

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KUANTUM NOKTA TEMELLİ BELLEK YAPILARDA KUANTUM  
NOKTALARININ ELEKTRONİK YAPISININ DERİN SEVİYE GEÇİŞ  
SPEKTROSKOPİSİ İLE BELİRLENMESİ**

**Türkan ÜSTÜN**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2011**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KUANTUM NOKTA TEMELLİ BELLEK YAPILARDA KUANTUM NOKTALARININ ELEKTRONİK YAPISININ DERİN SEVİYE GEÇİŞ SPEKTROSKOPİSİ İLE BELİRLENMESİ

Türkan ÜSTÜN

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilimdalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin SARI

Bu tez çalışmasında; kuantum nokta temelli bellek aygıt olabilecek GaAs/GaSb kuantum noktalı örnek ile GaAs/GaSb kuantum noktası içermeyen örneklerin elektronik özellikleri incelenmiştir. Bu incelemelerden yola çıkarak kuantum noktalarının varlığı her iki örnek için yapılan ölçümler karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Örneklerin her ikisi de aynı fiziksel koşullarda Moleküler Işın Epitaksi (MBE) sistemi ile büyütülmüştür. Kuantum noktası içeren örnekler büyütülürken Stranski-Kranstanow yöntemi kullanılarak büyütülmüştür.

Her iki örnek için 55 K ile 300 K sıcaklık aralıklarında akım-voltaj (I-V) ve sığa –voltaj (C-V) ölçümleri yapılarak derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) ile kuantum noktasının varlığı gösterildi. Kuantum noktası içeren örnek için aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. GaAs/GaSb kuantum noktası içeren örnek için lokalizasyon enerjisi (temel seviye aktivasyon enerjisi) 450 meV civarında bulundu.

**Ocak 2011, 65 sayfa**

**Anahtar Kelimeler :** Kuantum nokta temelli bellek aygıtlar, derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS)

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **DETECTION OF ELECTRONIC STRUCTURE OF QUANTUM DOTS BASED ON FLASH MEMORY STRUCTURES VIA DEEP LEVEL TRANSIENT SPECTROSCOPY**

Türkan ÜSTÜN

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics Engineering

Supervisor: Doc. Dr. Hüseyin SARI

In this thesis work, the samples which can be used for quantum dots based on flash memory devices having with GaAs/GaSb and without GaAs/GaSb quantum dots of electronic structure have been investigated. In this researches show the existence of quantum dots with compare both samples.

The samples have been grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE) in the same physical condition. The sample which includes the quantum dots have been grown by Stranski - Kranstanow method.

For each one of the two samples, the current-voltage (I-V) and the capacity-voltage measurements have been done between 55 K-300 K. The existence of quantum dots was showed by Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS). The activation energy of the quantum dots is determined from DLTS. The localization energy (ground state activation energy) of the GaAs/GaSb quantum dots was found to be 450 meV.

**January 2011, 66 pages**

**Key Words:** Quantum dots based on flash memory, deep level transient spectroscopy (DLTS)

## TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmanın hazırlanmasında, beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de bana destek olan Ankara Üniversitesi fizik mühendisliği anabilim dalı öğretim üyesi sayın danışman hocam Doç. Dr. Hüseyin SARI'ya, bunun yanında bu çalışmanın gerçekleşmesine olanak sağladığı ve misafirperverliği için Berlin Teknik Üniversitesi Katihal Fiziği Enstitü Direktörü Prof. Dr. Dieter BİMBERG'e, ayrıca Berlin Teknik Üniversitesi'nde deneysel çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları yardım ve yönlendirme için Andreas MARENT, Tobias NOWOZIN ve Annika HÖGNER'a, Ankara Üniversitesi, Avrupa Birliği Eğitim Programları Koordinatörlüğü'ne, yurt dışında bulunduğum süre içerisinde bana manevi destek sağlayan aileme, bu çalışma boyunca bana büyük motivasyon kaynağı olan Erkan ERCAN'a, ve beni yalnız bırakmayan tüm dostlarıma en derin duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Socrates Erasmus Değişim Programı kapsamında desteklenmiştir.

Türkan ÜSTÜN

Ankara, Ocak 2011

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
1.GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Düşük Boyutlu Yarıiletken Heteroyapılar.....	4
2.2 Kuantum Noktaları.....	8
2.2.1 Kuantum noktaları fabrikasyon teknikleri.....	10
2.2.2 Kuantum noktalarının elektriksel özellikleri.....	14
2.2.3 Kuantum noktalarından taşıyıcı yayınlanması.....	15
2.2.3.1 Termal uyarılma.....	15
2.2.3.2 Tünelleme.....	16
2.2.3.3 Fononlar yardımıyla tünelleme.....	17
2.2.3.4 Optik uyarılma.....	18
2.3 Yarıiletken Bellek Aygıtlar.....	19
2.3.1 DRAM.....	19
2.3.2 Flaş bellekler.....	20
2.3.3 Kuantum noktaları temelli flaş bellekler.....	21
2.4 Arınma Bölgesi.....	24
2.4.1 p-n eklemi.....	25
2.4.2 Arınma bölgesi sığası.....	27
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	29
3.1 Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (DLTS).....	29
3.2 Yük Seçici Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi.....	33
3.3 Malzeme Büyütme Yöntemleri.....	34
3.3.1 Moleküler ışın epitaksi.....	35
3.4 Örneklerin Yapısı.....	38
3.4.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örnek (TW454).....	38
3.4.2 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örnek (TW455).....	39

<b>3.5 DeneYlerde Kullanılan Ölçüm Yöntemleri.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.1 Akım-voltaj.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.2 Sığa-voltaj.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.3 DLTS.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 DeneY Düzenekleri.....</b>	<b>42</b>
<b>3.6.1 Akım-voltaj (I-V) deneY düzeneği.....</b>	<b>42</b>
<b>3.6.2 Sığa-voltaj (C-V) deneY düzeneği.....</b>	<b>43</b>
<b>3.6.3 DLTS DeneY düzeneği.....</b>	<b>44</b>
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örneğin (TW454) akım-voltaj ölçüm sonuçları.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örneğin (TW455) akım-voltaj (I-V) ölçüm sonuçları.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.3 Örneklerin Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Sığa-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örneğin (TW454) sığa-voltaj (C-V) ölçüm sonuçları.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örneğin (TW455) sığa-voltaj (C-V) ölçüm sonuçları.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.3 Örneklerin Sığa-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 DLTS Ölçüm Sonuçları ve Aktivasyon Enerjisi.....</b>	<b>59</b>
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>65</b>

## SİMGELER DİZİNİ

$D(E)$	Durum yoğunluğu
$D_{min}$	Kuantum noktası için kritik çap
$E_2$	Uyarılmış seviye
$E_1$	Taban seviye
$E_C$	İletkenlik bandı
$E_V$	Valans bandı
$E_g$	Yasak bant aralığı
$E_F$	Fermi seviyesi
$E_1^{QD}$	Kuantum noktasının sahip olduğu birinci enerji seviyesi
$E_A$	Aktivasyon enerjisi
$\epsilon$	Ortamın dielektrik sabiti
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik sabiti
$h$	Planck sabiti
$k_B$	Boltzman sabiti
$N_D$	Donör konsantrasyonu
$N_A$	Akseptör konsantrasyonu
$n_{QD}$	Kuantum noktasındaki elektron yoğunluğu
$m^*$	Etkin kütle
$F$	Elektrik alan
$K$	Kelvin
$T$	Sıcaklık

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Boyutlara bağlı olarak yarıiletken yapıların durum yoğunlukları.....	6
Şekil 2.2 III-V ve II-V grubu yarıiletkenler için örgü sabitinin bant boşluğu ile değişimi.....	7
Şekil 2.3 İki farklı yarıiletkenin oluşturduğu heteroyapılarda olası bant uyumu tipler....	8
Şekil 2.4 lithografi + oyma işlemleriyle kuantum noktalarının elde edilmesi.....	11
Şekil 2.5 Kendiliğinden organize olan yapıların farklı heteroepitaksi yöntemleri.....	13
Şekil 2.6 Tip I bant yapısına sahip InAs/GaAs kuantum noktası sistemi ile Tip II bant yapısına sahip GaSb/GaAs kuantum noktası sisteminin şematik gösterimi...	14
Şekil 2.7 Uygulanan F elektrik alanı altında termal uyarılma yoluyla taşıyıcı yayınlanması.....	16
Şekil 2.8 Uygulanan F elektrik alanı altında tünelleme yoluyla taşıyıcı yayınlanma süreci.....	17
Şekil 2.9 Uygulanan F elektrik alanı altında Fononlar yardımıyla tünelleme [termal uyarılma (1) + tünelleme (2) ] yoluyla taşıyıcı yayınlanma süreci.....	18
Şekil 2.10 Uygulanan F elektrik alanı altında optik uyarılma yoluyla taşıyıcı yayınlanmasüreci.....	18
Şekil 2.11 DRAM hücresi.....	20
Şekil 2.12 Flaş Bellek yapısı.....	21
Şekil 2.13 Taşıyıcıları holler olan bir kuantum nokta temelli bellek aygıtta yazma, silme ve depolama süreçleri.....	22
Şekil 2.14 Taşıyıcıları elektronlar olan bir kuantum nokta temelli bir flaş bellekte yazma, silme ve depolama süreçleri.....	23
Şekil 2.15 Kuantum nokta temelli bir bellek aygıt yapıda okuma süreç yapısı.....	24
Şekil 2.16 p-n eklemi, 2. Arınma bölgesi, 3. Elektrostatik potansiyel.....	26
Şekil 3.1 Bir p <sup>+</sup> -n diyot içine gömülmüş kuantum noktaları için DLTS çalışma döngüsü.....	30
Şekil 3.2 DLTS deneyi çalışma prensibi.....	31
Şekil 3.3 Yük seçici derin seviye geçiş spektroskopisi çalışma döngüsü.....	33
Şekil 3.4 Moleküler Işın Epitaksi (MBE) sistemi.....	36
Şekil 3.5 MBE tekniği ile büyütülen GaAs / GaSb kuantum noktaları içeren (TW454) örnek yapısı.....	38
Şekil 3.6 MBE tekniği ile büyütülen referans (TW454) örnek yapısı.....	39
Şekil 3.7 n <sup>+</sup> -p ekleminin kuantum noktaları içermediği durumdaki C-V karakteristiği ile aynı eklemin kuantum noktaları içerdiği durumdaki C-V ölçümleri karşılaştırması.....	41
Şekil 3.8 Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği.....	42
Şekil 3.9 Sığa-Voltaj (C-V) deney düzeneği.....	43
Şekil 3.10 DLTS deney düzeneği.....	44
Şekil 4.1 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 55 K için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	45
Şekil 4.2 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 100 K için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi .....	46

Şekil 4.3 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 200 K için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	46
Şekil 4.4 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için oda sıcaklığında (300K) için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	47
Şekil 4.5 GaAs/GaSb kuantum noktaları içermeyen referans örneği (TW455) için 55 K' de alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	48
Şekil 4.6 Referans örneği (TW455) için 100 K' de alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	48
Şekil 4.7 Referans örneği (TW455) için 200 K' de alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi.....	49
Şekil 4.8 Referans örneği (TW455) için 300 K' de (oda sıcaklığı) alınan Akım-Voltaj grafiğ değişimi.....	50
Şekil 4.7 Referans örneği (TW455) ile kuantum noktaları içeren örneğin (TW454) 300 K için I-V ölçüm karşılaştırmaları.....	51
Şekil 4.8 Referans örneği (TW455) ile kuantum noktaları içeren örneğin (TW454) 55 K için I-V ölçüm karşılaştırmaları.....	49
Şekil 4.9 Oda sıcaklığında (300K), farklı frekanslar için elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi.....	50
Şekil 4.10 250 K için, farklı frekanslarda elde edilen sığa-voltaj değişim eğrisi.....	52
Şekil 4.11 100 K için, farklı frekanslarda elde edilen sığa-voltaj değişim eğrisi.....	52
Şekil 4.12 55 K için, farklı frekanslarda elde edilen sığa-voltaj değişim eğrisi.....	53
Şekil 4.13 300 K, 1 MHz için elde edilen sığa-voltaj değişim eğrisi (üstte) ve kuantum noktalarının boş ve dolu olduğu voltaj değerlerini gösteren sığa- voltaj eğrisinin ikinci türevi (altta).....	54
Şekil 4.14 300 K, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi.....	55
Şekil 4.15 200 K, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi.....	55
Şekil 4.16 100 K, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi.....	56
Şekil 4.17 100 K, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi.....	56
Şekil 4.18 300 K' de, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen kuantum noktası içeren örnek (TW454) ile referans örneğinin (TW455) sığa-voltaj değişim eğrileri.....	57
Şekil 4.19 300 K ve 1 MHz için TW454 kodlu (kuantum noktası içeren) örnek ile TW455 kodlu referans örneğinin C-V grafikleri.....	58
Şekil 4.20 200 K ve 1 kHz için TW454 kodlu (kuantum noktası içeren) örnek ile TW455 kodlu referans örneğinin C-V grafikleri.....	58
Şekil 4.21 TW454 kodlu örnek için DLTS ölçüm sonuçları.....	59
Şekil 4.22 TW454 kodlu örnek için aktivasyon enerjisi grafiği.....	60

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, en büyük problemlerden biri bilginin taşınması ve saklanmasıdır. Modern çağda amaç; kapasitesi daha fazla ve daha hızlı aygıtlar yapabilmektir. Bu nedenle düşük boyutlu yarıiletken aygıtlar üzerine yapılan araştırmalar her geçen gün artış göstermektedir.

Mikroelektronik aygıtlarda, performans artışı, boyutları küçülterek daha küçük alanlara daha çok devre elemanı yerleştirerek mümkündür. Bu sayede, bilgi teknolojilerinde güç tüketimi azaltılmış, işlem hızı ve bellek kapasitesi arttırılmıştır.

Yarıiletken endüstrisinde boyutların küçülmesi, kuantum mekaniğinin etkin olduğu boyutlara ulaşıldığında bazı fiziksel sınırlamalara neden olur. Örneğin; Dinamik rastgele erişimli bellek (DRAM) için boyutların küçülmesiyle, tünelleme olasılığının artması, sızıntı akımlara ve gürültüye neden olabilir.

Nanometre boyutundaki yarıiletken aygıtların üretiminde iki yaklaşım söz konusudur. Bunlardan biri; yukarıdan-aşağıya yaklaşıklığı (top-down approach), diğeri ise; aşağıdan-yukarıya yaklaşımı (bottom-up approach) dır. Yukarıdan-aşağıya yaklaşıklığı, lithohgrafi ve aşındırma yöntemlerine ihtiyaç duyarken, aşağıdan-yukarıya yaklaşımı lithografiye ihtiyaç duymaz. Bu nedenle aşağıdan-yukarıya yaklaşımı daha fazla tercih edilir. Bu yaklaşımda yapılar; atom ya da moleküllerin belli bir düzenle dizilmesiyle ya da kimyasal reaksiyonlar yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde, atomlar ya da moleküller kendiliğinden organize olarak, adacık oluştururlar. Bu yaklaşıklıkta büyütme işlemi, bir malzeme üzerine farklı örgü sabitine sahip başka bir malzemenin büyütülmesiyle gerçekleştirilir. Örgü sabitleri arasındaki fark nedeniyle örgü gerilmeleri üç boyutta sınırlandırılmış sıfır boyutlu yapılar meydana getirir. Kuantum noktaları sıfır boyutlu yapılar olup, çoğu zaman yapay atom olarak da adlandırılırlar.

Kuantum noktalarındaki bu sınırlandırmalardan yola çıkarak üstün performanslı pek çok aygıtın yapılabileceği düşünülmektedir. Kuantum noktalarının hem optoelektronik hem de nanoelektronik alanda pek çok uygulaması mevcuttur. Kuantum noktalarının

kullanılmasıyla bu uygulamalara iyi bir örnek de kuantum nokta temelli bellek aygıtlar olacaktır.

Günümüz elektronik aygıt endüstrisine iki temel bellek aygıt hakimdir. Bunlardan biri DRAM diğeri ise flaş belleklerdir. DRAM temel hafıza olarak günümüz bilgisayarlarında kullanılmakta olup, geçici hafızaya sahiptir. Yani güç kesildiği zaman sahip olduğu bilgileri yitirmektedir. Bu nedenle DRAM'lerde depolanan bilgi her 10 milisaniyede bir tekrar yazılmalıdır. Bunun yanında erişim zamanları 20 ns den küçük olup, hızlı çalışan ve az güç harcayan bellek aygıtlardır. Ayrıca CPU ile kıyaslandığında hız ve performans açısından DRAM'ler geride kalmaktadır. Flash Bellekler ise kalıcı hafızaya sahip olup, herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymadan 10 yıldan fazla bir süre bilgi saklayabilmektedirler. Bu nedenle cep telefonlarında, mp3 çalarlarda ve dijital kameralarda kullanılmaktadırlar. Flaş belleklerde sadece bilginin okunması, yazılması ve silinmesi süreçlerinde enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu açıdan DRAM ler ile kıyaslandığında üstünlüğü vardır. Flaş belleklerin en büyük dezavantajı ise 10-20 ms civarında olan erişim hızlarıdır.

O halde yarıiletken bellek endüstrisinin sahip olacağı evrensel bellek hem DRAM in hem de flash belleğin üstün özelliklerini bünyesinde barındırmalıdır.

Böyle bir belleğin;

- Kalıcı hafızaya sahip
- Oldukça hızlı (erişim zamanı nanosaniyeler mertebesinde)
- Dayanıklı

olması gerekmektedir.

İşte bu özelliklere sahip evrensel bir belleğin yapımı kuantum noktaları ile mümkündür. Kuantum noktalarının kullanılmasıyla yapılabilecek belleklerde, malzemelerin özelliğine göre, hapsedtikleri bir ya da birkaç taşıyıcıyı oda sıcaklığında yıllarca taşıyabilirler.

Bu çalışmadaki amaç, kuantum nokta temelli bellek yapısındaki GaAs/GaSb kuantum noktalı örnek ile GaAs/GaSb kuantum noktası içermeyen örneklerin karşılaştırmalarının yapılarak kuantum noktalarının varlığının tespit edilmesiyle, bu malzemelerin evrensel bellek aygıt olarak kullanılabilirliklerinin araştırılmasıdır.

Bu çalışmada, kuramsal temeller kısmında düşük boyutlu heteroyapılar ve kuantum noktaları hakkında temel bilgiler verilmiş ve kuantum nokta temelli bellek aygıtların çalışma prensibi üzerinde durulmuştur. Malzeme ve yöntem kısmında; Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (DLTS) , örneklerin yapıları ve ölüm düzenekleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bulgular ve tartışma kısmında deney sonuçları gösterilmiş, sonuç kısmında ise deney sonuçları hakkında yorumlar yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Düşük Boyutlu Yarıiletken Heteroyapılar

Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, taşıyıcı hareketlerinin belli doğrultularda sınırlandırılmasıyla meydana gelen yapılardır. Boyutların sınırlandırılması malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Sınırlandırma; taşıyıcıların de Broglie dalga boyu mertebesinde yapılır. Taşıyıcıların boyutları de Broglie mertebesinde olduğunda kuantum etkisi gözlenmeye başlar.

de Broglie dalga boyu:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m^* k_B T}} \quad (2.1)$$

formülü ile verilir. Burada  $m^*$  elektronların ya da boşlukların (hole) etkin kütlesini ve  $k_B$  ise Boltzmann sabitini ifade etmektedir.

Düşük boyutlu sistemler; iki boyutta kuantum kuyuları, bir boyutta kuantum telleri ve sıfır boyutta kuantum noktaları olarak bilinir.

Yarıiletken yığmsal (bulk) yapılarda uzayda hiçbir sınırlandırma olmadığından taşıyıcılar iletim ve değerlik bandında sürekli enerji seviyelerde bulunurlar ve boyutların sınırlandırılması ile taşıyıcılar sürekli enerji seviyeleri yerine kuantize enerji seviyelerinde yer almaya başlarlar. Düşük boyutlu sistemler, kontrollü bir şekilde bant enerjilerini değiştirmeye olanak sağlar. Taşıyıcıların uzaysal olarak sınırlandırılması sayesinde dağılma ilişkisi sınırlandırma doğrultusu boyunca değiştirilir.

Üç boyutta durum yoğunluğunun değişimi boyutlara bağlı olarak değişmezken, iki, bir ve sıfır boyutlu sistemlerde durum yoğunluğu boyutlara bağlı olarak değişmektedir.

Üç, iki, bir ve sıfır boyutlarda durum yoğunluğu denklemleri;

$$D^{(3)}(E) = 2 \frac{2\pi}{(2\pi)^3} \left[ \frac{2m^*}{\hbar^2} \right]^{3/2} E^{1/2} \quad (2.2)$$

$$D^{(2)}(E) = 2 \frac{\pi}{(2\pi)^2} \frac{1}{L_z} \left[ \frac{2m^*}{\hbar^2} \right] E^0 \quad (2.3)$$

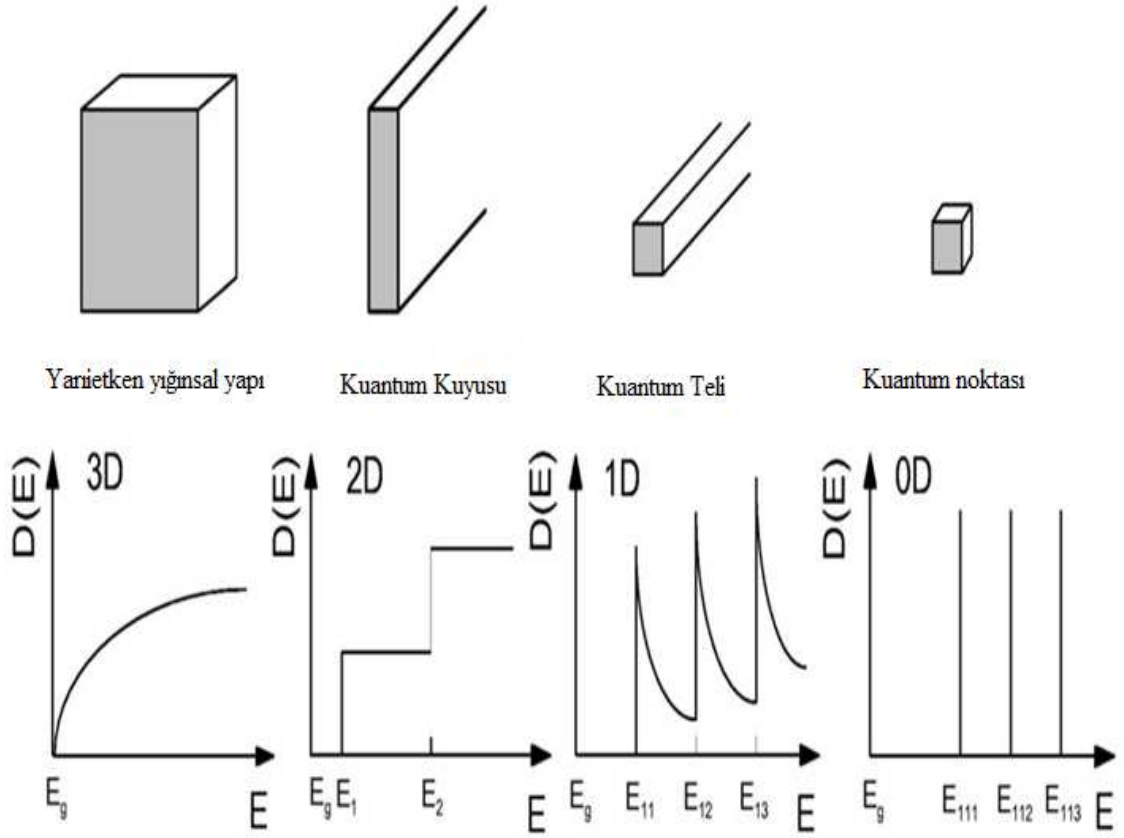
$$D^{(1)}(E) = 2 \frac{1}{2\pi} \frac{1}{L_z L_y} \left[ \frac{2m^*}{\hbar^2} \right]^{1/2} E^{-1/2} \quad (2.4)$$

$$D^{(0)}(E) = 2 \frac{1}{L_x L_y L_z} \delta ( E - E_i ) \quad (2.5)$$

şeklinde verilir. Burada  $m^*$  elektronların ya da boşlukların etkin kütlelerini,  $E$  enerjiiyi,  $\delta ( E - E_i )$  delta fonksiyonunu,  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  ise sırası ile x, y ve z doğrultusundaki uzunlukları göstermektedir. Durum yoğunluğu formüllerinde de görüldüğü üzere boyutların değiştirilmesiyle taşıyıcıların enerji durumları ve dolayısıyla taşıyıcılara ilişkin bant genişliği tasarlanabilir.

