

167928

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

KİMYASAL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN InP İNCE FİLMLERİNİN
ELEKTRİK, OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ



Funda AKSOY

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Prof. Dr. Refik KAYALI

Temmuz 2005

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından FİZİK ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Nurdoğan CAN

Celal Bayar Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Refik KAYALI

Niğde Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Adil CANIMOĞLU

Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, 07/07/2005 tarihinde, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun 17/08/2005 tarih ve 2005/15-03 sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

25/08/2005

Doç. Dr. Mevsun İBRAHİM

Enstitü Müdürü

ÖZET

KİMYASAL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN InP İNCE FİMLERİNİN ELEKTRİK, OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AKSOY, Funda

Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Refik KAYALI

Temmuz 2005, 67 sayfa

Değişik oranlarda alınan InCl_3 ve Na_2HPO_4 ile hazırlanan eriyikler kullanılarak püskürtme yöntemi ile değişik taban sıcaklıklarında kuvars cam alttabanlar üzerine oluşturulan amorf InP ince filmlerinin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri; dört nokta yöntemi, Hall mobilite deneyi, UV spektrometresi, XRD ve SEM gibi ölçüm yöntemleri ile incelendi. Dört nokta yöntemiyle, aynı alt taban sıcaklığında farklı oranlarda hazırlanan iki ince film örneğinin karanlıktaki elde edilen özdirenç değerleri 6.25×10^4 ve $19.11 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ ve ışık altında elde edilen değerleri de 5.74×10^4 ve $12.57 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ bulundu. Aynı örneklerin Hall mobiliteleri 1.04×10^2 ve $38.58 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V-s}$ olarak elde edildi. Özdirenç ve Hall mobilite değerleri karşılaştırıldığında özdirençteki artışın Hall mobilitesinde azalışa neden olduğu görüldü. UV spektrometresi ölçüm sonuçlarından yararlanarak, farklı oranlarda ve alt taban sıcaklıklarında hazırlanan InP ince film örnekleri için elde edilen enerji bant aralığı değerleri 1.60–1.85 eV arasında değişmektedir. Örneklerin yapısal özellikleri XRD ve SEM yöntemleriyle tespit edildi. XRD ve SEM ölçümü sonuçlarından tüm ince film örneklerinde homojen bir polikristalleşmenin olduğu, fakat kristalleşmenin farklı boyut ve şekillerde meydana geldiği görüldü. Bunun yanı sıra, ince film örneklerinin içerdiği indiyum oranının artmasıyla doku boyutlarının arttığı ve buna bağlı olarak yüzey yapısındaki kristalleşmenin homojenliğe doğru gittiği görüldü.

Anahtar Sözcükler: InP, püskürtme yöntemi, elektrik ve optik özellikler, ince filmler

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF THE InP THIN FILMS OBTAINED BY SPRAYING PYROLYSIS METHOD

AKSOY, Funda

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Refik KAYALI

July 2005, 68 pages

Electrical, optical and structural properties of the InP thin films formed from the solutions prepared with InCl_3 and Na_2HPO_4 with different ratios at different temperatures by spraying pyrolysis method were studied by means of different methods, such as four probe method, Hall mobility experiment, UV spectroscopy, XRD and SEM. The resistivity values of two samples obtained by four probe method in dark and under the light were found 6.25×10^4 , $19.11 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$, 5.74×10^4 and $12.57 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ respectively. The Hall mobilities of the same samples were obtained as 1.04×10^2 and $38.58 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V-s}$ from the Hall measurements. When these obtained values of the samples were compared with each other it was seen that the increase in resistivity of the samples is due to decrease in the mobility. It was found that the band gap energy values of the four samples prepared with different ratios and substrate temperatures obtained from the UV spectroscopy measurement results were varied in the energy region 1.60–1.85 eV. The structural properties of the samples were determined by using the XRD and SEM methods. XRD and SEM measurements showed that all of the thin samples had homogen and polycrystallization structure, but it was observed that the crystallization has been formed with different sizes and formes. In addition to, it was seen that the grain sizes increase with increasing the amount of the indium in thin film samples and at same time the increase amount of the indium causes the crystallization on the surface structure of the samples to have much more homogenic structure.

Key Words: InP, spraying pyrolysis method, electrical and optical properties, thin films

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan ve yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Refik KAYALI' ya, çalışmamın deneysel ve yorum kısmında yardımcı olup laboratuvarlarını kullanmam için izin veren Gaziantep Üniversitesi ğretim üyeleri Yrd. Doç. Dr. Metin BEDİR ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÖZTAŐ' a, SEM ölçümleri almamda laboratuvarlarını kullanmama izin verdikleri için Kırıkkale Üniversitesi Fizik Bölümü ğretim üyelerine, XRD çekimleri için bana yardımcı olup yardımlarını esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi ğretim üyesi Doç. Dr. Uğur ÇEVİK' e ve dört nokta ölçümleri için laboratuvarını bana açan ve benimle birlikte ölçümleri alan Erciyes Üniversitesi Fizik Bölümü ğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Mehmet ARI' ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yer alan resimlerin çiziminde bana yardım eden ve çalışmam boyunca manevi desteğini esirgemeyen nişanlım Güvenç AKGÜL' e çok teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans çalışmam süresince beni telefonla sürekli olarak arayıp, moral verip beni destekleyen anneme de çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
BÖLÜM 3. TEORİ	12
3.1. Giriş	12
3.2. Materyallerin Enerji Bant Yapıları	12
3.2.1. Yarıiletken Materyaller	13
3.2.2. İndiyum Fosfatın Yapısal Özellikleri	15
3.3. Kristal Kusurları	17
3.3.1. Kristal Kusurlarının Elektronik Seviyelere Etkileri	18
3.4. Yarıiletkenlerde Elektriksel Özellikler	19
3.4.1. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik	20
3.4.1.1. Saçılma Mekanizması	20
3.4.1.2. Mobilite ve Öziletkenlik	21
3.4.1.3. Hall Mobilitesi	26
3.5. Yarıiletkenlerdeki Fazlalık Taşıyıcıları	29
3.5.1. Temel Soğurma	29
3.5.2. İzinli Doğrudan Geçişler	29
3.5.3. Yasaklanmış Doğrudan Geçişler	32
3.5.4. Optik Soğurma	32
3.5.4.1. Geçirme ve Soğurma	33
3.5.4.2. Soğurma Sabiti ve Bant Aralığı	34
3.6. X-Işını Kırınım Yöntemleri	37
3.6.1. Laue Yöntemi	37
3.6.2. Döner Kristal Yöntemi	38
3.6.3. Toz Yöntemi	39
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40

4.1. Giriş	40
4.2. Film Oluşturma Sistemi	40
4.2.1. Püskürtme Sistemi	40
4.2.2. Isıtıcı	41
4.2.3. Sıcaklık Kontrol Sistemi (Termostat)	41
4.2.4. Zaman Ayarlayıcı	41
4.3. Alt tabanların Hazırlanması	42
4.4. Püskürtme Eriyiğinin Hazırlanması	43
4.5. InP İnce Film Örneklerinin Oluşturulması	44
4.6. Elektriksel Ölçümler	44
4.6.1. Özdirenç Ölçümü ve Dört Nokta Metodu	44
4.7. Hall Mobilitesi Ölçümü	47
4.8. Optik Ölçümler	48
4.9. Yapısal Ölçümler	48
BÖLÜM 5. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. İnce Filmlerin Optiksel Özellikleri	49
5.2. İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri	53
5.2.1. X-Işını Ölçümleri	53
5.2.1.1. Örgü sabitinin hesaplanması	55
5.2.1.2. Doku büyüklüğü ölçümleri	55
5.2.1.3. Mikrozorlama ölçümleri	56
5.2.1.4. Dislokasyon yoğunluk ölçümleri	56
5.2.2. SEM Analizleri	58
5.3. İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri	59
5.3.1. Özdirenç ve öziletkenlik ölçümleri	59
5.3.2. Hall mobilite ölçümleri	62
BÖLÜM 6. SONUÇ	63
KAYNAKLAR	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yarıiletken materyaller. (a) periyodik tabloda yarıiletkenlerin yer aldığı sütunlar (b) elementel ve bileşik yarıiletkenler	14
Çizelge 3.2. InP' nin materyal özellikleri	17
Çizelge 4.1. InP ince filmlerinin oluşturulması için kullanılan püskürtme çözeltilerindeki InCl ₃ ve Na ₂ HPO ₄ tuzlarının miktarları	43
Çizelge 5.1. Çeşitli InP ince film örneklerinin enerji bant aralığı değerleri	52
Çizelge 5.2. InP ince filmleri için çeşitli yapısal parametreler	57
Çizelge 5.3. Örneklerin karanlıktaki ve ışık altındaki özdirenç ve öziletkenlik değerleri	60
Çizelge 5.4. InP ince film örneklerinin Hall mobilite değerleri	62



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde izin verilen enerji bantlarındaki elektron doluluk şeması	13
Şekil 3.2. InP' nin birim hücre yapısı	15
Şekil 3.3. Tipik olarak yalıtkan, iletken ve yarıiletkenlerin iletkenliklerinin değişimi	20
Şekil 3.4. İletkenlik bandındaki bir elektronun hareketi. (a) elektrik alan yokken, (b) elektrik alan varken	22
Şekil 3.5. Geçiş zamanı ve sürüklenme mobilitesinin ölçümü	24
Şekil 3.6. L uzunluğuna ve S kesit alanına sahip bir metal bloğu	25
Şekil 3.7. Hall etkisi	27
Şekil 3.8. Tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli olduğu iki direkt enerji vadisi	29
Şekil 3.9. $h\nu > E_g$ enerjili bir fotonun optik soğurulması	33
Şekil 3.10. Optik soğurma deneyi	34
Şekil 3.11. Optik soğurma (a) yarıiletken aydınlatma altında iken (b) foton akısının eksponansiyel azalışı	35
Şekil 3.12. Optik spektruma göre bazı yarıiletkenlerin bant aralıkları	36
Şekil 3.13. Laue yöntemi için deneysel düzenek	38
Şekil 3.14. Döner-kristal yöntemi için deneysel düzenek	38
Şekil 3.15. Toz deseninin ortaya çıkışı	39
Şekil 4.1. Püskürtme sistemi	40
Şekil 4.2. Cam alt tabanların temizlenme işlemi	42
Şekil 4.3. Dört nokta ölçüm tekniği	45
Şekil 5.1. (a) InP (4:1, 500°C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^{2'}$ in $h\nu'$ ye karşı elde edilen grafiği	49
Şekil 5.1. (b) InP (1:1, 475°C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^{2'}$ in $h\nu'$ ye karşı elde edilen grafiği	50
Şekil 5.1. (c) InP (3:1, 500°C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^{2'}$ in $h\nu'$ ye karşı elde edilen grafiği ...	50
Şekil 5.1. (d) InP (1:1, 450°C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^{2'}$ in $h\nu'$ ye karşı elde edilen grafiği ...	51
Şekil 5.2. InP ince film örneklerinin soğurma grafikleri ve bant aralığı enerjileri	52
Şekil 5.3. (a) InP (10:1, 500 °C) ince filminin XRD grafiği	53
Şekil 5.3. (b) InP (3:1, 500 °C) ince filminin XRD grafiği	54
Şekil 5.3. (c) InP (1:1, 475 °C) ince filminin XRD grafiği	54
Şekil 5.4. (a) InP (10:1, 500 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü	58
Şekil 5.4. (b) InP (3:1, 500 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü	58
Şekil 5.4. (c) InP (1:1, 475 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü	59

Şekil 5.5. (a) e ve (b) f örneklerinin karanlıkta ve aydınlıkta ölçülen öz dirençlerinin kaynak potansiyeline karşı değişimi 61



KISALTMA VE SİMGELER

KISALTMA/SİMGE

LED	Laser Emitted Diode
LD	Lazer Diyodu
PD	Foto Diyot
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
OTDM	Optical Time Domain Multiplexing
UV	Ultraviolet
XRD	X-Ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy
eV	Elektron Volt
InP	İndiyum Fosfat
As	Arsenik
GaAs	Galyum Arsenik
Si	Silisyum
Au	Altın
Ge	Germanyum
Ni	Nikel
Mg	Magnezyum
EDAX	Energy Dispersive X-Ray Microanalysis
E_g	Bant Aralığı Enerjisi
m_e	Elektron Kütlesi
m^*	Etkin Kütle
μ_{sr}	Sürüklenme Mobilitesi
μ_h	Boşluk Mobilitesi
τ_r	Geçiş Zamani
σ	Öziletkenlik
ρ	Özdirenç
λ	Dalgaboyu
h	Plank Sabiti

a	Örgü Sabiti
α	Soğurma Katsayısı
k	Dalga Sayısı
f.c.c.	Face Centered Cubic



BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüzde fizik alanında yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, özellikle elektronik sanayiinde çok büyük uygulama alanı bulmasından dolayı Yoğun Madde Fiziği üzerine odaklanmış bulunmaktadır. Bileşik yarıiletken ve ince film çalışmaları, Yoğun Madde Fiziği içerisinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmalar sonucunda bugüne kadar transistörler, anahtarlar, diyotlar, fotovoltaiik piller, detektörler, termistörler, LED' ler, lazer diyotları gibi binlerce aygıt geliştirilmiştir. Bu aygıtlar yerine göre bazen tek başlarına bir devre elemanı olarak, bazen de entegre devrelerin bir parçası olarak kullanılırlar.

Bileşik yarıiletken ve ince film çalışmalarında en yaygın kullanılan yarıiletkenlerin birçoğu III-V grubuna giren yarıiletkenlerdir. III-V grubu içine giren maddeler, periyodik tablonun üçüncü metalik grubunda bulunan bir element ile metalik olmayan beşinci grubunda bulunan bir elementin bir araya gelmesiyle oluşan GaAs, InP, GaN, InSb ve InAs gibi ikili kristallerdir. Bu bileşik kristallerin özelliklerinden biri, serbest elektronların ve boşlukların yüksek mobilitelere sahip olmalarıdır ve bu özelliklerinden dolayı çok-yüksek hız elektroniğinde kullanılırlar.

InP, 1980' lerin ilk günlerinden beri bu alanlarda yapılan araştırma çalışmalarında bir odak noktası olmuştur; ve bugün bu materyal fotodetektörleri, modülatörleri, yarıiletken optik yükselticileri, LED' leri, yüksek mobilite transistörleri [1], optiksel ızgaralar (optical grating) ve yarıiletken lazerleri [3] içeren fiber iletişim bileşenlerinin geniş bir çeşitliliği içine alan bir platformda yerini almıştır. Bu uygulamalardan biri fiber optik iletişim sistemleridir. InP bu sistemlerde, elektrik sinyallerini optik sinyallere çevirmek için lazer diyodu (LD) ve optik sinyalleri elektrik sinyallerine çevirmek için foto diyot (PD) olarak yüksek-hız ve yüksek-yoğunluk optik iletişim düzeneklerinin yapımında kullanılan vazgeçilmez bir materyaldir.

InP' in ulaşılabilir en yüksek elektron hızı (yüksek elektron mobilitesi), yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek elektrik alan kırılması gibi sahip olduğu fiziksel özellikleri, onu yüksek-hız ve yüksek kırılma-voltajı elektronik uygulamalarında

kullanılan elektronik elemanların yapımında uygun bir materyal haline getirir. Optik iletişimlerde kullanılan ışığa yakın bant aralığı ve büyük kırılma indisine sahip olması gibi fiziksel özelliklerinden dolayı InP elektronik aygıtları, yüksek frekans uygulamalarında veya başka bir deyişle milimetrikdalga ve mikrodalga frekanslarındaki çalışan sistemlerde kullanılır.

Bu bileşik kristallerin bir diğer özellikleri de, bu kristallerin çoğunda elektronların bağlanma bandından iletkenlik bandına doğrudan geçiş yapmalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı bileşik kristaller özellikle opto-elektronik alanında ve LED'lerin yapımında en fazla kullanılan materyaller arasında yer alır.

InP bileşik kristallerin en çok kullanıldığı alanlardan bir diğeri de, çalışma prensibi daha önce iletkenlik bandına uyarılan elektronların tekrar bağlanma bandına geri dönerlerken foton yaymaları temeline dayanan yarıiletken lazerleridir. InP'ın kullanıldığı bu lazer sistemleri dalga boyları 633 nm' den 1.3 μm ye kadar değişen lazer ışınları üretirler. Bu üretilen lazer ışınının dalga boyu aralığının bu kadar geniş olması gerek araştırmalarda gerekse teknolojideki uygulamalarda ona büyük bir avantaj sağlar. Yine bu alanda kullanılmasının bir başka nedeni daha vardır. InGaAs ve InGaAsP ' ı içine alan materyallerin bir ailesi, temel InP tabanı üzerinde epitaksiyal işleme müsaade eden InP gibi aynı 5.87 Å örgü sabitini paylaşırlar. Bu materyaller, lazer verimliliğini iyileştirmek için elektriksel sınırlama ve aktif (kazanç veya soğurulma) ve pasif (geçirgenlik) optiksel dalga kılavuzu fonksiyonlarını oluşturmak için optiksel sınırlama gibi durumlarda kullanılabilir. Özellikle InGaAsP dörtlü materyalinin kompozisyonunu (bileşimini) değiştirerek, dalga boyu bant aralığı dalga boyu 0.92 μm ve 1.65 μm arasında yer alan lazer üretilebilir. Bu da, 1.25-1.65 μm arasındaki telekomünikasyon penceresinde herhangi bir dalga boyu için aktif (soğurma ve kazanç) ve pasif (geçirgen) fonksiyonlar sağlama imkanı (olanağını) verir. Diğer uyumsuz materyaller, kuantum etkileri ve zorlanma gibi kullanışlı özellikleri eklemek için ince tabakalar üzerine büyütülebilir.

InP'nin anahtar avantajlarından biri, düzenek boyutudur. Çünkü, InP' nin kırılma indisi ve onun üçlü (InGaAs) ve dörtlü (InGaAsP) türevleri göreceli olarak diğer optik materyallerden daha büyüktür; bükülmeler daha keskin ve küçük yapılabilir. Diğer taraftan nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte bileşik kristallerle yapılan sistemlerin

boyutları çok küçülmüş, buna karşın kullanılma alanlarının sayısı daha da artmıştır. Bunun bir sonucu olarak, InP' in da içinde yer aldığı bu sistemler CD çalarlar, bilgisayar yazıcılar, metroloji ve optik iletişim sistemleri gibi bir çok uygulama alanı bulmuştur. InP' in bir diğer kullanım alanı ise, onun lüminesans (ışık) özelliğe sahip olmasından dolayı LED diyotlardır.

Bir yarıiletken olarak InP, entegre devrelerin üretimi için de çok kuvvetli bir potansiyeldir. Bu, tek bir çip üzerinde lazerler, modülatörler ve yükselticiler gibi değişik aktif optik elementler ile optiksel anahtarlar, çoklu gönderici sistemler (multiplexers), ayrıştırıcılar, birleştiriciler ve interferometre gibi pasif dalga kılavuzlarını bir araya getiren Fotonik Birleşik Devre sistemini temsil eder. Bundan başka, HBT (heterojunction bipolar transistor)' ler üzerine şu andaki geçerli geliştirme çalışması, yüksek hız DWDM ve OTDM sistemlerinin uygulaması için çok güçlü ve maliyet-etkili çözümler üreterek elektriksel sürücü devresi ile optik elementlerin bir araya getirilmesidir.

InP yarıiletkeni son yıllarda güneş hücrelerindeki uygulamaları nedeniyle de üzerinde yoğun araştırmalar yapılan ve en fazla kullanılan bir materyal haline gelmiştir. Güneş hücrelerinde daha önce yaygın bir şekilde kullanılan materyallere göre birçok avantaja sahiptir. Bunlardan Si ve GaAs yarıiletkenleri ile karşılaştırıldığında, oda sıcaklığında 1.34 eV' luk bant aralığı enerjisine sahip olduğundan dolayı görünür ışık spektrumunun optimum biçimde kullanımında daha uygun olması, direkt bant aralığı ile daha ince olabilmesi, yüksek sıcaklıklara daha duyarlı olması nedeniyle yüksek-şiddetli güneş ışığı altında kullanılabilmesi, radyasyon azalmasına daha duyarlı olması bunun da uzay uygulamaları için güneş hücresi materyal alanının ve kütesinin indirgenmesine yol açması ve daha küçük yüzey yeniden birleşme hızına sahip olması gibi avantajlara sahiptir.

Elektronik uygulamalar için indiyum fosfatın (InP) kullanımını yirmi yılı aşkın bir süredir geniş bir araştırma konusu olduğu için optiksel ve elektriksel fonksiyonların gerçekleştirilebileceği geniş kapsamlı bir InP-tabanlı teknolojinin gelişmesi, optik iletişimlerin geleceğini devrimsel olarak değiştirecektir.

Sonuç olarak, son yirmi yılın yarıiletken teknolojisinde özellikle optik iletişim alanında çok önemli bir yere sahip olan indiyum fosfatın (InP) elektrik, optik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi, bilimsel ve teknolojik açıdan önemlidir.

Bu çalışmada, değişik oranlarda ve farklı alt taban sıcaklıklarında InP ince filmlerinin oluşturulmasında Püskürtme Payrolisis (ısı yoluyla kimyasal değişimin sağlanması) Metodu ilk kez uygulanmış ve elde edilen ince filmlerin elektrik, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Oluşturulan InP ince filmlerin elektrik özellikleri dört nokta metodu ve hall ölçümleri, optik özellikleri UV Geçirme Spektrometresi, yapısal özellikleri ise XRD ve SEM yöntemleri kullanılarak bulunmuştur. Birinci bölüm olan giriş bölümünde kısaca InP ile yapılan çalışmaların önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde, geçmişten bugüne InP yarıiletkeni üzerine yapılan çalışmaların tarihçesi verilmiştir. Üçüncü bölümde konuyla ilgili gerekli olan teorik bilgiler açıklanmıştır. Deneysel çalışmaların yer aldığı dördüncü bölümde InP ince filmlerin nasıl ve hangi koşullar altında oluşturulduğu, elektrik, optik ve yapısal özelliklerinin nasıl tespit edildiği ve incelendiği anlatılmıştır. Beşinci bölümde, elde edilen sonuçlar verilmiş ve bunların detaylı bir şekilde fiziksel yorumları yapılmıştır.

BÖLÜM II

2.1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, InP yarıiletkeni üzerine geçmişten bugüne kadar değişik amaçlar ve uygulamalar için yapılmış olan gerek teorik gerekse deneysel çalışmalar taranmış ve bu çalışmaların içerikleri kısaca verilmiştir.

InP üzerine bugüne kadar birçok araştırmacı tarafından teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri, In-çözültisinden (solüsyonundan) büyütülen n-tipi InP tek kristallerinin lüminesans özellikleri üzerine yapılan çalışmadır. Bu çalışmada hem zayıf hem de yüksek derecede katkılanmış InP örneklerinin lüminesans özellikleri incelenmiştir. Zayıf katkılama çalışmaları birçok araştırmacı gruplar tarafından yapıldığı halde, yüksek derecede katkılamalı örnekler üzerinde ilk çalışma bu grup tarafından yapılmıştır. Bu iki farklı çalışmanın sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında zayıf katkılanmış örneklerde helyum sıcaklığında iki ana yayılım bandının ortaya çıktığı görülmüştür. Bunlardan biri (dört yayılım çizgisi içeren) 1.416 eV yakınında ve ikincisi de 1.38 eV' ta ortaya çıkmıştır. Yüksek derecede katkılanmış örneklerde ise, iki yayılım bandı banttan-banda ve bant-alıcı birleşmesi olarak açıklanmıştır. Bu değişikliğin yüksek enerjiye doğru kayma olarak bilinen Burstein-Moss kaymasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Elde edilen diğer bir sonuç da, elektron yoğunluğunun 10^{18} elektron/cm³' ten daha büyük olması durumunda, bant-alıcı geçişinin göreceli olarak şiddetinin artması, yayılım bandının genişlemesi ve bu bandın baskın yayılım bandı haline gelmesidir [4]. Aynı araştırmacı grubu tarafından, önceki çalışmalarından farklı olarak, Fermi seviyesinin taşıyıcı yoğunluğu ile kaymasını parabolik iletkenlik bandını kabul eden teori ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak deneysel kaymanın bant kuyruklanma ve bant aralığındaki azalma etkilerine bağlı olarak, beklenen Burstein-Moss kaymasını takip etmediği ortaya konulmuştur. Ayrıca, InP tek kristallerinin elektron mobiliteleri incelenmiş ve oda sıcaklığı Hall mobilitelerinin elektron konsantrasyonuna olan bağımlılığını Moore ve Brooks-Herring' in teorik eğrileri ile karşılaştırılmıştır [5].

