

**NİTRAT BAZLI YARIİLETKEN
NANOYAPILARDA
KAPASİTANS-VOLTAJ ÖLÇÜMÜ**

Esra YAZICI
Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı
Ağustos 2011

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Esra Yazıcı'nın “Nitrat Bazlı Yarıiletken Nano Yapılarda Kapasitans Voltaj Ölçümü” başlıklı **İleri Teknolojiler** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 11.07.2011 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. MUSTAFA RAMİS ÖKSÜZOĞLU	
Üye	: Doç. Dr. MURAT TANIŞLI	

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NİTRAT BAZLI YARIİLETKEN NANOYAPILARDA KAPASİTANS-VOLTAJ ÖLÇÜMÜ

Esra YAZICI

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Engin TIRAŞ

2011, 48 sayfa

Bu tezde oda sıcaklığında InN ve $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ örneklerde kapasitans-voltaj ($C-V$) ve kapasitans frekans ($C-f$) ölçümleri yapıldı. Deneylerde kullanılan örnekler *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) büyütme sistemi ile, Crete Üniversitesi (Yunanistan) ve LAAS-CNRS (Fransa) tarafından büyütüldü. Crete Üniversitesi'nde büyütülen InN örnekler, InN tabaka kalınlığı $1,08\ \mu\text{m}$, $2,07\ \mu\text{m}$ ve $4,7\ \mu\text{m}$ olan hacimli (bulk) örneklerdir. LAAS-CNRS tarafından üretilen $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ kuantum kuyu örnekleri, nitrür oranı %1 ve %0.4 olan katkısız örnek, Si katkılı n-tipi (nitrür oranı % 1.5) ve Be katkılı p-tipi (nitrür oranı %1.5) örneklerdir. Kapasitans-voltaj ($C-V$) ölçümleri 1MHz frekans altında yapıldı ve elde edilen verilerle derinliğe bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyonları elde edildi. Kapasitans frekans ($C-f$) ölçümleri farklı gerilimler uygulanarak gerçekleştirildi. Bu ölçümlerle örneklerin elektriksel özellikleri incelendi.

Anahtar Kelimeler: Kapasitans-Voltaj ($C-V$), Kapasitans Frekans ($C-f$), Schottky ve Ohmik Kontak, Taşıyıcı Konsantrasyonu.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

CAPACITANCE-VOLTAGE MEASUREMENTS IN NITRIDE-BASED NANO SEMICONDUCTORS

Esra YAZICI

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Advanced Technologies Program

Supervisor :Assoc. Prof. Dr. Engin TIRAŞ

2011, 48 pages

In this thesis, capacitance-voltage (C-V) and capacitance-frequency (C-f) measurements have been made in InN and $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ samples at room temperature. Samples were grown at Crete University (Greece) and LAAS-CNRS (France) using Molecular Beam Epitaxy (MBE) growth system. InN bulk samples with thicknesses 1.08, 2.07 and 4.7 μm were grown at Crete University and undoped with nitrogen content 1% and 0.4%, n-type Si-doped with nitrogen content 1.5% and p-type Be-doped with nitrogen content 1.5% $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ quantum well samples were grown at LAAS-CNRS. Capacitance-voltage (C-V) measurements were performed at 1MHz and depth dependent carrier concentrations were evaluated from these datas. Capacitance-frequency (C-f) measurements were performed at different applied voltage. Electrical properties of samples were investigated with these measurements.

Keywords: Capacitance-Voltage (C-V), Capacitance-Frequency (C-f), Schottky and Ohmic Contac, Carrier Concentration.

TEŞEKKÜR

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

Çalışmada kullanılan örnekleri sağlayan **Prof. Dr. Naci Balkan**'a (University of Essex, U.K.) teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda kullandığım Test Ünitesinin kullanımını sağladığı için **Prof. Dr. Önder ORHUN**'a teşekkür ederim.

Yardımlarını gördüğüm, çalışma arkadaşlarım, **Özlem Çelik, Selman Mutlu ve Şükrü Ardalı**'ya teşekkür ederim.

Çalışma süresince maddi ve manevi desteği için annem **Ayşe Yazıcı**'ya, babam **Rahmi Yazıcı**'ya kardeşlerim **Harun Yazıcı, Sema Yazıcı** ve **Eda Yazıcı**'ya ve arkadaşlarım **Zeynep, Özlem, Emel, Özge, Ayşe, Sema ve Gülizar**'a teşekkür ederim.

Esra YAZICI

Temmuz 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2.InN ve GaInNAs TABANLI YAPILAR.....	5
2.1. InN Tabanlı Yapılar.....	5
2.2. GaInNAs Tabanlı Yapılar.....	7
3. KURAMSAL BİLGİLER.....	11
3.1. Giriş.....	11
3.2. Schottky Kontak.....	12
3.3. Ohmik Kontak.....	15
3.4. Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri.....	17
4. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	23
4.1. InN ve GaInNAs Örneklerinin Hazırlanması.....	23
4.2. Deney Düzenneği.....	24
5. ÖLÇÜMLER	27
5.1. InN Ölçümleri.....	27
5.1.1. InN Örneklerinde Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri.....	27

5.1.2. InN Örneklerinde Kapasitans-Frekans Ölçümleri.....	32
5.2. GaInNAs Ölçümleri.....	35
5.2.1. GaInNAs Örneklerinde Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri.....	33
5.2.2. GaInNAs Örneklerinde Kapasitans-Frekans Ölçümleri.....	41
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	44
KAYNAKLAR.....	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

2.1. Bazı III-V ve II-IV yarıiletken bileşiklerin yasak enerji aralığının örgü parametresine bağlı değişimi [33]	5
2. 2. InN'ın wurtzite yapısı ve örgü sabitleri [36].....	7
2.3. Grup III-V yarıiletkenlerindeki örgü sabiti ve bant aralığı enerjisi ilişkisi [37]	10
2.4. GaINAs, GaNAs ve GaInNAs için bant sırası diyagramı.....	10
3.1. Metal n-tipi yarıiletken çifti (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra. Metalin iş fonksiyonunu(ϕ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) daha büyüktü ($\phi_m > \phi_s$).....	13
3.2. Metal n-tipi yarıiletken sistem. Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyüktür. (a) denge durumunda, (b) ileri-besleme, (c) ters besleme [32]	14
3.3. Metal p-tipi yarıiletken ohmik kontak için ideal bant diyagramı (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra, (c) $V \neq 0$ durumunda [38]	16
3.4. n-tipi yarıiletken Schottky kontak için, (a) enerji bant diyagramı, (b) elektrik alan, (c) potansiyel dağılımı, (d) uzay yük dağılımı	20
4.1. Kapasitans-voltaj ve Kapasitans-frekans ölçüm düzeneği.....	25
5.1. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerde uygulanan voltaj karşı kapasitans davranışları.....	27
5. 2. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin C-V ölçümlerinden elde edilen derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları.....	31
5. 3. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin farklı gerilimlerdeki kapasitans frekans (C-f) ölçümleri.....	33
5. 4. Oda sıcaklığında , (a) Be-GaInNAs, (b) Si-GaInNAs, (c) %1 N-GaInNAs, (d) % 0.4 N-GaInNAs örneklerinde kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri.....	36

5.5. Oda sıcaklığında a) Be-GaInNAs, b) Si-GaInNAs, c) %1 N GaInNAs, d) % 0.4 N- GaInNAs örneklerinde derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları	39
5.6. (a), (b) GaInNAs örneklerinin farklı gerilimlerdeki kapasitans- frekans ölçümleri	41

ÇİZELGELER LİSTESİ

4.1	G1382, G1383, G1424 kodlu örneklerin tabaka yapısı.....	23
4.2	$Ga_{1-x}In_xN_yA_{1-y}$ örneklerinin tabaka yapısı.....	24
5.1	G1382, G1383, G1424 kodlu örneklerin taşıyıcı yoğunlukları.....	29
5.2	$Ga_{1-x}In_xN_yA_{1-y}$ örneklerinin kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları.....	37

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Temas alanı
A^*	Etkin Richardson sabiti
C	Ölçülen kapasite
W	Azalma bölgesi genişliği
e	Bir elektronun yükü
E_c	Yarıiletkenin iletkenlik bandının enerji seviyesi
E_F	Fermi seviyesi
E_{FS}	Fermi Stabilizasyon Enerjisi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi seviyesi
E_m	Yarıiletken içerisindeki elektrik alanın en yüksek değeri
E_s	Yarıiletkenin dolu bandının vakum seviyesi altındaki derinliği
E_v	Valans bandın enerji seviyesi
E_c	İletim bandın enerji seviyesi
F	Ölçülen Frekans
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Φ_B	Engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
K	Boltzman sabiti
h	Planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s)
J	Akım yoğunluğu
χ	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
MBE	Molecular beam epitaxy
m_e	Elektronun etin kütlesi
N_A	Alıcı yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
$n(x)$	Uzay yük bölgesindeki elektron yoğunluğu
$p(x)$	Uzay yük bölgesindeki hole yoğunluğu
Q_s	Birim alan başına düşen pozitif yük

R_c	Kontak direnci
ρ	Uzay yük yoğunluğu
T	Sıcaklık
T	Periyot
V	Kontağa uygulanan gerilim
V_{bi}	Arayüzey tabakası boyunca düşen gerilim
W	Azalma bölgesi genişliği

1.GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisinde ve aygıt fiziğinde, yarıiletken aygıtların ve ilgili teknolojinin gelişmesi, yüzeyde ve arayüzeyde yapılan temel araştırmalara bağlıdır.

Son yirmi yılda nitratlı yarıiletken teknolojisi etkileyici bir gelişme göstermektedir ve bu gelişmedeki en büyük başarı yüksek şiddetli mavi LED lerde ve lazer diyot aygıtlarda olmuştur.

Bu yapılardan wurtzite nitrat heteroyapıların ileri optik ve elektronik aygıt olarak uygulanması için yüzey ve arayüzeylerindeki elektronik özelliklerin bilinmesine ihtiyaç duymaktadır [1].

Son yıllarda grup III nitratlı bileşikler ve onların alaşımları yarıiletken materyallerinin araştırılması oldukça artmıştır. Bu yapılar ayarlanabilir bant aralığı özelliğinden dolayı çeşitli optoelektronik aygıtlarda ve fotovoltaiiklerde kullanılmaktadır [2-11].

Özellikle InN, grup III-nitrat yarıiletkenlerinin özel bir bileşenidir ve son zamanlarda çok fazla dikkat çekmektedir. InN'ın optiksel ve elektriksel özellikleri 30 yıldır araştırılmaktadır fakat fiziksel özellikleri yeteri kadar bilinmemektedir. Son yıllara kadar InN'ın bant aralığının 1.9 eV olduğuna inanılıyordu. Ancak son zamanlarda, yüksek kalitede MBE tekniği ile büyütülen örneklerle yapılan deneylerde bant aralığının 0.7 eV civarında olduğunu öngörmüştür [3-11]. Bu değer grup III-nitrat bileşenlerinin bant aralığı genişliğinin yakın kızıl ötesinden mor ötesi kadar yayıldığını gösterir. Bazı bileşiklerin kullanılabilirliği yeni materyallerin araştırılmasına imkân sunmaktadır. Bunlardan bazıları tandem güneş hücreleri [12], ışık yayan diyotlar, lazer diyotlar, yüksek frekanslı transistörler [13] örnek olarak verilebilir. Bunlara ek olarak GaN veya GaAs kıyasla InN üstün bir taşıyıcılığa sahiptir. InN, grup III-nitratlar içinde en küçük etkin kütleye sahip olan bileşiktir. Sonuç olarak geniş bir doyumluk ve yüksek sürüklenme hızlarına sahip olması beklenmektedir. Bu özelliklerinden dolayı, InN yüksek hızlı ve yüksek frekanslı elektronik aygıtlarda kullanılabilir [14].

Literatürde, AlN ve GaN bileşikleriyle karşılaştırıldığında InN hakkındaki bilgiler oldukça azdır. Bu yapılarda tek kristali hazırlaması oldukça zor ve zahmetli bir iştir. Bu malzemeleri tanımlamak ve büyütebilmek için birçok anahtar parametrenin elde edilmesi gereklidir. Bu parametreleri elde etmek için birçok deneysel sonuca ihtiyaç olacaktır. Bu sebepten dolayı InN yapıları üzerinde oldukça fazla bilimsel çalışma yapılmaktadır. InN yapıları ilk kez yaklaşık 30 yıl önce azot atmosferinde metalik indiyumun buharlaştırılarak radyo frekansı ile saçılmasıyla hazırlanmıştır [15]. Bu örnekler polikristal formundadır ve elektron yoğunluğu 10^{18} cm^{-3} ile mobilitesi ise $250 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$ civarındadır. Daha sonraları farklı araştırma grupları InN büyüttümler ve elektron yoğunluklarının 10^{19} cm^{-3} mobilitelerinin ise $100 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$ civarında olduğu bulunmuştur [16-17]. Foley ve Tansley (1984) tarafından yapılan çalışmada yapılanlardan farklı olarak mobiliteleri $3980 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$ ve elektron yoğunluğu ise 10^{16} cm^{-3} olarak bulunmuştur [18]. Aynı örnekler aynı deney şartları ve koşulları sağlanarak tekrar üretilmesine rağmen elektron yoğunluğu $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak ve mobiliteleri de $100 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$ den az olarak bulunmuştur [19]. Buna benzer çalışmalar farklı araştırma grupları tarafından yine RF-saçılma polikristal film üretim yöntemi kullanılarak üretilen örnekler kullanılarak yapılmış ve benzer sonuçlar gözlenmiştir [17]. Yine düşük elektron yoğunluğu ve yüksek mobiliteli örnekler Foley ve Tansley (1986) tarafından sentezlenmiş ve bu örneklerde optik soğurma ölçümlerinden InN'nin yasak enerji aralığının 1,9 eV olduğu öngörülmüştür.

InN araştırmalarındaki büyük kırılma on yıl kadar önce safir alttaş üzerine MBE ile yapılan yüksek kaliteli tek kristal filmler sayesinde olmuştur [4,10,20-23].

MBE'de büyütülen InN yapıların elektriksel özelliklerinde büyük bir gelişme sağlanmıştır. Elektron yoğunluğu oda sıcaklığında 10^{18} m^{-2} değerlerine düşerken mobiliteleri $0,1 \text{ m}^2(\text{Vs})^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Günümüzde elektron mobilitelerinin arttığı ve $0,22 \text{ m}^2(\text{Vs})^{-1}$ değerlerine ulaştığı ve bu örnek için elektron yoğunluğunun da $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ olarak bulunduğu belirtilmiştir [24].

Yüksek kaliteli tek kristal InN üretilmesi bu yapıların temel fiziksel özelliklerinin araştırılmasına fırsat vermiştir. MBE’de büyütülmüş InN düşük elektron yoğunluğuna sahip örneklerde, optik absorpsiyon, fotoışım (PL) ve fotomodülasyonlanmış yansıma (PR) ölçümleri ile yasak enerji aralığı 0.67 ± 0.05 eV olarak bulunmuştur [8,22,25]. Bu değer önceki değerlerin yaklaşık olarak 1/3’ü kadardır. Farklı gruplar tarafından yapılan kuramsal band hesapları da bulunan bu düşük enerji aralığı değerini doğrulamaktadır.

Son zamanlarda dörtlü yarıiletken alaşımı olan GaInNAs birçok optoelektronik uygulamasından dolayı ilgi çekmeye başlamıştır. İlk defa Kondow ve arkadaşları tarafından GaAs üzerine örgü uyumu olarak üretilen GaInNAs potansiyel aygıt olarak ilgi çekmiştir. Bu çalışmalarda GaInNAs’ın 1,30 ve 1,55 μm lazer diyotta çalışabileceğini öngörülmüştür. Bunun yanında GaInNAs tabanlı optoelektronik aygıtlar GaAs alttaş üzerine büyütülebildiği için InGaAsP gibi aynı aralıkta aygıt olarak kullanılabilen aygıtlara göre ekonomik olabileceği önerilmiştir. GaInNAs alaşımı aynı zamanda güneş hücreleri ile ilgilenen araştırmacılar tarafından da ilgi çekmektedir [26].

