

**DÜŞÜK SICAKLIKTA GaAs YAPISININ MBE İLE BÜYÜTÜLMESİ
VE KARAKTERİZASYONU**

Şener ŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2010
ANKARA**

Şener ŞEN tarafından hazırlanan “DÜŞÜK SICAKLIKTA GaAs YAPISININ MBE İLE BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı,

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Toffik MEMEDOV

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Elif ORHAN

.....

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih : 02/07/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şener ŞEN

**DÜŞÜK SICAKLIKTA GaAs YAPISININ MBE İLE BÜYÜTÜLMESİ
VE KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Şener ŞEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, elektromanyetik dalga spektrumunun kızıl ötesi bölümünde yer alan terahertz dalgalarının üretme ve algılama yöntemleri incelendi. Terahertz dalgaların oluşturulmasında yarıiletken GaAs anten yapılar tercih edildi. Yarı iletken kristal büyütme tekniklerinden Düşük Sıcaklık (LT) Moleküler Demet Epitaksi (MBE) büyütme yöntemi ile GaAs kristal yapısı büyütüldü. Büyütülen numuneden alınan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan parçalarda oluşan yapıların yapısal özellikleri X-Işını Kırınımı (HR-XRD) ve Optik Mikroskop sistemleri aracılığıyla incelenerek terahertz antenler için uygunluğu belirlendi.

Bilim Kodu : 202.1.008
Anahtar Kelimeler : MBE, THz, GaAs, LTG-GaAs
Sayfa Adedi : 81
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**OPTICAL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF LTG- GaAs
LAYERED SEMICONDUCTOR STRUCTURES
(M.Sc. Thesis)**

Şener ŞEN

**GAZI UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY
July 2010**

ABSTRACT

In this study, the generation and detection method of terahertz wavelengths which take place on the infrared part of electromagnetic wave spectrum are investigated. Semiconducture GaAs antenna structures are preferred to be created terahertz wavelengths. GaAs crystal structure are grown by using one of semiconductor crystal grown techniques low temperature Molecular Beam Epitaxy (MBE) grown. Structural properties of the formed structures at the pieces taken from the grown sample and annealed at different temperatures investigated by high resolution X-Ray diffraction (HR-XRD), and Optical Microscope systems whether it is appropriate for the terahertz antenna.

Science Code : 202.1.008
Key Words : MBE, THz, GaAs, LTG-GaAs
Page Number : 81
Adviser : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof.Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e, tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Toffik MEMEDOV'a, Dr. Sema ŞEN'e, Yarıiletken fiziği ve teknolojileri araştırma laboratuvarında (Starlab) çalışan ve her zaman desteklerini gördüğüm laboratuvarlarda görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarına 2001 K 120590 nolu proje ile desteklerinden dolayı Devlet Planlama Teşkilatı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. TERAHERTZ DALGALAR	3
2.1. Yarıletkenler	7
2.2. Elektromanyetik Işıma Ve Soğurma	9
2.3. Fotoiletken Yapılarda Işıma Ve Soğurma Mekanizmaları	13
2.4. Fotokarıştırıcılar	17
3. DÜŞÜK SICAKLIKTAKI GALYUM ARSENİK (LT-GaAs) YAPININ ÖZELLİKLERİ	22
3.1. GaAs Bileşiğinin Özellikleri	22
3.1.1. Enerji bant yapısı	24
3.1.2. Hareketlilik ve sürüklenme hızı.....	27
3.1.3. Kristal kusurları	28
3.1.4. Termal özellikleri.....	31
3.2. Yarıyalıtkan GaAs	31

Sayfa

3.3. Tambon Katman	32
3.4. GaAs'ın Düşük Sıcaklıkta Büyütülmesi (LT-GaAs).....	32
3.5. LT-GaAs Katmanlarda Tavlamanın Adacık Oluşumuna Etkileri	37
4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER	42
4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)	42
4.1.1. Yükleme odası	47
4.1.2. Hazırlık odası.....	48
4.1.3. Büyütme odası	48
4.1.4. Kontrol ünitesi	51
4.1.5. Bilgisayar sistemi.....	52
4.2. Düşük Sıcaklıkta GaAs 'in MBE Yöntemiyle Büyütülmesi	52
4.3. Büyütülen Numunelerin Tavllanması.....	54
4.4. Yüksek Çözünürlükteki X – Işını Difraksiyonu (HR – XRD) Ölçümleri	56
4.5. Optik Mikroskop İnceleneleri.....	63
5. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. GaAs'in oda sıcaklığındaki özellikleri.....	23
Çizelge 4.1. Tavlama koşulları.....	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dalga boyunun gösterimi	3
Şekil 2.2. Elektromanyetik dalganın gösterimi	4
Şekil 2.3. Elektromanyetik dalga spektrumunda terahertz dalganın yeri.....	5
Şekil 2.4. Enerji bandı gösterimi.....	8
Şekil 2.5. LC rezonans devresi.....	11
Şekil 2.6. Hertz Dipolü.....	12
Şekil 2.7. Hertz anten ve elektronik eşdeğeri.....	13
Şekil 2.8. Elektron'un foton salınım ve soğurması	14
Şekil 2.9. Fotokarıştırıcı yapının şematik gösterimi	17
Şekil 2.10. Auston switch	18
Şekil 2.11. Fotokarıştırıcı yapılardaki hertz dipol antenin önden görünüşü	19
Şekil 2.12. Fotokarıştırıcı yapılardaki hertz dipol antenin yandan görünüşü	19
Şekil 2.13. Terahertz sinyal üretimi için kullanılan hertz dipol antenin şematik yapısı	20
Şekil 2.14. Terahertz sinyal üretimi için kullanılan hertz dipol antenin parametreleri..	20
Şekil 2.15. Terahertz sinyal üretim ve algılama için kullanılan yapının prensip şeması	21
Şekil 3.1. GaAs kristal örgünün birim küpük yapısı.....	23
Şekil 3.2. GaAs için enerji bant aralığı	24
Şekil 3.3. Direkt bant yarıiletken	25
Şekil 3.4. İndirekt bant yarıiletken.....	26
Şekil 3.5. GaAs ve Si 'un elektron sürüklenme hızı	27

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. GaAs kirliliklerinin enerji bant diyagramı.....	29
Şekil 3.7. GaAs büyüme sıcaklığının etkileri	33
Şekil 3.8. Kristal yüzeyin gönderilen As ₂ moleküllerinin bağlanma şekilleri	34
Şekil 3.9. GaAs ₂ Bağ yapısı	35
Şekil 3.10. As ₂ moleküllerinin bağlanma geometrisi.....	36
Şekil 3.11. GaAs ₂ yapıda atomlar arası bağ uzunlukları.....	37
Şekil 3.12. LT-GaAs numunede tavlama sıcaklığının (t_a)değişiminin, örgü parametresine etkisi.....	39
Şekil 4.1. Alttaş (Wafer) üzerine GaAs yapının büyütülmesi.....	42
Şekil 4.2. MBE sisteminin blok gösterimi	46
Şekil 4.3. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi.....	47
Şekil 4.4. Büyütme odasının grafiksel gösterimi	49
Şekil 4.5. GaAs için RHEED salınım eğrilerinin periyodu ve zamanla değişimi	51
Şekil 4.6. GaAs için MBE de büyüme periyodu.....	53
Şekil 4.7. GaAs için MBE’de zamana bağlı büyüme periyodu	54
Şekil 4.8. Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması	57
Şekil 4.9. Tavlınmamış numunenin HR – XRD deseni.....	58
Şekil 4.10. 350 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	59
Şekil 4.11. 400 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	59
Şekil 4.12. 450 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	60
Şekil 4.13. 500 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	60
Şekil 4.14. 600 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	61
Şekil 4.15. 700 °C ‘de tavlınmış numunenin HR – XRD deseni.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. HR – XRD ile yapılan ölçümlerin tamamı	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Gazi Üniversitesi STARLAB V80H model MBE sistemi.....	44
Resim 4.2. XRD cihazının resmi.....	56
Resim 4.3. Leica DMLM Optik mikroskobu	63
Resim 4.4. Optik mikroskopta As küme (cluster) resimleri.....	64
Resim 4.5. 450 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	64
Resim 4.6. 500 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	65
Resim 4.7. 500 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	66
Resim 4.8. 700 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	67
Resim 4.9. 700 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	68
Resim 4.10. 800 °C ‘de tavlanmış numunede As kümelenmesi	69
Resim 4.11. 700 °C ‘de 20 dakika tavlanmış numunede As kümelenmesi.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E_r	Elektrik alan
B_r	Manyetik alan
I	Akım
λ	Dalga boyu
ω	Açısal frekans
ρ	Özdirenç
E	Fotonun enerjisi
h	Planck sabiti
f	Frekans
C	Işık hızı
E_1	Değerlik bandının maximum enerji düzeyi
E_2	İletim bandının minimum enerji düzeyi
E_C	İletim Bandı
E_F	Fermi enerjisi
E_V	Değerlik Bandı
E_g	Yasak enerji aralığı
$E_{g,\Gamma}$	Γ noktasındaki direkt geçişi
fs	Femtosaniye
ps	Picosaniye
θ_B	Bragg açısı

Kısaltmalar	Açıklama
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
Ga	Galyum
As	Arsenik
GaAs	GalyumArsenik
LT	Düşük Sıcaklık
LT-GaAs	Düşük Sıcaklıkta Büyütülmüş GalyumArsenik
MIG	Gözetim İyon Ölçer
RHEED	Yansımalı Yüksek Enerji Elektron Kırınımı
MQW	Çoklu Kuantum Kuyusu
UHV	Çok Yüksek Vakum
FWHM	Yarı Genişlik
XRD	X-Işını Kırınımı
SI	Yarı-yalıtkan
BWO	Geri Beslemeli Dalga Osilatörü
PC	Fotoiletken
DB	Değerlik Bandı
İB	İletkenlik Bandı
YB	Yasak enerji Bandı
THz	Terahertz

1. GİRİŞ

19. Yüzyılda Maxwell'in geliştirdiği elektromagnetik dalga teorisi, Hertz tarafından deneysel olarak ispatlanmasının ardından bir çok farklı frekansta elektromanyetik dalga üretilmeye başlanmıştır. Spektrumda terahertz dalga boyu, mikrodalga ve kızılötesi dalga boylarının arasında yer almaktadır. Dalga boyu olarak karşılaştırıldığımızda terahertz, kızılötesi dalga boylarına göre kısa, mikrodalga dalga boylarına göre uzundur. Elektromagnetik dalganın boyuna bağlı olarak elektromagnetik dalga üreteçlerinin yapısıda farklılaşır. Terahertz dalgaları üretmek için ne optik ne de mikrodalga üretim teknikleri doğrudan uygulanamamaktadır[1].

