



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



[Yüksek Lisans Tezi]

**[p-i-n EKLEM OPTOELEKTRONİK AYGITLARDA NEGATİF
KAPASİTANS OLGUSU]**

[Aydın MASOUMİ]

[Fizik Anabilim Dalı]

[Katıhal Fiziği Programı]

**DANIŞMAN
[Doç. Dr.] [Fahrettin SARCAN]**

[Ocak, 2023]

İSTANBUL

Bu çalışma, 27.12.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Fahrettin SARCAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ayşe EROL
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür Burak ASLAN
Boğaziçi Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Tez çalışma sürecinde sabır ve anlayışla bana her zaman desteklerini hissettiren değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Fahrettin SARCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimi sürdürdüğüm laboratuvarındaki bütün bilim insanlarının üzerinde emeği olan sayın hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecinde bilimsel ve teknik bilgisini ve tecrübelerini her zaman benimle paylaşan ve bana yardımlarını esirgetmeyen sayın Mustafa AYDIN hocama sonsuz teşekkür ederim.

Tez düzenleme konusunda bana yardımcı olan değerli arkadaşım Mustafa BÜYÜKHARMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez düzeltme konularında bana yardım eden Araş. Gör. Göksenin KALYON'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasındaki deneysel süreçlerde bana her zaman yardımcı olan değerli arkadaşım Ümit DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecimde her zaman bana arkadaş gibi eşlik eden ve yardımcı olan parlak zekalı arkadaşım Arda SEVİNÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın en büyük öğretmeni ve bana maddi manevi olarak desteklerini esirgemeyen saygıdeğer babama ve tüm zorluklarda yanımda olan ve beni destekleyen anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. |

Ocak 2023

|Aydın MASOUMİ|

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. P-N EKLEMLERİN FİZİĞİ VE EKLEM AYGITLAR.....	3
2.2. P-N EKLEM AYGITLARDA KAPASİTANS OLGUSU	7
2.2.1 P-N Eklem Fotodedektörlerde Kapasitans	8
2.2.2 Işık Yayan Diyotlarda Kapasitans	11
3. MALZEME VE YÖNTEM	15
3.1. AYGIT YAPISI VE AKTİF BÖLGE MALZEMESİ.....	15
3.2. FOTODEDEKTÖR VE LED KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ.....	15
3.2.1. Akım-voltaj.....	15
3.2.2. Fotoışırma	16
3.2.3. Elektro-ışırma	17
3.2.4. Empedans Spektroskopisi.....	18
4. BULGULAR	24
4.1. 9KK AYGITI	24
4.1.1. 9KK Aygıtın Fotoışırma ve Elektro-ışırma Ölçüm Sonuçları	24
4.1.2. 9KK aygıtın kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları	24
4.2. 20KK AYGITI	29
4.2.1. 20KK Aygıtın Fotoışırma Ve Elektro-ışırma Ölçüm Sonuçları	29
4.2.2. 20KK Aygıtın Kapasitans-Voltaj Ölçüm Sonuçları	30
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	34
KAYNAKLAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: a) n-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı. b) p-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı.	3
Şekil 2.2 : p-n eklemde bant denge durumu bant diyagramı gösterimi.	4
Şekil 2.3: İleri besleme altında p-n eklemi.....	6
Şekil 2.4: Geri besleme altında p-n eklemi.	6
Şekil 2.5: p-n eklem fotodedektör geri besleme altında akım-voltaj karakteristiği.	9
Şekil 2.6: Azınlık taşıyıcıların difüzyonundan oluşan bölgenin sınırları.....	12
Şekil 3.1: 9KK ve 20KK aygıtlarının yapısı	15
Şekil 3.2: Akım-voltaj ölçüm deney düzeneği.....	16
Şekil 3.3: Fotoışırma ve elektro-ışırma ölçüm düzeneği.	17
Şekil 3.4: a) aygıtı uygulanan basamak voltajı b) aygıtın akım tepkisi.	22
Şekil 3.5: a) basamak voltajı b) geçici akım c) geçici akımın zamana göre türevi d) uygulanan alternatif voltaj e) iki fonksiyonun çarpımı	23
Şekil 3.6: Empedans ölçüm deney düzeneği.....	23
Şekil 4.1: 9KK aygıtının oda sıcaklığında a) fotoışırma. b) elektro-ışırma spektrumları.	24
Şekil 4.2: 10 MHz'te farklı ileri besleme modülasyon voltajlarında kapasite-voltaj ölçüm sonuçları.	25
Şekil 4.3: 9 KK aygıtın oda sıcaklığında kapasite-voltaj ölçüm sonucu.	25
Şekil 4.4: Frekansa bağılı kusur enerji seviyelerinin iletme katkısı.....	27
Şekil 4.5: Ticari kırmızı LED'in a) akım-voltaj b) kapasite-voltaj ölçüm sonuçları	28
Şekil 4.6: 9KK aygıtta a) sıcaklığa bağılı kapasite-voltaj ölçüm sonucu b) sıcaklığın kusur enerji seviyelerinin aktivasyonunda etkisi.	29
Şekil 4.7: 20KK aygıtının oda sıcaklığında a) fotoışırma. b) elektro-ışırma spektrumları.	30
Şekil 4.8: 20KK aygıtın oda sıcaklığında kapasitans-voltaj ölçüm sonucu.	31

Şekil 4.9: 20KK aygıttan sabit 10 MHz ve farklı sıcaklıklarda elde edilen kapasite-voltaj ölçüm sonuçları.	32
Şekil 5.1: KK sistemde taşıyıcıların hareketi ve tuzaklanması.....	34
Şekil 5.2: a) 9KK aygıtta b) 20 KK aygıtta, kondüktans ve kapasitans-voltaj ölçüm sonucu.....	35
Şekil 5.3: a) 5MHz ve b) 10MHz'de 9KK ve 20KK aygıtların kapasite voltaj ölçüm sonuçları.....	36



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Etkin fotodedektör alanı
a_s	: Alt tabakanın örgü sabiti
a_L	: Üst tabakanın örgü sabiti
C	: Kapasitans
d	: Tabaka kalınlığı
E	: Elektrik alan
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_{th}	: Katkıda bulunan kusur seviyelerinin sınır enerji seviyesi
e	: Elektron yükü
h	: Boşluk
I_0	: Karanlık akım
I_{ph}	: Fotoakım
k_B	: Boltzmann sabiti
L	: Endüktans
N_A	: Akseptör yoğunluğu
N_D	: Donor yoğunluğu
n_{p0}	: P tipi yarıiletkende elektron yoğunluğu
P_0	: Gelen optik güç
p_{n0}	: N tipi yarıiletkende boşluk yoğunluğu
r	: Frensel yansıma katsayısı
T	: Kristalin sıcaklığı
V	: Besleme voltajı
V_{NC}	: Negatif kapasitansın görüldüğü voltaj
V_s	: Taşıyıcı sürüklenme hızı
W_{dep}	: Arınmış bölge genişliği
α	: Absorpsiyon katsayısı
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	: Malzemenin dielektrik sabiti
ν	: Fotonun frekansı

τ	: Dedektörün tepki süresi
τ_{trap}	: Yüklerin tuzak seviyelerindeki ömrü
ω	: Açısal frekans
$\hbar$	: İndirgenmiş planck sabiti

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

NC	: Negatif kapasitans
QWPD	: Kuantum kuyusu fotodedektör
LED	: Işık yayan diyot
LD	: Laser diyot
KK	: Kuantum Kuyusu

|

ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

[p-i-n EKLEM OPTOELEKTRONİK AYGITLARDA NEGATİF KAPASİTANS OLGUSU]

[Aydın MASOUMİ]

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

[Fizik Anabilim Dalı]

Danışman: [Doç. Dr. Fahrettin SARCAN]

[Bu tez çalışmasında 9 kuantum kuyulu ve 20 kuantum kuyulu p-n eklem optoelektronik aygıtların kapasitans-voltaj ölçümleri incelenmiş ve negatif kapasitans olgusu araştırılmıştır. Bu aygıtlarda oluşan kapasitans türleri ve bunların nedenleriyle ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Optoelektronik aygıtlar ışık yayan aygıtlar ve dedektörler olarak ikiye ayrılarak yapıları ve özellikleriyle ilgili bilgi verilmiştir. Işık yayan aygıtlarda ideal kapasitans ve daha sonra negatif kapasitans anlatılmıştır ve negatif kapasitansa neden olan olaylarla ilgili bilgi verilmiştir. Fotodedektörlerde ideal kapasitans ve negatif kapasitans anlatılmıştır ve negatif kapasitansa neden olan olaylarla ilgili bilgi verilmiştir. Aygıtların yapısı ve karakterizasyon süreçleriyle ilgili özet olarak bilgi verilmiştir. Akım-voltaj, fotoışım ve elektro-ışım ölçümleri gibi aygıtların karakterizasyonunda kullanılan metotlarla ilgili bilgi verilmiştir. p-n eklem aygıtların empedans spektroskopisi denklemler vasıtasıyla detaylı bir şekilde anlatılmıştır. 9 ve 20 KK, (kuantum kuyulu) aygıtlarda oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda kapasitans-voltaj ölçümleri alınmıştır ve gözlemlenen negatif kapasitans olgusunun nedenleri araştırılmıştır. 9 ve 20 KK aygıtlarda fotoışım ve elektro-ışım spektrumları alınmış olup bu sonuçlardan aygıtların ileri beslemede LED karakteristiği sergilediği kanıtlanmıştır. 9 ve 20 KK örneklerin sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj ölçümleri alınmış ve sıcaklığın negatif kapasitanstaki etkisi araştırılmıştır.]

Ocak 2023, [52] sayfa.

Anahtar kelimeler: [Işık yayan diyotlar, LED, Negatif kapasitans, NC, Fotodedektörler]

SUMMARY

M.Sc. THESIS

NEGATIVE CAPACITANCE PHENOMENA ON p-i-n JUNCTION OPTOELECTRONIC DEVICES

Aydın MASOUMİ

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fahrettin SARCAN

In this thesis, the capacitive behaviors of p-n junction optoelectronic devices with 9 quantum wells and 20 quantum wells were investigated and the phenomenon of negative capacitance was discussed. Information about the physics of p-n junction semiconductor devices is given and, detailed information is provided about the types of capacitances that occur in these devices with the physics behind them. Optoelectronic devices are separated into the categories which are light emitting devices and detectors and, information related to their structure and properties is given. Ideal capacitance and negative capacitance in photodetectors are explained and information is given about the events that cause negative capacitance. Information is given about the methods used in the characterization of devices such as current-voltage, photoluminescence and electro-luminescence measurements. Impedance spectroscopy of p-n junction devices is explained in detail by the means of equations. Capacitance-voltage measurements were carried out at room temperature and at different frequencies on devices with 9 and 20 quantum wells, and the reasons for the observed negative capacitance phenomenon are explained. Photoluminescence and electro-luminescence spectra were taken from 9 and 20 quantum well devices and it was proved from these results that the devices exhibit LED characteristics under forward bias.

January 2023, 52 pages.

Keywords: Light Emitting diodes, LED, Photodetectors, negative capacitance

1. GİRİŞ

Yarıiletken eklem aygıtlar günümüz teknolojisinin temellerini oluşturmaktadır [1]. Elektronik, haberleşme, optoelektronik teknolojilerinde yer alan hemen hemen tüm aygıtların en temel bileşenleri p-n eklemidir. Optoelektronik aygıtlar ışık yayan diyotlar [3,4], yarıiletken lazerler [5] gibi ışık yayan yarıiletken aygıtlar ve fotodedektörler [6] gibi ışık sinyallerini elektrik sinyallere çeviren aygıtlara verilen genel isimdir [7,8]. Günümüzde haberleşme fiber-optik iletişim teknolojisiyle yapılmakta olup temelinde optoelektronik aygıtlar yer almaktadır. Fotodedektörler sanayide askeri alanlarda ve güvenlik ve alarm sistemlerinde sıkça kullanılan aygıtlardır. Aygıtların teknolojiye uygun hale gelmeleri için tasarım, fabrikasyon ve karakterizasyon gibi çeşitli süreçlerden geçmeleri gerekmektedir [9,10]. Fabrikasyon süreci yarıiletken malzemelerin üretilmesi, katkılanması ve çeşitli yöntemlerden yararlanarak büyütülmesinden ibarettir [11,12]. Karakterizasyon yapıldıktan sonra üretilen aygıt çalışma ve performans parametreleri belirlenmektedir [13,14]. Ayrıca fabrikasyondan elde edilen sonuçlar bir sonraki aygıt fabrikasyonlarında daha iyi ve daha hedefe yönelik aygıtların ortaya çıkmasında önemli fayda sağlamaktadır [15–17]. Karakterizasyon metotlarından bir tanesi kapasitans analizidir. Kapasitans analizi aygıt karakterizasyonunda önemli rol oynamaktadır. Kapasitans analizlerinden; üretilen aygıtın hızı, tepki süresi ve bant genişliğinin yanı sıra aygıtı oluşturan yarıiletken malzemenin katkı yoğunlukları, taşıyıcı yoğunlukları ve kusur seviyeleriyle ilgili önemli bilgiler elde edilmektedir [18,19]. Bu bilgiler sonraki fabrikasyon süreçlerinde daha kaliteli malzemeler büyütülsün diye kristal büyütücülerin bilgilerine sunulmaktadır. Tez kapsamında teknolojiye yaygın olarak kullanılan kırmızı altı bölgede ışıma ve algılama yapan optoelektronik aygıtlarda kapasitans analizleri yapılmıştır [20]. Elde edilen ideal durum sonuçlarının yanı sıra aygıtı kapasitansının sıra dışı davranışı gözlemlenmiştir. Bu sıra dışı davranışa literatürde negatif kapasitans (Negative Capacitance, NC) [21] adı verilmektedir. NC ilk olarak 1982 yılında GaAsP yarıiletkeninden oluşan LED’de gözlemlendi [22]. Bu olgu uzun yıllar boyu araştırmalarda ölçüm cihazlarının yaptıkları hatalardan ve kalibrasyon bozukluklarından kaynaklandığı düşünülmüş olup ne yazık ki birçoğu deneysel gözlem literatüre yansımada. Fakat aynı ölçümler tekrar tekrar yapıldığında aynı olgunun tekrarlanması görüldü ve bunun ölçüm cihazlarından kaynaklanmadığı ve aygıtın kendi davranışı olarak düşünülmeye başladı. Negatif kapasitansın kaynağı bir olguya atfedilmemekte

olup kusurlardan oluřan tuzak enerji seviyeleri [23], kuantum kuyuları [11,24] ve impakt iyonizasyon [25] olarak dūřūnūlebilir. Negatif kapasitans aygıtların iřlevini olumsuz etkilemektedir fakat son çalıřmalarda bu fenomenden elektronik devrelerinde transistörlerin besleme voltajını dūřürmek için yararlanabilme ihtimalleri arařtırılmaktadır [26].