Seyreltilmiş nitrat olan GaInNAs aygıt etkinliğini metamorfik yapıya ihtiyaç duymadan aygıt etkinliğini artırabilmektedir. Bu yapı kendiliğinden birçok kusuru içermektedir [27].

Son zamanlarda neredeyse % 100 kuantum etkinliğindeki GaInNAs güneş hücreleri oluşturulmuştur. Bant aralığı 1.0 eV veya daha az olan GaInNAs güneş hücreleri, kısa difüzyon uzunluğundan dolayı düşük bir performans göstermiştir. Yüksek etkinlikteki dar bant aralığına sahip seyreltilmiş nitrat hücre çeşitli çoklu eklem yapıların oluşmasına imkan sunmaktadır [27].

Yapılan bazı çalışmalarda GaInNAs taşıyıcı konsantrasyonları elde edilmiştir. Metal organik kimyasal buhar depolama (MOCVD) yöntemiyle büyütülen Sn katkılı GaInNAs örneği incelenmiştir ve yapılan çalışmada tavlama ile beraber elektron konsantrasyonun yaklaşık $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ kadar düştüğü görülmüştür. Öncesinde p-tipi GaInNAs’daki hole konsantrasyonundaki net artışın yaklaşık $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olduğu gözlenmiştir. Bu artışa tavlama sırasında yeniden aktif olan background karbon akseptörlerinin neden olduğu belirtilmiştir.

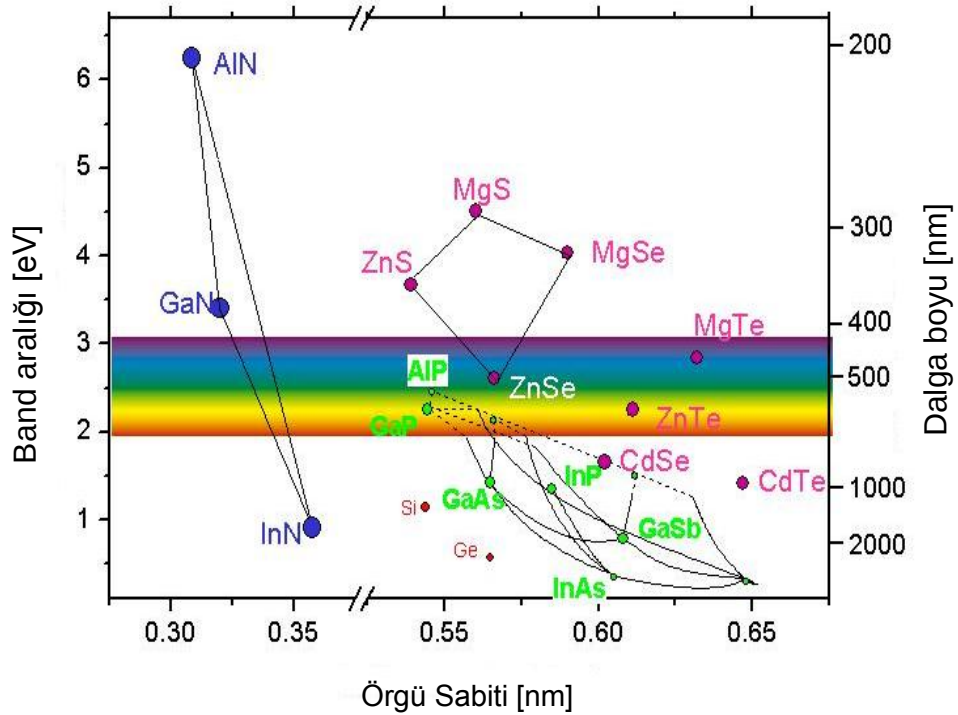
Secondary ion mass spectroscopy (SIMS) ölçümlerinden elde edilen sonuçlar aynı şartlardaki n-tipi GaInNAs katmanındaki karbon konsantrasyonunun yaklaşık $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olduğunu göstermiştir [26]. Yapılan başka bir çalışmada radyo frekansı (RF)'yla birlikte Molecular Beam Epitaxy (MBE) yöntemiyle büyütülen GaInNAs örneği incelenmiş. GaInNAs'ın kapasitans voltaj davranışı incelenmiş katkı konsantrasyonunun 10^{17} cm^{-3} 'ye karşılık geldiği belirtilmiştir [28]. Başka bir çalışmada ise GaInNAs pn eklemi incelenmiş, kapasitans voltaj ölçümleriyle donör konsantrasyonu $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur [29]. MBE yöntemiyle büyütülen GaInNAs örneklerinde akseptör konsantrasyonunun derinliğe bağlı davranışının 10^{13} ile 10^{16} cm^{-3} arasında değiştiği görülmüştür [30].

Bu yüksek lisans tezinde oda sıcaklığında InN ve GaInNAs örneklerinin kapasitans-voltaj (C-V) ve kapasitans-frekans (C-f) ölçümleri yapıldı. Kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen verilerle ilgili teorik bilgiler birleştirilerek taşıyıcı konsantrasyonları elde edildi.

2. InN ve GaInNAs TABANLI YAPILAR

2.1. InN Tabanlı Yapılar

InN grup III nitrür alaşımlarının en dikkat çeken örneklerinden biridir. InN yapıları üretildiğinde doğası gereği n-tipi yapısal özellik gösterdiğinden dolayı yüksek kalitede InN oluşturmak, GaN ve AlN oluşturmaya göre daha zordur. InN'ın elektron çekiciliği 5,8 eV dur ve bu değer diğer yarıiletkenlere göre daha büyüktür [31]. Nitratın indiyum üzerinde çok yüksek buhar basıncı var. Bu sebepler InN yapımında bazı zorlukları meydana getirmektedir [32]. InN ile Ga birleştirildiği zaman üçlü bir yapı olan InGaN oluşturulur ve bant aralığı 0.7-3.4 eV arasında ayarlanabilir.



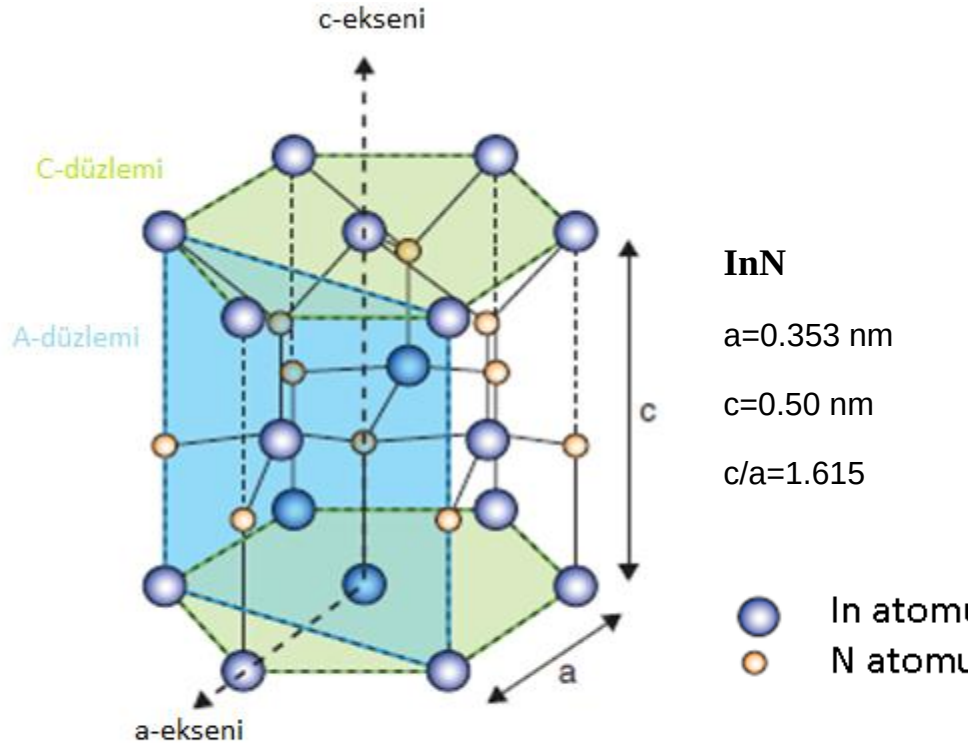
Şekil 2. 1. Bazı III-V ve II-IV yarıiletken bileşiklerin yasak enerji aralığının örgü parametresine bağlı değişimi [33]

InN yapılarıdaki n-tipi iletkenlik amphoteric kusur modeli (ADM) ile açıklanabilir [12-13]. Bu modelde, doğal kusurların oluşum enerjisi, Fermi

enerjisinin (E_F) Fermi stabilizasyon enerjisine (E_{FS}) göre olan konumuyla belirlenir. E_{FS} doğal kusurların ortalama enerji seviyesidir. Eğer $E_F > E_{FS}$ ise, donör kusurlarının oluşum enerjisi artarken akseptör kusurlarının enerjisi azalır. Ters durumda yani $E_F < E_{FS}$ ise donör kusurları azalırken akseptör kusurları artar. Bundan dolayı önemli derecede donör ve akseptör kusurları oluşur. Bu kusurlar E_F seviyesini E_{FS} seviyesine yaklaştırır. Eğer E_F seviyesi E_{FS} ulaşırsa, donör ve akseptör kusurlarının oluşum enerji oranları aynı olacaktır. E_{FS} bant aralığının içinde bulunmaktadır. Doğal kusurlar birçok yarıiletkende yüksek öz direnci sağlarlar. Fakat InN’larda E_{FS} alışılmışın dışında iletim bandının üzerinde 0,9 eV seviyesinde bulunmaktadır [12,34]. Bundan dolayı Fermi enerjisi E_{FS} seviyesinin altında oluşmaktadır ve böylece donör benzeri kusurlar elektron konsantrasyonu 10^{20} cm^{-3} değerinin altında olduğu zaman oluşur. Bu, doğal kusurların katkısıyla elektron konsantrasyonunun kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır [35].

InN hem wurtzite hemde zinc blende yapısında bulunabilir fakat yaygın olarak wurtzite yapısındadır. Zinc blende yapısı, zinc blende alttaş kullanımı içeren özel büyütme şartları gerektirir.

Şekil 2.2’de wurtzite kristal yapı ve örgü sabitleri görülmektedir. Wurtzite yapının birim hücresi hegzagonal dir ve a ve c olmak iki tane örgü sabiti vardır. birim hücrede her atomdan altı tane bulunur. Wurtzite yapı iki tane iç içe geçmiş hegzagonal sıkı paket (hcp) alt örgüden oluşur ve her bir alt örgüde tek tip atom bulunur. Bu atomlar hücre yüksekliği $5c/8$ olacak şekilde c -ekseni boyunca yerleşmiştir. Wurtzite yapı için (0001) düzleminin $\langle 0001 \rangle$ yönündeki istif düzeni ABABAB şeklindedir [32].



Şekil 2. 2. InN'in wurtzite yapısı ve örgü sabitleri [36]

Wurtzite yapısına sahip grup III nitürlerde c-eksenine dik bir terslenim simetrisi bulunmaz. Bundan dolayı bu yapılarda polarizasyon görünür. [0001] yönünde kristaller In-yüzlü ve N-yüzlü olarak iki şekilde büyütülür. (0001) veya (0001)A düzleminde herhangi bir grup III elementi (Al, Ga, In) polaritesine, (000-1) veya (0001)B düzleminde N-polaritesine sahiptir [32].

2.2. GaInNAs Tabanlı Örnekler

$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ dörtlü alaşımları ilk defa M.Kondow tarafından önerilmiş ve daha sonra bu alaşım bir çok araştırmanın konusu olmuştur [26].

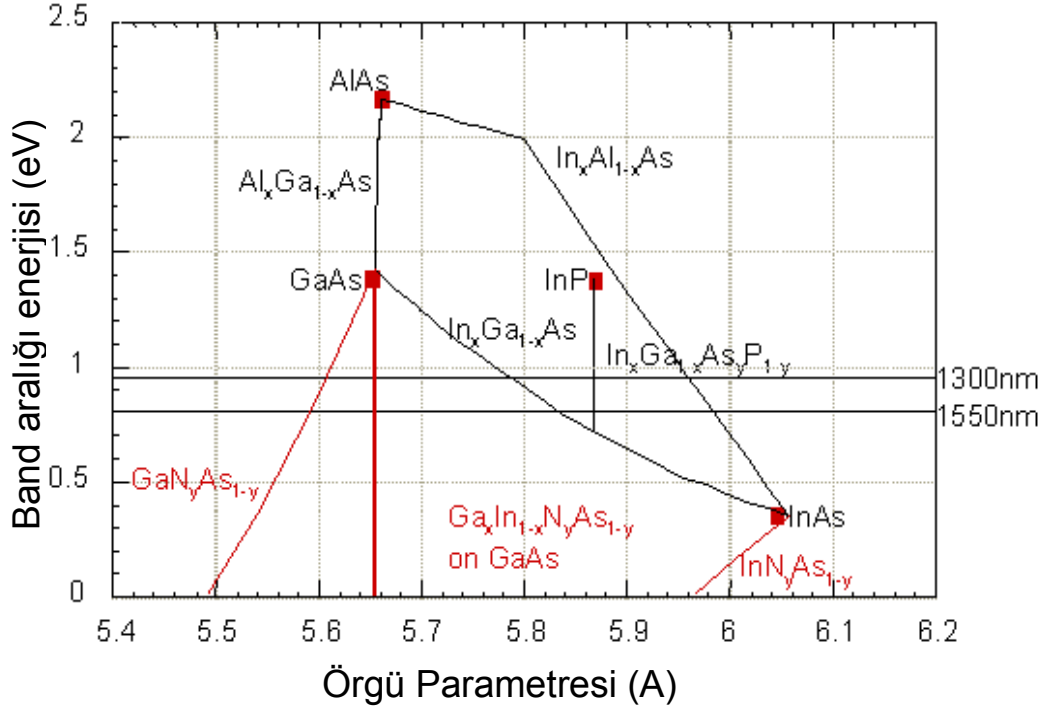
Az miktarda nitrür GaInAs ile birleştirildiğinde ortaya çıkan yeni yapının optik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir, özellikle emisyon dalgaboyu ve bant aralığı enerjisi değişmektedir. GaInNAs alaşımı GaAs üzerine büyütülebilir ve büyük elektronegatifliğe sahip olan N atomları iletim bandı ofsetini 350 meV kadar uzatılabilir. Bundan dolayı yüksek sıcaklıklarda bile taşıyıcı hapsedilmesi çok kuvvetli bir şekilde devam edebilir, böylece çok külfetli ve pahalı soğutucu sistem gerekmebilir. Bu özellikten dolayı GaInNAs/GaAs alaşımı GaInAsP/InP alaşımına göre yüksek sıcaklıkta daha iyi bir performans gösterebilir

Diğer grup-V nitrürlü yarıiletken alaşımlarında olduğu gibi GaInNAs alaşımındaki ana problem çok büyük olan bant aralığı eğilmesidir. Bu bant aralığı nitrür miktarının artmasıyla büzülür. Bu büzülme nitrür atomlarının yüksek elektron çekiciliğinden kaynaklanmaktadır. Nitrür atomları Arsenik atomlarına göre büyük elektron negatifliğine ve küçük iyon yarıçapına sahiptir. Bu farklılık arsenik ve nitrür arasında büyük ve karışık bir aralığa(gap) neden olur bu da pürüzsüz bir GaInNAs alaşımını oluşturmaya engel olur.

