

**ELEKTRONİK TRANSPORT MEKANİZMALARININ  
PULSLU ÖLÇÜM TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ**

Selman MUTLU  
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı  
Ocak-2013

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından Proje No:1001F99 ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Proje No:110T377 desteklenmiştir.**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Selman MUTLU**'nun “**Elektronik Transport Mekanizmalarının Pulsu Ölçüm Teknikleri ile İncelenmesi**” başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 18.01.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı- Soyadı		İmza
Üye (Tez Danışmanı): Doç.Dr.ENGİN TIRAŞ		.....
Üye	: Doç.Dr.RAMİS MUSTAFA ÖKSÜZOĞLU	.....
Üye	: Doç.Dr.EVREN TURAN	.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRONİK TRANSPORT MEKANİZMALARININ PULSLU ÖLÇÜM TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ

Selman MUTLU

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Engin TIRAŞ

2013, 92sayfa

AlGaN/AlN/GaN ve AlInN/AlN/GaN heteroeklem örnekler *Metalorganic chemical vapor deposition* (MOCVD) tekniğiyle, GaInNAs/GaAs, GaN/AlN/InN ve InGaN/GaN örnekler *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) tekniğiyle büyütülen örneklerde pulslu akım gerilim (I-V) ölçümleri yapıldı.

Pulslu akım-gerilim ölçümleri 1,7-300 K aralığında 50 K adımlarla yapıldı. Bu ölçümlerde 200 ns puls genişliğinde 0-200 V aralığında pulslu voltajlar uygulandı. Elektronların elektrik alan altındaki sürüklenme hızı, mobilitesi ve elektron başına güç kayıpları elde edildi. AlGaN/AlN/GaN ve AlInN/AlN/GaN heteroeklem örneklerde güç kaybı mekanizmaları mobilitenin karşılaştırılması yöntemi kullanılarak elde edildi. Elektron başına güç kaybının sıcaklıkla değişimi kuramsal modeller ile karşılaştırıldı. Yüksek elektron sıcaklıklarında enerji durulmasının optik fonon emisyonu ile gerçekleştiği sonucuna varıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Heteroeklem, kuantum kuyu, yüksek elektrik alan iletim mekanizmaları, sıcak elektronlar, güç kaybı

## ABSTRACT

### Master Thesis

## INVESTIGATION OF THE ELECTRONIC TRANSPORT MECHANISMS BY USING PULSED MEASUREMENT TECHNIQUES

Selman MUTLU

Anadolu University  
Graduated School of Science  
Physics Program

Supervisor: Assoc. Prof. Engin TIRAŞ  
2013, 92 pages

The pulsed current-voltage (I-V) measurements were performed in AlGaN/AlN/GaN, AlInN/AlN/GaN, GaInNAs/GaAs, GaN/AlN/InN, and InGaN/GaN samples. The AlGaN/AlN/GaN and AlInN/AlN/GaN heterostructure samples were grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) technique, GaInNAs/GaAs, GaN/AlN/InN, and InGaN/GaN samples were grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE) technique.

The pulsed current-voltage measurements were carried out in the temperature range between 1.7 and 300 K, in steps of 50 K. The pulsed voltages up to 200 V with pulse width up to 200 ns were applied to samples in the measurements. The drift velocity, electron mobility and electric field dependent power loss per electron were determined from the analysis of the results. The temperature dependent power loss per electron were also determined using the mobility comparison method. The results of the temperature dependent power loss per electron were compared with current theoretical models in the literature. It was indicated that, the electron energy relaxation time were limited by optical phonons at high temperatures.

**Key Words:** Heterojunction, quantum well, high electric field transport mechanism, hot electrons, power loss

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde çok değerli yardımları ve sürekli desteğini gördüğüm tez yöneticisi **Doç. Dr. Engin TIRAŞ**'a teşekkür ederim.

Yardımlarını gördüğüm, çalışma arkadaşım **Şükrü ARDALI**'ya teşekkür ederim.

Çalışma süresince manevi desteği için annem **Halide MUTLU**, babam **Abdullah MUTLU**, kardeşlerim **Ahmet** ve **Süleyman MUTLU**, yakın arkadaşlarım **Serdar KARAMAN**, **İlknur KIRIMÇA** ve **Ayça GÜZEL**'e teşekkür ederim.

Selman MUTLU

Ocak 2013

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TEMEL BİLGİLER</b> .....	<b>3</b>
2.1. İki Boyutlu Yarıiletkenler ve İki Boyutlu (2DEG) Elektron Gazı.....	3
2.2. Düşük Alan İletimi.....	6
2.3. Fonon Saçılması .....	7
2.3.1. Akustik Fonon Saçılması .....	8
2.3.2. Optik Fonon Saçılması.....	10
2.4. Yüksek Alan İletimi .....	11
2.4.1. Sıcak Elektron Kavramı .....	12
2.4.1.1. Mobiliteğin Karşılaştırılması Yöntemi .....	14
2.4.2. Sıcak Elektronların Enerji Durulmaları .....	17
2.4.2.1. Akustik Fonon Emisyonu ile Enerji Durulması.....	18
2.4.2.2. Optik Fonon Emisyonu ile Enerji Durulması .....	20
2.4.2.3. Sıcak Fonon Etkileri .....	21

<b>3. DENEYSEL YÖNTEMLER</b>	<b>24</b>
3.1. Örnekler .....	24
3.1.1. AlGaN/AlN/GaN Örnek .....	24
3.1.2. AlInN/AlN/GaN Örnek.....	25
3.1.3. GaInNAs/GaAs Örnekler.....	27
3.1.4. GaN/AlN/InN Örnek.....	28
3.1.5. InGaN/GaN Örnekler.....	28
3.2. Pulsu I-V Ölçümleri .....	30
3.3. Deney Düzenegi ve Özellikleri .....	33
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b>	<b>35</b>
4.1. Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> N/AlN/GaN Yapılar .....	36
4.2. Al <sub>0,83</sub> In <sub>0,17</sub> N/AlN/GaN Yapılar.....	41
4.3. Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N <sub>y</sub> As <sub>1-y</sub> /GaAs Yapılar .....	47
4.4. GaN/AlN/InN Yapılar .....	65
4.5. In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N/GaN Yapılar .....	67
<b>5. SONUÇLAR</b>	<b>73</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b>	<b>75</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

2.1.	Bazı III-V yarıiletken bileşiklerin yasak enerji aralığının ( $E_g$ ) örgü sabitine bağlı değişimi.....	4
2.2.	Çeşitli kuantum yapılarının şematik gösterimi a) heteroeklem, b) kuantum kuyu, c) çoklu kuantum kuyu, d) süperörgü ( $E_c$ iletim bandı enerjisidir.) .....	5
2.3.	Termal dengede $Al_{0,22}Ga_{0,78}N/AlN/GaN$ heteroeklem yapının enerji band diyagramı ( $E_F$ Fermi enerjisi, $E_1$ birinci altband enerjisi, $E_2$ ikinci altband enerjisidir.) [14].....	6
2.4.	a)Fonon soğurulması ve b) fonon yayımlanması süreçlerinin şematik gösterimi [19].....	8
2.5.	Mobilitelelerin karşılaştırılması yöntemiyle elektron sıcaklığının elde edilmesi [63].....	15
2.6.	Sıcak fonon etkisi olduğu ve olmadığı durumlarda taşıyıcı başına güç kaybı karşılaştırılması [22]. Sürekli çizgi sıcak fonon etkisi olmadığı durumda elde edilen taşıyıcı başına düşen güç, kesikli çizgi ise sıcak fonon etkisinin olduğu durumdaki taşıyıcı başına güçtür.....	23
3.1.	$AlGaN/AlN/GaN$ örneğin tabaka yapısı .....	24
3.2.	Van der Pauw geometrisi. Şekilde $V_{giriş}$ devreye uygulanan voltaj, $R_{yük}$ yük direnci ve $V_R$ yük direnci üzerine düşen voltajdır. ....	25
3.3.	$AlInN/AlN/GaN$ örneğin tabaka yapısı.....	26
3.4.	Hall-çubuğu geometrisi. Üzerine düşen voltaj sayesinde örneğe uygulanan voltajı elde etmemizi sağlayan, örneğe seri bağlı direnç $R_{yük}$ 'tür. ....	26
3.5.	$GaNAs/GaAs$ örneklerin tabaka yapısı .....	27
3.6.	$GaN/AlN/InN$ örneğin tabaka yapısı.....	28
3.7.	$InGaN/GaN$ örneklerin tabaka yapısı .....	29

3.8.	Pulslu I-V ölçümleri için deneysel kurulum şeması. Burada $V_{giriş}$ devreye uygulanan voltaj, $R_{yük}$ yük direnci, $V_R$ yük direnci üzerine düşen voltajdır. $R_{//}$ paralel direnci ise puls üretici, kablolar ve devre arasında empedansı sağlamak ve termal gürültüyü azalmak için eklenmiştir.....	30
3.9.	Kare dalga iş döngüsü şeması. Dalganın tepe noktasındaki değeri $V_{cc}$ , çukurdaki değeri ise $V_{ss}$ 'dir. ....	32
3.10.	Deney düzeneğinin blok diyagramı.....	33
3.11.	Örnek ve örnek tutucu .....	34
4.1.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örneğinin akım gerilim grafiği ( $T=1,7$ K).....	36
4.2.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte sürüklenme hızının uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K).....	37
4.3.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K) .....	37
4.4.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte sıcaklığa ve elektrik alana bağlı normalize edilmiş mobilitelerin karşılaştırılması. İçi dolu daireler normalize edilmiş mobilitenin sıcaklıkla değişimi ve içi boş daireler normalize edilmiş mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimidir.....	38
4.5.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte elektron sıcaklığının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K) .....	39
4.6.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybı. İçi boş daireler Eş. 4.4 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybı, içi dolu daireler ise Eş. 4.5 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybıdır ( $T=1,7$ K).....	40
4.7.	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$ heteroeklem örnekte elektron başına güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi. Sürekli çizgi Eş. 2.25 ile verilen kuramsal uyum eğrisidir.....	41
4.8.	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AiN/GaN$ heteroeklem örneğinin akım gerilim grafiği ( $T=1,7$ K).....	42

<b>4.9.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte sürüklenme hızının uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K).....	42
<b>4.10.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K) .....	43
<b>4.11.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte sıcaklığa ve elektrik alana bağlı normalize edilmiş mobilitelerin karşılaştırılması. İçi dolu daireler normalize edilmiş mobilitenin sıcaklıkla değişimi ve içi boş daireler normalize edilmiş mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimidir.....	44
<b>4.12.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte elektron sıcaklığının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$ K) .....	44
<b>4.13.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybı. İçi boş daireler Eş. 4.4 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybı, içi dolu daireler Eş. 4.5 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybıdır ( $T=1,7$ K).....	45
<b>4.14.</b>	$Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$ heteroeklem örnekte elektron başına güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi. Sürekli çizgi Eş. 2.29 ile verilen kuramsal uyum eğrisidir.....	46
<b>4.15.</b>	$Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,004}As_{0,996}/GaAs$ kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K,e)200 K, f)250 K, g)300 K'deki uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri.....	47
<b>4.16.</b>	$Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,004}As_{0,996}/GaAs$ kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7$ K).....	51
<b>4.17.</b>	$Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,1}As_{0,9}/GaAs$ kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K,e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri .....	52
<b>4.18.</b>	$Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,1}As_{0,9}/GaAs$ kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7$ K).....	56

- 4.19.  $Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,15}As_{0,85}/GaAs$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K,e)200 K, f)250 K, g)300 K’de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri ..... 57
- 4.20.  $Ga_{0,7}In_{0,3}N_{0,15}As_{0,85}/GaAs$  kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7$  K)..... 61
- 4.21.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin nitrür oranına göre elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K) ..... 61
- 4.22.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının nitrür oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K) ..... 62
- 4.23.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğuna göre değişimi ( $F=5$  kV/m,  $T_L=1,7$  K,  $T_e=155$  K) ..... 64
- 4.24. GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre sürüklenme hızının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K) ..... 65
- 4.25. GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre mobilitenin elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)..... 66
- 4.26. GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)..... 67
- 4.27. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde sürüklenme hızının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K) ..... 68
- 4.28. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde mobilitenin elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)..... 69
- 4.29. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K) ..... 69
- 4.30. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde elektron başına güç kaybının In oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)..... 70
- 4.31.  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu ile değişimi ( $F=5$  kV/m,  $T_L=1,7$  K,  $T_e=23$  K) ..... 72

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<b>3.1.</b>	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ örneklerinin yapısal özellikleri .....	29
<b>4.1.</b>	$\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ heteroeklem örnek için kuramsal uyum hesaplamalarında kullanılan malzeme parametreleri [67] .....	46
<b>4.2.</b>	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$ kuantum kuyu örnekler için kuramsal uyum hesaplamalarında kullanılan malzeme parametreleri [83] .....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR

2D	İki-Boyutlu
2DEG	İki-Boyutlu Elektron Gazı
3D	Üç-Boyutlu
DC	Doğru Akım
$e$	Elektron yükü ( $=1,602 \times 10^{-19}$ C)
$e_{14}$	Piezoelektrik Sabiti
$e^*$	Born Etkin Yüğü
$E_1$	Birinci Altband Enerjisi
$E_2$	İkinci Altband Enerjisi
$E_g$	Yasak Enerji Aralığı
$E_F$	Fermi Enerjisi
$\epsilon_\infty$	Yüksek Frekans Elektriksel Geçirgenlik
$\epsilon_s$	Durgun Elektriksel Geçirgenlik
$F$	Elektrik Alan Şiddeti
$F_0$	En Düşük Elektrik Alan Şiddeti
$h$	Planck sabiti ( $=6,626 \times 10^{-34}$ J.s)
$\hbar$	$h/2\pi$
$k_B$	Boltzmann Sabiti ( $=1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
$L_z$	Kuantum Kuyu Genişliği
$L_B$	Kuantum Kuyu Engel Kalınlığı
$m^*$	Etkin Kütle
$m_0$	Serbest Elektron Kütle (= $9,109 \times 10^{-31}$ kg)
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	Metalorganic Chemical Vapour Deposition
$\mu_E$	Elektrik Alana Bağlı Elektron Mobilitesi
$\mu_T$	Sıcaklığa Bağlı Elektron Mobilitesi
PW	Puls Genişliği
$R_{yük}$	Yük Direnci

$T_e$	Elektron Sıcaklığı
$T_L$	Örgü Sıcaklığı
$T_e^c$	Kritik Elektron Sıcaklığı
$v_s$	Ses Hızı
$V_d$	Sürüklenme Hızı

## 1. GİRİŞ

III-N ve III-V-N yarıiletkenler geniş band aralığına sahip malzemelerdir ve alaşım konsantrasyonlarının değiştirilmesiyle yasak enerji band aralığı da değiştirilebilir. Bu özelliklerinden dolayı kızılötesi bölgeden ultraviyole bölgeye kadar ışık yayan aygıt olarak kullanılabilir [1]. Bu yarıiletkenler yüksek güç ve yüksek frekans uygulamaları için elverişli malzemelerdir [2,3]. InGaN alaşımları dalgaboyu enerjisi 0,7-3,4 eV aralığında değişen ışın yayıcılar olarak, AlGaN/GaN ve AlInN/GaN yapılar yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMTs) yaygın olarak kullanılmaktadır [4-7]. GaInNAs/GaAs yapılar ise 1,3-1,5  $\mu\text{m}$  aralığında çalışan telekomünikasyon aygıtlarında kullanılmaktadır [8-11].

Tasarlanan aygıtların yüksek sıcaklıklarda ve yüksek alanlarda etkin çalışabilmesi önemlidir. Bu yüzden aygıtların yüksek elektrik alanlardaki davranışlarının ve sıcak elektron iletiminin incelenmesinin teknolojik önemi vardır. İki-boyutlu (2D) yarıiletkenlerde sıcak elektron iletimi yaklaşık yarım asırdır incelenmektedir. İki-boyutlu yarıiletken aygıtların çok çeşitli uygulama alanlarının bulunması araştırmacıların bu konuya ilgi göstermelerindeki en büyük nedendir. Yarıiletken malzemelerin boyutlarının sınırlanması ve kuantum mekaniksel etkenlerin sıcak elektron iletimini nasıl etkilediği başlıca araştırma konuları arasındadır. Günümüzde çok küçük boyutlarda yarıiletken malzemelerin üretilmesiyle, küçük voltajlar uygulanarak yüksek elektrik alanlar daha kolay elde edilebilmektedir. Yüksek elektrik alanlarda sıcak elektronların enerji ve momentum durulmalarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Sıcak elektron oluşturmak için gerekli büyüklükte elektrik alan uygulandığında hacimli (üç boyutlu, 3D) yarıiletkenlerin hemen ısınması (Joule heating) nedeniyle, bu tip yarıiletkenlerde sıcak elektron deneyleri yapmak oldukça zordur [12]. İki-boyutlu yarıiletkenlerde ise, 2D elektronların iletim mobilitesi çok yüksek olduğundan, sıcak elektron oluşturmak için gerekli olan elektrik alan şiddeti çok daha küçüktür.

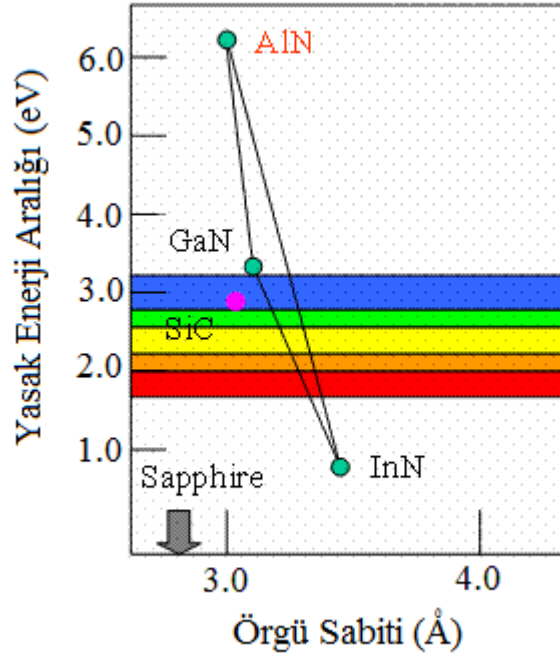
Bu tez çalışmasında  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AlN/GaN$  heteroeklem örnek,  $Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN/GaN$  heteroeklem örnek,  $Ga_{0,7}In_{0,3}N_yAs_{1-y}/GaAs$  çoklu kuantum kuyu örnekler ( $y=0,004; 0,010; 0,015$ ),  $GaN/AlN/InN$  heteroeklem örnek ve  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  ( $1 \geq x \geq 0,44$ ) örneklerinde pulslu akım-gerilim (I-V) ölçümleri kullanılarak yüksek elektrik alanda sıcak elektronların soğuma mekanizmalarının incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1. İki Boyutlu Yarıiletkenler ve İki Boyutlu (2DEG) Elektron Gazı

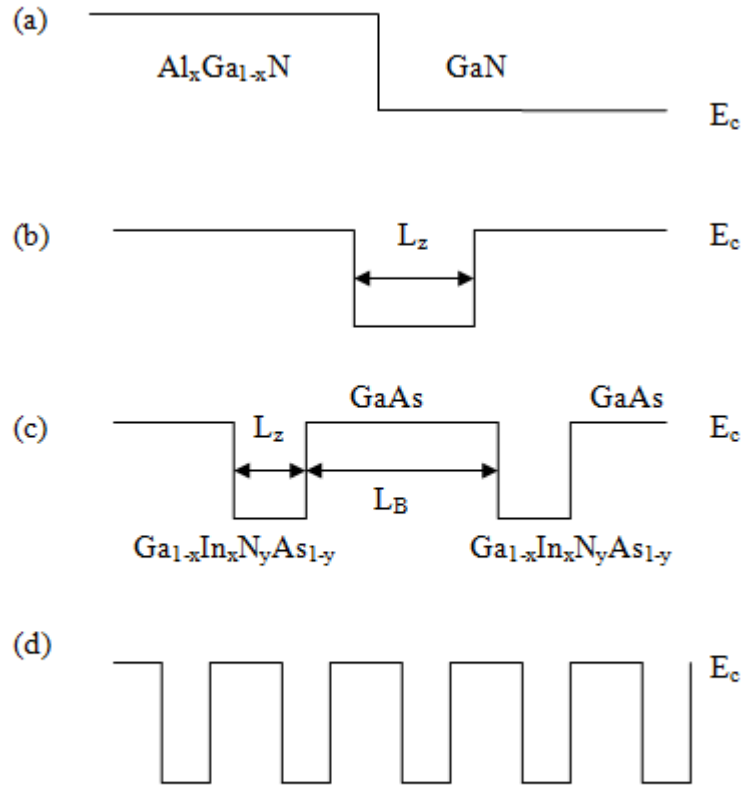
Yasak enerji aralığı farklı yarıiletken katmanların bir altta (substrate) üzerine üst üste büyütülmesiyle elde edilen yapılara heteroeklem yapılar denir. Heteroeklem yapıları üretmek için seçilen yarıiletken malzemelerin örgü sabitleri birbirlerine yakın olmalıdır. Örgü sabitleri yakın malzemelerin seçilmesi heteroeklemede oluşabilecek zorlanmayı (strain) ve dolayısıyla meydana gelebilecek deformasyonu en aza indirir. Böylece arayüzeyi düzgün heteroeklem yapılar elde edilebilir. Arayüzeyin düzgün olmaması durumunda taşıyıcıların kusurlar tarafından saçılması artar ve bu nedenle heteroeklem yapıların kullanıldığı aygıtların performansı düşer. Örgü sabitlerinin birbirine yakın malzemeleri seçebilmek için III-V ve II-VI bileşiklerinin yasak enerji aralığının örgü parametresine bağlı değişimini veren çizelge veya grafiklerden yararlanılır (Şekil 2.1). Büyütülecek tabakanın bileşik değil de alaşım olması durumunda ise konsantrasyon ayarlanarak aynı örgü parametresine ulaşılır. Bu tez çalışmasında kullanılan GaN üzerine büyütülmüş  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$  heteroeklem örnek, GaN üzerine büyütülmüş  $Al_{0,83}In_{0,17}N$  heteroeklem örnek ve GaAs üzerine büyütülmüş  $Ga_{0,7}In_{0,3}N_yAs_{1-y}$  ( $y=0,004; 0,010; 0,015$ ) örnekler buna örnek olarak verilebilir.

Heteroeklem yapılarda iki-boyutlu elektron gazı yasak enerji aralığı daha düşük olan yarıiletken tabaka içinde ve eklem arayüzeyine yakın oluşur. Büyütme sırasında elektronlar daha yüksek affiniteye sahip ve daha düşük enerji seviyeleri bulunan yarıiletkene geçiş yaparlar. Bu geçiş iki yarıiletken katmanın Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Bu sırada, katmanlı yapının enerji band diyagramında, iletkenlik ve valans bandı kenarlarında basamak şeklinde süreksizlikler oluşmaktadır. Bu basamakların yükseklikleri "iletkenlik bandı süreksizliği" (conduction band discontinuity)  $\Delta E_c$  ve "valans bandı süreksizliği" (valance band discontinuity)  $\Delta E_v$  olarak adlandırılır.  $\Delta E_c$  ve  $\Delta E_v$  nicelikleri lüminesans ölçümleriyle deneysel olarak elde edilebilmektedir [13].



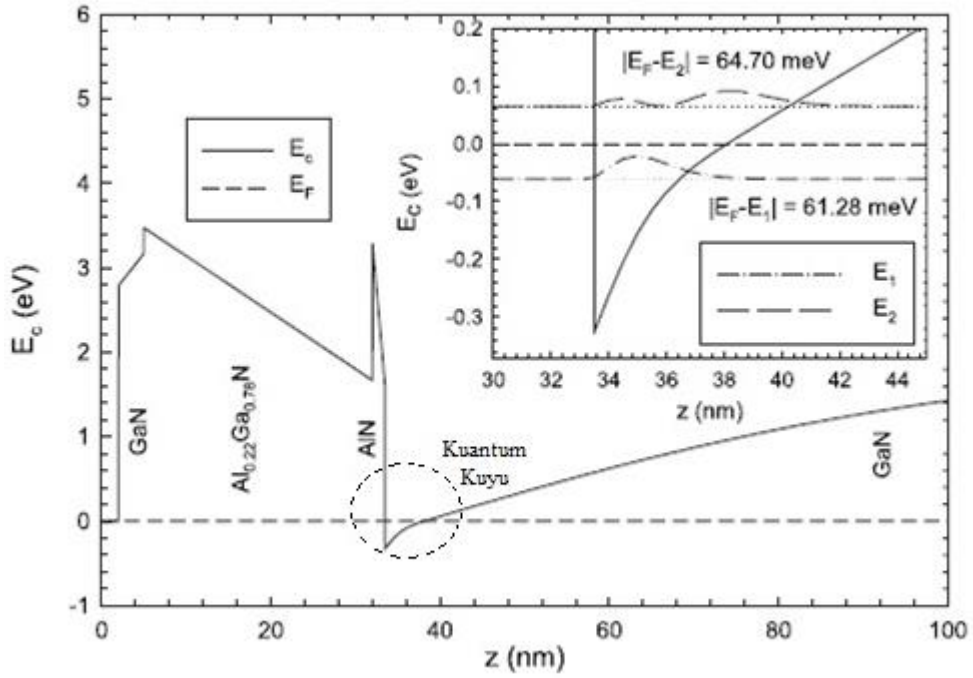
**Şekil 2.1.** Bazı III-V yarıiletken bileşiklerin yasak enerji aralığının ( $E_g$ ) örgü sabitine bağlı değişimi

İki-boyutlu yarıiletken sistemlerin şematik gösterimi Şekil 2.2'de yer almaktadır. Şekil 2.2.a'da GaN katmanı üzerine  $Al_xIn_{1-x}N$  katmanı büyütülerek elde edilen bir heteroeklem yapı gösterilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan  $AlGaN/AlN/GaN$ ,  $AlInN/AlN/GaN$ ,  $GaN/AlN/InN$  ve  $InGaN/GaN$  örnekler bu yapıdadır. Şekil 2.2.b'deki yapı ise bir kuantum kuyusudur (quantum well). Kuantum kuyu genişliği ( $L_z$ ) elektronun de Broglie dalga boyu mertebesindedir. Bu yapı periyodik olarak tekrarlandığında ise oluşan yapıya çoklu kuantum kuyu (multiple quantum well) adı verilir. Çoklu kuantum yapı Şekil 2.2.c'de yer almaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan  $Ga_xIn_{1-x}N_yAs_{1-y}/GaAs$  örnek grubu bu yapıdadır. Şekil 2.2.d'de ise çoklu kuantum yapısında engel kalınlığının ( $L_B$ ) yeterince küçük tutulması ile elde edilen süperörgü (superlattice) yapı bulunmaktadır.  $d=L_B+L_z$ , uzunluğu süperörgü periyodu olarak bilinir.



**Şekil 2.2.** Çeşitli kuantum yapılarının şematik gösterimi a) heteroeklem, b) kuantum kuyu, c) çoklu kuantum kuyu, d) süperörgü ( $E_c$  iletim bandı enerjisidir.)

İki-boyutlu yarıiletken yapılarda, modülasyonlu katkılama (modulation doping, selective doping) yöntemi kullanılarak istenilen katmana katkılama yapılabilir. Böylece iki-boyutlu elektronlar ile verici (donor) atomlar uzaysal olarak ayrılırlar. Yüklerin uzaysal olarak ayrılması kuantum kuyu ve heteroeklem yapıların enerji bandlarında bükülmelere neden olur. Bunun sonucunda oluşan kuantum kuyu üçgen biçimindedir (Şekil 2.3) [14].