Üretimi ve algılanmasındaki güçlüklerden dolayı şimdiye kadar askeri uygulamalar dışında terahertz sinyalleri araştırmaların keşfedilmemiş bir alanıdır. Terahertz dalga üreten malzemelerde karşılaşılan temel sorunların başında kararlı ışınım, atmosferde bu ışının yayma zorluğu, kurulum düzeneklerinin geniş alan kaplamasından ötürü taşınabilir olmaması ve bu sistemlerin maliyetinin pahalı olması gelebilir. Terahertz dalga boylarının X-ışınımı ve bir çok yüksek fekanslı dalga boylarına göre radyoaktif etkilerinin yok denecek kadar az olması; Su ve metal molekül bağları haricindeki bağ yapılarında geçebiliyor olması nedeniyle THz bölgesine ilgi duyan moleküler kimya, astrofizik ve savunma gibi alanların yanısıra görüntüleme, bilişim, sağlık ve iletişim gibi sektörlerinde terahertz sinyallere ilgi duymaya başlamıştır. Araştırmaların artması beraberinde terahertz sinyal üretim teknik ve yöntemlerinde artmasına yol açmıştır.

Terahertz dalga sinyallerinin üretiminde ve algılanmasında bir çok farklı yöntem denenmiş ve denenmektedir. Üzerinde yoğun olarak çalışılan ve başarılı sonuçlar alınan yöntemlerden biriside yarıiletken yapılardır. Bilindiği üzere yarıiletken yapılarda lazer sinyallerini oluşturabilmek için yarıiletken yapının dışarıdan optik bir dalga klavuzu ile uyarılarak lazer sinyal üretimi bir yöntemdir. Bu yöntemde farklı bir yaklaşım getirilerek uyarıcı klavuz dalganın soğrulduktan sonra yarıiletken yapının daha düşük frekanslı (terahertz mertebelerinde) bir sinyal üretilmesi yaklaşımı genel kabul görmüştür. Deneysel olarak bu yaklaşım üzerinde başarılı sonuçlar elde

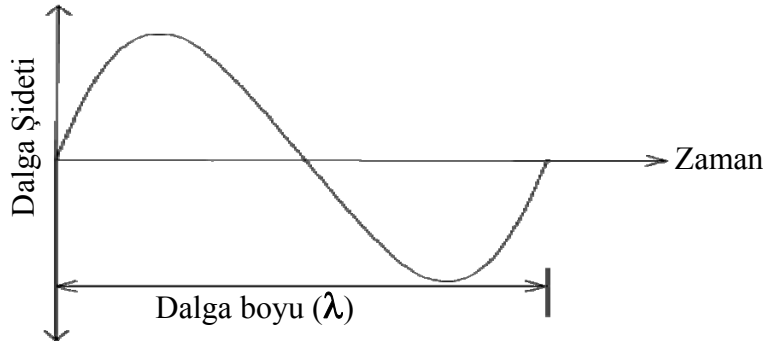
edilmesi üzerine bizde bu metodu terahertz boyutlarında sinyal üretimi için bir medot olarak benimseyeceğiz.

Moleküler-Işın-Epitaksi (MBE) ile büyütülen GaAs 'in benzersiz bileşimi, yüksek direnç, nispeten büyük elektron hareketliliği nedeniyle çok hızlı optoelektronik cihazların ana malzemesi haline gelmiştir[2]. Optik dalga boylarının büyük bir kısmı GaAs yapıyla üretilmesine rağmen terahertz dalga boylarında sinyal üreten ve algılayan GaAs kristal yapının üretim kriterleri (fabrikasyonu) kesin olarak belirlenememiştir. GaAs yapı ile terahertz alıcı ve verici cihazları elde etmenin iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisinde MBE sistemi ile düşük sıcaklıkta Arsenikce zengin GaAs kristali büyütülmesi, ikinci yöntemde ise GaAs katmanlar iyon ekimi ile yapılmaktadır. Her iki yöntemde de hedef büyütme sonrası yapıların uygun sıcaklıkta tavlama ile epitaksiyel yüzeyde As kümeciklerinin oluşturulmasıdır. Literatür taramalarında THz verici ve alıcı yapılar içinde en iyi sonuçların MBE'de düşük sıcaklıkta büyütülen GaAs tabakaları (LT-GaAs) kullanılmasıyla gerçekleştirilebildiği kabul görmektedir. LT-GaAs ile imal edilen cihazlar pikosaniye'nin altındaki fotoiletken sinyallerin üretimi başarılmıştır. LT-GaAs yapısı, fotoiletken anten yapılarıyla birleştirilip bu yapıyla uyumlu çok kısa lazer sinyalleri ile tetiklenerek THz verici olarak kullanılabilmektedirler[3-5]. Fotokarıştırıcı olarak adlandırılan bu cihazların performansı, taşıyıcı yoğunluklarına ve yarı iletken katmanları üzerinde yüksek sinyal yakalama oranına bağlıdır.

Bu çalışmada, MBE sisteminde GaAs yapı düşük sıcaklıkta büyütüldü. Büyütülen bu yarıiletken yapının tavlama öncesi ve çeşitli sıcaklıklarda tavlama sonrasında oluşan yeni yapıların optik özellikleri incelenmesi, X-Işını kırınım spektrometresi ve Optik mikroskop sistemleri ile gerçekleştirildi. Yapısal ve optiksel incelemeler sonucunda bu yarıiletken yapıların opto-elektronik cihaz üretimine uyumluluğu tartışıldı.

2. TERAHERTZ DALGALARIN ÜRETİMİ VE ALGILANMASI

Bir dalga hareketinde birbirini izleyen iki tepe veya çukur noktası arasındaki uzaklığa veya şekil 2.1’de görüldüğü gibi dalgaların bir salınımında aldıkları yola dalga boyu denir. Dalga boyu birimi metre’dir. İki dalga tepesi veya çukurunun belirli bir noktadan art arda geçişi arasındaki süreye dalga periyodu veya frekans denir. Frekansın birimi Hertz (Hz) dir. 1 Hz saniyede bir salınım yani kendini bir tekrar anlamına gelir.



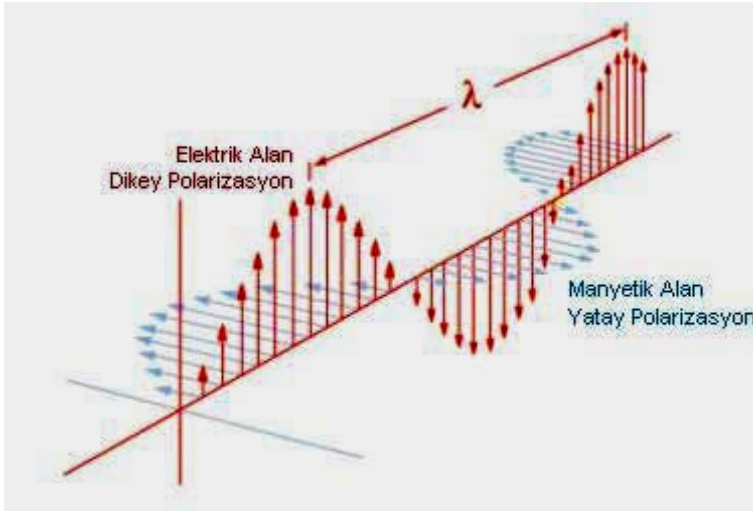
Şekil 2.1 Dalga boyunun gösterimi

Zamanla değişmeyen hallerde, elektriksel alan, manyetik alandan bağımsız olarak bulunabilir. Zamanla değişen olaylarda ise, elektriksel ve manyetik alanlar bir arada bulunmak zorundadır. Bu iki alanın tümüne elektromanyetik alan denir (Şekil 2.2). Elektromagnetik dalgalar, geniş bir frekans veya dalga boyu aralığını kapsarlar. Bu dalgalar uzunluklarına göre sınıflandırılırlar. Elektromagnetik spektrum adı verilen bu sınıflandırma, kesin sınırlar sergilemez. Günümüzde radyo dalgalarından ısıya, görünür ışıktan, morötesi, X ve kozmik ışınlar kadar bütün ışıma enerjisi birimlerinin elektromanyetik yapıda olduğu biliniyor. Örneğin ışık ile radyo dalgaları arasındaki tek fark dalga boylarıdır.

Huygens ve Fresnelin yaptıkları kırınım, girişim deneylerinde ışığın dalga karakterinde olduğu ifade etmişlerdir. Ancak daha sonra siyah cisim ışıması, fotoelektrik olay ve Compton saçılması gibi deneylerde ışığın tanecik karakterinin de olduğu ortaya konulmuştur. Compton saçılma deneyini açıklarken fotonlarla

elektronların çarpışmasını iki katı maddenin birbiriyle çarpışması gibi düşünmüş ve sonuçta ışığın tanecik karakterinde olduğunu ifade etmiştir. Bohr bu ikilemi “dalga ve parçacık hareketleri bütünleyicidir, ikisi ayna anda gözlenemez yapılan ölçümün cinsine göre bu iki karakterden biri gözlenir” ifadesiyle ortadan kaldırmıştır.

Max Planck'ın kuantum varsayımlarına göre ışıyım yapan, titreşen bir sistemin enerjisi kesikli enerji değerlerine sahiptir ve atomlar foton adı verilen ışık enerjisinin kesikli birimleri cinsinden enerji yayımlar veya soğururlar. Fotoelektrik deneyi ile $h\nu$ enerjili fotonlar metal üzerine düşürüldüğünde enerjilerinin bir kısmı metaldeki elektronların bağlı oldukları atomlardan sökmek için kullanılırken bir kısmı kopan elektronların hareketlerinde kullanılır. Bu olay metal üzerine düşen fotonların enerjilerini metaldeki elektronlara aktarmasıyla meydana gelir.



Şekil 2.2. Elektromanyetik dalganın gösterimi

Elektromanyetik dalgalar, ivmelendirilmiş elektrik yükleri tarafından oluşturulurlar. Elektromanyetik alan kuantalanmıştır ve alan kuantasına “foton” denir. Foton, elektromanyetik ışımanın en küçük birimidir. Einstein'e göre ışık, durgun kütlesi sıfır olan enerji paketçikleri gibi davranan parçacıklardan oluşur. Fotonlar boşlukta ışık hızıyla hareket eden, hareket ederken tıpkı bir dalga gibi frekansı, dalga boyu ve frekansa göre enerji taşıyan parçacıklardır. Eş. 2.3 'de verildiği üzere bir fotonun

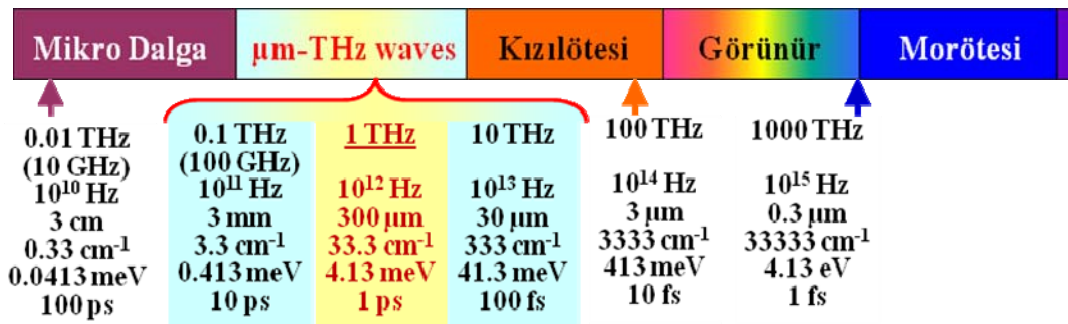
enerjisinin bulunabilmesi için fotonun frekansının yada dalga boyunun bilinmesi gerekir(Eş. 2.3).

$$E = h \cdot f \quad (2.3)$$

Burada E Fotonun enerjisi, h Planck sabiti ($4,14 \times 10^{-15}$ eV.s) (Elektron Volt x Saniye), f Işığın frekansıdır.

