



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KUANTUM NOKTALARI TEMELLİ
BELLEK AYGITLAR**

**Namık AKÇAY
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Programı**

**Danışman
Prof.Dr. Nurten ÖNCAN**

Ekim, 2008

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KUANTUM NOKTALARI TEMELLİ
BELLEK AYGITLAR**

**Namık AKÇAY
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Programı**

**Danışman
Prof.Dr. Nurten ÖNCAN**

Ekim, 2008

İSTANBUL

Bu çalışma 30/10/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından FİZİK Anabilim Dalı KATİHAL FİZİĞİ programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Nurten ÖNCAN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi
(Danışman)

Prof.Dr. Şehsuvar ZEBİTAY
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi
(Tez İzleme Komitesi Üyesi)

Prof.Dr. Fatma TEPEHAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
(Tez İzleme Komitesi Üyesi)

Prof. Dr. Yani SKARLATOS
Boğaziçi Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Prof.Dr. Emel ÇINGİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin T2268 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Prof.Dr. Nurten ÖNCAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalardaki yardımları ve konukseverliği için Berlin Teknik Üniversitesi Katıhal Fiziği Enstitüsü Direktörü Prof. Dr. Dieter BİMBERG'e teşekkür ederim.

Tez çalışmaları boyunca 6 aylık çalışma raporlarını okuyan Tez İzleme Komitesi üyeleri, Prof. Dr. Şehsuvar ZEBİTAY'a ve Prof.Dr. Fatma TEPEHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yurt dışı görevlendirmem süresince yardımları ve göstermiş olduğu anlayış için Prof. Dr. Erhan GÜZEL'e teşekkür ederim.

Tez çalışmaları ve yazımı boyunca eşsiz yardımları ve anlayışları için Yard. Doç. Dr. Gökhan ALGÜN'e ve Yard. Doç. Dr. Mehtap YALÇINKAYA'ya teşekkür ederim.

Berlin Teknik Üniversitesinde yaptığım deneysel çalışmalar süresince yardımları ve yol gösterimi için Dr. Paul Martin GELLER'e ve Andreas MARENT'e teşekkür ederim.

Berlin Teknik Üniversitesi'ndeki çalışmalarım süresince sağladığı destek için TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür ederim.

Pınar'a, anneme ve abilerime bana gösterdikleri güven ve anlayış için teşekkür ederim.

Ekim, 2008

Namık AKÇAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	İ
İÇİNDEKİLER	İİ
ŞEKİL LİSTESİ.....	VI
TABLO LİSTESİ	XIV
SEMBOL LİSTESİ	XV
ÖZET	XVII
SUMMARY	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. DÜŞÜK BOYUTLU YARIİLETKEN YAPILAR	6
2.2. KUANTUM NOKTALARI.....	12
2.2.1 Kuantum Noktası Oluşturma Yöntemleri	14
2.2.2. Kuantum Noktalarının Elektriksel Özellikleri.....	17
2.2.3. Kuantum Noktaları Durumlarının Modellenmesi	19
2.2.4. Kuantum Noktalarından Yüklü Taşıyıcı Yayınlanması.....	20
2.2.4.1. Termal Uyarılma.....	21
2.2.4.2. Tünelleme.....	22
2.2.4.3. Fononlar Yardımıyla Tünelleme.....	23
2.2.4.4. Optik Uyarılma.....	24
2.3. YARIİLETKEN BELLEK AYGITLAR	25
2.3.1. DRAM	26
2.3.2. Flaş Bellekler	28
2.3.3. Kuantum Noktaları Temelli Bellekler.....	32

2.3.4. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtların Çalışma Prensipleri	33
2.3.5. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt Yapısı	37
2.4. TAŞIYICI DİNAMİĞİ.....	38
2.4.1. Yarıiletkenlerde Derin Seviyeler	38
2.4.2. Taşıyıcı Yakalama ve Yayınlama Süreçleri.....	39
2.4.3. Termal Denge Durumu.....	42
2.4.4. Yayınlama Hızının Sıcaklığa Bağlılığı.....	44
2.4.5. Azınlık ve Çoğunluk Taşıyıcı Tuzakları	46
2.4.6. Süreklilik Denkleminin Genel Çözümü	46
2.5 YARIİLETKENLERDE KUANTUM NOKTALARI.....	49
2.5.1. Termal Uyarılma Hızı.....	49
2.5.2. Yayınlama Sürecine Elektrik Alanın Katkısı.....	52
2.5.3. Saf Tünelleme ve Fononlar Yardımıyla Tünelleme	55
2.5.4. Kuantum Noktası Civarında Bir Bariyer Bulunma Durumu	57
2.5.5. Yüklü Taşıyıcıların Yakalanması Süreci	58
2.6 EKLEMLER.....	60
2.6.1. Arınma Bölgesi	60
2.6.2. Schottky Kontakı.....	60
2.6.3. p-n Eklemi.....	62
2.6.4. Arınma Bölgesi Genişliği.....	64
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	67
3.1. KAPASİTANS SPEKTROSKOPİSİ	67
3.1.1. Arınma Bölgesi Kapasitesi	67
3.1.2. Kapasitenin Voltaja Bağlılığı	68
3.2. BÜYÜTME TEKNİKLERİ	70
3.2.1 Moleküler Işın Epitaksisi (MBE).....	70
3.2.2 Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırma ile Biriktirme (MOCVD).....	73
3.3. KUANTUM NOKTALARININ STRANSKİ-KRASTANOW METODU İLE OLUŞTURULMASI.....	75
3.3. ÖRNEKLERİN YAPISI	77
3.3.1. InAs/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek (TU5822).....	78

3.3.2. InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örnek (5-712).....	79
3.3.3. GaSb/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek (TU5823)	81
3.4. ÖRNEKLERİN ÖLÇÜMLERE HAZIRLANMASI	82
3.5 DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	82
3.5.1. Akım-Voltaj (I-V).....	82
3.5.2. Kapasite-Voltaj (C-V).....	83
3.5.3. Histerisiz Açıklığı (Hysteresis opening)	84
3.5.4. Yazma Zamanı	86
3.5.5. Silme Zamanı.....	87
3.6 DENEY DÜZENEKLERİ	88
3.6.1 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Düzenegi	88
3.6.2 Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Düzenegi	90
3.6.3 Yazma Zamanı Ölçüm Düzenegi.....	92
3.6.4 Silme Zamanı Ölçüm Düzenegi	95
4. BULGULAR.....	97
4.1. AKIM-VOLTAJ (I-V) ÖLÇÜM SONUÇLARI	97
4.1.1 InAs Kuantum Noktaları içeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları	97
4.1.2 GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları	100
4.1.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları.....	103
4.2. KAPASİTE-VOLTAJ (C-V) ÖLÇÜM SONUÇLARI	106
4.2.1 InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları.....	106
4.2.2 GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları.....	113
4.2.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer içeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) ölçüm sonuçları.....	117
4.3. HİSTERİSİZ AÇIKLIĞI ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	121

4.3.1 InAs Kuantum Noktaları içeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları	122
4.3.2 GaSb Kuantum Noktaları içeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları	124
4.3.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları	126
4.4. YAZMA ZAMANI ÖLÇÜM SONUÇLARI	127
4.4.1. InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları	128
4.4.2. GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları	129
4.4.3. InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları	130
4.5. SİLME ZAMANI ÖLÇÜM SONUÇLARI	132
4.5.1. InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Silme Zamanı Ölçüm Sonuçları	133
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	139
KAYNAKLAR.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	151

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2.1** : Külçe malzeme, görünür ışık için dalga kılavuzları, Kuantum Noktaları ve atomların boyutlarının şematik karşılaştırılması..... 7
- Şekil 2.2** : 3 boyutlu külçe malzeme, 2 boyutlu Kuantum Kuyusu, 1 boyutlu Kuantum Teli ve 0 boyutlu Kuantum Noktası şematik gösterimi (üstte). Durum yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi (altta) 8
- Şekil 2.3** : III-V grubu yarıiletkenlerinin oluşturduğu ikili (siyah noktalar) ve üçlü (gri çizgiler) bileşiklerin 0 K sıcaklığı için Enerji bant aralığı-örgü sabiti değişimi 9
- Şekil 2.4** : Bant aralıkları sırasıyla E_g^1 ve E_g^2 olan iki farklı yarıiletkenin aşamalı oluşturduğu heteroyapılarda olası bant uyumu tipleri: a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip II Kırık bant aralıklı. E_C iletkenlik bandını, E_V valans bandını ve ΔE_C , ΔE_V sırasıyla iletkenlik bandı süreksizliğini ve valans bandı süreksizliğini göstermektedir. 10
- Şekil 2.5** : GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ heteroyapısının arakesitinde Al konsantrasyonuna bağlı olarak ve iletkenlik bandı süreksizliği ΔE_C ve valans bandı süreksizliği ΔE_V değişimi. İletkenlik bandı süreksizliği X noktası için ΔE_C^X ve Γ noktası için ΔE_C^Γ olarak gösterilmiştir 11
- Şekil 2.6** : Kuantum Noktaları oluşturma yöntemleri (a) cam üzerinde mikrokristallenme (b) ince filmlerin şekillendirilmesi, (c) kendiliğinden organize olma. 14
- Şekil 2.7** : Farklı metotlarla Düşük Boyutlu yarıiletken üretimi: (a) Frank-van der Merwe, (b) Volmer-Weber, (c) Stranski-Krastanow metodu. 16
- Şekil 2.8** : (a) GaAs [001] yüzey üzerine büyütülmüş üç boyutlu, InAs Kuantum Noktasının STM (taramalı tünelleme mikroskopisi) ile elde edilmiş üç boyutlu görüntüsü. (b) GaAs tabaka üzerine Stranski-Krastanow yöntemi ile büyütülen InGaAs Kuantum Noktası ve üzerine büyütülen GaAs, AlGaAs tabakaların TEM (Transmisyon elektron mikroskopisi) ile elde edilmiş kesit görüntüsü. Resimde InGaAs wetting layer da görülebilmektedir. 17
- Şekil 2.9** : (a) Tip I bant yapısına sahip InAs/GaAs Kuantum Noktasında elektron ve boşluk durumları. (b) Tip II bant yapısına sahip GaSb/GaAs Kuantum Noktasında boşluk durumları. Bant yapısı Tip I şeklinde olan Kuantum Noktaları için iletkenlik bandında elektronlar ve valans bandında da boşluklar için sınırlama getirilir. Bant yapısı Tip II şeklinde olan GaSb/GaAs Kuantum Noktası sisteminde valans bandında boşluklar için sınırlama getirilirken iletkenlik bandında elektronlar için bir potansiyel engel meydana gelmektedir..... 18

Şekil 2.10	: (a) InAs/GaAs Kuantum Noktasının bant diyagramı. (b) 8-bant k.p modeli kullanılarak, farklı taban genişliklerine sahip piramit şeklindeki Kuantum Noktalarının sahip oldukları elektron ve boşluk enerji durumları gösterilmiştir. Elektron ve boşluk enerjilerinin Kuantum Noktası taban genişliğine bağlılığı görülmektedir. Çizgiler aynı dalga fonksiyonu simetrisine sahip olan durumları işaret eder. 000 durumu elektron ve boşluk için temel seviyeyi gösterir. (c) Kuantum Noktasında elektron ve boşluk durumları için uyumlu olasılık yoğunluğu eşyüzeyleri gösterilmiştir.	20
Şekil 2.11	: Uygulanan bir F elektrik alanı altında olası taşıyıcı yayınlanma süreçleri. Bir Kuantum Noktasının iletkenlik bandındaki temel seviyesinden, Termal uyarılma ve Fonon yardımıyla uyarılma (a), tünelleme ve optik uyarılma (b) yolları ile elektron yayınlanması gösterilmiştir.	22
Şekil 2.12	: (a) Bir Transistor ve bir Kapasiteye sahip DRAM. (b) DRAM içyapısını oluşturan katmanlar.	27
Şekil 2.13	: Günümüzde kullanılan bellekler (DRAM, Flaş bellek) ve tek ya da birkaç elektronlu bellek aygıtlar için hücre başına elektron sayısı – hücre büyüklüğü değişimi.	28
Şekil 2.14	: (a) Günümüzde kullanılan Akış geçitli (Floating-gate) Flaş belleklerin bant diyagramı. (b) Flaş bellek yapısının kesiti ve yapıyı oluşturan katmanlar.	29
Şekil 2.15	: Bir Flaş bellek için (a) yazma (programlama), (b) silme ve (c) okuma süreçlerinin şematik gösterimi. Her bir süreçte, Flaş bellek hücresi (üstte) ve hücrelerden oluşan dizin (altta) için uygulanan voltajlar ve bağlantı şekli gösterilmektedir. BL_1 ve WL_1 sırasıyla birinci hücrenin bit hattını ve sözcük hattını göstermektedir. Kaynak (source) kontağı S ile, Diren kontağı D ile, Geçiş (Gate) kontağı G ile gösterilmiştir. Uygulanan voltaj değerleri Flaş bellek yapısına göre farklı değerler alabilir.	31
Şekil 2.16	: Taşıyıcıları elektronlar olan Kuantum Noktaları Temelli Flaş bellek için yazma, depolama (saklama) ve silme süreçlerinde bant yapısının şematik gösterimi. a) İletkenlik ya da valans bandından direk olarak Kuantum Noktası seviyelerine taşıyıcıların yakalanması pikosaniye mertebelerinde oldukça hızlı yazma zamanına karşılık gelir. b) Kuantum Noktası p-n eklemesinin arınma bölgesinde olduğu sürece bilgiyi saklama durumu devam eder. c) Yüksek elektrik alanla geri besleme yapılarak taşıyıcıların QD seviyelerinden tünellemesi sağlanarak silme süreci oluşturulabilir.	34
Şekil 2.17	: Taşıyıcıları boşluklar olan bir Kuantum Noktaları Temelli Flaş Bellek için yazma, depolama (saklama) ve silme süreçlerinde bant yapısının şematik gösterimi. a) Yazma “1” b) bilgi saklama c) silme “0”	35
Şekil 2.18	: Kuantum Noktaları Temelli Flaş Bellek için mümkün olabilecek bilgi okuma sürecinin şematik gösterimi. Kuantum Noktasına oldukça yakın 2 boyutlu elektron gazı (2DEG) yer almaktadır. 2 boyutlu elektron gazının direnci Kuantum Noktasının sahip olduğu elektron sayısına bağlıdır.	36

Şekil 2.19	: (a) Kuantum Noktaları Temelli Flaş Bellek için mümkün olabilecek malzemeler ve tabaka yapısının şematik gösterimi. (b) Bilginin yazılması silinmesi ve okunabilmesi için gerekli elektriksel bağlantı şekli.	37
Şekil 2.20	: n tipi bir yarıiletken, E_t enerjisine sahip N_t tuzak seviyelerinden elektron ve boşluk için yakalama ve yayınlama süreçleri. E_F yarıiletkenin Fermi enerjisini, E_C iletkenlik bandı kenarı enerjisini, n_C iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğunu, E_V valans bandı kenarı enerjisini, p_V valans bandındaki boşluk yoğunluğunu, n_t tuzak seviyelerinde tuzaklanmış elektronların sayısını göstermektedir.	39
Şekil 2.21	: n tipi bir yarıiletken, elektron tuzağının elektronlarla ortalama tuzaklanma nüfusu $n_n(t) / N_t$ 'nin zamana bağlı değişimi. Başlangıçta tuzağın dolu olduğu durum gri çizgi ile, başlangıçta tuzağın boş olduğu durum siyah çizgiyle gösterilmiştir. Zaman sabiti τ_n her iki durumda da aynıdır.	48
Şekil 2.22	: Kuantum Noktası için yakalama süreci. (a) E_{BE} bağlanma enerjili boş Kuantum Noktası seviyesinin elektronlar tarafından işgal edilmesi. b) Kuantum Noktası içerisinde bulunan elektronlar nedeniyle oluşan iç Coulomb yüklenmesi sonucu E_{CC}^2 ve Kuantum Noktası içindeki ve dışındaki elektronların etkileşmesiyle oluşan Coulomb yüklenmesi sonucu E_{CC}^1 kadar bant eğilmesi gerçekleşir.	51
Şekil 2.23	: Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasının bant yapısının şematik gösterimi. Kuantum Noktası içindeki enerji seviyeleri, Coulomb yüklenmesi ve bant eğilmesi nedeniyle $E_{CC} + E_{CAP}$ kadar yukarı doğru kayar. Ayrıca Coulomb yüklenmesi ve p-n eklemının arınma bölgesi nedeniyle oluşan iç elektrik alan, yakalama süreci c_n için bir potansiyel bariyer oluşturur. Poole-Frenkel etkisi de bu bariyerde δE kadar bir azalma sağlar.	53
Şekil 2.24	: (a) Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasından Tünelleme ve (b) Fononlar yardımıyla tünelleme yoluyla elektron yayınlaması. Fononlar yardımıyla tünellemeye E_{QD} enerji seviyesinde bulunan elektron öncelikle termal aktivasyon ile E_A kadar bir enerji kazanır ve ardından üçgen bariyerden tünelleme yapabilir.	56
Şekil 2.25	: Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktası ve Kuantum Noktasının hemen altında bulunan bariyer tabakasının şematik gösterimi. Elektronlar için yayınlama bariyeri $E_{BAR} - \delta E$ farkına eşit iken, yakalama bariyeri $E_{CC} + E_{CAP} + E_{BAR} + (-\delta E)$ toplamına eşittir.	57
Şekil 2.26	: Bir metal-yarıiletken Schottky kontağı için bant diyagramı. Arınma bölgesi genişliği w yarıiletkenin katkı konsantrasyonuna bağlıdır. Bant eğilmesi nedeniyle bir V_b iç potansiyeli oluşmaktadır.	61
Şekil 2.27	: Bir p-n eklemının enerji bant diyagramı.	63
Şekil 3.1	: Moleküler Işın Epitaksisi (MBE) sistemi.	71

Şekil 3.2	: MBE tekniği ile büyütme yapılırken meydana gelen süreçlerin şematik gösterimi.	72
Şekil 3.3	: Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırmayla Biriktirme (MOCVD) sistemi.	74
Şekil 3.4	: MOCVD tekniği ile büyütme yapılırken meydana gelen süreçlerin şematik gösterimi.	75
Şekil 3.5	: Örgü sabitleri farklı malzemelerin epitaksiyel büyütmesinde gerilmeler sonucunda oluşabilecek yapılar. (a) Büyütme öncesi katı haldeki maddeler. (b)Stranski-Krastanow metodu ile büyütme; koyu gri, taşıyıcıyı açık gri, wetting tabakasını ve beyaz renk Kuantum Noktalarını gösterir. (c) Tabaka-tabaka büyütme, ok ile çevrelenen bölgede dislokasyonlar oluşmaktadır.	76
Şekil 3.6	: MOCVD tekniği ile büyütülen InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren TU5822 örneğinin (a) tabakalı yapısı (b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaklar.	78
Şekil 3.7	: MBE tekniği ile büyütülen InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve Kuantum Noktaları civarında $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ bariyer tabakası içeren 5-712 örneğinin (a) tabakalı yapısı (b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaklar.	80
Şekil 3.8	: MOCVD tekniği ile büyütülen GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren TU5823 örneğinin a) tabakalı yapısı b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaklar.	81
Şekil 3.9	: Kimyasal aşındırma ile örnek üzerinde oluşturulan 400µm ve 800µm çaplarında dairesel diyotlar elektriksel ölçümler için alınan kontakların şematik gösterimi. Üst kontak her bir diyot için farklı olup alt kontak ortak kullanılmaktadır.	82
Şekil 3.10	: Bir n^+ - p eklemünde Kuantum Noktası bulunması durumunda (kalın çizgi) ve bulunmaması durumunda (ince çizgi) C-V değişimi. Kuantum Noktaları bulunması durumunda C-V karakteristiğindeki oluşan plato (kesikli çizgi ile gösterilen alanda) Kuantum Noktalarında taşıyıcıların birikmesi sonucu oluşmaktadır.	84
Şekil 3.11	: Arınma bölgesi civarında Kuantum Noktaları içeren bir n^+ - p eklemünde geri besleme voltajının süpürme yönü değiştirilerek elde edilen C-V değişimi ve oluşan Histerisiz açıklığı. 1 durumunda Kuantum Noktaları tamamen boş, 3 durumunda tamamen doludur. 2 ve 4 durumları Histerisiz açıklığının maksimum olduğu noktaları, V_{HM} ise Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değerini gösterir.	85
Şekil 3.12	: Yazma zamanı ölçüm metodunun şematik gösterimi. Burada V_{EP} ve V_{HM} sırasıyla silme için gerekli geri besleme voltajının maksimum olduğu ve Histerisiz açıklığının maksimum olduğu değerleri göstermektedir. Yazma darbesi 0V olarak gösterilmiştir.	87
Şekil 3.13	: Silme zamanı ölçüm metodu. Burada V_{EP} ve V_{HM} sırasıyla silme için gerekli yüksek geri besleme voltajının maksimum olduğu ve Histerisiz açıklığının maksimum olduğu değerleri göstermektedir. Yazma işlemi için 0V uygulanmaktadır.	88
Şekil 3.14	: Akım-Voltaj deney düzeneği.	89

Şekil 3.15	: HP4284A LCR Metre kullanılarak oluşturulan Kapasite-Voltaj deney düzeneği.....	91
Şekil 3.16	: Boonton 7200 Kapasite Köprüsü kullanılarak oluşturulan Kapasite-Voltaj deney düzeneği. Bu düzenek sabit 1MHz frekansta kapasite ölçümleri alınabilmektedir. HP8116A darbe jeneratörü kullanılarak elde edilen DC geri besleme voltajı, örneklere Boonton 7200 Kapasite Köprüsüyle uygulanmıştır.....	92
Şekil 3.17	: Yazma zamanı deney düzeneği.....	94
Şekil 3.18	: Silme zamanı deney düzeneği.....	96
Şekil 4.1	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğe aşırı akım uygulamamak için güç kaynağının akım çıkışı maksimum $5\mu\text{A}$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır.....	98
Şekil 4.2	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 25K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğe aşırı akım uygulamamak için güç kaynağının akım çıkışı maksimum $5\mu\text{A}$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -17.5V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı 1.4V 'tur.	100
Şekil 4.3	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -18V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı 0.95V 'tur.....	101
Şekil 4.4	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -21V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise 1.38V 'tur.	102
Şekil 4.5	: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek (5-712) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -19V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise 0.9V 'tur.....	104
Şekil 4.6	: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek (5-712) için 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -20V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise 1.0V 'tur.....	105
Şekil 4.7	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan değişim Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır.....	107
Şekil 4.8	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 25K sıcaklığında 220Hz(kırmızı çizgi), 1kHz (siyah çizgi) ve 1MHz (mavi çizgi) frekanslarında alınan ölçümler sonucunda elde edilen	

	Kapasite-Voltaj değişimi gösterilmektedir. Kesikli izgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır	108
şekil 4.9	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren rnek (TU5822) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli izgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır.....	109
şekil 4.10	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren rnek (TU5822) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi ve bu değişimin ikinci türevi. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.	110
şekil 4.11	: TU5822 rneğinin 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj lüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu (N_a)- arınma bölgesi genişliği (w) değişimi. Diyot apı 400 μ m'dir. Diyotun p tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık 3.10^{16} cm ⁻³ olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 740nm'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan (hole) kaynaklanmaktadır.	112
şekil 4.12	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj lm sonucunda elde edilen değişim. Kesikli izgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR-Metre kullanılmıştır.....	113
şekil 4.13	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj lm sonucunda elde edilen değişim. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.	114
şekil 4.14	: TU5823 örneğinin oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj lüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu N_a ile arınma bölgesi genişliği w değişimi. Diyot apı 400 μ m'dir. Diyotun p tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık 3.10^{16} cm ⁻³ olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 720nm'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.	115
şekil 4.15	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli izgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR-Metre kullanılmıştır.....	116
şekil 4.16	: TU5823 rneğinin 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj lüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu N_a ile arınma bölgesi genişliği w değişimi. Diyot apı 400 μ m'dir. 820nm'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.	117

Şekil 4.17	: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi.	118
Şekil 4.18	: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için 230K sıcaklığında alınan ölçümleri sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi.	119
Şekil 4.19	: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.	120
Şekil 4.20	: 5-712 örneğinin 230K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu (N_a) ile arınma bölgesi genişliği (w) değişimi. Diyot çapı $800\mu\text{m}$ 'dir. Diyotun n tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık 3.10^{15}cm^{-3} olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 1600nm 'de görülen pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.	121
Şekil 4.21	: TU5822 örneğinin 25K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Geri besleme voltajının 0V 'tan başlatılarak -14V kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -14V 'tan başlanarak 0V 'ta kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Platonun olduğu bölge grafik içinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı -8.2V 'ta gözlemlenmiştir.	122
Şekil 4.22	: TU5822 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlılığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -8.2V 'ta 150fF olarak bulunmuştur. Ölçümler 25K sıcaklığında 1MHz ölçüm frekansında alınmıştır.	123
Şekil 4.23	: TU5823 örneğinin 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimleri. Geri besleme voltajının 0V 'tan başlatılarak -19V kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -19V 'tan başlanarak 0V 'ta kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı 7.2V 'ta gözlemlenmiştir.	124
Şekil 4.24	: TU5823 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlılığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -7.2V 'ta 0.8pF olarak bulunmuştur. Ölçümler 100K sıcaklığında 1MHz frekans değerinde alınmıştır.	125
Şekil 4.25	: 5-712 örneğinin 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimleri. Geri besleme voltajının 0V 'tan başlatılarak -7V 'a kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -7V 'tan başlanarak 0V 'ta kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı 2.9V 'ta gözlemlenmiştir.	126
Şekil 4.26	: 5-712 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlılığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -2.9V 'ta 115pF olarak bulunmuştur. Ölçümler 230K sıcaklığında 1MHz frekans değerinde alınmıştır.	127

- Şekil 4.27** : InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 25K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 6ns olarak bulunmuştur. 128
- Şekil 4.28** : GaSb Kuantum Noktaları içeren örneğin 100 K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50 yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 14ns olarak bulunmuştur. 130
- Şekil 4.29** : InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer tabaka içeren örneğin 230K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz Açıklığının %50'si yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 32ns olarak bulunmuştur..... 131
- Şekil4.30** : InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında Silme-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Uygulanan silme voltaj darbesi $V_{EP} = -16V$ olup, örnek içerisinde oluşan elektrik alanın büyüklüğü $F=166KV/cm$ 'dir. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si silme için yeterli kabul edilmiş ve Silme zamanı 45ns olarak bulunmuştur. 133
- Şekil 4.31** : InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında farklı silme voltaj darbesi V_{EP} (elektrik alan F) uygulanarak elde edilen Silme-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si silme için yeterli kabul edilmiştir..... 135
- Şekil 4.32** : InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında silme zamanının uygulanan dış elektrik alana bağlılığı. Kalın kırmızı çizgi doğrusal fiti göstermektedir. 136
- Şekil 4.33** : InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında tünelleme hızının uygulanan dış elektrik alanın tersine bağlılığı. Kalın kırmızı çizgi doğrusal fiti göstermektedir..... 137

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: DRAM ve Flaş Belleklerin bazı önemli özelliklerinin karşılaştırılması.	30
Tablo 4.1	: Katkı konsantrasyonları kullanılarak diyotun bariyer potansiyeli hesaplanırken kullanılan fiziksel büyüklüklerin 300K'deki değerleri.	99
Tablo 4.2	: 25K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklüklerin değerleri.	99
Tablo 4.3	: 100K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklüklerin değerleri.	103
Tablo 4.4	: 5-712 örneğinin, 300K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler.	105
Tablo 4.5	: 5-712 örneğinin, 230K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler.	106
Tablo 4.6	: TU5822 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.	111
Tablo 4.7	: TU5823 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.	115
Tablo 4.8	: 5-712 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.	120
Tablo 4.9	: Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtlar için bu çalışmada elde edilen yazma zamanları ve literatürde yer alan bilgi saklama süreleri.	132
Tablo 4.10	: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K'de uygulanan elektrik Alana bağlı olarak silme zamanı değişimi.	135
Tablo 4.11	: Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtlar için bu çalışmada elde edilen yazma ve silme zamanları ile literatürde yer alan bilgi saklama süreleri.	138

SEMBOL LİSTESİ

E_C	: İletkenlik bandı
E_V	: Valans bandı
E_g	: Yasak bant aralığı
E_F	: Fermi seviyesi
ΔE_C	: İletkenlik bandı süreksizliğini
ΔE_V	: Valans bandı süreksizliğini
L_z	: Kuantum kuyusu genişliği
k_B	: Boltzman sabiti
h	: Planck sabiti
N_d	: Donör konsantrasyonu
N_a	: Akseptör konsantrasyonu
m^*	: Taşıyıcı etkin kütlesi
T	: Sıcaklık
K	: Kelvin
F	: Elektrik Alan
$F_{iç}$: Diyotun iç elektrik alanı
E_1^{QD}	: Kuantum Noktasının sahip olduğu birinci enerji seviyesi
γ_n	: Sıcaklıktan bağımsız bir sabit
E_A	: Termal uyarılma enerjisi
$R_n^e(t)$: Elektron için net uyarılma hızı
$R_p^e(t)$: Boşluk için net uyarılma hızı
$e_n(T)$: Elektron için termal yayınlanma hızı
$e_p(T)$: Boşluk için termal yayınlanma hızı
σ^n	: Elektron için yakalama tesir kesiti
σ^p	: Boşluk için yakalama tesir kesiti
E_B	: potansiyel kuyusunun yüksekliği
x	: Alüminyum konsantrasyonu
W_m	: Her bir m fonon modu için istatistiksel ağırlık
e	: Elektron yükü
D_{min}	: Kuantum Noktası için kritik çap
n_{QD}	: Kuantum Noktasındaki elektron yoğunluğu
E_{CC}	: Coulomb yüklenme enerjisi

D_{QD}	: Kuantum Noktalarının seviye yoğunluğu
E_i	: Kuantum Noktasının sahip olduğu enerji seviyeleri
N_t	: Toplam tuzak yoğunluğu
f	: Bir t anında tuzakların işgal edilme oranı
c_n	: Elektron yakalama hızı
c_p	: Boşluk yakalama hızı
e_n	: Elektron yayınlama hızı
e_p	: Boşluk yayınlama hızı
E_{CAP}	: Yakalama bariyeri
E_{CC}	: Coulomb yüklenmesi
e^T	: Tünelleme hızı
E_{QD}	: Kuantum Noktasının sahip olduğu bir enerji seviyesi
χ_s	: Elektron afinitesi
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
V_m	: Metal için kontak potansiyeli
V_s	: Yarıiletkenin kontak potansiyeli
V_b	: Diyotun iç potansiyeli
$\rho(x)$: Sabit yük yoğunluğu
L_D	: Debye uzunluğu
f_{mm}	: Örgü uyumsuzluğu
m_e^*	: Elektron etkin kütlesi
m_p^*	: Boşluk etkin kütlesi
C_{QD}	: Kuantum Noktasının kapasitesi
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ	: Ortamın dielektrik sabiti

ÖZET

KUANTUM NOKTALARI TEMELLİ BELLEK AYGITLAR

Bu çalışmada, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt olabilecek InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnekler incelendi. Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtlar için oldukça önemli olan yazma ve silme zamanları belirlendi.

İncelenen örneklerden ikisi, Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırmayla Biriktirme (MOCVD) tekniği ile diğeri de Moleküler Işın Epitaksisi (MBE) tekniği ile büyütülmüştür. MOCVD tekniği ile büyütülen örnekten ilki, InAs/GaAs Kuantum Noktaları, ikincisi ise, GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. Diğer taraftan, MBE tekniği ile büyütülmüş örnek ise, InAs/GaAs Kuantum Noktaları civarında AlGaAs bariyer içermektedir. Her üç örnekte de, Kuantum Noktaları, n^+ -p eklemesinin arınma bölgesi civarında bulunmaktadır.

Örneklerin her biri için 25K-300K aralığında Akım-Voltaj (I-V) ve Kapasite-Voltaj ölçümleri yapıldı.

Bu çalışmada, Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt olabilecek örneklerin yazma ve silme zamanlarının belirlenebilmesi için iki yeni ölçüm yöntemi geliştirildi. Kapasite-Voltaj değişimine dayanan bu yöntemler kullanılarak örneklerde ilk kez yazma ve silme zamanı deneysel olarak belirlendi.

Yazma zamanı ölçüm yöntemi kullanılarak InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için yazma zamanı, 25K'de 6ns olarak bulundu. InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için yazma zamanı, 230K'de 32ns ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için 100K'de yazma zamanı 14ns olarak bulundu.

Ayrıca, InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için 20K'de silme zamanı 43ns olarak bulundu.

Bu çalışmanın bir bölümü TÜBİTAK-BİDEB desteği ile Berlin Teknik Üniversitesi Katihal Fiziği Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir.

SUMMARY

MEMORY DEVICES BASED ON QUANTUM DOTS

In this work, the samples which can be used for Quantum Dots based Flash Memory Devices including InAs/GaAs and GaSb/GaAs Quantum Dots has been investigated. Write and erase time for Quantum Dots based Flash Memory Devices has been determined.

The two of the samples have been grown by the Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) and the other sample has been grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE). The first sample that has been grown by MOCVD includes InAs/GaAs Quantum Dots and the second one includes GaSb/GaAs Quantum Dots. On the other hand, the sample that has been grown by MBE includes AlGaAs barrier around InAs/GaAs Quantum Dots. Quantum dots are embedded in depletion region of n^+ -p junction for on all of the three samples.

For each one of the three samples, the Current-Voltage (I-V) and the Capacity – Voltage measurements have been done between 25K-300K .

In this work, two new estimation methods have been developed for the determination of write and erase time of the samples that can be used for Quantum Dots based Flash Memory Devices. Write and erase time of the samples have been experimentally determined for the first time in the literature by the use of these new methods based on Capacity-Voltage change.

For the sample that includes InAs/GaAs Quantum Dots, the writing time has been determined as 6ns at 25K by the method of write time measurement. For the sample that includes InAs/GaAs Quantum Dots and AlGaAs barrier, the write time has been determined as 32ns at 230K and finally for the sample that includes GaSb/GaAs Quantum Dots the write time has been determined as 14ns at 100K.

Furthermore, for the sample that includes InAs/GaAs Quantum Dots the deleting time has been determined as 43ns at 20K.

A significant part of this work which is supported by TUBITAK-BİDEB has been performed at the Technical University of Berlin, Institute of Solid State Physics.

1.GİRİŞ

Modern bilgi toplumunun temel problemlerinden birisi de günlük yaşantımızda hemen her alanda üretilen bilginin taşınması ve saklanmasıdır. Özellikle son yıllarda, giderek artan bir hızla üretilen bilginin işlenmesinde ve saklanmasında hız ve kapasite artışı sağlayacak yeni nesil aygıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, Düşük Boyutlu yarıiletken ve nanoteknolojik aygıtlar üzerindeki araştırmalar yoğunluk kazanmıştır.

Yarıiletken endüstrisinin mikroelektronik aygıtlarda performans artışı sağlamak için temel stratejisi, boyutları küçülterek daha küçük alanlara daha çok devre elemanı yerleştirmek olmuştur. Böylece, bilgi teknolojilerinde işlem hızı ve bellek kapasitesi artmış aynı zamanda üretim maliyetlerinde ve güç tüketiminde azalma sağlanmıştır. Günümüzde de süregelen bu strateji başarısını yarıiletken fiziğinde elde edilen ilerlemelere borçludur.

1965 yılında, mikroelektronik devrelerde yer alan bileşenlerin birim hücre boyutlarının (feature size) üssel olarak azalacağı konusunda bir öngörüde bulunan Gordon Moore “Bir yonga üzerinde yer alan birim alandaki bileşen sayısı her 12 ayda iki kat artar” demiştir[1]. Moore Yasası (Moore’s Law) olarak bilinen bu öngörü, başlangıçta ilk 10 yıllık dönem için düşünülmüş olsa da fiziksel sınırlamalar da göz önüne alındığında, bazı değişikliklerle günümüzde hala geçerlidir[2,3,4].

Endüstride devam eden küçültme eğilimi doğrultusunda, birim hücre boyutları 2005 yılında 90nm ve 2008 yılı başında 45nm boyutlarına inmiştir. “Yarıiletkenler için Uluslararası Yol Haritası” (International Roadmap for Semiconductors) [5] öngörüsüne göre birim hücre boyutlarının 2014 yılında 14nm’ye inmesi beklenmektedir.

Günümüze kadar, birim hücre boyutlarının giderek küçülmesi, yapılan yoğun araştırmalarla ve yeni teknikler geliştirilerek sağlanabilmişse de bugün gelinen noktada

yariletken endüstrisi, kuantum mekaniğinin geçerli olduğu boyutlara yaklaştığından bazı fiziksel sınırlamalarla karşı karşıyadır. Örneğin, transistör ve kapasite içeren bir DRAM (Dynamic Random Access Memory) için boyutların küçülmesi, transistörde ve kapasitede yer alan çok ince bariyerlerde tünelleme olasılığını arttıracığından, sızıntı akımlara ve gürültüye neden olabilir.

Mikroelektronik devrelerin küçültülmesinde optik litografi tekniklerinin göstermiş olduğu gelişim hayati öneme sahiptir. Daha küçük devreler yapabilmek için litografi tekniğinin sürekli geliştirilmesi zorunludur. Bu zorunluluk, üretim aşamasında yüksek maliyetlere neden olur. Aslında bu durum, Gordon Moore tarafından “yonga üretmek için kurulacak fabrikanın maliyeti her yeni yonga neslinde iki kat artar” şeklinde tanımlanmış olup “Moore’un İkinci Yasası” (Moore’s Second Law) olarak adlandırılır.

Mikroelektronik devre üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntem, “yukarıdan-aşağıya yaklaşıklık” (top-down approach)’dır. Bu yaklaşıklıkta, levha (wafer) halinde malzemenin üzerinde mikrometre veya nanometre boyutlarında istenilen şekli oluşturmak için litografi ve aşındırma (etching) yöntemleri kullanılmaktadır. Birim hücre boyutlarının küçülmesi, şekillendirmede (patterning) kullanılan ışığın dalga boyunun azaltılmasıyla mümkündür. Bunun için UV (morötesi) litografi ya da X-ışını litografisi kullanılmaktadır. Daha küçük boyutlarda şekillendirme ve üretim yapılabilmesi için oldukça iyi çözünürlükte çalışan yeni sistemlere ihtiyaç duyulmakta ve bu da maliyet artışlarına sebep olmaktadır.

Nanometre boyutlarında yapıların üretimi, uygulanan fiziksel etkiler sonucunda atomların ya da moleküllerin belli bir düzenle sıralanmasıyla veya kimyasal reaksiyonlarla bir araya gelmesiyle gerçekleştirilebilir. Litografiye ihtiyaç duymayan bu yöntem “aşağıdan-yukarıya yaklaşımı” (bottom-up approach) olarak adlandırılmaktadır. Aşağıdan-yukarıya yaklaşımı atom ya da moleküllerin daha büyük ve düzenli yapılar oluşturmak için bir araya gelmesi, diğer bir deyişle, kendiliğinden organize olma süreci (self-organized processes) temeline dayanmaktadır. Kendiliğinden organize olmuş ada yapısının oluşabileceği ilk olarak 1938 yılında Stranski ve Krastanow [6] tarafından ileri sürülmüştür. Bu yöntemde büyütme işlemi yüzeyi pürüzsüz bir malzeme üzerine farklı örgü sabitine sahip başka bir malzemenin ince tabakalar şeklinde yerleştirilmesiyle

gerçekleştirilir. Örgü sabitleri arasındaki fark nedeniyle örgü gerilmelerine sahip ince bir tabaka (wetting layer) oluşmaktadır. Belirli fiziksel koşullar altında (sıcaklık, basınç vb) atom ya da moleküller, gerilme enerjisini azaltmak için bu ince tabaka üzerinde küçük adacık yapılar oluştururlar. Oldukça düzgün şekillere sahip ve boyutları nanometre mertebesinde olan bu küçük yapılarda yük taşıyıcılarının (elektronlar ve boşluklar) hareketi her üç boyutta da sınırlandırılır. Bir yarıiletken malzeme içerisinde yer alan taşıyıcıların hareketi her üç boyutta da sınırlandırılmış ise böyle bir yapıya “sıfır boyutlu” yapı denir. Kendiliğinden organize olmuş Kuantum Noktaları sıfır boyutlu yapılar olup aynı zamanda “yapay atom” (artificial atoms) olarak da adlandırılmaktadır. Bu tür yapıların modern epitaksiyel yöntemlerle büyütülmesi ilk olarak 1990 yılında gerçekleştirilebilmiştir[7-9].

Kuantum Noktalarının taşıyıcı hareketini sınırlamada sahip olduğu üstün özellikler kullanılarak birçok aygıt yapılabileceği düşünülmektedir. Günümüzde yapılan araştırmalar, Kuantum Noktaları kullanılarak lazer ve optik yükseltici üretilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır[10-15]. Ancak Kuantum Noktalarının sahip olduğu özellikler gelecekte sadece optoelektronik değil aynı zamanda elektronik aygıtların yapılabilmesine de olanak sağlamaktadır. Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktaları kullanılarak yapılabilecek nanoelektronik aygıtlara iyi bir örnek bellek aygıtlardır.

Günümüzde birçok farklı malzeme ve fiziksel özellik kullanarak bellek aygıt üretebilmek için araştırmalara devam edilmektedir. Bunlar arasında teknolojik öneme sahip, yaygın olarak kullanılan iki bellek çeşidi sırasıyla DRAM ve Flaş belleklerdir. Her iki bellek çeşidi de hız, bilgi saklama süresi (storage time) ve üretim maliyeti konularında birbirlerine üstünlük sağlamaktadırlar. Bir DRAM’de bilgi, bir transistör ve kapasite çifti kullanılarak saklanmaktadır. DRAM’ler, erişim zamanları (access time) 20ns’den küçük, hızlı çalışan bellek aygıtlardır. Ayrıca dayanıklılığı da 10^{15} yazma/silme döngüsü mertebesinde olup oldukça yüksektir. Buna ilaveten her bir DRAM birim hücresi, 10^5 mertebesinde elektron içerdiğinden güç sarfiyatı fazladır. DRAM’lerin en büyük dezavantajı geçici (volatile) hafızaya sahip aygıtlar olmalarıdır. DRAM’lerde depolanan bilginin, yaklaşık her 10 milisaniyede bir tekrar yazılması gerekmektedir. Aksi halde depolanan bilgi yok olacaktır.

Bilgisayarlarda geçici hafıza birimi olan DRAM'lerin hız ve performanslarındaki artış, bilgisayar işlemcileriyle (CPU) kıyaslandığında oldukça yavaş ilerlemektedir. Bilgisayar işlemcilerinin çalışma frekansı 3 GHz'in üzerinde iken DRAM'lerin çalışma frekansı 1GHz'in altındadır. Bu da bilgisayarlarda işlemci - bellek hızları arasında bir fark yaratmakta olup işlemci hızı yüksek olsa da bilgisayarın performansını düşürmektedir.

Diğer taraftan Flaş bellekler kalıcı (non-volatile) hafızaya sahip aygıtlardır ve ortalama bilgi saklama süreleri 10 yıldan büyüktür. Flaş belleklerin bilgi saklamada kullandıkları elektron sayısı yaklaşık 10^3 olup DRAM'lere göre yaklaşık 100 kat daha azdır. DRAM'ler bilgi yazma/silme işlemleri olmadığında bile sürekli enerji harcarken Flaş bellekler bilgi saklamak için enerjiye ihtiyaç duymazlar. Bir Flaş bellek sadece bilgi yazma/silme ve okuma süreçlerinde enerjiye ihtiyaç duyar, bilgi yazıldıktan sonra güç kesilse de yazılmış olan bilgi yıllarca saklanabilir. Bundan dolayı Flaş bellekler taşınabilir cihazlar için en uygun bellek çeşididir. Bugün dijital fotoğraf makinesi, mp3 çalar, cep telefonu, USB (Universal Serial Bus) bellekler ve hatta bazı taşınabilir bilgisayarlarda da bilgi saklama birimi olarak Flaş bellekler kullanılmaktadır. Ancak Flaş belleklerin daha yaygın ve yüksek performanslı olarak kullanılabilmesi için dayanıklılıklarının artırılması ve 10-20 milisaniye civarında olan erişim hızlarının düşürülmesi gerekmektedir.

DRAM'lerin ve Flaş belleklerin sahip oldukları üstün özellikleri barındıran yeni bir bellek yapısının oluşturulması yarıiletken bellek endüstrisi için hayati öneme sahiptir. Böyle bir "evrensel" belleğin:

- Kalıcı hafızaya sahip olması (bilgi saklama zamanı 10 yıldan büyük)
- Oldukça hızlı olması (yazma/silme erişim zamanı nanosaniyeler mertebesinde)
- Dayanıklılığının oldukça yüksek olması (en az 10^{15} kez yazılıp-silinebilmesi)

gerekmektedir.

Kuantum Noktaları, özellikleri bakımından evrensel bellek yapabilmek için idealdir. Milyarlarca Kuantum Noktası tek bir teknolojik adımla büyütülebilir. Kuantum

Noktaları kullanılarak yapılabilecek bellekler, malzemenin özelliklerine bağı olarak hapsedtikleri bir ya da birkaç taşıyıcıyı oda sıcaklığında yıllarca saklayabilirler. Kuantum Noktaları için elektronların rölaksasyon süresi pikosaniyeler mertebesinde olacağından böyle bir bellek için yazma hızı da oldukça yüksek olacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt yapısında olan, InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneklerde, bilgi yazma ve silme zamanlarının Kapasite-Voltaj ölçümlerine dayanan elektriksel ölçümlerle belirlenebilmesidir. Elde edilen sonuçlar, kullanmakta olduğumuz belleklerin erişim zamanları ve dayanıklılığı ile kıyaslanmış ve Kuantum Noktaları Temelli Belleklerin kullanılabilirlikleri araştırılmıştır.

Genel Kısımlar bölümünde, Düşük Boyutlu yarıiletkenler hakkında bilgiler verilmiş ve Kuantum Noktaları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yine bu bölümde, yarıiletken malzemelerden yapılmış bellek aygıtlar anlatılmış ve Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtların çalışma prensibi hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca, taşıyıcı dinamiği ve yarıiletken eklemler kısaca anlatılmıştır. Malzeme ve Yöntem bölümünde, ölçümlerde kullanılan Kapasitans Spektroskopisi hakkında bilgiler verilmiştir. Büyütme teknikleri, incelenen örneklerin yapısı, yapılan deneyler ve deney düzenekleri hakkındaki bilgiler de yine bu bölümde yer almaktadır. Bulgular bölümünde yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar yorum yapılmadan verilmiştir. Tartışma ve Sonuç bölümünde de elde edilen sonuçların yorumları yapılmış ve ileride yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. DÜŞÜK BOYUTLU YARIİLETKEN YAPILAR

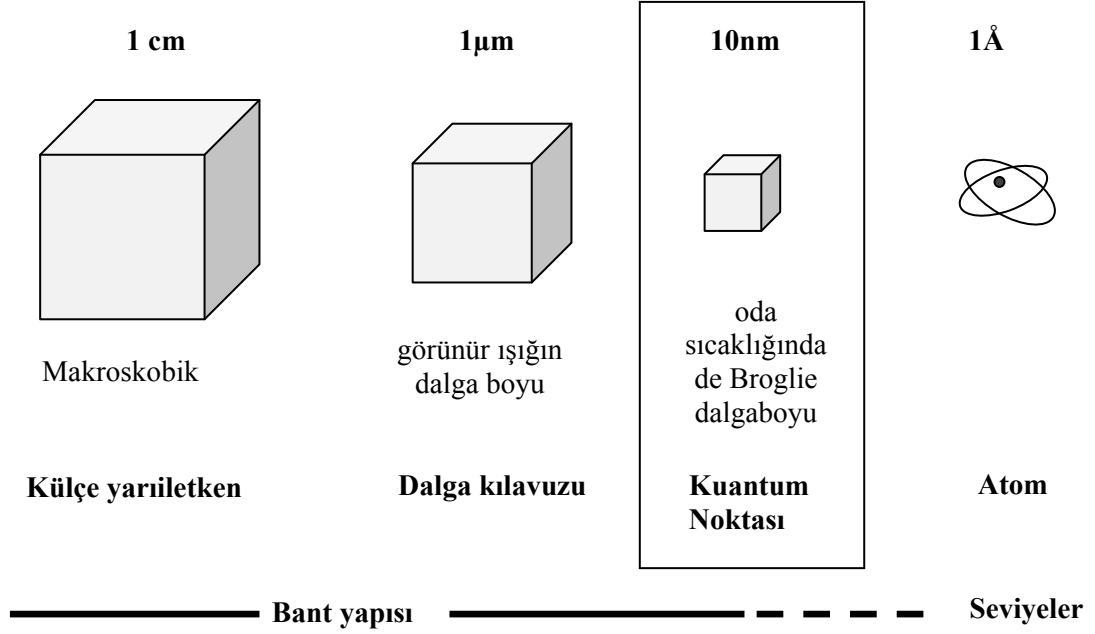
Bir yarıiletken malzemenin herhangi bir doğrultudaki tabaka kalınlığı, yarıiletkenin sahip olduğu taşıyıcıların de Broglie dalgaboyu ile kıyaslanabilir boyutlarda ise kuantum boyut etkisi gözlenmeğe başlar. Kuantum boyut etkisinin ortaya çıktığı doğrultularda taşıyıcıların hareketi sınırlandırılmış ve enerji seviyeleri kuantize olmuştur.

Taşıyıcı hareketlerinin belli doğrultularda sınırlanmış olduğu sistemlere Düşük Boyutlu Sistemler denir. Sınırlama tek doğrultuda ise iki boyutlu (kuantum kuyusu), iki doğrultuda ise tek boyutlu (kuantum teli), üç doğrultuda ise sıfır boyutlu (kuantum noktası) sistemler olarak adlandırılır. λ de Broglie dalgaboyu, T sıcaklığına bağlı olarak;

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\sqrt{3m^*k_B T}} = \frac{1.22nm}{\sqrt{(E_{kin} / [eV])}} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. Burada m^* elektronların ya da boşlukların etkin kütlesi ve k_B Boltzmann sabitidir. Elektronun etkin kütlesi, serbest elektron kütlesinden çok küçük olabileceğinden, kuantum boyut etkisi, malzemenin örgü sabitinden yüzlerce kat büyük kalınlıklarda da ortaya çıkabilir [7]. Örneğin oda sıcaklığında, GaAs içerisindeki elektronların ve boşlukların de Broglie dalga boyu sırasıyla 25nm ve 9 nm'dir.

Şekil 2.1'de külçe malzeme, görünür ışığın dalgaboyu, Kuantum Noktaları ve atom için yaklaşık olarak verilen büyüklükler şematik olarak karşılaştırılmıştır.

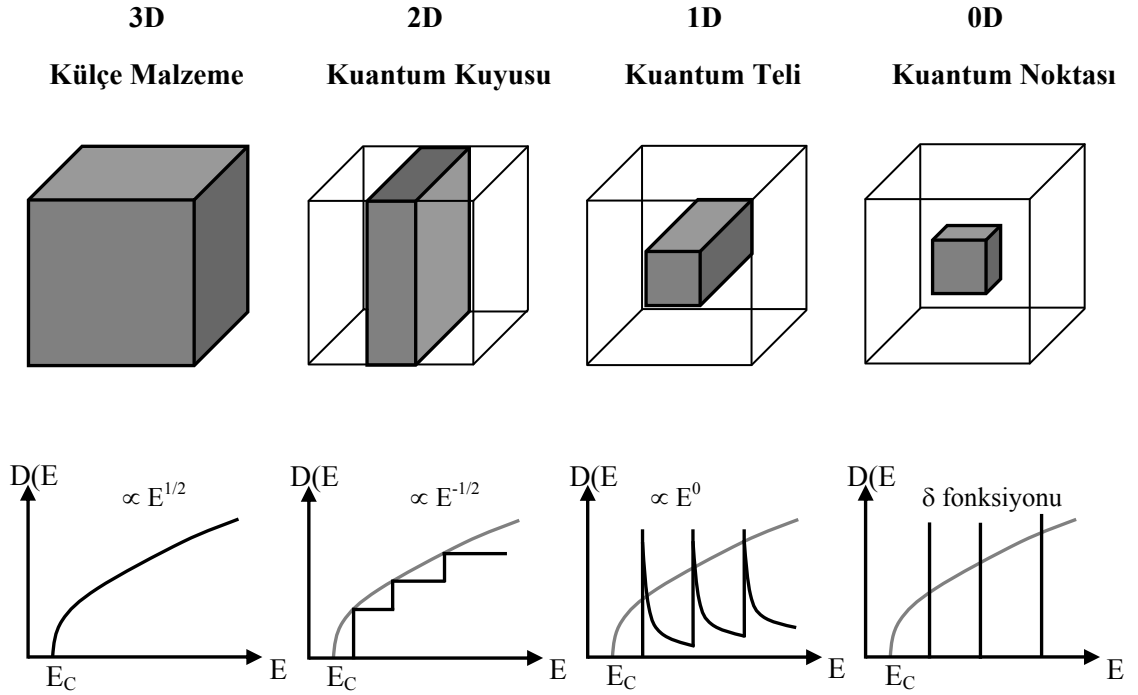


Şekil 2.1: Külçe malzeme, görünür ışık için dalga kılavuzları, Kuantum Noktaları ve atomların boyutlarının şematik karşılaştırılması [7].

Taşıyıcı hareketinin yalnızca bir doğrultuda sınırlandırılmış olduğu malzemelerde (Kuantum Kuyusu) enerji değerlerindeki kesiklilik sadece indirgenmiş boyut doğrultusunda olup diğer doğrultularda serbest taşıyıcı hareketi için bir sınırlama söz konusu değildir. 2 boyutlu durum yoğunluğuna sahip böyle bir sistem için sınırlamanın olmadığı doğrultularda durum yoğunluğu süreklidir. Boyut sınırlamasının olduğu doğrultuda ise durum yoğunluğu basamak fonksiyonu şeklindedir. Kuantum Kuyusu içerisinde durum yoğunluğu ilk altbant (subband) enerji değerlerinde sabit kalır ve sonraki altbantlarda artarak basamak şeklinde bir değişim gösterir.

Şekil 2.2’de 3 boyutlu külçe malzeme, 2 boyutlu Kuantum Kuyusu, 1 boyutlu Kuantum Teli ve 0 boyutlu Kuantum Noktası şematik olarak gösterilmiş ve durum yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi verilmiştir.

İnce tabaka halindeki malzemelerde kuantum boyut etkisinin oluşturulabileceği fikri ilk olarak 1950’li yılların sonunda ortaya çıkmıştır [16]. Bu alanda ilk önemli çalışma, 1962 yılında Keldysh tarafından bir kristal içerisinde üstüste binmiş periyodik potansiyel etkisinde elektron hareketini tanımlayan teorik çalışmadır [7].



Şekil 2.2: 3 boyutlu külçe malzeme, 2 boyutlu Kuantum Kuyusu, 1 boyutlu Kuantum Teli ve 0 boyutlu Kuantum Noktası şematik gösterimi (üstte). Durum yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi (altta)

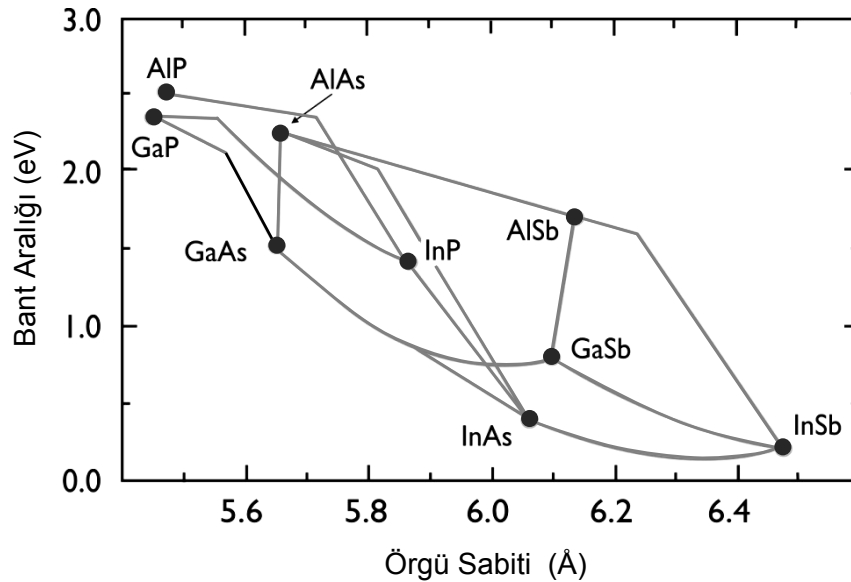
Keldysh tarafından yapılan çalışmada minibölgelerin (minizone) ve negatif diferansiyel rezistansın (NDR) varlığı öngörülmüştür. 1970 yılında Esaki ve Tsu tarafından negatif diferansiyel rezistansın gözlenmesinde süperörgülerin kullanılacağı önerilmiş [7,18] ve 1971 yılında da Alferov tarafından deneysel olarak gözlenmiştir [19].

Bant aralıkları farklı iki yarıiletkenin ardı ardına büyütülmesiyle Düşük Boyutlu yarıiletken oluşturulabilir. Bunun için bant aralığı büyük olan yarıiletken üzerine, bant aralığı küçük olan yarı iletken büyütülür ve ardından tekrar bant aralığı büyük olan yarıiletken büyütülerek iletkenlik ve valans bantlarında taşıyıcılar için bir potansiyel kuyusu oluşturulur. Kuantum boyut etkilerinin gözlemlenmesi için bant aralığı küçük olan yarıiletkenin tabaka kalınlığının (bir boyutta) ya da kalınlıklarının yeterince ince olması gerekir.

İki yarıiletkenin birbiri üzerine büyütülmesiyle oluşan yapılara heteroyapılar ve bu yapıların birbirleriyle birleşim arayüzeylerine de heteroeklemler denilmektedir.

Heteroeklemler, heteroyapıların elektronik özelliklerini belirlediğinden istenilen elektriksel ya da optik özelliklere sahip aygıt tasarımı için oldukça önemlidir.

