



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**InAs/GaAs VE GaSb/GaAs KUANTUM NOKTALARI  
İÇEREN YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**İsmail Fırat ARIKAN  
Fizik Anabilim Dalı  
Katıhal Programı**

**Danışman  
Prof.Dr. Nurten ÖNCAN**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 13/05/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

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

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

Prof. Dr. Fatma TEPEHAN  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi

Prof. Dr. Haşım MUTUŐ  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Nevin KALKAN  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

## **ÖNSÖZ**

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Nurten ÖNCAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Ayrıca Berlin Teknik Üniversitesi'nde bilimsel araştırma olanağı sağladığı için Berlin Teknik Üniversitesi Katıhal Fiziği Enstitüsü Direktörü Prof. Dr. Dieter BIMBERG'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımı boyunca yardımları ve göstermiş olduğu anlayış için Yard. Doç. Dr. Namık AKÇAY'a teşekkür ederim.

Berlin Teknik Üniversitesi'nde yaptığım deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemedikleri için Andreas MARENT ve Tobias NOWOZIN'e teşekkür ederim.

Hiçbir zaman desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

**Mayıs, 2011**

**İsmail Fırat ARIKAN**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
TABLO LİSTESİ .....	vii
SEMBOL LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL KISIMLAR .....	6
2.1. KUANTUM NOKTALARI .....	6
2.2.1. Düşük Boyutlu Yapılar .....	6
2.2.2. Kuantum Noktalarının Elektronik Özellikleri .....	8
2.2.3. Kuantum Noktalarından Taşıyıcı Yayınlanma Süreçleri .....	9
2.2.3.1. Termal Uyarılma .....	10
2.2.3.2. Tünelleme .....	11
2.2.3.3. Fononlar Yardımıyla Tünelleme .....	11
2.2.3.4. Optik Uyarılma .....	12
2.2.4. Kuantum Noktası Oluşturma Yöntemleri .....	12
2.2. YARIİLETKEN BELLEK AYGITLAR .....	15
2.2.1. DRAM .....	16
2.2.2. Flaş Bellekler .....	17
2.2.3. Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar .....	18
2.3. TAŞIYICI DİNAMİĞİ .....	20
2.3.1. Yarıiletkenlerde Derin Seviyeler .....	21
2.3.2. Taşıyıcı Yakalanma ve Yayınlanma Süreçleri .....	22

2.3.3. Termal Denge Durumu .....	24
2.3.4. Yayınlanma Hızının Sıcaklığa Bağlılığı .....	26
<b>2.4. KUANTUM NOKTALARDA TAŞIYICI DİNAMİĞİ .....</b>	<b>27</b>
2.4.1. Termal Uyarılma Hızı .....	28
2.4.2. Yayınlanma Sürecine Elektrik Alanın Katkısı .....	30
2.4.3. Saf Tünelleme ve Fononlar Yardımıyla Tünelleme .....	33
2.4.4. Yüklü Taşıyıcıların Yakalanması Süreci .....	34
<b>2.5. ARINMA BÖLGESİ KAPASİTESİ.....</b>	<b>35</b>
2.5.1. Arınma Bölgesi .....	36
2.5.2. Schottky Kontakı .....	36
2.5.3. p-n Eklemi .....	37
2.5.4. Arınma Bölgesi Genişliği.....	39
2.5.5. Arınma Bölgesi Kapasitesi .....	42
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1. ÖRNEKLERİN YAPISI.....</b>	<b>44</b>
3.1.1. InAs/GaAs Kuantum Noktası İçeren Örnek .....	44
3.1.2. GaSb/GaAs Kuantum Noktası İçeren Örnek.....	45
<b>3.2. DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>46</b>
3.2.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçümü.....	46
3.2.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçümü.....	46
3.2.3. DLTS Ölçümü .....	48
3.2.4. Seviye Seçici DLTS Ölçümü.....	51
<b>3.3. DENEY DÜZENEKLERİ .....</b>	<b>53</b>
3.3.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Düzeneği .....	53
3.3.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Düzeneği .....	53
3.3.3. DLTS Ölçüm Düzeneği.....	54
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1. InAs KUANTUM NOKTASI İÇEREN ÖRNEK.....</b>	<b>56</b>
4.1.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları.....	56
4.1.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları.....	58
4.1.3. DLTS Ölçüm Sonuçları .....	61
4.1.4. Seviye Seçici DLTS Ölçüm Sonuçları .....	63
<b>4.2. GaSb KUANTUM NOKTASI İÇEREN ÖRNEK .....</b>	<b>66</b>
4.2.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları.....	66
4.2.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları.....	68
4.2.3. DLTS Ölçüm Sonuçları .....	70

4.2.4. Seviye Seçici DLTS Ölçüm Sonuçları .....	72
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>85</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Külçe ve düşük boyutlu malzemelerin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2	: İki farklı yarıiletkenin oluşturacakları heteroyapıların bant durumları.	8
Şekil 2.3	: Taşıyıcı yayılma süreçleri .....	10
Şekil 2.4	: Kuantum Noktası oluşturma yöntemleri.....	13
Şekil 2.5	: Farklı yöntemlerle düşük boyutlu yarıiletken üretimi .....	14
Şekil 2.6	: Taşıyıcıları sınırlamalarına göre sınıflandırılan bant yapısı tipleri ..	15
Şekil 2.7	: DRAM'in şematik gösterimi ve DRAM'i oluşturan katmanlar .....	16
Şekil 2.8	: Flaş Bellek'in yapısı ve Flaş Belleği oluşturan katmanlar .....	17
Şekil 2.9	: Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtının yazma, silme, saklama ve okuma işlemlerindeki bant yapısı.....	19
Şekil 2.10	: Bir yarıiletkende taşıyıcılar için yayılma ve yakalanma süreçleri..	21
Şekil 2.11	: Kuantum Noktası için taşıyıcı yakalanma süreci .....	28
Şekil 2.12	: Bir p-n eklemesinin arınma bölgesi civarında bulunan Kuantum Noktasının bant yapısının şematik gösterimi .....	31
Şekil 2.13	: Kuantum Noktasından tünelleme ve fononlar yoluyla tünelleme ile elektron yayılması.....	33
Şekil 2.14	: Bir Schottky Kontakının bant yapısı .....	36
Şekil 2.15	: Bir p-n eklemesinin enerji-bant diyagramı .....	39
Şekil 3.1	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin tabakalı yapısı .....	44
Şekil 3.2	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin tabakalı yapısı .....	45
Şekil 3.3	: Bir $n^+$ -p eklemesinin arınma bölgesi civarında Kuantum Noktası bulunması ve bulunmaması durumlarında C-V profili.....	47
Şekil 3.4	: Bir $n^+$ -p eklemesinin arınma bölgesi civarına yerleştirilmiş Kuantum noktasının, DLTS ölçümlerinde uygulanan voltaj durumlarındaki bant yapısı.....	48
Şekil 3.5	: Kapasite geçişleri ve DLTS sinyali .....	50
Şekil 3.6	: Aktivasyon enerjisi-saklama zamanı grafiği .....	52
Şekil 3.7	: Akım-voltaj ölçüm düzeneği .....	53
Şekil 3.8	: Kapasite-voltaj ölçüm düzeneği .....	54
Şekil 3.9	: DLTS ölçüm düzeneği.....	54
Şekil 4.1	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 300K'deki akım-voltaj grafiği .....	56
Şekil 4.2	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 25K'deki akım-voltaj grafiği .....	57
Şekil 4.3	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 150K'deki kapasite - voltaj grafiği .....	59
Şekil 4.4	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnekte, platonon başladığı ve bittiği voltaj değerleri .....	59
Şekil 4.5	: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin katkı konsantrasyonu -arınma bölgesi genişliği değişimi.....	61
Şekil 4.6	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyali .....	62

<b>Şekil 4.7</b>	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyalinden elde edilmiş Arrhenius grafiği.....	63
<b>Şekil 4.8</b>	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS sinyalleri .....	64
<b>Şekil 4.9</b>	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS sinyallerinden elde edilen Arrhenius grafikleri .....	65
<b>Şekil 4.10</b>	: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin aktivasyon enerjisi - voltaj değişim grafiği.....	66
<b>Şekil 4.11</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 20K'deki akım-voltaj grafiği .....	67
<b>Şekil 4.12</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 300K'deki akım - voltaj grafiği .....	67
<b>Şekil 4.13</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 300K'deki kapasite-voltaj grafiği .....	68
<b>Şekil 4.14</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnekte, platonon başladığı ve bittiği voltaj değerleri .....	69
<b>Şekil 4.15</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin katkı konsantrasyonu -arınma bölgesi genişliği değişimi.....	70
<b>Şekil 4.16</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyali.....	71
<b>Şekil 4.17</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyalinden elde edilmiş Arrhenius grafiği.....	71
<b>Şekil 4.18</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS sinyalleri .....	72
<b>Şekil 4.19</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS sinyallerinden elde edilen Arrhenius grafikleri .....	73
<b>Şekil 4.20</b>	: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin aktivasyon enerjisi - voltaj değişim grafiği.....	73



## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b>	: DRAM ve Flaş Bellekin bazı önemli özelliklerinin kıyaslanması ...	<b>18</b>
<b>Tablo 3.1</b>	: Aktivasyon enerjisi - saklama zamanı grafiğinden elde edilmiş sonuçlar.....	<b>52</b>
<b>Tablo 4.1</b>	: Deney sonucu elde edilen Aktivasyon enerjisi ve saklama zamanı değerleri.....	<b>74</b>

## SEMBOL LİSTESİ

$\lambda$	: de Broglie dalga boyu
$h$	: Planck sabiti
$p$	: Momentum
$m^*$	: Etkin kütle
$k_B$	: Boltzman sabiti
$e$	: Elektronun yükü
$T$	: Sıcaklık
$K$	: Kelvin
$\psi$	: Dalga Denklemi
$L_x$	: Kuantum kuyusunun genişliği
$m$	: Kütle
$D_{QD}$	: Kuantum kuyusunun durum yoğunluğu
$E_i$	: Kuantum noktasının sahip olduğu enerji
$E_A$	: Termal uyarılma enerjisi
$R_n^e(t)$	: Elektron yayınlama hızı
$R_p^e(t)$	: Boşluk yayınlama hızı
$R_n^c(t)$	: Elektron yakalama hızı
$R_n^c(t)$	: Boşluk yakalama hızı
$e_n(T)$	: Elektron için termal uyarılma hızı
$e_p(T)$	: Boşluk için termal uyarılma hızı
$\gamma_n$	: Sıcaklıktan bağımsız sabit
$\gamma_p$	: Sıcaklıktan bağımsız sabit
$\sigma^n$	: Elektron yakalama tesir kesiti
$\sigma^p$	: Boşluk yakalama tesir kesiti
$E_B$	: Potansiyel kuyusunun yüksekliği
$e^T$	: Tünelleme hızı
$F$	: Elektrik alan
$W_m$	: Her bir $m$ fonon modu için istatistiksel ağırlık
$c_n$	: Elektron yakalama hızı
$e_n$	: Elektron yayınlama hızı
$c_p$	: Boşluk yakalama hızı
$e_p$	: Boşluk yayınlama hızı
$n_c$	: İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu
$p_v$	: Valans bandındaki boşluk yoğunluğu
$N_t$	: Toplam tuzak yoğunluğu
$n_n$	: İşgal edilmiş tuzak seviye yoğunluğu
$E_F$	: Fermi seviyesi
$E_C$	: İletkenlik bandı
$E_V$	: Valans bandı

$N_C$	: İletkenlik bandı etkin seviye yoğunluğu
$N_V$	: Valans bandı etkin seviye yoğunluğu
$E_{QD}$	: Kuantum noktasının enerji seviyesi
$E_{CC}$	: Coulomb etkileşmesi
$C_{QD}$	: Kuantum noktasının kapasitesi
$E_{BE}$	: Bağlanma enerjisi
$E_{CAP}$	: Yakalama bariyeri
$E_{BAR}$	: E enerjili bariyer üzerinde termal uyarılma enerjisi
$\Phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$\chi_s$	: Elektron afinitesi
$V_m$	: Metal için kontak potansiyeli
$V_s$	: Yarıiletkenin kontak potansiyeli
$V_b$	: Diyodun iç potansiyeli
$E_g$	: Yarıiletkenin bant aralığı
$N_a$	: Akseptör atomları yük yoğunluğu
$N_d$	: Donör atomları yük yoğunluğu
$n_i$	: Asal taşıyıcı konsantrasyonu
$\rho(x)$	: Sabit yük yoğunluğu
$\epsilon_0$	: Boşluğun dielektrik sabiti
$\epsilon$	: Ortamın dielektrik sabiti
$w_n$	: Arınma bölgesi genişliği
$C$	: Kapasite
$Q$	: Yük
$V$	: Gerilim
$A$	: Alan
$S(T, t_1, t_2)$	: Kapasite geçişlerinden elde edilen DLTS sinyali
$\tau_{ref}$	: Referans zamanı

## ÖZET

### **InAs/GaAs VE GaSb/GaAs KUANTUM NOKTALARI İÇEREN YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Bu çalışmada, InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneklerin elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Her iki örnek de MBE (Moleküler Işın Epitaksi) yöntemiyle büyütülmüştür. Her iki örnekte de Kuantum Noktaları  $n^+$ -p eklemiminin arınma bölgesi civarına yerleştirilmiştir.

Her bir örnek için 20K ve 300K sıcaklık aralığında, Akım-Voltaj (I-V), Kapasite-Voltaj, DLTS (Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi) ve Seviye Seçici DLTS (Charge Selective Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi) ölçümleri alınmıştır.

InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örnek için, aktivasyon enerjisi Seviye Seçici DLTS metodu ile 198 meV olarak bulunmuştur. GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örnek için ise aynı metotla aktivasyon enerjisi 461 meV olarak bulunmuştur.

Araştırmanın daha ileri bir adımı olarak, InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örnekler için, saklama zamanları oda sıcaklığında sırasıyla 0.5 ns ve 1  $\mu$ s olarak bulunmuştur.

Çalışmanın bir bölümü Berlin Teknik Üniversitesi, Katihal Fiziği Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir.

## **SUMMARY**

### **INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF THE STRUCTURES INCLUDING InAs/GaAs AND GaSb/GaAs QUANTUM DOTS**

In this working, electrical properties of the samples which have including InAs/GaAs Quantum Dots and GaSb/GaAs Quantum Dots has been investigated.

Both of the samples have been grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE). Quantum Dots are embedded in depletion region of  $n^+$ -p junction for on all of the samples.

For each one of the samples, the Current-Voltage (I-V), the Capacity-Voltage (C-V), the DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) and the Charge Selective DLTS measurements have been done, between 20K and 300K.

For the sample that includes InAs/GaAs Quantum Dots, the activation energy has been determined as 198 meV by the method of Charge Selective DLTS. For the sample that includes GaSb/GaAs Quantum Dots, the activation energy has been determined as 461 meV by the method of Charge Selective DLTS.

Furthermore, for both of the samples that include InAs/GaAs Quantum Dots and GaSb/GaAs Quantum Dots, the storage times have been determined as 0.5 ns and 1  $\mu$ s respectively at room temperature.

A part of this work has been performed at the Technical University of Berlin, Institute of Solid State Physics.

## 1. GİRİŞ

İnsanlar toplumsal yaşamın gereği olarak, bazı işleri yapmakla yükümlüdürler. Bununla birlikte, insanlar bu işleri kolaylaştırmak veya büsbütün kurtulmak için çeşitli yöntemler ve aletler geliştirmişlerdir. Bilgi ve deneyim arttıkça üretim süreci de hızlanmış ve karmaşıklaşmıştır. Böylece bir çok endüstri meydana gelmiştir. Günümüzde en büyük endüstri, elektronik endüstrisidir [1]. Bu endüstrinin yüzde seksenini yarıiletkenler oluşturmaktadır [1].

Yarıiletken cihazlar günümüzde iletişim, görüntüleme, bilginin saklanması gibi bir çok alanda kullanılmaktadır [1-3]. Tasarlanacak yarıiletken cihazlardan beklenti, işlemlerin hızlı yapılması ve yüksek kapasitedir. Bu beklentileri sağlamak için izlenen yol, boyutları küçülterek, birim alan başına daha fazla devre elemanı sığdırmaktır. Bu şekilde oluşturulan aygıtlar, işlem hızını ve bilgi kapasitesini artırırken, güç ihtiyacını ve maliyeti düşürür. [4]

Küçültme stratejisi ile alakalı olarak Gordon Moore 1965 yılında, ilk on yıl için geçerli olacak bir öngöründe bulunmuştur. 1. Moore Yasası olarak da bilinen bu öngörü şu şekildedir; 'Bir yonga üzerinde yer alan bileşen sayısı her 12 ayda iki kat artar.' [5]. Bu yasa ilk on yıl için söylenmiş olmasına rağmen hala geçerliliğini korumaktadır [6].

1965 yılında birim hücre boyutu 1 $\mu$ m iken, 2010 yılı itibariyle bu boyut 32 nm'ye kadar düşürülmüştür [4]. Bir bilgisayar işlemcisine sığdırılan bileşen sayısı 1.9 milyara ulaşmıştır [7].

Boyutlardaki bu hızlı düşüş belirli bir sınıra kadar gelmiştir. Artık bu sınırdaki kuantum olaylar görülmeye başlanmıştır. Bu olaylar klasik fizik yasalarına uygun çalışan aygıtlar için bazı sınırlamalar meydana getirmektedir. Örnek olarak bir transistör ve kapasitörden oluşan DRAM'ler göz önüne alınabilir. Boyutlar yeterli miktarda küçültüldüğünde, transistör ve kapasitördeki bariyerlerin kalınlıkları azalacaktır.

Böylece tünelleme olasılığı artarak, sızıntı akımlarının ve gürültünün artmasına sebep olacaktır [8].

Bu fenomen insanları çok sayıda araştırmalara ve yeni fabrikasyon teknikleri bulmaya iter. Gordon Moore'un, 2. Moore Yasası olarak bilinen ikinci öngörüsü fabrikasyon maliyeti ile ilgilidir. Öngörüye göre, yeni yongalar üretmek için kurulacak fabrikaların maliyeti, her yeni nesilde iki kat artacaktır'[5]. 1970 yılında yonga üretilen bir fabrikanın maliyeti 2 milyon dolar iken, 2010 yılında bu miktar Moore'un öngörüsüne göre 15 milyar doları aşacaktır [6].

Bu tarz devre elemanları üretebilmek için kullanılan tekniklerden birisi 'yukarıdan-aşağı yöntemi'dir (top-down approach). Bu yöntemle levha halindeki bir malzemeye litografi ve aşındırma teknikleri uygulanarak, istenen boyutlarda yeni malzemeler elde edilir. Bu teknikte boyutların küçülmesi ışığın dalga boyunun azalması ile mümkündür. Bunun için günümüzde UV ve X ışınları kullanılmaktadır. Daha düşük boyutlarda malzeme elde etmek istendiğinde bu yöntem kullanışsız bir hal almaktadır [8].

Bir diğer yöntem ise 'aşağıdan-yukarıya (bottom-up) yöntemi'dir. Bu yöntemde atomlar veya moleküller belirli düzenler ile yeniden sıralanırlar. Örgü sabitleri farklı atomları bir araya getirdiğimizde, aralarındaki gerilim kuvvetlerinden dolayı ince bir tabaka meydana gelir. Atomlar veya moleküller bu gerilim kuvvetini azaltmak için, ince tabaka üzerinde gelişigüzel düzenli yapılar oluştururlar. Bu yapılara adacıklar da denir. Bu adacıklar düzgün şekillere sahiplerdir ve boyutları nanometre mertebesindedir. Bu yöntem ayrıca 'Kendiliğinden Organize Olma Yöntemi' (Self-Organized Processes) olarak da adlandırılır. Bu konudaki ilk çalışmalar 1938 yılında Stranski ve Krastanow [9] tarafından gerçekleştirilmiştir.

Küçültme işlemi belirli bir değere ulaştığında kuantum olaylar görülmeye başlar. Bu da klasik fiziği değil kuantum fiziğini kullanmayı gerektirir. Külçe malzemelerde (bulk material) taşıyıcılar her üç doğrultuda da serbestçe hareket edebilirler. Fakat kuantum etkiler görüldüğünde taşıyıcıların hareketleri etkilenir. Taşıyıcılar serbestçe değil, belirli sınırlamalar çerçevesinde hareket ederler. Bu etkilerin başlama ölçüsü, malzemenin ebadının, taşıyıcıların dalga boyu olan 'de Broglie dalga boyu' ile kıyaslanabilecek

kadar küçülmesidir. Bu şartlarda taşıyıcıların durum yoğunluğu ifadeleri değişerek, sadece izin verilen değerleri alırlar. Böylece enerji ifadeleri sürekli değil kesikli değerler alırlar. Bu tarz malzemelere Düşük Boyutlu Yapılar denir [10].

Sınırlamanın tüm doğrultularda meydana geldiği malzemelere Kuantum Noktalar denir. Kuantum Noktaların durum yoğunluğu ifadesi Dirac-Deltası ile temsil edilir. Yani sadece belirli bir noktada bulunabilirler. Böylece enerji değerleri, belirli enerji seviyelerinde anlamlıdır. Kuantum Noktalar bu özellikleri ile atomlara benzemektedirler. Bu sebeple Yapay Atom (Artificial Atom) olarak da adlandırılırlar.

Kuantum Noktaların atomlara benzer elektronik ve optik özellikleri, bir çok teknolojik uygulama için büyük avantaj sağlar. Özellikle lazer ve optik alanında yaygın olarak çalışılmaktadır [11-16]. Tek foton devrelerinde kullanılmaya başlanmıştır [17-18]. Kuantum Noktalar sadece bu alanlarda değil, elektronik ve optoelektronik bir çok alanında kullanılacaktır. Bir diğer kullanım alanı olarak da mantık ve hafıza devreleri öngörülmektedir. Bu alanda uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır [19-31].

Günümüzde bellek aygıt olarak yarıiletken tabanlı DRAM ve Flash Bellek'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. DRAM'ler transistörlerden ve kapasitörlerden oluşan, geçici hafızalı (volatile) bellek cihazlardır. Yaygın olarak bilgisayarlarda geçici hafıza birimi olarak kullanılırlar. Transistör bilgiyi yazar, kapasitör bilgiyi saklar. DRAM'ler erişim hızları (yazma-silme-okuma) oldukça yüksektir. Ayrıca yazma/silme döngüleri oldukça uzundur. Bu avantajlarına rağmen, kapasitörler sürekli dolup boşaldıklarından dolayı, işlem yapılmasa bile sürekli olarak enerjiye ihtiyaç duyarlar. Kapasitörün boşalma süreleri saklama zamanına tekabül ettiğinden dolayı hafızaları geçicidir. Bu süre milisaniyeler mertebesinde ve bilgiyi saklamak için çok kısa bir süredir. Bir diğer dezavantajları ise işlemlerde çok sayıda taşıyıcı kullanmalarıdır.

Flaş Bellekler, iki tane SiO<sub>2</sub> bariyer arasında, bir silisyum tabaka ile oluşturulan kalıcı hafızalı (non-volatile) bellek cihazlardır. Si tabakasında taşıyıcı olup olmaması bilginin saklanması belirler. SiO<sub>2</sub> bariyeri ile Si tabaka arasındaki enerji farkı yaklaşık olarak 3.2 eV olduğundan dolayı, oda sıcaklığında taşıyıcıların Si tabakasını terk etmeleri söz konusu değildir. Böylece kaydedilen bilgi, enerjiye ihtiyaç duyulmadan, oda



sıcaklığında yaklaşık olarak 10 yıl saklanır. Bu süre bellek cihazlar için ideal bir süredir. Saklama zamanı için avantaj sağlayan bariyer, maalesef, erişim zamanı için dezavantaj sağlar. Yazma işleminde taşıyıcıların  $\text{SiO}_2$  bariyeri aşarak Si tabakasına yerleşmesi, silme işleminde ise  $\text{SiO}_2$  bariyeri aşarak Si tabakasından çıkması gerekir. Taşıyıcıların bariyeri aşmaları yüksek elektrik alan ihtiyacına sebebiyet verir. Yüksek elektrik alan kullanılması aygıtın dayanıklılığını (yazma-silme döngüsü) azaltır. Ayrıca taşıyıcıların yüksek bir bariyeri aşmaları erişim zamanının uzamasına neden olur.

İstenilen bellek aygıt, DRAM'lerin ve Flaş Bellek'lerin iyi özelliklerine sahip olmalıdır. Bu özellikler, aygıtın kalıcı hafızaya sahip olması (sadece işlemlerde enerjiye ihtiyaç duyması), erişim zamanlarının hızlı olması (nanosaniyeler), saklama zamanının oda sıcaklığında en az 10 yıl olması, işlemleri az sayıda taşıyıcı ile gerçekleştirebilmesi, düşük enerji ihtiyacı ve düşük üretim maliyeti olarak sıralanabilir. Böyle bir bellek aygıt 'Evrensel Bellek Aygıt' olacaktır.

Evrensel Bellek Aygıt için önerilen model Kuantum Noktalara dayanmaktadır. Kuantum Noktaların atomlara benzeyen elektronik ve optik özellikleri böyle bir fikri mantıklı kılar. Kuantum Noktaların enerji seviyeleri, taşıyıcılar için tuzak seviyeleri gibi davranarak, taşıyıcıların yakalanmasına ve yayınlanmasına olanak verir. Böyle bir aygıt tasarımında, Kuantum Noktalar bir p-n eklemine arınma bölgesi civarına yerleştirildiğinden dolayı, ileri ve geri voltaj beslemeleri ile bant yapıları değiştirilerek, yakalanma ve yayınlanma süreçleri kontrol edilebilir.

p-n eklemine arınma bölgesi civarına yerleştirilmiş bir Kuantum Noktasına ileri voltaj uyguladığında, yakalama bariyeri azalacak ve taşıyıcılar Kuantum Noktasının içine yerleşecekler. Bu işlem yazma işlemine karşılık gelir. Kuantum Noktasının içindeki taşıyıcılar belirli enerji seviyelerine yerleşecekler ve olası bir emisyon olayına kadar orada kalacaklardır. Bu süre saklama zamanına karşılık gelir. Bilgi silinmek istendiğinde ise yüksek bir geri voltaj uygulanır. Yakalama bariyeri, uygulanan geri voltaj ile yeteri kadar incelendiğinde taşıyıcılar tünelleme yaparak Kuantum Noktasını terk ederler. Okuma işleminde ise iki boyutlu elektron ya da iki boyutlu boşluk gazından yararlanılır (taşıyıcılar elektron ise 2DEG, taşıyıcılar boşluk ise 2DHG). Bu işlemlerin gerçekleşmesi için bir ya da birkaç taşıyıcı yeterlidir. Bu da enerji ihtiyacını asgari

seviyede tutar. Ayrıca yüksek elektrik alan ihtiyacı olmadığından dolayı, yazma/silme döngüsü de yeterince uzundur [32].

Bu çalışmada InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren yapıların elektriksel özellikleri incelenmiştir. Akım-Voltaj ölçümleri yapılarak örneklerin diyot karakterisliğine sahip oldukları gösterilmiş, ileri ve geri yönde kırılma voltajları tesbit edilmiştir. Kapasite-Voltaj ölçümleri yapılarak, Kuantum Noktası içeren yapıların kapasite profilleri gösterilmiştir. Ayrıca bu ölçümler ile Kuantum Noktaları içeren örneklerin katkı konsantrasyonları ve arınma bölgesi genişlikleri tesbit edilmiştir. Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy) ölçümleri yapılarak, Kuantum Noktalarının kesikli enerji seviyelerine sahip oldukları gösterilmiş, aktivasyon enerjileri bulunmuştur. Seviye Seçici DLTS (Charge Selective DLTS) ölçümleri ile de Kuantum Noktalarının her bir enerji seviyeleri için aktivasyon enerjileri belirlenmiştir.