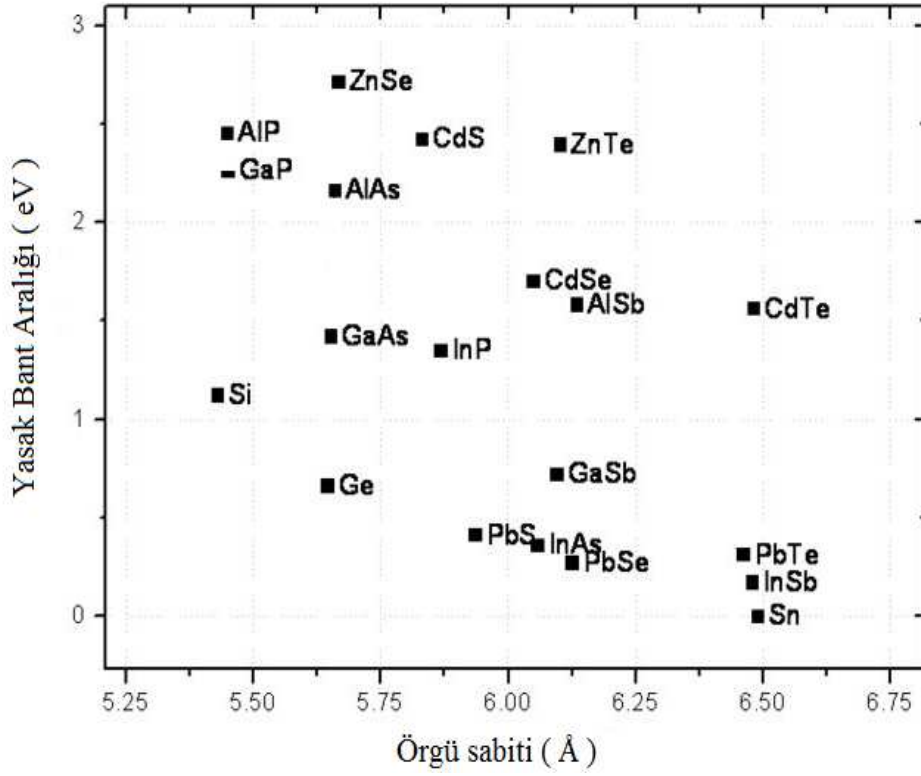
Kuantum etkisinin görüldüğü doğrultularda taşıyıcı hareketi sınırlandırılmış ve enerji seviyeleri kuantize olmuştur. Bunun nedeni boyutların düşürülmesiyle değişen durum yoğunluklarıdır. Durum yoğunluğu bir sistemdeki uygun enerji seviyelerinin sayısını tanımlar. Yarıiletkenlerdeki taşıyıcı konsantrasyonunun ve taşıyıcıların enerji dağılımının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Taşıyıcı hareketi tek bir doğrultuda sınırlandırılmışsa bu kuantum kuyusu olarak bilinir ve iki boyutta durum yoğunluğuna sahip böyle bir sistem için sınırlamanın olmadığı doğrultularda durum yoğunluğu süreklilik göstermektedir. Sınırlandırmanın olduğu doğrultuda ise durum yoğunluğu basamak fonksiyonu şeklinde değişmektedir. Bunun anlamı, belirli enerji değerleri için durum yoğunluğunun sabit olmasıdır.

Yarıiletken heteroyapılar, yasak bant aralığı farklı yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulurlar. Bu yapılar; bant aralığı büyük olan yarıiletken malzeme üzerine, bant aralığı daha küçük olan yarıiletken malzemenin büyütülmesiyle iletkenlik ve valans bantlarındaki taşıyıcılar için potansiyel kuyusu oluşturur.



Şekil 2.1 Boyutlara bağlı olarak yarıiletken yapıların durum yoğunlukları  
[\(http://www.opto.e-technik.uni-ulm.de/lehre/cs/, 2010\)](http://www.opto.e-technik.uni-ulm.de/lehre/cs/)

Metal organik kimyasal buharlaştırma depozit (MOCVD) ve Moleküler ışın epitaksisi (MBE) yöntemleri farklı elektronik özelliklere sahip yarıiletken malzemelerin büyütülmesinde kullanılan epitaksiyel büyütme teknikleridir. Bu gibi yöntemlerle oluşturulmuş yarıiletken kristallere heteroyapı, bu iki malzeme arasındaki arayüz de heteroeklem denir. Heteroeklemler, heteroyapıların elektronik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemli olup, heteroyapılar ile istenilen elektronik ve optik özelliklere sahip cihazların tasarlanması mümkündür. Heteroeklemlerin, yarıiletkenlerin tasarım ve üretimde kullanılmasıyla yüksek performanslı birçok yeni aygıt geliştirilmiştir (Akçay 2008). Örneğin 1963 yılında Alferov ve Kroemer tarafından geliştirilen çift heteroeklemlili (DHS) lazer, 2000 yılında Nobel ödülüne layık görülmüştür. 1969 yılında bulunan bu lazerin yapımında galyum arsenik (GaAs) ve alüminyum arsenik (AlAs) yarıiletkenleri kullanılmıştır. Bunlar gibi periyodik cetvelde yer alan III-V grubu yarıiletkenler optoelektronik cihazların geliştirilmesinde oldukça önemli rol oynamaktadır.

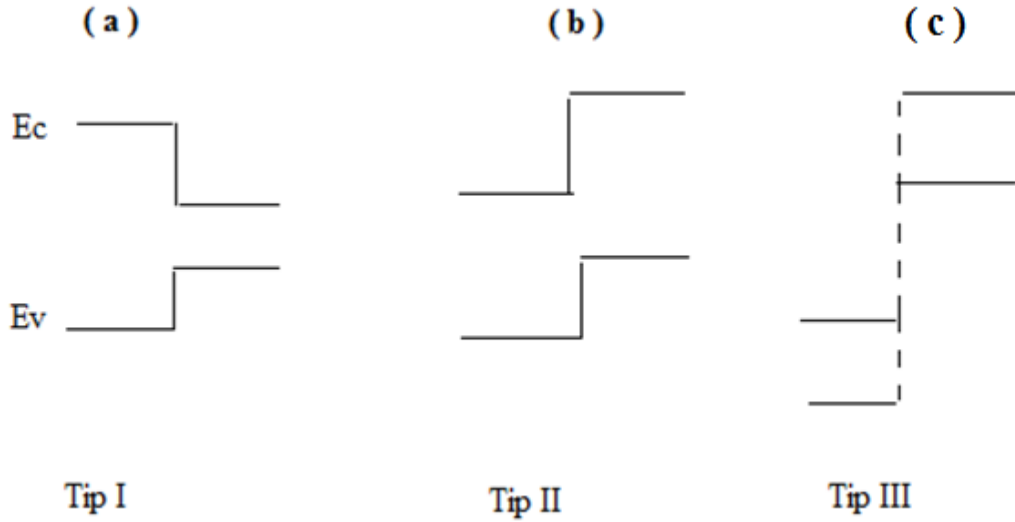


Şekil 2.2 III-V ve II-V grubu yarıiletkenler için örgü sabitinin bant boşluğu ile değişimi ([http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandgap\\_vs\\_Lattice\\_Const\\_for\\_Semiconductors\\_5.25-6.74\\_Angstrom.jpg#file.](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandgap_vs_Lattice_Const_for_Semiconductors_5.25-6.74_Angstrom.jpg#file.), 2010)

Epitaksiyel büyütme teknikleri kullanılarak, ikili veya üçlü yarıiletken bileşikler oluşturulabilir. Örneğin;  $Al_{1-x}Ga_xAs$ , içerisinde barındırdığı AlAs ve GaAs yüzdelere bağlı olarak bant aralığı ayarlanabilir. Şekil 2.2’de III-V ve II-VI grubu yarıiletkenler için bant aralığı örgü parametresine bağlı olarak gösterilmiştir. III-V grubu ve II-VI grubu yarıiletkenlerin ikili ve üçlü kombinasyonları ile bant yapılarının kontrol edilmesiyle arzulanan yapıda yarıiletken aygıtlar yapmak mümkündür.

Bant aralığının yanında, yarıiletken heteroyapılar için arayüzdeki iletim ve valans bantı enerji pozisyonları oldukça önemlidir. Bant aralığı iletim ve valans bantındaki bant süreksizliğini (band offset) kontrol eder. İki yarıiletkenin ara yüzeyi arasında bant kenarındaki süreksizliğe bant süreksizliği denir. Şekil 2.3’de yarıiletken heteroyapılarda oluşan farklı tiplerdeki bant uyumu gösterilmiştir.

Tip I bant uyumunda; küçük bant aralığına sahip yarıiletkenin bant boşluğu, büyük bant aralığına sahip yarıiletkenin bant aralığı içerisinde olmalıdır. Bu bant hizalama genel olarak InAs/GaAs, GaAs/AlGaAs ve GaSb/AlSb gibi heteroyapılarda görülmektedir.



Şekil 2.3 İki farklı yarıiletkenin oluşturduğu heteroyapılarda olası bant uyumu tipleri

Tip II bant uyumuna sahip heteroyapılarda ise ikinci yarıiletkenin bant boşluğu tamamiyle birinci yarıiletkenin bant boşluğu içerisinde yer almaz. Fakat iki yarıiletkenin enerji değerlerinin üst üste geldikleri görülür. Bu tip bant hizalama GaSb/GaAs sistemleri için önemli bir karakteristiktir. Tip III bant uyumu ise iki malzeme arasında aralık bırakılır ve her iki yarıiletkenin bant aralıklarındaki enerji değerlerinin üst üste gelmedikleri görülür.

## 2.2 Kuantum Noktaları

Kuantum noktaları; elektronların ya da boşlukların üç boyutta (x, y, z yönlerinde) sınırlandırılmasıyla oluşan düşük boyutlu heteroyapılardır. Bu yapılar birkaç nanometre mertebesinde olup, elektriksel ve optiksel özellikleri açısından çoğunlukla 'yapay atom' olarak da adlandırılmaktadırlar.

Kuantum noktalarına olan ilgi son yirmi yıldır iki sebepten dolayı artış göstermektedir. Birincisi, bu yapıların birkaç nanometre mertebesinde olması, ikincisi ise kuantum noktalarının aynı zamanda birçok yeni fiziksel etki göstermesidir. Bu fiziksel etkiler

kuantum nokta yapılarını çok hızlı sistemler olan mikro elektronik cihazlarda teknolojik olarak çok umut verici yapar. Bu gibi sıfır boyutlu yapılar; alan transistörlerinde, bellek aygıtlarda, lazerlerde, dedektörlerde, yükselticilerde, yüksek frekanslı optik cihazlarda ve tekli foton kaynağı gibi birçok optoelektronik aygıtlarda kullanılmaktadırlar.

Bir kuantum noktasında taşıyıcıların hiçbir yöne hareketi mümkün olmayıp, taşıyıcıların de Broglie dalgaboyu bu sistemlerin kuantum etkilerini şaşırtıcı yapan hapsedilme uzunluğu ile aynı uzunluk ölçeğindedir. Kısaca, elektronların veya boşlukların ince bir yarıiletken bir tabakaya hapsedilmesi ile sağlanan boyuttaki azalmanın, taşıyıcıların hareketinde önemli değişikliklere neden olduğu görülür. Bu kural; taşıyıcıların etrafındaki boyutu iki boyutlu kuantum kuyusundan bir boyutlu kuantum teline ve en sonunda sıfır boyutlu kuantum noktasına azaltmakla gerçekleştirilebilir.

Kuantum noktalarının en önemli özelliklerinden bir diğeri de; kuantize enerji seviyelerinin boyutlarının değiştirilmesiyle ayarlanabilmesidir. Bunun nedeni boyutlara bağlı olarak değişen durum yoğunluğudur. Bu şekilde farklı enerji seviyelerinin yaratılmasıyla farklı soğurma ve yayılım spektrumuna ulaşılmış olur.

Kuantum noktalarının şekli kullanılan malzemeye bağlı olup, küre ya da piramit şeklide olabilir. Taşıyıcıları elektronlar olan küresel bir kuantum noktasının sahip olabileceği en küçük çapa 'kritik çap' adı verilir. Bir elektron seviyesi olan küresel bir kuantum noktası için kritik çap

$$D_{min} = \frac{\pi\hbar}{\sqrt{2m_e^* \Delta E_C}} \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada  $m_e^*$  elektronların etkin kütesini,  $\hbar$  planck sabitini  $\Delta E_C$  iletkenlik bant süreksizliğini göstermektedir. Örneğin; GaAs/AlGaAs in iletkenlik bandı süreksizliği [ $\Delta E_C$ ] 0,3 eV alınırsa, böyle bir sistem için küresel kuantum noktasının kritik çapı en az 4 nm olmalıdır. Bu bir kuantum noktası için en düşük büyüklük olup bu büyüklüğe sahip bir kuantum noktasının sahip olduğu enerji seviyeleri arasındaki fark oldukça küçüktür. Bu nedenle elektronlar en küçük bir termal etkiyle bile kuantum noktasından ayrılabilirler.

Kuantum noktaları için alt sınır olduğu gibi bir de üst sınır vardır. Enerji seviyelerinin termal nüfus yoğunluğu kuantum noktalarının büyüklüğü için bir kısıtlama getirir. Bir kuantum noktası için enerji seviyeleri ile sıcaklık arasındaki bağıntı;

$$k_B T \leq \frac{1}{3} [E_2^{QD} - E_1^{QD}] \quad (2.7)$$

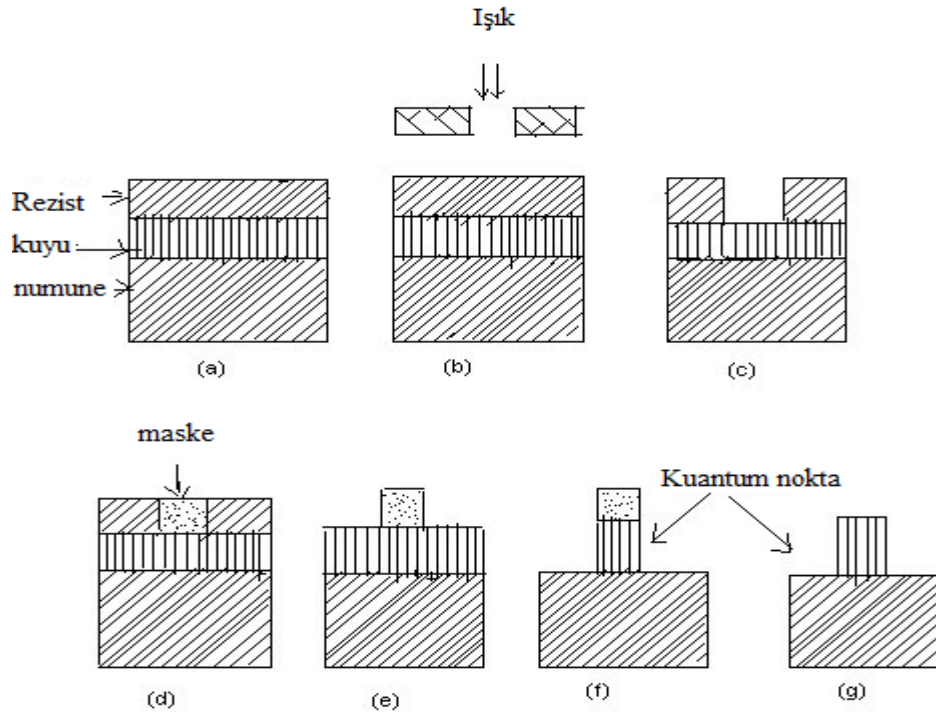
şeklindedir. Bu bağıntıdan yola çıkarak GaAs/AlGaAs gibi taşıyıcıları elektrolar olan bir sistemde kuantum noktalarının maksimum büyüklüğü 12 nm olup, InAs/AlGaAs gibi bir sistem için kuantum noktalarının büyüklüğü maksimum 20 nm olmalıdır. Kısacası kuantum noktalarının alt sınırı bant süreksizliğinden kaynaklanırken, üst sınır ise sıcaklıktan gelir.

### 2.2.1 Kuantum noktaları fabrikasyon teknikleri

Sıfır boyutlu sistemlerin fabrikasyonunda ilk olarak lithografi tekniği ile, yukarıdan aşağıya yaklaşımı (top-down approach) kullanılmıştır. Yine bu yöntemde optik lithografi, X-Ray lithografi, elektron ışın lithografisi (electron beam lithography) ve taramalı tünelleme mikroskobu (STM) kuantum kuyulu yapıların aşındırılmasında ve şekillendirilmesinde kullanılmışlardır.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımında, kuantum noktaları ince büyütülmüş tabakanın birleştirilmesiyle ve lithografi tekniğiyle oluşturulur. Bu yaklaşımda lithografi + oyma (etching) ile oluşturulmuş kuantum noktasına örnek olarak, nm kalınlığında katkılanmış GaAs üzerine örgü sabiti hemen hemen GaAs ile aynı olan AlGaAs büyütülür. Bu iki malzemenin örgüsü birbirine uyduğu için çok az bir gerginlik olacaktır. GaAs burada kuantum kuyusu oluştururken, AlGaAs bariyer görevi görür. Dolayısıyla, GaAs/AlGaAs tabakasında kesikli enerji seviyeleri oluşturulmuş olur. Kuantum kuyusu öyle incedir ki, en düşük alt bant elektronlar tarafından işgal edilmiştir. Elektronlar kuyuda yalnız yanlamasına hareket edebilirler. Bu yöntemin aşamalarında bir veya daha fazla kuantum kuyusu içeren GaAs/AlGaAs numunesinin yüzeyi fotorezist denilen ışığa duyarlı bir solüsyon ile kaplanır (a). Elde edilmek istenen nanoyapı için önceden maske tasarlanmalıdır. Maske yardımıyla ışığa tutulan numune, oluşturulacak olan

nanoyapının şekline karşılık gelir (d). Çünkü fotorezist denilen ışığa duyarlı malzeme sayesinde ışık gören yerler çözünmüş, ve maske yardımıyla istenilen nanoyapı aşındırılarak elde edilebilmiştir (e). Kesilen bölgede maske kaldırıldıktan sonra, tüm yüzey ince metal tabaka ile kaplanır. Özel bir çözücü kullanılarak, fotorezist ve koruyucu metal tabaka kaldırılır. Metal tabakanın kaldığı yer olan daha önce kesilen bölge dışında numunenin temiz bir yüzeyi elde edilir. Daha sonra, maskeyle korunmayan bölgenin kimyasal olarak oyulmasıyla (etching), kuantum kuyularının kesildikten sonra çıkan parçalarını içeren ince sütunlar oluşturulur (g). Bu yolla, ilk olarak kuantum kuyusunda hapsedilmiş elektronların hareketi, çapı 10-100 nm mertebesinde olan küçük sütunlara kısıtlanmıştır.



Şekil 2.4 lithografi + oyma işlemleriyle kuantum noktalarının elde edilmesi  
(<http://knol.google.com/k/nanofabrication#>, 2010)

Ancak yukarıdan-aşağıya yaklaşıklığı ile üretilen kuantum noktalarında çözünürlük yeterince iyi olmayıp, şekillendirme ve oyma işlemleri uygulanırken örneklerde kusur (defect) ve arayüzeylerde hasar oluşabilmektedir. Bu nedenle günümüzde kuantum noktalarını oluşturmak için sıklıkla kullanılan bir diğer fabrikasyon yöntemi

kendiğinden organize (self organized) olma yani aşağıdan yukarıya yaklaşımıdır . Bu yöntemde temel olarak küçük örgü sabitli yariletken üzerine daha büyük örgü sabitli yariletkenin büyütülmesiyle kuantum noktaları oluşturulur. Farklı örgü sabitlerine sahip iki malzeme büyütülürken, alttaşın ve üzerine büyütülen filmin gerilme enerjileri oldukça önemlidir. Çünkü gerilme enerjisi büyütülen tabakanın kalınlığı attıkça artar ve belli bir kritik kalınlıktan sonra dislokasyonlar meydana gelir.

Gerilme Enerjisi

$$E = \frac{a_a - a_f}{a_f} \quad (2.8)$$

ile verilir. Burada  $a_a$  alttaşın örgü sabiti olup,  $a_f$  ise filmin örgü sabitidir.

Kritik kalınlık ise

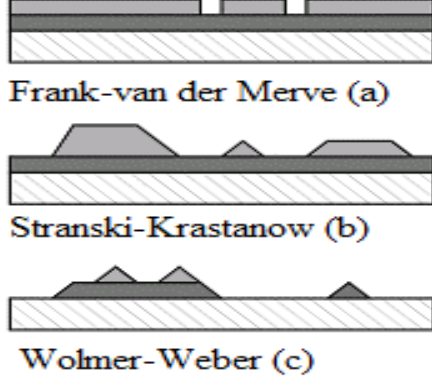
$$t_k = \frac{a_a}{2 \epsilon} \quad (2.9)$$

şeklindedir.

Burada kuantum noktalarının oluşumu yüzey gerilmeleri nedeniyle yüzey enerjisini minimuma indirmek için kendiliğinden meydana gelir. Kendiliğinden organize olma, kullanılan malzemelerin alttaşına, arayüzeyine ve film enerjilerine bağlı olarak üç farklı metotla gerçekleştirilebilir. Bunlar Frank-van der Merwe (a), Stranski –Krastanow (b) ve Volmer – Weber (c) metotlarıdır.

Frank-van der Merwe yönteminde, kuantum nokta şekillenmesi olmadan iki boyutta tabaka tabaka büyütme yapılır. Bu yöntemde alttaş ile film arasındaki örgü sabiti farkı oldukça küçüktür. Bu nedenle atomların alttaş ile olan bağları birbirleriyle olan bağdan çok daha güçlüdür.  $\gamma_s > \gamma_f + \gamma_{sf}$  koşulları sağlandığında bu yöntemde büyütme sağlanmış olur.

Burada,  $\gamma_s$ : alttaşın yüzey enerjisini,  $\gamma_f$ : filmin yüzey enerjisini,  $\gamma_{sf}$ : alttaş-film arayüzey enerjisini göstermektedir. Alttaş ile arayüzey arasındaki gerilme düşük olup, düzgün bir yüzey elde edilir.



Şekil 2.5 Kendiliğinden organize olan yapıların farklı heteroepitaksi yöntemleri  
(<http://biointerface.org/nano/nanostructures/default.aspx>, 2010)

Volmer – Weber yönteminde ise arada yüksek bir gerilme olup, büyütme üç boyutta yapılır. Alttaş ile film arasındaki örgü sabiti farkı çok büyüktür. Filmin enerjisi yeterli olmadığı için iki boyutlu ıslak tabaka (wetting layer) oluşmaz. Bu metot  $\gamma_s < \gamma_f + \gamma_{sf}$  koşulu sağlandığında yani atomların ya da moleküllerin alttaş ile güçlü bağ kurdukları zaman gerçekleşir.

Stranski –Krastanow büyütme metotunda tabaka tabaka büyütme yapılır. İlk başta tekli gerilmiş tabaka (monolayer) meydana gelir ve kritik kalınlığa kadar iki boyutta büyüme devam eder. Kritik kalınlığa gelindiğinde iki boyutlu büyüme için gerilme enerjisi çok yüksek olur. Gerilmeyi azaltmak için üç boyutlu adalar meydana gelir. Böylelikle büyüklükleri oldukça yakın olan kuantum noktaları elde edilebilmektedir.

Eğer büyütülen malzemeler arasındaki gerilme enerjisi düşük ise, iki boyutlu büyütme (wetting layer) uzun sürer. Eğer gerilme yüksek ise ince bir iki boyutlu ıslak tabaka

(wetting layer) sonrasında üç boyutlu büyütme gerçekleşir.  $\gamma_s > \gamma_f + \gamma_{sf}$  koşulu sağlandığında bu büyütme yöntemi gerçekleşmiş olur.