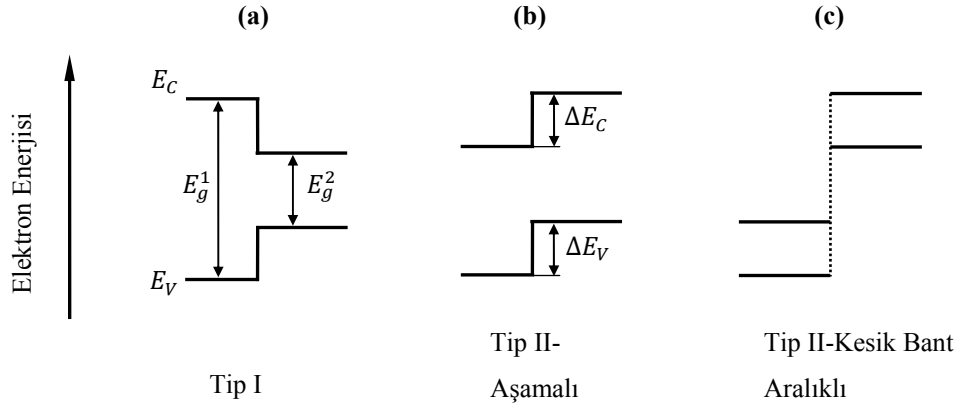
Yarıiletken aygıtların tasarımında ve üretiminde heteroeklemelerin kullanılmasıyla, yüksek performanslı yeni birçok aygıt geliştirilmiştir. Örneğin çift heteroeklemlerli lazer (double heterostructure (DHS) lazer) 1963 yılında Alferov ve Kremer tarafından bulunmuş ve bu buluşları nedeniyle 2000 yılında Nobel ödülü ile ödüllendirilmişlerdir [4]. İlk DHS yarıiletken lazerin yapımında galyum arsenik (GaAs) ve galyum alüminyum arsenik (GaAlAs) kullanılmıştır. Periyodik cetvelin III. grubunda (Ga, In, Al) ve V. grubunda (As, P, Sb, N) yer alan elementlerin oluşturduğu yarıiletken malzemeler; lazerler, detektörler gibi optoelektronik cihazların üretilmesinde büyük rol oynamaktadırlar [20,21]. III-V grubu yarıiletkenlerinin oluşturduğu ikili alaşımlar, 0.17eV (InSb) ile 2.46eV (AlP) değerleri arasında bant aralığına sahip olurlar. Hatta azotla yaptıkları bazı alaşımlarda bant aralığı 6eV'e kadar ulaşabilmektedir. Bunun yanında ikili, üçlü ve dörtlü bileşikler oluşturularak hemen her (kullanılan elementlerin konsantrasyonu da değiştirilerek) enerji değerinde bant aralığına sahip yarıiletkenler elde etmek mümkündür. Şekil 2.3'de III-V grubu yarıiletkenleri için enerji bant aralığı-örgü sabiti değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: III-V grubu yarıiletkenlerinin oluşturduğu ikili (siyah noktalar) ve üçlü (gri çizgiler) bileşiklerin 0K sıcaklığı için Enerji bant aralığı- örgü sabiti değişimi [22,23].

III-V grubu üçlü alaşıma tipik bir örnek $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'dir. Burada x , Al atomlarının konsantrasyonunu gösterir ve 0 ile 1 arasında değerler alır. Kristal örgü içerisinde III. Grup elementleri kendi aralarında yer değiştirirler. Al atomlarının Ga atomlarıyla yer değiştirmesi rastgeledir.

Bir heteroyapılı yarıiletken için, bant aralığına ek olarak, iki yarıiletkenin arakesitinde valans ve iletkenlik bantlarının göreceli pozisyonları da oldukça önemlidir. Bant uyumu (band alingment) olarak adlandırılan bu durum, bant aralığıyla birlikte bir heteroyapı için iletkenlik ve valans bandı süreksizliklerini (band offset) belirler. Bant süreksizliği iki yarıiletkenin arakesitinde bant kenarının kesiklilik göstermesi olarak tanımlanabilir. Şekil 2.4'de yarıiletken heteroyapılarda oluşan çeşitli tiplerdeki bant uyumu gösterilmiştir. Tip I, tip II-aşamalı (staggered) ve tip II-kesik-bant aralıklı (broken-gap) olmak üzere 3 tip bant uyumu gösterilmiştir.

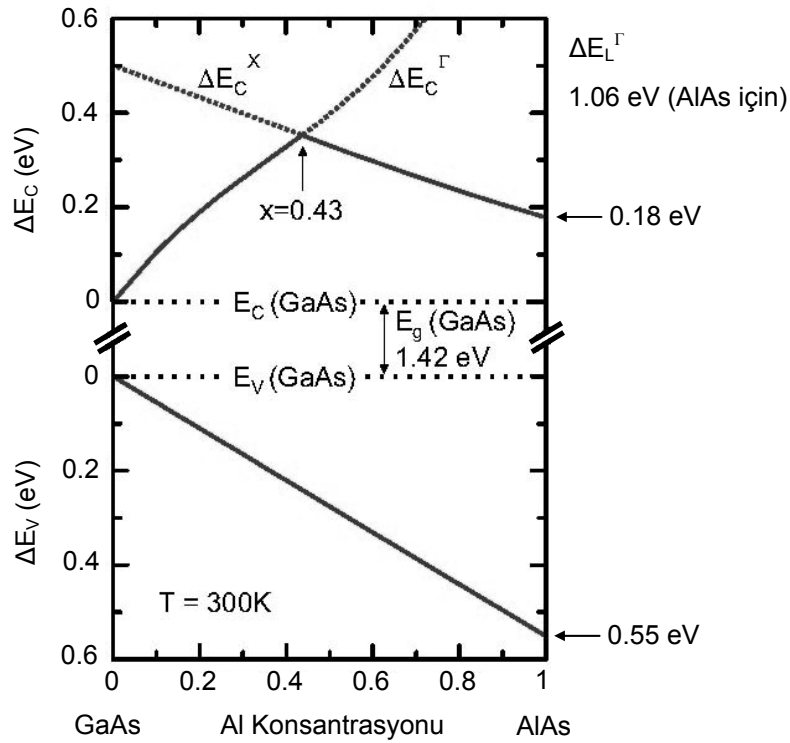


Şekil 2.4: Bant aralıkları sırasıyla E_g^1 ve E_g^2 olan iki farklı yarıiletkenin oluşturduğu heteroyapılarda olası bant uyumu tipleri: (a) Tip I, (b) Tip II aşamalı ve (c) Tip II Kesik bant aralıklı. E_C iletkenlik bandını, E_V valans bandını ve ΔE_C , ΔE_V sırasıyla iletkenlik bandı süreksizliğini ve valans bandı süreksizliğini göstermektedir.

III-V grubu yarıiletkenlerinin oluşturduğu heteroyapıların çoğu, Tip I bant uyumu gösterirler. GaAs/AlGaAs, InAs/GaAs ve GaSb/AlSb Tip I bant uyumu gösteren heteroyapılara örnek gösterilebilir. Şekil 2.4 a'da gösterildiği gibi Tip I bant uyumunda, küçük bant aralığına (E_g^2) sahip yarıiletkenin, iletkenlik ve valans bandı enerji değerleri, büyük bant aralığına (E_g^1) sahip yarıiletkenin bant aralığı değeri içerisinde

kalacak şekilde olmalıdır. Şekil 2.4 b'de gösterilen Tip II Aşamalı bant uyumuna sahip heteroyapılarda ise ikinci yarıiletkenin bant aralığının tamamı, birinci yarıiletkenin bant aralığının içinde kalmamaktadır. Bu tip bant uyumuna sahip heteroyapıya en iyi örnek GaSb/GaAs'dır. Tip II Kesik Bant uyumu ise her iki yarıiletkenin bant aralıklarındaki tüm enerji değerlerinin üst üste gelmedikleri durumda görülebilir.

Tip I bant uyumu gösteren GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısında elektronlar (iletkenlik bandında) ve boşluklar için (valans bandında) potansiyel bariyeri oluşacaktır. Bileşikteki Al konsantrasyonu x değiştirilerek potansiyel bariyerinin yüksekliği yani bant süreksizliği ayarlanabilir. Şekil 2.5'de GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heteroyapısının arakesitinde, Al konsantrasyonuna bağlı olarak iletkenlik bandı süreksizliği ΔE_C ve valans bandı süreksizliği ΔE_V değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5: GaAs / $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heteroyapısının arakesitinde Al konsantrasyonuna bağlı olarak iletkenlik bandı süreksizliği ΔE_C ve valans bandı süreksizliği ΔE_V değişimi. İletkenlik bandı süreksizliği X noktası için ΔE_C^X ve Γ noktası için ΔE_C^Γ olarak gösterilmiştir [4,22,23].

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x=0.45$ değerine kadar Al konsantrasyonuna sahipse direkt bant aralıklı (GaAs gibi), $x=0.45$ değerinden daha büyük Al konsantrasyonuna sahipse indirekt bant

aralıklı yarıiletken (AlAs gibi) davranışı gösterir. $Al_xGa_{1-x}As$ yapısının Γ noktasında maksimum bant süreksizliği, iletkenlik bandı için 1.06eV ve valans bandı için 0.55eV'tur.

2.2. KUANTUM NOKTALARI

Kuantum Noktaları elektron ya da boşluk hareketinin her üç uzaysal doğrultuda sınırlandırıldığı Düşük Boyutlu yapılardır. x, y, z doğrultularının her üçünde de taşıyıcıların hareketi sınırlandırıldığı için Kuantum Noktaları sıfır boyutlu yapılar olarak adlandırılır. Üç boyutlu yarıiletkenlerde yer alan enerji bantları kavramı, Kuantum Noktalarında keskin enerji seviyelerine dönüşür. Kuantum Noktalarının optiksel ve elektronik davranışları atomların optiksel ve elektronik özelliklerine benzediğinden “yapay atom” (artificial atom) olarak da adlandırılırlar. Kuantum Noktaları, sahip oldukları üstün özellikleri ve çok küçük boyutları sayesinde optoelektronikte; lazer, detektör, tek-foton kaynağı, optik yükseltici ve yüksek frekanslı optik aygıt[10,11,15], elektronikte; alan etkili transistör (FET) [24,25], bellek aygıtlar [26-30] ve kuantum bilgisayarları gibi birçok aygıtın üretilebilmesinde ya da geliştirilmesinde oldukça ümit verici yapılardır.

Kuantum Noktalarını kullanarak oda sıcaklığında çalışabilecek elektronik ya da optoelektronik aygıt yapabilmek için Kuantum Noktalarının bazı temel gereksinimleri sağlanması gerekmektedir.

- (a) Yeterince derin lokalizasyon potansiyeline sahip ve sıfır boyutlu kuantum sınırlaması sağlayabilecek kadar küçük boyutlarda olmalı.
- (b) Birim hacimdeki Kuantum Noktalarının sayısı (yoğunluk) yüksek olmalı, Kuantum Noktalarının boyutları ve şekilleri birbirinin aynı olmalı.
- (c) Malzeme iyi kalitede olmalı ve kusur içermemelidir.

Bir Kuantum Noktasının boyutları için alt limit kullanılan malzemeye göre değişiklik gösterir. Temel prensip; Kuantum Noktasının elektron ya da boşluk (ya da her ikisi birden) bulundurabileceği en az bir enerji seviyesine sahip olmasıdır. Kuantum Noktalarının şekli de yine kullanılan malzemeye bağlı olup küre, piramit ya da tepesi

kesik piramit (truncated pyramid) biçimlerinde olabilir. Küresel bir Kuantum Noktasının sahip olabileceği en küçük çap “kritik çap” olarak adlandırılır ve kullanılan malzemenin bant süreksizliğine bağlıdır. Bir elektron seviyesine sahip Küresel bir Kuantum Noktası için kritik çap D_{\min} ,

$$D_{\min} = \frac{\pi\hbar}{\sqrt{(2m_e^*\Delta E_C)}} \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilir [7]. Burada m_e^* elektron etkin kütleini, $\hbar = h/2\pi$ olmak üzere h Plank sabitini, ΔE_C iletkenlik bandı süreksizliğini, göstermektedir. GaAs/Al_{0,4}Ga_{0,6}As heteroyapısının iletkenlik bandı süreksizliği ~0.3 eV olarak alınırsa, böyle bir sistemin oluşturacağı küresel Kuantum Noktasının çapı 4 nm’den büyük olmalıdır. Bu Kuantum Noktasının sahip olabileceği en düşük büyüklüktür. Bu büyüklüklerdeki Kuantum Noktalarının sahip oldukları enerji seviyeleri arasındaki fark ve bariyer enerjileri küçüktür. Bu nedenle çok küçük sıcaklık değerlerinde bile Kuantum Noktasında bulunan elektronlar termal uyarılma yoluyla Kuantum Noktasından ayrılabilirler.

Kuantum Noktalarının büyüklükleri için de bir üst limit vardır. Enerji seviyelerinin termal nüfus yoğunluğu Kuantum Noktalarının büyüklükleri için bir sınırlama getirir. Enerji seviyelerinin termal nüfus değişimi, limit durumunda, Kuantum Noktasının enerji seviyeleri ile sıcaklık arasındaki ilişki;

$$k_B T \leq \frac{1}{3}(E_2^{OD} - E_1^{OD}) \quad (2.3)$$

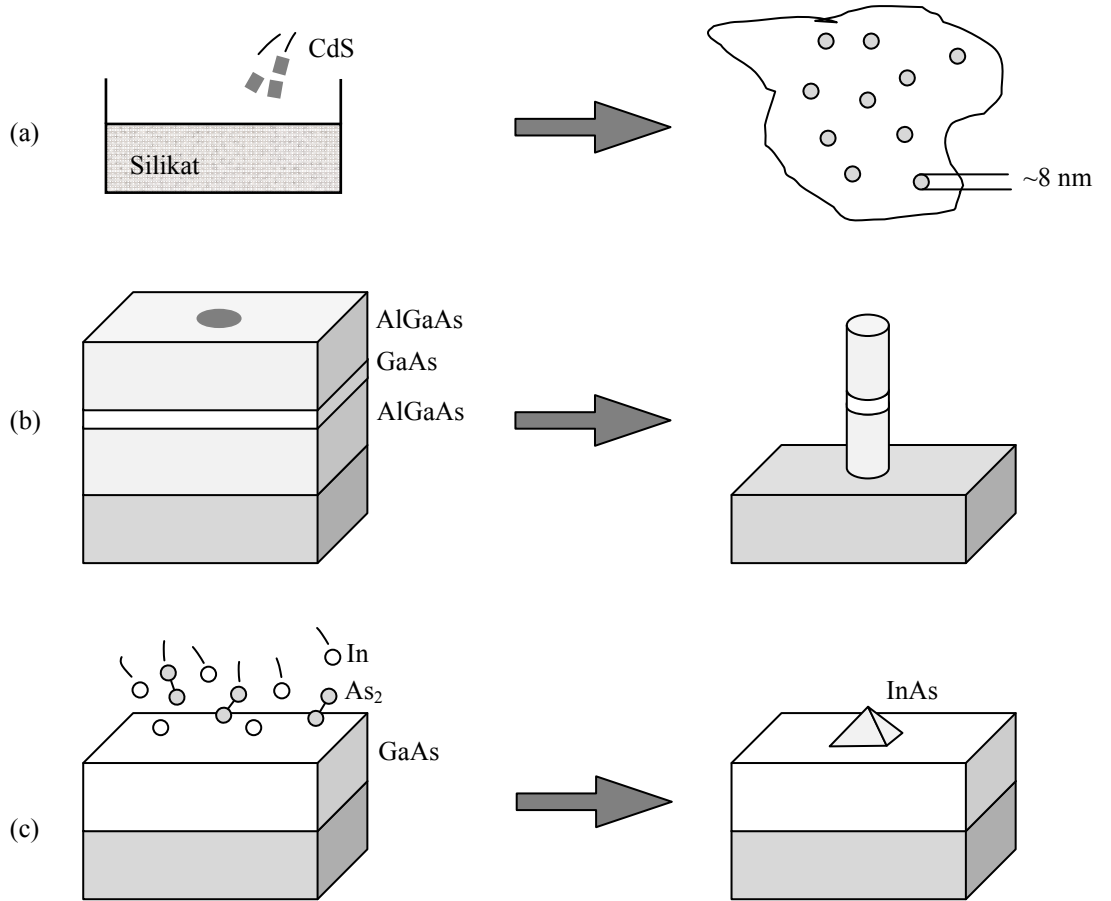
şeklinde verilir. Burada E_1^{OD} ve E_2^{OD} sırasıyla Kuantum Noktasının sahip olduğu birinci ve ikinci enerji seviyesini göstermektedir. Örneğin oda sıcaklığında, taşıyıcıları elektronlar olan GaAs/AlGaAs Kuantum Noktaları için maksimum büyüklük 12nm ve InAs/AlGaAs Kuantum Noktaları için de 20nm’dir. Kuantum Noktalarının sahip olabilecekleri büyüklüğün maksimum değeri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Taşıyıcıları boşluklardan oluşan bir Kuantum Noktası için boyutlarının üst limiti taşıyıcıları elektronlar olan Kuantum Noktasının büyüklüğünden farklıdır. Yukarıda

taşıyıcıları elektronlar olarak örnek gösterilen sistemlerde taşıyıcıların boşluklar olması durumunda oda sıcaklığında maksimum Kuantum Noktası büyüklüğü, 5-6nm daha büyük olabilir. Kuantum Noktaları için tipik büyüklük 10-20nm civarında olup kullanılan malzemeye ve taşıyıcı tipine göre farklılık göstermektedir. Bu büyüklüklerdeki Kuantum Noktaları 10^4 - 10^5 civarında atoma sahiptirler [7,16].

2.2.1 Kuantum Noktası Oluşturma Yöntemleri

Kuantum Noktaları, litografi, kimyasal aşındırma (etching) [31-35] ya da kendiliğinden organize olma (self organized) yöntemleriyle elde edilebilir [7,36]. Şekil 2.6'da Kuantum Noktası oluşturulmasında kullanılan yöntemler şematik olarak gösterilmiştir.



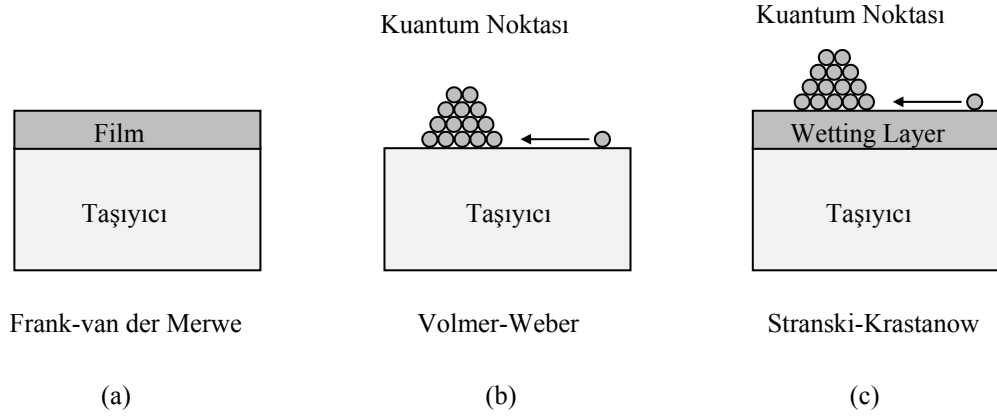
Şekil 2.6: Kuantum Noktaları oluşturma yöntemleri (a) cam üzerinde mikrokristallenme (b) ince filmlerin şekillendirilmesi, (c) kendiliğinden organize olma [7].

Kuantum Noktaları oluşturulurken çözünürlük, oluşturulan örneklerin kalitesi ve üretim maliyetleri göz önüne alınarak en uygun oluşturma yöntemi belirlenir. Kuantum Noktası oluşturmak için ilk olarak litografik yöntemler kullanılmıştır. Bu tür yöntemlerde, örnekler bir bütün üzerinden şekillendirilerek (yukarıdan-aşağıya yaklaşıklığı) nanometre mertebesindeki boyutlarda Kuantum Noktaları üretilebilir. Yine bu yöntemde Kuantum Noktaları oluşturulurken şekillendirme ve aşındırma işlemleri için optik litografi, X-ışını litografisi, elektron ışını litografisi ve taramalı tünelleme mikroskopisi (Scanning Tunneling Microscopy) yöntemleri kullanılmaktadır.

Ancak yukarıdan-aşağıya yaklaşıklığı ile yapılan üretimlerde çözünürlük yeterince iyi olmayıp ayrıca şekillendirme ve aşındırma işlemleri uygulanırken örneklerde kusurlar (defect) ve arayüzeylerde hasar oluşabilmektedir. Kuantum Noktası oluşturmak için günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntem (aşağıdan-yukarıya yaklaşımı) kendiliğinden organize olma yöntemidir. Bu yöntemde Kuantum Noktalarının oluşumu, sistemdeki gerilmeleri ve yüzey enerjisini minimuma indirmek için kendiliğinden meydana gelir [37]. Büyütme süresince Kuantum Noktalarını oluşturmak için doğrudan bir dış etki yapılmaz. Ancak sistemin kendi gerilmelerini minimuma indirebilmesi için sıcaklık gibi dolaylı etkiler uygulanır.

Kendiliğinden organize olma yöntemiyle, büyüklükleri ve şekilleri birbiriyle aynı olan Kuantum Noktaları oluşturulabilmektedir. Yine bu yöntemle yüksek Kuantum Noktası yoğunluğuna ve oldukça düşük kusur sayısına sahip, optik ve elektriksel özellikler bakımından iyi kalitede örnekler büyütülebilmektedir. Kendiliğinden organize olan düşük boyutlu yapıların büyütülmesi, kullanılan malzemelerin yüzeyine, arayüzeyine ve film enerjilerine bağlı olarak 3 farklı metotla gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla; Frank-van der Merwe metodu [38], Volmer-Weber metodu [39] ve Stranski-Krastanow metodudur [40]. Frank-van der Merwe metodunda tabaka tabaka büyütme yapılırken, Volmer-Weber metodunda pürüzsüz bir taşıyıcı üzerine ıslatma tabaka olmadan adacık şeklinde yapı oluşturulmaktadır. Üçüncü metot olan Stranski-Krastanow metodu, 1938 yılında Stranski ve Krastanow tarafından öne sürülmüş olup ilk iki metodun birleşimi olarak düşünülebilir. Stranski-Krastanow büyütme metodunda pürüzsüz bir taşıyıcı malzeme üzerine farklı örgü sabitine sahip bir tabaka büyütüldüğünde, tabakanın kalınlığı artarken taşıyıcı ile arasındaki örgü uyumsuzluğu (lattice mismatch) nedeniyle

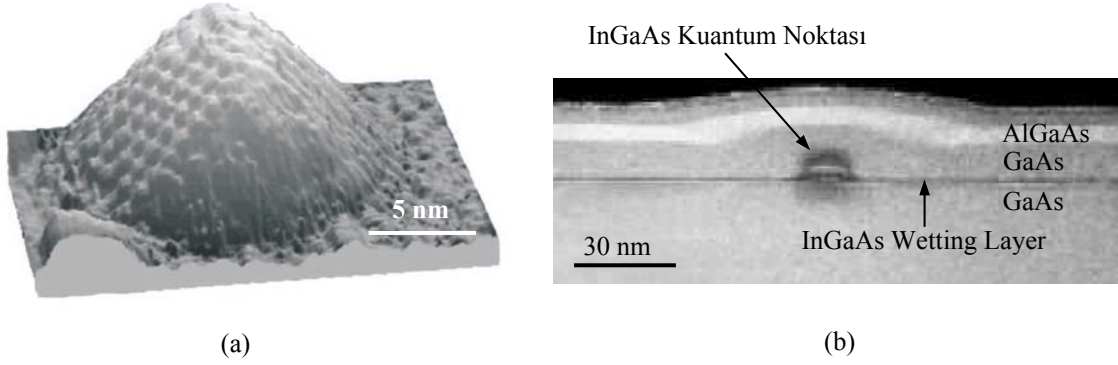
gerilme enerjisi de artacaktır. Bu gerilmeler büyütülen tabakada homojen bir kalınlık artışı oluşmasını engeller ve adacıklı bir yapıya dönüşmesini sağlar. Böylece büyüklükleri ve şekilleri birbirine oldukça yakın olan Kuantum Noktaları oluşabilmektedir. Taşıyıcı üzerine ilk olarak homojen büyütülen ince bir tabaka (wetting layer) kaplanır. Volmer-Weber metodunda ise taşıyıcı üzerinde wetting tabakası oluşmaksızın Kuantum Noktaları oluşmaktadır. Frank-van der Merwe metodunda ise tabaka tabaka büyütme yapılmakta olup bu metotta Kuantum Noktası oluşmamaktadır. Şekil 2.7’de farklı metotlarla Düşük Boyutlu yarıiletken oluşturulması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Farklı metotlarla Düşük Boyutlu yarıiletken üretimi: (a) Frank-van der Merwe, (b) Volmer-Weber, (c) Stranski-Krastanow metodu.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktaları epitaksiyel büyütme teknikleriyle büyütülebilirler. Şekil 2.8 a’da GaAs yüzey üzerine epitaksiyel yöntemlerle büyütülmüş InAs Kuantum Noktasının STM (taramalı tünelleme mikroskopisi) ile elde edilmiş üç boyutlu görüntüsü gösterilmektedir. Aygıt yapımında, bu tür Kuantum Noktaları büyütüldükten sonra GaAs tabakayla kaplanmaktadır. Şekil 2.8’b de GaAs tabaka üzerine Stranski-Krastanow metodu ile büyütülen InGaAs Kuantum Noktası ve üzerine büyütülen GaAs, AlGaAs tabakaların TEM (Transmisyon elektron mikroskopisi) ile elde edilmiş kesit görüntüsü verilmiştir.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktaları, büyütme koşullarına ve kullanılan malzemeye göre değişmekle birlikte taban genişliği 10-30 nm ve yüksekliği 2-5 nm olan piramit ya da kesik piramit şeklinde büyütülebilmektedir [41].



Şekil 2.8: (a) GaAs [001] yüzey üzerine büyütülmüş, InAs Kuantum Noktasının STM (taramalı tünelleme mikroskopisi) ile elde edilmiş üç boyutlu görüntüsü [42]. (b) GaAs tabaka üzerine Stranski-Krastanow yöntemi ile büyütülen InGaAs Kuantum Noktası ve üzerine büyütülen GaAs, AlGaAs tabakaların TEM (Transmisyon elektron mikroskopisi) ile elde edilmiş kesit görüntüsü[43]. Resimde InGaAs wetting layer da görülebilmektedir.

2.2.2. Kuantum Noktalarının Elektriksel Özellikleri

Külçe bir yarıiletken içerisindeki yüklü taşıyıcılar her üç doğrultuda hareket edebilirler. Külçe yapının sahip olduğu bant yapısında momentumun fonksiyonu olarak enerji dağılımı sürekli bir yapıda olup, seviye yoğunluğu $D(E)$, enerjinin karekökü ile orantılı olarak artmaktadır. Her üç doğrultuda taşıyıcıların hareketine sınırlama getirilen Kuantum Noktası gibi sistemlerde enerji dağılımı atomlara benzer şekilde olup seviye yoğunluğu;

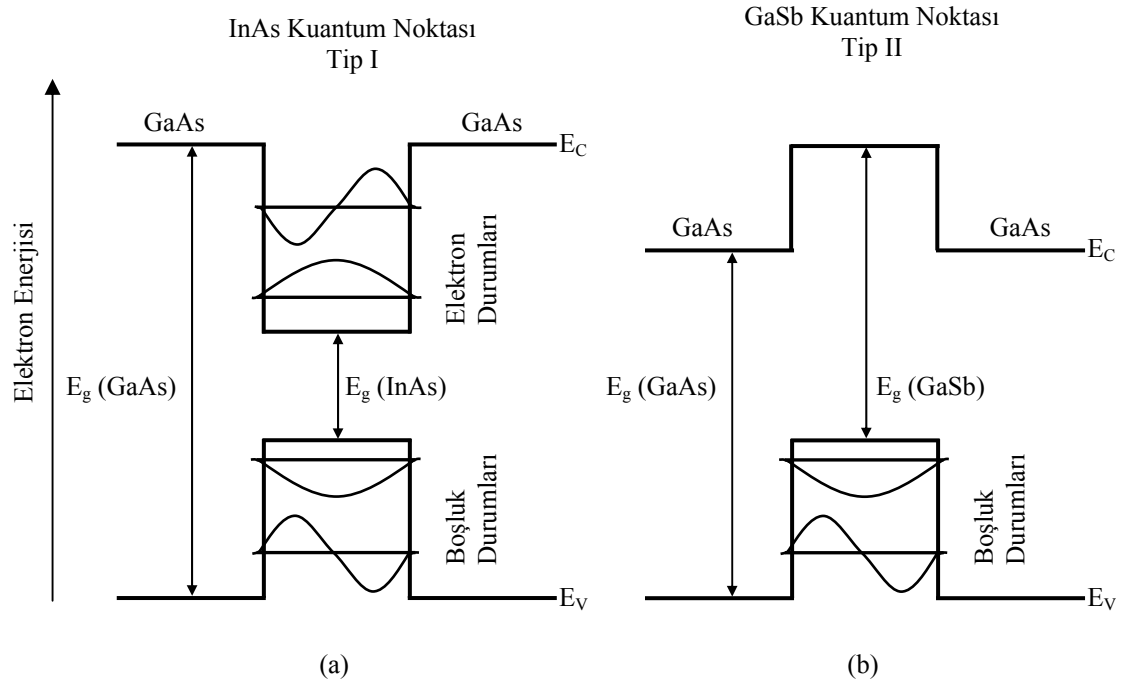
$$D_{QD}(E) = \sum \delta(E - E_i) \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir. Burada $D_{QD}(E)$ Kuantum Noktalarının seviye yoğunluğunu, E_i Kuantum Noktasının sahip olduğu enerji seviyelerini göstermektedir. Verilen E enerjisi E_i enerjisine eşit ise seviye yoğunluğunun belli bir değeri vardır. Diğer durumlarda seviye yoğunluğu sıfırdır.

Kuantum Noktaları elektronlar ya da boşluklar için sonlu bir derinliğe sahip potansiyel kuyusu oluşturmaktadır. Kuantum Noktasının sahip olduğu enerji seviyeleri, Kuantum Noktasının büyüklüğüne, şekline ve Kuantum Noktasını oluşturan malzemeye bağlıdır. Kuantum Noktasının büyüklüğünün, sahip olduğu enerji seviyelerine etkisi, elektronun

bir potansiyel kuyusu içerisindeki davranışına benzetilebilir. Sonlu bir potansiyel kuyusu içindeki enerji dağılımının kuantum mekaniksel çözümü ile potansiyel kuyusunun genişliğine bağlı olarak, sıfırdan farklı bir en düşük enerji seviyesi elde edilir. Bu yaklaşıklık Kuantum Noktasının şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak sınırlı sayıda enerji seviyesinin varlığını göstermektedir. Kuantum Noktası küçüldükçe sahip olduğu enerji değerleri arasındaki fark artmaktadır.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktalarında farklı tiplerde bant yapısı oluşabilmektedir. Örneğin InAs/GaAs Kuantum Noktası sisteminde iki tip taşıyıcı (elektronlar ve boşluklar) hareketi için sınırlama söz konusu iken, GaSb/GaAs gibi sistemlerde yalnız tek tip taşıyıcı (elektronlar ya da boşluklar) hareketi için sınırlama gerçekleşmektedir. Şekil 2.9'da InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası sistemleri için bant yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9: (a) Tip I bant yapısına sahip InAs/GaAs Kuantum Noktasında elektron ve boşluk durumları. (b) Tip II bant yapısına sahip GaSb/GaAs Kuantum Noktasında boşluk durumları. Bant yapısı Tip I şeklinde olan Kuantum Noktaları için iletkenlik bandında elektronlar ve valans bandında da boşluklar için sınırlama getirilir. Bant yapısı Tip II şeklinde olan GaSb/GaAs Kuantum Noktası sisteminde valans bandında boşluklar için sınırlama getirilirken iletkenlik bandında elektronlar için bir potansiyel engel meydana gelmektedir.

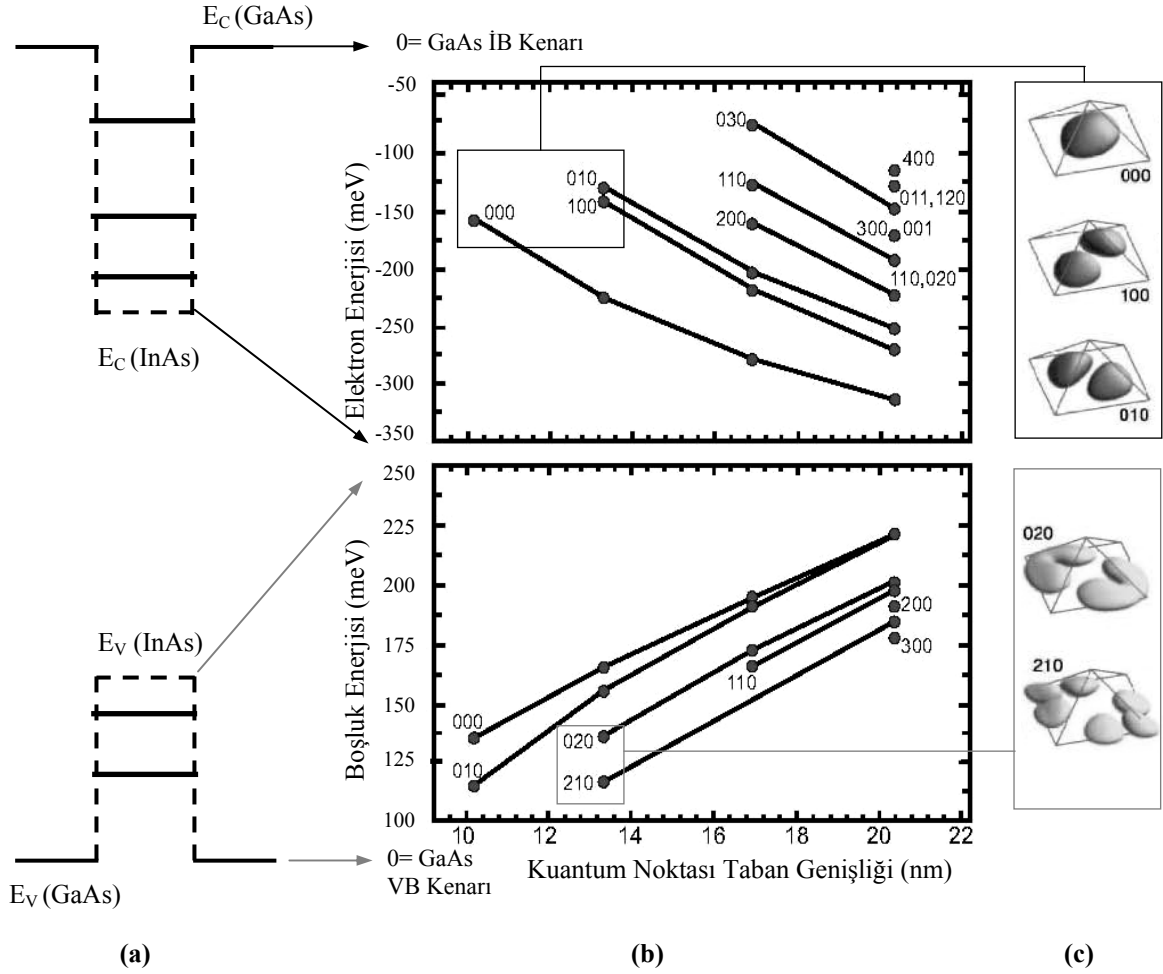
2.2.3. Kuantum Noktaları Durumlarının Modellenmesi

Kuantum Noktaları durumlarının hesaplanmasında birçok farklı yöntem kullanılmaktadır.

Yapısal özellikleri (şekli, büyüklüğü, malzeme konsantrasyonu) bilinen bir Kuantum Noktası içinde tek bir parçacığın durumunun hesaplanmasında mekanik süreç (Continuum Mechanical) modeli kullanılır. Çeşitli yöntemler kullanılırken, Kuantum Noktası içerisindeki gerilme dağılımlarının (strain distribution) modellenmesinde valans kuvvet alanı modeli (Valans Force Field Model) kullanılmaktadır. 8-bant **k.p** modeli kullanılarak tek bir parçacığın durumları uygun dalga fonksiyonları yardımıyla hesaplanabilir [44,45]. **k.p** modelinde, iletkenlik bandı ve üç valans bandı (ağır boşluk, hafif boşluk ve split-off bantları) ve bunların ikili etkileşimleri göz önüne alınarak hesaplamalar yapılır. Bu hesaplamalara elektronun ve boşlukların spin durumları da eklendiğinde toplam 8-bant **k.p** modeli oluşmaktadır.

Şekil 2.10 a’da 8-bant **k.p** modeli kullanılarak, farklı taban genişliklerine sahip piramit şeklindeki Kuantum Noktalarının sahip oldukları elektron ve boşluk enerji durumları gösterilmiştir. Yine şekil 2.10’da uygun dalga fonksiyonları (olasılık yoğunluğu eşyüzeyleri) da gösterilmektedir. Burada gerilme dağılımının hesaplanmasında mekaniksel süreç modeli kullanılmıştır. Elektron ve boşluk durum enerjilerinin taban genişliğine bağlılığı açıkça görülmektedir.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktalarının elektronik özelliklerinin hesaplanabilmesi için 8-bant **k.p** modelinin dışında, deneysel Pseudo potansiyel teorisi de kullanılmaktadır. Bu yöntemde Kuantum Noktası potansiyeli elde etmek için yüz binlerce atomdan oluşan süperhücre (supercell) yaklaşıklığı kullanılmaktadır [46]. 8-bant **k.p** modelinde ise külçe özelliklerinden (8 bant) başlanarak Kuantum Noktalarının elektronik özellikleri hesaplanmaktadır.



Şekil 2.10: (a) InAs/GaAs Kuantum Noktasının bant diyagramı. (b) 8-bant $k.p$ modeli kullanılarak, farklı taban genişliklerine sahip piramit şeklindeki InAs/GaAs Kuantum Noktalarının sahip oldukları elektron ve boşluk enerji durumları gösterilmiştir. Elektron ve boşluk enerjilerinin Kuantum Noktası taban genişliğine bağlılığı görülmektedir. Çizgiler aynı dalga fonksiyonu simetrisine sahip olan durumları işaret eder. 000 durumu elektron ve boşluk için temel seviyeyi gösterir. (c) Kuantum Noktasında elektron ve boşluk durumları için uyumlu olasılık yoğunluğu eşyüzeyleri gösterilmiştir[4,44,47].

2.2.4. Kuantum Noktalarından Yüklü Taşıyıcı Yayınlanması

Kuantum Noktaları taşıyıcılar için tuzak oluştururlar. Taşıyıcının Kuantum Noktasında kalma süresi belirli bir zamandır. Bu süre yayınlanma sürecine bağlıdır. Kuantum Noktaları, taşıyıcıları tutabilmesi ve uygulanan dış elektrik alan yardımıyla yayımlayabilmesi özellikleri sayesinde bir bellek aygıtta bilgi saklama birimi olarak kullanılabilirler.

Kuantum Noktasında bulunan bir taşıyıcı; termal uyarılma, tünelleme, fononlar yardımıyla tünelleme ve optik uyarılma yollarıyla yayınılanarak Kuantum Noktasından ayrılabilir.

2.2.4.1. Termal Uyarılma

Termal uyarılma yarıiletkenlerde yer alan derin tuzak seviyelerinde olduğu gibi Kuantum Noktalarında da en önemli uyarılma şeklidir ve bu nedenle Kuantum Noktasında taşıyıcıların ne kadar süre bulunabileceğini belirler. Şekil 2.11'de bir elektrik alan altında olası uyarılma ve taşıyıcı yayınlama süreçleri gösterilmiştir.

Kuantum Noktaları, taşıyıcı saklama ve uyarılma süreçleri bakımından yarıiletkenlerde yer alan derin tuzak seviyelerine benzemektedir. Bu nedenle termal uyarılma süreci incelenirken derin tuzak seviyelerinde kullanılan formalizm kullanılabilir [48].

Bir Kuantum Noktası, termal aktivasyon enerjisi E_A olan bir derin tuzak seviyesi gibi davranarak elektron ya da boşluk yayınlatabilir. Yayınlanan elektron (n) ya da boşluk (p) için, net uyarılma hızı sırasıyla $R_n^e(t)$ ve $R_p^e(t)$ ile ifade edilir. Net uyarılma hızı, birim zamanda Kuantum Noktasından (ya da birim hacimdeki derin tuzaktan) yayınlanan yüklü taşıyıcı sayısı olarak tanımlanır. Benzer şekilde net yakalama hızı da (net capture rate) elektron için $R_n^c(t)$, boşluk için de $R_p^c(t)$ şeklinde gösterilir. Termal denge durumunda net uyarılma hızı, net yakalama hızına eşit olmalıdır. Kararlı denge durumunda termal yayınlama hızı elektronlar için,

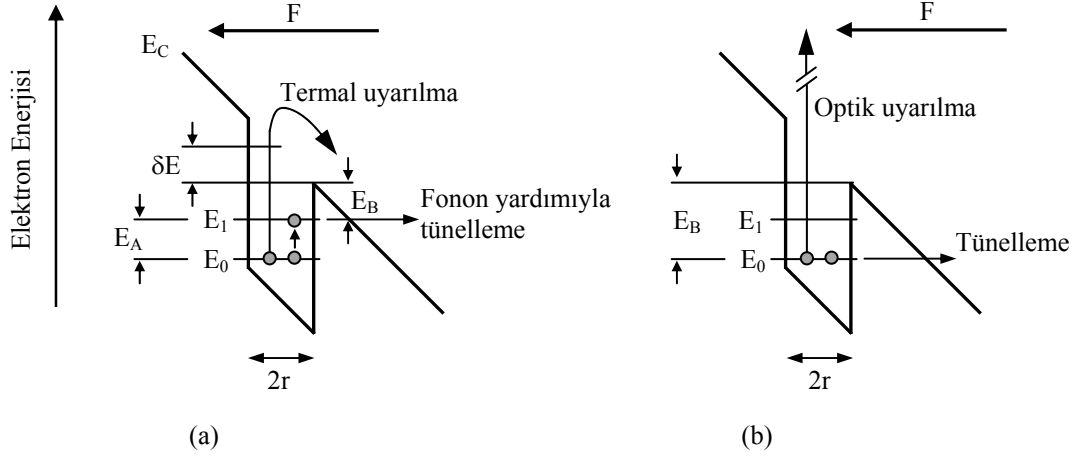
$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^n \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \quad (2.5)$$

ve boşluklar için

$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} T^2 \sigma^p \exp\left(-\frac{E_A^p}{k_B T}\right) \quad (2.6)$$

ifadeleri ile verilir. Burada g_0 (g_1), boş (dolu) durumların dejenerasyonunu, σ^n (σ^p), belirli bir sıcaklıkta yakalama tesir kesitini (capture cross-section), E_A^n (E_A^p) elektron

(boşluk) aktivasyon enerjisini, γ_n (γ_p) ise elektron (boşluk) durumları için sıcaklıktan bağımsız bir sabiti göstermektedir.



Şekil 2.11: Uygulanan bir F elektrik alanı altında olası taşıyıcı yayınlama süreçleri. Bir Kuantum Noktasının iletkenlik bandındaki temel seviyesinden, (a) Termal uyarılma ve Fonon yardımıyla uyarılma (b) tünelleme ve optik uyarılma yolları ile elektron yayınlaması gösterilmiştir.

2.2.4.2. Tünelleme

Uygulanan bir elektrik alan altında enerji bantları eğilir ve yüklü taşıyıcıların yayınlama hızı, oluşabilecek Poole- Frenkel Etkisi, Tünelleme ve Fonon yardımıyla tünelleme süreçleriyle artabilir.

Poole-Frenkel etkisi Frenkel [49] tarafından 1938 yılında tek boyutlu bir modelde tanımlanmıştır. Poole-Frenkel etkisi Şekil 2.11 a'da gösterildiği gibi bir F elektrik alanının varlığı nedeniyle potansiyel bariyer yüksekliğinin azalması ve taşıyıcıların termal uyarılma yoluyla bariyer üzerinden yayınlaması sürecidir. Elektronun yayınlama hızı e_n , denklem (2.3) kullanılarak,

$$e_n(F) = e_n \exp\left(\frac{\delta E(F)}{k_B T}\right) \quad (2.7)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada $\delta E(F)$, enerji seviyesinin uyarılma enerjisindeki etkin değişimi göstermekte olup r yarı genişliğine sahip kare potansiyel kuyu için bu değer,

$$\delta E(F) = eF_r \quad (2.8)$$

şeklindedir ve burada e , elektron yükünü göstermektedir.

Şekil 2.11 b’de gösterildiği gibi, yük taşıyıcılarının uyarılma hızı, Poole-Frenkel etkisine ek olarak, valans ya da iletkenlik bandına tünelleme yoluyla da arttırılabilir. Uygulanan bir elektrik alan etkisinde kuantum mekaniksel tünelleme olayı, yüksekliği E_B olan bir Dirac Kuyusu için incelendiğinde, üçgen bariyer içerisinde tünelleme hızı (ya da yayınlanma olasılığı) e^T ,

$$e^T = \frac{eF}{4\sqrt{2m^*E_B}} \exp\left[-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{E_B^{3/2}}{eF}\right] \quad (2.9)$$

formülü ile hesaplanır. Burada F uygulanan elektrik alan, m_e^* elektronun etkin kütlesi, E_B potansiyel kuyusunun yüksekliğidir. Burada üssel çarpan üçgen bariyerin geçirgenliğinin genel ifadesidir. Üssel olmayan çarpan ise sınırlandırılmış potansiyelde dalga fonksiyonları ile ilişkilidir.

Bir boyutlu Wentzel-Kramer-Brillouin (WKB) [50] hesaplaması kullanılarak, sınırlandırmanın olduğu z -doğrultusundaki genişliği L olan bir boyutlu bir potansiyel kuyusunda taşıyıcıların tünelleme hızı e^T , hesaplandığında,

$$e^T = \frac{\hbar\pi}{2m^*L^2} \exp\left[-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{E_B^{3/2}}{eF}\right] \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilir. Burada denklem (9)’dan farklı bir üssel olmayan çarpan görülmektedir.

2.2.4.3. Fononlar Yardımıyla Tünelleme

Fononlar yardımıyla tünelleme olayı, termal uyarılma ve tünelleme olaylarının bir birleşimidir. Uygulanan bir elektrik alan altında sınırlandırılmış enerji seviyesinden fononlar yardımıyla tünelleme iki adımda gerçekleşir. İlk adımda, alt (sınırlandırılmış) seviyelerde bulunan taşıyıcılar termal uyarılma yoluyla daha üst (sınırlandırılmış) seviyelere çıkarlar. İkinci adımda ise üst seviyeye çıkmış olan taşıyıcılar üçgen

bariyerden tünelleme yaparlar. Fononlar yardımıyla tünellemede yayınlama hızı sıcaklığa, uygulanan elektrik alana, potansiyel kuyusunun şekline ve derinliğine bağlıdır.

Bir Dirac Kuyusundan sürekli enerji seviyelerinden fononlar yardımıyla tünellemeyle yayınlama hızı, yarı-klasik [51] ve kuantum mekaniksel yaklaşıklıklarla hesaplanabilir. Kuantum Mekaniksel yaklaşıklıkla yayınlama hızı,

$$e^P = \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_m e^T (E_A + m\hbar\omega) \quad (2.11)$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki toplam, ilgili tüm fonon modlarını içermektedir. W_m , her bir m fonon modu için istatistiksel ağırlıktır [48,51,52].

Yarı-klasik yaklaşıklık kullanılarak daha basit bir ifade elde edilebilir. Elektronlar için termal uyarılma hızına (denklem (2.5) ve üçgen bariyerin geçirgenliğine (denklem (2.10)) bağlı olan Fononlar yardımıyla tünellemede toplam yayınlama hızı,

$$e_n^P = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^n \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \left[-\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m_e^*}{\hbar^2}} \frac{E_B^{3/2}}{eF} \right] \quad (2.12)$$

şeklinde verilmektedir.

Vincent ve arkadaşları [51] tarafından, 10^6 - 10^8 V/m mertebesindeki voltaj değerlerinde Kuantum Noktası seviyeleri ya da derin tuzak seviyeleri için Poole-Frenkel etkisinin ve fononlar yardımıyla tünellemenin de önemli olduğu gösterilmiştir. Kuantum Noktalarında fononlar yardımıyla tünelleme olayı deneysel olarak gözlenmiştir [53-55].

2.2.4.4. Optik Uyarılma

Kuantum Noktaları üzerine yeterli enerjiye sahip fotonlar düşürülürse, sınırlandırılmış seviyelerde bulunan taşıyıcılar optik uyarılma yoluyla Kuantum Noktasından ayrılabilirler. Optik uyarılma foto iyonizasyon ya da bantiçi absorblama olarak ta adlandırılmaktadır.

Kuantum Noktalarında optik uyarılma ile ilgili teorik çalışmalar yapılmıştır. Zhang ve arkadaşları [56] tarafından piramidal InAs/GaAs Kuantum Noktasında, optik uyarılmanın foton enerjisinin 600meV değerlerine kadar gerçekleşebileceği hesaplanmıştır.

2.3. YARIİLETKEN BELLEK AYGITLAR

Günümüzde üretilen tüm yarıiletken aygıtların %23'ünü yarıiletken bellekler oluşturmaktadır [57]. Yarıiletken belleklerin teknolojik önemi ve endüstride pazar payı her geçen gün artmaktadır.

Yarıiletken bellekler kalıcı (nonvolatile) ve geçici (volatile) hafızaya sahip bellekler olarak iki gruba ayrılabilir. DRAM (Dynamic Random Access Memory) ve SRAM (Static Random Access Memory) bellekler geçici hafızaya sahip olup, güç kesildiğinde depoladıkları bilgi kaybolur. Kalıcı hafızaya sahip olan belleklerde ise bilginin saklanması için güce ihtiyaç yoktur. Flaş bellekler gibi kalıcı hafızaya sahip belleklerin oda sıcaklığında ortalama bilgi saklama süresi 10 yıldan büyüktür.

Kalıcı hafızaya sahip bellek aygıtlar;

1. ROM (Read Only Memory) : Bilgi Üretim aşamasında kalıcı olarak kaydedilen, sadece okunabilir bellektir.
2. PROM (Programmable ROM) : Sadece bir kez yazılabilir.
3. FGM (Floating Gate Memory): Kayan geçit bellekler.
4. Silikon-Nitrit Bellekler
5. FRAM (Ferroelectric RAM)
6. MRAM (Magnetoresistive RAM)

şeklinde çalışma şekli ve kullanılan malzemeye göre sınıflandırılırlar. Yukarıda sıralanan bellek aygıtların özelliklerini kıyaslayabilmek için öncelikle ideal bir belleğin özellikleri belirlenmelidir.

İdeal bir bellek aygıt aşağıda verilen özelliklere sahip olmalıdır [58];

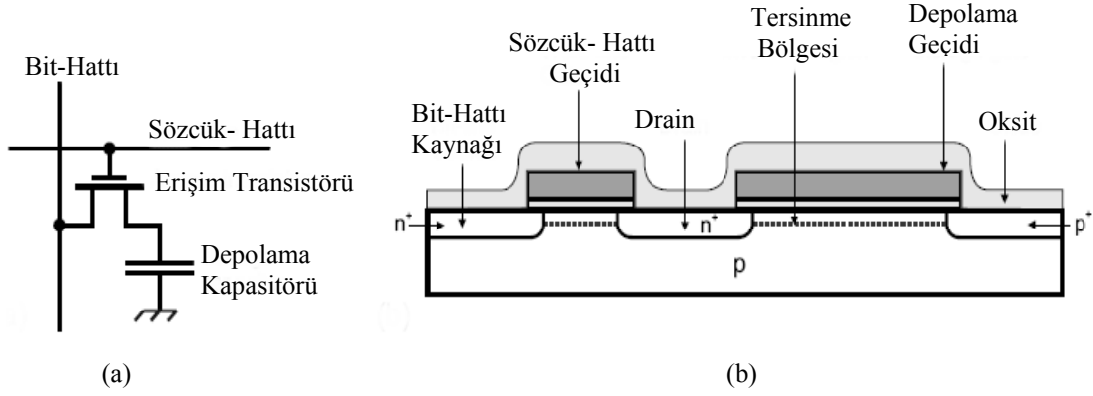
1. Kalıcı hafıza; Kaydedilen bilgiyi elektriksel güce ihtiyaç duymadan oda sıcaklığında en az 10 yıl süreyle saklayabilmeli.
2. Küçük birim hücre alanı; Küçük bir alanda çok sayıda bellek hücresi yer alabilmeli, hücre yoğunluğu yüksek olmalı.
3. Enerji sarfiyatı düşük olmalı.
4. Sistem içi yeniden yazılabilirlik özelliği olmalı.
5. Bit değiştirilebilirliğine sahip olmalı.
6. Hızlı okuma/yazma yapılabilirliği olmalı.
7. Yüksek dayanıklılık: yazma/silme döngü sayısı $>10^{15}$ olmalı.
8. Düşük üretim maliyetine sahip olmalı.
9. Tek güç kaynağına ihtiyaç duymalı.
10. Ölçeklendirilebilir (high scalability) olmalı.
11. Sağlam olmalı.
12. Günümüz yarıiletken teknolojisiyle uyumlu çalışabilmeli.

Teknolojide yaygın kullanım alanları ve sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle DRAM ve Flaş bellekler ön plana çıkmaktadır. Bir DRAM geçici hafızaya sahip olmasına rağmen sahip olduğu yüksek yazma/silme erişim hızı, yüksek dayanıklılık ve düşük üretim maliyeti nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında Flaş belleklerin sahip oldukları uzun bilgi saklama süresi nedeniyle, önemi giderek artmaktadır.

2.3.1. DRAM

DRAM (Dynamic Random Access Memory) yaygın olarak bilgisayarlarda geçici (volatile) hafıza birimi olarak kullanılmaktadır. Basit bir DRAM aygıt, bilgi saklama birimi olarak kullanılan bir kapasite ve bilginin yazılmasını sağlayan bir transistörden oluşmaktadır. Kapasitenin kendiliğinden deşarj süresi, minimum bilgi saklama süresi olarak kabul edilir ve tipik olarak milisaniyeler mertebesindedir. Şekil 2.12 a’da basit bir DRAM’in yapısı şematik olarak gösterilmiştir. DRAM’e kaydedilen bilgi sürekli olarak yinelenmelidir. Sadece okuma işlemi sonrasında da DRAM’de depolanan bilgi kaybolur ve yeniden yazılmak zorundadır. Bu yenileme işlemi entegre devre üzerindeki bir kontrolcü tarafından otomatik olarak sağlanır. Sürekli olarak devam eden okuma ve yazma döngüsü nedeniyle bu tür bellekler “Dinamik” adını alırlar.

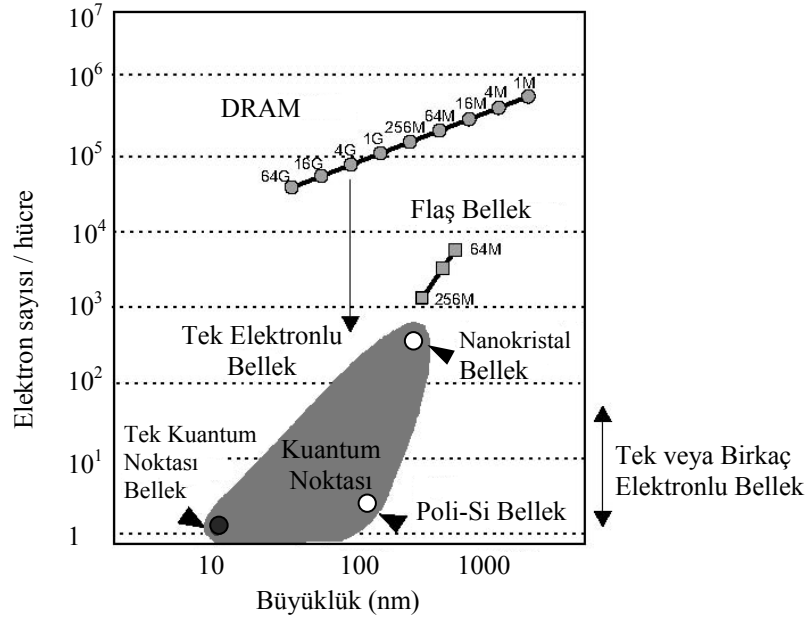
Şekil 2.12 b’de bir DRAM hücresinin kesiti gösterilmektedir [59]. Burada bilgi saklama birimi olan kapasiteyi, tersinme kanal bölgesi (birinci plaka), saklama geçidi (ikinci plaka) ve aralarındaki oksit tabaka (dielektrik malzeme) oluşturmaktadır.



Şekil 2.12: (a) Bir Transistör ve bir Kapasiteye sahip DRAM. (b) DRAM içyapısını oluşturan katmanlar.

Bilgi yazma sürecinde erişimi sağlayan transistör bir metal oksit yarıiletken alan etkili transistördür (MOSFET). Transistörün toplayıcı (drain) kontağı depolama kapasitesine, kaynak (source) kontağı bit hattına ve geçit (gate) kontağı da sözcük hattına bağlıdır. Sözcük hattı ve bit hattı kullanılarak istenilen bir DRAM hücresi seçilir ve bilgi yazma/okuma işlemi gerçekleştirilir ve bu da erişim hızının yükselmesini sağlar [60]. Yazma/okuma işlemi için seçilen sözcük ve bit hattına bir voltaj darbesi gönderilir. Sadece bu sözcük hattı ile bit hattının kesiştiği noktadaki DRAM hücresinde erişim transistörü buradan geçen elektronların geçmesine izin verir ve kapasite şarj olur.

Bir DRAM hücresi için yazma, okuma ve silme süresi ~ 20 ns olup yazma/silme işlemi 10^{15} kez tekrar edilebilir. Bu da bellek aygıt için istenilen hızlı erişim süresi ve dayanıklılığı sağladığını gösterir. Ancak diğer taraftan DRAM hücresinde bilginin sürekli yenilenmesi gerektiğinden enerji tüketimi fazladır ve güç kesildiğinde var olan bilgi kaybolur. Ayrıca bir bit bilgiyi depolamak için gerekli olan elektron sayısı göreceli olarak yüksek olup 10^5 civarındadır. Şekil 2.13’de farklı büyüklüklerdeki DRAM hücreleri, Flaş bellekler ve tek ya da birkaç elektronlu bellek aygıtlar için birim hücre başına elektron sayısının hücre büyüklüğü ile değişimi gösterilmiştir.