Daha ileri bir adım olarak da, bulunan temel seviye aktivasyon enerjileri kullanılarak, Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtı olabilecek InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneklerin bilgiyi saklayabilirlikleri test edilmiş, oda sıcaklığındaki bilgiyi saklama süreleri tesbit edilmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. KUANTUM NOKTALARI

#### 2.2.1. Düşük Boyutlu Yapılar

Taşıyıcıların her üç doğrultuda da serbestçe hareket edebildikleri malzemelere ‘Külçe Malzeme’ (Bulk Material) denir. Bu tarz malzemeler için enerji ifadesi sürekli olup, durum yoğunluğu ifadesi enerjinin karekökü ile orantılıdır. Durum yoğunluğu kavramı taşıyıcıların yerleşebilecekleri mümkün durumların sayısını ifade eder.

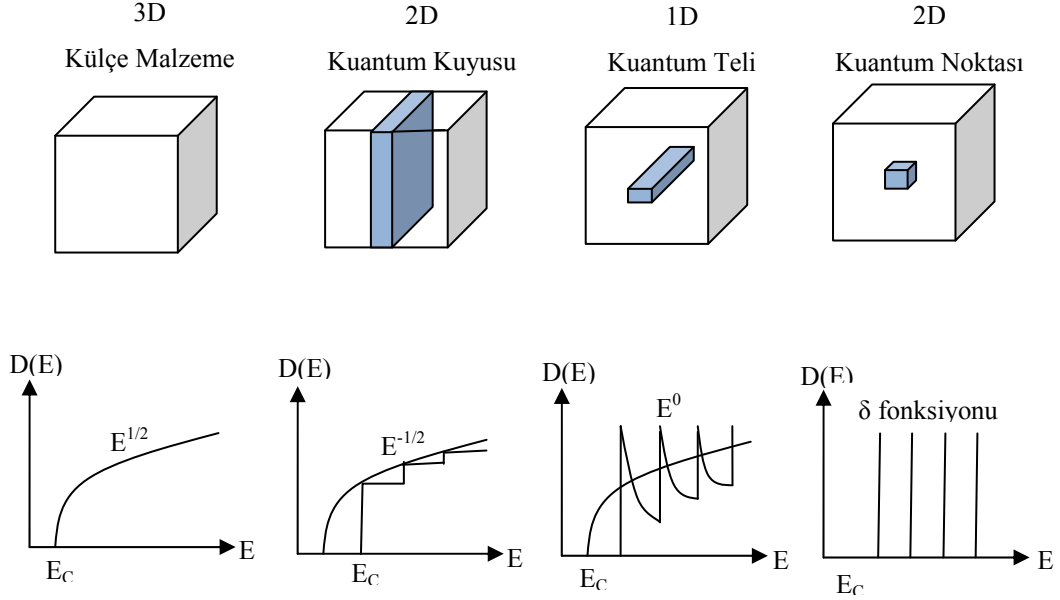
Eğer malzemenin ebadı, taşıyıcıların dalga boyu olan de Broglie dalga boyu ile kıyaslanabilecek kadar küçük ise, kuantum olaylar görülür. Böylece taşıyıcılar için bazı sınırlamalar ortaya çıkar. Durum yoğunluğu ifadesi değişir, enerji kesikli değerler alır. Böyle malzemelere Düşük Boyutlu Yapılar denir.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m^*k_B T}} = \frac{1,22nm}{\sqrt{(E_{kin} / [eV])}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\lambda$ , de Broglie dalga boyunu ifade eder.  $h$  Planck sabitini,  $m^*$  etkin kütle,  $k_B$  Boltzman sabitini ve  $T$  de Kelvin cinsinden sıcaklığı temsil eder. Bu ifadeden görüldüğü gibi dalga boyu sıcaklığa ve etkin kütleyle bağlı olarak değişir. Örnek olarak oda sıcaklığında GaAs’de elektronlar için de Broglie dalga boyu 25 nm iken, boşluklar için 9 nm’dir [8]. Etkin kütle taşıyıcıların (elektronlar ve boşluklar) yapı içerisindeki diğer elektronlarla ve boşluklarla etkileşmesi sonucu ortaya çıkan kütledir. Her yapı için farklı değer alır.

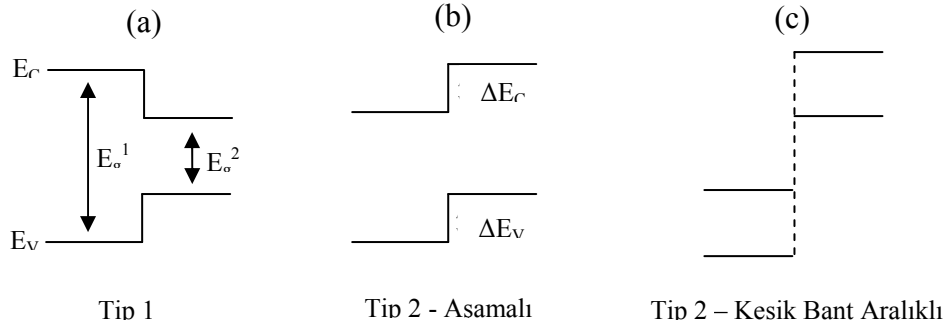
Taşıyıcılar için sınırlama, bir boyutta, iki boyutta ya da üç boyutta da gerçekleşebilir. Bu durumda sınırlama olan doğrultuda etkiler gözlenirken, diğer boyutlardaki taşıyıcılar külçe malzemedeki gibi serbest hareketlerine devam ederler. Düşük Boyutlu Yapıları, taşıyıcılar için sınırlamanın kaç boyutta gerçekleştiğine göre sınıflandırabiliriz.

Buna göre; sınırlama bir boyutta ise Kuantum Kuyusu (Quantum Well), iki boyutta ise Kuantum Teli (Quantum Wire), üç boyutta ise Kuantum Noktası (Quantum Dot) olarak sınıflandırılırlar. Şekil 2.1’de bu malzemelerin bant yapıları ve durum yoğunluklarına bağlı enerji ifadeleri gözükmemektedir [10].



Şekil 2.1: Külçe ve düşük boyutlu malzemelerin şematik gösterimi (üstte). Durum yoğunluklarının enerjiye bağlı değişimleri (altta).

Düşük boyutlu yapıları elde etmek için bant yapıları farklı iki yarı iletken ard arda büyütülür. Bu işlemde bant aralığı büyük olan yarıiletkenin üzerine bant aralığı küçük olan yarıiletken, bunların üzerine tekrar bant aralığı büyük yarıiletken büyütülür. Böylece iletkenlik ve valans bantlarında taşıyıcılar için potansiyel kuyusu oluşturulur. Kuantum etkilerin gözlenebilmesi için bant aralığı küçük olan yarıiletkenin tabaka kalınlığı (bir boyut için) veya tabaka kalınlıklarının (iki veya üç boyut için) yeterince ince olması gerekir. Bu şekilde iki yarıiletkenin birbiri üzerine büyütülmesi ile elde edilen yapılara ‘heteroyapılar’ denir. Bu yapıların birleşim yüzeylerine de ‘heteroeklemler’ denir. Şekil-2 de iki farklı bant aralığına sahip iki farklı yarıiletkenin oluşturabileceği heteroyapılar gösterilmiştir [10].



Şekil 2.2: Bant aralıkları  $E_g^1$  ve  $E_g^2$  olan iki farklı yarıiletkenin oluşturacağı heteroyapıların olası bant durumu tipleri. (a) Tip 1, (b)Tip 2 aşamalı ve (c) Tip 2 kesik bant aralıklı.

### 2.2.2. Kuantum Noktaların Elektronik Özellikleri

Kuantum Noktaları, taşıyıcıların hareketine her üç doğrultuda da sınırlama koyan düşük boyutlu yapılardır. Sınırlama söz konusu olduğu için, enerji ifadesi her değeri alamaz. Kuantum Noktalar taşıyıcılar için sonlu bir potansiyel kuyusu oluştururlar. Taşıyıcılar sadece Kuantum Noktasının sahip olduğu enerji seviyelerine yerleşebilirler. Bu enerji seviyeleri, Kuantum Noktasının büyüklüğüne, şekline ve kimyasal yapısına bağlıdır [8].

Enerji seviyelerini belirlemek için, sonlu potansiyel kuyusundaki parçacık için ‘Schrödinger Dalgı Denklemi’ni bir boyutta çözmek gerekir. Bulunan sonuç üç boyuta genellediğinde, Kuantum Noktalarının sahip olduğu enerji seviyelerinin değerlerini elde edilir.

$$\psi(x, y, z) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{l\pi y}{L_y}\right) \sin\left(\frac{q\pi z}{L_z}\right) \quad (2.2)$$

$$E_T = \frac{h^2 n^2}{8mL_x} + \frac{h^2 l^2}{8mL_y} + \frac{h^2 q^2}{8mL_z} \quad (2.3)$$

Denklem (2.2) parçacığı temsil eden dalga denklemi ifadesidir. Denklem (2.3) ise enerji ifadesidir. Denklemdeki n, l ve q değerleri seviyeleri belirtir. h Planck sabiti, m taşıyıcının kütlesi ve L kuantum kuyusunun genişliğidir. Denklem (2.3)’te görüldüğü gibi enerji sürekli değerler yerine kesikli değerler alır.

Durum yoğunluğu ifadesi külçe mazlemelerde enerjinin karekökü ile doğru orantılı olmasına karşın, Kuantum Noktalarda bu ifade Dirac Deltası'na dönüşür. Bu fonksiyonun özelliğinden bilindiği gibi parantez içindeki ifade sıfır ise durum yoğunluğunun anlamlı bir değeri vardır. Yani taşıyıcıların sadece belirlenmiş seviyelere yerleşmeleri mümkündür.

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

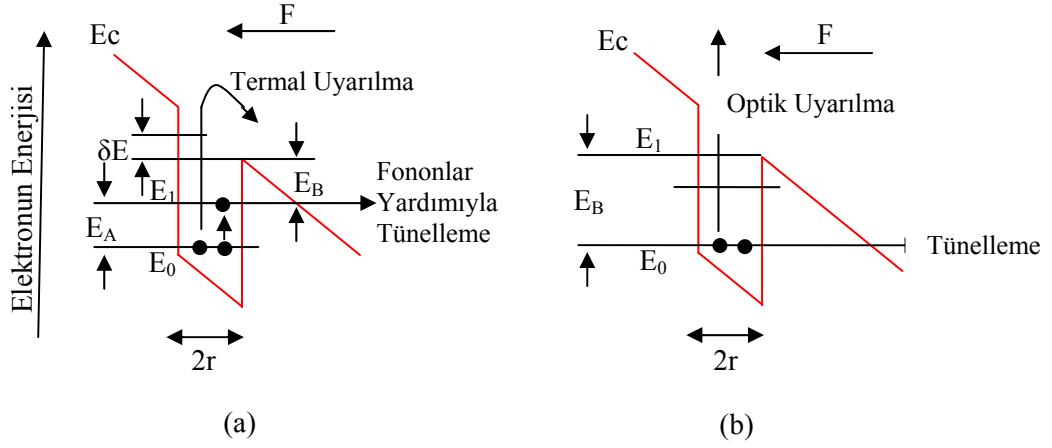
Denklem (2.4)'te  $D_{QD}$  Kuantum Noktasının durum yoğunluğunu,  $E_i$  Kuantum Noktaların enerji seviyelerini,  $E$  de taşıyıcılar için verilen enerji değerini gösterir. Bunlar birbirlerine eşit ise taşıyıcı buraya yerleşebilir demektir.

Kuantum Noktaları atomlara benzer optik ve elektronik özelliklerinden dolayı yapay atom (artificial atom) olarak da adlandırılırlar. Bu özellikleri sayesinde bir çok elektronik ve optoelektronik aygıtların üretilmesinde ya da geliştirilmesinde önem taşırlar. Lazerler, dedektörler, tek foton kaynakları, optik yükselticiler, yüksek frekanslı optik aygıtlar [11,12,16], alan etkili transistörler (FET) [33,36], bellek aygıtlar [35-39] ve kuantum bilgisayarlar bu uygulamalara örnek olarak verilebilirler.

Kuantum Noktalarının, oda sıcaklığında çalışan elektronik ve optoelektronik aygıtlarda kullanılabilmesi için bazı şartları sağlamaları gerekir. Bu şartları; taşıyıcılar için üç boyutta da sınırlama koyabilecek kadar küçük olmaları, birim hacimde aynı şekle ve büyüklüğe sahip olmak üzere çok sayıda olmaları, kusur içermemeleri olarak sıralayabiliriz.

### 2.2.3. Kuantum Noktalarından Taşıyıcı Yayınlanma Süreçleri

Kuantum Noktalarının sahip oldukları enerji seviyeleri, taşıyıcılar için tuzak seviyesi işlevi görürler. Taşıyıcılar bu seviyelere yerleşirler ve belirli bir süre sonra yayınlanırlar. Bu yayınlanma mekanizmalarını Termal Uyarılma, Tünelleme, Fononlar Yardımıyla Tünelleme ve Optik Uyarılma olarak sıralayabiliriz.



Şekil 2.3: Bir Kuantum Noktasının iletkenlik bandındaki temel seviyesinden, (a) Termal uyarılma ve fonon yardımıyla tünelleme, (b) tünelleme ve optik uyarılma.

### 2.2.3.1. Termal Uyarılma

Termal uyarılma sürecinde, Kuantum Noktası içinde tutulan taşıyıcılar ısı enerjisi yardımıyla yayınlanırlar. En etkin yayınlanma sürecidir. Kuantum Noktalar taşıyıcılar için, yarıiletkenlerdeki tuzak seviyeler gibi davranacağından, tuzak seviyeler için kullanılan ifadeler Kuantum Noktalar için de kullanılabilir [26].

Kuantum Noktasının sahip olduğu aktivasyon enerjisi  $E_A$ , yayınlanan elektron (n) ya da boşluk (p) için net uyarılma hızları sırasıyla  $R_n^e(t)$  ve  $R_p^e(t)$  ile ifade edilir. Net uyarılma hızı, birim zamanda Kuantum Noktasından yayınlanan taşıyıcı sayısıdır. Benzer şekilde elektron ve boşluklar için net yakalama hızları ise  $R_n^c(t)$  ve  $R_p^c(t)$  olarak verilir. Termal denge durumunda net uyarılma hızı ile net yakalama hızı 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,  $\sigma^n(\sigma^p)$  belirli bir sıcaklıktaki yakalama tesir kesitini  $E_A^n(E_A^p)$  elektron (boşluk) aktivasyon enerjisini,  $\gamma_n(\gamma_p)$  ise elektron (boşluk) durumları için sıcaklıktan bağımsız bir sabiti göstermektedir.

### 2.2.3.2. Tünelleme

Bu süreçte elektrik alan uygulanarak enerji bantlarının eğilmesi sağlanır. Enerji bantları yeteri kadar incelendiğinde taşıyıcılar bariyerin içinden geçerek yayınlanırlar.

Uygulanan bir elektrik alan etkisinde kuantum mekaniksel tünelleme olayı, yüksekliği  $E_B$  olan bir Dirac kuyusu incelendiğinde, üçgen bariyer içerisinde tünelleme hızı (ya da yayınlama olasılığı)  $e^T$ ,

$$e^T = \frac{eF}{4\sqrt{2m^*E_B}} \exp\left[-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{E_B^{3/2}}{eF}\right] \quad (2.7)$$

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 sınırlandırmış potansiyelde dalga fonksiyonları ile ilişkilidir.

### 2.2.3.3. Fononlar Yardımıyla Tünelleme

Fononlar yardımıyla tünelleme, termal uyarılma ve tünelleme olaylarının peş peşe gerçekleşmesidir. İki adımda gerçekleşir. Birinci adımda taşıyıcılar uyarılarak üst seviyelere çıkarlar. İkinci adımda ise üçgen bariyerden tünelleme yaparak Kuantum Noktasını terk ederler. Yayınlama hızı; sıcaklığa, uygulanan elektrik alana, potansiyel kuantum kuyusunun şekline ve derinliğine bağlıdır.



Fononlar yardımıyla tünellemeyle yayınlanma hızı, kuantum mekaniksel ve yarı-klasik yaklaşıklıklarla hesaplababilir. Kuantum mekaniksel yaklaşıklıkla hesaplanan yayınlanma hızı,

$$e^P = \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_m e^T (E_A + m\hbar\omega) \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanır. Buradaki toplam ilgili tüm fonon modlarını içermektedir. W, her bir m fonon modu için istatistiksel ağırlıktır [40,41].

Yarı-klasik yaklaşıklık kullanılarak ise yayınlanma hızı şu şekilde bulunur,

$$e_n^P = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^2 \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \left[ -\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \frac{E_B^{3/2}}{eF}} \right] \quad (2.9)$$

Yapılan deneylerde  $10^6 - 10^8$  V/m mertebesindeki voltaj değerlerinde Kuantum Noktası seviyeleri ya da derin tuzaklar için fononlar yardımıyla tünellemenin önemli olduğu gösterilmiştir [41].

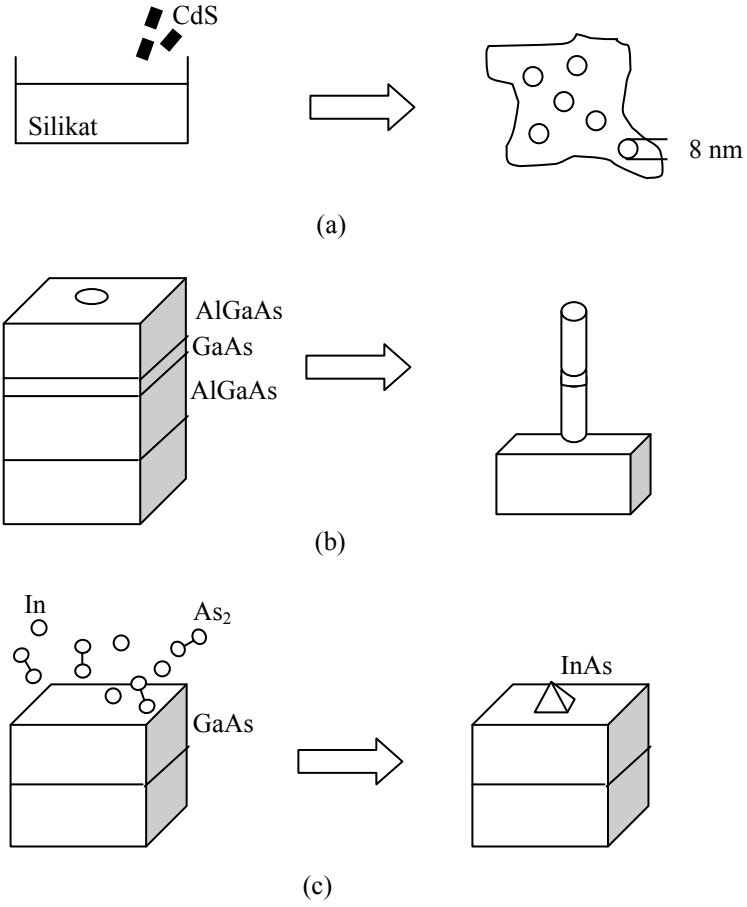
#### 2.2.3.4. Optik Uyarılma

Optik uyarılmada, Kuantum Noktaların üzerine fotonlar düşürülür. Eğer fotonların sahip oldukları enerji yeterince büyükse, taşıyıcılar Kuantum Noktasını terk ederler.

Piramit şeklindeki InAs/GaAs Kuantum Noktası için, optik uyarılmanın foton enerjisinin 600 meV değerlerine kadar gerçekleşebildiği yapılan deneyler ile hesaplanmıştır [42].

#### 2.2.4. Kuantum Noktası Oluşturma Yöntemleri

Kuantum Noktaları elde etmek için mikrokristallendirme, kimyasal aşındırma (etching) [43-47] ve kendiliğinden organize olma (self-organized) yöntemleri [9,48] kullanılır. Kuantum Noktaları oluşturulurken çözünürlük, kalite ve maliyet göz önüne alınarak en uygun yöntem seçilir.

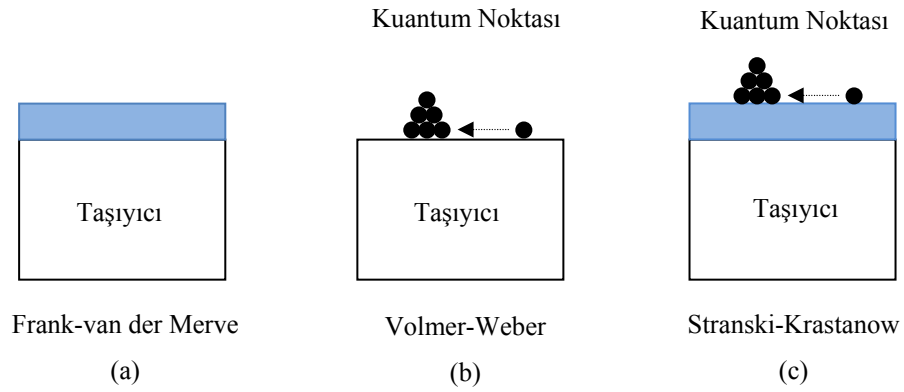


Şekil 2.4: Kuantum Noktası oluşturma yöntemleri. (a) Cam üzerinde mikrokristallendirme, (b) ince filmelerin şekillendirilmesi, (c) kendiliğinden organize olma.

Mikrokristallendirme yönteminde, dielektrik bir malzemenin içine yarıiletken malzemeler konularak, yüksek sıcaklığa maruz bırakılırlar. Bu şekilde yaklaşık eşit büyüklüklerde kristal formlar elde edilir. Bu teknikte mikrokristallerin boyutları ısıya ve ısıya maruz bırakılma süresine bağlıdır.

Kimyasal aşındırma yönteminde bir bütün halindeki tabakalardan, litografi ve aşındırma tekniği ile istenilen şekilde Kuantum Noktaları elde edilir (yukarıdan – aşağıya). Litografi yapılırken; optik litografi, X-ışını litografisi, elektron demeti litografisi ve taramalı tünelleme mikroskopisi yöntemlerinden biri ya da bir kaçını kullanılır. Yukarıdan aşağıya yönteminin dezavantajı, örneklerin çözünürlüklerinin yeterince iyi olmaması, şekillendirme ve aşındırma işlemleri yapılırken kusurların oluşmasıdır.

Yaygın olarak kullanılan diğer yöntem ise Kendiliğinden Organize Olma Yöntemi'dir (aşağıdan – yukarıya). Bu yöntemde farklı örgü sabitlerine sahip malzemeler bir araya getirilir. Örgü sabitleri farklı olduğundan aralarında gerilme kuvveti meydana gelir. Bu kuvvetin etkisiyle, gelişigüzel dağılmış, benzer yapılarda ve eşit boyutlarda Kuantum Noktası adacıkları oluşur. Kendiliğinden organize olma yöntemiyle oluşturulan örnekler, Kuantum Noktası yoğunluğu yüksek, düşük sayıda kusur içeren, optik ve elektriksel özellikleri bakımından yüksek kalitedeki örneklerdir.

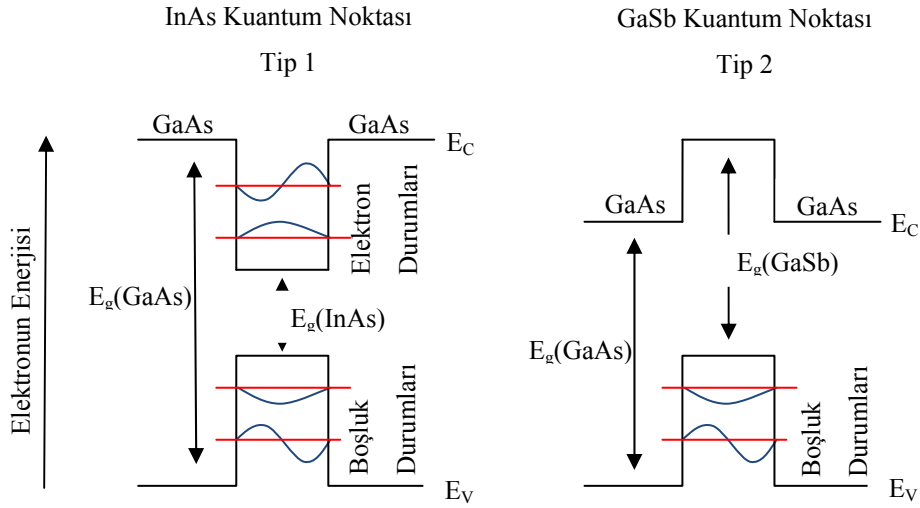


2.5: Farklı yöntemlerle Düşük Boyutlu yarıiletken üretimi. (a) Frank-van der Merwe, (b) Volmer-Weber, (c) Stranski-Krastanow yöntemleri.

Kendiliğinden organize olma yönteminde düşük boyutlu yapılar, kullanılan malzemelerin yüzeyine, arayüzeylerine ve film enerjilerine bağlı olarak üç farklı yöntemle büyütülür. Bu yöntemler; Frank-van Merwe [49], Wolmer-Weber [50] ve Stranski-Krastanow [51] yöntemleridir. Frank-van Merve yönteminde taşıyıcı üstünde sadece ince bir film meydana gelir. Wolmer-Weber yönteminde Kuantum Noktalar ara tabaka olmadan, direk olarak tabaka üzerinde oluşur.

Stanski-Krastanow yöntemi, diğer iki yöntemin birleşimi niteliğindedir. Bu yöntemde pürüzsüz bir tabaka üzerine farklı örgü sabitine sahip bir tabaka büyütülür. Farklı örgü sabitleri yüzeyler arasında bir gerilme kuvveti meydana getirir. Önce taşıyıcı üzerinde ince bir tabaka meydana gelir (wetting layer). Kritik bir kalınlıktan sonra bu homojen yapı bozularak kuantum adacıkları meydana gelir.

Kendiliğinden organize olma yöntemiyle taban genişlikleri 10-30 nm ve yüksekliği 2-5 nm olan piramit ya da kesik piramit şeklinde Kuantum Nokta adacıkları elde edilebilir. Örnekler büyütme koşullarına ve kullanılan malzemeye göre değişiklik gösterirler [52].



Şekil 2.6: (a) Tip 1 bant yapısına sahip InAs/GaAs Kuantum Noktasında elektron ve boşluk durumları. (b) Tip 2 bant yapısına sahip GaSb/GaAs Kuantum Noktası boşluk durumları.

Kendiliğinden organize olan Kuantum Noktalar iki tip bant yapısı oluşturabilirler. Her iki taşıyıcı (elektronlar ve boşluklar) için de sınırlama verebilirler (tip-1) veya herhangi bir tip taşıyıcı için sınırlama verebilirler (tip-2). Tip-1 için InAs/GaAs, tip-2 için GaSb/GaAs yapıları örnek olarak verilir [8].

## 2.2. YARIİLETKEN BELLEK AYGITLAR

Günümüz modern toplumunda her geçen gün bilgi hızla artmaktadır. Artan bu bilginin saklanması ve gerektiğinde kullanılması zorunlu olduğundan dolayı, bellek aygıtlar büyük bir öneme sahiptirler.