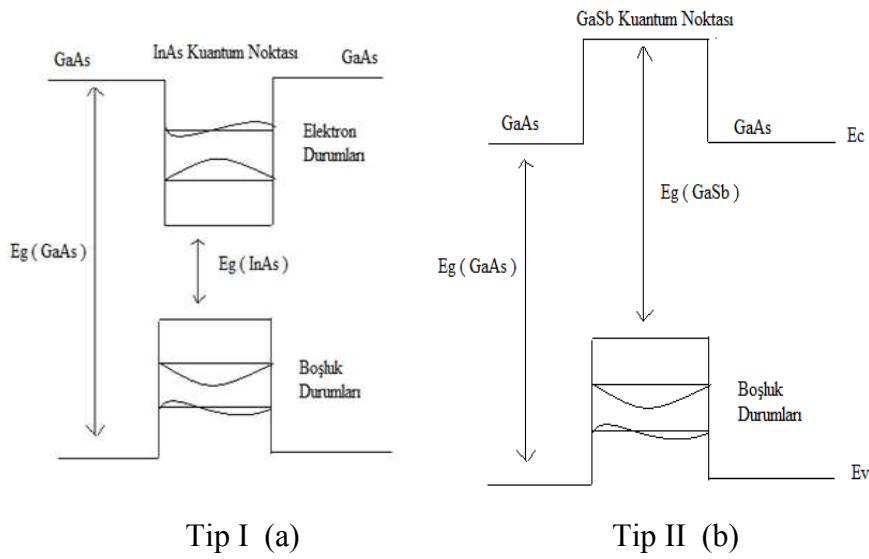
Kendiliğinden organize olan kuantum noktaları, büyütme koşullarına ve kullanılan malzemeye göre değişmekle birlikte taban genişliği 10-30 nm ve yüksekliği 2-5 nm olan piramit ya da kesik piramit şeklinde büyütülebilmektedir (Akçay 2008).

## 2.2.2 Kuantum noktalarının elektriksel özellikleri

Bir yığımsal yarıiletkende taşıyıcılar her üç doğrultuda serbestçe hareket eder. Bu tür yapılarda enerji süreklidir ve durum yoğunluğu enerjinin karekökü ile doğru orantılı olarak artar;  $D(E) \sim \sqrt{E}$ .

Kuantum noktaları elektronlar ya da boşluklar için potansiyel kuyusu oluştururlar. Kuantum noktasındaki enerji seviyeleri, kuantum noktasını oluşturan malzemeye ve kuantum noktasının büyüklüğüne bağlı olarak değişir.

Kendiliğinden organize kuantum noktalarında farklı tiplerde bant yapısı görülebilmektedir.



Şekil 2.6 Tip I bant yapısına sahip InAs/GaAs kuantum noktası sistemi ile Tip II bant yapısına sahip GaSb/GaAs kuantum noktası sisteminin şematik gösterimi (Akçay 2008)

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi Tip I bant yapısına sahip InAs/GaAs kuantum noktası sisteminde elektronlar ve boşluklar için sınırlama söz konusu iken, Tip II bant yapısına sahip GaSb/GaAs kuantum noktası sisteminde sadece valans bandında boşluklar için sınırlama getirilmiştir. Bu çalışmada bu tür örnekler kullanılmıştır.

Bant tipi ve durum yoğunluğu kuantum noktalarının elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde oldukça büyük öneme sahiptir.

### 2.2.3 Kuantum noktalarından taşıyıcı yayınlanması

Kuantum noktaları elektronlar ya da boşluklar için tuzak oluşturabilirler. Bu nedenle taşıyıcıların kuantum noktasında kalma süreleri emisyon sürecine bağlıdır. Kuantum noktalarının taşıyıcı tutabilme ve uygulanan dış elektrik alan yardımıyla taşıyıcı yayımlayabilme özellikleri sayesinde bellek aygıt olarak kullanılabilirler.

Kuantum noktasındaki bir taşıyıcı dört farklı mekanizma ile yayımlanabilir, Bunlar; i. termal uyarılma, ii. tünelleme, iii. fononlar yardımıyla tünelleme ve iv. optik uyarılma mekanizmalarıdır.

#### 2.2.3.1 Termal uyarılma

Termal uyarılma; sıcaklığa bağlı olarak, kuantum noktasındaki taşıyıcıların ne kadar süre kalabileceğini belirler.

Kuantum noktaları, taşıyıcı tutma ve uyarılma süreçleri bakımından yarıiletkenlerdeki tuzak seviyelere benzemektedirler.

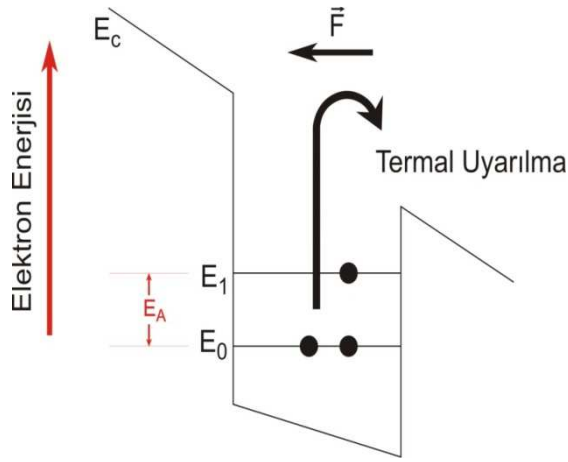
Bir kuantum noktası, termal aktivasyon enerjisi  $E_A$  olan bir tuzak seviyesi gibi elektron ya da boşluk yayımlayabilir. Termal denge durumunda uyarılma hızı, yakalanma hızına eşit olmalıdır. Denge durumunda termal yayınlama hızı elektronlar için

$$e_n(T) = \gamma_n \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^n \exp\left[-\frac{E_A^n}{k_B T}\right] \quad (2.10)$$

şeklinde olup, boşluklar için

$$e_p(T) = \gamma_p \frac{g_0}{g_1} T^2 \sigma^p \exp\left[-\frac{E_A^p}{k_B T}\right] \quad (2.11)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada  $E_A^n$  ve  $E_A^p$  elektronların ve boşlukların aktivasyon enerjisini,  $g_0$  ve  $g_1$  boş ve dolu durumların dejenerasyonunu,  $\sigma^n$  ve  $\sigma^p$  yakalama tesir kesitini (capture cross-section),  $\gamma_p$  ve  $\gamma_n$  elektron ve boşluk için sıcaklıktan bağımsız bir sabiti göstermektedir.



Şekil 2.7 Uygulanan F elektrik alanı altında termal uyarılma yoluyla taşıyıcı yayınlaması

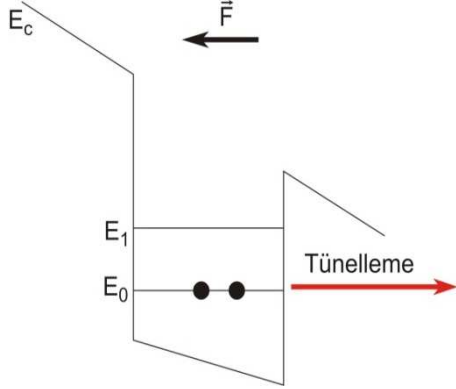
### 2.2.3.2 Tünelleme

Yarıiletkenlere dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında, enerji bantlarında eğilmeler görülür. Bu eğilmeler sayesinde enerji seviyesinde bulunan taşıyıcılar daha kolay bir şekilde tünelleme yapabilmektedirler. Tünellemeye uygulanan elektrik alanın yanında kuantum kuyularının arasındaki mesafe ve sıcaklık da oldukça önemli etkenler arasında yer almaktadır.

Uygulanan bir dış elektrik alan etkisiyle kuantum mekaniksel tünelleme olayı, yüksekliği  $E_B$  olan bir Dirac kuyusu için, üçgen bariyer içerisinden tünelleme hızı,

$$e^T = \frac{eF}{4\sqrt{2m^*E_B}} \exp \left[ -\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{E_B^{3/2}}{eF} \right] \quad (2.12)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada  $m^*$  elektronun etkin kütesini,  $F$  uygulanan elektrik alanı,  $E_B$  ise potansiyel bariyer yüksekliğini ifade etmektedir.



Şekil 2.8 Uygulanan  $F$  elektrik alanı altında tünelleme yoluyla taşıyıcı yayınlama süreci

### 2.2.3.3 Fononlar yardımıyla tünelleme

Fononlar yardımıyla tünelleme; termal uyarılma ve tünellemenin birleşimi olarak gerçekleşir. Uygulanan bir elektrik alan altında fononlar yardımıyla tünelleme iki durumda gerçekleşir. İlk durumda alt seviyede bulunan taşıyıcılar termal uyarılma ile bir üst seviyeye çıkar, ikinci durumda ise üst seviyeye çıkmış olan taşıyıcılar bariyerden tünelleme yaparlar.

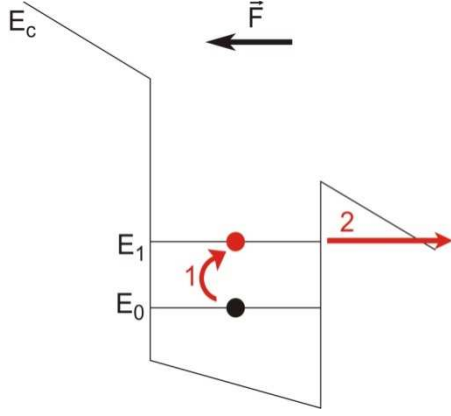
Fononlar yardımıyla tünelleme, sıcaklığa, elektrik alana ve potansiyel kuyusunun şekline bağlı olarak değişir.

Bir Dirac kuyusundaki enerji seviyelerinden fononlar yardımıyla tünelleme yayınlama hızı yarı klasik kuantum mekaniksel yaklaşıklıkla

$$e^p = \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_m e^T (E_A + m\hbar\omega) \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki toplam, ilgili tüm fononları içermektedir.  $W_m$  her bir  $m$  fonon modu için istatistiksel ağırlıktır ( Makram-Ebeid ve Lanoo 1982) .

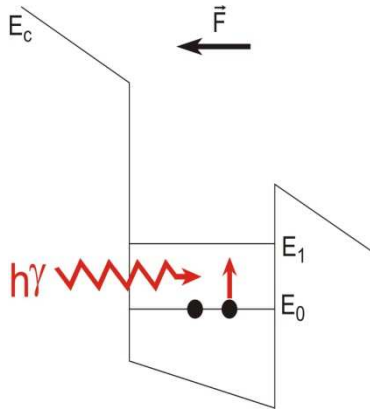
Ayrıca  $e^T(E_A + m\hbar\omega)$  eşitliği yukarıdaki denklemden hesaplanabilir.



Şekil 2.9 Uygulanan  $F$  elektrik alanı altında Fononlar yardımıyla tünelleme (termal uyarılma+tünelleme) yoluyla taşıyıcı yayınlanma süreci

#### 2.2.3.4 Optik uyarılma

Dışarıdan gelen fotonlar, eğer yeterli enerjiye sahipse  $[E_g \geq E_1 - E_0]$ , kuantum noktalarındaki taşıyıcılar fotonlar tarafından uyarılarak kuantum noktasından ayrılabilirler.



Şekil 2.10 Uygulanan  $F$  elektrik alanı altında optik uyarılma yoluyla taşıyıcı yayınlanma süreci

Bu olay optik uyarılma ya da bantıçi soğurma olarak adlandırılmaktadır.

Bu olay birçok optoelektronik aygıtların temel prensibini oluşturmaktadır.

### **2.3 Yarıiletken Bellek Aygıtlar**

Günümüzde üretilen tüm yarıiletken aygıtların %23'ünü yarıiletken bellekler oluşturmaktadır (Geller 2007).

Yarıiletken bellekler kalıcı (nonvolatile) ve geçici (volatile) hafızaya sahip olmak üzere iki grupta toplanabilir. Günümüzde bilgisayarda temel hafıza birimi olarak kullanılan DRAM'ler geçici hafızaya, 20 ns den az hızlı erişim zamanına ve  $> 10^{15}$  yazma/silme döngü sayısına sahiptirler. Flash bellek gibi kalıcı hafızalarda ise herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmadan ortalama 10 yıldan fazla bilgi saklanabilir.

Flash belleklerin dışında kalıcı hafızaya sahip bellek olarak; ROM (Read Only Memory), PROM (Programmable ROM), FRAM (Ferroelectric RAM) örnek olarak verilebilir.

Kalıcı hafızaya sahip bellekler, çalışma şekilleri ve yapıldıkları malzemelere göre sınıflandırılabilirler.

Günümüzde ideal bir bellek yapısının; kalıcı hafızaya sahip, küçük bir alanda çok fazla bellek hücresi olan, enerji sarfiyatı düşük, hızlı okuma yazma yapabilen, düşük maliyette, sağlam yapıda olması arzulanmaktadır.

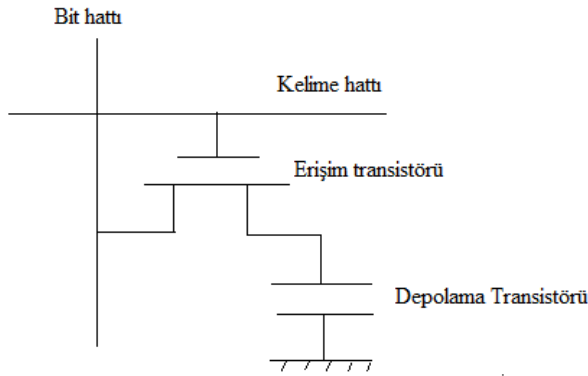
Günümüz elektronik teknolojisinde sahip oldukları üstün özellikler sebebiyle DRAM ve flash bellekler büyük yer tutmaktadır.

#### **2.3.1 Dram**

Dinamik rastgele erişimli bellek (Dynamic Random Access Memory), bir tümleşik devre içinde her bir veri bitini ayrı bir kapasitör içinde saklayan Rastgele Erişimli Bellek türüdür (<http://tr.wikipedia.org/wiki/DRAM.>, 2010). Kapasitörler yapıları gereği

bir süre sonra boşalacağından yenileme/tazeleme (refresh) devresine ihtiyaç duyarlar. Sığanın kendiliğinden deşarj süresi milisaniyeler mertebesindedir. DRAM, yenileme devresinden dolayı çok yer kaplar (<http://tr.wikipedia.org/wiki/DRAM>, 2010). Bu Güç kaynağı açık olduğu durumda DRAM sakladığı verileri korur bu nedenle DRAM geçici hafızaya sahip bellek türüdür.

Güç kaynağı açık olduğu durumda DRAM sakladığı verileri korur bu nedenle DRAM geçici hafızaya sahip bellek türüdür.



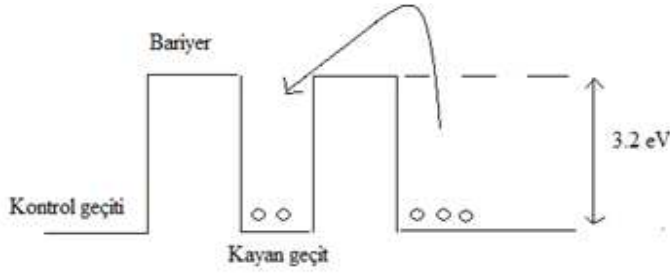
Şekil 2.11 Dram hücresi

Bir DRAM hücresi için okuma, yazma ve silme süresi  $\sim 20$  ns olup yazma/silme işlemi  $10^{15}$  kez tekrar edilebilir (Akçay 2008). Bu durum da bir bellek aygıt için arzu edilen hızlı erişim süresini ve dayanıklılığı sağlar. Fakat diğer yandan DRAM hücresi için bilginin sürekli yenilenmesi gerektiği için enerji tüketimi fazla olup, güç kesildiği zaman varolan bilgi kaybolur.

### 2.3.2 Flaş bellekler

Flaş belleklerde bilginin okunması, yazılması ve silinmesi süreçleri elektrik alan uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Bu bellek yapısında bilgi yazıldıktan sonra enerjiye ihtiyaç duyulmadığı için kalıcı hafızaya sahiptirler. Enerji harcamadan ve yenileme devresine ihtiyaç duymadan bilginin okunması ve saklanması, flaş belleklerde enerji tasarrufu ve uzun pil ömrü sağlar.

Flaş bellekler; silikon temelli kayan geçit (floating gate) yapısına sahip olup, silikon tabaka iki SiO<sub>2</sub> (Silikon dioksit) bariyer tabaka arasına yerleştirilmiştir. Bu bariyerlerin tabaka kalınlığı yaklaşık 10 nm ve yüksekliği 3 eV dur. Bu kadar yüksek bariyerler arasına hapsedilen elektronlar, yüksek bir elektrik alan uygulanmadığı sürece oda sıcaklığında 10 yıla kadar poli-silikon tabakada kalabilirler (Akçay 2008). Böylelikle flaş belleğe kaydedilen bilgi 10 yıl süre ile saklanabilirler.



Şekil 2.12 Flaş bellek yapısı

Bir flaş belleğin çalışma prensibinde; bilgi yazma süreci elektrik alan uygulanarak elektronların yüksek bariyerden geçirilmesi ile olur. Fakat bariyerlerin yüksek olması bu süreci yavaşlatmakla birlikte yüksek elektrik alana ihtiyaç duyar. Fakat yüksek elektrik alan flaş bellek yapısına zarar verir. Dolayısıyla bir flaş bellekteki yazma/silme döngüsü  $\cong 10^6$  ile sınırlandırılır.

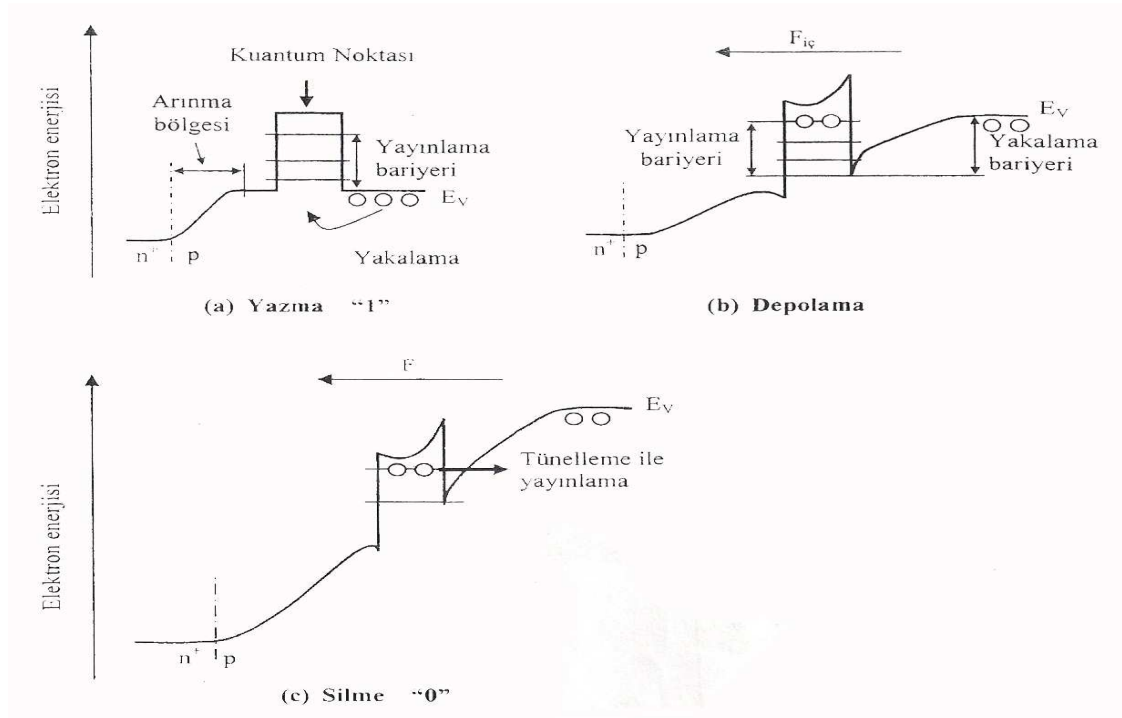
### 2.3.3 Kuantum noktaları temelli flaş bellekler

Kuantum noktaları temelli flaş belleklerde , kuantum noktaları bilgi saklama birimi olarak kullanılabilirler.

Evrensel bir bellek aygıtın; dayanıklı olması (yazma/silme döngüsü  $\geq 10^{15}$ ), kaydettiği bilgiyi en az 10 yıl saklayabilmesi ve yazma, silme, okuma süreçlerinin nanosaniyeler mertebesinde olması gerekmektedir. Bu durum DRAM ile flaş belleğin üstün özelliklerinin birleşmesi anlamına gelir. Kuantum nokta temelli flaş bellek ile bu özelliklerde bir bellek yaratmak mümkündür.

Günümüzde 90 nm büyüklüğünde DRAM ve flaş bellekler yapılabilmekte olup, bilgi saklama yoğunluğu 10 Gbit/inç<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Akçay 2008). Kuantum nokta temelli flaş belleklerde ise her bir bite karşılık bir kuantum noktasının karşılık geldiği varsayılırsa, 1 cm<sup>2</sup> lik alanda 10<sup>11</sup> kuantum noktası olabileceğini ve bilgi saklama yoğunluğunun 1 Tbit/inç<sup>2</sup> olacağını söyleyebiliriz (Akçay 2008). Yani Flaş bellekle hemen hemen aynı büyüklükte olan kuantum noktaları temelli bellek aygıtı, flaş bellekten 100 kat daha fazla bilgi saklayabilmektedir.

Kuantum nokta temelli flaş belleklerde, flaş belleklerdeki yüksek bariyerler yerine, kuantum noktalarını çevreleyen katkıli yarıiletkenler kullanılmaktadır.



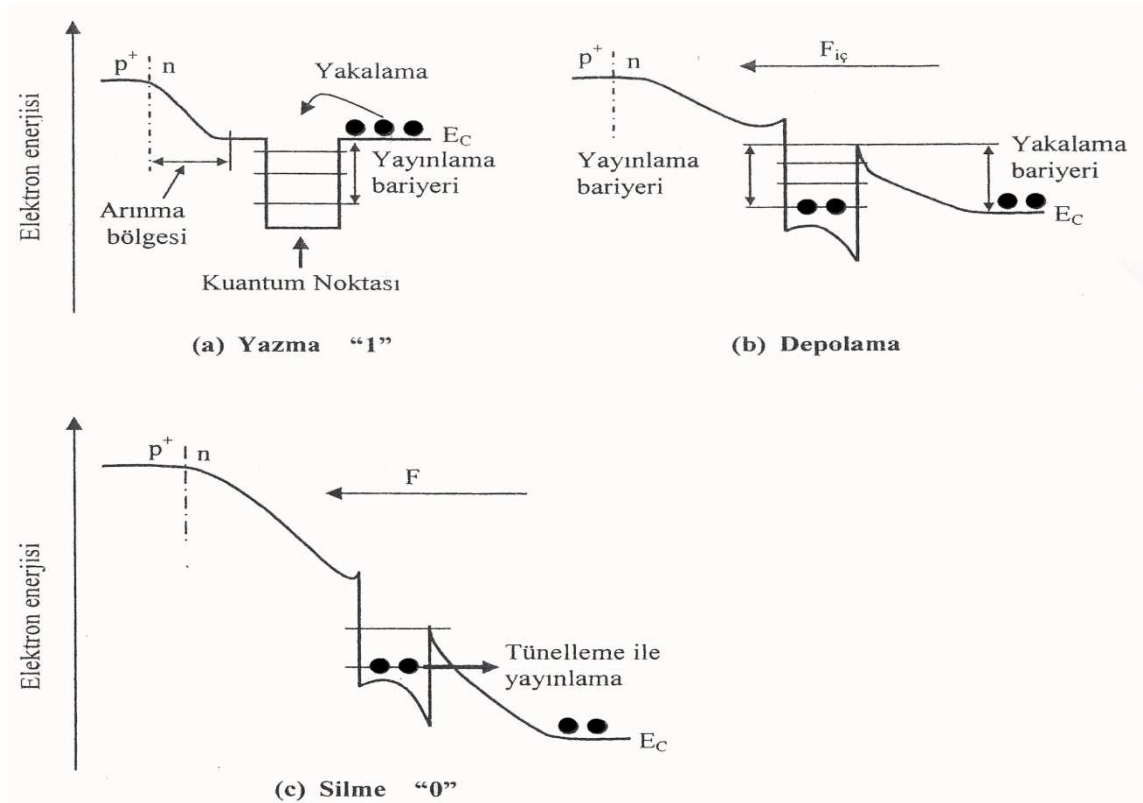
Şekil 2.13 Taşıyıcıları holler olan bir kuantum nokta temelli bellek aygıtında yazma, silme ve depolama süreçleri (Akçay 2008)

alan ile bariyer yüksekliği ayarlanabilmektedir. Bu şekilde dış elektrik alan ile pn eklemesinde bant eğilmesi sağlanabildiğinden yapıya zarar verilmeksizin yazma/silme süreçleri gerçekleştirilebilir.

Bu belleklerde yazma süreci kuantum noktalarındaki enerji seviyelerinde taşıyıcıların bulunması demektir ve bu durum 1'e karşılık gelmektedir. Bu süreçte, uygulanan ileri besleme ile kuantum noktalarının pn eklemının dışında kalması sağlanır. Dolayısıyla kuantum noktasındaki enerji seviyelerine taşıyıcıların geçişi sağlanır. Böylelikle bilgi yazma süreci gerçekleştirilmiş olur.