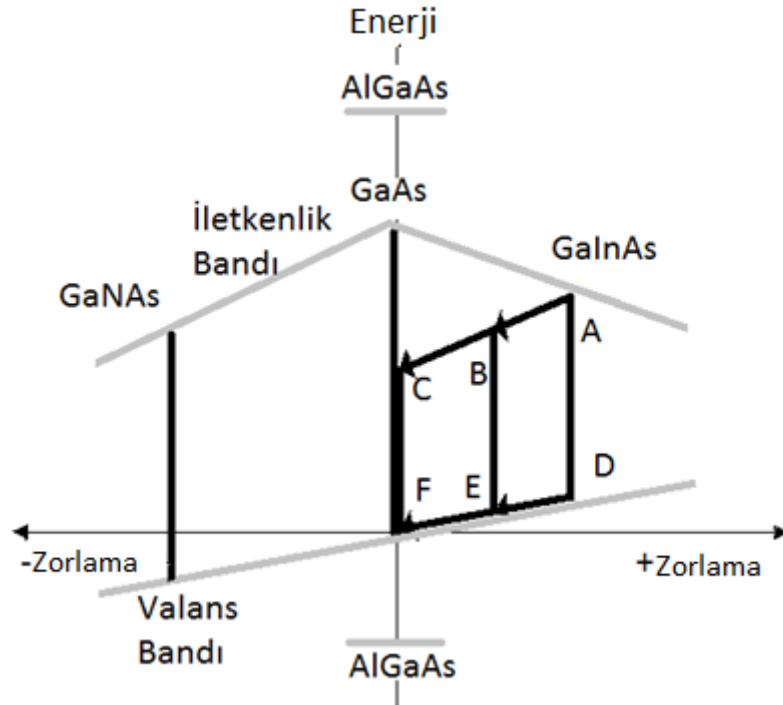
Nitrürün bu farklı özelliğinden dolayı GaInNAs oluşturmak kolay bir iş değildir. Bant aralığındaki azalma, büyük eğilme parametresi ve elektronun etkin kütledeki beklenen artış, nitrür içeren yarıiletken bir model geliştirmek için önemli faktörlerdir.

GaInNAs yapıları için birçok teorik model önerilmiştir ve farkı sonuçlar ortaya çıkmış. Bu yüzden şu anki aşamada bir modelin diğerine göre daha güvenilir olduğunu kabul etmek zordur. İlk önerilen modelde nitrür artışı ile GaInNAs emisyon enerjisinin lineer olarak azaldığı kabul edilmiştir. Bu azalış 100meV ile 160meV arasında değişmektedir. *Virtual Crystal Approximation* (VCA) olarak adlandırılan diğer benzer bir yaklaşım GaNAs için kullanılmış daha sonra GaInNAs için genişletilmiştir. Bu yaklaşıma göre 14meV ile 22meV arasında değişen lineer olmayan bowing parametre, nitrür'ün varlığındaki bant aralığının lineer olmayan davranışını açıklar. Bu modeller bant aralığı etkileşiminin etkisini de ihmal ederler. Bu etkiler örnekteki zorlanma ve kuantum hapsedilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu modeller kuantum kuyu içeren örnekler düşünüldüğünde güvenilir kabul edilmez [37].

Şekil 2.3 örgü sabitlerinin bir fonksiyonu olarak bant aralığı enerji diyagramını göstermektedir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi bir çok durumda örgü parametresinin artmasıyla bant aralığı enerjisi azalmaktadır. Fakat burada bir istisna mevcuttur. Az miktardaki nitrür’ün GaAs ile birleştiğinde hem örgü parametresinin hemde bant aralığı enerjisinin azaldığı görülmektedir. Eğer uygun miktarda nitrür InGaAs ile birleştirilirse, oluşan yeni yapının örgü sabiti, GaAs’ın örgü sabitinin pozisyonuna doğru geri çeker. Şekil 2.4’de görüldü gibi sıkıştırıcı zorlama indiyumun GaAs’da katılmasıyla indüklenebilir. Bu durumu telafi etmek için InGaAs içine nitrür eklenebilir. Böylece uygun miktarda indiyum ve nitrür GaAs içine eklenirse, GaAs alttaş üstüne InGaAs örgü eşleşmesi yapılabilir. Bu durumda yanlış örgü eşleşmesinden dolayı indüklenen kusurlar azalır. Aynı zamanda şekil 2.4’de de görüldüğü gibi, indiyum ve nitrürün GaAs’ın içine eklenmesiyle iletim bandı ve valans bandı aşağıya çekiliyor. Bu, materyal sistemin geniş bant ofsete sahip olmasının sebebidir. Bu bant ofset, herhangi bir ek yapıya ihtiyaç duymadan elektron hapsedilmesine öncülük eder. GaInAs yapısının içine nitrür eklendiğinde nitrüre bağlı kusurlar indüklenebilir. Bu da hem materyalin kalitesini düşürür hem de aygıtın performansını etkiler [38].



Şekil 2. 3. Grup III-V yarıiletkenlerdeki örgü sabiti ve bant aralığı enerjisi ilişkisi [37]



Şekil 2. 4GaInAs, GaNAs ve GaInNAs için bant sırası diyagramı

3.KURAMSAL BİLGİLER

3.1. Giriş

Katkılama miktarı, yarıiletken malzemelerin aygıt olarak kullanılmasında ve buna bağlı olarak yeni tür aygıtların araştırılmasında önem taşır. Bu parametre yaygın olarak kapasitans- voltaj (C-V) ölçümlerinden elde edilebilir. Bu ölçümlerden elde edilen bilgiler aygıtların kalitesinin ve verimlerinin artırılmasında kullanılır. Kapasitans- voltaj ölçümleri taşıyıcı ve katkılama konsantrasyonlarını elde edilen Hall ölçümlerine göre daha kolay ve maliyeti daha düşük bir yöntemdir.

Metal-yarıiletken kontakların özellikleri çeşitli yarıiletken aygıtlar ve entegre devrelerin performansında önemli rol oynar. Metal yarıiletken kontaklarda yükün bir taraftan diğerine göre daha kolay hareket ettiği kontak türleri Schottky (doğrultucu) kontak, yükün her iki tarafta kolayca hareket ettiği kontak türleri ise ohmik (doğrultucu olmayan) kontak olarak bilinir. Schottky kontaklar çok fazla çeşitteki aygıt uygulamalarında kullanılabilir, iyi bir ohmik kontak ise düşük direnç özelliğine sahip olmasından dolayı mükemmel bir yarıiletken performansı elde etmek için önemlidir. Ayrıca Schottky kontak yarıiletken materyallerin ve yüzeylerinin fiziksel ve elektriksel özelliklerin araştırmak için test aracı olarak kullanılır. Örneğin Schottky diyot metal-yarıiletken sistemlerin arayüzey ve hacimli yapısının kusurlarının öğrenilmesinde kullanılır [39].

Metal yarıiletken kontaklar üzerinde ilk çalışma Braun tarafından 1874 yılında yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan Schottky diyotları radyo dedektörü, radar dedektörü ve entegre devrede anahtar hızını artırmak için kullanılmıştır. İkinci dünya savaşı esnasında nokta doğrultucu kontaklar yapılmış ve ve kontaklar mikrodalgalarda ve frekans dönüştürücülerde kullanılmıştır. 1950'li yıllarda ohmik kontaklar p-n eklemlerin yapımında akım iletimi için kullanılmıştır. 1964 yılında Baird Schottky engeliyle Si transistörlerini birleştirerek yarıiletken alan etkili transistörü bulmuştur. 1983 yılında Chandra ve Prasad metal yarıiletken

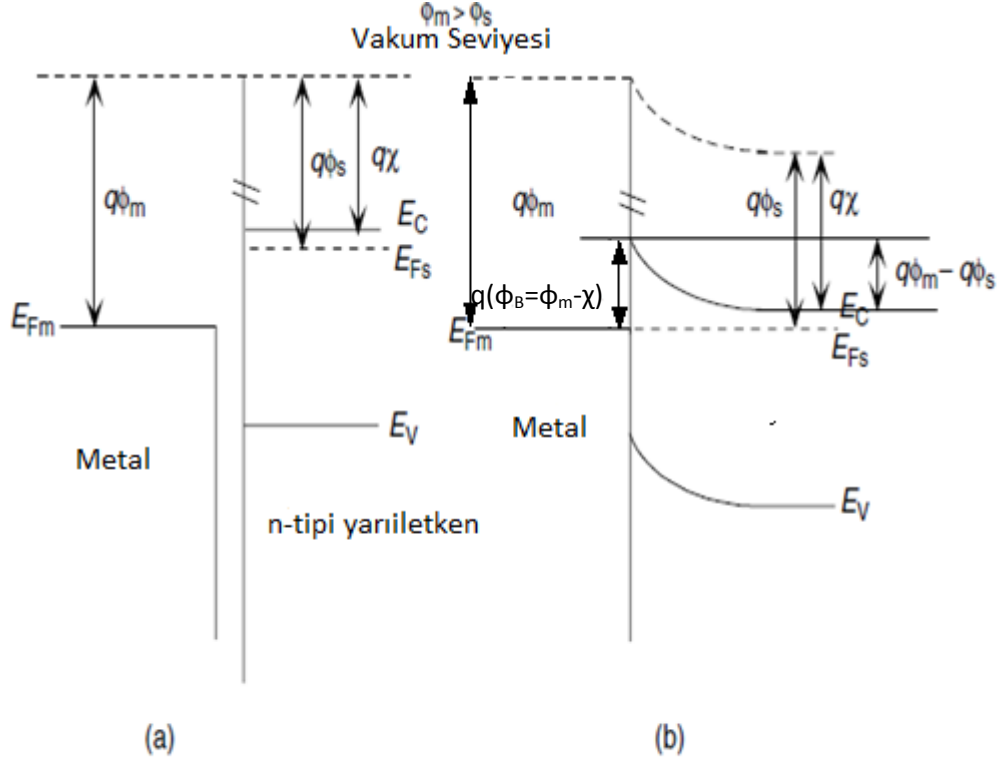
diyotlarda V-T davranışlarını incelemiş ve bu yapılar sıcaklığın tayininde kullanılmıştır [40].

1938 yılında Mott ve Schottky metal yarıiletken kontaklarda ara yüzeyde oluşan potansiyel engeli üzerinde teoriler üretmişlerdir. Mott tarafından üretilen teoriye göre metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarındaki farktan dolayı bir potansiyel engeli oluşmaktadır. Bu teoride, Mott arayüzey kirlilik atomlarının olmadığını ve elektrik alanın sabit olduğunu kabul etmiştir, bu karşılık Schottky ise ara yüzeyde sabit kirlilik atomlarının bulunduğunu, elektrik alanın ise lineer olarak arttığını kabul etmiştir. Schottky elektrostatik potansiyelin Poisson denklemiyle uyumlu bir şekilde metalin sınırına kadar kuadratik olarak değiştiğini varsaymıştır, Mott ise elektrostatik potansiyelin metale olan uzaklıkla lineer olarak değiştiğini varsaymıştır [40].

Bu bölümde aygıt yapımında yaygın olarak kullanılan Schottky ve ohmik kontaklar ve bu kontaklar yapıldıktan sonra yarıiletkendeki katkılama miktarının kapasitans-voltaj (C-V) yöntemiyle nasıl elde edileceği üzerinde durulmaktadır.

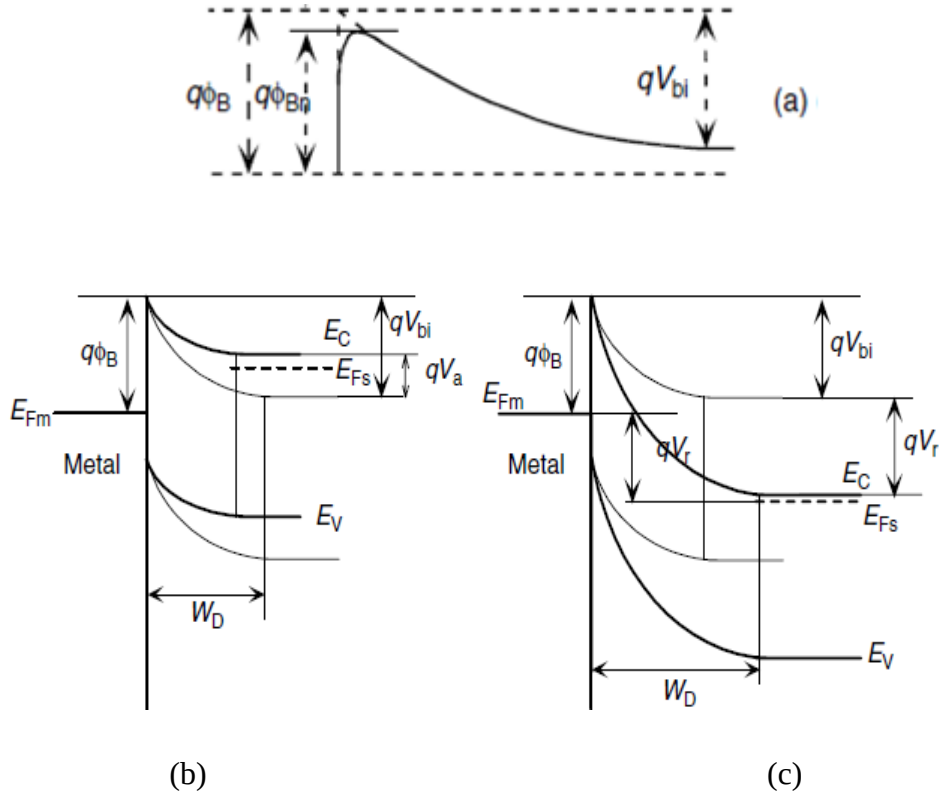
3.2 Schottky Kontak

Metal ve yarıiletken yüzey durumu olmadan kontakla birleştirildiğinde ve denge korunduğunda yarıiletken ve metalin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelecektir. Eğer metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri kontakta önce aynı ise, kontak yapıldıktan sonra bant yapılarında bir değişme gözükmeyecektir. Yarıiletkenlerin Fermi seviyeleri dolayısıyla iş fonksiyonları taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olduğu için metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının aynı hizaya olması neredeyse imkansızdır. Burada iş fonksiyonundan kasıt bir elektronu metalden veya yarıiletkenden koparıp boşluk seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjidir. Yarıiletkenin elektron ilgisi χ iletkenlik bandının kenarı ile boşluk seviyesi arasındır [32].



Şekil 3. 1. Metal n-tipi yarıiletken çifti (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra. Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) daha büyüktür ($\phi_m > \phi_s$) [32]

Schottky ve Mott' un geliştirdiği teoreme göre bariyer oluşumu şekil 3.1'de gösterilmiştir. Burada n-tipi bir yarıiletken dikkate alınmıştır. Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu durum göz önünde bulundurulmuştur. Metalin ve yarıiletkenin kontakta önceki ve sonraki Fermi seviyeleri gösterilmiştir. Kontak sonrası hizalama yüksek enerjili taraftan düşük enerjili tarafa oluşan yük hareketiyle meydana getirilmiştir. Bu hizalama yarıiletkende bir azalma bölgesinin ve arayüzeyde de bir bariyerin oluşmasını sağlamıştır. Oluşan bariyer yüksekliği ϕ_B kısaca şekil 3.1 de gösterildiği gibi metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkendeki elektron ilgisinin arasındaki farktır ($\phi_m - \chi$). Yarıiletkende meydana gelen bant bükülmesi metalin iş fonksiyonu ϕ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki farktır ($\phi_m - \phi_s$). [32]



Şekil 3.2. Metal n-tipi yarıiletken sistem. Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyüktür. (a) denge durumunda, (b) ileri-besleme, (c) ters besleme [32]

Metal-yarıiletken doğrultucu kontağa herhangi bir besleme uygulanmadığında denge durumu oluşur (Şekil 3.2a). İleri besleme durumunda (metale bağlı olarak n-tipi yarıiletkenine negatif voltaj uygulanır) uygulanan beslemeyle bariyer alçalır (şekil 3.2b), ters durumunda (metale göre n-tipi yarıiletkenine pozitif voltaj uygulanır) bariyer yükselir (şekil 3.2c) [32].