Tez kapsamında negatif kapasitansın olası nedenleriyle ilgili teorik bilgiler verilmiştir ve ticari aygıtta, 9KK ve 20KK aygıtlarda negatif kapasitans olgusu araştırılmıştır. |



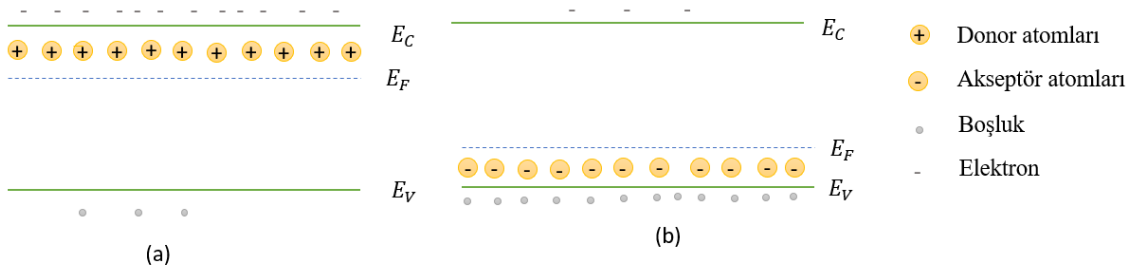
2. GENEL KISIMLAR

2.1. P-N EKLEMLERİN FİZİĞİ VE EKLEM AYGITLAR

Yarıiletken eklem aygıtlar aynı (homo-eklem) veya farklı yarıiletkenlerin (hetero-eklem) bir araya getirilmesiyle oluşturulan aygıtlardır. Bu aygıtlara diyotlar, transistörler, fotodedektörler, LED ve LD olarak örnek verilebilir [15].

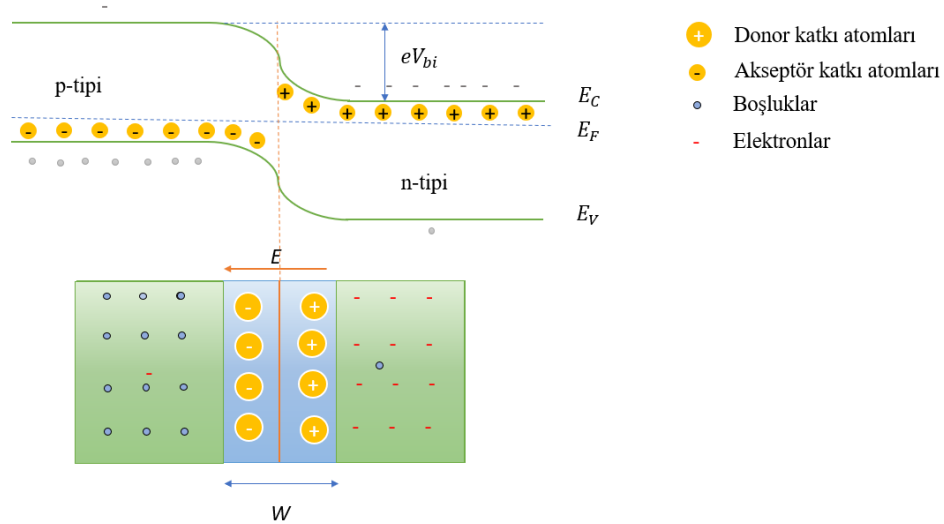
p-n eklemi çoğunluk taşıyıcısı boşluklar olan p-tipi yarıiletken ile çoğunluk taşıyıcısı elektronlar olan n-tipi yarıiletkenin difüzyon, iyon implantasyon veya tabakasal olarak büyütme yöntemlerini kullanarak bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır [15]. n-tipi yarıiletkenin katkı atom yoğunluğu N_D , elektron yoğunluğu n_n ve boşluk yoğunluğu p_n olarak düşünülürse, denge durumu öncesi bantlar düzdür. Oda sıcaklığında tüm donörlerin iyonize olduğu varsayılabilir. İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, donör atomlarının yoğunluğu ve termal enerjiden dolayı (~ 26 meV) valans bandını bırakıp iletkenlik bandına çıkan elektronların toplamıyla eşit olup, malzeme nötrdür ($n_n = n_i + N_D$) ve kütle etki yasası ($n_n p_n = n_i^2$) geçerlidir. Bu ifadede n_i , asal yarıiletkendeki yük yoğunluğudur [1,27].

p-tipi yarıiletkenin katkı atom yoğunluğunu N_A , boşlukların yoğunluğu p_p ve elektronların yoğunluğu n_p olarak düşünülebilir. Denge durumu kurulmadan önce p-tipi yarıiletken bölgesinde de enerji bantları düzdür. Oda sıcaklığında tüm akseptörlerin iyonize olduğu düşünülebilir. Valans bandındaki boşlukların yoğunluğu iyonize olmuş akseptör atomlarının yoğunluğu ve termal enerjiden dolayı valans bandını bırakıp iletkenlik bandına çıkan elektronların geride bıraktığı boşlukların toplamına eşittir. Malzeme nötrdür ($p_p = n_i + N_A$) ve kütle etki yasası geçerlidir ($n_p p_p = n_i^2$).



Şekil 2.1: a) n-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı b) p-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı.

Bu iki farklı bölge bahsedilen yöntemlerle bir araya getirildiğinde p-n eklemi oluşur. n-tipi yarıiletken tarafından p-tipi yarıiletken tarafına doğru azalan elektron yoğunluğu ve p-tipi yarıiletken tarafından n-tipi yarıiletken tarafına doğru azalan boşluk yoğunluğundan (homojen olmayan taşıyıcı) dolayı n-tipi yarıiletken tarafından p-tipi yarıiletken tarafına elektron ve p-tipi yarıiletken tarafından n-tipi yarıiletken tarafına doğru boşluk difüzyonu başlayacaktır [2]. Difüzyon sonucu oluşan akıma difüzyon akımı denir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi difüzyon sonucu p-tipi tarafına difüze olan elektronlar boşluklarla ve n-tipi tarafına difüze olan boşluklar elektronlarla yeniden birleşirler (rekombinasyon). Rekombinasyonun sonucu olarak eklem bölgesi taşıyıcılardan arınır. Geride iyonlaşmış lokalize yükler kalır. Bu nedenle eklem bölgesi arınmış bölge olarak adlandırılır. Şekil2.2’de gösterildiği gibi geride kalan iyonlaşmış lokalize atomlardan kaynaklı iç elektrik alan (E), enerji bantlarında bükülmeye neden olacaktır. Enerji bantları büküldüğünde V_{bi} büyüklüğünde potansiyel bariyeri oluşup, difüzyon akımını engellemeye çalışır. Diğer yandan oluşan elektrik alan neticesinde difüzyon akımının zıt yönünde sürüklenme akımını oluşturur. Sürüklenme akımı ve difüzyon akımı birbirine eşit olduğu zaman denge durumu gerçekleşir [1,15,27].



Şekil 2.2: p-n ekleminde bant denge durumu bant diyagramı gösterimi.

Sürüklenme akımı ve difüzyon akımı denge durumunda eşit olursa net akım :

$$J(x)_p = e \left[\mu_p p(x) E(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right] = 0 \quad (2.1)$$

ifadesinde belirtildiği gibi sıfıra eşit olmalıdır. Denklem 2.1’de boşluklardan kaynaklanan akım ele alınmıştır [1]. Burada μ_p boşlukların mobilitelerini, $p(x)$ boşluk taşıyıcıların yoğunluğu $E(x)$ elektrik alan D_p boşlukların difüzyon katsayısıdır. Bu denklemden elektrik alanı elde edebiliş, $E = -dv/dx$ ve Enistein bağıntısını $\frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{k_e T}$ kullanarak bariyer potansiyeli:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.2)$$

olarak elde edilebilir, [1,27].

Şekil 2.2: p-n eklemde bant denge durumu bant diyagramı gösterimi.

$$(V_{bi}) = \left\{ \frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \left[\frac{N_D}{N_A(N_A+N_D)} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

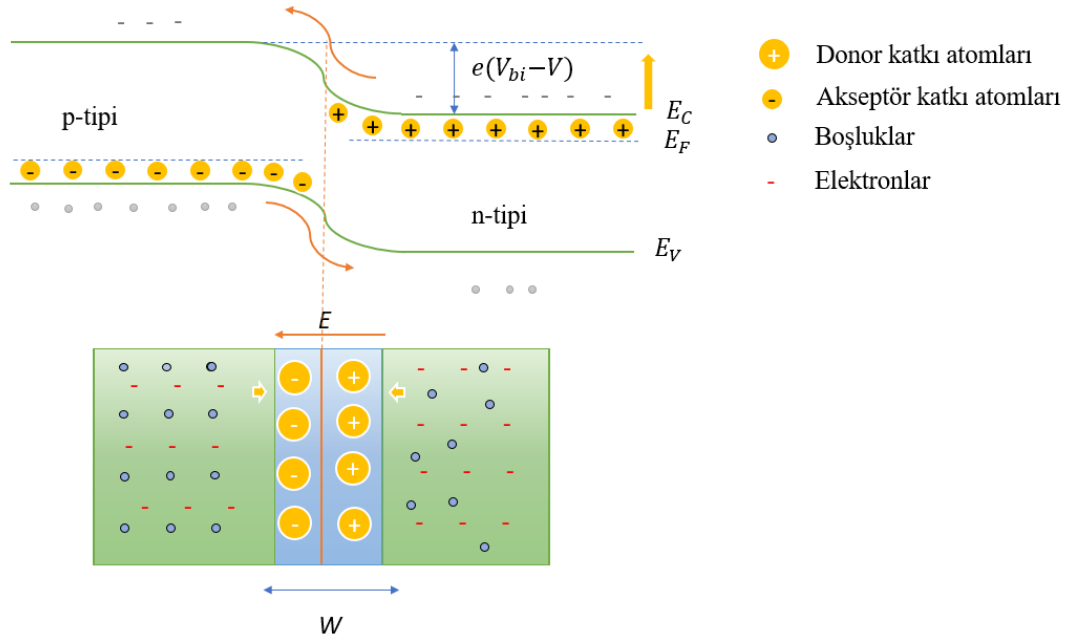
ve n-tipi yarıiletkende arınmış bölgenin genişliği:

$$W_n(V_{bi}) = \left\{ \frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \left[\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

ve toplam arınmış bölgenin genişliği:

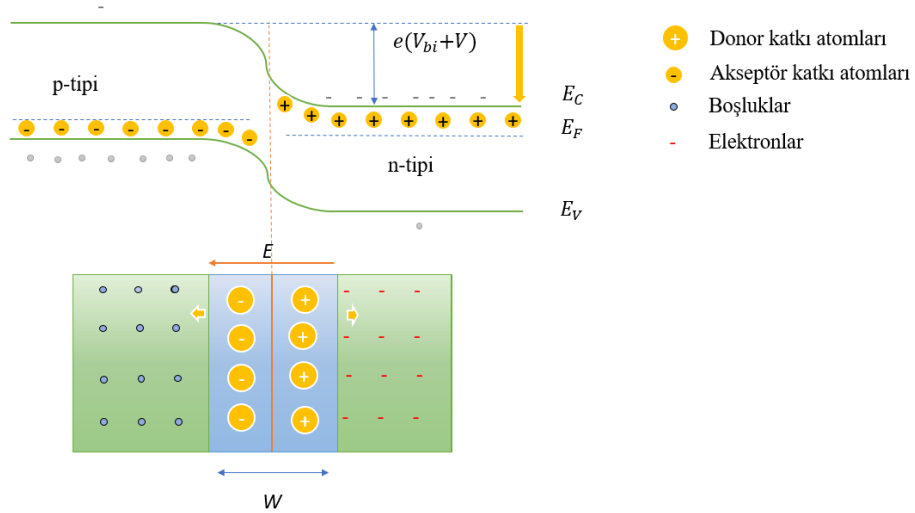
$$W(V_{bi}) = W_p(V_{bi}) + W_n(V_{bi}) = \left\{ \frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \left[\frac{N_A+N_D}{N_A N_D} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. p-n eklemi ileri besleme altına alınırsa denge durumu bozulur. İleri besleme durumunda p-tipi yarıiletken güç kaynağının artı kutbuna, n-tipi yarıiletken ise güç kaynağının eksi kutbuna bağlanmaktadır. Bu durum aygıtta harici bir elektrik alan oluşturur. Oluşan elektrik alan iç elektrik alanla tam ters yöndedir. Bu da Şekil 2.3’te gösterildiği gibi potansiyel bariyerinin yüksekliği azalacaktır. Potansiyel bariyerinin yüksekliği azalırsa, çoğunluk taşıyıcıların enerjileri karşı taraflara difüze olmak için yeterli olacaktır [1,3,27].



Şekil 2.3: İleri besleme altında p-n eklemi.

Eğer p-n eklemi geri beslenirse yani p-tipi yarıiletken bölge güç kaynağının eksi kutpuna ve n-tipi yarıiletken güç kaynağının artı kutpuna bağlanırsa oluşan dış elektrik alan iç elektrik alanla aynı yöndedir. Toplam elektrik alan artar ve Şekil 2.5'te gösterildiği gibi potansiyel bariyerinin yüksekliği artar.



Şeki 2.4: Geri besleme altında p-n eklemi.

Bu durumda n-tipi yarıiletken bölgedeki azınlık taşıyıcılar yani boşluklar ve p-tipi yarıiletken bölgesindeki azınlık taşıyıcılar yani elektronlar oluşan elektrik alandan dolayı sürüklenerek karşı bölgelere geçecekler ki buna sızıntı akımı denir. p-n eklemde akım-voltaj ilişkisi:

$$I(V) = I_0 \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right) \quad (2.6)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada $I(V)$ akım, V uygulanan voltaj, k_B Boltzman sabitini ve T sıcaklığı temsil etmektedir. Buradan sızıntı akımı:

$$I_0 = eA \left[\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right] \quad (2.7)$$

şeklinde elde edilir [1].

2.2. P-N EKLEM AYGITLARDA KAPASİTANS OLGUSU

Kapasitans kısaca aygıtların yük tutabilme kabiliyeti olarak düşünülebilir ve yük değişiminin voltaj değişimine oranı şeklinde tanımlanmaktadır ($C = \frac{dQ}{dV}$) [28–30]. Bir p-n eklemının arınmış bölgesi civarı zıt yüklere sahip olduğu için bir kapasitör olarak düşünülebilir. Bir p-n eklemde kapasitans eklem kapasitansı ve difüzyon kapasitansından oluşmaktadır. p-n eklemının arınmış bölgesindeki yük miktarı katkı atom yoğunluğu (N_D) ve arınmış bölge genişliğinin (W_n) fonksiyonu olarak:

$$|Q| = eAW_n N_D = eAW_p N_A \quad (2.8)$$

ifadesiyle verilebilir. Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'ten yararlanarak $W_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W$ olarak elde edip denklem 2.8'e yerleştirilerek [27]:

$$|Q| = A \left[2e\epsilon(V_{bi} - V) \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada A eklem kesit alanı, V_{bi} bariyer potansiyeli ve V uygulanan voltajı temsil etmektedir.