Elektromanyetik dalga tayfının belirli bir kısmını oluşturan THz ışıması 1896 yılında keşfedilmiştir. Tera anlam olarak elektromagnetik spektrumda Mikrodalga sinyallerinin üst sınırı (10^{12} Hz) ile Morötesi frekansın alt sınırı olan (10^{15} Hz) arasındaki dalga boylarına (10^{12} Hz $\leq$ Terahertz $\leq 10^{15}$ Hz) verilen katsayının adıdır.

Terahertz bölge, kızıl ötesi ve görülebilen ışınları kapsar. Görünür ışık ve kızılötesi dalgalara boylarının kendi içinde sınıflandırması ve bu sınıflandırmaların yaygın olarak kullanılması günümüzde terahertz sinyallerinden bahsedildiğinde terahertz'in katsayısal adından ziyade Şekil 2.3'te görüldüğü üzere mikrodalga ışıma frekans aralığı ile kızılötesi ışıma frekans (1×10^{11} Hz $\leq$ T-Rays $\leq 1 \times 10^{13}$ Hz) aralığını anlaşılmaktadır. Günümüzde bu frekans aralığındaki ışımalara terahertz dalgaları ya da Terahertz ışını (T-rays) olarak kabul görmektedir[1,2,6,7]. Şekil 2.3'de elektromanyetik spektrumdaki terahertz dalga boylarının foton enerji seviyeleri verilmiştir.



Şekil 2.3. Elektromanyetik dalga spektrumunda terahertz dalgaının yeri

Tüm nesneler, canlılar (biyolojik) ve cansız (kimyasal) molekülleri titreşim ısısından ötürü ışıması yayarlar. Tüm nesnelerin ışıması o cismin en fazla ışık verdiği dalga boyu ile ilişkilidir. Bu titreşim ışımaları terahertz frekans aralığına uymaktadır. Terahertz ışınları plastik, karton, kumaş gibi çoğu malzemeden geçerken, su molekülleri tarafından soğrulur ve metallere yansır. THz dalga boyları çoğu kimyasal ve biyolojik malzemede parmak izi spektrumunu oluşturduğundan, tehlikeli maddelerin tanımlanmasında kullanılabilir.

THz frekanslı ışıma, yenilikçi algılama ve görüntüleme yetenekleri ile son yılların üzerinde en çok çalışılan araştırma konularından birisi olmuştur. THz dalgaları çok hızlı kablosuz iletişimde, tıbbi görüntülemede, kara mayınlarının uzaktan algılanmasında yeni avantajlar sağlayacaktır. Terahertz teknolojisi ile güvenlik uygulamaları üzerine yapılan çalışmaların yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. THz teknolojilerinde dalga gücünün artırılması ile birlikte herhangi bir şekilde herhangi bir yere saklanmış bomba, silah ve yasadışı maddeler belirlenebilecektir. Bunların yanı sıra Terahertz ışınları biyolojik dokuları iyonize etmeme özelliğinden dolayı X-ışınlarına göre zararsız olduğundan insan sağlığını etkileyen unsurlarını büyük ölçüde ortadan kaldırılmış olacağı öngörülmektedir. Buda Thz'i canlılar üzerinde dozaj sınırı olmadan tıbbi görüntülemede kullanılabilecektir.

Bütün bu özelliklerine rağmen bu frekans aralığı küçük boyutlu kompakt, frekansı ayarlanabilir, koherent, sürekli ışıma yapan terahertz ışınları üreten kaynaklardan yoksundur. THz dalgaları genişbant dalgalar veya dar-bant sürekli dalga olarak çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Serbest elektron lazerleri atlamalı veya sürekli terahertz ışınları üretimi için uygun olmasına rağmen büyük hacim kaplamakta ve pahalı olmaları laboratuvar dışında kullanımını engellemektedir. Geri beslemeli dalga titreştiricilerde (Backward Wave Oscillator - BWO) belli frekans aralıklarında ayarlanabilmelerine karşın büyük hacim kaplamakta, çıkış gücü (>1 mW) civarını geçememekle birlikte cihaz maliyetleri çok yüksektir. Kuantum kademeli lazerlerin (Quantum Cascade Lazer) frekansı ise 2.1 THz'in altına henüz inilememiştir. Genellikle çok pahalı femtosaniye atma üreten lazerlerle THz dalga üretilebilmekte ve laboratuvar dışında uygulama bulması konusunda araştırmalar devam

etmektedir. Hızla gelişen teknoloji sayesinde karmaşık devre elemanları kullanılarak daha ucuza THz ışımlarını elde etmek artık mümkündür[8].

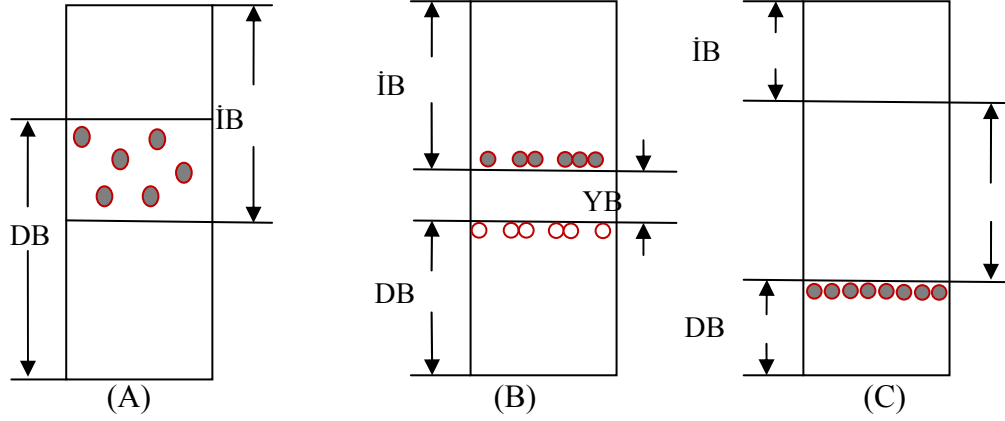
2.1. Yarıiletkenler

Bir atom veya molekülün fiziksel özelliklerini çekirdek etrafında değişik yörüngelerde hareket eden elektronlarının diziliş şekli belirler. Katı içinde bulunan elektronlar, her istedikleri enerji değerini alabilecek serbestliğe sahip değildir. Kuantum mekaniği yasalarına göre, yalıtılmış atomların elektronları yalnızca belirli (kesikli) enerji seviyelerine sahiptirler. Bu yalıtılmış atomlar, kristal oluşturmak için bir araya geldiklerinde elektronlar tek bir enerji seviyesinde değil izin verilen enerji seviyelerinde bulunurlar. Bu özel enerji seviyeleri izinli durumlar olarak adlandırılır. Bu seviyelerin gruplandırılması ile enerji bantları oluşurlur.

Katı maddelerin elektrik akımına karşı yaptığı zorluk atomlarının son yörüngesinde bulunan elektron sayısına bağlı olarak değişmektedir. Elektronlar, negatif elektrik yüküne sahiptirler ve her atom içerisindeki elektronların uyarım şiddeti aynı değildir. Bir elektronun bir üst enerji seviyesine geçiş yapabilmek için yeterli enerjiye sahip olma olasılığı fermi dağılma fonksiyonuyla belirlenir. Elektronların yaptığı bağlar kırıldığında, serbest kalan elektron, akım iletimine katılır. Bağda bir elektron boşluğu (eksikliği) meydana geldiğinden bu boşluk komşu elektronlardan birisi tarafından doldurulabilir. Sonuç olarak, boşluk pozisyonunda bir kayma meydana gelir. Böylelikle bir uyarıcı aracılığı ile atomdan ayrılan elektronların hareketi, elektrik akımını oluşturur. Boşluğu elektrona benzer bir parçacık olarak düşünebiliriz. Bu hayali parçacık “deşik” olarak adlandırılır. Pozitif yük taşır ve uygulanan elektrik alan altında elektronun yönüne ters yönde hareket eder. Böylece hem elektronlar ve hem dedeşikler iletkenliğe katkıda bulunurlar.

İzinli enerji bölgeleri yasak bandın altında ve üstünde yerleşir. Yasak bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi değerlik bandı; üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesine ise iletkenlik bandı olarak adlandırılır. Yarıiletken malzemelerin en önemli ayırt edici özelliği değerlik (valans)

bandının en üstü seviyesi ile iletkenlik bandının en alt seviyesi arasındaki enerji farkını ifade eden yasak band aralığıdır.



Şekil 2.4. Enerji band gösterimi, (a) İletkenlerin enerji bandı gösterimi, (b) yarıiletkenlerin enerji bandı gösterimi ve (c) yalıtkanların enerji bandı gösterimi

Şekil 2.4 'de DB=Değerlik Bandını, İB=İletkenlik Bandını, YB=Yasak enerji aralığını, $\circ$ Deşikler, $\bullet$ Serbet elektronları sembolize ederler. Bir elektronun değerlik bandından iletim bandına (enerji bant aralığını) geçmek için gerekli enerji miktarı sıcaklığa, yarıiletken maddeye, malzemenin saflığına ve katkı atomlarına bağlıdır.

Katı haldeki malzemeler, elektrik akımına karşı verdikleri tepkilere (özdirenç : $\rho=1/\sigma$) göre grublandırma yapıldığında iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır

İletkenlerde Şekil 2.4(a)'da görüldüğü üzere yasak bant aralığı (YB) yoktur. İletkenlik bandı kısmen boş ya da değerlik bandı ile çakışmış durumdadır[12]. Değerlik bandının tepesinde bulunan elektronlar, uygulanan küçük bir elektrik alandan kinetik enerji kazanarak, yakındaki enerji seviyesine doğru hareket edebilirler. Böylelikle elektrik akımına, çok küçük bir direnç göstererek ($10^4 \text{ S/cm} < \sigma < 10^6 \text{ S/cm}$) elektrik akımının oluşması sağlanır.