InP, fotovoltaik pillerin yapımında en fazla kullanılan yarı iletken maddelerden biridir. Buna bağlı olarak, bu konuda birçok teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. S. C. Dahlberg, çalışmasında n-tipi InP (100)' in geçici fotovoltaik sinyallerini, rötarlı

potansiyel elektron ışın tekniği ile çalışmış ve örneğin ışığa maruz bırakıldığı süre içinde veya ışık şiddeti azaldığı zaman fotovoltajın azaldığını gözlemlemiştir. Diğer taraftan foto voltajın, örnek üzerine düşürülen fotonların enerjilerinin bant aralığı enerjisinden küçük olması halinde birden bire azaldığını, sıcaklığa bağımlı olduğunu ve yüzey bileşimindeki değişikliklere duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen diğer bir sonuç da, örnek Ar ile bombardıman edildiği zaman fotovoltaj ve iş fonksiyonunun keskin bir şekilde azalmasıdır [6].

InP çoğunlukla diğer yarıiletkenlerle beraber kullanılır. Bu sistemlerin daha etkili olarak kullanılabilmesi için onların fiziksel özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Bu amaçla yapılan çalışmalardan biri n-tipi materyal içerisine çinko difüzyonu ile oluşturulan p-tipi InP tabakalarının elektriksel özelliklerini saptamak için yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, kristallere nüfuz eden safsızlık atomlarının dağılımı, radyo-izleyici analiz yöntemiyle analiz edilmiştir. Ayrıca, homojen olmayacak şekilde katkılanan numuneler üzerinde p-n kavşak ölçümleri yapılarak nüfuz eden bir tabaka içindeki çinko atomları sayısının sığ alıcıların sayısından çok daha fazla olduğu gösterilmiştir. Atomların ve taşıyıcı konsantrasyonlarının bu uygunsuzluğu dört nokta öz direnc, Hall etkisi ve kapasitans-voltaj ölçümleri ile saptanmıştır. Bunlara ilaveten p-tipi InP için $5 \times 10^{18} - 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ aralığındaki taşıyıcı mobilitesinin taşıyıcı konsantrasyonuna karşı elde edilen grafiğinden Hall etkisi ölçümleri için, bir altın prop nokta kontak işlemi geliştirilmiştir [7].

InP' nin fiziksel özellikleri üzerine yapılan diğer bir çalışmada, InP üzerine depolanan ve omik kontak olarak kullanılan ince metalik tabakaların elektriksel ve metalurjik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, metalik tabakalar $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstündeki sıcaklıklarda ısısal işleme tabi tutulmuş ve Auger elektron spektroskopisi ile incelenmiştir. n-tipi InP' ye kontak için altın, nikel ve Ni / Au / Ge bileşik tabakası olmak üzere üç ayrı ince film sistemi oluşturulmuştur. Bileşik Ni / Au / Ge / InP içindeki nikelin omik davranış sergilediği görülmüş ve $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ lük net bir katkılama için $r_c = 3 \times 10^{-5} \Omega$ değerinde bir minimum kontak direncine sahip olduğu bulunmuştur. Bunun yanı sıra p- tipi InP' a kontak olarak kullanmak için Au / Mg ' den oluşan bir film oluşturulmuştur. $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ' nin üzerindeki sıcaklığa tabi tutulduğunda artan sıcaklıkla birlikte Au / Mg / InP sisteminin minimum kontak direncinin azaldığı ve daha yüksek sıcaklıklarda yüzey morfolojisinin alaşım haline geldiğinin işareti

gözlemlenmiştir. 50 dakika boyunca $446^{\circ}C$ 'de ısıtılan ve $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'lük katkılanmış örneklerde, en düzgün yüzey elde edilmiş, minimum kontak direnci $r_c \approx 1 \times 10^{-4} \Omega$ olarak bulunmuştur [8].

InP üzerine yapılan çalışmalar, 1980' li yıllardan itibaren büyük bir hız kazanmıştır. Bu yıllarda, özellikle InP' ın elektro-optik uygulamalarını içeren çalışmaların yapılması, InP-tabanlı çeşitli bileşenlerin geliştirilmesine ve bu bileşenlerin de fiber optik iletişimlerde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu konuda yapılan çalışmalardan birinde, fiber optik uygulamalar için, düşük oda-sıcaklığı eşik akımlı (25 mA), yüksek modülasyon frekanslı ($> 2 \text{ GHz}$) ve uzun cw oda-sıcaklığı yaşam ömürlü ($> 10^4$ saat) diyot lazerler geliştirilmiştir. InP içinde, p-n birleşim çığ bölgesine ve GaInAsP içinde fotoduyarlı bölgeye sahip olan, birkaç yüz pik çığ kazançlı ve on defa daha düşük sızıntı akımlı çığ fotodiyotları yapılmıştır. Ayrıca, sinyal-işlem uygulamaları ve mümkün olan iletişim uygulamaları için $\sim 18 \text{ ps}$ atma genişliklerinde çalışan dış-boşluk mod-kilitli lazerler, 2.2 GHz ' de çalışan Q-anahtarlı lazer modülatörü ve çok hızlı tepki zamanlı ($< 50 \text{ ps}$) InP opto-elektronik devre anahtarları geliştirilmiştir [9].

III-V grubu opto-elektronik aygıtların, lazerler, LED' ler veya foto detektörler gibi, II-VI grubu elektronik aygıtlarla veya devrelerle birleştirilmesi son zamanlarda bir çok laboratuarda hatırı sayılır şekilde ilgi çeken başlıklar olmuştur. Bu yeni entegre edilmiş opto-elektronik devreler (OEIC' ler) yüksek-hız dijital VLSI silikon devreleri arasında iç bağlantılarının gelişmesinde olduğu gibi fiber optik iletişim sistemlerindeki bir çok uygulamalar için önerilmiştir. Bu çalışmalardan birinde, yarıiletken lazerlerin onların OEIC içinde entegrasyonu için ihtiyaç duyulan özellikleri vurgulanmıştır. Sonuç olarak, opto ve mikro-elektronik teknolojileri arasındaki uyumluluk analiz edilmiş ve GaAs / GaAsAs ($0.85 \mu\text{m}$) veya InP / GaInAsP ($1.3 \mu\text{m}$) lazerleri içeren daha ileri devre örnekleri yeniden çalışılmıştır [10].

InP' nin güneş pillerinin yapımında kullanılmasıyla ilgili çalışmalardan biri de, Si alt tabakası üzerine InP ince film güneş hücresinin oluşturulması üzerinedir. Bu yapı içerisinde, InP' nin yüksek radyasyon direnç ve yüksek verim özelliğine sahip olması, hem sistemin maliyetini düşürür hem de cihaz ağırlığının azalmasını sağlar. Yapılan çalışmada, InP' nin GaAs ve Si'ye göre bir ince film güneş hücresi materyali olarak

avantajları tartışılmıştır. InP ince film güneş pillerinin fotovoltajik özellikleri, ince filmdeki azınlık-taşıyıcı difüzyon uzunluğu üzerindeki dislokasyon etkisi göz önünde tutularak hesaplanmış ve bunun sonucunda InP ince filmi içerisindeki dislokasyon yoğunluğunun 10^6 cm^{-2} den az olması durumunda Si alt tabakaları üzerine InP ince film güneş pillerinin % 18 veya daha fazla verimlilikle üretilebileceği ortaya konulmuştur [11].

Fiber optik iletişim sistemlerinde, InP' nin optiksel-dalga klavuzu uygulamalarında kullanımı ile ilgili bir çalışmada, örgü sabiti InP' ye uydurulmuş ve dalga klavuzu uygulamalarında kullanılması düşünülen InGaAsP dörtlü alaşımları incelenmiştir. Bu sistemlerde optiksel soğurma katsayısı ve kırılma indisi n en önemli parametreler oldukları için, InGaAsP sisteminin içerdiği materyallerin değişik miktarları için bu parametrelerin her ikisinin de değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan birkaç deneyle karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalar film şeklindeki dikdörtgen dalga klavuzlarına uygulanmış ve üzerinde çalışılan parametrelerin bu şekilde kullanılması halinde entegre edilmiş-optik uygulamalarında kaybın yeterince küçük olacağı gösterilmiştir [12].

İndiyum fosfatın en fazla kullanıldığı sistemlerden biri de detektörlerdir. Bu konuda hem teorik hemde deneysel olmak üzere bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada ilk defa düşük enerjili ışınları detekte etme yeteneğine sahip p-n kavşaklı InP katı hal detektörü geliştirilmiştir. Çalışmada, sıvı faz epitaksiyal işlemi ile büyütülen bir tabaka içerisine Zn nüfuz ettirilerek p-n kavşağı oluşturulmuştur. Detektör oda sıcaklığında çalıştırılarak düşük enerjili gama parçacıkları, nötrinolar ve ışınlar karşı spektrum tepkileri ölçülmüş ve 2.2 MeV enerjili parçacıklar için çözüm %10 olarak bulunmuştur [13].

InP' nin, diğer yarıiletkenlerle beraber daha etkili bir biçimde kullanılabilmesi için onların fiziksel özelliklerinin yanı sıra optik özelliklerinin de çok iyi bilinmesi gerekir. Bu konu da birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde, InCl₃ ve NH₄PF₆ içeren sulu bir çözeltiden titanyum (Ti) üzerine elektroliz yöntemiyle ~ 0.45 µm kalınlığında InP ince filmleri oluşturulmuş ve bu örneklerin stoikiyometrik, elektrik ve optik özelliklerini incelenmiştir. Örneklerin stoikiyometrik yapısını belirlemek için EDAX, X-ışını ve TEY yöntemleri uygulanmış ve örneklerdeki elementel In ve P

sırasıyla %49 ve %51 olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda SEM yöntemiyle kaplama yapılan yüzeyde oluşan InP kümelerinin boyutlarının $\sim 100 \text{ \AA}$ olduğu tespit edilmiştir. Soğurma ölçümlerinden yararlanılarak optik bant aralığı değeri yaklaşık olarak 1.22 eV bulunmuştur. Elektriksel özdirenç ve Hall ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak, oda sıcaklığında örneklerin özdirenci $6.2 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ ve elektron taşıyıcı yoğunluğu $3.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ olarak elde edilmiştir [14].

İnce film oluşturulmasında alt taban olarak en fazla kullanılan materyallerden biri de cam alt tabanlardır. Yapılan bir çalışmada, cam alttabakalar üzerine d.c. magnetron saçılma tekniği ile InP ince filmleri oluşturulmuştur. Elde edilen ince filmlerin elektriksel iletkenliği, Hall mobilitesi ve optik özellikleri 120 K' den 400 K'e değişen sıcaklık aralığında ölçülmüş ve sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda düşük sıcaklıklarda oluşturulan ince film örneklerinde doku sınırlarının saçılmada büyük rol oynadıkları yüksek sıcaklıklarda da optik ve akustik fononların daha öne çıktıkları gözlenmiştir. Diğer taraftan optik ölçümler sonucu, bu örneklerin direkt geçiş enerjileri 1.30-1.34 eV arasında bulunmuştur [15].

InP ince filmleri, birçok değişik yöntem kullanılarak oluşturulur. Bu yöntemlerden biri de, süperkritik akış kimyasal depolama yöntemidir (SCFD). Bu konuda yapılan bir çalışmada, ilk kez bu yöntemle III-V grubuna giren InP ince filmi alt taban olarak kullanılan InP üzerine 500 °C' de oluşturulmuştur. Bu yöntemle elde edilen örneklerin kalitesi oldukça yüksek ve ayna özelliği fazladır. Ayrıca MOCVD (metal organic chemical vapour deposition) ve MOMBE (metal organic molecular beam epitaxy) yöntemleri ile oluşturulan InP ince filmlerine göre de gerek maliyet açısından gerekse fiziksel özellikleri bakımından birçok avantajlara sahiptir [16].

Teknolojik öneminden dolayı III-V yarıiletkenlerinin optiksel özellikleri, hem deneysel hem de teorik olarak büyük ilgi konusu olmuştur. Kübik yapıda kristalize olan InP, bu özelliğinden dolayı bu çalışmalarda kullanılan önemli yarıiletkenlerden biridir ve çoğu kez yüksek hız elektriksel ve opto-elektronik aygıtlar için alt-tabaka olarak kullanılır. Onun için, InP' nin dielektrik sabitlerinin ve bu sabitlerin frekans bağımlılığının değerlerinin en doğru şekilde bilinmesinin önemi büyüktür. Bu amaçla yapılan teorik bir çalışmada, bütün potansiyel lineer muffin-tin (yarımay-teneke çörek) yörüngesel (FPLMTO) yöntemi kullanılarak InP' nin dielektrik fonksiyonu ve bant

yapısı hesaplanmıştır. Elde edilen dielektrik fonksiyon değerleri Herzinger (1998)' in çalışmasındaki yeni verilerle karşılaştırılarak iyi bir uyum içinde oldukları ortaya konulmuştur. Ayrıca, hesaplanan bant aralığı değerinin deneysel bant aralığı değerinden yaklaşık 0.7 eV daha küçük olduğu bulunmuştur [17].

İnce filmlerin oluşturulmasında epiteksiyel büyütme birçok değişik yöntemle gerçekleştirilir. Bunlardan biri, pirolitik kimyasal buharla depolama (CVD) yöntemidir. Yapılan bir çalışmada, ((C₆H₁₁)PH₂) ve TMI'n (trimethylindium)' nin karıştırılmasıyla hazırlanan eriyik ile CVD metodu kullanılarak hem silikon hem de InP (100) alt tabanlar üzerine değişik sıcaklıklarda ve değişik oranlarda (III-V) olacak şekilde kristal InP ince filmleri oluşturulmuştur. Silikon ve InP (100) alt tabanları üzerine değişik sıcaklıklarda ve oranlarda elde edilen InP ince filmlerinin polikristal şeklinde oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmada bulunan en önemli sonuç cyclohexylphosphine' nin InP depolanmasında bir fosfit kaynağı olarak kullanılabilceğidir [18].

Yukarıda anlatılan çalışmaya benzer bir çalışma, InP ince filmlerinin InP (001) alt tabanları üzerine moleküler ışın epiteksiyel (MBE) yöntemiyle oluşturulması üzerine yapılan çalışmadır. Bu çalışmada ilk defa indiyum fosfatın InP (001) alt tabanı üzerine homoepiteksiyel yöntemi ile büyütülmesi esnasında P₂ birleştirme katsayısı ve grup V kinetiğini açıklamakta Yansıma Yüksek Enerji Elektron Kırınım (RHEED) yöntemi kullanılmış ve P₂' nin birleştirme oranı ve birleştirme katsayısının alttabaka sıcaklığı ile azaldığı tespit edilmiştir [19].

Son yıllarda, nanoteknolojide ileri nanoaygıt uygulamalarındaki potansiyellerinden dolayı InP nanotelleri, nanotüpleri ve InP içeren kuantum noktaları araştırmacılar tarafından üzerinde en çok çalışılan yapılar arasındadır. Bu çalışmalardan biri, InP nanotellerinin ve nanotüplerinin sentezlenmesi ve yapılarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmadır. Yüksek sıcaklıkta reaksiyona giren InP ve In₂O₃ içinden InP nanotellerin sentezlenmesini sağlayan deneysel bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, bu yüksek sıcaklıkta buharlaşan ve indiyum ve fosfor içeren buharlar bir düşük sıcaklık depolama bölgesine taşınır ve daha sonra oksit buharının olduğu bu bölgede yeniden kristallendirilerek bir boyutlu yapılara dönüştürülür. Ortaya çıkan bu yapılarda, depolama sıcaklığının ve oksit konsantrasyonunun her ikisinin de InP nanotellerinin yarıçapının ve morfolojisinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı

gözlemlenmiştir. Aynı zamanda fazla miktarda oksit kullanıldığı zaman InP nanotüplerinin de sentezlenebileceği gösterilmiş ve sentezlenen nanotüplerin yapısal analizleri yapılarak mümkün olan büyütme mekanizmaları ortaya konulmuştur [20].

InP nanoyapıları üzerine yapılan başka bir çalışmada, lazer uygulamaları için 1.55 μm civarında ışık yayan InAs / InP kuantum noktalarının yeni optiksel özellikleri ortaya konulmuştur. Orijinal bir büyütme metodu ile oda sıcaklığında kuantum noktası yayılım dalga boyunun 1.3-1.5 μm arasında kontrol edilebileceği gösterilmiş, 1.3 μm ' de yayılım yapan kuantum noktalarından elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Optiksel ölçümler, sürekli dalga ve zaman-çözümlü fotoluminesans deneyleri ile yapılmıştır. Ayrıca, bant yapısı modellemesi ile bulunan teorik sonuçların deneysel verilerin yorumları ile uyumlu olduğu ortaya konulmuştur [21].

InP ince filmlerinin oluşturulmasında kullanılan, bilinen uygulamalar dışında değişik ince film oluşturma sistemleri de vardır. Bunlardan biri, atmalı lazer depolama yöntemidir. Bu çalışmalardan birinde, safir (100) ve GaAs (100) üzerine InP ince filmleri bu yöntem kullanılarak oluşturulmuş ve örneklerin yapıları ve morfolojileri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, 573 K' de ve 10^{-8} torr basınç altında depolama parametrelerini değiştirmek suretiyle yüzey pürüzlülüğü 4-12 nm arasında değişen düzgün yüzeyli InP filmlerinin elde edileceği gözlenmiştir [22].

Aynı araştırmacılar, aynı yöntemle, aynı materyaller üzerine InP ince filmlerini oluşturmuşlardır. Bu iki çalışma arasındaki farklardan biri, ince filmleri büyütme hızlarıdır. İlk çalışmada ince film büyütme hızı 0.06 $\text{\AA} / \text{s}$ iken ikinci çalışmadaki büyütme hızı 1.6 $\text{\AA} / \text{s}$ ' dir. Önemli farklardan biri de, birinci çalışmada yüzey pürüzlülüğü 4-12 nm arasında değişirken ikinci çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü 78 nm civarındadır [23].

BÖLÜM III

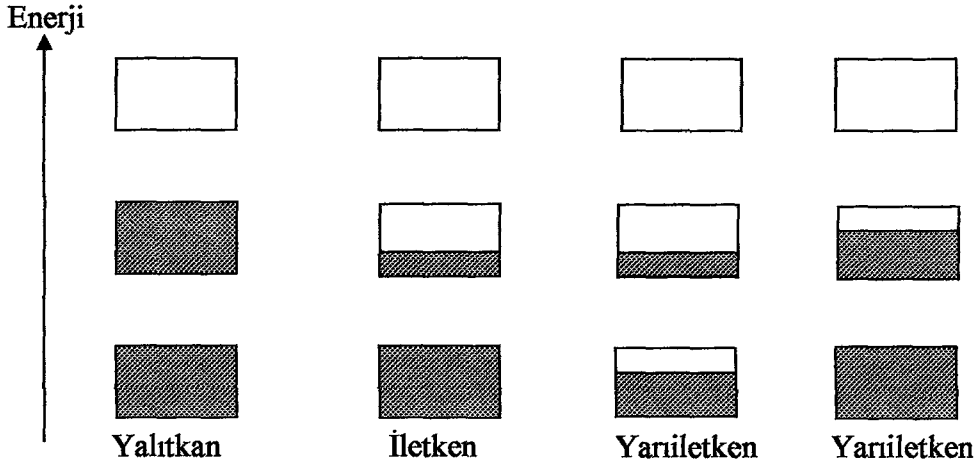
TEORİ

3.1. Giriş

Yarıiletken maddelerin her geçen gün elektronik, optoelektronik ve fiberoptik iletişim gibi bir çok alanda kullanılması gün geçtikçe artmaktadır. Bu sistemlerin verimlerindeki artış son on yılda büyük boyutlara ulaşmıştır. Bunun nedeni bu materyallerin fiziksel özelliklerinin her geçen gün daha çok anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Bu bölümde, bu çalışmanın yukarıda saydığımız sistemlerde en yaygın bir şekilde kullanılan InP' in elektrik, optik ve yapısal özelliklerinin tespiti çalışması olması nedeniyle, sırasıyla kristal kusurları, InP' in kristal yapısı, yarıiletkenlerde elektriksel özellikler, mobilite ve öziletkenlik, yarıiletkenlerde fazlalık taşıyıcıları, geçirme ve soğurma, soğurma sabiti ve bant aralığı, X-ışını kırınım yöntemleri açıklanmakta ve bu konularla ilgili gerekli matematiksel eşitlikler verilmektedir.

3.2. Materyallerin Enerji Bant Yapıları

Katılarda, enerji bantları arasındaki fiziksel işlemler kuantum teorisiyle açıklanabilir. Elektronların dalga fonksiyonu, katının yapısına bağlı olup atomların yan yana gelmesiyle, üst üste binme ilkesine göre oluşur. Elektronlar için Schrödinger dalga denkleminin periyodik olarak değişen potansiyel altındaki çözümü, elektronların sadece izin verilen bölgelerde bulunabileceğini gösterir. Diğer olası enerji değerleri, yasak enerji bölgesini veya yasak bant aralığını oluşturur. Ayrıca, Pauli Dışlama İlkesi' nin bir uygulaması olarak birbirine yeterince yakın olan atomların enerji seviyeleri, kesikli seviyeler oluşturacak şekilde bölünürler ve elektronların izinli seviyeleri birbirlerinden yasak enerji aralığı oluşacak şekilde ayrılırlar. Birbirinden E_g enerji aralığıyla ayrılan elektronların bulunduğu en düşük ve en yüksek enerji seviyeleri (bağlanma ve iletkenlik bandı), katının elektronik ve optik özelliklerini belirler. Böylece E_g büyüklüğüne ve elektronların seviyeleri işgal etme durumlarına bağlı olarak maddeler iletken, yalıtkan ve yarıiletken olarak tanımlanırlar. Materyal, eğer bantlar kısmen elektronlarla dolu ise iletken; bant aralığı bağıl olarak dar, bağlanma bandı dolu ve iletkenlik bandı boş ise yarıiletken; aynı şekilde bağlanma bandı dolu, iletkenlik bandı boş fakat bant aralığı geniş ise yalıtkan olarak tanımlanır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde izin verilen enerji bantlarındaki elektron doluluk şeması. Dikdörtgen dikey uzunluklar izin verilen enerji bölgelerini gösterir. Taralı alanlar, elektronla dolu kısımlardır [24]

3.2.1. Yarıiletken Materyaller

Yarıiletkenler, yalıtkanlar ve metaller arasında elektriksel özelliklere sahip bir materyal grubudur. Sıcaklık değişimleri, optiksel uyarılma ve safsızlık içeriği ile bu materyallerin iletkenlikleri büyük oranda değiştirilebilir. Elektriksel özelliklerinin bu değişkenliği, elektronik cihaz araştırmaları için yarıiletken materyalleri doğal seçenekler haline getirir.