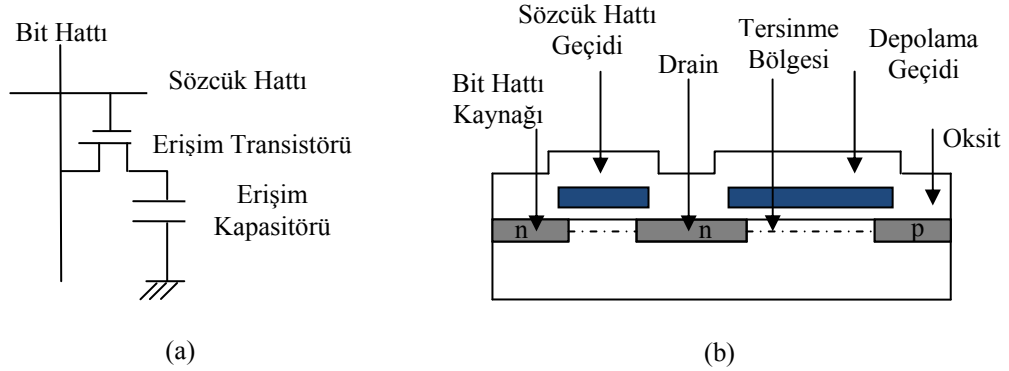
Bellek aygıtların ihtiyaçlarımızı karşılaması için bazı istenilen özelliklere sahip olması gerekir. Bu istenilen özelliklerden en önemlisi kalıcı hafızaya (non-volatile) sahip olmalarıdır. Kalıcı hafızaya sahip aygıt, kaydedilen bilgiyi enerjiye ihtiyaç duymadan, oda sıcaklığında en az 10 yıl kadar saklayabilir. Diğer istenilen özellikler ise, birim

alanda çok sayıda bellek hücresi barındırmaları, okuma-yazma-silme gibi işlemleri hızlı yapmaları, uzun yazma/silme döngülerine sahip olmaları, işlemleri az sayıda taşıyıcı ile yapabilmeleri, düşük enerjiye ihtiyaç duymaları, düşük üretim maliyetine sahip olmaları ve günümüz yarıiletken teknolojisi ile uyumlu çalışmaları olarak sıralanabilirler.

Yukarıda sıralanan özellikler göz önüne alındığında günümüzde en yaygın olarak kullanılan yarıiletken bellek aygıtlar DRAM'ler ve Flash Bellek'lerdir. Bu iki yarıiletken bellek aygıt, tek başlarına tüm özellikleri sağlamasalar da, yukarıda belirtilen bazı özellikleri sağlayarak yaygın olarak kullanılan bellek aygıtlar olmuşlardır. Bu iki aygıt türünün birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

### 2.2.1. DRAM (Dynamic Random Access Memory)

DRAM'ler geçici hafızaya (volatile) sahip bellek aygıtlardır. Yaygın olarak bilgisayarların geçici hafıza birimi olarak kullanılırlar. Bilginin yazılmasını sağlayan bir transistör ve bilginin saklanmasını sağlayan bir kapasitörden oluşurlar. Şekil 2.7'de DRAM'in yapısı şematik olarak gösterilmiştir [1].



Şekil 2.7: (a) DRAM'in şematik gösterimi. (b) DRAM'i oluşturan katmanlar.

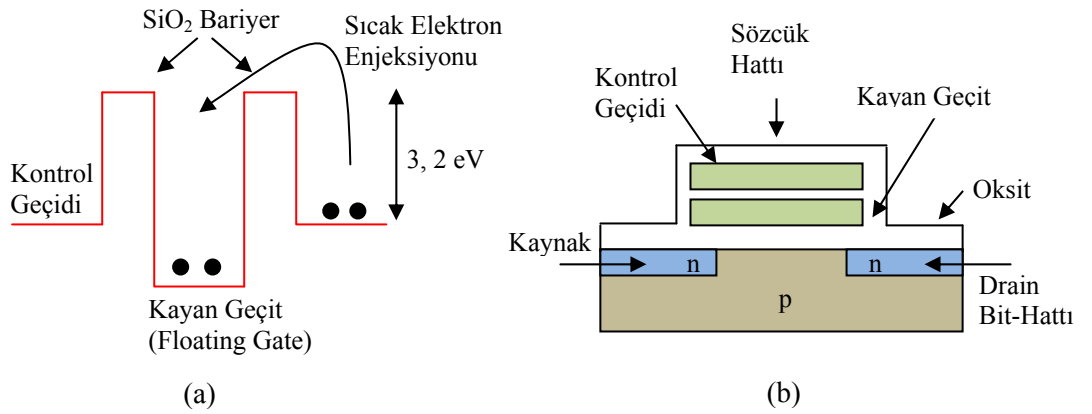
Kapasite sürekli olarak şarj ve deşarj olur. Bu süre DRAM'de milisaniyeler mertbesindedir. Deşarj süresi bilginin saklanma süresini belirler. Bu sebeple kaydedilen bilgi, her milisaniyede kaybolacaktır. Her milisaniyede bilgi tekrar yazılmalıdır. Bu özellik büyük bir dezavantajdır. Bilgi, enerjiye ihtiyaç duymadan oda sıcaklığında en azından 10 yıl kalabilmelidir.

DRAM'lerin bir diğer dezavantajları ise işlemlerde kullanılan taşıyıcı sayısının fazla olmasıdır. (10000'in üstünde). Geçici hafızaya sahip olmaları ve işlemler sırasında fazla sayıda taşıyıcı kullanmalarından dolayı enerji ihtiyaçları yüksektir.

Erişim zamanları (yazma-silme-okuma) ise nanosaniye mertebelerindedir. Bu süre oldukça hızlıdır. Bu özellik, DRAM'lerin en büyük avantajıdır. Ayrıca DRAM'lerin yazma silme döngüleri oldukça uzundur. Bu sayı yaklaşık olarak  $10^{15}$ 'tir.

### 2.2.2. Flaş Bellek

Flaş Bellekler kalıcı hafızaya (non-volatile) sahip yarıiletken bellek cihazlardır. Yani kaydedilen bilgi, enerjiye ihtiyaç duymadan uzun süre kaybolmaz. Bu sebeple cep telefonu, mp3 çalar gibi taşınabilir aygıtlarda hafıza birimi olarak kullanılırlar.



Şekil 2.8: (a) Kayan geçitli Flaş belleklerin yapısı. (b) Flaş Belleklerin katmanları.

Flaş Bellekler iki tane SiO<sub>2</sub> tabaka arasına yerleştirilmiş Si tabakadan meydana gelir. Şekil 2.8'de Flaş Bellek'in bant yapısı görülmektedir [53]. Si ve SiO<sub>2</sub> bariyerin bant yapıları arasında yaklaşık olarak 3,2 eV'luk bir enerji farkı vardır.

Flaş Belleklerde iki SiO<sub>2</sub> tabaka arasına taşıyıcılar hapsedilerek bilginin kaydedilmesi sağlanır. Eğer yüksek bir elektrik alan uygulanmazsa, hapsedilmiş taşıyıcılar, oda sıcaklığında yaklaşık olarak 10 yıl kalırlar. Bu da Flaş Belleklerin en büyük avantajıdır. Bir diğer önemli avantajları ise işlemlerde az sayıda taşıyıcı (yaklaşık olarak 1000) kullanılmalarıdır.

Flaş Belleklerde yazma işlemi, taşıyıcıların SiO<sub>2</sub> bariyeri aşarak, Si tabakaya yerleşmesi ile gerçekleşir. Silme işlemi ise tam tersidir. Si tabakadaki taşıyıcılar, yine bariyeri aşarak, SiO<sub>2</sub> tabakaya ulaşırlar. Bu işlemlerin gerçekleşmesi için yüksek elektrik alanına ihtiyaç duyarlar. Taşıyıcıların 3,2 eV gibi bir bariyeri aşmaları yazma ve silme zamanlarının uzamasına yol açar. Bu süre yaklaşık olarak 10 ms kadardır. İdeal bir bellek aygıt için bu süre uzundur. Nanosaniyeler mertebesinde olması beklenir. Ayrıca taşıyıcıların bariyeri aşması için yüksek elektrik alan uygulandığından yazma/silme döngüleri 10<sup>6</sup>'nın üzerindedir ve bu miktar oldukça azdır. Bu da Flash Belleklerin bir diğer dezavantajları olarak görülmektedir.

Tablo 2.1: DRAM ve Flaş Belleklerin bazı önemli özelliklerinin karşılaştırılması [8].

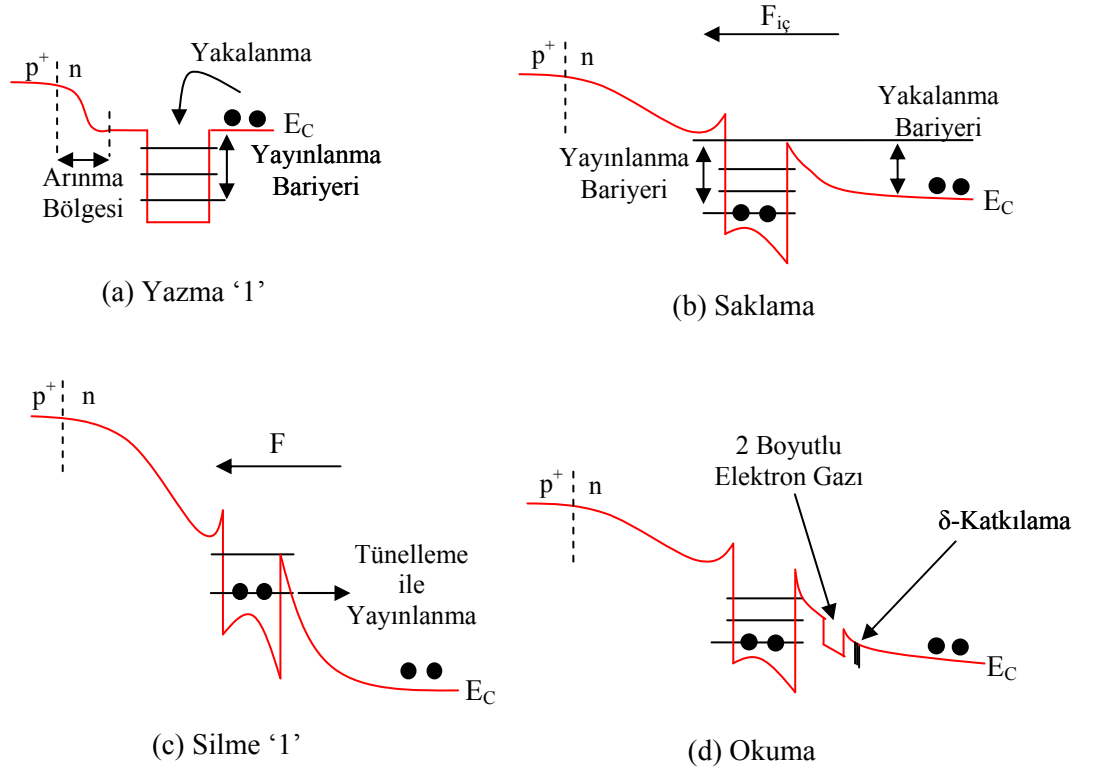
	Yazma Zamanı	Okuma Zamanı	Saklama Zamanı	Taşıyıcı Sayısı	Yazma/Silme Döngüsü
DRAM	~20 ns (iyi)	~20 ns (iyi)	~ms (zayıf)	>10000 (zayıf)	>10 <sup>15</sup> (iyi)
Flaş Bellek	~10 ms (zayıf)	~20 ns (iyi)	>10 yıl (iyi)	~1000 (iyi)	>10 <sup>6</sup> (zayıf)

### 2.2.3. Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar

DRAM'lerin ve Flaş Bellek'lerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Eğer iki türün de iyi özellikleri tek bir bellek aygıtta toplanabilirse, böyle bir aygıt ihtiyaç duyulan özellikleri sağlayarak, ideal bellek aygıt olarak kabul edilebilir. İhtiyaç duyulan bu özellikler, hızlı erişim zamanı (ns mertebesi), bilgiyi enerjiye ihtiyaç duymadan uzun süre saklaması (en az 10 yıl), uzun yazma-silme döngüsü, düşük enerji ihtiyacı ve düşük maliyettir.

Böyle bir 'Evrensel Bellek Aygıt' tasarlanması için Kuantum Noktaları kullanma fikri çözüm olarak görülmüş ve bu anlamda bir çok çalışma yapılmıştır [19-31]. Kuantum Noktaların atomlara benzer optik ve elektronik özelliklere sahip olmaları, evrensel bellek aygıt yapımında kullanılabilmelerini mümkün kılar.

Kuantum Nokta temelli bellek aygıt tasarımı, Kuantum Noktaları bir p-n eklemesinin arınma bölgesi civarına yerleştirilir. Kuantum Noktalarının enerji seviyeleri buradaki taşıyıcılar için tuzak seviyesi vazifesi görerek, taşıyıcıların yerleşebilecekleri seviyeler yaratır. Yerleşen taşıyıcılar, yayınlanana kadar burada tutulurlar. İstenildiğinde elektrik alan uygulanarak, eklemesinin ve Kuantum Noktalarının bant yapıları kontrol edilebilir ve böylece taşıyıcıların Kuantum Noktalarına girişleri ve çıkışları sağlanır.



Şekil 2.9: Taşıyıcıları elektronlar olan Kuantum Nokta Temelli Flaş Bellek için yazma (a), saklama (b), silme (c) ve okuma (d) süreçlerinde bant yapısının şematik gösterimi.

Şekil 2.9'da Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıt için bilgiyi yazma, bilgiyi silme, bilgiyi saklama ve bilgiyi okuma işlemleri esnasındaki bant yapıları şematik olarak görülmektedir. Kuantum Noktasının enerji seviyelerinde taşıyıcı bulunması ikili sistemde 1 durumuna tekabül eder ve bilginin yazıldığı anlamına gelir. Taşıyıcı olmaması ise 0 durumuna karşılık gelerek, bilginin silindiğini ifade eder. Bant yapılarına bakıldığında Kuantum Noktasının etrafında Yayınlanma Bariyeri ve Yakalanma Bariyeri olduğu görülür. Bu bariyerlerin yükseklikleri Kuantum Noktasına



ve onları çevreleyen yarıiletkenin konsantrasyonuna bağılı olarak değişir. Yayınlanma bariyeri 1 durumunun korunması, yakalanma bariyeri ise 0 durumunun korunmasını sağlar. Yani, yayınlanma bariyeri taşıyıcıların Kuantum Noktasından çıkışını, yakalanma bariyeri ise taşıyıcıların Kuantum Noktasına girişini engeller. Herhangi bir voltaj uygulanmadığı durumda, Kuantum Noktasının enerji seviyelerine yerleşmiş elektronlar oldukları yerde kalacaklar ve bilgi saklanmış olacaktır. Taşıyıcılar termal, optik ya da elektriksel olarak uyarılarak Kuantum Noktasını terkedebilirler. Kuantum Noktalarına yerleşmiş taşıyıcıların, bu etkiler ile Kuantum Noktasından ayrılmalarına kadar geçen süre Kuantum Noktasının saklama zamanıdır (stroage time) ve bu süre yayınlanma bariyerine bağılı olarak binlerce yıl olabilir [8].

Yazma işleminde, p-n eklemine ileri besleme yapılmalıdır. Böylece yakalama bariyerinin yüksekliği dūřürölerek taşıyıcıların Kuantum Noktasına girişleri sağlanır. Silme işleminde ise p-n eklemine geri besleme yapılır. Geri besleme yapıldığında yakalanma bariyeri incelir. Yeteri kadar incelendiğinde taşıyıcılar tūnelleme yaparak Kuantum Noktasını terk ederler. Kaydedilen bilginin okunmasında ise 2 boyutlu elektron gazından (eęer taşıyıcılar hole ise 2 boyutlu boşluk gazından) yararlanılır. Kuantum Noktası civarına 2 boyutlu elektron gazı yerleştirilerek direnci ölçölür. Eęer Kuantum Noktasında taşıyıcı varsa Coulomb Etkileřmesi nedeniyle 2 boyutlu elektron gazında çarpışmalar artacak ve direnç değeri yüksek, Kuantum Noktasında taşıyıcı yoksa direnç değeri dūřük olacaktır.

Kuantum Noktalarının sahip oldukları esnek bariyer, elektrik alan uygulanarak yazma silme işlemlerinin kolaylıkla yapılabilmesine olanak sağlar. Böylece aygıtın kolay yıpranmasını engelleyerek yüksek yazma/silme dōngüsüne izin verir. Yapılan işlemler çok az sayıda taşıyıcı ile yapılabilir. Bilginin saklanması için enerjiye ihtiyaç duymaz. Sadece işlemlerde enerji ihtiyaç duyar.

### **2.3. TAşIYICI DİNAMIğI**

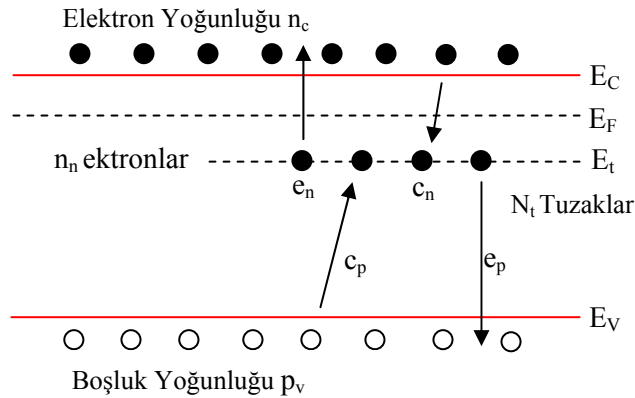
Kuantum noktalarının sahip olduğu enerji seviyerleri, yarıiletkenlerdeki derin seviyeler gibi, taşıyıcılar için tuzak seviyesi oluştururlar. Derin seviyeler için taşıyıcı dinamiği deneysel ve teorik çalışmalarla incelenmiş [54], bu teorik yaklaşımların Kuantum

Noktası gibi düşük boyutlu sistemler için de geçerli olduğu kapasitans spektroskopisi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ile ayrıca gözlenmiştir [55,56].

Bu tez çalışmasında InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren yapıların elektriksel özellikleri araştırılmış, ileri bir aşama olarak da bu yapılar kullanılarak oluşturulacak Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar için saklama zamanı belirlenmiştir. Bu bakımdan, taşıyıcıların enerji seviyelerine nasıl yerleştikleri, nasıl yayımlandıkları, termal denge durumunda neler olduğu ve tüm bu süreçlerin sıcaklıkla ve elektrik alanının varlığında nasıl değiştikleri bu çalışma için önemlidir. Bu sebeple önce derin seviyelerdeki davranışlar anlatılmış, daha sonra aynı teoriler Kuantum Noktalardaki taşıyıcı davranışlarını da ifade etmek için kullanılmıştır.

### 2.3.1. Yarıiletkenlerde Derin Seviyeler

Yarıiletkenler katkılandıklarında, katkı atomlarından dolayı ‘sığ’ ve ‘derin’ seviyeler ortaya çıkar. Sığ seviyelerde genellikle düşük sıcaklıklardan itibaren iyonizasyon görülür. Derin seviyelerin valans veya iletkenlik bantlarıyla bağlanma enerjileri birkaç  $k_B T$ ’den büyüktür. Bu sebeple, taşıyıcılar oda sıcaklığında bile derin seviyelerde bulunabilirler [8]. Derin seviyeler taşıyıcılar için tuzak seviyesi işlevi görürler. Yani taşıyıcılar bu seviyelere yerleşebilir, olası bir emisyon durumuna kadar orada kalabilirler.



Şekil 2.10: n tipi yarıiletkende, tuzak seviyelerinden elektron ve boşluk için yakalanma ve yayılma süreçleri.

### 2.3.2. Taşıyıcı Yakalama ve Yayınlama Süreçleri

Şekil 2.10'da, bir yarıiletkenin içindeki tuzak seviyesinin elektron ve boşluklar için yakalanma (capture) ve yayınlanma (emission) süreçleri görülmektedir. Buna göre süreçler şu şekilde sıralanır;

- İletkenlik bandındaki bir elektronun tuzak seviyesi tarafından yayınlanması
- Tuzak seviyesindeki bir elektronun iletkenlik bandına yayınlanması
- Valans bandındaki bir boşluğun tuzak seviyesi tarafından yakalanması
- Tuzak seviyesindeki bir boşluğun valans bandına yayınlanması

Yakalanma hızı; yakalanma tesir kesiti ( $\sigma$ ) ve taşıyıcı akısına bağlıdır. Taşıyıcı akısının taşıyıcı yoğunluğunun ( $n$ ) ve taşıyıcıların termal hızının ortalama karekökü ile çarpına eşittir.

$$c_n = \sigma^n \langle v_n \rangle n_c \quad (2.10)$$

Yakalama hızı boşluklar için şu şekilde yazılır.

$$c_p = \sigma^p \langle v_p \rangle p_v \quad (2.11)$$

Derin seviyelerin nüfusu, elektronların ve boşlukların yakalanma ve yayınlanma süreçlerinin etkileşimlerine bağlıdır. Toplam tuzak yoğunluğu  $N_t$ , işgal edilmiş tuzak seviyelerinin yoğunluğu  $n_n$  ve işgal edilmemiş tuzak seviyelerinin yoğunluğu da  $(N_t - n_n)$  olan bir yarıiletkende, elektronlar ve boşluklar için yayınlanma ve yakalanma hızları sırasıyla  $e_n$ ,  $c_n$ ,  $c_p$  ve  $e_p$ 'dir. Derin tuzak seviyelerinde elektron ve boşluk yayınlanmasından ve yakalanmasından kaynaklanan elektron işgalindeki  $n_n$  net hız değişimleri;

- İşgal edilmiş tuzak seviyelerinden  $n_n(t)$  iletkenlik bandına net elektron yayınlanma hızı  $R_n^e(t) = e_n n_n(t)$ ,

- İletkenlik bandından işgal edilmemiş tuzak seviyelerine  $[N_t - n_n(t)]$  net elektron yakalanma 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 yayınlanma hızı  $R_p^e(t) = e_p [N_t - n_n(t)]$ ,
- Valans bandından işgal edilmemiş tuzak seviyelerine  $n_n(t)$  net boşluk yakalanma hızı;  $R_p^c(t) = c_p n_n(t)$

şeklindedir.

Yayınlanma hızı  $e_n$ , gerçekte tuzaklanmış elektron başına yayınlanma hızıdır ve birim zamanda belirli bir elektronun yayınlanma olasılığını temsil eder.  $e_n$ , tuzak seviyeleri için karakteristik olup yayınlama süresince sabit kalır. Dolayısıyla zamandan bağımsızdır. Benzer şekilde  $c_n$ , işgal edilmemiş bir seviyede yakalama olasılığını ifade eder ve zamana bağımlı değildir. Boşluklar için de aynı koşullar geçerli olduğundan boşluk yayınlanma hızı  $e_p$  ve boşluk yakalanma hızı  $c_p$  zamandan bağımsızdır. Ancak net hızlar tuzak seviyelerinde, birim zamanda yakalanan ya da yayınlanan taşıyıcı sayısını gösterdiğinden zamana bağımlıdır.

n-tipi bir malzemede bulunabilecek  $N_t$  tuzak için hız değişimi, net uyarılma hızı ile net yakalanma hızının toplamına eşit olduğundan, şu ifade yazılır;

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = R_n^c(t) - R_n^e(t) + R_p^e(t) - R_p^c(t) \quad (2.12)$$

Buradan da aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{dn_n(t)}{dt} = (c_n + e_p)[N_t - n_n(t)] - (e_n + c_p)n_n(t) \quad (2.13)$$

Bu diferansiyel denklem, yüklü taşıyıcılar bulunduran tuzak durumlarını tanımlayan bir hız denklemidir. Derin seviyelerin sayısının, net katkı sayısından daha az olması durumunda, yayınlanma ve yakalanma süreçlerinin yarıiletken içindeki serbest taşıyıcı

yoğunluklarına ( $n_c$  ve  $p_v$ ) etkisi ihmal edilebilir. Bu nedenle  $n_c$  ve  $p_v$  sabit olarak kabul edilebilir ve denklem 2.13'in sınır koşullarına bağlı olarak çözülebilir [8].

### 2.3.3. Termal Denge Durumu

Termal denge durumunda derin seviyelerin nüfus durumlarının zamana bağlı değişimi incelendiğinde, net elektron yakalanma ve yayınlanma hızları  $R_n^c(t)$  ile  $R_n^e(t)$  eşit olmalıdır. Benzer şekilde boşluklar için de net yakalanma ve yayınlanma hızları  $R_p^c(t)$  ve  $R_p^e(t)$  eşit olmalıdır. Kararlı denge durumunda denklem (2.13) sıfıra eşit olmalıdır. Denklem (2.6) kullanılarak termal denge durumunda ortalama tuzak nüfusu,  $t \rightarrow \infty$  için,

$$\frac{n_n(\infty)}{N_t} = \left( \frac{c_n}{c_n + e_n} \right) = \left( \frac{e_p}{e_p + c_p} \right) \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanır.

Termal denge durumunda tuzak nüfusu Fermi-Dirac Dağılımı kullanılarak da bulunabilir [56]. Boşken dejeneresi  $g_0$ , işgal edilmişken dejeneresi  $g_1$  olan  $E_t$  enerjili bir tuzak seviyesi için nüfus

$$\frac{n_n(\infty)}{N_t} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.15)$$

ifadesi ile verilir ve spin dejenere seviyesi ise  $\frac{g_0}{g_1} = \frac{1}{2}$  olarak alınabilir. Denklem (2.14)

ve denklem (2.15) kullanılarak elektronlar için,

$$\frac{e_n}{c_n} = \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.16)$$

ve boşluklar için,

$$\frac{e_p}{c_p} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(\frac{E_F - E_t}{k_B T}\right) \quad (2.17)$$

ifadeleri elde edilir. Denklem (2.16) ve (2.17)'de  $E_t < E_F$  için  $c_n > e_n$  ve  $e_p > c_p$  olmalıdır. Bu da termal denge durumunda tuzak seviyelerin 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 boşluklar için yakalanma tesir kesitleri  $\sigma^n$  ve  $\sigma^p$ , yayınlama hızları  $e_n$  ve  $e_p$  derin seviyelerin asal özellikleri olmasına rağmen yakalanma hızları  $c_n$  ve  $c_p$  katkı konsantrasyonlarına bağlıdır.

Dejenere olmamış ( $n_c < N_c$ ) bir yarıiletkende, serbest elektron yoğunluğu  $n_c$ , Boltzman bağıntısı kullanılarak [1] denklem (2.18) ifadesiyle

$$n_c = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.18)$$

hesaplanabilir. Burada  $N_c$  iletkenlik bandı etkin seviye yoğunluğunu,  $E_F$  Fermi enerjisini, T sıcaklığı ve  $k_B$  ise Boltzman sabitini göstermektedir. Boşluklar için benzer şekilde dejenere olmamış ( $p_v < N_v$ ) yarıiletken için serbest boşluk yoğunluğu  $p_v$ ,

$$p_v = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) \quad (2.19)$$

şeklinde yazılır. Burada  $N_v$  valans bandı etkin seviye yoğunluğunu göstermektedir. Denklem (2.10)'un denklem (2.16)'da yerine yazılmasıyla elektron yayınlama hızı  $e_n$ ,

$$e_n = \sigma^n \langle \nu_n \rangle n_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.20)$$

olarak bulunur. Bu ifade denklem (2,18)'te kullanılarak,

$$\begin{aligned} e_n &= \sigma^n \langle \nu_n \rangle N_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_t - E_F - (E_C - E_F)}{k_B T}\right) \\ &= \sigma^n \langle \nu_n \rangle N_C \frac{g_0}{g_1} \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

şeklinde elde edilir. Benzer şekilde boşluk yayınlanma hızı  $e_p$ , denklem (2.11) ve (2,19)'un denklem (2,17)'de yerine yazılmasıyla,

$$e_p = \sigma^p \langle \nu_p \rangle N_V \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_B T}\right) \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.21) ve (2.22) termal denge durumunda sıcaklığa bağlı, ancak zamandan bağımsız yayınlama hızını vermektedir .

#### 2.3.4. Yayınlama Hızının Sıcaklığa Bağlılığı

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

$$\langle \nu_n \rangle = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e^*}} \quad (2.23)$$

şeklinde verilir. İletkenlik bandı seviye yoğunluğu  $N_C$  [1]

$$N_C = 2M_C \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.24)$$

ifadesiyle verilir. Burada  $M_C$  iletkenlik bandı minimumlarının sayısı,  $h$  Planck sabitidir. Denklem (2.21),

$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^2 \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_B T}\right) \quad (2.25)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada  $\gamma_n$  sıcaklıktan bağımsız bir sabit olup,

$$\gamma_n = \sqrt{12(2\pi)^3} \frac{k_B^2}{h^3} M_C m_e^* \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir. Boşluklar için yayınlanma hızı da,

$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^2 \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.27)$$

ifadesine eşit olup, burada  $\gamma_p$ ,

$$\gamma_p = \sqrt{12(2\pi)^3} \frac{k_B^2}{h^3} M_V m_p^* \quad (2.28)$$

Değerine eşittir. Denklem (2.25) ve (2.27), termal olarak uyarılmış yayınlama sürecini tanımlamaktadır [8].