Eklem kapasitansı Denklem 2.9'dan yükün voltaja göre türevini alarak:

$$C_j = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \frac{A}{2} \left| \frac{2e\epsilon}{V_{bi}-V} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right|^{1/2} = \frac{A\epsilon}{W} \quad (2.10)$$

ifadesiyle gösterilebilir. Denklem 2.10 ifadesinden anlaşıldığı gibi p-n eklemine uygulanan voltaj değişimi arınmış bölge genişliğinin ve kapasitans miktarı değişimine neden olur. Denklem 2.10'da görüldüğü gibi p-n eklem aygıtlar değişken kapasitör olarak kullanılabilir [1].

Kapasitans, diffusion kapasitansı (C_{diff}) ve eklem kapasitansı (C_j) olmak üzere iki kısımdan oluşur:

$$C_{total} = C_{diff} + C_j \quad (2.11)$$

Eğer p-n eklem ileri besleme altındaysa n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene giden elektronlar ve p-tipi yarıiletkenden n-tipi yarıiletkene giden boşluklar karşı taraflarda azınlık taşıyıcı olacaklardır. Azınlık taşıyıcılar arınmış bölgenin etrafında toplanarak difüzyon kapasitansını oluştururlar. Difüzyon kapasitans aygıtı uygulanan voltaj değişiminin yük değişimine oranı olup:

$$C_{diff} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{q l_n A n_{p0} e^{v_0/k_B T}}{2 k_B T} = \frac{q l_p A p_{n0} e^{v_0/k_B T}}{2 k_B T} \quad (2.12)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada l_n elektronların difüzyon uzunluğunu, l_p boşluk difüzyon uzunluğunu, n_{p0} denge durumunda p-tipi yarıiletkende elektron yoğunluğunu, p_{n0} denge durumundaki n-tipi yarıiletkendeki boşluk yoğunluğunu temsil etmektedir. Geri beslemede difüzyon kapasitans küçük değere sahip olacağı için kapasitans büyük ölçüde eklem kapasitansına bağlıdır [31–34].

2.2.1 P-N Eklem Fotodedektörlerde Kapasitans

Fotodedektör elektromanyetik dalgalarını elektrik sinyallere dönüştüren aygıtlardır. Üzerine düşen fotonun enerjisi eğer fotodedektörün absorpsiyon bölgesindeki kristalin bant aralığından daha büyükse $h\nu > E_g$ elektron boşluk çifti yaratılır. Oluşan elektron boşluk çiftinin yaratacağı akıma fotoakım denir. Eğer absorpsiyon bölgesine düşen ışığın optik gücü P_0 , dalga boyu λ , absorpsiyon bölgesindeki kristalin absorpsiyon katsayısı α , kristalin yansıma katsayısı r ve kesme dalga boyu $\lambda_c = \frac{hc}{E_g}$ ise düşen ışığın optik gücünün bir kısmı yansımadan dolayı

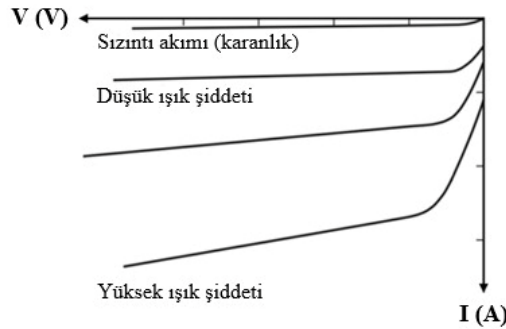
azalacaktır. Geriye kalan kısmı eğer ışığın dalga boyu kristalin kesme dalga boyundan küçükse kristal tarafından absorplanır. Denklem (2.13)'te görüldüğü gibi ışık x-yönünde ilerledikçe optik güç absorpsiyon nedeniyle eksponansiyel olarak azalmaktadır [1,6,30,35].

$$P_s = P_0(1 - r)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.13)$$

Eğer absorpsiyon bölgesinin kalınlığını d olarak düşünülürse yukarıdaki denklemde x yerine d koyulacaktır. Yansıma katsayısı sıfır olarak düşünülürse oluşan foto akım $I_{ph} = \frac{eP_0}{hv}$ aşağıdaki gibi yazabiliriz [1].

$$I_{ph} = e \left(\frac{P_0}{hv} \right) (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.14)$$

Burada $\frac{P_0}{hv}$ birim zamanda dedektöre gelen foton sayısıdır. İleri besleme altında oluşan fotoakım aygıt üzerinden geçen akımla kıyaslanabilir mertebede değildir ve perdeleme etkisi yaratılır. Bu nedenle fotodedektörler geri beslemeye tabi tutulmalılar [1,6,27,35]. p-n eklem tabanlı fotodedektörünün sızıntı akımına karanlık akım denir. Geri besleme altındaki p-n fotodedektörünün karanlıkta ve ışık altında akım voltaj davranışını Şekil 2.5'te verilmektedir [35].



Şekil 2.5: p-n eklem fotodedektör geri besleme altında akım-voltaj karakteristiği.

Elektromanyetik dalga p-n eklem fotodedektörlerde arınmış bölge, p-tipi veya n-tipi bölgeye düşebilirler. Oluşan foto akım (elektron-boşluk çifti) difüzyon uzunlukları kadar hareket ederler. Eğer oluşan foto akım arınmış bölge veya arınmış bölgenin etrafındaysa, elektron-boşluk çifti elektrik alana maruz kalarak birbirinden ayrılıp elektrotlara doğru hareket eder. Fakat eğer taşıyıcılar difüzyon uzunluğu kadar mesafe gittikten sonra arınmış bölgenin civarına ulaşamazlarsa rekombine oldukları için akıma katkı sağlayamazlar [30,36]. p-n eklem

aygıtlarda absorpsiyon bölgesine asal bir yarıiletken eklenmesiyle aktif bölge genişliği artırılabilir. Bu durumda asal bölgede oluşan elektron boşluk çifti elektrik alana maruz kalarak elektrotlara ulaşır. Absorpsiyon bölgesinin büyütülmesinin yanı sıra yapının kapasitansını azaltarak tepki süresini $\tau_{RC} = RC$ düşürüp daha hızlı çalışabilecek aygıtlar elde edilebilir. Fakat bu durumda elektron boşluk çiftinin gideceği mesafe artacak ve bu sebeple dedektörün tepki süresinde de artışa neden olacaktır $\tau_{tr} = \frac{W}{V_s}$. Bu ifade de V_s taşıyıcıların sürüklenme hızıdır. Fotodedektör aygıtının toplam tepki süresi:

$$\tau_{total} = \tau_{RC} + \tau_{tr} \quad (2.15)$$

olarak ifade edilebilir.

Hızlı cevap süresine sahip dedektör üretimi için asal malzemenin kalınlığını optimize etmek gerekir [15].

Fotodedektörlerde kuantum verimi ve iç kazancın artırılması için absorpsiyon bölgesi kuantum kuyulu sistem şeklinde yapılmaktadır. Diğer yandan kuantum kuyulu sistemler istenilen dalga boylarında aygıt tasarımı için kullanılmaktadırlar. Bu sistem 5-10nm kalınlıktaki dar bant aralıklı yarıiletken ile 10-20nm kalınlıktaki geniş bant aralıklı yarıiletkenin art arda büyütülmesiyle oluşturulmaktadır. Ayrıca çoklu kuantum kuyulu sistemlerde valans bandı süreksizliği iletkenlik bandı süreksizliğinden daha azdır. Bu nedenle boşluklar kuantum kuyularını elektronlardan daha hızlı terk ederler. Taşıyıcıların kuantum kuyularında tutulma süreleri:

$$\tau_{th} = \left[\frac{1}{L_w} \left(\sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m_w^*}} e^{\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right)} \right) \right]^{-1} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Absorpsiyon bölgesinin kuantum kuyulardan oluştuğu p-i-n fotodedektöre voltaj uygulandığında taşıyıcılar aygıtta harekete başlarlar ve kuyular tarafından tutulurlar. Bu tuzaklanma sonucunda yük dengesi bozulur ve bölüm 3.2.4'te detaylı bir şekilde anlatılacağı gibi NC ortaya çıkar. Kuantum kuyularının yanı sıra bir sonraki bölümde bahsedilen tuzak enerji seviyeleri NC'nin bir diğer kaynağıdır [1,6,15].

2.2.2 Işık Yayan Diyotlarda Kapasitans

LED'ler ileri besleme altında p-n eklem aygıtlardır. İleri besleme altında taşıyıcılar enerji seviyeleri ve bantları arasında ışımalı veya ışımasız geçişler yaparlar. Gerçekleşen ışımalı rekombinasyona elektro-ışımaya denir. Bu durumda kapasitansı oluşturan faktör sadece eklem kapasitansının olmadığını ve azınlık taşıyıcıların difüzyon yoluyla eklem bölgesinin etrafına toplanmasından dolayı ortaya çıktığı Bölüm 2.2'de anlatıldı [34,37].

Denklem 2.12'den görüldüğü gibi ileri besleme altında p-n eklemde voltajın artmasına rağmen ortaya çıkan kapasitans hep pozitif kalacaktır ve bu da schockley diyot teorisiyle doğrulanır. Normal bir durumda bir p-n eklemde ileri besleme altında voltajın artışıyla arınmış bölgenin genişliğinin azalmasından ve difüzyon yoluyla arınmış bölgenin etrafına toplanan azınlık taşıyıcıların artışından dolayı kapasitans pozitif olarak artması gerekmektedir. Ancak literatürdeki çalışmalarda LED ve LD gibi ışık yayan yarıiletken aygıtlarının büyük bir kısmında yaptıkları ışımalı rekombinasyondan dolayı belirli bir besleme voltajından sonra kapasitans değerleri azalmakta ve negatif olmaktadır [22,36].

Diğer negatif kapasitans kaynağı ise bant aralığında kusurlardan kaynaklanan enerji seviyelerinin rekombinasyon sürecine dahil olmaları elektro-ışımaya da artışa neden olacaktır. Bu enerji seviyeleri yükleri tuzaklayarak yük dengesini bozacaktır. Yük dengesi tekrardan kurulmaya çalışılacaktır ve tuzaklanan taşıyıcılar telafi edilecektir. Böylece akım voltajın gerisinde kalacak ve negatif kapasitans gözlemlenecektir [38]. Genelde NC etkisi gösteren aygıtların kapasitans-voltaj ölçüm sonuçlarında ölçülen kapasitans miktarı belirli uygulanmış ve modüle edilmiş voltaj miktarından sonra hızlıca daha düşük değerlere daha sonrasında ise negatif değerlere inmektedir [21].

Negatif kapasitansın genel olarak kusurlu yapılarda taşıyıcıların tuzak enerji seviyelere rekombine olması veya kuantum kuyulu yapılarda yüklerin kuyularda tutulması ve bunun sonucunda telafi akımının voltaj artışının gerisinde kalmasından dolayı ortaya çıkan bir olgudur. LED gibi ışık yayan aygıtlarda, eğer uygulanan DC voltajın üzerine küçük genlikte AC voltaj bindirilirse bu voltajın belirli bir değerlere kadar artışı ölçülen kapasitans miktarında artışa neden olacak olup, belirli değerden sonra kapasitans miktarı düşmeye başlayacaktır [39,40].

Negatif kapasitansa katkıda bulunması beklenen tuzak enerji seviyelerinin sınır enerjisi dediğimiz minimum bir limit enerji miktarının üzerinde enerjiye sahip olmaları gerekiyor. Bu enerji limiti AC voltajının frekansına ve sıcaklığa bağlıdır. Bu ilişki tuzak enerji seviyelerinin yük tutma süresinden ortaya çıkmaktadır. Yüklerin tuzak seviyelerinde kalma süresi τ_{trap} ve uygulanan açısal frekans ω_{ac} şeklinde gösterilirse, açısal frekans ve yüklerin tuzak seviyesinde kalma süresi:

$$\omega_{ac} = \tau_{trap}^{-1} \quad (2.17)$$

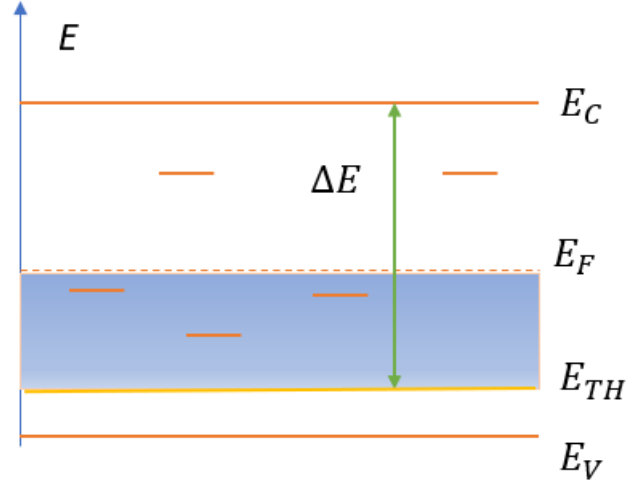
olarak ifade edilebilir. Bu bağıntıda $\omega_{ac} = 2\pi f_{ac}$, f_{ac} uygulanan AC voltajının frekansdır [38]. Denklem 2.17'den anlaşıldığı gibi uygulanan AC voltajının frekansı arttıkça daha kısa süre yük tutabilecek kusurlu enerji seviyeleri ilettime (ve aynı anda NC'a) dahil olmaktadır. Daha doğrusu bir tuzak enerji seviyesinin ilettime dahil olabilmesi için $\omega_{ac} \leq \tau_{trap}^{-1}$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Şekil 2.7 de gösterildiği gibi tuzak enerji seviyelerinin ilettime dahil olabilmesi için E_{TH} gibi minimum bir enerji seviyesine sahip olmaları gerekmektedir. Bu enerji seviyesine sınırlama enerjisi denir. Bu enerji seviyesi frekans ve sıcaklığın fonksiyonudur. Tuzak enerji seviyelerinin yük tutma süreleri ve sınırlama enerji seviyesinin arasındaki ilişki;

$$\tau_{trap} = \gamma^{-1} e^{\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right)} \quad (2.18)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada γ frekanstan kaçma girişimi faktörü ve ΔE sınır enerji seviyesiyle iletkenlik bandı enerjisi seviyesi arasındaki farktır. ΔE sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak:

$$\Delta E = k_B T \ln\left(\frac{\gamma}{\omega_{ac}}\right) \quad (2.19)$$

şeklinde gösterilir.



Şekil 2.7: NC'a katkıda bulunacak tuzak enerji seviyeleri.