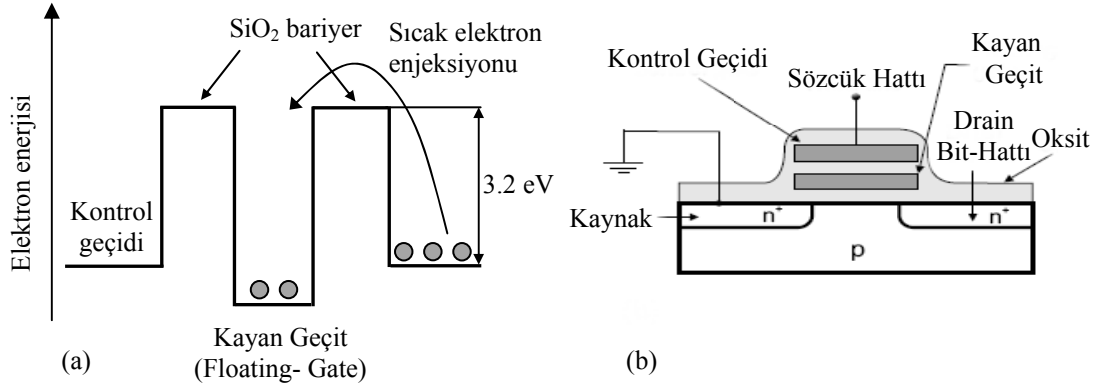
Şekil 2.13: Günümüzde kullanılan bellekler (DRAM, Flaş bellek) ve tek ya da birkaç elektronlu bellek aygıtları için hücre başına elektron sayısı – hücre büyüklüğü değişimi [4].

2.3.2. Flaş Bellekler

Flaş belleklere bilgi yazılması, silinmesi ve okunması elektrik alan uygulayarak yapılmaktadır. Kalıcı hafızaya sahip olan Flaş bellekler, EEPROM (Electrically Erasable and Programmable Read-Only Memory) yapısındadır. Flaş bellekler, bilgi yazıldıktan sonra bilgiyi saklamak için enerjiye ihtiyaç duymazlar. Enerji kapatıldığında da Flaş belleğe önceden kaydedilen bilgi kaybolmaz. Bu da, özellikle taşınabilir cihazlar için hayati öneme sahiptir. Taşınabilir cihazlarda, enerji harcamadan ve yenilemeğe ihtiyaç duymadan bilginin yazılması ve saklanması enerji tasarrufu ve uzun pil ömrü sağlar. Yine Flaş bellekler, bilgisayarların açılışta yaptığı önyüklemede (boot) yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde bazı taşınabilir bilgisayarlarda bilgi kaydetme birimi olarak ta Flaş bellek yapısını temel alan katıhal sürücüler (solid state drive) kullanılmaktadır. Bu tür disklerde motor kullanmadığı için enerji harcaması oldukça düşüktür. Yine hızları geleneksel hard disklerle karşılaştırıldığında daha yüksektir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan Flaş bellekler Silikon (silisyum) temelli kayan geçit (floating gate) yapısına sahip bellek aygıtlardır [58]. Bu tür bir bellekte poli-

silikon tabaka, iki SiO₂ (Silisyum dioksit) bariyer tabaka arasına yerleştirilmiştir. Böyle bir belleğin yapımında kullanılacak bir malzemenin bant yapısı şekil 2.14 a'da ve kesiti şekil 2.14 b'de şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan SiO₂ bariyerlerin tabaka kalınlığı yaklaşık 10nm olup yüksekliği 3eV gibi oldukça yüksek enerji değerine sahiptir. Bu kadar yüksek bariyerler arasına hapsedilen elektronlar, yüksek bir elektrik alan uygulanmadığı sürece oda sıcaklığında 10 yıla kadar poli-silikon tabakada kalabilirler. Dolayısıyla bu tür bir belleğe kaydedilen bilgi yıllarca saklanabilmektedir. Bariyerlerin yüksek oluşunun bilgi saklama zamanını arttırmasına rağmen bazı olumsuz etkileri de vardır.



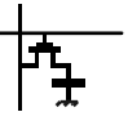

Şekil 2.14: (a) Günümüzde kullanılan kayan geçitli (Floating-gate) Flaş belleklerin bant diyagramı. (b) Flaş bellek yapısının kesiti ve yapıyı oluşturan katmanlar [58].

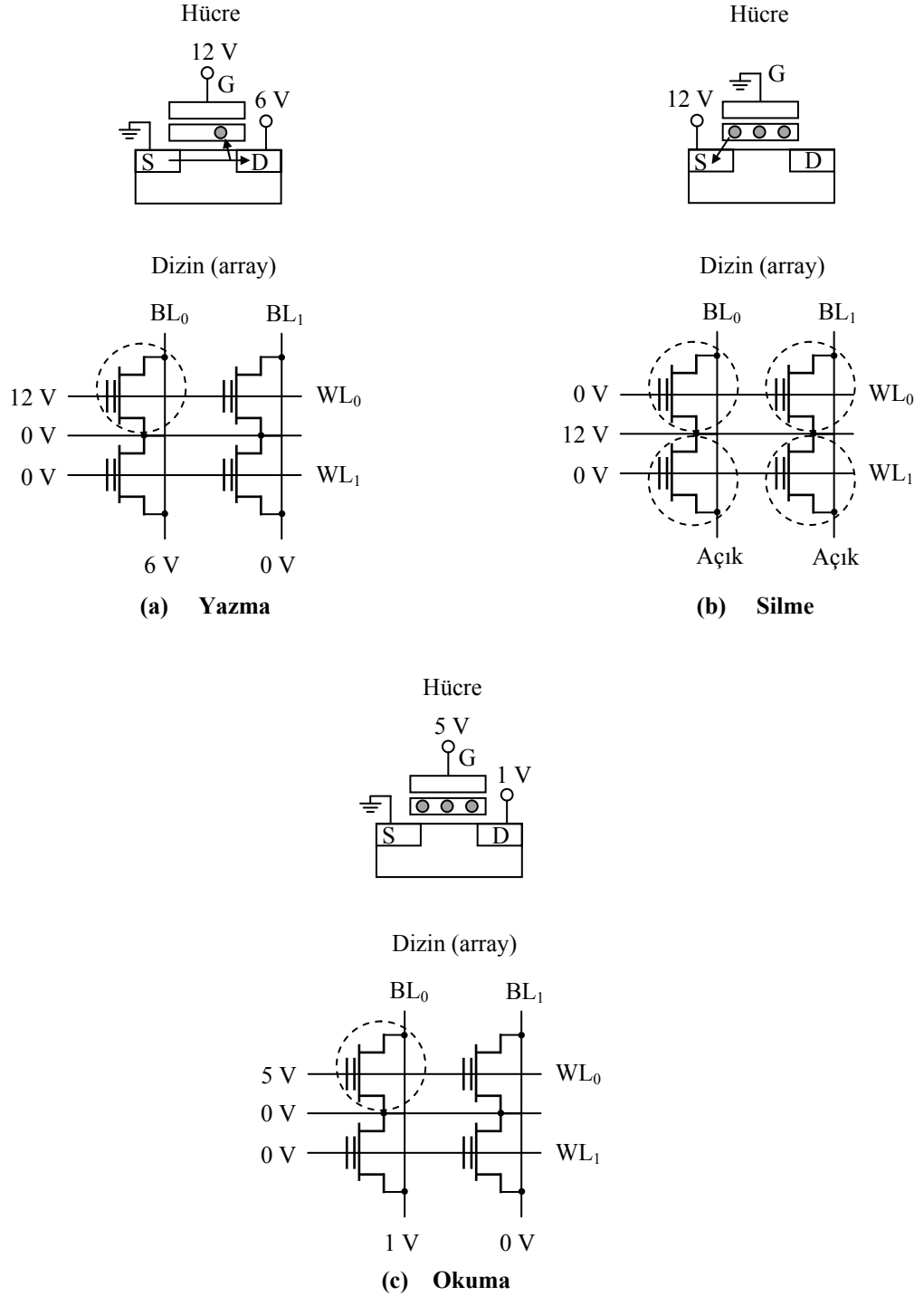
Bilgi yazma sürecinde, elektrik alan uygulanarak yüksek bariyer üzerinden elektronları geçirmek için milisaniyeler mertebesinde zaman gereklidir. Bu da yazma zamanının yavaşlamasına neden olur. Yine yazma ya da silme süreçlerinde, elektronları sabit yüksek bariyer üzerinden geçirmek için yüksek elektrik alan gereklidir bu da her yazma/silme işleminde Flaş belleğe zarar verir. Bu nedenle Flaş belleklerin yazma silme döngü sayıları yaklaşık 10⁶'dır.

Flaş belleklere bilgi yazma süreci sıcak elektron enjeksiyonu (hot-electron injection) ya da Fowler-Nordheim tünellemesi ile gerçekleşmektedir. Sıcak elektron enjeksiyonu sürecinde, kaynak kontağı ile bit hattına (drain kontağı) küçük bir voltaj uygulanır.

Sözcük hattına (kontrol geçidi) ise 10-20V aralığında pozitif besleme yapılır. Bu durumda MOSFET transistör yapısı “açık” konuma getirilmiş olup kaynak ve drain bölgelerinde bulunan elektronların tersinme (inversion) bölgesine enjeksiyonu gerçekleşir. Tersinme bölgesindeki elektronlar yüksek elektrik alan nedeniyle kinetik enerji kazanarak kayan geçit (floating gate) doğrultusunda hızlanırlar. Bu yüksek kinetik enerji nedeniyle “sıcak elektronlar” olarak adlandırılan elektronlar SiO₂ bariyerini aşabilirler. Ancak her yazma sürecinde bariyerler aşınır ve bu da Flaş belleğin dayanıklılığını azaltır. Ayrıca kayan geçit içindeki elektronların rölaksasyon olasılığının düşük olması nedeniyle yazma hızı da düşer. Bir Flaş belleğe önceden yazılmış bilginin okunma süreci, MOSFET yapısındaki tersinme bölgesinde bulunan 2 boyutlu elektron gazının (2DEG) direncinin okunmasıyla sağlanır. Kontrol geçidine bir elektrik alan uygulanarak kaynak ve drain kontakları arasındaki ince kanal (2DEG) şekillendirilir ve direnci ölçülür. Eğer kayan geçitte depolanan elektronlar varsa kaynak ile drain kontakları arasındaki direnç değerinin yüksek olduğu görülür. Şekil 2.15’de bir Flaş bellek için yazma, silme ve okuma süreçleri şematik olarak gösterilmiştir. Kalıcı hafızaya sahip Flaş belleklerde bir bitlik bilginin depolanabilmesi için yaklaşık 1000 elektron kullanılır. Bu ise Flaş Belleğin DRAM ile kıyaslandığında daha az enerji harcadığını göstermektedir. Tablo 2.1’de DRAM ile Flaş belleklerin bazı önemli özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1: DRAM ve Flaş belleklerin bazı önemli özelliklerinin karşılaştırılması.

BELLEK	YAZMA (Erişim Süresi)	OKUMA (Erişim Süresi)	DEPOLAMA (Bilgi Saklama Süresi)	ELEKTRON SAYISI	YAZMA/SİLME DÖNGÜ SAYISI
DRAM 	~20ns (iyi)	~20ns (iyi)	~ms (zayıf)	>10000 (zayıf)	>10 ¹⁵ (iyi)
FLAŞ BELLEK 	~10ms (zayıf)	~20ns (iyi)	>10 yıl (iyi)	~1000 (iyi)	>10 ⁶ (zayıf)



Şekil 2.15: Bir Flaş bellek için (a) yazma (programlama), (b) silme ve (c) okuma süreçlerinin şematik gösterimi. Her bir süreçte, Flaş bellek hücresi (üstte) ve hücrelerden oluşan dizin (alta) için uygulanan voltajlar ve bağlantı şekli gösterilmektedir. BL₁ ve WL₁ sırasıyla birinci hücrenin bit hattını ve sözcük hattını göstermektedir. Kaynak (source) kontağı S ile, Diren kontağı D ile, Geçiş (Gate) kontağı G ile gösterilmiştir. Uygulanan voltaj değerleri Flaş bellek yapısına göre farklı değerler alabilir.

2.3.3. Kuantum Noktaları Temelli Bellekler

Kuantum Noktaları bir bellek aygıtta bilgi saklama birimi olarak kullanılabilirler. Kendiliğinden örgütlenen Kuantum Noktaları (self-organized Quantum Dots) günümüzde ihtiyaç duyulan hızlı ve dayanıklı bellek aygıt yapabilmek için gerekli fiziksel özelliklere sahiptirler.

Evrensel bir bellek aygıt, kaydedilen bilgiyi 10 yıldan daha uzun bir süre saklayabilmeli, dayanıklı olmalı (yazma/silme döngü sayısı $>10^{15}$), yazma, silme ve okuma süreçleri için erişim hızı nanosaniyeler mertebesinde olmalıdır. Bu ise kullanmakta olduğumuz DRAM'lerin ve Flaş belleklerin sahip oldukları üstün özelliklerin tek bir bellek aygıtta toplanabilmesi anlamına gelmektedir.

Kuantum Noktaları Temelli kalıcı hafızaya sahip bir bellek aygıt, bilgisayarlarda ana bellek birimi olarak kullanılabilir. Böylece bilgisayarların ön yüklemesi daha hızlı gerçekleştirilebilir.

Günümüzde bilgisayar işlemcilerinin çalışma frekansı 3GHz'in üzerindedir. Bu da işlemcilerin erişim hızının 0.33ns'nin altında olduğu anlamına gelir. Bunun yanında bilgisayarlarda ana bellek olarak kullanılan DRAM'lerin erişim hızı yaklaşık 20ns'dir ve bu da bize ana bellek ile işlemci arasında yaklaşık 60 kat hız farkı olduğunu göstermektedir. Kuantum Noktaları Temelli Bellekler, hızlı erişim süreleri sayesinde işlemci-ana bellek arasındaki bu hız farkı sorununa bir çözüm olabilirler. Kuantum Noktaları Temelli kalıcı hafızaya sahip düşük enerji sarfiyatlı bir bellek aygıt, günümüz bilgisayarlarında kullanılan harddisklerin yerini alarak özellikle taşınabilir bilgisayarların pil ömrünü arttırabilir.

Günümüz teknolojisi kullanılarak 90nm hücre büyüklüğüne sahip DRAM ve Flaş bellek yapılabilmektedir. Bu da bilgi saklama yoğunluğu olarak 10 Gbit/inç²'lik bir değere karşılık gelmektedir [5]. Kuantum Noktaları kullanılarak yapılacak bir bellek aygıt için, her bir Kuantum Noktası bir bitlik bilgiyi depolayacağı varsayıldığında, bir cm²'lik alanda 10¹¹ Kuantum Noktası olabileceğinden bilgi saklama yoğunluğu 1 Tbit/inç² olacaktır. Bu bize, Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıtın aynı büyüklükteki Flaş bellekten 100 kat daha fazla bilginin saklanabileceğini gösterir.

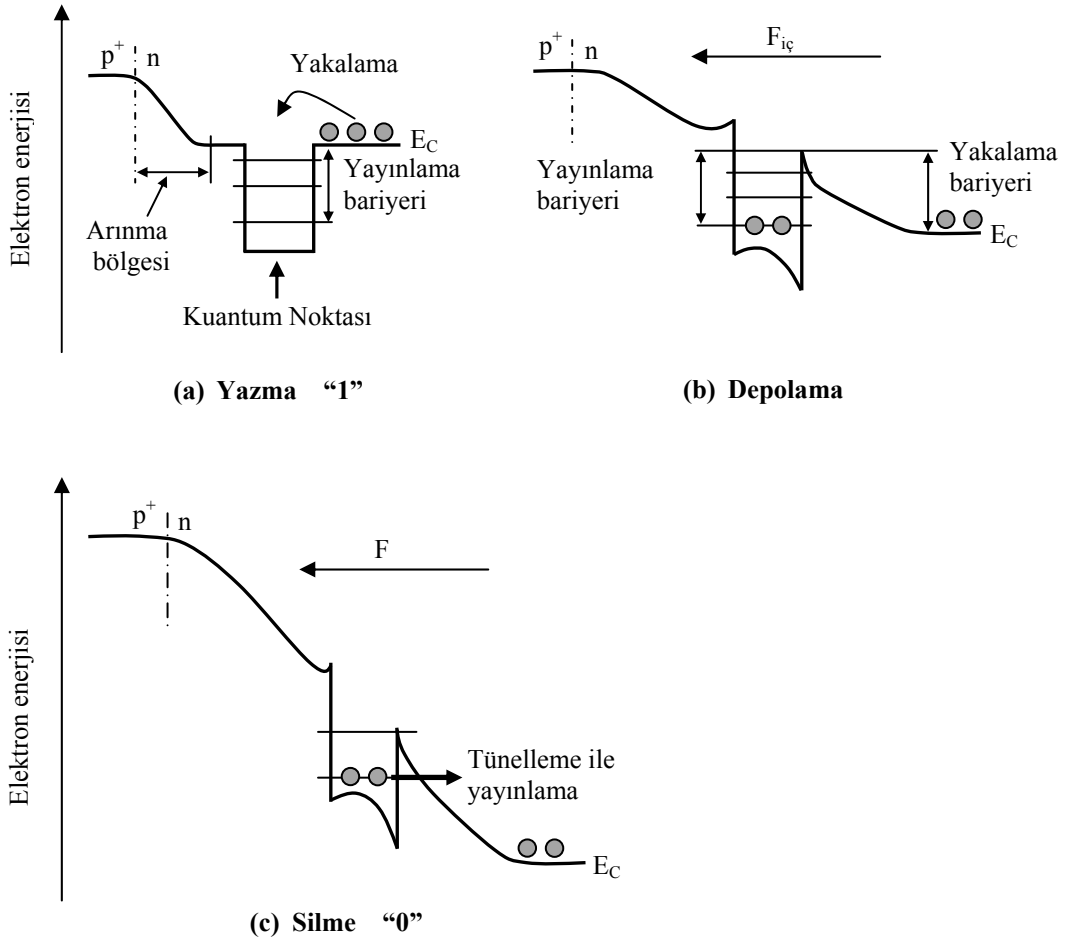
2.3.4. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtların Çalışma Prensipleri

Bir bellek aygıtta bilgi yazma, bilginin saklanması, bilginin silinmesi ve kayıtlı bilginin okunması süreçlerinin sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Kuantum Noktası Temelli bir bellekte bilginin yazılması, Kuantum Noktasında bulunan enerji seviyelerinde taşıyıcıların bulunması anlamına gelir ve bu durum ikili sayı sisteminde "1" ile gösterilir. Kuantum Noktasında taşıyıcıların bulunmaması ise ikili sayı sisteminde "0" durumuna karşılık gelir ve bu da silme işlemini ifade eder[61,62].

Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt kavramı bir p-n eklemesinin arınma bölgesi civarında bulunan Kuantum Noktalarının bilgi saklama birimi olarak kullanılması fikrinden kaynaklanmaktadır. Burada p-n eklemesine uygulanacak ileri ve geri besleme voltajlarıyla Kuantum Noktasına bilgi yazılabilir ve silinebilir. Taşıyıcıları elektronlar olan Kuantum Noktası Temelli bir bellek aygıt için yazma, depolama ve silme süreçlerinde bant yapısı şekil 2.16'da ve taşıyıcıları boşluklar olan aygıt için bant yapısı da şekil 2.17'de, şematik olarak gösterilmiştir. Depolama işlemi için yeterince yüksek yakalama ve yayınlama bariyerlerinin bulunması gerekmektedir. Yayınlama bariyeri "1" durumunun korunmasını ve yakalama bariyeri de "0" durumunun korunmasını sağlar. "1" durumunda taşıyıcılar Kuantum Noktasında bulunur ve yayınlama bariyeri ile taşıyıcıların termal uyarılma ya da tünelleme yoluyla Kuantum Noktasından ayrılması engellenmiş olur. "0" durumunda Kuantum Noktasında taşıyıcı yoktur ve yakalama bariyeri Kuantum Noktasına taşıyıcı girişine engel olur. Yayınlama bariyerinin yüksekliği Kuantum Noktası ile Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkeni oluşturan malzeme konsantrasyonlarına bağlı olarak değişir. Yakalama bariyerinin olmadığı durumda yarıiletkenin valans ya da iletkenlik bandında bulunan taşıyıcılar Kuantum Noktasındaki düşük enerji seviyelerine geçeceklerinden "0" durumundan "1" durumuna geçiş hızlı bir şekilde gerçekleşir.

Günümüzde Flaş belleklerde bulunan sabit yüksek bariyerler yerine, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtlarda, Kuantum Noktasını çevreleyen katkılı yarıiletken kullanılmaktadır. Böyle bir durumda yakalama bariyeri, p-n eklemesinin arınma bölgesinde kendiliğinden oluşacaktır ve uygulanan dış elektrik alan ile bariyer yüksekliği ayarlanabilmektedir. Örneğin Yazma sürecinde p-n eklemesine ileri besleme uygulanarak arınma bölgesinin genişliği azaltılıp Kuantum Noktaları arınma bölgesi

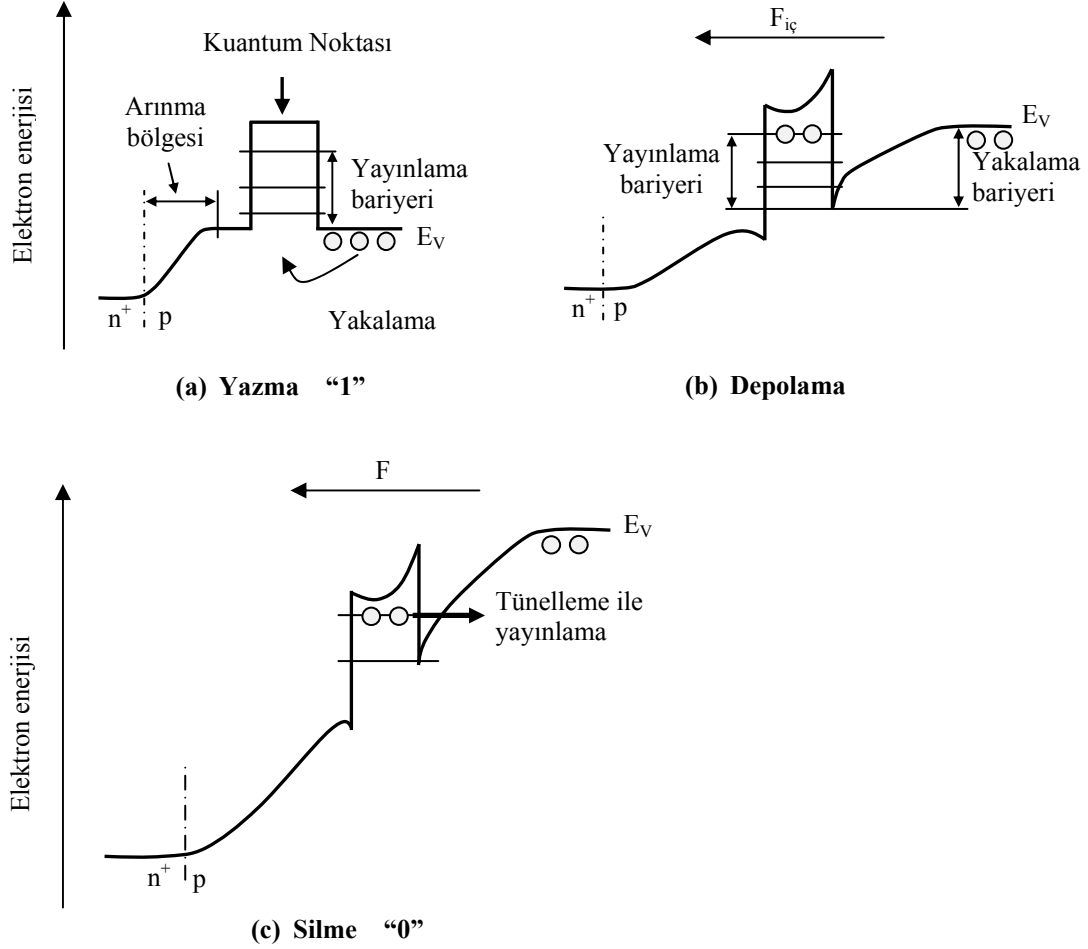
dışına çıkarılabilir ve iletkenlik veya valans bandında bulunan taşıyıcıların Kuantum Noktasına kendiliğinden rölaksasyonu sağlanabilir. Bu durum Şekil 2.16 a’da şematik olarak gösterilmektedir. Böylelikle günümüzde kullanılan Flaş belleklerde bulunan sabit bariyer nedeniyle yazma hızının yavaş olması sorunu giderilmiş olabilir.



Şekil 2.16: Taşıyıcıları elektronlar olan Kuantum Noktalı Temelli Flaş bellek için yazma, depolama (saklama) ve silme süreçlerinde bant yapısının şematik gösterimi. (a) İletkenlik ya da valans bandından direk olarak Kuantum Noktası seviyelerine taşıyıcıların yakalanması pikosaniye mertebelerinde oldukça hızlı yazma zamanına karşılık gelir. (b) Kuantum Noktası p-n eklemının arınma bölgesinde olduğu sürece bilgiyi saklama durumu devam eder. (c) Yüksek elektrik alanla geri besleme yapılarak taşıyıcıların QD seviyelerinden tünellemesi sağlanarak silme süreci oluşturulabilir.

Taşıyıcıların kendiliğinden rölaksasyonu hızlı bir süreç olup pikosaniyeler mertebesi gibi bir zamanda gerçekleşmektedir[63-65]. Böyle bir bellek aygıtı dış elektrik alan uygulanarak p-n eklemında bant eğilmesini sağlanabildiğinden (bariyer yüksekliği

değiştirilebildiğinden) yapıya zarar verilmeksizin yazma/silme işlemi gerçekleştirilebilir ve bu aygıtın dayanıklılığı oldukça yüksek olabilir.



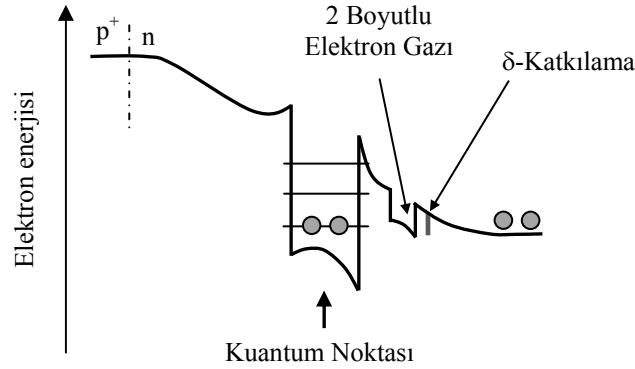
Şekil 2.17: Taşıyıcıları boşluklar olan bir Kuantum Noktası Temelli Flaş Bellek için yazma, depolama (saklama) ve silme süreçlerinde bant yapısının şematik gösterimi. (a) Yazma "1" (b) bilgi saklama (c) silme "0".

Bir p-n eklemine arınma bölgesindeki Kuantum Noktasına yazma süreci sonunda dış elektrik alan kaldırıldığında, yayınlama bariyeri yeterince yüksek ise taşıyıcılar Kuantum Noktasında kalacaktır. Böylece yazılan bilgi enerjiye ihtiyaç duymadan depolanabilir. Depolanan bilgi yayınlama bariyerinin yüksekliğine bağlı olarak binlerce yıl saklanabilir [65].

Yazılan bilginin silme işlemi de p-n eklemine yüksek geri besleme uygulanarak Kuantum Noktasındaki taşıyıcıların tünellemeye zorlanmasıyla gerçekleşir. Yüksek elektrik alan (10^7 V/cm'ye kadar) altında taşıyıcılar üçgen bariyerden tünelleme

yaparlar ve “1” durumundan “0” durumuna geçiş sağlar. Silme zamanı yayınlama bariyerinin yüksekliğine ve yarıiletkenin katkı konsantrasyonuna bağlıdır.

Kaydedilen bilginin okunabilmesi için Kuantum Noktası civarında 2 boyutlu elektron gazı oluşturulmuştur. Okunma süreci günümüzde kullanılan Flaş belleklerdeki benzer şekilde 2 boyutlu elektron gazının direncinin ölçülmesiyle gerçekleştirilebilir. Kuantum Noktasında taşıyıcıların bulunduğu “1” durumunda, Kuantum Noktasındaki taşıyıcılar ile 2 boyutlu elektron gazında bulunan taşıyıcılar arasında oluşan Coulomb etkileşmesi nedeniyle 2 boyutlu elektron gazında çarpışmalar artacak ve ölçülen direnç değeri yüksek olacaktır. “0” durumunda ise 2 boyutlu elektron gazının direnci düşük olacaktır. Okuma süreci için gerekli olan 2 boyutlu elektron gazı, Kuantum Noktası civarına bir Kuantum kuyusu ve hemen bitişiğine bir δ -katkılama (çok ince taşıyıcı sayısı yüksek tabaka) yapılarak oluşturulabilir. Şekil 2.18’de Kuantum Noktası Temelli Flaş Bellek için mümkün olabilecek bilgi okuma süreci şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Kuantum Noktası Temelli Flaş Bellek için mümkün olabilecek bilgi okuma sürecinin şematik gösterimi. Kuantum Noktasına oldukça yakın 2 boyutlu elektron gazı (2DEG) yer almaktadır. 2 boyutlu elektron gazının direnci Kuantum Noktasının sahip olduğu elektron sayısına bağlıdır.

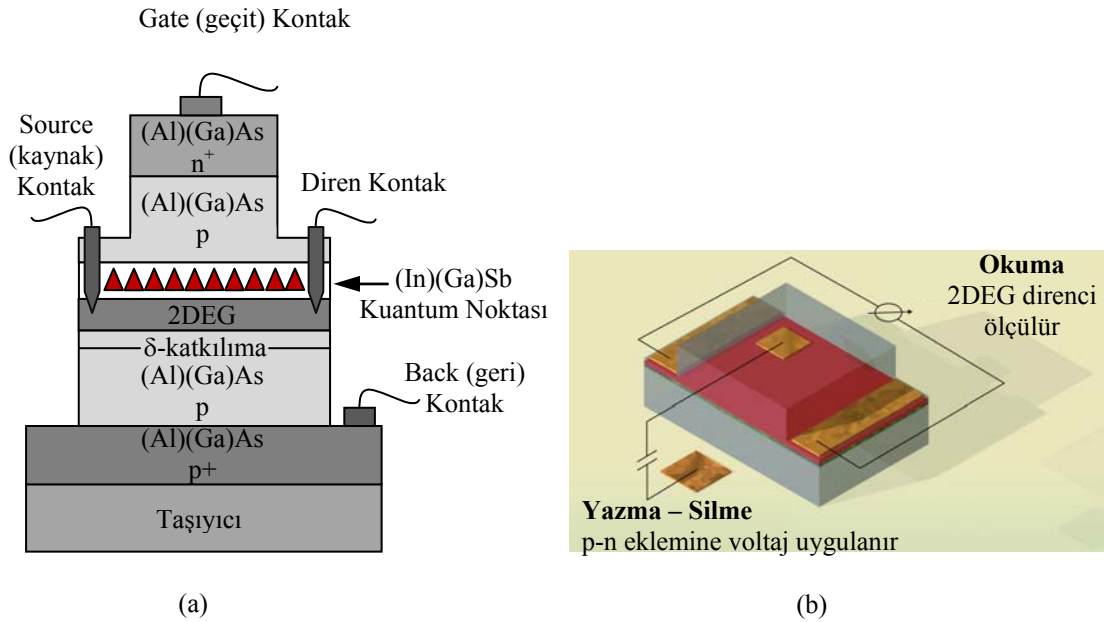
Şekil 2.18’de gösterilen, δ -katkılama bulunan elektronlar, oda sıcaklığında iyonize olarak iletkenlik bandına ulaşır ve geride pozitif yüklü atomlar bırakırlar. İletkenlik bandına ulaşan elektronlar buradan yakında bulunan kuantum kuyusuna rölaksasyon ile inerler. Kuantum kuyusu içerisine inen elektronlar ile iyonize olmuş pozitif yüklü atomlar arasında Coulomb etkileşmesi meydana gelir. Bu nedenle kuantum kuyusu

içerisinde bulunan elektronlar, kuyunun pozitif yüklü atomlara yakın tarafında toplanarak 2 boyutlu elektron gazını oluştururlar.

2.3.5. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt Yapısı

Kuantum Noktaları kullanılarak yapılabilecek bir Flaş belleğin yapısı şekil 2.19 a'da şematik olarak gösterilmektedir.

Flaş bellek aygıtın depolama birimi olan Kuantum Noktalarında elektronların ya da boşlukların bulunması bir bitlik bilginin kaydedildiği anlamına gelir. Öncelikle hangi tip taşıyıcı ile çalışılacağı belirlenmelidir. Kuantum Noktasını ve çevresindeki yarıiletkeni oluşturan malzemeye bağlı olarak taşıyıcı tipi belirlenir.



Şekil 2.19: (a) Kuantum Noktaları Temelli Flaş Bellek için mümkün olabilecek malzemeler ve tabaka yapısının şematik gösterimi.(b) Bilginin yazılması silinmesi ve okunabilmesi için gerekli elektriksel bağlantı şekli.

Taşıyıcıları boşluklar olan bir bellek aygıtta, p-n eklemının n bölgesi aşırı katkılanmış olup eklem n⁺- p şeklinde gösterilir. Taşıyıcıları elektronlar olan bir aygıt için ise eklemın p bölgesi aşırı katkılanmış ve p⁺- n şeklinde gösterilir. Şekil 2.18'de gösterilen bellek yapısında n⁺- p eklemi kullanılmıştır. Eklemi oluşturan tabakaların

kalınlıkları ve katkı konsantrasyonları, dış bir elektrik alan uygulanmadığı durumda Kuantum Noktaları, n^+ -p ekleminin arınma bölgesinde kalacak şekilde seçilmiştir. Yazılan bilgiyi oda sıcaklığında yıllarca saklayabilecek bir Flaş bellek için ideal yapı GaSb/AlAs Kuantum Noktası sistemidir [66]. GaSb Kuantum Noktası ile AlAs yarıiletken yapısının oluşturduğu sistemde bariyer yüksekliği nedeniyle taşıyıcılar oda sıcaklığında Kuantum Noktası seviyelerinde 10^6 yıl kadar kalabilirler.

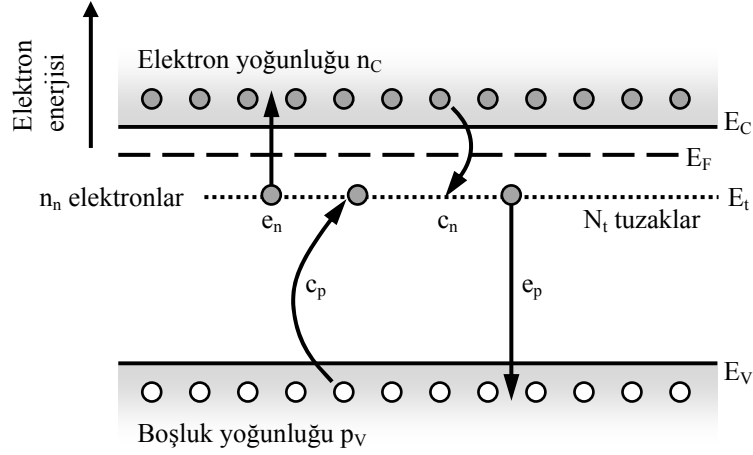
Şekil 2.19'da gösterilen bellek yapısına bilginin yazılması için geçit (gate) kontak ile geri (back) kontağa ileri besleme uygulanır. Yazma işlemi için geçit kontağı ile kaynak ya da drain kontağına ileri besleme uygulanması da yeterli olabilir. Yapıda yer alan 2 boyutlu elektron gazı (2DEG), Kuantum Noktalarından 20-50nm uzaklıkta olup dış bir elektrik alan uygulanmadığı zaman (sıfır besleme) n^+ -p ekleminin arınma bölgesi dışında kalır. Kaynak ve drain kontakları ile 2 boyutlu elektron gazının direncinin ölçülmesi okuma sürecinin gerçekleşmesini sağlar.

2.4. TAŞIYICI DİNAMİĞİ

2.4.1. Yarıiletkenlerde Derin Seviyeler

Bir yarıiletkenin elektronik özelliklerinin belirlenmesinde, katkılardan kaynaklanan donör ve akseptör seviyeleri gibi sığ seviyelerin yanında derin seviyelerin varlığı da önemli rol oynamaktadır. Sığ seviyelerde çoğu zaman düşük sıcaklıklardan ($>50K$) itibaren iyonizasyon görülürken, iletkenlik ve valans bantlarıyla göreceli bağlanma enerjileri birkaç $k_B T$ 'den büyük olan seviyeler genellikle “derin seviye” olarak adlandırılırlar. Derin seviyelerde, elektronlar ya da boşluklar oda sıcaklığında hatta daha yüksek sıcaklıklarda dahi bulunabilirler. Derin seviyeler, taşıyıcılar için tuzak seviyeleri olarak da bilinirler. Derin seviyeler hidrojen atomu modeliyle açıklanamayan seviyelerdir. Bir yarıiletkende derin tuzak seviyelerinde taşıyıcı yakalama ve yayınlama süreçleri şekil 2.20'de şematik olarak gösterilmiştir.

Kuantum Noktalarının sahip olduğu enerji seviyeleri, derin seviyeler gibi taşıyıcıları tutabilir ya da taşıyıcıları yayınlatabilir. Burada derin seviyeler için taşıyıcı dinamiği incelenirken Kuantum Noktalarının sahip olduğu özel durumlar göz önüne alınmadan geleneksel hız denklemi yaklaşımı kullanılmaktadır.



Şekil 2.20: n tipi bir yarıiletkende, E_t enerjisine sahip N_t tuzak seviyelerinden elektron ve boşluk için yakalama ve yayınlama süreçleri. E_F yarıiletkenin Fermi enerjisini, E_C iletkenlik bandı kenarı enerjisini, n_C iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğunu, E_V valans bandı kenarı enerjisini, p_V valans bandındaki boşluk yoğunluğunu, n_n tuzak seviyelerinde tuzaklanmış elektronların sayısını göstermektedir.

Derin seviyeler için taşıyıcı dinamiği deneysel ve teorik çalışmalarla incelenmiş olup[67], kapasitans spektroskopisi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda teorik yaklaşımların Kuantum Noktaları gibi Düşük Boyutlu sistemler için de geçerli olduğu görülmüştür [68,69].

2.4.2. Taşıyıcı Yakalama ve Yayınlama Süreçleri

Bir yarıiletkenin bant aralığı içerisinde bulunan bir tuzak seviyesinin durumu dört farklı dinamik süreçle belirlenir. Bunlar sırasıyla elektron yakalama, elektron yayınlama, boşluk yakalama ve boşluk yayınlama süreçleridir. Bu süreçler şekil 2.20'de gösterilmiş olup;

- İletkenlik bandındaki bir elektronun tuzak seviyesi tarafından yakalanması (c_n),
- Tuzak seviyesindeki bir elektronun iletkenlik bandına yayınlanması (e_n),
- Valans bandındaki bir boşluğun tuzak seviyesi tarafından yakalanması (c_p),
- Tuzak seviyesindeki bir boşluğun valans bandına yayınlanması (e_p),

şeklinde sıralanabilir.

“n” ve “p” alt indisleri sırasıyla elektronu (elektronla ilgili bir özelliği) ve boşluğu (boşlukla ilgili bir özelliği) ifade etmektedir. Yakalama sürecinin etkinliği, σ yakalama tesir kesiti ile taşıyıcı akısına bağlıdır ve taşıyıcı yoğunluğu n ile taşıyıcıların termal hızının ortalama karekökünün $\langle v_n \rangle$ çarpımıyla belirlenir. Eğer toplam tuzak yoğunluğu N_t ve herhangi bir t anında işgal edilme olasılığı f ($f \in [0,1]$) ise $1-f$ boş seviye vardır ve elektron yakalanabilir. Yakalama süreci nedeniyle işgal edilme olasılığındaki değişim,

$$\frac{df}{dt} := \frac{\partial f}{\partial t} = \sigma^n \langle v_n \rangle n(1-f) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Elektron yakalama hızı,

$$c_n = \frac{df}{dt} \frac{1}{1-f} \quad (2.14)$$

ve buradan

$$c_n = \sigma^n \langle v_n \rangle n_c \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilir. Benzer şekilde boşluk yakalama hızı da,

$$c_p = \frac{d(1-f)}{dt} \frac{1}{f} = -\frac{df}{dt} \frac{1}{f} = \sigma^p \langle v_p \rangle p_v \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir. Burada p_v , valans bandındaki boşluk yoğunluğu, σ^p , boşluk yakalama tesir kesitini ve $\langle v_p \rangle$ ise boşlukların termal hızının ortalama karekökünü göstermektedir.

Derin seviyelerin nüfusu, elektronların ve boşlukların yakalama ve yayınlama süreçlerinin etkileşimine bağlıdır. Toplam tuzak yoğunluğu N_t , işgal edilmiş tuzak seviyelerinin (dolu) yoğunluğu n_n ve işgal edilmemiş (boş) tuzak seviyelerinin yoğunluğu da $N_t - n_n$ olarak şekil 2.20’de gösterilen bir yarıiletken, elektronlar ile

boşluklar için yayınlama ve yakalama hızları sırasıyla e_n , c_n , c_p ve e_p 'dir. Derin tuzak seviyelerinde elektron/boşluk yayınlanmasından ve yakalanmasından kaynaklanan elektron işgalindeki n_n net hız değişimleri;

- İşgal edilmiş tuzak seviyelerinden $n_n(t)$ iletkenlik bandına net elektron yayınlama hızı: $R_n^e(t) = e_n n_n(t)$,
- İletkenlik bandından işgal edilmemiş tuzak seviyelerine $[N_t - n_n(t)]$ net elektron yakalama hızı : $R_n^c(t) = c_n [N_t - n_n(t)]$,
- İşgal edilmemiş tuzak seviyelerinden $[N_t - n_n(t)]$ valans bandına net boşluk yayınlama hızı : $R_p^e(t) = e_p [N_t - n_n(t)]$,
- Valans bandından işgal edilmiş tuzak seviyelerine $n_n(t)$ net boşluk yakalama hızı : $R_p^c(t) = c_p n_n(t)$,

şeklindedir.

Yayınlama hızı e_n , gerçekte tuzaklanmış elektron başına yayınlama hızıdır ve birim zamanda belirli bir elektronun yayınlanma olasılığını temsil eder. e_n , tuzak seviyeleri için karakteristik olup yayınlanma süresince sabit kalır dolayısıyla zamandan bağımsızdır. Benzer şekilde c_n işgal edilmemiş bir seviyede yakalama olasılığını ifade eder ve zamana bağlı değildir. Boşluklar için de aynı koşullar geçerli olduğundan boşluk yayınlama hızı e_p ve boşluk yakalama hızı c_p zamandan bağımsızdır. Ancak net hızlar ($R_n^e(t)$, $R_n^c(t)$, $R_p^e(t)$, $R_p^c(t)$) tuzak seviyelerinde, birim zamanda yakalanan ya da yayınlanan taşıyıcı sayısını gösterdiğinden zamana bağlıdır.

n-tipi bir malzemede bulunabilecek N_t tuzak için net hız değişimi, net uyarılma hızı ile net yakalama hızının toplamına eşit olduğundan,

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = R_n^c(t) - R_n^e(t) + R_p^e(t) - R_p^c(t) \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir ve buradan

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = (c_n + e_p)[N_t - n_n(t)] - (e_n + c_p)n_n(t) \quad (2.18)$$

ifadesi elde edilir. Bu diferansiyel denklem, yüklü taşıyıcılar bulunduran tuzak durumlarını tanımlayan bir hız denklemdir. Derin seviyelerin sayısının, net katkı sayısından daha az olması durumunda, yayınlama ve yakalama süreçlerinin yarıiletken içerisindeki serbest taşıyıcı yoğunluklarına (n_c ve p_v) etkisi ihmal edilebilir. Bu nedenle n_c ve p_v sabit olarak kabul edilebilir ve denklem (2.18) sınır koşullarına bağlı olarak çözülebilir.

2.4.3. Termal Denge Durumu

Termal denge durumunda derin seviyelerin nüfus durumlarında zamana bağlı değişimi incelendiğinde, net elektron yakalama ve yayınlama hızları $R_n^c(t)$ ile $R_n^e(t)$ eşit olmalıdır. Benzer şekilde boşluklar için de net yakalama ve yayınlama hızları $R_p^c(t)$ ile $R_p^e(t)$ eşit olmalıdır. Kararlı denge durumunda denklem (2.18) sıfıra eşit olmalıdır. Denklem (2.6) kullanılarak termal denge durumunda ortalama tuzak nüfusu, $t = \infty$ için,

$$\frac{n_n(\infty)}{N_t} = \left(\frac{c_n}{c_n + e_n} \right) = \left(\frac{e_p}{e_p + c_p} \right), \quad (2.19)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Termal denge durumunda tuzak nüfusu Fermi-Dirac dağılımı kullanılarak ta bulunabilir[70]. Boşken dejeneresi g_0 , işgal edilmişken dejeneresi g_1 olan E_t enerjili bir tuzak seviyesi için nüfus [67,68],

$$\frac{n_n(\infty)}{N_t} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.20)$$

ifadesi ile verilir ve spin dejenere seviyesi ise $\frac{g_0}{g_1} = \frac{1}{2}$ olarak alınabilir. Denklem (2.19)

ile denklem (2.20) kullanılarak elektronlar için,

$$\frac{e_n}{c_n} = \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.21)$$

ve boşluklar için de,

$$\frac{e_p}{c_p} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(\frac{E_F - E_t}{k_B T}\right) \quad (2.22)$$

ifadeleri elde edilir. Denklem (2.21) ve (2.22)'de $E_t < E_F$ için $c_n > e_n$ ve $e_p > c_p$ olmalıdır, bu da termal denge durumunda tuzak seviyelerinin elektronlar tarafından işgal edildiği anlamına gelir. Benzer şekilde $E_t > E_F$ için $c_n < e_n$ ve $e_p < c_p$ olacağından, termal denge durumunda tuzak seviyeleri boşluklar tarafından işgal edilmiş olacaktır.

Elektron ve boşluk için yakalama tesir kesitleri σ^n ve σ^p , yayınlama hızları e_n ve e_p derin seviyelerin asal özellikleri olmasına rağmen yakalama hızları c_n ve c_p katkı konsantrasyonuna bağlıdır.

Dejenere olmamış ($n_C < N_C$) bir yarıiletkende, serbest elektron yoğunluğu n_C , Boltzmann bağıntısı kullanılarak [71],

$$n_C = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.23)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada N_C , iletkenlik bandı etkin seviye yoğunluğunu E_F , Fermi enerjisini T , sıcaklığı ve k_B ise Boltzmann sabitini göstermektedir. Boşluklar için benzer şekilde dejenere olmamış ($p_V < N_V$) yarıiletken için serbest boşluk yoğunluğu p_V ,

$$p_V = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N_V , valans bandı etkin seviye yoğunluğunu göstermektedir. Denklem (2.15)'in denklem (2.21)'de yerine yazılmasıyla elektron yayınlama hızı e_n ,

$$e_n = \sigma^n \langle v_n \rangle n_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.25)$$

ve denklem (2.23) de kullanılarak,

$$\begin{aligned} e_n &= \sigma^n \langle v_n \rangle N_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F - (E_C - E_F)}{k_B T}\right) \\ &= \sigma^n \langle v_n \rangle N_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

şeklinde elde edilir. Benzer şekilde boşluk yayınlama hızı e_p , denklem (2.16) ve (2.24)'ün denklem (2.22)'de yerine yazılmasıyla,

$$e_p = \sigma^p \langle v_p \rangle N_V \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_B T}\right) \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.26) ve (2.27) termal denge durumunda sıcaklığa bağlı ancak zamandan bağımsız yayınlama hızını vermektedir. Bu denklemler termal denge durumunda, denklik sağlandığı varsayıldığından Auger ya da fonon saçılmaları gibi temel yayınlama süreçlerini içermez. Bu nedenle hız denklemi yakalama tesir kesiti ve termal hıza bağlı olarak verilmiştir. Örneğin yakalama tesir kesiti büyük olursa bunun anlamı, tuzak seviyelerinde taşıyıcı nüfusu hızla artacak ve bunun sonucunda yayınlama hızı da artacaktır.

2.4.4. Yayınlama Hızının Sıcaklığa Bağlılığı

Elektronlar için termal hızın ortalama karekökü $\langle v_n \rangle$,

$$\langle v_n \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e^*}} \quad (2.28)$$

şeklinde verilir. Burada m_e^* elektronların etkin kütlelerini ifade eder. İletkenlik bandı seviye yoğunluğu N_C [71],

$$N_C = 2M_C \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.29)$$

ifadesiyle verilir. Burada M_C , iletkenlik bandı minimumlarının sayısı h , Planck sabitidir. Denklem (2.26),

$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^n \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_B T}\right) \quad (2.30)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada γ_n sıcaklıktan bağımsız bir sabit olup,

$$\gamma_n = \sqrt{12(2\pi)^3} \frac{k_B^2}{h^3} M_C m_e^*, \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilir. Boşluklar için yayınlanma hızı da,

$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} T^2 \sigma^p \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_B T}\right), \quad (2.32)$$

ifadesine eşit olup burada γ_p ,

$$\gamma_p = \sqrt{12(2\pi)^3} \frac{k_B^2}{h^3} M_V m_p^*, \quad (2.33)$$

değerine eşittir. Denklem (2.30) ve (2.32), termal olarak uyarılmış yayınlama sürecini tanımlamaktadır ve $\ln(e_n/T^2)$ 'nin ya da $\ln(e_p/T^2)$ 'nin sıcaklığın tersinin (T^{-1}) bir fonksiyonu olarak grafiği çizildiğinde, eğimi sırasıyla $E_C - E_t$ ya da $E_t - E_V$ olan bir

doğru elde edilir. Ancak doğru sonuçlar elde etmek için yakalama tesir kesitinin sıcaklığa bağlılığı göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4.5. Azınlık ve oğunluk Taşıyıcı Tuzakları

Denklem (2.18) ve (2.20)'de $(E_C - E_t) < (E_t - E_V)$ olması durumunda $e_n > e_p$ olacağından, tuzak seviyelerinin enerji değeri, yarıiletkenin bant aralığının yarısından büyük olacaktır. Bu tip tuzak seviyelerine elektron tuzağı denir. Eğer tuzak seviyelerinin enerji değeri yarıiletkenin bant aralığının yarısından küçük ise $e_p > e_n$ olur ve bu tip tuzak seviyeleri de boşluk tuzaklarıdır. n tipi bir yarıiletkende, bir elektron tuzağının yakalayabileceği taşıyıcı, çoğunluk taşıyıcıları (elektronlar) olacağı için, elektron tuzakları çoğunluk taşıyıcı tuzakları, boşluk tuzakları da azınlık taşıyıcı tuzakları olarak adlandırılırlar. p-tipi bir yarıiletkende, boşluk tuzakları çoğunluk taşıyıcı tuzakları ve elektron tuzakları da azınlık taşıyıcı tuzaklarıdır.

2.4.6. Süreklilik Denklesinin Genel özümü

Denklem (2.18)'in genel çözümü ile taşıyıcı bulunduran tuzakların zamana bağlı davranışları elde edilir. Geçiş davranışlarını belirleyebilmek için, başlangıçtaki herhangi bir (termal dengede olmayan) durumdan termal denge durumuna geçişte, denklem (2.18) ile belirlenen tuzak işgalinin değişimi incelenebilir. Denklemde yer alan ifadeler için bazı kısaltmalar yapılarak denklem basitleştirilebilir. Örneğin elektron kazancı a ve elektron kaybı b ile ifade edilirse $a = c_n + e_p$ ve $b = e_n + c_p$ olmak üzere, denklem (2.18),

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = a[N_t - n_n(t)] - bn_n(t) \quad (2.34)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Sınır koşulları kullanılarak denklem (2.34)'in genel çözümü, $t=0$ için $n_n = n_n(0)$,

$$n_n(t) = \frac{a}{a+b} N_t - \left(\frac{a}{a+b} N_t - n_n(0) \right) \exp[-(a+b)t] \quad (2.35)$$

ifadesi ile elde edilebilir. Kararlı durum tuzak nüfusu $n_n(\infty)$, $t = \infty$ (sınır koşulu) için sağlanır ve bu durumda denklem (2.34) sıfıra eşit olacağından,

$$n_n(t) = \frac{a}{a+b} N_t \quad (2.36)$$

değerine eşittir. Daha genel olarak denklem,

$$n_n(t) = n_n(\infty) - [n_n(\infty) - n_n(0)] \exp(-t/\tau) \quad (2.37)$$

şeklinde yazılabilir. Burada τ bir zaman sabiti olup,

$$\tau^{-1} = a + b = c_n + e_n + c_p + e_p \quad (2.38)$$

ifadesine eşittir. Başlangıçta tuzak seviyelerinin tamamı işgal edilmişse denklem (2.35),

$$n_n(t) = \frac{a}{a+b} N_t - \frac{b}{a+b} N_t \exp[-(a+b)t], \quad n_n(0) = N_t \text{ iken} \quad (2.39)$$

şeklinde yazılabilir ve burada $n_n(t)$ zamanla azalır. Başlangıçta tüm tuzak seviyeleri işgal edilmemişse denklem,

$$n_n(t) = \frac{a}{a+b} N_t (1 - \exp[-(a+b)t]), \quad n_n(0) = 0 \text{ iken} \quad (2.40)$$

ifadesi ile verilir ve burada $n_n(t)$ zamanla artar.

2.4.6.1. Çoğunluk Taşıyıcı Tuzakları

Genel olarak n-tipi bir yarıiletken için $e_n \gg e_p$ ise elektron tuzakları, çoğunluk taşıyıcı tuzakları, p-tipi bir yarıiletken için $e_p \gg e_n$ ise boşluk tuzakları, çoğunluk taşıyıcı tuzakları kabul edilebilir. Bu yaklaşıklıkla denklem (2.18),

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = c_n [N_t - n_n(t)] - e_n n_n(t) \quad (2.41)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Denklem (2.37)'de verilen genel çözümdeki zaman sabiti,

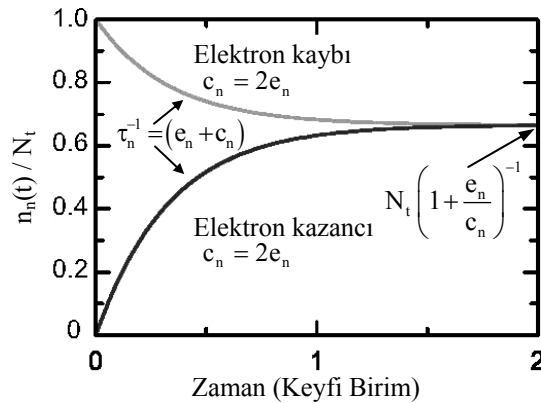
$$\tau^{-1} = e_n + c_n \quad (2.42)$$

şeklinde olacaktır. $t = \infty$ için kararlı dengeye ulaşıldığında tuzak nüfusu,

$$n_n(\infty) = N_t \left(1 + \frac{e_n}{c_n} \right)^{-1} \quad (2.43)$$

ifadesiyle bulunabilir.

Süreklilik denkleminin genel çözümü, $n_n(0)$ 'dan (başlangıçtan) $n_n(\infty)$ 'a (kararlı dengeye ulaşılan) kadar tuzaklanma nüfusundaki değişimin zaman sabiti $\tau_n = (e_n + c_n)^{-1}$ olan üssel bir şekilde olduğunu göstermektedir. Şekil 2.21'de tuzak seviyelerinin başlangıçta tamamen dolu olduğu (gri çizgi) ve tuzak seviyelerinin başlangıçta tamamen boş olduğu (siyah çizgi) durumlardaki rölaksasyon süreci gösterilmektedir. Her iki durum için de $c_n = 2e_n$ olarak seçilmiş olup ortalama tuzaklanma nüfusu $n_n(t)/N_t$, zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Başlangıçta tuzakların elektronlarla tamamen dolu olduğu durumda yayınlama süreci için zaman sabiti $\tau_n = (e_n + c_n)^{-1}$ iken, tuzakların tamamen boş olduğu durumda da elektron yakalama sürecinin aynı zaman sabitine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.21: n tipi bir yarıiletkende, elektron tuzağının elektronlarla ortalama tuzaklanma nüfusu $n_n(t)/N_t$ 'nin zamana bağlı değişimi. Başlangıçta tuzağın dolu olduğu durum gri çizgi ile, başlangıçta tuzağın boş olduğu durum siyah çizgiyle gösterilmiştir. Zaman sabiti τ_n her iki durumda da aynıdır.

2.5 YARIİLETKENLERDE KUANTUM NOKTALARI

Kuantum Noktalarından taşıyıcı yayınlanması süreci derin tuzak seviyelerin taşıyıcı yayınlanmasına benzerlikler içeren bir süreçtir. Kuantum Noktasında bulunan bir seviye taşıyıcı için çok büyük bir tuzak işlevi görebilir. Derin tuzak seviyelerini tanımlarken kullanılan ifadeler çoğu zaman Kuantum Noktalarında gerçekleşen yayınlama ve yakalama süreçleri için de geçerlidir. Örneğin, yayınlama sürecini oluşturan termal uyarılma enerjisi, Kuantum Noktasının sahip olduğu sınırlandırılmış enerji seviyeleriyle, Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin bant kenarı arasındaki enerji farkı, bağlanma enerjisi ve lokalizasyon enerjisine bağlıdır. Derin tuzak seviyesi için verilen denklemler bazı değişikliklerle Kuantum Noktası için de kullanılabilir.

Önceki denklemlerde verilen, tuzak seviyesinin enerjisi E_t , Kuantum Noktasında yer alan enerji seviyesi E_{QD} ile yer değiştirir. Tüm Kuantum Noktalarının aynı büyüklük, şekil ve kimyasal bileşime sahip oldukları varsayılarak, Kuantum Noktalarının sahip oldukları dinamik taşıyıcı yoğunluğu da N_{QD} ile gösterilmektedir.