#### 2.4. KUANTUM NOKTALARDA TAŞIYICI DİNAMİĞİ

Kuantum Noktaların enerji seviyeleri, taşıyıcılar için yarıiletkenlerdeki derin tuzak seviyelerinin işlevini görür [58-62]. Derin tuzak seviyelerini tanımlarken kullanılan ifadeler küçük değişiklikler ile Kuantum Noktalardaki yakalanma ve yayınlanma süreçleri için de kullanılabilir.

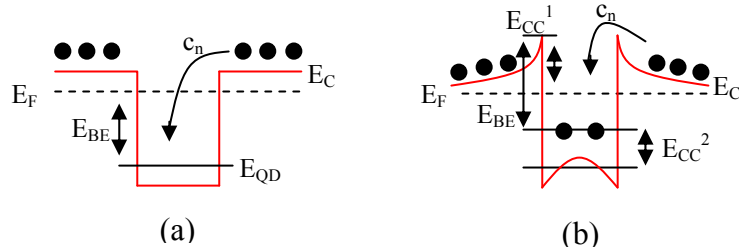


Önceki denklemlerde  $E_t$  olarak verilen tuzak seviyesi enerjisi, Kuantum Noktasının enerji seviyesi  $E_{QD}$  ile yer değiştirir. Kuantum Noktaların sahip oldukları dinamik taşıyıcı yoğunlukları da  $N_{QD}$  ile gösterilir.

#### 2.4.1. Termal Uyarılma Hızı

Yarıiletken içindeki Kuantum Noktalar, taşıyıcı bulundurdıklarından dolayı, üç boyutlu potansiyel dağılımdan biraz daha karmaşık bir yapıya sahiptirler. Kuantum Noktasının içindeki taşıyıcılar, Kuantum Noktasını çevreleyen yarıiletkenin içindeki taşıyıcılarla ve birbirleriyle etkileşerek bant yapısının bükülmesine yol açarlar.

Kuantum Noktasının içindeki taşıyıcılarla, etrafını çevreleyen yarıiletkendeki taşıyıcılar arasında Coulomb Etkileşmesi meydana gelir. Coulomb Etkileşmesi fazladan bir  $E_{CC}^1$  potansiyeli meydana getirir. Kuantum Noktasının içindeki taşıyıcılar arasında ise İç Coulomb Etkileşmesi meydana gelir. Bu etki ise fazladan bir  $E_{CC}^2$  potansiyeli yaratır. Bu iki potansiyelden hangisinin etkin olduğu tam olarak belirlenememektedir. Fakat bunların birbirlerine eşit oldukları varsayılır. ( $E_{CC}^1 = E_{CC}^2 = E_{CC}$ ).



Şekil 2.11: Kuantum Noktası için yakalama süreci. (a) boş Kuantum Noktası seviyesinin elektronlar tarafından işgal edilmesi. (b) Coulomb etkileşmesi nedeniyle bant eğilmesi

Coulomb yüklenme enerjisi, Kuantum Noktasının kapasitesi kullanılarak bulunabilir.

$$E_{CC} = \frac{e^2}{C_{QD}} \quad (2.29)$$

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

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{E_{CC}}{k_B T}\right) \quad (2.30)$$

Burada  $n_C$  iletkenlik bandı civarındaki elektron yoğunluğudur. Bu durumda denklem (2.10)'da verilen yakalama hızı aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$c_n(T) = \sigma^2 \langle \nu_n \rangle n_C \exp\left(-\frac{E_{CC}}{k_B T}\right) \quad (2.31)$$

$E_{CC}$ , elektrokimyasal potansiyele bağlı olacağından, termal denge durumunda Fermi-Dirac dağılımı ifadesini değişikliğe uğrattır. Buradan denklem (2,15)

$$\frac{n_n^{QD}(\infty)}{N_{QD}} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_{QD} - E_F + E_{CC}}{k_B T}\right)} \quad (2.32)$$

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 elektron yoğunluğunu verir.

Denklem (2,32)'in denklem (2,14)'te yerine yazılmasıyla

$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} \sigma^n T^2 \exp\left(-\frac{E_{BE}^n}{k_B T}\right) \quad (2.33)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\gamma_n$  denklem (2,26)'ta açık ifadesi verilen sıcaklıktan bağımsız bir sabit,  $E_{BE}^n$  Kuantum Noktasının sahip olduğu enerji seviyesi için bağlanma enerji olarak tanımlanır ve  $E_C$  iletkenlik bandı kenarı ile  $E_{QD}$  Kuantum Noktasındaki enerji seviyesinin farkına eşit olup,

$$E_{BE}^n = E_C - E_{QD} \quad (2.34)$$

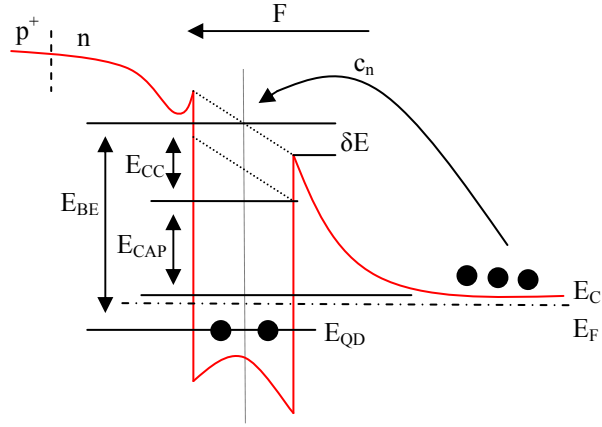
şeklinde yazılabilir. Benzer şekilde boşluk bağlanma enerjisi  $E_{BE}^p = E_{QD} - E_V$  olacağından boşluk yayınlama hızı,

$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_0}{g_1} \sigma^p T^2 \exp\left(-\frac{E_{BE}^p}{k_B T}\right) \quad (2.35)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\gamma_p$  (2,28)'de ifadesi verilen sıcaklıktan bağımsız bir sabiti gösterir.

#### 2.4.2. 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 yakalanma bariyerini değiştirecektir. Elektrik alan altındaki yakalanma bariyeri, etkin yakalanma bariyeri olarak adlandırılır ve  $E_{CAP}$  olarak gösterilir. Şekil 2.12'de elektrik alan altındaki Kuantum Noktası ve n tipi bir yarıiletken içindeki elektronlar arasında oluşan Coulomb yüklenmesi şematik olarak gösterilmiştir. Kuantum Noktalarının enerji seviyeleri  $E_{QD} = E_{CC} + E_{CAP}$  kadar yukarı kayar. Yakalanma ve yayınlama süreçlerinde bariyer Poole-Frenkel etkisiyle  $\delta E$  kadar azalır.



Şekil 2.12: Bir p-n ekleminin arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasının bant yapısının şematik gösterimi.

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

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{(E_{CAP} + E_{CC} - \delta E)}{k_B T}\right) \quad (2.36)$$

şeklinde verilir. Buradan elektronlar için yakalama hızı,

$$c_n = \sigma_\infty^n \langle v \rangle n_C \exp\left(-\frac{(E_{CAP} + E_{CC} - \delta E)}{k_B T}\right) \quad (2.37)$$

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

$$\frac{n_n^{QD}(\infty)}{N_{QD}} = \frac{1}{1 + \frac{g_0}{g_1} \exp\left(\frac{E_{QD} + E_{CC} + E_{CAP} - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.38)$$

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

Denklem (2,38)'in denklem (2,14)'te yerine yazılmasıyla, uygulanan elektrik alan altında elektronların termal yayınlanma hızı,

$$e_n^F(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} \sigma_\infty^n T^2 \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \quad (2.39)$$

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,

$$E_A^n = (E_C - E_{QD}) - \delta E \quad (2.40)$$

şeklinde olmalıdır. Elektronlarınkine benzer şekilde boşluklar için yayınlanma hızı da,

$$e_p^F(T) = \gamma_p \frac{g_0}{g_1} \sigma_\infty^p T^2 \exp\left(-\frac{E_A^p}{k_B T}\right) \quad (2.41)$$

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,

$$E_A^p = (E_{QD} - E_V) - \delta E \quad (2.42)$$

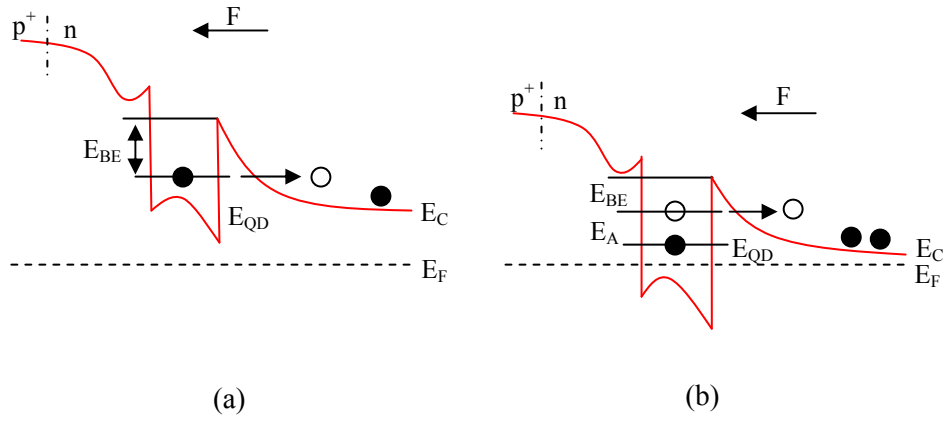
ifadesi yazılabilir.

### 2.4.3. 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  $e^T$ ,

$$e^T = \frac{\hbar\pi}{2m^*L^2} \exp\left(-\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{\Delta E_{BE}^{3/2}}{eF}\right) \quad (2.43)$$

ifadesi ile verilir.



Şekil 2.13: (a) Bir p-n eklemının arınma bölgesinde bulunan Kuantum Noktasından tünelleme ve (b) fononlar yardımıyla tünelleme yollarıyla elektron yayınlaması.

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.

Toplam yayınlama hızı elektrik alanın şiddeti ile üçgen bariyerin geçirgenlik faktörünün çarpımına eşittir [63]

Elektronlar için fononlar yardımıyla tünelleme hızı,

$$e^f(T, F) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma_{T, F=\infty}^n \exp\left(-\frac{E_A^n}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{4}{3\hbar F e} \sqrt{2m^* E_{BE}^3}\right) \quad (2.44)$$

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

$$\sigma_\infty^n(F) = \sigma_{T, F=\infty}^n \exp\left(-\frac{4}{3\hbar F e} \sqrt{2m_e^* E_{BE}^3}\right) \quad (2.45)$$

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.

#### 2.4.4. Yüklü Taşıyıcıların Yakalanma Süreci

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

$$c_n = \sigma_\infty^n \langle \nu \rangle n_{QD} \quad (2.46)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\sigma_\infty^n$ , sıcaklıktan bağımsız yakalama tesir kesiti,  $n_{QD}$  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,

$$n_{QD} = n_C \exp\left(-\frac{E_A^c}{k_B T}\right) \quad (2.47)$$

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

$$c_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma_\infty^n \exp\left(-\frac{E_{A,Capt}^n}{k_B T}\right) \quad (2.48)$$

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

$$E_{A,Capt}^n = (E_C - E_V) + E_{CAP} + E_{CC} - \delta E \quad (2.49)$$

şeklinde verilir. Benzer şekilde boşlukların çoğunluk taşıyıcısı olduğu durumda ise

$$c_p(T) = \gamma_n \frac{g_1}{g_0} T^2 \sigma_\infty^p \exp\left(-\frac{E_{A,Capt}^p}{k_B T}\right) \quad (2.50)$$

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

$$E_{A,Capt}^p = (E_F - E_V) + E_{CAP} + E_{CC} - \delta E \quad (2.51)$$

değerine eşittir [8].

## 2.5. ARINMA BÖLGESİ KAPASİTESİ

Bu çalışmada kullanılan örnekler p-n eklem arınma bölgesi civarında oluşturulmuş Kuantum Noktalarından meydana gelmektedir. Kapasite ölçümlerinde arınma bölgesi kapasitesi kullanılmıştır. Bu sebeple bu tez için ‘Arınma Bölgesi’ kavramı önemlidir.



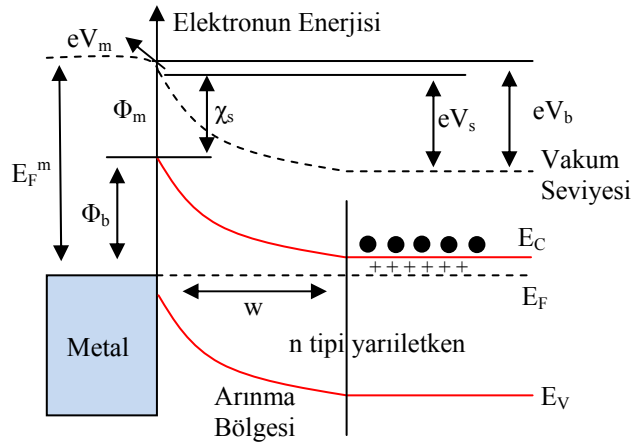
### 2.5.1. Arınma Bölgesi

Fermi Seviyesi metallerde ya da yarıiletkenlerde taşıyıcıların nasıl yerleşeceklerini belirleyen seviyedir. Dolayısıyla malzemeye göre değişiklik gösterir. Bir metal ile bir yarıiletkenden ya da farklı katkı konsantrasyonlarına sahip iki yarıiletkenden oluşturulan yapılarda, termodinamik denge sağlanana kadar, iki taraflı bir yük akışı meydana gelir. Termodinamik dengeye erişildiğinde, Fermi seviyesi bütün bir yapı boyunca aynı hizaya gelir, eklem bölgesi civarında serbest taşıyıcıların yerine, sadece iyonize olmuş donör ve akseptör atomları bulunur. Serbest taşıyıcıların bulunmadığı bu bölgeye 'Arınma Bölgesi' denir. Arınma Bölgesi'nin genişliği, kullanılan malzemelerin katkı konsantrasyonlarına ve aralarındaki potansiyel farka bağlıdır.

İki farklı kontak türü Arınma Bölgesi'ni meydana getirir; Metal-Yarıiletken ile oluşturulan Schottky Kontak; n ve p tipi yarıiletkenler ile oluşturulan p-n eklemi [1].

### 2.5.2. Schottky Kontakı

Schottky kontakı bir metal – yarıiletken kontakıdır. Akımın tek yönde geçişine izin vererek doğrultucu görevi görür. Schottky Kontakı ifade edilirken bir 'Vakum Seviyesi' referans olarak alınır. Vakum seviyesi serbest bir elektronun malzemeden ayrılması için gerekli olan enerjiyi tanımlar. Bir elektronun Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkması için gerekli olan enerjiye 'Metalin İş Fonksiyonu' denir. ( $\phi_m$ ). Bir elektronun yarıiletkenin iletkenlik bandından vakum seviyesine çıkması için gerekli olan enerjiye ise Elektronun Afinitesi denir. ( $\chi_s$ ).



Şekil 2.14: Bir metal-yarıiletken Schottky kontakı için bant diyagramı.

Arayüzeyde metal ve yarıiletken için vakum seviyeleri de eşittir. Bu sebeple metalin Fermi seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı arasında bir bariyer meydana gelir. Bu bariyerin yüksekliği

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s - eV_m \quad (2.52)$$

olarak verilir. Metalin seviye yoğunluğu yüksek olduğundan dolayı bant eğilmesi çok küçük olur. Bu sebeple  $eV_m$  ifadesi ihmal edilebilir. böylece denklem (2.52)'deki ifade şu şekilde yazılır.

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad (2.53)$$

Bant eğilmesi serbest elektronları uzaklaştırdığından dolayı yarıiletkenin içinde bir Arınma Bölgesi meydana gelir. Arınma Bölgesinin bittiği yerde bant yapısı artık düzdür. Böylece iletkenlik bandının enerji değeri arayüzey ile yarıiletkenin içinde farklılık gösterir.

Bant eğilmesi metalde, yarıiletkene oranla çok küçüktür. Bir başka deyişle Arınma Bölgesinin genişliği metal içinde çok küçüktür. Bu sebeple metalin kontak potansiyeli  $V_m$  ile yarıiletkenin kontak potansiyeli  $V_s$ 'yi kıyasladığımızda, metalin kontak potansiyeli  $V_m$ , ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Schottky Kontaktağında sıfır besleme durumunda toplam bant eğilmesi iç potansiyel olarak adlandırılır ve

$$eV_b \approx eV_s = \phi_m - \chi_s - (E_C - E_F) = \phi_b - (E_C - E_F) \quad (2.54)$$

şeklinde ifade edilir.

### 2.5.3. p-n Ekleme

p-n eklemi p ve n tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş kontaklardır. Referans olarak bir vakum seviyesi alınır. Katkılamanın her iki yarıiletken için de aynı olduğu varsayılırsa, elektron afiniteleri eşit olacaktır. Termal denge durumunda bütün

bir yapı için Fermi seviyesi eşittir. Fakat bant eğilmesinden dolayı n tipi bölgedeki iletkenlik bandının Fermi seviyesine olan uzaklığı ile n tipi bölgedeki iletkenlik bandının Fermi seviyesine uzaklığı aynı değildir.

O halde

$$(E_C^p - E_F) - \chi_s = eV_b - \chi_s - (E_C^n - E_F) \quad (2.55)$$

ifadesi yazılır. p-n eklemesindeki iç potansiyel ise

$$eV_b = E_g - (E_F - E_C^p) - (E_C^n - E_F) \quad (2.56)$$

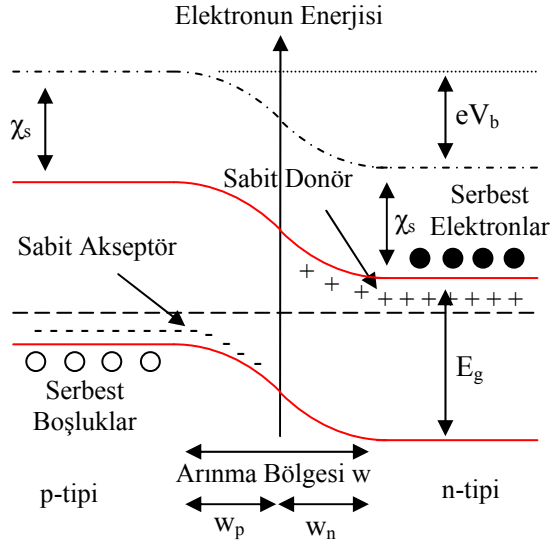
olarak yazılır. İfadedeki  $E_g$  terimi yarıiletkenin bant aralığını göstermektedir. İç potansiyel p ve n tipi bölgelerdeki potansiyel farkına eşit olup sıcaklığa bağlı olarak

$$V_b = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_a N_d}{N_i^2} \right) \quad (2.57)$$

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

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left( - \frac{E_g}{2k_B T} \right) \quad (2.58)$$

ifadesine eşittir. İfadedeki  $N_C$  ve  $N_V$  sırasıyla iletkenlik bandı ve valans bandı yoğunluklarını göstermektedir.



Şekil 2.15: Bir p-n eklemının enerji-bant diyagramı.

Bir p-n ekleminde sabit donör ve akseptör atomları bant eğilmelerine neden olduğundan dolayı, kontağın her iki yanında da Arınma Bölgesi meydana gelir. Katkı konsantrasyonları eşit olduğundan her iki bölgedeki arınma genişlikleri eşit olacaktır.

Malzemenin elektriksel özelliklerinin araştırıldığı bazı deneylerde, malzemenin p ya da n kısmı daha fazla katkılandırılarak, Arınma Bölgesi Schottky bariyerinde olduğu gibi sadece bir bölgede oluşturulabilir. Daha fazla katkılanmış malzemelere 'Aşırı Katkılandırılmış Malzeme' denir ve + üst indisıyla gösterilir. Bu tez çalışmasında kullanılan tüm örneklerin, n kısımları aşırı katkılandırılmıştır. ( $n^+$ -p)

#### 2.5.4. 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,

$$V = V_a + V_b \quad (2.59)$$

ifadesi ile bulunur. Burada  $V_b$ , eklemın sıfır beslemede sahip olduğu iç potansiyeldir. Arınma Bölgesi Poisson Denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (2.60)$$

Denklemden  $\psi$  elektrostatik potansiyel,  $F$  elektrik alan,  $\varepsilon_0$  boşluğun ve  $\varepsilon$  yarıiletkenin dielektrik sabitlerini göstermektedir. Başlangıçta donörler ve akseptörler iyonize olmuşsa, buradan oluşacak yük yoğunluğu sırasıyla  $eN_d$  ve  $eN_a$  olacaktır,

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{eN_d}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.61)$$

ifadesi yazılabilir. Burada  $w_n$  n tipi bölgenin arınma bölgesi genişliğidir. Bir Schottky kontağı ya da  $p^+$  - n eklemi için denklem (2.60)

$$F(x) = F_0 + \frac{eN_d x}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.62)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada  $x < 0$  ve  $x > w_n$  için  $F(x) = 0$  olacaktır, integral sabiti  $F_0$ , sınır koşulları kullanılarak,

$$F_0 = -\frac{eN_d w_n}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (2.63)$$

şeklinde bulunur. Burada  $F_0$  eklemnin arayüzeyindeki elektrik alanı göstermekte olup, maksimum değerdedir. Arınma Bölgesinin n tipi yarıiletken tarafında kalan kısmında oluşacak elektrik alanı

$$F(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon \varepsilon_0} (x - w_n) \quad 0 \leq x \leq w_n \quad (2.64)$$

ifadesi ile verilir. Benzer şekilde Arınma Bölgesinin p tipi yarıiletken kısmında oluşacak elektrik alan da,

$$F(x) = \frac{eN_a}{\epsilon\epsilon_0}(x + w_p) \quad w_p \leq x \leq 0 \quad (2.65)$$

şeklinde yazılır.

Arınma Bölgesinin n tipi yarıiletken kısmındaki potansiyel dağılımı denklem (2.64) kullanılarak

$$\psi(x) = \int_0^x \frac{eN_D}{\epsilon\epsilon_0}(x - w_n)dx = \frac{eN_D w_n}{\epsilon\epsilon_0} \left( x - \frac{x^2}{2w_n} \right) + \psi(0) \quad (2.66)$$

şeklinde bulunur. Bir  $p^+$  - n eklemi için bant eğilmesi sadece n tipi bölgede oluşacaktır. Kontak potansiyeli iç potansiyele eşit olduğundan

$$\psi(0) = -V = -(V_b - V_a) \quad (2.67)$$

yazılır ve buradan

$$V = V_b + V_a = \frac{eN_D}{2\epsilon\epsilon_0} w_n^2 \quad (2.68)$$

eşitliği elde edilir.  $p^+$  - n eklemi için Arınma Bölgesi genişliği de,

$$w_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 V}{eN_D}} \quad (2.69)$$

şeklinde hesaplanabilir. Hem p tipi bölgede hem de n tipi bölgede Arınma Bölgesinin oluştuğu bir p-n eklemi için iç potansiyel

$$V = V_b + V_a = \frac{eN_D}{2\epsilon\epsilon_0} w_n^2 + \frac{eN_A}{2\epsilon\epsilon_0} w_p^2 \quad (2.70)$$

ve Arınma Bölgesi genişliği

$$w = (w_n + w_p) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{eN_d} V \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (2.71)$$

ifadesi ile bulunur.

### 2.5.5. Arınma Bölgesi Kapasitesi

Termal denge durumundaki bir p-n eklemi göz önüne alındığında, Arınma Bölgesinde serbest taşıyıcıların bulunmadığı bir durumdur. Arınma Bölgesinin bir tarafı negatif diğer tarafı ise pozitif iyonlarla yüklenmiştir. Bu görünüm kapasiteye benzemektedir. Eklemdeki bu Arınma Bölgesinde kapasite ölçümleri yaparak malzemenin elektronik özellikleri hakkında bilgi edinebiliriz [64,67].

Arınma Bölgesindeki iyonlar, Arınma Bölgesinin genişliğiyle doğrudan orantılıdır. Arınma Bölgesinin genişliği ise uygulanan voltajın karekökü ile orantılıdır. Böylece kapasite ifadesi

$$C = \lim_{\Delta V} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{dQ}{dV} \quad (2.72)$$

olarak yazılır. Burada Q, birim alan başına yükü ifade eder. Alanı A olan bir p<sup>+</sup>-n eklemi için arınma bölgesinde bulunan toplam yük ifadesi,

$$Q = eN_d A w_n(V) = A \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 N_d V} \quad (2.73)$$

olarak yazılır. kapasitesi ifadesi ise denklem (2.73) kullanılarak,

$$C(V) = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_V = A \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 e N_d}{2V}} = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{w_n} \quad (2.74)$$

olarak yazılır. Bu ifade p+n eklemin n kısmındaki Arınma Bölgesinin kapasite ifadesidir. p kısmı aşırı katkılandığından dolayı Arınma Bölgesi hemen hemen n tarafındadır. Eklem bu haliyle Schottky bariyeri gibi davranmaktadır [8].

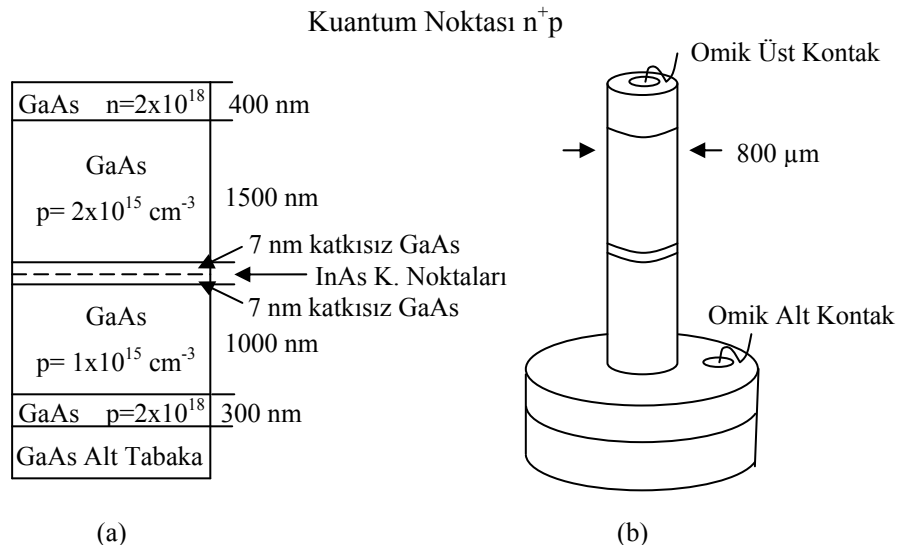


### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. ÖRNEKLERİN YAPISI

##### 3.1.1. InAs/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek

Rusya'da MBE yöntemiyle büyütülen bu örnek, GaAs tabakasında InAs Kuantum Noktalar içermektedir. n-p eklemesinin n kısmı aşırı katkılandırılarak, taşıyıcıların boşluklar (hole) olması sağlanmıştır. Şekil 3.1'de örneğin tabakalı yapısı ve kimyasal aşındırma sonrası kontak alınmış hali şematik olarak görülmektedir.