Yarıiletken materyaller, periyodik tablonun IV. sütunu ile bu sütuna komşu sütunlarda bulunurlar (Çizelge 3.1). IV. sütun yarıiletkenleri olan silisyum ve germanyum, tek bir cins atomlardan ibaret olduklarından dolayı, elementel yarıiletkenler olarak isimlendirilirler. Elementel materyallere ilaveten, III. ve V. sütun bileşikleri yarı-metal veya bileşik yarıiletkenleri oluştururlar.

Çizelge 3.1. Yarıiletken materyaller. (a) periyodik tabloda yarıiletkenlerin yer aldığı sütunlar (b) elementel ve bileşik yarıiletkenler

II	III	IV	V	VI
	B	C		
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

(a)

Element	IV-IV Bileşimleri	III-V Bileşimleri	II-VI Bileşimleri	IV-VI Bileşimleri
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

(b)

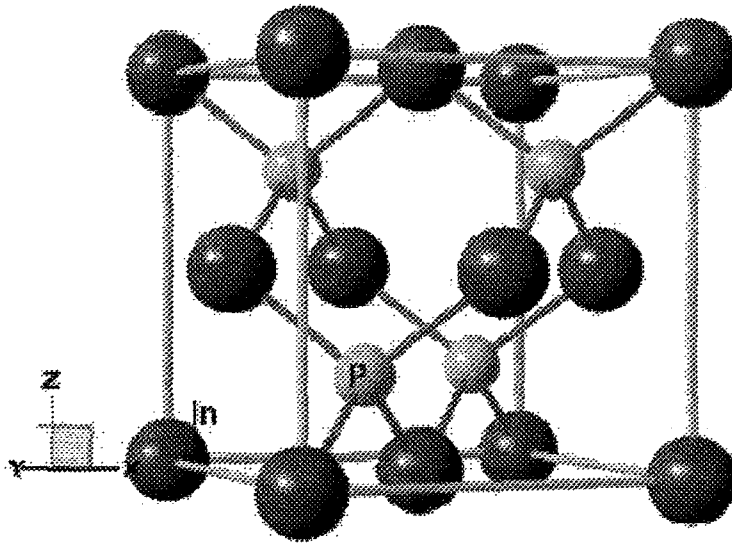
Çizelge 3.1’ de değişik gruplara karşılık gelen yarıiletken materyaller verilmektedir. Bu materyaller içinde silisyum (Si) transistörler, doğrultucular ve entegre devreler gibi yarıiletken aygıtların çoğunda kullanılır. Bileşik yarıiletkenler ise, genellikle ışığın soğurulmasını ve yayınımını gerektiren aygıtlarda kullanılırlar. Örneğin yarıiletken ışık yayıcılar çoğunlukla, InP, GaAs, GaP gibi ikili bileşiklerden ve GaAsP gibi üçlü bileşiklerden yapılır. Televizyon ekranlarında kullanılan flüoresan materyalleri genellikle ZnS gibi II-VI grubu bileşik yarıiletkenleridir. Işık detektörleri, genellikle InSb, CdSe veya PbTe ve PbSe kurşun tuzları gibi diğer bileşiklerle yapılırlar; aynı zamanda Si ve Ge kızılötesi ve nükleer radyasyon dedektörleri olarak kullanılırlar. Önemli bir mikrodalga aygıtı olan Gunn diyodu, genellikle GaAs’ ten yapılır. Böylece yarıiletken materyaller özelliklerin çeşitliliği açısından aygıt ve devre mühendislerine elektronik fonksiyonların dizaynında geniş bir yelpaze sunar.

Yarıiletken materyallerin elektronik ve optik özellikleri, katkı miktarları tamamen kontrol edilebilen katkı maddesi olarak tanımlanan safsızlıklardan güçlü şekilde etkilenirler. Bu tür safsızlıklar, yarıiletkenlerin iletkenliklerini geniş aralıklarda değiştirmek için kullanılır. Örneğin, bir Si örneği içinde milyonda bir oranındaki safsızlık yoğunluk değeri, malzemeyi elektrik akımı için kötü bir iletkeniden iyi bir iletkene çevirebilir. Bu şekilde safsızlıkları kontrollü ekleme işlemi katkılama olarak isimlendirilir.

Yarıiletkenlerin bu kullanışlı özelliklerini incelemek için materyallerin atomik yapısını bilmek gerekir. Eğer, orijinal materyalin saflığındaki önemsiz değişiklikler elektriksel özelliklerinde etkili değişimler meydana getiriyorsa, her bir yarıiletken içindeki atomların doğal ve özel düzenlenişinin kritik bir önemi olmalıdır.

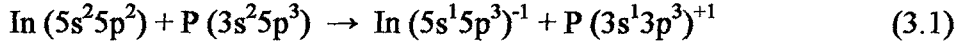
3.2.2. İndiyum Fosfatın Yapısal Özellikleri

III-V grubu ikili bileşik yarıiletkenlerinden birisi olan InP, periyodik tablonun III. sütununda bulunan indiyum atomu ile V. sütununda bulunan fosfat atomunun bir araya gelmesiyle oluşur. Elmas veya çinko sülfür (ZnS) ile aynı kristal yapısına sahip olmakla birlikte elmastan farklı olarak her bir örgü noktasında iki farklı atom (In ve P) yer almaktadır ve her atom diğer cinsten atomla dörtlü kovalent bağ (sp^3 hibrit bağlanması) yapar (Şekil 3.2). InP' nin tetrahedral (düzgün dörtyüzlü) şeklinde bağlı örgü yapısındaki kübik uzay grubu F43m temelindedir.



Şekil 3.2. InP' nin birim hücre yapısı

Herhangi bir kristalin kırılgenlik 6zellikleri, atomik d6zenlemeye ve yoğunluk dağılımına bağlıdır. Periyodik tablonun III A grubu atomları, tam dolu y6r6ngelerin s^2p^1 y6r6ngelerinde 6ç elektrona ve V A grubu atomları ise s^2p^3 y6r6ngelerinde beş elektrona sahiptir. Bu nedenle s^1p^3 hibrit y6r6ngeleri arasında kovalent bağ oluşur. Bu kovalent bağ oluşumu için, her V. grup atomu III. grup atomuna bir elektron verir. In ve P atomları arasındaki elektron alış verişi aşağıdaki denkleme g6re olur



Yukarıda da belirtildiği gibi, indiyum fosfatın temel bağ kuvveti kovalent bağ kuvvetidir. Fakat, bunun yanı sıra her bir In^- iyonu ve çevresindeki 4 P^+ iyonu arasındaki veya her bir P^+ iyonu ve çevresindeki 4 In^- iyonu arasındaki elektrostatik çekim kuvvetinden kaynaklanan iyonik bağ karakteri de bulunmaktadır. Elektronlar d6şuk sıcaklıklarda d6rt y6zl6 6rg6 içerisinde bağlı olduklarından dolayı, iletkenlik 6zelliklerini kaybederler. Y6ksek sıcaklıklarda ise ısısız titreşimler nedeniyle bazı elektronlar bağlarını kırarak bağlanma bandında boşluk bırakıp iletkenlik bandına geçerler. Herhangi bir elektrik alanı varlığında, iletkenlik bandındaki bu elektronlarla bağlanma bandındaki boşluklar kinetik enerji kazanırlar ve elektriği iletirler. Serbest elektron k6tlesi m_0 ($m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) olmak 6zere InP ' nin elektron etkin k6tlesi $0.08 m_0$ ve boşluk etkin k6tlesi $0.12 m_0$ ' dir.

InP ' nin oda sıcaklığında (300 K) ve normal basınç altında 6rg6 parametresi $a_0 = 0.58688$ nm [25] ve yine bu sıcaklık değerinde en yakın komşu uzaklığı ise 0.254 nm' dir.

Birim h6cresinde d6rt tane molek6l bulunduran InP ' nin oda sıcaklığındaki (300 K) kristal yoğunluğu, 4.791 gr/cm³ ve molek6ler yoğunluğu ise 3.95×10^{22} cm⁻³, t6r.

Indiyum fosfatın diğer bir malzeme parametresi olan dielektrik sabitinin değeri 12.4 ' t6r.

Direkt bant yapısına sahip olan InP ' nin yasak bant enerji aralığı oda sıcaklığında $E_g = 1.344$ eV ve 1.6 K' de 1.424 eV' tur. Yasak bant enerji aralığının sıcaklıkla ilişkisi aşağıdaki ifadeyle verilir

$$E_g(T) = 1.424 - \frac{(4.9 \times 10^{-4})T^2}{(T + 327)} \text{ eV} \quad (3.2)$$

İndiyum fosfatın yukarıda anlatılan tüm fiziksel özellikleri Çizelge 3.2' de verilmektedir.

Çizelge 3.2. InP' nin materyal özellikleri

Materyal Özelliği	InP
Yapı	Çinko Sülfid
Uzay grubu	F43m
300 K' deki örgü parametresi a_0	0.58688 nm
300 K' deki en yakın komşu uzaklığı	0.254 nm
300 K' deki yoğunluğu	4.791 g / cm ³
Dielektrik sabiti	12.4
Enerji bant aralığının yapısı	Direkt
300 K' deki enerji bant aralığı	1.344 eV
1.6 K' deki enerji bant aralığı	1.424 eV
Elektron etkin kütlesi	0.08 m_0
Boşluk etkin kütlesi	0.12 m_0

3.3. Kristal Kusurları

Katılar, mükemmel olmayan düzene sahip biçimde kristalize olan materyallerdir. Katılardaki düzensizlikler, kusurlar olarak adlandırılırlar. Kusurlar, katıların yapısal özelliklerinde olduğu kadar elektriksel ve diğer geçiş özelliklerinde de etkili rol oynarlar.

Gerçek bir kristal temel olarak üç tip kusura sahiptir. Bunlar içsel nokta kusurları (veya doğal kusurlar), dışsal nokta kusurları (veya safsızlık kusurları) ve iyonlaştırıcı radyasyonun alkali halidelerde meydana getirdiği kusurlardır.

1. İçsel nokta kusurları:

- a) Kristallere ait önemli içsel nokta kusurlarından biri, ara atomları (Frenkel kusuru)'dır. Bu kusur molekül, atom veya iyonun kristal örgü içinde bulunduğu yeri terk edip örgüdeki atomlar arası boşluklara yerleşmesi ile oluşan bir nokta kusurudur. Atomların, atomlar arası boşluklardan daha büyük olması nedeniyle, bu kusurla oluşan düzensizlik atomun bir kaç tabakasına yayılır.
- b) Diğer bir içsel kusur da boşluklar (Schottky kusuru) olup, ideal bir kristalde atomların bulunması gereken yerde olmaması durumunda ortaya çıkan bir noktasal kusurdur. Noktasal bir kusur olması nedeniyle, örgünün kalan kısmına etkisi azdır. İçsel nokta kusurları iyonik kristallerde oluşurlar ve kristalin stokiyometrisini değiştirmezler.
- c) Yerine geçmeye ait kusurlar da içsel kusurlardır. Bu tip kusurlara örnek olarak bir alkali iyonunun bulunması gereken yerde bir halojen iyonunun bulunmasından kaynaklanan kusur verilebilir.
- d) Yukarıda belirtilen kusurların hepsinin bir arada bulunduğu durumlar.

2. Dışsal nokta kusurları:

Nokta kusurların diğer bir biçimi, dışsal nokta kusurlarıdır. Bu kusurlar, safsızlıkların materyal içerisine girmesi ve bir atomun başka bir atomla yer değiştirmesi sonucu kristal bozuklukların oluşması ile ortaya çıkar. Bu safsızlıklar kristal yapı içerisinde erime, yayılma veya kristale içerisine başka bir iyonun yerleştirilmesinden kaynaklanır.

3. İyonlaştırıcı radyasyonun alkali halidelerde meydana getirdiği kusurlar:

Bu tip kusurlar renk merkezleri olarak adlandırılan soğurma merkezleridir. Çukuklar (dislokasyonlar: kaymış veya kaymamış kristal düzlemleri arasındaki sınırları gösteren karmaşık kusurlar) gibi çizgi ve düzlemsel kusurlar ile tanecik sınırları (kristal düzleminin paralel iki dizini arasındaki açısız uyumsuzluklardan kaynaklanan yüzeyler) yavaş enerji aralığındaki izin verilen enerji seviyelerini artırabilirler.

3.3.1. Kristal Kusurlarının Elektronik Seviyelere Etkileri

İdeal bir kristalin, periyodik potansiyel için Schrödinger denkleminin çözümü çiftlenmiş atomların bütün sistem içindeki tek bir elektron için enerji özdeğerlerini ve dalga fonksiyonlarını verir. İzinli enerji seviyeleri ise, bantlara ayrılır. Eğer kristal örgü

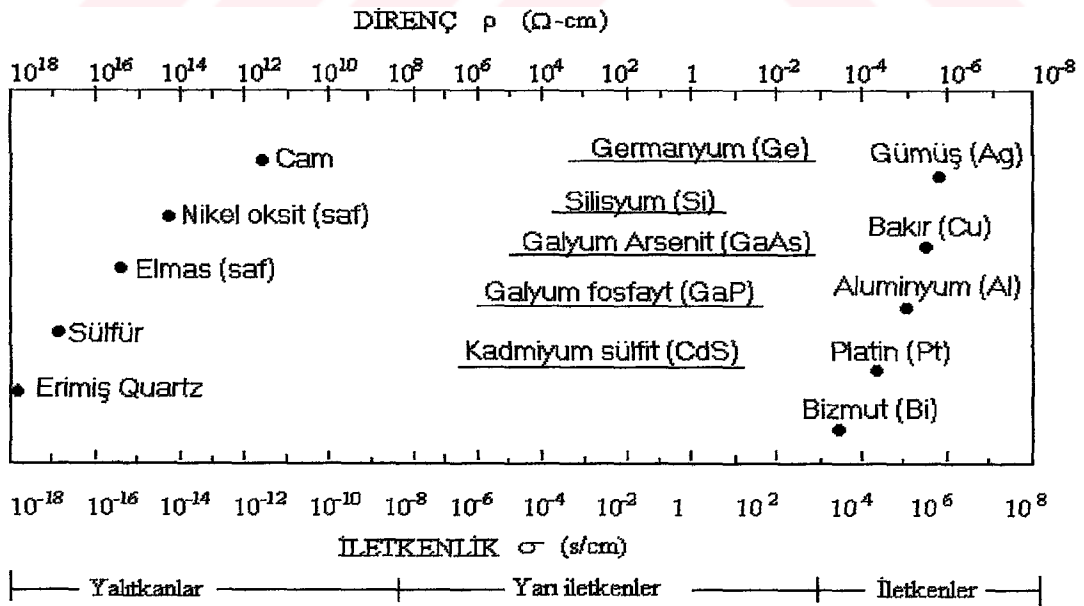
içerisinde yer alan kusur yoğunluğu örgünün periyodikliğini bozacak kadar büyükse, izinli enerji seviyeleri için Schrödinger denkleminin çözümü oldukça zor olacaktır. Diğer bir taraftan kusur yoğunluğu küçük ise ve kristalin periyodikliğini değiştirmiyorsa, izinli seviyeler için çözüm, kusurların ideal kristaldeki bir pertürbasyon olarak düşünülmesi ile bulunabilir.

Dokular arasında bulunan kusurlar için boşlukların meydana gelip gelmemesine bağlı olarak, bantlardan herhangi bir orijinal seviye ayrılmaksızın sisteme enerji seviyeleri eklenebilir.

Eğer aynı atomların safsızlıkları yeterli yoğunlukta ise, kusur dalga fonksiyonları üst üste (overlap) gelecektir ve bu kusurların enerji seviyeleri safsızlık durumlarının izinli bir enerji bandı biçiminde yeni enerji seviyelerine yarılacaktır. Safsızlık bant seviyelerinin dalga fonksiyonları ise, yerelleşmeyecektir (lokalize olmayacaktır).

3.4. Yarıiletkenlerde Elektriksel Özellikler

Şekil 3.3' te görüldüğü gibi, farklı tür materyallerin elektriksel iletkenlikleri metaller için $10^6(\Omega.cm)^{-1}$, den başlayıp yalıtkanlar için $10^{-18}(\Omega.cm)^{-1}$ gibi küçük değerlere kadar değişmektedir.



Şekil 3.3. Tipik olarak yalıtkan, iletken ve yarıiletkenlerin iletkenliklerinin değişimi

Yarıiletkenler oda sıcaklığında yaklaşık olarak $1 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ değerinde iletkenliğe sahip olsalar da, bu değer sıcaklığa ve yarıiletkenin saflığına bağlı olarak değişir. Elektriksel iletkenliğin sıcaklık bağımlılığı, serbest taşıyıcı yoğunluğunun ve serbest taşıyıcı mobilitesinin sıcaklık bağımlılığı ile belirlenir. Metallerin serbest taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıktan bağımsız olduğu için, iletkenliğin sıcaklık bağımlılığını sadece mobilite sıcaklık bağımlılığı belirler. Yarıiletkenlerde ve yalıtkanlarda, serbest taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıkla üstel olarak artar. Mobilitenin sıcaklığa bağımlılığı ise özel saçılma işlemlerine bağlıdır. Taşıyıcı yoğunluğunun ve mobilitesinin sıcaklık bağımlılığı ile bunların elektriksel iletkenlik üzerine etkileri, aygıt davranışının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

3.4.1. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik

3.4.1.1. Saçılma Mekanizması

Eğer bir yarıiletkenin iki ucuna sabit bir voltaj kaynağı bağlanırsa, bu yarıiletken içinde \vec{E} (V cm^{-1}) elektrik alanı meydana gelir. Bu alan, serbest yük taşıyıcıları üzerine etkir ve onların uyguladığı kuvvet yönünde sürüklenmesine neden olur. Bundan dolayı, oluşan akım sürüklenme akımı olarak adlandırılır.

Bir yük taşıyıcısı, örneğin bir elektron, vakum içinde sabit bir elektrik alanında hareket ettiği zaman, eğer harekete durgun halden başlıyorsa Newton' un ikinci kanununa göre bu elektronun \vec{a} ivmesi

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m_e} \quad (3.3)$$

ve bir t zamanındaki \vec{v} hızı

$$\vec{v} = \int_0^t \vec{a} dt = \frac{q\vec{E}t}{m_e} \quad (3.4)$$

Denk. 3.4' te görüldüğü gibi, elektronun sahip olduğu hız zamanla lineer olarak artmaktadır.

Diğer taraftan, bir yarıiletken içindeki yük taşıyıcılarının hareketi düzgün değildir; fakat bu hareket saçılma olarak bilinen olaya neden olan çeşitli engeller ile pertürbe edilir. İki çeşit saçılma mekanizması vardır: (a) Örgü saçılması, yarıiletken kristal içerisindeki periyodik iç potansiyeldeki düzensizlikler ile hareketli taşıyıcının çarpışması sonucu meydana gelir. Bu düzensizlikler, kristal örgü atomlarının örgü içinde ısısal enerjilerinden dolayı onların ‘uygun’ yerleri etrafındaki salınmalarına bağlıdır. Herhangi bir kristalde varolan periyodik iç potansiyelin etkisi, hareketli elektrona veya boşluğa bir m^* etkin kütesinin atfedilmesi ile hesaba katılabilir. Bu kütleler, elektronun kristal dışındaki m_0 kütesinden farklıdır. Onun için, sadece sürüklenen serbest taşıyıcıları saçan atomların ısısal titreşimleri sonucu meydana gelen periyodik potansiyeldeki bozulmalardır: bir elektron belli bir zamanda kristal atomlarının her zamankinden daha sıkı paketlenmiş bir bölgeye gelebilir ve hemen bir süre sonra kendini seyrek paketlenmiş bir bölgede bulabilir. Yoğun ve seyrek bölgeler, kristalde varolan basınç dalgalarına şekil verir. (b) Safsızlık saçılmasının oluşum nedeni, kristal örgü içinde iyonize olmuş atomların varlığıdır. Bunlar sahip oldukları net yükleri nedeniyle, yakınlarından geçen serbest taşıyıcılar üzerine onların yönlerini değiştiren bir kuvvet uygularlar. Eğer serbest taşıyıcı hızlı hareket ediyorsa (yüksek sıcaklıklarda) ve iyonize olmuş safsızlık atomlarının çevresinde az zaman harcıyor ise bu tip saçılma mekanizmasının etkisi az olur [26].

3.4.1.2. Mobilite ve Öziletkenlik

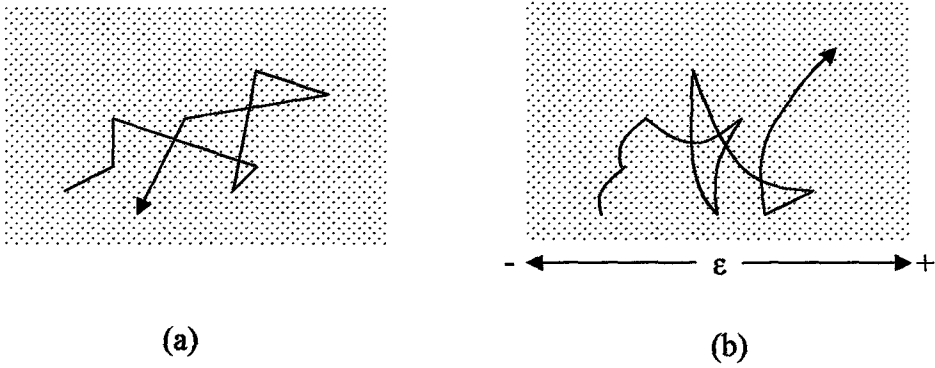
Bir yarıiletken içindeki yük taşıyıcıları, serbest elektronlar iletkenlik bandında ve boşluklar bağlanma bandında olmak üzere enerji bantları içinde enerji seviyeleri işgal ederler. Eğer kristal tamamen mükemmel bir kristalse, her atomun kendi gerçek konumunu işgal etmesiyle birlikte, iletken elektronlar ve boşluklar bir vakum içindeki serbest taşıyıcılara benzer şekilde davranacaktır.

Kristal kusurları da yarıiletkenlerdeki iletkenlik elektronlarının saçılmasına katkıda bulunurlar. En önemlisi, birçok materyale bilerek eklenen alıcı ve verici safsızlık atomları tarafından neden olunan saçılmadır. Oda sıcaklığında, kristal içindeki safsızlıklar iyonize olurlar ve bu da onların saçılma gücünü artırır. Eğer safsızlık konsantrasyonu çok küçükse, çoğu aygıt materyallerinde oda sıcaklığında iyonize olmuş safsızlık saçılması ısısal saçılmadan daha az önemli olur. Kristal kusurlarının bağlanma

bandındaki boşlukların hareketine etkisi ise hemen hemen aynıdır. Boşluklar, oda sıcaklığında örgünün ısısal titreşimleri ile saçılırlar.

Saçılma sürecinin bu tanımından yük hareketi anlaşılabilir. İki tip yük hareketi vardır: Bunlardan biri taşıyıcıların gelişigüzel ısısal hareketleri ve diğeri de onların uygulanan bir alandaki yönlendirilmiş hareketleridir. Isısal hareket, bir gazın moleküllerinin hareketine benzer. Bir katının ısısal enerjisinin çoğunun örgü titreşimlerinde yer almasına rağmen, küçük bir kısmı ise serbest yük taşıyıcıları arasında istatistiksel olarak dağılmış kinetik enerji biçimindedir. Sonuç olarak taşıyıcılar oda sıcaklığında dahi büyük hızlara sahiptirler.