2.5.1. Termal Uyarılma Hızı

Yarıiletken içerisindeki Kuantum Noktası yüklü taşıyıcı bulundurması nedeniyle üç boyutlu potansiyel dağılımından biraz daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Örneğin Kuantum Noktası içerisinde bulunan taşıyıcılarla, Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin sahip olduğu taşıyıcılar arasında Coulomb etkileşmesi meydana gelecektir. Bu etkileşme Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin bant yapısında bir eğilmeye neden olur. Bu bant eğilmesi, E_{CC}^1 enerjili fazladan bir potansiyel engelin oluşmasına benzetilebilir. Bu durum şekil 2.22 b’de şematik olarak gösterilmiştir.

Kuantum Noktası içerisinde bulunan taşıyıcılar arasında da bir iç Coulomb etkileşmesi meydana gelecektir. Bu iç Coulomb etkileşmesi Kuantum Noktasındaki enerji seviyelerinin E_{CC}^2 kadar bant kenarına doğru kaymasına neden olur. Kuantum Noktasında bulunan elektronlar arasındaki iç Coulomb etkileşmesi ile Kuantum Noktasında bulunan elektronlarla Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin elektronları arasındaki Coulomb etkileşmesi kıyaslandığında hangisinin daha şiddetli

olduğu tam olarak belirgin değildir. Kuantum Noktası bir nokta kusur olarak varsayıldığında iç Coulomb etkileşmesinin daha güçlü olduğu düşünülebilir. Diğer taraftan iç Coulomb yüklemesi E_{CC}^2 'in bölgesel bant eğilmesi E_{CC}^1 'e eşit olduğu ($E_{CC}^1 = E_{CC}^2 = E_{CC}$) varsayılabilir.

Coulomb yüklenme enerjisi E_{CC} , Kuantum Noktasının kapasitesi C_{QD} kullanılarak,

$$E_{CC} = \frac{e^2}{C_{QD}}, \quad (2.44)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Kuantum Noktalarının sahip olduğu kapasite, küresel ya da disk şeklinde oldukları varsayılarak hesaplanabilir. Örneğin ϵ_r dielektrik sabitli bir yarıiletken içerisinde bulunan r yarıçaplı disk şeklinde Kuantum Noktası için kapasite değeri,

$$C_{QD}^{disk} = 8\epsilon_0\epsilon_r r \quad (2.45)$$

şeklinde verilir. r yarıçaplı küre şeklindeki Kuantum Noktası için kapasite ise,

$$C_{QD}^{sphere} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r \quad (2.46)$$

ifadesi ile verilir. Coulomb yüklenme enerjisinin değeri, birçok parçacığın Kuantum Noktasına etkisi hesaba katıldığı farklı yöntemler (self-consistent) kullanılarak bulunabilir [44,72].

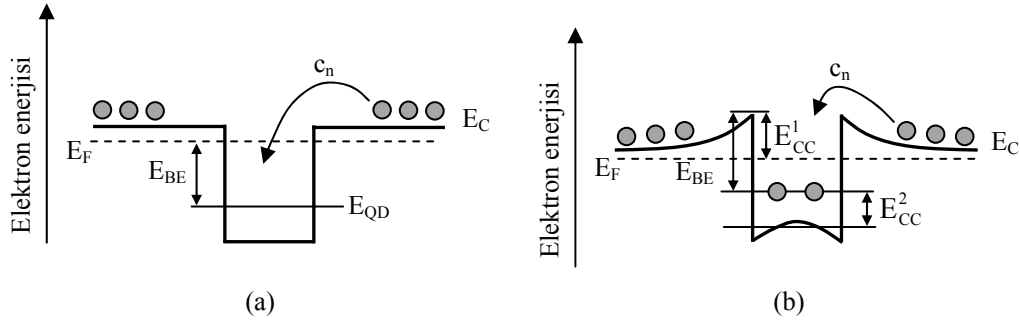
Bölgesel bant eğilmesi E_{CC} , Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin Kuantum Noktasına yakın olan bölgesindeki çoğunluk taşıyıcılarının yoğunluğuna bağlı olarak azalır. Toplam bant eğilmesi ise Kuantum Noktası içerisindeki elektron sayısına bağlı olarak doğrusal bir şekilde artar. Bant eğilmesi yakalama süreci için bir engel oluşturacağı için Kuantum Noktasındaki elektron yoğunluğu ifadesi,

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{E_{CC}}{k_B T}\right) \quad (2.47)$$

şeklinde verilir. Burada n_C iletkenlik bandı kenarındaki elektron yoğunluğudur. Bu durumda denklem (2.15)'te verilen yakalama hızı,

$$c_n(T) = \sigma^n \langle v_n \rangle n_C \exp\left(-\frac{E_{CC}}{k_B T}\right) \quad (2.48)$$

şeklinde yeniden yazılabilir.



Şekil 2.22: Kuantum Noktası için yakalama süreci. (a) E_{BE} bağlanma enerjili boş Kuantum Noktası seviyesinin elektronlar tarafından işgal edilmesi. (b) Kuantum Noktası içerisinde bulunan elektronlar nedeniyle oluşan iç Coulomb yüklenmesi sonucu E_{CC}^2 ve Kuantum Noktası içindeki ve dışındaki elektronların etkileşmesiyle oluşan Coulomb yüklenmesi sonucu E_{CC}^1 kadar bant eğilmesi gerçekleşir.

E_{CC} , elektrokimyasal potansiyele bağlı olduğundan, termal denge durumunda Fermi-Dirac dağılımı ifadesini değişikliğe uğratar. Buradan denklem (2.20),

$$\frac{n_n^{QD}(\infty)}{N_{QD}} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_{QD} - E_F + E_{CC}}{k_B T}\right)} \quad (2.49)$$

şekline dönüşür. İfade de $n_n^{QD}(\infty)$, termal denge durumunda Kuantum Noktası içindeki elektron yoğunluğunu, E_{QD} , Kuantum Noktasının sahip olduğu belirli bir enerji seviyesini ve N_{QD} , Kuantum Noktasındaki katman (sheet) elektron yoğunluğunu verir.

Denklem (2.49)'un denklem (2.19)'da yerine yazılmasıyla,

$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} \sigma^n T^2 \exp\left(-\frac{E_{BE}^n}{k_B T}\right) \quad (2.50)$$

ifadesi elde edilir. Burada γ_n , denklem (2.33)'de açık ifadesi verilen sıcaklıktan bağımsız bir sabit ve E_{BE}^n de Kuantum Noktasının sahip olduğu elektron seviyesi için bağlanma enerjisi olarak tanımlanır ve E_C iletkenlik bandı kenarı ile E_{QD} Kuantum Noktasındaki enerji seviyesinin farkına eşit olup,.

$$E_{BE}^n = E_C - E_{QD} \quad (2.51)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer şekilde boşluk bağlanma enerjisi $E_{BE}^p = E_{QD} - E_V$ olacağından boşluk yayınlama hızı,

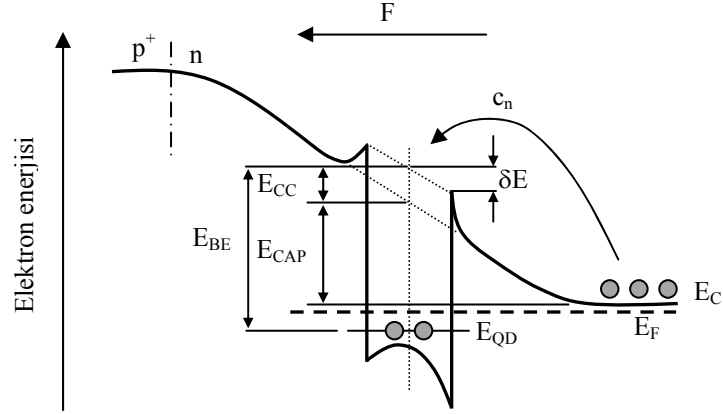
$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} \sigma^p T^2 \exp\left(-\frac{E_{BE}^p}{k_B T}\right) \quad (2.52)$$

şeklinde yazılabilir. Burada γ_p , denklem (2.33)'de açık ifadesi verilen sıcaklıktan bağımsız bir sabiti gösterir.

2.5.2. Yayınlama Sürecine Elektrik Alanın Katkısı

Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasının, kapasitesi ölçülmek istendiğinde uygulanan elektrik alanın arınma bölgesine olan etkisi göz önüne alınmalıdır. Uygulanan elektrik alan bant eğilmesine neden olacak ve yakalama bariyerini değiştirecektir. Elektrik alan altındaki yakalama bariyeri, etkin yakalama bariyeri olarak adlandırılır ve E_{CAP} olarak gösterilir. Şekil 2.23'de elektrik alan altındaki

Kuantum Noktası ve n-tipi bir yarıiletken içindeki elektronlar arasında oluşan Coulomb yüklenmesi E_{CC} şematik olarak gösterilmiştir. Kuantum Noktasının enerji seviyeleri $E_{QD} = E_{CC} + E_{CAP}$ kadar yukarı kayar. Yakalama ve yayınlama süreçlerinde bariyer Poole-Frenkel etkisiyle δE kadar azalır.



Şekil 2.23: Bir p-n eklemesinin arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasının bant yapısının şematik gösterimi. Kuantum Noktası içindeki enerji seviyeleri, Coulomb yüklenmesi ve bant eğilimi nedeniyle $E_{CC} + E_{CAP}$ kadar yukarı doğru kayar. Ayrıca Coulomb yüklenmesi ve p-n eklemesinin arınma bölgesi nedeniyle oluşan iç elektrik alan, yakalama süreci c_n için bir potansiyel bariyeri oluşturur. Poole-Frenkel etkisi de bu bariyerde δE kadar bir azalma sağlar.

Toplam yakalama bariyerinin ($E_{CC} + E_{CAP} - \delta E$) Kuantum Noktasındaki elektron sayısına etkisi, Boltzmann bağıntısı ile

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{(E_{CAP} + E_{CC} - \delta E)}{k_B T}\right) \quad (2.53)$$

şeklinde verilir. Buradan elektronlar için yakalama hızı,

$$c_n = \sigma_\infty^n \langle v \rangle n_C \exp\left(-\frac{(E_{CAP} + E_{CC} - \delta E)}{k_B T}\right) \quad (2.54)$$

olarak belirlenir. Bant eğilmesine neden olan enerji ifadeleri Fermi-Dirac fonksiyonunu da değiştireceğinden,

$$\frac{n_n^{OD}(\infty)}{N_{QD}} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_{QD} + E_{CC} + E_{CAP} - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.55)$$

ifadesi yazılabilir. Burada $n_n^{OD}(\infty)$ termal denge durumunda, elektronlarla dolu olan Kuantum Noktası seviyelerinin yoğunluğu N_{QD} ise Kuantum Noktasının katman elektron yoğunluğudur.

Denklem (2.55)'un denklem (2.19)'da yerine yazılmasıyla, uygulanan elektrik alan altında elektronların termal yayınlama hızı,

$$e_n^F(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} \sigma_\infty^n T^2 \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \quad (2.56)$$

şeklinde elde edilir. Burada E_A^n , E_{QD} enerjili Kuantum Noktası elektron seviyeleri için termal aktivasyon enerjisini göstermektedir. Poole-Frenkel etkisi hesaba katıldığında termal aktivasyon enerjisi,

$$E_A^n = (E_C - E_{QD}) - \delta E \quad (2.57)$$

şeklinde olmalıdır. Elektronlarınkine benzer şekilde çoğunluk taşıyıcıları olarak boşluklar için yayınlama hızı da,

$$e_p^F(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} \sigma_\infty^p T^2 \exp\left(-\frac{E_A^p}{k_B T}\right) \quad (2.58)$$

şeklinde bulunur. Burada E_A^p , E_{QD} enerjili Kuantum Noktası boşluk seviyeleri için termal aktivasyon enerjisini göstermektedir. Poole-Frenkel etkisi boşluk bağlanma enerjisini azaltacağından,

$$E_A^p = (E_{QD} - E_V) - \delta E \quad (2.59)$$

ifadesi yazılabilir.

2.5.3. Saf Tünelleme ve Fononlar Yardımıyla Tünelleme

Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan, L genişliğinde ve üçgen bariyer yüksekliği E_{BE} olan Kuantum Noktasının bir F elektrik alan altında oluşacak saf tünelleme hızı e^T ,

$$e^T = \frac{\hbar\pi}{2m^*L^2} \exp\left(-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{\Delta E_{BE}^{3/2}}{eF}\right) \quad (2.60)$$

ifadesi ile verilir.

Elektrik alan altındaki bir Kuantum Noktasından taşıyıcı yayınlama süreci çoğu zaman tünelleme ve termal uyarılma süreçlerinin bir kombinasyonu şeklindedir. Bu nedenle kapasite ölçümleriyle elde edilen aktivasyon enerjisi E_A , bağlanma enerjisinden farklı olabilir. Şekil 2.24 a'da Kuantum Noktasında bulunan elektronların elektrik alan altında bir üçgen potansiyel bariyer üzerinden tünelleme yoluyla ve şekil 2.24 b'de fononlar yardımıyla tünelleme yaparak yayınlanması süreçleri şematik olarak gösterilmiştir.

Toplam yayınlama hızı elektrik alanın şiddeti ile üçgen bariyerin geçirgenlik faktörünün çarpımına eşittir [53].

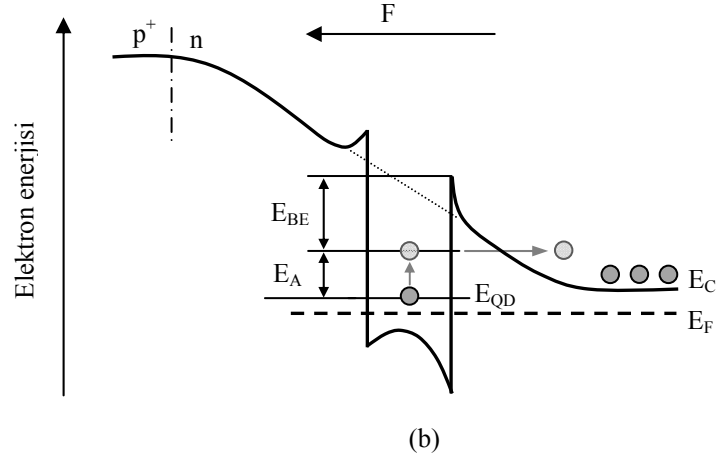
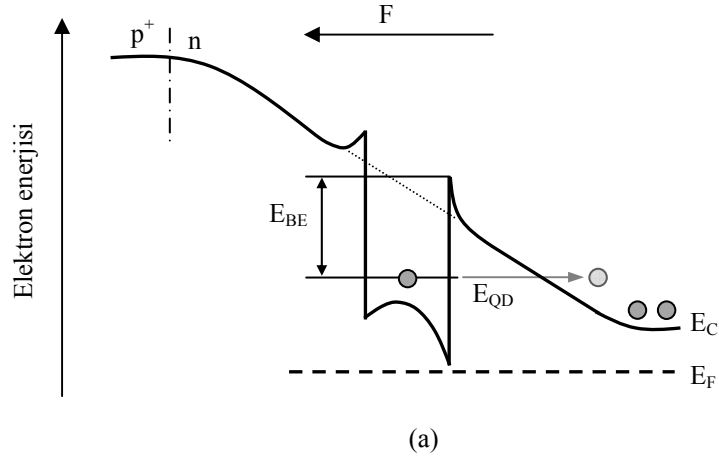
Elektron için fononlar yardımıyla tünelleme hızı,

$$e^P(T, F) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma_{T, F=\infty}^n \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{4}{3\hbar F e} \sqrt{2m_e^* E_{BE}^3}\right) \quad (2.61)$$

şeklinde yazılır. Burada m_e^* , elektron etkin kütlelerini F , uygulanan elektrik alanı ve $\sigma_{T, F=\infty}^n$ ise sıcaklığın ve uygulanan elektrik alanının çok yüksek olduğu durumdaki yakalama tesir kesitini göstermektedir. Yakalama tesir kesitinin uygulanan elektrik alana bağlılığı,

$$\sigma_{\infty}^n(F) = \sigma_{T, F=\infty}^n \exp\left(-\frac{4}{3\hbar F e} \sqrt{2m_e^* E_{BE}^3}\right) \quad (2.62)$$

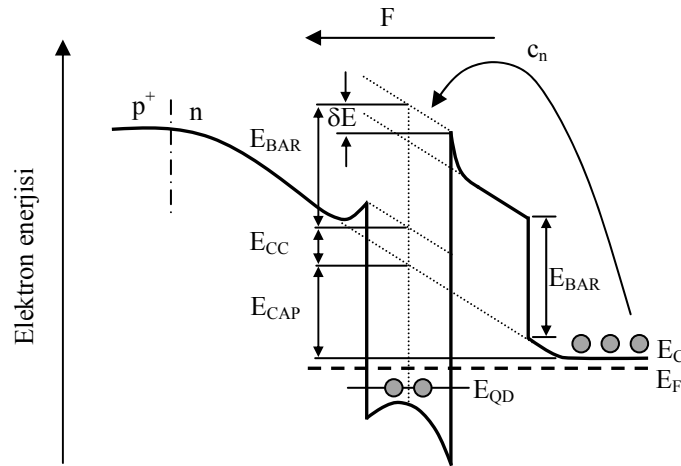
ifadesi ile verilir. Burada $\sigma_{T,F=\infty}^n$ sıcaklığın ve uygulanan elektrik alanın her ikisinin de sonsuz olduğu durumda yakalama tesir kesitini gösterir ve bu ifade sıcaklığa ve elektrik alana bağlı olarak değişmez. $\sigma_{\infty}^n(F)$ ise sıcaklıktan bağımsız ancak uygulanan elektrik alana bağlıdır.



Şekil 2.24: (a) Bir p-n eklemine arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasından tünelleme ve (b) Fononlar yardımıyla tünelleme yoluyla elektron yayınlanması. Fononlar yardımıyla tünellemede E_{QD} enerji seviyesinde bulunan elektron öncelikle termal aktivasyon ile E_A kadar bir enerji kazanır ve ardından üçgen bariyerden tünelleme yapabilir.

2.5.4. Kuantum Noktası Civarında Bir Bariyer Bulunma Durumu

Taşıyıcıların Kuantum Noktası tarafından yakalanmasına ya da Kuantum Noktasından yayınlanmasına sınırlama getirmek amacıyla Kuantum Noktası civarına potansiyel bariyeri oluşturmak mümkündür. Bariyer oluşturmak için Kuantum Noktası civarında bant aralığı farklı malzemeler büyütülebilir. Şekil 2.25’de Kuantum Noktası civarında bulunan bir potansiyel bariyerin Kuantum Noktasına etkisi şematik olarak gösterilmiştir. Burada Kuantum Noktası enerji seviyesinde (E_{QD}) bulunan bir elektronun yayınlama sürecinde karşılaşıcağı bariyer (yayınlama bariyeri) $E_{BAR} - \delta E$ değerine eşit iken, yakalama sürecinde karşılaşıcağı bariyer (yakalama bariyeri) $E_{CC} + E_{CAP} + E_{BAR} - \delta E$ değerine eşit olur ve bariyerin Kuantum Noktası enerji seviyelerine bir etkisi yoktur.



Şekil 2.25: Bir p-n eklemesinin arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktası ve Kuantum Noktasının hemen altında bulunan bariyer tabakasının şematik gösterimi. Elektronlar için yayınlama bariyeri $E_{BAR} - \delta E$ farkına eşit iken, yakalama bariyeri $E_{CC} + E_{CAP} + E_{BAR} + (-\delta E)$ toplamına eşittir.

Denklem (2.55)’de verilen yakalama hızı, bir bariyerin var olduğu durumda,

$$c_n = \sigma_\infty^n \langle v \rangle n_C \exp\left(-\frac{(E_{CAP} + E_{CC} + E_{BAR} - \delta E)}{k_B T}\right) \quad (2.63)$$

şeklinde verilir. Benzer şekilde bariyerin var olduğu durumda elektron yayınlaması da,

$$e_n^{BAR}(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma_\infty^n \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \quad (2.64)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Burada, Kuantum Noktasındaki belirli bir E_{QD} enerji seviyesinde bulunan elektronun E_{BAR} enerjili bariyer üzerinden termal uyarılma enerjisi, E_A^n ile gösterilmektedir. E_A^n değerinin belirlenmesi için Kuantum Noktasında bulunan seviyenin bağlanma enerjisi ($E_C - E_{QD}$) ile bariyer yüksekliği toplanır ve Poole-Frenkel enerjisi bu toplamdan çıkarılarak

$$E_A^n = (E_C - E_{QD}^n) + E_{BAR} - \delta E \quad (2.65)$$

şeklinde bulunur.

Benzer şekilde boşlukların çoğunluk taşıyıcılar olması durumunda yakalama hızı,

$$e_p^{BAR}(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} T^2 \sigma_\infty^p \exp\left(-\frac{E_A^p}{k_B T}\right) \quad (2.66)$$

şeklinindedir. Burada E_A^p , Kuantum Noktasındaki belirli bir E_{QD} enerji seviyesinde bulunan boşluğun E_{BAR} enerjili bariyer üzerinden termal aktivasyon enerjisidir. E_A^p değeri,

$$E_A^p = (E_{QD}^p - E_V) + E_{BAR} - \delta E \quad (2.67)$$

ifadesi ile bulunabilir.

2.5.5. Yüklü Taşıyıcıların Yakalanması Süreci

Bir Kuantum Noktasının elektron yakalama hızı, derin tuzak seviyelerine benzer şekilde,

$$c_n = \sigma_\infty^n \langle \nu \rangle n_{QD} \quad (2.68)$$

şeklinde yazılabilir. Burada σ_{∞}^n , sıcaklıktan bağımsız yakalama tesir kesitini, n_{QD} ise Kuantum Noktasındaki elektron yoğunluğunu göstermektedir.

Yakalama sürecini belirlemek için yapılan bir kapasite ölçümünde, Kuantum Noktasındaki elektron yoğunluğu, termal aktivasyon bariyeri nedeniyle $E_A^c = E_{CAP} + E_{CC} - \delta E$ kadar azalır. Buradan Kuantum Noktasındaki elektron yoğunluğu,

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \quad (2.69)$$

olur. İfadede n_C , iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğudur. Termal aktivasyon bariyerinin ($E_{A,Capt}^n$) bulunduğu durumda yakalama hızı için,

$$c_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma_{\infty}^n \exp\left(-\frac{E_{A,Capt}^n}{k_B T}\right) \quad (2.70)$$

denklemini yazılabilir. Burada $E_{A,Capt}^n$, elektronun yakalama bariyeri üzerinden aşarak Kuantum Noktası içerisindeki bir seviye tarafından yakalanabilmesi için gerekli termal aktivasyon enerjisini ifade eder ve

$$E_{A,Capt}^n = (E_C - E_F) + E_{CAP} + E_{CC} - \delta E \quad (2.71)$$

şeklinde verilir. Benzer şekilde boşlukların çoğunluk taşıyıcıları olduğu durumda ise

$$c_p(T) = \gamma_p \frac{g_1}{g_0} T^2 \sigma_{\infty}^p \exp\left(-\frac{E_{A,Capt}^p}{k_B T}\right) \quad (2.72)$$

ifadesi kullanılarak yakalama hızı bulunabilir. $E_{A,Capt}^p$, boşluk yakalama süreci için gereken termal aktivasyon enerjisidir ve

$$E_{A,Capt}^p = (E_F - E_V) + E_{CAP} + E_{CC} - \delta E \quad (2.73)$$

değerine eşittir.

2.6 EKLEMLER

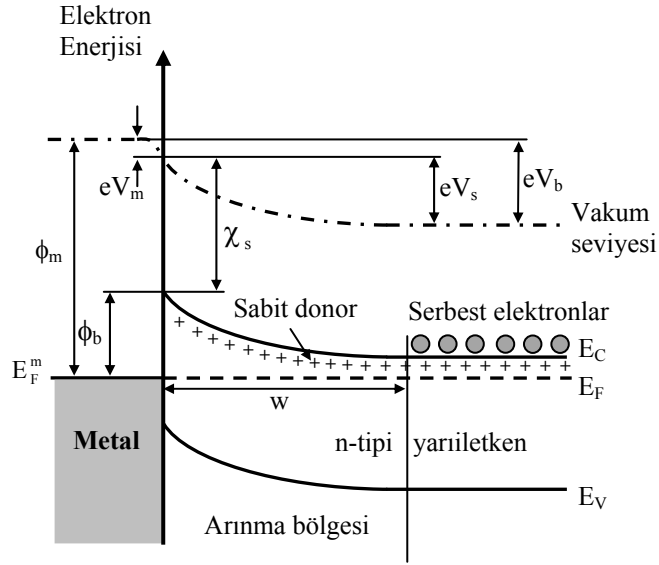
2.6.1. Arınma Bölgesi

Bir metalin ve yarıiletkenin (ya da farklı katkı konsantrasyonuna sahip iki yarıiletkenin) Fermi seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki fark genellikle aynı değildir. Eğer bir metal ile bir yarıiletken (ya da farklı katkı konsantrasyonuna sahip iki yarıiletken) elektriksel kontakla bir araya getirilirse, termodinamik denge sağlanana kadar serbest taşıyıcı alışverişi olur ve Fermi enerjisi E_F , tüm yapı boyunca eşitlenir. Sonuçta, ara yüzeye yakın bölgede serbest taşıyıcı bulunmaz sadece iyonize olmuş donör ya da akseptör atomları bulunur. Bu bölge serbest taşıyıcılar arındırıldığı için “arınma bölgesi” olarak adlandırılır. Arınma bölgesinin genişliği, iki malzeme arasındaki potansiyel farkına ve katkı konsantrasyonuna bağlıdır ve uygulanan dış elektrik alan yardımıyla ayarlanabilir. Bir metal-yarıiletken kontağı, Schottky modeli ile tanımlanır ve Schottky kontağı olarak bilinir. n tipi bir yarıiletkenle p tipi bir yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşan kontak ise p-n eklemi olarak adlandırılır [71,72].

2.6.2. Schottky Kontakı

Bir metal-yarıiletken kontağı, genellikle Schottky modeli çerçevesinde tanımlanır. Bu modelde metal içerisindeki bariyerin yüksekliği ϕ_b , uygulanan elektrik alandan bağımsız ya da çok az bağımlıdır. Schottky modelinde enerji-bant diyagramı oluşturulurken, serbest elektronun malzemedan ayrılma enerji seviyesi olarak tanımlanan vakum seviyesi referans olarak alınmıştır.

Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , bir elektronu metalin Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir. Yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarında bulunan bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji de elektron afinitesi (affinity) χ_s olarak tanımlanır. Metal-yarıiletken ara yüzeyinde vakum seviyeleri eşittir. Termal denge durumunda metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşit olmalıdır. Schottky kontağı için bant diyagramı şekil 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.26: Bir metal-yarıiletken Schottky kontağı için bant diyagramı. Arınma bölgesi genişliği w yarıiletkenin katkı konsantrasyonuna bağlıdır. Bant eğilmesi nedeniyle bir V_b iç potansiyeli oluşmaktadır.

Metal-yarıiletken ara yüzeyinde vakum seviyeleri aynı olduğundan, burada metalin Fermi seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı arasında bir enerji farkı oluşacaktır. Bu fark, bariyer yüksekliği ϕ_b olarak tanımlanır ve

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s - eV_m \quad (2.74)$$

ifadesi ile verilir. Metalde seviye yoğunluğu yüksek olduğu için bant eğilmesi çok küçük olur ve denklem (2.74)'de yer alan eV_m ifadesi ihmal edilebilir. Bu nedenle Schottky bariyer yüksekliği genellikle,

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad (2.75)$$

şeklinde verilir. Metal-yarıiletken ara yüzeyinden yarıiletkene doğru gidildikçe, iletkenlik bandının enerji değeri azalacak ve arınma bölge sonuna gelindiğinde sabit kalacaktır. Bant eğilmesi serbest taşıyıcıların uzaklaşmasına neden olur ve geride sadece iyonize olmuş donör atomları nedeniyle sabit pozitif yük kalır. Arınma bölgesinin bittiği yerde iletkenlik bandı düz bant (flat band) şeklinde olur. Arınma bölgesinin genişliği w , net iyonize olmuş yük yoğunluğuna bağlı olup Poisson denklemiyle bulunabilir.

Metaldeki seviye yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğundan çok fazla olduğu için arınma bölgesinin metal içerisindeki genişliği, yarıiletken içerisindeki genişliğinden çok

küçük olacaktır. Bu nedenle metal için kontak potansiyeli V_m , yarıiletken için kontak potansiyeli V_s ile kıyaslandığında oldukça küçük olur ve ihmal edilebilir.

Schottky kontağında sıfır beslemede toplam bant eğilmesi V_b “iç potansiyel” ya da “iç voltaj” olarak adlandırılır ve

$$eV_b \approx eV_s = \phi_m - \chi_s - (E_C - E_F) = \phi_b - (E_C - E_F) \quad (2.76)$$

ifadesi ile verilir.

2.6.3. p-n Eklemi

Bir p-n ekleminin bant diyagramı şekil 2.27’de gösterilmiştir. Eklem her iki tarafında da vakum seviyesi süreklidir. p ve n tipi katkıların eşit olduğu varsayılırsa her iki bölge için χ_s eşit olur. Termal denge durumunda eklem boyunca Fermi seviyesi eşit olmalıdır. Bant eğilmesi nedeniyle n-tipi bölgedeki iletkenlik bandının Fermi seviyesine uzaklığı ile p-tipi bölgedeki iletkenlik bandının Fermi seviyesine olan uzaklığı farklı olacaktır. Şekil 2.27’de gösterilen eklem için,

$$(E_C^p - E_F) + \chi_s = eV_b + \chi_s + (E_C^n - E_F) \quad (2.77)$$

ifadesi yazılabilir. Burada “p” ve “n” üst indisleri sırasıyla p ve n tipi katkılanmış bölgedeki değerleri göstermektedir. p-n eklemi için iç potansiyel de,

$$eV_b = E_g - (E_F - E_V^p) - (E_C^n - E_F) \quad (2.78)$$

şeklinde yazılabilir. İfadede E_g , yarıiletkenin bant aralığını göstermektedir. İç potansiyel p-tipi ile n-tipi bölgelerdeki toplam elektrostatik potansiyel farkına eşit olup sıcaklığa bağlı olarak,

$$V_b = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.79)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_a ve N_d sırasıyla sabit akseptör (alıcı) ve donör (verici) yük yoğunlukları ve n_i ise asal taşıyıcı konsantrasyonu olup,

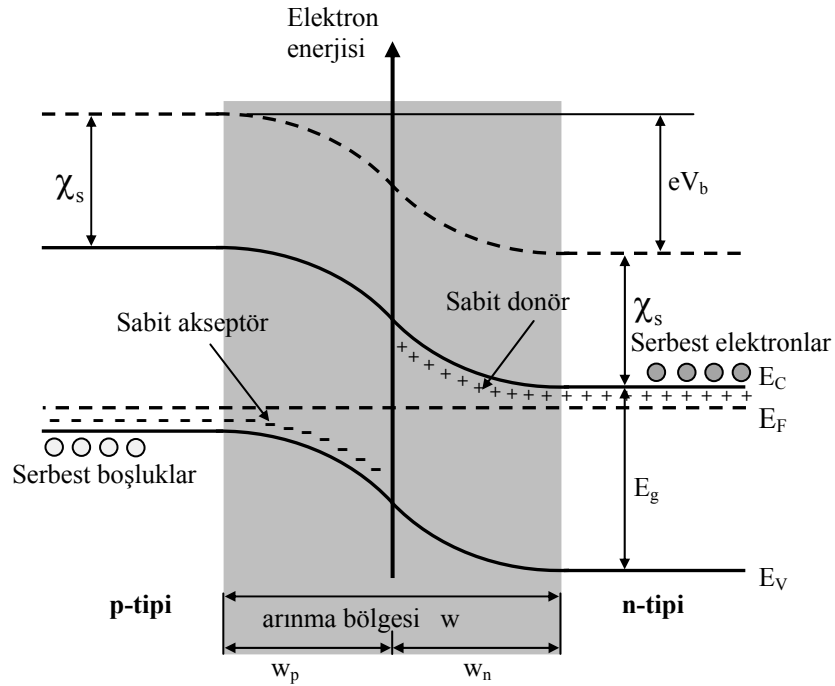
$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.80)$$

ifadesine eşittir. Burada N_C ve N_V sırasıyla iletkenlik bandı ve valans bandı seviye yoğunluklarını göstermektedir. Örneğin GaAs için katkı konsantrasyonu (p ve n tipi) 10^{17}cm^{-3} olursa iç potansiyel V_b , oda sıcaklığında 1.3V olacaktır.

Bir p-n eklemde sabit donör ve akseptör yükleri bant eğilmesine neden olduğundan kontakın her iki yanında arınma bölgesi meydana gelir. Yük nötrlüğü (charge neutrality) olması gerektiğinden,

$$N_a w_p = N_d w_n \quad (2.81)$$

ifadesi yazılabilir.



Şekil 2.27: Bir p-n eklemnin enerji-bant diyagramı.

Katkı konsantrasyonu eşit alınırsa arınma bölgesinin p-tipi ve n-tipi bölgelerdeki genişliği de birbirine yakın olacaktır. Ancak malzemenin elektriksel özelliklerini

belirlemek için yapılan kapasitans deneylerinde, arınma bölgesi p-n eklemının sadece bir bölgesinde oluşacak şekilde eklemın bir bölgesinin katkı konsantrasyonunun diğerinden yüksek olması sağlanır. Bu tür p-n eklemının arınma bölgesi Schottky kontağın arınma bölgesine benzer. Bir bölgenin katkı konsantrasyonu daha fazla ise (aşırı katkılanmış ise) o bölge “+” üst indisi ile gösterilir. $N_a \gg N_d$ ya da $N_d \gg N_a$ olduğunda eklem sırasıyla $p^+ - n$ ve $n^+ - p$ şeklinde gösterilir.

2.6.4. Arınma Bölgesi Genişliği

Bir p-n eklemının arınma bölgesi genişliği, uygulanan dış elektrik alanla değiştirilebilir. Örneğin p-n eklemine bir V_a geri besleme voltajı uygulandığında, eklemın iç potansiyeli,

$$V = V_a + V_b \quad (2.82)$$

ifadesi ile bulunur. Burada V_b dış elektrik alan uygulanmadığında (sıfır besleme) eklemın sahip olduğu iç potansiyeldir. Arınma bölgesi genişliği, Poisson denklemi kullanılarak hesaplanabilir. ψ elektrostatik potansiyel olmak üzere,

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (2.83)$$

ifadesi yazılabilir. Burada F elektrik alanı, ϵ_0 ve ϵ sırasıyla boşluğun ve yarıiletkenin dielektrik sabitlerini göstermektedir. Başlangıçta donörler ve akseptörler iyonize olmuşsa buradan oluşacak yük yoğunluğu sırasıyla eN_d ve eN_a olacağından,

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{eN_d}{\epsilon \epsilon_0}, \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.84)$$

ifadesi yazılabilir. Burada w_n , n-tipi bölgedeki arınma bölgesi genişliğidir. Bir Schottky kontağı ya da $p^+ - n$ eklemi için denklem (2.83),

$$F(x) = F_0 + \frac{eN_d x}{\epsilon \epsilon_0}, \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.85)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada $x < 0$ ve $x > w_n$ için $F(x) = 0$ olacağından, integral sabiti F_0 , sınır koşulları (arınma bölgesi kenarında bant eğilmesi olmadığı göz önüne alınarak) kullanılarak,

$$F_0 = -\frac{eN_d w_n}{\epsilon \epsilon_0} \quad (2.86)$$

şeklinde bulunur. Burada F_0 , eklem ara yüzeyindeki elektrik alanı göstermekte olup maksimum değerdedir. Arınma bölgesinin n-tipi yarıiletken tarafında kalan kısmında oluşacak elektrik alan,

$$F(x) = \frac{eN_d}{\epsilon \epsilon_0} (x - w_n), \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.87)$$

ifadesi ile verilir. Benzer şekilde arınma bölgesinin p-tipi yarıiletken tarafında kalan kısmında oluşacak elektrik alan da,

$$F(x) = \frac{eN_a}{\epsilon \epsilon_0} (x + w_p), \quad -w_p \leq x \leq 0 \quad (2.88)$$

şeklinde yazılabilir.

Arınma bölgesinin n-tipi yarıiletken tarafında kalan kısmındaki potansiyel dağılımı denklem (2.87) kullanılarak,

$$\psi(x) = \int_0^x \frac{eN_d}{\epsilon \epsilon_0} (x - w_n) dx = \frac{eN_d w_n}{\epsilon \epsilon_0} \left(x - \frac{x^2}{2w_n} \right) + \psi(0) \quad (2.89)$$

şeklinde bulunur. Bir p^+ - n eklemi için bant eğilmesi sadece n-tipi bölgede olacaktır. Kontak potansiyeli iç potansiyele eşit olduğunda,

$$\psi(0) = -V = -(V_b - V_a) \quad (2.90)$$

ifadesi yazılabilir ve buradan,

$$V = V_b + V_a = \frac{eN_d}{2\epsilon\epsilon_0} w_n^2 \quad (2.91)$$

eşitliği elde edilir. p^+ - n eklemi için arınma bölgesi genişliği de,

$$w_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 V}{eN_d}} \quad (2.92)$$

şeklinde hesaplanabilir. Hem p-tipi bölgede hem de n-tipi bölgede arınma bölgesinin oluştuğu bir p-n eklemi için iç potansiyel,

$$V = V_b + V_a = \frac{eN_d}{2\epsilon\epsilon_0} w_n^2 + \frac{eN_a}{2\epsilon\epsilon_0} w_p^2 \quad (2.93)$$

ve arınma bölgesi genişliği,

$$w = (w_n + w_p) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{eN_d} V \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (2.94)$$

ifadesi ile bulunur.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. KAPASİTANS SPEKTROSKOPİSİ

3.1.1. Arınma Bölgesi Kapasitesi

Bir kapasite, paralel iki metal levha (yük tutucu) ve aralarındaki dielektrik alandan meydana gelir. Bir p-n eklemine ise yükler (iyonize olmuş donör ya da akseptörler) arınma (dielektrik) bölgesinin içinde bulunmaktadır. İyonize olmuş donör sayısı n-tipi yarıiletken tarafında kalan arınma bölgesi genişliğine (w_n) doğrusal olarak bağlı iken, arınma bölgesi genişliği de uygulanan voltajın karekökü ile orantılıdır. Dolayısıyla, kapasite değerinin uygulanan voltaja bağlılığı doğrusal olmayıp küçük bir ΔV besleme voltajı için diferansiyel olarak,

$$C = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV} \quad (3.1)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada C kapasite ve Q yük değerleri, birim alan başına verilmektedir. Denklem (2.92) kullanılarak alanı A olan bir p^+ - n eklemine (Schottky kontağının) arınma bölgesinde bulunan toplam yük sayısı,

$$Q = eN_d A w_n (V) = A \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 N_d V} \quad (3.2)$$

ve kapasite değeri de,

$$C(V) = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_V = A \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 e N_d}{2V}} = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{w_n} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılır.

3.1.2. Kapasitenin Voltaja Bağlılığı

Bir p-n eklemde kapasite değeri arınma bölgesi genişliğine, arınma bölgesi genişliği de katkı konsantrasyonuna ve uygulanan besleme voltajına bağlıdır. Bu bağımlılık nedeni ile Kapasite-Voltaj (C-V) ölçümleri yarıiletkenlerin katkı konsantrasyonlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [73-76].

Denklem (3.3)'te verilen kapasite ifadesinde yer alan w_n 'in açık ifadesi yerine yazılırsa,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2V}{A^2 \epsilon \epsilon_0 e N_d} \quad (3.4)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden $1/C^2$ ile V 'nin değişiminin sabit katkı konsantrasyonu için doğrusal olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Buradan N_d , katkı konsantrasyonu Kapasite-Voltaj ölçümleriyle elde edilebilir ve

$$N_d = \frac{2}{A^2 \epsilon \epsilon_0 e} \left(\frac{d(1/C^2)}{dV} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

şeklinde verilir. Burada $1/C^2 = 0$ için uygulanan besleme voltajı iç voltaja karşılık gelir. Değişken katkı konsantrasyonu söz konusu olsa bile, yük değişimi sadece arınma bölgesi kenarında olduğundan, arınma bölgesi genişliği,

$$w_n = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(V)} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir ve denklem (3.3) ve denklem (3.6) kullanılarak katkılama-arınma bölgesi genişliği bağımlılığı değişimleri (C-V ölçüm sonuçlarından) belirlenebilir.

Ancak ρ yük yoğunluğunun sabit olmayıp arınma bölgesi genişliğine bağlı olması nedeniyle, C kapasite ve w_n arınma bölgesi genişliği değerleri denklem (2.92)'den elde edilenlerden farklılık gösterebilir. Arınma bölgesi genişliğinin belirlenmesi için daha genel bir ifadeyle eklem bölgesindeki toplam potansiyel düşmesi,

$$V = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \int_0^{w_n} x\rho(x) dx \quad (3.7)$$

şeklinde verilir.

Arınma bölgesi yaklaşımı üzerine kurulu “arınma yaklaşımı” (depletion approximation) tam olarak doğru sonuçlar vermeyebilir. Termal denge durumunda dejenere olmamış n-tipi bir yarıiletkenin serbest taşıyıcı yoğunluğu n , Boltzmann bağıntısıyla,

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \quad (3.8)$$

şeklinde verilir. Burada T sıcaklığı, N_C iletkenlik bandı etkin seviye yoğunluğunu, E_C ve E_F de sırasıyla iletkenlik bandı kenarının enerjisini ve Fermi enerjisini göstermektedir. Benzer şekilde N_V , valans bandı etkin seviye yoğunluğunu E_V , iletkenlik bandı kenarının enerjisi olmak üzere boşluklar için de,

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad (3.9)$$

ifadesi yazılabilir. Sabit yük yoğunluğu ($\rho = eN_d$) yerine,

$$\rho(x) = e(N_d - n(x)) \quad (3.10)$$

şeklinde değişken yük yoğunluğu ifadesi kullanılabilir. Burada $n(x)$ ifadesi yerine yazılırsa [73],

$$\rho(x) = eN_d \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w-x}{L_D}\right)^2\right] \right\} \quad (3.11)$$

ifadesi elde edilir. Burada L_D Debye uzunlu olup,

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 k_B T}{e^2 N_d}} \quad (3.12)$$

ifadesiyle verilir. Debye uzunluğu, serbest taşıyıcıların sabit yüklere olan uzaklığını göstermektedir. Arınma yaklaşımının geçerli olabilmesi için arınma bölgesi kenarının yeteri kadar ince olması ve arınma bölgesi genişliğinin Debye uzunluğundan büyük olması ($w \gg L_D$) gereklidir.

3.2. BÜYÜTME TEKNİKLERİ

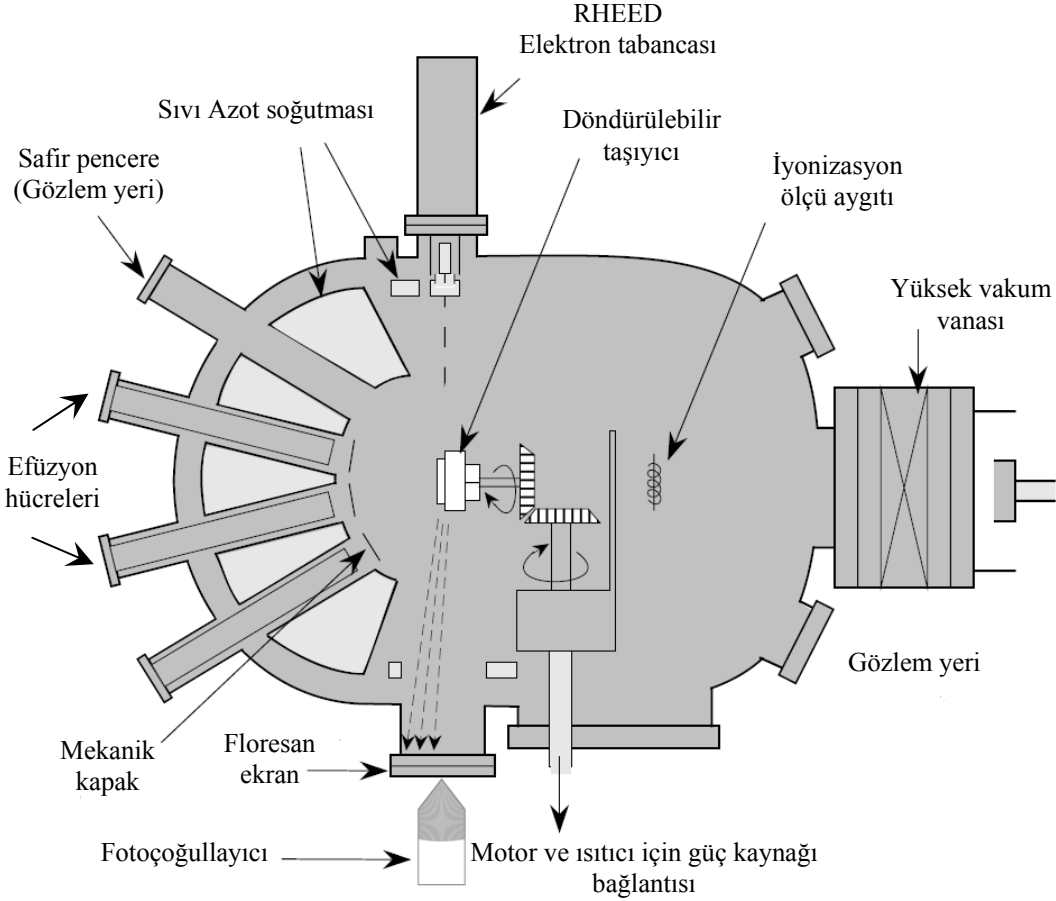
Epitaksi, tek kristal bir yarıiletken üzerine, kalınlık ve katkı miktarı kontrol edilerek, düzenli atomik tabakalar halinde yine tek kristal bir yapının büyütülmesidir. Epitaksiyel büyütme tekniklerinde son yıllarda kaydedilen ilerlemeler teknolojinin gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Epitaksiyel büyütme tekniği, esas olarak külçe kristallerdekenden daha üstün malzeme özellikleri elde etmek amacıyla kullanılır. Safılık, katkı ve kalınlık profilleri çok iyi kontrol edilebildiği için günümüzde, bu tekniklerden, heteroeklem yapılar, Kuantum Noktaları, ultrince filmler ve çoklu kuantum kuyuları oluşturmada yararlanılmaktadır. Epitaksinin birçok şekli vardır. Bunlardan en yaygın olanları, MBE (Molecular Beam Epitaxy: Moleküler Işın Epitaksisi), MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma ile Biriktirme) ve LPE (Liquid Phase Epitaxy: Sıvı Faz Epitaksi)'dir [21,77-79]. Bu çalışmada kullanılan örnekler, MOCVD ve MBE tekniği ile büyütüldüklerinden burada sadece bu tekniklerden kısaca bahsedilecektir.

3.2.1 Moleküler Işın Epitaksisi (MBE)

MBE sistemi 1970'li yıllarda geliştirilmiş olup günümüzde yüksek kalitede düşük boyutlu yarıiletken üretiminde tercih edilen epitaksiyel büyütme tekniklerinden biridir. MBE sistemi ile hemen hemen her yarıiletken sistemi büyütülebilir. Büyütme $\approx 10^{-11}$ torr basınçta (yüksek vakum ortamında) yapılır.

Şekil 3.1'de gösterilen MBE sisteminde, büyütülecek malzeme Knudsen efüzyon hücreleri olarak adlandırılan buharlaştırma hücrelerinde buharlaştırılarak demet haline getirilerek taşıyıcı üzerine gönderilir. Her biri ayrı bir kapakla kontrol edilen efüzyon hücrelerinde, büyütülmek istenilen kristali oluşturacak ev sahibi atomlar buharlaştırıldığı gibi katkı olarak kullanılacak atomlar da buharlaştırılabilir. Uygun

hücre ve taşıyıcı sıcaklığı seçilerek, istenilen kimyasal kompozisyona sahip epitaksiyel tabaka 1MLs^{-1} (saniyede 1 tek tabaka) hızla büyütülebilir. Bu da yaklaşık saatte $1\mu\text{m}$ kalınlıkta büyütme yapılacağını gösterir.

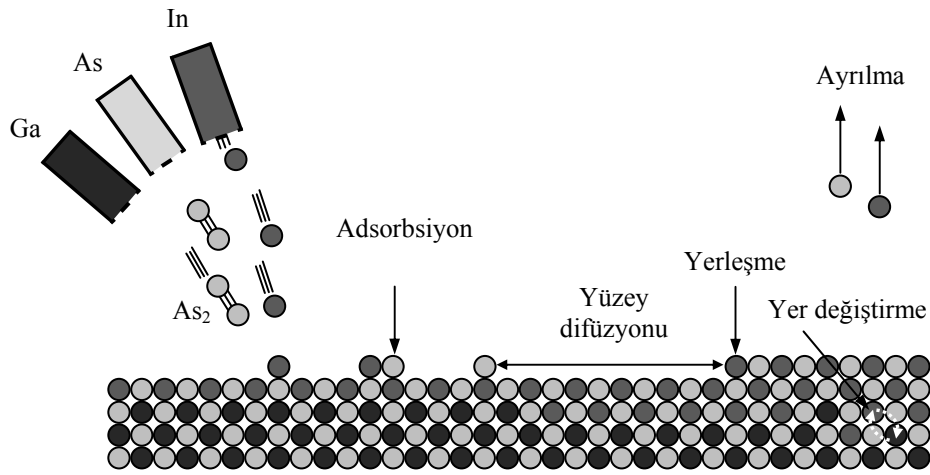


Şekil 3.1: Moleküler Işın Epitaksisi (MBE) sistemi.

Büyütülecek olan kristal malzemenin çok iyi bir kaliteye sahip olması için taşıyıcı sıcaklığı 400°C - 700°C arasında tutulur. Bu sıcaklık, vakum sistemi içinde sürekli olarak bulunan bir ısıtıcıyla sağlanmaktadır. Ayrıca nitelikli büyütmenin yapılabilmesi için taşıyıcı yüzeyinin her türlü kristalografik ve diğer kusurlardan arındırılması gerekmektedir. Bu işlem için oksidi yok eden kimyasal aşındırma işlemi uygulanır [80,81].

MBE tekniğinde efüzyon hücreleri simetrik olmayan bir şekilde yerleştirildiğinden, her bir malzemenin taşıyıcı üzerindeki dağılımı farklı olacaktır ve bu durum büyütülen

filmlerin kalınlık ve kimyasal kompozisyonunda değişikliklere neden olacaktır. Bu sorun büyütme sürecinde örneğin döndürülmesi ile giderilebilir. Farklı efüzyon hücrelerinden çıkan moleküler ışınlar ısıtılmış taşıyıcı üzerinde kesişirler. Moleküllerin sahip olduğu uzun ortalama serbest yol nedeniyle moleküller taşıyıcı üzerine gelmeden önce bir etkileşme meydana gelmez. Taşıyıcı üzerinde gerçekleşen epitaksiyel büyütme süreci şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: MBE tekniği ile büyütme yapılırken meydana gelen süreçlerin şematik gösterimi.

MBE tekniği ile büyütmede meydana gelen en önemli yüzey süreçleri;

- Taşıyıcı yüzeyine çarpan atom ya da moleküllerin adsorbsiyonu.
- Yüzey difüzyonu ve atomların yüzeyden ayrılması ya da önceden yerleşmiş atomlarla yer değiştirmeleri.
- Atomların büyütme yüzeyinde kristal örgü içine yerleşmesi.
- Kristal içine yerleşmiş atomların termal uyarılma ile kristalden ayrılmaması,

olarak sıralanabilir.

MBE ile büyütme yapılırken büyütme sıcaklığının uygun olarak ayarlanması çok önemlidir. Düşük sıcaklıklarda büyütme yapıldığında yüzey difüzyon süreçleri yetersiz olacak, yüksek sıcaklıklarda büyütme yapıldığında da taşıyıcı yüzeyinde gerçekleşen

adsorbsiyon-ayrılma süreçlerinin dengesi bozulacaktır. Genellikle MBE ile büyütme düşük sıcaklık limitlerine yakın yapılır. Bu sıcaklık değerinde yüzey difüzyonu adsorbsiyon sürecinden hızlı olmalı ve atomların yüzeyden ayrılmaları da ihmal edilebilmelidir.

MBE tekniği ile InAs/GaAs Kuantum Noktası sistemi büyütülürken, GaAs (001) taşıyıcı sıcaklığı 480 - 610 °C arasında tutulur [82,83]. InAs Kuantum Noktalarının büyütülmesi ise 420 - 510 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilir.

MBE tekniği, epitaksiyel büyütme teknikleri arasında en basit ve oldukça kontrol edilebilir olanıdır. Aynı zamanda yüksek vakum değerlerinde büyütme yapıldığından oluşabilecek sorunlar azaltılmış olur. InAs için tipik büyütme hızı $0.02-0.1\text{MLs}^{-1}$ aralığında ve GaAs için de $0.2-0.5\text{MLs}^{-1}$ aralığındadır.

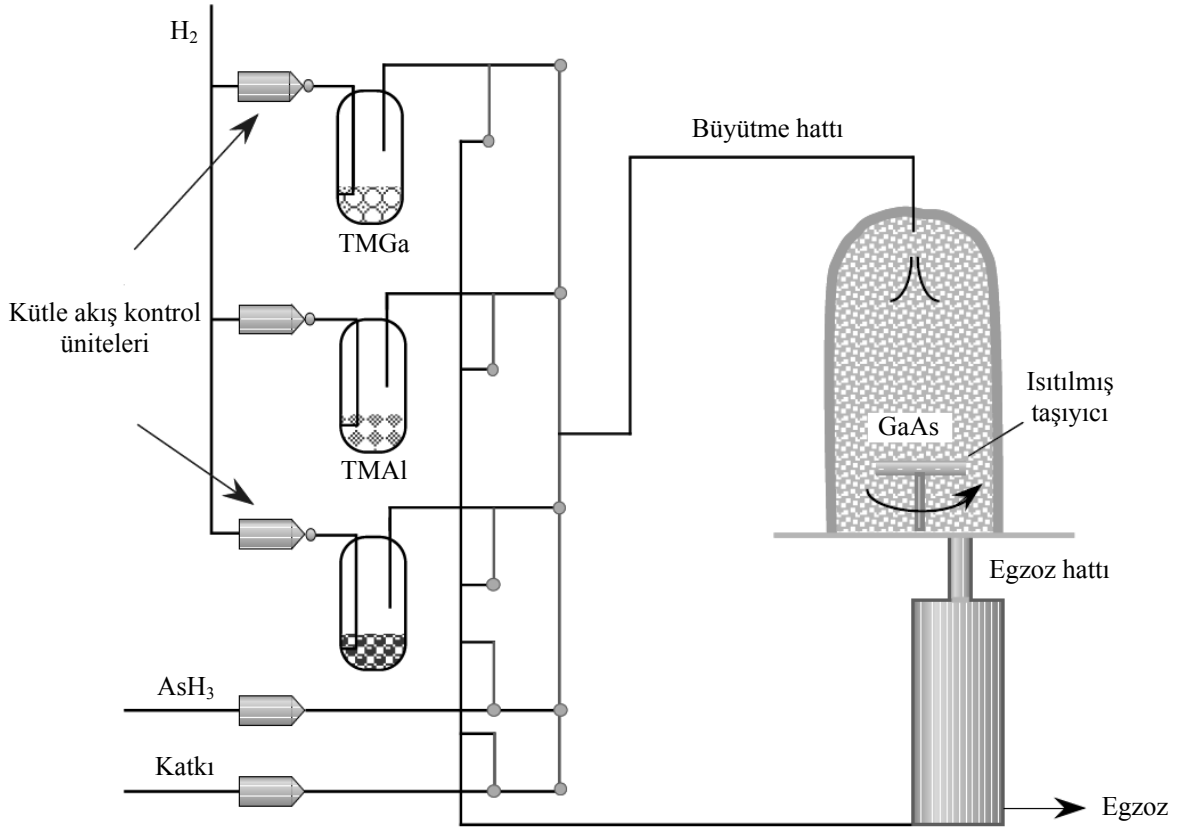
3.2.2 Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırmayla Biriktirme (MOCVD)

MOCVD tekniğinde, MBE'den farklı olarak, kullanılan kaynak gazlar karmaşık moleküller halindedir. Bu teknikte, yarıiletken kristal bir tabakanın büyütülmesi, ortamdaki gazların kimyasal reaksiyonu veya ayrışması sonucunda olur.

Şekil 3.3'de gösterilen MOCVD tekniği ile büyütme yapılırken, metal-organik gaz bileşenlerin, H_2 (hidrojen) ya da N_2 (azot) gibi bir taşıyıcı gaz yardımıyla ısıtılmış taşıyıcı üzerine akışı sağlanır. Büyütmede önemli olan süreçler;

- Kristalin büyütülmesi için gerekli bileşenleri oluşturacak homojen gaz-faz reaksiyonu ya da yüzey reaksiyonlarının gerçekleşmesi.
- Büyütülmede kullanılacak atomların yüzeye doğru taşınması.
- Adsorbsiyon, yüzey difüzyonu ve yer değiştirme.
- Büyütülmede kullanılacak atomların örgü yapısına katılması (incorporation).
- Kristal örgüye katılmamış atom ya da moleküllerin ayrılması (uzaklaştırılması),

şeklinde sıralanabilir.



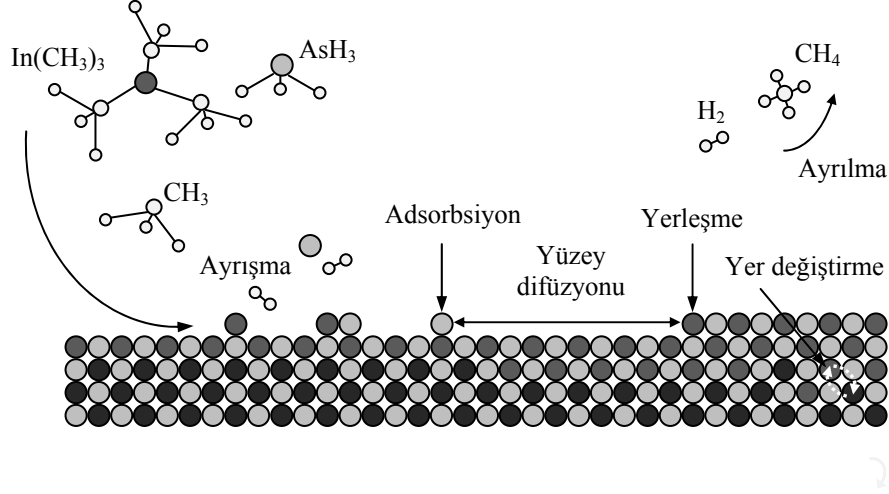
TMGa : Ga içeren organik bileşik
 TMAI : Al içeren organik bileşik
 AsH₃ : As içeren bileşik

Şekil 3.3: Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırmayla Biriktirme (MOCVD) sistemi.