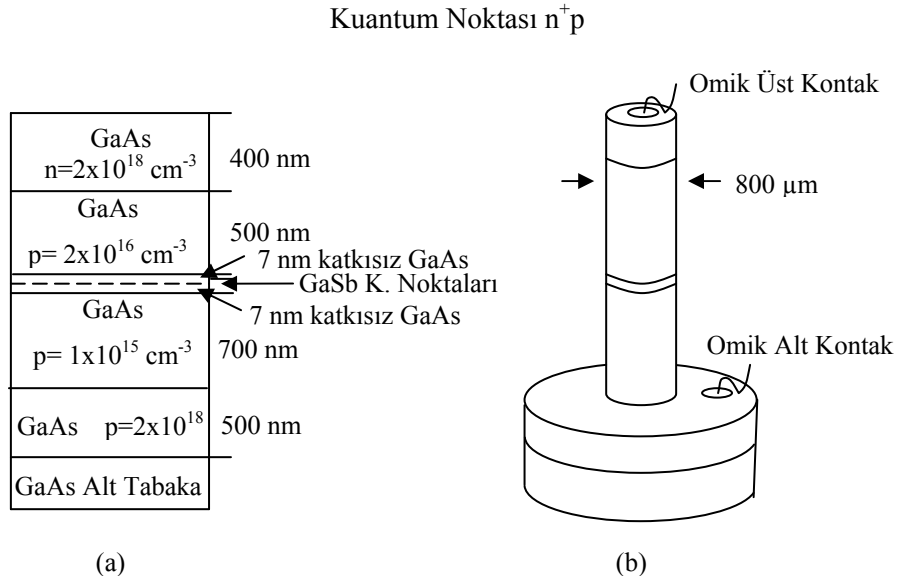


Şekil 3.1: InAs Kuantum Noktaları içeren örneğin (a) tabakalı yapısı ve (b) kimyasal aşındırma sonrası kontak alınmış görünümü.

Örnek GaAs bir tabaka üzerine sırasıyla, 300 nm kalınlığında aşırı katkılanmış p tipi GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 1000 nm kalınlığında p tipi GaAs ( $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), 7 nm'lik katkısız GaAs tabakaları arasına sıkıştırılmış InAs Kuantum Noktalar, 1500 nm kalınlığında p tipi GaAs ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) ve son olarak da 400 nm kalınlığındaki aşırı katkılanmış n tipi GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) tabakadan oluşmaktadır. Örnekler üzerinde kimyasal aşındırma yapılmış ve kontaklar alınmıştır.

### 3.1.2. GaSb/GaAs Kuantum Noktaları İçeren Örnek

Bu örnek Tayvan'da MBE yöntemiyle büyütülmüştür. Örnek  $n^+p$  eklemi civarında GaSb Kuantum Noktaları içermektedir.  $n$  kısmı aşırı katkılandırıldığından dolayı taşıyıcılar boşluklardır. Şekil 3.2'de örneğin bant yapısı ve kimyasal aşındırma sonrası kontak alınmış bant yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2: GaSb Kuantum Noktaları içeren örneğin (a) tabakalı yapısı ve (b) kimyasal aşındırma sonrası kontak alınmış görünümü (b).

Örnek, GaAs taşıyıcı tabaka üzerine büyütülmüştür. Sırasıyla 500 nm kalınlığında aşırı katkılanmış  $p$  tipi GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 700 nm kalınlığında  $p$  tipi GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 7 nm'lik katkısız GaAs tabaka arasına sıkıştırılmış GaSb Kuantum Noktaları, 500 nm kalınlığında  $p$  tipi GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ve 400 nm kalınlığında aşırı katkılanmış  $n$  tipi GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) tabakalarından oluşmuştur.

## 3.2. DENEYLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

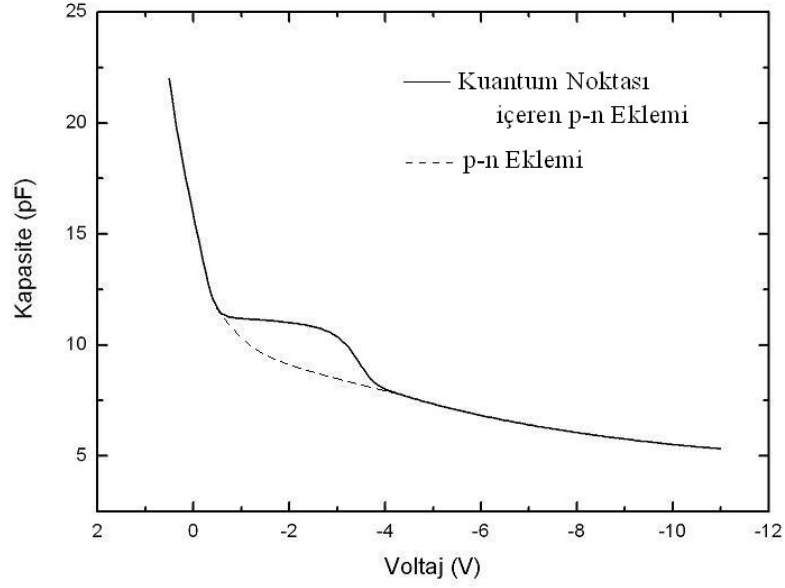
### 3.2.1. Akım-Voltaj Ölçümü (I-V)

Bu tez çalışmasında kullanılan örneklerde, Kuantum Noktaları bir p-n eklemının arınma bölgesi civarına yerleştirilmiştir. Dolayısıyla örneklerin diyot gibi davranmaları beklenmektedir. I-V ölçümlerinin yapılmasının amacı, örneklerin beklenildiği üzere diyot gibi davrandıklarını göstermektir. Diyotun davranışı ise ileri yönde uygulanacak küçük bir voltajdan itibaren akımı geçirmek, geri yönde voltaj uygulandığında ise akımı geçirmemektir. Diyotlar, voltaj geri yönde uygulandığında akımı geçirmemekle beraber, belirli bir voltaj değerinden sonra bu özelliğini kaybederek geri yönde de akım geçirmeye başlar. Bu voltaj noktasına diyotun geri kırılma voltajı denir. I-V ölçümleri ile ayrıca diyotun geri yöndeki ve ileri yöndeki kırılma voltajları da tesbit edilebilir.

Bu bağlamda, deneysel çalışma süresince, her sıcaklık değeri için I-V ölçümü alınarak, örneklerin diyot karakterislikleri gözlenmiş, ileri ve geri yönlerdeki kırılma voltajları tesbit edilmiştir.

### 3.2.2. Kapasite-Voltaj Ölçümü (C-V)

Bir p-n eklemi ya da Schottky bariyerinin arınma bölgesinde kapasite voltaj (C-V) ölçümleri yapılarak, bu yapılar için ideal kapasite-voltaj davranışları gözlenebilir. Fakat p-n eklemi ya da Schottky bariyerinin arınma bölgesi civarında bir Kuantum Noktası varsa ideal kapasite-voltaj profilinden sapma meydana gelir. Bunun nedeni, Kuantum Noktasının enerji seviyelerinin taşıyıcıların yerleşebilecekleri yeni durumlar yaratmasıdır. Böylece Kuantum Noktasının enerji seviyelerine yerleşmiş yeni taşıyıcılar ortamdaki yük miktarını artırmış olurlar. Bir p-n eklemının ya da Schottky bariyerinde ideal durum için, kapasite ifadesi voltajın karekökü ile azalır. Eğer arınma bölgesi civarında bir Kuantum Noktası varsa, takdim edilen yeni taşıyıcılar ile yük değeri de artacağından dolayı, kapasite değeri tüm taşıyıcılar yayınlanana kadar, hemen hemen azalmayacaktır. Böylece Kuantum Noktası içeren yapılar için elde edilen kapasite-voltaj profilinde 'plato'ya benzer bir görünüm elde edilir. Bu plato örneklerin Kuantum Noktası içerdiklerinin göstergesidir [58-62]. Şekil 3.3'de böyle bir yapı için kapasite-voltaj karakterisliği gözükmektedir.



Şekil 3.3: Bir  $n^+$ -p ekleminde Kuantum Noktası bulunması durumunda (kalın çizgi) ve bulunmaması durumunda (kesikli çizgi) C-V değişimi.

Kapasite-voltaj karakterisliğinde gözükten plato ayrıca Kuantum Noktalarının taşıyıcılarla tamamen dolu ve taşıyıcılardan tamamen boş oldukları voltaj değerlerini belirtir. Bu bilgi, böyle yapılara elektrik alan uygulanarak yapılacak işlemler için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında ise bu bilgi kullanılarak, DLTS ölçümleri için uygulanacak voltaj değerleri belirlenmiştir. Böylece örneklerin aktivasyon enerjileri belirlenebilmiştir.

Kapasite-voltaj ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Kuantum Noktası içeren örneklerin katkı konsantrasyonları elde dileyebilir.

$$N_a = \frac{2}{A^2 \epsilon \epsilon_0 e} \left( \frac{d(1/C^2)}{dV} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

İfadede  $N_a$  katkı konsantrasyonunu  $A$  alanı,  $V$  uygulanan voltajı,  $C$  ölçülen kapasite değerini,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitini,  $\epsilon$  malzemenin dielektrik sabitini göstermektedir.

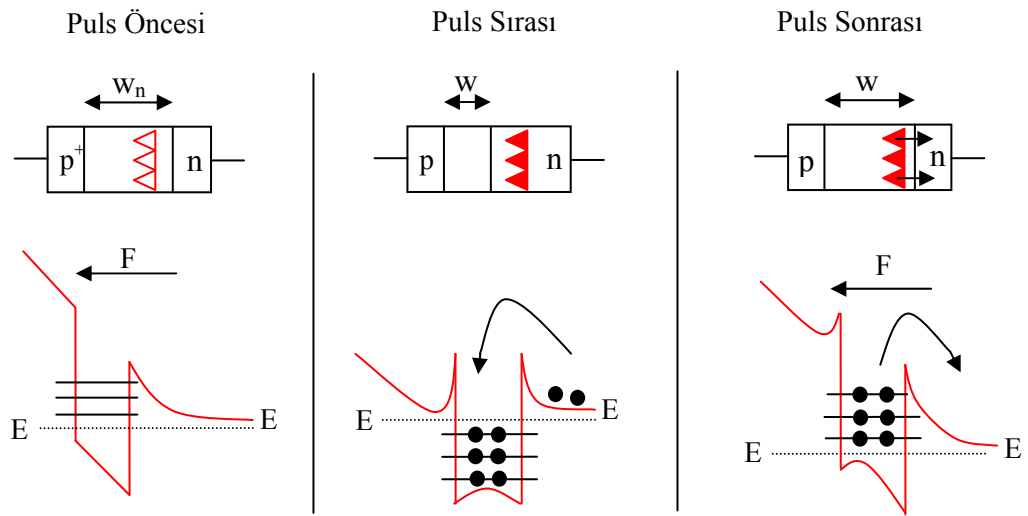
Kapasite-voltaj ölçümleri ile p-n eklemının arınma bölgesi genişliği elde edilebilir.

$$w_a = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{C(V)} \quad (3.2)$$

ifadede  $w_a$  arınma bölgesi genişliğini,  $A$  alanı,  $C(V)$  voltaja bağlı olarak ölçülen kapasite değerini,  $\varepsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitini,  $\varepsilon$  malzemenin dielektik sabitini göstermektedir.

### 3.2.3. Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (Deep Level Transient Spectroscopy)

1974 yılında Lang [68] tarafından bulunan DLTS tekniği ile safsızlık ya da kusurların sebebiyet verdiği tuzak seviyeler karakterize edilir. DLTS tekniği kullanılarak derin seviyelerin aktivasyon enerjileri, katkı konsantrasyonları, yakalama tesir kesirleri belirlenebilir. Yarıiletkenlerdeki derin seviyelere benzer biçimde, Kuantum Noktaların enerji seviyelerine taşıyıcılar yerleşebilir, yayınlanabilir. Bu sebeple DLTS tekniği Kuantum Noktaların enerji seviyelerini araştırmak için uygun bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında DLTS tekniği ile Kuantum Nokta içeren örneklerin aktivasyon enerjisi belirlenmiştir. Aktivasyon enerjileri kullanılarak da InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları kullanılarak tasarlanabilecek Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar için saklama zamanları belirlenmiştir.



Şekil 3.4: p<sup>+</sup>-n eklemının arınma bölgesi civarına yerleştirilmiş Kuantum Noktalarda, DLTS ölçümü boyunca uygulanan puls durumları.

Şekil 3.4'te DLTS ölçümünde yapılan işlemlerin, p<sup>+</sup>-n eklemının arınma bölgesi civarına yerleştirilmiş bir Kuantum Noktasına uygulanışı görülmektedir. Başlangıç durumunda Kuantum Noktası eklemının arınma bölgesi içindedir. Fermi seviyesi Kuantum Noktalarının tüm seviyelerinin altındadır ve seviyelerde elektron yoktur. Ekleme darbe (puls) şeklinde voltaj uygulanarak Kuantum Noktası, arınma bölgesinin dışına çıkartılır. Bu durumda Fermi seviyesi yükselir, Kuantum Noktasının enerji seviyeleri elektronlar ile tamamen dolar. Uygulanan voltaj kaldırıldığında, Kuantum Noktası, arınma bölgesinin içine girer fakat elektronlar hala enerji seviyelerindedir. Belirli bir süre içinde termal emisyon ve tünelleme mekanizmaları ile elektronlar tamamen yayınlanırlar. Bu işlemler boyunca kapasite ölçümü yapılarak kapasitedeki değişim zamana göre belirlenir. Şekil 3.5'te kapasitenin zamana göre değişimi görülmektedir. Bu süreçte elektronların emisyonları hakkında bilgi edinilir.

Bu işlemler belirli bir sıcaklık aralığında, belirli sıcaklık adımlarında tekrarlanır. Her sıcaklık adımındaki kapasite geçişleri kaydedilir. Geçişlerde t<sub>1</sub> ve t<sub>2</sub> noktaları seçilerek, bu aralıktaki kapasite farkı ile sıcaklık değişimi çizilerek DLTS sinyali elde edilir. Şekil 3.5'te kapasite geçişleri ve DLTS sinyali görülmektedir.

$$S(T, t_1, t_2) = C(T, t_2) - C(T, t_1) \quad (3.3)$$

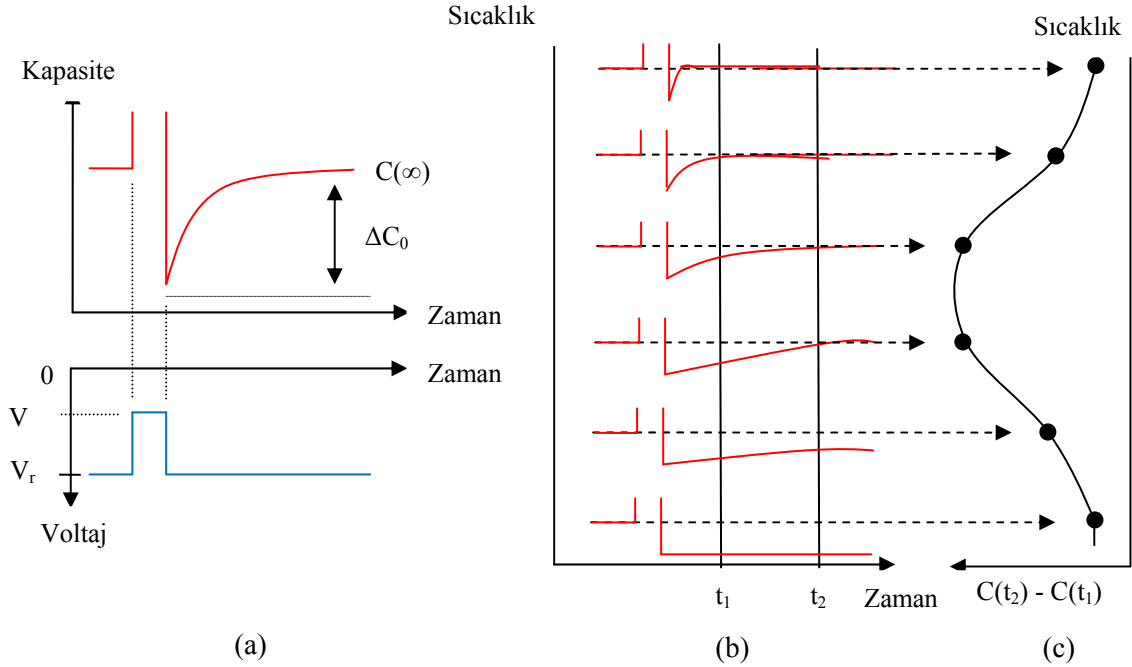
Yarıiletkenlerde derin seviyeler, ya da Kuantum Noktalar bir tane değil bir topluluk halindedir. Daha sağlıklı sonuçlar elde etmek için, DLTS piki oluşturulurken seçilen t<sub>1</sub> ve t<sub>2</sub> zamanları değiştirilerek, referans zamanı  $\tau_{ref}$  tanımlanır.

$$\tau_{ref} = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2/t_1)} \quad (3.4)$$

Bu şekilde farklı seçilen  $\tau_{ref}$  sayısı kadar DLTS piki çizilir.

$$S(T, t_1, t_2) = \Delta C_0 \left[ \exp\left(-\frac{t_2}{\tau(T)}\right) - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau(T)}\right) \right] \quad (3.5)$$

Şekil (3.5)'de kapasite geçişleri ve DLTS sinyali görülmektedir. Sinyalin yükseliği seviyedeki taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Pikin maksimum olduğu noktadan termal emisyon hızı belirlenir.



Şekil 3.5: DLTS ölçüm döngüsü. (a) Alt kısım ekleme uygulanan voltaj beslemelerinin zamana bağlı değişimi, üst kısım uygulanan voltaja karşılık gelen kapasite-zaman değişimi. (b) Farklı sıcaklıklarda ölçülmüş kapasite geçişleri. (c) Kapasite geçişlerinden  $t_1$  ve  $t_2$  zamanları seçilerek oluşturulmuş DLTS sinyali. Pikin maksimum olduğu nokta termal emisyon hızını belirler.

DLTS sinyalinden aktivasyon enerjisini tesbit etmek için termal emisyon hızından yararlanır. Pikin maksimum olduğu nokta ile seçilen referans zamanlarının çarpımı sonucu Arrhenius grafikleri elde edilir. Arrhenius grafiğinin eğiminden aktivasyon enerjisi belirlenir [6,68,69].

$$\Delta E = kT \ln(t_2/t_1) \quad (3.6)$$

Elde edilen bu aktivasyon enerjileri ile Kuantum Noktalarının durum yoğunlukları ifadelerinin Dirac-Deltasına uyduğu, enerji ifadelerinin de sürekli değil kesikli oldukları gözlenmiş olur.

### 3.2.4. Seviye Seçici DLTS (Charge Selective DLTS)

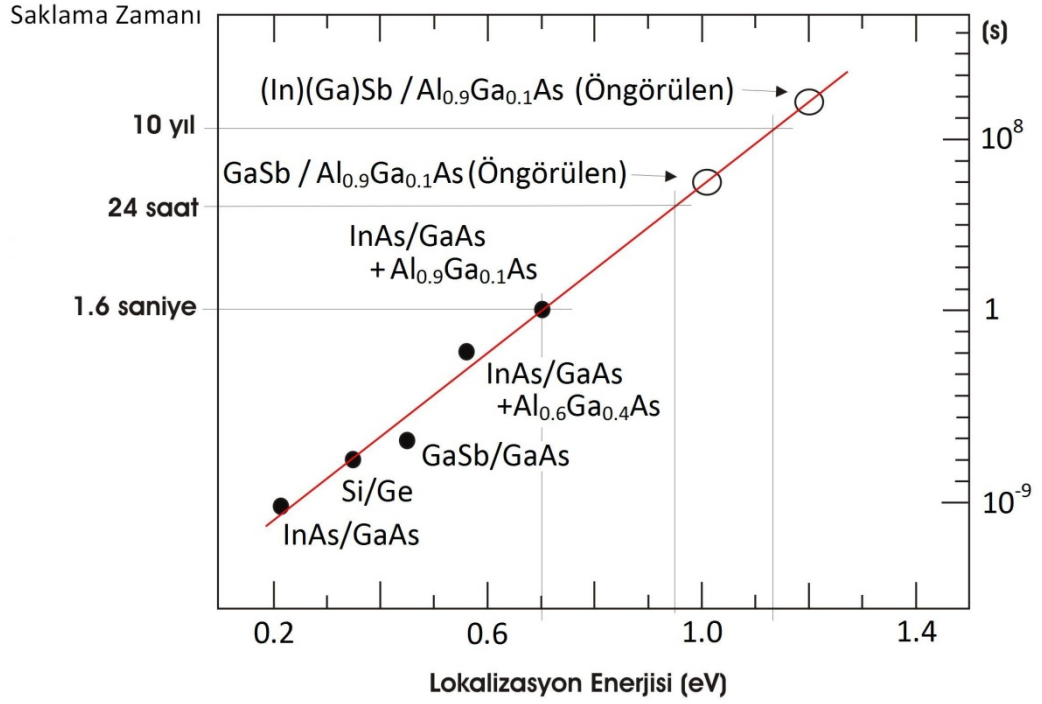
DLTS ölçümünde kullanılan örneklerde tek bir Kuantum Noktası değil, bir Kuantum Noktası topluluğu vardır. p-n eklemine voltaj uygulandığında, Kuantum Noktasının enerji seviyeleri tamamen dolar. Uygulanan darbe kaldırıldığında taşıyıcıların hepsi aynı anda yayınlanmaz. Kuantum Noktalar topluluk halinde olduğundan dolayı, bazı Kuantum Noktalarının ikinci enerji seviyesindeki taşıyıcılar yayınlarken, bazı Kuantum Noktaların birinci enerji seviyelerindeki taşıyıcılar yayınlıyor olabilirler. Sonuçta elde edilen aktivasyon enerjisi, Kuantum Noktalar için ortalama bir aktivasyon enerjisidir.

Geller tarafından geliştirilen Seviye Seçici DLTS yöntemi, Kuantum Noktaların aktivasyon enerjisini daha net şekilde belirlemektedir [6]. Bu yöntemde uygulanan voltaj belirli aralıklara bölünmüştür. Örnek olarak, eğer Kuantum Noktasının taşıyıcılarla tamamen dolu olduğu voltaj değeri 3V, taşıyıcılardan tamamen arındığı voltaj değeri de 1V ise DLTS ölçümünde darbe voltajı 3V, ölçüm voltajı 1V olarak seçilir. Seviye Seçici DLTS ölçümünde ise bu aralık adımlara bölünür. Adımlar, örneğin 0.2 V seçilirse, 1.2V değerinde darbe uygulanır ve 1V değerinde ölçüm yapılır. 1.4V değerinde darbe uygulanır, 1.2V değerinde ölçüm alınır. Bu şekilde son olarak 3V değerinde darbe uygulanır, 2.8V değerinde ölçüm alınır. Sonuç itibariyle seçilen her parametre için ayrı bir DLTS sinyali çizilir ve her bir parametre için ayrı Aktivasyon enerjisi bulunur. Bu farklı aktivasyon enerjileri, Kuantum Noktasının farklı enerji seviyelerine karşılık gelir.

Her bir seviye için ayrı bir aktivasyon enerjisi hesaplanmasının sebebi, Kuantum Noktası kullanılarak tasarlanmış bir bellek aygıtta, sadece bir taşıyıcı bulunması durumunda bile bilginin saklanabilmesidir. Bu sebeple Kuantum Noktasının temel enerjisi seviyesinin aktivasyon enerjisini tesbit etmek (lokalizasyon enerjisi), Kuantum Nokta temelli bellek aygıtların saklama zamanlarının belirlenmesinde önemlidir.

Aktivasyon enerjisinden saklama zamanını bulmak için 8 k.p [10,69] teorisinden yararlanır. Bu teori kullanılarak yapılan uzun çalışmalar sonucu, aktivasyon enerjisi saklama zamanı grafiği oluşturulmuştur [32]. Şekil 4.21'de bu grafik görülmektedir. Siyah daire ile gösterilen örnekler deneysel çalışmalar ile doğrulanmış, içi beyaz daireler ile gösterilen örnekler ise teorinin söylediği bir öngörüdür.





Şekil 3.6: 8 k.p Teori kullanılarak elde edilmiş aktivasyon enerji saklama zamanı grafiği.

Grafik kullanılarak bulunan aktivasyon enerjisinin hangi saklama zamanına tekabül ettiği belirlenir. Tablo (3.1)'de grafiğe göre oluşturulmuş değerler görülmektedir.

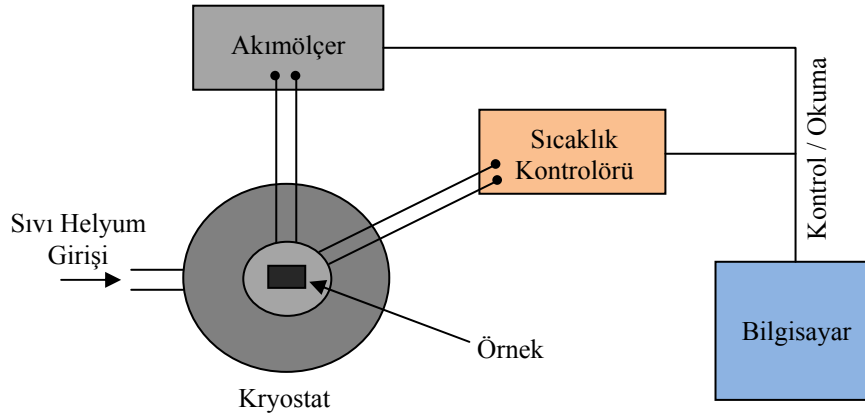
Tablo 3.1: Daha önceki çalışmalarda elde edilmiş aktivasyon enerjileri ve saklama zamanları.

Örnek	Taşıyıcı tipi	Temel Seviye Aktivasyon Enerjisi	300K'deki Saklama Zamanı
InAs/GaAs [22]	Boşluk	210 meV	~0.5 ns
Si/Ge [20]	Boşluk	350 meV	~0.1 $\mu$ s
GaSb/GaAs [21]	Boşluk	450 meV	~1 $\mu$ s
InAs/GaAs [24] Al <sub>(0,6)</sub> Ga <sub>(0,4)</sub> As bariyerli	Boşluk	560 meV	5 ms
InAs/GaAs [26] Al <sub>(0,9)</sub> Ga <sub>(0,1)</sub> As bariyerli	Boşluk	710 meV	1.6 s

### 3.3. DENEY DÜZENEKLERİ

#### 3.3.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Düzenegi

Akım-Voltaj ölçümlerinde, Keitley 2400 modeli ölçü aleti kullanılmıştır. Keitley 2400 ampermetre işlevi görerek akım-voltaj ölçümü, akım-voltaj kaynağı olarak da akım veya voltaj üretebilmektedir. Deney düzenegi Şekil 3.7’de görülmektedir.

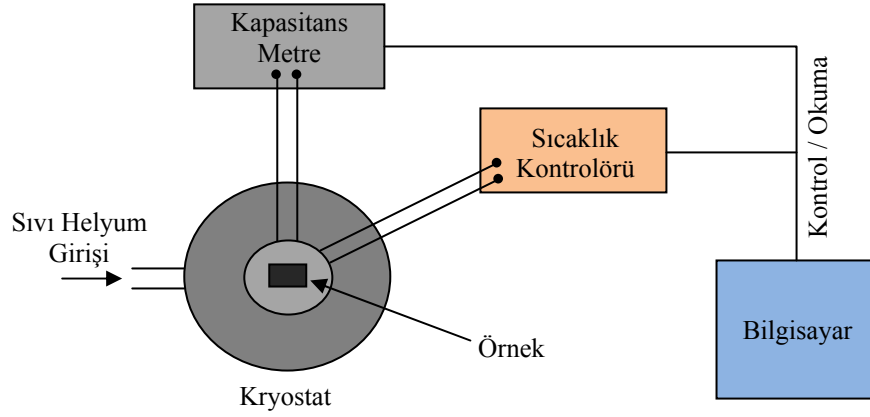


Şekil 3.7: Akım – Voltaj ölçüm düzenegi.

Şekilde görüldüğü gibi örneğin üst (top) ve alt (back) kontakları Keitley 2400’e bağlanmıştır. Örneklerle değişik sıcaklıklarda ölçüm yapılmıştır. Bu sebeple akım-voltaj deneyinde ve diğer tüm deneylerde örnek, bir kryostat düzenegi içine yerleştirilmiştir. Sıcaklığı yükseltmek için kryostata sıcaklık kontrolörü bağlanmış, sıcaklığı düşürmek için ise kryostat içinden sıvı helyum gazı dolaştırılmıştır. Kryostat içindeki havayı boşaltmak için vakum pompası ve ayrıca deney setini kontrol edebilmek için de bir bilgisayar kullanılmıştır.