Şekil 2.3. Termal dengede  $\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem yapının enerji band diyagramı ( $E_F$  Fermi enerjisi,  $E_1$  birinci altband enerjisi,  $E_2$  ikinci altband enerjisidir.) [14]

## 2.2. Düşük Alan İletimi

Yarıiletkenlerde bulunan kusurlar taşıyıcı hareketlerini etkiler. Taşıyıcılar ve kusurlar arasındaki etkileşmelere saçılma (scattering) adı verilir ve genelde kusur tipine ve sıcaklığa bağlıdır. Eğer taşıyıcıların termal hareketi ihmal edilirse, bir  $F$  dış elektrik alan altında taşıyıcı hareketi [15]

$$\frac{d(m^*V_d)}{dt} + \frac{m^*V_d}{\langle \tau_m \rangle} = eF \quad (2.1)$$

eşitliğiyle tanımlanır. Burada  $e$  temel elektrik yükü,  $t$  zaman,  $m^*$  etkin kütle,  $V_d$  sürüklenme hızı,  $F$  elektrik alan,  $m^*V_d$  taşıyıcı momentumu ve  $\langle \tau_m \rangle$  ortalama momentum durulma zamanıdır. Kararlı durumda (steady state), sürüklenme hızı  $V_d = \mu F$  ile tanımlanır. Burada  $\mu$  mobilitedir ve

$$\mu = \frac{e\langle \tau_m \rangle}{m^*} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.  $t = 0$  anında elektrik alanın sıfır olduğu düşünülürse Eş. 2.1

$$m^*V_d = (m^*V_d)_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\langle \tau_m \rangle}\right) \quad (2.3)$$

formuna dönüşür. Buradan açıkça görüldüğü gibi elektronların momentumu exponansiyel bir şekilde azalmaktadır. Eşitlik 2.3'deki  $\langle \tau_m \rangle$ , taşıyıcıların denge durumuna geri dönme zamanı değerleridir. Örgü boyunca elektronlar farklı kusurlar boyunca saçılırlar ve her saçılmanın kendine özgü bir durulma zamanı vardır. Bu durumda ortalama momentum durulma zamanı,

$$\frac{1}{\tau_m} = \sum_i \frac{1}{\tau_m^{(i)}} \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\tau_m^{(i)}$  her bir saçılmadan kaynaklanan durulma zamanıdır (Matthiessen's rule [15]).

### 2.3. Fonon Saçılması

Yarıiletken kristaldeki iletim elektronları örgüyü oluşturan atomların oluşturduğu periyodik potansiyel içinde hareket ederler. Atomların denge konumları etrafında titreşimleri (fononlar) periyodik kristal potansiyelinde değişimler meydana getirmektedir. Bu değişim elektronların saçılmasına, momentumun değişmesine ve enerji kaybı oranların da değişmelere sebep olur. Elektron-fonon etkileşmesinde fonon yayımlanması ya da soğurulması süreçlerinde enerji ve momentum korunumu sağlanmalıdır. Dalga vektörü  $\vec{k}$  olan

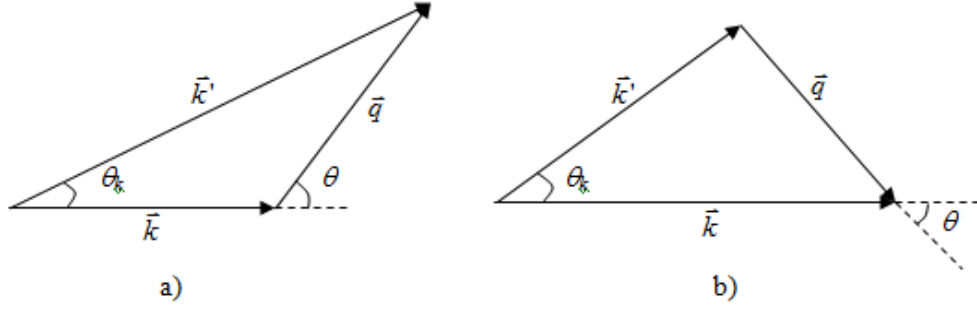
bir elektronun dalga vektörü  $\vec{q}_s$  olan bir fonon yayarak dalga vektörü  $\vec{k}'$  olan bir duruma saçılması sırasında, momentum korunumu

$$q_s^2 = k^2 + k'^2 \mp 2kk' \cos\theta \quad (2.5)$$

ve enerji korunumu

$$\frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2 k'^2}{2m^*} \mp \hbar\omega_q \quad (2.6)$$

bağıntıları ile ifade edilir [16,17]. Burada,  $\omega_q$  akustik fononun açılmal frekans,  $\theta$  ise  $\vec{k}$  ve  $\vec{k}'$  arasındaki saçılma açısıdır (Şekil 2.4.) ve (+) işareti fonon soğurulması, (-) işareti fonon yayılması anlamına gelir [18-20].



Şekil 2.4. a)Fonon soğurulması ve b) fonon yayılması süreçlerinin şematik gösterimi [19]

### 2.3.1. Akustik Fonon Saçılması

Elektronların akustik fononlardan saçılması iki farklı ve bağımsız süreç olan, akustik örgü titreşimleri sonucu oluşan deformasyon potansiyeli saçılması ve piezoelektrik saçılması ile meydana gelir. Bazı yarıiletkenlerin birim hücrelerinde, sıkı paketlenmiş (hcp) iki hegzagonal iç içe geçmiş (wurtzite) yapıda olduğu gibi, birden fazla atom bulunabilir ve bu nedenle yarıiletken kristalinde bir simetri merkezi oluşmayabilir. Bu tür yapılarda akustik fononların etkisi ile oluşan zorlanma ile iyonlar kutuplaşır. Bu kutuplaşma sonucunda kristal yapıda konuma ve zamana bağlı olarak değişen bir dipol elektrik alan oluşur. Elektronlar bu

elektrik alan etkisiyle saçılırlar. Bu saçılma piezoelektrik saçılma olarak adlandırılır [17]. Piezoelektrik saçılma potansiyelinin büyüklüğü ile zorlanma arasındaki ilişki

$$\Delta U(\vec{r}, t) = \frac{qe_{14}}{\varepsilon(0)q_s} \vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{r}, t) \quad (2.7)$$

şeklindedir [17,18,20]. Burada  $e_{14}$  piezoelektrik katsayısı ve  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  atomların denge konumlarına göre yer değiştirmesidir.

Kristalde boyuna akustik fononlar yayılırken atomlar arasındaki mesafede değişim meydana gelir. Bu değişimler örgü sabitinde ve dolayısıyla da iletim bandı ( $E_c$ ) ve valans bandı ( $E_v$ ) kenarlarında değişimlerin oluşmasına neden olur. Sonuç olarak periyodik kristal potansiyelinde de değişimler meydana gelir ve elektronlar deformasyon saçılması adı verilen saçılmaya uğrarlar. Enine akustik fonon saçılmasının katkısı ihmal edilebilecek kadar azdır [17]. Boyuna akustik titreşimler esnasında birim hücrenin genişlemesi ve sıkışması, zorlanmanın (strain) maksimum olduğu bölgede meydana gelir. Saçılma potansiyeli

$$\Delta U(\vec{r}, t) = \Xi \vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{r}, t) \quad (2.8)$$

bağıntısıyla tanımlanır [18,20]. Burada  $\Xi$  akustik deformasyon potansiyeli adı verilen saçılma potansiyeli ile zorlanma arasındaki orandır.

### 2.3.2. Optik Fonon Saçılması

Taşıyıcıların, örgü titreşimlerinin optik modları (optik fononlar) ile etkileşmesi optik fonon saçılması olarak adlandırılır. Optik fononlar elektronların, polar olmayan (non polar) ve polar optik fonon saçılması olmak üzere iki bağımsız ve farklı süreçte saçılmasına sebep olurlar. Optik fonon enerjisinin yüksek olan değerlerinden dolayı, optik fonon saçılması elastik olmayan saçılmadır. Birim hücrenin genişlemesi veya sıkışması boyunca optik fononların etkisi ile meydana gelir, enine fononların etkisi çok azdır. Optik titreşimlerin yayılması sırasında, atomlar birbirlerine göre yer değiştirirler. Burada denge konumlarına göre yer değiştirme değil de, birbirlerine göre yer değiştirme dikkate alınmalıdır. Bu bağlı yer değiştirme iletkenlik ve valans bandı kenarlarında değişimler meydana getirir. Bu değişimlerden dolayı da elektronlar saçılırlar.

Polar optik fonon saçılması birim hücrede iyonların kutuplanmasıyla oluşur. Bu kutuplanma boyunca optik titreşimler tarafından meydana getirilir. GaN ve InN gibi polar malzemelerde bu etkileşme momentum ve enerji durulma süreçlerinde çok önemli rol oynar. Polar optik fonon saçılma potansiyelinin büyüklüğü ile atomların bağlı yer değiştirmeleri arasındaki ilişki

$$\Delta U(\vec{r}, t) = \frac{qe^*}{\Omega \epsilon_\infty q_s} \delta u(\vec{r}, t) \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir [17,18,20]. Burada  $e^*$  Born etkin yüküdür,  $V$  kristal hacmi,  $N$  ise birim hücre sayısı olmak üzere  $\Omega$  ( $=V/N$ ) birim hücrenin hacmi ve

$$e^* = \Omega \omega_{LO} \epsilon_\infty \rho^{1/2} \left[ \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \right], \text{dir [21]. } \epsilon_s \text{ durgun (statik) ve } \epsilon_\infty \text{ yüksek frekans}$$

elektriksel geçirgenlik katsayıları,  $\rho$  kütle yoğunluğu ve  $\omega_{LO}$  boyunca optik fonon frekansıdır.

## 2.4. Yüksek Alan İletimi

Termal denge şartları altında, bir yarıiletkendeki elektronlar, holeler ve fononlar örgü sıcaklığına eşit olan bir sıcaklık ile karakterize edilirler. Bunu  $E$  enerjili bir durumun dolu olma olasılığını veren bir dağılım fonksiyonu olarak tanımlamak mümkündür. Elektronlar için bu dağılım fonksiyonu Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur,

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}. \quad (2.10)$$

Burada  $E_F$ , Fermi enerjisidir. Elektrik alan veya optik uyarma gibi dış bir etki altında termal denge şartları geçerliliğini koruyamayabilir. Bu şartlarda, taşıyıcılar fazladan enerji ve momentum kazanırlar. Böylece ortalama kinetik enerji, örgünün ortalama termal enerjisinden ( $k_B T$ ) çok daha büyük olur. Bu durum sıcak taşıyıcı (hot carrier) olayı ile açıklanır. Genelde, yeni enerji dağılım fonksiyonu ısısal değildir (nontermal). Taşıyıcı sıcaklığını tanımlayabilmek için bazı özel şartlar altında, taşıyıcı sıcaklığını da içeren bir enerji dağılım fonksiyonu yazmak mümkün olur [22].

Günümüzde sıcak elektron rejimi yarıiletken teknolojisi için çok önemlidir. Modern aygıtların çok küçük boyutlarda yapılabilmesi sonucu çok küçük voltaj değerleri uygulayarak çok yüksek elektrik alanlar elde edilebilir. Birçok yüksek frekans aygıtı sıcak elektron rejimi bölgesinde çalışabilmek için dizayn edilmiştir. Bu nedenle, yüksek elektrik alanda taşıyıcıların davranışlarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Yüksek elektrik alan üzerine deneysel çalışmalar, 1940'lı yılların sonlarında Shockley ve Ryder tarafından yalıtkanlarda dielektrik kırılmanın (breakdown) araştırılmasıyla başlamıştır [23]. Transistörün bulunmasıyla da ohm yasasından sapmalar ve Gunn etkisi gibi stabil olmayan davranışlar alanlarındaki çalışmalar ivme kazanmıştır [24,25].

### 2.4.1. Sıcak Elektron Kavramı

İki-boyutlu elektron gazı düzlemine (xy-düzlemi) paralel olarak elektrik alan uygulandığında, 2D elektronlar uygulanan elektrik alana zıt yönde momentum kazanırlar ve enerjileri artar. Isısal dengede, elektronların belirli bir yönde net bir momentumları yoktur. Uygulanan elektrik alan etkisiyle elektronlar net bir sürüklenme hızı (drift velocity) kazanırlar. Bu da elektrik akımı olarak gözlenebilir. Isısal dengede ve çok zayıf elektrik alan altında elektronların ortalama enerjisi  $3k_B T/2$  kadardır [26]. Uygulanan elektrik alan arttıkça, 2DEG'daki elektronların yüksek mobiliteleri sayesinde elektrik alandan kazandığı enerji de artar. Ortalama ısısal enerji  $3k_B T/2$  değerine ulaşır ve bu değeri aşar. Böylece 2DEG içinde, kristal örgüyle ısısal dengede olmayan ve enerjileri ortalama ısısal enerjiden büyük olan elektronlar meydana gelir. Bu elektronlara sıcak elektronlar (hot electrons) denmektedir. Sıcak elektronlar, örgü sıcaklığından ( $T = T_L$ ) daha yüksek olan bir elektron sıcaklığı ( $T_e$ ) ile karakterize edilirler,  $T_e > T_L$ . Sıcak elektronlar  $T_e$  sıcaklığında ısısal dengede olan bir sistem oluştururlar. Sıcak elektron gazının ısısal dengeye ulaşması elektron-elektron etkileşmesiyle olmaktadır [27-30]. Sıcak elektronlar kristal örgüye enerji aktararak soğurlar. Bundan dolayı, sıcak elektronların soğuma mekanizmalarının incelenmesiyle, elektron-fonon etkileşmesi hakkında nicel ve yararlı bilgiler elde edilebilmektedir.

Elektron sıcaklığı, sıcak elektronlar ile kristal örgü arasındaki enerji alışverişi tarafından belirlenmektedir. Yani, enerji durulmasına (energy relaxation) yol açan saçılma mekanizmaları sıcak elektron iletiminde etkin olmaktadır. Yüksek örgü sıcaklığı ( $T_L > 40$  K) ve yüksek elektrik alanlarda sıcak elektronların ortalama enerjisi optik fononların enerjisinden büyüktür. Bu durumda, sıcak elektronlar optik fononlardan elastik olmayan saçılma yaparlar ve dolayısıyla sıcak elektronlardan kristal örgüye enerji aktarılır. Böylece, sıcak elektronlar optik fonon yayarak soğurlar ve enerjileri azalır. Bu rejimde sıcak elektronların akustik fononlarla etkileşmesinin tamamen esnek olduğu varsayılır [16,31].

Yeterince düşük sıcaklıklarda ( $T_L < 30$  K) ve nispeten zayıf elektrik alanlarda, optik fonon ışıması yapabilecek sıcak elektronların sayısı ve optik fonon sayısı çok azdır [32]. Bu koşullar altında, enerji durulması sıcak elektronların akustik fononlardan esnek olmayan saçılmaları sonucunda meydana gelir. Yani, sıcak elektronlar akustik fonon ışıması yaparak soğumaktadırlar.

Sıcak elektronların soğuma mekanizmalarının incelenmesinde metal veya yalıtkan yerine, yarıiletken malzeme kullanılmaktadır. Bunun nedeni metallerde serbest elektron yoğunluğunun çok yüksek, yalıtkanlarda ise çok düşük olmasıdır. Elektron yoğunluğunun fazla olması örneğe uygulanacak elektrik alanın çok yüksek olmasını gerektirmektedir. Aynı zamanda, metallerde iletim elektronlarının ortalama enerjisi Fermi enerjisi mertebesindedir: bu değer tipik olarak 1–5 eV'tur. Fakat dejenere olmayan (non-degenerate) yarıiletkenlerde elektronun ortalama enerji  $3k_B T/2$  ile verilir ve 1–50 meV aralığındadır. Dolayısıyla elektrik alan uygulayarak elektronun ortalama enerjisini değiştirmek, yani sıcak elektron oluşturmak yarıiletkenlerde daha kolaydır.

Bu konuda ilk deneysel çalışmalar Shockley [23] tarafından yapılmıştır. 1957-1967 yılları arasındaki on yıllık dönemde Gunn [33], Schmidt and Tiedemann [34], Paige [35] ve Conwell [36] sıcak elektron iletimini inceleyen araştırmacılardan bazılarıdır. Bu araştırmacılar çalışmalarını, akıma bağlı elektrik alan ölçümleri ve negatif diferansiyel direnç (negative differential resistance) ölçümleri üzerine yoğunlaştırmışlardır. Daha sonraki yıllarda, sıcak elektron iletimi çalışmalarında optik yöntemler de kullanılmıştır.

Dejenere iki boyutlu yarıiletkenlerde sıcak elektronların akustik fonon ışıması yaparak soğuması birçok araştırmacı tarafından kuramsal olarak incelenmiştir [37-40]. Bu çalışmalarda kutuplu olmayan akustik fonon saçılması (non-polar acoustic phonon scattering, deformation potential scattering) ve kutuplu akustik fonon saçılması (polar acoustic phonon scattering, piezoelectric scattering) hesaba katılmıştır. Bu çalışmalarda elektron-elektron etkileşmesi açıkça hesaba katılmayıp, elektron dağılım fonksiyonunun Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu formunda olmasını sağlayacak şiddette elektron-elektron etkileşmesi

olduğu varsayılmıştır. Bir başka deyişle, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonundaki örgü sıcaklığı yerine elektron sıcaklığı ( $T_e$ ) yazılarak, güç kaybı (power loss, energy relaxation rate) hesaplanmıştır. Bazı basitleştirici yaklaşımlar yapılarak, sıcak elektron-akustik fonon etkileştirmesi neticesinde meydana gelen güç kaybı için çok kullanışlı analitik bağıntılar türetilmiştir [16,30,32,41].

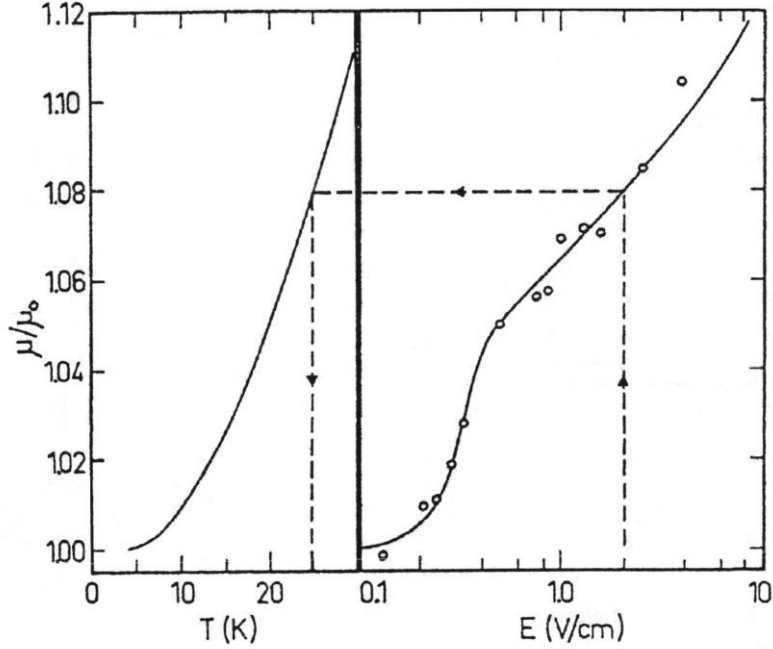
Sıcak elektron iletimini kuramsal olarak incelemek için birçok yöntem kullanılmıştır. En çok kullanılan yöntem Boltzmann transport denklemleridir. Budd [42,43] ve Kurosawa [44] yeni bir teknik olarak iteratif tekniği (iterative methods), daha sonraları Fawcett [45] ve Rees [46] Monte Carlo yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemler Fawcett [47], Nag [48] ve Jacoboni ve Reggiani [49] tarafından tekrar ele alınarak incelenmiştir. Bauer [50] ise elektron sıcaklığının ölçülmesinde çok kullanışlı bir yöntem geliştirilmiştir.

Elektron sıcaklığını ölçmek için temelde üç farklı deneysel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar Shubnikov-de Haas osilasyonları yöntemi, mobiliteelerin karşılaştırılması yöntemi ve optik yöntemlerdir. Bu tez çalışmasında elektron sıcaklığının belirlenmesinde mobiliteelerin karşılaştırılması yöntemi kullanıldı.

#### **2.4.1.1. Mobiliteelerin Karşılaştırılması Yöntemi**

Mobiliteelerin karşılaştırılması yöntemi termal dengede olmayan elektronların sıcaklıklarını elde etmek için kullanılan bir yöntemdir [51-59]. Bu yöntem dejenere olmayan veya az dejenere iki-boyutlu elektron gazı sistemlerine uygulanabilmektedir [50,60]. Mobiliteelerin karşılaştırılması yöntemi GaAs [52,53], hacimli GaN [61,62] ve iki boyutlu AlGaN HEMT yapılarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır [54,58]. Bu yöntem, hem sabit örgü sıcaklığında elektrik alana bağlı mobilite ( $\mu_E$ ) ölçümlerini hem de sabit düşük elektrik alanda örgü sıcaklığına bağlı mobilite ( $\mu_T$ ) ölçümlerini içerir. Her iki ölçümün sonuçları da düşük alan mobilitesi ve düşük sıcaklık mobilitesine göre normalize edilir. Normalize edilen sonuçlar karşılaştırılır ve elektron sıcaklığı elektrik alanın fonksiyonu olarak elde edilir.

Şekil 2.5’de normalize edilmiş örgü sıcaklığına bağlı mobilitenin ve normalize edilmiş elektrik alana bağlı mobilitenin karşılaştırılması ile elektrik alana bağlı elektron sıcaklığı elde edilmiştir [63].



Şekil 2.5. Mobilitelerin karşılaştırılması yöntemiyle elektron sıcaklığının elde edilmesi [63]

Elektron sıcaklığını uygulanan elektrik alanın fonksiyonu olarak elde etmek için:

- Örneğe elektronları ısıtmayacak kadar düşük ve sabit bir elektrik alan ( $F_0$ ) uygulanarak mobilite örgü sıcaklığının ( $T_L$ ) fonksiyonu olarak ölçülür,
- En düşük örgü sıcaklığında ( $T_{L0}$ ) mobilite elektrik alanın ( $F$ ) fonksiyonu olarak ölçülür [19].

Bauer ve Kahlert [63] tarafından 1972 yılında yapılan çalışmada momentumun elektrik alan ve örgü sıcaklığının fonksiyonu olarak değişimlerinin benzer olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu varsayıma göre;

$$\left[ \frac{\mu_{(T_L)}}{\mu_{(T_{L0})}} \right]_{F=F_0} = \left[ \frac{\mu_{(F)}}{\mu_{(F_0)}} \right]_{T_L=T_{L0}} \quad (2.11)$$

eşitliği yazılır.

Mobiliteletin karşılaştırılması yönteminin kullanılabilmesi için bazı yaklaşımlar öngörülmüştür [54,58]:

- Taşıyıcı yoğunluğu uygulanan elektrik alan ile değişmemektedir,
- Elektron-elektron saçılmaları sıcak elektronlar tarafından yapılır ve elektron sıcaklığı örgü sıcaklığından çok büyüktür,
- Momentumun elektron sıcaklığına bağlılığı, örgü sıcaklığına bağlılığı ile ilişkilendirilir. Örgü sıcaklığına bağlı mobilite ile düşük alan mobilitelerinin değişimi boyuna optik (LO) fonon bölgesindedir. LO fononların yayılımı ve soğurulması, örgü içinde termal dengedeki elektronlar ve fononlar ile,  $k$  uzayında bir düzensizliğe neden olur. Bu durumda elektronun, örgünün ve fononların sıcaklıkları eşit kabul edilir.

$$T_e = T_p = T_L$$

Bu nedenle aşağıdaki koşulların sağlanması gerekir.

- Yüksek alanlarda dengede olmayan fononlar olmalıdır.
- Sıcak fononların karakteristik sıcaklığı elektronların sıcaklığına yakın olmalıdır.
- Düşük alanlarda olduğu gibi yüksek alanlarda da sıcak fononların dağılımı  $k$  uzayında rastgele olmalıdır.

#### 2.4.2. Sıcak Elektronların Enerji Durulmaları

Yarıiletkenlerde optiksel veya elektriksel etkileşmeler dengede olmayan serbest taşıyıcı meydana getirebilirler. Elektronlar veya holeler tarafından kazanılan fazla enerji akustik ve optik fonon adı verilen örgü titreşimleriyle etkileşmesi ile harcanır. Deneysel sonuçların teorik çalışmalarda karşılaştırılmasında, iletim ölçümlerinin taşıyıcı enerji dağılım fonksiyonu hakkında direk bir bilgi vermeyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden çoğu zaman Maxwell ya da Fermi-Dirac dağılımlarında, örgü sıcaklığı  $T_L$  'den daha büyük olan elektron sıcaklığı  $T_e$  'nin tek değişken olduğu kabul edilir. Bu modele sıcak elektron modeli adı verilir. Bir yarıiletkene dışarıdan  $\vec{F}$  elektrik alanı uygulandığında, akım yoğunluğu  $\vec{J}$

$$J_i = \sum_j \sigma_{ij} F_j \quad (2.12)$$

olarak elde edilir. Burada  $\sigma_{ij}$  tensörel iletkenliktir. Ohm yasası gereğince  $\sigma_{ij}$  elektrik alandan bağımsızdır. Fakat bu durum sadece düşük alanlar için geçerlidir, orta ve yüksek elektrik alanlarda sapmalar meydana gelir. Meydana gelen bu sapmalar taşıyıcıların fazladan enerji kazandığını gösterir. Bir dış elektrik alan kristale  $\sigma F^2$  'lik bir güç aktarır. Buradan taşıyıcı başına ortalama güç

$$P = \frac{\sigma F^2}{n_{3D}} = e\mu F^2 \quad (2.13)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $n_{3D}$  üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğudur. Düşük elektrik alan değerlerinde güç  $P$ ,  $k_B T$  veya optik fononlardan kaynaklanan  $\hbar\omega_{LO}$  değerindeki güç gibi diğer karakteristik güçler ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. Fakat elektrik alan artışında enerji dağılım fonksiyonu değişir. Sıcak elektron modeli, taşıyıcıların birbirleri ile olan çarpışmaları sonucunda dış alan doğrultusunda kazandıkları momentum rastgele olduğunda uygulanabilir. Diğer bir deyişle elektron-elektron veya hole-hole saçılmaları, taşıyıcıları termal dengeye getirebilecek kadar sık meydana gelmelidir. Bu sayede taşıyıcılar Maxwell dağılım fonksiyonuna göre hareket ederler ve elektrik alanın var

olmadığı elektron sıcaklığından daha yüksek bir elektron sıcaklığı ile karakterize edilebilir. Bu yaklaşım sadece yüksek taşıyıcı yoğunluklarında geçerlidir.

Elektronlar optik yada akustik fonon yayımlayarak dururlar. Eğer elektronların fazla enerjisi boyuna optik fonon (LO-fonon) enerjisinden ( $\hbar\omega_{LO}$ ) büyük ise baskın etkileşme ve enerji kaybı mekanizması elektron-polar optik fonon saçılmasıdır [22]. Fakat elektron enerjisi  $\hbar\omega_{LO}$  'dan daha küçük ise akustik fonon saçılması baskın olur. Bu saçılma çok düşük sıcaklıklarda ve dolayısıyla da düşük elektron enerjilerinde meydana gelir.

#### 2.4.2.1. Akustik Fonon Emisyonu ile Enerji Durulması

Çok düşük sıcaklıklarda akustik fononların emisyonu baskın enerji durulma mekanizmasıdır [22]. Bu konu ile yapılan ilk çalışmalar Green [64], Kogan [37], Ridley [30], Jasiukiewicz ve Karpus [65] tarafından gerçekleştirilmiştir. GaAs ve ilişkili alaşımları [32,66] ve GaN [62] için deneysel sonuçların ve teoremin uyum gösterdiği sonuçlar elde edilmiştir. Çiftlenim parametrelerinin anizotropisi ve elastik özellikler göz ardı edildiğinde, enerji bantları parabolik modeli ve Maxwell dağılımı dikkate alınarak 3D yarıiletkenlerde fonon emisyonu ile taşıyıcı başına enerji kaybı oranı [62]

$$P = \frac{3m^{*2} C_\gamma^2 v_s k_F^{(\gamma+1)}}{4\pi\rho\hbar^2} \left( \frac{k_B T_e}{\hbar v_s k_F} \right)^{(\gamma+4)} \times \int_0^{\frac{2\hbar v_s k_F}{k_B T_e}} x^{(\gamma+3)} \left( \frac{1}{e^x - 1} - \frac{1}{e^{x(T_e/T_L)} - 1} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{s^2}{x^2}} \right)^2 dx \quad (2.14)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $C_\gamma$ ,  $\gamma = -1$  piezoelektrik çiftlenim (PE) ve  $\gamma = 1$  deformasyon potansiyeli (DP) için çiftlenim sabitidir.  $v_s$  fonon hızı,  $k_F = (3\pi^2 n_{3D})^{1/3}$  Fermi vektörü,  $k_B$  Boltzman sabiti,  $x = \hbar v_s q / (k_B T_e)$  boyutsuz parametre,  $q$  fonon dalga vektörü,  $s = \hbar v_s \lambda / (k_B T_e)$  perdeleme parametresidir.  $\lambda$  ise perdeleme uzunluğunun tersidir ve

$$\lambda = \frac{e}{\pi\hbar} \sqrt{\frac{m^* k_F}{2\varepsilon_s}} \quad (2.15)$$

olarak tanımlanır.