Büyütme süresince oluşan süreçler şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

MOCVD tekniği ile büyütme hızı genellikle MBE ile büyütme hızından yüksektir. Kuantum Noktası gibi nanometre boyutlarındaki yapıların büyütülmesi için yüksek hassasiyet gerekir. Bu nedenle MBE tekniği daha avantajlı gözükebilir ancak özellikle endüstri için büyütme hızının yüksek olması oldukça önemlidir. Yine MOCVD'de tek seferde daha geniş çaplı yapı (wafer) üretilebilir. Bu da seri üretim için olumlu bir özelliktir. MOCVD tekniğinde büyütme sıcaklıkları 400°C-700°C aralığında yapılabilir. InAs Kuantum Noktası için büyütme hızı yaklaşık 1MLs⁻¹ (saniyede tek tabaka) olup

MBE'ye göre 10 kat hızlıdır. GaAs için büyütme hızı $1-21 \text{ MLs}^{-1}$ aralığında değişmektedir.



Şekil 3.4: MOCVD tekniği ile büyütme yapılırken meydana gelen süreçlerin şematik gösterimi.

3.3 KUANTUM NOKTALARININ STRANSKI-KRATANOW METODU İLE OLUŞTURULMASI

Stranski-Krastanow büyütme metodu, pürüzsüz yüzeyli bir taşıyıcı üzerine farklı örgü sabitine sahip başka bir malzemenin ince tabakalar halinde yerleştirilmesi şeklinde tanımlanır. Örgü sabitlerinin farklı olması nedeniyle iki malzemenin arayüzeyinde örgü gerilmeleri yüksektir.

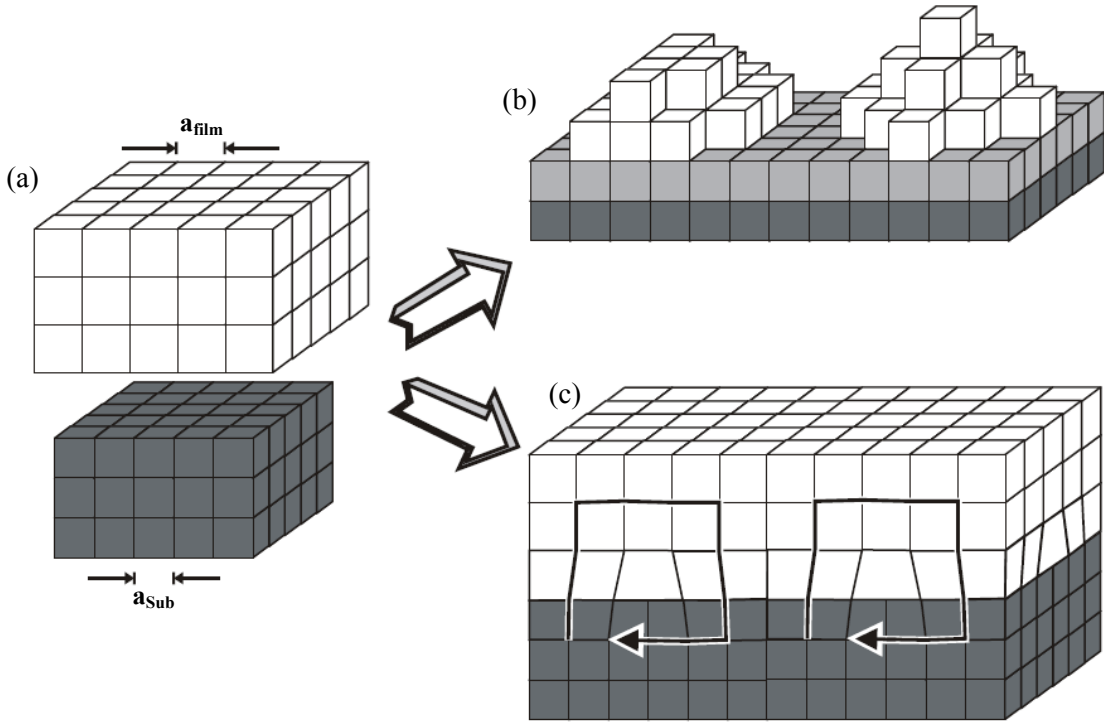
Stranski-Krastanow metodu ile büyütme yapılırken taşıyıcı üzerinde oluşan ilk ince tabaka (wetting layer) 2 boyutludur. Büyütülen tabaka sayısı arttırıldığında gerilme enerjisi de artar ve belirli fiziksel koşullar altında (sıcaklık, basınç) atom ya da moleküller gerilme enerjisini azaltmak için 3 boyutlu Kuantum Noktalarını oluştururlar. Uygun ortam koşulları sağlanmadığında Kuantum Noktaları oluşmaz ve tabaka-tabaka büyütme gerçekleşir. Ancak bu tip yapılarda dislokasyonlar oluşabilir. Şekil 3.5'te örgü sabitleri farklı malzemelerin epitaksiyel büyütmesinde gerilmeler sonucunda oluşabilecek yapılar gösterilmektedir[84].

örgü sabiti a_{sub} olan bir taşıyıcı üzerine örgü sabiti a_{film} olan bir film kaplandığında oluşan örgü uyumsuzluğu f_{mm} ,

$$f_{mm} = \frac{a_{sub} - a_{film}}{a_{sub}} \quad (3.13)$$

ifadesi ile bulunur. Genellikle örgü uyumsuzluğu %2'den büyük olan malzemeler Stranski-Krastanow metodu ile büyütülebilirler.

Stranski-Krastanow metodu ile homojen dağılıma sahip, eşit büyüklükte kendiliğinden organize olan Kuantum Noktaları büyütülebilmektedir. Stranski-Krastanow metodu ile InAs/GaAs, GaSb/GaAs, Ge/Si gibi birçok farklı Kuantum Noktası sistemi oluşturulabilir. Bunlar arasında en çok bilinen InAs/GaAs Kuantum Noktası sistemi sistemidir. GaAs taşıyıcı üzerine InAs büyütüldüğünde örgü uyumsuzluğu %7.2 olup Stranski-Krastanow metodu ile Kuantum Noktaları oluşturulabilir.



Şekil 3.5: Örgü sabitleri farklı malzemelerin epitaksiyel büyütmesinde gerilmeler sonucunda oluşabilecek yapılar. (a) Büyütme öncesi katı haldeki maddeler. (b) Stranski-Krastanow metodu ile büyütme; koyu gri, taşıyıcıyı açık gri, wetting tabakasını ve beyaz renk Kuantum Noktalarını gösterir. (c) Tabaka-tabaka büyütme, ok ile çevrelenen bölgede dislokasyonlar oluşmaktadır.

GaAs taşıyıcı üzerine GaSb büyütüldüğünde örgü uyumsuzluğu %7.8 ve Ge taşıyıcı üzerine Si büyütüldüğünde ise örgü uyumsuzluğu %4.2'dir. Stranski-Krastanow metodu kullanılarak her iki malzeme sistemiyle Kuantum Noktaları oluşturulabilmektedir.

Bu metotla Kuantum Noktaları oluşturulmasında büyütme sıcaklığı oldukça önemlidir. Sadece belirli sıcaklıklarda Kuantum Noktaları oluşturulabilmesinin yanında sıcaklık, Kuantum Noktalarının büyüklüğünü de etkileyen önemli bir parametredir.

GaAs taşıyıcı üzerine InAs Kuantum Noktaları, 420-510°C aralığında oluşturulabilmektedir. Sıcaklığa ve büyütme sürecinde InAs buharlaştırma hızına bağlı olarak oluşan Kuantum Noktalarının tabaka yoğunluğu 1×10^8 - $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ aralığında değerler alabilir. Bu metotla, taban genişlikleri 10-200nm ve yüksekliği 2-8nm aralığında olan piramit ya da tepesi kesik piramit şeklinde InAs Kuantum Noktaları, oluşturulabilmektedir[4,7].

GaAs taşıyıcı üzerine GaSb Kuantum Noktaları, 400-550°C aralığında oluşturulabilmektedir. Büyütme parametrelerine bağlı olarak 4×10^8 - $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ aralığında tabaka yoğunluğuna sahip Kuantum Noktaları üretilebilmektedir. GaSb Kuantum Noktaları küresel ya da piramit şeklinde oluşabilmekte olup, piramit şeklindeki Kuantum Noktalarının taban genişlikleri 10-200nm ve yükseklikleri de 2-9.5nm aralıklarında değerler alabilmektedir[85-87].

3.3. ÖRNEKLERİN YAPISI

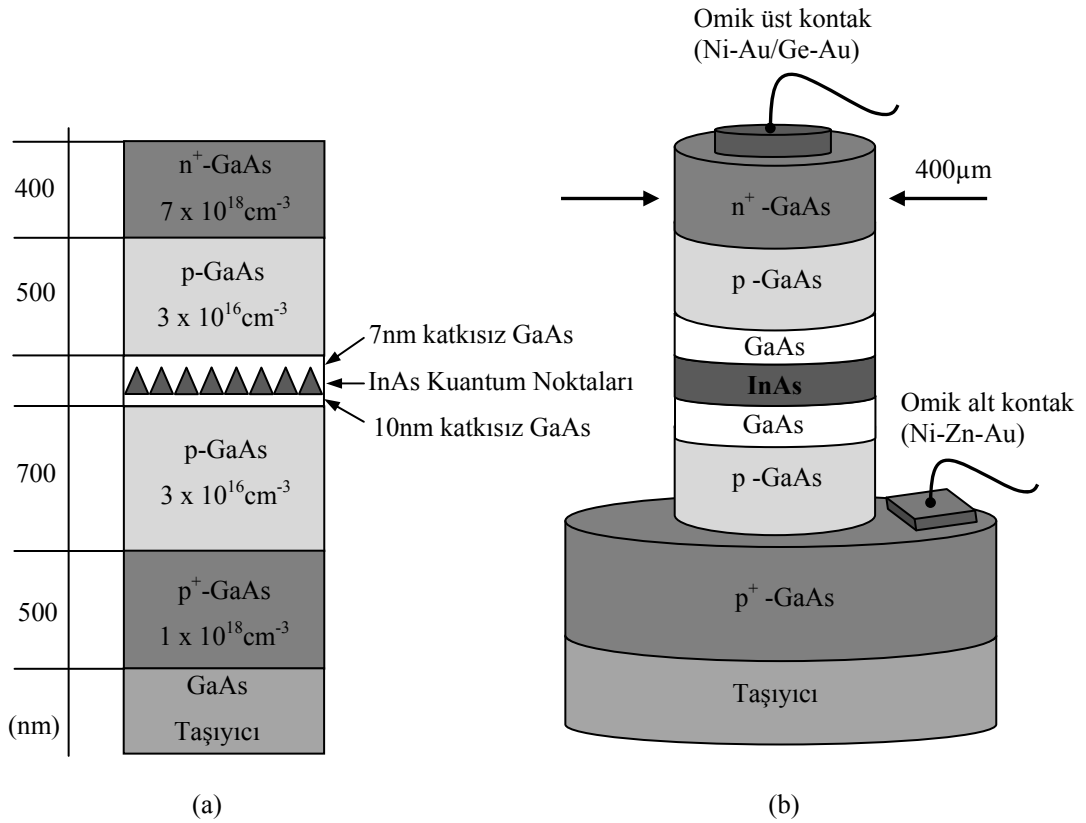
Bu çalışmada Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt olabilecek InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneklerde yazma ve silme zamanı elektriksel ölçümler yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında farklı büyütme teknikleri ile farklı yapılara sahip bir çok örnek incelenmiş ve tezde sadece amaca uygun optimum şartları sağlayan örneklerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

İncelenen örneklerden ilki Berlin Teknik Üniversitesi'nde MOCVD tekniği ile büyütülmüş, bir n^+ -p ekleminin arınma bölgesi civarında InAs Kuantum Noktaları içeren örnektir. Bu örneğe büyütücü tarafından verilen kod numarası TU5822'dir.

İncelenen örneklerden ikincisi MBE tekniği ile A. F. Ioffe Enstitüsü St. Petersburg Rusya'da büyütülmüş bir n^+ -p eklemimin arınma bölgesi civarında InAs Kuantum Noktaları ve Kuantum Noktalarının yakınında bariyer tabaka olarak AlGaAs içeren 5-712 kod numaralı örnektir. İncelenen üçüncü örnek ise yine Berlin Teknik Üniversitesi'nde MOCVD tekniği ile büyütülmüş olup bir n^+ -p eklemimin arınma bölgesi civarında GaSb Kuantum Noktaları içermektedir. Bu örneğin kod numarası TU5823'tür.

3.3.1. InAs/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek (TU5822)

Berlin Teknik Üniversitesi'nde MOCVD tekniği ile büyütülen örneklerden ilki, n^+ -p eklemimin arınma bölgesi civarında tek tabaka halinde büyütülmüş InAs/GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. Şekil 3.6'da MOCVD ile büyütülen örneğin tabakalı yapısı ve kimyasal aşındırma sonrası alınan kontaklar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6: MOCVD tekniği ile büyütülen InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren TU5822 örneğinin (a) tabakalı yapısı (b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaklar.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktaları Stranski Krastanow metodu ile büyütülmüştür. n^+ - p eklemi kullanılarak InAs Kuantum Noktalarında depolanacak taşıyıcıların boşluklar (Holes) olması amaçlanmaktadır.

Kuantum Noktaları oluşturulmak için 500 °C'de, 3 ML (Mono Layer, tek tabaka) halinde InAs, GaAs tabaka üzerine büyütülmüştür. Kuantum Noktalarının tabaka yoğunluğu (N_D) yaklaşık $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 'dir.

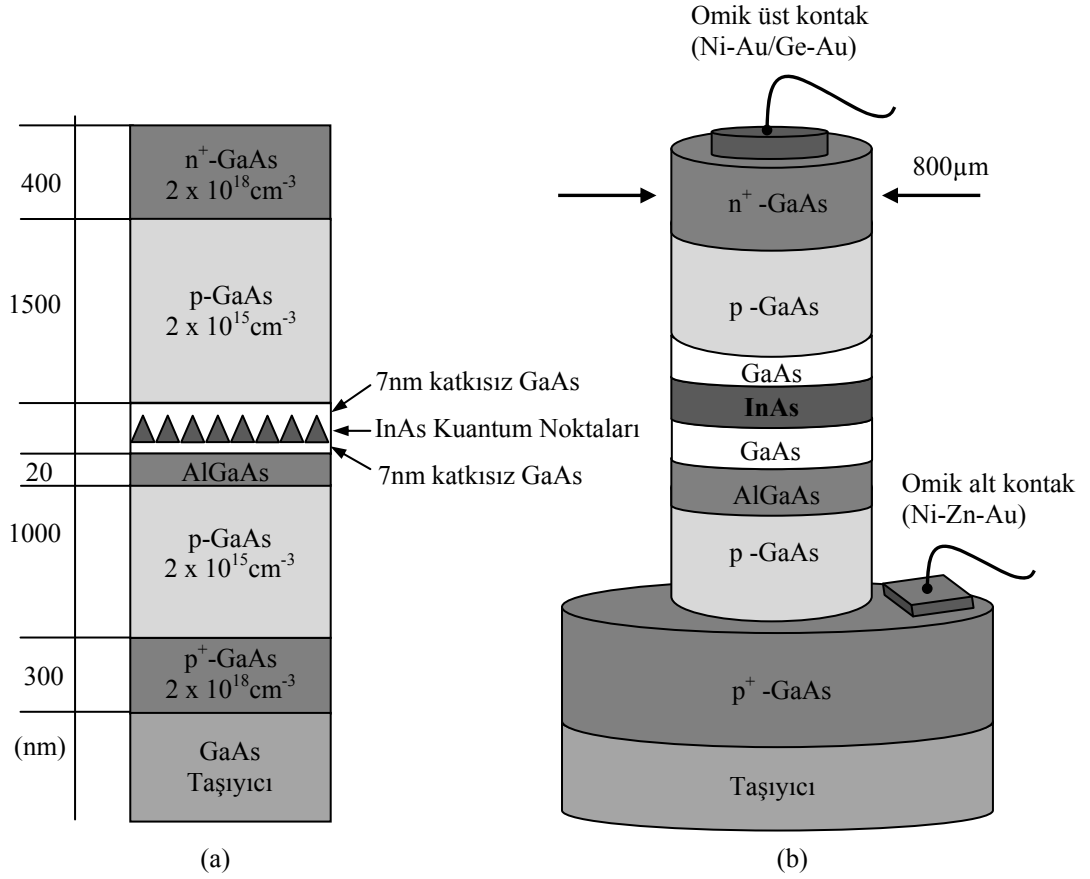
Örnek, sırasıyla GaAs (001) taşıyıcı üzerine 500nm kalınlığında aşırı katkılı p tipi GaAs ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 700 nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ve 10nm kalınlığında katkısız GaAs tabaka içermektedir. Bu tabakalar için büyütme sıcaklığı 650 °C'dir. Bu tabakalar üzerinde 3 tek tabaka halinde InAs katmanı bulunmaktadır. InAs Kuantum Noktası oluşturabilmek için sıcaklık 500 °C de sabit tutulmuştur. Daha sonra örnekte, sırasıyla 7 nm kalınlığında katkısız GaAs, 500nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ve son olarak ta 400nm kalınlığında n tipi aşırı katkılı GaAs ($\sim 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) tabakalar yer almaktadır. Örnekler üzerinde elektriksel ölçüm yapılabilmesi için kimyasal aşındırma uygulanmış ve kontaklar alınmıştır. Uygulanacak voltaj ile n^+ - p eklemine arınma bölgesi genişliği değiştirilerek Kuantum Noktalarının arınma bölgesi içerisinde kalacak şekilde ayarlanabilmesi için n^+ katkılı ilk tabakadan ve kimyasal aşındırma yapılarak p^+ katkılı tabakadan kontaklar alınmıştır.

3.3.2. InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örnek (5-712)

İncelenen örneklerden ikincisi, MBE tekniği ile A. F. Ioffe Enstitüsü St. Petersburg Rusya'da büyütülmüş bir n^+ - p eklemine arınma bölgesi civarında InAs Kuantum Noktaları ve Kuantum Noktalarının yakınında bariyer tabaka olarak AlGaAs içeren örnektir. $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ bariyer ile Kuantum Noktasında bulunan taşıyıcıların daha uzun süre Kuantum Noktasında kalması amaçlanmıştır. n^+ - p eklemine arınma bölgesi civarında tek tabaka halinde büyütülmüş InAs\GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. Taşıyıcılar boşluklardır. InAs Kuantum Noktaları, 485 °C de, 0.1 MLs^{-1} (saniyede tek tabaka) büyütme hızıyla, GaAs tabaka üzerine büyütülmüştür. Kuantum Noktalarının tabaka yoğunluğu (N_D) yaklaşık $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 'dir.

Örnek sırasıyla GaAs (001) taşıyıcı üzerine 300nm kalınlığında aşırı katkılı p tipi GaAs ($\sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 1000 nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) ve 10nm kalınlığında katkısız GaAs tabaka içermektedir. Bu tabakalar için büyütme sıcaklığı 650C° dir. Bu tabakalar üzerinde 2.2ML halinde InAs katmanı bulunmaktadır. InAs Kuantum Noktası oluşturabilmek için sıcaklık 485C° de sabit tutulmuştur. Daha sonra örnekte, sırasıyla 7 nm kalınlığında katkısız GaAs, 1500nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) ve son olarak ta 400nm kalınlığında n tipi aşırı katkılı GaAs($\sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) tabakalar yer almaktadır. 1000nm kalınlıktaki p tipi GaAs tabaka ile Kuantum Noktalarından önce büyütülen 7nm'lik katkısız GaAs tabaka arasında 20nm kalınlığındaki $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ tabaka bulunmaktadır.

Şekil 3.7’de MBE ile büyütülen örneğin tabakalı yapısı ve kimyasal aşındırma sonrası alınan kontaklar şematik olarak gösterilmektedir. Örnek üzerinde kimyasal aşındırma ile $400\mu\text{m}$ ve $800\mu\text{m}$ çaplarında dairesel diyotlar oluşturulmuştur.

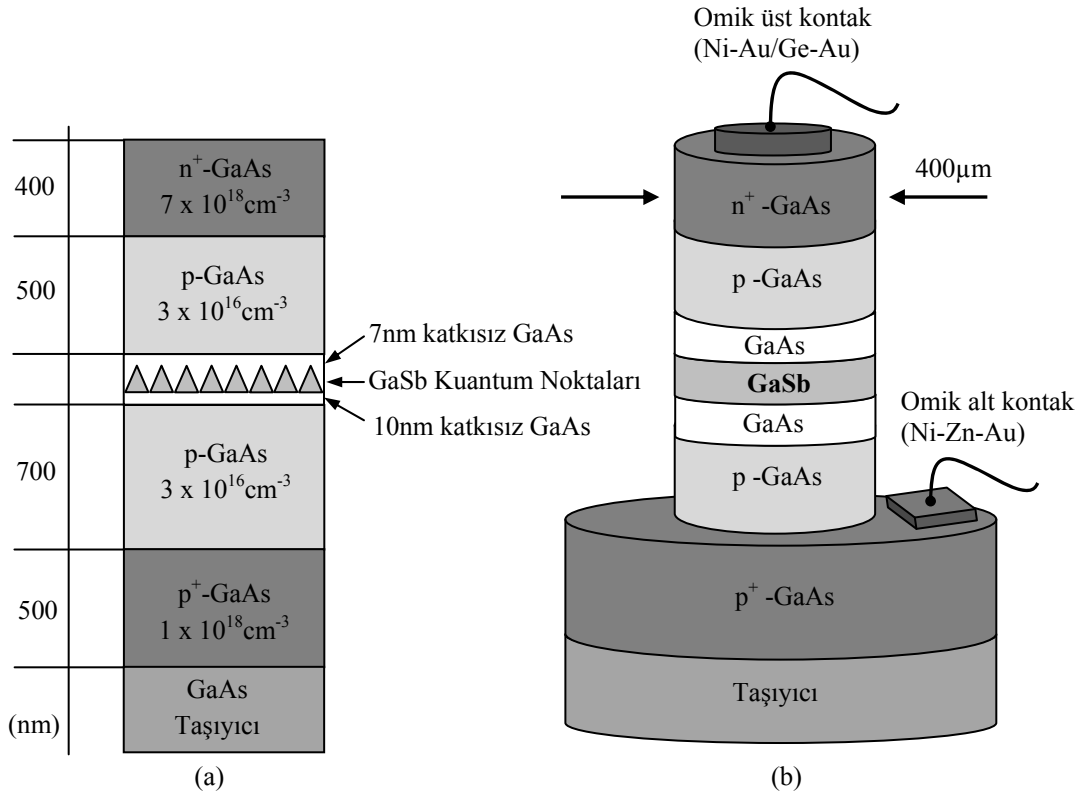


Şekil 3.7: MBE tekniği ile büyütülen InAs/GaAs Kuantum Noktası ve Kuantum Noktası civarında $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ bariyer tabakası içeren 5-712 örneğinin (a) tabakalı yapısı (b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaktlar.

3.3.3. GaSb/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek (TU5823)

Berlin Teknik Üniversitesi'nde MOCVD tekniği ile büyütülen örneklerden ikincisi, n^+ -p eklemesinin arınma bölgesi civarında GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. InAs/GaAs ve GaSb/GaAs sistemlerinin karşılaştırılabilmesi için örneklerin tabakalı yapıları aynı olacak şekilde seçilmiştir.

Örnek, GaAs (001) taşıyıcı üzerine 500nm kalınlığında aşırı katkılı p tipi GaAs ($\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 700 nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) ve Kuantum Noktalarından önce 10 nm kalınlığında katkısız GaAs tabaka içermektedir. GaAs tabakalar için büyütme sıcaklığı 650°C 'dir. GaSb Kuantum Noktaları oluşturabilmek için sıcaklık 495°C 'ye düşürülmüş ve 2.8ML halinde GaSb katmanı büyütülmüştür. Bu tabakalar üzerine sırasıyla 7 nm kalınlığında katkısız GaAs, 500nm kalınlığında p tipi GaAs ($\sim 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) ve son olarak ta 400nm kalınlığında n tipi aşırı katkılı GaAs ($\sim 7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) büyütülmüştür. Örneğin tabakalı yapısı şekil 3.8'de gösterilmiştir.

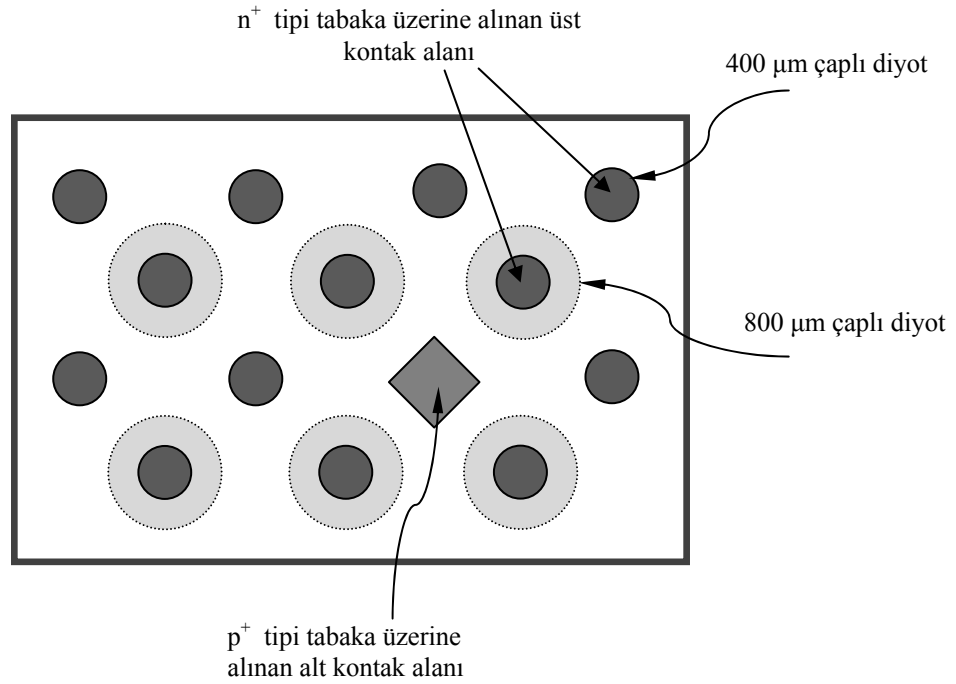


Şekil 3.8: MOCVD tekniği ile büyütülen GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren TU5823 örneğinin (a) tabakalı yapısı (b) kimyasal aşındırma ve sonrasında alınan omik kontaklar.

3.4. ÖRNEKLERİN ÖLÇÜMLERE HAZIRLANMASI

Litografi tekniği ile örnek üzerinde 400 μ m ve 800 μ m çaplarında dairesel diyotlar oluşturulmuştur. Şekil 3.9'da kimyasal aşındırma sonucunda oluşturulan farklı çaplarda diyotlar içeren örnek şematik olarak gösterilmiştir.

Kimyasal aşındırma işleminden sonra, kontak almak için vakum ortamında p⁺ tipi tabaka, sırasıyla ~5nm Nikel (Ni), ~ 50 nm Çinko (Zn) ve ~200 nm Altın (Au) tabakalar ile kaplanmıştır. Üst kontağın alınması için n⁺ tipi tabaka, sırasıyla ~7.5nm Nikel (Ni), ~ 200 nm Altın/Germanyum (Au/Ge, 88:12) ve ~100 nm Altın (Au) tabakalar ile kaplanmıştır. Her iki tip katman için kaplamalar yapıldıktan sonra omik kontak elde edebilmek için örnek azot gazı ortamında 390°C'de, 2 dakika süre ile tavlanmıştır.



Şekil 3.9: Kimyasal aşındırma ile örnek üzerinde oluşturulan 400 μ m ve 800 μ m çaplarında dairesel diyotlar elektriksel ölçümler için alınan kontakların şematik gösterimi. Üst kontak her bir diyot için farklı olup alt kontak ortak kullanılmaktadır.

3.5 DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

3.5.1. Akım-Voltaj (I-V)

Akım-Voltaj (I-V) ölçümü genellikle örneklerin kontak kalitesini (omik kontak olup olmadığını) belirlemek amacıyla yapılır. I-V ölçümleri ile kontak kalitesinin yanında

örneklerin diyot karakteristiği, dolayısıyla yapılacak diğer elektriksel ölçümlerde uygulanabilecek maksimum geri besleme voltajı belirlendiğinden genel prensip olarak yapılacak tüm elektriksel ölçümlerden önce her bir sıcaklık değeri için I-V ölçümü alınmaktadır. I-V ölçümü sonucunda diyotun ileri ve geri besleme doğrultularında kırılma voltajları belirlenir. Elektriksel ölçümlerde uygulanacak voltajın, diyotun kırılma voltajlarından farklı olarak diyottan geçen akımın “0” olduğu aralıklarda olması gerekmektedir.

3.5.2. Kapasite-Voltaj (C-V)

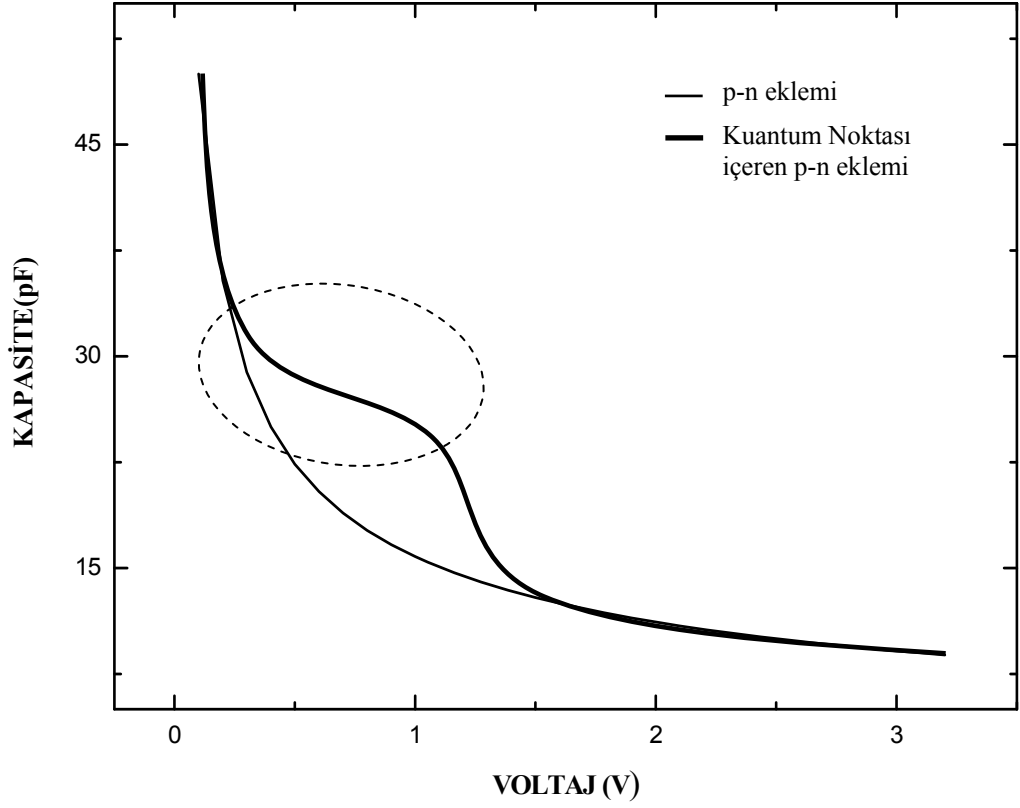
Bir p-n eklemının ya da Schottky kontağının Kapasite-Voltaj ölçümü alındığında, ölçülen C kapasite değeri, uygulanan V geri besleme voltajının karekökü ile ters orantılı ($C \sim 1/\sqrt{V}$) olarak değişir. Ancak p-n eklemının (ya da Schottky kontağının) arınma bölgesi civarında Kuantum Noktaları bulunuyorsa bu durumda Kuantum Noktalarında taşıyıcıların birikmesi nedeniyle, C-V karakteristiğinde bir değişim olacaktır.

C-V ölçüm sonuçları kullanılarak Kuantum Noktalarının varlığı tespit edilebilir ve elektriksel özellikleri incelenebilir.

Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıt için C-V ölçümleri alınırken, uygulanan geri besleme voltajının başlangıç değeri ve süpürme yönü değiştirilerek yazma/silme süreçleri hakkında bilgi elde edilebilir. Kuantum Noktaları, besleme voltajı uygulanmadığı durumda n^+ -p eklemının arınma bölgesi dışında kalıyorsa, taşıyıcı bulundurulur.

Geri besleme voltajı uygulanarak arınma bölgesi genişliği arttırılacak olursa, ölçülecek kapasite değeri de voltajın kareköküyle ters orantılı olarak azalacaktır. Arınma bölgesi genişliği arttırılarak Kuantum Noktalarına ulaşıldığında elektrik alan nedeniyle taşıyıcılar tünelleme yapacaktır ve bu, silme sürecine karşılık gelebilir. C-V ölçümüne yüksek geri besleme voltajı değerlerinden başlanarak 0V geri beslemeye doğru gidilirse, yüksek geri besleme nedeniyle Kuantum Kuyusunda taşıyıcı bulunmaz ve geri besleme voltajı değeri azaltılarak yazma işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Şekil 3.10'da bir $n^+ - p$ ekleminin C-V karakteristiği ile aynı $n^+ - p$ ekleminin arınma bölgesi civarında Kuantum Noktaları bulunması durumunda C-V karakteristiği gösterilmektedir



Şekil 3.10: Bir $n^+ - p$ ekleminde Kuantum Noktası bulunması durumunda (kalın çizgi) ve bulunmaması durumunda (ince çizgi) C-V değişimi. Kuantum Noktaları bulunması durumunda C-V karakteristiğindeki oluşan plato (kesikli çizgi ile gösterilen alanda) Kuantum Noktalarında taşıyıcıların birikmesi sonucu oluşmaktadır.

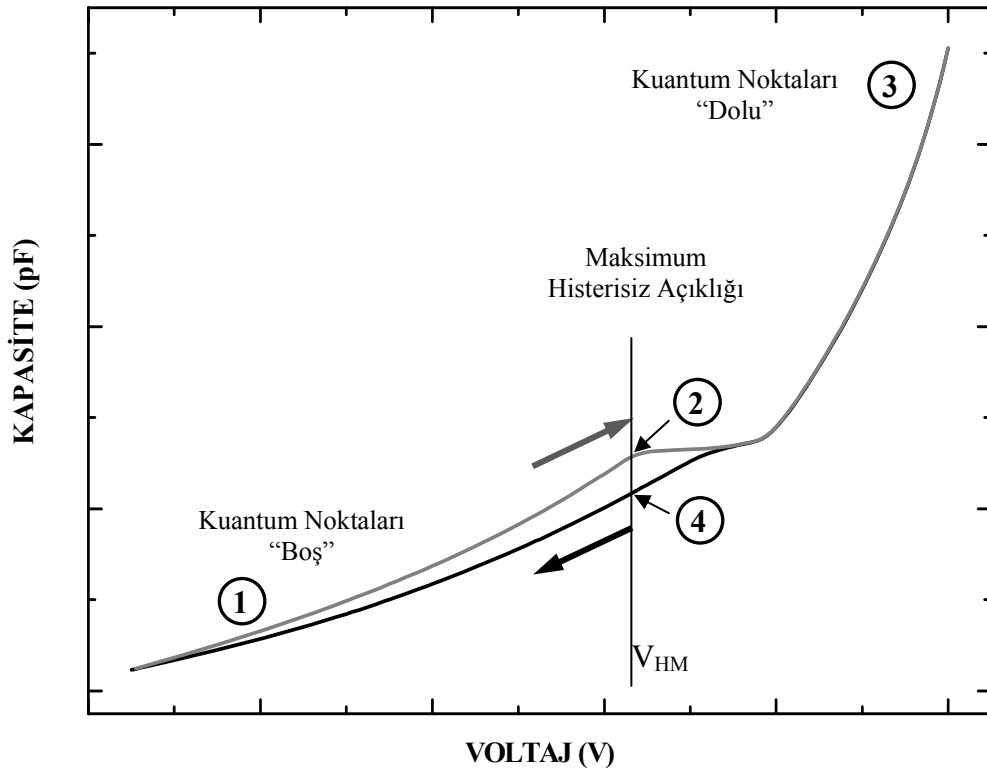
C-V ölçüm sonuçları kullanılarak, malzemenin dielektrik katsayısı ve diyot çapı biliniyorsa, katkı konsantrasyonu hesaplanabilir.

3.5.3. Histerisiz Açıklığı (Hysteresis opening)

Farklı sıcaklık değerleri için C-V ölçümü alınırken, öncelikle voltaj, yüksek geri besleme yapacak şekilde büyük tutulur ve giderek azaltılarak kapasite değeri ölçülür. Daha sonra sıcaklık sabit tutularak voltajın süpürülme yönü (0V'tan başlanarak geri besleme voltajı kırılma voltajına yakın değerlere kadar) değiştirilerek kapasite ölçümü

gerçekleştirilir ve elde edilen iki C-V değişiminin bir Histerisiz içerip içermediği incelenir.

Voltajın süpürülme doğrultusu değiştirilerek alınan C-V ölçümünden ilki silme sürecine ikincisi ise yazma sürecine karşılık gelir. Şekil 3.11’de geri besleme voltajının süpürülme yönü değiştirilerek elde edilen C-V değişimi ve maksimum Histerisiz açıklığı gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Arınma bölgesi civarında Kuantum Noktaları içeren bir $n^+ - p$ eklemde geri besleme voltajının süpürme yönü değiştirilerek elde edilen C-V değişimi ve oluşan Histerisiz açıklığı. 1 durumunda Kuantum Noktaları tamamen boş, 3 durumunda tamamen doludur. 2 ve 4 durumları Histerisiz açıklığının maksimum olduğu noktaları, V_{HM} ise Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değerini gösterir.

Histerisiz açıklığının bulunduğu C-V değişiminden,

- ① Uygulanan yüksek elektrik alan nedeniyle, arınma bölgesi genişletilmiştir ve

Kuantum Noktalarında bulunan tüm taşıyıcılar tünelleme ile yayınlandığından, Kuantum Noktaları tamamen boştur.

- ② Kuantum Noktaları arınma bölgesi sınırındadır. Kuantum Noktaları dolmaya başlamıştır. Bu nedenle geri besleme voltajı azaltılmasına rağmen kapasite değeri artmaz.
- ③ Kuantum Noktaları arınma bölgesi dışında ve tamamen doludur.
- ④ Arınma bölgesi genişliği arttırılmış ve Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcılar tünelleme ile yayınlanmaya başlamıştır.

sonuçları elde edilebilir.

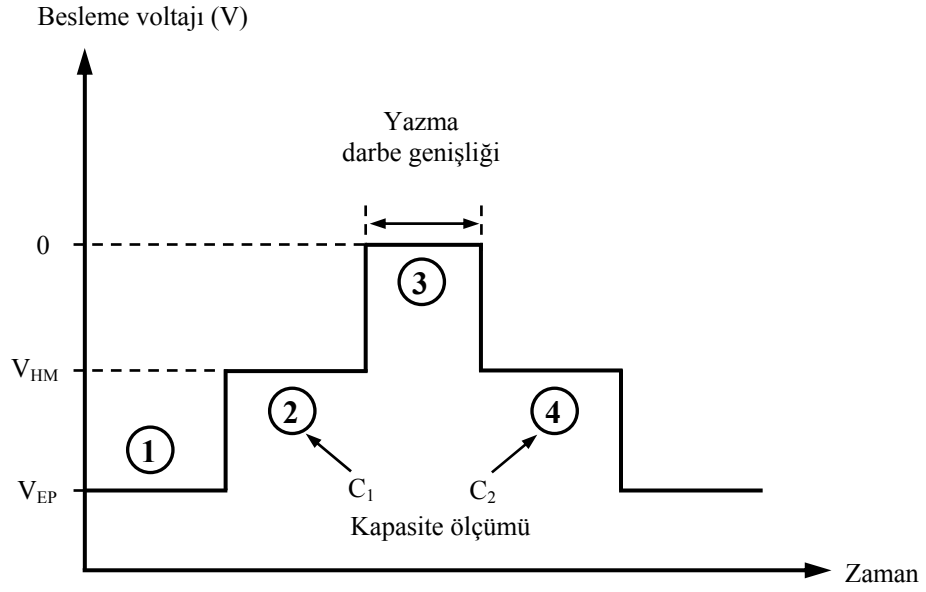
3.5.4. Yazma Zamanı

Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıtı bilgi yazma zamanı, taşıyıcı bulunmayan Kuantum Noktalarına taşıyıcıların geçiş zamanına karşılık gelir.

Yazma zamanının belirlenebilmesi için bu çalışmada yeni bir ölçüm metodu geliştirilmiştir. Bu ölçüm metodu, geri besleme voltajının süpürme yönü değiştirilerek elde edilen C-V ölçümlerinde oluşan Histerisiz açıklığının, Kuantum Noktalarının boş ve dolu olduğu durumlardaki kapasite değeri farkından kaynaklandığı kabul edilerek oluşturulmuştur.

Yazma zamanının ölçülebilmesi için öncelikle uygulanan yüksek geri besleme voltajı ile Kuantum Noktaları tamamen boşaltılır. Ardından geri besleme voltajı Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değerine (V_{HM}) getirilerek C_1 kapasite değeri ölçülür. Daha sonra Kuantum Noktalarının tamamen doldurulması için kısa bir süre küçük bir ileri besleme voltajı ya da 0V uygulanır (yazma süreci). Ardından voltaj değeri tekrar V_{HM} değerine getirilerek C_2 kapasite değeri ölçülür.

Şekil 3.12’de yazma zamanı ölçümü için geliştirilen yöntemde uygulanan voltaj değerleri- zaman değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Yazma zamanı ölçüm metodunun şematik gösterimi. Burada V_{EP} ve V_{HM} sırasıyla silme için gerekli geri besleme voltajının maksimum olduğu ve Histerisiz açıklığının maksimum olduğu değerleri göstermektedir. Yazma darbesi 0V olarak gösterilmiştir.

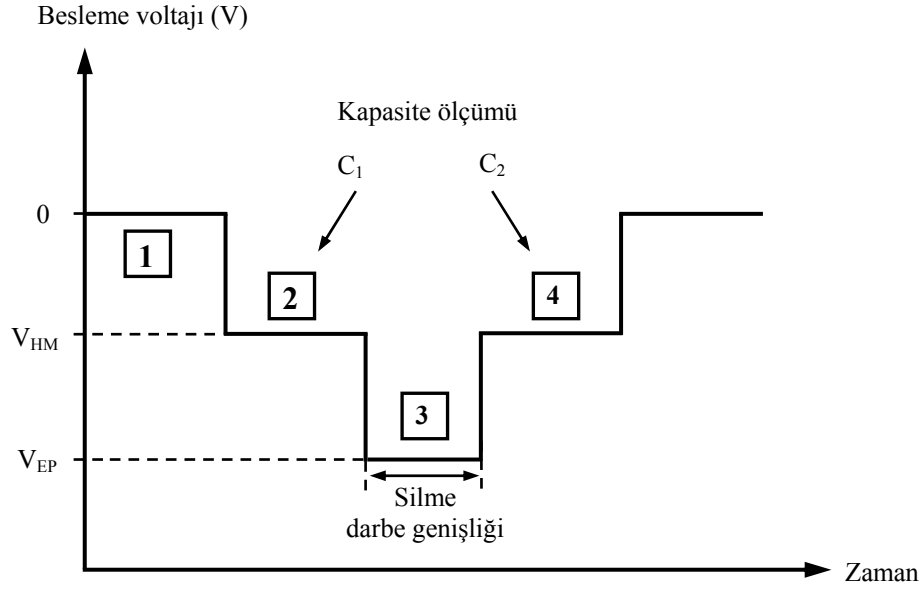
İleri besleme süresi değiştirilerek elde edilen C_1 ve C_2 kapasite değerlerinin farkı hesaplanır ve bu farkların değişiminden yazma zamanı bulunabilir.

3.5.5. Silme Zamanı

Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıtı bilgi silme zamanı, taşıyıcı bulunduran Kuantum Noktalarına uygulanan yüksek elektrik alan ile taşıyıcıların tünelleme yaparak Kuantum Noktasından ayrılma süresine karşılık gelir.

Silme zamanı, yazma zamanının belirlenmesinde kullanılan metoda benzer şekilde bir ölçüm sistemi hazırlanarak bulunmuştur. Silme zamanı ölçümü için geliştirilen metot Şekil 3.13'te şematik olarak gösterilmiştir.

Bu metot oluşturulurken Histerisiz açıklığının, Kuantum Noktalarının boş ve dolu olduğu durumlardaki kapasite değeri farkından kaynaklandığı kabul edilmiştir.



Şekil 3.13: Silme zamanı ölçüm metodu. Burada V_{EP} ve V_{HM} sırasıyla silme için gerekli yüksek geri besleme voltajının maksimum olduğu ve Histerisiz açıklığının maksimum olduğu değerleri göstermektedir. Yazma işlemi için 0V uygulanmaktadır.

Silme zamanı belirlenirken öncelikle Kuantum Noktalarının tamamen doldurulması için ileri besleme ya da 0V uygulanır. Ardından Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değeri (V_{HM}) kadar geri besleme voltajı uygulanır ve C_1 kapasite değeri ölçülür. Silme işleminin gerçekleştirilmesi için geri besleme yönünde kısa bir voltaj darbesi (pulse) uygulanır. Uygulanan voltaj tekrar V_{HM} değerine getirilerek C_2 kapasitesi ölçülür. Silme işleminin gerçekleştirilmesi için yapılan yüksek geri beslemenin süresi değiştirilerek elde edilen C_1 ve C_2 kapasite değerlerinin farkı hesaplanır. Yüksek geri besleme süresi ve C_1 ve C_2 kapasite değerlerinin farkı değişiminden silme zamanı bulunabilir.

3.6 DENEY DÜZENEKLERİ

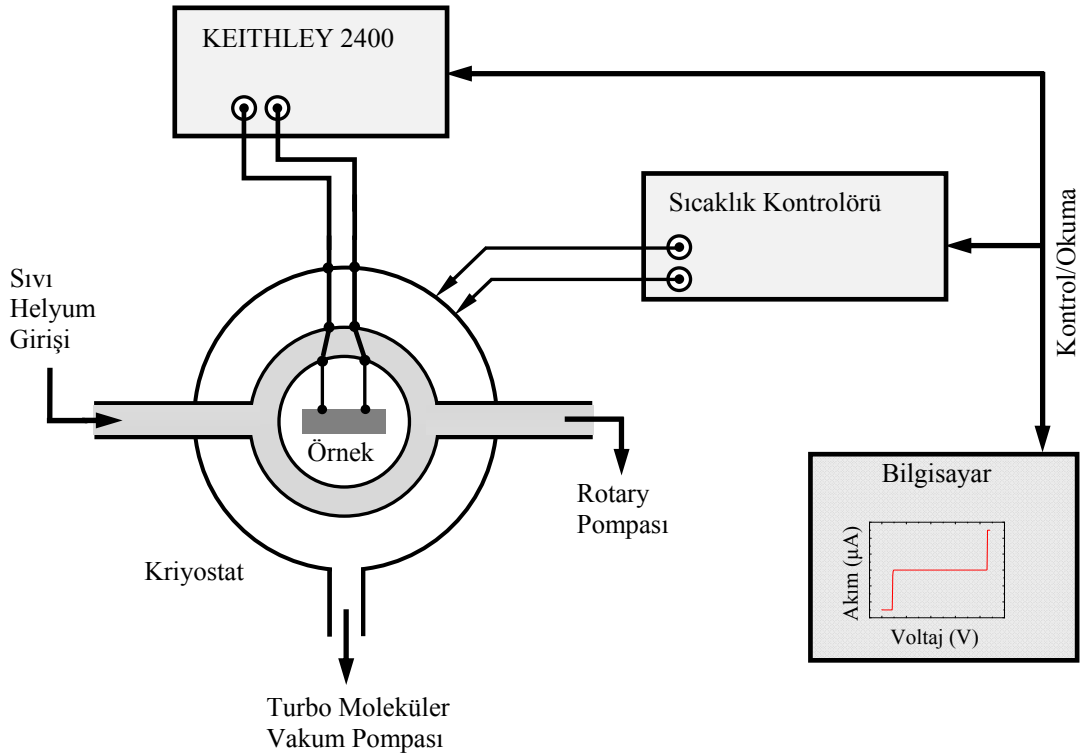
3.6.1 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Düzeneği

Akım-Voltaj ölçümleri, örneklerin kontak kalitesini ve Kapasite-Voltaj ölçümlerinde uygulanabilecek maksimum geri besleme voltajını belirlemek için alınmıştır.

Şekil 3.14'te Akım-Voltaj ölçümlerinin alındığı deney seti şematik olarak gösterilmiştir. Ölçümlerde voltaj kaynağı ve aynı zamanda ampermetre olarak Keithley marka 2400 model akım/voltaj kaynağı ve ölçü aleti (SourceMetre) kullanılmıştır.

Örnekler, farklı sıcaklıklarda ölçüm yapabilmek için sürekli sıvı Helyum akışına sahip kriyostata (continuous flow cryostat) yerleştirilmiştir. Kullanılan kriyostat sistemi ile 15K-450K aralığında istenilen sıcaklık değerinde ölçümler alınabilmektedir.

I-V ölçümleri, $\pm 40V$ aralığında yapılabilmekte olup, kullanılan örnekler için kırılma voltajı -15 ile -30V aralığındadır.



Şekil 3.14: Akım-Voltaj deney düzeneği.

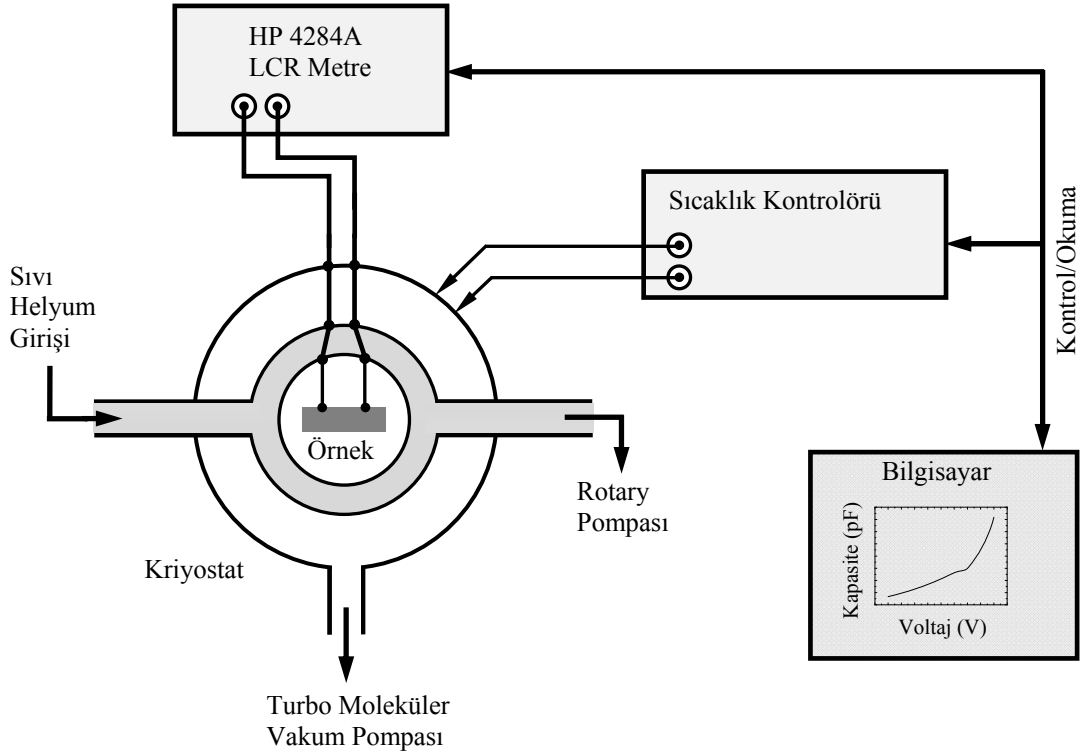
3.6.2 Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Düzenegi

Kuantum Noktaları Temelli bellek aygıtlarda bilgi saklama ve yazma süreçlerinin anlaşılabilmesi için p-n eklemının arınma bölgesi civarında büyütölmüş Kuantum Noktaları içeren örneklere Kapasite-Voltaj ölçümleri yapılmıştır. Örneklere farklı geri besleme voltajları uygulanarak her bir voltaj değeri için örneğin kapasitesi ölçölmüştür. Farklı geri besleme voltajı uygulanarak p-n eklemının arınma bölgesi genişliği değıştirilmiş ve Kuantum Noktalarının arınma bölgesi içerisinde kalması sağlanmıştır. Arınma bölgesi içerisindeki Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcılar, yüksek elektrik alan etkisi altında Kuantum Noktasından tünelleme yapabilmektedir.

Yapılan deneylerde her bir geri besleme voltajı için Kapasite değeri ölçölmüş ve Kapasite değışimi ile Kuantum Noktalarından çıkan taşıyıcılar gözlemlenmiştir. Öncelikle Kuantum Noktalarının varlığı Kapasite-Voltaj ölçümleri gibi elektriksel ölçümler kullanılarak kanıtlanmıştır.

Kapasite-Voltaj ölçümlerinde iki farklı deney düzenegi kullanılmıştır. Kullanılan ilk düzenekte kapasite ölçü aleti olarak HP4284A LCR Metre kullanılarak farklı frekanslarda ölçümler yapılmıştır. HP4284A LCR Metre ile 20Hz - 1MHz aralığında farklı frekanslarda ölçümler alınabilmekte olup örneklere geri besleme voltajı olarak $\pm 40V$ aralığında voltaj değeri uygulanabilmektedir. C-V ölçümünde örneklere 100mV'luk bir AC voltaj uygulanmıştır.

HP4284A LCR Metre kullanılarak oluşturulan deney düzenegi şekil 3.15'de şematik olarak gösterilmiştir.

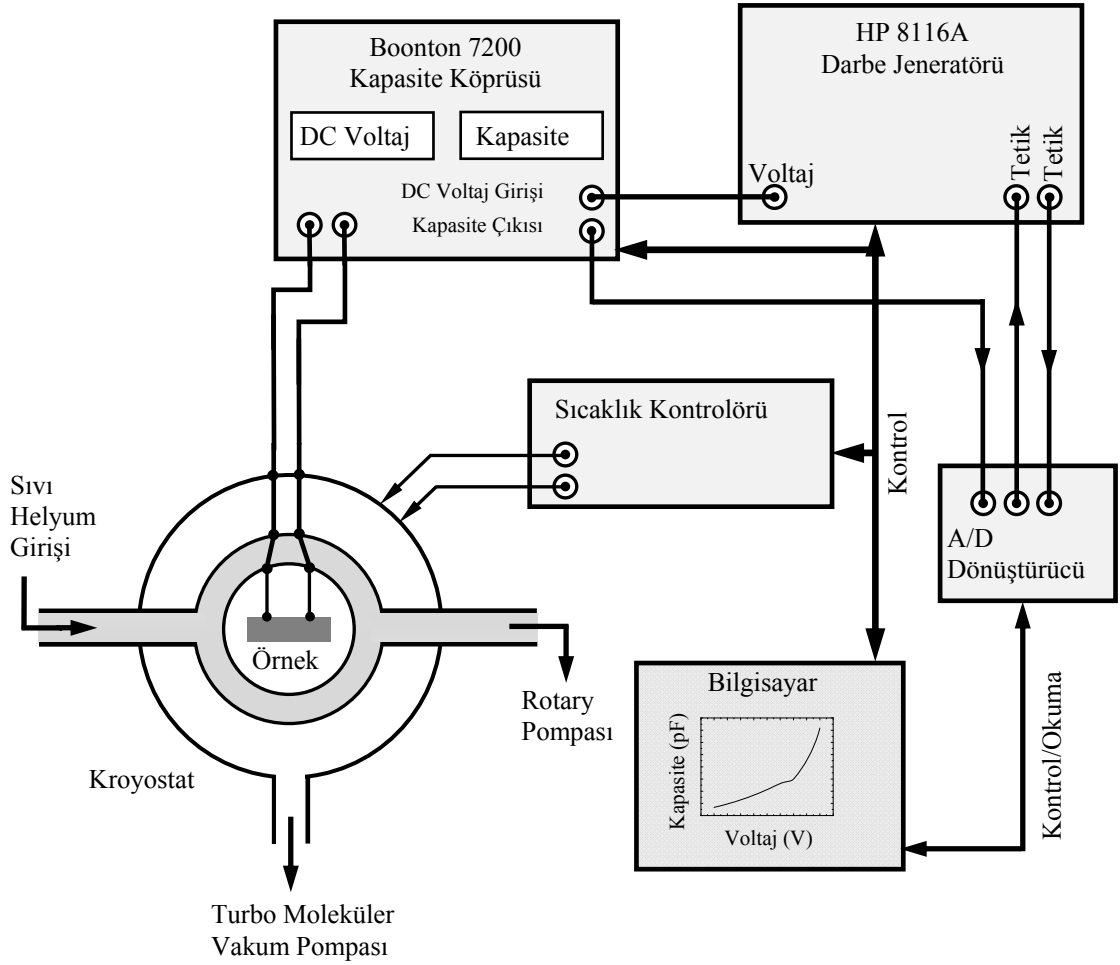


Şekil 3.15: HP4284A LCR Metre kullanılarak oluşturulan Kapasite-Voltaj deney düzeneği.

Kapasite-Voltaj ölçümlerinde kullanılan ikinci ölçüm sisteminde Kapasite ölçü aleti olarak Boonton 7200 Kapasitans Köprüsü kullanılmıştır.

Boonton 7200 ile 1MHz sabit frekansta kapasite ölçümü yapılabilmektedir. Boonton 7200 ile yapılan ölçümlerde iki ölçüm arasındaki bekleme zamanı kısa olduğu için hızlı ölçümler alınabilmektedir. Şekil 3.16'da Boonton 7200 Kapasite Köprüsü kullanılarak oluşturulan Kapasite-Voltaj deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.