#### 3.3.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Düzenegi

Kapasite-voltaj ölçümlerinde ölçü aleti olarak HP 4284A LCR Metre kullanılmıştır. Bu ölçü aleti ile 20 Hz – 1 MHz aralığındaki frekanslarda ölçüm alınabilir. Örneğe besleme voltajı olarak  $\pm 40V$  aralığındaki voltaj değerleri uygulanabilir.

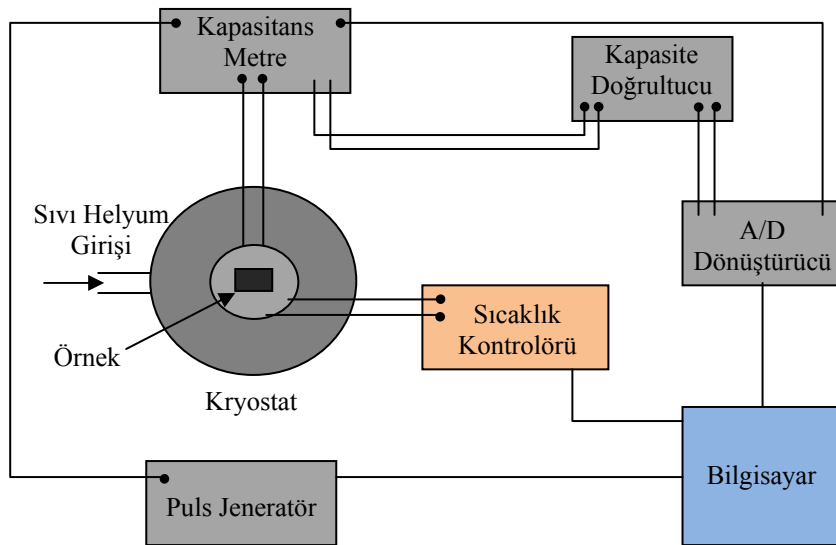


Şekil 3.8: Kapasite – Voltaj ölçüm düzeneği.

Şekil 3.8’de kapasite voltaj ölçüm düzeneği görülmektedir. Örneğin uçları kapasitans metreye bağlanmıştır. Farklı sıcaklık değerlerinde ölçüm alabilmek için örnek kryostat düzeneği içine yerleştirilmiştir. Sıcaklığı yükseltmek için sıcaklık kontrolörü kullanılırken, sıcaklığı düşürmek için de sıvı helyum kullanılmıştır. Bilgisayar ile deney aletleri kontrol edilmiştir.

### 3.3.3. DLTS Ölçüm Düzeneği

DLTS ölçümlerinde yüksek bir darbe uygulanarak Kuantum Noktaların taşıyıcılarla tamamen dolması sağlanır. Daha sonra uygulanan darbe kaldırılarak, taşıyıcılar yayımlanırken, kapasite ölçümü yapılır. Bu işlem belirli bir sıcaklık aralığı boyunca, belirli sıcaklık adımlarında tekrar ettirilir.



Şekil 3.9: DLTS ölçüm düzeneği.

Örneğe darbe uygulamak için Agilent 33250A modeli darbe jeneratörü kullanılmıştır. Boonton 7200 modeli kapasitansmetre ile 1MHz'lik sabit frekansta kapasite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da DLTS deney düzeneği görülmektedir. Darbe jeneratörü ve örneğin uçları kapasite ölçümü için Boonton'a bağlanmıştır. Farklı sıcaklıklarda ölçüm alabilmek için örnek kryostat sistemine yerleştirilmiştir. Bilgisayar hem okuma işlemi hem de cihazların kontrolü için kullanılmaktadır. Bilgisayarın darbe jeneratörü, sıcaklık kontrolü ve A/D dönüştürücüsü ile bağlantısı vardır. A/D dönüştürücü analog sinyalleri dijital sinayallere çeviren bir karttır. Kapasitansmetrenin ölçtüğü analog sinyalleri dijite etmektedir. Kapasitans doğrultucu ise kapasitansmetrenin daha hassas ve gürültüsüz bir ölçüm yapması için geliştirilmiş, kapasitansmetrenin ölçüm yapacağı aralığı ayarlayan bir düzeneştir.

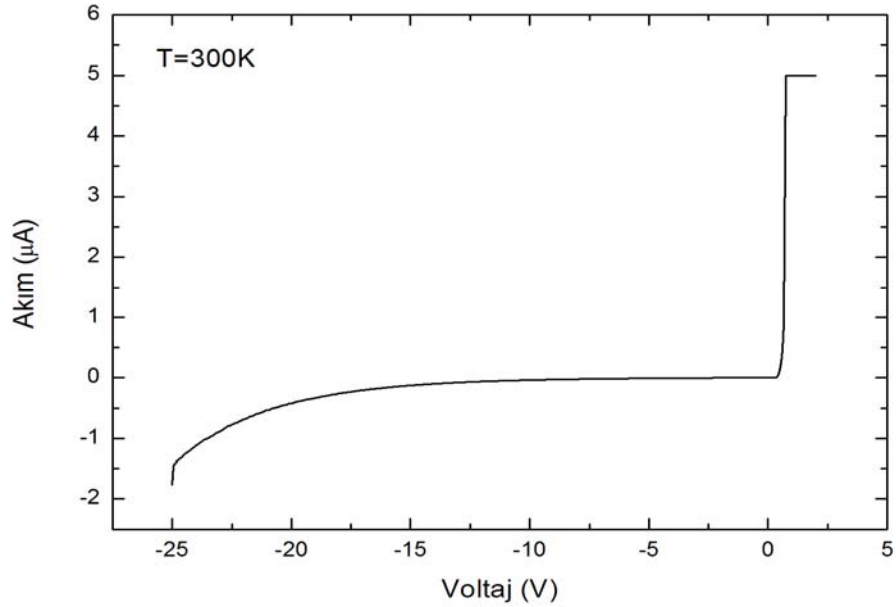
## 4. BULGULAR

### 4.1 InAs/GaAs KUANTUM NOKTASI İÇEREN ÖRNEK

#### 4.1.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları

Akım-Voltaj ölçümleri, örneğin diyot kalitesinin sınanmasını ve örneğin ileri-geri kırılma voltajlarının tesbit edilmesini sağlar. Bu bilgiler bir diyodun en temel elektriksel özellikleridir. Ayrıca bu sonuçlar kapasite-voltaj ve dolayısıyla DLTS ölçümlerinde uygun voltaj aralıklarında çalışabilmek için önemlidir.

Şekil 4.1’de InAs Kuantum Noktası içeren örneğin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği verilmiştir. Örneğin, diyot çapı 800  $\mu\text{m}$ ’dir. Örneğe -25 V’tan 2 V’a kadar gerilim uygulanmıştır. Voltaj adımı 0,05 V’tur. Örneği yüksek akıma karşı korumak için güç kaynağının akım çıkışı  $\pm 5 \mu\text{A}$  ile sınırlandırılmıştır.

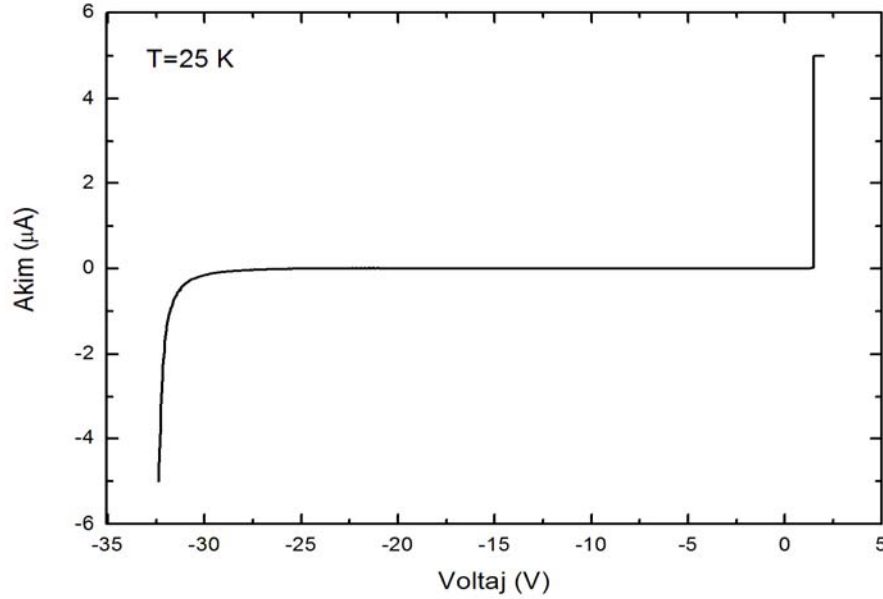


Şekil 4.1: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin, 300 K’deki akım-voltaj grafiği.

Ölçüm sonucunda elde edilen veriye göre, örneğin oda sıcaklığındaki ileri yönde kırılma voltajı 0.65 V, geri yönde kırılma voltajı ise -23.5 V olarak tesbit edilmiştir. Geri kırılma voltajı tesbit edilirken -1  $\mu$ A referans alınmıştır.

Grafikte de görüldüğü gibi yaklaşık -10 V'tan sonra kaçak akımlar gözlenmiştir. Bu kaçak akımlar örneğin kalitesi ile ilgilidir. Kapasite ölçümleri bu sınırın dışında kaldığından dolayı, çalışma için herhangi bir sorun teşkil etmemektedir.

Şekil 4.2'de örneğin 25 K'deki akım-voltaj değişimi görülmektedir. 25 K'deki ölçümlerde voltaj aralığı -33 V'a kadardır. Buna göre örneğin ileri kırılma voltajı 1.45V, geri kırılma voltajı ise -31,8V olarak bulunmuştur. Geri kırılma voltajının ölçüm sıcaklığına göre değişiklik göstermesi, yarıiletkenlerin bant yapıları ile alakalıdır. Sıcaklık düştükçe bant genişliği azaldığından dolayı akım geçmesi için gerekli gerilim değeri artmaktadır.



Şekil 4.2: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 25K'deki akım-voltaj grafiği

Bu çalışmada akım-voltaj ölçümü yapılmasının iki amacı vardır. Birincisi örneğin ideal diyot karakterisliğini yansıtıp yansıtmadığından emin olmak, ikincisi ise ileri ve geri kırılma voltajlarını tesbit etmektir. Deney sonuçlarına göre örneğin ideal diyot

karakteristiğini yansıttığı söylenebilir. İleri besleme durumunda küçük bir voltaj artışında akım geçerken, geri yönde belirli bir noktaya kadar akım geçmez.

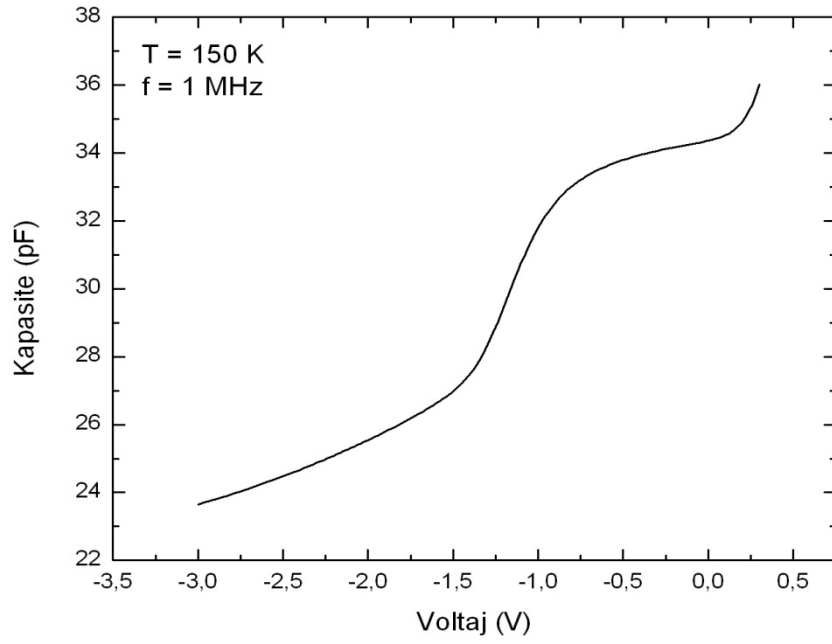
#### 4.1.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları

Kapasite-voltaj ölçümleri ile Kuantum Noktalarının varlığı gözlenebilir, başladığı ve bittiği voltaj değeri tesbit edilebilir. Bu noktalar DLTS ölçümleri için gereklidir. Ayrıca katkı konsantrasyonu ve arınma bölgesi genişliği gibi elektriksel özellikleri belirlenebilir.

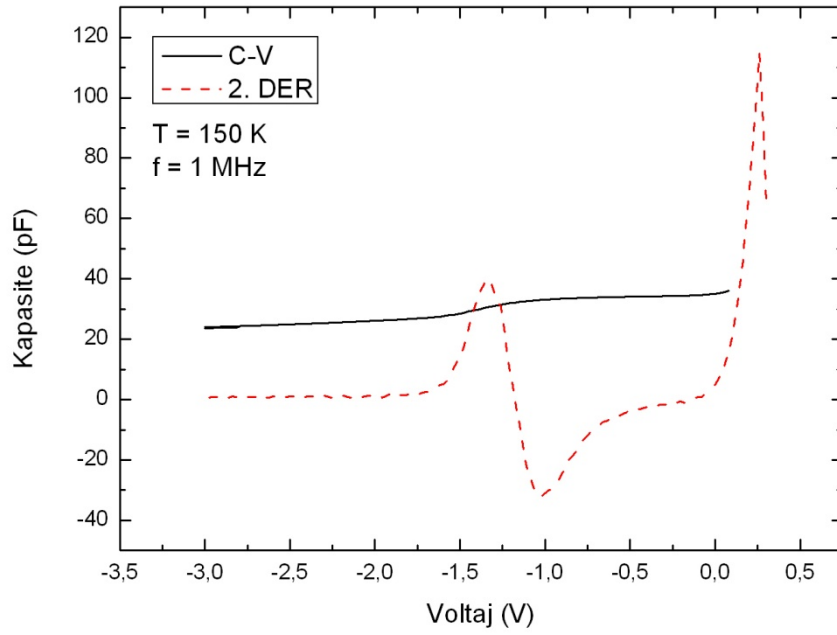
Ölçümler 25 K'den 300 K'e kadar değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık adımı 50 K'dir. Ayrıca ölçümlerde farklı frekanslar kullanılmıştır. Bu frekanslar sırasıyla 1 MHz, 100 kHz, 10 kHz ve 1 kHz'dir.

Farklı sıcaklık ve frekans değerleri kullanılmaktaki amacımız, taşıyıcıların hareketini daha iyi şekilde gözlemlemektir. Sıcaklık taşıyıcıların hareketini doğrudan etkileyen bir faktördür. Oda sıcaklığında taşıyıcıların kinetik enerjileri yüksektir. Buna karşın InAs'ın aktivasyon enerjisi düşüktür. Bu sebeple Kuantum Noktasındaki taşıyıcılar nanosaniyeler mertebesinde yayımlanırlar. Taşıyıcıların hareketlerini belirgin bir biçimde gözleyebilmek için daha düşük sıcaklıklara inmek gerekir. Kapasite ölçümlerinde frekans, ölçme hızını belirler. Alçak frekanslarda ölçüm hızı yavaş iken, yüksek frekanslarda ise hızlıdır. Daha iyi sonuçlar elde etmek için uygun frekans değerini seçmek de önemlidir.

Şekil 4.3 InAs Kuantum Noktası içeren örneğin 150 K'deki kapasite-voltaj değişimini göstermektedir. Uygulanan voltaj 0.5 V ile -3.5 V arasındadır. Şekilde açıkça görüldüğü gibi ideal kapasite-voltaj karakteristiğine nazaran büyük bir sapma vardır. İdeal bir diyotta kapasite-voltaj ölçümü alındığında kapasitenin, voltajın karekökü ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Grafikteki değişim de Kuantum Noktasına ulaşıncaya kadar bu şekildedir. Kuantum Noktasına ulaşıldığında ise, Kuantum Noktasına yerleşmiş taşıyıcılar kapasitenin azalmasını hemen hemen önleyeceklerdir. Tüm taşıyıcılar yayımlandığında ise tekrar ideal karakteristiğe dönülür. Böylece grafikte bir plato görülür. Bu platonun görülmesinin sebebi Kuantum Noktasının taşıyıcılar için yarattığı yeni durumlarıdır. Böylece Kuantum Noktalarının varlıkları gözlenmiş olurlar.



Şekil 4.3: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin 150K'deki kapasite-voltaj grafiği.



Şekil 4.4: InAs/GaAs Kuantum Noktalar içeren örneğin 150 K'deki C-V değişimi ve C-V değişiminin ikinci dereceden türevi.



Bir eğrinin bir noktasında ikinci dereceden türev alındığında o noktanın eğimi bulunmuş olunur. Kapasite-voltaj eğrisinin ikinci türevini aldığı anda ise iki tane maksimum nokta elde edilir. Bu maksimum noktalar ani değişimlerdir ve platonun başladığı ve bittiği voltaj değerlerini temsil ederler. Bir diğer deyişle Kuantum Noktalarının başladığı ve bittiği voltaj değerleridir. Şekil 4.4'deki eğriden, InAs Kuantum Noktası için platonun başladığı voltaj değeri 0.3 V, platonun bittiği voltaj değeri ise -1.4 V olarak belirlenir.

Bir n-p eklemde, p tipi bölgedeki boşluklar ile kapasite değeri arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Böylece kapasite voltaj ölçümleri ile örneğin katkı konsantrasyonunu belirlenebiliriz. Aralarındaki ilişki (4.1) bağıntısı ile verilmektedir.

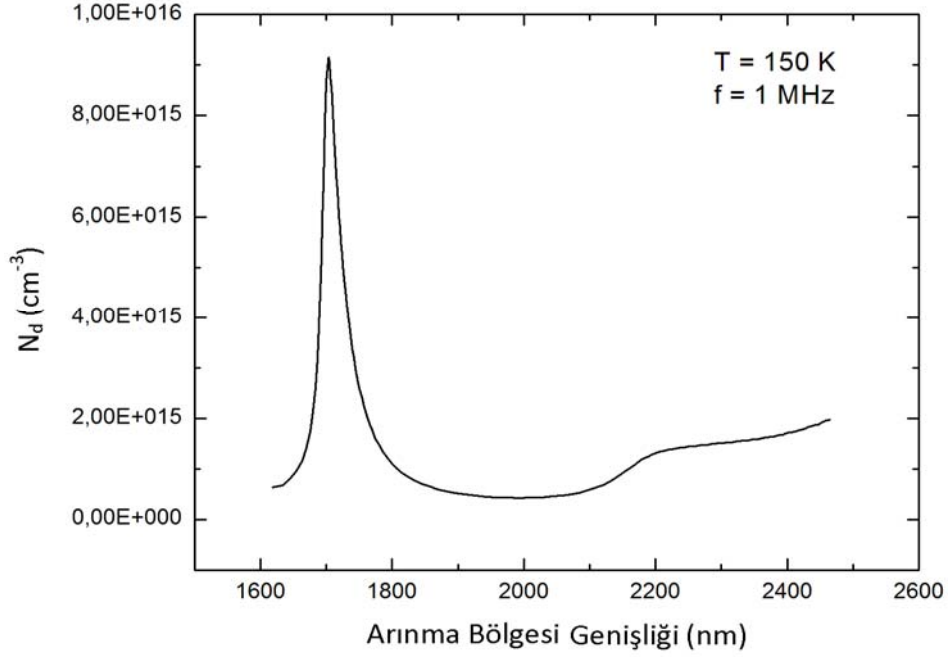
$$N_a = \frac{2}{A^2 \epsilon \epsilon_0 e} \left( \frac{d(1/C^2)}{dV} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda  $N_a$  katkı konsantrasyonunu, A alanı, V uygulanan voltajı, C ölçülen kapasite değerini,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitini ve  $\epsilon$  malzemenin dielektrik sabitini temsil etmektedir.

Ayrıca kapasite voltaj ölçümleri kullanılarak eklem arınma bölgesi genişliği de elde edilir. Voltaj ileri yönde uygulandığında arınma bölgesi genişliği azalacak, geri yönde uygulandığında ise artacaktır. Arınma bölgesinin genişliğini matematiksel olarak şu şekilde yazabiliriz,

$$w_a = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(V)} \quad (4.2)$$

Kapasite-voltaj eğrisi kullanılarak elde edilen katkı konsantrasyonu – arınma bölgesi genişliği değişimi şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin katkı konsantrasyonu-arınma bölgesi genişliği değişimi.

Şekilden katkı konsantrasyonu  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , arınma bölgesi genişliği ise 1700 nm olarak elde edilmiş görülmektedir. Örneğin referans değerlerine göre katkı konsantrasyonu  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , arınma bölgesi genişliği ise 1500 nm'dir. Ölçüm sonucu elde edilen değerler ile referans değerleri arasındaki küçük farkın sebebi, farklı sıcaklıklarda ölçüm alınması ve sıcaklığın taşıyıcı hareketini önemli derecede etkilemesidir. Aradaki fark ihmal edilebilecek değerdedir.

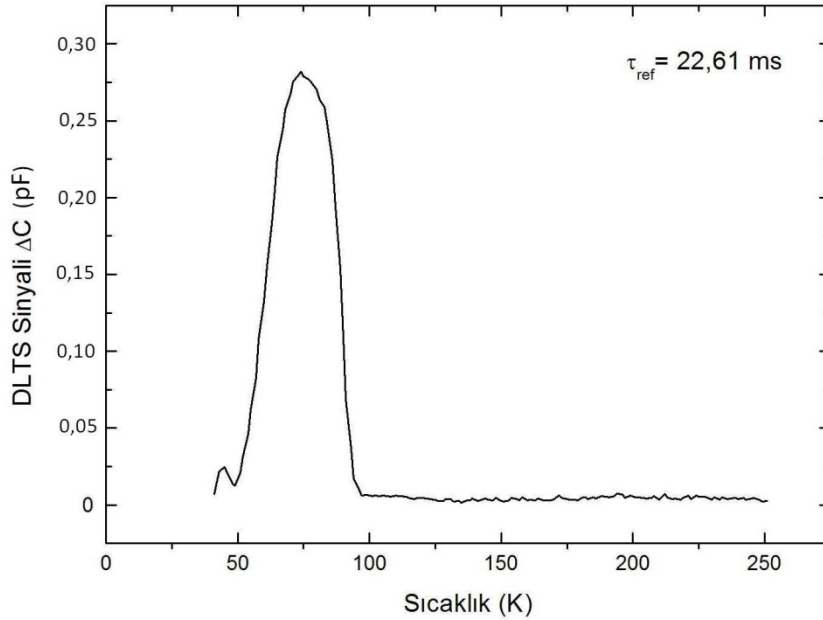
#### 4.1.3. DLTS Ölçüm Sonuçları

DLTS ölçümleriyle Kuantum Noktalarının termal emisyon hızları, katkı konsantrasyonları, yakalama tesir kesirleri ve aktivasyon enerjileri belirlenebilir. Kuantum Noktaların enerji seviyeleri taşıyıcıların yerleşebilecekleri mümkün seviyelerdir. Bu seviyelere yerleşen taşıyıcılar yayımlana kadar kalırlar. Taşıyıcıların yayımlanmalarındaki en büyük etkenler ise elektrik alan ve sıcaklıktır. DLTS ölçümlerinde, belirli bir sıcaklık aralığında, önce örneğe sabit bir darbe uygulanarak Kuantum Noktalarının taşıyıcılarla tamamen dolmaları sağlanır, daha sonra uygulanan darbe kaldırılarak taşıyıcıların yayımlanması sağlanır. Böylece sıcaklık nedeniyle

meydana gelen yayınlama süreci hakkında bilgi edinilerek, malzemenin aktivasyon enerjisi belirlenir.

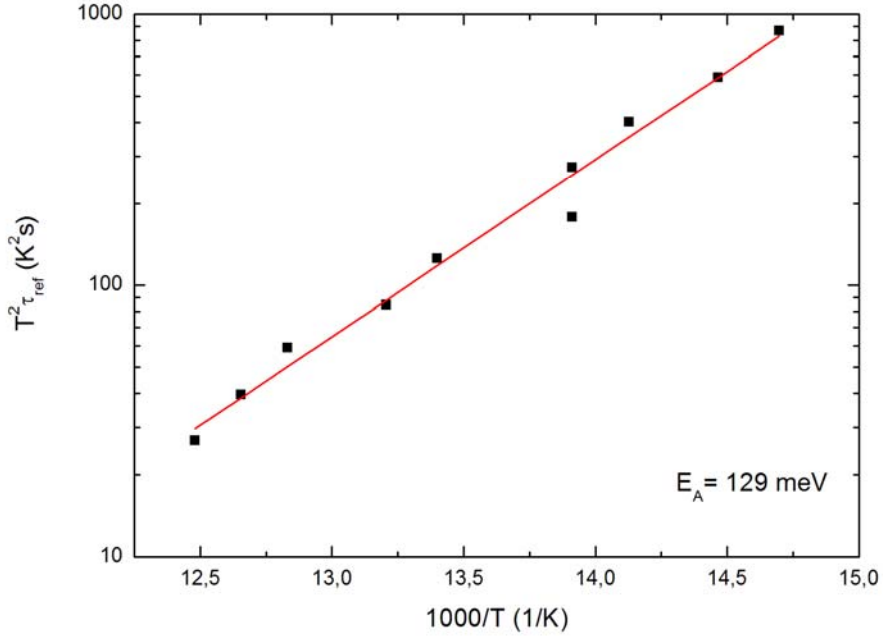
DLTS deneyi yapılırken 40 K ile 300 K sıcaklık aralığı taranmıştır. Sıcaklık adımı 1.5 K'dir. InAs örnek için kapasite voltaj ölçümlerinden platonun başlangıç noktası 0.3 V, bitiş noktası ise -1.45 V olarak tesbit edilmişti. Bu sebeple darbe voltajı (yüksek voltaj) 0.5 V, ölçüm voltajı (düşük voltaj) ise -1.6 V olarak seçilmiştir. Darbe genişliği 1 s'dir. Seçilen darbe süresi boyunca örneğe 0.5 V uygulanarak Kuantum Noktaları taşıyıcılarla tamamen doldurulur. Uygulanan darbe kaldırıldığında Kuantum Noktalar eklemin arınma bölgesine geri dönerek tüm taşıyıcıları yayınlamaya başlar.

Şekil 4.6'da InAs örnek için DLTS sinyalinin sıcaklığa göre değişim eğrisi ve Arrhenius grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi DLTS sinyali 50 K ile 100 K arasında pik yapar ve 250 K'e kadar uzanır. Bu sıcaklık aralığı, kapasite değişiminin maksimum olduğu sıcaklık aralığıdır. Daha düşük sıcaklıklarda ısı enerjisi, taşıyıcıları daha hızlı yayınlamak için yetersizdir. Yüksek sıcaklıklarda ise ısı enerjisi yüksek olduğundan, taşıyıcılar seviyelere tamamen yerleşmeden yayınlanırlar.



Şekil 4.6: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyali.

Şekil 4.7’de DLTS sinyalini kullanılarak çizilen Arrhenius grafiği görülmektedir. Grafiğe göre InAs örnek için aktivasyon enerjisini 129 meV olarak bulunur. Bu değer Kuantum Noktasının ana aktivasyon enerjisidir (main activation energy).