Şimdi, T sıcaklığında yarıiletken bir kristali düşünelim. Kristal içindeki elektronlar ve boşluklar, ısısal enerjilerinden dolayı gelişigüzel hareket ederler. Biz, bir elektronun hareketini şekil 3.4 a' da olduğu gibi göz önünde canlandırabiliriz. Elektronun izlediği yörünge, çarpışmalar arasındaki düz çizgilerin bir serisinden oluşur. Çarpışmalar arasındaki serbest zamanlar, t_1, t_2, t_3, \dots şeklinde gösterilmiş olup bu zamanların ortalaması çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zamandır. Her bir saçılma olayı, elektron ve örgü arasında bir enerji değişimine neden olur. Bazı çarpışmalarda, elektronlar örgüye enerji



Şekil 3.4. İletkenlik bandındaki bir elektronun hareketi. (a) elektrik alan yokken, (b) elektrik alan varken

verirler; bazılarında ise örgü atomlarından enerji alırlar. Dışarıdan hiçbir enerji katkısı yokken net enerji değişim oranı sıfırdır. Çünkü, çarpışmalarda olduğu gibi elektronların

hareketi de gelişigüzele ve her elektron bir çok çarpışmadan sonra ilk bulunduğu konuma geri döner. Bundan dolayı elektronun ortalama hızı sıfırdır. Isısal hız ise,

$$v_{\text{ısal}} = \sqrt{3 \frac{kT}{m_e}} \quad (3.5)$$

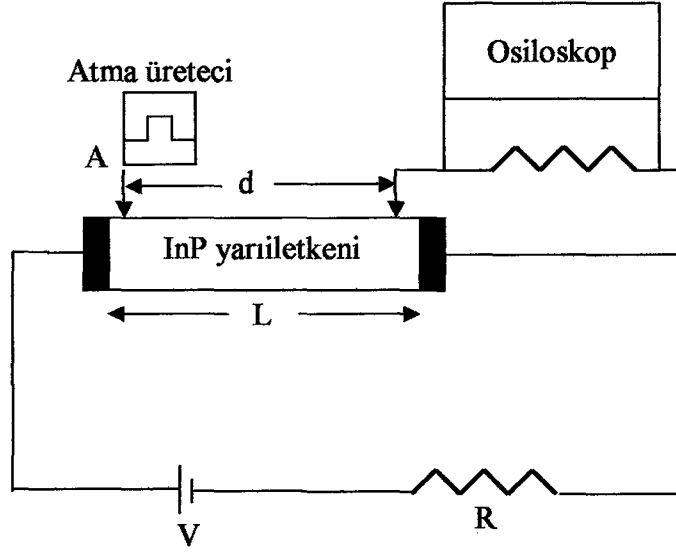
Kristale bir elektrik alan uygulandığı zaman elektronlar, çarpışmaları arasındaki hareketleri boyunca alan tarafından ivmelendirilirler ve sonuçta izledikleri serbest yol, yerçekimi altındaki bir eğik atış hareketinin yörüngesine benzer şekilde bükülmüş olur (Şekil 3.4 b).

Elektron, birçok çarpışmadan sonra uygulanan alan yönünde belli bir yol alır. Bu hareket, sürüklenme hareketi olarak bilinir. Elektron, iki çarpışma arasındaki serbest uçuşu esnasında elektrik alandan kinetik enerji kazanır ve bu enerjiyi kristale transfer eder. Kristale transfer edilen enerji, kristal içerisinde joule ısısı olarak dağıtılır.

Sürüklenme mobilitesi $\mu_{\text{sür.}}$ 'yi ve azınlık taşıyıcı geçiş zamanı t_r 'yi ölçmek mümkündür. Bunun için basit bir tekniğin temel düzenlemesi, şekil 3.5' de görülmektedir. Bir elektrik alan varlığında herhangi bir elektronun sürüklenme hızı kazanacağı açıktır. Çarpışmalar arasındaki ortalama yol (ortalama serbest yol), alan tarafından değiştirilmez ve elektron hızındaki artışın etkisi çarpışmaları daha sık yapar. Bir elektrik alan içindeki yüklü bir parçacığın sürüklenme mobilitesi,

$$\mu_{\text{sür.}} = \frac{\vec{v}_D}{\vec{E}} \quad (3.6)$$

Burada \vec{v}_D parçacığın sürüklenme hızı, \vec{E} ise elektrik alan şiddetidir.



Şekil 3.5. Geçiş zamanı ve sürüklenme mobilitesinin ölçümü

Boşlukların ortalama sürüklenme hızı, omik kontaklar arasındaki d uzunluğunun geçiş zamanı t_r ' ye bölünmesi ile bulunur.

$$\mu_{sür.} = \frac{d}{Et_r} \quad (3.7)$$

Burada V omik kontaklar arasındaki voltaj ve $E = V / L$ iken, azınlık taşıyıcılarının sürüklenme mobilite değerlerini veren denklem 3.7' nin Mckelvey [27] ve Haynes ve Shockley [28] tarafından yeni uyarlanan şekli

$$\mu_{sür.} = \frac{Ld}{Vt_r} \quad (3.8)$$

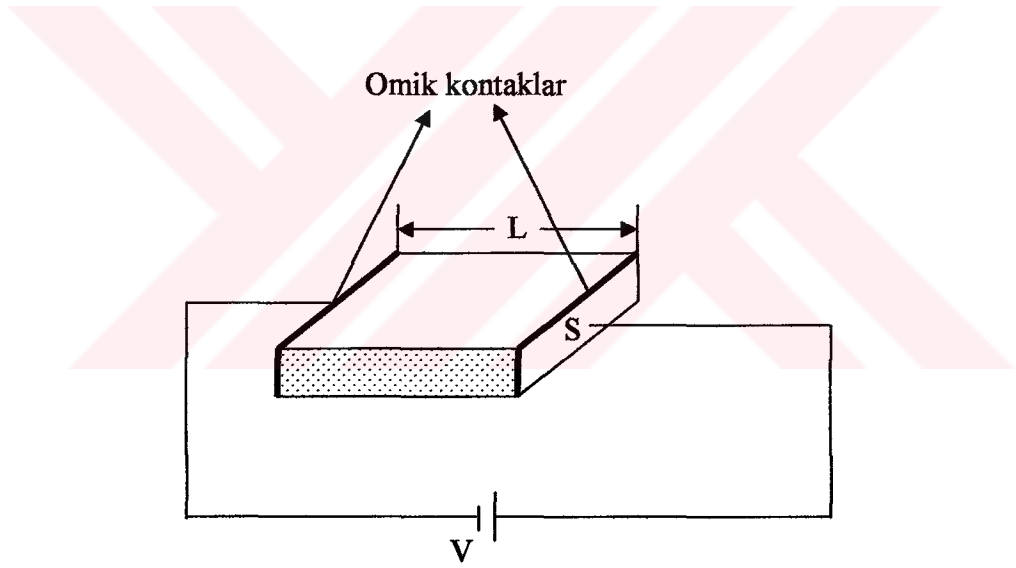
Mobilite kavramı, verilen bir alan içinde ortalama sürüklenme hızının sabit olduğunu ve elektronların vakum içinde yaptıkları gibi büyük mesafelerde ivmelenmeyeceğini ifade eder.

Uygulanan bir elektrik alan içerisinde boşlukların hareketi, serbest elektronların hareketine benzerdir. Fakat sahip oldukları pozitif yüklerinden dolayı, serbest elektronların hareket yönüne zıt yönde sürüklenirler. Boşluk mobilitesi μ_h , elektronlardan biraz farklı olan kütle ve ısısal hızdan dolayı elektron mobilitesinden

genellikle bir derece daha küçüktür. Boşluk mobilitesi, sıcaklıkla ve safsızlık miktarıyla azalır.

Bir yarıiletkenin iletkenliği, doğrudan doğruya mobilite kavramından anlaşılabilir. Uygulanan bir elektrik alan içerisinde zıt yönlerde sürüklenen boşlukların ve elektronların her ikisi de, toplam akıma katkıda bulunurlar. L uzunluğuna, S kesit alanına sahip olan ve birim hacminde n tane elektron içeren bir metal bloğu düşünelim (şekil 3.6). Eğer, bloğun uçlarına bir V gerilimi uygulanırsa, elektronların v_D sürüklenme hızıyla hareketine sebep olan bir $E = V / L$ alanı oluşacak ve elektronlar bir $v_D S$ hacmini geçecektir. Bundan dolayı verilen bir materyal diliminden geçen toplam yük miktarı, $nev_D S$ Coulomb olacaktır. Bu, aynı zamanda I akımına eşittir.

$$I = n e v_D S \quad (3.9)$$



Şekil 3.6. L uzunluğuna ve S kesit alanına sahip bir metal bloğu

Birim alandaki akım anlamına gelen akım yoğunluğu $J = I / S$ ifadesi, yukarıdaki denklemlerle karşılaştırıldığında zaman şu şekilde yazılır:

$$\vec{J} = ne\vec{v}_D = ne\mu\vec{E} \quad (3.10)$$

Burada, $\vec{v}_D = \mu_{sar} \vec{E}$ ' dir. Yukarıdaki ifade, Ohm Kanunu' nun değişik bir biçimi olarak yazılabilir

$$I = \frac{V}{R}, R = \rho \frac{L}{S}, J = \frac{V}{RS} = \frac{V}{\rho L} = \frac{E}{\rho} \quad (3.11)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.12)$$

Burada, σ materyalin öziletkenliğidir.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = ne\mu \vec{E} \quad (3.13)$$

$$\sigma = ne\mu \quad (3.14)$$

ve

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu} \quad (3.15)$$

Öziletkenlik, aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi, taşıyıcı mobilitelerinin ve yoğunluklarının her ikisinin de fonksiyonudur

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (3.16)$$

Daha önce de anlatıldığı gibi, safsızlık yarıiletkenlerinde her iki tipten de birçok taşıyıcı vardır; bu yüzden de Denk. 3.16' nın bir terimi diğerine göre üstün olur ve öziletkenlik çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu ile hesaplanır.

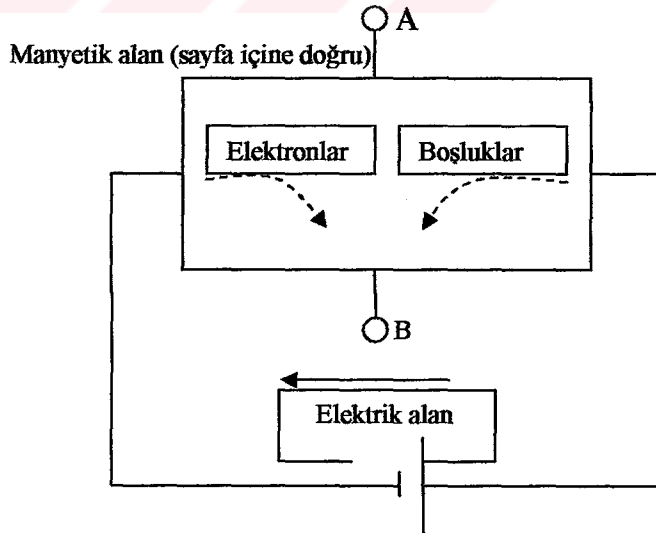
3.4.1.3. Hall Mobilitesi

Fotonlar yardımıyla elektronlar (ve boşluklar) üretilerek sürüklenme mobilitelerini belirlemek mümkündür. Şiddeti bilinen bir alanın etkisi altında, materyalin belli bir uzunluğunda sürüklenen elektronlar ve onların bazı noktalara varışı, bir toplaç ile detekte edilebilir. Eğer ışık bir açma-kapama mekanizması ile zayıflatılırsa,

elektronların ışığa maruz kalması ve toplaca varışı arasındaki zaman sürüklenme mobilitelerini belirlemek için kullanılabilir.

Pratikte, mobilite terimi yerine Hall mobilitesi ifadesi kullanılır. Silikon ve germanyum için mobilite değerleri yaklaşık olarak eşittir. Eğer bir yük manyetik alan içerisinde hareket ederse, bu yüke bir manyetik kuvvet etkir. Yüke etkiyen manyetik kuvvetin yönünü, yükün hareket yönü ile manyetik alanın yönü belirler.

Bir yarıiletken içindeki taşıyıcıların durumu düşünüldeği zaman, bir elektrik alanın etkisi altında, bu taşıyıcılar hareket edecekler ve elektronlar alana zıt yönde, boşluklar ise alanla aynı yönde ilerleyeceklerdir. Eğer elektrik alana uygun bir açıda bir manyetik alan uygulanırsa, elektronlar ve boşluklar bu her iki alana dik yönde hareket edeceklerdir (Şekil 3.7). Manyetik alanın etkisinin ters yönlerde olmasına rağmen, boşlukların ve elektronların her ikisi de aynı yönde çapraz olarak hareket edeceklerdir. Yarıiletkenin bir kenarında elektronlar diğerk kenarında ise boşluklar birikecek ve denge durumunda yarıiletken kristalin uçları arasında bir elektrik alan oluşacaktır. Eğer bu alanın uçlarına bir potansiyometre bağlanırsa (şekilde A ve B noktaları arasına), oluşan kutuplanma boşlukların mı yoksa elektronların mı çoğunluk taşıyıcıları olduğunu gösterir. Ölçülen potansiyel farkının büyüklüğü ise, Hall alanını verir.



Şekil 3.7. Hall etkisi

Hall alanı E_H ' nin büyüklüğü, kristalin uçları arasında denge durumunda oluşan elektrik alan kuvvetinin manyetik alanın oluşturduğu kuvvete eşitlenmesi ile bulunur.

$$e E_H = e v_D H \quad (3.17)$$

Burada, e elektron üzerindeki yük miktarı, v_D yük taşıyıcısının hızı ve H ise manyetik alan şiddetidir. Yukarıdaki eşitlikten E_H

$$E_H = v_D H \quad (3.18)$$

olarak bulunur. Hall voltajı, Hall alanına ve kristalin uçları arasındaki uzaklığa bağlı olacaktır ve aşağıdaki gibidir

$$V_H = E_H d \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklemleri kullanarak Hall mobilitesi aşağıdaki şekilde bulunur

$$\mu_H = \frac{V_H}{EHd} \quad (3.20)$$

veya

$$E = \frac{V}{l} \quad (3.21)$$

iken

$$\mu_H = \frac{V_H l}{V_a Hd} \quad (3.22)$$

olur. Burada V_a uygulanan voltaj ve l ise uzunluktur. Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki tüm parametreler ölçülebilir ve Hall mobilitesi hesaplanabilir [29].

3.5. Yarıiletkenlerdeki Fazlalık Taşıyıcıları

3.5.1. Temel Soğurma

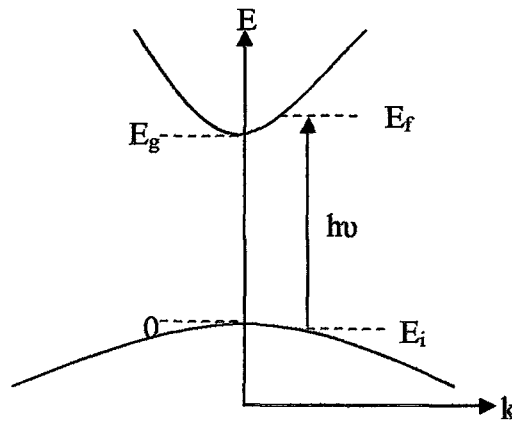
Temel soğurma, banttan banda geçişlere veya eksiton geçişlerine işaret etmektedir. Bunun anlamı, bir elektronun bağlanma bandından iletkenlik bandına uyarılmasıdır. Soğurmada hızlı bir artış ile kendini gösteren temel soğurma, bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirlemek için kullanılabilir. Bir fotonun momentumu h / λ (λ , ışığın dalga boyu), kristal momentumu h / a (a , örgü sabiti) ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan foton-soğurma işleminde elektronun momentumu korunmalıdır. Verilen bir foton enerjisi $h\nu$ için soğurma katsayısı $\alpha(h\nu)$, başlangıç durumundan son duruma geçişte, geçiş olasılığı P_{if} , elektronların başlangıç durumundaki yoğunluğu n_i ve son durumdaki yoğunluğu n_f ile orantılıdır. Bunun için, $h\nu$ ' ye eşit bir enerji farkı ile ayrılan seviyeler arasındaki mümkün olan tüm geçişler toplanarak aşağıdaki ifade elde edilir

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{if} n_i n_f \quad (3.23)$$

Kolaylık olması açısından, tüm alt durumların dolu, üst durumların boş ve 0 K ' de yarıiletkenin katkısız olduğu kabul edilmiştir [30].

3.5.2. İzinli Doğrudan Geçişler

Şekilde görüldüğü gibi, direkt geçişe sahip iki enerji vadisi arasında, tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli ve P_i geçiş olasılığının foton enerjisinden bağımsız olduğunu düşünelim (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli olduğu iki direkt enerji vadisi

Aşağıdaki ifadede verildiği gibi, E_i ' deki her başlangıç durumu, E_f ' deki bir son durumla ilişkilidir

$$E_f = h\nu - |E_i| \quad (3.24)$$

Fakat parabolik bantlarda, son ve ilk durumlar arasındaki enerji farkı

$$E_f - E_g = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m_e^*} \quad (3.25)$$

ve

$$E_i = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m_h^*} \quad (3.26)$$

Onun için, enerji bant aralığı ile foton enerjisi arasındaki ilişki,

$$h\nu - E_g = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (3.27)$$

Momentum uzayında, izinli noktaların yoğunluğu düzgündür. Sabit enerji yüzeyleri, ilk yaklaşımda küreseldir (izotropik ortam) ve E ve $E + dE$ enerji küreleri arasındaki k -uzayının hacmi $4\pi k^2$ 'dir. Burada E , parabolik bandın kenarına göre ölçülen enerjidir. Tek bir durum, momentum uzayında $8\pi^3 / V$ (V , kristalin gerçek hacmidir) hacmini işgal eder ve her bir enerji seviyesi başına iki durum vardır. Böylece E ve $E + dE$ aralığındaki enerji durumlarının sayısı

$$N(E)dE = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (3.28)$$

V kolaylık olması açısından birim hacim olarak alınır. Toplam durum yoğunluğu

$$N = \frac{8\pi}{3h^3} (2m^* E)^{3/2} \quad (3.29)$$

Genel olarak, enerji vadileri küresel yüzeyler yerine rotasyonel elipsoidler oldukları için etkin kütle izotropik değildir; Bundan böyle, durum etkin kütlelerin ortalama yoğunluğu

$$m^* = (m_1^* m_{t1}^* m_{t2}^*)^{1/3} \quad (3.30)$$

Burada m_1^* boyuna etkin kütle ve m_{t1}^* ile m_{t2}^* iki enine kütlelerdir.

Durum yoğunluğunu bulmak için, tüm enerji vadilerinin katkıları eklenmelidir. Böylece çok-vadili bir yarıiletken içindeki iletkenlik bandının en alt noktası ile bir E enerjisi arasındaki durum sayısı

$$N = \frac{8\pi}{3h^3} \sum_j g_j (2m_j^*)^{3/2} (E - E_j)^{3/2} \quad (3.31)$$

Burada g_j j-tipi vadi sayısı, m_j^* bir j' inci vadideki yüklü parçacığın ortalama etkin kütlesi ve E_j j-vadisinin en alt noktasındaki enerjidir. Böylece, birleştirilmiş durumların yoğunluğu

$$\begin{aligned} N(h\nu)d(h\nu) &= \frac{8\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} \\ &= \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 h^3} (h\nu - E_g)^{1/2} d(h\nu) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Burada m_r indirgenmiş kütle olup, aşağıdaki şekilde verilir

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (3.33)$$

Böylece, $h\nu$ ' nün fonksiyonu olan soğurma katsayısı α

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.34)$$

ve A^* sabiti

$$A^* = \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (3.35)$$

[30].

3.5.3. Yasaklanmış Doğrudan Geçişler

Bazı materyallerde, kuantum seçim kuralları direkt geçişler için $k = 0$ ' da izinsiz, $k \neq 0$ ' da izinlidir ve geçiş olasılığı k^2 ile artar. Şekil 3.8' de görülen model için bu geçiş olasılığının $(h\nu - E_g)^{1/2}$ ile orantılı olarak artması anlamına gelir ve soğurma katsayısı aşağıda görülen spektral bağımlılığa sahiptir.

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.36)$$

burada A

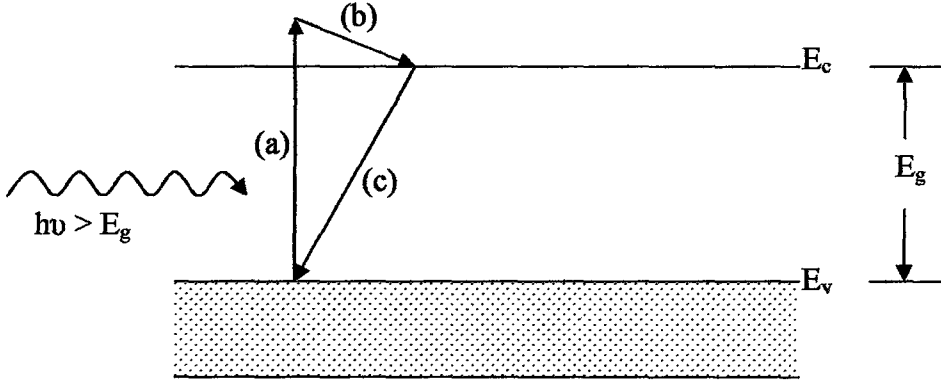
$$A = \frac{4}{3} \frac{q^2 \left(\frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{5/2}}{nch^2 m_e^* m_h^* h\nu} \quad (3.37)$$

3.5.4. Optik Soğurma

Bir yarıiletkenin bant aralığı enerjisini ölçmede kullanılan tekniklerden biri, materyal üzerine gelen fotonların materyal tarafından soğurulmasını baz alır. Bu tekniğin uygulanmasında, dalga boyu bilinen fotonlar örnek üzerine yönlendirilir ve çeşitli fotonların göreceli geçirgenliği ölçülür. Bant aralığı enerjisinden büyük enerjiye sahip fotonlar soğurulurken; enerjisi bant aralığı enerjisinden küçük olan fotonlar materyal tarafından soğurulmadan geçerler. Böylece, bant aralığı enerjisinin tam bir ölçümü elde edilir.

3.5.4.1. Geçirme ve Soğurma

$h\nu > E_g$ enerjisine sahip bir fotonun bir yarıiletken tarafından soğurulacağı açıktır (Şekil 3.9). Bağlanma bandında elektron varken ve iletkenlik bandı boşken, elektronlar uyarılabilir ve foton soğurulma olasılığı yüksektir.