Şekil 2.7'de E_{TH} sınır enerji seviyesi, E_F Fermi enerji seviyesinin konumunu ve kırmızı çizgiler kusur enerji seviyeleridir. Frekanstaki artış ΔE miktarında azalmaya ve sınır enerji seviyesinin E_{TH} yükselmesine neden olacaktır [39]. NC'a sebep olan tuzak enerji seviyeleri (kırmızı çizgiler) sınır enerji seviyesi ve Fermi enerji seviyesinin arasındaki değerlere sahip olan seviyeler olup mavi alan olarak gösterilmiştir. Ayrıca sınır enerji seviyesini etkileyen diğer bir faktör sıcaklıktır. ΔE aygıtın sıcaklığıyla doğru orantılıdır [21]. Örnek olarak düşük frekanslarda ΔE artar ve E_{TH} enerji seviyesi azalır. Voltaj artışıyla Fermi enerji seviyesi daha üst seviyelere çıkar ve daha fazla tuzak seviyesi aktif hale gelir. Bu durum literatürdeki pek çok çalışmada düşük frekansta gözlenen NC sebebi olarak gösterilmektedir [22].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. AYGIT YAPISI VE AKTİF BÖLGE MALZEMESİ

Bu bölümde tez kapsamında incelenen aygıtların yapısı ve karakterizasyonu için kullanılan deney düzenekleri hakkında bilgi verilecektir. Aygıtların fabrikasyon süreçlerine tez danışmanımın doktora tezinde detaylı bir şekilde değinilmiş olup bu kısımda özet halinde anlatılacaktır [15]. Tez kapsamında incelenen p-n aygıtların aktif bölgesi GaInNAs alaşım yarıiletkeni olup aygıt hem fotodedektör olarak hem de LED olarak çalışmaktadır. Çalışma dalga boyu 1,3 μm olup kırmızı altı bölge (infrared, IR) uygulamalarında kullanılması hedeflenmektedir. Tez içerisinde kısaltma olarak; absorpsiyon bölgesi 9 ve 20 kuantum kuyudan oluşan aygıtlar sırasıyla 9KK ve 20KK isimleriyle kodlanmaktadır. 9KK ve 20KK aygıtlarının yapısı Şekil 3.1’de verilmiştir [6,15].

<i>GaAs</i>	250nm	p^+	} X 9/20 KUANTUM KUYUSU
<i>GaAs</i>	10nm	i	
<i>GaN_{0.035}As_{0.965}</i>	13nm	i	
<i>Ga_{0.73}In_{0.27}N_{0.025}As_{0.975}</i>	7nm	i	
<i>GaN_{0.035}As_{0.965}</i>	13nm	i	
<i>GaAs</i>	10nm	i	} X 15 DBR
<i>GaAs</i>	70nm	n^+	
<i>AlAs</i>	113nm	n^+	
<i>GaAs</i>	98nm	n^+	
<i>GaAs</i>	200nm	n^+	
<i>GaAs</i>	350 μm	n^+	

Şekil 3.1: 9KK ve 20KK aygıtlarının yapısı.

3.2. FOTODEDEKTÖR VE LED KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Bu bölümde aygıtların optik, elektriksel, elektro-optik ve kapasitans ölçümleri için kullanılan tekniklerle ilgili bilgi verilmektedir [15].

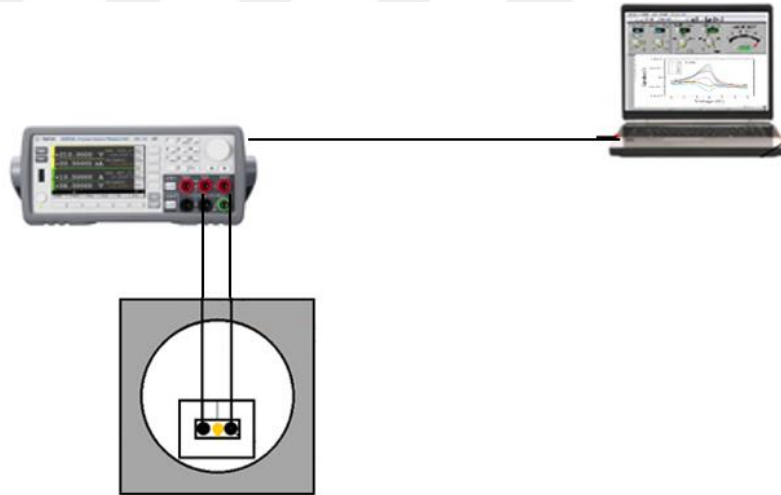
3.2.1. Akım-voltaj

Tüm elektronik ve optoelektronik aygıtlarda, aygıtın çalışma voltajı aralığını ve uygulanan voltajlarda üzerinden geçen akım miktarını belirlemek için en temel ölçümlerden biri akım-

voltaj ölçümüdür. Akım-voltaj trendi aygıtın cinsi hakkında bilgi vermektedir. Örneğin direnç gibi pasif devre elemanlarının akım-voltaj ölçüm sonuçları ohm yasası:

$$V = IR \quad (3.1)$$

gereği doğrusaldır. Bununla birlikte p-n eklem aygıtlarda uygulanan ileri besleme voltajının miktarı artarsa akım miktarı Denklem 2.6'da gösterildiği gibi eksponansiyel olarak artmaktadır. Bu da bölüm 2.1'de anlatıldığı gibi arınmış bölgenin daralması ve oluşan potansiyel bariyerinin küçülmesinden kaynaklanmaktadır. Geri besleme uygulandığında arınmış bölge genişliği, dolayısıyla oluşan potansiyel bariyeri artar. Bu nedenle çoğunluk taşıyıcıların geçişi engellenir ve azınlık taşıyıcılardan oluşan sızıntı akımı oluşur [15]. Akım voltaj ölçümleri için bir adet B2901A model Agilent marka ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Deney düzeneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



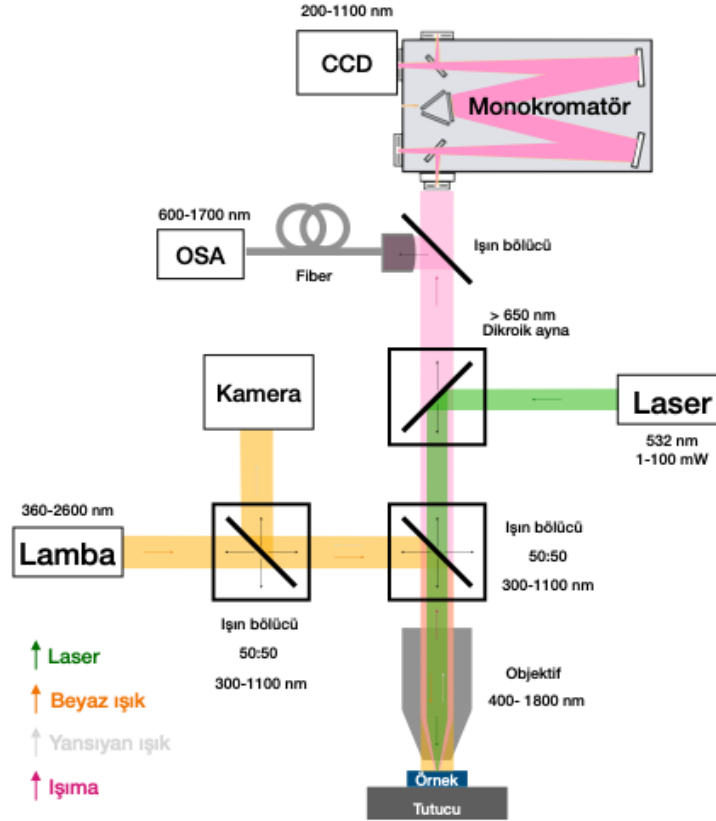
Şekil 3.2: Akım-voltaj ölçüm deney düzeneği.

3.2.2. Fotoişıma

Fotoişıma olayı, yarıiletkenlerin etkin bant aralığı ve ışımalı geçişlere sahip olan tuzak seviyelerinin enerjileri hakkında bilgi vermektedir [15]. Fotoişıma olayının gözlemlenebilmesi için örneğin üzerine enerjisi örneğin bant aralığına eşit veya bant aralığından daha büyük enerjili elektromanyetik dalga gönderilir. Valans bandında bulunan elektronlar iletkenlik bandının en üst seviyelerine çıkar. Bu elektronlar fazla enerjilerini fonon etkileşimlerine bırakarak iletkenlik bandının en alt seviyelerine inerler [3,6]. Elektronlar iletkenlik bandından

valans bandına, donör, akseptör veya derin tuzak seviyelerine ışımalı veya ışımasız olarak geçiş yapar. Foton uyarımı sonrası oluşan ışımalı geçişler fotoışımaya olarak adlandırılır. Fotoışımaya ölçüm düzeneği Şekil 3.3'te verilmektedir [1,11,15,18].

Fotoışımaya deney düzeneğinde laser kaynağından 532nm dalga boyuna sahip fotonlar ışın bölücünden geçirilerek modüle edilirler. Işın mercekler yardımıyla toplandıktan sonra aygıtın üzerine düşürülür. Örnekten/aygıttan çıkan ışımaya mercek yardımıyla monokromatör'e gönderilir. Monokromatör gelen fotonları farklı dalga boylarında tarayıp, fotodedektöre gönderir. Fotodedektörden elde edilen elektrik sinyal ışın bölücünün frekansına kilitlenen lock-in yükselteç (Lock-in Amplifier, LIA)'ya gönderilir. Bu cihaz elektrik sinyalini referans frekansta bilgisayara göndermektedir [15].



Şekil 3.3: Fotoışımaya ve elektro-ışımaya ölçüm düzeneği.

3.2.3. Elektro-ışımaya

Elektro-ışımaya aygıtına uygulanan elektrik alan sonucunda aygıttan yayımlanan ışımaya denilir. Elektro-ışımaya sıcaklık sonucunda oluşan kara cisim ışımasından tamamen farklıdır. Yarıiletken aygıtlarda, elektro-ışımaya elektronlar ve boşlukların ışımalı rekombinasyonundan

kaynaklanmaktadır. Bu ölçüm sonucu elde edilen fotonların dalga boyu aygıtın aktif bölgesinde kullanılan yarıiletkenin bant aralığı ve kusurların oluşturduğu enerji seviyeleriyle ilgili bilgi vermektedir. Şekil 3.3 aynı anda elektro-ışınma deney düzeneğidir [4,21].

3.2.4. Empedans Spektroskopisi

Empedans spektroskopisi elektronik ve optoelektronik aygıtlarda eklem bölgesi civarındaki yük dağılımı hakkında bilgi veren önemli karakterizasyon tekniklerindendir. Empedans analizinin nasıl yapıldığıyla ilgili bilgi vermeden önce empedans ve admitans kavramlarının ne olduğuyla ilgili bilgi verilmektedir.

Empedans alternatif akım altında olan elektronik bir aygıtın direnç ve reaktansının toplamına eşittir. Reaktans devre elemanı tarafından elektronun hareketine karşı oluşturulan eylemsizliktir [4,10,21,32].

Genel olarak belirli bir frekansa sahip voltajın uygulandığı aygıtta empedans:

$$Z(\omega) = R + X(\omega) \quad (3.2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada ω :

$$\omega = 2\pi f \quad (3.3)$$

uygulanan AC voltajın açısal frekansıdır. Kısaca empedans:

$$Z = R + X \quad (3.4)$$

ifadesiyle de yazılabilir. Burada Z empedans, R direnç ve X reaktanstır. Reaktans, kapasitörlerde kapasitif reaktans X_C ve indüktörlerde indüktif reaktans X_L olup;

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.5)$$

ve

$$X_L = j\omega L \quad (3.6)$$

ifadeleriyle verilmektedir. Burada ω uygulanan AC voltajın açısal frekansdır. Empedans yük akışına karşılık direnç veya yük hareketindeki zorluk olarak tanımlanabilir. Bunun tam aksine admitans yükün hareket kolaylığı olarak tanımlanmakta olup ve

$$Y = G + B \quad (3.7)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada $Y = \frac{1}{Z}$, $G = \frac{1}{R}$, $B = \frac{1}{X}$ olarak tanımlanıyor. Sırasıyla Y admitans, G iletim veya iletkenlik ve B suspitanstır.

Bu durumda kapasitör için empedans ve admitans ifadeleri sırasıyla:

$$Z = R - j\omega c \quad (3.8)$$

ve

$$Y = G + j\omega c \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 3.9'da Y ve C frekansa bağlı parametrelerdir. Aygıt üzerinde belirli frekanslarda admitans analizi yapılırsa kapasitans değeri hesaplanabilir. Admitans analizi aygıtı fiziksel zarar vermeden kapasitans ölçümünde kullanılan önemli bir metottur. Frekansa bağlı kapasitans:

$$C(\omega) = \frac{1}{\omega} \text{Im}[Y(\omega)] \quad (3.10)$$

ifade edilmektedir. Diğer yandan admitans yükün hareket kolaylığını temsil eden bir parametre olduğu için:

$$Y(\omega) = \frac{\delta I(\omega)}{\delta V(\omega)} \quad (3.11)$$

ifadesiyle de verilebilir. Bu ifadede aygıtı uygulanan basamak voltajı ile aygıtın akım tepkisinin oranı admitans olarak tanımlanmıştır. Basamak voltajı:

$$\delta V(\omega) = v(t) - v(0) = \Delta V \theta(t) \quad (3.14)$$

ve bu voltaja tepki olarak akım:

$$\delta I(t) = \delta J(t) + \delta j(t) \quad (3.15)$$

ifadesiyle verilir. Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'te gösterilen ifadelerde $\theta(t)$, basamak fonksiyonu, $\delta J(t)$ kapasitif bölgede anlık yük değişimi ve $\delta j(t)$ geçici akım bileşenidir. Anlık yük değişimi:

$$\delta J(t) = C_0 \Delta V \delta(t) \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifadede, C_0 , ($C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 A/W$) geometrik kapasitans, ΔV uygulanan voltajın değişimi ve $\delta(t)$ Dirac delta fonksiyonudur. Denklem 3.15 ve 3.16'dan aygıtın basamak voltajına akım tepkisi:

$$\delta I(t) = C_0 \Delta V \delta(t) + \delta j(t) \quad (3.17)$$

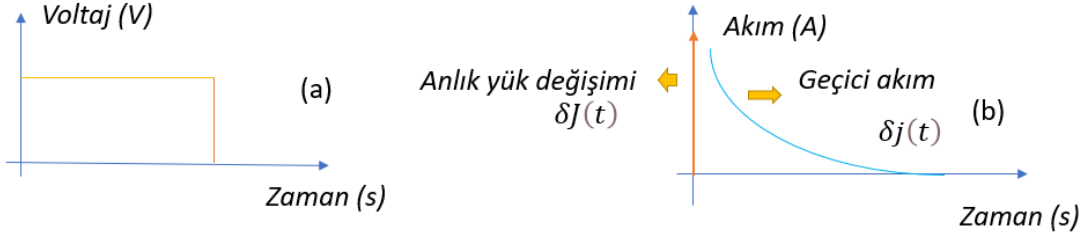
şeklinde ve difüzyondan kaynaklı frekansa bağlı kapasitans (görülen kapasitans):

$$C(\omega) = \frac{1}{\Delta V} \int_0^\infty \delta I(t) \cos \omega t dt \quad (3.18)$$

şeklinde verilebilir. Denklem 3.17 ve 3.18'den anlaşıldığı gibi kapasitans değerinin büyüklüğü tepki akımından ($\delta I(t)$) ve tepki akımının büyüklüğü geçici akımdan ($\delta j(t)$) etkilenmektedir. Denklem 3.17'de eğer geçici akım pozitif değerlere sahip ve monoton olarak azalmakta ise tepki akımı ve kapasitans tüm frekanslarda pozitifdir. Eğer negatifse tepki akımı ve kapasitans negatiftir.