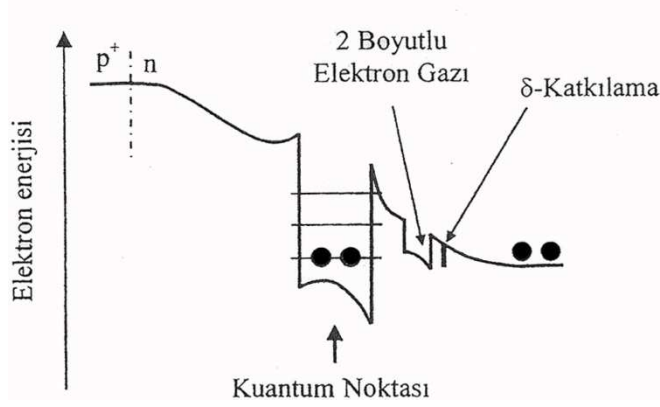
Kuantum noktaları pn eklemının arınma bölgesi içinde olduğu sürece bilginin saklanması durumu devam eder.

Silme işleminde ise pn eklemine yüksek geri besleme uygulanır. Geri besleme ile genişliği artan pn eklemi kuantum noktalarına ulaşır. Yüksek elektrik alandan dolayı azalan bariyer sayesinde taşıyıcılar tünellemeye zorlanır. Bilginin silinmesi durumu 0 a karşılık gelmektedir.



Şekil 2.14 Taşıyıcıları elektronlar olan bir kuantum nokta temelli bir flaş bellekte yazma, silme ve depolama süreçleri (Akçay 2008)

Kaydedilen bilginin okunması ise kuantum noktası civarında oluşturulan iki boyutlu elektron gazının direncinin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Kuantum noktasında taşıyıcıların bulunduğu durumda '1', kuantum noktasındaki taşıyıcılar ile iki boyutlu elektron gazında bulunan taşıyıcılar arasındaki Coulomb etkileşmesi nedeniyle ölçülen direnç değeri yüksek olacaktır. Kuantum noktasında taşıyıcıların bulunmadığı durumda ise kuantum noktasındaki taşıyıcılar ile iki boyutlu elektron gazında bulunan taşıyıcılar arasında ki coulomb etkileşmesi azalacak ve ölçülen direnç değeri düşük olacaktır. Okuma süreci için gereken iki boyutlu elektron gazı;  $\delta$  katkılama ile kuantum noktası civarında bir kuantum kuyusu ile oluşturulabilir.



Şekil 2.15 Kuantum nokta temelli bir bellek aygıt yapıda okuma süreç yapısı (Akçay 2008).

Kuantum noktalarını oluşturan malzemeye bağlı olarak bellek aygıtın hangi taşıyıcı tipi ile çalışacağı belirlenir. Kuantum noktalarında elektronların ya da boşlukların bulunması bir bitlik bilginin kaydedildiği anlamına gelmektedir.

Kuantum noktaları temelli bellek yapılarında, cihaz yapısında bilginin yazılması için kapı kontak (gate contact) ile alt kontağa (back contact) ileri besleme uygulanır.

## 2.4 Arınma Bölgesi

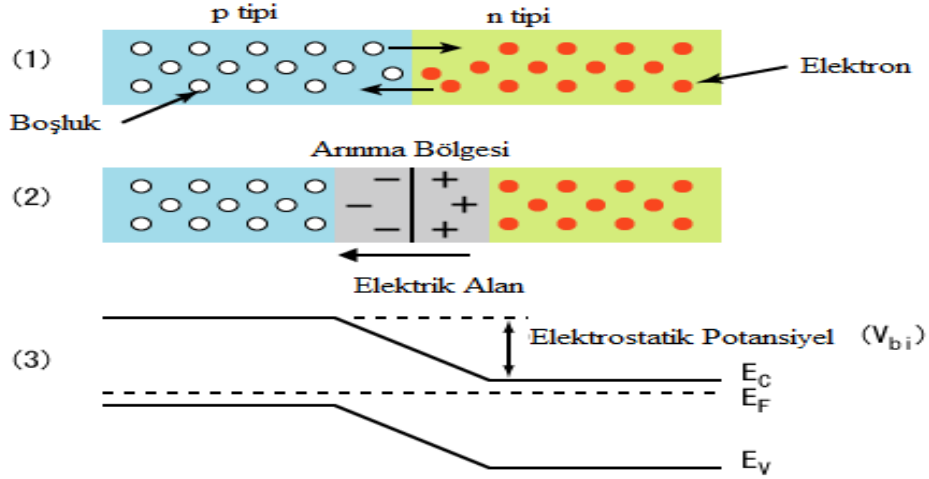
### 2.4.1 p - n Eklemi

Bir yarıiletkenin bir kısmı p tipi, diğeri n tipi olacak şekilde katkılanırsa, birbirlerine komşu iki farklı bölge ile bunların sınır bölgesi, yani p-n eklemi gerçekleştirilmiş olur. Yarıiletkenin elektron verici (donor) atomlarla katkılanması n-tipi yarı iletkeni, elektron alıcı (akseptör) atomlarla katkılanması ise p-tipi yarı iletkeni oluşturur.

Farklı konsantrasyonlara sahip yarıiletkenler bir araya getirildiğinde, termodinamik denge sağlanana kadar serbest taşıyıcı alışverişi olur ve Fermi seviyesi tüm yapı boyunca eşitlenir. Bunun sonucunda arınma bölgesinde taşıyıcı bulunmaz, sadece iyonize olmuş donör ve akseptör atomları bulunur.

Bir p-n ekleminde p-tipi bölgeye negatif, n-tipi bölgeye ise pozitif gerilim (ters geri besleme) uygulanırsa; oluşan elektrik alan, yüklerin hareketini önemli ölçüde engeller. Dolayısıyla eklemden hemen hemen hiç akım akmaz. Böyle bir gerilim uygulanması “ tıkama yönünde kutuplama” olarak anılır. Bunun tersi halinde, yani p-tipi bölgeye pozitif gerilim uygulanması (ileri besleme) durumunda ise eklemden büyük akım akar. Bu durum “geçirme yönünde kutuplama” olarak adlandırılır.

Sonuç olarak geçirme yönünde kutuplanan bir p-n ekleminin büyük miktarda akım akıtabilmesine karşılık; tıkama yönünde kutuplanmasında ise çok küçük bir akım akıttığı söylenebilir.



Şekil 2.16 p-n eklemi, 2. Arınma bölgesi, 3. Elektrostatik potansiyel. Burada  $E_C$  iletim bandı,  $E_V$  ise valans bandını,  $E_F$  ise Fermi seviyesini ifade etmektedir (<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-PV-E.PNG>, 2010)

Arınma bölgesi genişliği,

$$W = \left[ \frac{2\epsilon_S}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V) \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

formülü ile verilir. Arınma bölgesi genişliği iki yarıiletken arasındaki potansiyel farkına, uygulanan elektrik alanına ve katkı konsantrasyonuna bağlı olarak değişir.

$$W_n = W (V_{uyg.}) \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.15)$$

$$W_p = W (V_{uyg.}) \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.16)$$

p ve n tipindeki potansiyel enerji farkı  $qV_{bi}$  olup, ileri besleme uygulandığında toplam elektrostatik potansiyel  $V_{bi}$ ,  $V_F$  (ileri besleme voltajı) tarafından arınma bölgesi boyunca azalır  $[V_{bi} - V_F]$ . Bu nedenle ileri besleme uygulandığında arınma bölgesi genişliği azalacaktır. Geri besleme ( $V_R$ ) uygulandığında ise elektrostatik potansiyel artacağından dolayısıyla arınma bölgesi genişliği de artmış olacaktır  $[V_{bi} + V_R]$ .

Elektrostatik potansiyel formülü

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.17)$$

ile verilmektedir. Burada  $N_A$  : akseptör yük yoğunluğu (acceptor charges of density),  $N_D$  : donör yük yoğunluğu (donor charges of density),  $k$  boltzman sabiti,  $T$  sıcaklık,  $q$  yük,  $n_i$ : bir yarıiletkendeki özgül yük yoğunluğu (intrinsic carrier density) olup;

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left[ -\frac{E_g}{2kT} \right] \quad (2.18)$$

ifadesine eşittir. Burada  $E_g$  yasak bandı,  $N_C$  ve  $N_V$  sırasıyla iletkenlik ve valans bandı seviye yoğunluklarını göstermekte olup her tip yarıiletken için farklı değer almaktadırlar.

#### 2.4.2 Arınma bölgesi sığası

Bir p-n eklemde iyonize olmuş donör ve akseptörler dielektrik alandan oluşan arınma bölgesinin içinde bulunmaktadırlar.

Sığa

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.19)$$

olarak verilmektedir.

Benzer şekilde bir diğer ifade olarak

$$C(V) = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{W_n} \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\epsilon$  ortamın dielektrik sabiti,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $A$   $p^+$ -n eklemının alanı,  $W_n$  iyonize olmuş donör sayısı  $n$  tipi yarıiletken tarafında kalan arınma bölgesi genişliğini ifade etmektedir.

Bir p-n ekleminde sığa değeri, arınma bölgesi genişliğine ve uygulanan voltaja bağlı olarak değışir. Arınma bölgesindeki iyonlaşmış katkı konsantrasyonu, arınma bölgesi genişliğine bağlı olduğundan, bir arınma bölgesindeki yük konsantrasyonu uygulanan voltaja bağlı olarak sığa değeri değıştirilebilir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1 Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (DLTS)

Bu bölümde bu çalışmada kullanılan derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) , örneklerin yapıları ve ölçüm düzenekleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Bir p-n eklemdeki arınma bölgesi genişliği uygulanan voltaja ve katkı konsantrasyonuna yani eklemdeki yük miktarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle sığa, p-n eklemi içinde yer alan derin seviyelere ya da kuantum noktalarında bulunan yük popülasyonuna karşı duyarlıdır.

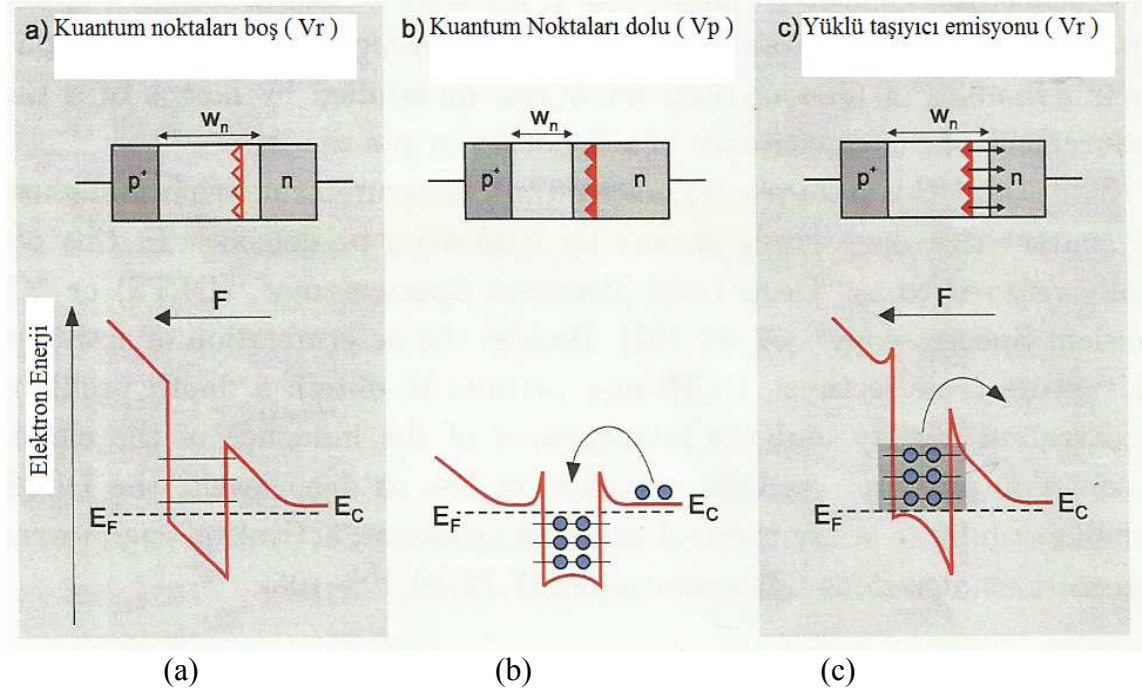
Zamana bağlı sığa (time resolved capacitance), başlarda derin seviyelerdeki kusurların belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu yöntem derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) in yanısıra sığa geçiş spektroskopisi olarak da adlandırılır. DLTS, termal emisyon mekanizmalarının, aktivasyon enerjisinin ve taşıyıcı dinamiğinin belirlenmesine olanak verir. Bu nedenle DLTS ile kuantum noktalarının elektronik yapısı araştırılabilir.

Yarıiletken kuantum noktaları bir veya birkaç yükü belli bir süre tutabilme özelliğinden dolayı derin seviyelere benzetilebilir. Bu nedenle son zamanlarda DLTS ile ortalama tutma zamanı (storage time) ayrıntılı olarak çalışılabilmektedir.

Kuantum noktaları temelli flaş bellekli yapılarda, kuantum noktaları, p-n eklemının arınma bölgesi civarında konumlandırılır. Bir p-n eklemde DLTS deneyi öncesi I-V karakterizasyonuna bakılarak uygulanması gereken geri besleme değerleri belirlenir. Geleneksel bir DLTS deneyinde, ilk adımda geri besleme değerinin uygulanmasıyla, kuantum noktaları arınma bölgesi içine girer ve kuantum noktalarındaki enerji seviyelerinin tamamıyla boşalması sağlanır (Şekil 3.10). Yüklerinden tamamıyla arınan bir kuantum noktasında, Fermi seviyesi kuantum noktasının enerji seviyelerinin altındadır. İkinci adımda ise ileri besleme uygulanarak kuantum noktalarının arınma bölgesi dışına çıkması sağlanır. Böylelikle kuantum noktaları tamamıyla taşıyıcı ile yüklenir. Bu durumda artık Fermi seviyesi kuantum nokta enerji seviyelerinin üstündedir. İleri beslemeden sonra, tekrar başlangıçtaki geri besleme değerine

dönüldüğünde yani kuantum noktaları tekrar arınma bölgesine girdiklerinde, kuantum noktaları tüm rezervuarlarıyla dolu durumdadır.

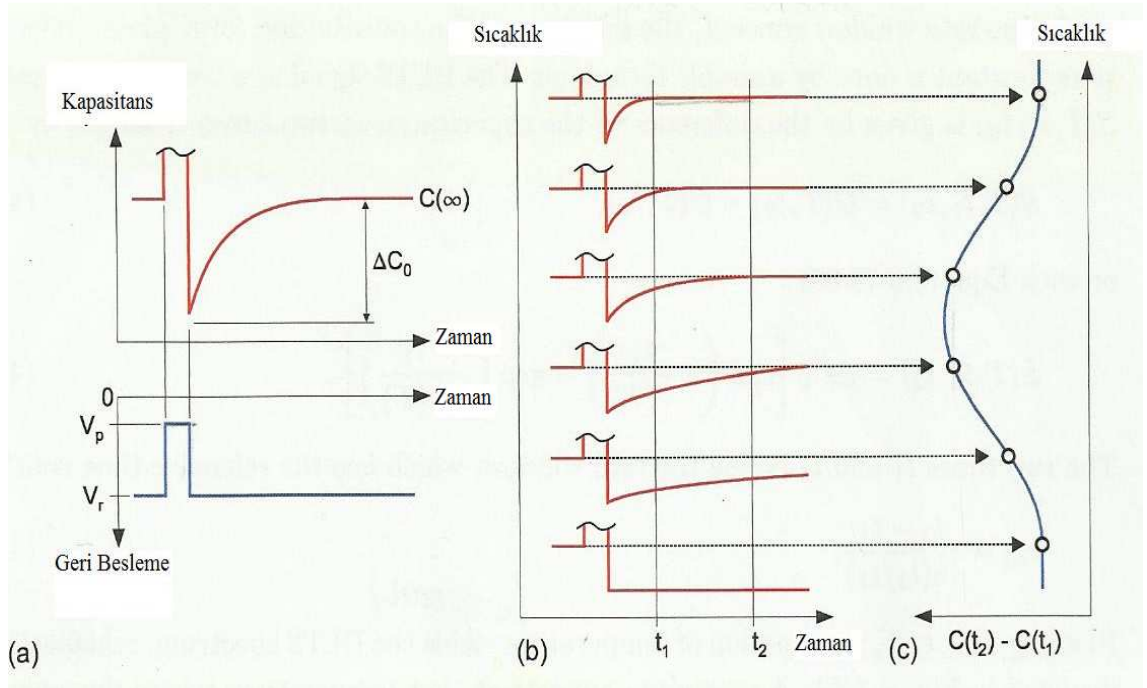
Bu durumda Fermi seviyesi tekrar ilk durumdaki gibi kuantum noktasındaki enerji seviyelerinin altında kalacağından, enerji seviyeleri boşalmak durumunda kalır.



Şekil 3.1 Bir p<sup>+</sup>-n diyot içine gömülmüş kuantum noktaları için DLTS çalışma döngüsü (Geller 2007)

Şekil 3.1’de, V<sub>r</sub> geri besleme voltajını, V<sub>p</sub> ileri besleme voltajını, W<sub>n</sub> arınma bölgesi genişliğini, F elektrik alanı, E<sub>F</sub> Fermi seviyesini ve E<sub>C</sub> iletim bandı enerjisini ifade etmektedir. (a) uygulanan geri besleme voltajı (b) uygulanan ileri besleme voltajı (c) ilk başta uygulanan geri besleme voltajıyla yüklü taşıyıcı emisyonunu, alt sıra ise bu durumlara karşılık gelen bant diyagramlarını göstermektedir.

DLTS ölçümü kusurların belirlenmesi için oldukça hassas bir yöntemdir. Fakat DLTS ölçümünde benzer emisyon özelliklerine sahip enerji seviyelerinin ayrımının yapılması zordur. DLTS ölçümü mutlaka bir arınma bölgesine ya da bir Schottky kontağa ihtiyaç duyar. Ayrıca DLTS ölçümü %10’den daha az bir katkı konsantrasyonu gerektirir.



Şekil 3.2 DLTS deneyi çalışma prensibi (Geller 2007). a. Alt grafik; zamanın fonksiyonu olarak aygıt dışarıdan uygulanan geri besleme voltajının zamanın fonksiyonu olarak gösterimi, üst grafik ise bunlara karşılık gelen sığa-zaman grafiği, b. Sığa geçiş değerlendirilmesi, c. Termal emisyon DLTS grafiği

Kuantum nokta enerji seviyelerindeki taşıyıcı emisyonu bu süreçte normalin aksine yavaş gerçekleşir. Kuantum noktalarındaki yük değişimi sığayı değiştirir. İleri beslemeden sonra azalan sığa, taşıyıcıların termal aktivasyon ya da tünelleme emisyonlarından dolayı tekrar artar.

Termal emisyon sabiti

$$e_{th} = \gamma T^2 \tau_{\infty} \exp\left[-\frac{E_A}{kT}\right] \quad (3.1)$$

olarak verilir. Burada  $E_A$  termal aktivasyon enerjisini,  $\tau_{\infty}$ ,  $T=\infty$  için yakalama kesit alanı (capture cross section),  $\gamma$  sıcaklıktan bağımsız bir sabiti göstermektedir. Emisyon zaman sabitinin ( $\tau = 1/e_{th}$ ) bilinmesiyle farklı sıcaklıklar için termal aktivasyon enerjisi ve yakalama kesit alanı (capture cross section) hesaplanabilir. Termal emisyon sabitinin çoklu üstel (multiexponential) geçişlerden hesaplanabilmesi oran pencere yaklaşımı (rate window concept) ile mümkündür.

Sığa değişimi, uygulanan voltaja bağlı olarak, kuantum noktalarındaki taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır.

$$C(T) = C(\infty) - \Delta C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.2)$$

Fakat kuantum noktaları ve derin seviyeler için sığa geçişleri toplu genişlemeden (ensemble broadening) dolayı çoklu üsteldir. Bu durumda aktivasyon enerjisinin ve termal zaman sabitinin hesaplanabilmesi için oran pencere yaklaşımı uygulanmalıdır. Bu yaklaşımda DLTS sinyali; farklı iki zaman aralığındaki ( $t_1$  ve  $t_2$ ) sığa değişimi için kesin bir sıcaklık değeri ile verilir.

Kesin bir sıcaklık değeri için DLTS sinyali

$$S(T, t_1 \text{ ve } t_2) = \Delta C_0 \left[ \exp\left[-\frac{t_2}{\tau(T)}\right] - \exp\left[-\frac{t_1}{\tau(T)}\right] \right] \quad (3.3)$$

Burada referans zaman sabiti  $\tau(T)$ ,  $t_1$  ve  $t_2$  zaman aralıklarındaki oran penceresini,  $\Delta C_0$  ise sığa değişimini tanımlamaktadır.

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

$S(T, t_1 \text{ ve } t_2)$ ' in sıcaklığın fonksiyonu grafiği DLTS spektrumunu verir. Maksimum sıcaklık; termal aktivasyon emisyon zaman sabitinin uygulanan referans zaman sabitine eşit olduğu durumda görülür  $\tau(T_{max}) = \tau_{ref}$ . Farklı  $\tau_{ref}$  pik pozisyonları için  $T_{max}$  belirlenir.

Aktivasyon enerjisi,  $T^{-1}$  in fonksiyonu olarak  $\ln(T_{max}^2 \tau_{ref})$  Arrhenius eğrisinden hesaplanabilir. Arrhenius eğrisi termal emisyon proseslerinde aktivasyon enerjisinin saptanmasına izin verir.

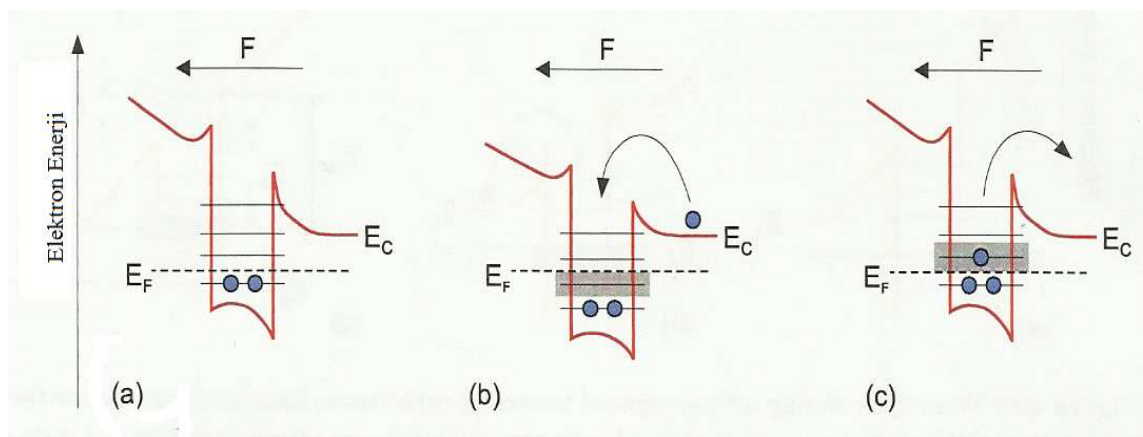
Geleneksel DLTS’de sıcaklık zamanla değiştirilirken, sığa değişimi çift boxcar tekniği (double boxcar technique) araştırılır. Bu teknik, seçilecek oran penceresini belirler ve bu oran penceresindeki DLTS piklerini gosterir.

DLTS piki belli bir sıcaklık değerinde emisyon sabitinin seçilen oran pencere içerisinde olduğu zaman gozlemlenebilir.

Bu deneysel çalışmada DLTS deney verilerinin değerlendirilmesi boxcar tekniği ile yapılmıştır.

### 3.2 Yük Seçici Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (Charge - Selective Deep Level Transient Spectroscopy)

Yük seçici DLTS’in geleneksel DLTS’den farkı, herbir seviye için emisyonun hesaplanabilmesi ve her bir seviyeye ait aktivasyon enerjilerinin ayrı ayrı hesaplanabilmesidir. Geleneksel DLTS deneyinde iki nedenden dolayı elektron/boşluk yakalanmaları gozlenemeyebilir. Bunlardan biri, ileri besleme boyunca kuantum noktalarının p-n diyodun arınma blgesi dışında olması ve sığada çok fazla bir değişimin gorlememesi, diğeri ise yk yakalama zamanının kuantum noktaları için pikosaniye mertebesinde olmasıdır.