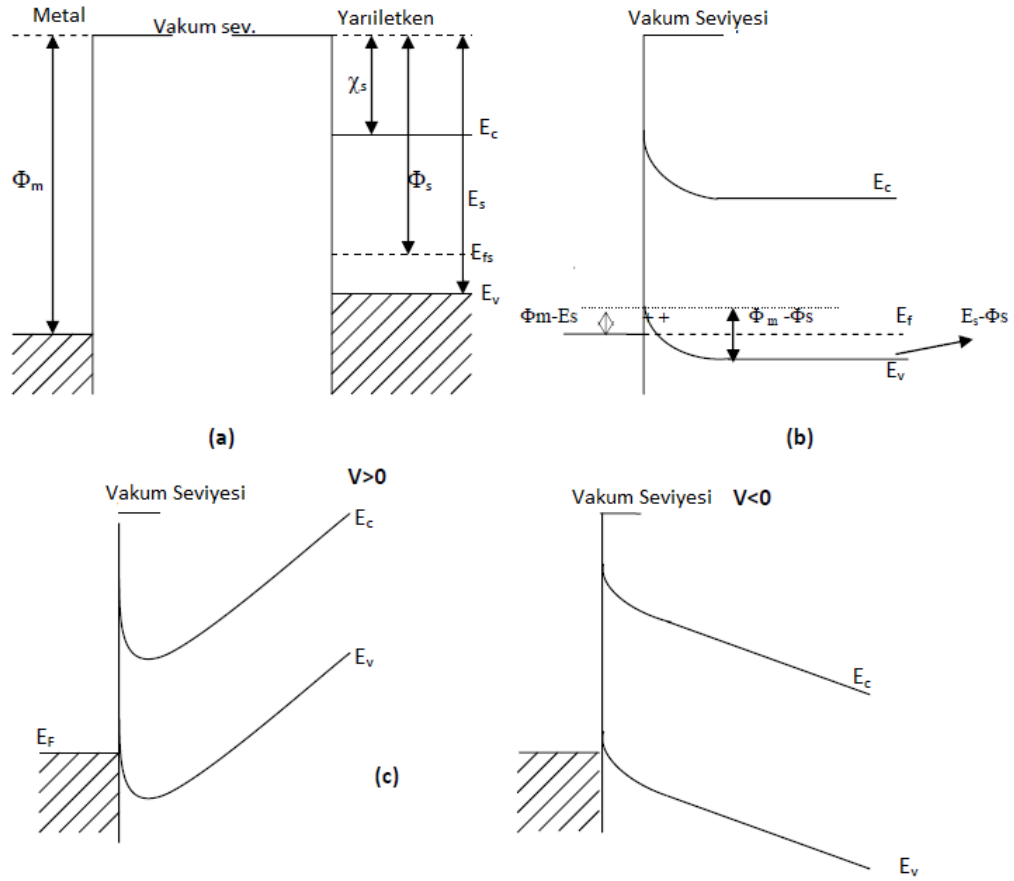
Metal-yarıiletken kontağında, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu eşleşmediği sürece potansiyel bariyer meydana gelir. Eğer bir voltaj uygulanırsa, metal veya yarıiletkendeki taşıyıcılar termal yollarla ya da elektrik alanla bariyeri aşmak için yeterli bir enerji kazanırlar ve böylece bir akım meydana gelir. Ancak bariyer kalınlığı tünel mesafesiyle karşılaştırılacak kadar inceyse taşıyıcılar direk tünelleme yaparak bariyeri aşar ya da bariyerin içindeki

herhangi bir noktada tünellemeyle birleşmiş Fermi seviyesine göre yeterli bir enerji kazanarak bariyeri aşar.[32].

3.3. Ohmik Kontak

Ohmik kontaklar doğrultucu olmayan metal yarıiletken kontaklardır. Ohmik kontaklar düşük dirençli kontaklardır. Ohmik metal ve yarıiletken arasında her iki yödede iletimi sağlarlar [32,39,41].

Şekil 3.3'te p-tipi yarıiletkenle metal arasında doğrultucu olmayan kontak verilmiştir. Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür. Şekil 3.3a'da kontakta önceki enerji seviyeleri gösterilmiştir, yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan $\phi_m - \phi_s$ kadar yukardadır. Kontak yapıldığında yarıiletkendeki elektronlar termal dengeye ulaşmak için geride pozitif yük bırakarak metala doğru akarlar. Metal tarafında bir negatif yüzey yüküne neden olurlar. Fermi seviyesi şekil 3.3b deki gibi $\phi_m - \phi_s$ kadar aşağıya düşer. Yüzeyde oluşan fazla hol konsantrasyonu yarıiletken yüzeyini daha fazla p-tipi yapar. Metaldeki elektronlar hızlı bir şekilde yarıiletkendeki boş durumlara geçebilirler. Şekil 3.3c'de görüldüğü gibi bir V voltajı uygulandığında elektronlar zorlukla karşılaşmadan engeli kolayca geçebilirler. İleri besleme durumunda metaldeki elektronlar yarıiletkendeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Buradaki yük hareketi hollerin yarıiletkenden metale doğru akışına karşılık gelir. Ters besleme durumunda ise holler kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler [41].



Şekil 3.3. Metal p-tipi yarıiletken ohmik kontağın ideal bant diyagramı (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra, (c) $V \neq 0$ durumunda [38]

Voltaj uygulandığında oluşan kontak direnci R_c alınır;

$$R_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0} \quad (3.1)$$

Eşitliği ile gösterilebilir. Kontak direncinin birimi $\Omega \cdot m^2$ dir. J akım yoğunluğunu ifade eder. ve bu eklemden termiyonik emisyon akımı baskındır. Bu durumdaki kontak direnci,

$$R_c = \frac{\left(\frac{kT}{e} \right) \exp\left(\frac{e\phi_B}{kT} \right)}{A^* T^2} \quad (3.2)$$

eşitliğiyle ifade edilir. T mutlak sıcaklıktır, A^* ile ifade edilen etkin Richardson sabitidir ve,

$$A^* = 4 \pi e m_e^* k^2 / h^3 \text{ eşitliğiyle ifade edilir.}$$

Burada e , elektron yükü, m_e^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti, h Plank sabitidir. Eşitlik 3.2'den görüldüğü gibi bariyer yüksekliği ϕ_B düşerken buna bağlı olarak kontak direncide düşer. Bariyer yüksekliğindeki küçük bir düşüş Schottky deki kontak direncinde çok büyük bir azalmaya neden olur [41].

3.4 Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri

Azalma bölgesi genişliğini ve Schottky diyot eklemine kapasitansını bulmak için Poisson eşitliğinden yararlanılır. Tek boyutlu Poisson eşitliği,

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_s} \quad (3.3)$$

Uygun sınır şartları kullanılarak çözüldüğünde, yapı içindeki potansiyelin konuma bağlı değişimi elde edilir. Eşitlik 3.3'deki ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_s , ise yarıiletken malzemenin mutlak elektriksel geçirgenliğidir.

$0 \leq x \leq W$ için yük yoğunluğu

$$\rho = [N_D - n(x) - N_A + p(x)] \quad (3.4)$$

Donor katkılama yoğunluğunun akseptör katkısına göre oldukça büyük olan bir yapı için, $N_D \gg N_A$

$$\rho = e[N_D - n(x)] \quad (3.5)$$

formuna dönüşür. $n(x)$ uzay yük bölgesindeki elektron yoğunluğudur ve azalma bölgesi sınırında ($x=W$), $n_0 \exp\left(-\frac{eV_{bi}}{k_b T}\right)$ değerine eşittir. $n(x)$, azalma bölgesinden uzaklaştıkça eksponansiyel bir şekilde azalır.

$0 < x < W$ için $n(x)=0$ olduğu edilirse ve tek taraflı keskin eklem yaklaşımı kullanılırsa eşitlik 3.3'ün integrali alınarak elektrik alanın konuma bağlı dağılımı elde edilir;

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = \left(\frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon_s} \right)x + C_1 \quad (3.6)$$

Burada C_1 sabittir ve sınır koşullarıyla belirlenir. Potansiyel dağılımı eşitlik 3.6'nin integrali alınarak bulunur.

$$V(x) = -\left(\frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon_s} \right)x^2 - C_1x + C_2 \quad (3.7)$$

burada C_2 de sabittir. C_1 ve C_2

$$x = 0 \text{ 'da} \quad V(0) = -\phi_B \quad (3.8)$$

ve

$$x = W \text{ 'de} \quad E(x) = -\frac{dV}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

sınır koşulları kullanılarak elde edilebilir.

Böylelikle C_1 ve C_2 ,

$$C_1 = -\frac{eN_D W}{\epsilon_0\epsilon_s} \quad (3.10)$$

$$C_2 = -\phi_B \quad (3.11)$$

olarak elde edilir. Bu değerler denklem 3.6 ve 3.7’de yerine konulursa elektrik alanın ve azalma bölgesindeki potansiyelin konuma bağlı dağılımı;

$$E(x) = \left(\frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right) (x - W) \quad (3.12)$$

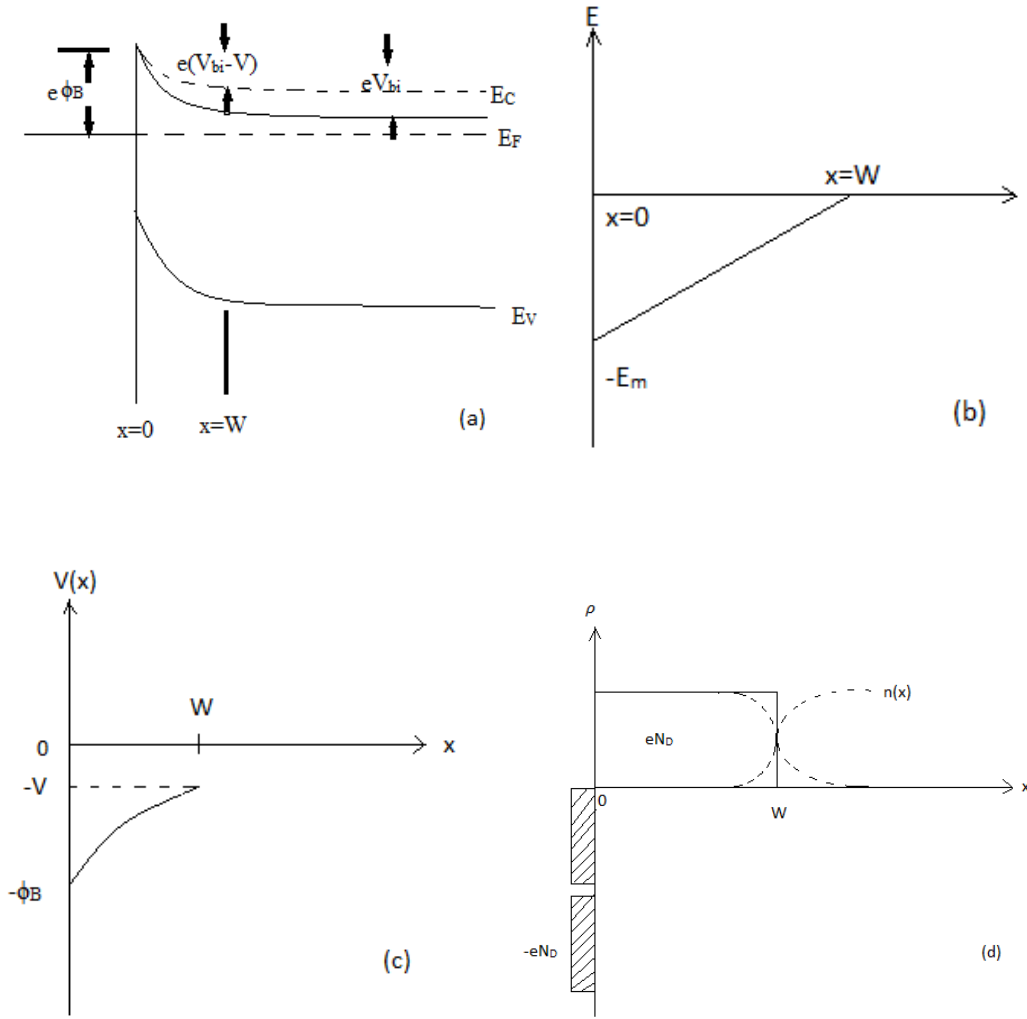
$$V(x) = - \left(\frac{eN_D}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right) \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) - \phi_B \quad (3.13)$$

eşitliğiyle verilen fonksiyonlara dönüşür.

Azalma katmanı genişliği W , N_D , V_{bi} , ve bariyere uygulanan voltaj kullanılarak bulunabilir. Şekil 3.4a ve eşitlik 3.12’den $x=W$ deki potansiyel,

$$V(W) = (V_{bi} - V) - \phi_B = \left(\frac{eN_D W^2}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \right) - \phi_B \quad (3.14)$$

olarak elde edilir.



Şekil 3.4. n-tipi yarıiletken Schottky kontağı için, (a) enerji bant diyagramı, (b) elektrik alan, (c) potansiyel dağılım, (d) uzay yük dağılımı

Azalma katmanı genişliği W ise Eşitlik 3.14 kullanılarak

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s(V_{bi} - V)}{eN_D}} \quad (3.15)$$

formunda elde edilir.

Eşitlikte 3.15'den görüldüğü gibi azalma katmanı genişliği direk olarak uygulanan gerilimin karaköküyle ve yarıiletkenin donör yoğunluğunun, N_D karaköküyle orantılıdır. Buradan anlaşılacağı gibi geri besleme voltajının ($V \geq 0$)

kareköküyle birlikte azalma katmanı genişliği azalır ve ileri-besleme ($V < 0$) voltajının kareköküyle birlikte artar.

Şekil 3.4d’de gösterildiği gibi azalma bölgesindeki birim alan başına düşen toplam pozitif yükü, Q_s ,

$$Q_s = eN_D W = \sqrt{2eN_D \epsilon_0 \epsilon_s (V_{bi} - V)} \quad (3.16)$$

eşitliği ile bulunabilir.

Birim alan başına azalma bölgesi kapasitansı, uygulanan voltaj V nin türevinin alınmasıyla elde edilir,

$$C = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{eN_D \epsilon_0 \epsilon_s}{2(V_{bi} - V)}} \quad (3.17)$$

Eşitlikte 3.7’den görüldüğü gibi azalma katmanının kapasitansı uygulanan voltajın kareköküyle ters orantılıdır. Şekil 3.4a metal/n-tipi yarıiletken Schottky bariyer diyotu için termal dengedeki (kalın çizgili) ve ileri beslemeki (kesikli çizgi) bant enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekil 3.4b’de azalma bölgesindeki konuma bağlı elektrik alan gösterilmektedir. Eşitlik 3.12’ye göre $x=0$ ’daki maksimum elektrik alan;

$$E_m = -\frac{eN_D W}{\epsilon_0 \epsilon_s} \quad (3.18)$$

olarak bulunur.

Şekil 3.4c’de azalma bölgesindeki potansiyelin konuma bağlı dağılımı şekil 3.4d’de ise azalma bölgesindeki konuma bağlı uzay yükün konuma bağlı dağılımı gösterilmektedir. Şekil 3.4d’de kesikli çizgiler gerçek yük dağılımı gösterilmektedir.

Eşitlik 3.17 tekrar düzenlenirse donör katkılama yoğunluğu için,

$$N_D = \frac{2(V_{bi} - V)}{e\epsilon} C^2 \quad (3.20)$$

elde edilir ve kapasitans değerin karesinin tersinin uygulanan gerilime göre türevi için

$$\frac{-d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{e\epsilon N_D} \quad (3.21)$$

eşitliğine ulaşır. Böylelikle katkılamanın konuma bağlı değişimi elde edilir.

$$N_D = \frac{2}{e\epsilon} \left[\frac{-1}{d(1/C^2)/dV} \right] \quad (3.22)$$

Deneyssel olarak uygulanan voltaja karşılık çizilen C^{-2} grafiğin eğiminden katkı seviyesi bulunabilir [39].

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1. InN ve GaInNAs Örneklerinin Hazırlanması

Yaptığımız çalışmada kullandığımız örnekler Crete Üniversitesi (Yunanistan) ve LAAS-CNRS (Fransa) tarafından Molecular Beam Epitaxy (MBE) tekniği kullanılarak büyütülmüştür.