Şekil 3.4'te aygıtı uygulanan basamak voltajı δV , aygıtın voltaja verdiği akım tepkisi δI ve tepki akımının bileşenleri (δJ ve δj) grafikleri şeklinde gösterilmiştir [30,34,36].

Geçici akım negatif kapasitansa sebebiyet veren taşıyıcı yüklerin tuzaklanması veya impakt iyonizasyon gibi faktörlerden ortaya çıkmaktadır. Geçici akımın eğimi kapasitansın negatif veya pozitifliğiyle ilgili en önemli bilgiyi vermektedir [34,38].



Şekil 3.4: a) aygıtı uygulanan basamak voltajı b) aygıtın akım tepkisi.

Denklem 3.17 ve 3.18'in birleştirilmiş halinden frekansa bağlı kapasitans:

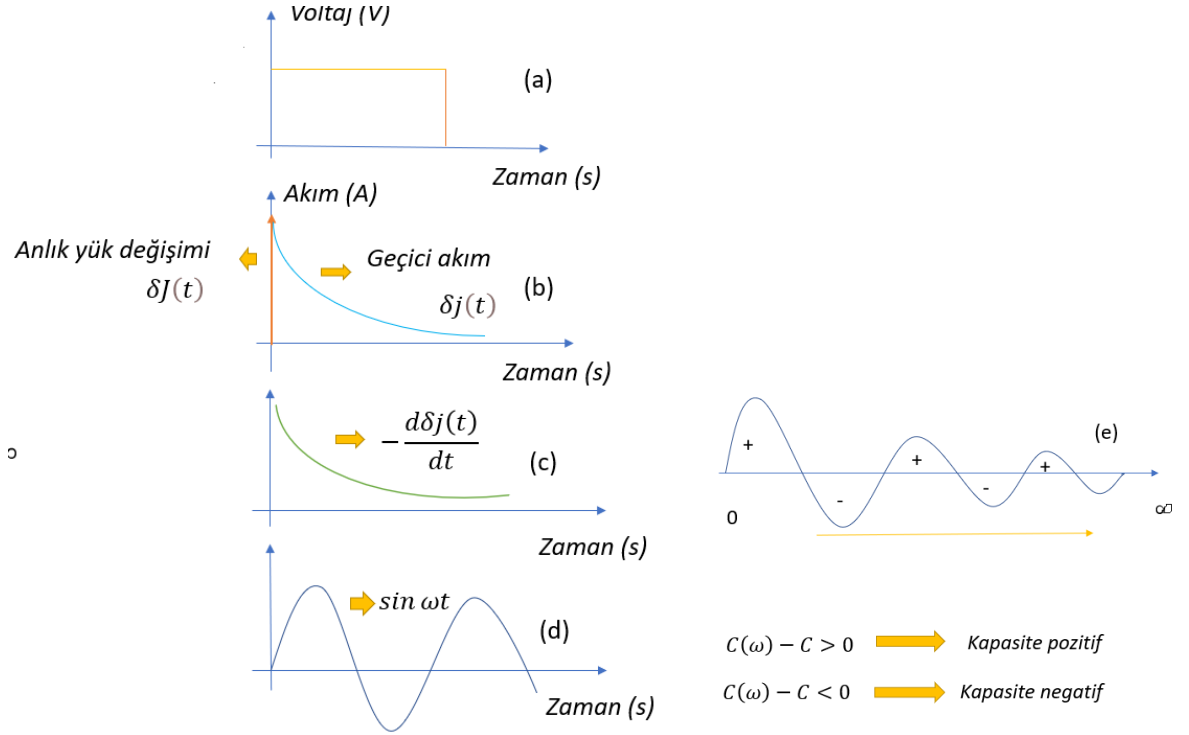
$$C(\omega) = C_0 + \frac{1}{\omega \Delta V} \int_0^{\infty} \left[-\frac{d\delta j(t)}{dt} \right] \sin \omega t \, dt \quad (3.19)$$

ve frekansa bağlı görülen iletkenlik:

$$G(\omega) = G(\infty) + \frac{1}{\Delta V} \int_0^{\infty} \left[\frac{d\delta j(t)}{dt} \right] \cos \omega t \, dt \quad (3.20)$$

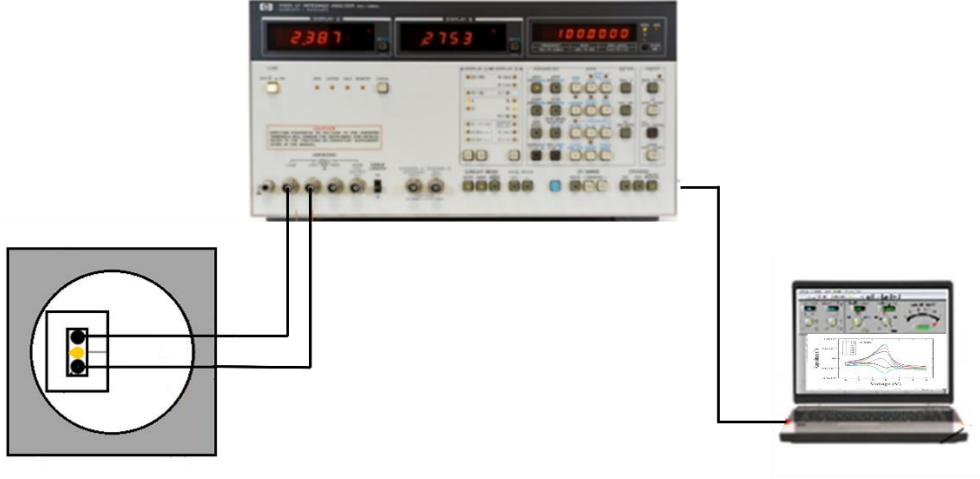
şeklinde ifade edilebilir. Denklem 3.19 ve 3.20'deki ifadelerde, C_0 geometrik kapasitansdır. $G(\omega)$, AC voltaj altında iletkenlik ve $G(\infty)$ eklem bölgesindeki iletkenliktir. Denklem 3.19'daki ifade de eğer $C(\omega) - C_0 > 0$ (ölçülen kapasitans geometrik kapasitansdan daha büyük) ise kapasitans pozitif, eğer $C(\omega) - C_0 < 0$ (ölçülen kapasitans geometrik kapasitansdan daha küçük) ise kapasitans negatiftir. Denklemden anlaşıldığı gibi kapasitansın negatif veya pozitif olması $-\frac{d\delta j(t)}{dt}$ ifadesine bağlıdır. Eğer yukarıda anlatıldığı gibi geçici akım pozitif ve değeri monoton olarak sıfıra doğru azalıyorsa ($\frac{d\delta j(t)}{dt} < 0$), $C(\omega) - C_0 > 0$ olduğu için kapasitans tüm frekanslarda pozitifdir. Eğer geçici akım monoton olarak artıyorsa ($\frac{d\delta j(t)}{dt} > 0$), $C(\omega) - C_0 < 0$ olduğu için kapasitans tüm frekanslarda negatiftir. Monoton olmayan geçici akım değişimleri kapasitansı frekans değerlerine bağlı bir şekilde etkiler ve pozitif veya negatif yapar [34,36].

Örnek olarak Şekil 3.5a'da zamana bağlı geçici akımın değişimi grafiğinde verilmiştir. Geçici akımın zamana göre türevi Şekil 3.5b'de verilmiştir. Şekil 3.5c'de ω açısal frekansındaki uygulanan voltaj ve sonuç olarak Şekil 3.5b grafiğiyle Şekil 3.5c grafiğinin çarpımı Şekil 3.5d'de gösterilmiştir. Bu grafikteki taralı alanın toplamı ölçülen kapasitans miktarına ($C(\omega) - C_0$) karşılık gelmektedir. Bu sonuç sıfırdan sonsuza kadar limitlere sahip entegral hesaplamasıyla elde edilmiştir. Verilen örnekte ölçülen kapasitans pozitifdir [34].



Şekil 3.5: a) basamak voltajı b) geçiş akımı c) geçiş akımının zamana göre türevi d) uygulanan alternatif voltaj e) iki fonksiyonun çarpımı.

Tez kapsamında empedans analizi HP4192A model (5 Hz-13 MHz) empedans analiz cihazı yardımıyla yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.6'da verilmektedir. Aygıtlara AC voltajla modüle edilmiş DC voltaj uygulanmıştır. AC voltajın genliği, küçük sinyal koşulunun sağlanması ve lineerliğin bozulmaması için 10mV, 50mV ve 500mV olarak seçilmiştir. Aygıtlardan farklı frekanslarda ve modüle voltajlarda kapasitans-voltaj ölçümleri alınmıştır.



Şekil 3.6: Empedans ölçümü deney düzeneği.

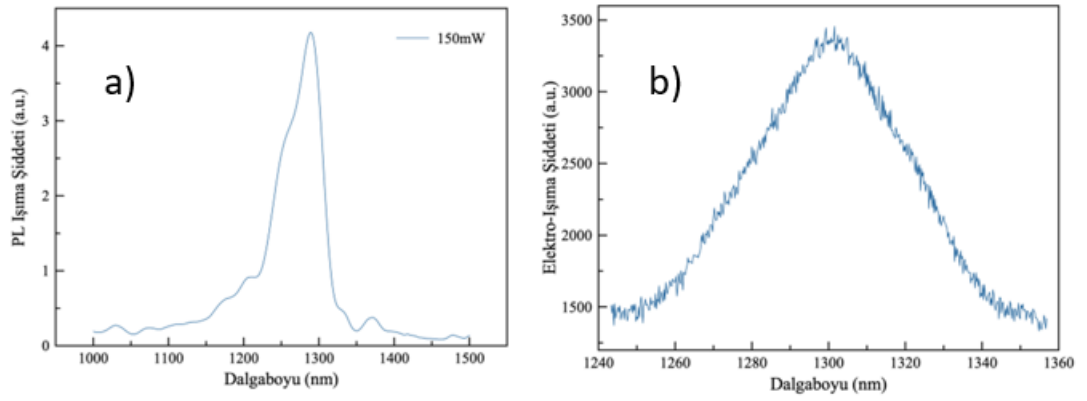
Şekil 3.6’teki deney düzeneğinde aygıt sıcaklığa bağlı ölçümler için kroyostat içerisine yerleştirildikten sonra sistem vakuma alınmaktadır. Sistemin sıcaklığı $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ değiştirilerek farklı sıcaklıklarda HP4192A LF empedans analizörüyle aygıtta farklı frekanslarda voltaj uygulanıyor. Voltaja bağlı kapasitans değerleri cihaz tarafından okunduktan sonra bilgisayara gönderilmektedir. Daha sonrasında ise Labview programı tarafından datalar toplanmaktadır. |

4. BULGULAR

4.1. 9KK AYGITI

4.1.1. 9KK Aygıtın Fotoışma ve Elektro-ışma Ölçüm Sonuçları

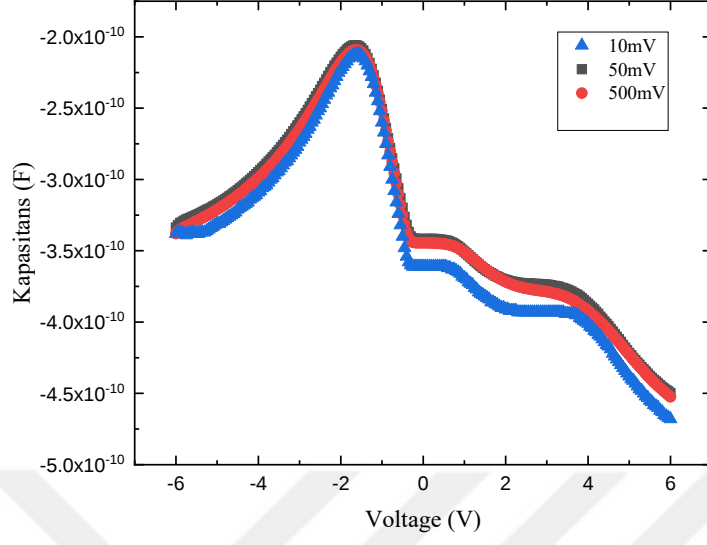
9KK aygıtının fotoışma ve elektro-ışma spektrumları Şekil 4.1’de verilmiştir. Bölüm 3.2.2 ve 3.2.3’te anlatıldığı gibi bu metotlardan yararlanarak aygıtların aktif bölgelerindeki bant aralıkları ve tuzak enerji seviyeleriyle ilgili bilgi sahibi olabiliriz. Fotoışma ve elektro-ışma spektrumlarında görüldüğü gibi aygıt 1300 nm civarında ışıma yapmaktadır. Ayrıca elektro-ışma ölçüm sonucu aygıtın ileri besleme voltaj altında bir LED gibi ışıma yaptığını göstermektedir [6,15].



Şekil 4.1: 9KK aygıtının oda sıcaklığında a) fotoışma b) elektro-ışma spektrumları.

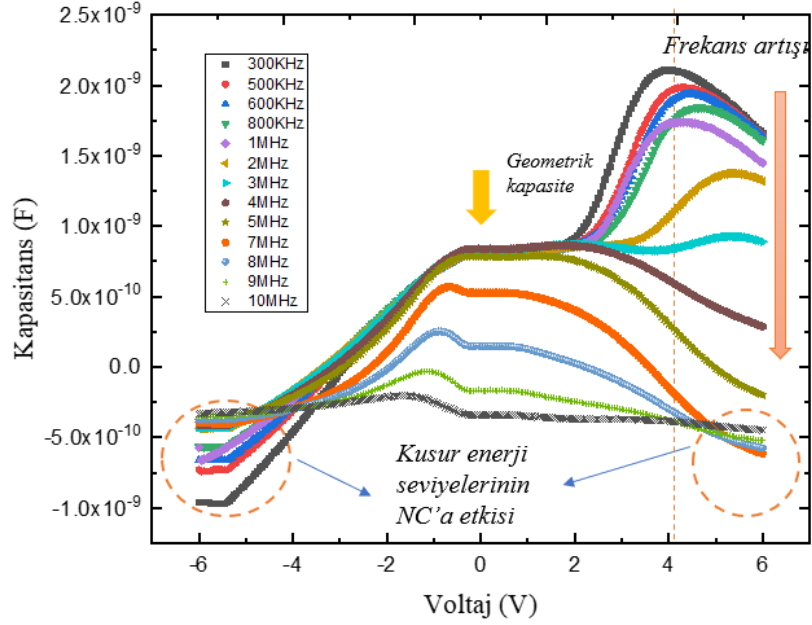
4.1.2. 9KK aygıtın kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları

Literatürde genel olarak kapasitans-voltaj ölçümlerinde modülasyon voltajının büyüklüğü 50 mV olarak seçilmektedir. Bu çalışmada modülasyon voltaj genliğinin negatif kapasitanstaki etkisini araştırmak için modülasyon voltajının büyüklüğü 10mV, 50mV ve 500mV ve frekansı ise 10MHz olarak seçildi. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: 10 MHz'te farklı ileri besleme modülasyon voltajlarında kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ölçüm sonuçları uygulanan modülasyon voltajın büyüklüğünden bağımsızdır. Aşağıdaki bölümlerde gösterildiği gibi kapasitans frekansa ve sıcaklığa bağlı bir şekilde değişmektedir.