Kullanılan bu sistemde DC (Doğru Akım) geri besleme voltajı, HP8116A darbe jeneratörü kullanılarak elde edilmiş ve Boonton 7200 Kapasitans Köprüsü aracılığı ile örnekler üzerine uygulanmıştır. Hazırladığımız Labview programıyla ve Analog/Dijital (A/D) Dönüştürücü Kart aracılığıyla HP8116A darbe jeneratörüne tetik sinyali gönderilmiş ve uygulanan DC geri besleme voltajı ile eş zamanlı olarak Boonton 7200 Kapasite Köprüsü ile örneğin kapasitesi ölçülmüştür. Boonton 7200 Kapasite Köprüsünden voltaj olarak alınan ölçüm sonucu, A/D Dönüştürücü kart kullanılarak Bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 3.16: Boonton 7200 Kapasite Köprüsü kullanılarak oluşturulan Kapasite-Voltaj deney düzeneği. Bu düzenek sabit 1MHz frekansta kapasite ölçümleri alınabilmektedir. HP8116A darbe jeneratörü kullanılarak elde edilen DC geri besleme voltajı, örneklere Boonton 7200 Kapasite Köprüsüyle uygulanmıştır.

3.6.3 Yazma Zamanı Ölçüm Düzeneği

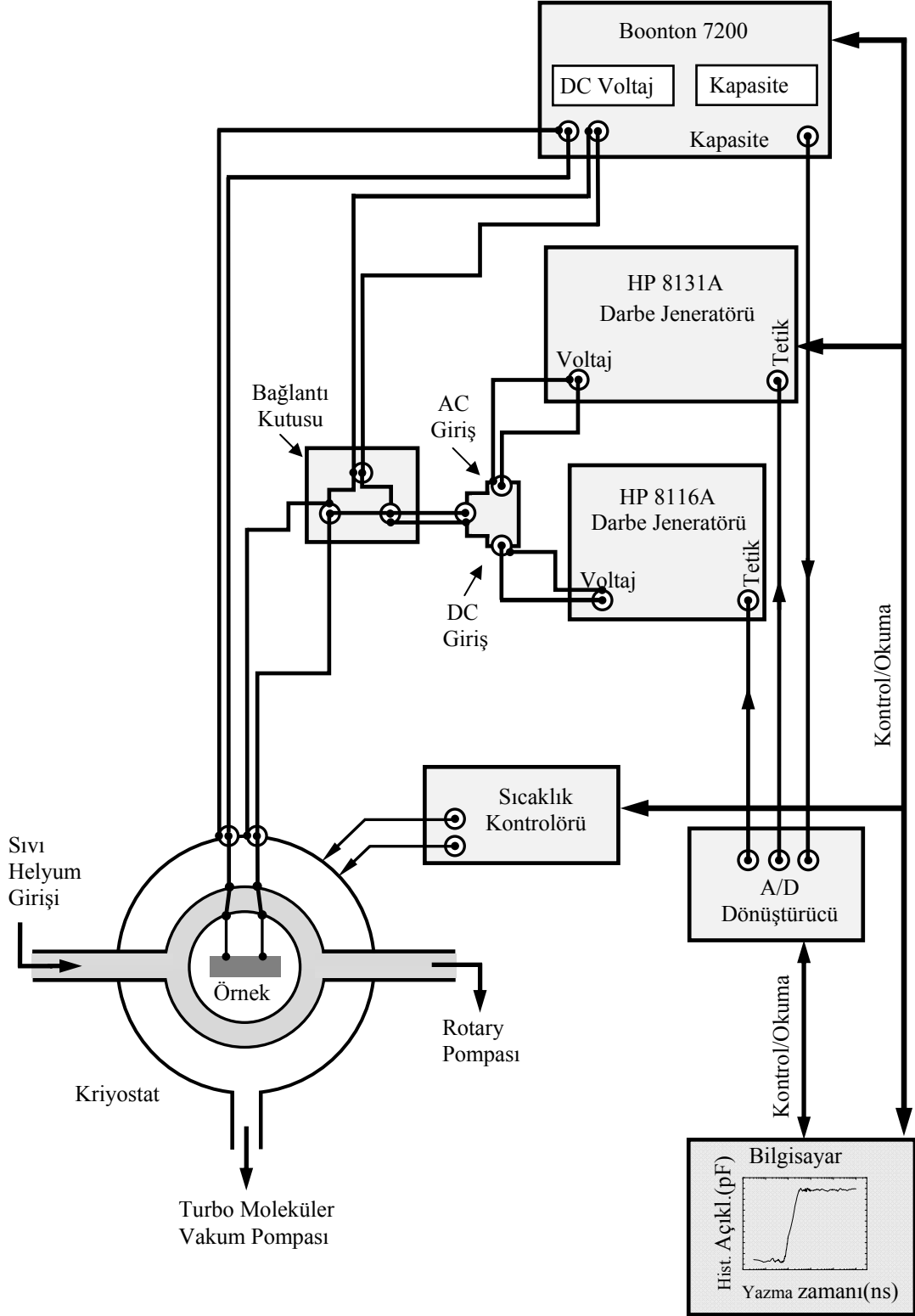
Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıt için yazma zamanı, boş olan Kuantum Noktalarının taşıyıcılarla doldurulması için gereken süre anlamına gelip, şekil 3.17’de şematik olarak gösterilen deney seti kullanılarak ölçülmüştür.

Yazma zamanının ölçülebilmesi için örneklere öncelikle HP8116A (ya da HP8115A) darbe jeneratörü ile yüksek geri besleme voltajı (-16V) uygulanarak tüm Kuantum Noktalarının tamamen boşaltılması sağlanmıştır. Ardından darbe jeneratörünün çıkış

voltajı Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değerine ayarlanmış ve örneğe bu voltaj uygulanırken C_1 kapasite değeri ölçülmüştür. Daha sonra yazma işleminin gerçekleştirilebilmesi için HP8131A yüksek hızlı darbe jeneratörü kullanılarak kısa süreli yazma darbesi uygulanmış ve voltaj değeri Histerisiz açıklığının maksimum olduğu değere getirilerek C_2 kapasite değeri ölçülmüştür. Yazma süreci için uygulanan voltaj darbesi genişliği 300ps - 10 μ s aralığında değiştirilerek, Histerisiz açıklığı (C_1 - C_2 farkı) darbe genişliği değişimi elde edilmiştir.

Deneyde kullanılan HP8116A darbe jeneratörü minimum 10ns'lik darbe genişliğine sahiptir. HP8116A, C-V değişiminden elde edilen Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değerini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan ikinci darbe jeneratörü HP8131A ise minimum 300ps genişliğinde darbe verebilmekte olup yazma süreci için gerekli voltaj darbelerini sağlamıştır. Her iki darbe jeneratörü şekil 3.17'de gösterildiği gibi bağlanarak eşzamanlı kullanılmıştır. Ölçümler, Labview programlama diliyle hazırlanan bir programla alınmıştır.



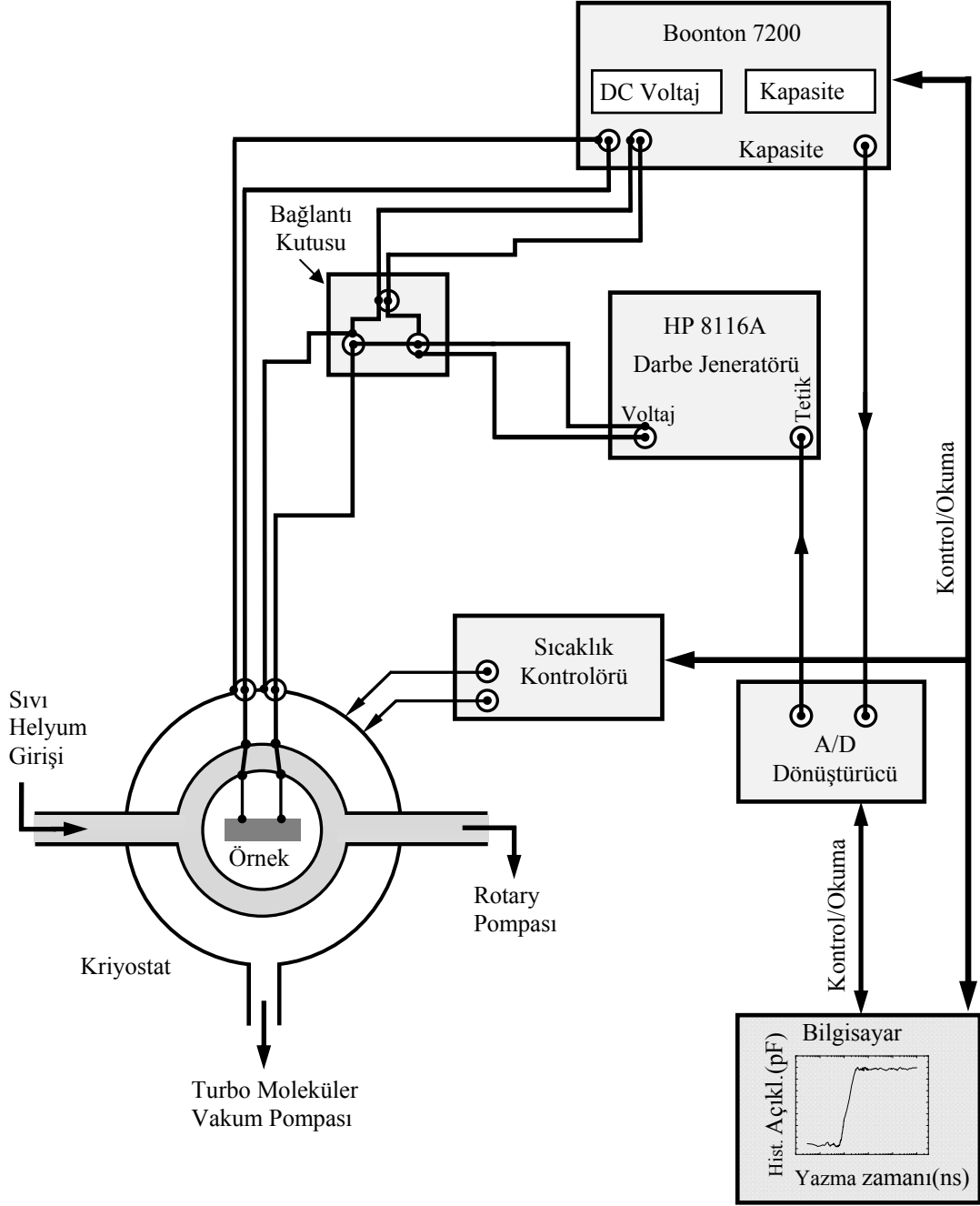
Şekil 3.17: Yazma zamanı deney düzeneği.

3.6.4 Silme Zamanı Ölçüm Düzenegi

Silme zamanı, Kuantum Noktaları Temelli bir bellek aygıt için başlangıçta tamamen dolu olan Kuantum Noktalarındaki taşıyıcıların, uygulanan yüksek elektrik alan ile tünelleme yaparak Kuantum Noktalarından ayrılma süresine karşılık gelir.

Şekil 3.18'de şematik olarak gösterilen deney seti kullanılarak silme zamanı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler alınırken, Kuantum Noktalarının tamamen dolu olmasını sağlamak için öncelikle HP8116A Darbe jeneratörü ile bir küçük ileri besleme ya da 0V'luk bir besleme yapılmış ardından C-V grafiğinden elde edilen Histerisiz açıklığının maksimum olduğu voltaj değeri (V_{HM}) kadar bir geri besleme uygulanmıştır. Bu geri besleme değeri için C_1 kapasite değeri Boonton 7200 kapasite köprüsü ile ölçülmüştür. Daha sonra silme işleminin gerçekleştirilebilmesi için HP8116A Darbe jeneratörü ile yüksek geri besleme voltajı (-16V) uygulanmış ve ardından geri besleme voltajı, V_{HM} değerine getirilerek C_2 kapasite değeri ölçülmüştür. Silme süreci için uygulanan voltaj darbesi genişliği 10ns-10ms aralığında değiştirilerek, Histerisiz açıklığı (C_1-C_2 farkı)-darbe genişliği değişimi elde edilmiştir.



Şekil 3.18: Silme zamanı deney düzeneği.

4. BULGULAR

4.1. AKIM-VOLTAJ (I-V) ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bir n^+ -p eklemının arınma bölgesi civarında büyütülmüş Kuantum Noktaları içeren örneklerde öncelikle diyot karakteristiğini gözlemek ve Kapasite-Voltaj ölçümlerinin alınabileceği uygun voltaj aralığını belirlemek amacıyla farklı sıcaklıklarda Akım-Voltaj ölçümleri yapılmıştır.

Ölçümlerde sıcaklığa bağlı olarak kontak kalitesinin iyi olup olmadığının anlaşılması için 25K-300K sıcaklıkları arasında I-V ölçümleri alınıp sonuçlar incelenmiştir. I-V ölçümleri alınırken kriyostat penceresi kapatılarak ölçümler karanlıkta alınmıştır.

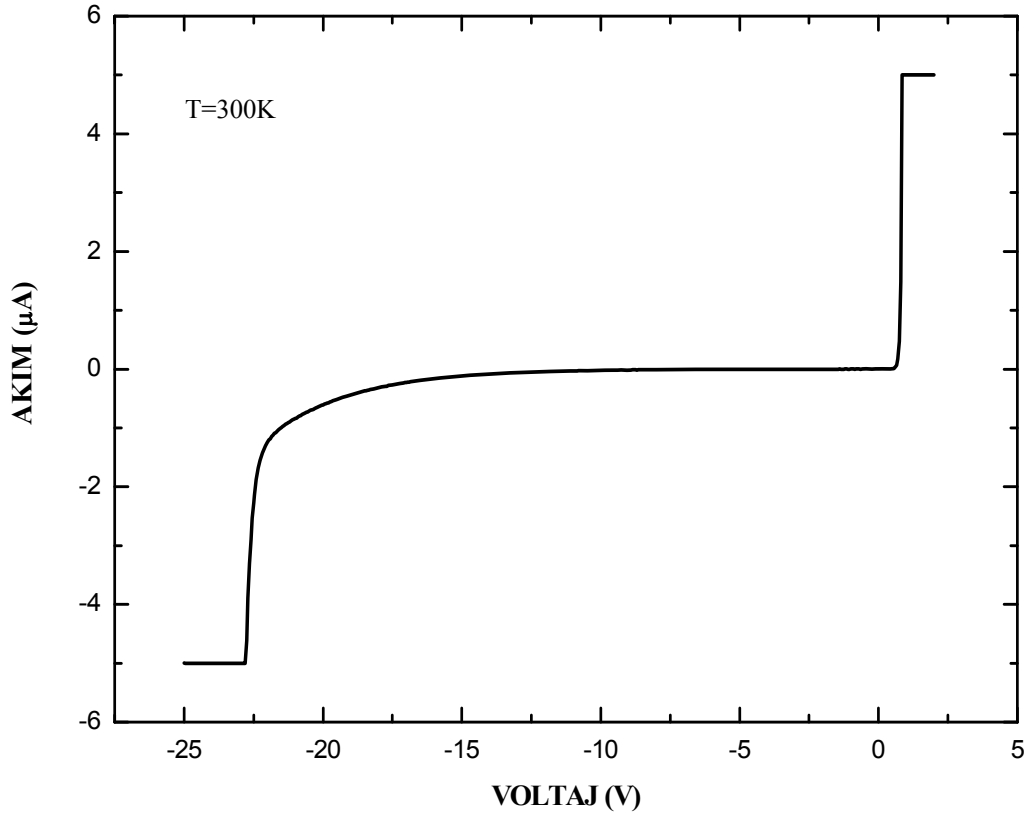
4.1.1 InAs Kuantum Noktaları içeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

Bir n^+ -p eklemının arınma bölgesi civarında büyütülmüş InAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucu elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.1’de gösterilmektedir.

Örneğin diyot çapı 400 μ m olup ölçümler -25V - +2V aralığında 0.05V’luk adımlarla yapıldı. Örneği yüksek akıma karşı korumak için güç kaynağının akım çıkışı $\pm 5\mu$ A olacak şekilde sınırlandırıldı.

Ölçüm sonucunda bu örnek için oda sıcaklığında kırılma (breakthrough) voltajı ileri besleme yönünde 1.28V, geri besleme yönünde ise -22V olarak bulundu.

Örneğin kontak direnci düşük olup omik kontak olarak kabul edilebilir. Oda sıcaklığında alınan ölçümlerde geri besleme doğrultusunda düşük kaçak akım gözlemlendi. Bu da örneğin diyot karakteristiğini ve alınacak C-V ölçüm sonuçlarını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle bu sıcaklık değerindeki ölçümler kaçak akımın olmadığı voltaj değerlerinde alındı.



Şekil 4.1: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğe aşırı akım uygulamamak için güç kaynağının akım çıkışı maksimum 5µA olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Örneğin kırılma voltajı, sıcaklığa bağlı olarak değişmekte olup n^+ ve p tipi tabakaların konsantrasyonları kullanılarak bariyer potansiyeli,

$$V_b = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{\left(\sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right) \right)^2} \right) \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanarak oda sıcaklığında 1.3V olarak bulunmuştur. İfadede k_B , Boltzmann sabitini T , sıcaklığı e , elektronun yükünü N_a ve N_d sırasıyla akseptör ve donör katkı konsantrasyonu, E_g , yasak bant aralığını N_C ve N_V , sırasıyla iletkenlik ve

valans bandı seviye yoğunluklarını göstermektedir. Hesaplamalarda kullanılan fiziksel büyüklükler Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1: Katkı konsantrasyonları kullanılarak diyotun bariyer potansiyeli hesaplanırken kullanılan fiziksel büyüklüklerin 300K’deki değerleri.

N_a (m ⁻³)	N_d (m ⁻³)	k_B (J/K)	$E_{g,GaAs}$ (eV)	N_C (m ⁻³)	N_V (m ⁻³)	e (C)
3×10^{22}	7×10^{24}	1.38×10^{-23}	1.42	3.9×10^{23}	8.9×10^{24}	1.60218×10^{-19}

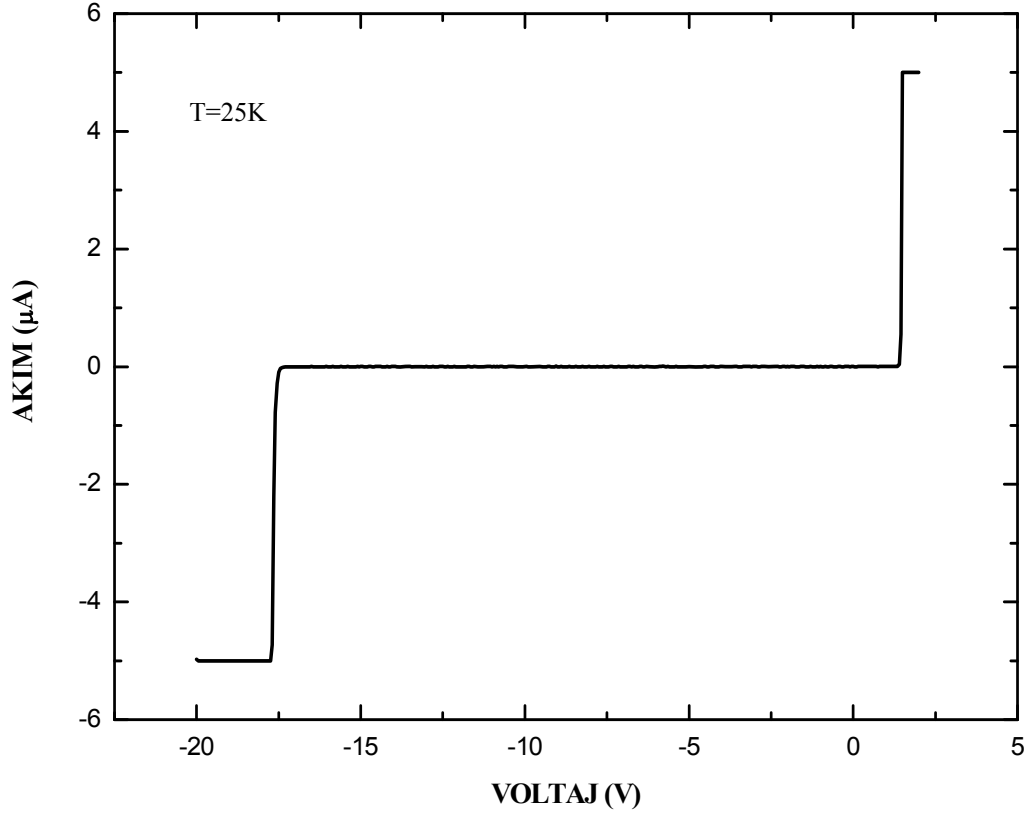
Aynı örnek için 25K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.2’de verilmiştir.

Düşük sıcaklıklarda örneğin diyot karakteristiğinin belirgin şekilde iyileştiği gözlenmektedir. Oda sıcaklığında geri besleme doğrultusunda görülen düşük kaçak akım, 25K sıcaklığında gözlemlenememiştir.

Şekil 4.2’de gösterilen grafikten, örneğin geri besleme kırılma voltajı -17.5V ve ileri besleme kırılma voltajı 1.4V olarak bulunmuştur. Denklem (4.1) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen bariyer potansiyeli 1.49V olup grafikten elde edilen değere eşit kabul edilebilir. 25K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: 25K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklüklerin değerleri.

N_a (m ⁻³)	N_d (m ⁻³)	k_B (J/K)	$E_{g,GaAs}$ (eV)	N_C (m ⁻³)	N_V (m ⁻³)	e (C)
3×10^{22}	7×10^{24}	1.38×10^{-23}	1.509	9.5×10^{21}	2.1×10^{23}	1.60218×10^{-19}



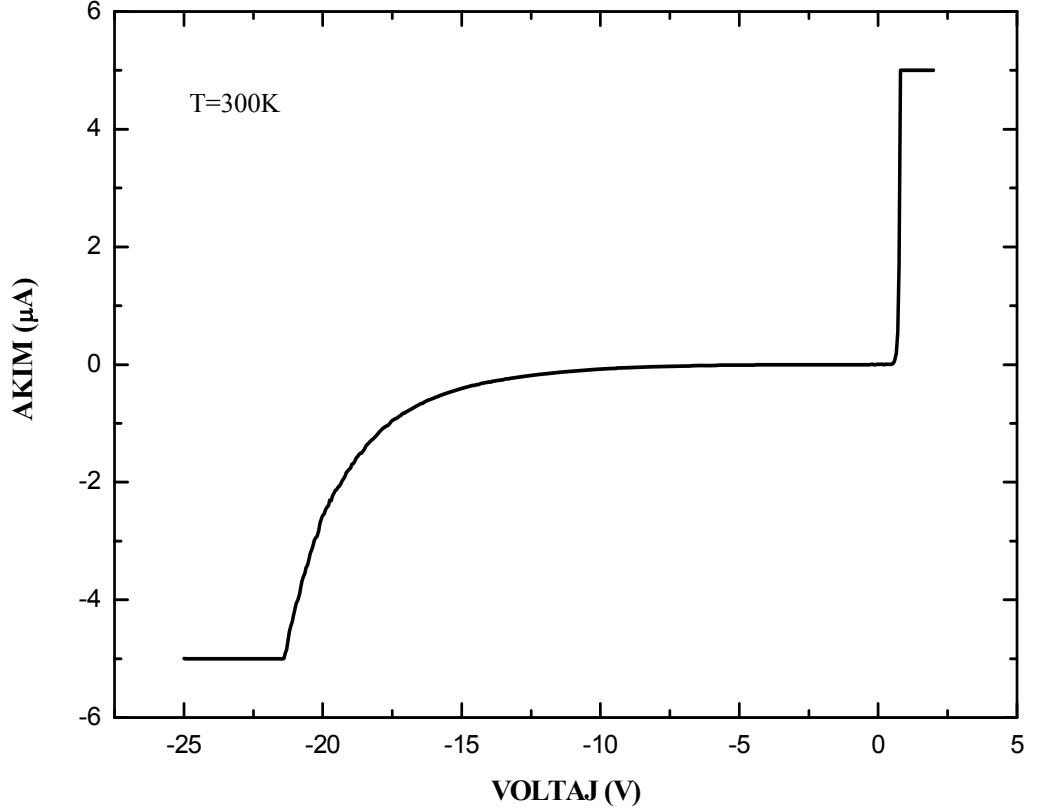
Şekil 4.2: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 25K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğe aşırı akım uygulamamak için güç kaynağının akım çıkışı maksimum $5\mu\text{A}$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -17.5V , ileri besleme yönündeki kırılma voltajı 1.4V 'tur.

4.1.2 GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

Bir n^+ - p ekleminin arınma bölgesi civarında büyütülmüş Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.3'de gösterilmektedir. Örnekte diyot yapısını oluşturan n^+ ve p tipi GaAs katmanlarının kalınlıkları, InAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) ile aynıdır.

Akım-Voltaj ölçümü sonucunda oda sıcaklığında, örneğin diyot karakteristiği gösterdiği açıkça görülmüştür. Geri besleme doğrultusunda -12V 'luk gerilim değeri sonrasında küçük kaçak akımlar gözlemlendi. Diyotun geri besleme ve ileri besleme durumlarında

kırılma voltajları sırasıyla -18V ve 0.95V olarak bulundu. Örneğin kırılma voltajı, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Denklem (4.1) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen bariyer potansiyeli 1.3V'tur. Grafikten elde edilen değer farklı olması küçük kaçak akımların varlığını gösterir.



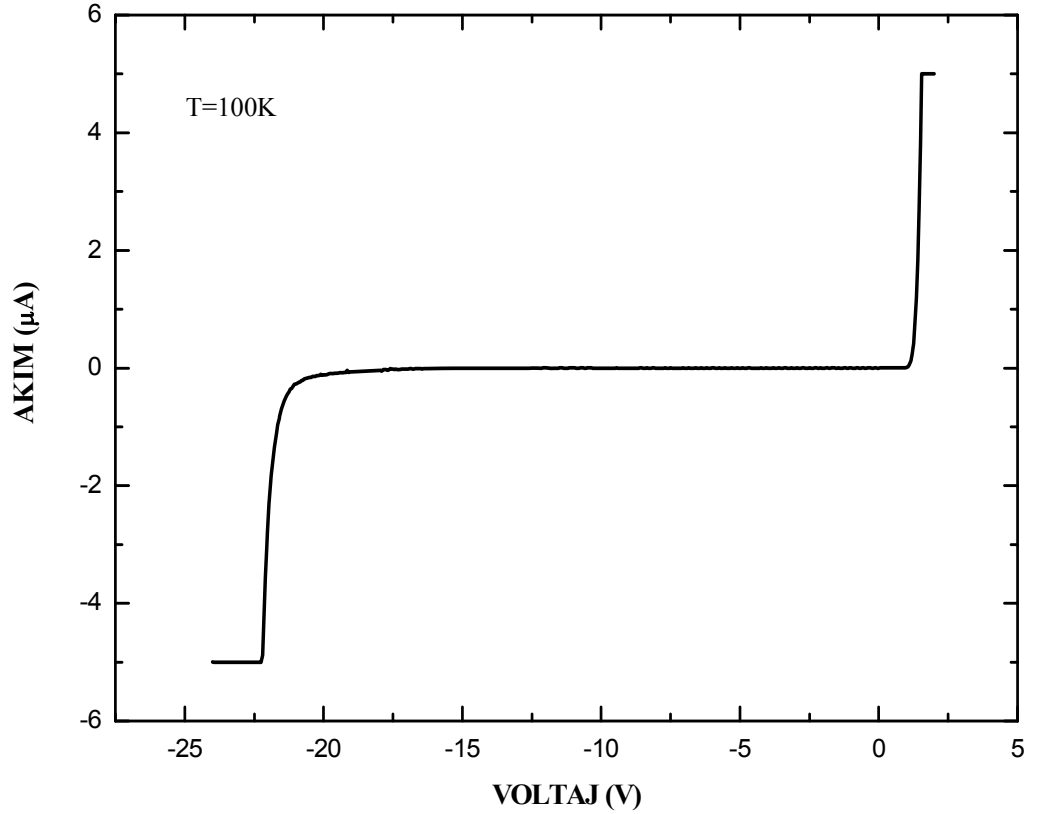
Şekil 4.3: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -18V, ileri besleme yönündeki kırılma voltajı 0.95V'tur.

GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için 100K sıcaklığında, alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu değerler, oda sıcaklığında alınan Akım-Voltaj değerleri ile kıyaslandığında kaçak akımların azaldığı ve diyot karakteristiğinin belirgin bir şekilde iyileştiği görüldü.

GaSb/GaAs Kuantum Noktası sisteminin iletkenlik bandı süreksizliği, InAs/GaAs Kuantum Noktası sistemine göre daha büyük olduğundan, GaSb Kuantum Noktalarının elektriksel özelliklerin daha yüksek sıcaklıklarda gözlemlenmesi beklenmektedir.

Farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümler sonucunda GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için en uygun sıcaklık 100K olarak belirlendi.

Örneğin diyot çapı 400 μ m olup ölçümler, -25V - +2V aralığında 0.05V'luk adımlarla yapıldı. Örneği yüksek akıma karşı korumak için güç kaynağının akım çıkışı $\pm 5\mu$ A olacak şekilde sınırlandırıldı.



Şekil 4.4: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5823) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görölmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -21V, ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise 1.4V'tur.

Şekil 4.4’de gösterilen grafikten, örneğin geri besleme kırılma voltajı -21V ve ileri besleme kırılma voltajı 1.4V olarak bulunmuştur. Denklem (4.1) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen bariyer potansiyeli 1.47V olup grafikten elde edilen değere eşit kabul edilebilir. 100K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3: 100K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklüklerin değerleri.

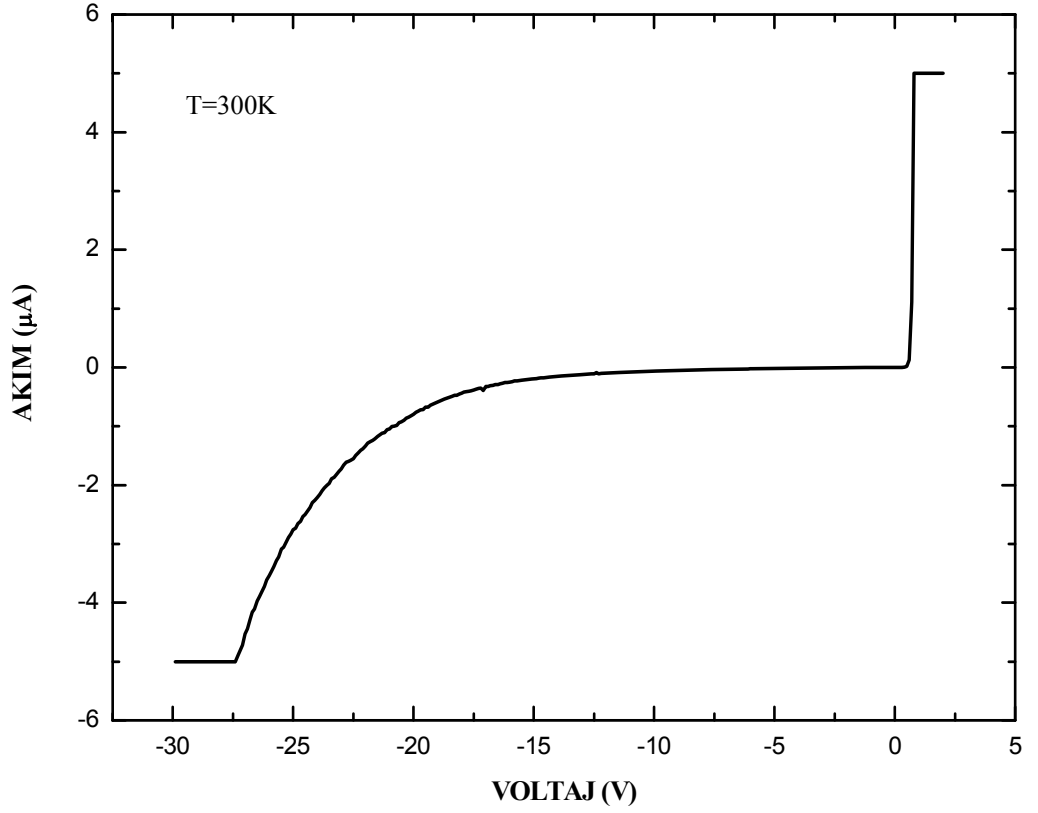
N_a (m ⁻³)	N_d (m ⁻³)	k_B (J/K)	$E_{g,GaAs}$ (eV)	N_C (m ⁻³)	N_V (m ⁻³)	e (C)
3×10^{22}	7×10^{24}	1.38×10^{-23}	1.49	7.6×10^{22}	1.7×10^{24}	1.60218×10^{-19}

4.1.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Akım-Voltaj Ölçüm Sonuçları

Bu örnekte, InAs Kuantum Noktaları civarında Al_{0.6}Ga_{0.4}As bariyer tabakası büyütülerek Kuantum Noktasında bulunan taşıyıcıların daha uzun süre Kuantum Noktasında kalması amaçlanmaktadır.

MBE tekniği ile büyütülmüş, bir n⁺-p eklemine arınma bölgesi civarında Kuantum Noktaları ve Al_{0.6}Ga_{0.4}As bariyer tabaka içeren örnek (5-712) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.5’de verilmektedir. Örnekte taşıyıcılar boşluklardır.

Örneğin diyot çapı 800µm olup ölçümler -30V - +2V aralığında 0.05V’luk adımlarla yapıldı. Örneği yüksek akıma karşı korumak için güç kaynağının akım çıkışı ±5µA olacak şekilde sınırlandırıldı.



Şekil 4.5: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek (5-712) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı $-19V$, ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise $0.9V$ 'tur.

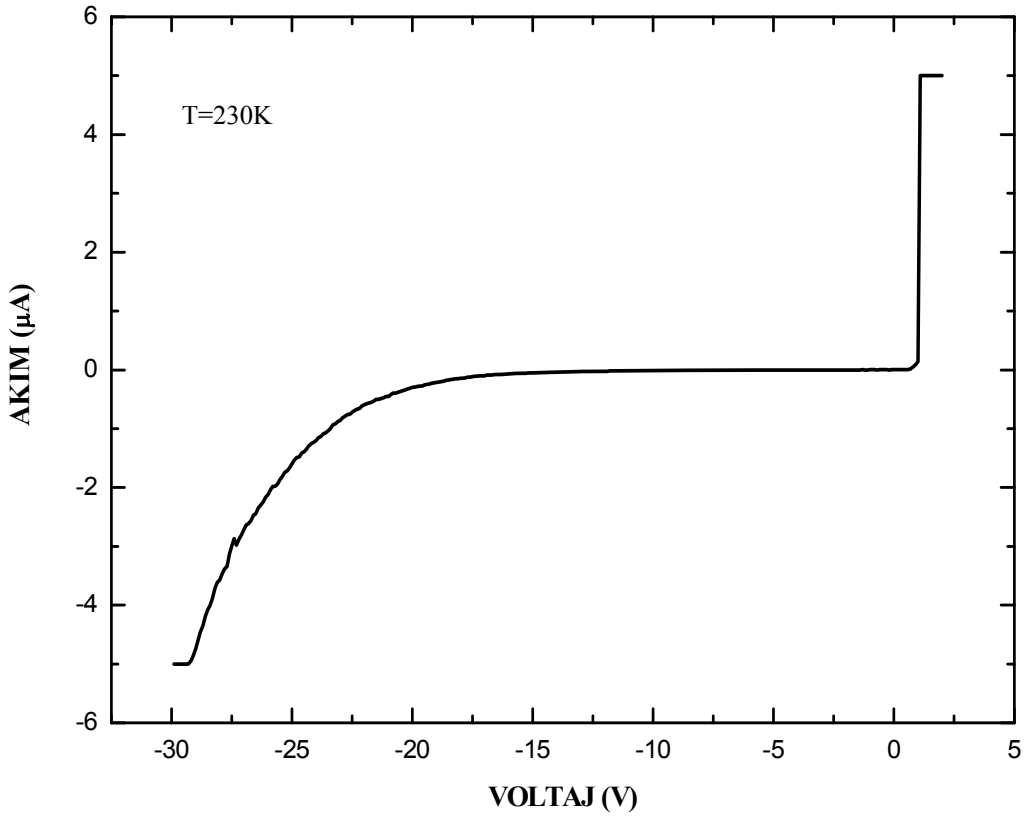
Oda sıcaklığında alınan I-V ölçümü sonucunda örneğin diyot karakteristiği gösterdiği görüldü ve geri besleme doğrultusunda $-15V$ 'tan sonra küçük kaçak akımlar gözlemlendi. Diyotun geri besleme ve ileri besleme durumlarında kırılma voltajları sırasıyla $-19V$ ve $0.9V$ olarak bulundu.

Denklem (4.1) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen bariyer potansiyeli $1.2V$ olup grafikten elde edilen değerden biraz farklıdır. 5-712 örneğinin, $300K$ sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: 5-712 örneğinin, 300K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler.

N_a (m^{-3})	N_d (m^{-3})	k_B (J/K)	$E_{g,GaAs}$ (eV)	N_C (m^{-3})	N_V (m^{-3})	e (C)
3×10^{-22}	7×10^{-24}	1.38×10^{-23}	1.49	7.6×10^{22}	1.7×10^{24}	1.60218×10^{-19}

Örneğin 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek (5-712) için 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Akım-Voltaj değişimi. Diyot karakteristiği açıkça görülmektedir. Örneğin geri besleme için kırılma voltajı -20V, ileri besleme yönündeki kırılma voltajı ise 1.0V'tur.

Bu değişim oda sıcaklığında alınan Akım-Voltaj değişimiyle kıyaslandığında kaçak akımların azaldığı ve diyot karakteristiğinin iyileştiği görüldü. Denklem (4.1) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu elde edilen bariyer potansiyeli 1.3V olup

grafikten elde edilen değerden biraz farklıdır. 5-712 örneğinin, 230K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: 5-712 örneğinin, 230K sıcaklığında bariyer potansiyelini hesaplamak için kullanılan fiziksel büyüklükler.

N_a (m ⁻³)	N_d (m ⁻³)	k_B (J/K)	$E_{g,GaAs}$ (eV)	N_C (m ⁻³)	N_V (m ⁻³)	e (C)
3×10^{-22}	7×10^{-24}	1.38×10^{-23}	1.49	7.6×10^{22}	1.7×10^{24}	1.60218×10^{-19}

4.2. KAPASİTE-VOLTAJ (C-V) ÖLÇÜM SONUÇLARI

Farklı sıcaklıklarda alınan Kapasite-Voltaj ölçümleri ile bir n⁺- p eklemesinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş Kuantum Noktaları içeren örneklerin elektriksel özellikleri incelenmiştir.

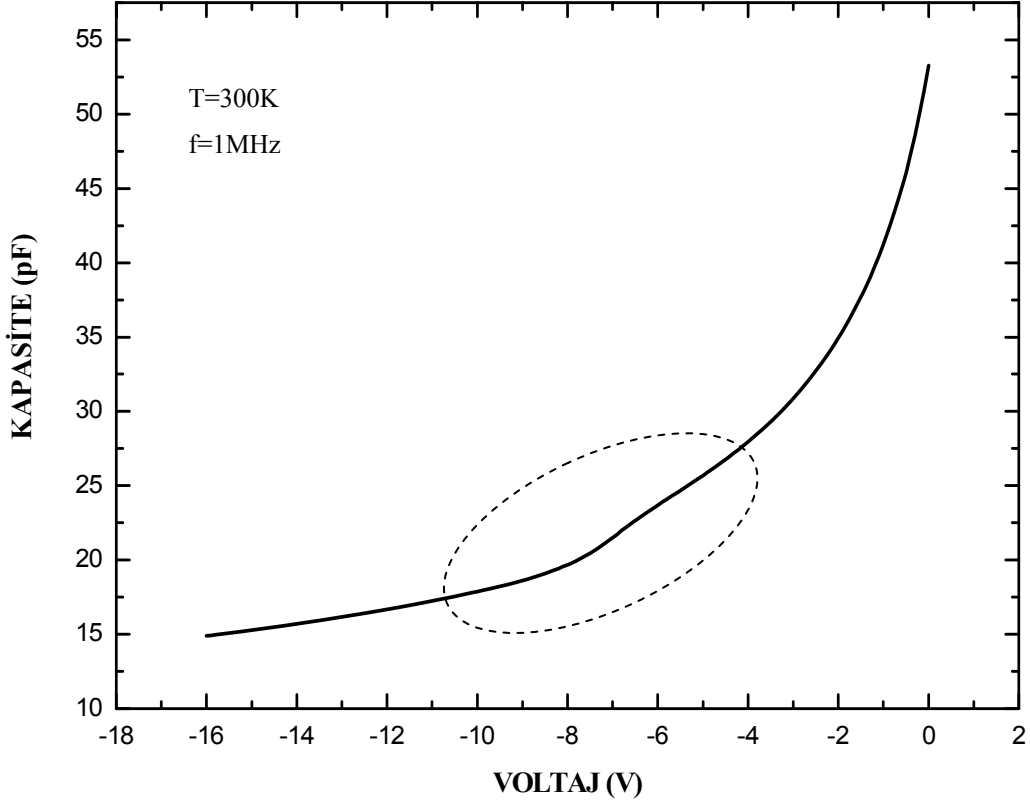
4.2.1 InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları

InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Kapasite-Voltaj eğrisinde -6V ile -10V aralığında oluşan değişim, Kuantum Noktalarında yer alan boşlukların hareketlerinden kaynaklanmakta olup Kuantum Noktalarının varlığını işaret eder.

Oda sıcaklığında taşıyıcıların sahip olduğu kinetik enerji yüksek olduğu ve InAs/GaAs Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcıların nanosaniye mertebesinde kısa bir zaman içerisinde termal emisyonla uğradığı [4,48,54] için oda sıcaklığında Kapasite-Voltaj ölçümleriyle taşıyıcı hareketleri belirgin bir biçimde gözlemlenememiştir.

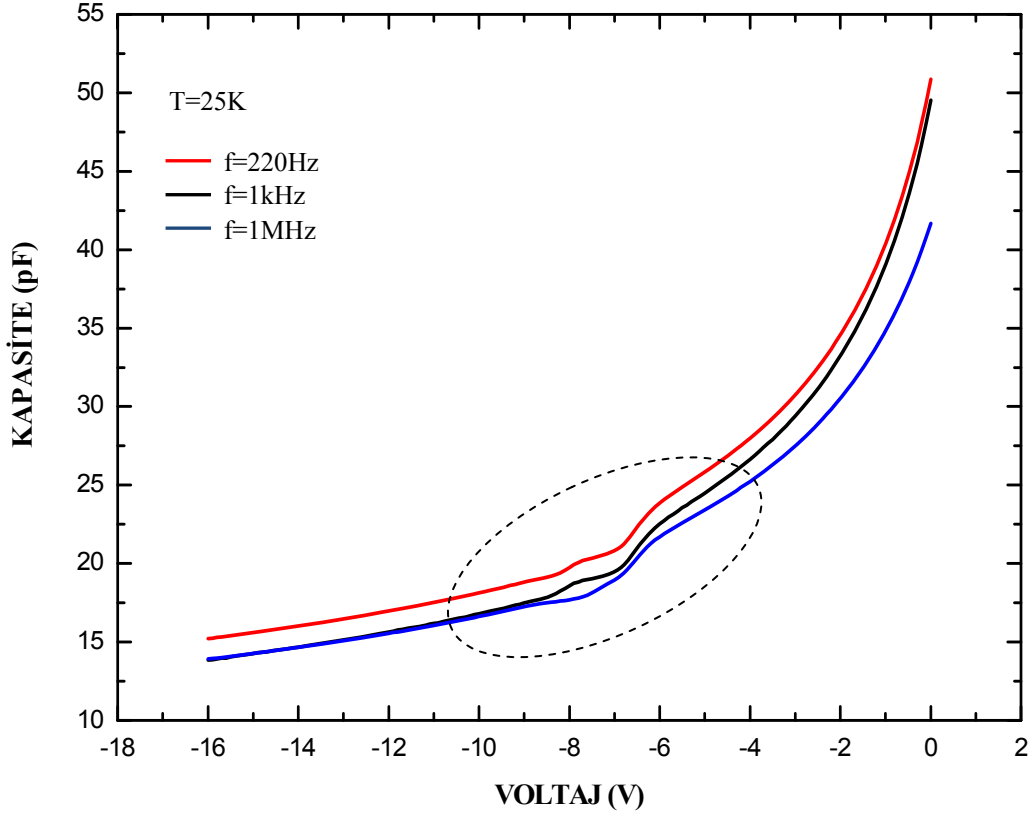
Düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde taşıyıcıların Kuantum Noktalarında kalma süreleri arttığı için Kapasite-Voltaj ölçüleriyle taşıyıcıların hareketlerinin gözlemlenmesi mümkün olabilmektedir.



Şekil 4.7: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan değişim Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır.

Kapasite-Voltaj ölçümleriyle bulunan taşıyıcıların hareketlerinin belirlenebilmesi için 25K sıcaklığında ölçümler alınmıştır. Taşıyıcı hareketlerinin gözlemlenmesinde, ölçüm frekansının etkisinin anlaşılması için üç farklı frekansta ölçümler alınmıştır. Yüksek Frekanslarda yapılan ölçümlerde, ölçme hızı da yüksek olduğundan taşıyıcı hareketleri ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.

Şekil 4.8’de 25K sıcaklığında,220Hz, 1kHz ve 1MHz frekanslarında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi gösterilmektedir.

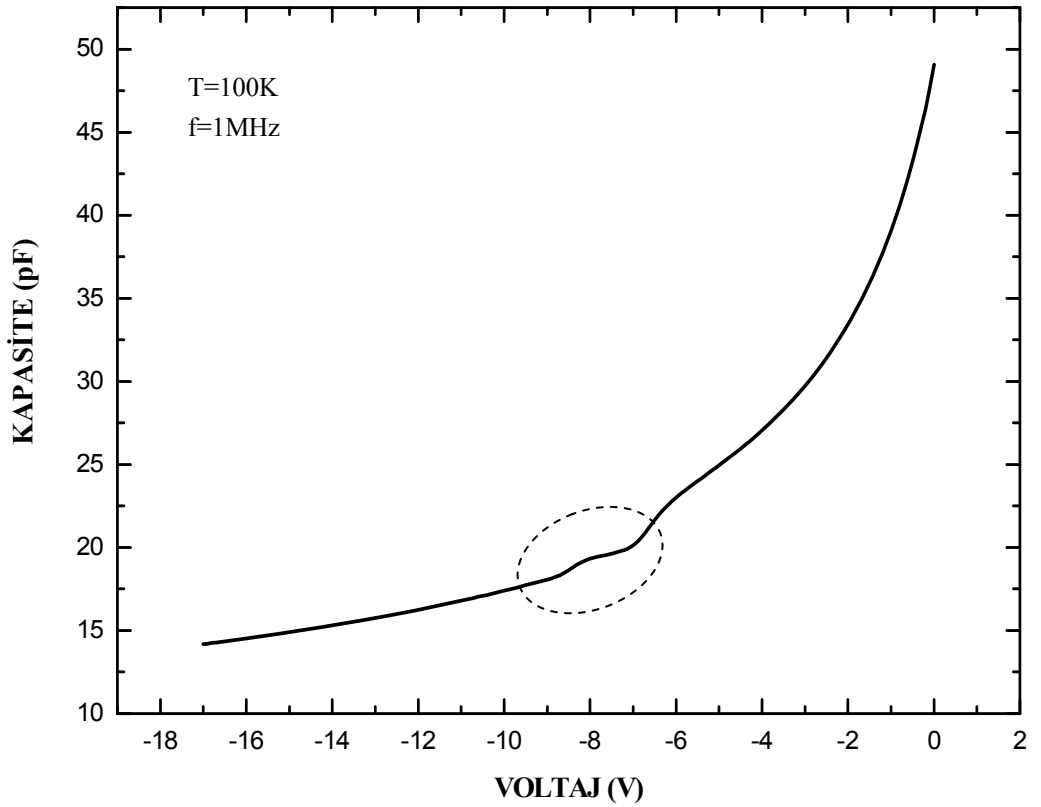


Şekil 4.8: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 25K sıcaklığında220Hz (kırmızı çizgi), 1kHz (siyah çizgi) ve 1MHz (mavi çizgi) frekanslarında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi gösterilmektedir. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır.

Alçak frekans ölçümlerinde kapasite değerinin yüksek frekanslara göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da alçak frekans ölçümlerinde ölçüm hızının azalmasından kaynaklanmaktadır. Kapasite-Voltaj ölçümlerinde gözlemlenen ve Kuantum Noktalarının varlığından kaynaklanan plato şekli frekansa bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 4.9'da 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi gösterilmektedir.

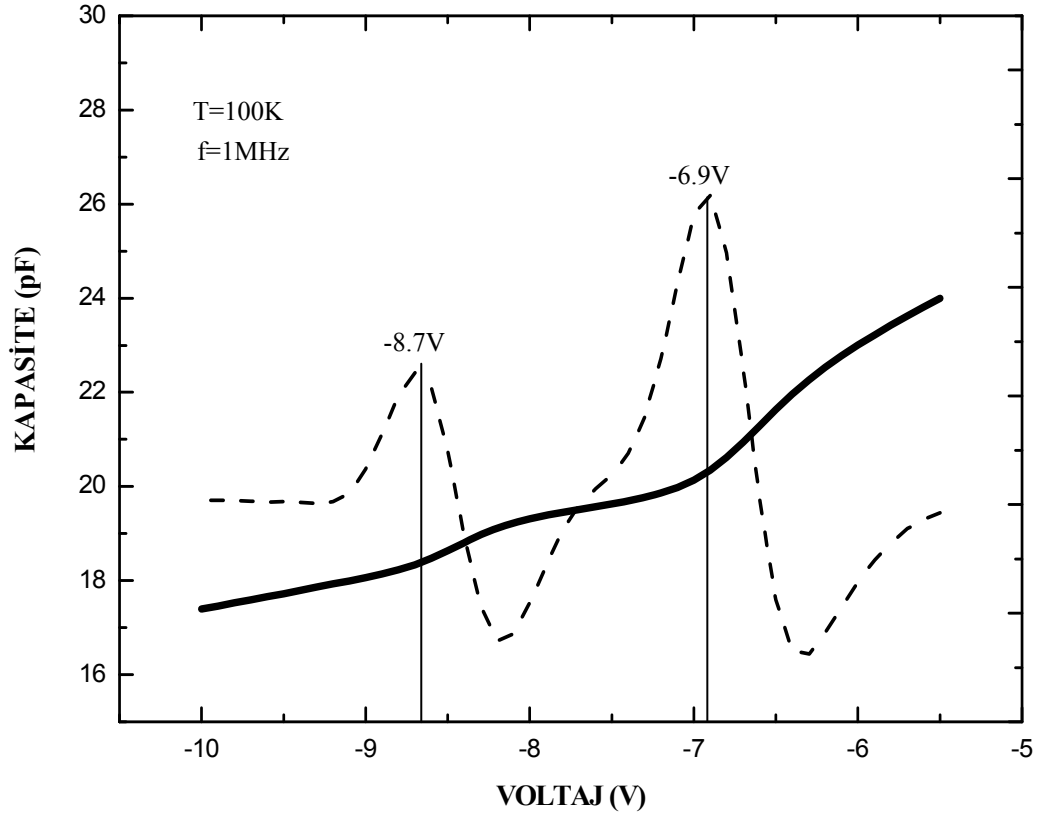
Ölçüm yapılırken geri besleme voltajının artırılmasıyla diyodun arınma bölgesi genişliği Kuantum Noktalarına ulaştığında, Kuantum Noktalarında yer alan taşıyıcıların hareketiyle yük miktarında meydana gelen değişiklik kapasite değerini de değiştirmektedir.



Şekil 4.9: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR Metre kullanılmıştır.

Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alındığında, elde edilen maksimum noktalar eğri üzerinde oluşan platonun başladığı ve bittiği voltaj değerlerini verecektir. Şekil 4.10'da Kapasite-Voltaj eğrisi ve bu eğrinin ikinci türevinin alınmasıyla elde edilen maksimum noktaları gösterilmektedir.

Bir n^+ - p eklemine geri besleme uygulanarak Kapasite-Voltaj değişimi incelendiğinde diyodun p tipi bölgesinde yer alan serbest taşıyıcılar (boşluklar), kapasite değerini belirler. Bu da katkı konsantrasyonu ile doğru orantılıdır. Arınma bölgesi genişliği aynı zamanda uygulanan geri besleme voltajına da bağlıdır.



Şekil 4.10: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek (TU5822) için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi ve bu değişimin ikinci türevi. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.

TU5822 örneğinin 100K sıcaklığında yapılan deney sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj eğrisinden, p tipi bölge için katkı konsantrasyonu (N_a) değeri,

$$N_a = \frac{2}{A^2 \epsilon \epsilon_0 e} \left(\frac{d(1/C^2)}{dV} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

formülü ile hesaplandı. Burada A alanı, V uygulanan voltajı, C ölçülen kapasite değerini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini ve ϵ da ortamın (GaAs) dielektrik sabitini göstermektedir. Kapasite-Voltaj eğrisinden katkı konsantrasyonu hesaplanırken kullanılan fiziksel büyüklükler tablo 4.6'da gösterilmiştir. Örnek dairesel şekilde olup çapı $400\mu\text{m}$ 'dir.

Tablo 4.6: TU5822 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.

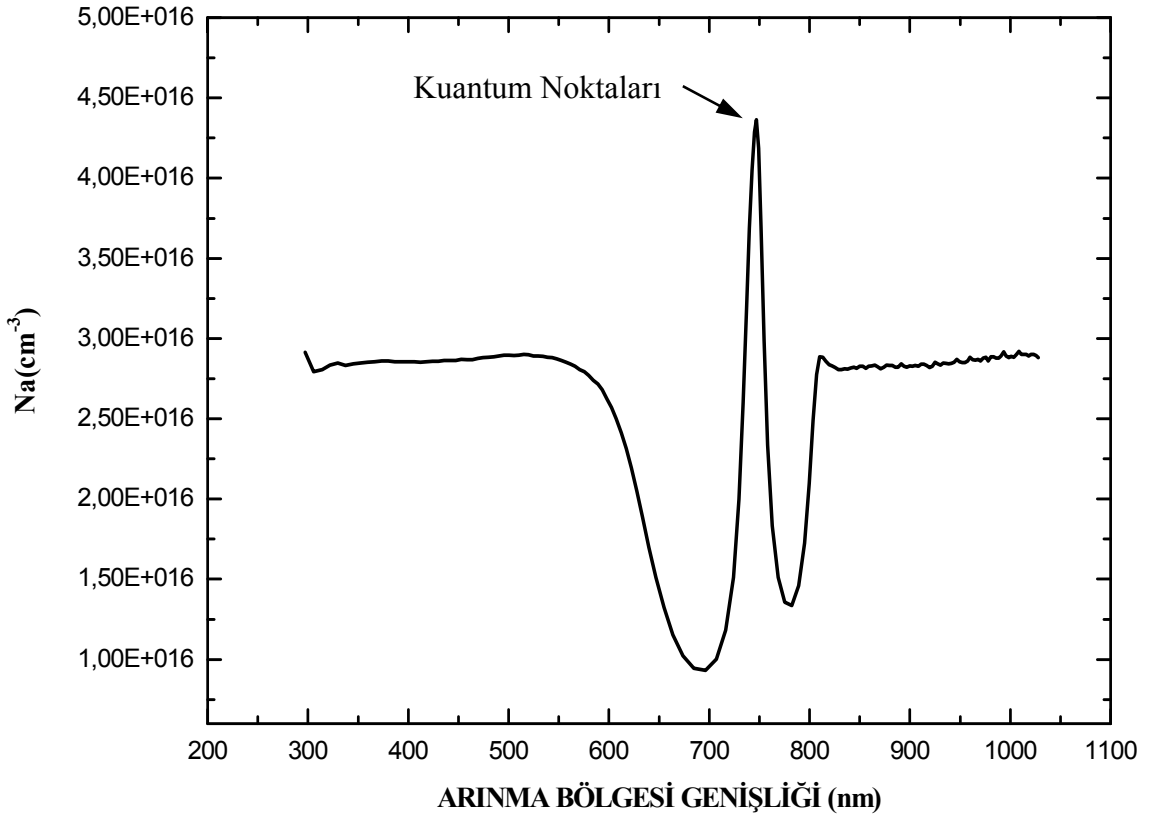
A (m ²)	ϵ_0 (C ² /Nm ²)	ϵ_{GaAs}	e (C)
$1.256637061 \times 10^{-7}$	8.85418×10^{-12}	13.1	1.60218×10^{-19}

Ölçümlerde elde edilen kapasite değeri ve tablo 4.6'da verilen fiziksel büyüklükler kullanılarak örneğin p tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu,

$$w_a = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(V)} \quad (4.3)$$

ifadesi ile hesaplanmıştır.

Kapasite-Voltaj eğrisi kullanılarak hesaplanan katkı konsantrasyonu (N_a)- arınma bölgesi genişliği (w) değişimi şekil 4.11'de gösterilmiştir.