Şekil 3.9. $h\nu > E_g$ enerjili bir fotonun optik soğurulması (a) foton soğurulması esnasında bir EHP yaratılır; (b) uyarılan elektron saçılma olayları ile enerjisini örgüye verir; (c) elektron bağlanma bandındaki bir boşluk ile yeniden birleşir

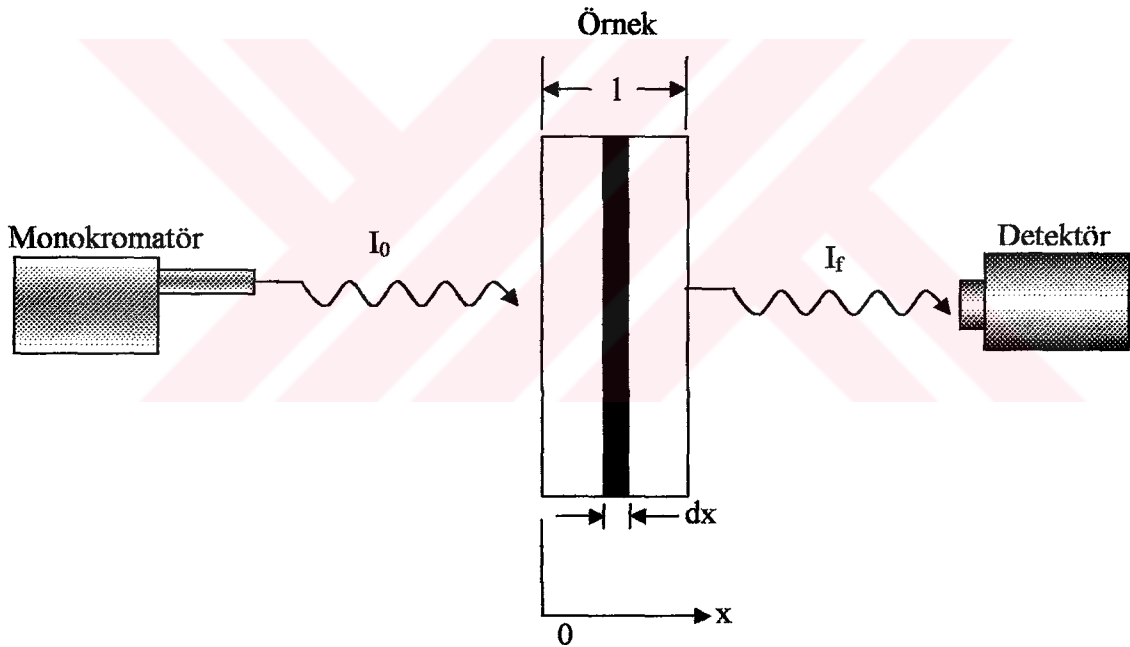
Şekil 3.9' da görüldüğü gibi, optik soğurma ile iletkenlik bandına uyarılan bir elektron iletkenlik bandındaki elektronlardan daha fazla enerjiye sahiptir (örnek çok yoğun bir şekilde katılanmadıkça hemen hemen tüm elektronlar E_c enerji seviyesinin yakınında bulunurlar). Bundan dolayı uyarılmış elektronlar, hızları diğer iletkenlik elektronlarının ısısal denge hızına ulaşana kadar enerjilerini saçılma olaylarında örgüye verirler. Bu soğurma işlemi ile yaratılan elektron ve boşluk, fazlalık taşıyıcılarıdır ve buldukları çevre ile dengede olmadıklarından dolayı sonunda yeniden birleşmek zorundadırlar. Fazlalık taşıyıcıları her biri kendi bantlarında iken materyalin iletkenliğine katkıda bulunmakta serbesttirler.

Enerjisi E_g ' den küçük olan bir foton, bağlanma bandından iletkenlik bandına bir elektron uyaramaz. Bundan dolayı, saf bir yarıiletken içinde $h\nu < E_g$ enerjili fotonların soğurulması ihmal edilir. Bu kuralın bir istisnası da, verilen bir bant içinde küçük bir miktar soğurmanın olabilmesidir. Örneğin, düşük enerjili bir foton, iletkenlik bandı içindeki bir iletkenlik bandı elektronunu geçici olarak daha yüksek bir seviyeye uyarabilir. Bu süreçte, fazlalık taşıyıcı yaratılmaz. Soğurmanın bu bileşeni yüksek

enerjili fotonlar ile banttan banda gerçekleşen uyarılmalarla (saf soğurma) karşılaştırıldığında genellikle ihmal edilir ve $h\nu < E_g$ enerjili bir çok foton da materyal içinden soğurulmadan geçerler. Bu sonuca bakılırsa, neden bazı materyallerin belli dalgaboyu aralıklarında geçirgen oldukları anlaşılır.

3.5.4.2. Soğurma Sabiti ve Bant Aralığı

Eğer $h\nu > E_g$ enerjili bir foton demeti bir yarıiletken üzerine düşürülürse, materyalin özellikleri ile belirlenen bir miktar soğurma olacaktır. Gelen ışık şiddeti için geçirme oranı fotonun dalgaboyuna ve örneğin kalınlığına bağlı olarak bulunabilir. Bu bağımlılığı hesaplamak için, I_0 (foton/cm²-s) şiddetine sahip bir foton demetinin 1 kalınlığındaki bir örnek üzerine düşürüldüğü varsayalım (Şekil 3.10) ve demet, sadece bir monokromatör vasıtasıyla seçilen λ dalgaboylu fotonlar içersin.



Şekil 3.10. Optik soğurma deneyi

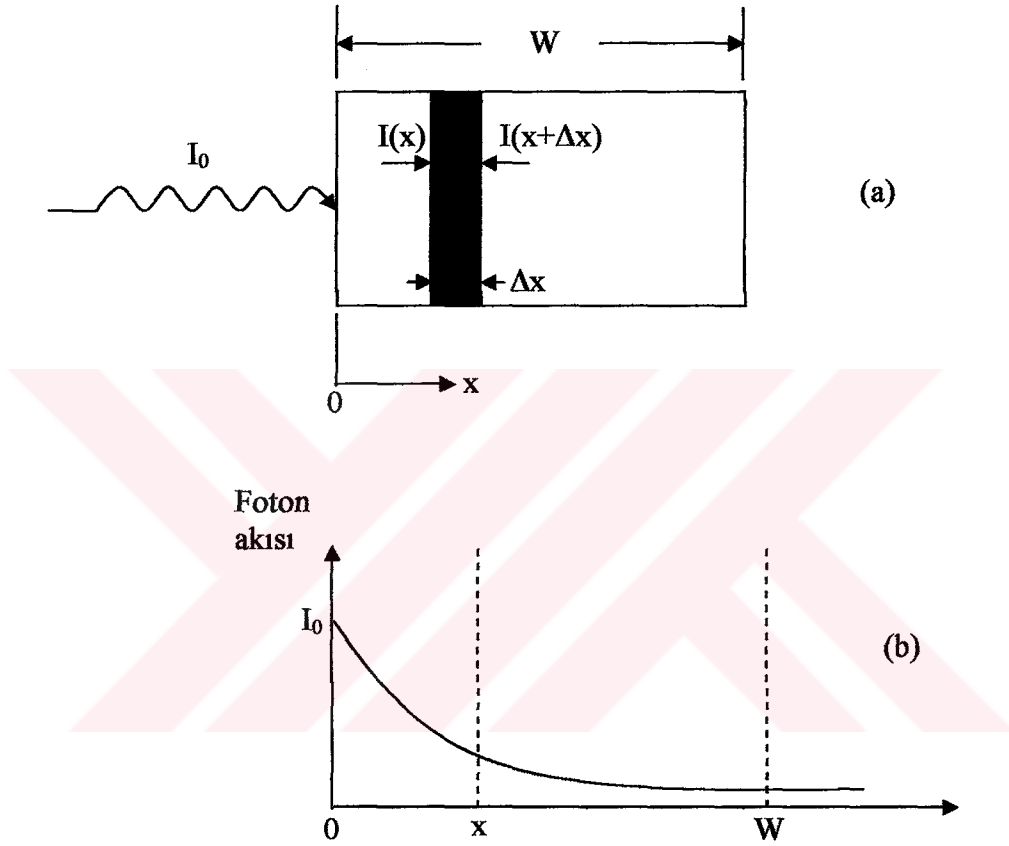
Demet örnek içinden geçerken, yüzeyden bir x uzaklığındaki şiddeti, herhangi bir dx kalınlığı içindeki soğurulma olasılığı göz önüne alınarak hesaplanabilir. Soğurma olmaksızın bir x uzaklığında bulunan foton için herhangi bir x kalınlığında soğurma olasılığı sabittir [31].

Bir yarıiletkenin, $h\nu > E_g$ enerjili bir ışık kaynağı ile aydınlatıldığı ve foton akısının I_0 olduğu varsayalım. Fotonlar yarıiletken boyunca ilerlerken soğurulan

fotonların kesri, akının şiddeti ile orantılıdır. Böylece, bir Δx kalınlığında (Şekil 3.11a) soğurulan foton sayısı

$$\alpha I_0(x) \Delta x \quad (3.38)$$

Burada α , soğurma sabiti olarak tanımlanan orantı sabitidir.



Şekil 3.11. Optik soğurma (a) yarıiletken aydınlatma altında iken (b) foton akısının eksponansiyel azalışı

Şekil 3.11a' da görüldüğü gibi, foton akısının sürekliliğinden

$$I(x + \Delta x) - I(x) = -\alpha I(x) \Delta x \quad (3.39)$$

veya

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x) \quad (3.40)$$

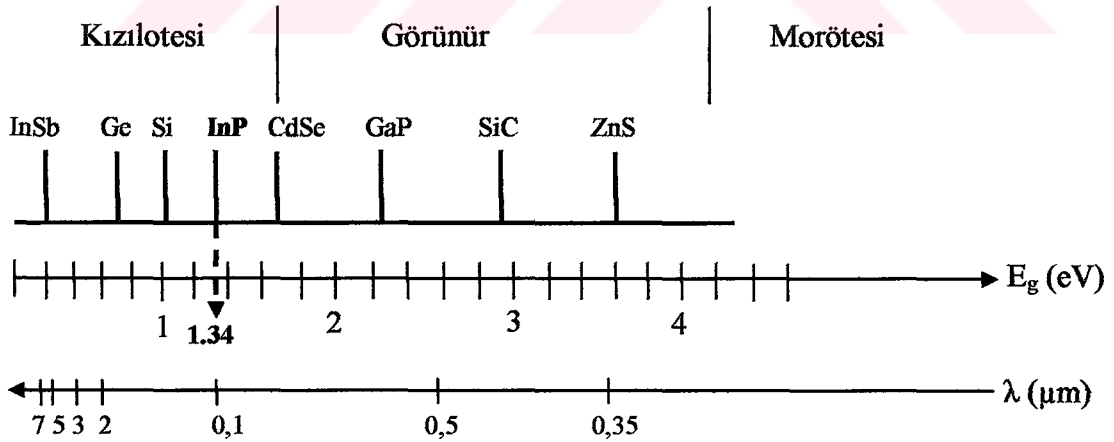
Denklemdaki negatif işaret, soğurmadan dolayı foton sayısının azaldığını gösterir. Denklem 3.40' ın $x = 0$ ' da $I(0) = I_0$ sınır şartı ile birlikte çözümü

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.41)$$

Yarıiletkenin diğer ucundaki foton akısı $x = l$ ' de

$$I(l) = I_0 e^{-\alpha l} \quad (3.42)$$

Şekil 3.12, yaygın şekilde kullanılan bazı yarıiletkenlerin bant aralığı enerjilerinin elektromanyetik spektrumun görünür, kızılötesi ve morötesi bölgelerine göre nereye düştüğünü göstermektedir. Görüldüğü gibi InP, GaAs, Si, Ge ve InSb görünür bölgenin dışına düşmektedirler. Bu yüzden de eğer göz geçirgenlik deneyinde detektör gibi kullanılmak zorundaysa, bir kızılötesi çevirici tüpü de kullanılmalıdır. GaP ve CdS gibi diğer yarıiletkenler ise, görünür bölgede fotonların geçmesi için yeterince geniş bant aralıklarına sahiptirler. Burada önemli olan nokta, bir yarıiletkenin bant aralığı enerjisine eşit veya daha büyük enerjili fotonları soğurmasıdır.



Şekil 3.12. Optik spektruma göre bazı yarıiletkenlerin bant aralıkları

3.6. X-Işını Kırınım Yöntemleri

Kristal yapısı fotonların, nötronların ve elektronların kırınımı yoluyla incelenir. Bir X-ışını fotonunun enerjisi dalgaboyuna bağlı olarak

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.43)$$

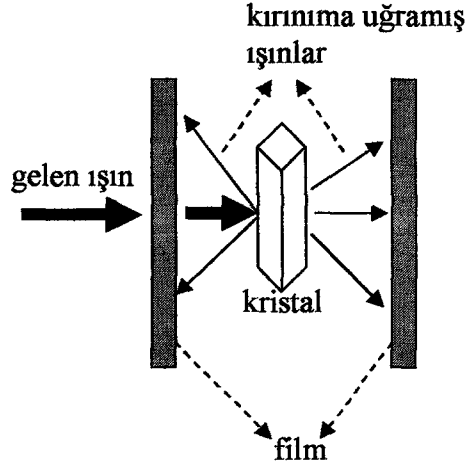
Burada, h Planck sabiti olup değeri $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s' dir. Denklem 3.43' te yer alan sabit değerlerin yerine yazılması ile dalgaboyu λ için aşağıda verilen denklem elde edilir:

$$\lambda = \frac{12400}{E(eV)} \quad (3.44)$$

Bragg Yasası, λ ve θ ' nin uyumunu gerektirir. Üç boyutlu bir kristale herhangi bir açıyla çarpan λ dalgaboyuna sahip tek renkli X-ışınları, genel olarak kristal tarafından yansıtılmayacaktır. Bu kristalde Bragg yansımasını gerçekleştirmek için, dalgaboyunun veya açının taranması gerekir. Kırınım yöntemleri özellikle bunları gerçekleştirmek için düzenlenmiştir [24].

3.6.1. Laue Yöntemi

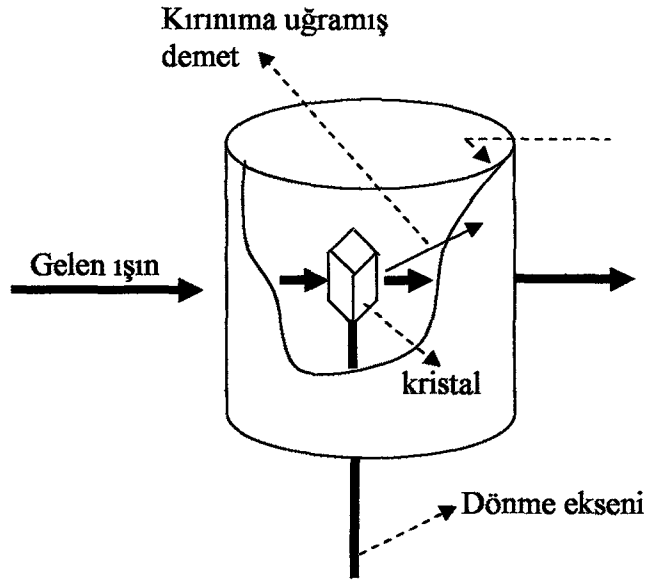
Laue yönteminde, sürekli dalgaboylu X-ışını ya da nötron ışınımı demetinde tekli bir kristal hareketsiz durur. Bu kristal, Bragg Yasası' nı sağlayan d aralıklı ve θ gelme açılı düzlemler için λ ' nin kesikli değerlerini seçer ve saçılmaya uğratar. Geniş dalgaboyu aralığında 0.2 A° dan 2 A° a kadar X-ışını verecek şekilde bir kaynak kullanılır.



Şekil 3.13. Laue yöntemi için deneysel düzenek [32]

3.6.2. Döner Kristal Yöntemi

Tek kristal, tek renkli X-ışını veya nötron demetinin yolu üzerine sabit bir eksen etrafında kolayca dönebilecek şekilde yerleştirilir. Dönme eksenini ile aynı eksenli silindirin iç yüzeyine fotoğraf filmi yerleştirilir. Gelen ışın bir süzgeçten geçirilerek veya bir kristalden yansıtılarak tek renkli (tek dalgaboylu) hale getirilir. Burada, kristalin belirli düzlemlerinden birinin dönme eksenine paralel hale getirilmesine dikkat edilir.



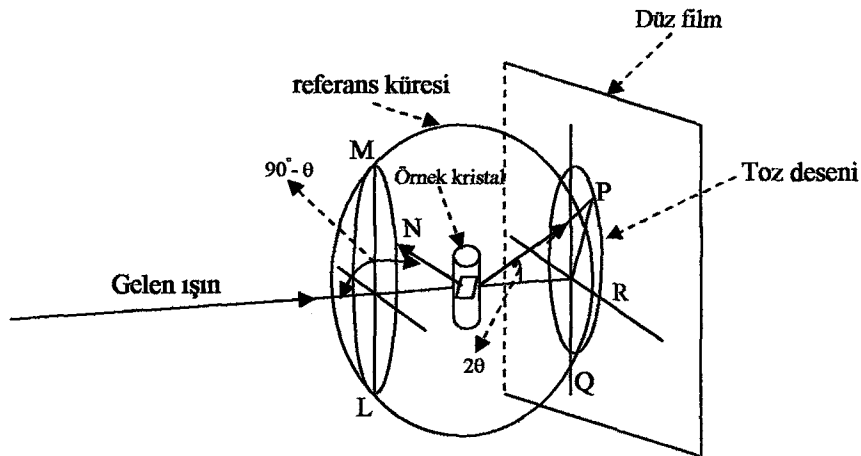
Şekil 3.14. Döner-kristal yöntemi için deneysel düzenek [32]

Kristal, eksenini etrafında döndürüldükçe değişik düzlemler Bragg Yansıması için uygun konumlara gelirler. Gelen demetteki ışınların dalgaboyu sabit olduğundan, ışının düştüğü paralel düzlem takımı için gelme açısı θ ve düzlemler arası d uzaklığı Bragg Yasası' nı sağladığı zaman kırınım meydana gelir. Düşey dönme eksenine paralel bütün düzlemlerden yansıyan ışınlar, yatay düzlem içinde meydana gelen sıfır tabaka çizgisini oluşturacak şekilde kırınım verir. Diğer tabakalar ise yansıma verirler. Değişik kristal yönelimleri için açılar ve şiddetler kırınım deseninden çıkarılarak birim hücredeki atomların yerleri ile birim hücrenin şekli ve büyüklüğü tayin edilir [32].

3.6.3. Toz Yöntemi

Bu yöntemde, toz haline getirilmiş örnekler kullanılır. Toz örnek, merkezinden geçen bir eksen etrafında kolayca dönebilen silindirik bir cam tüpün içine konulur. Tek renkli ışın, bu tüpün dönme eksenine dik olarak gelecek şekilde yeteri kadar ince bir demet şeklinde olmalıdır. Kırınımın kaydedileceği film ise, tüpün dönme eksenini ile aynı eksenli silindirin iç yüzeyine yerleştirilmelidir.

Çok sayıda küçük kristal taneleri tüpte rastgele yöneldiğinden, her zaman Bragg yasasını sağlayacak şekilde yönelmiş yeterli sayıda kristal tanesi bulunur. Bundan dolayı kırınıma uğramış ışın saçılır. λ ve θ ' nın her ikisi birden ölçülebildiğinden, düzlemler arası d uzaklığı hesaplanabilir. Tüpün içindeki örnek tüp ile beraber döndürülürse, her yeni durum için başka kristal taneleri kırınım konumuna geçer. Böylece, aynı dalgaboylu ışın için farklı her düzlem uzaklığına karşılık gelen bir kırınım oluşur. Kristal yapının türü önceden bilinirse, örgü sabiti büyük bir duyarlılıkla tayin edilir [33.]



Şekil 3.15. Toz deseninin ortaya çıkışı [33]

BÖLÜM IV

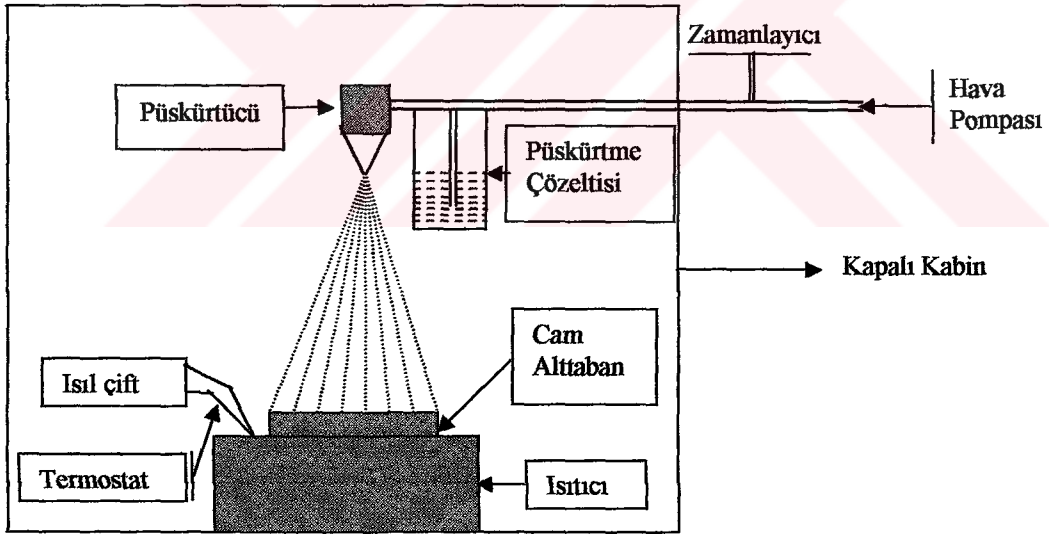
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, ilk önce InP ince filmlerinin oluşturulması daha sonra da elde edilen bu ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan ölçüm yöntemleri açıklanacaktır.

4.2. Film Oluşturma Sistemi

Bu çalışmada, püskürtme yöntemine dayalı atmosferik ortamda ince filmler oluşturmaya elverişli şematik görüntüsü Şekil 4.1' de verilen aşağıdaki sistem kullanılarak InP ince filmleri oluşturulmuştur. Kullanılan sistem şekilde görüldüğü gibi, püskürtme sistemi, ısıtıcı, sıcaklık kontrol sistemi ve zaman ayarlayıcısından oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Püskürtme sistemi

4.2.1. Püskürtme Sistemi

Bu sistem püskürtme eriyiğinden ısıtılmış cam alt tabanlar üzerine homojen ve damlacıklı bir yapıda püskürtme yapılabilmesi için kullanılmaktadır. Damlacıklar, kendilerini ve aynı zamanda taşıyıcı gaz akış oranını meydana getirmek için kullanılan

püskürtücü ağzının geometrisine bağlı olarak farklı büyüklüklerde olabilir. Bu çalışmada, taşıyıcı gaz olarak hava kullanıldı ve püskürtme eriyiğinin akış oranı bir hava motorunun yardımıyla dakikada 5 ml püskürtme yapacak şekilde ayarlandı. Diğer taraftan, damlacıkların büyüklüğünü etkileyen başka bir faktör daha vardır. Bu da püskürtme ağzının alt taban yüzeyinden olan yüksekliğidir. Bu yükseklik ayarlanabilir ve en iyi kaliteye sahip örnekleri oluşturmak için uygun olan en iyi yükseklik deneysel olarak bulunur.

4.2.2. Isıtıcı

Üzerinde film oluşturacak alt taban olarak kullanılan cam lamellerin ısıtılmasında kullanılır ve bir çelik plaka altına izole edilerek sarılmış rezistanstan oluşmaktadır. Isıtıcının gücü 2500 W olup 220 V ve 50 Hz' de alternatif akımla çalışmaktadır.