Şekil 4.3: 9 KK aygıtın oda sıcaklığında kapasitans-voltaj ölçüm sonucu.

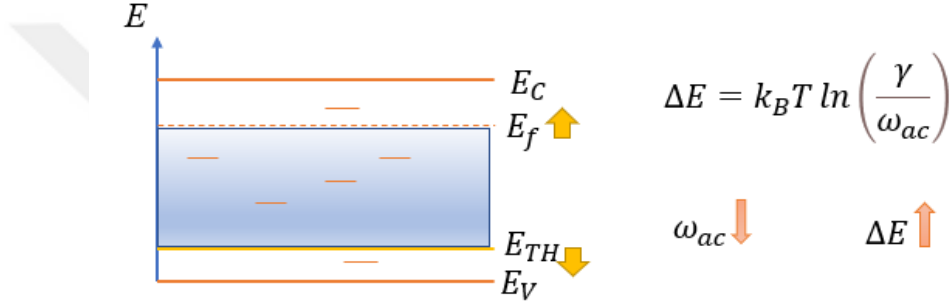
Bölüm 4.1.1’de anlatıldığı gibi 9KK aygıt ileri beslemede LED olarak, geri beslemede ise fotodetektör olarak çalışmaktadır. Bölüm 3.1’de anlatıldığı gibi aygıtın aktif bölgesi KK’lardan oluşmaktadır. Bölüm 2.2.1’de bahsedildiği gibi KK’lar aktif bölgede hareket eden taşıyıcıları tuzaklarlar. Bu tuzaklama sonucunda akım dengesi bozulur ve voltaj artmasına rağmen taşıyıcıların yoğunluğunda azalma gerçekleşir. Bunun sonucunda NC ortaya çıkar. Aygıtta oda sıcaklığında -6 V ve +6 V aralığında ve farklı frekanslarda modüle edilmiş voltaj uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3’te kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları olarak verilmiştir. Ölçüm sonuçları ileri besleme ve geri besleme olarak iki farklı bölgede incelenebilir. Her iki bölgede frekans artışıyla kapasitans azalmaktadır ve bu eğilim 7MHz’e kadar devam etmektedir. Frekans artışıyla kapasitans değerleri azalmaktadır. Denklem 3.19’dan anlaşıldığı gibi, frekans artışı ω da artışa neden olacaktır. Bu da denklemin ikinci terimini zayıflatacaktır. Sonuç olarak denklemin görülen kapasitans miktarı azalacaktır. Frekans artışının etkisi matematiksel olarak daha net anlaşılmak istenirse:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} C(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[C_0 + \frac{1}{\omega \Delta V} \int_0^{\infty} \left[-\frac{d\delta j(t)}{dt} \right] \sin \omega t dt \right] = C_0 \quad (4.1)$$

ifadesi oluşturulabilir. Denklemden anlaşıldığı gibi büyük frekanslarda ölçülen kapasitans geometrik kapasitansa yaklaşmaktadır. Bu olgunun fiziksel nedeni yüksek frekanslarda yüklerin eylemsizlikten dolayı donduğu ve KK’lar tarafından tuzaklanıp yayımlanamaması olarak düşünülmektedir. Şekil 4.3’te sarı okla gösterilen bölge geometrik kapasitansa karşılık gelebilmektedir.

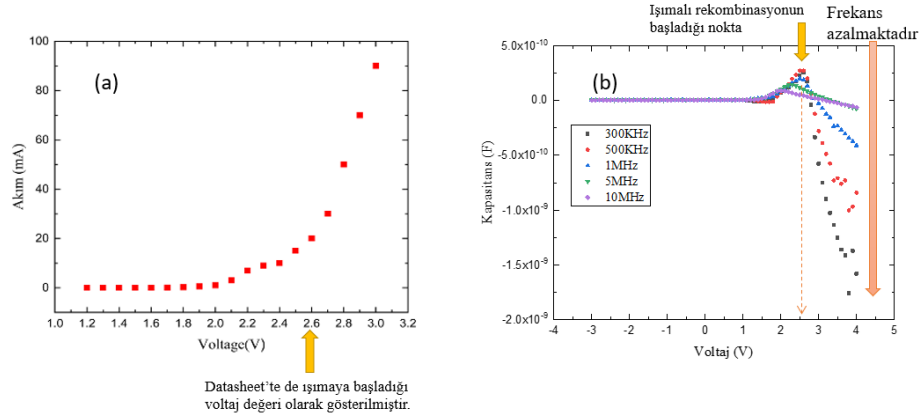
7MHz’ten sonraki frekanslarda uygulanan -4V ve +4V aralığında kapasitans azalma eğilimindedir. Fakat +4V’tan büyük ve -4V’tan küçük voltajlarda (hem ileri besleme hem de geri besleme bölgesinde) frekans ve kapasitans ters orantılıdır. Şekil 3.4’te gösterildiği gibi düşük frekanslarda ölçülen kapasitans daha negatiftir ve bu da Bölüm 2.2.2’de anlatıldığı gibi kusur enerji seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Seyreltik azotlu GaNAs, GaInNAs gibi aşırı uyumsuz yapılar GaAs veya GaInAs için belirlenen ideal büyütme sıcaklığının altında düşük sıcaklıklarda (<500 °C) büyütülmektedir. Bu durumun sonucu olarak düşük sıcaklıkta büyütülen GaAs içerisinde enerjisi GaAs’ın enerji bant aralığının ortalarında (0.7 ev) As_{Ga} (As atomunun Ga atomlarının yerine oturmasından oluşan nokta kusur) kusurları ve seyreltik azotlu yapılarda gözlenen N-N, N-As, V_{Ga} vs. kusurlar oluşmaktadır. 9KK ve 20KK aygıtların hem kuantum kuyusu hem de bariyer malzemesi düşük büyütme sıcaklığında büyütüldüğü için yapı

içerisinde bu kusurların olması beklenmektedir. 9KK aygıtın bant aralık enerjisi yaklaşık olarak 0.97 eV olduğu için olası As_{Ga} kusurları yaklaşık 0.4-0.5 eV civarındadır [15]. Şekil 2.7 ve denklem 2.19'dan anlaşıldığı gibi düşük frekanslarda ΔE değerinin arttığı, sonuç olarak sınırlanma enerji seviyesinin daha düşük değerlere ineceği söylenebilir. Diğer yandan voltaj artışı Fermi seviyesinin iletkenlik bandına doğru bükülmesine neden olacak ve NC'a katkıda bulunacak iki enerji seviyesinin (Fermi enerji seviyesi ve sınırlama enerji seviyesi) arasındaki kusur enerji seviyelerinin sayısı artacaktır. Bu sebeple düşük frekanslarda kapasitans daha büyük negatif değerlere ulaşacaktır. Bu durum Şekil 4.4'te görselleştirilmiştir [6,15,33,37,41].



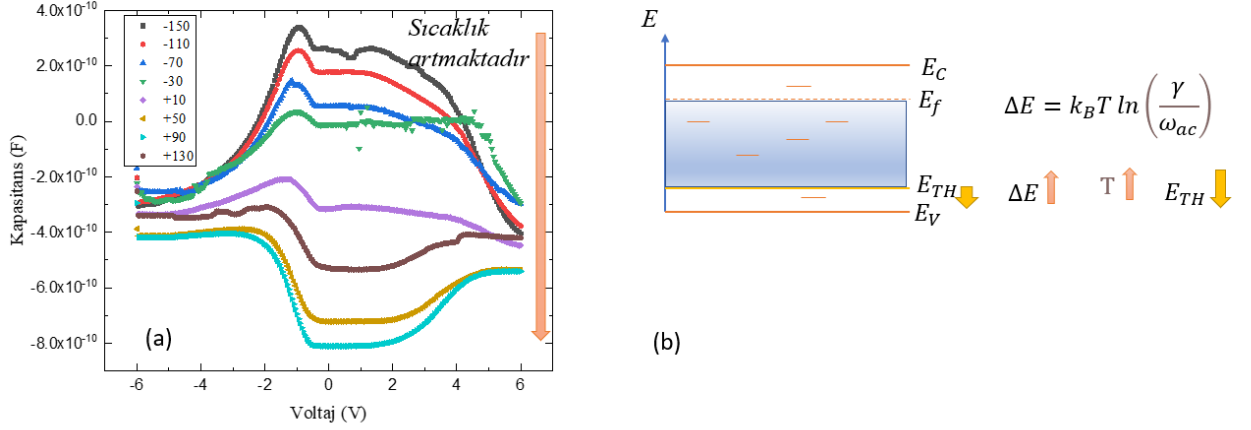
Şekil 4.4: Frekansa bağlı kusur enerji seviyelerinin iletme katkısı.

Şekil 4.3'te ileri besleme altındaki kusur enerji seviyelerinden kaynaklanan NC'ı ticari aygıtlarda test etmek için bir adet MCL053PD model kırmızı ticari LED kullanılmıştır. LED'e oda sıcaklığında voltaj uygulanıp akım değerleri ölçülmüştür. Akım-voltaj ölçüm sonuçları şekil 4.5a'da verilmiştir. Grafikte ok işaretiyle belirlenen nokta aynı anda LED'in ışımaya başladığı noktadır ve bu değer LED'in data sheetindeki ışıma voltajı değeriyle örtüşmektedir. Aynı aygıtta oda sıcaklığında -4V ve +4V arasında modüle edilmiş voltaj uygulanmış ve farklı frekanslarda kapasitans-voltaj ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümden elde edilen sonuçlar şekil 4.5 b'de verilmiştir. Şekil 4.5'teki grafiklerden anlaşılabileceği gibi LED'in ışıma yaptığı nokta kapasitans değerinin aniden azalmaya başladığı noktayla hemen hemen aynı voltaj değerine sahiptir. Bunun nedeni Bölüm 2.2.2'de anlatıldığı gibi ışımalı rekombinasyon olarak düşünülebilir. Düşük frekanslarda kapasitans daha negatif olduğu için 9KK'lu aygıttaki gibi kusur enerji seviyelerinin kapasitansa etki ettiği söylenebilir [34,39].



Şekil 4.5: Ticari kırmızı LED'in **a)** akım-voltaj **b)** kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları.

9KK aygıtta NC'nin sıcaklıktan nasıl etkilendiğini araştırmak için sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj ölçümü gerçekleştirilmiştir. Modülasyon voltajı 50 mV genlik ve 10MHz frekans değerine sahiptir. -6V, +6V aralığında aygıtta uygulanmaktadır. Sistemin sıcaklığı -150 °C'den +130 °C'a kadar değiştirilmektedir. Elde edilen kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi ortam sıcaklığı arttıkça kapasitans değerleri azalma eğilimindedirler. Şekil 4.6 b'de gösterildiği gibi ΔE ve T doğru orantılıdır. Sıcaklıktaki artış ΔE 'deki artışa neden olacaktır. Bundan dolayı E_{TH} enerji ekseninde aşağıya doğru hareket edecektir. Fermi enerji seviyesiyle sınırlama enerji seviyesi arasındaki enerji aralığı artacak olup, bu aralıkta mevcut olan ve iletme katkıda bulunan kusur enerji seviyelerinin sayısı da artacaktır (mavi alan). Daha fazla kusur enerji seviyesi daha fazla yükün tuzaklanması demektir. Buda kapasitansın daha negatif olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenden dolayı sıcaklık arttıkça kapasitans değeri azalarak negatif değerlere kaymaktadır. Fakat dikkat edildiğinde ortam sıcaklığı değeri +130 °C'a ulaştığında kapasitans-voltaj ölçüm sonucunda eğri yukarıya doğru kaymıştır ve daha pozitif olma eylemindedir. Yüksek sıcaklıklarda impakt iyonizasyon başlamaktadır. Bunun sonucunda taşıyıcı yoğunluğu artmaktadır ve bu taşıyıcılar kusur enerji seviyeleri tarafından tuzaklanan yükleri telafi ederek kapasitans daha pozitif değerlere çıkmasını sağlarlar [33,34,36,39,41,42].



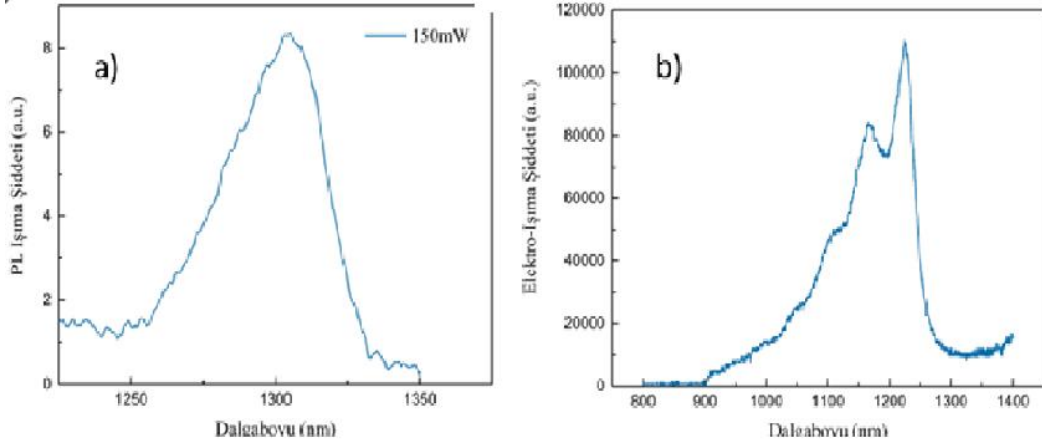
Şekil 4.6: 9KK aygıtta **a)** Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj ölçüm sonucu **b)** Sıcaklığın kusur enerji seviyelerinin aktivasyonundaki etkisi.

Sıcaklık azaldıkça şekil 4.6’da görüldüğü gibi kapasitans değeri artışa geçecektir ve sıfır kelvin sıcaklığında kapasitans değeri aygıtın geometrik kapasitansa ulaşacaktır. Sıfır Kelvin sıcaklığında denklem 2.19’da görüldüğü gibi ΔE değeri sıfır olacaktır. Dolayısıyla kusur enerji seviyeleri iletme katkı sağlayamayacaklar ve düşük besleme voltajlarında nerdeyse sıfır rekombinasyondan dolayı kapasitans geometrik kapasitansa eşit olacaktır.