GaN ve InN gibi wurtzite yapılarında PE çiftlenim sabiti boyuna akustik fononlar (LA) ve enine akustik fononlar (TA) için piezoelektrik parametreler olan  $e_{15}$ ,  $e_{31}$  ve  $e_{33}$  'ün fonksiyonu olarak verilirler [62].

$$C_{-1}^2 = \left(\frac{e}{\varepsilon_s}\right)^2 \frac{1}{6} \left[ \frac{4}{3} \left( e_{31} + \frac{3}{4} e_{33} + 2e_{15} \right)^2 + \frac{7}{4} e_{33}^2 \right] \text{ (LA fononlar için)} \quad (2.16)$$

$$C_{-1}^2 = \left(\frac{e}{\varepsilon_s}\right)^2 \frac{1}{8} \left[ \left( e_{31} - e_{33} - \frac{1}{3} e_{15} \right)^2 + \frac{56}{9} e_{15}^2 \right] \text{ (TA fononlar için)} \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.14' deki integralin nümerik çözümü yapıldığında ifadenin basitleştirilmiş formu [66-68]

$$P = A(T_e^\alpha - T_L^\alpha) \quad (2.18)$$

kullanılabilir. Burada  $A$  çiftlenim sabitlerine ve 2D taşıyıcı yoğunluğuna bağlı bir sabittir. Üst ifadesi  $\alpha$  ise deneylerin hangi sıcaklıkta yapıldığını ve baskın olan saçılma mekanizmalarını tayin eden bir gösterge olarak kullanılmaktadır [69-74]. Bu yaklaşım perdeleme ihmal edildiğinde ve taşıyıcı yoğunluğu çok yüksek olmadığında kabul edilebilir [22].

$T_e > 2\hbar v_s k_F / k_B$  (eş dağılım bölgesi), yani yüksek elektron sıcaklıkları için taşıyıcı başına enerji kaybı

$$P = \frac{3e^2 C_{-1}^2 m^{*2} v_s^2 n_{3D}}{2\pi\varepsilon_s \hbar^3 k_F} [(k_B T_e) - (k_B T_L)] \text{ (piezoelektrik)} \quad (2.19)$$

$$P = \frac{3C_{+1}^2 m^{*2} k_F n_{3D}}{\pi\rho\hbar^3} [(k_B T_e) - (k_B T_L)] \text{ (deformasyon potansiyeli)} \quad (2.20)$$

ifadeleri şeklinde verilir [32].

$T_e \ll \hbar v_s k_F / k_B$ , Bloch-Gruneisen rejimi olarak adlandırılan çok düşük sıcaklıklarda taşıyıcı başına enerji kaybı

$$P = \frac{e^2 C_{-1}^2 m^{*2}}{2\pi^3 \hbar^5 \varepsilon_s} \left[ (k_B T_e)^3 - (k_B T_L)^3 \right] \text{ (piezoelektrik)} \quad (2.21)$$

$$P = \frac{6C_{+1}^2 m^{*2}}{\pi^3 \rho \hbar^7 v_s^4} \left[ (k_B T_e)^5 - (k_B T_L)^5 \right] \text{ (deformasyon potansiyeli)} \quad (2.22)$$

ifadeleri ile verilir [30].

Ara sıcaklık bölgesinde ise,  $\hbar v_s k_F / k_B < T_e < 2\hbar v_s k_F / k_B$ , üst ifadesi  $\alpha$  perdelenmemiş PE çiftlenimi için 1'den 3'e ve perdelenmemiş DP çiftlenimi durumu için 1'den 5'e değişir.

#### 2.4.2.2. Optik Fonon Emisyonu ile Enerji Durulması

Yüksek elektron sıcaklıklarında ( $T_e \gg T_e^c$ ), optik fonon saçılması baskın olan enerji durulma mekanizmasıdır. Burada  $T_e^c$  kritik elektron sıcaklığı olarak adlandırılır ve

$$T_e^c = \frac{\left[ 8m^* v_s^2 (E_F - E_1) \right]^{1/2}}{k_B} \quad (2.23)$$

ile verilir [19,67,68]. Yüksek sıcaklık bölgesinde fonon dağılımı için Maxwell dağılımı geçerlidir

$$n(\omega_{LO}) = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_{LO}/k_B T_L) - 1} \approx \frac{k_B T}{\hbar\omega_{LO}} \quad [19]. \quad (2.24)$$

Optik fonon emisyonu, optik fonon enerjisinin oldukça yüksek değerlerde (GaN için 92meV [75]) olmasından dolayı yüksek derecede elastik olmayan bir emisyonudur.

Optik fonon emisyonuyla enerji durulmasını ilk olarak çalışan Conwell [36] bu modeli oluşturabilmek için bazı varsayımlar yapmıştır:

- Enerji bantları parabolik olmalıdır.
- Elektron-elektron saçılması, sıcak elektronları ısısal dengeye getirebilecek kadar etkili olmalıdır.
- Taşıyıcı yoğunluğu Maxwell dağılımını oluşturmak için yeteri kadar yüksek, fakat perdelemeyi ihmal edebilecek kadar da düşük olmalıdır.
- Pauli dışarlama prensibi göz önünde bulundurularak dejenere olmama koşulu ihmal edilebilmelidir (tüm durumların dolu olma olasılığı  $\ll 1$ 'dir).
- Dalga vektöründe fonon dağılımı bağımsız olmalıdır.

Bu varsayımlar altında optik fonon emisyonu ile taşıyıcı başına enerji kaybı

$$P = \frac{\hbar\omega_{LO}}{\tau_0} \left[ \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T_e}\right) - \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T_L}\right) \right] \quad (2.25)$$

ifadesi ile verilir [54-58]. Burada  $\tau_0 = (2\alpha\omega_{LO})^{-1}$  elektron-LO fonon saçılma zamanı ve  $\alpha$  Fröhlich çiftlenim sabitidir,

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar} \sqrt{\frac{m^*}{2\hbar\omega_{LO}}} \left( \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \right). \quad (2.26)$$

#### 2.4.2.3. Sıcak Fonon Etkileri

Dışarıdan uygulanan optik uyarma ya da elektrik alan ortamda yeteri kadar sıcak elektron oluşturabilecek şiddette olduğunda, taşıyıcıların enerji durulmalarının bir sonucu olarak yüksek sayıda fonon oluşur. LO fononlar küçük bir dağılım fonksiyonu ve dolayısıyla da küçük bir grup hızı [76] ile karakterize edilirler. Bu grup hızı, dengede olmayan büyük bir fonon popülasyonu oluşmasına yol açar. Bunlara sıcak fononlar (hot phonons) denir. Fonon üretim oranının fonon

bozulma oranından daha büyük olmasından dolayı, fonon popülasyonu oluşumu daha da güçlü hale gelir. Sıcak fonon etkisi ilk olarak Conwell [36] tarafından Ge yüksek alan iletimi açıklanırken önerilmiştir ve günümüzde enerji durulmasını etkileyen önemli bir mekanizma olarak kabul edilmiştir. Aslında, dengede olmayan fonon popülasyonundaki artış, sıcak taşıyıcılar tarafından bazı fononların tekrar yakalanabilme olasılığını artırır. Bu da enerji durulma oranında yavaşlatıcı bir etki olarak gözlenir [22].

Hareketsiz (non-drifting) sıcak fononların etkisini hesaba katmak için Ridley [77] tarafından hacimli ve 2D GaAs için bir model geliştirilmiştir. Bu model GaN ve InN gibi III-V yarıiletkenler için de kolayca genelleştirilebilir. Modele göre taşıyıcı başına güç kaybı [54-56]

$$P = \frac{\hbar\omega_{LO}}{\tau_{eff}} \left[ \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T_e}\right) - \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T_L}\right) \right] \quad (2.27)$$

olarak verilmiştir. Bu eşitlik ile Eşitlik 2.25 çok benzerdir. Aralarındaki tek fark  $\tau_0$  yerine  $\tau_{eff}$  yazılmıştır.  $\tau_{eff}$  etkin (effective) durulma zamanı olarak adlandırılır ve sıcak fonon etkilerini içerir [54-56]

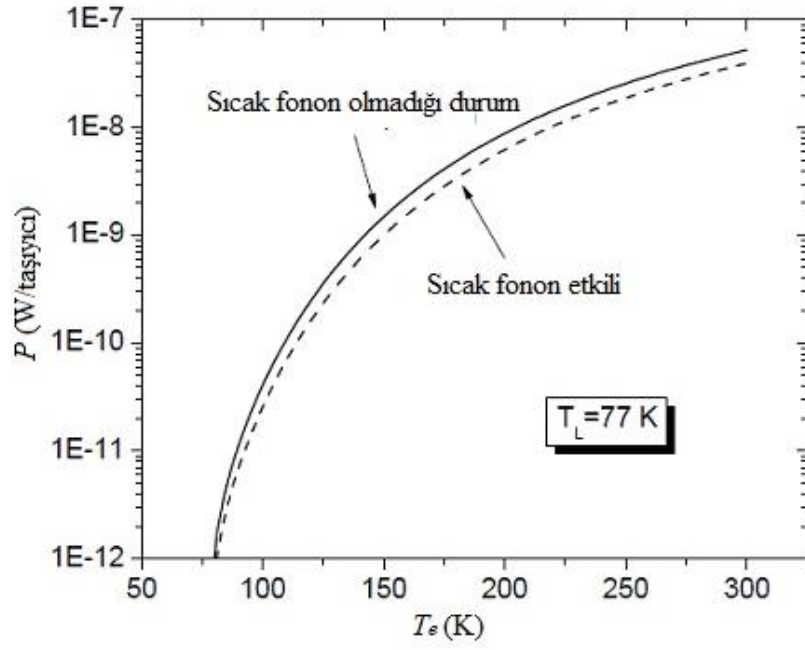
$$\tau_{eff} = \tau_o + \tau_p \left( \frac{n_{3D} k_B T_e}{2N_c \hbar\omega_{LO}} \right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T_e}\right) \right], \quad (2.28)$$

burada  $\tau_p$  fonon ömrü ve  $N_c$  etkin durum yoğunluğudur.

3D dejenere olmayan sistemler için etkin durum yoğunluğu

$$N_c = 2 \left( \frac{m^*}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (k_B T_e)^{3/2} \quad (2.29)$$

eşitliği ile verilir. Sıcak fonon etkisi olduğu ve olmadığı durumlarda taşıyıcı başına güç kaybı karşılaştırılması Şekil 2.6.'da görülmektedir [22]. Sıcak fononların bulunması durumunda güç kaybı, sıcak taşıyıcılar tarafından tekrar soğrulan (reabsorbed) fononların artmasından dolayı azalmıştır. Bu etkinin şiddeti taşıyıcı yoğunluğu ve fonon yaşam süresi ile orantılıdır.



**Şekil 2.6.** Sıcak fonon etkisi olduğu ve olmadığı durumlarda taşıyıcı başına güç kaybı karşılaştırılması [22]. Sürekli çizgi sıcak fonon etkisi olmadığı durumda elde edilen taşıyıcı başına düşen güç, kesikli çizgi ise sıcak fonon etkisinin olduğu durumdaki taşıyıcı başına güçtür.

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, pulslu akım-gerilim ölçümleri, deney düzeneği ve örneklerin tabaka yapısı, büyütme koşulları, geometrik boyutları hakkında bilgi verilecektir. Bu tez çalışmasında farklı geometrilere, farklı yapılarda ve boyutlarda örnekler kullanıldı.

#### 3.1. Örnekler

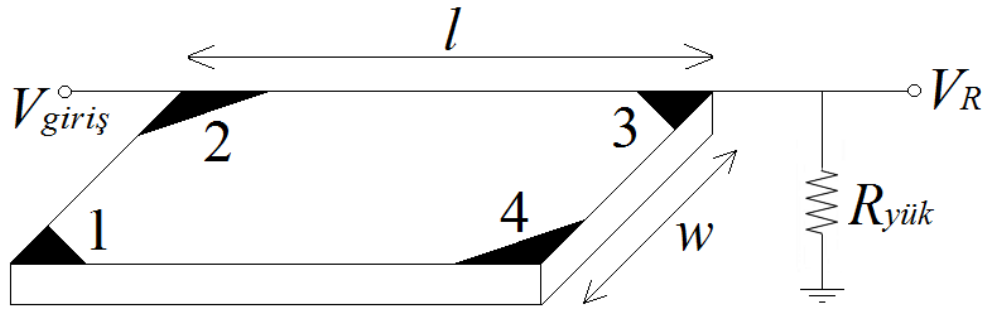
##### 3.1.1. AlGaN/AlN/GaN Örnek

AlGaN/AlN/GaN heteroeklem yapısı *metalorganic chemical vapor deposition* (MOCVD) tekniğiyle Bilkent Üniversitesi'nde büyütülmüştür. Örnek safir ( $Al_2O_3$ ) alttaş (substrate) üzerine sırasıyla; 320 nm kalınlığında bir AlN düzleştirici tabaka (buffer layer), 1,7  $\mu m$  kalınlığında katkısız bir GaN tabaka, 1 nm kalınlığında bir AlN ayırıcı (spacer) tabaka, 20 nm kalınlığında olan bir  $Al_xGa_{1-x}N$  ( $x=0,25$ ) tabaka ve 3 nm kalınlığında GaN kapak (cap) büyütülerek hazırlanmıştır.  $Al_xGa_{1-x}N$  tabakası  $10^{18} cm^{-3}$  oranında Si ile katkılanmıştır. Örneğin tabaka yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

GaN	3nm	Kapak
$Al_xGa_{1-x}N$	20nm	Si Katkılı
AlN	1nm	Ayırıcı
GaN	1700nm	Katkısız
AlN	320nm	Düzleştirici
Safir		Alttaş

Şekil 3.1. AlGaN/AlN/GaN örneğin tabaka yapısı

Bu tez çalışmasında incelenen AlGaN/AlN/GaN örnek Van der Pauw geometrisindedir. Boyu  $l = 5$  mm ve genişliği  $w = 5$  mm'dir (Şekil 3.2). Burada 1, 2, 3 ve 4 örneğin kontak noktalarıdır. Kontaklar Ti/Al/Ni/Au (200/2000/300/700 Å) alaşımı buharlaştırılarak yapılmıştır. 2 ve 3 nolu kontaklar arasında potansiyel farkı uygulandı. Yük direnci üzerindeki gerilim  $V_R$  noktasından ölçüldü.



Şekil 3.2. Van der Pauw geometrisi. Şekilde  $V_{giriş}$  devreye uygulanan voltaj,  $R_{yük}$  yük direnci ve  $V_R$  yük direnci üzerine düşen voltajdır.

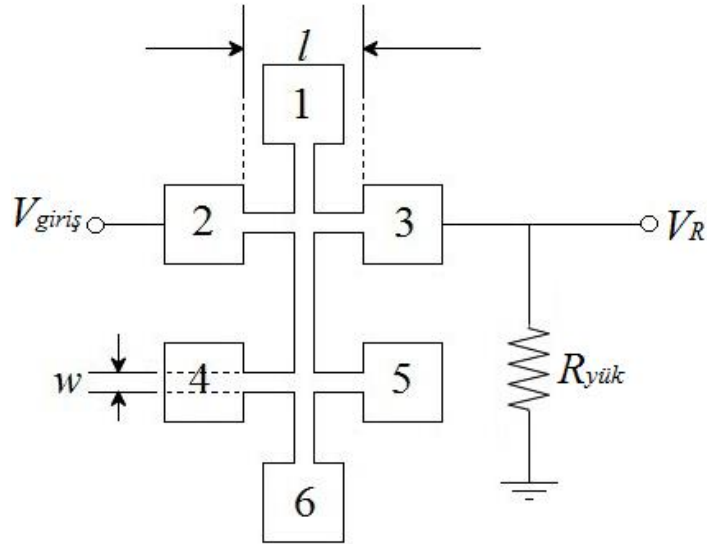
### 3.1.2. AlInN/AlN/GaN Örnek

Bu tez çalışmasında incelenen AlInN/AlN/GaN çift kanallı heteroyapı örnek safir alttaş üzerine, MOCVD tekniğiyle Bilkent Üniversitesi'nde büyütülmüştür. Yüzey safsızlıklarından kurtulmak için epitaksiyel büyüme öncesinde safir alttaş  $1100^{\circ}C$ 'de 10 dakika tavlannmıştır. Düzleştirici tabaka, düşük sıcaklıkta büyütülmüş ( $770^{\circ}C$ ) 15 nm kalınlığında AlN tabakası ve yüksek sıcaklıkta ( $1075^{\circ}C$ ) büyütülmüş 1,5 nm kalınlığındaki AlN ayırıcı tabakadan oluşmuştur. AlN ayırıcı tabakasının üzerine  $1075^{\circ}C$ 'de 3 nm kalınlığında katkısız GaN tabakası, ardından 1 nm AlN ayırıcı tabaka,  $830^{\circ}C$ 'de 13 nm kalınlığında  $Al_xIn_{1-x}N$  ( $x=0,83$ ) bariyer tabakası ve en sonunda  $830^{\circ}C$ 'de 2 nm kalınlığında GaN kapak büyütülmüştür. Büyütme sırasında katkılama yoğunluğu, alaşım oranı ve tabaka kalınlıkları gibi örnek parametrelerini kullanırken özel büyüme koşulları ve malzemeler için hazırlanmış çizelgelerden yararlanılmıştır. Örneğin tabaka yapısı Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

GaN	2nm	Kapak
$Al_xIn_{1-x}N$	13nm	Katkısız
AlN	1nm	Ayrıcı
GaN	3nm	Katkısız
AlN	16,5nm	Düzleştirici
Safir		Alttaş

Şekil 3.3. AlInN/AlN/GaN örneğin tabaka yapısı

AlInN/AlN/GaN çift kanallı heteroyapıdaki örnek Hall çubuğu (bar) geometrisinde olup boyu  $l=0,6$  mm ve genişliği  $w=0,2$  mm'dir (Şekil 3.4). Örneğe yüksek pulslu voltajlar 2 nolu kontakten uygulandı. Yük direnci üzerine düşen  $V_R$  voltajı 3 nolu kontakten ölçüldü. Uygulanan voltaj ile  $V_R$  voltajı arasındaki farktan örnek voltajı elde edildi.



Şekil 3.4. Hall-çubuğu geometrisi. Üzerine düşen voltaj sayesinde örneğe uygulanan voltajı elde etmemizi sağlayan, örneğe seri bağlı direnç  $R_{yük}$ 'tür.

### 3.1.3. GaInNAs/GaAs Örnekler

$Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örnekler *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) tekniği ile *GaAs* yarı-yalıtkan alttaş üzerine hızlı yada yavaş herhangi bir tavlama olmadan büyütülmüştür.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerde, In yoğunluğu  $x=0,3$  ve azotun mol kesri  $y=0,004$ ,  $y=0,010$  ve  $y=0,015$  oranlarında değişmektedir. 50 nm genişlikte *GaAs* bariyer ile ayrılmış 7 nm genişlikte üç adet *GaInNAs* kuantum kuyu bulunmaktadır. Bariyerlerin 40 nm'lik merkezi pozisyonları Si ile  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  oranında katkılanmıştır. Bariyerlerin her iki yanına da 5 nm'lik katkılanmamış ara katmanlar yerleştirilmiştir. Akım ve gerilim kontakları Au/Ge/In alaşımı buharlaştırılarak yapılmıştır. Örneğin tabaka yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

GaAs (Kapak)	50nm	Si(n-tipi)/Be(p-tipi)
GaAs (Bariyer)	20nm	Si(n-tipi)/Be(p-tipi)
GaAs (Ayrıcı)	5nm	Katkısız
GaInNAs	7nm	Katkısız
GaAs (Ayrıcı)	5nm	Katkısız
GaAs (Bariyer)	20nm	Si(n-tipi)/Be(p-tipi)
GaAs(Düzleştirici)	50nm	Katkısız
Yarı yalıtkan GaAs (Alttaş)		

x3

Şekil 3.5. GaInNAs/GaAs örneklerin tabaka yapısı

$Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örnekler Hall çubuğu geometrisinde fotolityografi tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Örneklerin boyu  $l=0,75$  mm ve genişliği  $w=0,1$  mm'dir.

### 3.1.4. GaN/AlN/InN Örnek

InN tabaka kalınlığı 0,4  $\mu\text{m}$  olan GaN/AlN/InN heteroeklem örnek Crete Üniversitesi (Yunanistan) tarafından MBE tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Örnek, safir alttaş üzerinde, 50 nm kalınlığında AlN ve ardından 100 nm kalınlığında GaN düzleştirici tabakalar üzerine 400 nm InN tabakası ve ardından 100 nm GaN kapak tabakası büyütülerek oluşturulmuştur. Örnek Hall çubuğu geometrisinde hazırlanmıştır ve boyu  $l=0,75$  mm ve genişliği  $w=0,1$  mm'dir. Örneğin tabaka yapısı Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

GaN	100nm	Kapak
InN	400nm	
GaN	100nm	Düzleştirici
AlN	50nm	Düzleştirici
Safir		Alttaş

Şekil 3.6. GaN/AlN/InN örneğin tabaka yapısı

### 3.1.5. InGaN/GaN Örnekler

Bu tez çalışmasında incelenen InGaN/GaN örnekler Cornell Üniversitesi (Amerika Birleşik Devletleri) tarafından MBE tekniği kullanılarak büyütülmüşlerdir. Örnekler safir alttaş üzerinde, 200 nm kalınlığında AlN düzleştirici tabaka ve ardından 240-300 nm kalınlığında  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  tabakası büyütülerek oluşturulmuştur. Akım ve gerilim kontakları Au/Ge/In alaşımı buharlaştırılarak yapılmıştır. Örnekler Hall çubuğu geometrisinde hazırlanmışlardır. Örneklerin boyları  $l=0,75$  mm ve genişlikleri  $w=0,1$  mm'dir.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerin katkılama miktarları, kodları ve indiyum yoğunlukları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Örneğin tabaka yapısı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

InGaN	240-300nm	
AlN	200nm	Düzleştirici
Safir		Altaş

Şekil 3.7. InGaN/GaN örneklerin tabaka yapısı

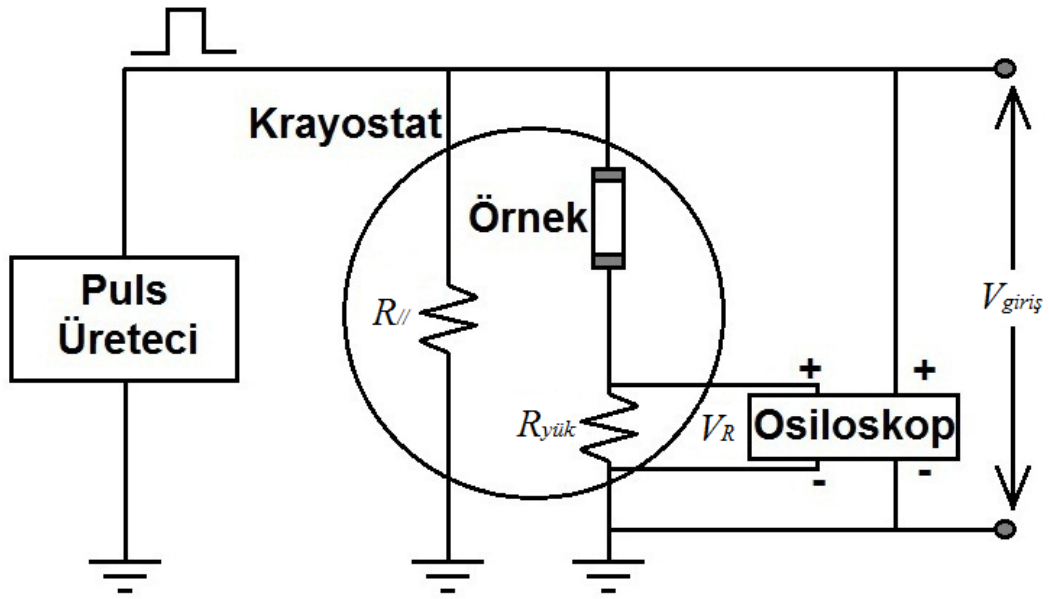
Bu örnekler kullanılarak yapılan ölçümler karanlık ortamda 1,7 K örgü sıcaklığında yapıldı.

Çizelge 3.1.  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerinin yapısal özellikleri

Örnek Kodları	İndiyum Yoğunluğu ( $x$ )	Katkılama
GS1382	0,981	Katkısız
GS1364	0,938	Katkısız
GS1506	0,784	Katkısız
GS1931	0,66	Katkısız
GS1799	0,52	Katkısız
GS1784	0,44	Katkısız
GS1548	0,1	Mg-katkılı

### 3.2. Pulsu I-V Ölçümleri

Akım-gerilim ölçümleriyle sabit sıcaklıkta taşıyıcıların sürüklenme hızı ve mobilitesi uygulanan elektrik alanın fonksiyonu olarak elde edilebilir. Doğru akım (DC) kullanılarak yapılan I-V ölçümlerinde uygulanan elektrik alana bağlı olarak örnek ısınır ve yanmasına sebep olabilir. Isınmaya ve yanmaya sebep olan etkiye Joule ısınması (heating) adı verilir. Joule ısınmasına göre, direnci  $R$  olan bir iletken üzerinden  $t$  sürede geçen sabit  $I$  akımı tarafından meydana getirilen ısı  $Q=I^2Rt$  olarak verilir. Bundan dolayı bu teknik ile yüksek elektrik alanlar uygulanamaz. Örneği yakmadan yüksek elektrik alanlar uygulayabilmek için pulslu I-V ölçümleri kullanılır. Bu teknik ile örnek üzerine dar bir zaman aralığında voltaj uygulanır, ardından örneğin soğuması için zaman verilir. Böylelikle örneğe yüksek elektrik alan uygulanabilir. Pulsu I-V ölçümlerinde Şekil 3.8’te gösterilen devre şeması kullanıldı.



**Şekil 3.8.** Pulsu I-V ölçümleri için deneysel kurulum şeması. Burada  $V_{giriş}$  devreye uygulanan voltaj,  $R_{yük}$  yük direnci,  $V_R$  yük direnci üzerine düşen voltajdır.  $R_{//}$  paralel direnci ise puls üretici, kablolar ve devre arasında empedansı sağlamak ve termal gürültüyü azalmak için eklenmiştir.