4.2.3. Sıcaklık Kontrol Sistemi (Termostat)

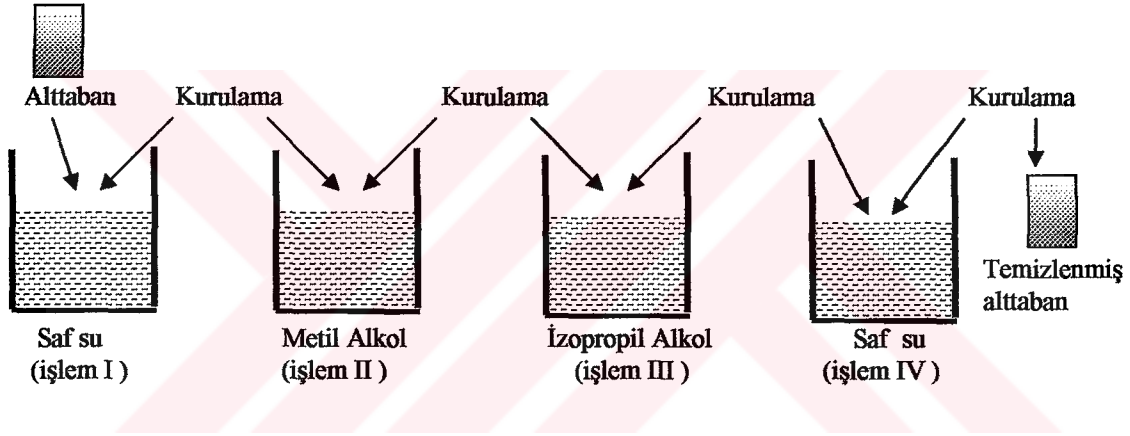
Kaliteli ince film örneklerinin oluşturulmasında filmin oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri alt taban sıcaklığının istenilen değerde sabit tutulmasıdır. Bu nedenle, film oluşturma sisteminde ısıtıcıyı istenilen sıcaklıkta sabit tutabilmek için 0-1200 °C arasında ± 5 °C duyarlılıkta ısıyı kontrol edebilen termostat sistemi kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol sisteminin çalışma mekanizması şu şekildedir: alt taban istenilen sıcaklığa ulaştığında ısıtma işlemi durur ve otomatik olarak hava motoru devreye girerek püskürtme işlemi başlatır. Püskürtme işlemi esnasında alt tabanda bir sıcaklık düşüşü olursa, hava motoru durur ve termostat sistemi tekrar devreye girerek ısıtma işlemi başlatır. Bu işlem ince film oluşumu tamamlanana kadar devam eder.

4.2.4. Zaman Ayarlayıcı

Sistemde püskürtme boyunca hava motorunun çalışma zaman aralığını (gaz akış zamanını) ayarlar. Bu zaman 1 saniyeden 9 saniyeye kadar ayarlanabilir. Termostatla uyumlu şekilde çalışır. Çalışmalarımızda püskürtme ve durma zamanları 3 saniye olarak seçilmiştir.

4.3. Alt Tabanların Hazırlanması

Üzerine ince film oluşturulacak olan alt tabanların fiziksel özellikleri, ince filmin kalitesi üzerinde en etkili olan faktörlerden biridir. Oluşturulan filmlerde kristalleşme alt tabanın kristal yapısına, InCl_3 ve Na_2HPO_4 tuzlarından elde edilen eriyiklerdeki In ve P iyonlarının oranlarına bağlıdır. Amorf tabanlar üzerinde kristalleşme oranı yüksek olduğu için ve cam amorf yapıya sahip olduğundan dolayı alt taban olarak cam kullanılmıştır. Kristalleşme, aynı zamanda cam alt tabanların yüzey düzgünlüğüne ve temizliğine de sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle, ince film oluşturulmadan önce cam alt tabanlar bir ön temizlemeye tabi tutulurlar. Bu işlem Şekil 4.2' de görüldüğü gibi dört aşamada gerçekleştirilir.



Şekil 4.2. Cam alt tabanların temizlenme işlemi

Şekil 4.2' deki işlem sırasına göre tüm cam alt tabanlar temizlenir:

1. İşlem: Cam alt tabanlar üzerlerinde bulunabilecek tozların temizlenmesi için birinci kaptaki saf su içerisinde 15 dakika bekletilir. Daha sonra saf sudan çıkarılarak temiz bir ortamda kurutulur.

2. İşlem: Saf su ile temizlenmiş olan cam alt tabanlar üzerlerinde bulunabilecek yağ ve diğer lekelerden temizlenmesi için içerisinde metil alkol bulunan ikinci kaptaki 15 dakika bekletilir. İşlem tamamlandıktan sonra cam alt taban dışarı alınır ve temiz bir ortamda kurutulur.

3. İşlem: İkinci kapta metil alkolle temizlenmiş ve kurutulmuş olan cam alt tabanlar yüzeyinde oluşabilecek pürüzlerin giderilerek yüzey düzgünlüğünün sağlanması için içerisinde izopropil alkol bulunan üçüncü kapta 15 dakika bekletilir ve daha sonra kaptan çıkarılarak kurutulur.

4. İşlem: Bu aşama ön temizlemenin son aşamasıdır. Yukarıdaki işlemlerle temizlenmiş olan cam alt tabanlar üzerlerinde kalabilecek istenmeyen son kalıntıların da temizlenmesi için dördüncü kapta bulunan saf su içerisinde 15 dakika daha bekletilir ve daha sonra kurutulurken ön temizleme işlemi tamamlanmış olur.

4.4. Püskürtme Eriyiğinin Hazırlanması

Bu çalışmada, püskürtme tekniği kullanılarak bir çok InP ince filmleri hazırlanmıştır. Bu yöntemle ince film oluşturmak için kullanılan çözelti, püskürtme çözeltisi olarak adlandırılır. Oluşturulan InP ince filmleri için, değişik oranlarda tuzlar kullanılarak bir çok püskürtme çözeltisi aşağıda açıklandığı gibi hazırlanmıştır: İlk olarak, istenilen miktarlarda InCl_3 ve Na_2HPO_4 tuzları tartılır ve daha sonra her iki tuz da içerisinde 100 ml saf su bulunan bir kaba konulup karıştırmak suretiyle eritilir. Böylece püskürtme çözeltisi hazırlanmış olur. InP ince filmleri oluşturmak için kullanılan püskürtme çözeltisindeki InCl_3 ve Na_2HPO_4 tuzlarının miktarları Çizelge 4.1' de verilmektedir.

Çizelge 4.1. InP ince filmlerinin oluşturulması için kullanılan püskürtme çözeltilerindeki InCl_3 ve Na_2HPO_4 tuzlarının miktarları

Örnek	In-P Miktarı (g)	Oran (In:P)	Alttaban sıcaklığı (°C)
a	2.0-0.8	5:2	500
b	0.5-0.5	1:1	475
c	1.5-0.5	3:1	500
d	0.5-0.5	1:1	450
e	1.0-0.1	10:1	500
f	1.5-0.5	3:1	500
g	0.5-0.5	1:1	475

4.5. InP İnce Film Örneklerinin Oluşturulması

InP ince filmleri oluşturmak için ilk olarak, eriyiğin püskürtme hızı yaklaşık olarak 4-5 ml / dk olacak şekilde ayarlanır (bu işlem otomatik olarak yapılır) ve püskürtme ağzı alttabakadan 20 cm yükseklikte sabitlenir. Daha sonra, hazırlanan püskürtme çözeltisinden 100 ml alınarak püskürtme sistemi içerisine konulur ve termostat istenilen sıcaklığa ayarlanarak ısıtıcının ısıtma işlemine geçmesi sağlanır. Cam alt taban sıcaklığı istenilen sıcaklığa ulaştığı zaman otomatik olarak ısıtıcı devreden çıkar ve hava basma sistemi devreye girerek püskürtme işlemini başlatır. Hava pompa sistemi zaman ayarlayıcı sistem yardımıyla püskürtme işlemini 20 saniye aralıklarla 3 saniye püskürtme yapacak şekilde ayarlanmıştır.

Püskürtme eriyiği ayarlanan sıcaklıktaki cam alt taban üzerine ulaştığında aşağıdaki denklemle ifade edilen kimyasal reaksiyon meydana gelir.



Denklem 4.1' de görüldüğü gibi, HCl ve NaOH buhar, O₂ gaz olarak ortamdan uzaklaşırken, InP katı olarak cam yüzeyinde kalır. Böylece, cam alt taban üzerinde InP ince filmi oluşturulmuş olur.

4.6. Elektriksel Ölçümler

Bu kısımda, püskürtme yöntemiyle hazırlanmış olan ince film örneklerinin özdirenç, iletkenlik ve Hall mobilite değerlerini bulmak için kullanılan yöntemler ve bunlara ait teorik bilgiler verilecektir.

4.6.1. Özdirenç Ölçümü ve Dört Nokta Metodu

Bir iletkenin direnci

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.2)$$

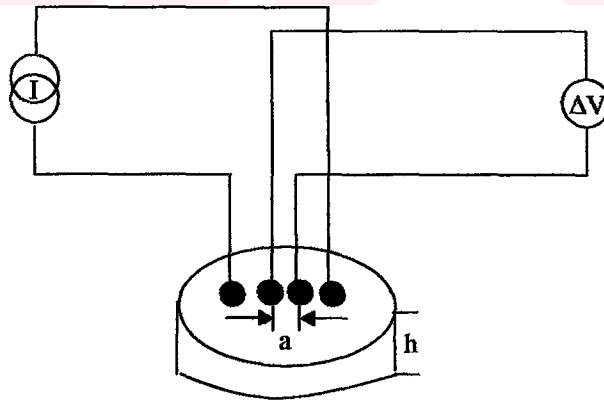
Burada, L iletkenin uzunluğu ve A ise kesit-alanıdır. Bu ifadeye göre, iletken boyunca akım yoğunluğu \vec{J} 'nin sabit olduğu (iletkenin her noktasında aynı değere sahip) kabul edilmiştir. Şimdi, iletkenin sabit kesit alanına (bazı kısımları geniş, bazı kısımları dar)

sahip olmadığını kabul edelim. Bu durumda, yukarıda verilen direnç ifadesi geçerli olmaz. Genel olarak, ölçülen öz direnç iletkenin hacmi üzerinden öz dirençlerin ağırlıklı ortalamasıdır. “Ağırlık” akım yoğunluğunun karesi ($\vec{J} \cdot \vec{J}$) alınarak hesaplanır.

Akım, iletken içinde bir a bağlantı noktası içerirse ne olur? Numune içindeki akım yoğunluğu, bağlantı noktası altında aniden artar. Akış yönündeki akım, hızlı bir şekilde yayılır ve her noktada oldukça sabit olur. Akım, çıkış bağlantısında tekrar toplanmalıdır. Etkin numune direnci, sabit olmayan akım yoğunluğundan dolayı ($\rho \frac{L}{A}$) ile ifade edilmez; ve hesaplanması oldukça zordur.

Yukarıda anlatılan problem bir dört-nokta ölçümü ile çözülebilir. Dört-nokta ölçümünde, akım yoğunluğunun değişmez olduğu ilerleme yönündeki (akımın ilerleme yönü) voltaj düşmesi ölçülür. Direnç, voltaj probleminin ayrılma aralığı kullanılarak numune öz direncinin hesaplanmasıyla bulunabilir.

Dört-nokta ölçümü, bir numune üzerine dört ayrı noktadan elektriksel bağlantı yapılarak alınır ve bu bağlantılardan ikisi boyunca bir elektrik akımı verilir diğer iki bağlantıdaki elektriksel potansiyel ölçülür. Böyle bir ölçüm, Şekil 4.3’ te verilmiştir.



Şekil 4.3. Dört-nokta ölçüm tekniği

Dört elektrot sıralı olarak dizilir ve dış elektrotlar boyunca bir I akımı verilir. Bir elektrometre yardımıyla iç elektrotlardaki dört-nokta voltajı ölçülür. Elektrometrenin giriş empedansı çok yüksek iken (100 GΩ civarında), elektrometre elektrotlarındaki

akım örnek boyunca dış kaynak akım elektrotlarından üretilen akım ile karşılaştırıldığında ihmal edilir. Böylece, ölçülen dört-nokta direnci V/I , dört elektrot ve örnek arasındaki bağlantı direncinden herhangi bir katkı içermez. Bundan dolayı, dört-nokta metodu çoğu zaman bağlantı direnci çok büyük iken yarı iletkenlerin öz direnç ölçümleri için kullanılır.

Dört-nokta prob metodu, öz direnç ölçümleri için kolay ve uygun olmasına rağmen metodu başarısız yapan bazı durumlar vardır. Metodun başarısı (hassasiyeti) numune şekline ve boyutlarına bağlıdır.

Dört-nokta probu, sonlu h kalınlığındaki bir dilim üzerine yerleştirildiğinde yüzeye dik gerilim gradiyenti oluşturacaktır. Bu gradiyentin ihmal edildiği incelikte bir dilim elde edildikten sonra bu uygun dilimin öz direnci bulunabilir. Sonlu kalınlıktaki sonsuz bir tabaka üzerindeki bir dört nokta probu için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\rho = \left(\frac{\Delta V}{I}\right)h \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right)F\left(\frac{h}{a}\right) \quad (4.3)$$

Burada;

ρ = tabakanın öz direnci

h =film kalınlığı

a =prob aralığı

$F(h/a)$ = $h \rightarrow 0$ için düzeltme faktörü

Yukarıda anlatılan durum için, düzeltme faktörü gerekli değildir, çünkü (h/a) oranı yaklaşık olarak sifira gider.

Şimdi iki durum ele alalım:

1) Numune sonsuz kalınlıkta ($h \gg a$)

2) Numune sonsuz incelikte ($h \ll a$)

Verilen iki durum için, numune öz direnci I ve ΔV 'ye göre aşağıdaki şekilde verilir:

$$h \ll a \quad \rho = \frac{\pi}{\ln 2} h \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (4.4)$$

$$h \gg a \quad \rho = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (4.5)$$

Değişen film kalınlığı için ihtiyaç duyulan düzeltmelere ek olarak, test edilecek örneğin şekli de hesaba katılmalıdır. Bu, prob aralığına göre test edilecek örneğin biçimine ve büyüklüğüne bağlı olan C_f düzeltme faktörüne sahiptir. Buna göre öz direnç

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} h \left(\frac{\Delta V}{I} \right) C_f \quad (4.6)$$

D yarıçaplı dairesel bir numunede, D/a oranı artarken C_f değeri de artar. Kare şeklindeki bir numunede ise C_f seçimi çok karmaşıktır.

Dört-nokta probu, yarı iletkenler içindeki elektronik geçişlerin doğru ve güvenilir ölçümlerini yapmak için kullanılan bir alettir. Bilinen dört-nokta problemleri, tungsten karpit veya benzer ağır metallerin kullanıldığı milimetre boyutunda aletlerdir.

Dört nokta metodu, çoğu zaman bağlantı direnci çok büyük iken yarı iletkenlerde öz direnç ölçümleri için kullanılır. Özellikle, yarı iletken kristallerdeki ince yüzeylerin veya yakın yüzey tabakalarının öz direnç ölçümlerinde kullanılır.

Dört-nokta probu 500° C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkabilen bir ısıtma cihazı ile bir araya getirilerek, ICR değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak analiz edilebilir.

Bu çalışmada, örneklerin öz dirençlerini dört nokta yöntemiyle ölçmek için, KEITHLEY 2400 SOURCEMETER, 2700 MULTIMETER / DATA ACQUISITION SYSTEM ve 7700 Interface kartı ile desteklenen bilgisayar ölçüm sistemi kullanılmıştır.

4.7. Hall Mobilitesi Ölçümü

Çoğunluk taşıyıcılarının (elektronların) Hall mobilitesini hesaplamak için şu yol izlenir. İlk olarak, örneklerin öz dirençleri dört nokta prob yöntemiyle ölçüldükten sonra,

yine aynı yöntem uygulanarak Hall mobilitesi ölçümü gerçekleştirilir. Bu uygulama sırasında değişiklik, içteki iki prob akım yönüne paralel iki kenar arasındaki voltajı ölçecek şekilde yerleştirilmesi ve örneğin yüzeyine dik olan bir manyetik alan içine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Sadece ortadaki iki probun yerlerini değiştirmek suretiyle yapılır. Örneklerin Hall mobiliteleri Denk. 3.22 ile hesaplanır.

4.8. Optik Ölçümler

Örneklerin bant aralığı enerji değerini belirlemek için, farklı dalgaboylu fotonlara karşılık örneğin soğurma katsayılarını bilmek gerekir. Bu amaçla, 500-1100 nm. dalgaboyu aralığında çalışan bir UV/VIS DOUBLE-BEAM JASKO 7800 Model Spektrometre geçiş ve soğurma ölçümleri için kullanılmıştır. Soğurma ölçümleri yapılırken, spektrometredeki çift ışığın birinin önüne ince film örneği diğerinin önüne de kaplanmamış alt taban cam konularak alt taban camından kaynaklanan soğurma etkisi ortadan kaldırılmıştır. İlk olarak, spektrometre kullanılarak farklı dalgaboylarına karşılık geçiş değerleri (I / I_0) bulundu. Daha sonra farklı dalgaboylarına karşılık gelen soğurma katsayısı α , örneğin kalınlık değerini ve geçirgenlik değerlerini aşağıdaki denkleme koymak suretiyle hesaplandı.

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (4.7)$$

Burada d , örneğin optik yol uzunluğudur.

4.9. Yapısal Ölçümler

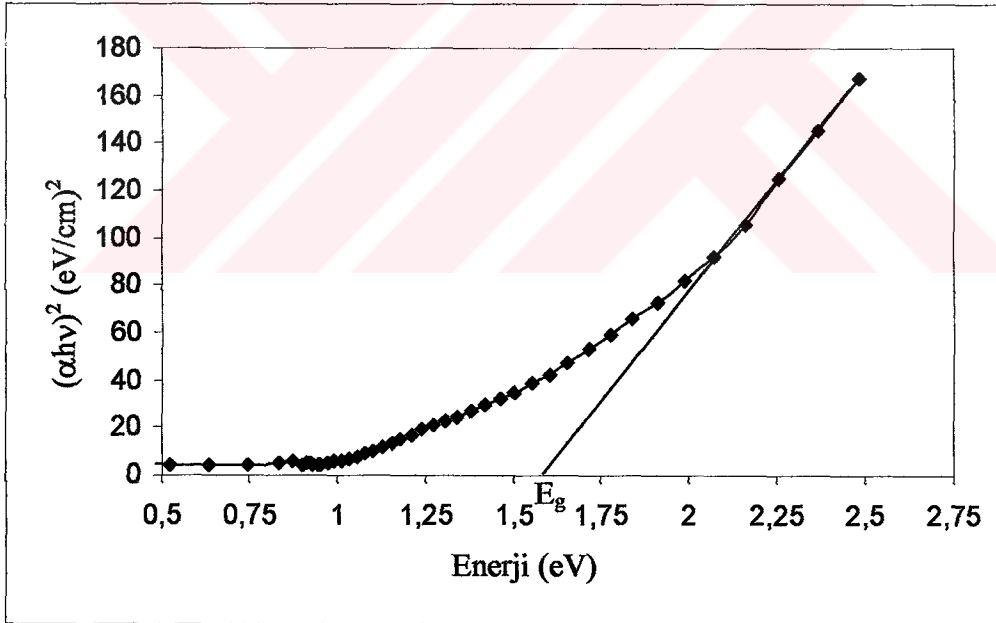
Hazırlanan örneklerin yapısal özelliklerinden olan kristalleşme ve doku oluşmalarını incelemek için XRD ve SEM yöntemleri uygulanmıştır. XRD ölçümleri için dalga boyu $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ olan CuK_α radyasyonu veren RIGAKU D/MAX-III marka X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. Bütün örneklerin XRD şablonları $10^\circ - 70^\circ$ (2θ) aralığında olacak şekilde alınmıştır. Örneklerin SEM görüntüleri ise, JSM 5600 model SEM cihazıyla alınmıştır.

BÖLÜM V

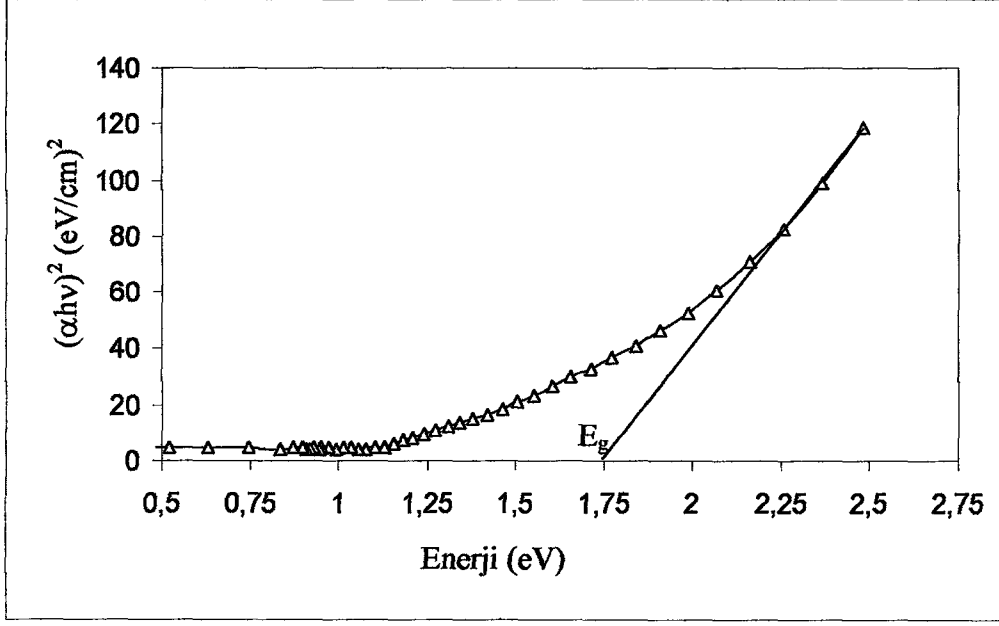
BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. İnce Filmlerin Optiksel Özellikleri

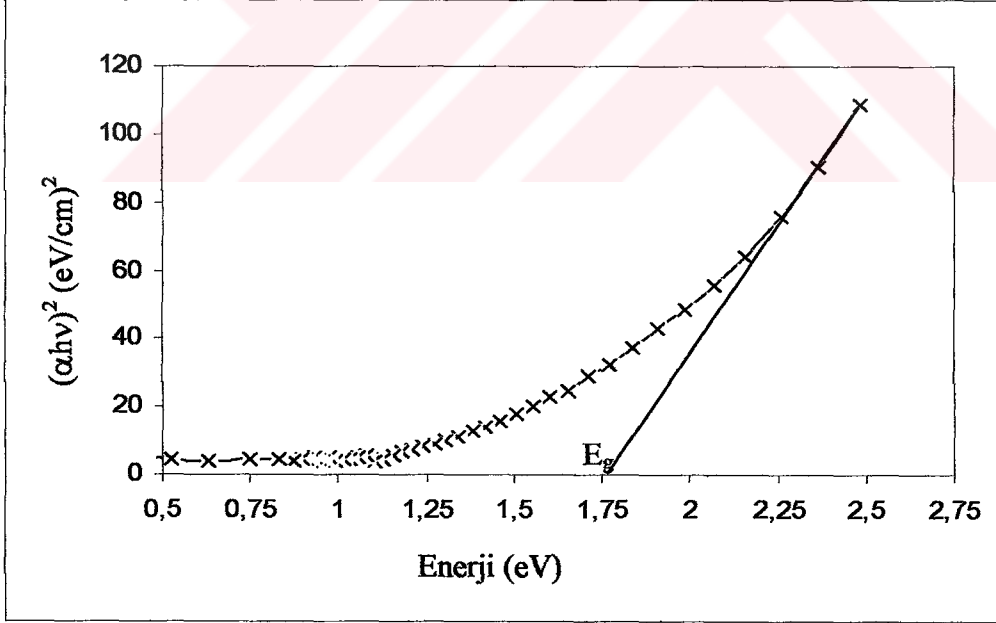
Bu çalışmanın önemli kısımlarından biri, InP ince film örneklerinin optiksel bant aralığını hesaplamaktır. Daha önce açıklandığı gibi, hazırlanan ince film örneklerinin dalga boyuna göre soğurma katsayıları Denk. 4.7 ile bulunmuş ve bulunan bu değerler Denk. 3.34 eşitliğinde yerine konarak bu fonksiyonun $h\nu$ ' ye karşı çizilen grafiğinden yararlanılarak örneklerin enerji bant aralıkları hesaplanmıştır. Şekil 5.1 a-b-c-d' de InCl_3 ve Na_2HPO_4 ' ün değişik oranlarında ve değişik alt taban sıcaklıklarında hazırlanan eriyiklerden elde edilen ince film örneklerinin, $(\alpha h\nu)^2$ ' nin $h\nu$ ' ye karşı elde edilen grafikleri verilmiştir.