4.2. 20KK AYGITI

4.2.1. 20KK Aygıtın Fotoışma Ve Elektro-Işıma Ölçüm Sonuçları

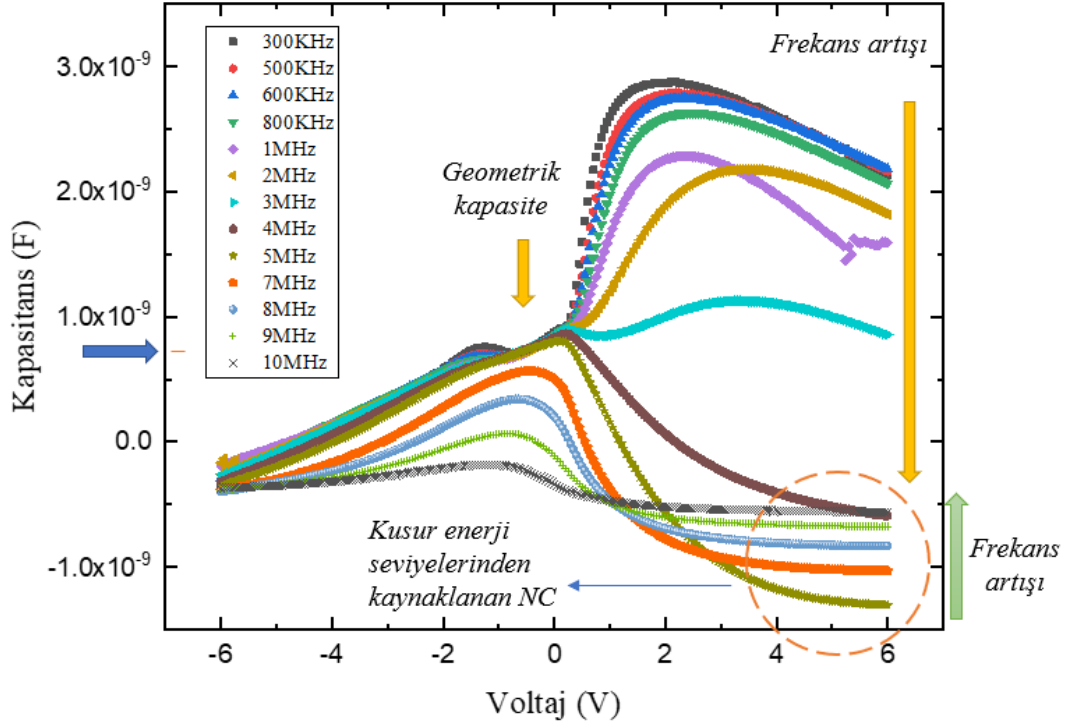
20KK’lu aygıtta da fotoışma ve elektro-ışma ölçümleri Şekil 4.7’da verilmektedir. 9KK’lu aygıtta olduğu gibi bu aygıtta da ışıma dalga boyu 1300 nm civarındadır. Fotoışma ve elektro-ışma sonuçları aygıtın uygulanan ileri besleme altında ışıma yaptığını ve dolayısıyla LED davranışı sergilediğini kanıtlamaktadır [6,15,26].



Şekil 4.7: 20KK aygıtının oda sıcaklığında **a)** fotoışıma. **b)** elektro-ışıma spektrumları.

4.2.2. 20KK Aygıtın Kapasitans-Voltaj Ölçüm Sonuçları

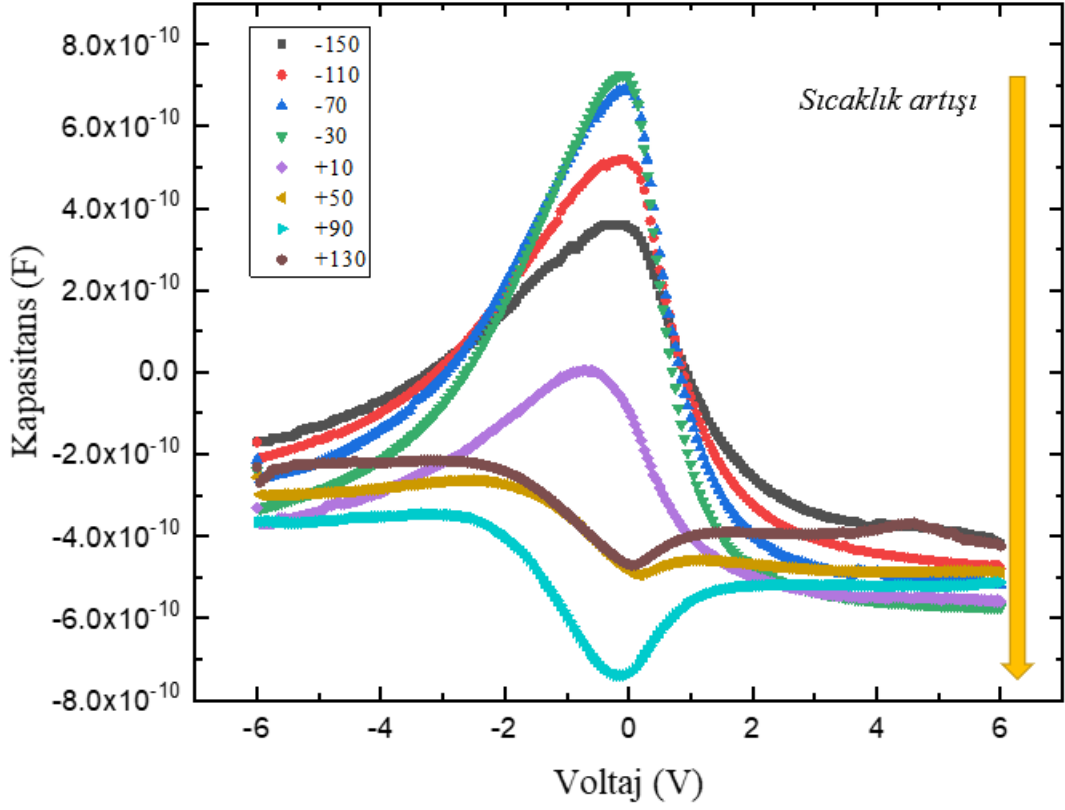
Bölüm 4.2.1’de fotoışıma ve elektro-ışıma spektrumundan anlaşıldığı gibi 20KK aygıt ileri besleme voltajlarında LED davranışı sergilemektedir. Bu aygıt geri besleme voltajlarında ise fotodedektör olarak çalışmaktadır. Aygıtta oda sıcaklığında 50mV büyüklüğünde ve farklı frekanslarda modülasyon voltajı uygulanmaktadır. DC ileri besleme ise -6 V ile +6 v aralığında verilmiştir. Kapasitans-voltaj ölçümünden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir. Kapasitans-voltaj ölçüm sonuçlarını 9KK’da yapıldığı gibi ileri besleme ve geri besleme olarak iki farklı bölgede incelenebilir. İleri beslemede frekans arttıkça kapasitans değerleri 4MHz’e kadar azalma eğilimindedir. Bölüm 4.1.1 ve denklem 3.19’dan anlaşıldığı gibi 20KK aygıtta da frekans artışı kapasitans miktarında azalmaya neden olacaktır. Denklem 4.1, 20KK aygıt için de geçerlidir. Frekans artışı aygıtı geometrik kapasitansa yaklaştırmaktadır. Şekil 4.8’de sarı ok işaretiyle belirlenen nokta geometrik kapasitansdır ve bu değer empedans analizör cihazıyla ölçülen geometrik kapasitans değerinin dolayındadır. 5MHz ve daha büyük frekanslarda frekans artışı ve kapasitans artışı ters orantıya sahiptir. Düşük frekanslarda ölçülen kapasitans değerleri daha negatiftir. Bu da 9KK aygıtta gerçekleşen olgunun aynısıdır. Bölüm 4.1.1’de detaylıca anlatıldığı gibi tuzak kusur enerji seviyelerinin NC’deki katkısından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.6 b, bu durum için de geçerlidir [33,36,41].



Şekil 4.8: 20KK aygıtın oda sıcaklığında kapasitans-voltaj ölçüm sonucu.

Dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise 4 MHz'in üzerindeki frekanslarda kapasitans-voltaj eğrilerinin maksimum yaptığı nokta voltajın artışıyla sağa doğru kaymaktadır. 3 MHz'ten daha küçük frekanslarda, frekans azaldıkça eğrilerin maksimum yaptığı nokta düşük voltajlara doğru kaymaktadır. 20KK ve 9KK aygıttan elde edilen sonuçlar kıyaslandığında 8 MHz'ten daha büyük frekanslarda davranış benzerliği gözlemlenmiştir. 20KK'lu aygıtta tıpkı 9KK aygıt gibi negatif kapasitansın kaynağı kuantum kuyuları ve kusur enerji seviyeleri olarak düşünülmüştür.

20KK aygıtta NC'nin sıcaklıktan nasıl etkilendiğini araştırmak için sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj ölçümü gerçekleştirilmiştir. Aygıt kroyostata yerleştirildikten sonra sistem tamamen vakuma alınmaktadır. Modülasyon voltajı 50 mV genlik ve 10MHz frekans değerine sahiptir ve -6V, +6V aralığında aygıtta uygulanmaktadır. Sistemin sıcaklığı -150 °C'den +130 °C'a kadar değiştirilmektedir. Aygıttan alınan kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi ortam sıcaklığı arttıkça kapasitans değerleri azalma eğilimindedirler.



Şekil 4.9: 20KK aygıttan sabit 10 MHz ve farklı sıcaklıklarda elde edilen kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları.

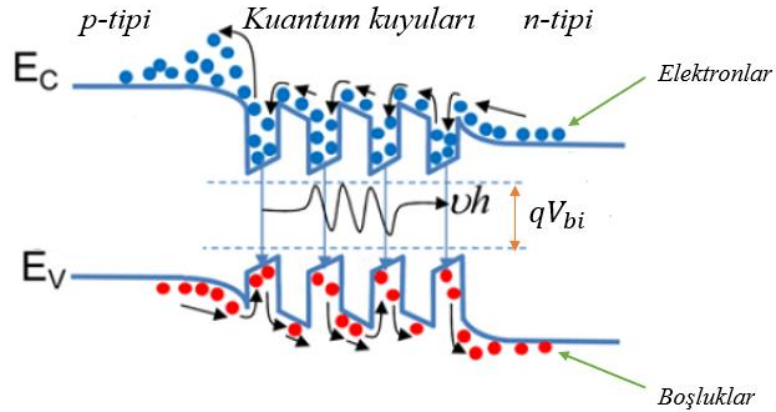
Şekil 4.6 b’de gösterildiği gibi ΔE ve T doğru orantılıdır. 20KK aygıtta aynı 9KK aygıt gibi sıcaklıktaki artış ΔE ’deki artışa neden olacaktır. Bundan dolayı E_{TH} enerji ekseninde aşağıya doğru hareket edecektir. Fermi enerji seviyesiyle sınırlama enerji seviyesi arasındaki enerji aralığı artacak olup bu aralıkta mevcut olan ve iletme katkıda bulunan kusur enerji seviyelerinin sayısı da artacaktır (mavi alan). Daha fazla kusur enerji seviyesi daha fazla yükün tuzaklanması demektir. Bu da kapasitansın daha negatif olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenden dolayı sıcaklık arttıkça kapasitans değeri azalarak negatif değerlere kaymaktadır. Fakat dikkat edildiğinde ortam sıcaklığı değeri $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’a ulaştığında kapasitans-voltaj ölçüm sonucunda eğri yukarıya doğru kaymıştır ve daha pozitif olma eylemindeydir. 9KK aygıt gibi bu aygıtta da yüksek sıcaklıklarda impakt iyonizasyon başlamaktadır. Bunun sonucunda taşıyıcı yoğunluğu artmaktadır ve bu taşıyıcılar kusur enerji seviyeleri tarafından tuzaklanan yükleri telafi ederek kapasitansın daha pozitif değerlere çıkmasını sağlarlar.

Sıcaklık azaldıkça şekil 4.9’da görüldüğü gibi kapasitans değeri artışa geçecektir ve sıfır Kelvin sıcaklığında kapasitans değeri aygıtın geometrik kapasitansına ulaşacaktır. Sıfır Kelvin sıcaklığında denklem 2.19’da görüldüğü gibi ΔE değeri sıfır olacaktır. Dolayısıyla kusur enerji seviyeleri iletme katkı sağlayamayacaklar ve düşük besleme voltajlarında nerdeyse sıfır rekombinasyondan dolayı kapasitans geometrik kapasitansa eşit olacaktır. |



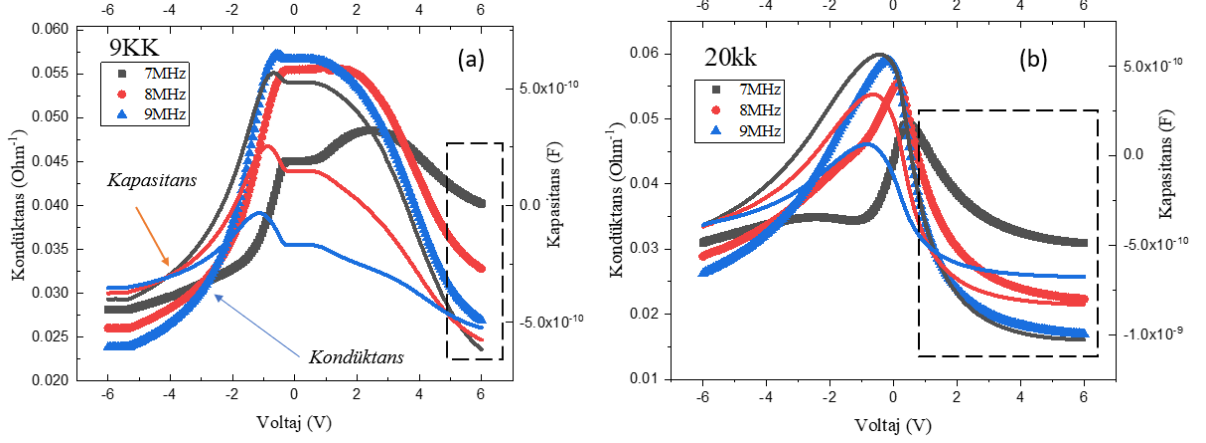
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez kapsamında detaylıca anlatıldığı gibi bir aygıtta NC aygıttan geçen akımın aygıtta uygulanan voltaja karşın sergilediği eylemsizlikten ortaya çıkmaktadır. Kapasitans tanım gereği yük değişiminin voltaj değişimine oranı olarak gösterilmektedir. Voltaj artışı sonucu eğer taşıyıcı yoğunluğunda azalma olursa veya akım artışı voltaj artışının gerisinde kalırsa (eylemsizlik), NC ortaya çıkar. Taşıyıcı yoğunluğundaki azalma aygıtın yapısına göre çeşitli nedenlerden gerçekleşebilir. Örnek olarak elektron-boşluk rekombinasyonu ve üretimi, KK'lardaki yüklerin tuzaklanması ve uyarılması, kusur enerji seviyelerindeki yüklerin tuzaklanması NC'nin kaynağı olarak düşünülebilir. LED'lerde ışıma, elektron-boşluk çiftlerinin ışımalı rekombinasyonu ile gerçekleşmektedir. Rekombinasyon taşıyıcı yoğunluğunu dolayısıyla akımın artış hızını azaltmaktadır. Diğer yandan aygıtın malzemesinde bulunan kusur enerji seviyeleri taşıyıcıların tuzaklanmasına sebep olmaktadır. Bu durum akımın voltaja karşın eylemsiz davrandığına ve NC'nin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Tez kapsamında kullanılan 9KK ve 20KK aygıtların aktif bölgelerinde kuantum kuyusu sistemi mevcuttur. Bu sistem Şekil 5.1'de gösterildiği gibi elektrotlardan gelen taşıyıcıları tuzaklarlar. Tuzaklama sonucu voltaj artışı taşıyıcı yoğunluğundaki azalmaya ve akımın voltaja göre eylemsiz olmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.1: KK sistemde taşıyıcıların hareketi ve tuzaklanması.