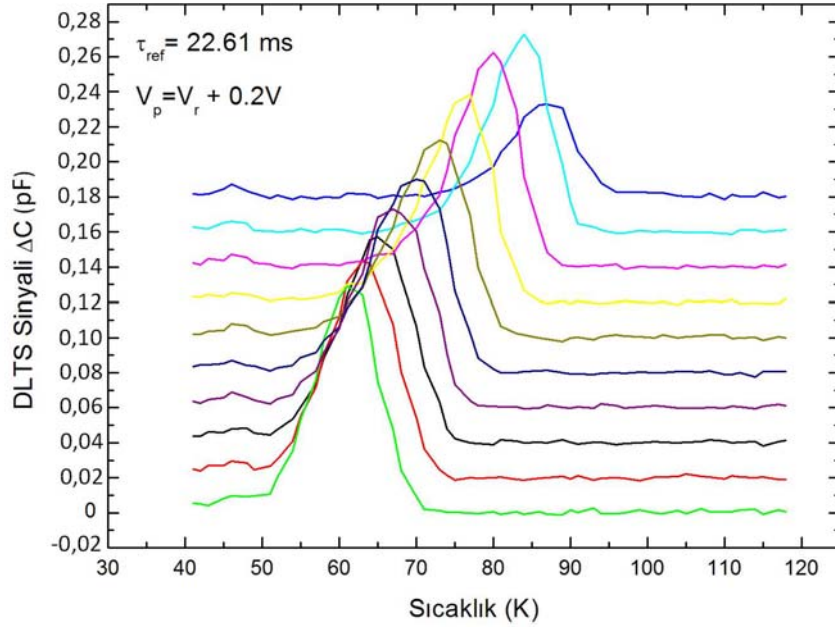
Şekil 4.7: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için, DLTS sinyalinden elde edilmiş Arrhenius grafiği.

#### 4.1.4. Seviye Seçici DLTS Ölçüm Sonuçları

DLTS ölçümlerinde örneğe belirli bir darbe uygulanarak Kuantum Noktaları doldurulmakta, darbe kaldırılarak ölçüm alınmaktadır. Bu şekilde ana aktivasyon enerjisi elde edilmektedir. Ana Aktivasyon Enerjisi ifadesinin anlamı, kendinden organize olma yöntemiyle elde edilen örneklerde tek bir Kuantum Noktası değil, bir Kuantum Noktası topluluğu olması ve elde edilen aktivasyon enerjisinin bir ortalama değer olmasıdır. Oysa herhangi bir Kuantum Noktasında tek bir taşıyıcının bulunmasının bile, fiziksel bir anlamı vardır. Örnek olarak Kuantum Noktasında kullanılarak oluşturulmuş bir bellek aygıtta, tek bir taşıyıcısının Kuantum Noktasına yerleştirilmesi bilginin kaydedilmesi demektir. Seviye Seçici DLTS ölçümlerinde ise voltaj aralığı belirli aralıklara bölünerek, her bir aralık için farklı darbe voltajı ve ölçüm voltajı uygulanır. Böylece Kuantum Noktalarındaki her seviyeye için ayrı aktivasyon

enerjisi belirlenmeye çalışılır. Sonuç itibariyle temel seviyenin aktivasyon enerjisi bulunur.

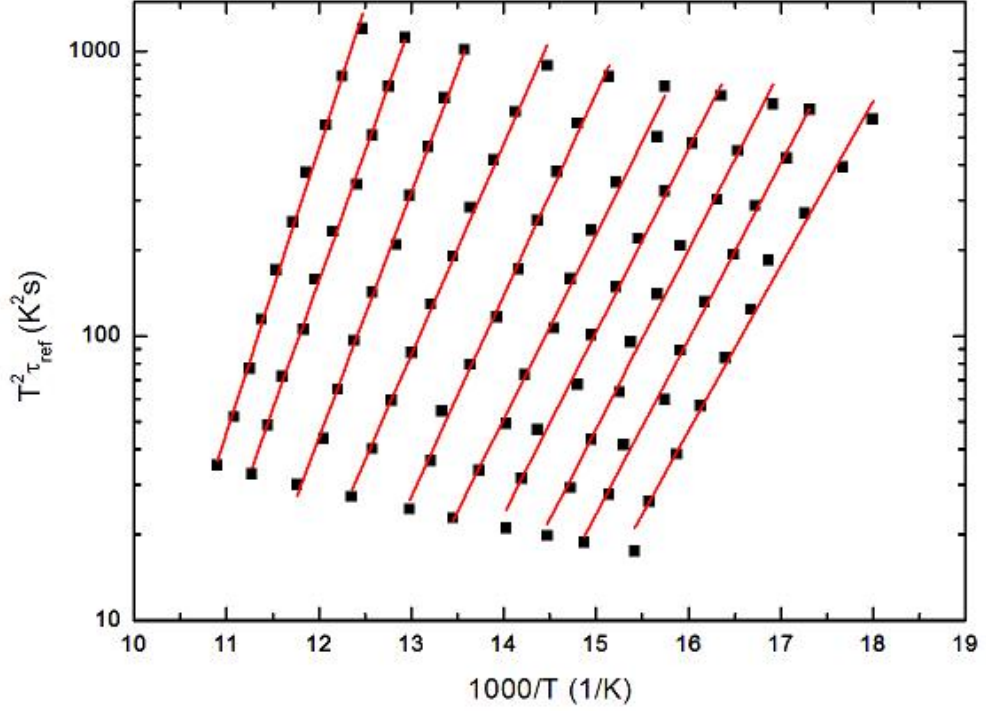
Seviye Seçici DLTS ölçümünde 40 K ile 120 K sıcaklık aralığı 1.5 K'lik adımlarla taranmıştır. DLTS ölçümünde darbe voltajı 0.5 V, ölçüm voltajı ise -1.6 V olarak seçilmiştir. Seviye Seçici DLTS ölçümünde ise voltaj değerleri 0.2 V'luk adımlara bölünmüştür. Böylece 0.5 V'luk darbe uygulandığında ölçüm 0.3 V'ta ve 0.3 V'luk darbe uygulandığında ise ölçüm 0.1 V'ta gerçekleştirilmiştir. Son olarak -1.3 V'luk darbe uygulanarak -1.5 V'ta ölçüm yapılmıştır. Buna göre 10 tane parametre kullanılmıştır. Darbe zamanı DLTS ölçümünde olduğu gibi, yine 1 s olarak seçilmiştir.



Şekil 4.8: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS ölçümü sonucu elde edilmiş DLTS sinyalleri.

Şekil 4.8'de 10 farklı parametre için 10 farklı DLTS sinyali görülmektedir. DLTS ölçümlerinde sinyal 50 K ile 100K arasında pik yapmasına karşın Seviye Seçici DLTS ölçümü sonucunda elde edilen grafikte ise, yine 50 K ile 100 K aralığında olmak üzere, her parametre için farklı bir bölgede pik oluştuğu görülmektedir. Darbe voltajının 0.5 V, ölçüm voltajının ise 0.3 V olduğu parametre için 50K ile 70K aralığında pik gözlenirken (en üst seviyelere karşılık gelir), darbe voltajının -1.3 V ve ölçüm voltajının -1.5 V

olduğu parametre için ise 75 K ile 95 K arasında pik görülmektedir (temel seviyeye karşılık gelir). Her parametre için Arrhenius grafiği çizilerek, herbiri için aktivasyon enerjileri belirlenir.



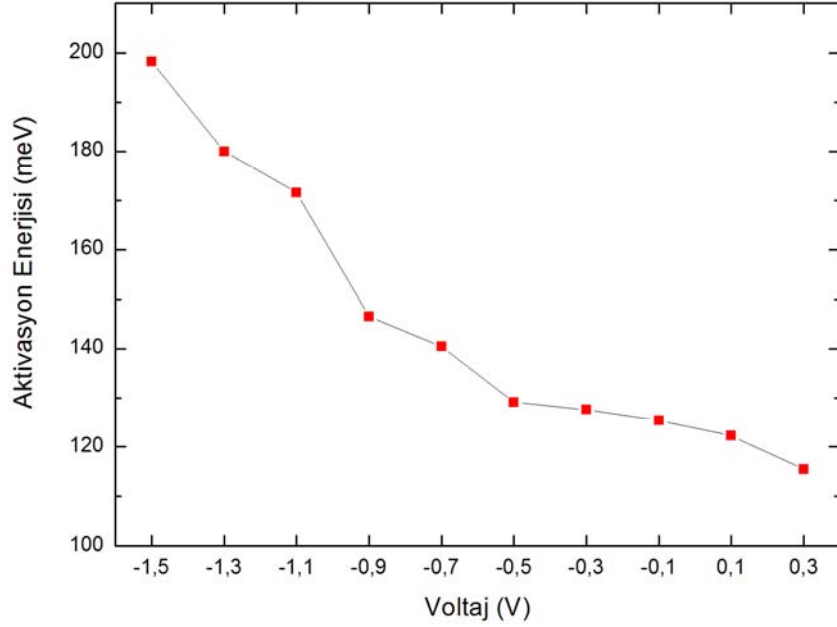
Şekil 4.9: InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin, Seviye Seçici DLTS ölçüm sonucunda elde edilmiş DLTS sinyalleri kullanılarak oluşturulan Arrhenius grafikleri.

Şekil 4.9'da Seviye Seçici DLTS sinyalleri için Arrhenius grafiği görülmektedir. Her düzlem farklı seviyeler için farklı aktivasyon enerjilerinin elde edilmesini sağlar.

Şekil 4.10'da Kuantum Noktasının farklı enerji seviyeleri için farklı aktivasyon enerjileri görülmektedir. En yüksek aktivasyon enerjisi 198 meV olup temel enerji seviyesini temsil etmektedir.

DLTS ölçümlerinden yararlanılarak 129 meV olarak bulunan aktivasyon enerjisinin ortalama bir değer olduğu belirtilmişti. Seviye Seçici DLTS ile Kuantum Noktası farklı voltaj aralıklarına bölünerek, temel seviyenin aktivasyon enerjisi belirlendi. Temel seviyenin aktivasyon enerjisinin belirlemek bu çalışma için önemlidir. Çünkü Kuantum Nokta Temelli bir bellek cihazda, taşıyıcıların sadece temel seviyeleri bile doldurmaları

yeterlidir. Eğer temel seviyeyi tesbit için bu deney yapılmıyaydı, saklama zamanı için daha düşük bir değer elde edilecekti.



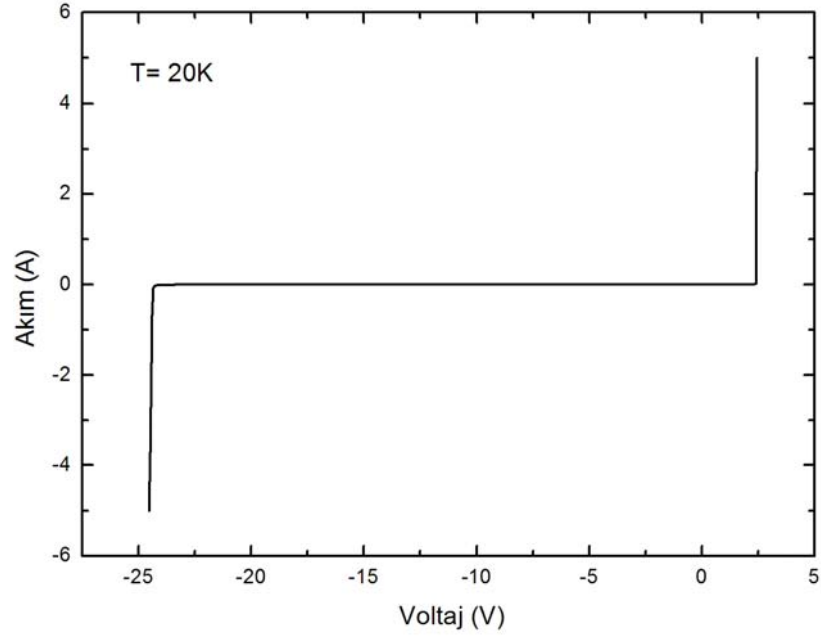
Şekil 4.10: InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin, Arrhenius Grafikleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri.

Sonuç itibariyle 198 meV aktivasyon enerjisine sahip bir Kuantum Noktası, bir taşıyıcıyı oda sıcaklığında 0.5 ns süresince saklamaktadır.

## 4.2. GaSb KUANTUM NOKTASI İÇEREN ÖRNEK

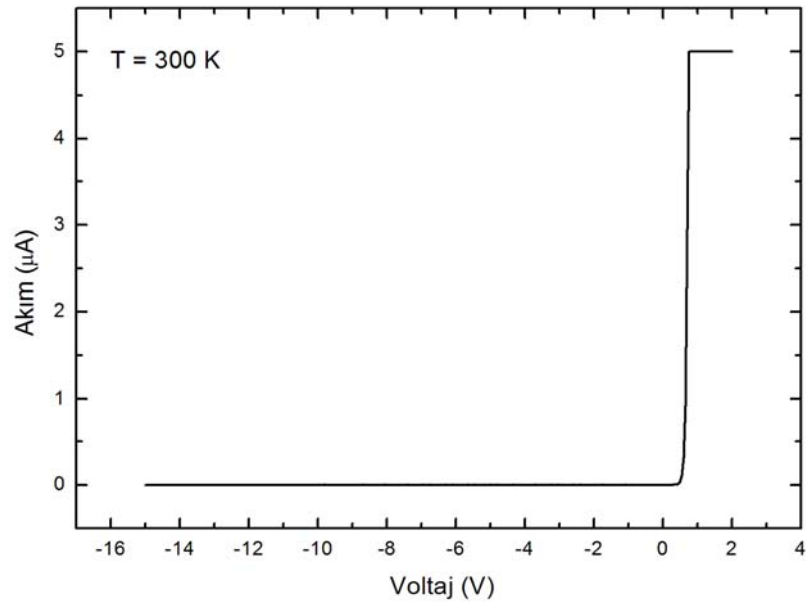
### 4.2.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.11’de GaSb Kuantum Noktaları içeren örneğin 20 K sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği görölmektedir. Örneğin diyot yarı çapı 400  $\mu\text{m}$ ’dir. Örneğe -25 V’tan 5 V’a kadar 0.05 V’luk adımlarla gerilim uygulanmıştır. Örneği yüksek akıma karşı korumak için güç kaynağının akım çıkışı  $\pm 5 \mu\text{A}$  ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.11: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin, 20K'deki akım-voltaj grafiği.

Deney sonucuna göre, örneğin 20 K'deki ileri kırılma voltajı 2.4 V, geri kırılma voltajı ise -24 V olarak tesbit edildi. Kırılma voltajları tesbit edilirken 1  $\mu$ A referans olarak alındı.



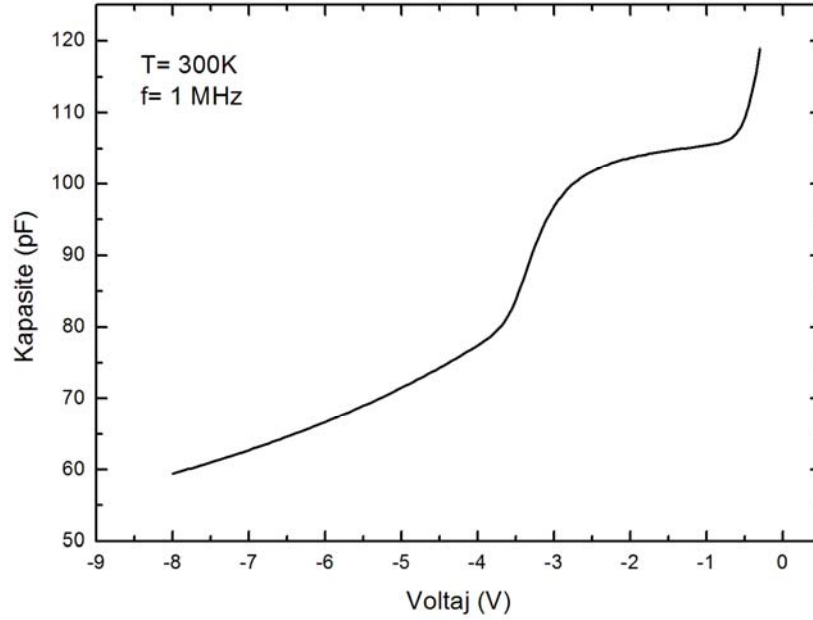
Şekil 4.12: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin, 300K'deki akım-voltaj grafiği.



Şekil 4.12’de ise örneğin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde, örneğe 2 V’tan -15 V’a kadar gerilim uygulanmıştır. İleri kırılma voltajı 0.5 V olarak tesbit edilirken, geri kırılma 15 V’a kadar gerçekleşmemiştir. Bu sonuca göre örneğin diyot karakterisliğinin iyi olduğu söylenir.

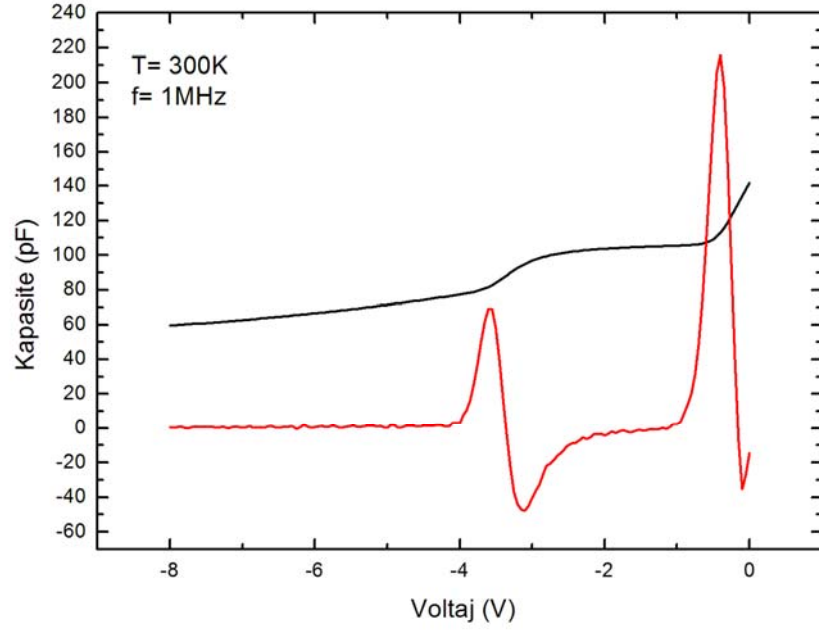
#### 4.2.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları

GaSb Kuantum Noktası içeren örnekte, kapasite voltaj ölçümleri 300 K’den 50 K’e kadar 50 K’lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 20 K’de de ölçüm alınmıştır. Ölçümlerde sırasıyla 1 MHz, 100 kHz, 10 kHz ve 1 kHz’lık frekanslar kullanılmıştır.



Şekil 4.13: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin 300K’deki kapasite-voltaj grafiği.

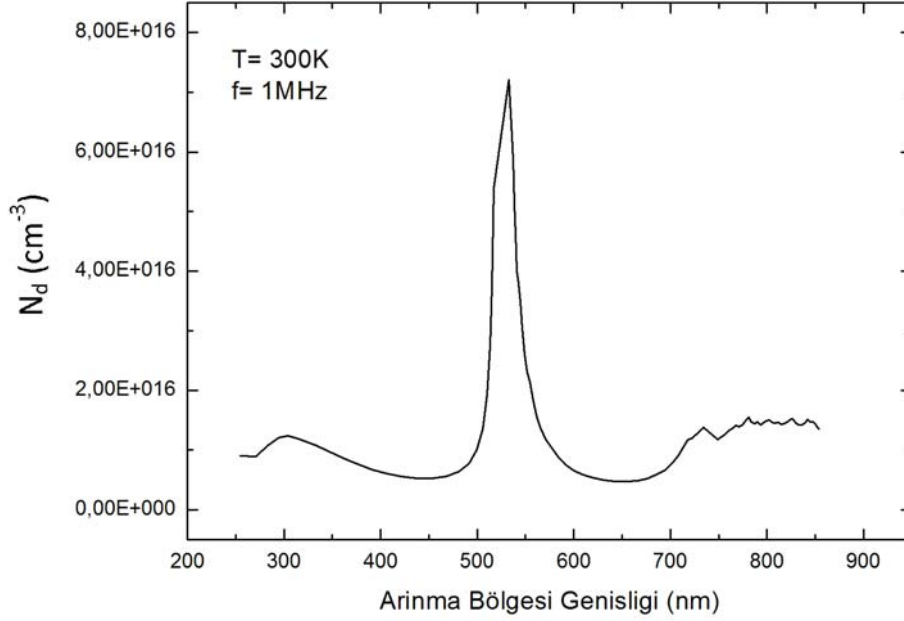
Şekil 4.13’de GaSb Kuantum Noktası içeren örneğin 300 K’deki kapasite-voltaj grafiği görülmektedir. Grafiğin ideal kapasite-voltaj grafiğinden farklı olduğu açık olarak görülmektedir. Kuantum Noktalarının enerji seviyelerine yerleşmiş taşıyıcılar sayesinde, voltajın geri yönde artmasına rağmen kapasite bir süre azalmamıştır. Belirli bir gerilim noktasından sonra ise voltajın karekökü ile ters orantılı olarak azalmıştır.



Şekil 4.14: GaSb/GaAs Kuantum Noktalar içeren örneğin 300K'deki C-V değişimi ve C-V değişiminin ikinci dereceden türevi.

Şekil 4.14'te kapasite-voltaj eğrisinin 2. dereceden türevi görülmektedir. Böylece grafikteki ani değişimler daha rahat bir şekilde görülür. Bu sayede Kuantum Noktasının sebebiyet verdiği platonun başlangıç ve bitiş voltaj noktaları tesbit edilir. Platonun başladığı voltaj değeri yaklaşık olarak  $-0.4$  V'tur. Bu nokta Kuantum Noktalarının taşıyıcılarla tamamen dolu olduğu voltaj değerine karşılık gelir. Platonun bittiği voltaj değeri ise yaklaşık olarak  $-3.6$  V'tur. Bu voltaj değeri ise Kuantum Noktalarının taşıyıcılardan tamamen arındığını değere tekabül eder.

Şekil 4.15'de ise katkı konsantrasyonu ile arınma bölgesi değişim eğrisi görülmektedir. Buna göre arınma bölgesi  $500$  nm civarındadır. Katkı konsantrasyonu ise  $10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$  mertebesindedir. Bu değerler örneklerin referans değerleri ile uyuşmaktadır.

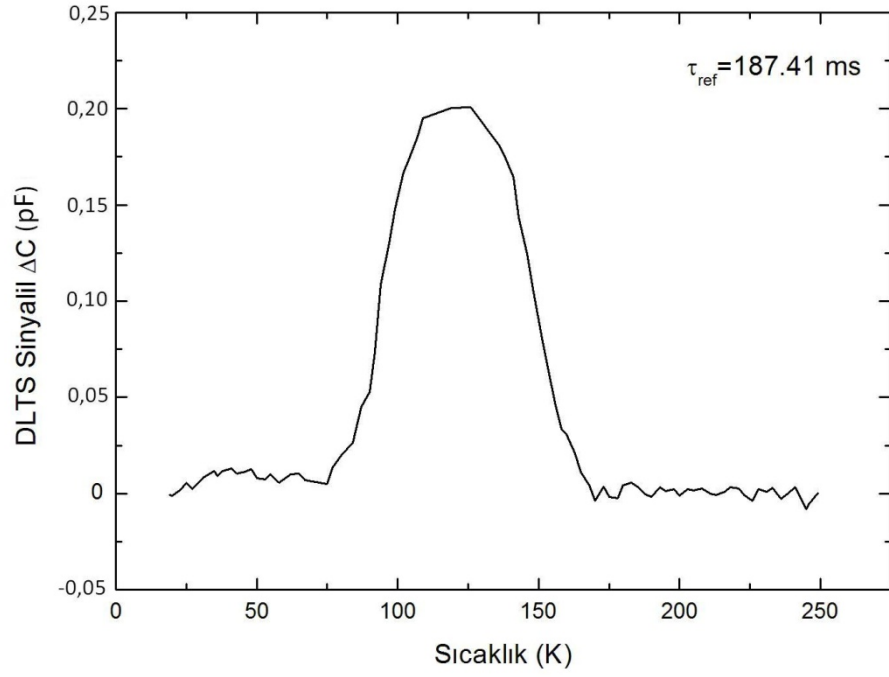


Şekil 4.15: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin katkı konsantrasyonu-arınma bölgesi genişliği değişimi.

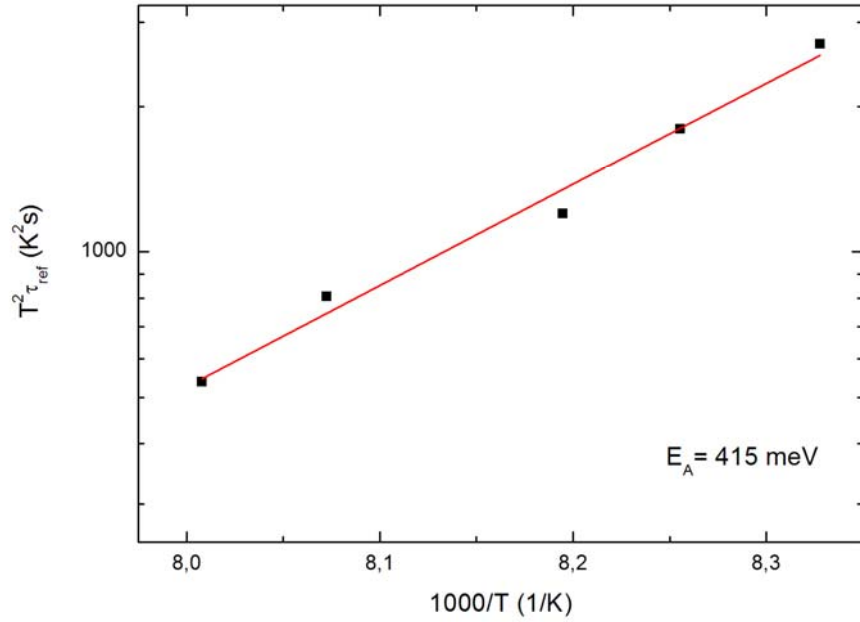
#### 4.2.3. DLTS Ölçüm Sonuçları

GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örnekte DLTS ölçümü yapılırken 30 K ile 300 K sıcaklık aralığı 2.5 K'lik adımlarla taranmıştır. C-V ölçüm sonuçlarına uygun olarak yüksek voltaj 0.5 V (darbe voltajı), düşük voltaj ise -4 V (ölçüm voltajı) olarak seçilmiştir. Örneğe 0.5 s boyunca darbe uygulanarak Kuantum Noktaların taşıyıcılarla dolması sağlanmış, darbe kaldırılarak ölçüm işlemi yapılmıştır.

Şekil 4.16'da GaSb Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyal grafiği görülmektedir. DLTS sinyali 75 K ve 175 K arasında bir pik yapmaktadır. Bunun anlamı, bu sıcaklık aralığında taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanmasının yoğun olduğudur. InAs Kuantum Noktası içeren örneğe kıyasla, pik daha yüksek sıcaklığa doğru kaymıştır.



Şekil 4.16: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin DLTS sinyali.

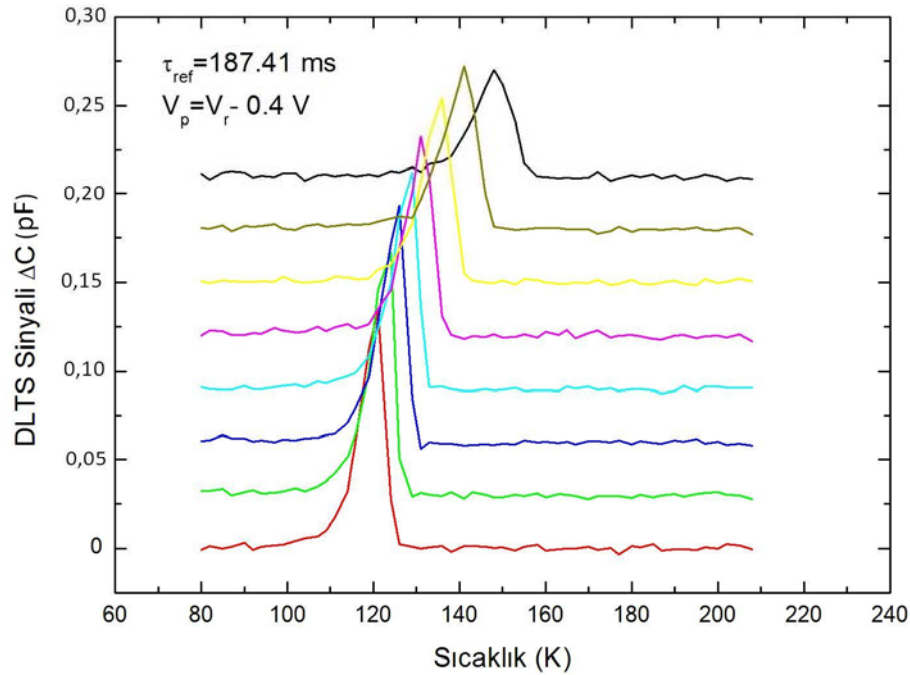


Şekil 4.17: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için, DLTS sinyalinden elde edilmiş Arrhenius grafiği.