şekil 3.3 Yük seçici derin seviye geçiş spektroskopisi çalışma dngs (Geller 2007).  
a. ileri besleme voltajı ncesi, b. boyunca, c. sonrası.

Enerji seviyelerinin ayrıntılı çalışılabilmesi için, yük seçici DLTS de yaklaşık olarak kuantum noktası başına düşen yükün emisyonu hesaplanır. Bu metotta, ileri beslemeden önce, Fermi seviyesine kadar kuantum noktaları yük ile dolu olabilir. Bu nedenle ileri besleme boyunca Fermi seviyesi uygulanan voltaj ile yaklaşık bir kuantum noktası başına bir yük yakalanacak şekilde ayarlanır. İleri besleme, geri beslemeye nazaran farklı kuantum nokta seviyeleri tarafından bir yükün yakalanması nedeniyle sabitlenir. İleri beslemeden sonra, geri besleme tekrar ilk konumdaki değerine getirilir. Önce yakalanan yük salınır ve yayınlama süreci yaklaşık kuantum noktası başına düşen bir yükten gözlemlenir.

Yük seçici DLTS, aynı aktivasyon enerjisine sahip farklı kuantum noktalarındaki birçok yük yayılımını hesaplamada kullanılabilir. Geri beslemenin artırılmasıyla ve ileri beslemenin ayarlanmasıyla (kuantum noktası başına bir yük düşecek şekilde ayarlanmalıdır) aktivasyon enerjisi hesaplanabilir.

### **3.3 Malzeme Büyütme Yöntemleri**

Epitaksi kelimesi Yunanca iki kelimenin birleşimi olup ‘epi’ kelimesi üzerinde ve ‘taksi’ kelimesi düzgün sıralamak anlamına gelmektedir. Yani tek kristal bir alttaş üzerine kalınlığın ve katkı miktarının kontrol edilmesiyle atomik tabakalar halinde tek kristal yapının büyütülmesidir. Alttaş kristalde büyütme katmanı olarak aynı malzeme olabileceği gibi benzer örgü sabitine sahip farklı malzemeler de kullanılabilir. Sadece bir malzemeyle yapılan epitaksi türüne homoepitaksi, alttaş ile benzer yapıda olan farklı malzemenin büyütülmesiyle yapılan epitaksi türüne heteroepitaksi adı verilir.

Epitaksiyel büyütme teknikleri; Moleküler Işın Epitaksisi (MBE: Molecular Beam Epitaxy), Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma Biriktirme (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition), Sıvı faz Epitaksi (LPE: Liquid Phase Epitaxy) ve Buhar Faz Epitaksi (VPE: Vapor Phase Epitaxy)’dir.

Sıvı faz epitaksi, epitaksiyel katmanların sıvı halden direk çöktürülmesiyle oluşturulan büyütmedir. Büyütme hızı düşük olup, sıvı epitaksi  $\geq 0.2 \mu\text{m}$  civarındaki büyütme için uygundur. Bu yöntemde büyütülecek malzemenin bir çözücüde çözünmesi ve yarıiletken alttaşın erime noktasının altında bir sıcaklıkta erimesi gerekir. Ucuz ve kaliteli tabakalar büyütülmesine rağmen çoklu yapıların büyütülmesinde karmaşıklık ve düşük kalınlık kontrolü bu büyütme tekniğinin dezavantajları olarak sayılabilir.

Buhar faz epitaksi, kristal tabakanın alttaş üzerine yarıiletkenlerin kimyasal buharlaştırılmasıyla ya da yarıiletkeni içeren kimyasal buharın karışımından büyütme yapılabilir. Bu teknikte yüksek saflık elde edilebilmesine rağmen, düşük kalınlık kontrollü ve düzensiz yapılar elde edilebilmektedir.

MOCVD tekniğinde yarıiletken kristal tabakaların büyütülmesi, ortamdaki gazların kimyasal reaksiyonu sonucunda gerçekleşir. Kullanılan kaynak malzeme moleküler gaz şeklindedir. Bu teknikte, büyütme kontrolü mükemmel olup, çok yönlü ve büyütme hızı yüksektir. Dezavantajı kaynakların zehirli gaz olmasıdır.

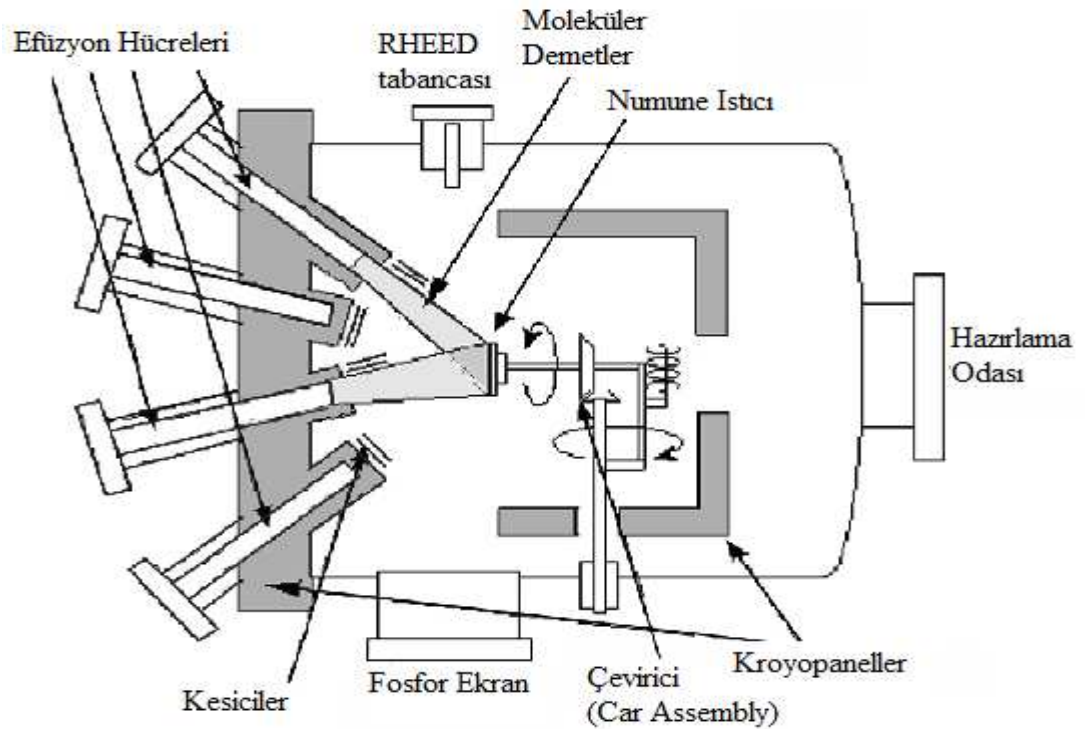
### **3.3.1 Moleküler Işın Epitaksi (MBE)**

MBE’de yüksek vakum koşulları altında ( $10^{-8} - 10^{-11}$  torr) ince filmler büyütülebilir. Farklı malzeme büyütme sorun değildir. MBE ile elementlerin atomik ya da termal enerjili molekül demeti ile yüksek vakumda uygun bir sıcaklıkta tutulan alttaş arasındaki reaksiyonlarla kristal ince filmlerin oluşumu gerçekleştirilir.

Kaynaklar efüzyon hücrelerinde bulunup, bu hücrelerde malzemelerin ısıtılmasıyla molekül demeti (beam) yaratılır. Molekül demetlerinin akısı efüzyon hücrelerinin sıcaklığı ile kontrol edilebilir. Bu hücrelerden çıkan moleküler demetler büyütme koşulları altında kontrollü olarak ısıtılmış alttaş doğru hareket ederler. MBE tekniğini diğer tekniklerden ayıran özellikle molekül demet akısının ve büyütme koşullarının kontrol edilebilmesidir. MBE yönteminde büyütme termodinamik olmayıp, gazların kinematiği üzerine çalışır. Bir MBE sistemi üç ana kısımdan oluşur;

1. Yükleme Odası (Load Lock): Bu örneğin dış ortamından vakum ortamına alındığı bölümdür.
2. Hazırlama Odası (Buffer chamber): Örneğin büyütmeye hazırlanmasında kullanılan kısımdır. Numunenin yüksek vakum koşullarına getirilmesinin yanısıra, bu bölümde numuneye degas işlemide yapılabilir. Degas işlemi numunenin üzerindeki safsızlıkların (impurity) yüksek sıcaklıkta buharlaştırılması işlemidir.
3. Büyütme Odası (Growth Chamber): Yüksek vakum altında büyütmenin gerçekleştirildiği ana kısımdır.

MBE ile ince filmlerin büyütülmesi işleminde, büyütme RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) denilen yüzeyde kırınımına uğrayan yüksek enerjili elektronların saçılması yöntemiyle kontrol edilebilir. RHEED sistemi bir elektron tabancası ve fosfor bir ekrandan meydana gelir. Büyütme sırasında yaklaşık 3°'lik açıyla kristal yüzeye gönderdiğimiz elektronlar saçılarak fosfor ekranda kırınım desenlerini oluştururlar. Bu saçılma desenleri bize kristalin yüzey morfolojisi hakkında bilgi verir.



Şekil 3.4 Moleküler ışın epitaksi sistemi (MBE)  
([http://mxp.physics.umn.edu/s07/Projects/S07\\_Graphene/intro.htm](http://mxp.physics.umn.edu/s07/Projects/S07_Graphene/intro.htm), 2010)

Efüzyon hücrelerinin sıcaklıklarının ve bu hücrelerin önünde yer alan kesicilerin (shutter) kontrol edilebilmesi büyütme için büyük öneme sahiptir. Efüzyon hücre sıcaklıklarının ayarlanmasıyla istenilen oranda element birikimi sağlanarak, arzu edilen malzeme bileşimi sağlanabilir.

MBE sisteminde büyütme sırasında belli bir sıcaklıkta tutulan alttaş büyütme sırasında düzgün filmler elde edilebilmesi için belli bir hızda döndürülür. Moleküllerin sahip olduğu ortalama serbest yol nedeniyle moleküller alttaşa ulaşmadan bir etkileşme meydana gelmez. Isıtılan alttaş üzerine efüzyon hücrelerinden gelen kristal atomları eklenir. Büyütme odasında meydana gelen olaylar gazların kinetik teorisi ile açıklanabilir. Burada alttaşın sıcaklığı da oldukça önemli bir parametredir. Alttaş sıcaklığının yüksek olması durumunda yüzeyden ayrılmalar (desorption) meydana gelir. Ayrılmadan kastedilen yüzeye gelen atomların yüzeyden yeniden buharlaştırılmasıdır. Moleküller yüzeyde belli bir noktada yerleşme eğilimi taşıdığından çekirdekleşme (nucleation) olayı meydana gelir.

GaAs alttaş üzerine GaSb kuantum noktaları 400-550°C aralığında oluşturulabilmektedir. Büyütme parametrelerine bağlı olarak  $4 \times 10^8$ -  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  yoğunlukta kuantum noktaları üretilebilmektedir. Kuantum noktaları piramit ya da küresel seklinde olup, piramit şeklinde olan kuantum noktalarının taban genişlikleri 10-200 nm ve yükseklikleri de 2-9.5 nm aralıklarında değerler alabilmektedir (Akçay 2008).

Bu tezde incelenen GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren (TW454) örnek ile aynı yapıda olan kuantum noktaları içermeyen (TW455) örnek MBE yöntemi ile aynı koşullar altında büyütülmüşlerdir.

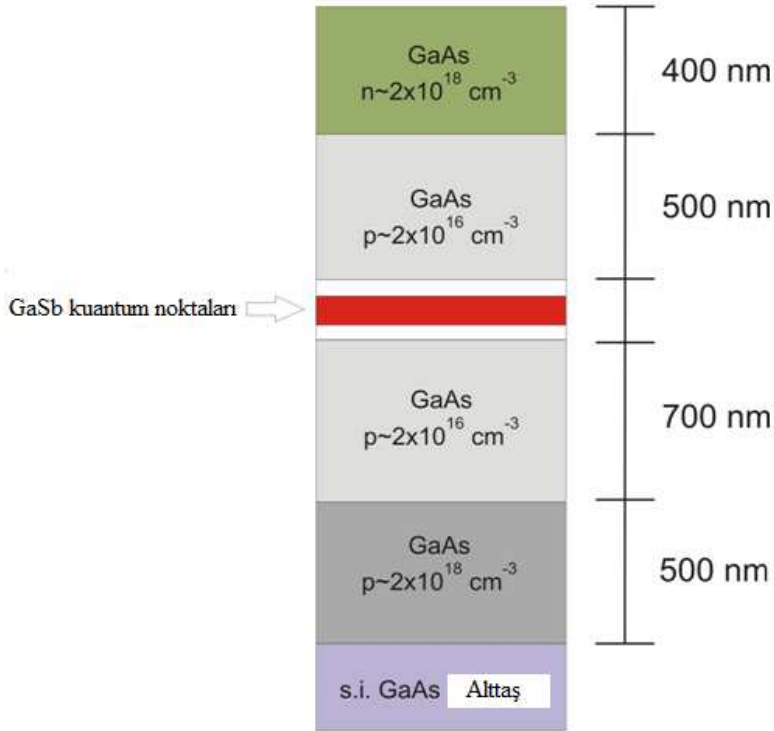
MBE sisteminde yüksek vakum altında yüksek saflıkta ve mükemmel kontrolle büyütme gerçekleştirilebilir. Dezavantajı ise yavaş , pahalı ve karmaşık bir sistem olmasıdır.

### 3.3 Örneklerin Yapısı

Bu tez çalışmasında kuantum nokta temelli bellek aygıt olabilecek GaAs / GaSb kuantum noktaları içeren (TW454) örnek ile aynı yapıda olan kuantum noktaları içermeyen (TW455) örnek için emisyon mekanizmaları DLTS ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu iki örnek Moleküler ışın epitaksi sisteminde aynı koşullar altında büyütülmüşlerdir.

#### 3.3.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örnek (TW454)

Bu çalışmada kullanılan örnekler Tayvan'daki laboratuvarlarda moleküler ışın epitaksi sisteminde 490°C'de büyütülmüştür. Örneklerden ilki,  $n^+$ - p eklemelinin arınma bölgesi civarında tek tabaka halinde büyütülmüş GaSb kuantum noktaları içermektedir (Şekil3.5). Kendiğinden meydana gelen kuantum noktaları Stranski-Kranstanow metodu ile büyütülmüştür. Bu metot ile oluşturulan kuantum noktalarının taban genişliklerinin 10-40 nm ve yüksekliklerinin 5-8 nm olması beklenmektedir.



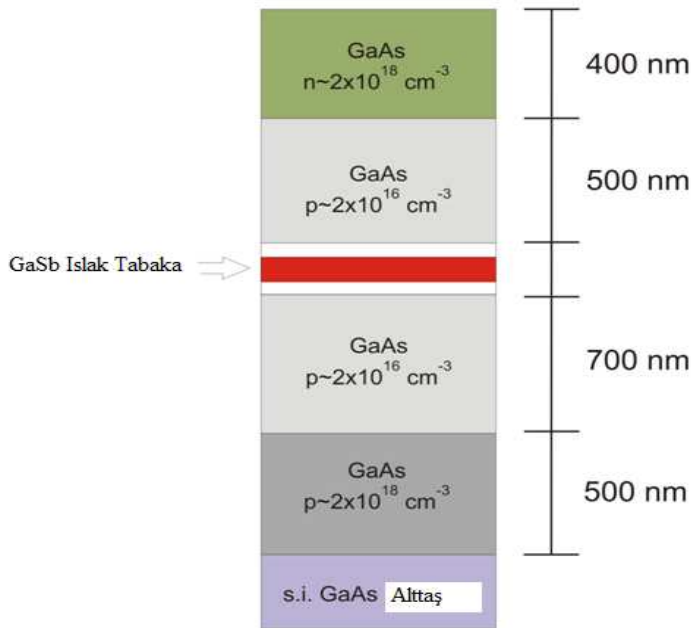
Şekil 3.5 MBE tekniği ile büyütülen GaAs / GaSb kuantum noktaları içeren (TW454) örnek yapısı

Bu örnekte  $n^+$ - p eklemi kullanılarak kuantum noktalarında yakalanacak taşıyıcıların boşluklar olması amaçlanmıştır.

GaSb kuantum noktaları, 7 nm kalınlığındaki iki katkısız GaAs tabakasına gömülmüştür. Örnek sırasıyla; GaAs (Alttaş) üzerine 500 nm kalınlığında p tipi katkı GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 700 nm kalınlığında p tipi katkılanmış GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ve 7 nm kalınlıklarındaki katkısız GaAs tabakalarını içermektedir. Bu tabakalar üzerine 500 nm kalınlığında p tipi katkılanmış GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ve), 400 nm kalınlığında n tipi katkılanmış GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) büyütülmüştür. Örnekler üzerinde elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için aşındırma yapılarak, kontaklar alınmıştır.

### 3.3.2 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örnek (TW455)

Tayvan'da Moleküler ışın epitaksi sisteminde ilk örnek ile aynı koşullarda büyütülen örneklerden ikincisi,  $n^+$ - p eklemine arınma bölgesi civarında tek tabaka halinde ıslak tabaka (wetting layer) bulundurup, GaSb kuantum noktaları içermemektedir (Şekil 3.6). Kuantum noktalarının varlığının gösterilmesi ve emisyon mekanizmaları için referans örneği olarak alınan bu örneğin yapısında da  $n^+$ - p eklemi kullanılarak taşıyıcıların boşluklar olması amaçlanmıştır.



Şekil 3.6 MBE tekniği ile büyütülen referans (TW455) örnek yapısı

Örnek sırasıyla; GaAs (Altaş) üzerine 500 nm kalınlığında p tipi katkı GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 700 nm kalınlığında p tipi katkı GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ve 7 nm kalınlıklarındaki katkısız GaAs tabakalarını içermektedir. Bu tabakalar üzerine 500 nm kalınlığında p tipi katkı GaAs ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ve , 400 nm kalınlığında n tipi katkı GaAs ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) büyütülmüştür (şekil 3.6).

Bu örnek kuantum noktaları içeren örneğin karşılaştırılabilmesi için referans örneği olarak kullanılmıştır.

### 3.4 Deneylede Kullanılan Ölçüm Yöntemleri

#### 3.4.1 Akım-Voltaj

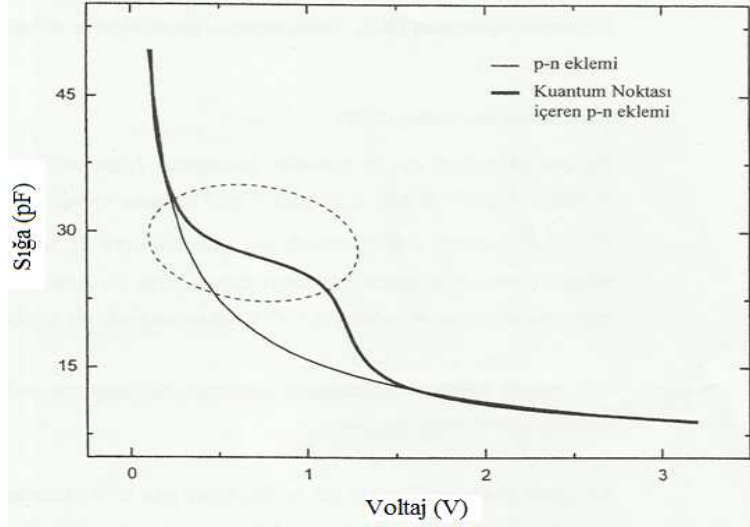
Akım-Voltaj (I-V) karakteristiği, derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) için uygulanması gereken maksimum geri besleme voltajının belirlenmesinde kullanılır. DLTS deneyinde uygulanacak geri besleme voltajı, belirlenen kırılma voltajının bir-iki değeri altında olmalıdır. Aksi takdirde diyot yapısındaki örneğe zarar verilebilir. Ayrıca I-V karakteristiğinden örneğin iyi veya kötü yapıda olduğu öngörülebilir. DLTS deneyi öncesinde her bir sıcaklık aralığı için I-V ölçümleri yapılmaktadır.

#### 3.4.2 Sığa-Voltaj

Sığa-Voltaj (C-V) ölçümü ile kuantum noktalarının varlığı tespit edilebilir. Kuantum nokta temelli bellek yapılarında, p-n eklemının arınma bölgesi civarında bulunan kuantum noktalarında voltaj değişimiyle taşıyıcıların birikmesi C-V karakteristiğinde bir değişime yol açar.

Kuantum nokta temelli yapılarında C-V ölçümünde artan geri besleme voltajıyla arınma bölgesi genişliği kuantum noktalara ulaştığında taşıyıcıların tünelleme yapmasıyla sığa değeri azalır. Geri besleme uygulanmadığında ya da düşük geri besleme değerlerinde kuantum noktaları arınma bölgesinin dışında kalıyorsa taşıyıcı bulundurulur. Bu durumda bulunan taşıyıcılardan dolayı sığa değeri yüksektir. Kuantum noktalarında taşıyıcıların yayınlanması kuantum nokta temelli bellek yapılarında bilginin silinmesine

karşılık gelirken, kuantum noktalarının taşıyıcıların bulunması bilginin yazılması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.7  $n^+$ -p eklemine kuantum noktaları içermediği durumdaki C-V karakteristiği ile aynı eklemine kuantum noktaları içerdiği durumdaki C-V ölçümleri karşılaştırması (Akçay 2008)

Ölçümler kuantum noktalarının taşıyıcı ile dolu olduğu voltajdan başlanıp, geri besleme voltajı artırılmasıyla, kırılma voltajına yakın bir değere kadar kuantum noktalarındaki taşıyıcıların uygulanan elektrik alandan dolayı tünellemesi sağlanır.

### 3.4.3 DLTS

DLTS deneyinde amaç; kuantum nokta temelli bellek yapılarında kuantum noktalarındaki taşıyıcıların termal emisyonlarının incelenmesidir. Bu tez çalışmasında her bir seviye arasındaki emisyon süreçlerinin ve aktivasyon enerjilerinin ayrıntılı olarak çalışılabilmesi için yük seçici DLTS kullanılmıştır.

Bir DLTS deneyi öncesinde kuantum nokta temelli bellek yapılar için I-V ve C-V karakterizasyonları yapılmalıdır. I-V ölçümü, örnek için maksimum uygulanması gereken geri besleme voltajını belirlerken, C-V karakterizasyonu ise kuantum noktalarının varlığını gösterir. Ayrıca C-V karakterizasyonu ile kuantum noktalarının hangi voltaj aralıklarında boş ve dolu olduğu da yaklaşık olarak tayin edilebilir.

Geleneksel DLTS de ilk adımda geri beslemeyle seviyeleri boşaltılan kuantum noktalarına ikinci adımda ileri besleme uygulanarak seviyelerin doldurulması sağlanır. Bir sonraki adımda kuantum noktaları baştaki durumuna geldiğinde, tüm taşıyıcılarını yayınlar.

Yük seçici DLTS ile geleneksel DLTS arasındaki temel fark, ileri besleme ile geri besleme voltajı arasındaki farkın daha az tutulmasıdır. Genellikle GaAs/GaSb için yapılan yük seçici DLTS deneylerinde  $V_p = V_R - 0.5$  veya  $V_p = V_R + 0.3$  olarak alınmıştır.

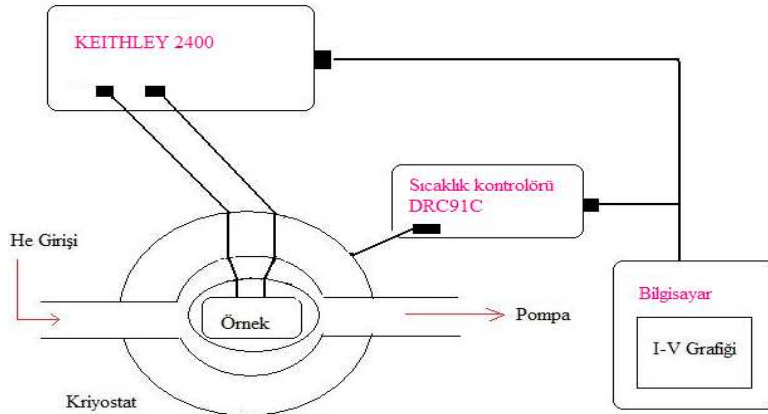
Burada  $V_p$  uygulanacak ileri besleme yani doldurma voltajını (pulse voltage) göstermekte olup,  $V_R$  uygulanacak geri besleme yani boşaltma voltajını (reverse voltage) ifade etmektedir.

### 3.5 Deney Düzenekleri

#### 3.5.1 Akım-voltaj (I-V) deney düzeneği

Akım-Voltaj (I-V) ölçümleri, derin seviye geçiş spektroskopisinde (DLTS) uygulanması gereken maksimum geri besleme voltajının belirlenmesi için alınmıştır.