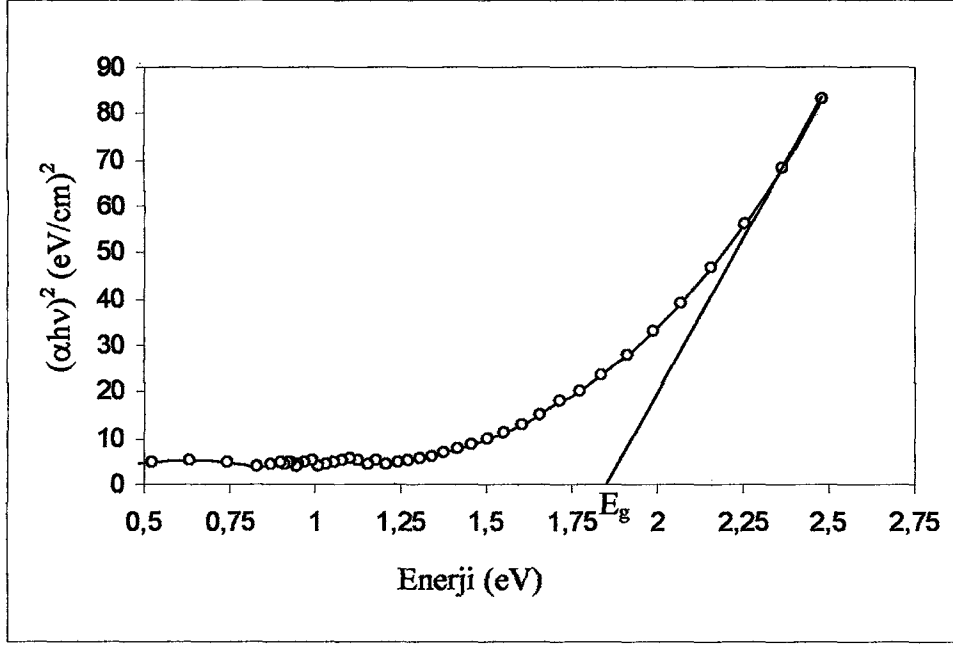
Şekil 5.1. (a) InP (4:1, 500⁰C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^2$ ' in $h\nu$ ' ye karşı elde edilen grafiği



Şekil 5.1. (b) InP (1:1, 475⁰C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^2$ 'in $h\nu$ ' ye karşı elde edilen grafiği

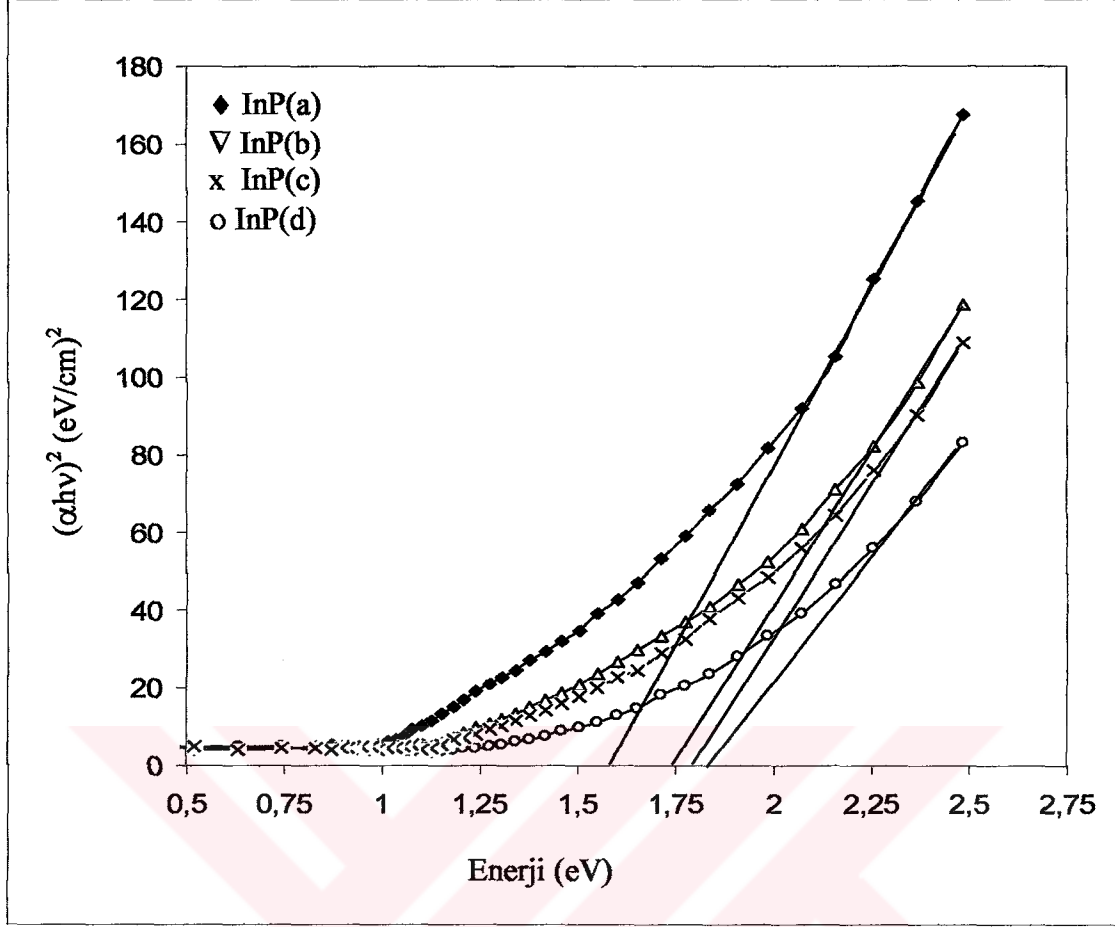


Şekil 5.1. (c) InP (3:1, 500⁰C) ince filmi için $(\alpha h\nu)^2$ 'in $h\nu$ ' ye karşı elde edilen grafiği



Şekil 5.1. (d) InP (1:1, 450⁰C) ince filmi için $(\alpha hv)^2$ ' in $h\nu$ ' ye karşı elde edilen grafiği

Örneklerin enerji bant aralığı değerleri, yukarıda verilen Şekil 5.1 (a-d)'de görülen eğrilere bir teğet çizgi çizmek suretiyle bulunur. Çizilen teğet çizgilerin $h\nu$ eksenini kestiği noktalar, örneklerin E_g bant aralığı enerjisine tekabül eder. Şekil 5.2' de Şekil 5.1'deki eğrilerin karşılaştırılmaları ve bu eğrilere çizilen ekstrapolasyon sonucu elde edilen doğruların $h\nu$ eksenini kestiği noktalar görülmektedir. Bu doğruların $h\nu$ eksenini kestiği noktalar daha önce belirtildiği gibi, ince film örneklerinin bant aralığı enerji değerlerine tekabül etmektedir.



Şekil 5.2. InP ince film örneklerinin soğurma grafikleri ve bant aralığı enerjileri

InP ince film örneklerinin bant aralığı enerjisi yukarıda açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’ de görülmektedir.

Çizelge 5.1. Çeşitli InP ince film örneklerinin enerji bant aralığı değerleri

Örnek	Oran (In:P)	Alt taban sıcaklığı	E _g (eV)
a	(5:2)	500 °C	1.60
b	(1:1)	475 °C	1.75
c	(3:1)	500 °C	1.80
d	(1:1)	450 °C	1.85

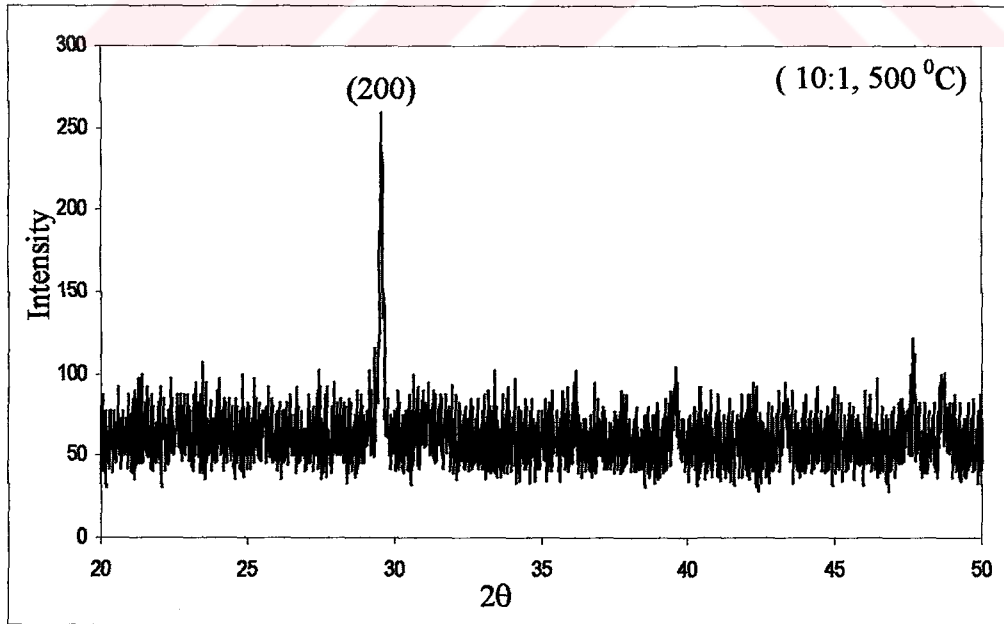
Çizelge 5.1' de görüldüğü gibi, InP ince film örneklerinin enerji bant aralığı değerleri 1.60 eV' den 1.85 eV' ye kadar değişmektedir. b örneğinin (1:1, 475 °C) enerji bant aralığı 1.75 eV iken d örneğinin (1:1, 450 °C) bant aralığı değeri 1.85 eV' tur. Buna göre, d örneğinin enerji bant aralığı değeri b örneğinkinden 0.1 eV daha büyüktür. İki örneğin enerji bant aralığındaki bu farklılık, tamamen örneklerin alt taban sıcaklıkları ile ilişkilidir. Örneklerin alt taban sıcaklığı arttıkça, bant aralığı enerji değerleri azalmaktadır. Bu, örneklerin alt taban sıcaklıkları arttıkça doku oluşumunun daha iyi olduğunu göstermektedir.

5.2. İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri

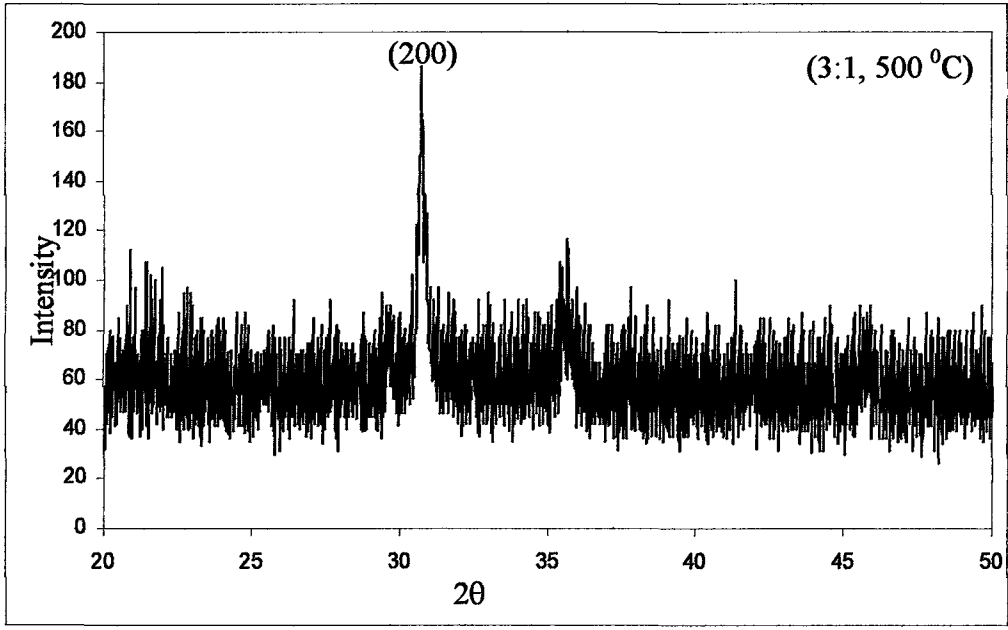
Farklı alt taban sıcaklıklarında ve değişik oranlarda püskürtmeyle depolanmış InP ince filmleri için çeşitli yapısal parametreler uygun şekilde aşağıda belirtilen yöntem ve formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

5.2.1. X-Işını Ölçümleri

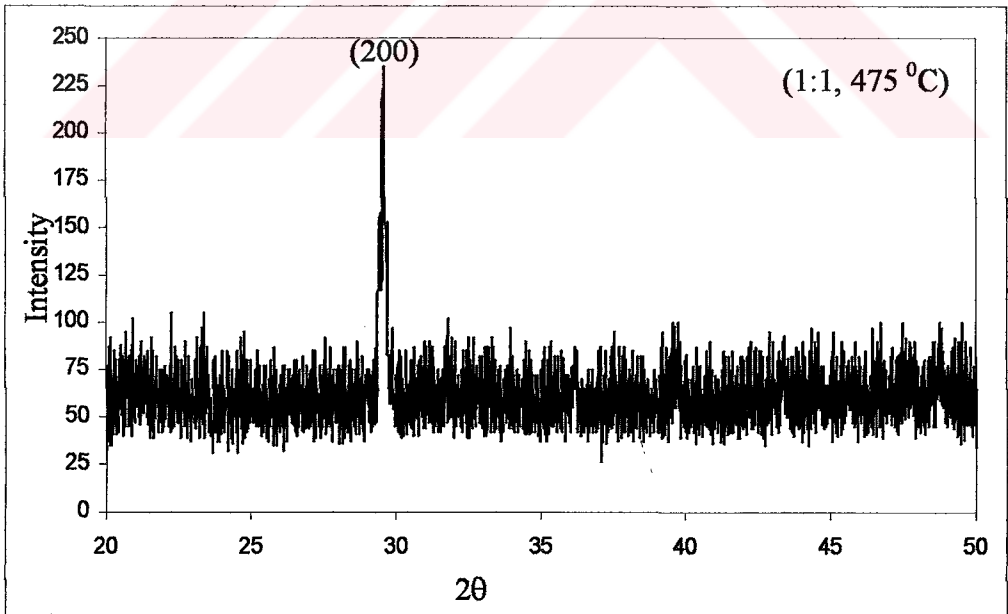
Değişik alt taban sıcaklıklarında ve oranlarda püskürtme yöntemiyle hazırlanan InP ince filmlerinin XRD grafikleri Şekil 5.3 (a-c) de görülmektedir.



Şekil 5.3. (a) InP (10:1, 500 °C) ince filminin XRD grafiği



Şekil 5.3. (b) InP (3:1, 500 °C) ince filminin XRD grafiği



Şekil 5.3. (c) InP (1:1, 475 °C) ince filminin XRD grafiği

Üç farklı InP ince film örneği için elde edilen XRD grafiklerinde görüldüğü gibi, InP' nin tüm görünen piklerini gösteren kırınım desenleri, f.c.c. (face centered cubic) kübik yapıdaki InP ince filmlerinin (200) düzlemlerinden gelen yansımalarından kaynaklanmaktadır. Tüm InP ince filmlerinin XRD şablonlarının, (200) düzlemi boyunca beklenen bir şekilde yönelme gösterdiği gözlenmektedir. (200) yönü, çinko sülfat yapısının sıkı-paket yönüdür. Alt taban sıcaklığı 500 °C'ye doğru yükseltirken ortaya çıkan pik şiddetleri iyi-tanımlı (200) yönelmesiyle daha iyi kristalleşme oluşumunun varlığını işaret etmektedir. 500° C' nin üstündeki sıcaklıklarda, şiddette bir azalma görülmektedir. Bunun nedeni, kısmi ayrışma denilen kristal yapıdan uzaklaşma olayı olarak açıklanabilir. Şekil 5.3 (a-c)'de verilen XRD grafiklerinin aşağıda açıklanan yöntemlerle yapılmış olan analizleriyle ince filmlerin yapısal özellikleri incelenmiştir.

5.2.1.1. Örgü sabitinin hesaplanması

Kübik faz yapısı için örgü sabiti 'a' aşağıdaki denklemle verilir:

$$a^2 = \frac{\lambda^2 (h^2 + k^2 + l^2)}{4 \sin^2 \theta} \quad (5.1)$$

Burada, θ kırınım tayfi (Bragg açısı) ve λ X-ışınının dalga boyudur. Farklı alt taban sıcaklıklarında ve oranlarda püskürtme yöntemiyle oluşturulmuş InP ince filmlerinin diğer örgü parametreleri bundan sonraki kısımlarda verilen formüllerle hesaplanmış ve Çizelge 5.2' de verilmiştir.

5.2.1.2. Doku büyüklüğü ölçümleri

Şekil 5.3 (a-c)'den görüldüğü gibi, tüm InP ince film örneklerinin XRD grafiklerinden en çok yönelmenin (200) düzlemi boyunca olduğu gözlenmektedir. (200) düzlemi için InP ince filmlerinin doku büyüklüğü Scherrer [34] formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d = \frac{\lambda}{D \cos \theta} \quad (5.2)$$

Burada, d doku büyüklüğü, λ kullanılan X-ışınının dalga boyu, D yarı-maksimum şiddetin açisal çizgi genişliği ve θ Bragg açısıdır. XRD grafiklerinin analiziyle yukarıda tanımlanan tüm parametrelerin değerleri Denk. (5.2)' de yerine yazılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2' de verilmiştir.

5.2.1.3. Mikrozorlama ölçümleri

Kristal filmlerde meydana gelen uyumsuz zorlamalar, ince filmlerin kristal örgüsü ve alt taban arasındaki ara-faz sınırlarındaki geometrik uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Bu zorlama, film içindeki örgü uyumsuzluğunun ortaya çıkmasına neden olur. Bununla birlikte zorlama, iki bileşene sahiptir: film ve alt tabanın genleşme katsayıları farkından kaynaklanan ısısal zorlama ve depolama esnasında film içinde oluşan kristalografik akış etkisinin toplanmasından kaynaklanan iç zorlama. Depolanmış filmlerin ortalama zorlaması, doğada baskısal olarak bulunur. Baskıcı zorlama, polikristal filmlerde baskın olan doku sınır etkisinden kaynaklanır. Bu zorlama aynı zamanda örgü uyumsuzluğundan ortaya çıkar ve örneğin oluşturulması esnasında kristalde oluşan kusurlardan kaynaklanır. Bu kusurlar, çoğu zaman alt taban sıcaklığı ile modife edilmiş, yüzey mobilitesi ile beraber film alt tabanına paralel hareket ederler. Zorlamanın kaynağı, depolama şartlarına bağlı olan örgü uyumsuzluğu ile de ilişkilidir. Püskürtmeyle oluşturulmuş InP ince filmlerindeki mikrozorlanmalar (ϵ) aşağıdaki denklemle hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.2' de verilmiştir.

$$\epsilon = \frac{D \cos \theta}{4} \quad (5.3)$$

Burada, D (200) pikinin yarı-maksimumun genişliğidir.

5.2.1.4. Dislokasyon yoğunluk ölçümleri

Dislokasyonlar, bir kristal içinde kristalin bir parçasındaki örgünün diğer parçasına göre yanlış oluşumuyla ilişkili bir kusursuzluktur. Boşlukların ve kristalin atomları arasında yer alan atomların tersine dislokasyonlar dengede olmayan kusursuzluklardır ki, termodinamik bilgiler onların gözlenen yoğunluklardaki varlığını belirlemekte yetersizdir. Hatta, dislokasyonları içeren büyüme mekanizması önemli bir konudur. Bu çalışmada, Williamson ve Smallman [35] metodundan yararlanılarak kübik

InP ince filmleri için dislokasyon yoğunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiş ve hesaplanmış değerler Çizelge 5.2' de verilmiştir.

$$\rho = 15\varepsilon/aD \quad (5.4)$$

Aşağıda verilen Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi, tüm InP ince film örneklerinde, baskın pikler literatürde de verilen $2\theta=29.5$ ile 30.06° değerlerinde bulunmuştur. Bu pikler homojen kristalleşmenin (200) düzleminde olduğunu göstermektedir. Tüm XRD pikleri (zinc blende) çinko sülfat yapısı olarak tanımlanabilir ve baskın piklerin konumları InP tek kristalleri için elde edilen sonuçlar ile de iyi bir uyum içindedir [36]. Çizelge 5.2' de verilen değerler ve Şekil 5.3 (a-c), fosfat (P) oranı sabit alınıp, indiyum (In) oranı 1 ile 10 arasında değiştirilerek birbirine yakın alt taban sıcaklıklarında elde edilen örneklerin InP ince filmleri olduğunu doğrulamaktadır.