Crete tarafından üretilen InN örnekler (G1382) 1.08 μm , (G1383) 2.07 μm , ve (G1424) 4.7 μm kalınlığındaki hacimli örneklerdir. Bu örneklerde alttaş olarak, *Metalorganic Chemical Vapour Deposition (MOVCD)* tekniği kullanılarak üretilen 1.5 μm kalınlığındaki GaN/Al₂O₃ (0001) kullanılmıştır. Alttaş üzerine MBE tekniği ile 40 nm kalınlığındaki GaN düzleştirici tabaka olarak kullanılmıştır ve bu düzleştirici üzerine InN filmleri büyütülmüştür.

Deneyde kullandığımız Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y} kuantum kuyu örnekleri, nitrür oranı %1 ve %0.4 olan katkısız örnek, Si katkılı n-tipi (nitrür oranı % 1.5) ve Be katkılı p-tipi (nitrür oranı %1.5) örneklerdir. Bu örnekler, yarı yalıtkan GaAs alttaş üzerine MBE tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Örnekler 7nm genişliğinde üç tane kuyuya sahiptir. Kuyular 50 nm genişliğindeki GaAs bariyerlerle ayrılmıştır. 40 nm lik merkezi bariyerler Si ve Be katkılanarak n-tipi ve p-tipi yapılmıştır. Her iki taraftaki 5 nm lik katkısız ayırıcı tabakalar vardır.

Tablo 4.1. G1382, G1383 ve G1424 kodlu örneklerin tabaka yapısı.

Materyal	Kalınlık
InN film	1-5 μm
GaN (düzleştirici)	40 nm
GaN/Al ₂ O ₃ (0001) (alttaş)	1.5 μm

Tablo 4.2. $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ örneklerinin tabaka yapısı.

Materyal	Kalınlık (nm)	Katkı
GaAs (kapak)	50	Si(n) / Be(p)
GaAs (engel)	20	Si(n) / Be(p)
GaAs(ayırıcı)	5	katkısız
$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ QW	7	katkısız
GaAs (ayırıcı)	5	katkısız
GaAs (engel)	20	Si(n) / Be(p)
GaAs(düzleştirici)	50	katkısız
Yarı yalıtkan GaAs (alttaş)		

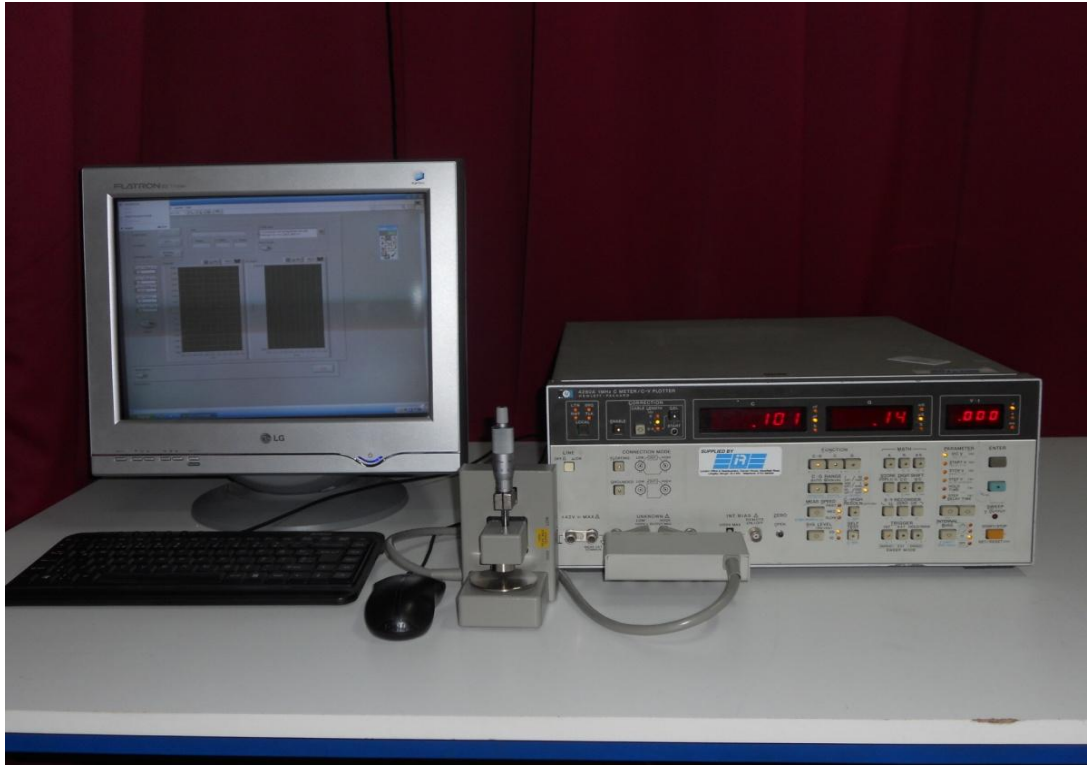
4.2. Deney Düzenegi

Yaptığımız çalışmada kapasitans-voltaj ve kapasitans-frekans ölçümleri gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj voltaj ölçümleri için HP 4280A CV Plotter kullanıldı. Kapasitans-frekans ölçümleri için ise HP 4275A Multi-Frequency LCR Mater kullanıldı. Ölçümler gerçekleştirilirken örnekler Agilent 16451B

Dilelektrik Test Fixture arasına konulmuştur. Yapılan tüm deneyde, örneklerin bir yüzeyinden bir de alt kısmından olmak üzere iki tane temas noktası vardır. InN örnekleri kullanılarak yapılan kapasitans-voltaj ölçümlerinde, InN örnekleri iki indiyum plaka arasına sıkıştırılmıştır. Kapasitans-voltaj ve kapasitans-frekans ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Kapasitans-voltaj ölçümleri 1MHz sistem frekansı altında gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj ölçümleri voltaj aralıkları -3V ile 4V arasında değişen değerlerde gerçekleştirildi. Daha hassas bir ölçüm yapmak için voltaj basamakları 0.001V - 0.005 V olarak belirlendi. Her bir basamak arası süre ve her bir voltaj değerinin örnek üzerinde kalma süresi 3s olarak belirlenmiştir.

Kapasitans-frekans ölçümleri 10kHz ile 10MHz arsında yapıldı. Her bir ölçüm için 0.1V ile 1V arasında değişen voltaj değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kapasitans-voltaj ve kapasitans-frekans ölçüm düzeneği

Veri Toplama programı LabView grubumuz tarafından hazırlanmıştır. Hazırlanan Veri Toplama Programı deney parametrelerinin (kapasitans, voltaj,

frekans) istenilen değerlerinde ölçüm yapılmasını, deneysel verilerin uygun şekilde dosyalanmasını ve deney sırasında ham veri grafiklerinin ekranda istenilen formatta çizilmesini sağlamıştır. Veri toplama programı kendi içinde menülendirilmiştir.

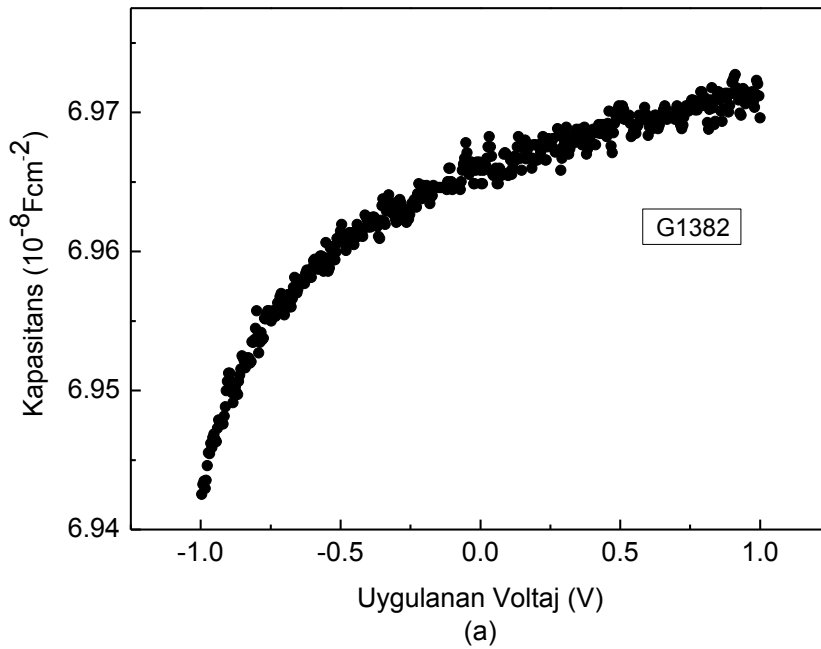
5. ÖLÇÜMLER

Yarıiletken sistemlerde azalma bölgesinin, katkı konsantrasyonunun ve elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için kapasitans-voltaj (C-V) ve kapasitans-frekans (C-f) ölçümleri oldukça önemlidir. Bu çalışma laboratuvar ortamında, oda sıcaklığında, bilgisayar destekli C-V ve C-f sisteminde deneyler yapıldı ve elde edilen sonuçlar teorik bilgiler kullanılarak değerlendirilmiştir.

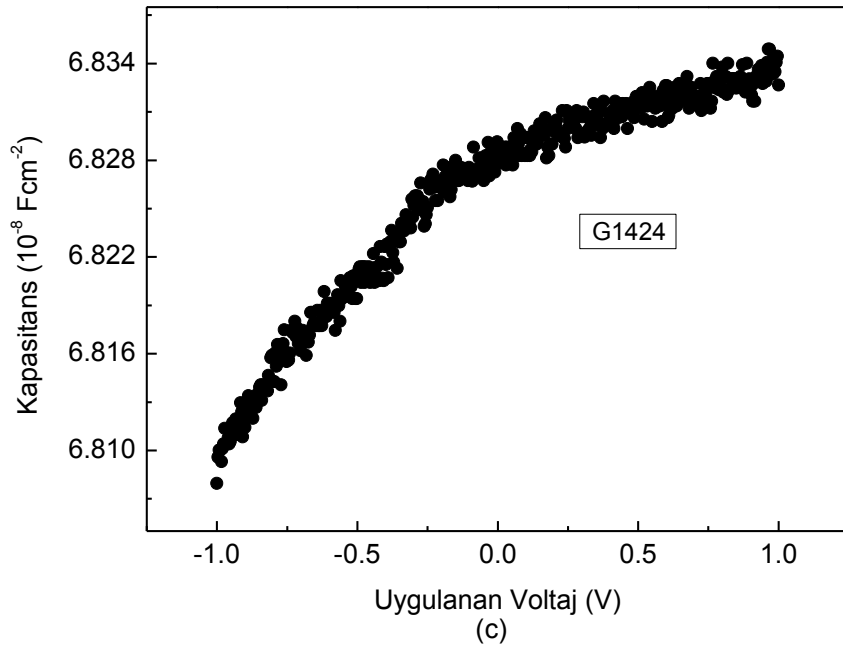
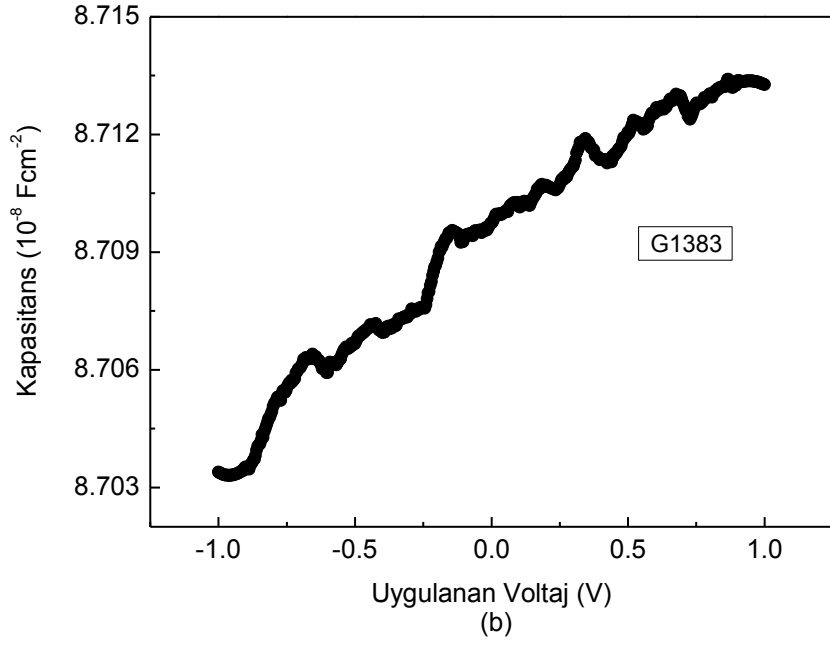
5.1. InN Ölçümleri

5.1.1 InN Örneklerinde Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri

Bu çalışmada G182, G1383 ve G1424 kodlu InN örnekleri kullanılarak oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri yapıldı. Uygulanan voltaj -1V +1V olarak belirlenmiştir Ölçüm sonuçları şekil 5.1 de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimin örnek üzerindeki temas yüzeyinin alanı, $A=5.93 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.1. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerde uygulanan voltaj karşı kapasitans davranışları



Şekil 5.1. (devamı) (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerde uygulanan voltaj karşı kapasitans davranışları

Oda sıcaklığında yapılan C-V ölçümleri yüksek frekansta (1MHz) gerçekleştirildi. Yüksek frekanslarda periyot değeri (T), arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden küçük olacaktır. Bu nedenler yüksek frekanslarda neredeyse hiçbir arayüzey durumu ac sinyali takip edemez. Burada kapasitans değerine arayüzeyden gelen katkı çok azdır [41].

Oda sıcaklığında yapılan C-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar şekil 5.1 (a), (b), (c)'de verildi. Kapasitans değerlerindeki değişimin çok küçük olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.1 de görüldüğü gibi örneklerin üzerine ters yönde uygulanan voltaj arttıkça zaman kapasitans değerlerinde düşme gözlenmiştir. Bu voltaj aralığında küçüğe olsa bir azalma bölgesinin olduğunu söyleyebiliriz.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{W} \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1'de görüldüğü gibi kapasitans değerinin azalmasıyla azalma bölgesi artacaktır.

Şekil 5.1(a) ve şekil 5.1(c)'yi incelediğimiz zaman, 0V ile 1V arasında kapasitans değerinde bir düzlüğün oluşmaya başladığını görürüz. Oluşan bu düzlük, bu bölgede bir elektron birikmesinin olduğunu gösterir.