I-V ölçümlerinde, örnekler sıvı helyum akışına sahip kriyostata (Cryostat) yerleştirilmiştir. Bu sistem sayesinde 15K ile 450K aralılarında akım-voltaj ölçümleri alınabilmektedir.



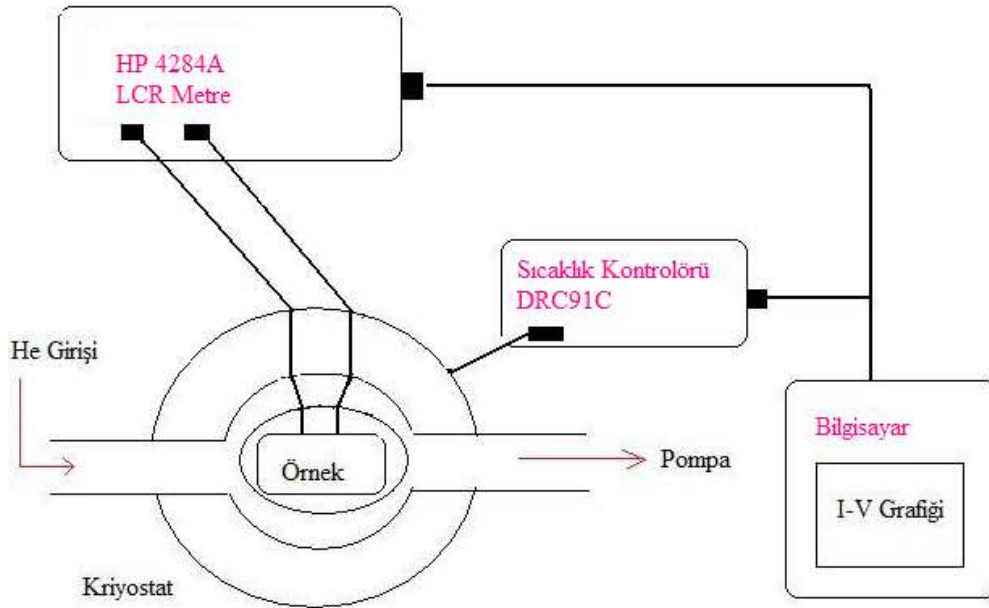
Şekil 3.8 Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği

Ölçümlerde akım-voltaj kaynağı olarak Keithley 2400, sıcaklık kontrolörü olarak DRC 91 C kullanılmıştır. I-V ölçümleri  $\pm 40$  V aralıklarında alınabilmektedir.

### 3.5.2 Sığa-voltaj (C-V) deney düzeneği

Sığa – Voltaj (C-V) ölçümleri, kuantum noktaları temelli bellek yapılarında p-n eklemi civarında kuantum noktaları içeren örnek ile kuantum noktaları içermeyen örnek için alınmıştır. Uygulanan geri besleme voltajının değiştirilmesiyle kuantum noktalarının arınma bölgesi içerisinde kalması sağlanmış ve geri besleme voltajıyla değişen sığa değerleri ölçülmüştür.

Yapılan ölçümler farklı sıcaklıklarda, farklı frekanslar için alınmış olup, bu ölçümler sayesinde kuantum noktalarının varlığı kanıtlanmıştır.



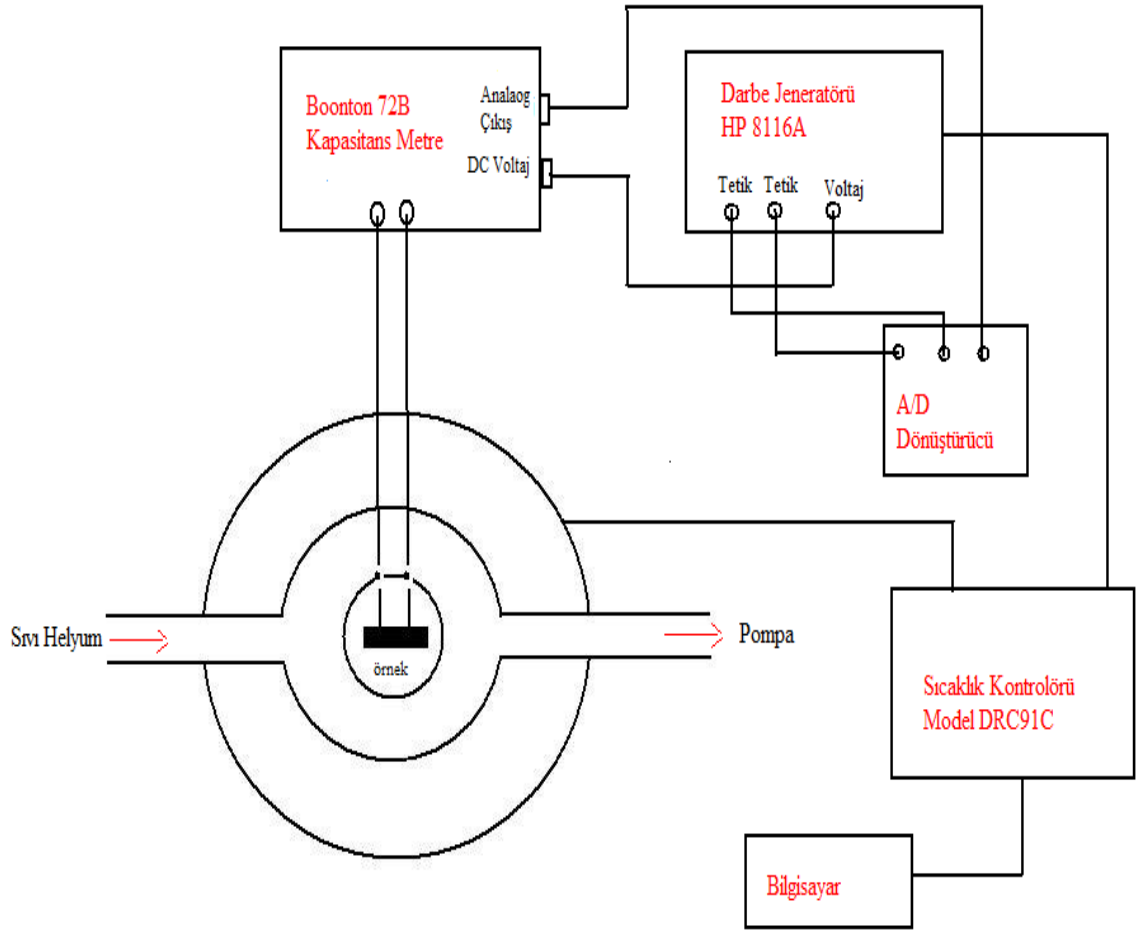
Şekil 3.9 Sığa-Voltaj (C-V) deney düzeneği

Sığa – Voltaj (C-V) ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinde ölçü aleti olarak HP 4284A LCR Metre kullanılmıştır. Bu ölçü aleti ile 20 Hz ile 1 MHz aralıklarında farklı frekanslarda ölçümler alınabilmektedir. C-V ölçümlerinde 100 mV luk AC voltajı uygulanmış olup, geri besleme voltajı  $\pm 40$  V aralığındadır.

### 3.5.3 DLTS deney düzeneği

Derin seviye geçiş spektroskopisi deney düzeneğinde; darbe jeneratörü olarak HP 8116A (pulse generator), sığa metre olarak Boonton 72B ve sıcaklık kontrolörü olarak DRC 91C kullanılmıştır. Geri besleme voltajı HP 8116A ile sağlanmış olup, minimum 10 ns lik darbe genişliğine sahiptir. HP 8116A darbe jeneratörüne tetik sinyali Analog/Dijital (GPIB) kart aracılığı ile gönderilmiştir.

Tüm deney düzeneği Labview programı aracılığıyla bilgisayardan yönetilmektedir.



şekil 3.10 DLTS deney düzeneği

DC geri besleme voltajı ile aynı zaman aralığında Boonton 72B sığa metre ile örneklerin sığa değerleri ölçülmüştür. Boonton 72B sığa metreden alınan ölçüm sonuçları A/D dönüştürücü kart (GPIB) yardımıyla bilgisayarda kaydedilmektedir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

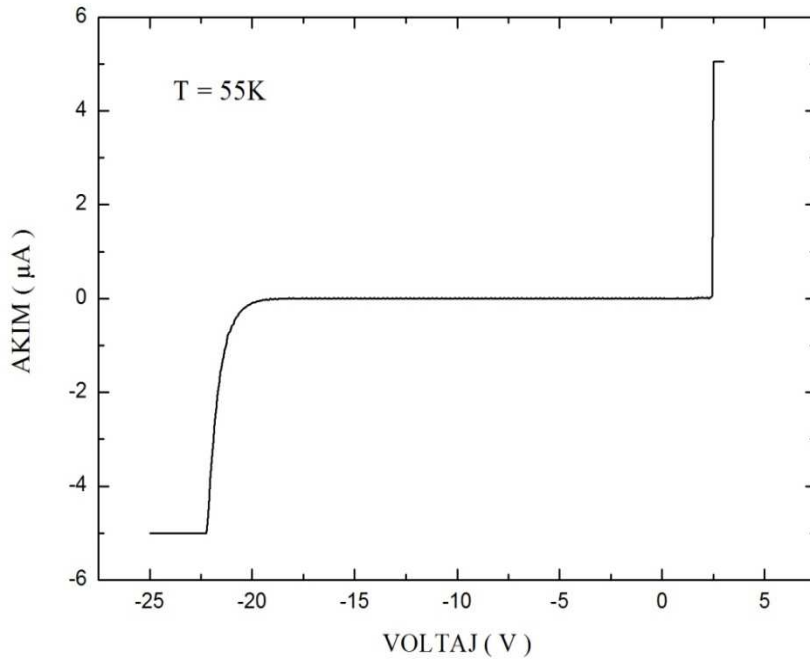
### 4.1 Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçları

Bir  $n^+$ -p eklemelinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş kuantum noktaları içeren ve içermeyen örneklerin diyot karakteristiklerini gözlemek ve hem DLTS hem de Sığa-Voltaj ölçümlerinde uygulanması gereken voltaj aralıklarının belirlenmesi için Akım-Voltaj ölçümleri alınmıştır.

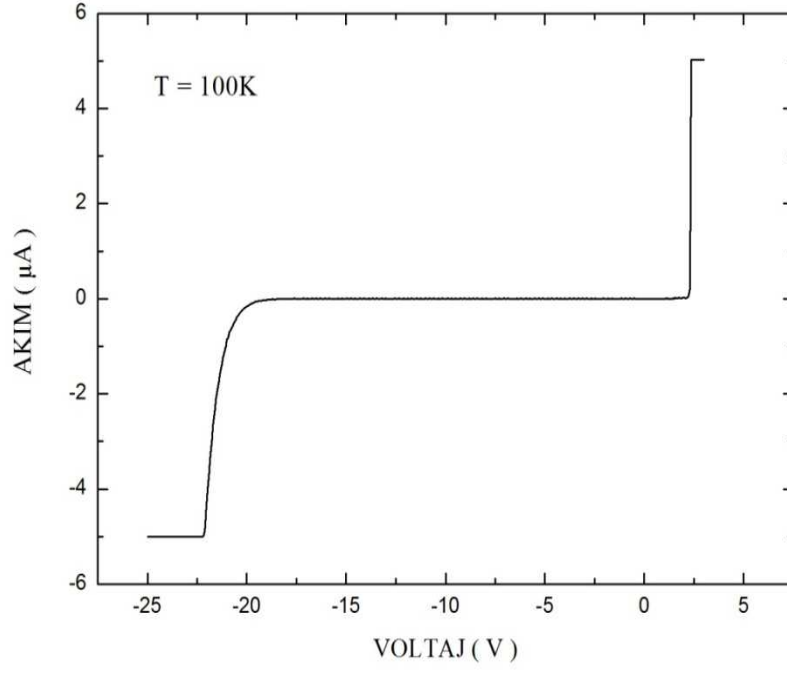
Ölçümler 55K-300K sıcaklık aralığında yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### 4.1.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örneğin (TW454) akım-voltaj (I-V) ölçüm sonuçları

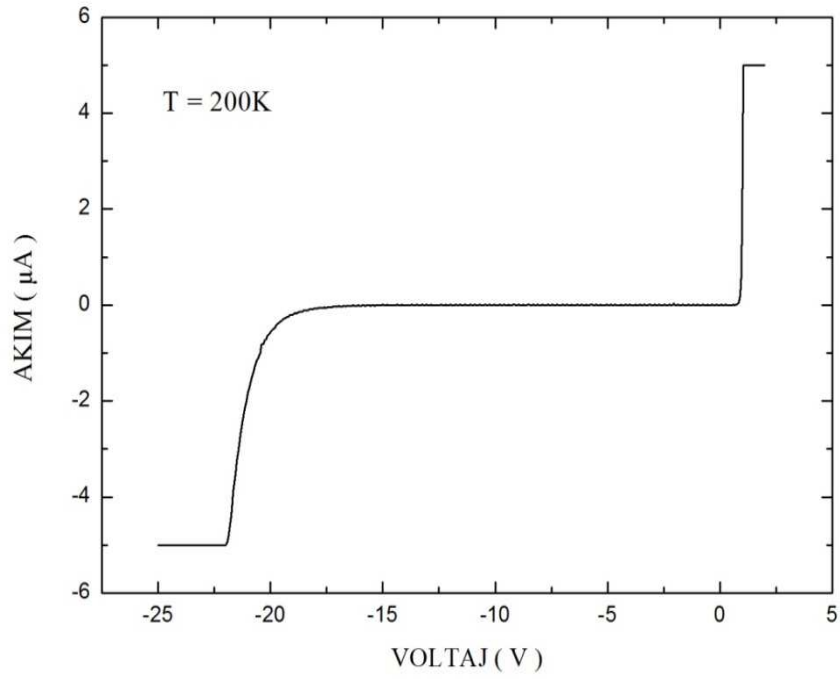
Bir  $n^+$ -p eklemelinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş GaSb kuantum noktaları içeren örnek için (TW454) 55 K'de (şekil 4.1), 100 K'de (şekil 4.2), 200 K'de (şekil 4.3) ve oda sıcaklığı (300K) için ölçümler alınmıştır (şekil 4.4).



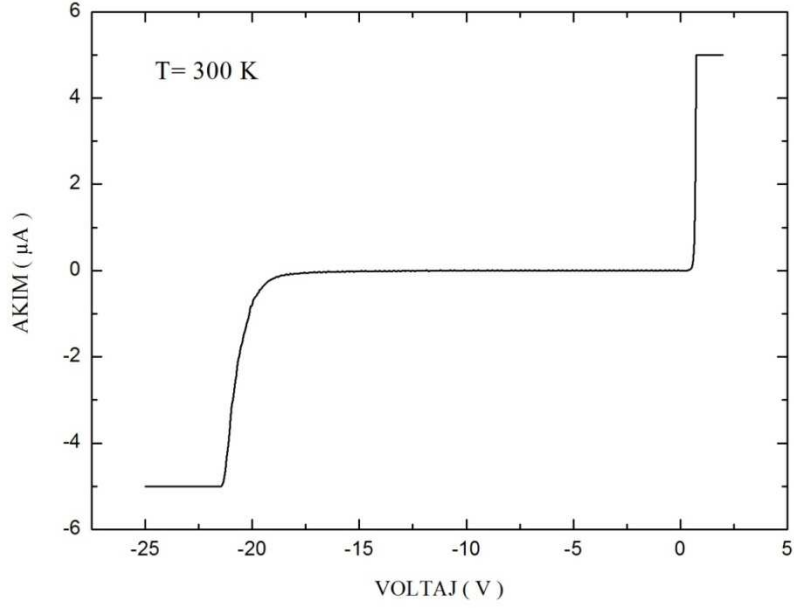
Şekil 4.1 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 55K için alınan akım-voltaj grafiği değişimi



Şekil 4.2 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 100K için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi



Şekil 4.3 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için 200K için alınan Akım-Voltaj grafiği



Şekil 4.4 GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) için oda sıcaklığında (300K) için alınan Akım-Voltaj grafiği değişimi

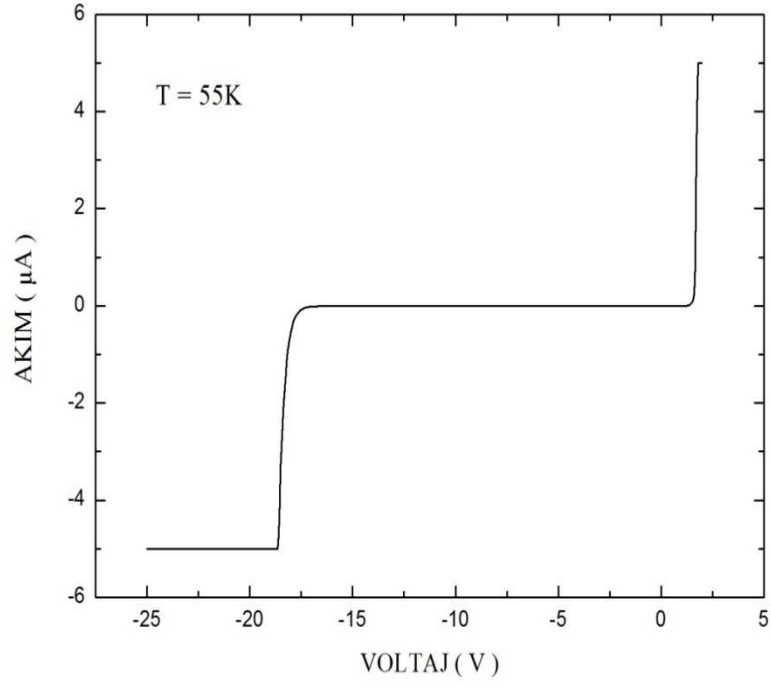
Akım-Voltaj grafiklerinde kırılma voltajı  $-1 \mu A$ 'e karşılık gelen voltaj olarak belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarından yola çıkarak örneğin geri besleme voltajı sınırı  $\cong -20V$  olarak bulunmuştur.

Düşük sıcaklıklarda ölçüm alınmasının nedeni, kaçak akımın azalması ve DLTS deneyinde düşük sıcaklıklara inilmesidir.

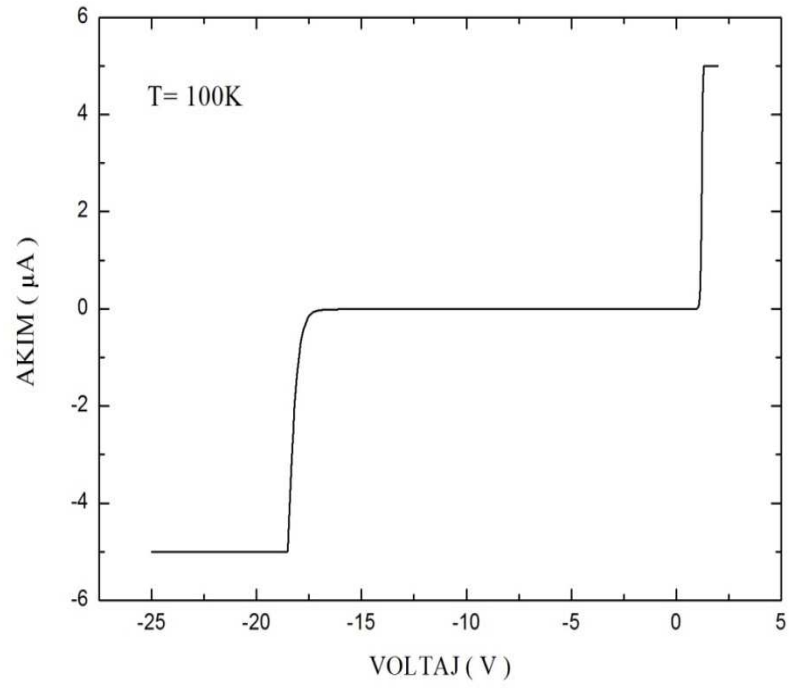
Ölçümler sırasında aşırı akıma karşı güç kaynağının çıkışı  $\pm 5 \mu A$  olarak sınırlandırılmıştır.

#### 4.1.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örneğin (TW455) akım-voltaj (I-V) ölçüm sonuçları

Bir  $n^+$ -p eklemelinin arınma bölgesi civarında büyütülmüş GaSb kuantum noktaları içermeyen örnek için (TW455) 55K-300K aralığında akım-voltaj (I-V) ölçümleri alınmıştır. Örneğin yapısı, bir önceki örnek yapısıyla aynı olup, aynı koşullarda büyütülmüşlerdir.



Şekil 4.5 GaAs/GaSb kuantum noktaları içermeyen referans örneği (TW455) için 55K'de alınan akım-voltaj grafiği değişimi



Şekil 4.6 Referans örneği (TW455) için 100K de alınan akım-voltaj grafiği değişimi

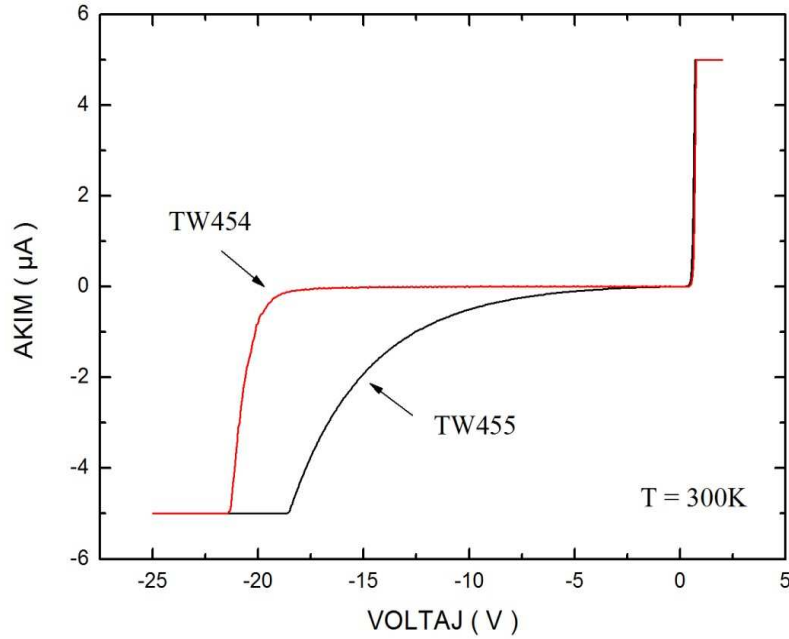
55 K, 100 K ve 200 K için optimize edilmiş voltaj değeri  $-1 \mu\text{A}$ 'e karşılık gelen kırılma voltajı  $\cong -18 \text{ V}$  olarak ölçülmüş olup, 300K için kırılma voltajı  $\cong -12.5 \text{ V}$  olarak gözlemlenmiştir.

Bu ölçüm sonuçlarından sıcaklık azaldıkça diyot karakteristiğinin iyileştiği görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklıklarda baskın olan kaçak akımın, düşük sıcaklıklarda azalmasıdır. Örneğin kırılma voltajı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.

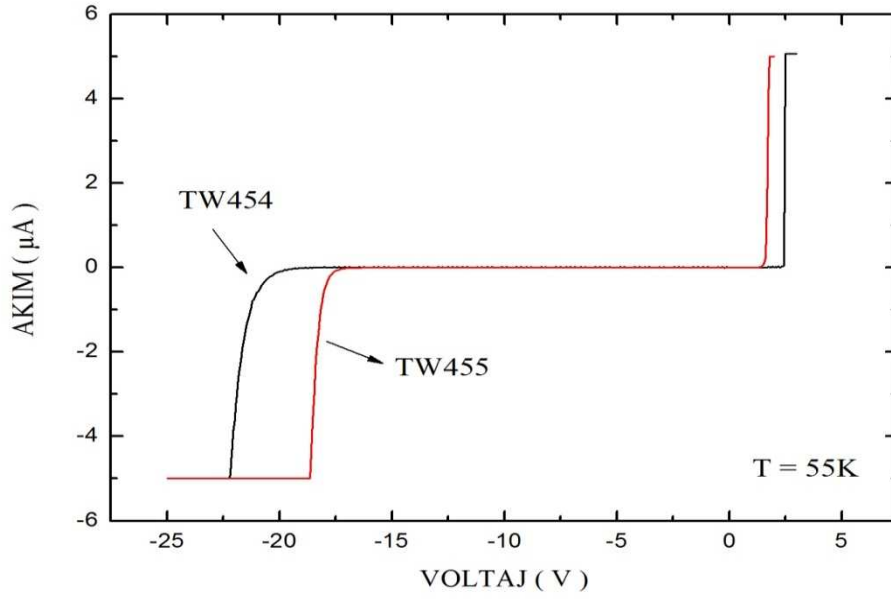
Ölçümler sırasında aşırı akıma karşı güç kaynağının çıkışı  $\pm 5 \mu\text{A}$  olarak sınırlanmıştır.