Yalıtkanlarda şekil 2.4(c)'de görüldüğü gibi yasak bant aralığı yüksektir. Değerlik bandındaki tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından doldurulmuş, iletkenlik

bandındaki tüm enerji seviyeleri ise boştur. Termal enerji yada uygulanan elektrik alan (elektrik alan şiddetinin elektron yapısını bozacak kadar büyük olmadığı varsayılır) nedeniyle kazanılan enerji, değerlik bandının en tepesinde bulunan elektronları iletkenlik bandına göndermek için yeterli değildir. Başka bir deyişle değerlik elektronlarının komşu atomlarla yaptığı güçlü bağları kırmak çok zordur. Oda sıcaklığı civarında, akım iletimine katılacak serbest elektronu olmadığından elektrik akımına karşı yüksek direnç ($10^{-18} \text{ S/cm} < \sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$) göstererek elektrik akımına engel olan malzemeler yalıtkan olarak adlandırılabilir[9].

Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenlikteki bu tür bağımlılıklar, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirir. Şekil 2.4(b)'de yarıiletkenlerin bant diyagramı gösterilmiştir. $T = 0 \text{ K}$ 'de, tüm elektronlar değerlik bandındadır. İletkenlik bandında bir çok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolaylıkla hareket ettirebilir ve bir akım meydana gelir. Yarıiletkenler, kristal örgünün periyodikliği nedeniyle, izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır (yasak bant aralığı) ve bu yasak bant aralığı dar bant aralıklı malzeme, yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. Oda sıcaklığında yarıiletken malzemenin atomlarının termal enerjileri, iletime katılacak çok az sayıda elektron sağlar.

2.2. Elektromanyetik Işıma ve Soğurma

Bir iletişim devresi verici, iletişim ortamı ve alıcı olmak üzere üç ana yapıdan oluşan bir bütündür. Verici, iletilmek istenen bilgiyi, yayınlanacak duruma getirmek için üzerinde gerekli işlemleri yaparak elektriksel işaretlere dönüştürür. İletişim ortamı çoğunlukla boşluk olarak kabul edilir. Alıcı ise boşlukta yayılan elektriksel işaretler üzerinde gerekli işlemler yaparak kullanılabilir bilgi elde edilmesini sağlar. Vericide oluşturulan elektrik sinyalini elektromanyetik dalga biçiminde iletişim ortamına yayan ve iletim ortamındaki elektromanyetik dalgaların yaydığı enerjiyi toplayıp elektrik sinyallerine çevirerek alıcı devreye aktaran sistemlere anten denir.

Alıcı ve verici antenler tamamen birbirinin tersi çalışmasına rağmen, temel yapıları ve çalışma prensipleri aynıdır. Antenler pasif elemanlardır, bir sinyali yükseltmezler fakat kazançları vardır. Basit (temel) bir anten, bir iletim hattının uçları açılarak yapılır. Uygulamada karşılaşılan antenler çeşitli türde ve geometrik yapıdadır.

Maxwell denklemlerinin çözümü elektromanyetik dalgaların yayılıcı özellikte bulunduğunu gösterir. Bu yayılma, genel olarak her ortamın içinde ve boşlukta mümkündür. Hertz tarafından bir indüksiyon bobini kullanarak elektromanyetik dalgaların üretiminin ve algılanmasını kanıtladığı deneyi bu konudaki çalışmalara temel oluşturmuştur. Durgun elektrik yükleri ve kararlı akımlar elektromanyetik dalgalar oluşturmazlar. Bu yüzden bir telden geçen akım zamanla değişirse tel elektromanyetik dalga yayar.

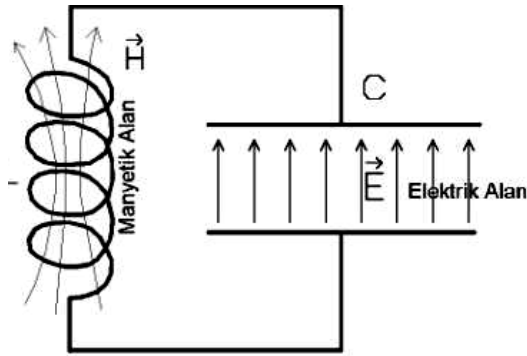
Elektromanyetik dalgaların boşlukta yayılması ışık hızında olur. Bu tür dalgalar birbirlerine ve dalganın yayılma doğrultusuna dik olarak titreşen elektrik ve manyetik alanlardan ibarettir. Bu nedenle, elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır. Elektromanyetik dalgalar belirli bir kaynaktan, bir alıcıya enerji ve momentum taşırlar. Bu dalgalar uzayda yayılırken yollarının üzerinde bulunan cisimlere enerji aktarırlar. Elektromanyetik radyasyon (ışınım) için hız, ışık hızına(C) eşittir. Bir dalganın enerjisi frekansı ile doğru orantılı dalga boyu ile ters orantılıdır. Diğer bir deyişle enerji ne kadar büyükse frekansı o kadar büyük, dalga boyu ise bir o kadar küçüktür(Eş. 2.2)[9].

$$C = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

Burada C ışık hızı, λ dalga boyu, f frekanstır.

Şekil 2.4’de görülen LC rezonans devresinde elektromanyetik enerji, bobinin çekirdeğinde manyetik alan olarak, kondansatörün levhaları arasında ise elektrik alan olarak kendini gösterir. Enerji bobinin çekirdeğinde ve kondansatörün levhaları arasında hapsedilmiş durumdadır. Böyle bir düzen dışarıya enerji yayamaz.

Kondansatörün levhalarını birbirinden uzaklaştırırken bobinin tellerini uçları düz bir iletken durumuna getirdiğimizde manyetik alan çizgileri düşey iletkeni çevreleyecek biçimde oluşur. Böyle bir yapı anten olarak çalışır. Manyetik alanın ve elektriksel alanın daha geniş bir bölgeye yayılması için bobin tellerinin uçları birbirine zıt yönde (180°) katlanıp elde edilen antene dipol anten denir[10].

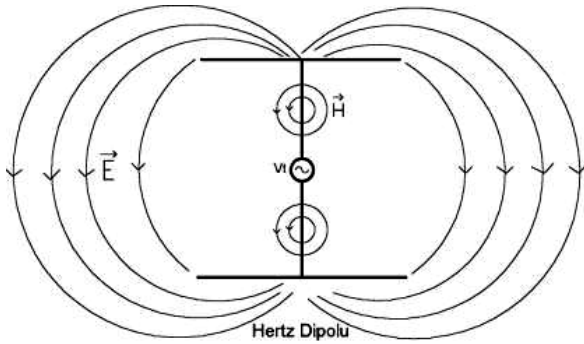


Şekil 2.5. LC rezonans devresi[10]

Antenlerde oluşan alan kondansatörün levhalarında biriken değişken elektrik yüklerinden veya düşey telden akan değişken akımdan ileri geliyormuş gibi düşünülmektedir. Gerçekte, Hertz dipolünün yaydığı alanı oluşturan düşey tel parçasıdır ve iletken üzerinden akan akımın zamanla sinüzoidal (sinüs biçiminde) olarak değiştiği varsayılır. Bu iletkenin iki ucundaki yatay iletken parçaları arasındaki sığa nedeniyle, düşey iletken üzerinden akan akım noktadan noktaya değişmeden aynı genlik değerinde kalır.

Temel anten olarak iki tip anten vardır. Bunlar Hertz ve Markoni antenleridir. Her iki antenin çalışma prensibi aynıdır. Şekil 2.6’de görülen ve dalga boyunun yarısı ebatlarındaki dipol antene hertz anten denir. Çoğunlukla 2 MHz üzeri frekanslarda yaygın olarak kullanılır. Yüksek frekanslarda elektrik enerjisi antenin ortasından beslenir. Açık olan uçlarında gerilimler maksimum fakat birbirine zıt yöndedirler. Her alternansta kutuplar değişir. Yön değiştiren zıt elektrik kutupları arasında değişken bir elektrik alanı oluşur. Enerjinin beslendiği giriş uçlarında akım en büyük durumundadır. Açık olan hat ucuna bağlı antenden geçen akım yavaş yavaş azalır. Hattın sonunda ise akım sıfır olur. Her alternansta değişen akım yönleri, merkezde

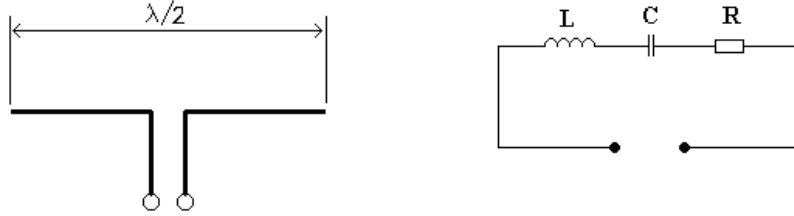
(hattın ortasında) büyük uçlara doğru azalarak yayılan manyetik olan çizgileri oluştururlar. Antenden geçen farklı akım ve gerilimlerin oluşturduğu elektrostatik alan ile mıknatıs alan çizgileri vardır. Bu farklı iki alan arasında 90° lik bir açı bulunmaktadır. Bu iki alan birlikte anten üzerinde boşluğa yayılarak elektromanyetik dalgayı oluştururlar.



Şekil 2.6. Hertz Dipolü[10]

Antene uygulanan güç arttıkça, girişteki akımında artacağı düşünülebilir böylece sabit bir anten direnci elde edilir. Antenlerin çalışma frekansları alıcı ve verici devreye göre değişebilir dolayısıyla antenlerin çalışma frekansları ile orantılı olarak anten boyları değişir. Anten rezonans frekansında duyarlılığı en büyük olur ve bu frekansları en yüksek seviyede olur. Bir dipolün merkezinde bilindiği gibi akım maksimum ve gerilim minimumdur. Antenin giriş uçlarında gösterdiği bu özellik; antenin seri rezonans devresine eşdeğer olduğunu gösterir. Şekil 2.6 'da hertz antenin seri rezonans devre olarak eşdeğeri görülmektedir. Seri rezonans devresinde bilindiği gibi rezonans anında $XL = XC$ olur. Endüktif ve kapasitif reaktansların birbirine eşit olmasıyla devrede sadece küçük bir direnç etkisi gösterir. Dipol antenin boyu çalıştırılacağı frekansa uygun dalga boyu üretiyorsa rezonanstadır. Anten rezonansta çalışırken en az kayıp ile randımanlı olarak enerji yayar. Eğer çalıştığı frekansa göre anten boyu kısa ise; kapasitif etki gösterir. Antenin boyu kısa olması ile gösterdiği kapasitif etki, antenden yayılması gereken enerjini bir kısmının geriye yansımına neden olur ve antenin verimi düştüğünden vericinin güç katına daha fazla yüklenir. Çalıştığı frekansa göre uzun olan bir anten endüktif etki gösterir. Antenin endüktif etki göstermesi ile enerjinin bir kısmı yine geriye yansır ve enerji kaybına sebep

olur[11]. Antenin iletkenliğinin artması ile direnci biraz düşer. Besleme noktasındaki açıklık ise direncini artırır.