Şekil 5.1’de KK’lı LED’in bant enerji profili gösterilmektedir. KK’lı sistemlerde kuantum kuyuları ve kusurlu enerji seviyeleri NC’nin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.



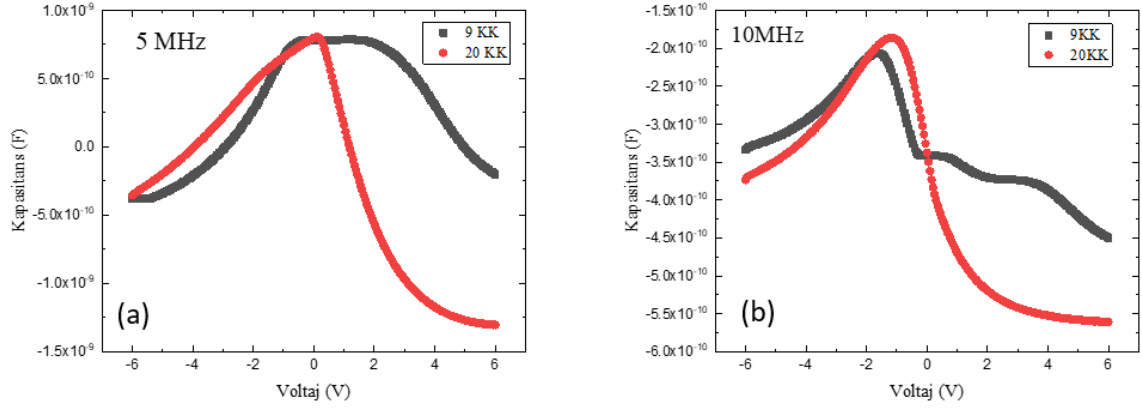
Şekil 5.2: a) 9KK aygıtta b) 20 KK aygıtta, kondüktans ve kapasitans-voltaj ölçüm sonucu.

Şekil 4.3 ve 4.8’te görüldüğü gibi her iki aygıtta da belirli bir frekansa kadar frekans artışı kapasitans da azalmaya neden olmaktadır. 9KK aygıt için 6MHz’den ve 20KK aygıt için 4MHz’ten daha büyük frekanslarda kusur enerji seviyeleri aktif hale gelerek ilettime ve NC’a katkıda bulunacaklar. Şekil 5.2a ve 5.2b’de sırasıyla 9KK ve 20KK aygıtlar için kapasitans-voltaj ve kondüktans-voltaj ölçüm sonuçları tek koordinat üzerinde gösterilmiştir. Şekil 5.2’de kalın çizgilerle gösterilen grafik eğrileri kondüktans, ince çizgilerle çizilen grafik eğrileri kapasitansı temsil etmektedir. 9KK aygıtta +4.5V’tan büyük ileri besleme voltajındaki davranış ve 20KK aygıtta +1V’tan büyük ileri besleme voltajındaki davranışı gösteren grafik eğrileri kesikli kadrajın içine alınmıştır. Şekilden anlaşıldığı gibi frekansın azalması kapasitansın azalmasına ve daha negatif değerlere gitmesine neden olmaktadır. Kondüktansın değişimi ise frekansın değişimiyle ters orantılıdır. Yani frekans arttıkça kondüktans azalmaktadır. Frekans azaldıkça ΔE ’nin artışı, dolayısıyla sınırlama enerji seviyesinin daha düşük değerlere indiği ve ilettime katkıda bulunan kusur enerji seviyelerinin arttığı Bölüm 2.2.2’de detaylıca anlatıldı. Bu artış kondüktansta artışa neden olmaktadır. Kapasitanstaki artış kondüktanstaki azalma anlamına gelmektedir ve bu davranış Şekil 5.2’de görülmektedir.

Buradan yola çıkarak aygıtların sergilediği NC’ın kaynağı kuantum kuyuları olmasının yanı sıra Bölüm 4.1.2’de anlatıldığı gibi kusur enerji seviyeleri de olabilir.

Sonraki aşamada aygıtların sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj ölçümleri gerçekleştirildi. Sıcaklığın artışı kapasitansın azalmasına ve negatif değerlere ulaşmasına neden oldu. Bunun nedeni ise denklem 2.19'dan anlaşılmaktadır.

Son aşamada ise 9KK ve 20KK aygıtların kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları 5MHz ve 10MHz frekanslarında karşılaştırılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: a) 5MHz ve b)10MHz'de 9KK ve 20KK aygıtların kapasitans-voltaj ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Her iki frekansta 20KK aygıtın kapasitansı 9KK'a nazaran daha negatiftir. 20KK aygıt daha fazla kuantum kuyusu ve bariyere sahiptir. Bu da taşıyıcıların hem kuantum kuyuları, hem de kusur enerji seviyeleri tarafından daha büyük ölçüde tuzaklanacakları anlamına gelmektedir ve kapasitansın 20KK aygıtta daha negatif olmasına neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

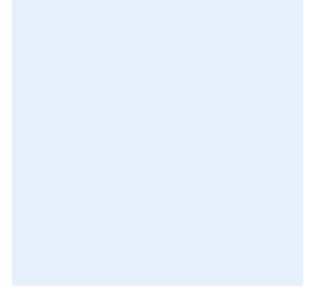
- [1]. Erol, A. and Balkan, N., 2015, *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, Seçkin, editor. Ankara, Seçkin Yayıncılık, ISBN: 9789750231018.
- [2]. Ha, D., Fang, Z., and Zhitenev, N. B., 2018, Paper in Electronic and Optoelectronic Devices, *Adv. Electron. Mater.* 4 (5), 1–20.
- [3]. Chang, M. H., Das, D., Varde, P. V., and Pecht, M., 2012, Light emitting diodes reliability review, *Microelectron. Reliab.* Elsevier Ltd. 52 (5), 762–782.
- [4]. Opel, D. R. et al., 2015, Light-emitting diodes: A brief review and clinical experience, *J. Clin. Aesthet. Dermatol.* 8 (6), 36–44.
- [5]. Haase, M. A., Qiu, J., Depuydt, J. M., and Cheng, H., 1991, Blue-green laser diodes Blue-green laser diodes, *Cit. Appl. Phys. Lett. J. Appl. Phys. J. Vac. Sci. Technol. B Today Phys. Lett. J. Vac. Sci. Technol. B.* 591 (10), 1272–2480.
- [6]. Sarcan, F., Nutku, F., Nordin, M. S., Vickers, A. J., and Erol, A., 2018, A study on the voltage-dependent response of a GaInNAs-based pin photodetector with a quasi-cavity, *Semicond. Sci. Technol.* IOP Publishing. 33 (11).
- [7]. Aberle, A. G., 2009, Thin-film solar cells, *Thin Solid Films.* 517 (17), 4706–4710.
- [8]. Muñoz-García, A. B. et al., 2021, Dye-sensitized solar cells strike back, *Chem. Soc. Rev.* 50 (22), 12450–12550.
- [9]. Ahmad, W., Khan, A., Khan, K., Khan, M., and Khan, Q., 2023, A review of the synthesis ,fabrication , and recent advances in mixed dimensional heterostructures for optoelectronic devices applications, *Appl. Mater. Today.* Elsevier Ltd. 30 (December 2022), 101717.
- [10]. Bayhan, H. and Kavasoglu, A. S., 2003, Admittance and Impedance Spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells, *Turkish J. Phys.* 27 (6), 529–535.
- [11]. Aydın, M. et al., 2022, High-Field Electron-Drift Velocity in n-Type Modulation-Doped GaAs_{0.96}Bi_{0.04} Quantum Well Structure, *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* 16 (11), 1–5.
- [12]. Zaki, S. E. et al., 2022, Phase modulation of MoO₂ -MoO₃ nanostructured thin films through W-Doping; utilizing UV photodetection and gas sensing applications, *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Derg.* 48 (1), 0–3.
- [13]. Cevik, E., Buyukharman, M., and Yildiz, H. B., 2019, Construction of efficient bioelectrochemical devices: Improved electricity production from cyanobacteria (*Leptolyngbiasp.*)based on π -conjugated conducting polymer/gold nanoparticle composite interfaces, *Biotechnol. Bioeng.* 116 (4), 757–768.
- [14]. Grundmann, M., 2016, Graduate Texts in Physics The Physics of Semiconductors, ISBN: 978-3-319-23880-7.

- [15]. Sarcan, F., 2018, *Rezonans Kaviteli ve İç Kazançlı GaInNAs- Tabanlı IR Fotodedektör*, 115.
- [16]. Buyukharman, M., 2020, Gümüş (Ag) atomları ile dekore edilmiş tek tabaka grafenin sentez ve karakterizasyonu, Fen Bilim. Enstitüsü, Necmettin Erbakan. Necmettin Erbakan Üniversitesi, ISBN: 9788578110796.
- [17]. Jelonek, Z., Drobnia, A., Mastalerz, M., and Jelonek, I., 2020, Bandgap engineering of high mobility two-dimensional semiconductors toward optoelectronic devices, *Sci. Total Environ.* The Chinese Ceramic Society. , 141267.
- [18]. Mutlu, S., 2020, Geniş yasak enerji aralıklı sıcak elektron lazer ve ışın yayıcı yarıiletken hetero-yapılar, Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- [19]. Kuruoğlu, F., 2018, Nano yapıları uçucu olmayan bellke aygıtların üretimi ve karakterizasyonu, Fen Bilim. Enstitüsü, Yıldız Teknik. Üniversitesi. ISBN: 0123456789.
- [20]. Qasuria, T. A., Fatima, N., Karimov, K. S., and Ibrahim, M. A., 2020, A novel and stable ultraviolet and infrared intensity sensor in impedance/capacitance modes fabricated from degraded CH₃NH₃PbI₃-xCl_xperovskite materials, *J. Mater. Res. Technol.* Korea Institute of Oriental Medicine. 9 (6), 12795–12803.
- [21]. Feng, L. F., Li, Y., Zhu, C. Y., Cong, H. X., and Wang, C. D., 2010, Negative terminal capacitance of light emitting diodes at alternating current (AC) biases, *IEEE J. Quantum Electron.* 46 (7), 1072–1075.
- [22]. Feng, L. F., Zhu, C. Y., Chen, Y., Zeng, Z. Bin, and Wang, C. Da, 2006, Mechanism of negative capacitance in LEDs, *Guangdianzi Jiguang/Journal Optoelectron. Laser.* 17 (1), 5–8.
- [23]. Johnston, S. W., Ahrenkiel, R. K., Friedman, D. J., and Kurtz, S. R., 2002, Deep-level transient spectroscopy in InGaAsN lattice-matched to GaAs, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.* , 1023–1026.
- [24]. Sharma, T. K. et al., 2009, Compositional dependence of the bowing parameter for highly strained InGaAs/GaAs quantum wells, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 80 (16), 1–11.
- [25]. Kasap, S., Rowlands, J. A., Baranovskii, S. D., and Tanioka, K., 2004, Lucky drift impact ionization in amorphous semiconductors, *J. Appl. Phys.* 96 (4), 2037–2048.
- [26]. Salahuddin, S. and Datta, S., 2008, Use of negative capacitance to provide voltage amplification for low power nanoscale devices, *Nano Lett.* 8 (2), 405–410.
- [27]. Sze, S. . and KWOK, K., 2007, No Title, *Phys. Semicond. Devices.* 3rd ed. California. p. 762.
- [28]. Nowy, S., Ren, W., Elschner, A., Lövenich, W., and Brütting, W., 2010, Impedance spectroscopy as a probe for the degradation of organic light-emitting diodes, *J. Appl. Phys.* 107 (5).

- [29]. Diodes, W. bandgap L. emitting, Han, D. pyo, Kim, Y. jin, Shim, J. in, and Shin, D. soo, 2016, Forward-Capacitance Measurement on, *IEEE*. 28 (21), 2407–2410.
- [30]. Fink, D. R., 2020, Capacitance-Based Characterization of PIN Devices,
- [31]. Li, Y. et al., 2022, Retrieve the carrier population and built-in potential alignment in multi-quantum-well GaAs/InGaAs p-i-n photodiode, *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*. Elsevier B.V. 135 (February 2021), 114970.
- [32]. Heath, J. and Zabierowski, P., 2016, Capacitance Spectroscopy of Thin-Film Solar Cells, *Adv. Charact. Tech. Thin Film Sol. Cells Second Ed.* 1–2 , 93–119.
- [33]. Perera, A. G. U., Shen, W. Z., Shov, M. E., Liu, H. C., Buchanan, M., and Schaff, W. J., 1999, Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors, *Appl. Phys. Lett.* 74 (21), 3167–3169.
- [34]. Zhu, C. Y. et al., 2009, Negative capacitance in light-emitting devices, *Solid. State. Electron.* Elsevier Ltd. 53 (3), 324–328.
- [35]. Levine, B. F., 1993, Quantum-well infrared photodetectors, *J. Appl. Phys.* 74 (8).
- [36]. Jones, B. K., Santanat, J., and McPherson, M., 1998, Negative capaciatnce effects in Semiconductor deiodes, *Solid State Commun.* 107 (2), 0–3.
- [37]. Ebadi, F., Taghavinia, N., Mohammadpour, R., Hagfeldt, A., and Tress, W., 2019, Origin of apparent light-enhanced and negative capacitance in perovskite solar cells, *Nat. Commun.* Springer US. 10 (1), 1–9.
- [38]. Mock, J., Kallergi, M., Gros, E., Golibrzuch, M., Rieger, B., and Becherer, M., 2022, Revealing the Negative Capacitance Effect in Silicon Quantum Dot Light-Emitting Diodes via Temperature-Dependent Capacitance-Voltage Characterization, *IEEE Photonics J.* 14 (4).
- [39]. Trong, V. D., Anh, C. T., Cuong, N. D., Binh, P. H., Truong, C. T., and Pham, A. T., 2012, Frequency dependence of negative capacitance in light-emitting devices, *2012 4th Int. Conf. Commun. Electron. ICCE 2012.* , 44–47.
- [40]. Kask, E., Raadik, T., Grossberg, M., Josepson, R., and Krustok, J., 2011, Deep defects in Cu 2ZnSnS 4 monograin solar cells, *Energy Procedia.* 10 , 261–265.
- [41]. Bourim, E. M. and Han, J. I., 2016, Size effect on negative capacitance at forward bias in InGaN/GaN multiple quantum well-based blue LED, *Electron. Mater. Lett.* 12 (1), 67–75.
- [42]. Karataş, Ş., 2021, Temperature and voltage dependence C–V and G/ω–V characteristics in Au/n-type GaAs metal–semiconductor structures and the source of negative capacitance, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 32 (1), 707–716.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Aydın MASOUMİ
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Islamic Azad University
Fakülte	Mühendislik
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimler Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Katıhal Fiziği