#### 4.1.3 Örneklerin Akım-Voltaj (I-V) Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

I-V ölçüm sonuçlarına bakılarak aynı koşullarda MBE sisteminde büyütülen TW455 kodlu referans örneği ile kuantum noktaları içeren TW454 kodlu örnek arasındaki kırılma voltajlarının değiştiği gözlenmiştir. Kırılma voltajını etkileyen etmenlerden biri sıcaklık olduğu için, örnekler aynı sıcaklık değerlerinde alınan ölçümler için karşılaştırılmalıdır.



Şekil 4.7 Referans örneği (TW455) ile kuantum noktaları içeren örneğin (TW454) 300K için I-V ölçüm Karşılaştırmaları



Şekil 4.8 Referans örneği (TW455) ile kuantum noktaları içeren örneğin (TW454) 55K için I-V ölçüm karşılaştırılmaları

Ölçümlerde en yüksek sıcaklık olarak 300K (oda sıcaklığı) alınmış olup, TW454 kodlu kuantum noktaları içeren örnek için bu sıcaklık değerinde optimize edilmiş  $-1\mu\text{A}$  e karşılık gelen kırılma voltajı  $\cong -20\text{V}$  olarak ölçülürken, TW455 kodlu referans örneği için yine sıcaklık değerinde  $1\mu\text{A}$  e karşılık gelen kırılma voltajı  $\cong -12.5\text{V}$  olarak ölçülmüştür.

I-V ölçümlerinde en düşük sıcaklık olarak 55K alınmıştır. TW454 kodlu kuantum noktaları içeren örnekte 55K için  $1\mu\text{A}$  e karşılık gelen kırılma voltajı  $\cong -21\text{V}$  olarak belirlenirken, TW455 kodlu referans örneği için yine sıcaklık değerinde  $1\mu\text{A}$  e karşılık gelen kırılma voltajı  $\cong -18\text{V}$  olarak belirlenmiştir.

Bu I-V ölçüm sonuçlarından yola çıkarak kuantum noktaları içeren örneğin diyot yapısının referans örneğine kıyasla daha iyi karakteristiklere sahip olduğu söylenebilir.

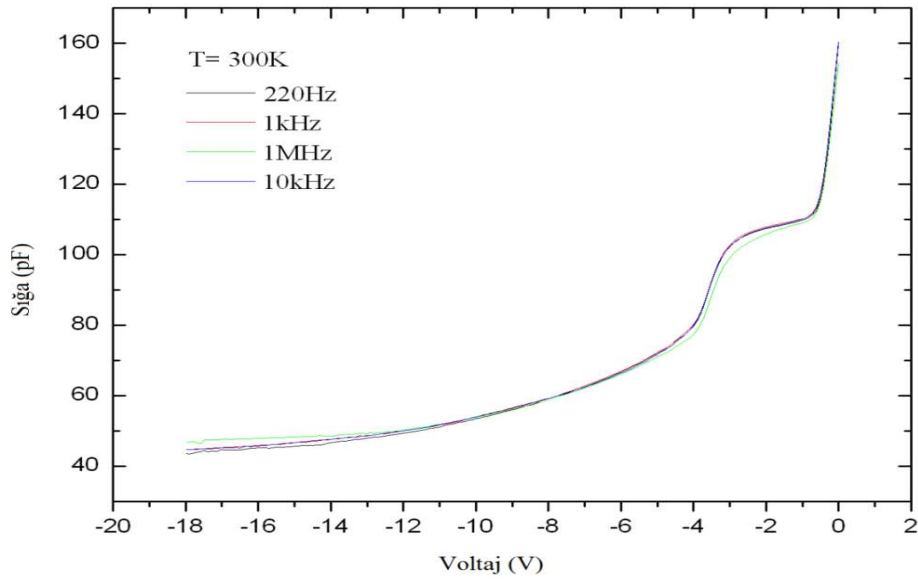
## 4.2 Sığa-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları

Farklı sıcaklık ve frekans aralıklarında alınan sığa-voltaj (C-V) ölçümleri ile bir  $n^+$ -p eklemi arınma bölgesi civarında büyütülmüş GaSb kuantum nokta içeren örnek (TW454) ile referans (TW455) elektriksel özellikleri incelenmiştir.

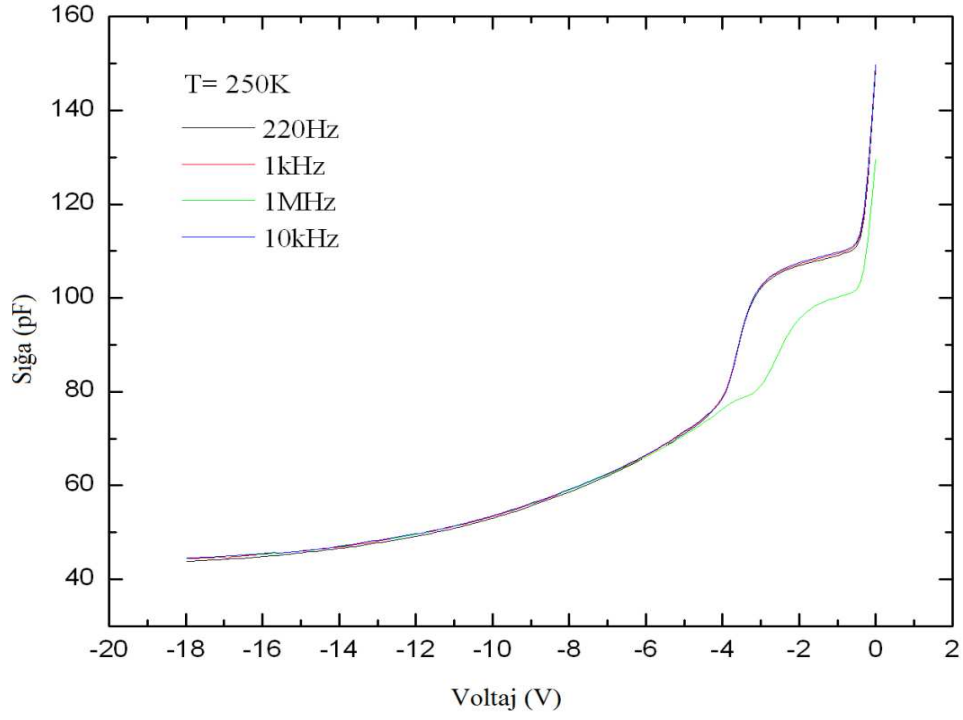
### 4.2.1 GaAs/GaSb Kuantum noktası içeren örneğin (TW454) sığa-voltaj (C-V) ölçüm sonuçları

GaAs/GaSb kuantum noktası içeren örnek (TW454) için farklı sıcaklık ve frekans aralıklarında C-V ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlere başlanmadan önce I-V ölçümlerinden elde edilen kırılma voltajı değerleri dikkate alınmıştır.

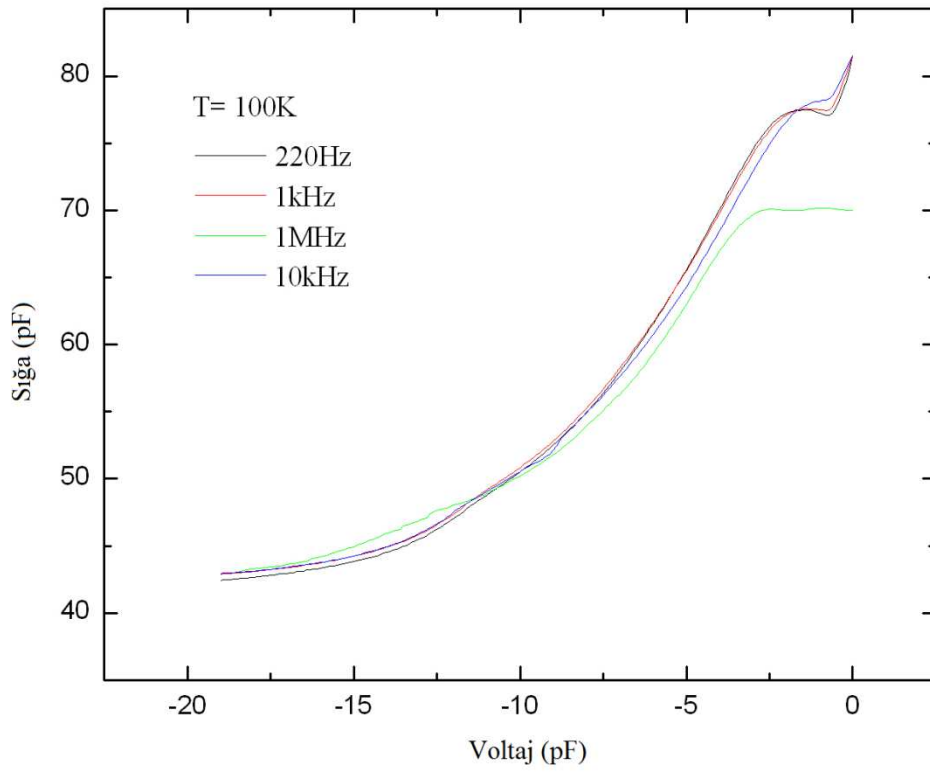
Şekil 1 de görülen Sığa-Voltaj eğrisinde 0 V ile -4 V arasındaki değişim kuantum noktalarının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu ölçümlerde kuantum noktalarının taşıyıcı hareketlerinin gözlenebilmesi için farklı sıcaklık ve frekans aralıklarına bakılmıştır. I-V ölçümlerinde olduğu gibi en yüksek sıcaklık 300K (oda sıcaklığı), en düşük sıcaklık olarak 55 K alınmış olup, frekans aralığı olarak 1 MHz, 220 Hz, 1 kHz ve 10 kHz deki değişimlere bakılmıştır.



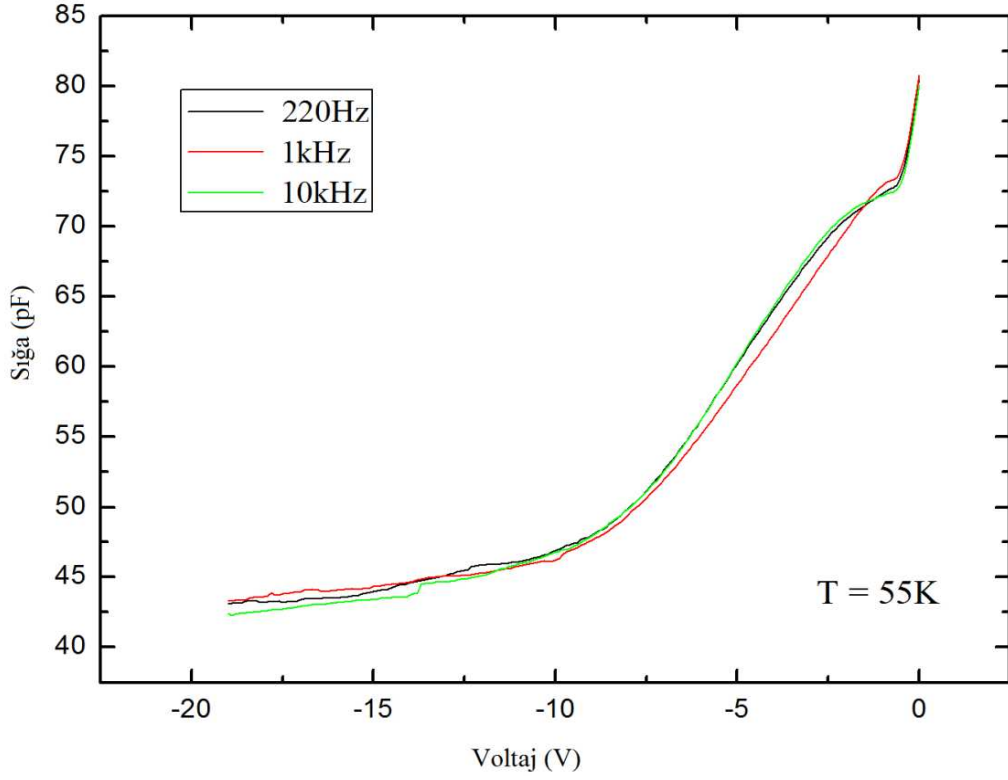
Şekil 4.9 Oda sıcaklığında (300K), farklı frekanslar için elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi



Şekil 4.10 250K için, farklı frekanslarda elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi



Şekil 4.11 100K için, farklı frekanslarda elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi

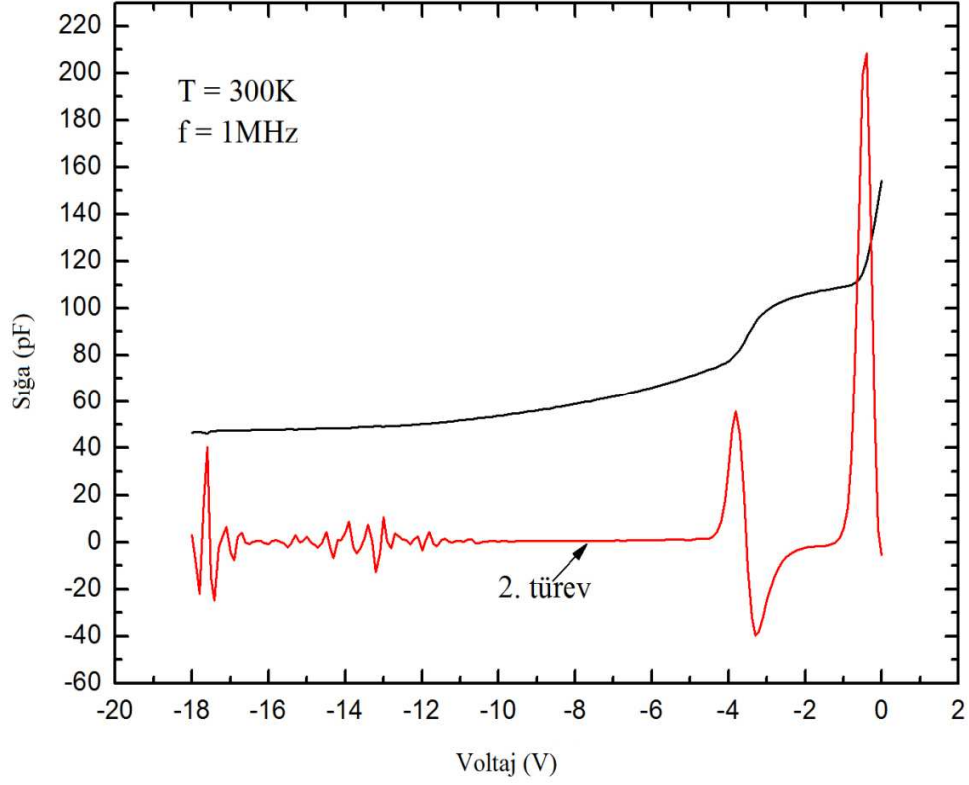


Şekil 4.12 55 K için farklı frekanslarda elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi

Alçak frekanslarda ölçüm hızı yavaşladığından daha ayrıntılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu nedenle alçak frekanslarda, yüksek frekans değerlerine nazaran biraz daha yüksek sığa değerleri ölçülmüştür.

Artan geri besleme voltajıyla arınma bölgesi genişliği kuantum noktalarına ulaşır. Kuantum noktalarının arınma bölgesi içerisine girmesiyle yüksek elektrik alandan dolayı emisyon meydana gelir. Dolayısıyla kuantum noktalarında yer alan taşıyıcıların hareketiyle yük miktarında değişim gözlenmiştir ( $C = dQ/dV$ ).

Şekil 4.15'deki grafikte altta gösterilen eğri Sığa-Voltaj eğrisinin ikinci türevidir. Bu türev, yani sığa ile voltajın 2. mertebeden değişimi kuantum noktalarının boş ve dolu olduğu voltaj değerlerini göstermektedir. Bu ölçüm sonucundan elde edilen voltaj değerlerinde -0.4 V'da kuantum noktaları arınma bölgesinin dışında dolu iken, -3.8V'da kuantum noktaları arınma bölgesinin içinde oluşan yüksek elektrik alandan dolayı boştur.



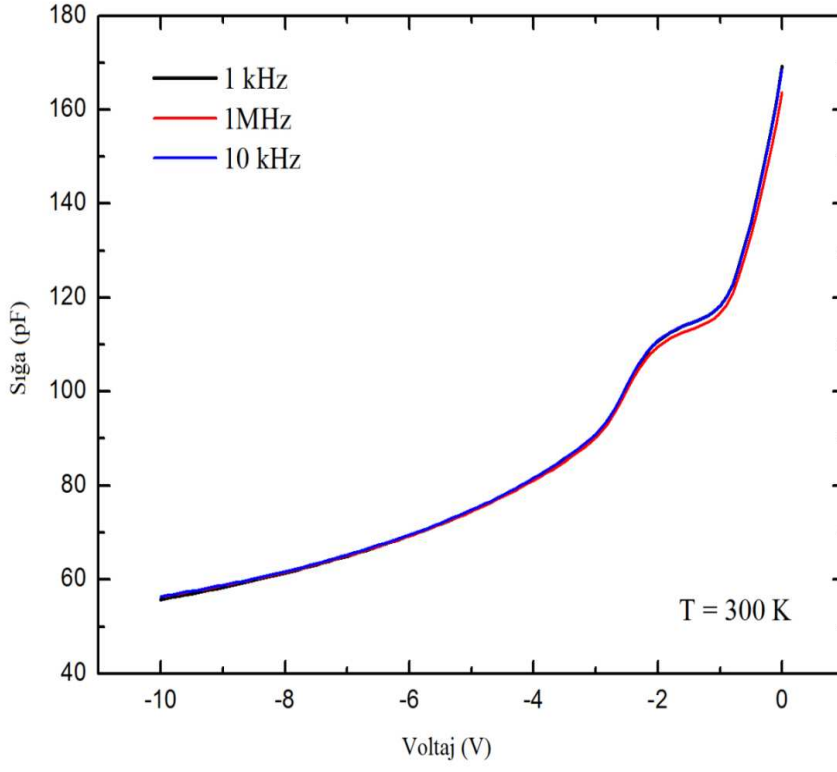
Şekil 4.13 300K, 1MHz için elde edilen Sığa-Voltaj değişim eğrisi (üstte) ve kuantum noktalarının boş ve dolu olduğu voltaj değerlerini gösteren sığa-voltaj eğrisinin ikinci türevi (altta)

#### 4.2.2 GaAs/GaSb Kuantum noktası içermeyen örneğin (TW455) sığa-voltaj (C-V) ölçüm sonuçları

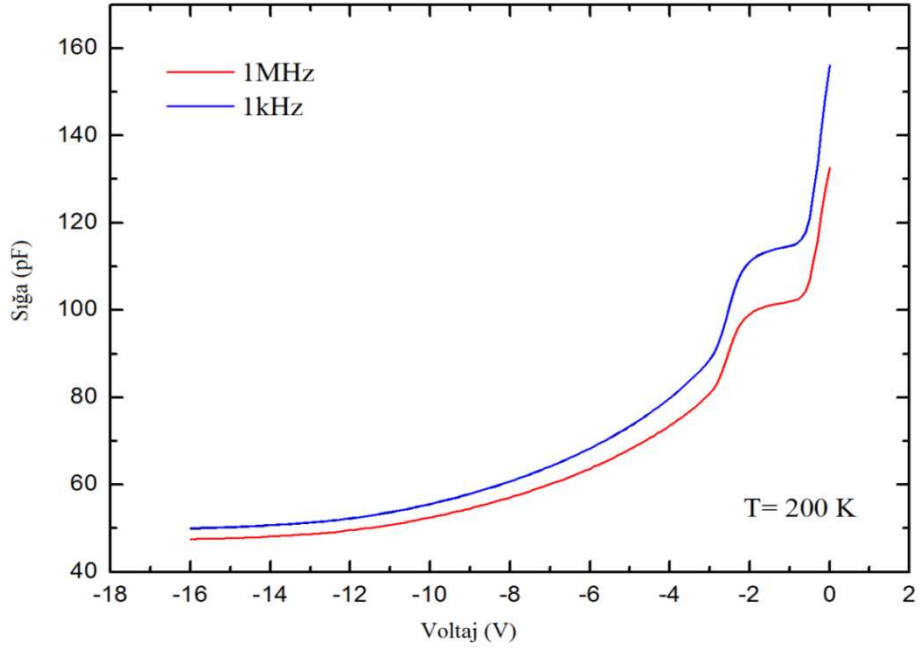
TW455 kodlu referans örneği için de Sığa-Voltaj ölçümleri 55 K, 100 K ve 300 K'de 1kHz, 1MHz ve 10 kHz için, 200K'de 1MHz ve 1 kHz için alınmıştır.

Ölçüm sonuçları farklı sıcaklık ve frekans değerlerindeki sığa-voltaj grafikleri ile gösterilmiştir.

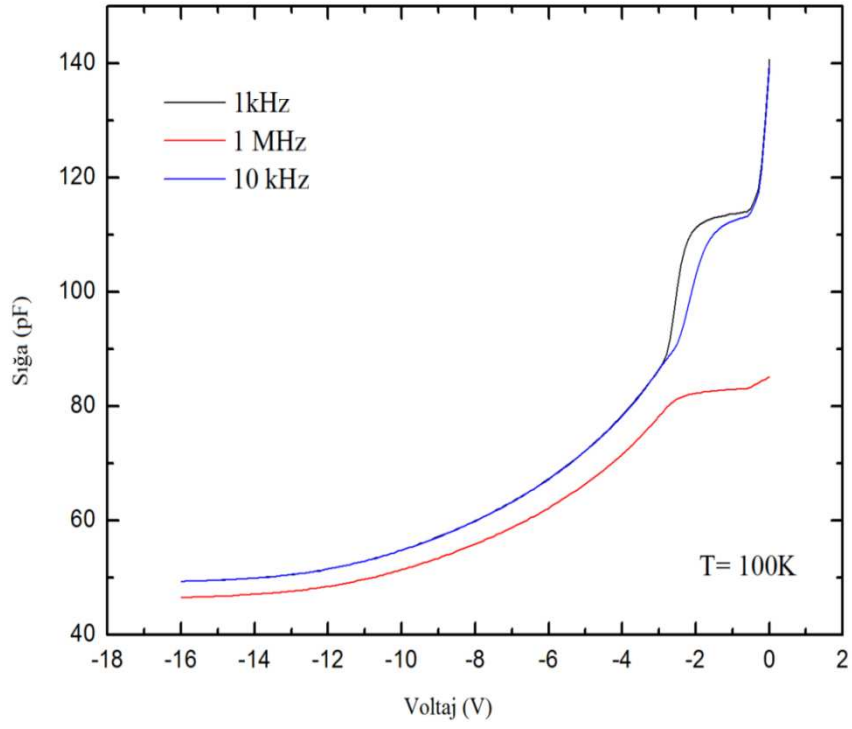
Bu referans örneği için ölçümler kuantum noktaları içeren örmekle karşılaştırılabilmesi için alınmıştır. Bu nedenle kuantum noktaları içeren örnek ile aynı sıcaklık ve frekans değerlerinde sığa-voltaj ölçümleri alınmıştır.



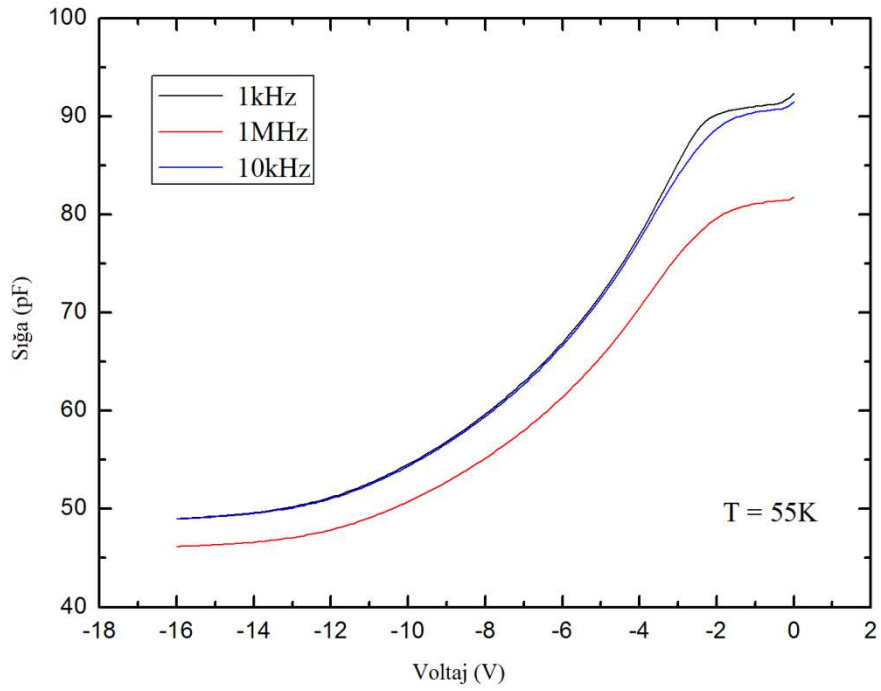
Şekil 4.14 300K, 1kHz, 1MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi.