Puls üretici ile belirlenmiş yüksek gerilim ile yüksek elektrik alanlar elde edildi. Osiloskop girişlerinin üretilen yüksek voltajlardan zarar görmemesi için sinyal sönümlenme elemanları (attenuator) kullanıldı. Yapılan deneylerde uygulanan en yüksek puls voltajı 200 V'tur. Puls genişliği (PW)  $60\text{ns} \leq \text{PW} \leq 200\text{ns}$  olan pulslar ve üreteç ile örnek arasında uzun kablolar kullanıldığında, malzemelerin dirençlerinden kaynaklanan termal gürültü (Johnson noise) adı verilen sinyal parazitlenmesini önlemek için devreye bir paralel direnç ( $R_{//}=50 \text{ ohm}$ ) bağlandı [78]. Aynı zamanda bu direnç sayesinde puls üretici, iletim kabloları ve devre girişi arasında empedans eşleşmesini de sağlandı. Puls giriş voltajı ( $V_{giriş}$ ) ile yük direnci ( $R_{yük}=50 \text{ ohm}$ ) üzerine düşen voltajın ( $V_R$ ) farkından örnek üzerine düşen voltaj ( $V_{örnek}$ ),

$$V_{örnek} = V_{giriş} - V_R \quad (3.1)$$

elde edildi. Yük direnci üzerine düşen  $V_R$  voltajının osiloskop giriş direnci ( $R_{os}$ ) ve yük direncinin eşdeğer direncine ( $R_{eş}$ ),

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_{yük}} + \frac{1}{R_{os}} \quad (3.2)$$

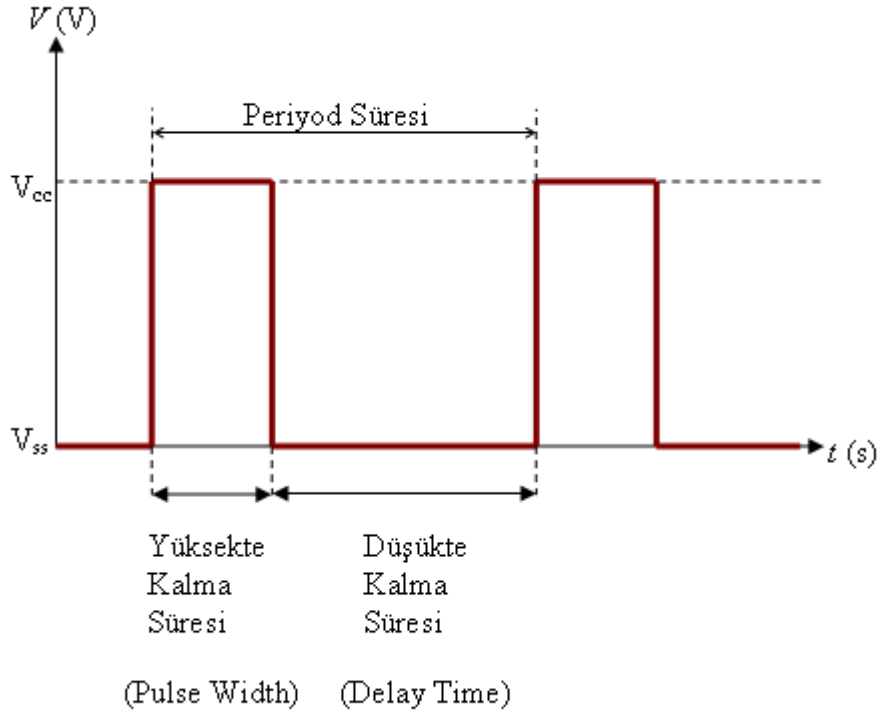
bölünmesiyle örnek üzerinden geçen akım ( $I_{örnek}$ ),

$$I_{örnek} = \frac{V_R}{R_{eş}} \quad (3.3)$$

elde edildi. Osiloskop yük direncine paralel olarak bağlanmıştır.

Termal dengedeki bir yarıiletkenle yüksek elektrik alan uygulandığında Joule ısınması etkisi ile örgü sıcaklığının arttığı görülür. Örgü sıcaklığının artması ile taşıyıcı yoğunluğu değişebilir. Bu istenmeyen bir durumdur. Çünkü hesaplamalarda taşıyıcı yoğunluğunun sabit olduğu, sıcaklık ile değişmediği yaklaşımı yapılmıştır [54-58]. Bu istenmeyen örgü ısınmasını en aza indirmek için çok düşük iş döngüsü (duty cycle) ile kısa elektrik sinyalleri uygulanmalıdır.

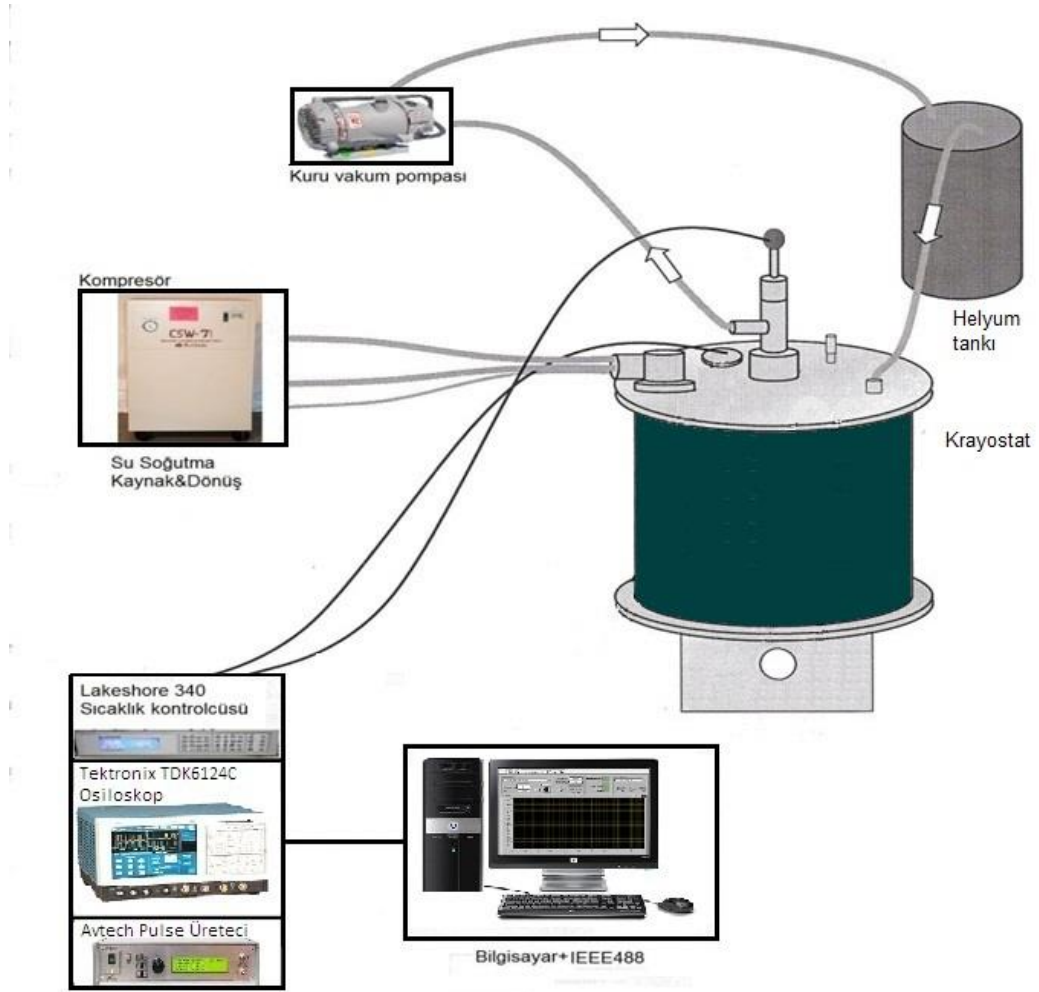
İş dögüsü kare dalgaın yüksekte kalma süresinin periyoda bölümüyle elde edilir. Kare dalga iş dögüsü şeması Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Uygulanan pulsların iş dögüsü değeri ne kadar küçük olursa voltajın yüksekte kalma süresi o kadar az olur. Böylece örneğe soğuması için verilen süre arttırılmış olur ve örneğin ısınmaması sağlanır ya da bu ısınma en aza indirilmiş olur. İş dögüsü değeri keyfi birimdedir. Ölçümlerimizde uyguladığımız pulsların iş dögüsü değeri  $10^{-4}$  br'den daha düşüktür.



Şekil 3.9. Kare dalga iş dögüsü şeması. Dalgaın tepe noktasındaki değeri  $V_{cc}$ , çukurdaki değeri ise  $V_{ss}$ 'dir.

### 3.3. Deney Düzenegi ve Özellikleri

Deneyel düzenegin blok diyagrami Şekil 3.10’da verilmiştir. Ölçümler standart puls tekniği ile maksimum 200 V ve 2-200 ns puls genişliğine sahip Avtech-AVIR-4-B pulsli voltaj üreteci, çift kanallı Lakeshore 340 sıcaklık ölçer ve kontrolcüsü, 12GHz band genişliğine sahip Tektronix TDS6124C osiloskop ve sıvı helyum gerektirmeyen kapalı sistem krayostat kullanılarak yapıldı.

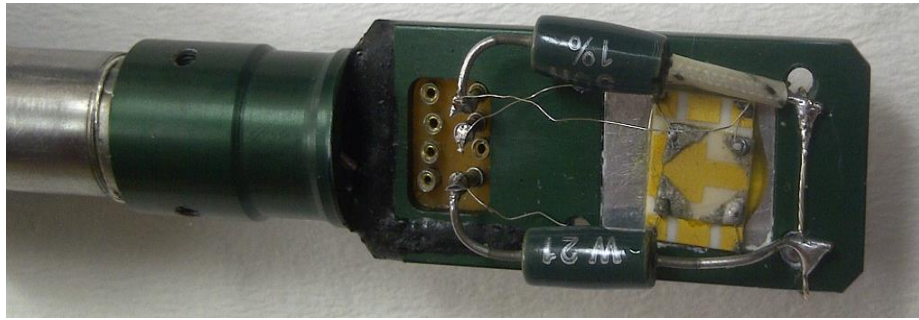


Şekil 3.10. Deney düzeneginin blok diyagramı

Krayostatın su soğutmalı helyum kompresörü sistemin iç sıcaklığını yaklaşık 3,5 K’e kadar düşürmektedir. Örnek tutucunun bulunduğu bölmeyi daha düşük sıcaklıklara indirebilmek için ayrıca bir helyum tankı bulunmaktadır. Kuru vakum pompası yardımıyla bu tanktaki helyum gazı örneğin bulunduğu bölmeye taşınır. İğne uçlu vana ile gaz geçişi kontrol edilir ve sıcaklığın 1,8 K değerine

düşmesi sağlanır. Oda sıcaklığından en düşük sıcaklığa iniş süresi 2 saattir. Bu sıcaklık 325 K'e kadar  $\pm 0,1$  K adımlarla kontrol edilebilir. Sıcaklığı kontrol etmek için Lakeshore 340 sıcaklık ölçer ve kontrolcüsü kullanıldı. Sıcaklık kontrolcüsü örnek tutucu üzerindeki iki ısıtıcıyı kontrol eder. Örnek üzerine uygulanacak pulslu voltajlar pulslu voltaj üretici ile ayarlandı. Elektriksel puls voltajları örneklerin büyütme eksenine dik olarak uygulandı. Uygulanan pulslu voltajları ve yük direnci üzerine düşen voltajları ölçmek için dört kanallı gerçek zamanlı osiloskop kullanıldı. Puls üretici ve osiloskop eş zamanlı (senkronize) çalışacak şekilde ayarlandı. IEEE 488 kartıyla beraber kişisel bilgisayar, veri toplama işlemi ve aygıtların kontrolü için kullanıldı. Veri toplamak için Labview programlama dilinde hazırladığımız programdan yararlandı. Bu program ile örneğe uygulanacak pulslu voltajın başlangıç değeri, bitiş değeri, artış miktarı, frekansı ve puls genişliği parametreleri girilir ve voltajın bir fonksiyonu olarak ölçülen akım değerleri anında grafik olarak elde edilir. Hazırladığımız veri toplama programı ile deneysel verilerin uygun şekilde dosyalanması da sağlanır.

Şekil 3.11'de bir örnek ve örnek tutucu yer almaktadır. Örnek tutucu üzerinde örneğin koyulduğu alan  $24,5 \times 24,5$  mm<sup>2</sup>'dir. Ölçümlerde yüksek frekanslı koaksiyel kablolar kullanıldı. Bu kablolar sayesinde termal gürültü ve sinyal zayıflaması en aza indirildi. Tüm ölçümler karanlık ortamda gerçekleştirildi.



Şekil 3.11. Örnek ve örnek tutucu

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yüksek elektrik alanda sıcak elektronların enerji durulmalarını incelemek için pulslu I-V ölçümleri kullanıldı. Ölçümlerden elde edilen verilerden elektrik alan, sürüklenme hızı  $v_d$ , elektrik alana bağlı mobilite  $\mu(F)$  ve güç ( $P$ ) ifadeleri hesaplandı.  $V$  uygulanan voltaj ve  $l$  örneğin boyu olmak üzere elektrik alan,

$$F = \frac{V}{l} \quad (4.1)$$

ifadesi kullanılarak hesaplandı. Sürüklenme hızı,

$$V_d = \frac{I}{en_{2D}w} \quad (4.2)$$

ile elde edildi. Burada  $I$  örnek akımı,  $n_{2D}$  iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğu ve  $w$  örneğin genişliğidir. Elektrik alana bağlı mobilitiyi elde etmek için

$$\mu(F) = \frac{V_d}{F} \quad (4.3)$$

ifadesi kullanıldı. Taşıyıcı başına ortalama güç ise

$$P_I = e\mu F^2 \quad (4.4)$$

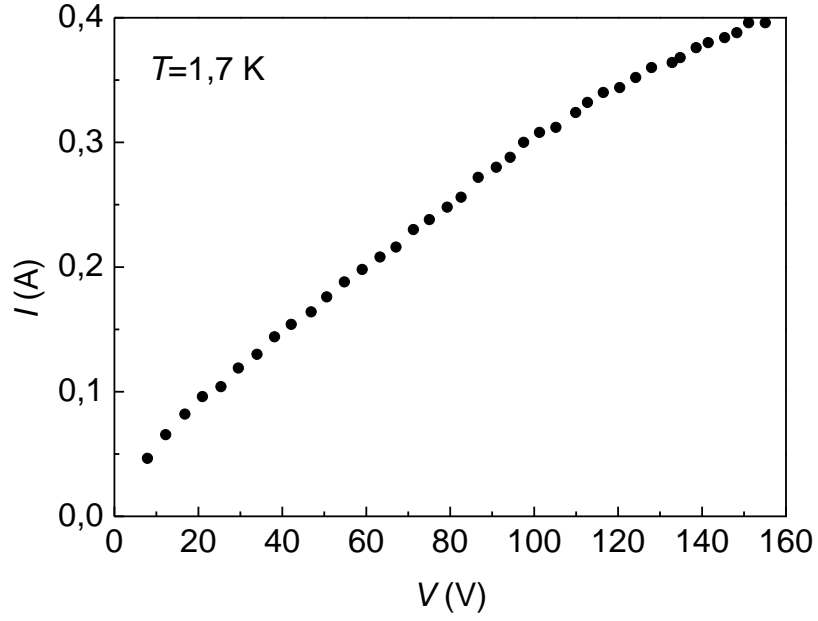
ve

$$P_{II} = \frac{IV}{n_{2D}A} \quad (4.5)$$

ifadeleri ile hesaplandı. Burada  $A$  örneğin alanıdır ( $A = lw$ ). Her iki ifadeden elde edilen güç ifadeleri karşılaştırıldığında aralarında fark olmadığı görüldü.

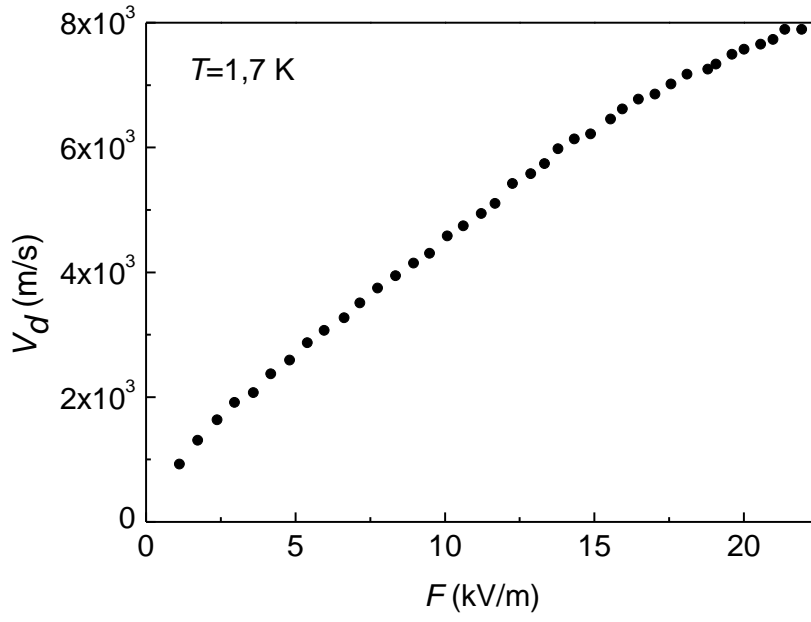
#### 4.1. Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>N/AlN/GaN Yapılar

Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>N/AlN/GaN heteroeklem örneği üzerine  $T=1,7$  K'de 0 V'tan 200 V'a kadar 200 ns genişliğinde 500 Hz frekanslı pulslu voltaj 1V adımlarla uygulandı. Her adımda örnekten geçen akım hesaplanarak pulslu I-V verileri elde edildi (Şekil 4.1).

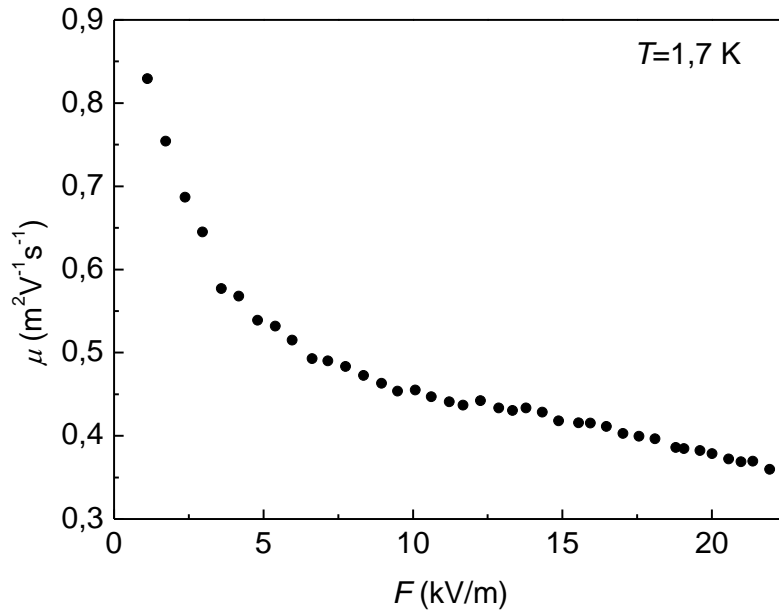


Şekil 4.1. Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>N/AlN/GaN heteroeklem örneğinin akım gerilim grafiği ( $T=1,7$  K)

Düşük ve orta voltajlarda ( $V < 100V$ ) akımın doğrusal arttığı görülmektedir. Bu tipik ohmik davranıştır. Yüksek voltajlarda ( $V > 100V$ ) ise elektronların ısınmasından dolayı küçük sapmalar görülmektedir. Taşıyıcı yoğunluğunun uygulanan elektrik alandan bağımsız olduğu varsayımı kabul edilerek sürüklenme hızı hesaplandı. Örneğe uygulanan elektrik alana karşı sürüklenme hızı grafiği Şekil 4.2'de görülmektedir. Elde edilen en yüksek sürüklenme hızı, 22 kV/m'lik elektrik alan değerinde yaklaşık  $7,8 \times 10^3$  m/s'dir. Elektrik alana bağlı mobilite grafiği Şekil 4.3'de yer almaktadır. Burada mobilitenin uygulanan elektrik alan ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Mobilite yaklaşık %60 oranında düşme göstermiştir.

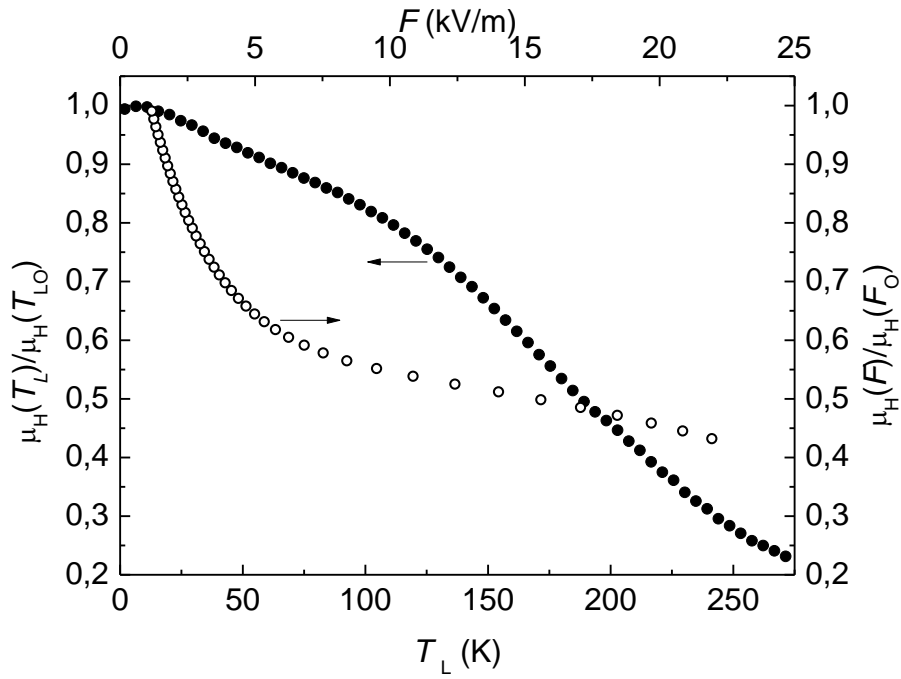


Şekil 4.2.  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte sürüklenme hızının uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)

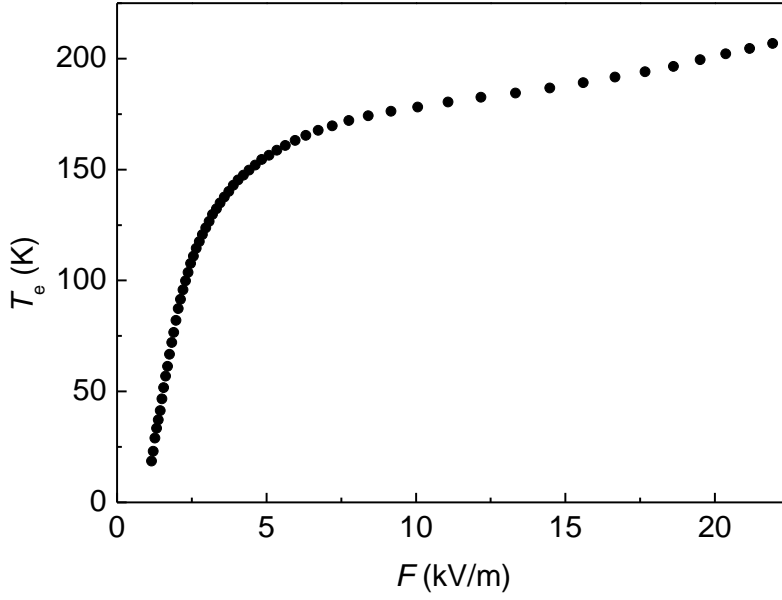


Şekil 4.3.  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)

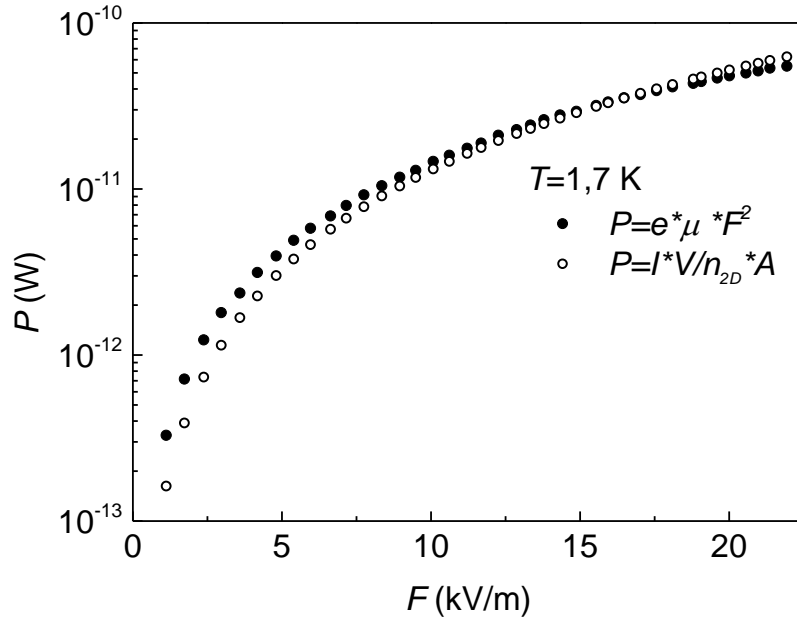
Elektrik alana bağılı mobilite ile sıcaklığa bağılı mobilite eğrilerinin karşılaştırılmasıyla elektron sıcaklığı Eş. 2.13 kullanılarak elde edildi (Şekil 4.4). Elektron sıcaklığını elde ederken taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklık ve uygulanan elektrik alandan bağımsız olduğu ve altbandlar arası geçişlerin yasaklı olduğu kabul edildi. Böylece elektron sıcaklığının elektrik alan ile değişimi elde edildi (Şekil 4.5). Elektrik alan arttıkça elektron sıcaklığının da yükseldiği görüldü. Burada elektron sıcaklığı, 1 kV/m'lik elektrik alan değerinde örgü sıcaklığının üzerine çıkmıştır. Deneylerde elde ettiğimiz en yüksek elektron sıcaklığı  $F > 25$  kV/m'lik elektrik alanda 200 K'dir. Uygulanan elektrik alana bağılı güç Eş. 4.4 ve Eş.4.5 kullanılarak elde edildi (Şekil 4.6). İçi boş daireler Eş. 4.4 ile, içi dolu daireler ise Eş. 4.5 kullanılarak elde edilen güç kayıplarıdır. Bu iki eğri arasındaki farkın küçük olduğu ve elektrik alan arttıkça bu farkın daha azaldığı görüldü.



**Şekil 4.4.**  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AlN/GaN$  heteroeklem örnekte sıcaklığa ve elektrik alana bağılı normalize edilmiş mobilitelerin karşılaştırılması. İçi dolu daireler normalize edilmiş mobilitenin sıcaklıkla değişimi ve içi boş daireler normalize edilmiş mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimidir.

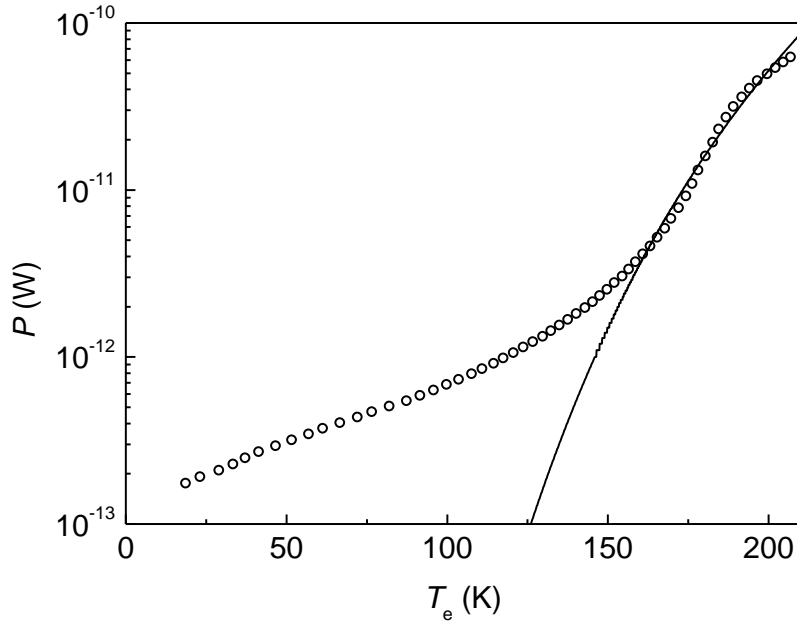


Şekil 4.5.  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektron sıcaklığının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)



**Şekil 4.6.**  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybı. İçi boş daireler Eş. 4.4 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybı, içi dolu daireler ise Eş. 4.5 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybıdır ( $T=1,7$  K).