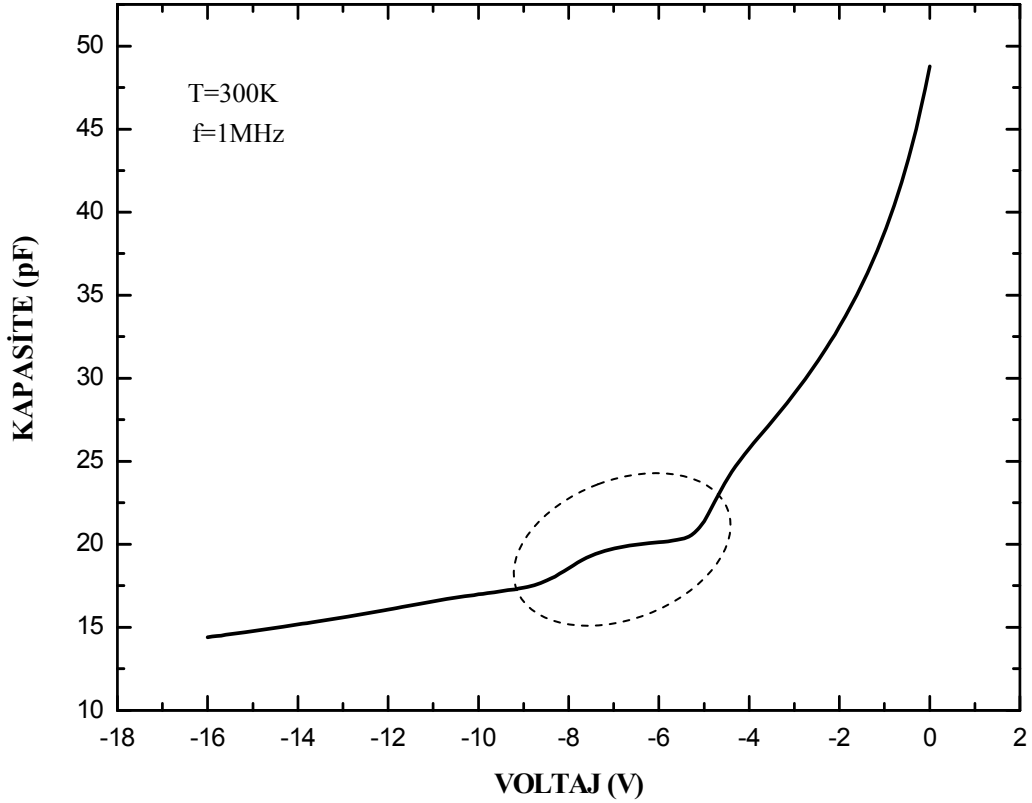


Şekil 4.11: TU5822 örneğinin 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu (Na)-arınma bölgesi genişliği (w) değişimi. Diyot çapı $400\mu\text{m}$ 'dir. Diyotun p tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 740nm 'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan (hole) kaynaklanmaktadır.

Yapılan hesaplama sonucunda diyotun p tipi bölgesinin katkı konsantrasyonu $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Arınma bölgesinin 740 nm 'deki değeri için kapasitede meydana gelen hızlı artış, Kuantum Noktalarında yer alan boşlukların uygulanan elektrik alan altında tünelleme yaparak Kuantum Noktalarından ayrıldıklarını göstermektedir.

4.2.2 GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları

GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi şekil 4.12’de gösterilmiştir. GaSb/GaAs yapısının iletkenlik bandı süreksizliği, InAs/GaAs yapısının iletkenlik bandı süreksizliğinden daha büyük olduğu için GaSb Kuantum Noktasında yer alan taşıyıcıların Kuantum Noktasından ayrılmaları için gereken termal enerji daha fazladır[4]. Bu nedenle GaSb/GaAs sisteminde taşıyıcı hareketlerinin incelenmesi göreceli olarak daha yüksek sıcaklarda yapılabilmektedir.

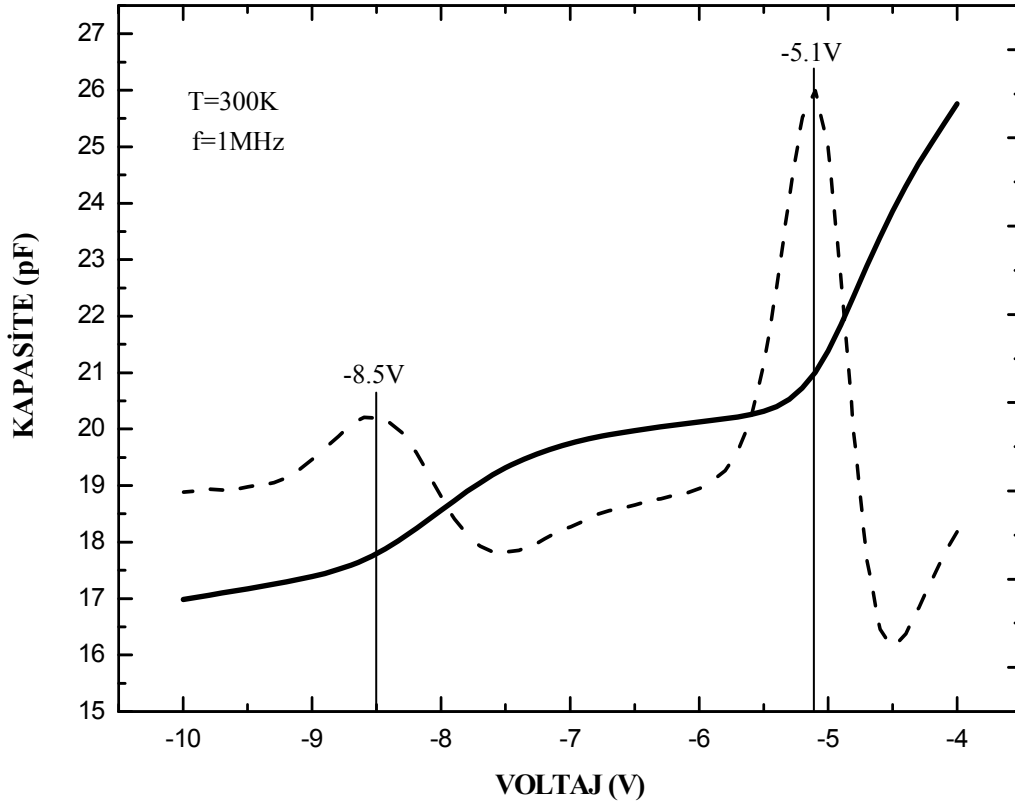


Şekil 4.12: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçümü sonucunda elde edilen değişim. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR-Metre kullanılmıştır.

GaSb Kuantum Noktalı örnek için oda sıcaklığında yapılan deney sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alındığında, elde edilen maksimum

noktalar eğri üzerinde oluşan platonun başladığı ve bittiği voltaj değerlerini dolayısıyla Kuantum Noktalarının başlangıç ve bitiş noktalarını vermektedir.

Şekil 4.13'te Kapasite-Voltaj eğrisi ve bu eğrisinin ikinci türevinin alınmasıyla elde edilen maksimum noktaları gösterilmektedir.



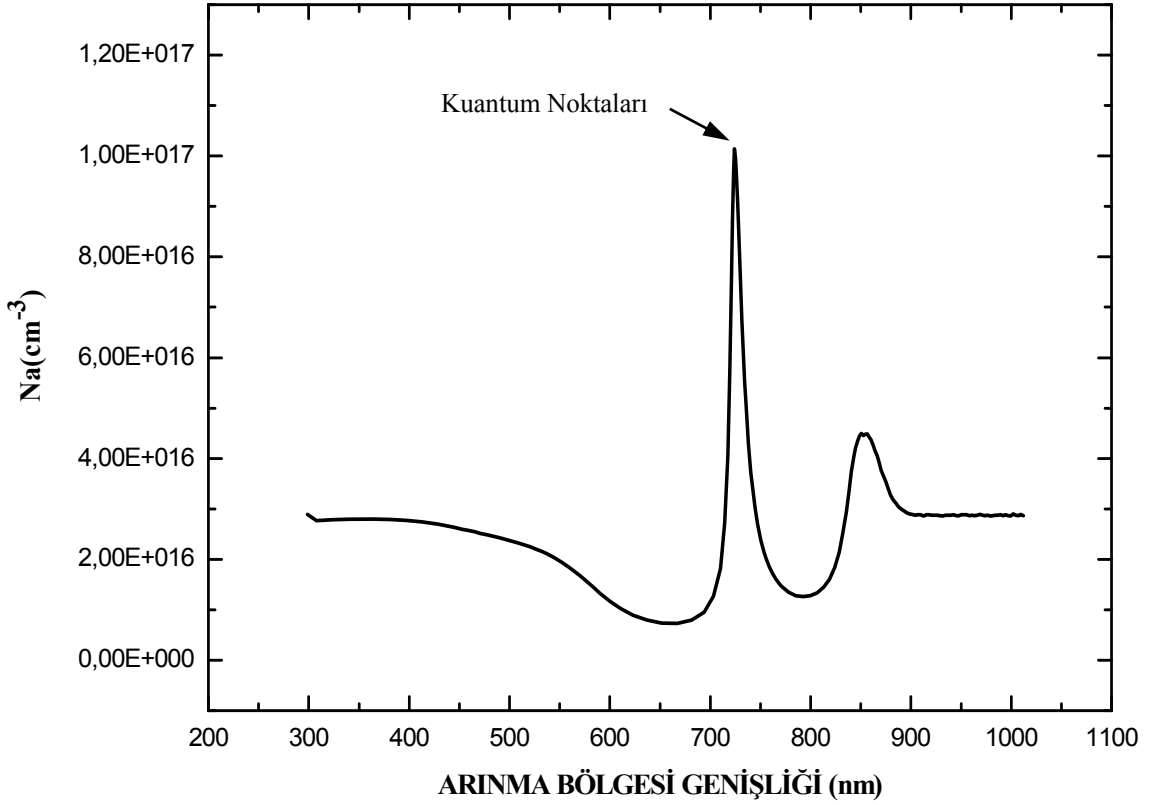
Şekil 4.13: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçümü sonucunda elde edilen değişim. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.

Oda sıcaklığında yapılan deneyler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj eğrisinden denklem (4.2) kullanılarak örneğin katkı konsantrasyonu hesaplanmıştır. Yine kapasite değerleri denklem (4.3)'te yerine yazılarak arınma bölgesi genişliği hesaplanmıştır. Kapasite-Voltaj eğrisinden katkı konsantrasyonu ve arınma bölgesi genişliği hesaplanırken kullanılan fiziksel büyüklükler tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7: TU5823 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.

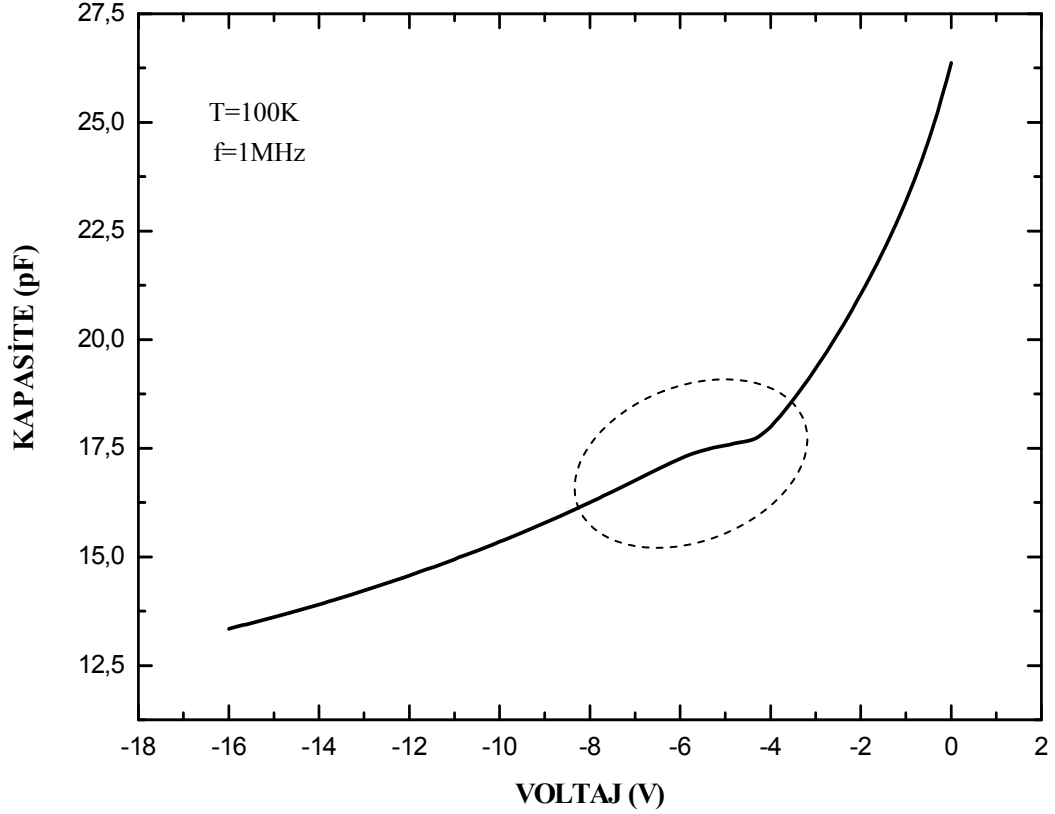
A (m ²)	ϵ_0 (C ² /Nm ²)	ϵ_{GaAs}	e (C)
$1.256637061 \times 10^{-7}$	8.85418×10^{-12}	13.1	1.60218×10^{-19}

Şekil 4.14'te TU5823 örneğinin p tipi bölgesinin katkı konsantrasyonu-geri besleme durumunda arınma bölgesi genişliğinin değişimi gösterilmektedir



Şekil 4.14: TU5823 örneğinin oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu N_a ile arınma bölgesi genişliği w değişimi. Diyot çapı $400\mu\text{m}$ 'dir. Diyotun p tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 720nm 'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.

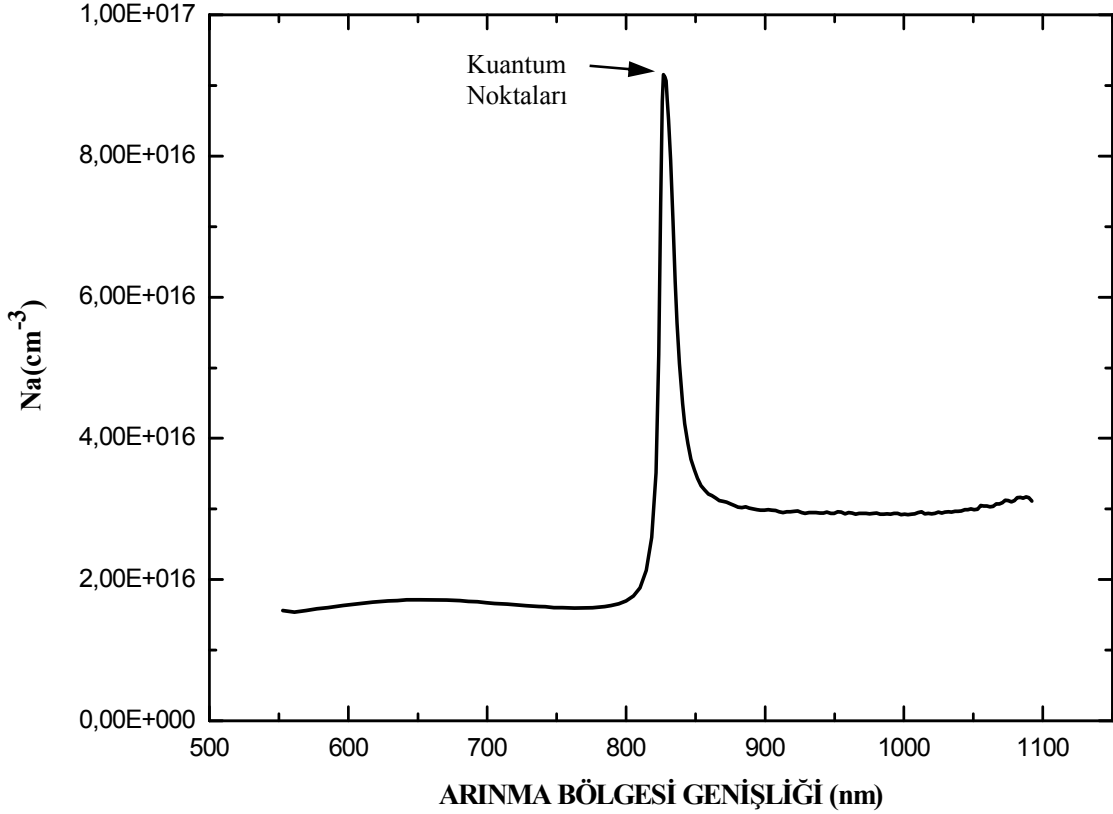
Aynı örnek için 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçümü sonucunda elde edilen değişim şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kesikli çizgi içerisinde kalan alanda oluşan plato (plateau) Kuantum Noktalarının varlığını işaret etmektedir. Ölçümlerde HP4284A LCR-Metre kullanılmıştır.

Ölçüm sonucunda, sıcaklığın düşmesine bağlı olarak kapasite değerinde de bir azalma meydana geldiği gözlemlendi. 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm eğrisinden denklem (4.2) kullanılarak 400 μ m çapındaki örnek için katkı konsantrasyonu ve denklem (4.3) kullanılarak ta arınma bölgesi genişliği hesaplanmıştır. Hesaplamalarda tablo 4.7'de verilen fiziksel büyüklükler kullanılmıştır.

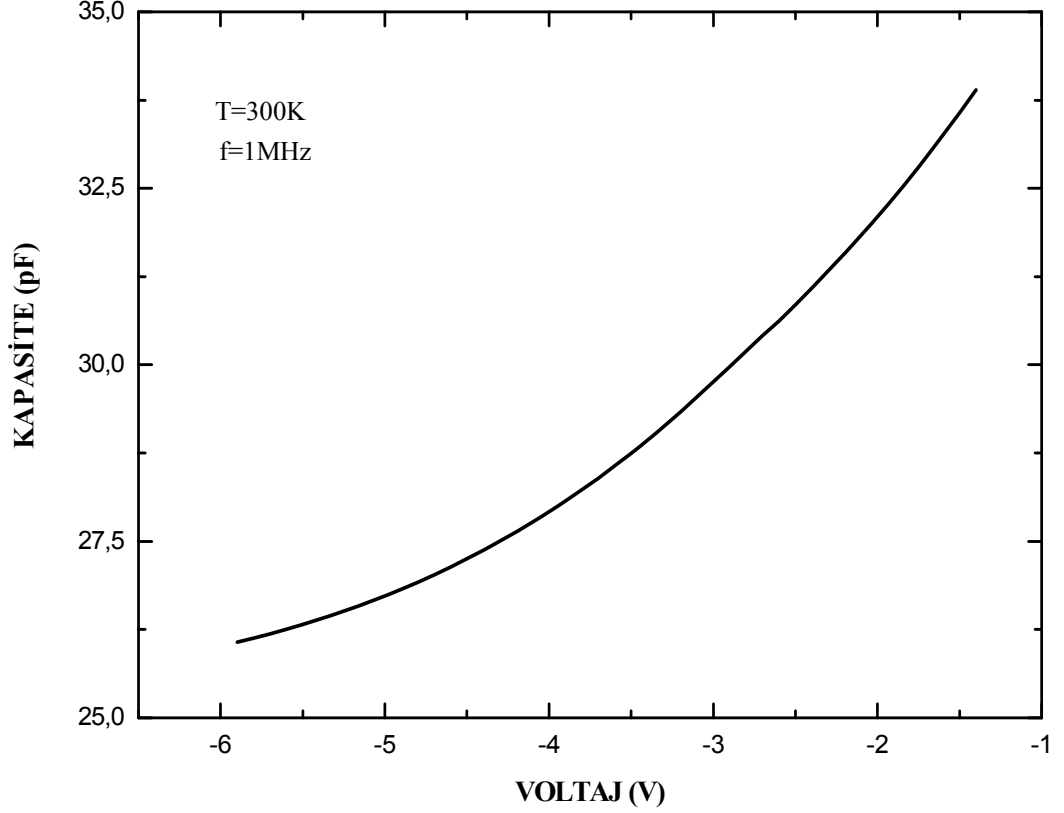
Şekil 4.16'da gösterilen katkı konsantrasyonu- arınma bölgesi genişliği değişiminde bulunan keskin pik Kuantum Noktalarından ayrılan taşıyıcıları işaret eder.



Şekil 4.16. TU5823 örneğinin 100K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu N_a ile arınma bölgesi genişliği w değişimi. Diyot çapı $400\mu\text{m}$ 'dir. 820nm'de görülen keskin pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.

4.2.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer içeren Örneğin Kapasite-Voltaj (C-V) ölçüm sonuçları

n^+ -p eklemesinin arınma bölgesinde, InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer tabaka içeren örnek için oda sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçümü sonucunda elde edilen değişim şekil 4.16'de gösterilmiştir. MBE tekniği ile büyütülen bu örnekte çoğunluk taşıyıcıları boşluklardır.

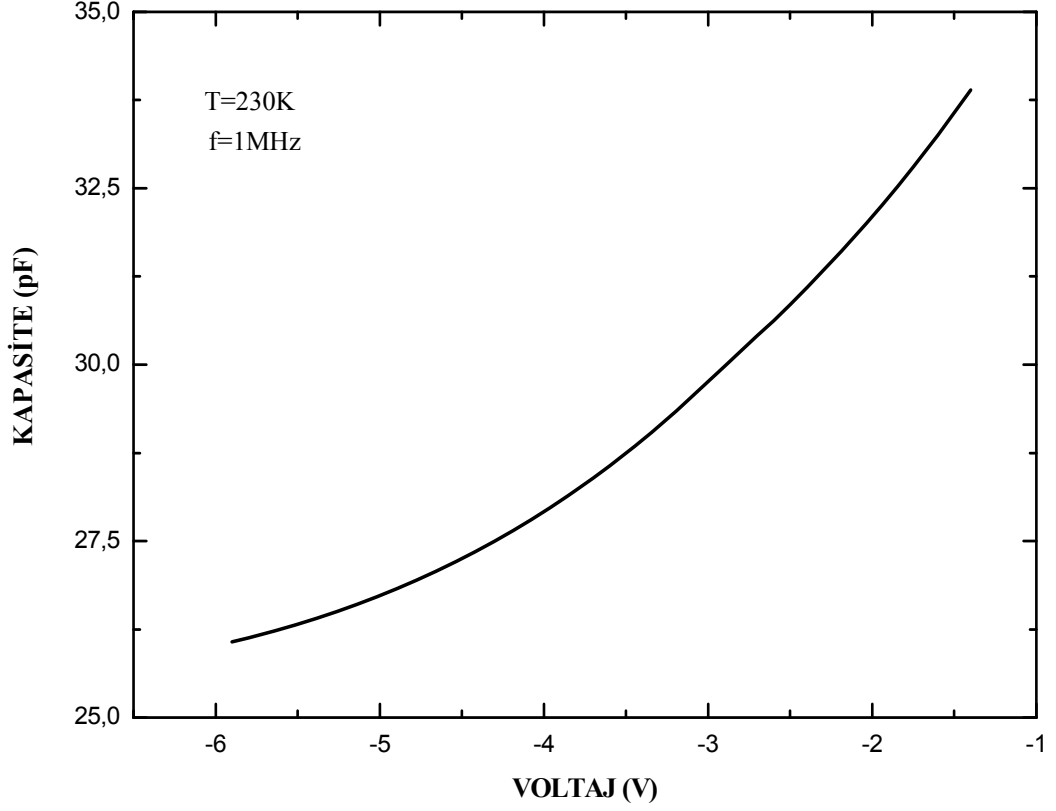


Şekil 4.17: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için oda sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi.

Oda sıcaklığında taşıyıcıların sahip olduğu termal enerjinin yüksek olduğu InAs Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcılar, termal emisyonla uğradığından Kapasite-Voltaj değişiminde, taşıyıcı hareketleri belirgin bir biçimde gözlemlenmemiştir.

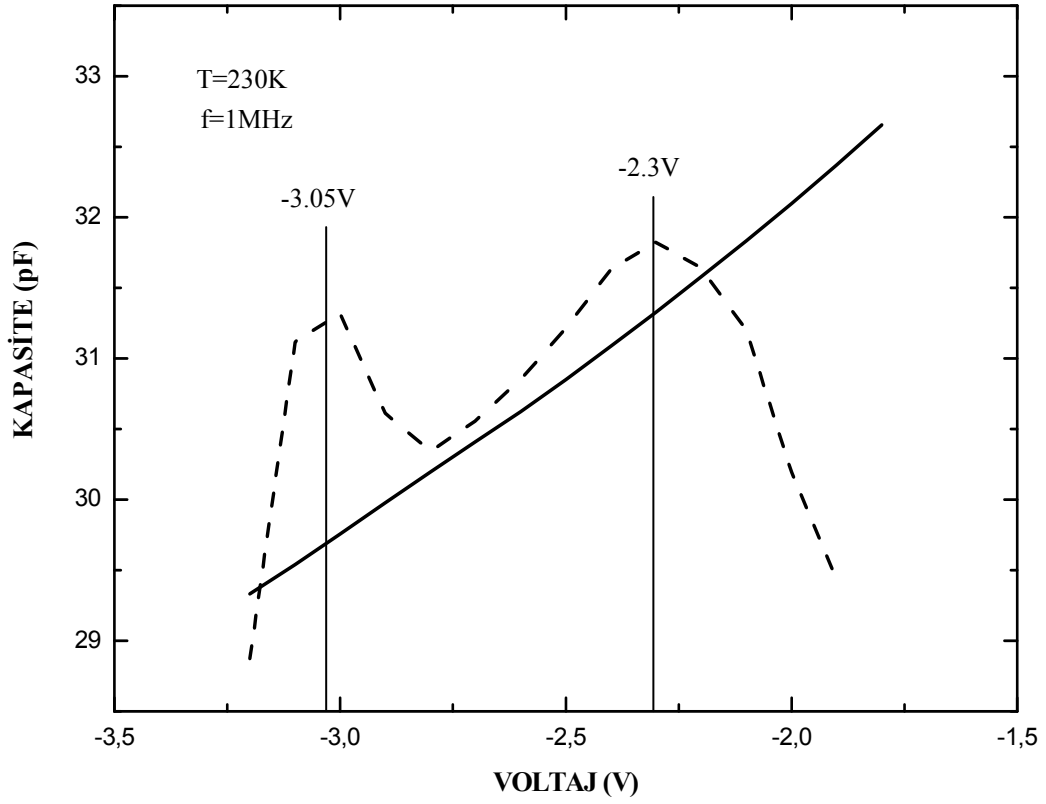
Aynı örneğin 230K’de alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi şekil 4.18’de gösterilmiştir.

Oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde taşıyıcıların Kuantum Noktalarında kalma süreleri arttığı için Kapasite-Voltaj ölçümleriyle taşıyıcıların hareketlerinin gözlemlenmesi mümkündür. Ancak değişimin ayırt edilmesi kapasite skalasının büyüklüğü nedeni ile zordur.



Şekil 4.18 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için 230K sıcaklığında alınan ölçümleri sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi.

5-712 örneği ile 230K sıcaklığında yapılan deney sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alındığında, elde edilen maksimum noktalar eğri üzerinde oluşan platonun başladığı ve bittiği voltaj değerlerini dolayısıyla Kuantum Noktalarının başlangıç ve bitiş noktalarını vermektedir. Şekil 4.19'da Kapasite-Voltaj eğrisi ve bu eğrinin ikinci türevinin alınmasıyla elde edilen maksimum noktaları gösterilmektedir.



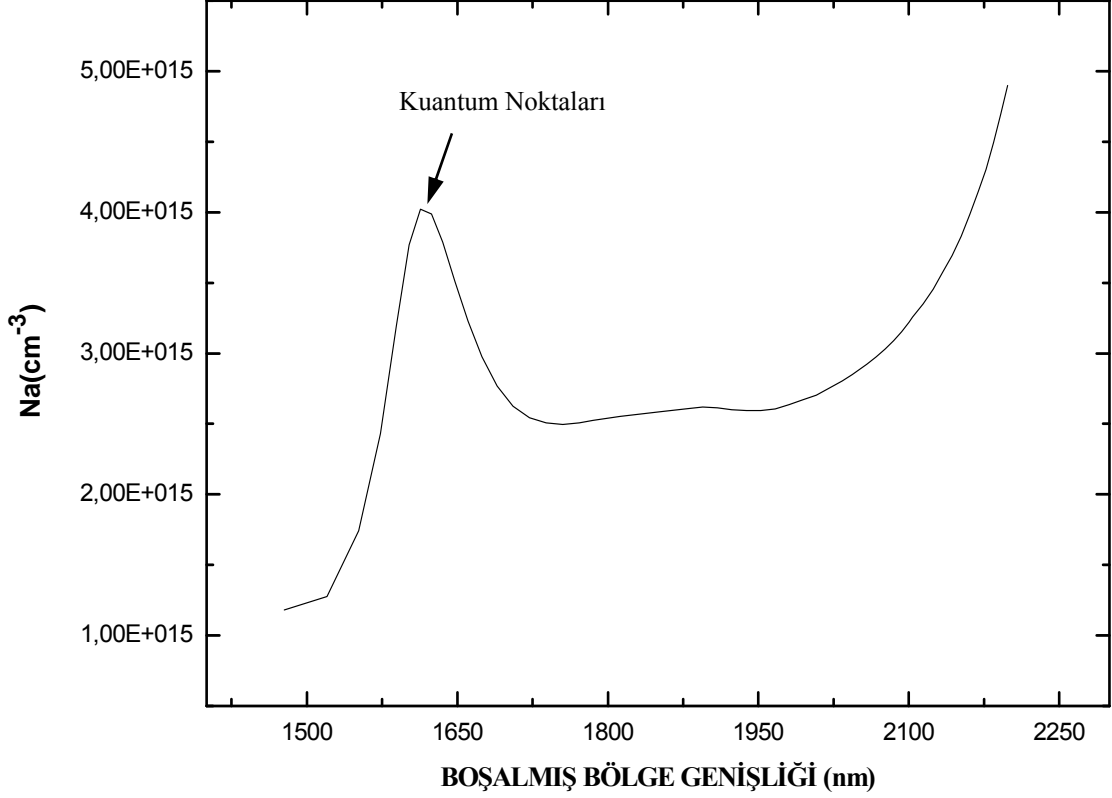
Şekil 4.19: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer içeren örnek için 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Kapasite-Voltaj eğrisinin ikinci türevi alınarak (kesikli çizgi) bulunan maksimum noktaları eğrideki platonun başlangıç ve bitiş voltajlarını göstermektedir.

230K sıcaklığında yapılan deneyler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj eğrisinden denklem (4.2) kullanılarak örneğin katkı konsantrasyonu hesaplanmıştır. Yine kapasite değerleri denklem (4.3)'te yerine yazılarak 800 μ m çapındaki örnek için arınma bölgesi genişliği hesaplanmıştır. Kapasite-Voltaj eğrisinden katkı konsantrasyonu ve arınma bölgesi genişliği hesaplanırken kullanılan fiziksel büyüklükler tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: 5-712 örneğinin Kapasite Voltaj değişiminden katkı konsantrasyonunun hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler.

A (m ²)	ϵ_0 (C ² /Nm ²)	ϵ_{GaAs}	e (C)
$5.026548246 \times 10^{-7}$	8.85418×10^{-12}	13.1	1.60218×10^{-19}

Şekil 4.20’de, 5-712 örneğinin p tipi bölgesinin katkı konsantrasyonu ve geri besleme durumunda arınma bölgesi genişliği değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.20: 5-712 örneğinin 230K sıcaklığında alınan Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından hesaplanan katkı konsantrasyonu (Na) ile arınma bölgesi genişliği (w) değişimi. Diyot çapı 800µm’dir. Diyotun n tipi bölgesindeki katkı konsantrasyonu yaklaşık 3.1015cm-3 olup bu değer büyütücünün verdiği değer ile uyumludur. 1600nm civarında görülen pik Kuantum Noktalarında yer alan boşluklardan kaynaklanmaktadır.

4.3. HİSTERİSİZ AÇIKLIĞI ÖLÇÜM SONUÇLARI

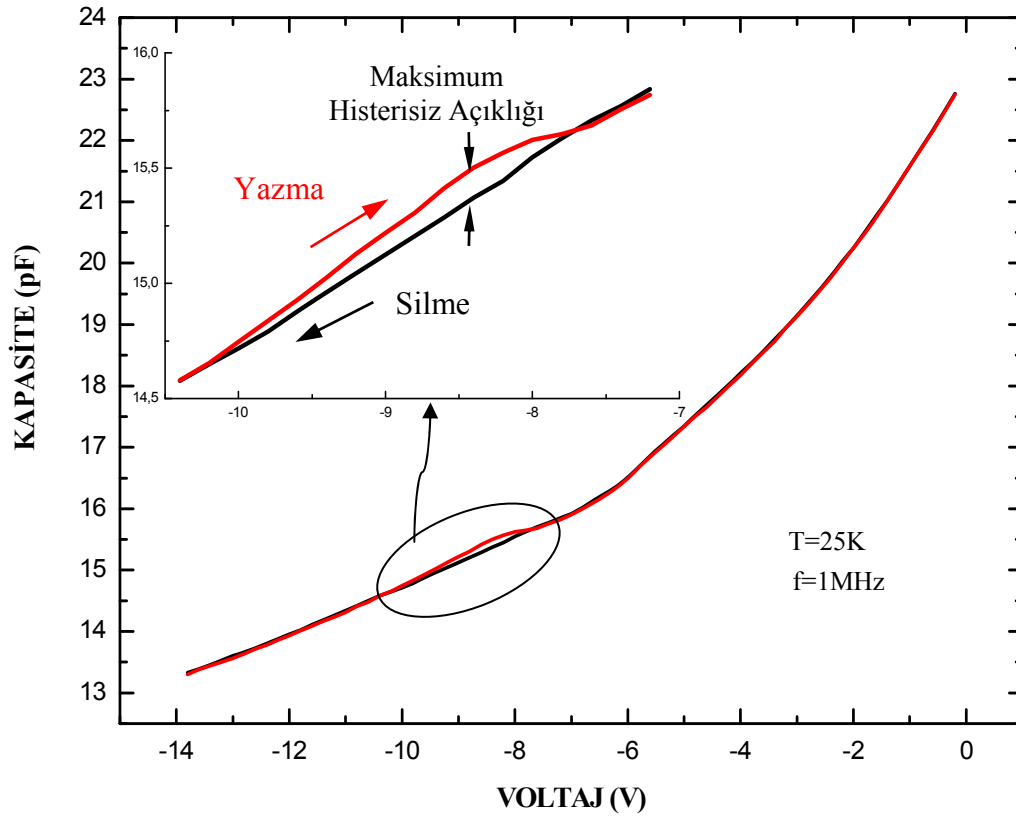
Sabit sıcaklıkta Kapasite-Voltaj ölçümü alınırken, öncelikle voltaj 0 V’dan başlatılarak ve geri besleme voltajı, Kuantum Noktalarının tamamı arınma bölgesi içerisinde kalacak şekilde azaltılarak, kapasite ölçümü gerçekleştirildi. Daha sonra da voltajın süpürülme yönü (Kuantum Noktalarının tamamı arınma bölgesi içerisinde kalacak

şekilde bir geri besleme voltaj değerinden başlanarak 0V'ta doğru) değiştirilerek kapasite ölçümü gerçekleştirildi.

Histerisiz açıklığının bulunması, Kuantum Noktalarına taşıyıcıların giriş ve çıkışı arasındaki hız farkını işaret eder.

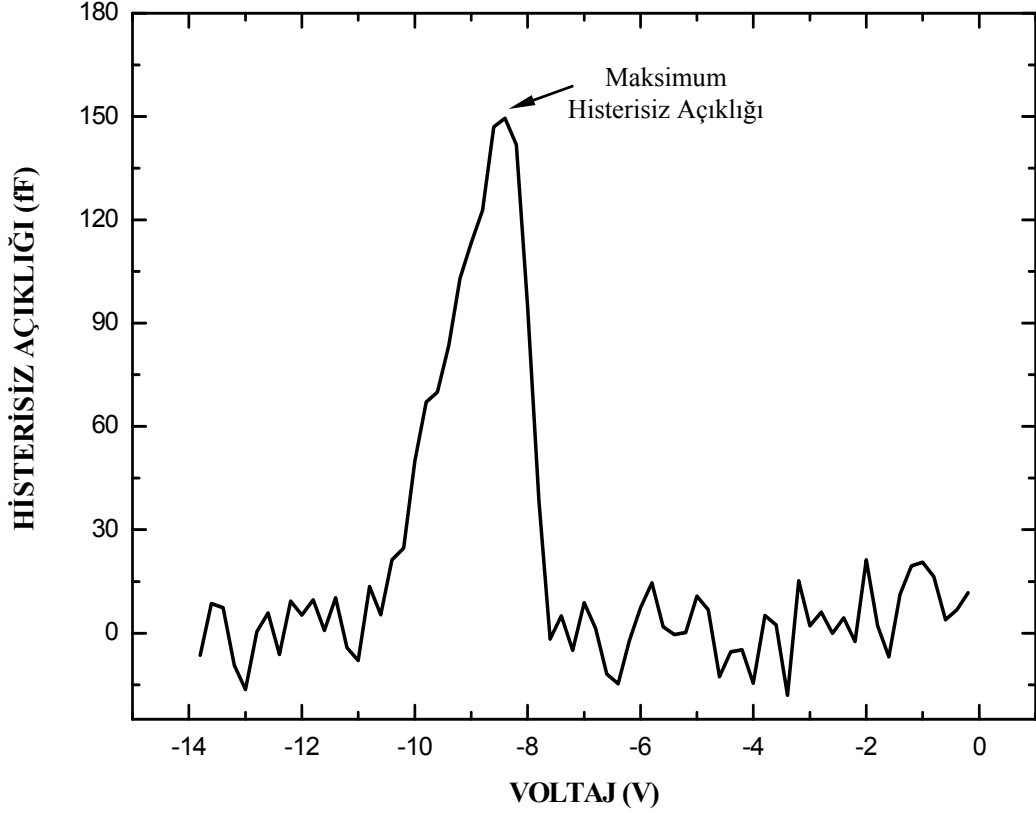
4.3.1 InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları

InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örnek için uygulanan besleme voltajının yönü değiştirilerek 25K'de alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi şekil 4.21'de verilmiştir. Ölçümlerde Boonton 7200 Kapasitans Metre kullanılmıştır.



Şekil 4.21: TU5822 örneğinin 25K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimi. Geri besleme voltajının 0V'tan başlatılarak -14V kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -14V'tan başlanarak 0V'ta kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Platonun oluştuğu bölge grafik içinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı -8.2V'ta gözlemlenmiştir.

Gerii besleme voltajının arttırılması ve azaltılmasıyla elde edilen iki Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarının farkı alınarak maksimum Histerisiz Açıklığı hesaplanmıştır. Şekil 4.22’de TU5822 örneğinin 25K sıcaklığındaki Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağıllığı gösterilmiştir.

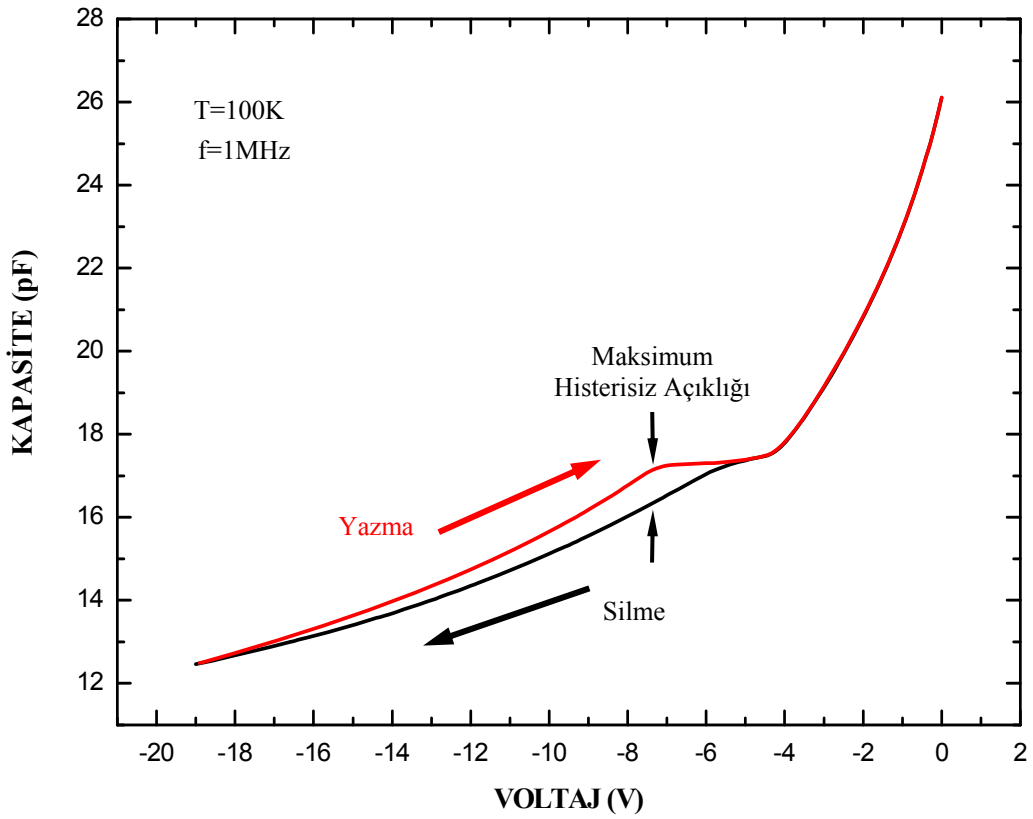


Şekil 4.22: TU5822 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağıllığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -8.2V’ta 150fF olarak bulunmuştur. Ölçümler 25K sıcaklığında 1MHz ölçüm frekansında alınmıştır

Maksimum Histerisiz Açıklığı’nın oluştuğı voltaj değeri, taşıyıcıların Kuantum Noktalarına bağlanma ve ayrılma zamanlarındaki gecikmenin maksimum olduğu voltaj değeridir. Bu değer Kuantum Noktaları için yazma ve silme zamanının ölçümlerinde referans olarak alınmaktadır.

4.3.2 GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları

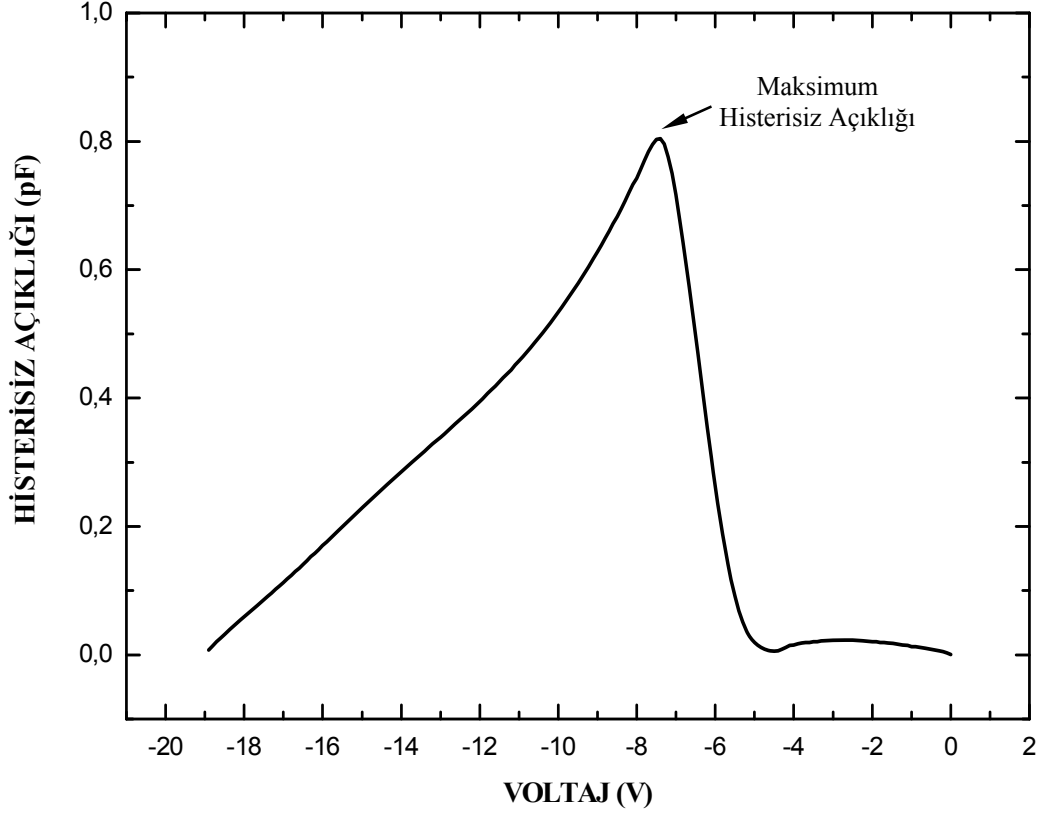
GaSb Kuantum Noktaları içeren örnekten 100K sıcaklığında, uygulanan voltajın yönü değiştirilerek alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23: TU5823 örneğinin 100K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimleri. Geri besleme voltajının 0V'tan başlatılarak -19V kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -19V'tan başlanarak 0V'ta kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı 7.2V'ta gözlemlenmiştir.

Ölçümlerde örneğe uygulanan geri besleme voltajının arttırılması ve azaltılmasıyla elde edilen iki Kapasite-Voltaj değerlerinin farkı alınarak maksimum Histerisiz Açıklığı

hesaplanmıştır. Şekil 4.24’de TU5823 örneğinin 100K sıcaklığındaki Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

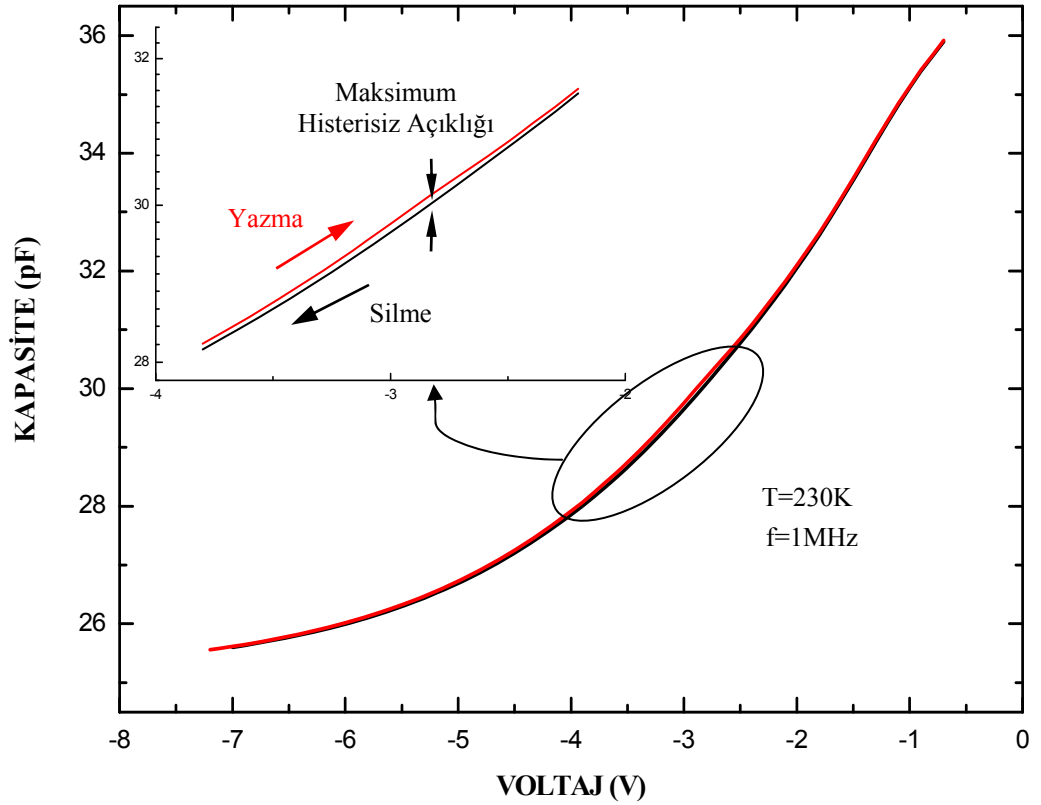


Şekil 4.24: TU5823 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlılığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -7.2V’ta 0.8pF olarak bulunmuştur. Ölçümler 100K sıcaklığında 1MHz frekans değerinde alınmıştır.

GaSb/GaAs sisteminin bant süreksizliği yüksek olduğundan, Kuantum Noktalarının taşıyıcılar için oluşturduğu potansiyel kuyusunun derinliği, InAs/GaAs sistemi ile kıyaslandığında daha fazladır. Bu nedenle GaSb Kuantum Noktalarını içeren örnekte Histerisiz Açıklığı daha yüksek sıcaklık değerinde gözlemlendi.

4.3.3 InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Histerisiz Açıklığı Ölçüm Sonuçları

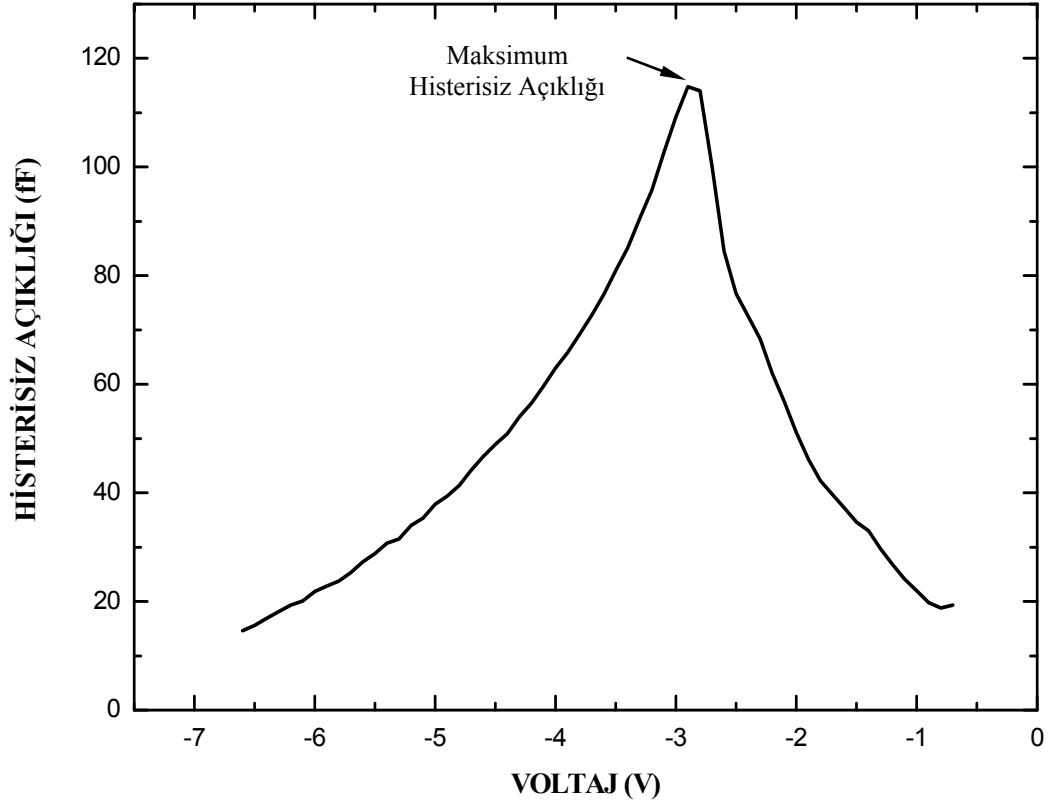
Bir n^+ -p eklemelinin arınma bölgesi civarında InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer tabakası içeren örnek için, 230K sıcaklığında alınan kapasite-voltaj ölçümleri sonucunda elde edilen Histerisiz Açıklığı şekil 4.25'te gösterilmektedir.



Şekil 4.25: 5-712 örneğinin 230K sıcaklığında alınan ölçümler sonucunda elde edilen Kapasite-Voltaj değişimleri. Geri besleme voltajının 0V'tan başlatılarak -7V'a kadar azaltılmasıyla (Silme) elde edilen eğri siyah çizgiyle, -7V'tan başlanarak 0V'a kadar artırılmasıyla (Yazma) elde edilen eğri kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığı 2.9V'ta gözlemlenmiştir.

Şekil 4.25'te gösterilen Kapasite-voltaj ölçümlerinde, -2V ile -4.5 aralığında Histerisiz olduğu görülmektedir.

5-712 örneğine 230K sıcaklığında uygulanan voltajın arttırılma yönü değiştirilerek elde edilen iki Kapasite-voltaj değişiminin farkı alınarak hesaplanan Histerisiz açıklığı şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26: 5-712 örneğinin Kapasite-Voltaj ölçüm sonuçlarından elde edilen Histerisiz Açıklığının geri besleme voltajına bağlılığı. Maksimum Histerisiz Açıklığı -2.9V'ta 115pF olarak bulunmuştur. Ölçümler 230K sıcaklığında 1MHz frekans değerinde alınmıştır.

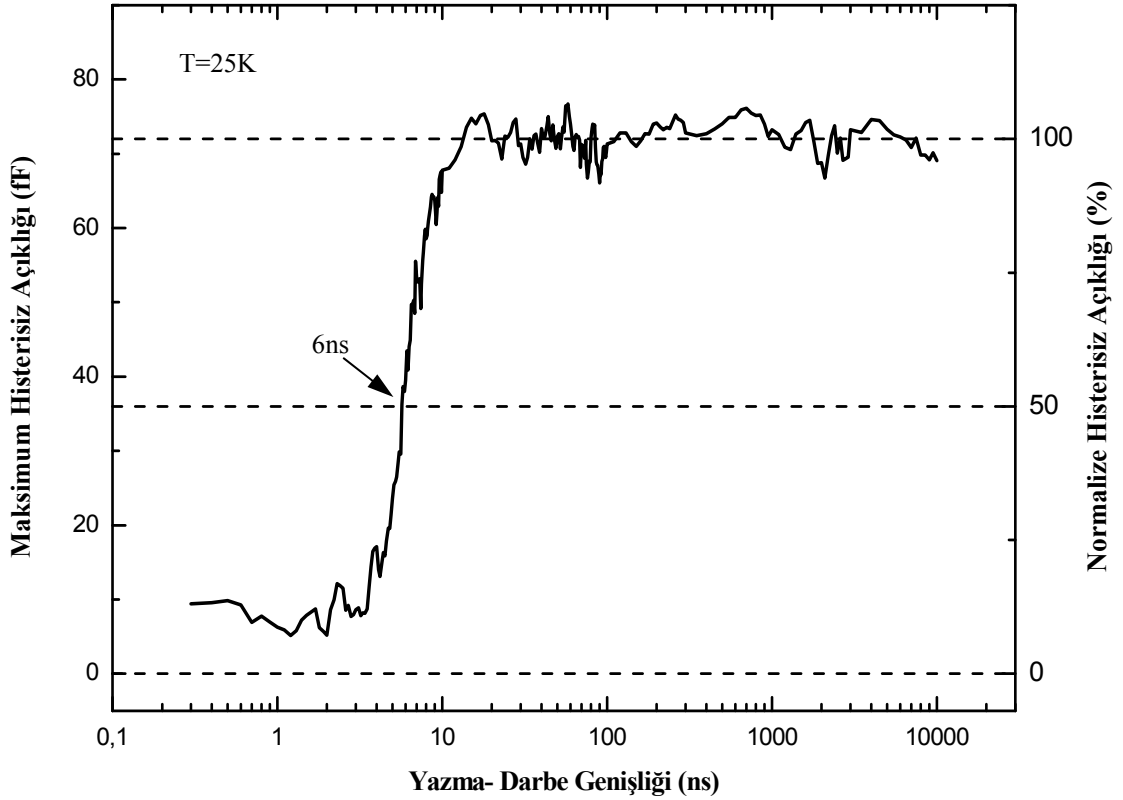
4.4. YAZMA ZAMANI ÖLÇÜM SONUÇLARI

Kapasite-Voltaj ölçümleri sonucunda elde edilen maksimum Histerisiz Açıklığı kullanılarak her bir örnek için uygun sıcaklık değerinde başlangıçta boş olan Kuantum Noktalarına taşıyıcıların aktarılma hızı ölçülmüştür. Ölçümlerde Histerisiz açıklığının minimum olduğu voltaj değerleri Kuantum Noktalarının tamamen boş, maksimum olduğu voltaj değerleri ise dolu olduğunu işaret eder. Maksimum Histerisiz Açıklığının yarısı kadar bir fark gözlemlendiğinde yazma sürecinin gerçekleştiği kabul edilmiştir.

4.4.1. InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları

InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 25K'de maksimum Histerisiz Açıklığı -8.2V olarak bulunduğundan, 25K sıcaklığında yazma zamanının belirlenmesinde bu voltaj değeri referans olarak alınmıştır. Örneğe uygulanan -16V geri besleme değerinde Kuantum Noktaları tamamen boş, 0V geri besleme değerinde de Kuantum Noktaları tamamen doludur.

Şekil 4.27'de InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin (TU5822) 25K sıcaklığında alınan yazma zamanı ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.27: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 25K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50 yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 6ns olarak bulunmuştur.

Yazma sürecinin gerçekleştirilebilmesi için uygulanan yazma darbesinin genişliği 300ps-10µs aralığında arttırılarak Histerisiz Açıklığının büyüklüğü ölçülmüştür. Şekil 4.27'de verilen grafikte görüldüğü gibi yazma-darbe genişliğinin 10ns'den büyük olduğu değerler için Histerisiz Açıklığı maksimumdur. Bu değerlerde yazma süreci tamamlanmış ve Kuantum Noktalarında bulunan seviyeler taşıyıcılar tarafından işgal edilmişlerdir.

Yazma sürecinin belirli sayıda taşıyıcı ile gerçekleşebileceği göz önüne alınarak, Histerisiz Açıklığı değerinin %50'si yazma süreci için yeterli kabul edildi ve minimum yazma zamanı 6ns olarak bulundu.