Çizelge 5.2. InP ince filmleri için çeşitli yapısal parametreler

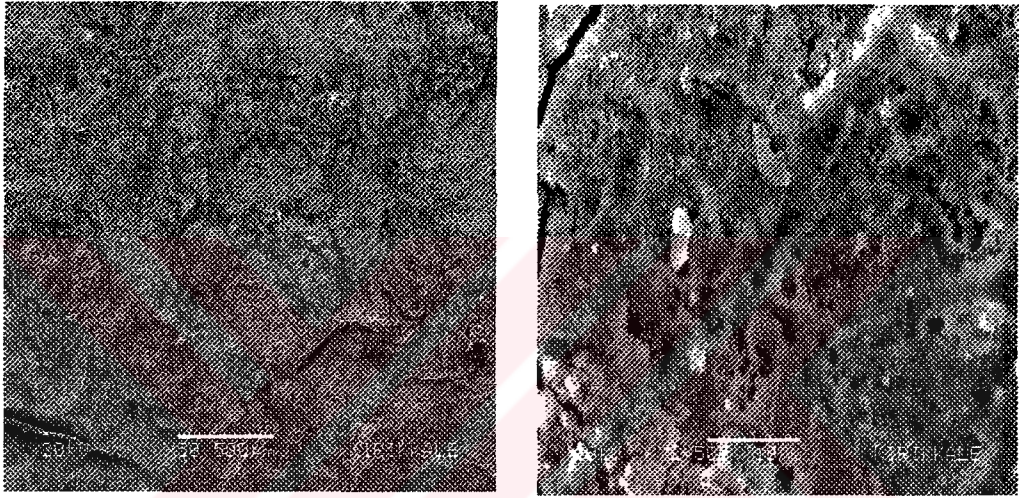
Örnek	2θ (derece)	(hkl)	Örgü sabiti (Å)	Doku büyüklüğü (Å)	Mikrozorlama (10^{-3})	Dislokasyon yoğunluğu (10^{11} cm^{-2})
e (10:1) 500°C	29.56	(200)	5.229	12.878	2.9	3.625
f (3:1) 500°C	30.06	(200)	5.144	9.686	3.856	3.615
g (1:1) 475°C	29.6	(200)	5.226	7.727	4.834	3.625

Çizelge 5.2' den görüldüğü gibi, indiyum oranındaki artış miller indislerini değiştirmemekle birlikte, 2θ açısına karşılık gelen yansıma açısını, örgü sabitini, doku büyüklüğünü, mikro zorlamayı ve dislokasyon yoğunluğunu değiştirmektedir. 2θ değerinin yarı maksimum genişliği (FWHM) ince filmin doku büyüklüğü ile ilişkilidir. Yarı maksimum genişliğinin küçük olması daha büyük doku büyüklüğü ve tüm filmin daha iyi kristal kalitesine sahip olması anlamına gelir. Şekil 5.3 (a-c)'deki XRD grafiklerinden, indiyum oranı 10'dan 1'e doğru değişirken pik şiddetinin azaldığı ve yarı maksimum genişliğinin arttığı görülmektedir. XRD analizlerinden elde edilen ve Çizelge 5.2' de verilen değerler de bunu desteklemektedir. Diğer taraftan, aynı alt taban sıcaklıklarında ve farklı oranlarda hazırlanan e ve f örneklerinin Çizelge 5.2' de verilen yapısal parametreleri incelendiği zaman indiyum oranındaki azalmanın örgü sabitini,

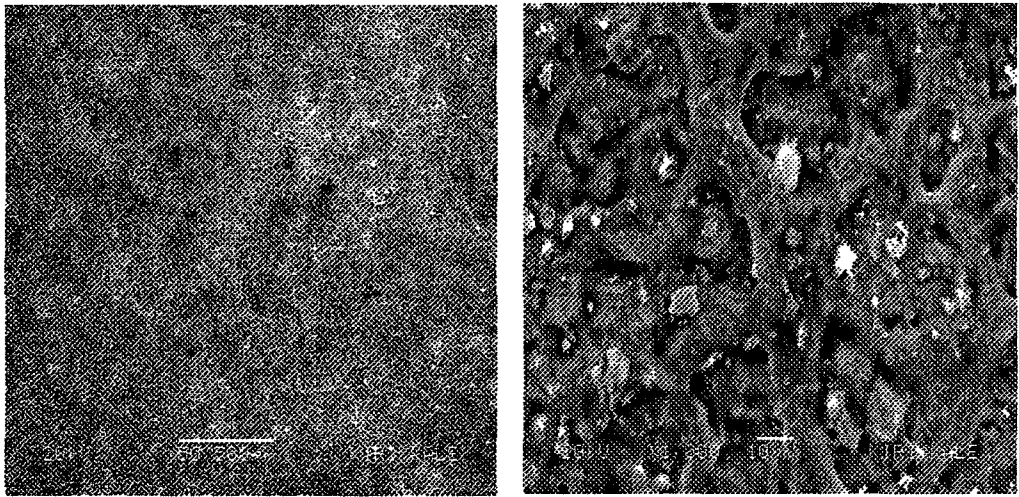
doku büyüklüğünü ve dislokasyon yoğunluğunu azaltırken, mikrozorlamayı artırdığı görülmektedir. Bu sonuçtan, ince filmlerin yapısal parametrelerinin onların oluşturulduğu alt taban sıcaklığına ve indiyum oranına sıkı sıkıya bağlı olduğu söylenebilir.

5.2.2. SEM Analizleri

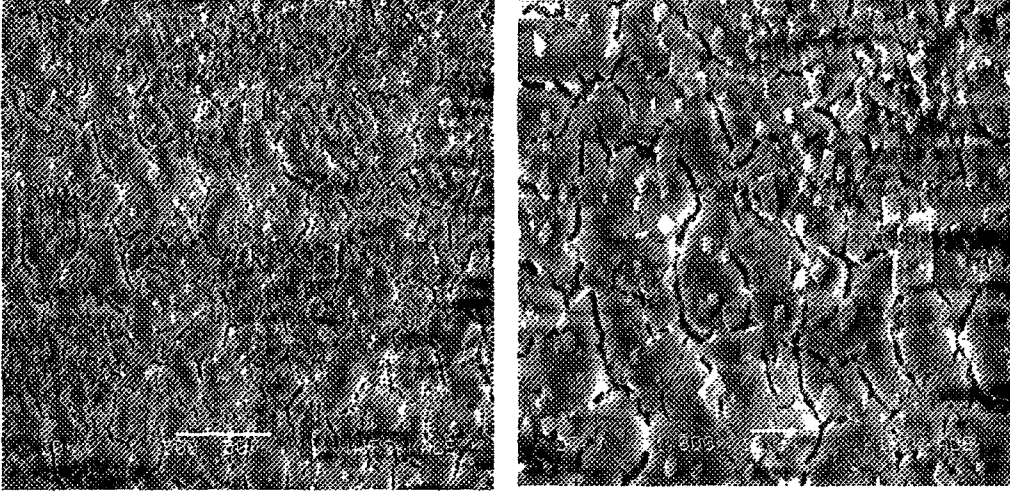
Farklı şartlarda elde edilen InP ince filmlerinin SEM görüntüleri Şekil 5.4 (a-c)'de görülmektedir.



Şekil 5.4. (a) InP (10:1, 500 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü



Şekil 5.4. (b) InP (3:1, 500 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü



Şekil 5.4. (c) InP (1:1, 475 °C) ince filminin iki farklı SEM görüntüsü

Şekillerden de görüldüğü gibi, tüm filmlerde homojen bir polikristalleşmenin olduğu, fakat kristalleşmenin farklı boyut ve şekillerde meydana geldiği görülmektedir. XRD analizlerinde açıklandığı gibi, doku boyutları indiyum oranının 10'dan 1'e doğru değişmesiyle azalmakta ve buna bağlı olarak yüzey yapısındaki kristalleşme de homojenlikten uzaklaşmaktadır. SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi, indiyum oranındaki değişim yüzey yapısını direk olarak etkilemektedir. Sonuç olarak XRD grafiklerinin analiziyle elde edilen bulgular ile SEM görüntüleri uyusmaktadır.

5.3. İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri

Daha önceki deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi, örneklerin özdirençleri dört nokta kontak yöntemiyle KEITHLEY 2400 SOURCEMETER, 2700 MULTIMETER / DATA ACQUISITION SYSTEM ve 7700 Interface kartı ile desteklenen bilgisayar ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır.

5.3.1. Özdirenç ve iletkenlik ölçümleri

Özdirenç ve iletkenlik ölçümleri, oda sıcaklığında karanlık ortamda ve yine oda sıcaklığında 60 Watt'lık güce sahip bir Tungsten lambanın yaydığı ışık altında alınmıştır. Örneklerin 1 cm²'lik alanına düşen enerji 0.07 Watt' tır. Bu şartlar altında örnekler için elde edilen özdirenç ve iletkenlik değerleri Çizelge 5.3' te verilmektedir.

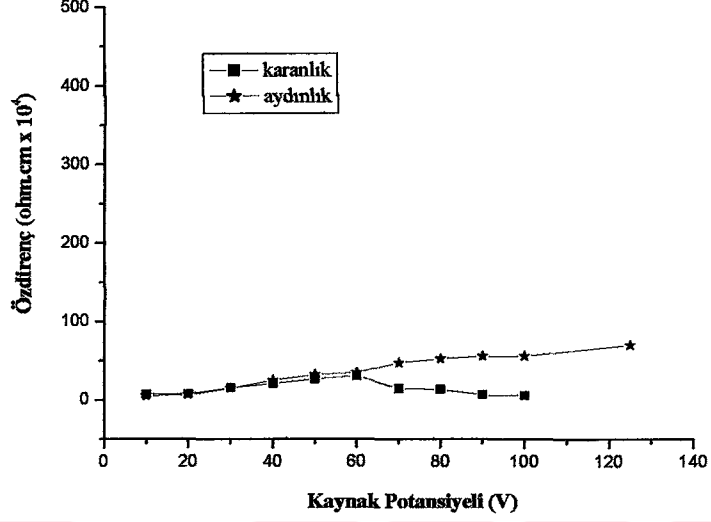
Çizelge 5.3. Örneklerin karanlıktaki ve ışık altındaki özdirenç ve öz iletkenlik değerleri

Örnek	Oran (In:P)	Alt taban sıcaklığı	Özdirenç ($\Omega.cm \times 10^4$)		Öziletkenlik ($\Omega.cm \times 10^4$) ⁻¹	
			karanlıkta	ışık altında	karanlıkta	ışık altında
e	(10:1)	500 °C	6.25	5.74	0.16	0.17
f	(3:1)	500 °C	19.11	12.57	0.05	0.08

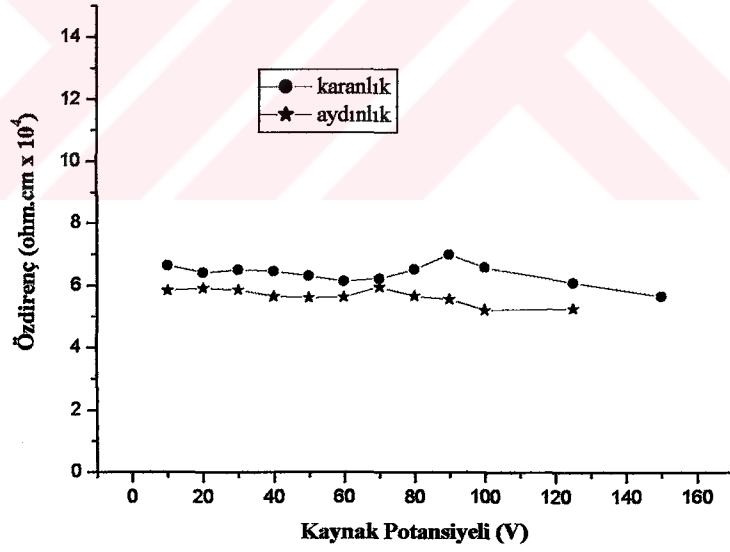
Çizelge 5.3' te görüldüğü gibi, e örneğinin karanlıktaki özdirenç değeri 6.25×10^4 $\Omega.cm$ iken ışık altında fotonlarla bombardıman edildiği durumdaki özdirenç değeri 5.74×10^4 $\Omega.cm$ değerine düşmektedir. Bu örneğin ışık altındaki özdirenç değerinin karanlık ortamdakine göre % 8.16 daha azaldığı görülmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü, örnek üzerine düşen fotonlar gerek tuzaklarda gerekse bağlanma bandında bulunan elektronların iletim bandına çıkmalarını sağlar. İletim bandındaki elektronların sayılarının artması da o maddenin özdirencinin azalması veya bunun tersi iletkenliğinin artması anlamına gelir. Buna göre, e örneğinin ışık altında iletkenliğinde meydana gelen artış oldukça küçüktür. f örneğinin Çizelge 5.3' de karanlıktaki ve aydınlıktaki özdirenç değerlerine bakıldığında, örneğin ışık altındaki özdirenç değerinin karanlıkta alınandan % 34 daha küçük olduğu görülmektedir. Buna göre, bu örneğin ışık altında özdirencindeki değişme oldukça fazladır. İki örneğin birbiri ile karşılaştırılması durumunda, f' nin özdirencindeki azalma e' ye göre dört kat daha büyüktür. Her iki örnek de aynı sıcaklıkta, değişik In ve P oranlarında oluşturulmuşlardır. e örneğindeki In ve P oranı (10:1), f örneğindeki In ve P oranı (3:1)' dir. Sıcaklık parametresi değişmediğine göre, örneklerin özdirençlerindeki değişme tek değişen parametre olan In' dan kaynaklanmaktadır. e örneğindeki In miktarı f' ten üç kat fazla iken f örneğinin özdirençindeki azalmanın dört kat daha fazla olması nedeniyle, ışık altında özdirençteki değişimin o örnek içinde bulunan In miktarı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Özdirenç sonuçlarıyla XRD ve SEM görüntülerini karşılaştırdığımızda, özdirenci küçük çıkan e örneğinin kristalleşmesinin daha düzenli ve homojene yakın olduğu görülür. Bunun yanı sıra, özdirenci yüksek olan f örneğinin kristalleşmesinde düzensizlikler ve homojenlikten uzaklaşmalar olduğu görülür.

Örneklerin dört-nokta ölçümleri, kaynak potansiyeli 10 V' tan 150 V'a kadar 10' ar volt artırılarak yapıldı ve her potansiyel değişiminde örneklerin özdirençleri hesaplandı. e ve f örneklerinin karanlıkta ve ışık altında hesaplanan özdirenç

değerlerinin kaynak potansiyeline karşı çizilen grafikleri Şekil 5.5 (a-b)' de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.5. (a) e ve (b) f örneklerinin karanlıkta ve aydınlıkta ölçülen özdirençlerinin kaynak potansiyeline karşı değişimi

Şekil 5.5 (a-b)' de görüldüğü gibi, örneklerin özdirençleri uygulanan kaynak potansiyeline göre değişmemektedir. Bu da , sıcaklık ve radyasyon gibi parametrelerde

bir değişmenin olmadığı durumda örneklerin 150 V gibi yüksek bir gerilim uygulandığında bile dirençlerinin değişmeyeceğini göstermektedir.

5.3.2. Hall mobilite ölçümleri

Deneysel çalışmalar bölümünün 4.6 kısmında açıklandığı gibi, Hall mobilite hesaplamaları için ilgili deney seti kurularak oda sıcaklığında ölçümler yapılmıştır. Ölçümler esnasında ince filmlerin yüzeyine dik olarak 0.45 mT'lık bir manyetik alan uygulanmıştır. Ölçümlerden elde edilen sonuçların ilgili denklemlerde kullanılması suretiyle hesaplanan Hall mobilite değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. InP ince film örneklerinin Hall mobilite değerleri

Örnek	Oran (In:P)	Alt taban sıcaklığı	Hall mobilitesi (cm ² /V.s)
e	(10:1)	500 °C	1.04x10 ²
f	(3:1)	500 °C	38.58x10 ⁻²

Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi, hall mobilite değerleri aynı sıcaklıkta farklı indiyum oranlarında hazırlanmış ince filmler için hesaplanmıştır. İndiyum oranının 10 olduğu örnekte hall mobilite değeri 1.04x10² cm²/V.s iken, indiyum oranının düşük olduğu örnekte daha küçük ve 38.58x10⁻² cm²/V.s'dir. İndiyum oranındaki artış örneğin metalik özelliklerini artırmaktadır. Bu nedenle, indiyum oranının fazla olduğu örneklerin hall mobiliteleri değerleri, daha düşük oranlarda indiyum içeren örneklerininkine göre daha büyüktür. Özdirenç sonuçlarıyla hall mobilite değerleri karşılaştırıldığında, özdirençteki artışın hall mobilitesinde azalışa neden olduğu ve özdirençteki azalışın ise hall mobilitede artışa neden olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar beklenen değerler olup literatürdeki sonuçlarla iyi bir uyum içindedir.

BÖLÜM VI

SONUÇ

Bu çalışmada, değişik oranlarda ve farklı alt taban sıcaklıklarında InP ince filmlerinin oluşturulmasında Püskürtme Payrolisis (ısı yoluyla kimyasal değişimin sağlanması) metodu ilk kez uygulanmış ve elde edilen ince filmlerin elektrik, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. InP ince film örneklerinin enerji bant aralığı değerleri 1.60 eV-1.85 eV arasında bulunmuştur. Bu enerji bant aralıklarındaki farklılık, tamamen örneklerin alt taban sıcaklıkları, indiyum fosfat oranı, film yüzeyinde oluşan ve doku sınırlarına difüz eden oksijenle ilişkilidir. InP ince film örneklerinin XRD grafiklerinden, InP 'nin tüm görünen piklerini gösteren kırınım desenlerinin, bu ince film örneklerinin f.c.c. (face centered cubic) kübik yapıda olduğu görülmüştür. Elde edilen XRD verilerinden örneklerin kristalleşmesi üzerine alt taban sıcaklığı ve indiyum fosfat oranlarının doğrudan etkisinin olduğu gözlenmiştir. SEM görüntülerinin XRD verileriyle örtüştüğü, tüm filmlerde homojen bir polikristalleşmenin olduğu ve doku yapılarının düzgün bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Özdirenç sonuçlarıyla hall mobilite değerleri karşılaştırıldığında, özdirençteki artışın hall mobilitede azalışa neden olduğu ve özdirençteki azalışın ise hall mobilitede artışa neden olduğu gözlenmiştir. Öz direnç ve hall mobilitesinin değerleri üzerine en fazla etkinin taban sıcaklığından çok indiyum oranının fazlalığından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Püskürtme yöntemiyle oluşturulan örneklerin yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri üzerine etkili olan diğer bir faktör ise, film oluşumunu esnasında çevresel faktörlerden kaynaklanan artık safsızlıklardır. Bu tür çalışmalarda elde edilen malzemelerin içerisinde oksijenin artık safsızlık olarak bulunduğu bilinmektedir. Bunun nedeni, oksijenin örneklerin oluşturulması sırasında kristal örgüsü içine kolayca difüz etmesidir. Oksijenin doku sınırlarında ve indiyum fosfat ince filmi üzerinde fiziksel olarak ara bölgelere girdiği bilinmektedir. Film yüzeyine yerleşen ve doku sınırlarına difüz eden oksijen, indiyum fosfat ince filmlerinin özellikleri üzerinde hatırı sayılır şekilde değişikliklere neden olur. Tüm örnekler atmosferik ortamda oluşturulduğu için, oksijen film yüzeyine ve doku sınırlarına kolayca difüz etmiş ve bunun sonucu olarak, enerji bant aralığında artış olduğu görülmüştür. Bundan başka, örneklerin özdirençlerinde artışa ve hall mobilitelerinde ise azalışa neden olmuştur. Bunun yanı

sıra, ince film örneklerinin tüm karakteristik özellikleri üzerinde alt taban sıcaklığı ve indiyum fosfat oranlarının da etkisinin olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışmada, ilk defa Püskürtme Payrolisis Yöntemi ile III-V grubu elementlerden InP ince filmlerinin elde edilebileceği, bu tür ince filmlerin daha kaliteli ve ucuz bir yöntem olan bu metot ile hangi parametreler altında daha da geliştirilebileceği ve bununla ilgili ileride yapılabilecek bilimsel çalışmalara bir alt taban oluşturabileceği gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Sonoda T., Yamamoto Y., Hayafuji N., Yoshida H., Sasaki H., Kitona T., Takamiya S., Ostubo M., *Solid-State Electron*, 41 (1997), 1621.
- [2] Ezaki M., Kumagai H., Toyoda K., Obara M., *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron*, 1 (1995), 841.
- [3] Kashima Y., Nozawa T., Munakata T., *J. Cryst. Growth*, 204 (1999), 429.
- [4] Heim U., Röder O., Queisser H. J. ve Pilkuhn M., *Photoluminescence Of Luminescence, Journal Of Luminescence* 1/2 (1970), 542-551.
- [5] Röder O., Heim U. ve Pilkuhn M. H., *Electron Mobilities and Photoluminescence of Solution Grown Indiumphosphide Single Crystals, Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 31/12 (1970), 2625-2626.
- [6] Dahlberg S. C., *Photovoltage Studies of n-Type InP (100), Surface Science*, 60/1 (1976), 231-238.
- [7] Hooper A. ve Tuck B., *The electrical Properties of Zinc Diffused Indium Phosphide, Solid-State Electronics*, 19/6 (1976), 513-517.
- [8] Erickson L. P., Waseem A. ve Robinson G. Y., *Characterization of Ohmic Contacts to InP, Thin Solids Films*, 64/3 (1979), 421-426.
- [9] Foyt A. G., *The Electro-Optic Applications of InP, Journal of Crystal Growth*, 54/1 (1981), 1-8.
- [10] Bouley Jean-Claude, *Lasers for Integrated Optoelectronics, Physica B + C*, 129/1-3 (1985), 107-118.
- [11] Yamaguchi M., Yamamoto A., Uchida N. ve Uemura C., *A New Approach for Thin Film InP Solar Cells, Solar Cells* 19/1 (1986), 85-96.
- [12] Fiedler F. ve Schlachetzki A., *Optical Parameters of InP-based Waveguides, Solid-State Electronics*, 30/1 (1987), 73-83.
- [13] Suzuki Y., Fukuda Y. ve Nagashima H. Kan Y., *An Indium Phosphide Solid State Detector: A Possible Low Energy Gamma and Neutrino Detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 275/1 (1989), 142-148.
- [14] Sahu S. N., *Structural, Optical and Electrical Properties of First Aqueous Electrodeposited InP Semiconductor Films, Solar Energy Materials*, 20 (1990), 349-358.
- [15] Chattopadhyay K. K., Dhar A., Chaudhuri S. ve Pal A. K., *Scattering Processes in Polycrystalline InP Films, Thin Solid Films*, 208 (1992), 100-105.

- [16] Popov V. K., Bagratashvili V. N., Antonov E. N., Lemenovski D. A., Supercritical Fluid Chemical Deposition of thin InP Films. A New Approach and Precursors, *Thin Solid Films*, 279 (1996), 66-69.
- [17] Ahuja R., Auluck S., Eriksson O., Wills J. M. ve Johansson B., Electronic and Optical Properties of InP, *Solid State Communications*, 104/5 (1997), 249-252.
- [18] A. John, Jr. Glass, Spencer James T., Epitaxial Growth with Phosphorus 3. Formation of Indium Phosphide Thin Films Using Cyclohexylphosphine, ((C₆H₁₁)PH₂), as the Organophosphorus Source Compound, *Thin Solid Films*, 315 (1998), 86-93.
- [19] Barnes G. W., Tok E. S., Neave J. H., Jones T. S., Phosphorus Incorporation During InP (001) Homoepitaxial Growth by solid source Molecular Beam Epitaxy, *Surface Science*, 53/1 (2003), 383-387.
- [20] Tang C., Bando Y., Liu Z. ve Goldberg D., *Chemical Pyhsics Letters*, 376/5-6 (2003), 676-682.
- [21] Miska P., Even J., Paranthoen C., Dehaese O., Folliot H., Loualiche S., Senes M. ve Marie X., Optical Properties and Carrier Dynamics of InAs / InP (113)B Quantum Dots Emitting Between 1.3 and 1.55 μm for Laser Applications, *Physica E:Low Dimensional Systems and Nanostructures*, 17 (2003), 56-59.
- [22] Hafez M. A., Elamrawi K. A., Elsayed-Ali H. E., Pulsed Laser Deposition of InP InP Thin Films on Sapphire(1000) and GaAs(100), *Applied Surface Science*, 239 (2004), 36-44.
- [23] Hafez M. A., Elamrawi K. A., Elsayed-Ali H. E., Pulsed Laser Deposition of InP Thin Films on Sapphire(1000) and GaAs(100), *Applied Surface Science*, 233 (2004), 42-50.
- [24] Kittel C., *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons Inc., (1966), 133.
- [25] Giesecke G. ve Pfister H., *Acta. Cryst.*, 11 (1958) , 369.
- [26] Barlev A., *Semiconductor and Electronic Devices*, Ins. Of Tech., Prentice Hall., (1993).
- [27] Mckelvey J. P., *Solid State and Semiconductor Physics*, A. Harper International Edition, Harper and Row., (1969).
- [28] Haynes J. R. and Shockley W., The Mobility and Life If Injected Holes and Electrons in Germanium, *Physical Review*, 81/5 (1951), 835.
- [29] Jenkins T. E., *Semiconductor Science Growth and Characterization Techniques*, Prentice Hall., 1995.

- [30] Pankove J. I., *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publications Inc., (1975), 1-422.
- [31] Size S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, A Division of John Wiley and Sons., (1969).
- [32] Dikici M., *Katıhal Fiziğine Giriş*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, (1993), 276.
- [33] Durlu T., *Katıhal Fiziğine Giriş*, Set Ofset Ltd.,(1992), 113.
- [34] Cullity B. D., *Elements of X-Ray Diffraction*, A. W. Pub. Comp. Inc., (1978), 99-106.
- [35] De C. K. ve Mishra N. K., *Indian J. Phys. A* 71, (1997), 530.
- [36] Khanna P. K., Jun Ki-Won, Hong Ki Bum, Baeg Jin-Ook, Mehrotra G. K., *Materials Chemistry and Physics* 92, (2005), 54-58.