Kullanılan örneklerin taşıyıcı yoğunluklarını hesaplamak için kapasitans voltaj ölçümlerinden yararlanıldı. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanarak uygulanan voltaja karşılık $1/C^2$ grafiği çizildi. Çizilen bu grafiklerin eğimi alınmıştır.

$$N = \frac{2}{e \epsilon_0 \epsilon_s} \left[-\frac{1}{m(1/C^2)} \right] \quad (5.2)$$

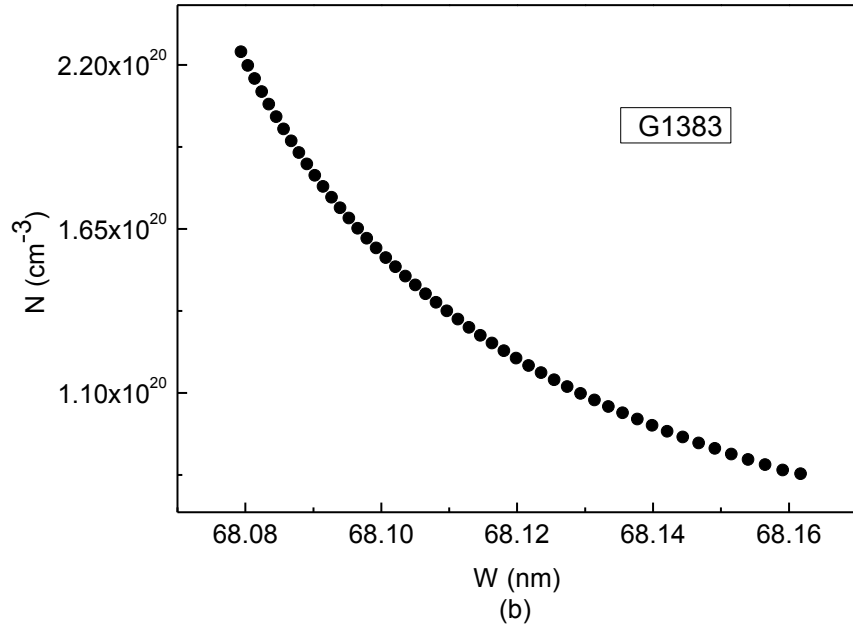
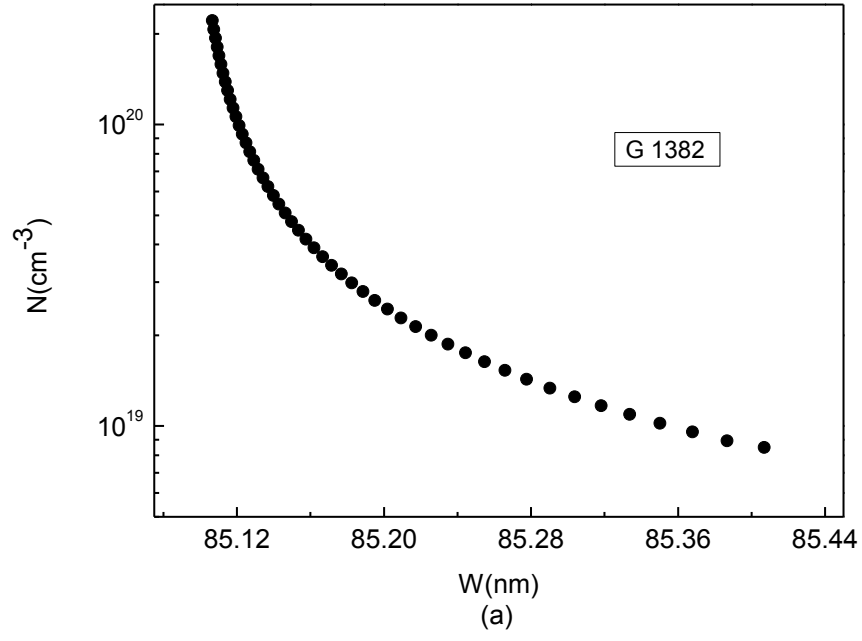
Elde edilen eğim değerleri eşitlik 5.2'deki denklemde yerine yazılarak örneklerin taşıyıcı yoğunlukları, N , bulunmuştur (Tablo 5.1). Kapasitans-voltaj ölçümlerinden yararlanılarak elde edilen taşıyıcı konsantrasyonu değerleriyle daha önce Hall ölçümleri yardımıyla elde edilen taşıyıcı konsantrasyonu değerleri birbirine yakın çıkmıştır [42]. İki ölçüm tekniğinden elde edilen değerler

arasındaki farklar ölçüm sırasında yapılan bir hatadan yada teorik hesaplamada kullandığımız alan (A) ölçümdeki bir hatadan kaynaklanmış olabilir.

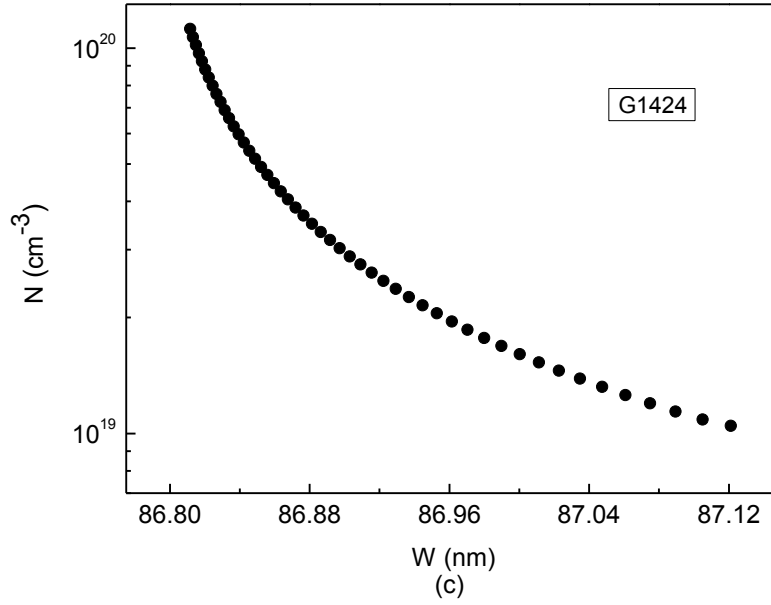
Tablo 5.1 G1382, G1383 ve G1424 kodlu örneklerinin taşıyıcı konsantrasyonları

Örnek Kodu	Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm^{-3})	$N(\text{cm}^{-3})$ (Hall Ölçümleri)
G1382	3.35×10^{19}	1.27×10^{19}
G1383	1.33×10^{19}	1.03×10^{19}
G1424	2.98×10^{19}	1.38×10^{19}

Taşıyıcı yoğunluklarının derinliğe bağlı değişim profilini elde etmek için 3.Bölüm'deki eşitlik (3.22) ve eşitlik (5.1) kullanıldı.



Şekil 5. 2. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin C-V ölçümlerinden elde edilen derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları



Şekil 5. 2. (devamı) (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin C-V ölçümlerinden elde edilen derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları

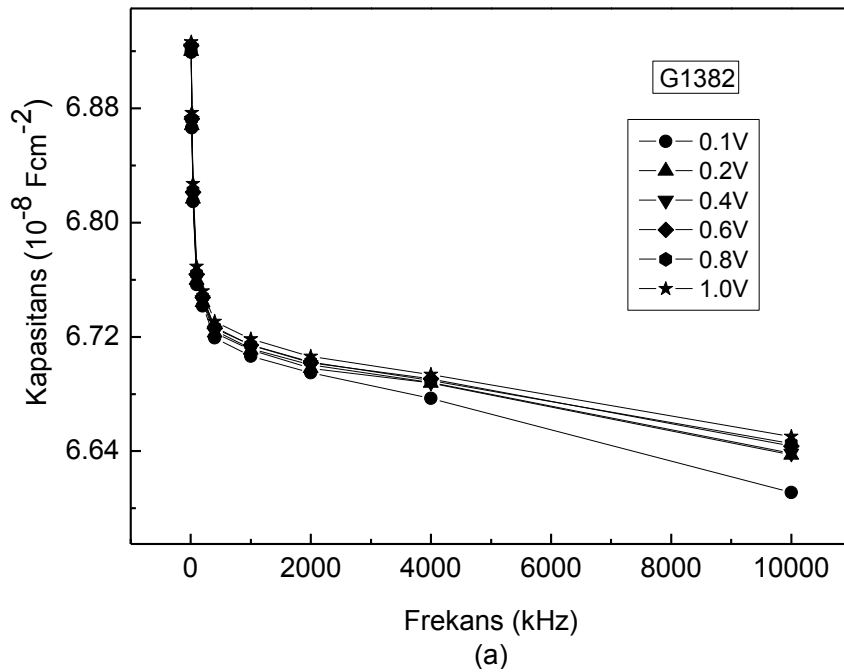
Yapılan C-V ölçümlerinden elde edilen verilerle eşitlik 3.22 ve 5.1 kullanılarak derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonu profili elde edilmiştir. Şekil (5.2)'de görüldüğü gibi taşıyıcı yoğunluğu yüzeye yakın olan yerlerde maksimum değerindedir. Ancak derinliğe inildikçe taşıyıcı yoğunluğunda hızlı bir düşüş gözlenmiştir.

5.1.2. InN Örneklerinde kapasitans Frekans Ölçümleri

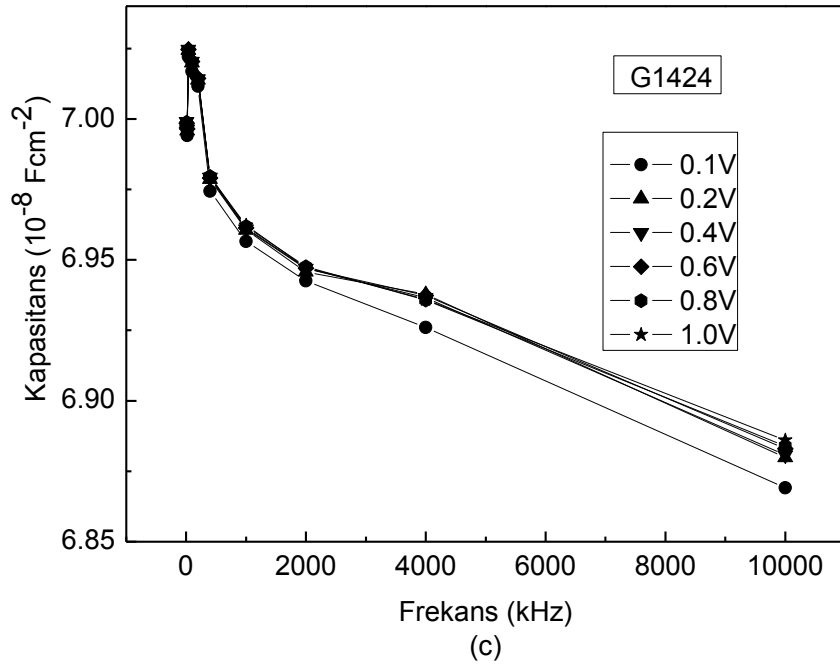
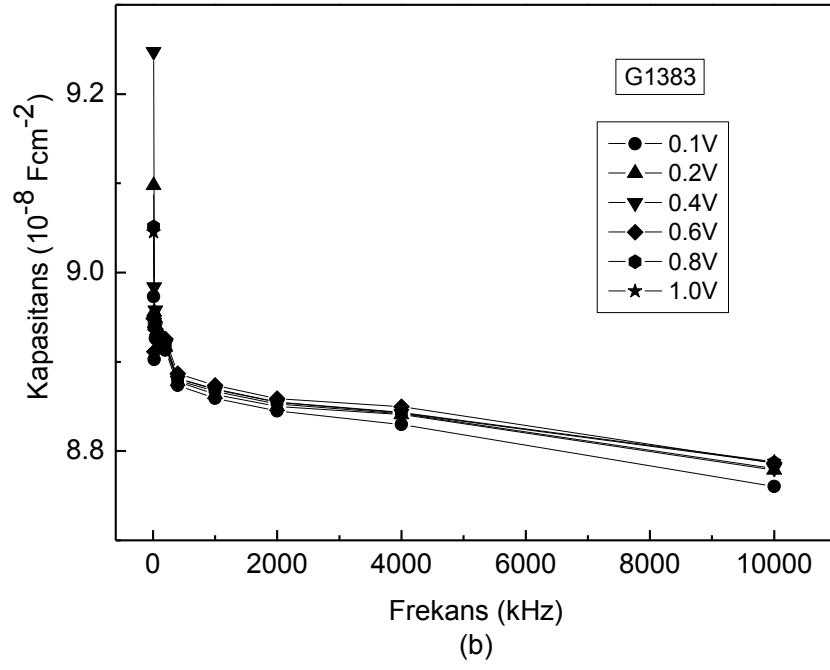
Oda sıcaklığında frekansa bağlı kapasitans davranışını ve bu davranışa gerilimin etkisini incelemek için kapasitans frekans ($C-f$) ölçümleri yapıldı. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi düşük frekanslarda kapasitans değeri yüksektir. Fakat

frekans değeri arttıkça kapasitans değerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Burada kapasitans davranışlarının frekansa bağlı olduğunu söyleyebiliriz.

Düşük frekanslarda periyot değeri (T) yüksek çıkacağından ($T=1/f$) azınlık yük taşıyıcılarının oluşum hızları yeterince yüksektir ve uygulanan frekansı takip edebilirler. Burada elde edilen kapasitans değerine bir katkıları vardır ve bu yüzden kapasitans değeri yüksek çıkar. Yüksek frekanslarda periyot değeri (T) düşük olacağından oluşum hızları yeterince yüksek değildir ve böylece uygulana frekansı takip etmeleri çok zordur. Bu yüzden yüksek frekanslarda kapasitansa katkıları ya yoktur yada ihmal edilecek kadar azdır [43].



Şekil 5.3. (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin farklı gerilimlerdeki kapasitans frekans (C-f) ölçümleri



Şekil 5. 3. (devamı) (a) G1382, (b) G1383, (c) G1424 kodlu örneklerin farklı gerilimlerdeki kapasitans frekans (C-f) ölçümleri

Kapasitans frekans ölçümlerinde uygulanan gerilimi değiştirdiğimiz zaman kapasitans frekans davranışında bir değişme olmadığı gözlemlenmiştir. Buradan, kullanılan örneklerin kapasitans frekans davranışlarının gerilimden bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden kullanılan örneklerin elektriksel özelliklerinin çok iyi olduğu söylenebilir [44].

5.2. GaInNAs Ölçümleri

5.2.1. GaInNAs Örneklerinde Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri

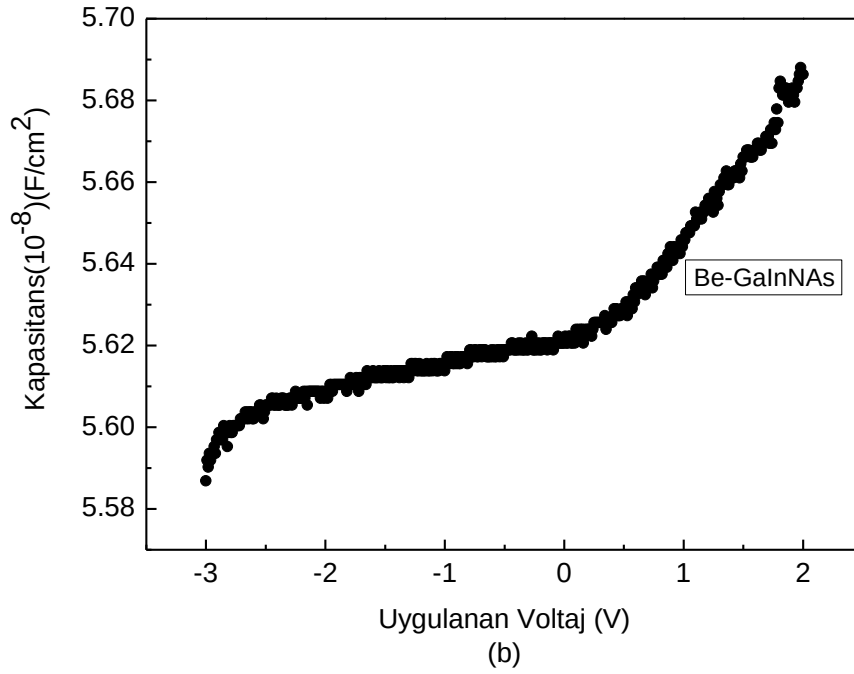
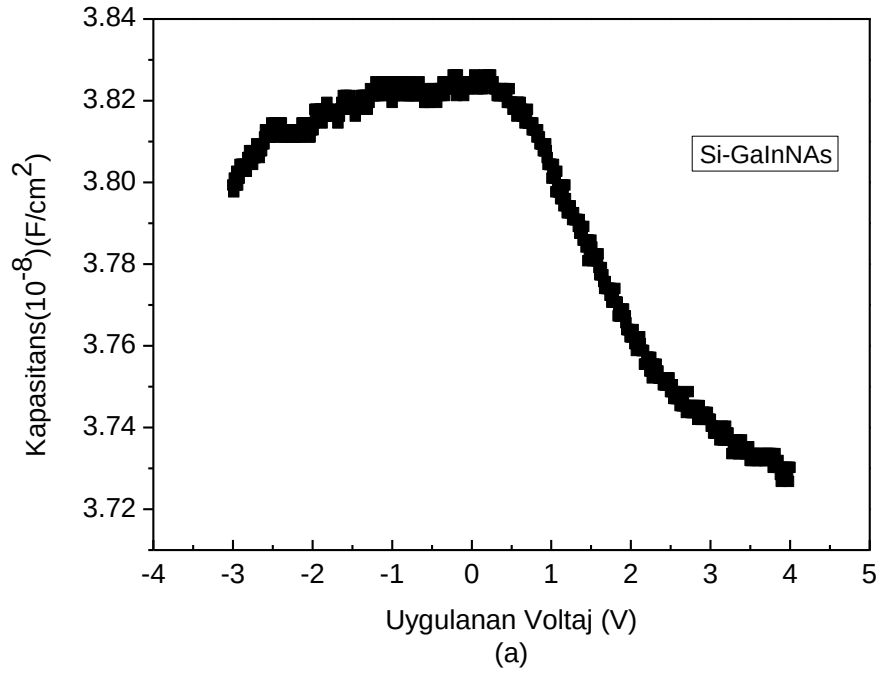
Oda sıcaklığında, nitrür oranı %1 ve %0.4 olan katkısız örnek, Si katkılı n-tipi (nitrür oranı % 1.5) ve Be katkılı p-tipi (nitrür oranı %1.5) $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ kuantum kuyu örnekleri kullanılarak kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri yapılmıştır.