Şekil 4.15 200K, 1kHz, 1MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi



Şekil 4.16 100K, 1kHz, 1MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi



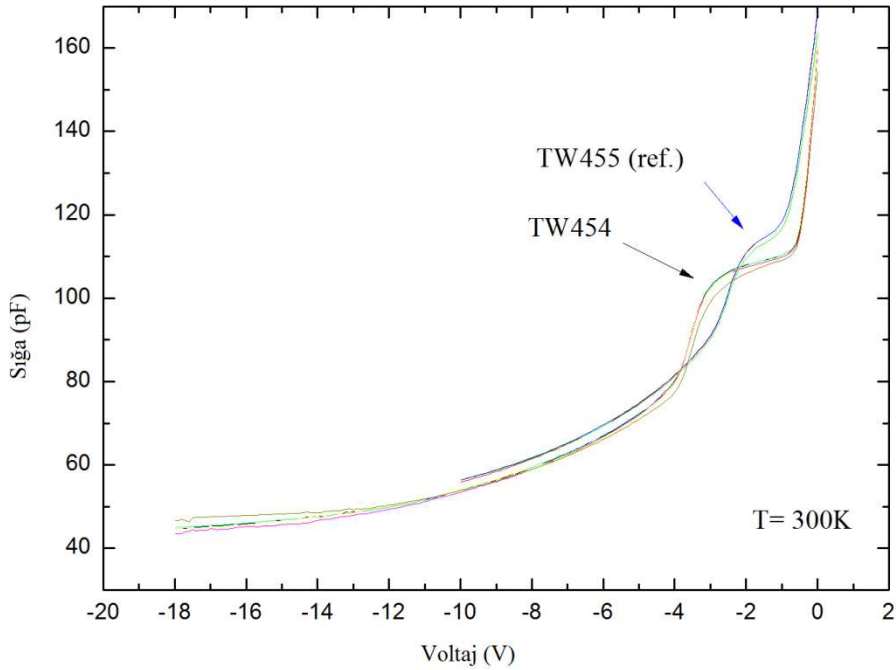
Şekil 4.17 55 K, 1 kHz, 1 MHz ve 10 kHz için elde edilen C-V değişim eğrisi

Bu örnek kuantum noktası içermemesine rağmen yukarıdaki C-V eğrisinde değişim gözlenmiştir. Bunun nedeni örnekte bulunan kusurların termal emisyon ile yayınlanmasından kaynaklanmaktadır.

Grafiklerden görüldüğü üzere 1kHz ile 1MHz için elde edilen verilerin oldukça yakın oldukları gözlemlenmiştir.

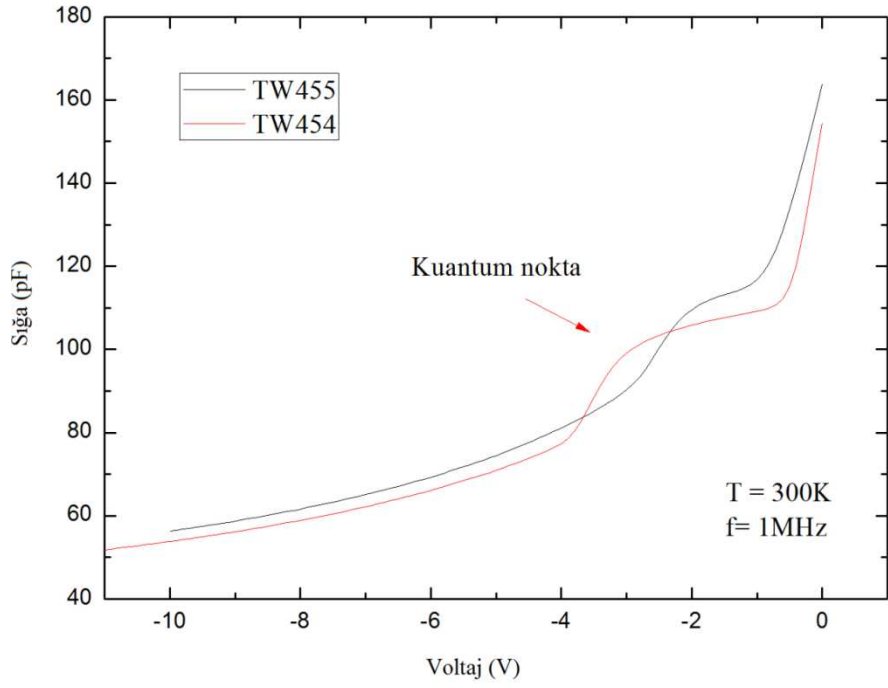
#### 4.2.3 Örneklerin Sığa-Voltaj (C-V) Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması

Kuantum noktalarının varlığı, kuantum noktası içeren örnek ile içermeyen örneğin karşılaştırmalı C-V grafikleri sonucunda gösterilmiştir. İki örnek arasındaki karşılaştırma farklı sıcaklık ve frekans değerleri göz önüne alınarak yapılmıştır.

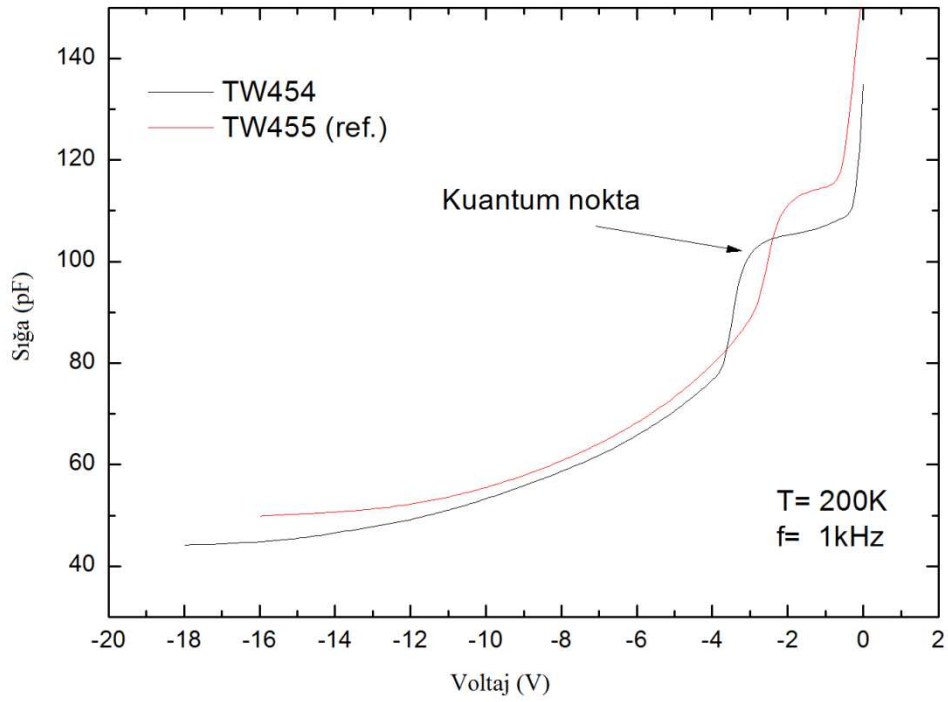


Şekil 4.18 300K' de, 1kHz, 1MHz ve 10 kHz için elde edilen kuantum noktası içeren örnek (TW454) ile referans örneğinin (TW455) Sığa-Voltaj değişim eğrileri

Şekil 4.2'de referans örneği ( TW455 kodlu örnek) ile kuantum noktaları içeren örneğin (TW454 kodlu örnek) 300 K için 1kHz, 1MHz ve 10 kHz frekanslarında sığa-voltaj ölçüm sonuçları aynı grafikte gösterilmektedir.



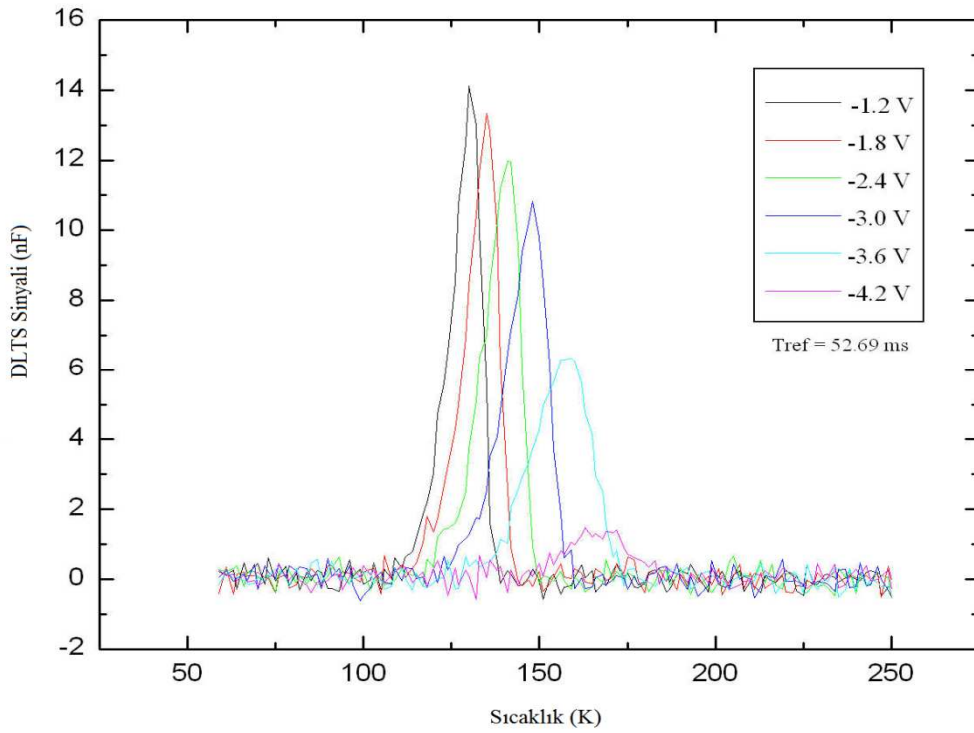
Şekil 4.19 300K ve 1MHz için TW454 kodlu (kuantum noktası içeren) örnek ile TW455 kodlu referans örneğinin C-V grafikleri



Şekil 4.20 200K ve 1kHz için TW454 kodlu (kuantum noktası içeren) örnek ile TW455 kodlu referans örneğinin C-V grafikleri

### 4.3 DLTS Ölçüm Sonuçları ve Aktivasyon Enerjisi

DLTS ölçümlerinde, doldurma voltajı ile boşaltma voltajı olan geri besleme voltajı arasına 0.3V luk fark konulmuştur [ $V_P = V_R + 0.3$ ]. Bu voltaj farkı ile hemen hemen her bir seviye için emisyonun gözlemlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu DLTS ölçümü aynı zamanda yük seçici derin seviye geçiş spektroskopisi olarak adlandırılabilir. Ölçümler 60K ile 250K arasındaki sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiş olup, sıcaklık 60 K den itibaren 1.5 K aralıklarla 250K e kadar arttırılmıştır. Ölçüm sonuçları Boxcar programı aracılığı ile değerlendirilmiştir.

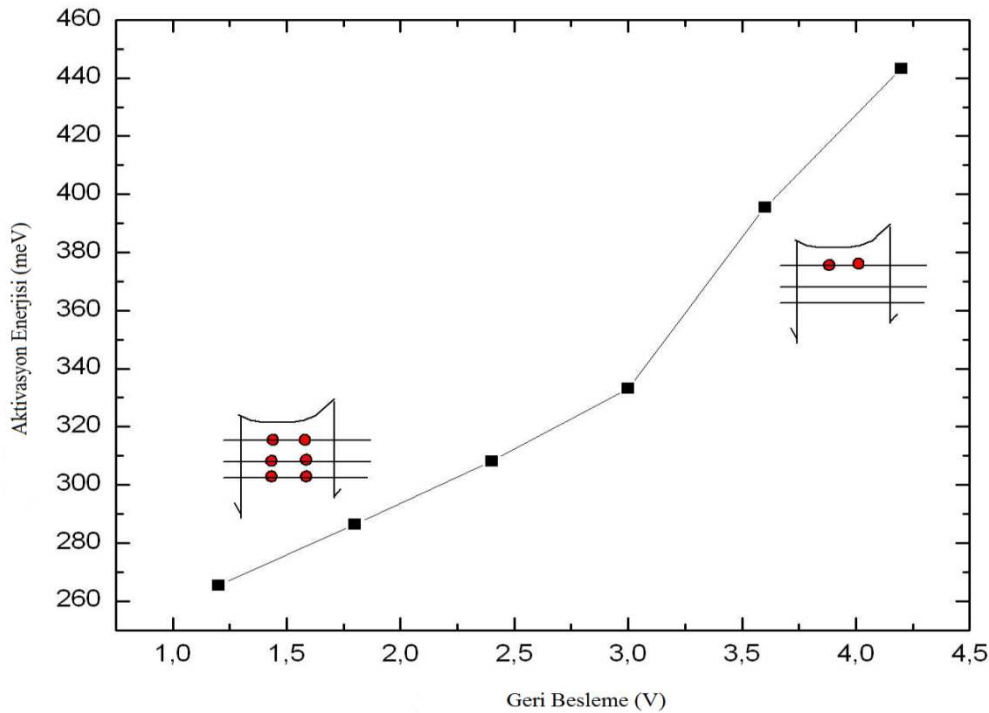


Şekil 4.21 TW454 kodlu örnek için DLTS ölçüm sonuçları

DLTS ölçüm sonuçlarına bakıldığında, -1,2 V'dan itibaren kuantum nokta enerji seviyelerinden emisyonun gözlemlenmeye başladığını ve -4,2 V'a ulaşıldığında kuantum nokta enerji seviyelerinin boşaldığı gözlemlendi. Düşük geri besleme voltaj değerlerinde, kuantum noktalarıyla dolu enerji seviyelerinin sayısı fazladır. Bu nedenle -1,2 V değerinde en yüksek DLTS sinyali alınmıştır. Geri besleme voltajı arttırıldıkça, kuantum noktalarıyla dolu enerji seviyelerinin sayısındaki azalma nedeniyle DLTS sinyali giderek azalmıştır.

DLTS ölçüm sonucundan görüldüğü üzere, kuantum noktaları içeren örnek için (TW454) emisyon gözlemlenebilmişken, referans örneğinden (TW455) aynı koşullar altında bu büyüklükte bir DLTS sinyali alınamamıştır. Bu durum teori ile uyuşmakta olup, bize kuantum noktalarının varlığını ispat etmektedir.

Aktivasyon enerjisi; taşıyıcıların bulunduğu enerji seviyesinden bir üst enerji seviyesine geçiş yapabilmeleri için gerekli olan enerji miktarıdır. Bu nedenle kuantum nokta temelli flaş belleklerde her bir seviye için bu enerji değerinin belirlenebilmesi oldukça önemlidir. DLTS ölçüm sonuçlarından yararlanarak aktivasyon enerjisi belirlenebilir.



Şekil 4.22 TW454 kodlu örnek için aktivasyon enerjisi grafiği

Aktivasyon enerjisi grafiğinden anlaşılacağı üzere, düşük voltaj değerlerinde kuantum noktalarıyla dolu enerji seviyelerinin sayısı fazla olup, aktivasyon enerjisi küçüktür. Voltaj değeri arttırıldıkça kuantum noktalarıyla dolu enerji seviyeleri azalarak, Fermi seviyesini yükseltecektir. Bu nedenle yüksek geri besleme voltaj değerlerinde, yüksek aktivasyon enerji değerlerine rastlanmaktadır. Grafikten, GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek için taban seviye aktivasyon enerjisi (lokalizasyon enerjisi) 450 meV civarında hesaplanmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, GaAs/GaSb kuantum noktaları içeren örnek (TW454) ile kuantum noktaları içermeyen (TW455) örnek karşılaştırılarak kuantum noktalarının varlığının tespit edilmesi ve DLTS (derin seviye geçiş spektroskopisi) ölçümünden yararlanarak GaAs/GaSb kuantum nokta temelli bir bellek aygıt için aktivasyon enerji değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Aktivasyon enerjisi, bir taşıyıcının ne kadarlık bir enerjiyle kuantum noktasından ayrılabilceğini gösterdiğinden bu yapıları bellek aygıt olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasında büyük önem arz etmektedir.

Kuantum nokta temelli bir bellek aygıt yapısında p-n eklemi civarında kendiliğinden organize olmuş kuantum noktaları bulunmaktadır. Bu ekleme geri besleme uygulanması silme sürecine karşılık gelirken, ileri besleme uygulanması yazma sürecine karşılık gelir. Taşıyıcıların kuantum noktalarında bulunması ya da ayrılması durumları voltajın yanında sıcaklığa da bağlıdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında değişken olarak voltajın yanı sıra sıcaklık da kullanılmış, bu değişkenlere bağlı olarak I-V (Akım-Voltaj) ve C-V (Sığa-Voltaj) ölçümleri alınmıştır. I-V ölçümünden kuantum noktası içeren örnek için geri besleme voltajı -20V civarında hesaplanırken, kuantum noktası içermeyen örnek için -12,5 V olarak hesaplanmıştır. Kuantum noktası içeren örnek için C-V ölçümlerinde kuantum noktalarının -0,4 V'da dolu, -3,8 V'da ise boş olduğu saptanmıştır. Nitekim DLTS ölçümlerinde de -1,2 V ile -4,2 V değerleri arasında DLTS sinyali alınmış olup, bu sonuçların daha önce elde edilen C-V ölçümüyle de uyduğu gözlemlenmiştir. Yine kuantum noktaları içeren örnek için DLTS ölçümünden yola çıkarak bu örneğin taban seviye aktivasyon enerjisi 450 meV civarında hesaplanmıştır.

GaAs/GaSb kuantum nokta temelli bellek yapılarda bilgi yazma ve silme süreçlerinin kırılma voltajının altındaki uygun voltaj değerlerinde gerçekleştirilmesi, bu tür bellek yapıların yüksek voltajlara maruz bırakılmadan zarar görmemesini ve uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır. Bellek aygıt endüstrisinde kullanılan silikon tabanlı flaş belleklerin yazma ve silme zamanları yavaş olup, kısa ömürlüdürler. Başka bir bellek çeşidi olan DRAM ler ise hızlı olmalarına karşın aşırı güç tüketimine neden olmaktadır. Her iki belleğin üstün özelliklerini içerisinde barındıran kuantum nokta

temelli flaş bellekler evrensel bir bellek olmaya adaydır.

Sonuç olarak, uygun malzeme kombinasyonu ve bant mühendisliğinin kullanılmasıyla hızlı ve dayanıklı kuantum nokta temelli bellek aygıtlar oluşturulabilir. Günümüzdeki çalışmalar kuantum nokta temelli bellek aygıtlarda bilgi yazma/okuma ve silme zamanlarının belirlenmesi ve yüksek aktivasyon enerjisine sahip yapıların oluşturulması üzerine yoğunlaşmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akçay, N. 2008. Kuantum nokta temelli bellek aygıtlar. Doktora tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Bimberg, D. 2008. Nanoscience and technology semiconductor nanostructures. Springer, 221-235, Berlin.
- Biointerface: Nanostructures, Anonymous. 2010. Web sitesi. <http://biointerface.org/nano/nanostructures/default.aspx>. Erişim sitesi: 20.10.2010.
- Compound semiconductors, 2009. Web sitesi. <http://www-opto.e-technik.uni-ulm.de/lehre/cs/>. Erişim tarihi. 08.09.2010.
- Eisele, H., Flebbe O., Kalka, T., Preinesberger, C., Heinrichsdorff, F., Krost A., Bimberg, D., and Dähne-Prietsch, M., 1999, Cross-sectional scanning-tunneling microscopy of stacked InAs quantum dots, Appl. Phys. Lett., 75, 106-108.
- Geller, M., Kapteyn, C., Müller-Kirsch, L., Heitz, R. and Bimberg, D. 2003. 450 meV hole localization in GaSb/GaAs quantum dots. Applied physics letters, 16, 2706-2708.
- Geller, M. 2007. Investigation of carrier dynamics in self-organized quantum dots for memory devices. Technische Universität Berlin, Berlin.
- 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, 40, 1811-1814
- Lang, D. V. 1974. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. Journal of applied physics vol. 45 no.7, 3023-3032.
- Makram-Ebeid, S. and Lanoo, M. 1982. Electric-field-induced phonon asisted tunnel ionization from deep levels in semiconductors, Phys. Rev. Lett. 48, 1281.
- Makram-Ebeid, S. and Lanoo, M. 1982. Quantum model for phonon-assisted tunnel ionization from deep levels in semiconductors, Phys. Rev. Lett. 25, 6406.
- 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. Applied physics letters, 91, 242109-1-242109-3.
- Marent, A., Geller, M., Bimberg, D., Vasi'ev A.P., Semenova E.S., Zhukov, A.E. and Ustinov V.M. 2006. Carrier storage time of miliseconds at room temperaturein self-organized quantum dots. Applied physics letters, 89, 072103-1-072103-3.
- MXP Project, Anonymous 2007. Web sitesi. [http://mxp.physics.umn.edu/s07/Projects/S07\\_Graphene/intro.htm](http://mxp.physics.umn.edu/s07/Projects/S07_Graphene/intro.htm). Erişim Tarihi:20.10.2010.

- Marquardt, B., Geller, M., Lorke, A., Reuter, D. and Wieck, D. 2009. Using a two-dimensional electron gas to study nonequilibrium tunneling Dynamics and charge storage in self-assembled quantum dots. Applied physics letters, 95, 022113-1-022113-3.
- Nanophysics, Anonymous 2002. Web sitesi. [http://www.pi4.uni-stuttgart.de/NeueSeite/Lehre/FKPh2007/files/density\\_of\\_states.pdf](http://www.pi4.uni-stuttgart.de/NeueSeite/Lehre/FKPh2007/files/density_of_states.pdf). Erişim tarihi: 01.09.2010.
- Nanofabrication, Anonymous 2008. Web sitesi. <http://knol.google.com/k/nanofabrication#>. Erişim tarihi: 10.09.2010.
- Sze, S.M. 2002. Semiconductor devices physics and technology. John wiley & sons, inc, 85-129, United States of America.
- Sarikavak, B. 2005. InxGa1-xAs/GaAs (x=0.15) süperörgüsünün MBE ile büyütülmesi ve elektriksel-yapısal özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Sarı, H. 2007. Web sitesi. <http://80.251.40.59/eng.ankara.edu.tr/hsari/ders-optoelektronik.htm>. Erişim Tarihi: 15.04.2010.
- Veeco, Yarı iletken diyot, Web sitesi. <http://www.yildiz.edu.tr/~calis/ElektronikLab1Deney2.doc>. Erişim tarihi: 06.09.2010.
- Vincent, G., Chantre A., and Bois, D., 1979. Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junction, J. Appl. Phys. 50, 5484.
- Williams, Ralph. 1990. Modern GaAs Processing Methods. Artech House, 41-46, London.
- Wikimedia commons, 2006. Websitesi. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-PV-E.PNG>. Erişim Tarihi: 13.10.2010.
- Wikimedia commons, 2006. Websitesi. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandgap\\_vs\\_Lattice\\_Const\\_for\\_Semiconductors\\_5.25-6.74\\_Angstrom.jpg#file](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandgap_vs_Lattice_Const_for_Semiconductors_5.25-6.74_Angstrom.jpg#file). Erişim tarihi: 26.08.2010.
- Wikipedia, 2007. Web sitesi. <http://tr.wikipedia.org/wiki/DRAM>. Erişim Tarihi: 25.09.2010.
- Wikipedia, 2008. Web sitesi. [http://en.wikipedia.org/wiki/Deep-level\\_transient\\_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Deep-level_transient_spectroscopy). Erişim Tarihi: 05.03.2010
- Kapteyn, C. 2001. Carrier emission and electronic properties of self-organized semiconductor quantum dots. Technische Universität Berlin, Berlin

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Türkan Üstün

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi: 30.04.1984

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Bahçelievler Deneme Lisesi (1998-2002).

Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen- Edebiyat Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı (Eylül 2003-2007).

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2008 – Ocak 2011).