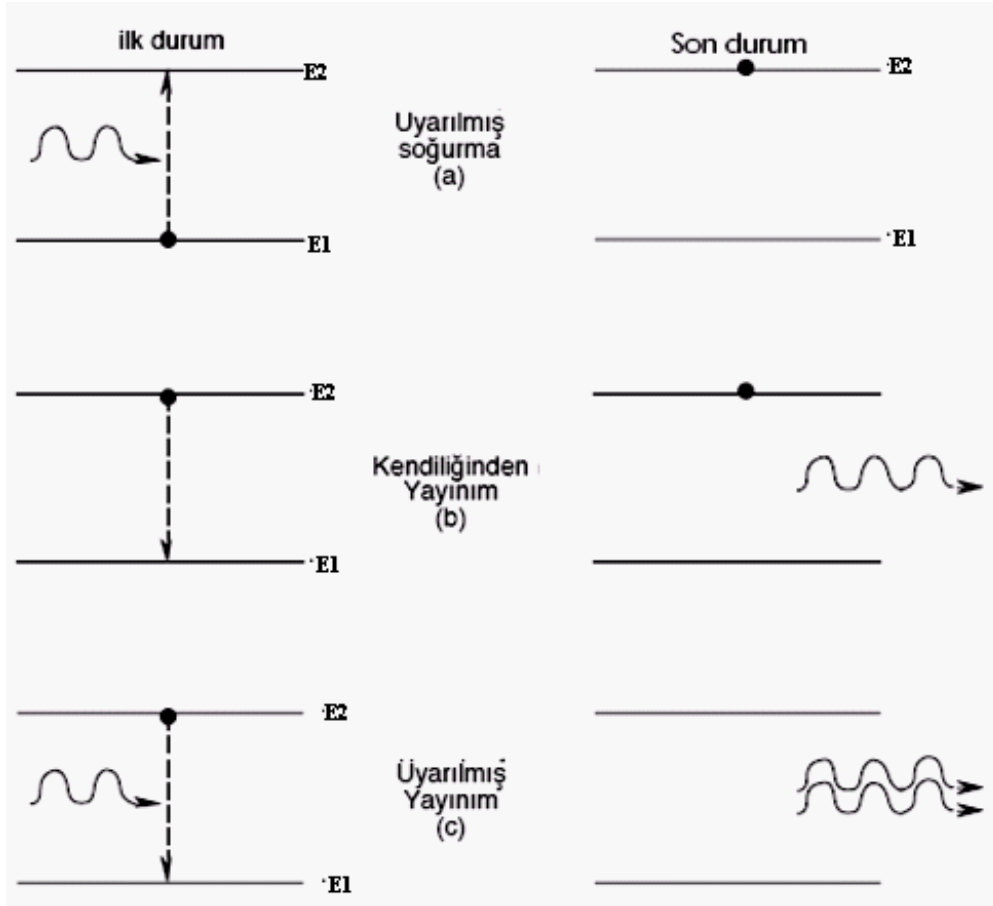


Şekil 2.7. Hertz anten ve seri rezonans devre eşdeğeri

Vericiden antene enerji taşıyan hatlara transmisyon hatları denir. Uygun enerji şekli sağlanırken, transmisyon hattının da yayılma direncine eşit bir empedans sahip olması gerekir. Bu şekilde, verici tank devresi transmisyon hattı ve anten arasında daima empedans uygunluğu sağlanır. Vericiden uygulanan enerjinin tamamı elektromanyetik sinyallere dönüşerek antenden yayılır.

2.3. Fotoiletken Yapılarda Işıma Ve Soğurma Mekanizmaları

Bir atomun değerlik bandında bulunan bir elektronun uygun uyarıcı ile uyarıldığında iletim bandına geçtiğini daha önceki bölümümüzde değinmiştik. Bantlar arası geçiş yapan elektronlar için üç durum söz konusudur. Bunlardan Şekil 2.9(a)'daki birincisi durumda değerlik bandının maximum enerji düzeyinde (E_1) bulunan bir elektron iletim bandının minimum enerji (E_2) düzeyine $E_2 - E_1$ enerjisine sahip V frekanslı fotonu soğurarak geçiş yapabilmektedir. Şekil 2.9(b)'deki ikinci durumda birinci mekanizmanın tersi olan iletim bandında bulunan bir elektronun $E_1 - E_2$ enerjisine sahip V frekanslı bir foton salarak değerlik bandına geçiş yapmasıdır. Şekil 2.6(c)'de görülen üçüncü durumda ise daha önce uyarılmış durumda bulunan (E_2 enerji düzeyindeki) elektronun değerlik bandına geçişi sırasında dışarıdan bir foton ile tetiklenmesi sonucu elektrondan bir birinin aynı özellikte iki fotonun ortamı terk etmesidir (ışınmasıdır).



Şekil 2.8. Elektronun foton salınımı ve soğurması

Üçüncü durum peş peşe tekrarlanırsa, aynı frekans ve aynı dalga boyunda fotonlar elde edilebilir. Bu şekilde fotonların uyarılmış yayılımı ile bir ışın demeti (lazer) elde etmek mümkündür. Lazer 1960 senesinde Theodore H. Maiman tarafından keşfedilen lazer, uyarılmış ışığın yayımıyla ışık kuvvetlendirilmesi anlamını taşıyan kelimelerin İngilizce baş harflerinden türetilmiş bir kelimedir.

Laserin çalışması için enerji seviyesi düşen atomlarda daha fazla sayıdaki atomların uyarılacak enerji seviyelerine yükseltilmesi gerekir. Bu durum ise normal olarak atomların enerji seviyesi dağılımının tersidir. Bu sebepten laserin çalışması için gerekli durum tersine çevrilmiş dağılım olarak isimlendirilir. Tersine çevrilmiş dağılımı ortaya çıkarmak için pompalama işlemi kullanılır. Lazer yapıyı üç farklı yöntemle uyarılabilir. Bunlar

- 1- Kimyasal yöntemle elde edilen enerjinin, ortamdaki atomlara ulaştırılmasıdır.
- 2- Yapıya elektrik akımı vererek gerçekleştirilir. Bu işlem elektriksel pompalama olarak isimlendirilir.
- 3- Yapıya dışarıdan yüksek frekanslı ışınların verilmesidir. Bu işleme optik pompalama olarak isimlendirilir.

Laser yapıları yukardaki yöntemlerden biriyle aldıkları enerjiyi emerler. Fazla enerji, atomları kararsız hale getirir. Kendisine bir foton çarpan, uyarılmış ve kararsız atom, fazla enerjiyi foton salarak verir. Fotonlar, benzer şekilde diğer fotonların salınmasını sağlar. Lazer içindeki paralel ayna görevi yapan yapılar sayesinde dalga şiddeti çığ gibi artar. Uyarma ve tahriklerle milyonlarca atom için bu işlem yapılırsa aynı yöne doğru milyonlarca foton paralel ışınlar halinde bir noktadan yayılır. Işık frekansına eş bir frekans ulaştığında, darbeler halinde ışık hüzmesi olarak yayılır. Genellikle bu yapılarda ışığın dalga boyları bir milimetreden büyük değildir.

Laserler yapıların monokromatik özelliği uyarılan elektronların geçiş esnasında uyarıcı kaynağın frekansıya eş uyumlu fotonlar salmaları anlamına gelir. Yayınlanan fotonların bu eş uyumu sonucu çıkan ışık dalgası aynı fazda, tek dalga boyuna sahip sinüsel bir dalga oluşturur. Oluşan bu dalgalar birbirini kuvvetlendirici özelliktedir. Normal ışık kaynaklarında ise yapı farklıdır çünkü oluşan dalgalar birbirine göre rastgele fazlarda dağılım gösterdiğinden birbirini zayıflatıcı karakterde olmaktadır. Lazerlerde dalga boyunun küçük olması dağılmayı büyük ölçüde azaltmakta ve dalgayı yön verilebilir kılmakta ayrıca sıcaklık ve manyetik alanda yapılacak değişikliklerle çalışma frekansı ayarlanabilmektedir. Laser ile üretilen dalga boyuna göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür.

Laser sistemlerinde sinyal üreteç olarak çok çeşitli gazlar, katılar veya sıvılar kullanılmaktadır. Bu sistemler sürekli veya kesikli, tek renkli demetler ışıyacak biçimde optik spektrumunun geniş bir bölgesinde (mor ötesi, görünür ve kızıl ötesi), mikrowattlardan megawatlara kadar değişen çıkış güçlerinde çalışacak şekilde tasarlanabilirler. Bir laser sistemin seçimi dalga boyu, güç mertebesi ve uygun diğer değişkenler kullanılacağı özel uygulamanın şartlarına göre yapılır. Pek çok uygulama

için önemli olan laser enerjisinin çıkışı gücünün değiştirilmesi işlemi sistemin elektrik girişinin kontrol edilmesiyle sağlanır.

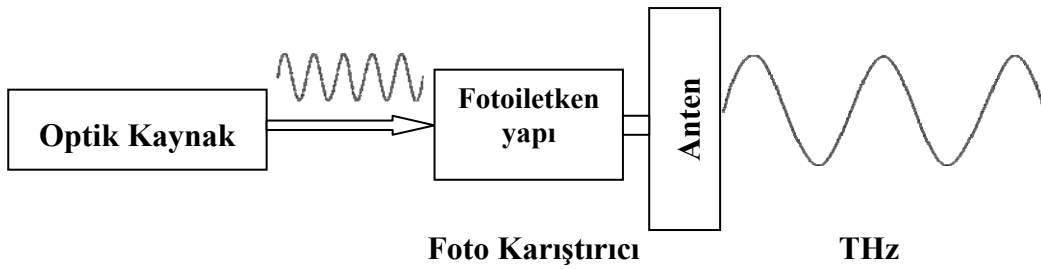
Yarıiletken malzemeler kullanılarak da laserler yapılmaktadır. Galyum Arsenik kristali yarı iletken lasere iyi bir örnektir. Bu yapı yarıiletken diod gibi P-N malzemenin birleşmesinden meydana gelmiş olup, P-N malzemenin birleşme yüzeyi yakut laserindeki aynalar görevini yapar. Birleşim yüzeyinde pozitif voltaj P tarafına, negatif voltaj N tarafına verildiği zaman elektronlar N malzemesinden P malzemesine geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonlar tekrar elektronlara çarparak bu elektronların daha çok foton üretmesine sebep olurlar. Neticede yeterli seviyeye ulaşan foton neşri, laser ışınını meydana getirmiş olur[12].