Şekil 5.4 (a)'daki Si-GaInNAs örneğinin kapasitans-voltaj davranışına bakıldığında ters yönde gerilimin artmaya başlamasıyla kapasitans değerinde bir düzlüğün oluşmaya başladığı görüldü. Bu bölgede bir tersleme katmanının olduğunu söyleyebiliriz. Örnek üzerine ileri yönde bir gerilim uygulanmaya başladığında ise kapasitans değerinin hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Burada artık taşıyıcıların bariyeri aşp geçtiğini söyleyebiliriz.

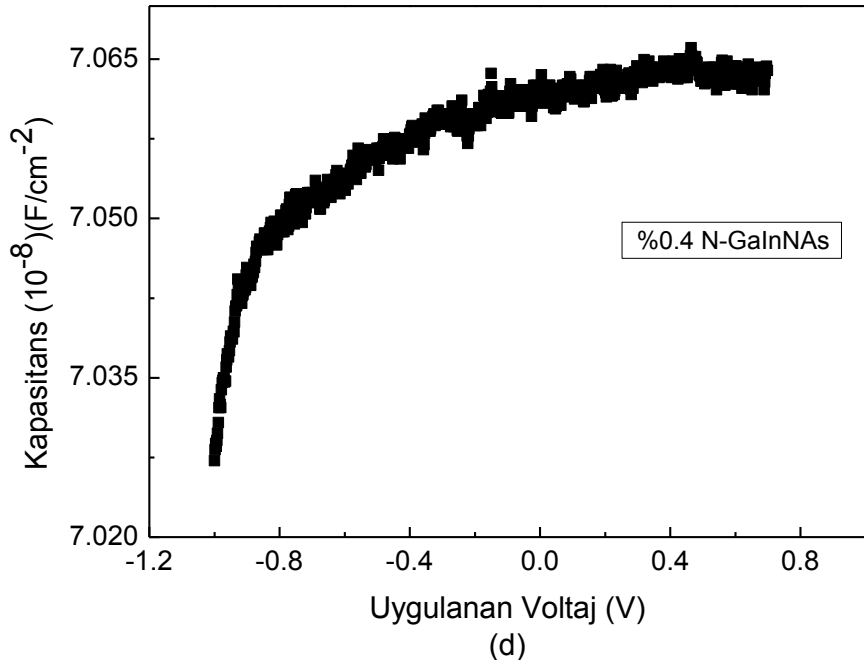
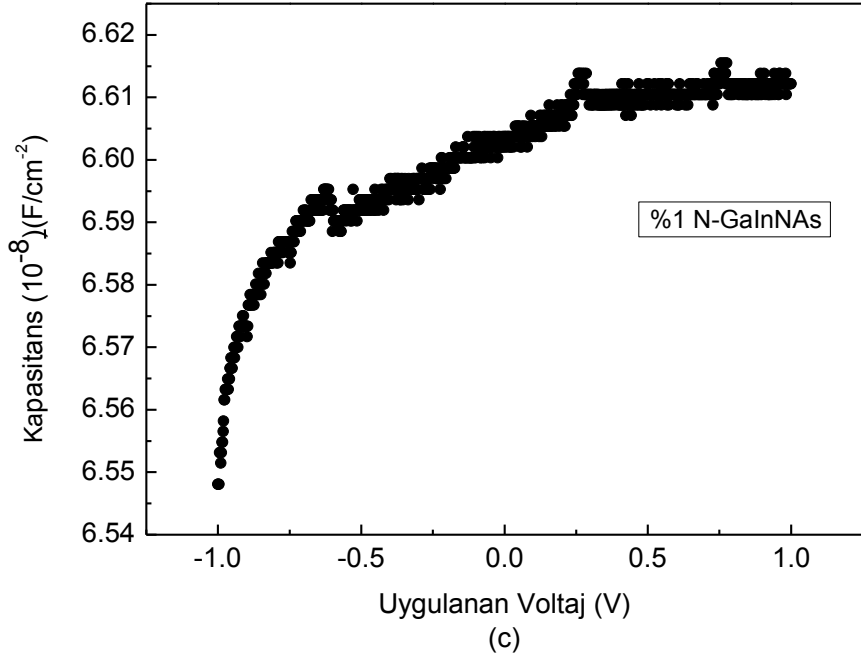
Şekil 5.4 (b)'de Be-GaInNAs örneğinin kapasitans-voltaj davranışı verilmiştir. Ters yönde gerilimin artmasıyla kapasitans değerinde bir düzlüğün oluşmaya başladığı görüldü. Bu bölgede bir birikmenin olduğu söylenebilir. İleri yönde gerilim uygulanmaya başladığında kapasitans değerinde hızlı bir artışın olduğu gözlemlenmiştir.

Oda sıcaklığında, nitrür oranı %1 ve %0.4 olan katkısız örnek, Si katkılı n-tipi (nitrür oranı % 1.5) ve Be katkılı p-tipi (nitrür oranı %1.5) $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ kuantum kuyu örnekleri kullanılarak kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri

yapılmıştır.



Şekil 5.4. Oda sıcaklığında , (a) Be-GaInNAs, (b) Si-GaInNAs, (c) %1 N- GaInNAs, (d) % 0.4 N-GaInNAs örneklerinde kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri



Şekil 5.4. (devamı) Oda sıcaklığında , (a) Be-GaInNAs, (b) Si-GaInNAs, (c) %1 N- GaInNAs, (d) % 0.4 N-GaInNAs örneklerinde kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri

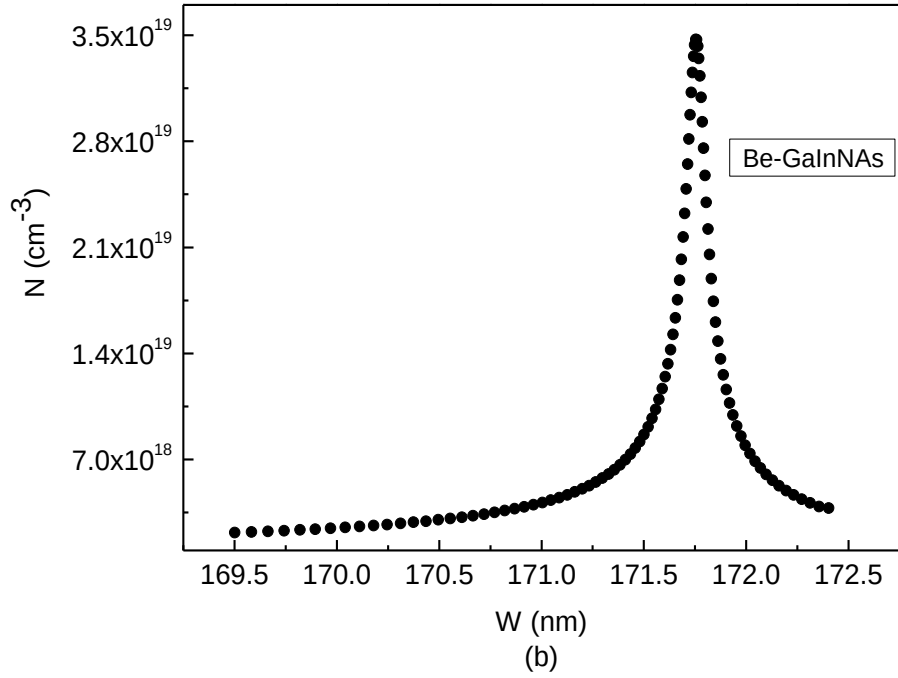
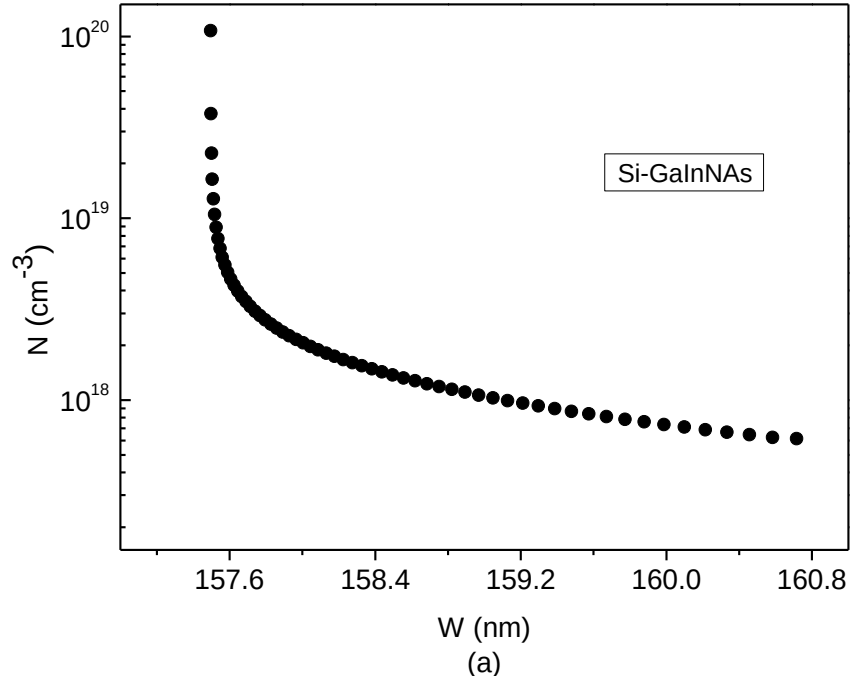
Şekil 5.4 (c) ve (d)'deki nitrür oranı %1 ve %0.4 olan katkısız örneklerle bakıldığında ters yönde gerilimin artmasıyla kapasitans değerinin hızlı bir şekilde azaldığı görülüyor. Bu bölgede bir azalma bölgesinin olduğunu söyleyebiliriz. İleri yönde gerilim artmaya başladığında kapasitans değerindeki artışın birden azaldığı ve bir düzlüğün oluşmaya başladığı görülmektedir. Bu bölgede elektronlar tarafından oluşturulan bir birikmeden söz edebiliriz.

GaInNAs örneklerinin taşıyıcı yoğunluklarını hesaplamak için kapasitans voltaj ölçümlerinden yararlanıldı. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak uygulanan voltaja karşılık $1/C^2$ grafiği çizildi. Çizilen bu grafiklerin eğimi alınmıştır.

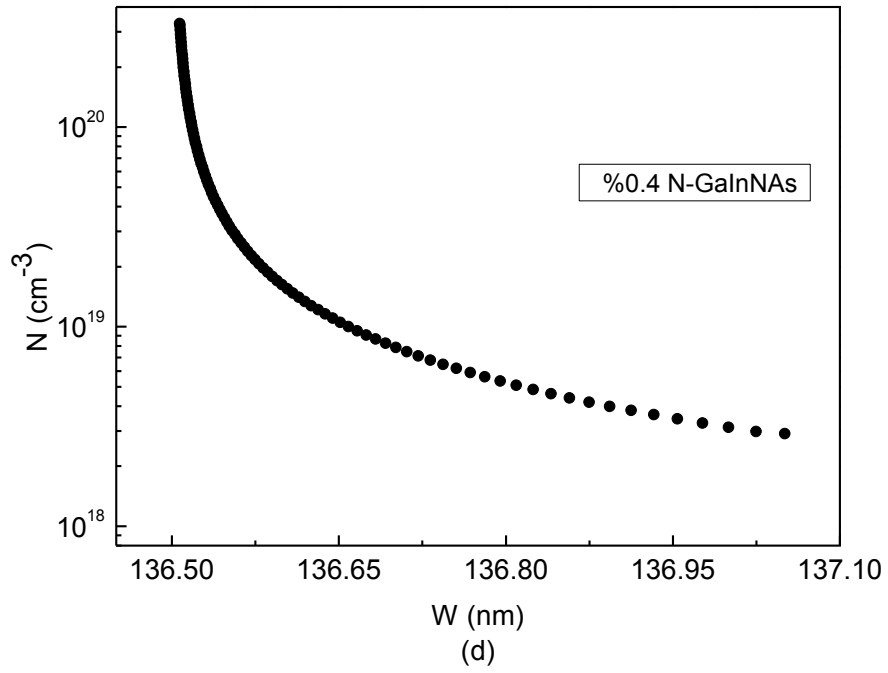
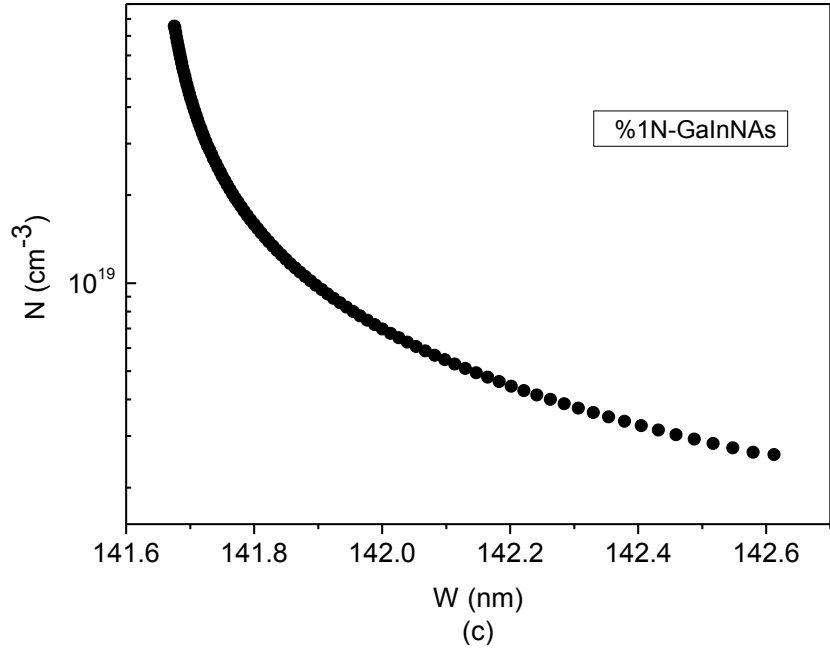
Elde edilen eğim değerleri eşitlik 5.1'deki denklemde yerine yazılarak örneklerin taşıyıcı yoğunlukları, N , bulunmuştur (Tablo 5.2)

Tablo 5.2. GaInNAs örneklerinin kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları

Örnek	Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm^{-3})
Be- GaInNAs	7.9×10^{18}
Si- GaInNAs	4.8×10^{18}
% 1N- GaInNAs	1×10^{19}
%0.4N- GaInNAs	1.8×10^{19}



Şekil 5.5. Oda sıcaklığında a) Be-GaInNAs, b) Si-GaInNAs, c) %1 N GaInNAs, d) % 0.4 N-GaInNAs örneklerinde derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları