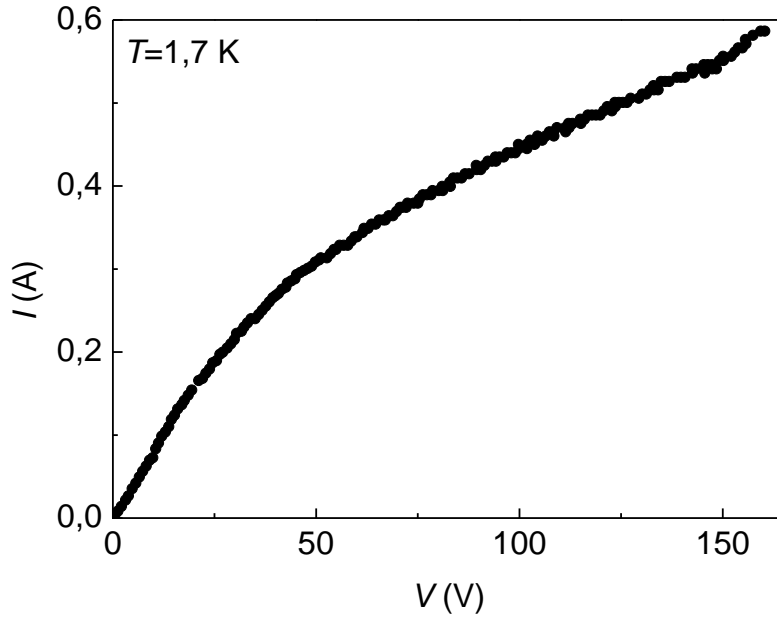
Şekil 4.7’de elektron başına güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi (içi boş daire) ve kuramsal hesaplamalardan elde edilen uyum eğrisi (sürekli çizgi) [68] gösterilmektedir. Deneysel verilerden mobilitenin karşılaştırılması yöntemiyle elde edilen elektron sıcaklığına bağlı elektron başına güç kaybı eğrisinde iki farklı davranış görüldü. Fakat 20-150 K’lik elektron sıcaklığı aralığında deneysel veriler ile kuramsal ifadeler arasında uyum yoktur. Elektron sıcaklığının 150 K’den büyük olduğu bölgede optik fonon titreşimleri baskındır ve elde edilen güç kaybı bu bölge için geliştirilen kuramsal yaklaşımların sonuçları ile uyumludur.



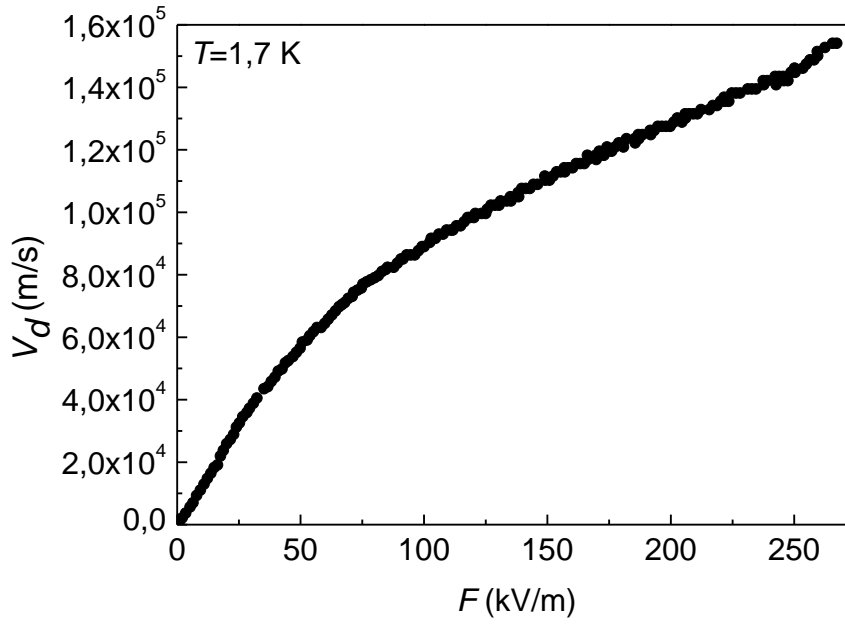
**Şekil 4.7.**  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektron başına güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi. Sürekli çizgi Eş. 2.25 ile verilen kuramsal uyum eğrisidir.

#### 4.2. $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ Yapılar

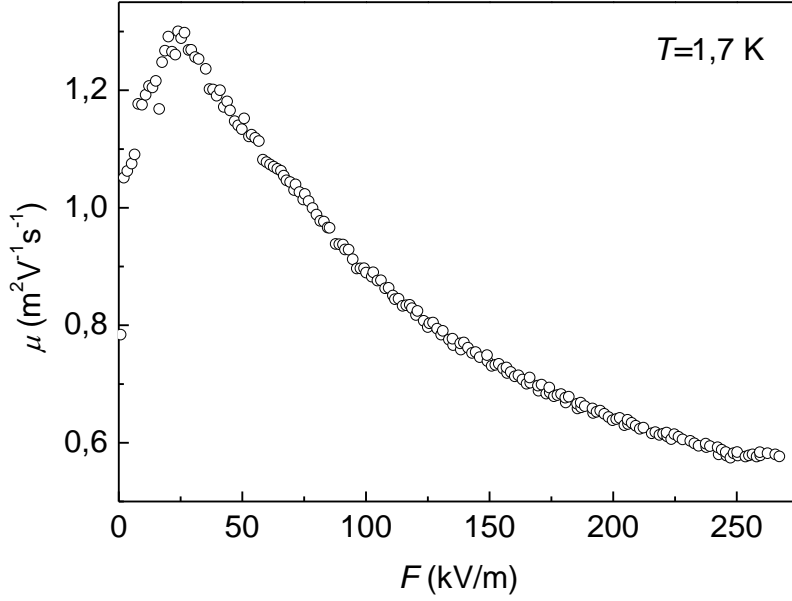
$\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnek üzerine 200 ns puls genişliğine sahip 0-200 V aralığında pulslu voltajlar 1 V aralıklarla uygulandı. Pulslu voltajların frekansı 500 Hz'dir. Bu değerlerde pulslu voltajların iş döngüsü  $10^{-4}$  br'dir. Örnek üzerine uygulanan voltaja bağlı akımın değişim grafiği elde edildi (Şekil 4.8). Örneğe maksimum uygulanan voltaj 160 V'tur ve bu voltaj değerinde 0,58 A akım elde edildi. Şekil 4.9'da sürüklenme hızının uygulanan elektrik alan ile değişimi yer almaktadır. Burada uygulanabilen maksimum elektrik alan değeri 260 kV/m'dir. Bu değerinde sürüklenme hızı  $1,57 \times 10^5$  m/s olarak elde edildi. Mobilitenin elektrik alan ile değişimi Eş. 4.3 kullanılarak elde edildi (Şekil 4.10). Elektrik alan arttıkça mobilitede azalma meydana geldiği görüldü.



Şekil 4.8. Al<sub>0,83</sub>In<sub>0,17</sub>N/AlN/GaN heteroeklem örneğın akım gerilim grafiğı (T=1,7 K)

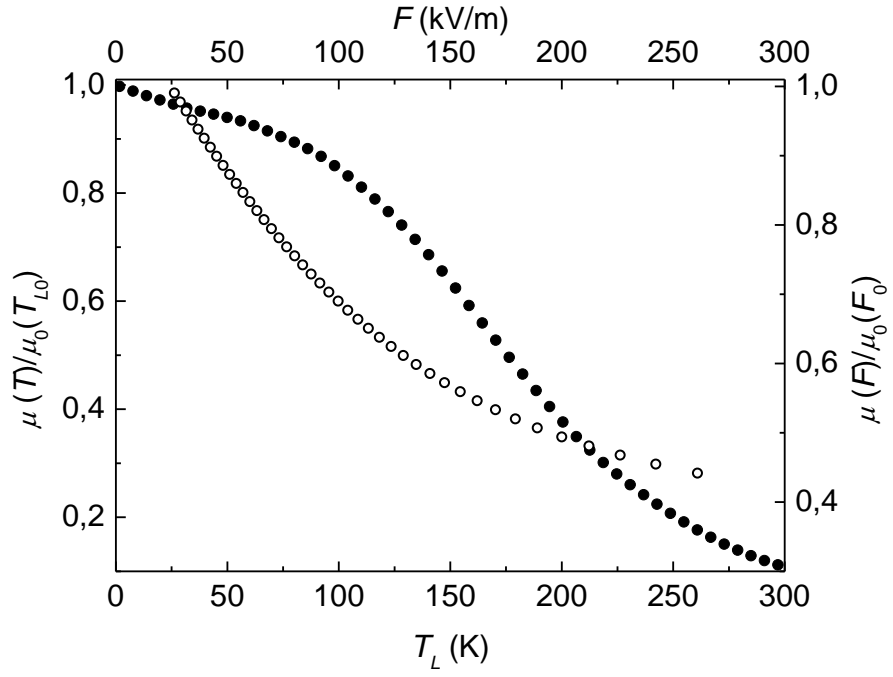


Şekil 4.9. Al<sub>0,83</sub>In<sub>0,17</sub>N/AlN/GaN heteroeklem örnekte sürüklenme hızının uygulanan elektrik alan ile değışimi (T=1,7 K)

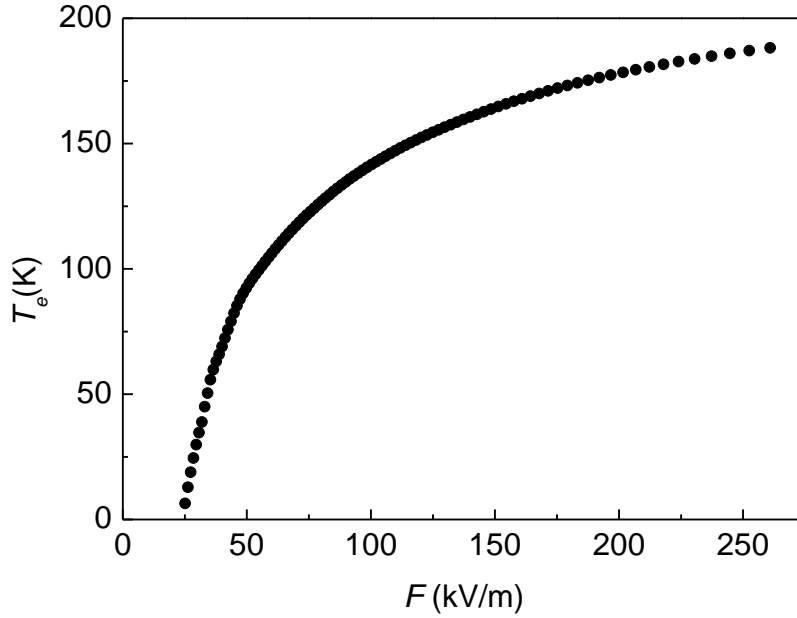


**Şekil 4.10.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)

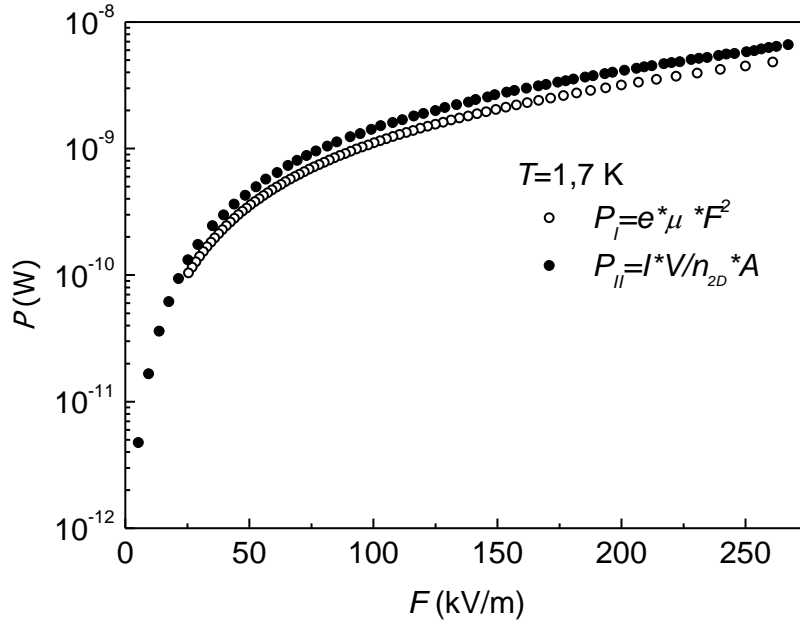
Mobilitenin karşılaştırılması yöntemi ile elektron sıcaklığını elde etmek için mobilitenin sıcaklık ve elektrik alan ile değişimleri Şekil 4.11’de verilmiştir. İçi dolu daireler normalize edilmiş mobilitenin sıcaklık ile değişimi iken [67] içi boş daireler normalize edilmiş mobilitenin elektrik alan ile değişimidir. Örnek üzerine 100 kV/m’lik elektrik alan uygulandığında elektron sıcaklığı yaklaşık 150 K’dir. Normalize edilmiş iki eğrinin karşılaştırılmasıyla elektron sıcaklığının uygulanan elektrik alan ile değişimi elde edildi (Şekil 4.12).  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örneğe uygulanan maksimum elektrik alan 260 kV/m’dir ve bu elektrik alan değerinde elde edilen elektron sıcaklığı 188 K’dir. Elektron başına güç kaybı eğrileri Eş. 4.4 ve Eş. 4.5 ayrı ayrı kullanılarak elde edildi (Şekil 4.13). İçi boş daireler Eş. 4.4, içi dolu daireler ise Eş. 4.5 ile edildi. Elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişim grafikleri arasındaki farkın çok büyük olmadığı görüldü.



**Şekil 4.11.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte sıcaklığa ve elektrik alana bağlı normalize edilmiş mobilitelerin karşılaştırılması. İçi dolu daireler normalize edilmiş mobilitenin sıcaklıkla değişimi ve içi boş daireler normalize edilmiş mobilitenin uygulanan elektrik alan ile değişimidir.

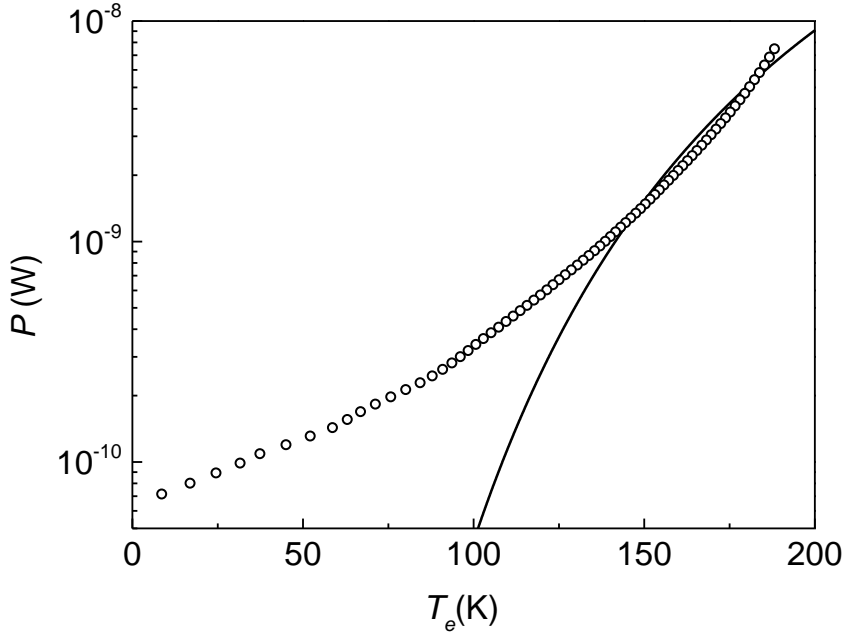


**Şekil 4.12.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektron sıcaklığının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)



**Şekil 4.13.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybı. İçi boş daireler Eş. 4.4 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybı, içi dolu daireler Eş. 4.5 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybıdır ( $T=1,7$  K).

Şekil 4.14’de elektron sıcaklığına bağlı elektron başına güç kaybı (içi boş daireler) ve kuramsal uyum eğrisi (sürekli çizgi) yer almaktadır. Elektron başına düşen güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi, mobilitenin karşılaştırılması yöntemiyle deneysel verilerden elde edildi. Kuramsal uyum eğrisi ise Eş. 2.27’den elde edildi. Kullanılan fiziksel parametreler Çizelge 4.1 verilmiştir. Elektron sıcaklığının 150 K’den büyük olduğu bölge Eş. 2.27 ile uyum gösterdi. Elektron sıcaklığının 150 K’den büyük olduğu bölgede elektron başına güç kaybının optik fonon emisyonu ile meydana geldiği görüldü.



**Şekil 4.14.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnekte elektron başına güç kaybının elektron sıcaklığı ile değişimi. Sürekli çizgi Eş. 2.29 ile verilen kuramsal uyum eğrisidir.

**Çizelge 4.1.**  $\text{Al}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  heteroeklem örnek için kuramsal uyum hesaplamalarında kullanılan malzeme parametreleri [67]

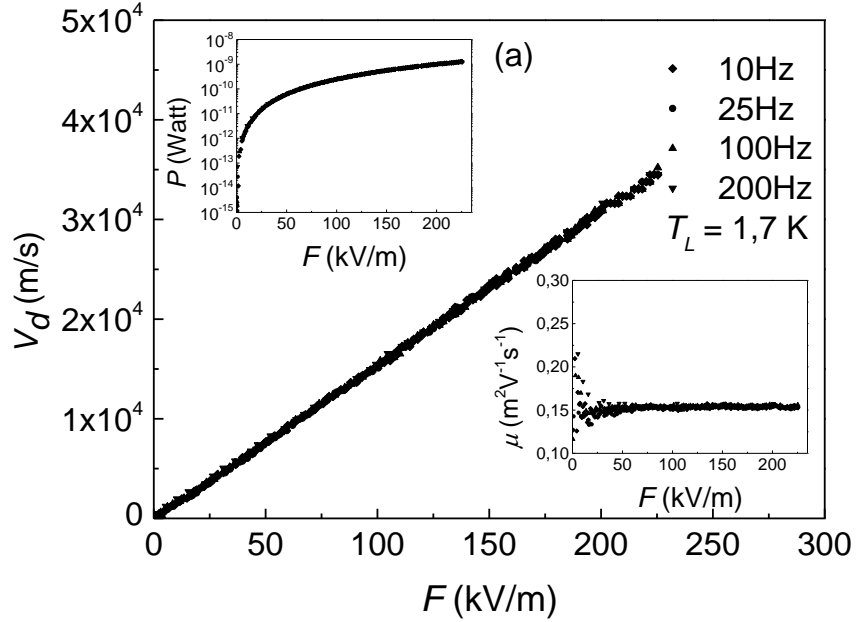
Parametre	Birim
LO fonon enerjisi, $\hbar\omega_{LO}$ (meV)	91,2
Etkin kütle, $m^*$ ( $m_0$ )	0,188
Yüksek frekans dielektrik sabiti, $\epsilon_\infty$ ( $\epsilon_0$ )	5,35
Durgun geçirgenlik sabiti, $\epsilon_s$ ( $\epsilon_0$ )	10

Çizelge 4.1'deki parametreler Eş. 2.27'de kullanıldığında elektron-fonon saçılma zamanı  $\tau_{eff}=0,65$  ps olarak elde edildi. Bu değer farklı araştırma gruplarının GaN temelli sistemler için elde ettikleri elektron fonon saçılma zamanları 0,35-2,5 ps aralığındadır [79-82].

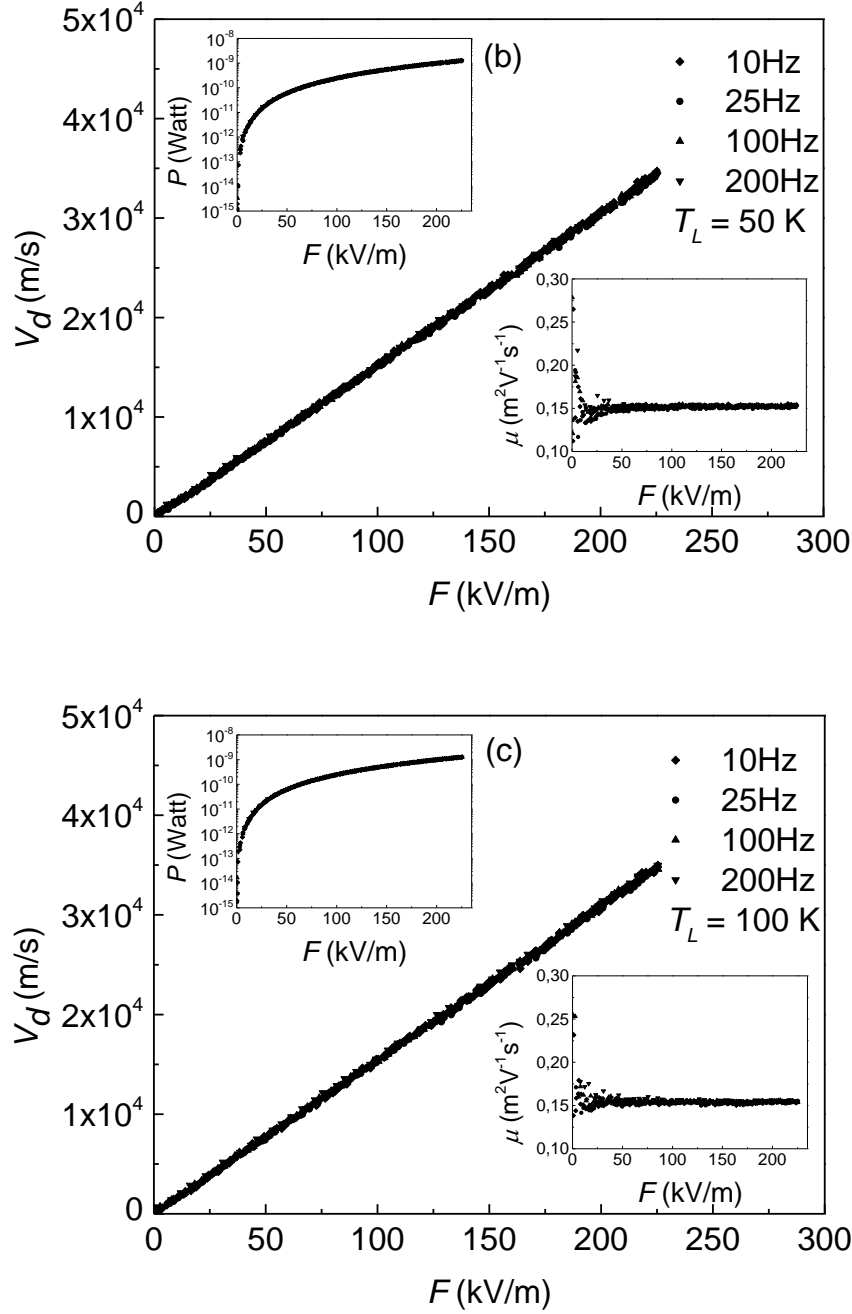
### 4.3. Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub>/GaAs Yapılar

Nitrür oranları 0,004, 0,010 ve 0,015 olan Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub>/GaAs kuantum kuyu örneklerine 0-200 V aralığında 200 ns puls genişliğinde pulslu voltajlar uygulandı. Bu örneklerle uygulanan pulslu voltajların frekansları 10, 25, 100 ve 200 Hz'dir. Bu parametreler kullanılarak her örnek için T=1,7K, 50 K, 100 K, 150 K, 200 K, 250 K ve 300 K'de ölçümler tekrarlandı.

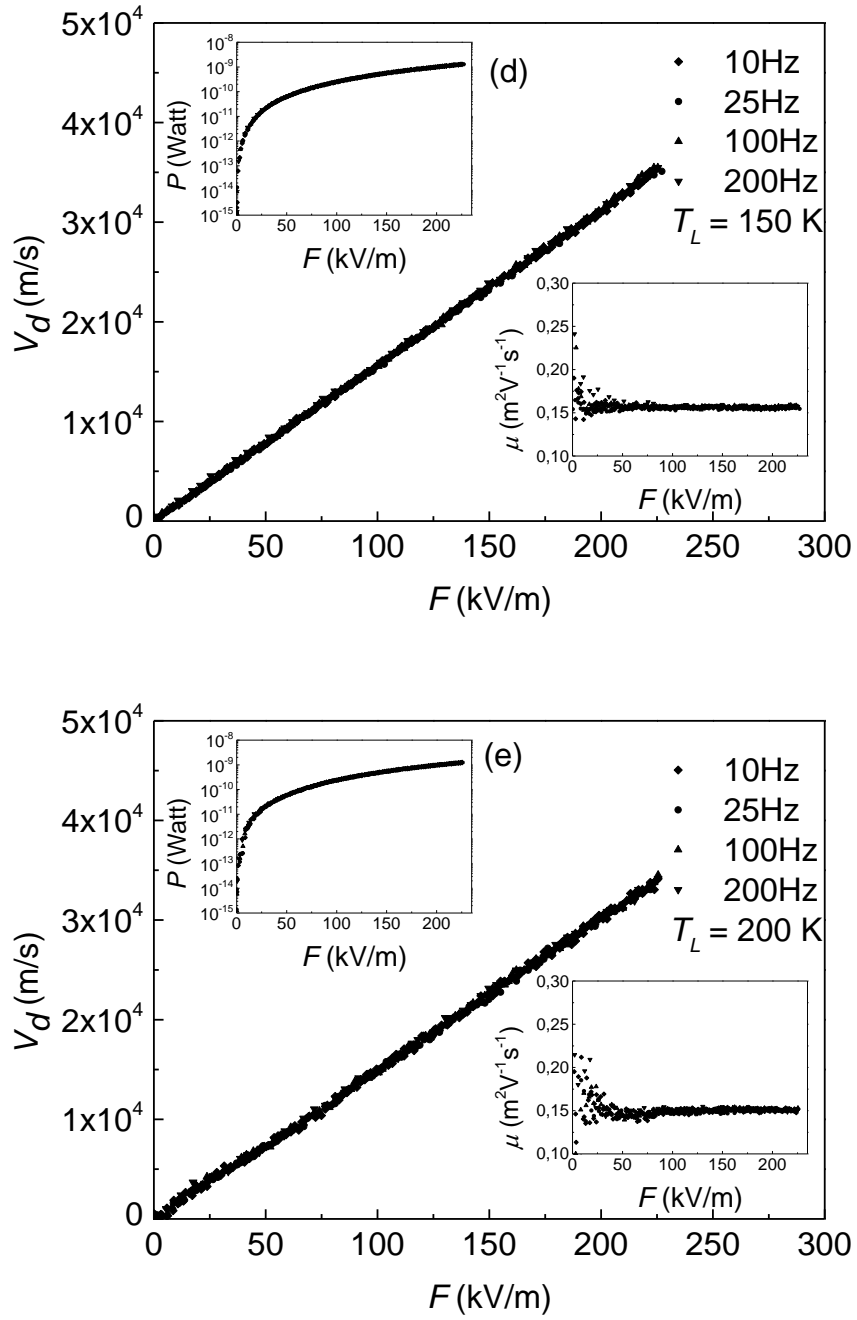
%0,4 Nitrür oranlı Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>N<sub>0,004</sub>As<sub>0,996</sub>/GaAs örnek için sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimleri yukarıdaki sıcaklıklarda sırasıyla Şekil 4.15'de elde edildi.