Lazerlerin tersi şekilde çalışarak ortamdaki manyetik değişikliği algılayan ve buna bağlı olarak çıkışında gerilim üreten elemanlara manyetik çevirici veya “Alan Etkili Transduser” adı verilir. Manyetik çeviriciler endüktif ve yarıiletken olmak üzere iki çeşit elemandan yapılmaktadır. Bobin endüktif bir elemandır ve manyetik alan değişimi içinde bulunursa uçlarında gerilim üretir. Bobin uçlarındaki gerilimin sürekli olması için sürekli değişen bir manyetik alan içinde bulunması yani mıknatısın ya da bobinin sürekli hareket etmesi gerekir. Manyetik alanın konumuna göre bobinin endüktans değeri değişmektedir. Hareketin sürekli olmadığı durumlarda bobin pasif olarak kullanılır. Diğer bir çeşit manyetik sensör, yarı iletkenlerden yapılan ‘Hall Sensör’dür. Bir yarıiletkenden elektronlar akarken akım yönüne dik bir manyetik alan uygulanınca elektronlar belli bir bölgede yoğunlaşır. Bu da yarıiletkenin uçlarında gerilim oluşmasına neden olur. Bu gerilim ile manyetik alanın varlığı ve şiddeti algılanabilir.

Manyetik sensörler, algılanacak büyüklükle algılama yapacak cihaz arasında elektriksel bağlantı olmaması gerektiğinde veya sensörle algılanacak cismin birbirini göremediği durumlarda kullanılmaktadır. Hall sensörlerin ebatları küçük olduğundan kullanımları pratiktir. Hall sensörler fiziki darbelere karşı daha dayanıklıdır.

2.4. Fotokarıştırıcılar

Terahertz sinyal aralığını, optik ve elektronik dalgalar ile karşılaştırdığımızda optik dalga boylarına göre çok kısa, mikrodalga boylarına göre çok uzun olması nedeniyle ne optik ne de mikrodalga üretim teknikleri terahertz sinyallerinin üretiminde direkt uygulanamazlar[13]. Optik tekniklerin gelişmesi, yarıyalıtkan, yarıiletken ve mikro boyutlu üretim tekniklerin (nanoteknolojinin) gelişmesi ile hetero yapılarda bant düzenlemelerinin yapılabilmesi kuantum elektroniğindeki yeni araştırma alanlarını ve terahertz alanında bir çok önemli uygulamanın önünü açmıştır. Elektromanyetik dalgaların üretimi için zorunlu olarak akımın periyodik değişimi gereklidir. Bunu başarabilmek için kullanılan yöntemlerden biride yarı iletken yapıyı optik sinyallerle uyarılarak dalga boyu daha kısa optik sinyaller elde edilmesidir. Bu teknikle THz sinyaller üretebilmek için, çok düşük taşıyıcı ömürleri olan çok kısa süreli periyodik sinyaller ihtiyaç duyulur[14-18].

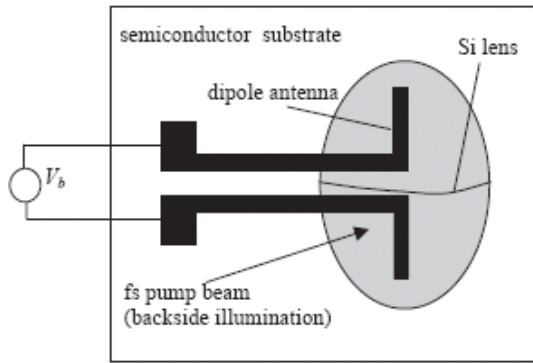


Şekil 2.9. Fotokarıştırıcı yapının şematik gösterimi

Temel katı hal osilatörlerin karşılaştığı zorlukları önlemek için, uzun zamandır araştırmacılar THz bölgede tutarlı güç üretimi için harmonik karıştırıcıları yönelmiş ve başarı elde etmişlerdir. Günümüzde katı-hal kaynakların frekansları 1 THz üzerindedir. Ayrıca geliştirilen katı hal cihazların taşınabilir sistemler olması bir çok yaklaşım ve gelişme için umut vericidir.

Terahertz teknolojilerinde, optiksel uyarımın tarihsel gelişimine baktığımızda 1970'lerin ortalarında sıkışmış kalıptaki bir optik sinyal geçiş için Nd: cam lazer ve yüksek dirençli Si [19] veya Cr-katkılı yarı-yalıtkan GaAs (SI-GaAs) [20] fotoiletken

anahtarlama olarak kullanılıyordu. 1980 yılında, Auston ve arkadaşları bir örnekleme tekniği kullanarak iletim hat yapıları ve amorf Si (a-Si) film üzerine erimiş silika altaşı fotoiletken yapı olarak gösterdi[21]. Günümüzde fotoiletken anahtarlama Auston ve Lee 'nin öncülüğünde oluşturulan yapıyı temel alan birçok terahertz sinyal üretme ve algılama deney sonuçlarında patlama yaşanmıştır. 1981 yılında Smith ve arkadaşları, Moleküler-Işın-Epitaksi (MBE) 'de düşük sıcaklıkta büyüttükleri GaAs (LT-GaAs) yapı ile çok iyi bir fotoiletken (PC) ince film geliştirdi[22], Mourou ve arkadaşları 1981 yılında; Heidemann ve arkadaşları 1983 yılında pikosaniye dalgalar boşlukta yaymak için anten ve geçici anahtarlama aracı olarak fotoiletken anahtarlama (PC switch) kullandılar[23-26].

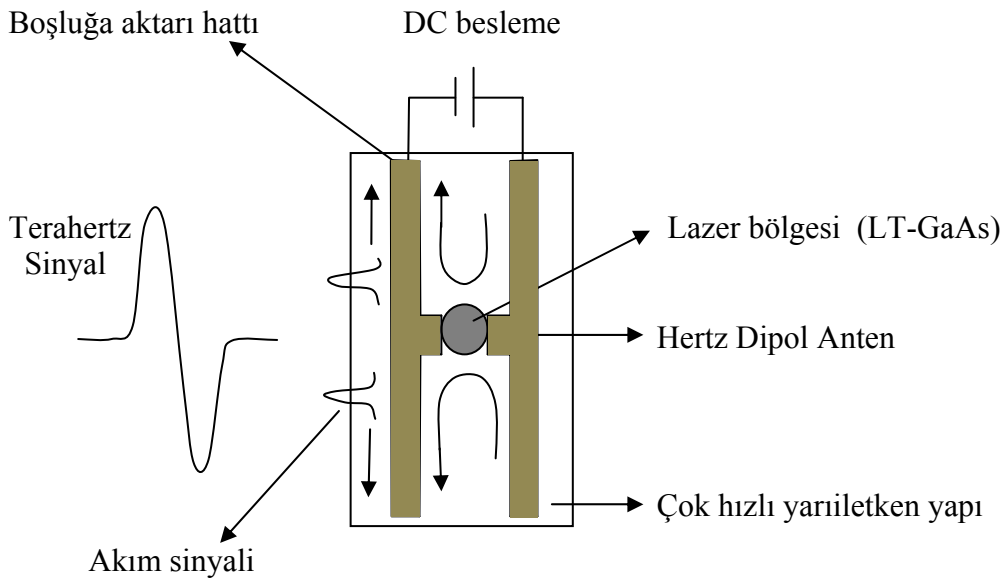


Şekil 2.10. Auston switch[19]

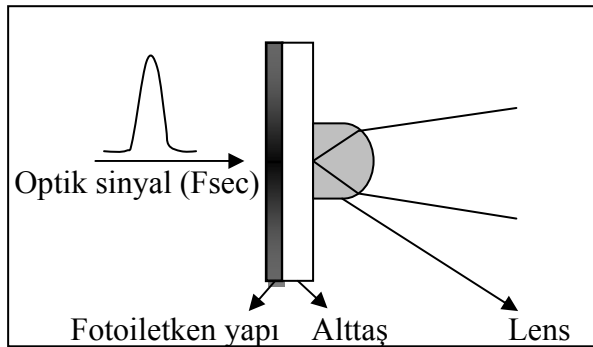
Bir yarıiletkende elektronlar değerlik bandından iletkenlik bandına ışık fotonu ile uyarılabilirse, bu tür yarıiletkenlere fotoiletken denir. Fotokarıştırıcılar bir diğer adıyla fotoiletken anahtarlama, optiksel olarak farklı güç dönüşümü yapan bir frekans değiştirme tekniğidir. Fotokarıştırıcılar karmaşık olmasına karşın frekansların birleşmesinde kullanılan katı-hal kaynakları ayarlanabilir. Fotoiletkenler, lazer karıştırıcılardan farklı olarak THz frekanslarının üretimi için düşük sıcaklıkta büyütülmüş (LT) GaAs kullanılır. Bu yöntem de LT- GaAs ince filimler yüksek elektrikle beslenerek THz frekansında dalga üretme tekniğidir. En uygun fotokarıştırıcılar maksimum çıkış gücüne ihtiyaç duyarlar. Bu tür uygulamalar için fotokarıştırıcıların birincil eksikliği THz çıkış gücü sınırlı olmasıdır. Bu güne kadar çok az fotokarıştırıcıda THz rejimleri için ölçülen en yüksek sürekli dalga çıkış gücü yaklaşık $1 \mu W$ olmuştur.

Son yıllarda 3 teknolojik buluş fotokarıştırmacılar ile farklı THz kaynakları yapılmasında başarılı olmuştur.

- 1- Fototaşıyıcı yaşam zamanı 1 ps'den az olan yarıiletken malzemelerin büyütme ve imalatının gerçekleştirilebilmesi,
- 2- Modern mikro-fabrikasyon teknikleri (nanoteknoloji) sayesinde fotoiletken yüzeyinde mikron altı seviyelerde elektrot desenlerinin oluşturulabilmesi
- 3- THz ışımda etkili bağlantı için Kompakt düzlemsel antenlerin elektrotlarının fotokarıştırmacı yapıya entegrasyonun yapılabilmesidir. Fotokarıştırmacılar için standart bir örnek yapı Şekil 2.11'de görülmektedir.

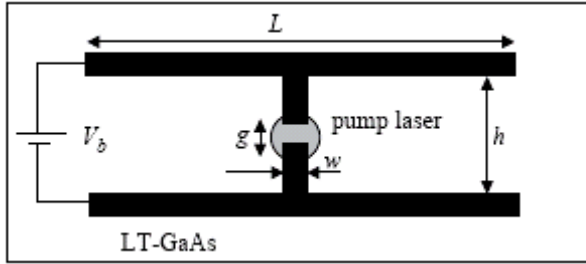


Şekil 2.11. Fotokarıştırmacı yapının önden görünüşü [7].