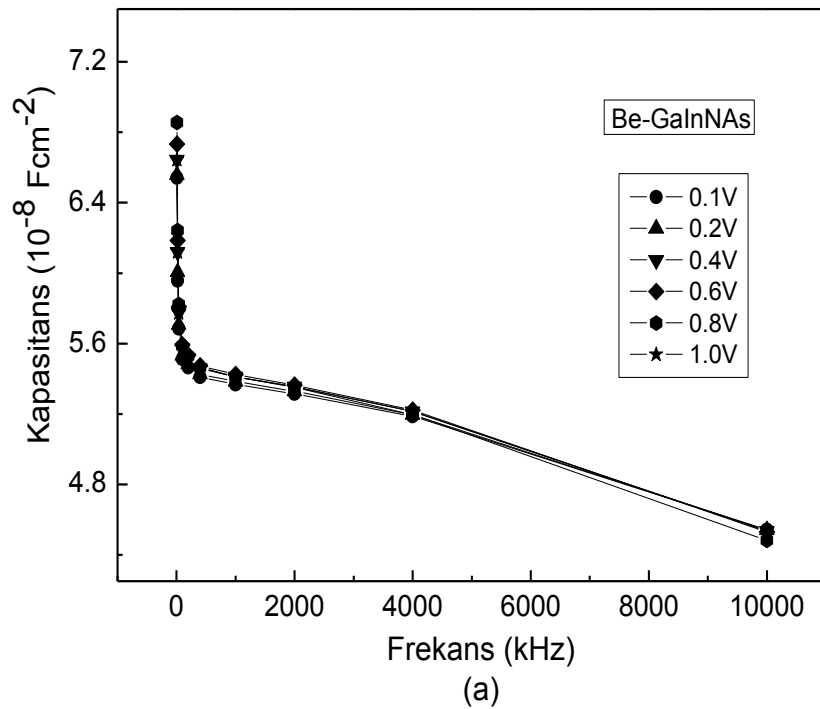


Şekil 5.5. (devamı) Oda sıcaklığında a) Be-GaInNAs, b) Si-GaInNAs, c) %1 N GaInNAs, d) % 0.4 N- GaInNAs örneklerinde derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyonları

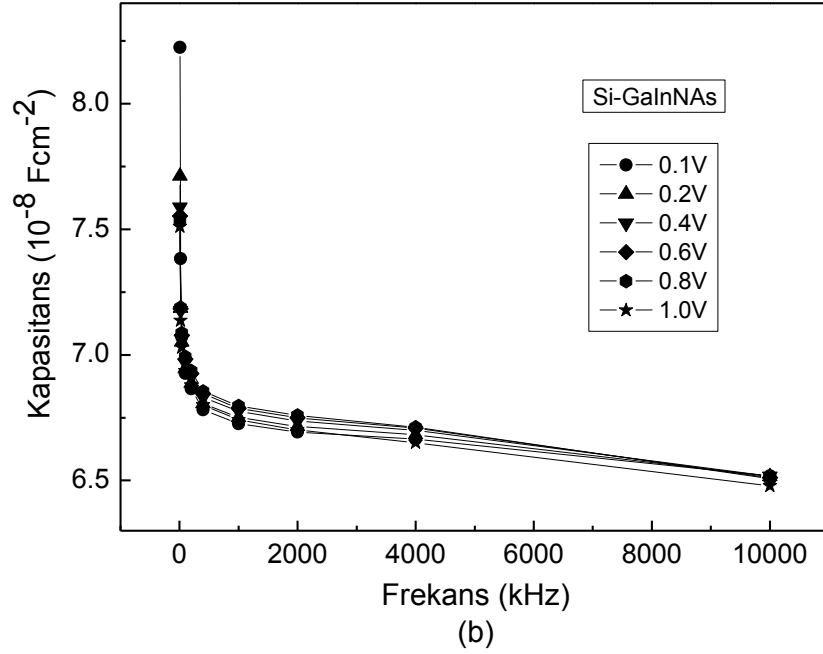
Taşıyıcı yoğunluklarının derinliğe bağlı değişim profilini elde etmek için 3.Bölüm'deki eşitlik (3.22) ve eşitlik (5.1) kullanılmıştır.

Şekil 5.5 (a), (c), (d)'de görüldüğü gibi konsantrasyon değerleri yüzeye yakın yerlerde maksimumdur. Ancak derinliğe doğru gidildikçe taşıyıcı konsantrasyonunun hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Şekil 5.5 (a) daki azalış şekil 5.5 (c) ve (d)'deki göre daha hızlıdır. Çünkü katkılama (Si) yüzeye yapılmıştır. Şekil 5.5 (b)'de Be-GaInNAs örneğinin derinliğe bağlı taşıyıcı konsantrasyon profili çizilmiştir. Yüzeyden derinlere doğru gidildikçe ilk önce katkı konsantrasyonu yavaş yavaş artmaktadır. Daha sonra hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Belirli bir derinliğe gelindiğinde katkı konsantrasyonu maksimum değerine geldiği ve sonra tekrar azalmaya başladığı görülmektedir.

5.2.2. GaInNAs Örneklerinde Kapasitans Frekans Ölçümleri



Şekil 5.6. (a), (b) GaInNAs örneklerinin farklı gerilimlerdeki kapasitans-frekans ölçümleri



Şekil 5.6. (devamı) (a), (b) GaInNAs örneklerinin farklı gerilimlerdeki kapasitans-frekans ölçümleri

Oda sıcaklığında frekansa bağlı kapasitans davranışını ve bu davranışa gerilimin etkisini incelemek için kapasitans frekans ($C-f$) ölçümleri yapıldı. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi düşük frekanslarda kapasitans değeri yüksektir. Fakat frekans değeri arttıkça kapasitans değerinde hızlı bir düşüş gözlemlendi. Burada kapasitans davranışlarının frekansa bağlı olduğunu söyleyebiliriz.

Düşük frekanslarda periyot değeri (T) yüksek çıkacağından ($T=1/f$) azınlık yük taşıyıcılarının oluşum hızları yeterince yüksektir ve uygulanan frekansı takip edebilirler. Burada elde edilen kapasitans değerine bir katkıları vardır ve bu yüzden kapasitans değeri yüksek çıkar. Yüksek frekanslarda periyot değeri (T) düşük olacağından oluşum hızları yeterince yüksek değildir ve böylece uygulana frekansı takip etmeleri çok zordur. Bu yüzden yüksek frekanslarda kapasitansa katkıları ya yoktur ya da ihmal edilecek kadar azdır.

Kapasitans frekans ölçümlerinde uygulana gerilimi değiştirdiğimiz zaman kapasitans frekans davranışında bir değişim olmadığı gözlemlendi. Buradan,

kullanılan örneklerin kapasitans frekans davranışlarının gerilimden bağımsız olduğu gözlenmiştir. Bu yüzden kullanılan örneklerin elektriksel özelliklerinin çok iyi olduğu söylenebilir.

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Oda sıcaklığında InN ve GaInNAs örneklerinde kapasitans-voltaj ($C-V$) ve kapasitans-frekans ($C-f$) ölçümleri yapıldı. $C-V$ ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak örneklerin taşıyıcı ve katkı yoğunlukları elde edildi. Elde edilen değerler, daha önce farklı yöntemlerle yapılmış ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler ile benzerlik gösterdi. $C-V$ ölçümleri 1MHz lik frekans altında gerçekleştirildi. Si katkılı örnekte ileri yönde gerilimin artmasıyla kapasitans değerinin azaldığı Be katkılı örnekte ise ileri yönde gerilimin artmasıyla kapasitans değerinin de arttığı gözlemlendi. Bu sonuç ışığında güneş pili uygulamasında Si katkılı örneğin daha avantajlı olacağını söyleyebiliriz. GaInNAs örneklerinde nitrat oranının artmasıyla konsantrasyon değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Burada nitrat atomlarının taşıyıcıları kendine bağlayarak iletkenliği düşürdüğü sonucuna varıldı. $C-f$ ölçümleri farklı gerilimler uygulanarak gerçekleştirildi. Düşük frekans değerinde kapasitans değerlerinin yüksek, yüksek frekanslarda ise kapasitans değerlerinin düşük olduğu gözlemlendi. Buradan frekansın kapasitans üzerindeki etkisi gözlemlendi. Farklı gerilimler uygulandığında kapasitans değerlerinin değişmediği gözlemlendi. Bu ölçümlerin gerilimden bağımsız olduğu gözlemlendi. Kullanılan örneklerin elektriksel özelliklerinin çok iyi olduğu ve bununla beraber örneklerin kristal yapılarının oldukça iyi olduğunu söyleyebiliriz. $C-V$ ölçümlerinde 1MHz lik frekanstaki bir gerilim noktasında elde edilen kapasitans değeri ile $C-f$ ölçümlerindeki 1MHz de aynı gerilimdeki kapasitans değeri birbiriyle uyumlu çıktı. Buradan örneklerin relaksasyon (tepki) sürelerinin birbirlerine yakın olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Rizzi, *Applied Surface Science*, **190**, 311-317 (2002).
- [2] K.M. Yu, Z. Liliental-Weber, W. Walukiewicz, S. X. Li, R. E. Jones, W. Shan, J. W. Ager III, E. E. Haller, Hai Lu, and William J. Schaff, *Applied Physics Letter* **86** 071910 (2005).
- [3] S. Yamaguchi, M. Kariya, S. Takeuchi, C. Wetzel, H. Amano, and I. Akasaki, *J. Appl. Phys.* **85**, 7682 (1999).
- [4] H. Lu, W. J. Schaff, J. Hwang, H. Wu, G. Koley, and L. F. Estman, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1489 (2001).
- [5] J. Wu, W. Walukiewicz, S. X. Li, R. Armigate, J. C. Ho, E. R. Weber, E. E. Haller, Hai Lu, William J. Schaff, A. Barcz, R. Jakiela, *Appl. Phys. Lett.* **84** 2805 (2004)- T. L. Tansley and C.P. Foley, *J. Appl. Phys.* **59**, 3241 (1986).
- [6] W. Z. Shen, L. F. Jiang, H. F. Yang, F. Y. Meng, H. Ogawa, and Q. X. Guo, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2063 (2002).
- [7] V. Yu. Davydov, A. A. Kklochikhin, R. P. Seisyan, V. V. Emtsev, S. V. Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmüller, H. Harima, A. V. Mudryi, J. Aderhold, O. Semchinova, and J. Graul, *Phys. Status Solidi B* **229**, R1 (2002).
- [8] J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, Y. Saito, and Y. Nanishi, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3967 (2002).
- [9] T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Harima, and E. Kurimoto, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1246 (2002).
- [10] Y. Saito, H. Harima, E. Kurimoto, T. Yamaguchi, N. Teraguchi, A. Suzuki, T. Araki, and Y. Nanishi, *Phys. Status Solidi B* **234**, 769 (2002).
- [11] A. G. Bhuiyan, A. Hashimoto, and A. Yamamoto, *J. Appl. Phys.* **94**, 2779 (2003).
- [12] W. Walukiewicz, J. W. Ager III, K. M. Yu, W. Shan, E. E. Haller, W. J. Schaff, W. K. Metzger, S. Kurtz, *J. Appl. Phys.* **94** 6477 (2003).
- [13] W. Walukiewicz, *Physica B* **302**, 123 (2001).

- [14] J. Wu, W. Walukiewicz, W. Shan, K. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, and W. J. Schaff, *Phys. Rev. B* **66**, 201403 (2002).
- [15] Hovel H. J. and Cuomo J., *J. Appl. Phys. Lett.* **20** 71, (1972).
- [16] Tyagi V.A, Eustignev V. A, Krasilov A M, Andreeva A F and Malatidiou V Yu, *Sov. Phys. Semicond.* **11** 1257 (1977).
- [17] Westra K I, Lawson R P W and Brett M J, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** 1730, (1988).
- [18] Tansley T. L. and Foley C. P. *Semi-Insulating III-V Compounds* D C Look and J. S. Blakemore (London: Shiva) p497, (1984).
- [19] Butcher K. S. A., Winterhert-Fouquet M., Chen P. P. T., Tansley T. L. and Sriekaw S., *Mater. Res. Symp. Proc.* **693** 16.9, (2001).
- [20] Lu H., Scaff W. J., Hwang J., Wu H., Yeo W., Pharkya A. and Eastman L.F. *Appl. Phys. Lett.* **77** 2548, (2000).
- [21] Davydov V. Yu, Ambacher O. and Goldhahn R. *Phys. Status Solidi a* **195** 628 -33, (2003).
- [22] Sugita K, Takatsuki H, Hashimoto A and Yamamoto A *Phys. Status Solidi b* **240** 421, (2003).
- [23] Saito Y, Yamaguchi T, Kano K, Araki T, Nanishi Y, Teraguchi N and Suzuki A, *J.Growth* **237** 1017, (2002).
- [24] Swartz C. H, Tomkins R. P, Myers T. H, Lu H. and Schaff W. J., *Phys. Status Solidi c* **2** 2250, (2005).
- [25] Nanishi Y., Saito Y. and Yamaguchi T., *Japan J. Appl. Phys.* **42** 2549, (2003).
- [26] R. J. Kaplar, A. R. Arehart, and S. A. Ringel, A. A. Allerman, R. M. Sieg, and Steven R. Kurtz, *Journal of Physics* , **90** 3405-3408 (2007).
- [27] Ptak, Steven W. Johnston, Daniel J. Friedman ve Sarah R. Kurtz *Journal of Applied physics* **101**, 114916 (2007).
- [28] W.K. Loke, S.F. Yoon , S. Wicaksono, B.K. Ng *Materials Science and Engineering B***131**40–44 (2006).
- [29] J. A. Jimenez Tejadai, M. J. Deen, P. Lara Bullejos, J. A. Lopez Villanueva, Gomez-Campos, S. Rodriguez-Bolivar *IEEE* 139-142 (2007).

- [30] A. J. Ptack, D. J. Frediman, Sarah Kurtz ve R. C. Reedy *Journal of applied physics*.**98**. 094501 (2005).
- [31] J. W. Ager III, N. Miller, R. E. Jones, K. M. Yu, J. Wu, W. J. Schaff, and W. Walukiewicz, *Phys. Status Solidi B***245** (2008).
- [32] H.Morkoç, *Hand Book of Nitride Semiconductor and Devices* (2008).
- [33] <http://www-opto.e-tecnik.uni-ulm.de/lehre/cs/>
- [34] S. X. Li, K. M. Yu, J. Wu, R. E. Jones, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, W. Shan, E. E. Haller, H. Lu, and W. J. Schaff, *Phys. Rev. B***71**, R161201 (2005).
- [35] W. Walukiewicz, J. W. Ager III, K. M. Yu, Z. Liliental, J. Wu, S. X. Li, R. E. Jones, and J. D. Delinger, *J. Phys.* **39** R83 (2006)
- [36] Y. Taniyasu and M. Kasu, *NTT Technical Review SpecialFeature* , **8**, 2010
- [37] S. Mazzucato, *GaNAs/GaAs Quantum Well Structures for Uncooled 1.3 μ m Lasers*, Doktora Tezi, Essex Üniversitesi (2003).
- [38] Jyun De Wu, *Improvement on Linearity in InGaAsN High Electron Mobility Transistors*, Yüksek Lisans Tezi (2005).
- [39] Sheng S. LI, *Semiconductor Physical.Elektronics Second Edition* (2006).
- [40] S. G. Aydın, *Al/PNp ClPhPPy/p tipi-Si Kontakın Elektronik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta (2010).
- [41] D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*, Second Edition (1992).
- [42] Ş. Ardalı, E.Tıraş, Mustafa Güneş, Naci Balkan, A. O. Ajaguna, E. Ilipoulos, A. Georgakilas, *Physica Status, Solidi C* **D01** 1-5 (2011).
- [43] I. Yücedağ, *Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklığa ve Frekansa Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2007).

- [44] B. Sciana, D. Pucicki, D. Radziejwicz, J. Serafinczuk, J. Kozłowska, B. Paszkiewicz, M. Taczala, P. Poloczek, G. Sek, J. Misiewicz, *Vacuum* **82** 377–382 (2008).