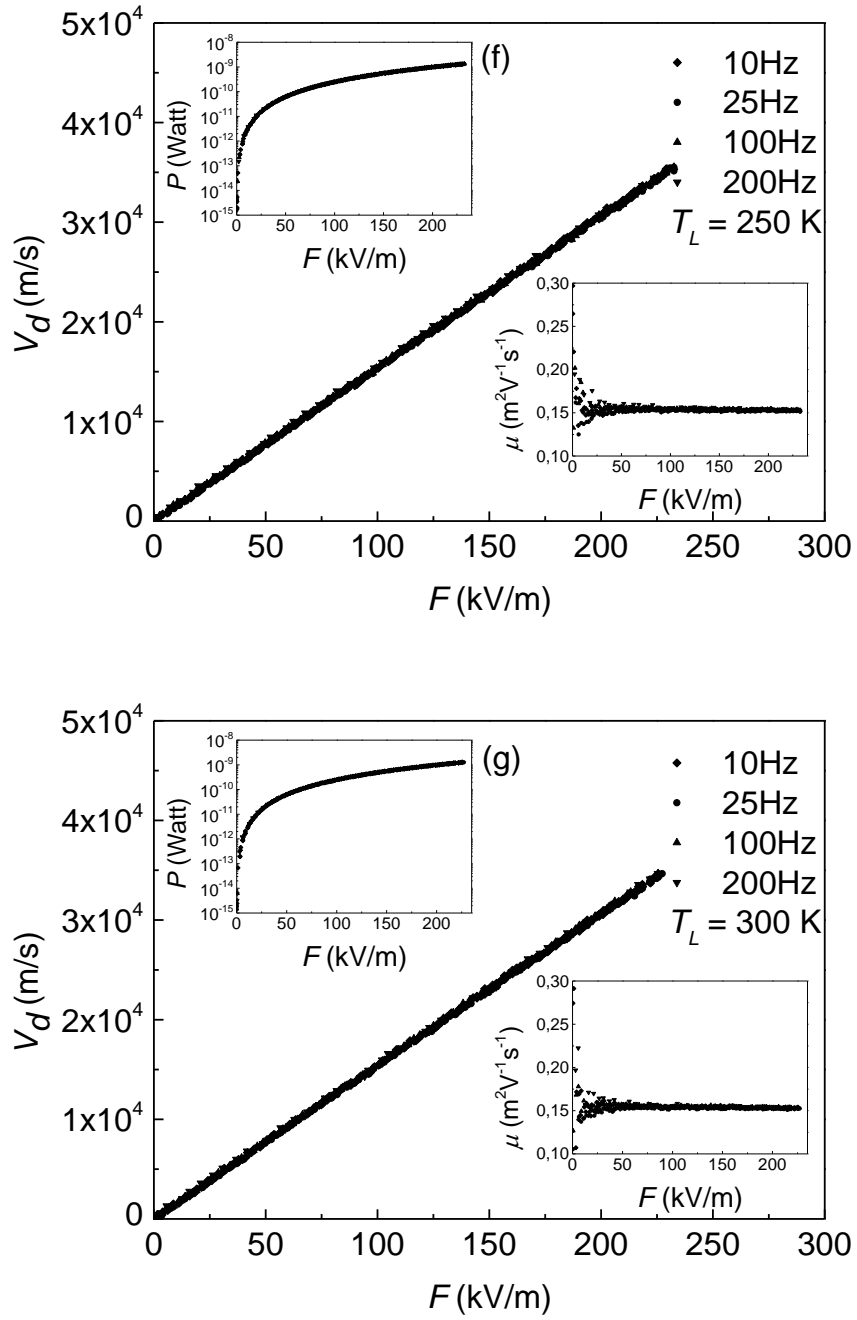
Şekil 4.15. Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>N<sub>0,004</sub>As<sub>0,996</sub>/GaAs kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'deki uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



Şekil 4.15. (Devam)  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.004}\text{As}_{0.996}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K,e)200 K, f)250 K, g)300 K'deki uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

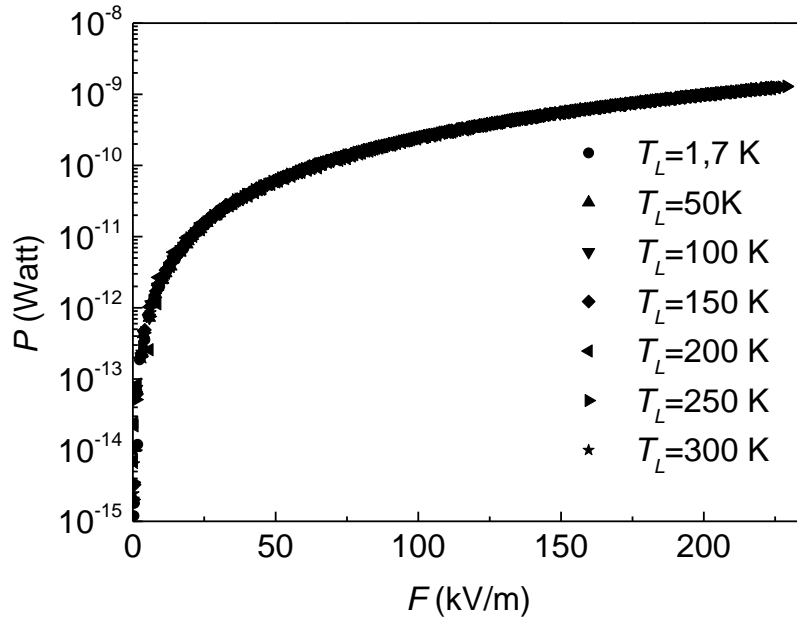


Şekil 4.15. (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,004}\text{As}_{0,996}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'deki uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



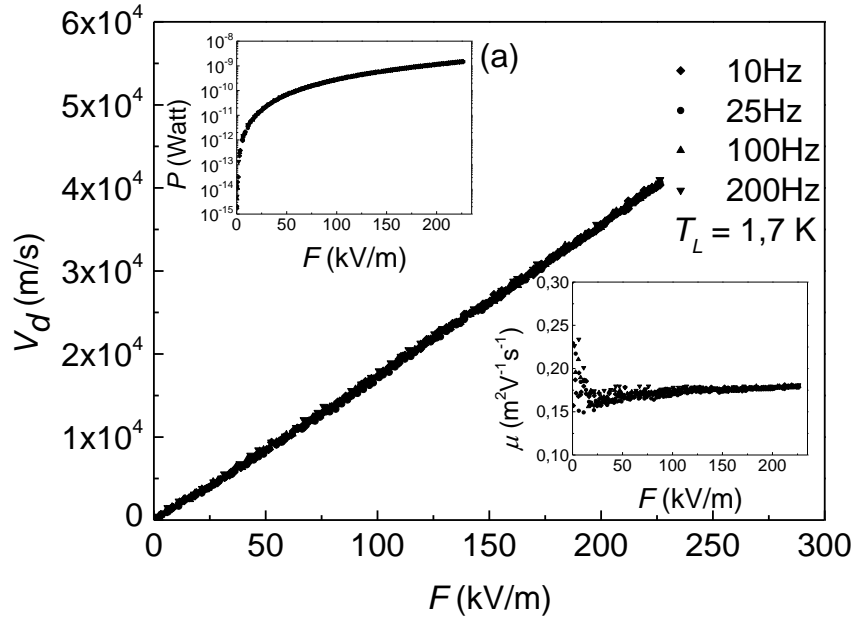
Şekil 4.15. (Devam)  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.004}\text{As}_{0.996}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'deki uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

%0,4 Nitrür oranına sahip  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,004}\text{As}_{0,996}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örneğe farklı frekanslarda pulslu voltajlar uygulandı. Bu örneğe uygulanan maksimum elektrik alan 225 kV/m'dir. Mobilitenin elektrik alan ile değişmediği görüldü. Bu yüzden mobilitelerin karşılaştırılması yöntemi kullanılmadı ve elektron sıcaklığı elde edilemedi. Ayrıca mobilitenin uygulanan voltajın frekansına bağlı olmadığı görüldü. Bu örnek için elde edilen mobilite değeri ( $0,15 \mu^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ve sıcaklığa bağlı mobilite değeri ( $0,14 \mu^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) [83] birbiriyle uyumludur. Elektron başına güç kaybı Eş. 4.5 kullanılarak elde edildi. Elektron başına güç kaybının uygulanan voltajın frekansı ile bir değişim göstermediği görüldü. Elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybı ölçülen tüm sıcaklıklarda değişmediği elde edildi (Şekil 4.16). Frekansa göre bir değişim olmadığı için Şekil 4.16'da sadece 10 Hz verileri verildi.

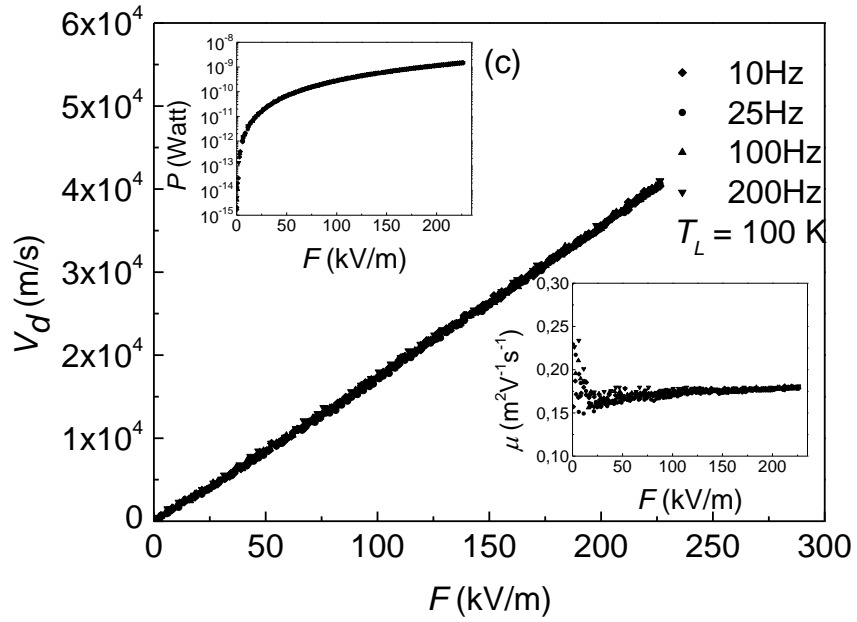
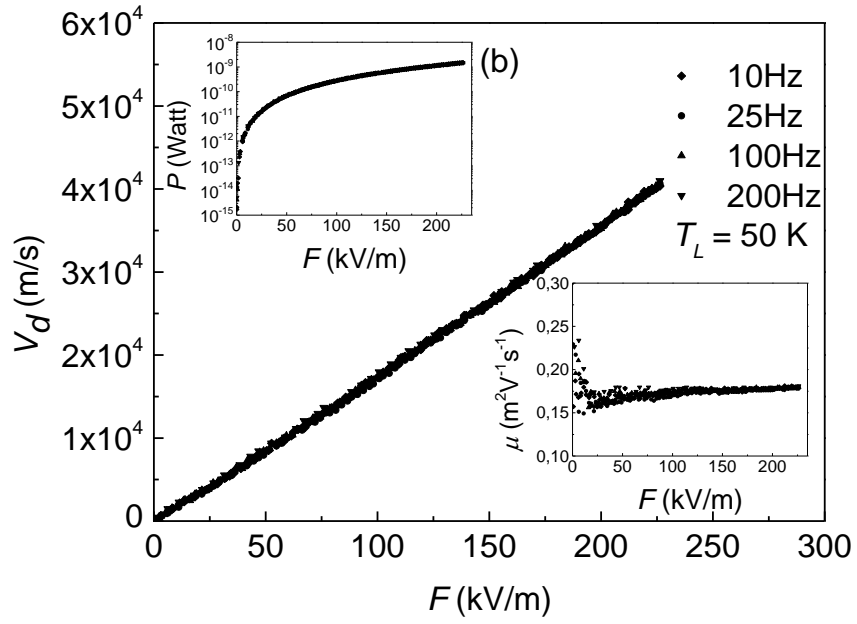


Şekil 4.16.  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,004}\text{As}_{0,996}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7$  K)

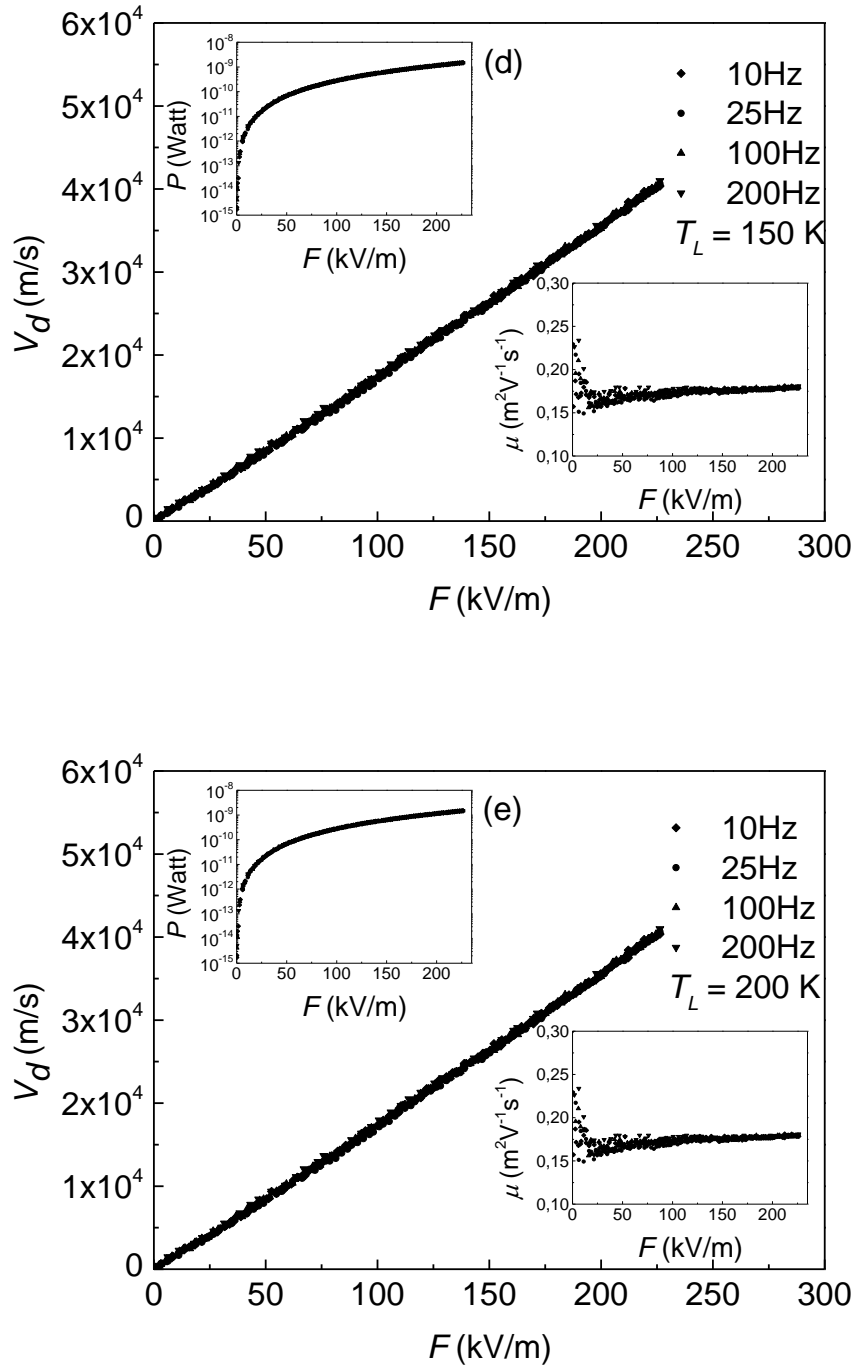
%1 Nitrür oranlı  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  örnek için sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimleri 1,7-300 K aralığında elde edildi (Şekil 4.17).



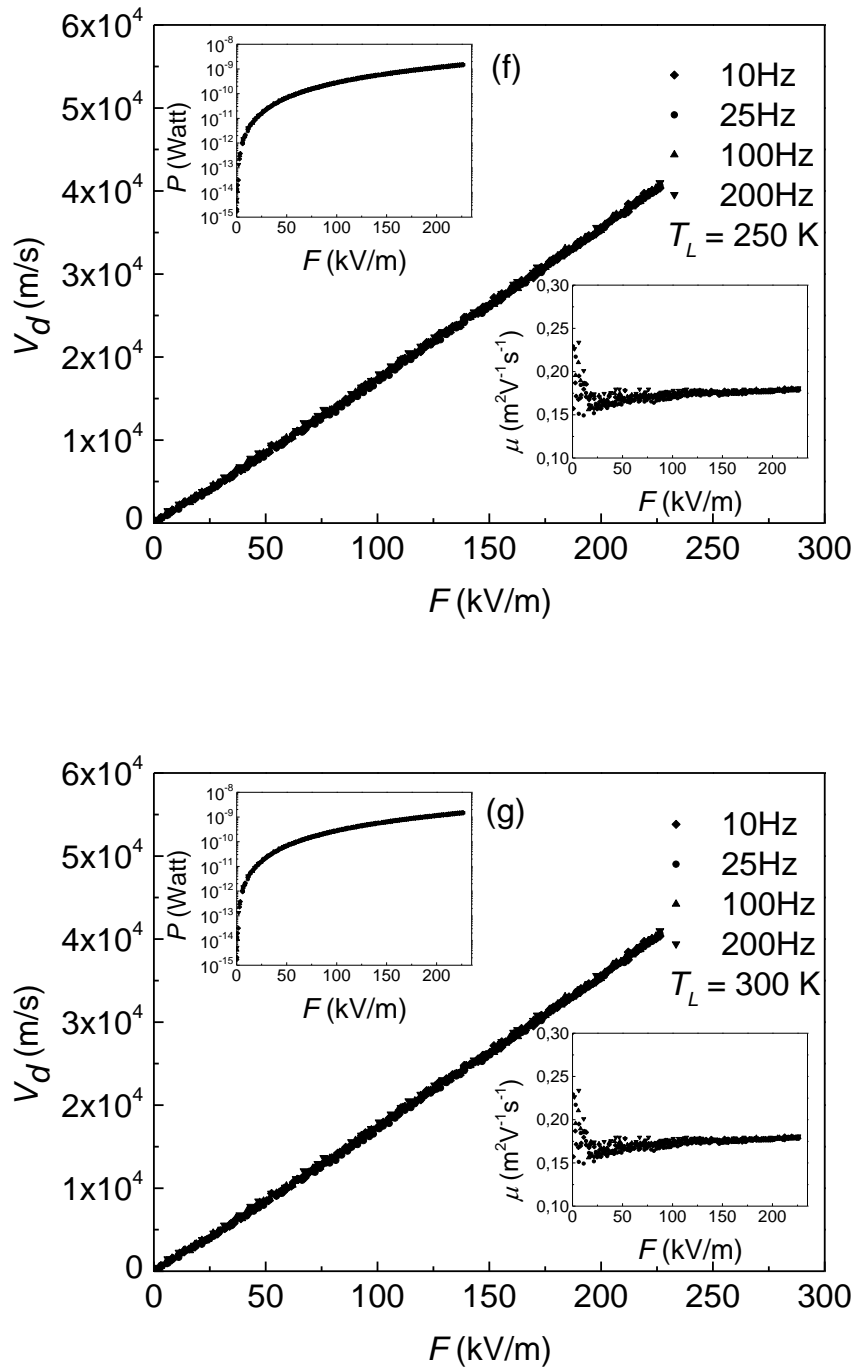
Şekil 4.17.  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K,e)200 K, f)250 K, g)300 K’de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



Şekil 4.17. (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

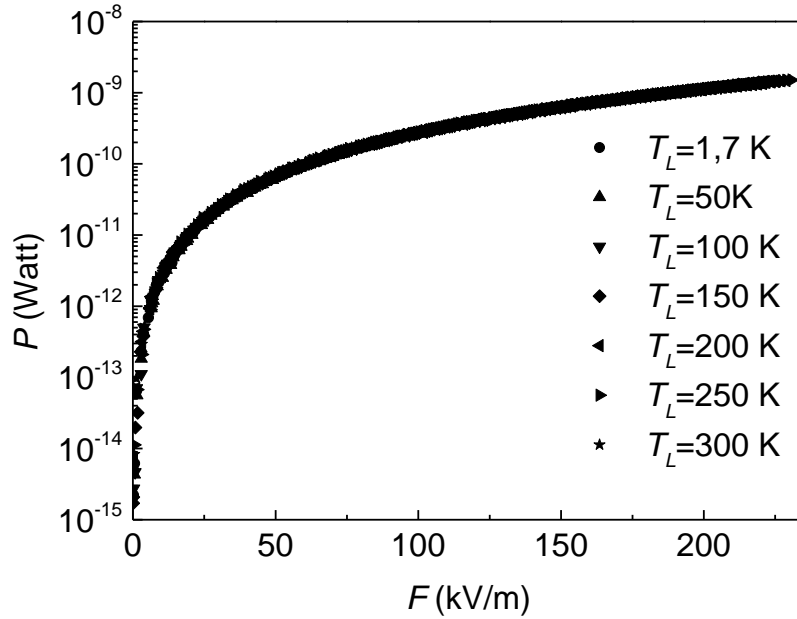


Şekil 4.17. (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



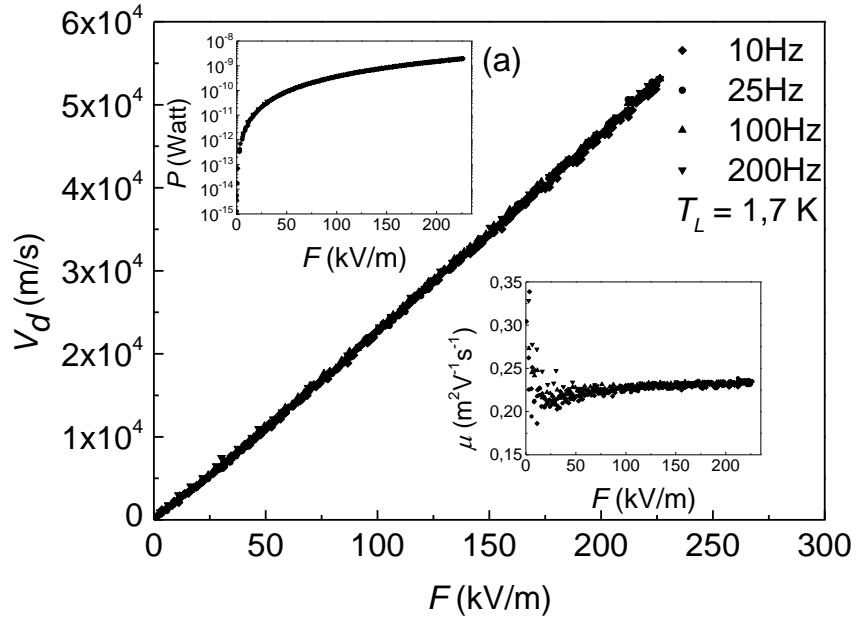
Şekil 4.17. (Devam)  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.1}\text{As}_{0.9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

%1 Nitrür oranına sahip  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örneğe farklı frekanslarda pulslu voltajlar uygulandı ve frekansın sürüklenme hızını, mobilitayı ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimlerini etkilemediği görüldü. Bu örneğe maksimum  $225 \text{ kV/m}$ 'lik elektrik alan uygulandı ve bu değere karşı  $4 \times 10^4 \text{ m/s}$ 'lik sürüklenme hızı elde edildi. Mobilitenin elektrik alan ile değişmediği görüldü. Bu yüzden mobilitelerin karşılaştırılması yöntemi kullanılmadı ve elektron sıcaklığı elde edilemedi. Bunun nedeni uygulanan elektrik alanın sıcak elektron oluşturabilecek kadar yüksek olmamasıdır. Elektron başına güç kaybı Eş. 4.5 kullanılarak elde edildi. Elektron başına güç kaybının uygulanan voltajın frekansı ile bir değişim göstermediği görüldü. Elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının ölçülen tüm sıcaklıklarda aynı olduğu elde edildi (Şekil 4.18). Frekansa göre bir değişim olmadığı için Şekil 4.18'de sadece 10 Hz verileri verildi.

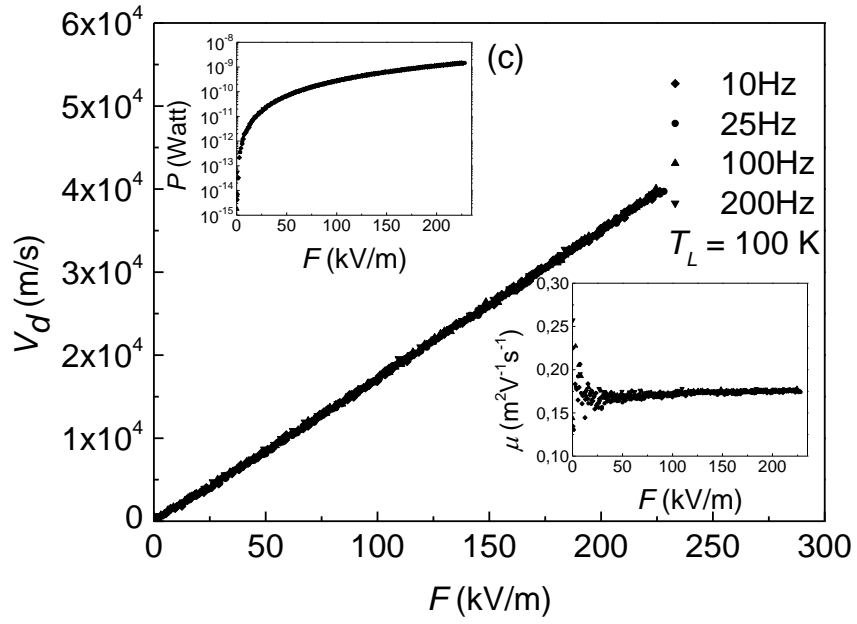
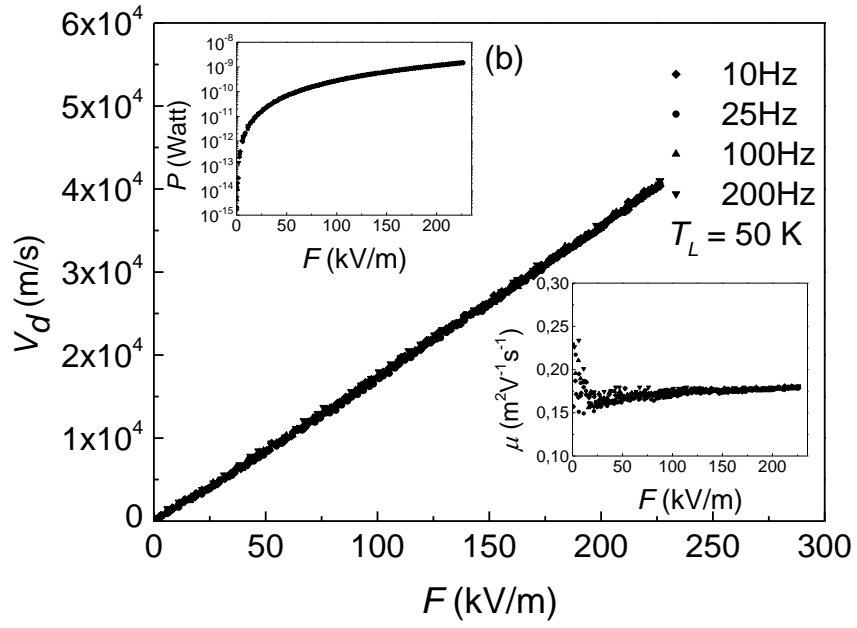


Şekil 4.18.  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,1}\text{As}_{0,9}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7 \text{ K}$ )

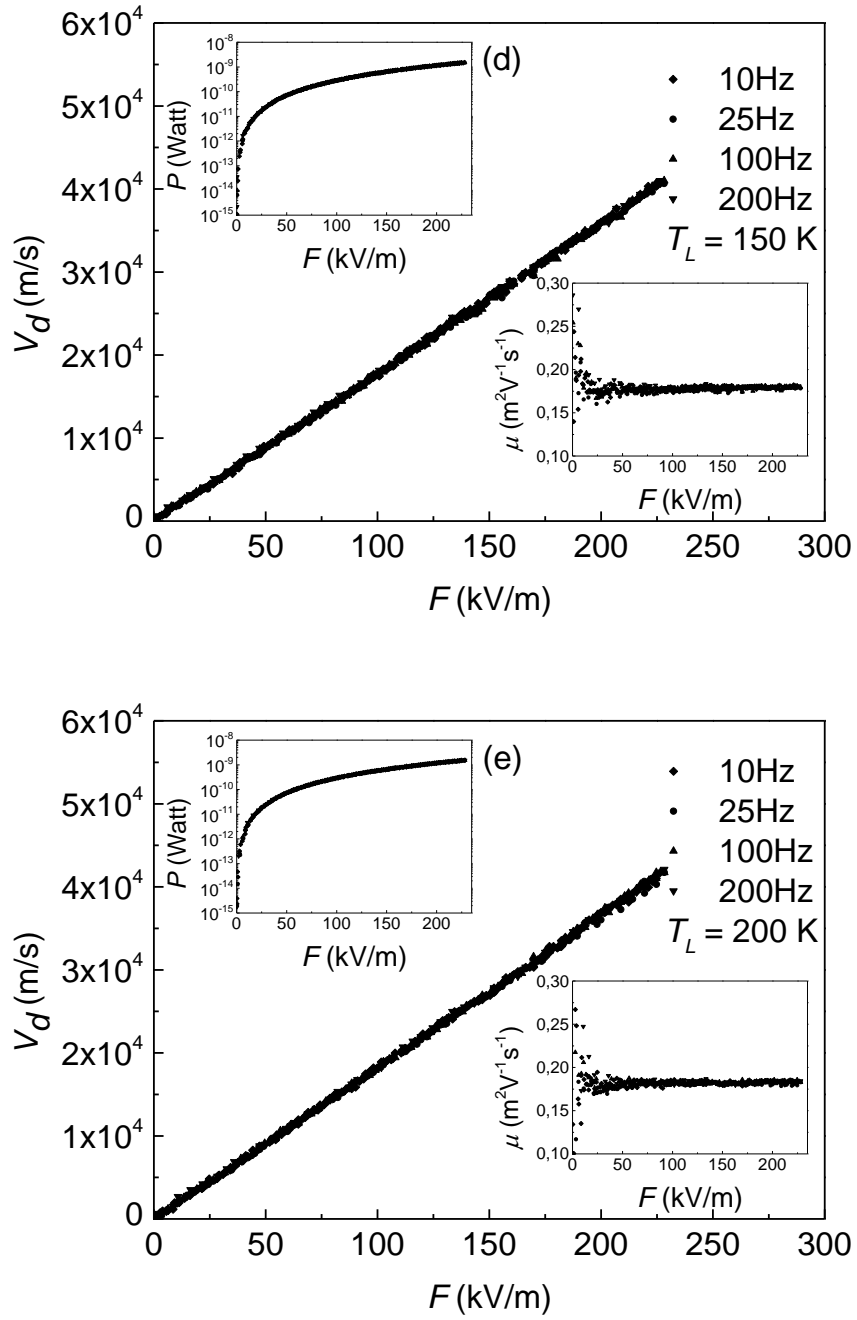
%1,5 Nitrür oranlı  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  örnek için sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimleri 1,7-300 K aralığında elde edildi (Şekil 4.19).  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örneğe farklı frekanslarda pulslu voltajlar uygulandı. Sürüklenme hızı elektrik alan ile doğrusal artmaktadır. Mobilitenin elektrik alan ile değişmediği görüldü. Bu yüzden mobilitelerin karşılaştırılması yöntemi kullanılmadı ve elektron sıcaklığı elde edilemedi. Ayrıca mobilitenin uygulanan voltajın frekansına bağlı olmadığı görüldü.