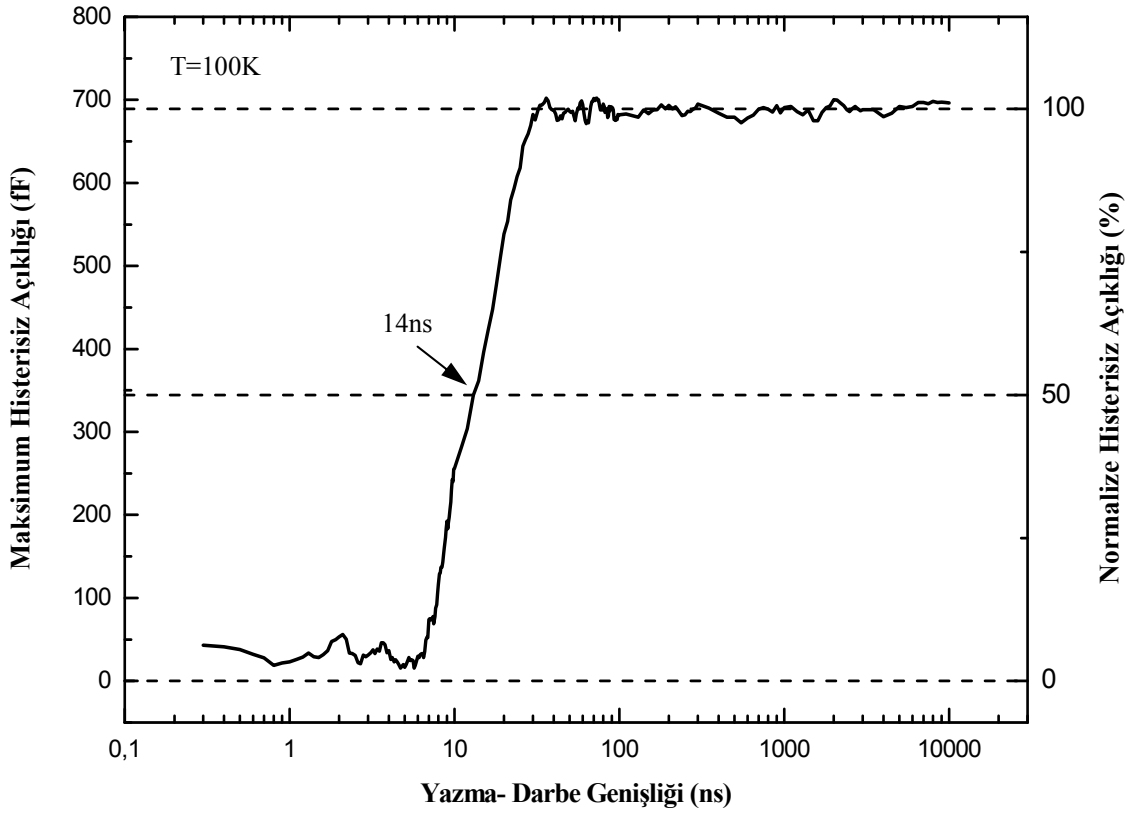
4.4.2. GaSb Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları

GaSb Kuantum Noktaları içeren örnek için 100K sıcaklığında geri besleme değeri -7.2V olduğunda Histerisiz Açıklığı maksimum olduğundan, 100K sıcaklığında yazma zamanının belirlenmesinde bu voltaj değeri referans olarak alınmıştır.

Şekil 4.28'de GaSb Kuantum Noktaları içeren örneğin (TU5823) 100K sıcaklığında alınan yazma zamanı ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

Deney süresince örneğe, -16V geri besleme voltajı uygulanarak Kuantum Noktaları tamamen boşaltıldı ve 0V geri besleme uygulanarak Kuantum Noktalarının tamamen taşıyıcılarla dolu olması sağlandı. Uygulanan yazma darbesinin genişliği 300ps-10µs aralığında arttırılarak Histerisiz Açıklığının büyüklüğü ölçülmüştür. Şekil 4.28'de verilen grafikte görüldüğü gibi yazma-darbe genişliğinin 30ns'den büyük olduğu değerler için Histerisiz Açıklığı maksimum değerdedir.

GaSb Kuantum Noktaları içeren örnek için 100K'de yapılan deneyler sonucunda Histerisiz Açıklığı değerinin %50'si yazma süreci için yeterli kabul edildi ve minimum yazma zamanı 14ns olarak bulundu.

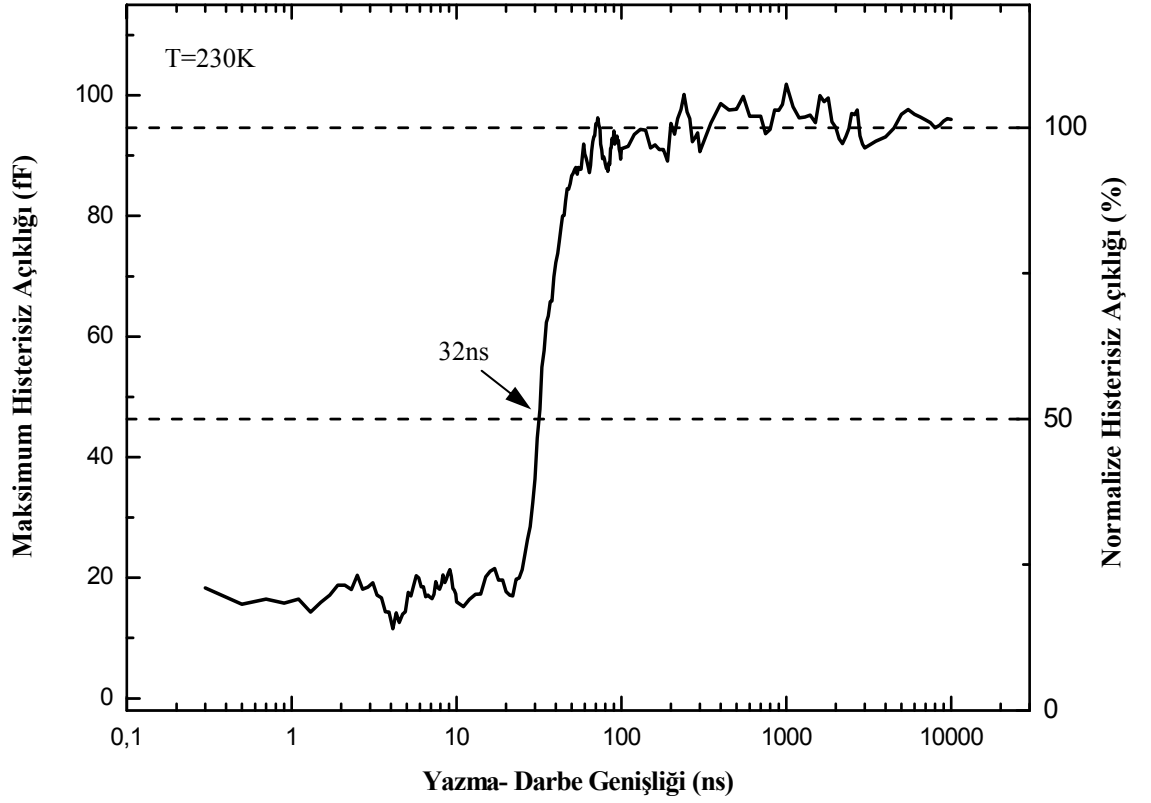


Şekil 4.28: GaSb Kuantum Noktaları içeren örneğin 100 K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği- Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 14ns olarak bulunmuştur.

4.4.3. InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer İçeren Örneğin Yazma Zamanı Ölçüm Sonuçları

InAs Kuantum Noktaları ve Kuantum Noktalarında taşıyıcıların kalma süresini arttırmak için AlGaAs bariyer tabaka içeren örneğin 230K'de yapılan Histerisiz Açıklığı ölçümü sonucunda geri besleme voltajı -2.9V olduğunda Maksimum Histerisiz Açıklığı gözlenmiştir. Bu nedenle yazma zamanını belirlemek için -2.9V'ta ölçümler alınmıştır.

Şekil 4.29'da InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer tabakası içeren örneğin (5-712) 230K sıcaklığında alınan yazma zamanı ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.29: InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs Bariyer tabakası içeren örneğin 230K sıcaklığında Yazma-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz Açıklığının %50'si yazma için yeterli kabul edilmiş ve yazma zamanı 32ns olarak bulunmuştur.

Deneyde, -16V geri besleme voltajı uygulanarak Kuantum Noktaları tamamen boşaltıldı ve 0V geri besleme uygulanarak Kuantum Noktalarının tamamen taşıyıcılarla dolu olması sağlandı. Şekil 4.29'da verilen grafikte yazma-darbe genişliğinin 100ns'den büyük olduğu değerleri için Histerisiz Açıklığının maksimum değerde olduğu görülmektedir.

InAs Kuantum Noktaları ve AlGaAs bariyer tabakası içeren örnek için 230K'de yapılan deneyler sonucunda Histerisiz Açıklığı değerinin %50'si yazma süreci için yeterli kabul edildi ve minimum yazma zamanı 32ns olarak bulundu.

Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtı olabilecek yapıların, bu çalışmada deneysel olarak elde edilen yazma zamanları ve literatürde yer alan bilgi saklama süreleri Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtları için bu çalışmada elde edilen yazma zamanları ve literatürde yer alan bilgi saklama süreleri.

Malzeme	Bant Yapısı	Büyütme Yöntemi	Taşıyıcı Tipi	Lokalizasyon Enerjisi	300K'de Bilgi Saklama Süresi	Yazma Zamanı
InAs/GaAs		MOCVD	Boşluk	210meV [88]	~0.5ns [88]	6ns (25K)
GaSb/GaAs		MOCVD	Boşluk	450meV [89]	~1μs [89]	14ns (100K)
InAs/GaAs ve Al _{0.6} Ga _{0.4} As Bariyer		MBE	Boşluk	560meV [90]	~5ms [90]	32ns (230K)

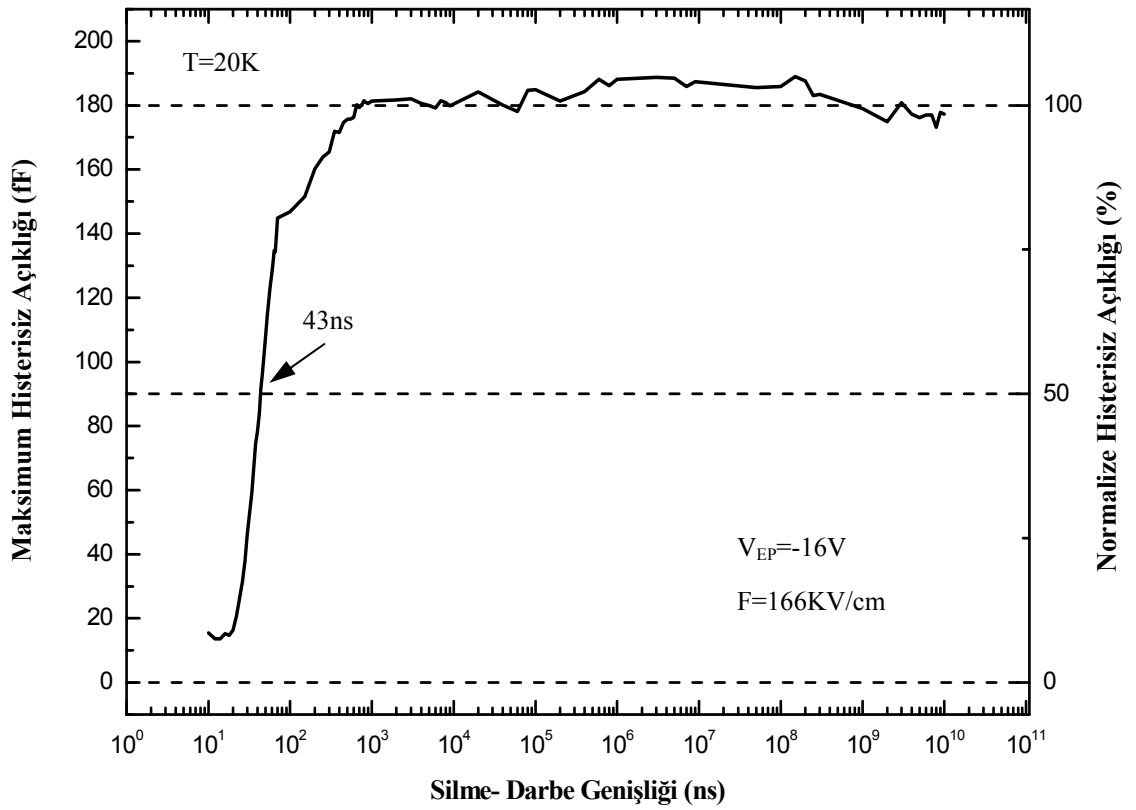
4.5. SİLME ZAMANI ÖLÇÜM SONUÇLARI

Kapasite-Voltaj ölçümleri sonucunda elde edilen maksimum Histerisiz Açıklığı kullanılarak InAs Kuantum Noktaları içeren örnekte, başlangıçta tamamen taşıyıcılarla dolu olan Kuantum Noktalarına uygulanan dış elektrik alan etkisiyle taşıyıcıların ayrılma zamanı ölçülmüştür. Silme zamanı ölçümlerinde, Histerisiz açıklığının minimum olduğu voltaj değerleri için Kuantum Noktaları tamamen dolu, maksimum

olduğu voltaj değeri için ise boş olduğu kabul edilmiştir. Maksimum Histerisiz Açıklığının yarısı kadar bir fark gözleendiğinde silme sürecinin gerçekleştiği kabul edilmiştir.

4.5.1. InAs Kuantum Noktaları İçeren Örneğin Silme Zamanı Ölçüm Sonuçları

InAs Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcıların uygulanan elektrik alan etkisi ile Kuantum Noktalarından ayrılma süresinin belirlenmesi için 20K sıcaklığında yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafik şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında Silme-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Uygulanan silme voltaj darbesi $V_{EP} = -16V$ olup, örnek içerisinde oluşan elektrik alanının büyüklüğü $F=166KV/cm$ 'dir. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığı, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si silme için yeterli kabul edilmiş ve Silme zamanı 43ns olarak bulunmuştur.

Bu sıcaklıkta maksimum Histerisiz Açıklığı $-8.2V$ olarak bulunduğundan, silme zamanının belirlenmesinde bu voltaj değeri referans olarak alınmıştır. Örneğe uygulanan $-16V$ geri besleme değerinde Kuantum Noktaları tamamen boş, $0V$ geri besleme değerinde de Kuantum Noktaları tamamen doludur.

Silme sürecinin gerçekleştirilebilmesi için uygulanan silme darbesinin genişliği $10ns-10s$ aralığında arttırılarak Histerisiz Açıklığının büyüklüğü ölçülmüştür. Şekil 4.30'da verilen grafikte görüldüğü gibi silme-darbe genişliğinin $1\mu s$ 'den büyük olduğu değerler için Histerisiz Açıklığı maksimum değerdedir. Bu değerlerde silme süreci tamamlanmış ve Kuantum Noktalarının tamamen boşaltılmıştır.

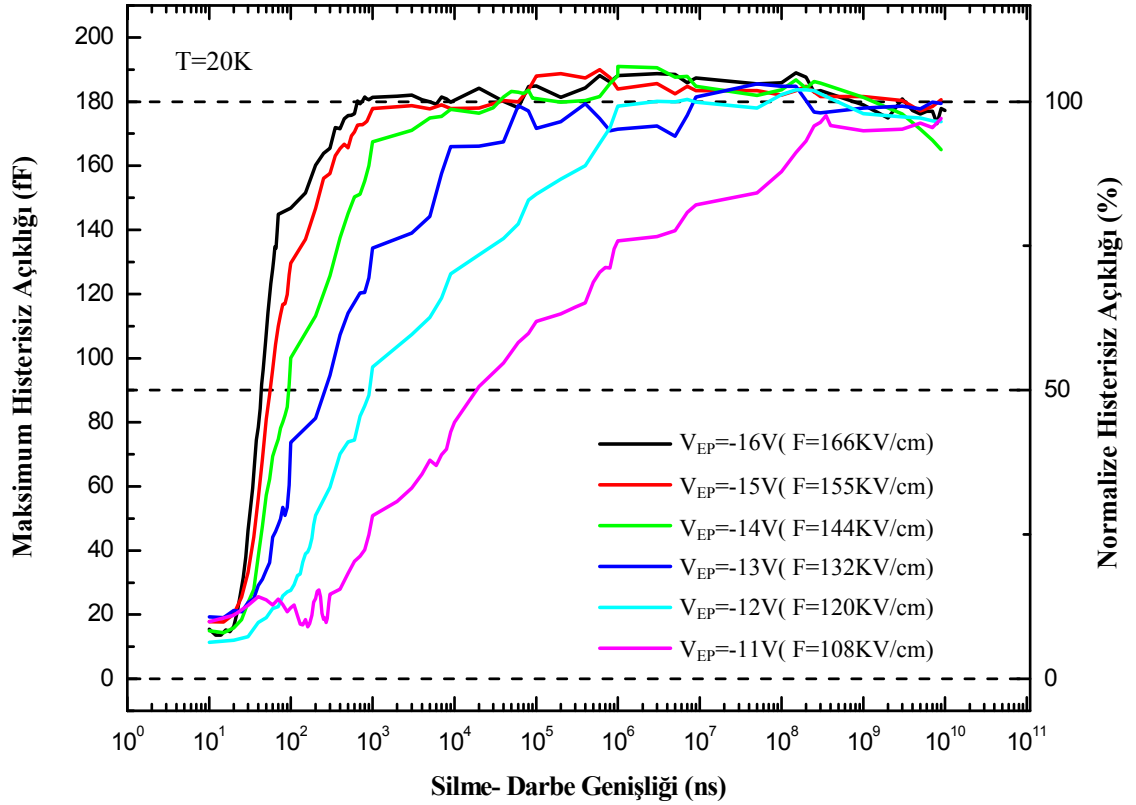
Silme sürecinin belirli sayıda taşıyıcı ile gerçekleştirilebileceği göz önüne alınarak, Histerisiz Açıklığı değerinin %50'si yazma süreci için yeterli kabul edildi ve minimum silme zamanı $43ns$ olarak bulundu.

Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcıların uygulanan elektrik alan altında tünelleme süresi, uygulanan elektrik alanın şiddetine bağlıdır. Bu nedenle örneğe farklı geri besleme voltajları uygulanarak silme hızının elektrik alan şiddetine bağlılığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.31'de InAs Kuantum Noktaları içeren örnekte elektrik alan şiddeti değiştirilerek elde edilen silme zamanı ölçüm sonuçları gösterilmektedir.

Ölçümlerde uygulanan elektrik alanın şiddeti arttıkça silme zamanının azaldığı açıkça görülmektedir.

Ölçümler sonucunda Histerisiz açıklığının %50'si silme için yeterli kabul edilerek, uygulanan her bir silme voltaj darbesi V_{EP} için silme zamanı belirlenmiştir.



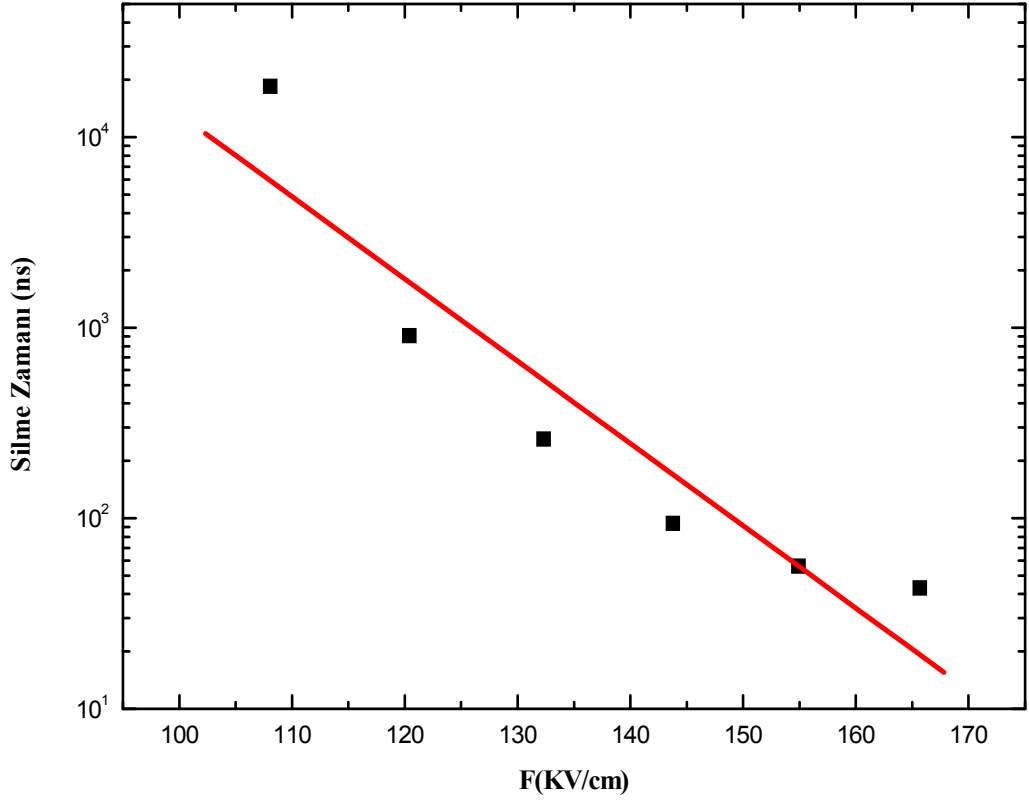
Şekil 4.31: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında farklı silme voltaj darbesi V_{EP} (elektrik alan F) uygulanarak elde edilen Silme-darbe genişliği-Maksimum Histerisiz açıklığı değişimi. Grafikte sol düşey eksen Maksimum Histerisiz Açıklığını, sağ düşey eksen normalize edilmiş Maksimum Histerisiz açıklığını gösterir. Histerisiz açıklığının %50'si silme için yeterli kabul edilmiştir.

Tablo 4.10'da InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin farklı elektrik alan uygulanarak elde edilen silme zamanı gösterilmektedir.

Tablo 4.10: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K'de uygulanan elektrik alana bağlı olarak silme zamanı değişimi.

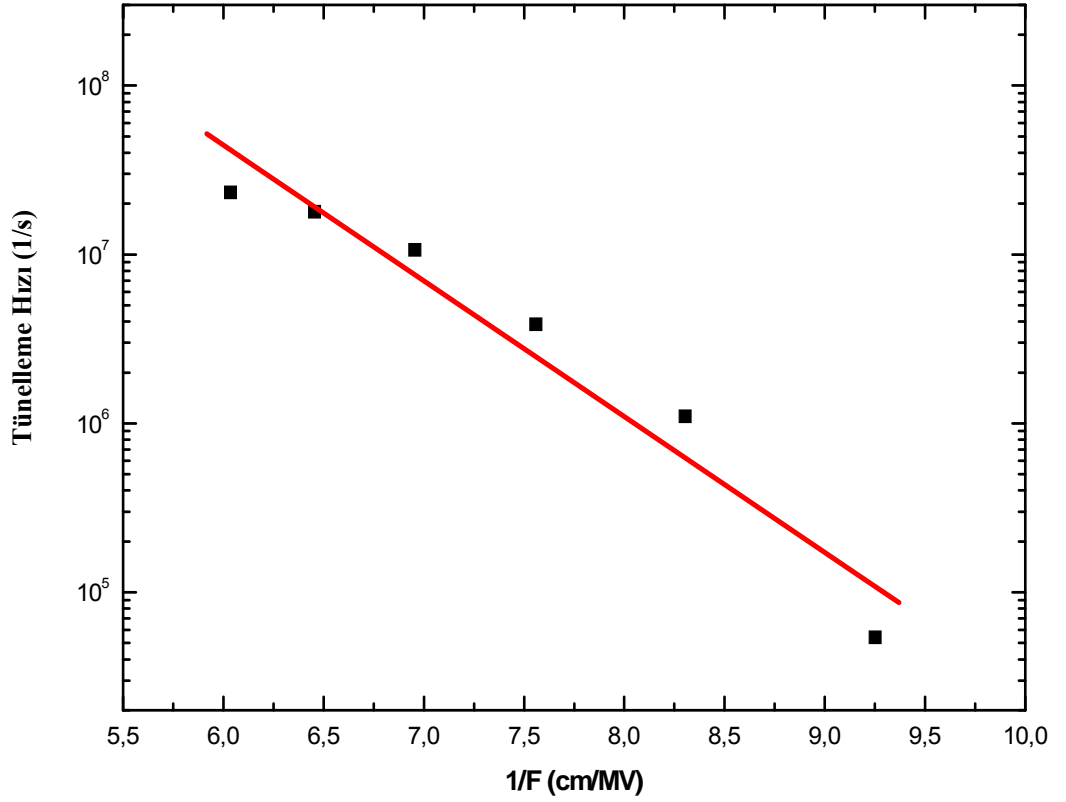
V_{EP} (V)	F (KV/cm)	Silme Zamanı (ns)
-16	166	43
-15	155	56
-14	144	94
-13	132	260
-12	120	910
-11	108	18504

Şekil 4.32’de InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında silme zamanının elektrik alan şiddetine bağlılığı gösterilmektedir.



Şekil 4.32: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında silme zamanının uygulanan dış elektrik alana bağlılığı. Kalın kırmızı çizgi doğrusal fiti göstermektedir.

Silme zamanın değerlerinin tersi tünelleme hızına eşit olduğundan, uygulanan elektrik alanın tersi ile tünelleme hızı değişim grafiği elde edilebilir. Şekil 4.33'te tünelleme hızının elektrik alanın tersine bağlılığı gösterilmiştir.



Şekil 4.33: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K sıcaklığında tünelleme hızının uygulanan dış elektrik alanın tersine bağlılığı. Kalın kırmızı çizgi doğrusal fiti göstermektedir.

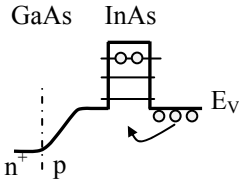
Kuantum Noktasında bulunan taşıyıcıların Kuantum Noktasından ayrılması, termal uyarılma ya da tünelleme yapımları ile gerçekleşebilir. Düşük sıcaklıklarda termal uyarılma için yeterli enerji olmayacağından silme süreci sadece uygulanan elektrik alan altında taşıyıcıların tünelleme yapmasına bağlıdır.

Şekil 4.32’de gösterilen grafikte, uygulanan elektrik alanın artırılmasıyla silme zamanının azaldığı dolayısıyla tünelleme hızının arttığı açıkça görülmektedir. Silme zamanı-uygulanan voltaj değişiminin doğrusal olduğu bilinmektedir. Şekil 4.32’de gösterilen grafikte özellikle yüksek elektrik alanlarda silme zamanı- uygulanan voltaj değişiminin doğrusallıktan saptığı görülmektedir. Ölçümlerde kullanılan voltaj darbe jeneratörünün maksimum çıkış voltajı 16V, minimum darbe genişliği 10ns’dir.

Dolayısıyla kullanılan voltaj darbe jeneratörünün sınır değerleri için hata payı yüksek olabilir. Bu da, yüksek voltaj değerlerinde doğrusallıktan sapmaya neden olabilir.

Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtı olabilecek yapının, bu çalışmada deneysel olarak elde edilen yazma ve silme zamanı ve literatürde yer alan bilgi saklama süresi Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtları için bu çalışmada elde edilen yazma ve silme zamanları ile literatürde yer alan bilgi saklama süreleri.

Malzeme	Bant Yapısı	Taşıyıcı Tipi	Lokalizasyon Enerjisi	300K’de Bilgi Saklama Süresi	Yazma Zamanı	Silme Zamanı
InAs/GaAs		Boşluk	210meV [88]	~0.5ns [88]	6ns (25K)	43ns (20K)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt olabilecek yapılarda bilgi yazma ve silme süreçlerinin incelenmesi ve böyle bir aygıtın, bellek aygıt olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

Hızlı ve dayanıklı bir “evrensel bellek” aygıtın üretimi günümüz bellek endüstrisinin öncelikli hedefidir. Günümüzde, üretilen bilginin saklanması, taşınması ve bilgisayarlarda işlenmesinde büyük öneme sahip olan bellek aygıtların, daha hızlı, kapasitelerinin daha fazla, boyutlarının daha küçük ve daha dayanıklı olabilmesi için araştırmalara devam edilmekle birlikte, bu alanda yeni bir fikir olan Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtlar, evrensel bellek olabilecek temel fiziksel özelliklere sahiptirler.

Kendiliğinden organize olma yöntemiyle, nanometre boyutlarında milyarlarca Kuantum Noktasını tek adımda üretmek mümkündür. Böylece birkaç nanometre büyüklüğünde bilgi saklama hücreleri oluşturulmuş olur. Bu sayede, Kuantum Noktaları kullanılarak yapılacak bir bellek aygıtta, 1inç^2 ’lik alanda 1Tbit bilgi saklanabilir.

Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt, p-n eklemelinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş kendiliğinden organize olan Kuantum Noktalarından oluşmaktadır. Kuantum Noktalarında taşıyıcı bulunması “1” durumuna ve taşıyıcı bulunmaması da “0” durumuna karşılık gelir. p-n eklemine geri besleme yapılarak, Kuantum Noktalarının, arınma bölgesi içerisinde kalması sağlanır. Bu durumda, Kuantum Noktalarında bulunan taşıyıcılar, tünelleme yaparak Kuantum Noktalarından ayrılırlar. Bu ise bellek aygıtta “Silme” sürecine karşılık gelir. Benzer şekilde p-n eklemine ileri besleme yapılarak boş olan Kuantum Noktalarının taşıyıcılarla dolması sağlanır bu da “Yazma” sürecine karşılık gelir. Kaydedilen bilginin okunması işlemi, Kuantum Noktaları civarında büyütülen iki boyutlu elektron gazı yapısının direncinin okunmasıyla gerçekleştirilir.

Bu çalışmada, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt olabilecek örnekler, Kapasite-Voltaj deneyleri ve kapasite ölçümünü temel alarak tasarlanan yazma zamanı ve silme zamanı deneyleri ile incelendi. İncelenen örneklerden ilki, n^+ -p eklemine arınma bölgesi civarında büyütülmüş InAs/GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. Önceki çalışmalardan böyle bir yapının oda sıcaklığında bilgi saklama süresinin 0.5ns olduğu bilinmektedir[88]. İncelediğimiz örneklerden ilki için bilgi yazma ve silme zamanı deneysel olarak bulundu. Yapılan deneyler sonucunda, 25K sıcaklığında bu örnek için bilgi yazma zamanı 6ns ve 20K sıcaklığındaki silme zamanı da 43ns olarak tespit edildi. İncelenen ikinci örnek, n^+ -p eklemine arınma bölgesi civarında GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içermektedir. Yine önceki çalışmalardan, böyle bir yapının bilgi saklama süresinin oda sıcaklığında 1 μ s olduğu bilinmekte olup[89], bu çalışmada örneğin sadece yazma zamanı deneysel olarak bulundu. Buna göre örneğin 100K sıcaklığında yazma zamanı 14ns olarak belirlendi. İncelenen üçüncü örnek ise n^+ -p eklemine arınma bölgesi civarında InAs/GaAs Kuantum Noktaları ve bir AlGaAs bariyer tabakası içermektedir. Böyle bir yapının, oda sıcaklığında bilgi saklama süresinin 5ms olduğu bilindiğinden[90], çalışılan örnekte sadece yazma zamanı deneysel olarak belirlendi. Yapılan deneyler sonucunda da, örneğin 230K sıcaklığında yazma zamanının 32ns olduğu tespit edildi. Diğer taraftan, bu örnekte bilgi saklama süresini arttırmak için büyütülen AlGaAs bariyer tabaka, yazma sürecinde de taşıyıcılara bir engel oluşturduğundan, yazma zamanı bariyer tabaka içermeyen diğer örnekler göre daha uzundur. Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtların bilgi saklama süresi, kullanılan malzemeye bağlı olarak, 10^6 yıl olabilir.

Deneysel ölçümler sonucunda yazma zamanının nanosaniye mertebesinde olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt için yazma zamanı pikosaniye mertebesinde olabilir. Ancak, örneklerin diyot yapısında olmasından dolayı, belli bir kapasite değerine ve kontak direncine sahip olması, alçak geçiren filtre (low-pass filter) devresi gibi davranmasına yol açabilir. Dolayısıyla, bu da, yüksek hızlı deneysel ölçümlere bir sınırlama getirir. Bu tür yapılarda kontak direncinin azaltılmasıyla daha hızlı yazma/silme zamanı değerleri deneysel olarak elde edilebilir.

Günümüzde kullanılmakta olan DRAM'lerin erişim zamanı yaklaşık 20ns'dir. Bilgisayarlarda ana hafıza birimi olarak kullanılan DRAM bellekler, göreceli olarak

hızlı ve dayanıklı olmalarına karşın geçici hafızaya sahiptirler. Bu da özellikle taşınabilir aygıtlarda aşırı güç tüketimine neden olur. Yine yaygın olarak kullanılan silisyum tabanlı Flaş belleklerin yazma zamanları milisaniye mertebesindedir. Bu tip belleklerde kaydedilen bilgi yıllarca saklanabilmesine karşın bilgi yazma/silme hızı yavaştır ve DRAM'lere göre oldukça kısa ömürlüdür. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıt olabilecek örneklerin, deneysel olarak ilk kez bu çalışmada elde edilen yazma zamanları, her iki bellek çeşidinin yazma zamanlarından da daha kısadır. Kuantum Noktaları Temelli Bellek Aygıtlara, Flaş belleklerden yaklaşık 10^6 kat ve DRAM'lerden 2 kat daha hızlı bilgi yazmanın mümkün olduğu bu çalışma ile deneysel olarak gösterilmiştir.

InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için yapılan silme zamanı ölçümlerinde, silme voltajının artmasıyla silme zamanının azaldığı gösterildi. Deneylerde silme işlemini gerçekleştirmek için uygulanan voltaj darbesinin genliği 16V'a kadar arttırıldı. Voltaj değerinin arttırılmasıyla silme zamanının azaltılabileceği deneysel olarak gösterildi.

Neticede, Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıt olabilecek yapılarda yazma ve silme zamanı deneysel olarak elde edilmiş olup günümüzde kullanılan bellek aygıtlardan daha kısa sürede bilgi yazılabileceği gösterilmiştir. Böyle bir aygıtta bilgi yazma ve silme işlemi ileri ve geri besleme ile gerçekleştirildiğinden uygun voltaj değerlerinde aygıt zarar görmeyecek ve kullanım ömrü uzun olacaktır. Yapılan deneylerde her bir örneğe en az 10000 kez ileri-geri besleme uygulanarak dayanıklı oldukları görülmüştür. Ayrıca, bu tür yapılarda kontak direncinin azaltılmasıyla daha hızlı yazma/silme zamanı değerleri elde edilmesinin mümkün olabileceği de anlaşıldı.

Sonuç olarak, uygun malzeme kullanılarak yapılacak Kuantum Noktası Temelli Bellekler, bilgi teknolojisinin ihtiyaç duyduğu bilgi saklama süresi 10 yıldan büyük, yazma/silme erişim zamanı pikosaniyeler mertebesinde, dayanıklı, evrensel bellek olmaya aday aygıtlardır.

İleriye yönelik çalışmalarda da Kuantum Noktası Temelli Bellek Aygıtlarda bilgi okuma sürecinin belirlenmesi ve bilgi saklama süresi 10 yıldan büyük olabilecek farklı malzeme sistemlerinin araştırılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. MOORE, G.E., 1965, Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics*, 38, 114-117.
2. HOENEISEN, B. and MEAD, C.A., Fundamental limitations in microelectronics: MOS technology, 1972, *Solid-State Electron.*, 15, 819-829.
3. SUGANO, T., Physical and Technological Limits in Size of Semiconductor Devices, 1976, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 15, 329-330.
4. GELLER, M.P., 2007, *Investigation of Carrier Dynamics in Self-Organized Quantum Dots for Memory Devices*, Thesis (PhD), Technische Universitat Berlin, Berlin.
5. ARDEN, W., COGEZ, P., ISHIUCHI, H., OSADA, T., JOO-TAE MOON, SOHN, H.C., C.Y., LU, APTE, P., DOERING, B., GARGINI, P., 2006, *International Technology Roadmap for Semiconductors 2005 Edition* [online], ITRS, <http://www.itrs.net/Links/2005ITRS/Home2005.htm> [Ziyaret Tarihi: 7 Şubat 2007].
6. STRANSKI, I. N. and KRASTANOW L., 1938, Zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander, *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Math.-Naturwiss.*, K1, Abt. 2B 146, 797-804.
7. BIMBERG, D., GRUNDMANN, M. and LEDENTSOV, N. N., 1998, *Quantum Dot Heterostructures*, John Wiley & Sons, Chichester, 978-0-471-97388-1.
8. EAGLESHAM, D. J. and CERULLO, M., 1990, Dislocation-Free Stranski-Krastanow Growth of Ge on Si (100), *Phys. Rev. Lett.*, 64, 1943-1946.
9. MO, Y.W., SAVAGE, D.E., SWARTZENTRUBER, B.S. and LAGALLY, M. G., 1990, Kinetic pathway in Stranski-Krastanov growth of Ge on Si(001), *Phys. Rev. Lett.*, 65, 1020-1023.
10. ARAKAWA, Y. and SAKAKI, H., 1982, Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current, *Appl. Phys. Lett.* 40, 939-941.
11. KIRSTAEDTER, N., LEDENTSOV, N. N., GRUNDMANN, M., BIMBERG, D., USTINOV, V. M., RUVIMOV, S. S., MAXIMOV, M. V., KOPEV, P. S., ALFEROV, Z. I., RICHTER, U., WERNER, P., GOSELE, U. and HEYDENREICH, J., 1994, Low threshold, large T_0 injection laser emission from (InGa)As quantum dots, *Electron. Lett.*, 30, 1416-1417.

12. GRUNDMANN M., 2000, The present status of quantum dot lasers, *Physica E*, 5, 167-184.
13. LEDENTSOV, N. N., GRUNDMANN, M., HEINRICHSOR, F., BIMBERG, D., USTINOV, V. M., ZHUKOV, A. E., MAXIMOV, M. V., ALFEROV, Z. I., and LOTT, J. A., 2000, Quantum-Dot Heterostructure Lasers, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum, Electronics*, 6, 439-451.
14. KUNTZ, M., FIOL, G., LAMMLIN, M., BIMBERG, D., THOMPSON, M. G., TAN, K. T., MARINELLI, C., PENTY, R. V., WHITE, I. H., USTINOV, V. M., ZHUKOV, A. E., SHERNYAKOV Y. M. and Kovsh, A. R., 2004, 35GHz mode-locking of 1.3 μm quantum dot lasers, *Appl. Phys. Lett.* 85, 843-845.
15. HEINRICHSOR, F., RIBBAT, C., GRUNDMANN, M., and BIMBERG, D., 2000, High-power quantum-dot lasers at 1100 nm, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 556-558.
16. BOROVIKSKAYA, E. and SHUR, M.S., 2003, *Quantum Dots*, worldscientific, New Jersey, 978-981-02-4918-7.
17. KELDYSH, L.V., 1962, Imbedding of Zero-Dimensional Compact Sets in E^n , *Sov.Math.Dokl.*, 3, 1701-1704.
18. ESAKI, L. and TSU, R., 1970, Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors, *IBM Journal of Research and Development*, 14, 61-65.
19. ALFEROV, Z.I., ZHILYAEV, Y.V. and SHMARTSEV, Y.V., 1971, Splitting of the conduction band in a 'superlattice' based on $\text{GaP}_x \text{As}_{1-x}$, *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov [Sov.Phys.Semicond.]*, 5, 196 -198.
20. AKÇAY, N., 2001, *Azot içeren düşük boyutlu yarıiletkenlerde Foto olayların incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul.
21. ALGÜN, G., 2004, *Düşük boyutlu yarıiletken yapılarda sıcak elektronların enerji kayıp mekanizmalarının incelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul.
22. VURGAFTMAN, I., MEYER, J.R. and RAM-MOHAN L.R., 2001, Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, *J. Appl. Phys.*, 89, 5815-5875.
23. MADELUNG, O., 1996, *Semiconductors: Physics of Group IV Elements and III-V Compounds*, Landolt-Börnstein volume III/17a, Springer, Berlin, 978-3-540-18490-4.
24. KIM, H., NODA, T., KAWAZU, T. and SAKAKI, H., 2000, Control of current hysteresis effects in a GaAs/n-AlGaAs quantum trap field effect transistor with embedded InAs quantum dots, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39, 7100-7102.

25. KOIKE, K., SAITOH, K., LI, S., SASA, S., INOUE, M. and YANO, M., 2000, Room-temperature operation of a memory-effect AlGaAs/GaAs heterojunction field-effect transistor with self-assembled InAs nanodots, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 1464-1466.
26. TIWARI, S., RANA, F., H. HANAFI, HARTSTEIN, A., CRABBÉ, E. F. and CHAN, K., 1996, A silicon nanocrystal based memory, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 1377-1379.
27. YUSA, G. and SAKAKI, H., 1997, Trapping of photogenerated carriers by InAs quantum dots and persistent photoconductivity in novel GaAs/n-AlAs field-effect transistor structures, *Appl. Phys. Lett.*, 70, 345-347.
28. OH J.E., and KIM, J.W., 2000, Room-temperature memory operation of AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors with InAs quantum dots embedded in the channel, *IEEE Proceedings of the International Electron Device Meeting IEDM*, 106-109.
29. BALOCCO, C., SONG, A. M. and MISSOUS, M., 2004, Room-temperature operations of memory devices based on self-assembled InAs quantum dot structures, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 5911-5913.
30. MÜLLER, C.R., WORSCHECH, L., FORCHEL, A., 2007, Room temperature memory operation of electron Y-branch switch with embedded quantum dots, *Electronics Letters*, 43(24),1-2.
31. WOGGON, U., 1997, *Optical Properties of Semiconductor Quantum Dots*, Springer-Verlag, Berlin, 978-3-540-60906-3.
32. MIYAMOTO, Y., CAO, M., SHINGAI, Y., FURUJA, K., SUEMATSU, Y., RAVIKUMAR, K.G. and ARAI, S., 1987, Light emission from quantum-box structure by current injection, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26, L225-L227.
33. ANDREWS, S.R., ARNOT, H., REES, P.K., KERR, T.M. and BEAUMONT, S.P., 1990, Photoluminescence studies of free-standing quantum boxes, *J. Appl. Phys.*, 67, 3472-3480.
34. STEFFEN, R., FALLER, F. and FORCHEL, A., 1994, Low-voltage electron beam lithography on GaAs substrates for quantum wire fabrication, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 12, 3653-3657.
35. EBERL, K., PETROFF, P. M. and DEMEESTER P., 1995, *Low Dimensional Structures Prepared by Epitaxial Growth or Regrowth on Patterned Substrates*, NATO Science Series E, Vol. 298, Springer, Netherland, 978-0-7923-3679-2.
36. LEDENTSOV, N.N., 1999, *Growth Process and Surface Phase Equilibria in Molecular Beam Epitaxy*, Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 156, Springer, Berlin, 978-3-540-65794-1.

37. PEHLKE, E., MOLL, N., KLEY, A. and SCHEFFLER, M., 1997, Shape and stability of quantum dots, *Appl. Phys. A*, 65, 525-534.
38. FRANK, F.C. and VAN DER MERWE, J.H., 1949, One-dimensional dislocations, *Proc. Roy. Soc.*, 198, 205-216.
39. VOLMER, M. and WEBER, A., 1926, Nucleus Formation in Super Saturated Systems, *Zeit. phys. Chem.*, 119, 227 -237.
40. STRANSKI, I.N. and KRASTANOV, L., 1938, Zur theorie der orientierten ausscheidung von ionenkristallen aufeinander [theory of orientation separation of ionic crystals], *Sitzungsber. Wien. Akad. Wiss. Math.-Nat. Kl. IIb*, 146,797-810.
41. EISELE, H., FLEBBE, O., KALKA, T., PREINESBERGER, C., HEINRICHSORFF, F., KROST,A., BIMBERG, D. and DÄHNE-PRIETSCH, M., 1999, Cross-sectional scanning-tunneling microscopy of stacked InAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 106-108.
42. MARQUEZ, J., GEELHAAR, L. and JACOBI, K., 2001, Atomically resolved structure of InAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 78, 2309-2311.
43. HEINER, Y., STIER, O., TÜRCK, V., VASCHULL, J., SUMPFF, B. and OSTERMEIER, A., 1996, Evolution strategies applied to least squares curve fitting of spectroscopic data, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 56, 769-782
44. STIER, O., GRUNDMANN, M. and BIMBERG, D., 1999, Electronic and optical properties of strained quantum dots modeled by 8-band-**k.p** theory, *Phys. Rev. B*, 59, 5688-5701.
45. STIER, O., *Electronic and Optical Properties of Quantum Dots and Wires*, 2001, Berlin Studies in Solid State Physics volume 7, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 3-89685-366-1.
46. WANG, L.-W., KIM, J. and ZUNGER, A., 1999, Electronic structures of [110]-faceted self-assembled pyramidal InAs/GaAs quantum dots, *Phys. Rev. B*, 59, 5678-5687.
47. GRUNDMANN, M., 2002, *Nano-Optoelectronics Concepts, Physics and Devices*, Springer-Verlag, Berlin, 3-540-43394-5.
48. KAPTEYN, C., 2001, *Carrier Emission and Electronic Properties of Self-Organized Semiconductor Quantum Dots*, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 3-89820-238-0.
49. FRENKEL,J.,1938, On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semiconductors, *Phys. Rev.*, 54, 647-648.

50. FRY, P.W., FINLEY, J.J., WILSON, L.R., LEMAITRE, A., MOWBRAY, D.J. and SKOLNICK, M.S., 2000, Electric-field-dependent carrier capture and escape in self-assembled InAs/GaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 77, 4344-4346.
51. VINCENT, G., CHANTRE, A. and BOIS, D., 1979, Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junctions, *J. Appl. Phys.*, 50, 5484-5487.
52. MAKRAM-EBEID, S. and LANNON, M., 1982, Quantum model for phonon-assisted tunnel ionization of deep levels in semiconductors, *Phys. Rev. B*, 25, 6406-6424.
53. CHANG, W.H., CHEN, W.Y., HSU, T.M., YEH, N.T. and CHYI, J.I., 2002, Hole emission processes in InAs/GaAs self-assembled quantum dots, *Phys. Rev. B*, 66, 195337-1-195337-8.
54. KAPTEYN, C.M.A., HEINRICHSORFF, F., STIER, O., HEITZ, R., GRUNDMANN, M., ZAKHAROV, N.D., BIMBERG, D. and Werner, P., 1999, Electron escape from InAs quantum dots, *Phys. Rev. B* 60, 14265-14268.
55. CHANG, W.H., CHEN, W., CHENG, M., LAI, C., HSU, T., YEH, N.T. and CHYI, J.I., 2001 Charging of embedded InAs Self assembled quantum dots by space-charge techniques, *Phys. Rev. B*, 64, 125315-1-125315-7.
56. ZHANG J.Z. and GALBRAITH, I., 2004, Intraband absorption for InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 1934-1936.
57. MASON, L., 2008 memory market report, 2008, [online], http://www.electronics.ca/reports/ic/-semiconductor_memory.html#toc [Ziyaret Tarihi: 6 Nisan 2008].
58. SZE, S.M., 1999, *Evolution of Nonvolatile Semiconductor Memory: From Floating-Gate Concept to Single-Electron Memory Cell*, Future Trends in Microelectronics, edited by S. Luryi, J. Xu, and A. Zaslavsky, page 291, John Wiley & Sons, Inc., 0-471-32183-4.
59. SZE, S.M., *Semiconductor Devices*, 1981, John Wiley & Sons, 2nd edition, 978-0471098379.
60. WASER, R., 2003, *Microelectronics and Information Technology*, Wiley-VCH, Berlin, 978-3527403639.
61. GELLER, M., MARENT, A., NOWOZIN, T., FEISE, D., PÖTSCHKE, K., AKÇAY, N., ÖNCAN N. and BIMBERG, D., 2008, Towards an Universal Memory Based on Self-Organized Quantum Dots, *Physica E*, 40, 1811-1814.
62. GELLER, M., MARENT, A., NOWOZIN AND BIMBERG, AKÇAY, N. and ÖNCAN, N., 2008, A write time of 6 ns for quantum dot-based memory structures,

Appl. Phys. Lett., 92, 092108-1-092108-3.

63. MULLER, T., SCHREY, F.F., STRASSER, G. and UNTERRAINER, K., 2003, Ultrafast intraband spectroscopy of electron capture and relaxation in InAs/GaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 3572-3574.
64. GELLER, M., MARENT, A., STOCK, E., ZUBKOV, A. E., SHULGUNOVA, I.S., SOLOMONOV, A.V. and BIMBERG, D., 2006, Hole capture into self-organized InGaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 232105-1-232105-3.
65. ENGSTRÖM, O., KANIEWSKA, M., FU, Y., PISCATOR, J. and MALMKVIST, M., 2004, Electron capture cross sections of InAs/GaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 2908-2910.
66. MARENT, A., GELLER, M., SCHLIWA, A., FEISE, D., PÖTSCHKE, K., BIMBERG, D., AKÇAY, N. and ÖNCAN, N., 2007, 10^{16} years extrapolated hole storage time in GaSb/AlAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 242109-1-242109-3.
67. LANNOO, M. and BOURGOIN, J., 1981, *Point Defects in Semiconductors I - Theoretical Aspects*, Springer Series in Solid-State Sciences volume 22, Springer, Berlin, 978-0387105185.
68. BOURGOIN, J. and LANNOO, M., 1983, *Point Defects in Semiconductors II - Experimental Aspects*, Springer Series in Solid-State Sciences volume 35, Springer, Berlin, 978-0387115153.
69. SCHULZ, S., SCHNÜLL, S., HEYN, C. and HANSEN, W., 2004, Charge-state dependence of InAs quantum-dot emission energies, *Phys. Rev. B*, 69, 195317-1-195317-7.
70. KITTEL, C., and KROEMER, H., 1980, *Thermal Physics*, W. H. Freeman, San Francisco, 978-0716710882.
71. SZE, S.M., *Semiconductor Devices - Physics and Technology*, 2001, John Wiley & Sons, New York, 978-0471333722.
72. WOJS, A. and HAWRYLAK, P., 1996, Charging and infrared spectroscopy of self-assembled quantum dots in a magnetic field, *Phys. Rev. B*, 53, 10841-10845.
73. BLOOD, P. and ORTON, J.W., 1992, *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States*, Academic Press, London, 978-0125286275.
74. KROEMER, H., CHIEN, W.Y., HARRIS, J.S. and EDWALL, D.D., 1980, Measurement of isotype heterojunction barriers by C-V profiling, *Appl. Phys. Lett.*, 36 (4), 295-297.

75. LETARTRE, X., STIEVENARD, D. and BARBIER, E., 1991, Analytical calculation of the capacitance associated with a single quantum well located in a junction, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 7912-7914.
76. WANG, J.B., LU, F., ZHANG, S.K., ZHANG, B., GONG, D.W., SUN, H.H. and WANG, X., 1996, Analysis of capacitance-voltage characteristics of Si_{1-x}Ge_x/Si quantum-well structures, *Phys. Rev. B*, 54, 7979 –7986.
77. LU, F., GONG, D., WANG, J., WANG, Q., SUN, H. and WANG, X., 1996, Capacitance-voltage characteristics of a Schottky junction containing SiGe/Si quantum wells, *Phys. Rev. B*, 53, 4623-4629.
78. BROUNKOV, P. N., BENYATTOU, T. and GUILLOT, G., 1996, Simulation of the capacitance-voltage characteristics of a single quantum-well structure based on the self-consistent solution of the Schrödinger and Poisson equations, *J. Appl. Phys.*, 80, 864-871.
79. BHATTACHARYA, P., 1994, *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 0-13-489766-8.
80. KELLY, M.J., 1995, *Low Dimensional Semiconductors*, Clarendon Press, Oxford, 0-19-851780-7.
81. SINGH, J., 1995, *Semiconductor Optoelectronics*, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 0-07-113577-4.
82. LENZ, A., 2008, *Atomic structure of capped In(Ga)As and GaAs quantum dots for optoelectronic devices*, Thesis (PhD), Technische Universität Berlin, Berlin.
83. BERTONI, J.M.M., 2000, *Struktur von GaAs-Oberflächen und ihre Bedeutung für InAs-Quantenpunkte*, PhD thesis, TU Berlin, Berlin.
84. TEMKO, Y., 2004, *Shape and growth of InAs quantum dots on high-index GaAs(113)A, B and GaAs(2 5 11)A, B substrates*, PhD thesis, TU Berlin, Berlin.
85. TIMM, R., 2007, *Formation, atomic structure, and electronic properties of GaSb quantum dots in GaAs*, PhD thesis, TU Berlin, Berlin.
86. HATAMI, F., N.N., LEDENTSOV, GRUNDMANN, M., BOHRER, J., HEINRICHSORFF, F., BEER, M., BIMBERG, D., RUVIMOV, S.S., WERNER, P., GOSELE, U., HEYDENREICH, J., U., RICHTER, IVANOV, S.V., MELTSER, B.YA. KOPEV, P.S., and ALFEROV, ZH.I., 1995, Radiative recombination in type-II GaSb/GaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 656-658.
87. BALAKRISHNAN, G., TATEBAYASHI, J., KHOSHAKHLAGH, A., HUANG, S.H., JALLIPALLI, A., DAWSON, L.R. and HUFFAKER, D.L., 2006, III/V ratio based selectivity between strained Stranski-Krastanov and strain-free GaSb quantum dots on GaAs, *Appl. Phys. Lett.* 89, 161104-1-161104-3.

88. GELLER, M., STOCK, E, KAPTEYN, C., SELLIN, R.L. and BIMBERG, D., 2006, Tunneling emission from self-organized In(Ga)As/GaAs quantum dots observed via time-resolved capacitance measurements, *Phys.Rev. B*, 73, 205331-1-205331-8.
89. GELLER, M., STOCK, E, KAPTEYN, C., MÜLLER-KIRSCH, L., HEITZ, R. and BIMBERG, D., 450 meV hole localization in GaSb/GaAs quantum dots, *Appl.Phys.Lett.*, 82, 2706-2708.
90. GELLER, M., MARENT, BIMBERG, D., VASI'EV,A.P., SEMENOVA, E.S., ZHUKOV, A.E. and USTINOV, V.M., 2006, Carrier storage time of milliseconds at room temperature in self-organized quantum dots, *Appl.Phys.Lett.*, 89,0702103-1-0702103-3.

ÖZGEÇMİŞ

GENEL

Adı : Namık
Soyadı : AKÇAY
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Ardahan, 15.12.1980
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dil : İngilizce
Ev Adresi : Soğanlı Mahallesi Birlik Sokak No: 32 D:2 Bahçelievler, İstanbul
İş Adresi : İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi 34118 Vezneciler, İstanbul
Telefon : 0212 455 57 00 - 15283
E-Mail : akcay@istanbul.edu.tr
namikakcay@gmail.com

EĞİTİM

- Doktora (2004-), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yüksek Lisans (2001-2004), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Lisans (1997-2001), İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
- Lise (1994-1997), Kars Alpaslan Lisesi

MESLEKİ DENEYİM

- Araştırma Görevlisi, (2001-), İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği Anabilim Dalı
- Fakülte Araştırma Görevlisi Temsilciliği, (2003-2005), İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi

BURSLAR

- Doktora Öğrencileri için Yurtdışı araştırma Bursu, TÜBİTAK-BİDEB, Şubat-Kasım 2007.

YURTDIŞI DENEYİMİ

- Berlin Teknik Üniversitesi, Almanya, Şubat-Kasım 2007.

KATILDIĞI KONGRE, SEMPOZYUM VE SEMİNERLER

- Seminer, “Nanofotonik Melez Aygıtlar”, Doç.Dr. Hilmi Volkan Demir, 1 Şubat 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Seminer, “Recent Progress in QD Semiconductor Amplifiers at Long Wavelength”, Dr. Tomoyaki Akiyama (Fujitsu), 18 Eylül 2007, Berlin Teknik Üniversitesi, Almanya.
- Seminer, “Progress and Challenges of GaInNAsSb for Optical Communication, Prof. Dr. James Harris (Stanford University), 18 Eylül 2007, Berlin Teknik Üniversitesi, Almanya.
- World Year of Physics 2005-Turkish Physical Society 23rd. International Physics Congress, 13-16 Eylül 2005, Muğla.
- International Research Workshop Physics and Technology of Dilute Nitrides for Optical Communications, 08-12 September 2002, İstanbul Üniversitesi Baltalimanı Sosyal Tesisleri, İstanbul (Yerel Organizasyon Komitesi).

SÖZLÜ BİLDİRİLER

- Marent, A., Geller, M., Nowozin, T., Feise, D., Pötschke, K., **Akçay, N.**, Öncan, N. and Bimberg, D., 15 - 20 Temmuz 2007, *Towards an Universal Memory Based on Self-Organized Quantum Dots*, 13th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-13), in Genova, İtalya.
- Marent, A., Geller, M., Schliwa, A., Nowozin, T., Feise, D., Pötschke, K., **Akçay, N.**, Öncan, N. and Bimberg, D., 10 - 13 Eylül 2007, *A Non-volatile Memory Based on III-V Semiconductor Quantum Dots*, EUROMAT 2007, Nürnberg, Almanya.
- Geller, M., Marent, A., Nowozin, T., Feise, D., Pötschke, K., **Akçay, N.**, Öncan, N. and Bimberg, D., 19 Temmuz 2007, *A Semiconductor Memory Based on Self-Organized Quantum Dots*, 4. Treffen des DGM Arbeitskreises "Materialien für nichtflüchtige Speicher" Freiberg, Almanya.

POSTER BİLDİRİLER

- Geller, M., Marent, A., Nowozin, T., Beyer, Y., Pötschke, K., **Akçay, N.**, Öncan, N. and Bimberg, D., 4 – 7 Eylül 2007, *A Semiconductor Memory Based on Quantum Dots*, 7th International workshop on Future information Processing Technologies, Dresden, Almanya.

- **Akçay, N.**, Erol, A., Arıkan, Ç., Balkan, N., 08-12 Eylül 2002, *In-Plane Photovoltaic and Photoconductive Effects in GaInAs and GaInNAs double quantum well structures*, International Research Workshop Physics and Technology of Dilute Nitrides for Optical Communications, İstanbul.

MAKALELER

- Geller, M., Marent, A., Nowozin, T., Feise, D., Pötschke, K., **Akçay, N.**, Öncan, N. and Bimberg, D., 2008, Towards an Universal Memory Based on Self-Organized Quantum Dots, *Physica E*, 40, 1811-1814.
- Marent, A., Geller, M., Schliwa, A., Feise, D., Pötschke, K., Bimberg, D., **Akçay, N.**, and Öncan, N. 2007, 10^{16} years extrapolated hole storage time in GaSb/AlAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 242109-1–242109-3.
- Geller, M., Marent, A., Nowozin and Bimberg, **Akçay, N.** and Öncan, N., 2008, A write time of 6 ns for quantum dot-based memory structures, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 092108-1-092108-3.
- Erol, A., **Akçay, N.**, Arıkan, M.C., Mazzucato S. and Balkan, N., 2004, Spectral Photoconductivity and In-Plane Photovoltage Studies of As-Grown and Annealed GaInNAs / GaAs and GaInAs / GaAs Quantum Well Structures, *Semicond. Sci. Technol.*, 19, 1086-1091.
- **Akçay, N.**, Erol, A., Arıkan, M.C., Mazzucato S. Chalker, P.R., and Joyce, T.B., 2003, In-plane Photovoltaic and Photoconductive Effects on GaInAs and GaInAs Double Quantum Well Structure, *IEE Proc.-Optoelectron*, 150, 96-98.

HOBİLER

- Satranç
- Kitap
- Sinema
- Müzik
- Web Sayfası Tasarımı