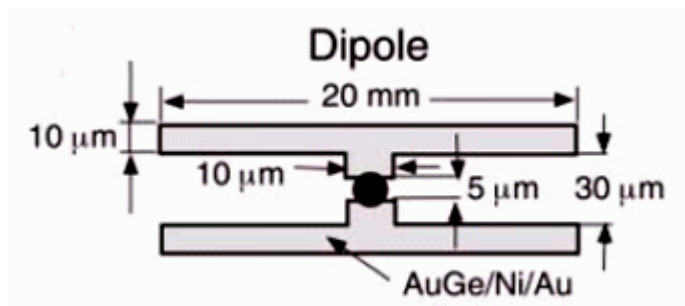
Şekil 2.12. Fotokarıştırmacı yapının yandan görünüşü [7].

Günümüzde, hızla gelişen teknolojinin imkânlarıyla birlikte, karmaşık devre elemanları kullanarak daha ucuza THz ışımlarını elde etmek artık mümkündür. Son zamanlarda, Moleküler-Işın-Epitaksi (MBE) ile düşük sıcaklıkta büyütülen GaAs (LT-GaAs), yüksek direnç, nispeten büyük elektron hareketliliği, gelişmiş arıza alan ve 1 ps'den kısa taşıyıcı ömür özellikleri nedeniyle çok hızlı optoelektronik yarıiletken cihazların ana malzemesi olmuştur. Genişbant terahertz sinyalleri yakalamak için LT-GaAs ile imal edilen cihazlar pikosaniyenin altındaki elektrik sinyalinin üretimi başarıldı ve fotoiletken dalga boylarında terahertz sinyal için iki lazer dalga boyunda optik karıştırıcılar üretildi[27-32].



Şekil 2.13. Terahertz sinyal üretimi için hertz dipol antenin şematik yapısı [33].

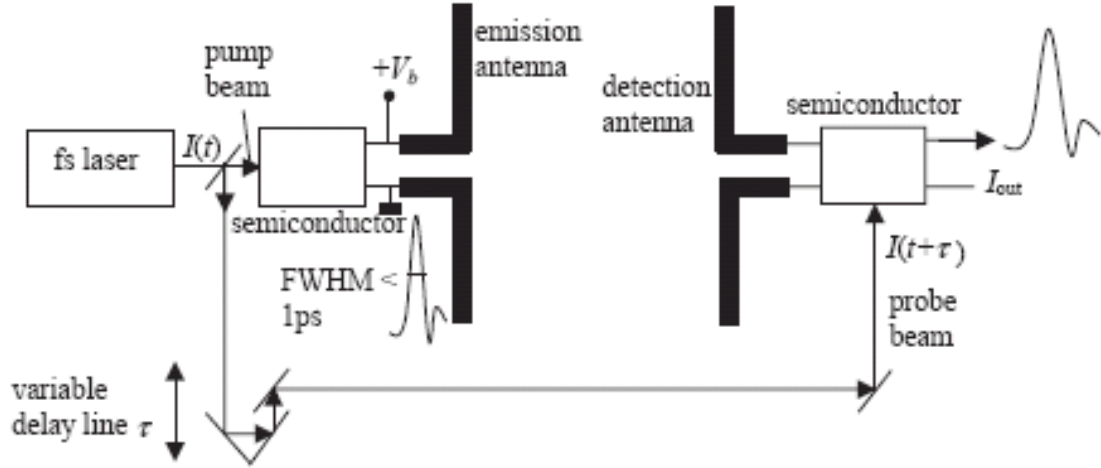
Araştırmalar şekil 2.13'de görüldüğü gibi THz sinyal üretimi için kullanılacak anten yapısında transmisyon hattı etkilerini yok etmek için LT-GaAs üst-tabakanın tamamı dipol elektrotları arasına gömülü yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.14. Terahertz sinyal için kullanılan hertz dipol antenin parametreleri[7].

Fotodedektörler, ışığı elektrik sinyallerine dönüştüren elektronik bileşenlerdir. Örneğin fiber optik ağlarda alıcılar olarak kullanılırlar. Onlar bir elektrik sinyal form bilgisini ışıkla geri dönerler. Yüzeyine foton vurduğu zaman yarıiletken yapıdaki elektrik alanda elektrik akımına yol açan elektron-deşik (elektron yokluğu, hol)

çiftini üretir. Bu elektrik alan çoğunlukla bileşene uygulanan harici voltaj tarafından üretilir. Fotodedektörler, genellikle silikon veya galyum arsenik gibi yarıiletkenlerden üretilirler.



Şekil 2.15. Terahertz sinyal üretim ve algılama için kullanılan yapının prensip şeması[7].

Fotokarıştırmalarda sinyal üretmek için yapıya gerilim uygulanmaktadır. Eger aynı yapıya akım uygulanır ise fotodedektör olarak kullanılabilirler. Tipik bir terahertz sinyal üretme ve algılama yapısı şekil 2.15’de görülmektedir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi iki anten paralel iken alış en büyük dik olduğunda ise en küçüktür.

Bu güne kadar LT-GaAs ve ErAs-GaAs başarılı fotokarıştırmacı malzeme olarak gösterilmektedir. Moleküler-Işın Epitaxy’de (MBE) 200°C civarındaki sıcaklıklarda galyuma göre yaklaşık 1% den fazla arsenik birleştirilerek büyütülen LT-GaAs ‘in fotokarıştırmacılar için ilk analiz ve uygulamaları 1992 de Lincoln laboratuvarında yapılmıştır[34].

THz bölgesinde çalışan cihazlarda kullanılacak fotokarıştırmacıların performansı yüksek ölçüde, taşıyıcı yoğunlukları ve yarıiletken katmanları üzerindeki sinyal yakalama oranına bağlıdır. Bu çalışmamızda, LT-GaAs katmanın büyütülmesini, büyütme kadar sonrasında başarılı bir tavlama süreci gerekli olduğundan yapının farklı sıcaklıklarda tavlama gerçekleştirerek oluşan yapıların verimliliklerini tartıştık.

3. DÜŞÜK SICAKLIKTA GALYUM ARSENİK (LT-GaAs) YAPININ ÖZELLİKLERİ

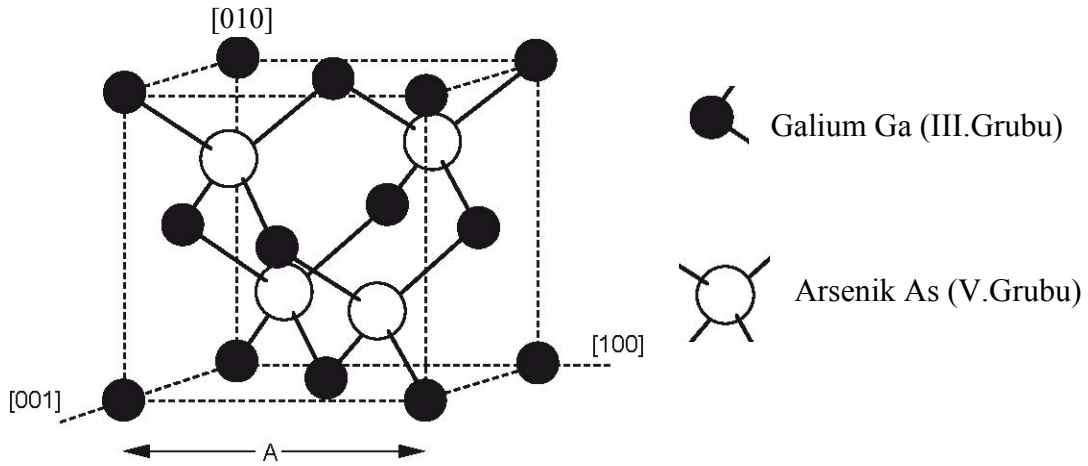
Yarıiletken materyalleri kendi aralarında yapısal olarak gruplandırırsak. Ge ve Si gibi yarıiletkenler, elementsel yarı iletkenlerdir. Bu elementler doğada bulunabilmelerine ragmen yapay üretim teknikleri ile büyütülürler. Bu elementler kendi aralarında her bir atomunun, bir elektronunu en yakın komşusuyla ortaklaşa kullanarak kuvvetli bir bağ olan kovalent bağ yapısını oluştururlar. İki yada daha çok elementten meydana gelen yarıiletkenlere ise bileşik yarıiletkenler denir. Bileşik yarıiletkenler arasında iki farklı elementten oluşan yarıiletkenlerin genel kimyasal formülü AB şeklinde gösterilir. II-V (üç-beş) bileşikler olarak anılan bu yapıda A, son yörüngesinde 3 değerlik elektronu bulunduran elementi, B ise son yörüngesinde 5 değerlik elektronuna sahip elementi sembolize eder. GaAs, periyodik tablodaki III sütundaki galyum (Ga) elementi ve V sütundaki arsenik (As) elementlerinden oluşan bir III-V yarıiletken bileşiğidir.

3.1. GaAs Bileşiğinin Özellikleri

GaAs ilk Goldschmidt tarafından 1929 yılında oluşturulmuş olmasına ragmen yarıiletken özellikleri 1952 yılına kadar rapor edilmemiştir[35]. GaAs kristali iki altkatmandan oluşur. Bunlardan birincisi her biri yüzey merkezli kübik (fcc) iken ikincisi diğetine göre fcc kübün yarı köşegeniyle ofsettir. Bu kristalin kübik görünüşü çinkosülfürün (Zincbelnde) şekli ile aynıdır. Şekil 3.1, GaAs için birim kübü gösterirken Tablo 3.1’de bileşiğin genel karakteristik özelliklerinden bir kısmı listelenmektedir.

III-V yarıiletkenlerde, molekül içindeki atomların bağ elektronlarını kendine çekme yeteneğindeki (elektronegatifliğindeki) farklılıklarından dolayı hem iyonik hem de kovalent bağlanmanın bir kombinasyonudur. GaAs yapıda yük dağılımı büyük atom olan Arsenige (As) doğru kaymıştır. Bu nedenle kovalent bağlanma iyonik bağlanmaya göre daha baskındır. Bileşik farklı iki element içerdiğinden, bağ boyunca elektronların dağılımı simetrik değildir. Atomlardan biri net bir elektrik

yükü fazlalığına sahip olduğundan, bağdaki elektron dağılımı elektronegatifliği fazla olan atoma doğru kayar. Bu kayma süreci bağa iyonik bir karakter kazandırır. III-V yarıiletken bileşikler polar doğaya sahiptirler ve bu özellikleri saçılma mekanizmalarının belirlenmesinde önemlidir.