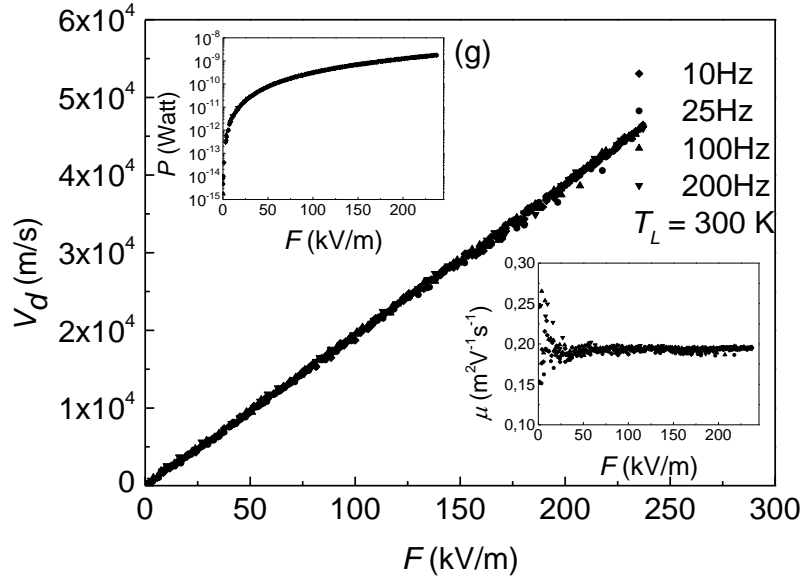
Şekil 4.19.  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



Şekil 4.19. (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

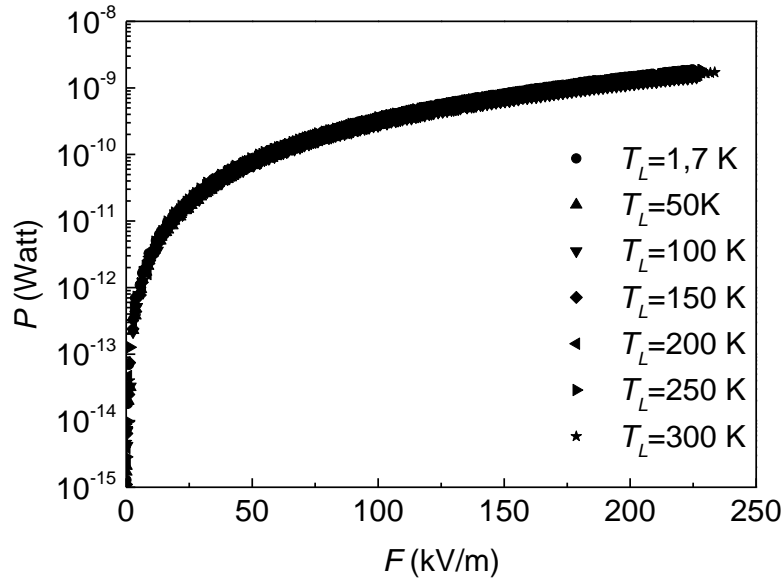


Şekil 4.19. (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri



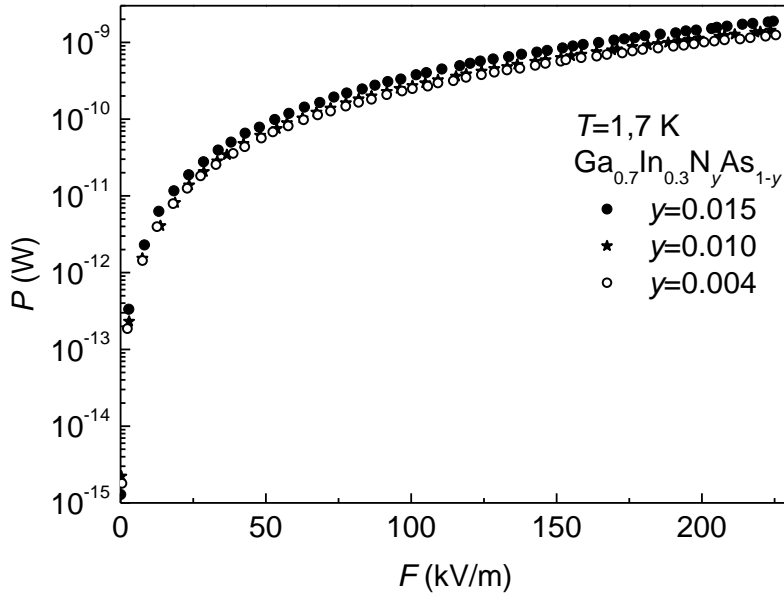
**Şekil 4.19.** (Devam)  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{N}_{0,15}\text{As}_{0,85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alanla değişimlerinin a)1,7 K, b)50 K, c)100 K, d)150 K, e)200 K, f)250 K, g)300 K'de uygulanan voltajın frekansına bağlı değişimleri

Elektron başına güç kaybı Eş. 4.5 kullanılarak elde edildi. Elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının ölçülen tüm sıcaklıklarda aynı olduğu elde edildi (Şekil 4.20). Frekansa göre bir değişim olmadığı için Şekil 4.20'de sadece 10 Hz verileri verildi.

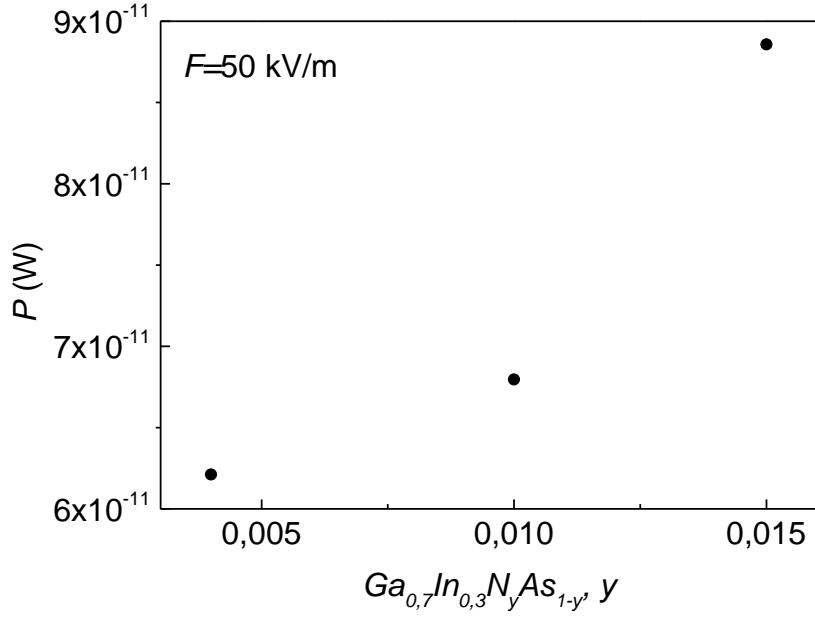


Şekil 4.20.  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.15}\text{As}_{0.85}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örnekte elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişimi ( $T=1,7$  K)

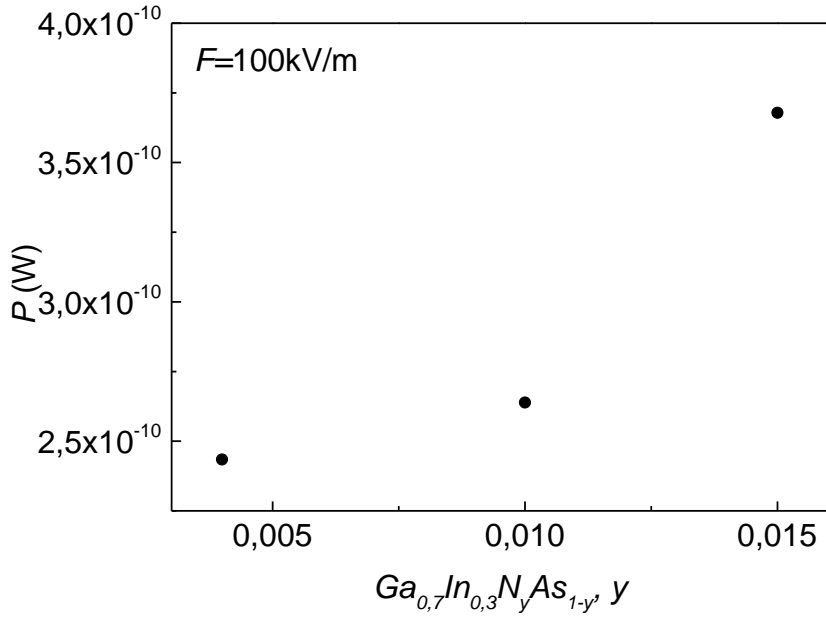
$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örneklerin nitrür oranlarına göre güç kaybı Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de incelenmiştir. Nitrür konsantrasyonu arttıkça elektron başına düşen güç kaybının elektrik alan ile değişimi de artmıştır.



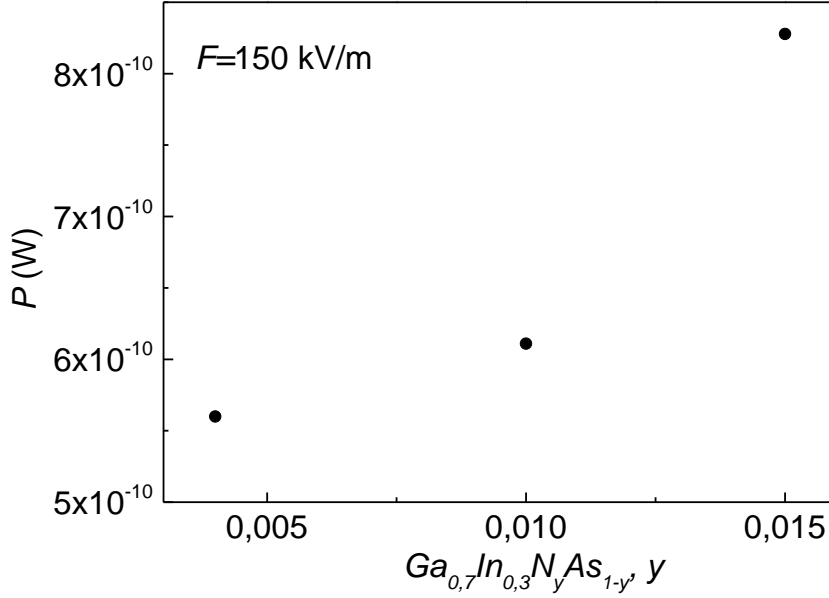
Şekil 4.21.  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  kuantum kuyu örneklerin nitrür oranına göre elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)



Şekil 4.22.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının nitrür oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)

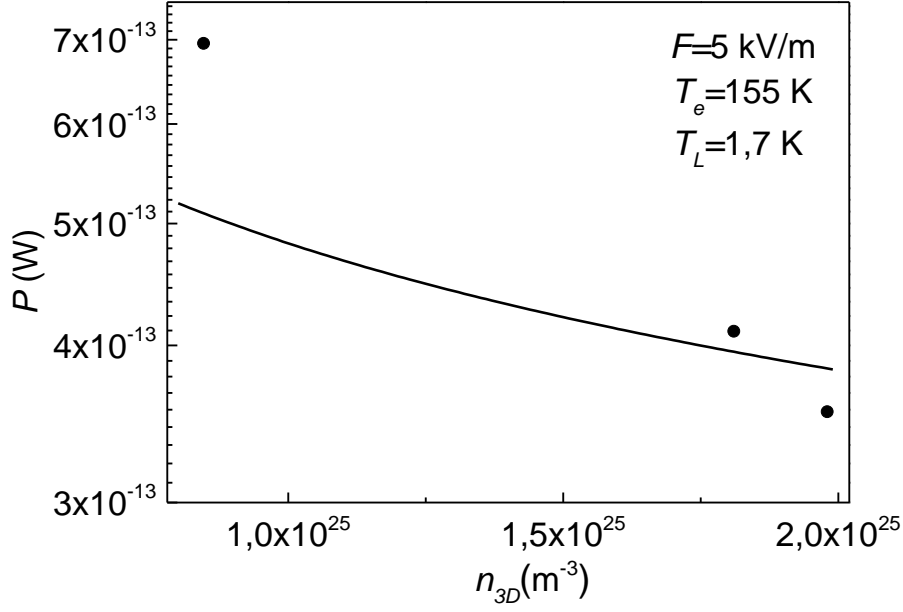


Şekil 4.23. (Devam)  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının nitrür oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)



**Şekil 4.24.** (Devam)  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının nitrür oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)

$Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğuna göre değişimi (içi dolu daireler) ve Eş. 2.14'den elde edilen kuramsal uyum eğrisi (sürekli çizgi) Şekil 4.23'de yer almaktadır.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örnekler için kuramsal uyum hesaplamalarında kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir [83]. Eşitlik 2.14'de  $T_e=155$  K alındığında kuramsal uyum eğrisi ile deneysel sonuçların uyum gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.23). Üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu arttıkça elektron başına güç kaybının azaldığı görüldü. Bu davranış daha önce GaN temelli sistemlerden elde edilmiş olan davranış ile benzerdir [62].



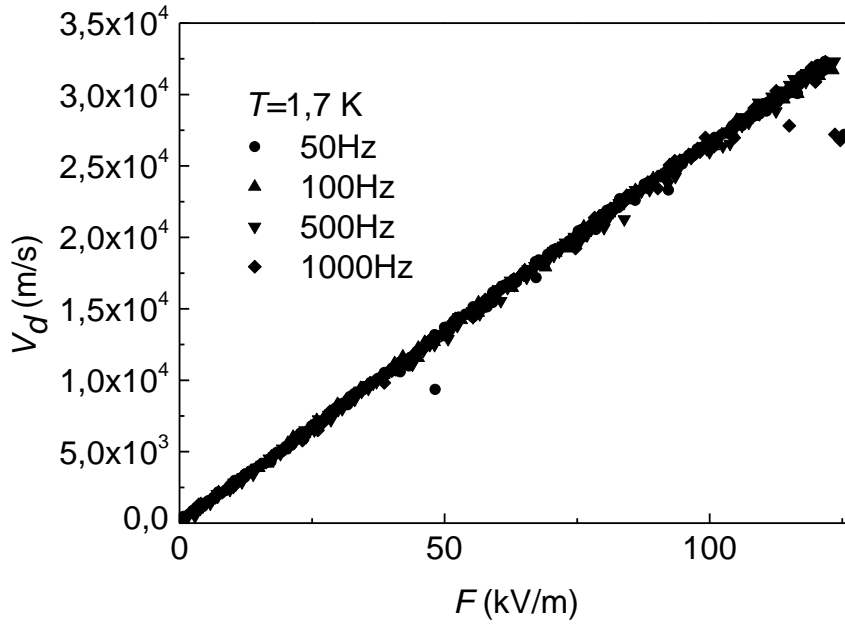
Şekil 4.25.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerin elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğuna göre değişimi ( $F=5$  kV/m,  $T_L=1,7$  K,  $T_e=155$  K)

Çizelge 4. 2.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örnekler için kuramsal uyum hesaplamalarında kullanılan malzeme parametreleri [83]

Parametre	Birim
LO fonon enerjisi, $\hbar\omega_{LO}$ (meV)	92
Etkin kütle, $m^*$ ( $m_0$ )	0,084
Yüksek frekans dielektrik sabiti, $\epsilon_\infty$ ( $\epsilon_0$ )	11,11
Durgun geçirgenlik sabiti, $\epsilon_s$ ( $\epsilon_0$ )	13,575
Ses hızı, $V_s$ (m/s)	3165
Piezoelektrik sabiti, $e_{15}$ (C/m <sup>2</sup> )	-0,3
Piezoelektrik sabiti, $e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	-0,49
Piezoelektrik sabiti, $e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	0,73

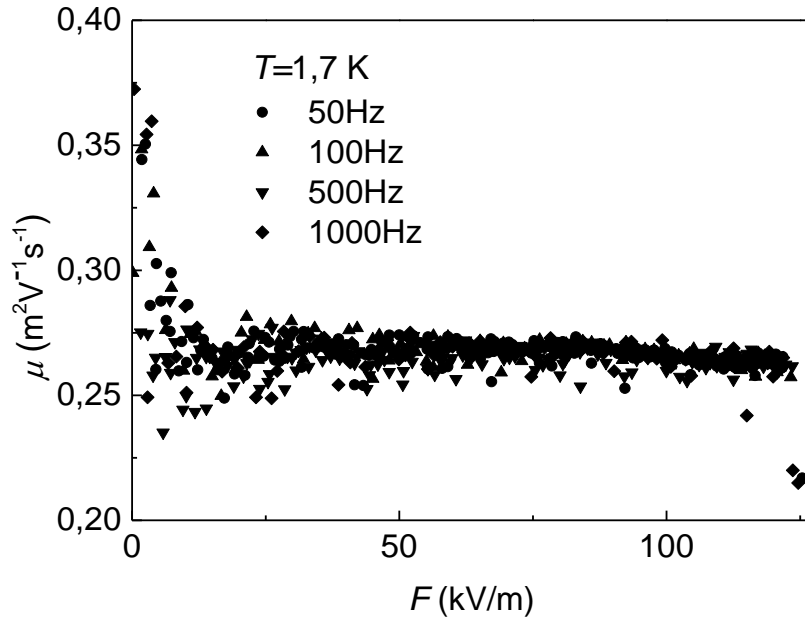
#### 4.4. GaN/AlN/InN Yapılar

InN tabaka kalınlığı 0,4  $\mu\text{m}$  olan GaN/AlN/InN heteroeklem örneğe  $T=1,7\text{ K}$ 'de farklı frekanslarda 200 ns puls genişliğinde 0-200 V aralığında pulslu voltajlar uygulandı. Örnek üzerine uygulanan elektrik alan Eş. 4.1 kullanılarak hesaplandı. Elektrik alana bağlı sürüklenme hızı Eş. 4.2 kullanılarak elde edildi (Şekil 4.24). Elektrik alan arttıkça sürüklenme hızının da doğrusal bir şekilde arttığı görüldü. Örneğe uygulanabilen en yüksek elektrik alan değerindeki (120 kV/m) maksimum sürüklenme hızı  $3,2 \times 10^4\text{ m/s}$ 'dir. Farklı frekanslarda pulslu voltajlar uygulanmasına rağmen sürüklenme hızında bir farklılık gözlenmedi.

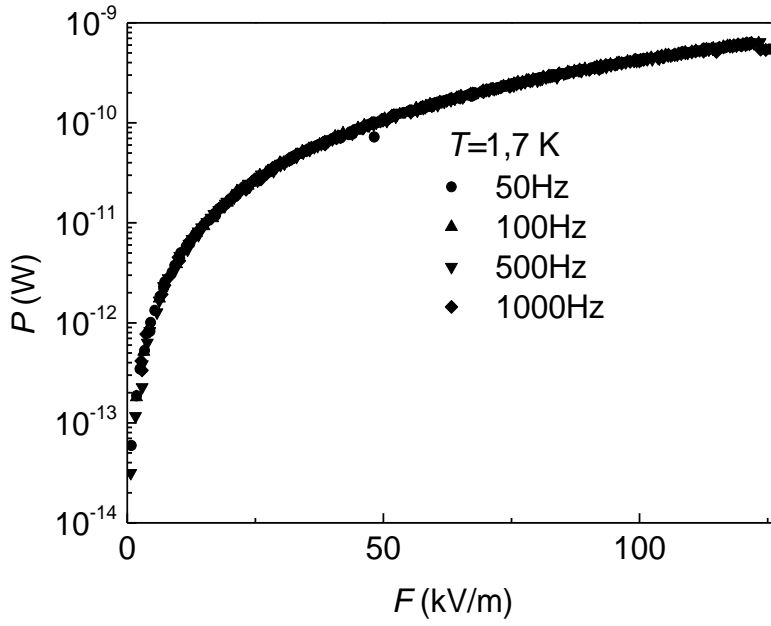


Şekil 4.26. GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre sürüklenme hızının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7\text{ K}$ )

Elektrik alana bağılı mobilite Eş. 4.3 kullanılarak elde edildi (Şekil 4.25) ve mobilitenin artan elektrik alan ile değişmediği görüldü. Mobilitede bir değişim elde edilemediğinden mobilitenin karşılaştırılması yöntemi uygulanamadı ve elektron sıcaklığı elde edilemedi. Elektrik alana bağılı mobilite değeri ( $0,27 \mu^2V^{-1}s^{-1}$ ) ile sıcaklığa bağılı mobilite değeri ( $0,28 \mu^2V^{-1}s^{-1}$ ) [84,85] karşılaştırıldığında aralarında farkın çok küçük olduğu görüldü. Mobilitede de uygulanan voltajların frekanslarına göre bir değişim meydana gelmedi. Elektron başına güç kaybı Eş 4.5 ile elde edildi. Elektrik alan arttıkça elektron başına güç kaybı da logaritmik olarak arttığı görüldü. Uygulanan voltajların frekansına göre bir değişim görülmedi (Şekil 4.26).



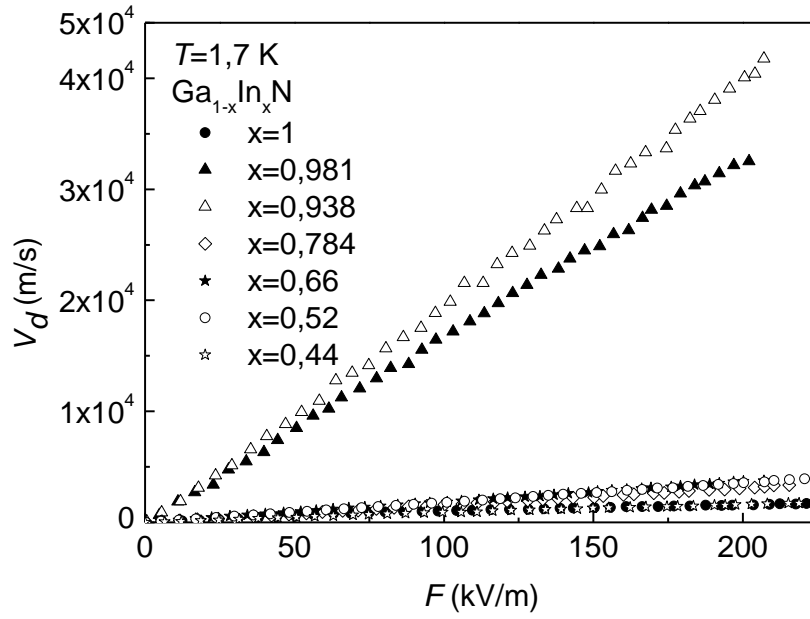
Şekil 4.27. GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre mobilitenin elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)



**Şekil 4.28.** GaN/AlN/InN heteroeklem örnekte uygulanan voltajın frekansına göre elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)

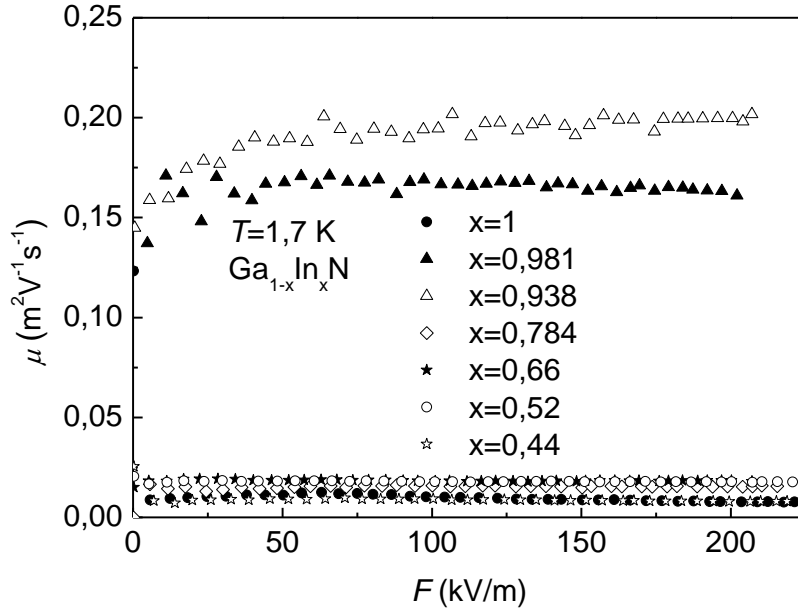
#### 4.5. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Yapılar

Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örnekler üzerine  $T=1,7$  K'de 200 ns puls genişliği olan 0-200 V aralığında pulslu voltajlar uygulandı. Sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimlerinin In konsantrasyonuna bağlılığı incelendi. Sürüklenme hızının artan elektrik alan ile doğrusal arttığı görüldü (Şekil 4.27). Sürüklenme hızının elektrik alan ile değişiminde In konsantrasyonuna bağlı bir davranış gözlenmedi.