Şekil 4.17’de örneğin DLTS sinyali kullanılarak çizilen Arrhenius grafiği görülmektedir. GaSb Kuantum Noktası içeren örneğin ana aktivasyon enerjisi 415 meV olarak tesbit edilmiştir.

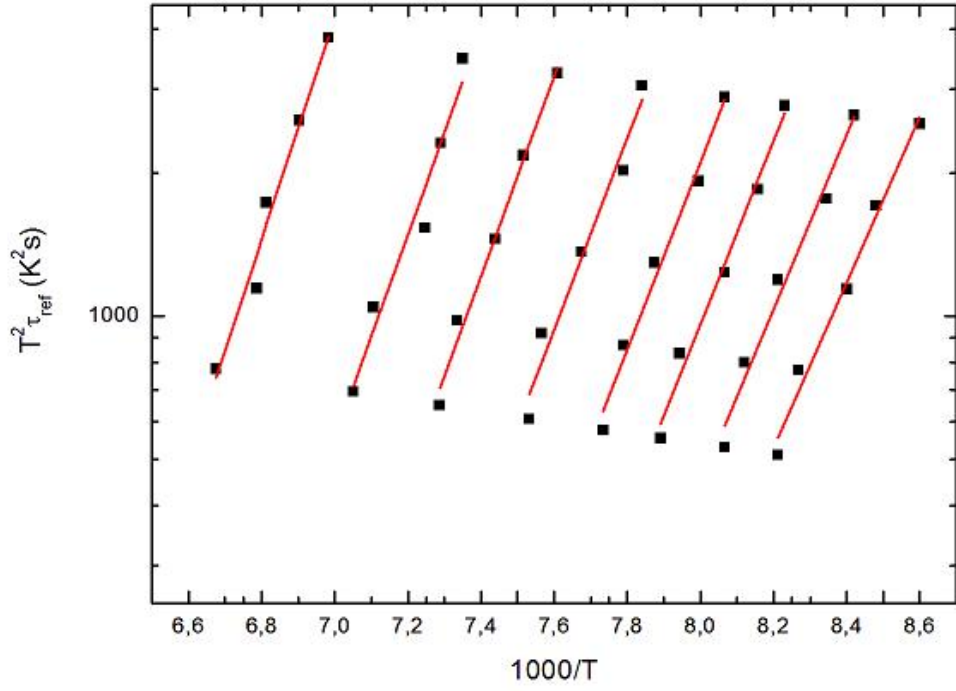
#### 4.2.4. Seviye Seçici DLTS Ölçüm Sonuçları

Seviye Seçici DLTS ölçümlerinde 80 K ile 210 K sıcaklık aralığı 2.5 K’lik adımlarla taranmıştır. Örneğe uygulanacak gerilim voltajı için DLTS ölçümlerinde kullanılan aralık, 0.4 V’luk adımlara bölünmüştür. Buna göre ilk voltaj aralığında geri yönde 0.3 V’luk darbe uygulanarak, geri yönde 0.7 V’luk voltaj değerinde ölçüm alınmıştır. Bölme işlemi, geri yönde 3.1 V’luk darbe ve geri yönde 3.5 V’luk voltaj değerinde ölçüm ile sonlandırılmıştır. Darbe zamanı 0.5 s olarak seçilmiştir.

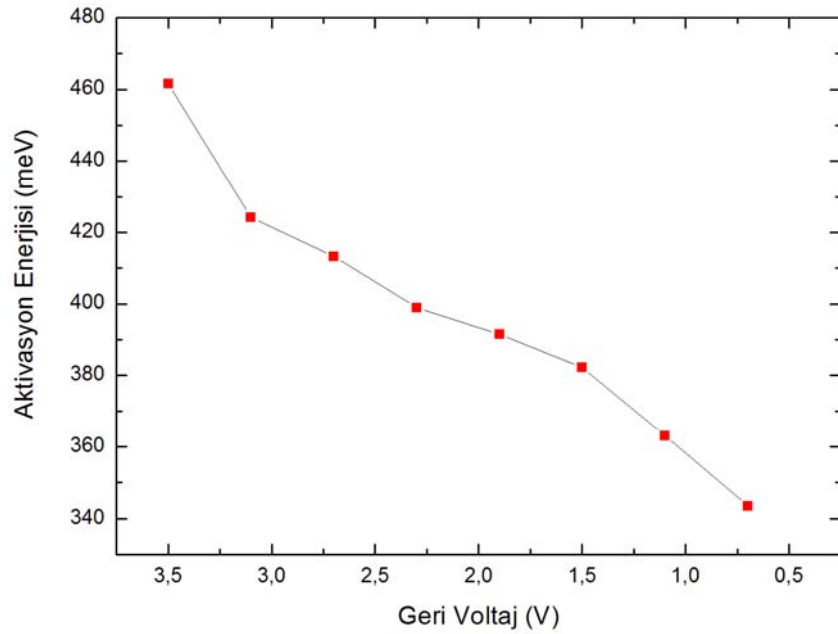


Şekil 4.18: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS ölçümü sonucu elde edilmiş DLTS sinyalleri.

Şekil 4.18’de GaSb/GaAs kuantum Noktası içeren örneğin Seviye Seçici DLTS ölçümü sonucunda elde edilen DLTS sinyali görülmektedir. Her parametre için ayrı bir DLTS sinyali elde edilmiştir.



Şekil 4.19: GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin, Seviye Seçici DLTS ölçüm sonucunda elde edilmiş DLTS sinyalleri kullanılarak oluşturulan Arrhenius grafikleri



Şekil 4.20: GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örneğin, Arrhenius grafikleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri.

Şekil 4.19’da her bir DLTS sinyali için Arrhenius grafikleri görülmektedir. Her bir parametre için aktivasyon enerjisi elde edilmiştir. Şekil (4.20)’de elde edilen aktivasyon enerji değerlerinin uygulanan gerilim ile değişim grafiği görülmektedir.

Şekil 4.20’ye göre platonun başladığı voltaj değerindeki aktivasyon enerjisi 343 meV bulunurken, platonun sonlandığı voltaj değerindeki aktivasyon enerjisi ise 461 meV olarak tesbit edilmiştir. Bu değer Kuantum Noktasındaki temel enerji seviyesinin aktivasyon enerjisine tekabül eder.

461 meV’luk aktivasyon enerjisine sahip bir Kuantum Noktası, oda sıcaklığında bir taşıyıcıyı yaklaşık olarak 1  $\mu$ s süresince saklamaktadır.

Tablo 4.1: Ölçümler sonucu elde edilen aktivasyon enerjileri ve saklama zamanları.

Örnek	Termal Aktivasyon Enerjisi	Temel Seviye Aktivasyon Enerjisi	Saklama Zamanı
InAs/GaAs	129 meV	198 meV	0.5 ns
GaSb/GaAs	415 meV	461 meV	1 $\mu$ s

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren yapıların elektriksel özelliklerinin incelenmesidir. Daha ileri bir adım olarak da, bu yapılar kullanılarak tasarlanabilecek Kuantum Temelli Bellek Aygıtların bilgiyi saklayabilirliklerini araştırmak ve saklama sürelerini belirlemektir.

Bu bağlamda, örnekler üzerinde Akım-Voltaj, Kapasite-Voltaj, DLTS ve Seviye Seçici DLTS ölçümleri alınmıştır. Akım-Voltaj ölçümleri sonucunda örneklerin diyot karakteristiği gösterdikleri gözlenmiş, ileri ve geri yöndeki kırılma voltajları belirlenmiş, bu voltajların sıcaklık ile değiştikleri belirlenmiştir. Kapasite-Voltaj ölçümleri ile Kuantum Noktaların varlığı gözlenerek, Kuantum Noktaların taşıyıcılarla tamamen dolu olduğu ve taşıyıcılardan tamamen arındıkları voltaj değerleri tesbit edilmiştir. Örneklerin katkı konsantrasyonları ve arınma bölgesi genişlikleri belirlenmiştir. DLTS ölçümleri ile Kuantum Noktaların durum yoğunluklarının Dirac-Deltasına eşit olduğu ve enerji ifadelerinin kesikli oldukları gözlenmiştir. Aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Seviye seçici DLTS ölçümü ile örneklerin temel seviye aktivasyon enerjileri elde edilmiştir. Bunun temel seviye aktivasyon enerjileri ile de InAs/GaAs ve GaSb/GaAs Kuantum Noktaları kullanılarak tasarlanacak Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar için saklama zamanları tesbit edilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda elektrik alanın ve sıcaklığın yarıiletken yapıdaki Kuantum Noktaların elektriksel özelliklerini etkin biçimde değiştirdikleri gözlenmiştir. Diyot karakteristiğinde olan bu örneklerin uygulanan ileri yöndeki voltaj ile bariyerlerinin alçaldıkları ve iletken özellikleri kazandıkları gözlenmiştir. Uygulanan geri yöndeki voltaj ile de belirli bir noktadan sonra kırılarak akım geçirdikleri gözlenmiştir. Elektrik alan uygulamaları ile bant yapıları kontrol edilerek taşıyıcıların istenilen şekilde hareket ettirmeye müsait oldukları gösterilmiştir. Sıcaklığın etkisi ile de akım-voltaj ve kapasite-voltaj profillerinin değiştikleri gözlenmiştir.



İncelenen örneklerin ilki,  $n^+p$  eklemine arınma bölgesi civarında büyütülmüş InAs/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnektir. Akım-Voltaj ölçümü sonucunda bu örnek için oda sıcaklığında ileri kırılma voltajı 0.65 V, geri kırılma voltajı ise -23.5 V olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar örneğin diyot karakteristiği gösterdiğini belirtir. Kapasite-Voltaj ölçümleri sonucunda elde edilen kapasite-voltaj profiline bakıldığında, bu profillin diyotun ideal kapasite-voltaj profilinden farklı olduğu görülür. Kapasite ile voltaj arasındaki ilişki kapasitenin voltajın karekökü ile ters orantılı olarak ifade edilir. Bir diyotun kapasitesi ölçüldüğünde ise verilen ilişkiye göre davranması beklenir. Kuantum Noktası içeren yapılarda ise bu ideal profilden sapmalar görülür. Kapasite değeri artan voltaj değerleri ile azalırken, belirli bir süre boyunca hemen hemen azalmamakta ve sonra tekrar azalmaya devam etmektedir. Kuantum Noktaların kapasite-voltaj profiline bakıldığında azalmayan bu bölge bir plato gibi görünür. Bu platonun oluşma sebebi, Kuantum Noktaların enerji seviyelerinin taşıyıcılara yerleşebilecekleri yeni durumlar yaratmasıdır. Dolayısıyla voltaj değeri artarken belirli bir süre boyunca yük de artacaktır. Bu platonun gözlenmesi Kuantum Noktalarının varlıklarını belirtmektedir. InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örnek için platonun başladığı voltaj değeri 0.3 V olup, Kuantum Noktasının taşıyıcılarla tamamen dolu olduğu voltaj değerini temsil eder. Platonun bitiş voltaj değeri ise -1.4 V olup, Kuantum Noktalarının taşıyıcılardan tamamen arındığı voltaj değerini temsil etmektedir. Kapasite-Voltaj ölçümü ile ayrıca örneklerin katkı konsantrasyonları ve arınma bölgesi genişlikleri de belirlenebilir. Ölçüm sonucunda InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örnek için 150 K'de katkı konsantrasyonu  $1 \times 10^{15}$ , arınma bölgesi genişliği ise 1700 nm olarak bulundu. Ölçüm sonucunda elde edilen sonuçlar örneklerin referans değerleri ile uyum içindedir.

DLTS ölçümleri ile Kuantum Noktalarının durum yoğunlukları ifadesinin Dirac-Deltası ile temsil edildikleri ve enerji ifadelerinin kesikli değerler aldıkları gözlenmiştir. Kuantum Noktalarının enerji seviyelerinin aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Belirlenen aktivasyon enerjileri yardımıyla da, Kuantum Noktaları kullanılarak tasarlanabilecek Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar için saklama zamanları tahmin edilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin temel seviyesinin aktivasyon enerjisi 198meV'tur. Buna göre InAs/GaAs Kuantum Noktası kullanılarak tasarlanacak Kuantum Temelli Bellek Aygıtın bilgiyi saklama süresi oda

sıcaklığında 0.5 ns'dir. Bu sonuç daha önceki çalışmalarda [22] benzer yapıdaki örnekler için bulunan sonuçlar ile tamamen uyum içindedir.

İncelenen ikinci örnek ise  $n^+p$  eklemelinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnektir. Akım-Voltaj ölçüm sonucunda örneğin ileri yönde kırılma voltajı 2.4 V, geri yönde kırılma voltajı ise 24 V olarak bulunmuştur. Örneğin diyot karakteristiğinde olduğu belirlenmiştir. Kapasite-Voltaj ölçümleri sonucunda Kuantum Noktaların varlığını belirten plato gözlenmiştir. Platonun başladığı voltaj değeri -0.4 V, bittiği voltaj değeri ise -3.6V'tur. Ölçüm sonuçlarına göre örneğin katkı konsantrasyonu  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , arınma bölgesi genişliği ise 500 nm olarak belirlenmiştir. Bulunan bu sonuçların referans değerleri ile uyum içinde oldukları görülmektedir.

DLTS ölçümleri sonucunda GaSb/GaAs Kuantum Noktaları içeren örnek için elde edilen temel seviye aktivasyon enerjisi değeri 461 meV'tur. Bu değer kullanılarak elde edilen sonuca göre GaSb/GaAs Kuantum Noktası kullanılarak tasarlanacak Kuantum Temelli Bellek Aygıtın bilgiyi saklama süresi oda sıcaklığında 1  $\mu\text{s}$ 'dir. Bulunan bu değer daha önceki çalışmalarda [21] benzer yapıdaki örnek için bulunan sonuçla uyum içindedir.

Kuantum Noktaları içeren yapıların elektriksel özellikleri incelendiğinde, bu yapılar kullanılarak oluşturulacak bellek aygıtların, bilgiyi saklayabilecekleri ve saklama zamanlarının Kuantum Noktaları oluşturan malzemelere bağlı oldukları söylenebilir.

Elde edilen sonuçlar günümüzde kullanılan bellek cihazlarla kıyaslandığında, Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar saklama zamanları, erişim zamanları ve dayanıklılık gibi özellikleri açısından umut vermektedir. En yaygın olarak kullanılan bellek aygıtlardan DRAM'in bilgiyi saklama süresi milisaniyeler mertebesinde. InAs/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin saklama zamanı olan 0.5 ns, GaSb/GaAs Kuantum Noktası içeren örneğin saklama zamanı ise 1  $\mu\text{s}$ 'dir. Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıt için elde edilen en iyi saklama zamanı ise 1.6s'dir [26]. Bu değer DRAM'lerin saklama zamanlarından daha uzundur. Bu sonuçlar kullanılan malzemeye göre daha uzun saklama zamanlarının elde edilebileceğini gösterir.

Literatürden, farklı malzemeler kullanılarak saklama süresinin istenen seviye olan 10 yıla ulaşabilecekleri bilinmektedir [32].

Sonuç olarak, Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar, bir bellek aygıttan beklenen asgari özellikleri sağlamaktadır. İleriye yönelik hedef, saklama zamanını asgari 10 yıla çıkartmaktır.

## KAYNAKLAR

1. SZE, S.M., 2001, *Semiconductor Devices – Physics and Technology*, John Wiley & Sons, NewYork, 978-0471333722
2. ENDERLEIN, R., HORING, N., 1997 *Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices*, World Scientific, New Jersey, 978-981-02-2387-8
3. PIERRET, F. R., 1996, *Semiconductor Devices Fundamentals*, Pentice Hall, New Jersey, 0201543931
4. A, B., 60 Years of The Transistor, 2010, [online], [www.intel.com/technology/timeline.pdf](http://www.intel.com/technology/timeline.pdf) [Ziyaret Tarihi: 22 Kasım 2010].
5. MOORE, G.E., 1965, Cramming more components onto integred circuits, *Electronics*, 38, 114-117.
6. GELLER, M.P., 2007, *Investigation of Carrier Dynamics in Self-Organized Quantum Dots for Memory Devices*, Thesis (PhD), Technische Universitat Berlin, Berlin.
7. A, B., White Paper Introduction to Intel’s 32nm Process Technology, 2010, [online], [ftp://download.intel.com/pressroom/kits/32nm/westmere/intel\\_32nm\\_Overview.pdf](http://download.intel.com/pressroom/kits/32nm/westmere/intel_32nm_Overview.pdf) [Ziyaret Tarihi: 22 Kasım 2010]
8. AKÇAY, N., 2008, *Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar*, Tez (PhD), İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
9. 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.
10. BIMBERG, D.,GRUNDMANN, M. and LEDENTSOV, N. N., 2001, *Quantum Dot Heterostructures*, John Wiley & Sons, NewYork, 10158-0012
11. ARAKAWA, Y. and SAKAKI, H., 1982, Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current, *Appl. Phys. Lett.* 40, 939-941.
12. KIRSTAEDTER, N., LEDENTSOV, N. N., GRUNDMANN, M., BIMBERG, D., USTINOV, V. M., RUVİMOV, S. S., MAXIMOV, M. V., KOP’EV, 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.
13. GRUNDMANN M., 2000, The present status of quantum dot lasers, *Physica E*, 5, 167-184.
  14. 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.
  15. 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  $\mu\text{m}$  quantum dot lasers, *Appl. Phys. Lett.* 85, 843-845.
  16. HEINRICHSOR, F., RIBBAT, C., GRUNDMANN, M. and BIMBERG, D., 2000, High-power quantum-dot lasers at 1100 nm, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 556-558.
  17. MICHEL, P., KIRAZ, A., BECHER, C., SCHOENFELD, W. V., PETROFF, P. M., ZHANG, L., HU, E. and İMAMOĞLU, A., 2000, A quantum dot single-photon turnstile device, *Science*, 290, 2282.
  18. SANTORI, C., FATTAL, D., VUCKOVIC, J., SOLOMON, G. S. and YAMAMOTO, Y., Indistinguishable photons from a single-photon device, 2002, *Nature*, 419, 594.
  19. KAPTEYN, C. M. A., LION, M., HEITZ, R., BIMBERG, D., BRUNKOV, P. N., VOLOVIK, B. V., KONNIKOV, S. G., KOVSH, A. R. and USTINOV, V. M., 2000, Hole and electron emission from InAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 12.
  20. KAPTEYN, C. M. A., LION, M., HEITZ, R., BIMBERG, D., MIESNER, C., ASPERGER, T., BRUNNER, K. and ABSTREITER, G., 2000, , *Appl. Phys. Lett.*, 77, 1671.
  21. GELLER, M., KAPTEYN, C., MÜLLER-KIRSCH, L., HEITZ, R. and BIMBERG, D., 2003, 450 meV hole localization in GaSb/GaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 16.
  22. 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. Revi. B*, 73, 205331.
  23. GELLER, M., MARENT, A., STOCK, E., BIMBERG, D., ZUBKOV, V. I., SHULGUNOVA, I. S. and SOLOMONOV, A. V., 2006, Hole capture into self-organized InGaAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 232105.

24. MARENT, A., GELLER, M., BIMBERG., 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, 072103.
25. GELLER, M., MARENT, A., NOWOZIN, T., FEISE, D., PÖTSCHKE, K., AKÇAY, N., ÖNCAN, N. and BIMBERG, D., 2007, Towards an universal memory based on self-organized quantum dots, *Science Direct Phys. E*, 40, 1811-1814.
26. MARENT, A., GELLER, M., SCHLIWA, A., FEISE, D., PÖTSCHKE, K., BIMBERG, D., AKÇAY, N. and ÖNCAN, N., 2007,  $10^6$  years extrapolated hole storage time in GaSb/AlAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 242109
27. GELLER, M., MARENT, A., NOWOZIN, T., BIMBERG., AKÇAY, N. and ÖNCAN, N., 2008, A write time of 6ns for quantum dot-based memory structures, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 092108.
28. MARENT, A., GELLER, M. and BIMBERG, D., 2009, A novel nonvolatile memory based on self-organized quantum dots, *Microelectronics Journal*, 40, 492-495.
29. GELLER, M., MARENT, A., NOWOZIN, T. and BIMBERG, D., 2008, Self-organized quantum dots for future semiconductor memories, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20, 454202.
30. NOWOZIN, T., MARENT, A., GELLER, M., BIMBERG, D., AKÇAY, N. and ÖNCAN, N., 2009, Temperature and electric field dependence of the carrier emission processes in a quantum dot-based memory structure, *Appl. Phys. Lett.*, 94, 042108.
31. MARENT, A., NOWOZIN, T., GELZE, J., LUCKERT, F. and BIMBERG, D., 2009, Hole-based memory operation in an InAs/GaAs quantum dot heterostructure, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 242114.
32. BIMBERG, D., 2008, *Quantum Dots for Memories*, Semiconductor Nanostructures – Nanoscience and Technology, Springer, Berlin, page 221-235
33. KIM, H., NODA, T., KAWAZU, T. and SAKAKI, H., 2000, Control of current hysteresis effect in a GaAs/n-AlGaAs quantum trap field effect transistor with embedded InAs quantum dots, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39, 7100-7102.
34. 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.

35. TIWARI, S., RANA, F., HANAFI, H., HARTSTEIN, A., CRABBE, E. F. and CHAN, K., 1996, A silicon nanocrystal based memory, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 1377-1379.
36. 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.
37. OH, J. E. and KIM, J. W., 2000, Room-temperature memory operation of AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor with InAs quantum dots embedded in the channel, *IEEE Proceeding of the International Electron Device Meeting IEDM*, 106-109.
38. 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.
39. MÜLLER, C. R., WORSCHECH, L. and FORCHEL, A., 2007, Room temperature memory operation of electron Y-branch switch with embedded quantum dots, *Electronics Letters*, 43(24), 1-2.
40. KAPTEYN, C., 2001, *Carrier Emission and Electronic Properties of Self-Organized Semiconductor Quantum Dots*, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 3-89820-238-0.
41. 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.
42. ZHANG, J. Z. and GALBRAITH, I., 2004, Intraband absorption for InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 1934-1936.
43. WOGGON, U., 1997, *Optical Properties of Semiconductor Quantum Dots*, Springer-Verlag, Berlin, 978-3-540-60906-3.
44. 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.
45. 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.
46. 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.

47. 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.
48. 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.
49. FRANK, F. C. and VAN DER MERWE, J. H., 1949, One-dimensional dislocations, *Proc. Roy. Soc.*, 198, 205-216.
50. VOLMER, M. and WEBER, A., 1926, Nucleus Formation in Super Saturated Systems, *Zeit. Phys. Chem.*, 119, 227-237.
51. 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.
52. EISELE, H., FLEBBE, O., KALKA, T., PREINESBERGER, C., HEINRICHSORFF, F., KROST, A., BIMBERG, D. and DAHNE-PRIETSCH, M., 1999, Cross-sectional scanning-tunneling microscopy of stacked InAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 106-108.
53. 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.
54. LANNOO, M. and BOURGIN, J., 1981, *Point Defects in Semiconductor I – Theoretical Aspects*, Springer Series in Solid-State Sciences Vol. 22, Springer, Berlin, 978-0387105185.
55. BOURGIN, J. and LANNOO, M., 1983, *Point Defects in Semiconductor II – Experimental Aspects*, Springer Series in Solid-State Sciences Vol. 35, Springer, Berlin, 978-0387115153.
56. 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.
57. KITTEL C. and KROEMER, H., 1980, *Thermal Physics*, W. H. Freeman, San Francisco, 978-0716710882.
58. BRUNKOV, P. N., KONNINOV, S. G., USTINOV, V.M., ZHUKOV, A.E., EGOROV, A. YU., MAKSIMOV, M. V., LEDENTSOV, N. N. and KOP'EV, P. S., 1996, Capacitance spectroscopy of electron energy level in InAs quantum dots in a GaAs matrix, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, 30, 924-933.



59. BRUNKOV, P. N., SUVOROVA, A. A., BERT, N. A., KOVSH, A. R., ZHUKOV, A. E., EGOROV, A. Yu., USTINOV, V. M., TSATSUL'NIKOV, A. F., LEDENTSOV, N. N., KOP'EV, P. S. and KONNIKOV, S. G., 1998, Capacitance-voltage profiling of Au/n-GaAs Schottky barrier structures containing a layer of self-organized InAs quantum dots, *Fiz, Tekh, Poluprovodn.*, 32, 1229-1234.
60. BROUNKOV, P. N., POLIMENI, A., STODDART, S. T., HENINI, M., EAVES L., MAIN, P. C., KOVSH, A. R., MUSIKHIN, YU. G. and KONNIKOV, S. G., 1998, Electronic structure of self-assembled InAs quantum dots in GaAs matrix, *Applied Physics Letters*, 73, 8.
61. HENINI, M., BROUNKOV, P. N., POLIMENI, A., STODDART, S. T., MAIN, P. C., EAVES, L., KOVSH, A. R., MUSIKHIN, YU. G. and KONNIKOV, S. G., 1999, Electron and hole levels of InAs quantum dots in GaAs matrix, *Superlattices and Microstructures*, Vol. 25. No. 1/2.
62. BROUNKOV, P. N., KOVSH, A. R., USTINOV, V. M., MUSIKHIN, YU. G., LEDENTSOV, N. N., KONNIKOV, S. G., POLIMENI, A., PATANE, A., MAIN, P. C., EAVES, L. and KAPTEYN C. M. A., 1999, Emission of electrons from ground and first excited states of self-organized InAs/GaAs quantum dot structures, *Journal of Electronics Materials*, Vol. 28, No. 5.
63. 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.
64. BLOOD, P. and ORTON, J. W., 1992, *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States*, Academic Press, London, 978-0125286275.
65. KROEMER, H., CHIEN, W. Y., HARRIS, J. S. and EDWALL, D. D., 1980, Measurements of isotype heterojunction barriers by C-V profiling, *Appl. Phys. Lett.*, 36(4), 295-297.
66. 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.
67. 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<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si quantum-well structures, *Phys. Rev B*, 54, 4623-4629.
68. LANG, D. V., 1974, Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 7.
69. KIROV, K. I. and RADEV, K. B., 1981, A simple charge-based DLTS technique, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 63, 711.

70. STIER, O., GRUNDMANN, M., and BIMBERG, D., 1998, Electronic and optical properties of strained quantum dots modeled by 8 k.p theory, *Phys. Rev B*, 59, 5688-5701.

## ÖZGEÇMİŞ

### GENEL

Adı : İsmail Fırat Arıkan  
Soyadı : ARIKAN  
Uyruğu : T.C.  
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 25.10.1985  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dil : İngilizce  
Ev Adresi : Çiğdem Mahallesi Caferağa Sokak Fıstık Dibi No:1 Beykoz,  
İstanbul  
Mail : [ifarikan@gmail.com](mailto:ifarikan@gmail.com)

### EĞİTİM

Yüksek lisans (2008- ), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisans (2002-2008) , İstanbul Üniversitesi Fen Fakóltesi Fizik Bölümü  
Lise (1999-2002) , Paşabahçe Ferit İnal Lisesi

### HOBİLER

Kitap  
Müzik  
Go