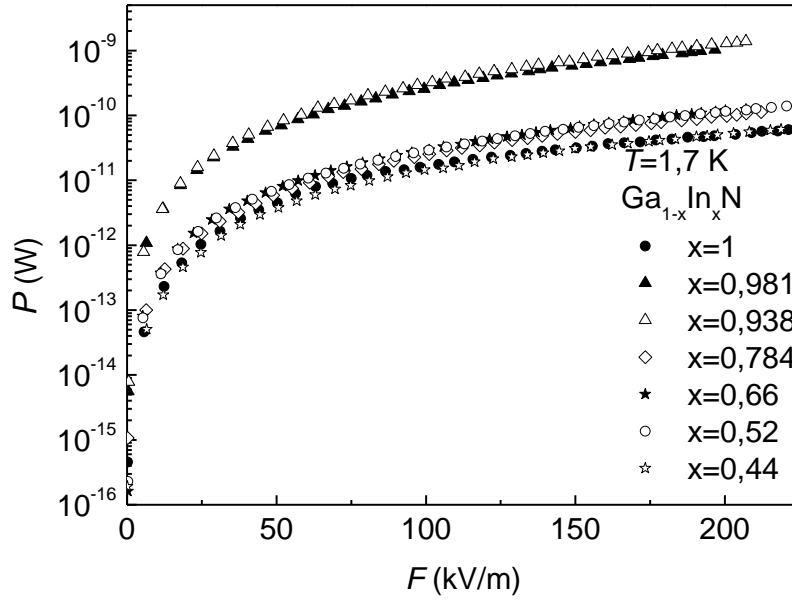


**Şekil 4.29.** Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde sürüklenme hızının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7$  K)

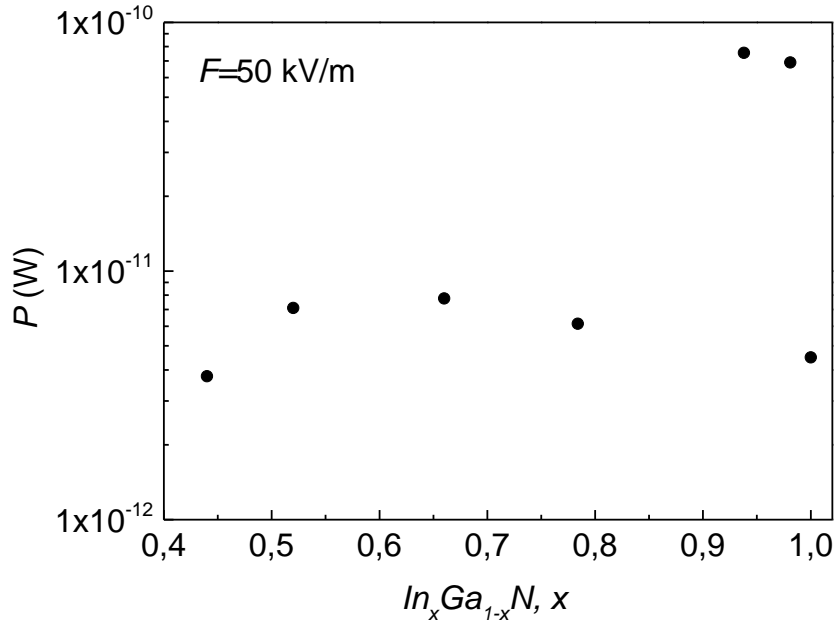
Şekil 4.28’de farklı In konsantrasyonlarındaki  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerin elektrik alana bağlı mobiliteleri yer almaktadır. Hiçbir örnekte mobilitenin elektrik alan ile değişmediği görüldü ve mobilitenin karşılaştırılması yöntemi uygulanamadı. Mobilitenin elektrik alan ile değişimleri de In konsantrasyonlarına bağlı bir davranış elde edilemedi. Eşitlik 4.5 kullanılarak elde edilen elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimlerinden In konsantrasyonlarına bağlı bir davranış elde edilemedi (Şekil 4.29, Şekil 4.30).



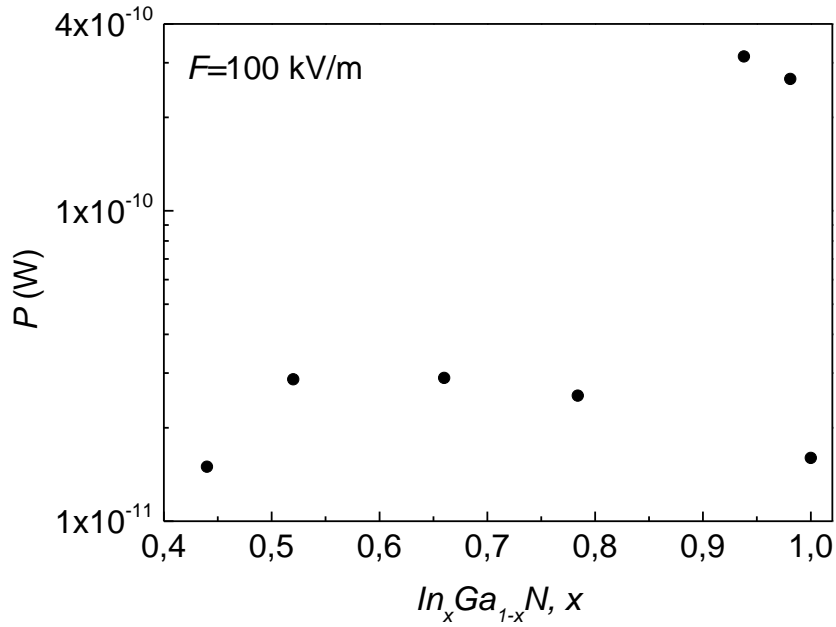
Şekil 4.30. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde mobilitenin elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7\text{ K}$ )



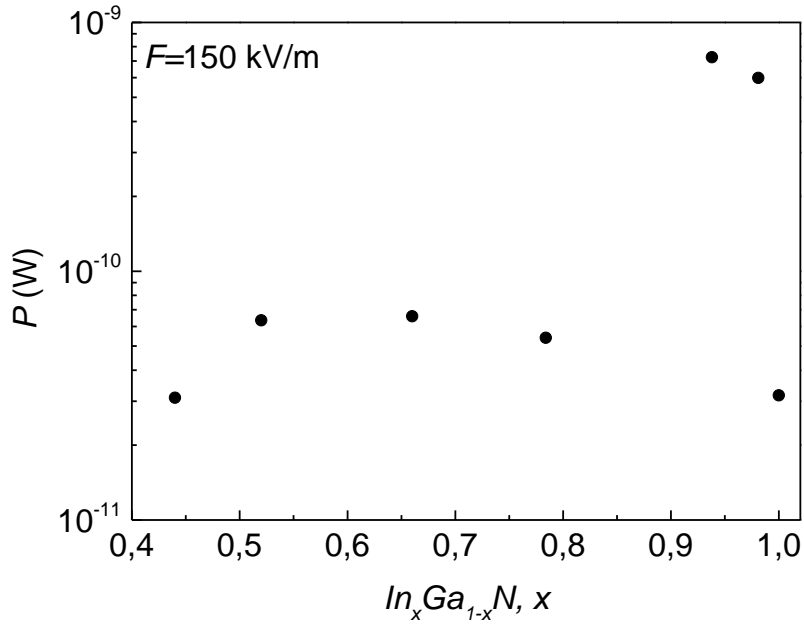
Şekil 4.31. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimi ( $T=1,7\text{ K}$ )



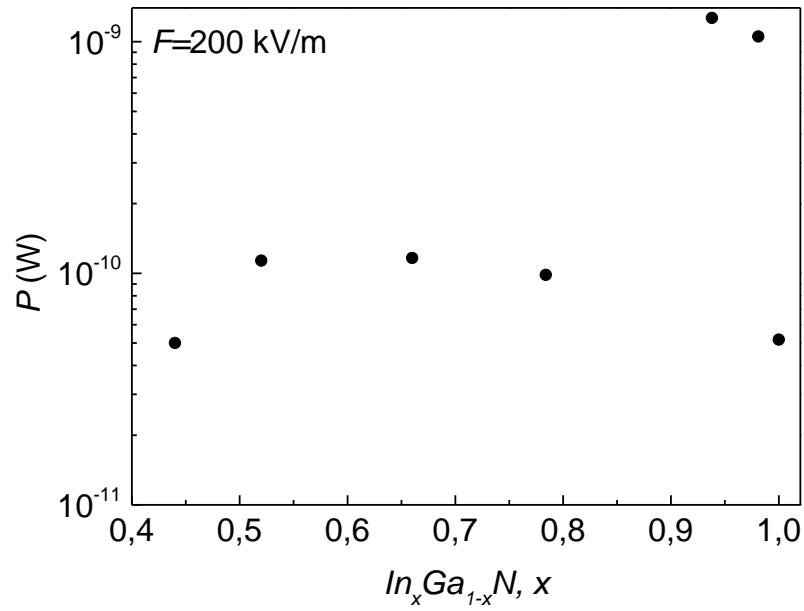
Şekil 4.32. Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde elektron başına güç kaybının In oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)



Şekil 2.30. (Devam) Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde elektron başına güç kaybının In oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)

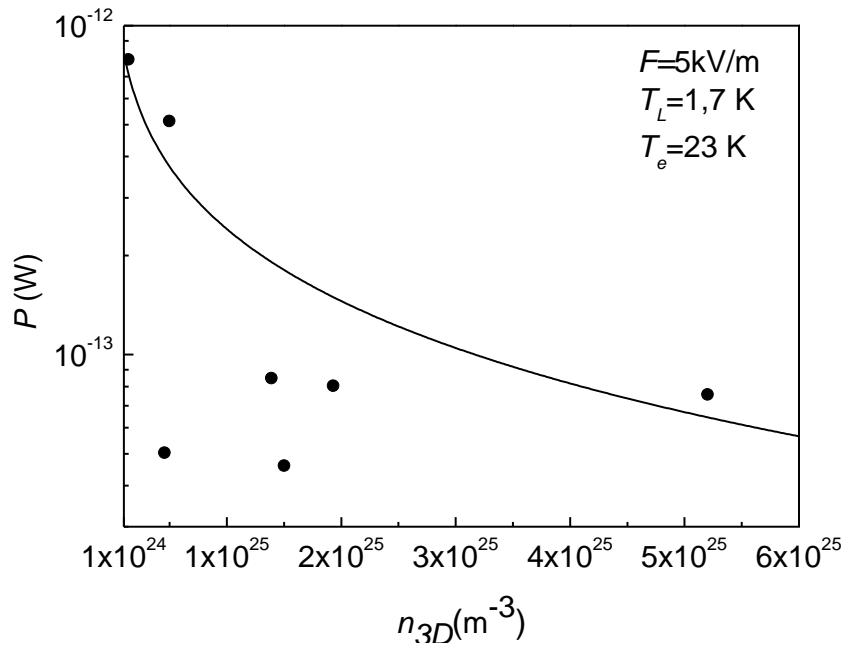


Şekil 2.30. (Devam) Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde elektron başına güç kaybının In oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)



Şekil 2.30. (Devam) Farklı In konsantrasyonlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde elektron başına güç kaybının In oranına göre değişimi ( $T=1,7$  K)

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğuna göre değişimi (içi dolu daireler) ve Eş. 2.14'den elde edilen kuramsal uyum eğrisi (sürekli çizgi) Şekil 4.31'de yer almaktadır. Eşitlik 2.14'de  $T_e=23$  K alındığında kuramsal uyum eğrisi ile deneysel sonuçların uyum gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.31). Üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu arttıkça elektron başına güç kaybının azaldığı görüldü. Bu davranış daha önce GaN temelli sistemlerden elde edilmiş olan davranış ile benzerdir [62].



**Şekil 4.33.**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  örneklerde elektron başına güç kaybının üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu ile değişimi ( $F=5\text{ kV/m}$ ,  $T_L=1,7\text{ K}$ ,  $T_e=23\text{ K}$ )

## 5. SONUÇLAR

$Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$  heteroeklem örnek,  $Al_{0,83}In_{0,17}N/AiN/GaN$  heteroeklem örnek,  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örnekler,  $GaN/AiN/InN$  heteroeklem örnek ve  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde yüksek elektrik alanda sıcak elektron güç kaybını incelemek için pulslu I-V ölçümleri yapıldı. Tüm örnekler için sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimleri elde edildi. Tüm örneklerde sürüklenme hızı artan elektrik alan ile doğrusal bir artış gösterdi.  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$  ve  $Al_{0,83}In_{0,17}N/AiN/GaN$  heteroeklem örneklerde elektrik alanın artmasıyla mobilitenin azaldığı gözlemlendi. Bu sayede iki örneğe mobilitelerin karşılaştırılması yöntemi uygulandı ve elektron sıcaklığı elektrik alanın fonksiyonu olarak elde edildi.  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N/AiN/GaN$  heteroeklem örnekte 1 kV/m'lik elektrik alan değerinde elektron sıcaklığının örgü sıcaklığı üzerine çıktığı görüldü.  $F=25$  kV/m'lik elektrik alanda elektron sıcaklığı 200 K olarak elde edildi. Elektron sıcaklığının 150 K'den büyük olduğu bölgede elektron başına güç kaybı optik fonon emisyonu ile gerçekleştiği ve kuramsal hesaplamalarla uyumlu olduğu görüldü.  $Al_{0,83}In_{0,17}N/AiN/GaN$  heteroeklem örnekte 25 kV/m'lik elektrik alan değerinde elektron sıcaklığı örgü sıcaklığı üzerine çıkmaya başlamıştır. Bu örneğe maksimum 260 kV/m'lik elektrik alan uygulandı ve bu değere karşılık elektron sıcaklığı 188 K olarak elde edildi. Bu örnekte de elektron sıcaklığının 150 K'den büyük olduğu bölgede optik fonon emisyonu ile güç kaybı meydana geldiği görüldü. Diğer örneklerin elektrik alana bağlı mobilitelerinde bir değişim elde edilemedi. Bu yüzden mobilitelerin karşılaştırılması yöntemi kullanılmadı ve elektron sıcaklığı elde edilemedi.  $GaN/AiN/InN$  heteroeklem örneğe ve  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerine farklı frekanslarda pulslu voltajlar uygulandı. Bu ölçümler sonucunda sürüklenme hızının, mobilitenin ve elektron başına güç kaybının elektrik alan ile değişimlerinde uygulanan voltajın frekansına bağlılık olmadığı görüldü.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerde ölçümler farklı sıcaklıklarda tekrarlandı ve tüm sıcaklıklarda aynı güç kaybı eğrisi elde edildi. Bu örneklerde elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının sıcaklık ile değişmediği görüldü.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerde nitrür oranına göre elektrik alana

bağlı elektron başına güç kaybı incelendiğinde nitrür oranı arttıkça güç kaybının da arttığı görüldü.  $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$  kuantum kuyu örneklerde üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu arttıkça elektron başına güç kaybının azaldığı elde edilmiştir.  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  örneklerde In oranına göre elektrik alana bağlı elektron başına güç kaybının değişimi incelendi. Bu örneklerde In oranına bağlı bir değişim elde edilemedi. Üç boyutlu taşıyıcı yoğunluklarına göre elektron başına güç kaybı incelendiğinde, üç boyutlu taşıyıcı yoğunluğu arttıkça güç kaybının düştüğü görüldü.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Wu, Y., Keller, B.P., Keller, S., Kapolnek, D., Kosodoy, P., Denbaars, S.P., Mishra, J.K., 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1438; Nakamura, S., Fasol, G., 1997 *The Blue Laser Diode*, Springer; Paiva, R de., Alves, J.L.A., Nogueira, R.A., de Oliveira, C., Alves, H.W.L, Scolfaro, L.M.R., Leite, J.R., 2002 *Mat. Sci. Eng.* **B93** 2.
- [2] Kurakin, A.M., Vitusevich, S.A., Danylyuk, S.V., Hardtdegen, H., Klein, N., Bougrioua, Z., Naumov, A.V., Belyaev, A.E., 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 073703.
- [3] Danilchenko, B.A., Zelensky, S.E., Drok, E., Vitusevich, S.A., Danylyuk, S.V., Klein, N., Lüth, H., Belyaev, A.E., and Kochelap, V.A., *Phys. Stat. Sol. (b)*, **243** 1529 (2006) Pearton, S.J., Zolper, J.C., Shul, R.J., and Ren, F., *J. Appl. Phys.* **86**, 1 (1999).
- [4] Lisesivdin, S.B., Yıldız, A., Acar, S., Kasap, M., and Ozcelik, S., Ozbay, E., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 102113 (2007) Khan, M.A., Bhattarai, A., Kuznia, J. N., and Olson, D. T., *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1214 (1993) Wu, Y.F., Keller, B.P., Keller, S., Kapolnek, D., Kozodoy, P., Denbaars, S.P., and Mishra, U.K., *IEEE Electron Device Lett.* **17**, 455 (1996).
- [5] Anwar, A.F.M., Wu, S.,and Richard, T., *Webster IEEE Transactions On Electron Devices*, **48**, 567 (2001).
- [6] Jardel, O., Callet, G., Dufraisse, J., Piazza, M., Sarazin, N., Chartier, E., Oualli, M., Aubry, R., Reveyrand, T., Jacquet J.D., Poisson M-A di, F., Morvan, E., Piotrowicz, S., and Delage, S.L., *Int. J. Microwave Wireless Tech.*, **3**, 301, 2011.
- [7] Sun, Y., Vaughan, M.P., Agarwal, A., Yilmaz, M., Ulug, B., Ulug, A., Balkan, N., Sopanen, M., Reentilä, O., Mattila, M., Fontaine, C., and Arnoult, A., *Phys. Rev. B*, **75**, 205316, 2007.
- [8] Borchert, B., Egorov, A.Y., Illek, S., Komainda, M., and Riechert, H., *Electron. Lett.* **35**, 2204, 1999.

- [9] Tournie, E., Pinault, M.A., Laugt, M., Chauveau J. M., Trampert A., and Ploog K. H., *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1845, 2003.
- [10] Wagner, A., Ellmers, C., Hohnsdorf, F., Koch, J., Agert, C., Leu, S., Holfmann, M., Stolz, W., and Ruhle, W.W., *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 271, 2000.
- [11] Haris, J.S., *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 880, 2002.
- [12] Gokden, S., *Physica E*, 23, **19** (2004).
- [13] Majid, M.H., and Umesh, K.M., *Semiconductors and Semimetals*, **41**, ed. Willardson, R. K., Academic Press, 157-217.
- [14] Lisesivdin, S.B., Balkan, N., Makarovskiy, O., Patane, A., Yildiz, A., Caliskan, M.D., Kasap, M., Ozcelik, S., Ozbay, E., *J. Appl. Phys.* **105** 093701, 2009.
- [15] Seeger, K., *Semiconductor Physics - An Introduction, 7<sup>th</sup> edition, Springer-Verlag*, 1999.
- [16] Price, P.J., *J. Appl. Phys.*, **53**, 1982.
- [17] Wolfe, C.M., Holonyak, N., Stillman, G.E., “Physical Properties of Semiconductors”, Prentice-Hall, Inc., USA 1989.
- [18] Altinöz, S., “In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As/ In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As Heteroeklem Örneklerde Mobilite Ölçümleri”, Bilim Uzmanlığı Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [19] Tıraş, E., “In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>1-y</sub>Al<sub>y</sub>As Heteroeklemlerin Elektronik Transport Özellikleri ve İki-Boyutlu Elektronların Güç Kaybı Mekanizmalarının Shubnikov-de Haas Osilasyonları Yöntemiyle Araştırılması” Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [20] Çelik, Ö., “AlGaIn/GaN Heteroeklemlerde Sıcak Elektron Güç Kaybı Mekanizmaları” Bilim Uzmanlığı Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [21] Ilgaz, A., “GaN/AlGaIn HEMT Yapılarda Saçılma Mekanizmaları” Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

- [22] Zanato, D., “Optoelektronic Properties of Group III-N Semiconductors”, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.), Department of Electronic Systems Engineering University of Essex, 2005.
- [23] Shockley, W., *Bell Syst. Tech. J.* **30**, 990, 1951.
- [24] Ridley, B.K., Watkins, T.B., *Proc. Phys. Soc.*, **78**, 293, 1961.
- [25] Gunn J.B., *Solid State Comm.* **1**, 88, 1963.
- [26] Seiler, D.G. and Stephens, A.E., “Landau Level Spectroscopy vol. 2”, ed Landwehr, G., and Rashba, E.I., Amsterdam: North-Holland, 1991.
- [27] Shah, J., Pinczuk, A., Störmer, H.L., Gossard, A.C. and Wiegmann, W., *Appl. Phys Lett.*, **44**, 1984.
- [28] Sakaki, H., Hirakawa, K., Yoshino, J., Svensson, S. P., Sekiguchi, Y., Hotta, T. and Nishii, S., *Surf. Sci.*, **142**, 1984.
- [29] Ridley, B.K., “Quantum Processes in Semiconductors”, Clarendon Press-Oxford, 1988.
- [30] Ridley, B.K., *Rep. Prog. Phys.*, **54**, 1991.
- [31] Okuyama, Y. and Tokuda, N., *Phys. Rev. B*, **40**, 1989.
- [32] Balkan, N., Çelik, H., Vickers, A., Cankurtaran, M., *Phys. Rev. B*, **52**, 1995.
- [33] Gunn, J.B., Progress in Semiconductors vol 2, ed. A. F. Gibson, New York, Wiley, p 213, 1957.
- [34] Schmidt-Tiedemann, K.J., Experimental evidence of birefringence by free carriers in semiconductors, *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 372-374, 1962.
- [35] Paige, E.G.S., Progress in Semiconductors vol 8, ed. A. F. Gibson, New York, Wiley, p 1, 1964.
- [36] Conwell, E.M., High field transport in semiconductors, Academic Press, 1967.
- [37] Kogan, S.M., *Sov. Phys. Solid State* **4**, 1813, 1963.
- [38] Karpus, V., Energy relaxation of two-dimensional electrons due to piezoacoustic scattering, *Sov. Phys. Semicond.*, **22**, 268-273, 1988.

- [39] Ridley, B.K., Electron-phonon interaction in 2D systems, ed. J. Shah, Academic press, New York, 1992.
- [40] Ridley, B.K., Electrons and phonons in semiconductor multilayers, Cambridge University Press, USA, 1997.
- [41] Cankurtaran, M., Çelik, H., Balkan, N., *Phys. Status Solidi B*, **229**, 2002.
- [42] Budd, H.F., *Phys. Rev.*, **140**, A2170, 1966.
- [43] Budd, H.F., *Phys. Rev.*, **158**, 798, 1967.
- [44] Kurosawa, T., *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.*, **20**, 1405, 1966.
- [45] Fawcett, W., Boardman, A.D. and Swain, S., *J. Phys. Chem. Solids*, **31**, 1963, 1970.
- [46] Rees, H.D., *J. Phys. C*, **5**, 641-656, 1972.
- [47] Fawcett, W., *Electrons in Crystalline Solids*, ed, A. Salam, IAEA, Vienna, p. 531, 1973.
- [48] Nag, B.R., *Theory of Electrical Transport in Semiconductors*, Oxford, Pergamon, 1972.
- [49] Jacoboni, C. and Reggiani, L., *Rev. Mod. Phys.*, **55**, 645, 1983.
- [50] Bauer, G., *Solid State Physics*, vol 74, ed G. Hohler, Berlin, Springer, p 1, 1974.
- [51] Balkan, N., Ridley, B.K., Emeny, M., and Goodridge, I., *Semicond. Sci. Technol.*, **4**, 852, 1989.
- [52] Balkan, N., Gupta, R., Daniels, M.E., Ridley, B.K. and Emeny, M., *Semicond. Sci. Technol.* **5**, 986, 1990.
- [53] Gupta, R., Balkan, N. and Ridley, B.K., *Semicond. Sci. Technol.* **7**, 274, 1992.
- [54] Balkan, N., Arikan, M.C., Gokden, S., Tilak, V., Schaff, B., Shealy, R.J., J. *Phys. Condens. Matter* **14**, 3457, 2002.
- [55] Mazzucato, S., Arikan, M.C., Balkan, N., Ridley, B.K., Zakhleniuk, N., Shealy, R.J., Schaff, B., *Physica B*, **314**, 55, 2002.

- [56] Zanato, D., Balkan, N., Ridley, B.K., Hill, G. and Schaff, W.J., *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 1024, 2004.
- [57] Stanton, N.M., Hawker, P., Kent, A.J., Cheng, T.S., and Foxon, C.T., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **176**, 369, 2011.
- [58] Ilgaz, A., Gotken, S., Tulek, R., Teke, A., Ozcelik, S. and Ozbay, E., *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **55**, 30102, 2011.
- [59] Balkan, N., *Semiconductor Research Springer Series in Materials Science*, **150**, 2012.
- [60] Balkan, N., Gupta, R., Daniels, M.E., Ridley, B.K. and Emeny, M., *Semiconductor Sci. Technol.*, **5**, 986-990, 1990.
- [61] Stanton, N.M., Kent, A.J., Akimov, A.V., Hawker, P., Cheng, T.S. and Foxon, C.T., *Phys. Status Solidi a*, **176**, 369, 1999.
- [62] Stanton, N.M., Kent, A.J., Akimov, A.V., Hawker, P., Cheng, T.S., Foxon, C.T., *J. Appl. Phys.*, **89**, 973, 2001.
- [63] Bauer, G., and Kahlert, H., *Phys. Rev. B*, **5**, 566, 1972.
- [64] Gren, R.F., *J. Electr. Control*, **3**, 387, 1957.
- [65] Jasiukiewicz, C., Karpus, V., *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 1777, 1986.
- [66] Tıraş, E., Cankurtaran, M., Çelik, H. and Balkan, N., *Phys. Rev. B*, **64**, 2001b.
- [67] Tiras, E., Ardali, S., Arslan, E., and Ozbay, E., *J. Electron. Mater.*, **41**, 2350, 2012.
- [68] Tiras, E., Celik, O., Mutlu, S., Ardali, S., Lisesivdin, S.B., Ozbay, E., *Superlattice and Microstruc.*, **51**, 733, 2012.
- [69] Hirakawa, K. and Sakaki, H., *Phys. Rev. B*, **33**, 1986.
- [70] Blyumina, M.G., Denisov, A.G., Polyanskaya, T.A., Savel'ev, I.G., Senichkin, A.P., and Shmartsev, Yu.V., *JETP Lett.*, **44**, 1986.
- [71] Manion, S.J., Artaki, M., Emanuel, M.A., Coleman, J.J. and Hess, K. , *Phys. Rev. B*, **35**, 1987.

- [72] Kreshchuk, A.M., Martisov, M.Yu., Polyanskaya, T.A., Savel'ev, I. G., Saidashev, I.I., Shik, A.Ya., and Shmartsev, Yu.V., *Sov. Phys. Semicond.*, **22**, 1988.
- [73] Kreshchuk, A.M., Martisov, M.Yu., Polyanskaya, T.A., Savel'ev, I.G., Saidashev, I.I., Shik, A.Ya., and Shmartsev, Yu.V., *Solid State Commun.*, **65**, 1988.
- [74] Çelik, H., Cankurtaran, M., Balkan, N. and Bayraklı, A., *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 2002.
- [75] Çelik, O., Tiras, E., Ardali, S., Lisesivdin, S.B., Ozbay, E., *Cent. Eur. J. Phys.*, **10**, 485-491, 2012.
- [76] Duboz, J.Y., *J. Appl. Phys.* **92**, 4312, 2002.
- [77] Ridley, B.K., *Semicond. Sci. Technol.* **4**, 1142, 1989.
- [78] Romero, N.A, "Johnson Noise", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1998.
- [79] Matulionis, A., Liberis, J., Ardaravicius, L., Smart, J., Pavlidis, D., Hubbard, S. and Eastman, L.F., *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, **12**, 459 2002.
- [80] Tsen, K.T., Kiang, J.G., Ferry, D.K. and Morkoc, H., *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112111, 2006.
- [81] Matulionis, A., Liberis, J., Sermuksnis, E., Xie, J., Leach, J.H., Wu, M. and Morkoc, H., *Semicond. Sci. Technol.* **23**, 075048, 2008.
- [82] Danilchenko, B.A., Zelensky, S.E., Drok, E., Vitusevich, S.S., and Danylyuk, S.V., *Phys. Status Solidi B*, **243**, 1529, 2006.
- [83] Ardali, S. , Tiras, E., *Physica E*, **47**, 207, 2013.
- [84] Ardali, S., Tiras, E., Gunes, M., Balkan, N., Ajagunna, A.O., Iliopoulos, E., and Georgakilas, A., *Phys. Status Solidi c*, **8**, 1620, 2011.
- [85] Ardali, S., Tiras, E., Gunes, M., Balkan, N., Ajagunna, A.O., Iliopoulos, E. and Georgakilas, A., *Phys. Status Solidi c*, **9**, 997, 2012.