Şekil 3.1. GaAs kristal örgünün birim küpük yapısı

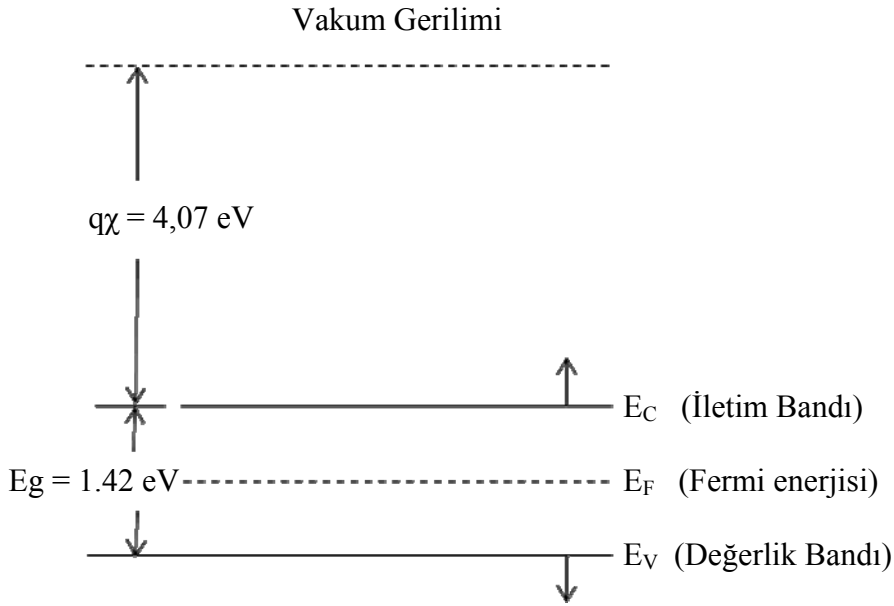
Çizelge 3.1. GaAs'in oda sıcaklığındaki özellikleri[36]

Nitelik	Parametre
Kristal yapısı	Çinko sülfür
Örgü sabiti (Å)	5.65
Yoğunluk (g/cm ³)	5.32
Atomik yoğunluk ($\times 10^{22}$ atom/cm ³)	4.5
Moleküler ağırlık	144.64
Termal genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)	5.8
Öz ısı (J/g-K)	0.327
Örgü termal iletkenliği (W/cm-°C)	0.55
Dielektrik sabiti (statik)	12.85
Yasak bant aralığı (eV)	1.42
Katkısız elektron hareketliliği (cm ² /V-s)	8500
Katkısız boşluk hareketliliği (cm ² /V-s)	400
Erime Noktası (°C)	1238

III-V yarıiletkenler aynı kristal yapısına sahiptirler. Kristal büyütme sürecinde alttaş üzerine büyütülen materyalin örgü parametreleri büyük bir öneme sahiptir. Alttaş ile

GaAs, AlAs gibi bileşik örgü sabitlerinin uyumlu olduğu durumlarda, bir materyalin diğeri üzerine birikme (büyüme) olasılığı yüksektir.

3.1.1. Enerji bant yapısı



Şekil 3.2. GaAs için enerji bant aralığı[37]

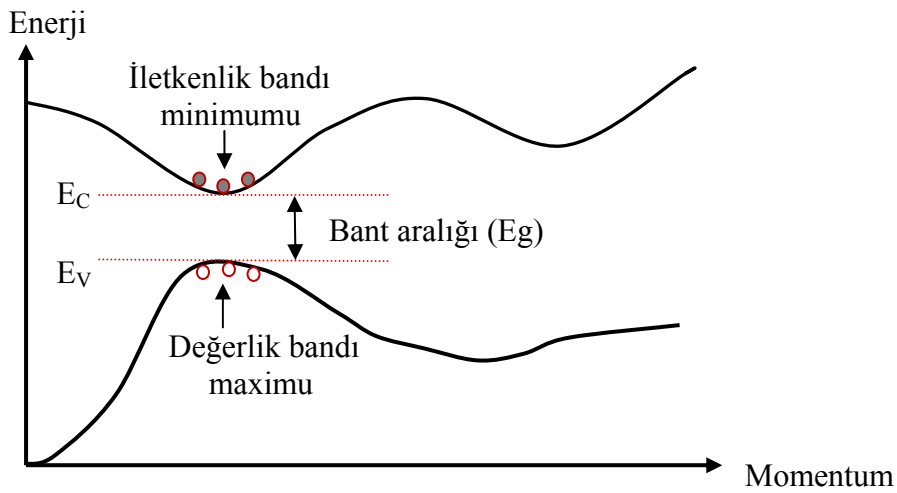
Şekil 3.2’de gösterilen fermi seviyesi, olasılık fonksiyonu yarısına eşit bir enerji seviyesidir. Saf yarı iletkenler için, fermi seviyesi yaklaşık bant genişliğinin merkezinde (ortasında) dir. Aslında, hiçbir elektron E_F gibi bir enerjisiye sahip değildir çünkü bant genişliği içindeki enerjilerine izin verilmez. Bir elektronun değerlik bandından iletim bandına (enerji bant aralığını) geçmek için gerekli enerji miktarı sıcaklığa, yarıiletken maddeye, malzemenin saflığı ve katkı şekline bağlıdır. Katkısız GaAs için, oda sıcaklığında enerji bant genişliği 1,42 eV dir. Enerji bant diyagramı için genellikle başvuru potansiyel vakum potansiyeldir. Elektron ilgisi, $q\chi$ iletim bandının tabanındaki bir elektronu vakum potansiyeline hareket ettirmek için gerekli enerjidir. GaAs için $q\chi$ yaklaşık 4,07 eV ‘tur[37].

Değerlik (valans) bandının en üstü seviyesi ile iletkenlik bandının en alt seviyesi arasındaki enerji farkına yasak band aralığı denir. Bant aralığı, optik cihazlar için

devre elemanlarının yapımında çok önemlidir. Üzerine foton düşürülen malzemede elektron-boşluk çifti yaratmalıdır.

Direkt bant yarıiletkenler (Doğrudan soğurma) : Şekil 3.3 'de görüldüğü üzere iletkenlik bandının en alt seviyesi ile değerlik bandının en üst seviyesi aynı momentum değerine veya değerlik bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu 1.Brillouin Bölgesinin merkezinde bulunan Γ , ($k=0$) noktasına karşılık gelen yarıiletkenlere “direk geçişli yarıiletken” denir. Teknolojik öneme sahip direkt bant yarıiletkenlere örnek olarak GaAs’i verebiliriz.

Direkt geçişlerde soğurulan fotonun dalga vektörü küçüktür. E enerjili foton $p=E/c$ momentumuna sahiptir. Optik fotonun 10^{-19} J civarında enerjisi vardır. $c=3.108$ m/s olduğundan, momentumu ($p=10^{-19}/3.108=0,3.10^{-25}$ J) çok küçüktür. E_g enerjisine sahip foton, direk geçişli yarıiletkenlerde elektronun geçiş için çok fazla momentuma enerjisine ihtiyacı olmadığından kolaylıkla elektron boşluk çifti yaratabilir. Rekombinasyon (elektron-boşluk çiftlerinin foton oluşturup yok olması) için direk geçişli yarıiletkenler daha uygundur[38].

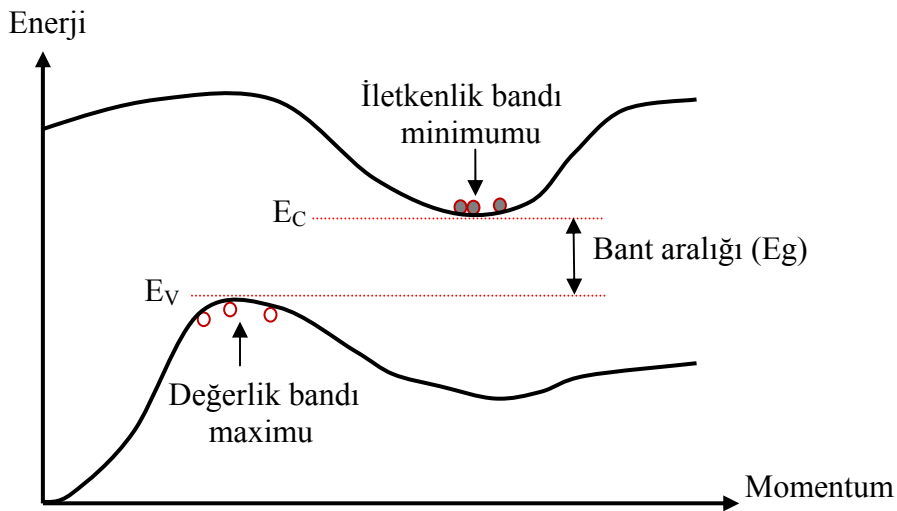


Şekil 3.3. Direkt bant yarıiletken

Direkt bant yarıiletkenlerin soğurma olayında, bir foton kristal tarafından soğurulurken, bir elektron ve bir deşik yaratılır. Sürekli optik soğurma bölgesinin

eşik frekansı w ise, bant aralığı $E_g = \hbar w$ ile verilir. Bu da direkt geçişli kristal yapıyı fotodetektörlerin üretimi için çok kullanışlı bir madde yapar.

İndirekt bant yarıiletkenler (Dolaylı soğurma) : Şekil 3.4’de görüldüğü üzere bu tip yarıiletkenlerde iletkenlik bandı minimumu ile değerlik bandı maksimumu aynı doğrultuda değildir. Elektronun, değerlik bandının maksimumundan, iletkenlik bandının minimumuna geçiş yapması için, enerjisinin yanı sıra momentumunu da değiştirmesi gerekmektedir. İndirekt geçiş hem foton, hem de fonon içerir; foton enerji sağlar, fonon ise momentum sağlar. Minimum enerji aralığında doğrudan bir foton geçişi, dalga vektörü korunumu koşuluyla sağlanamaz, çünkü bu enerji aralığında foton momentumu çok küçüktür[38].



Şekil 3.4. İndirekt bant yarıiletken

Yarıiletkenlerde yasak bant aralığı (E_g), iletkenlik bandının (E_c) en düşük enerjisi (iletkenlik bant kıyısı) ile değerlik bandının (E_v) en yüksek enerjisi (değerlik bant kıyısı) arasındaki enerji farkıdır.

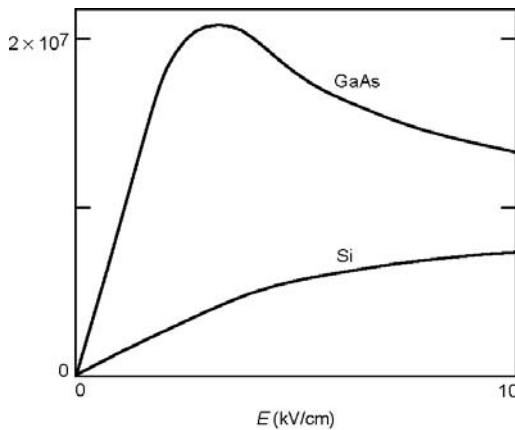
İndirekt geçişli yarıiletkenlerde, elektron-boşluk çifti yaratabilmek için E_g enerjisine sahip foton için elektronun momentumunu değiştirmesi gerekir. Bu mümkündür, ancak bu durumda elektron sadece enerji kazanmak için foton ile etkileşmeyecek,

aynı zamanda momentum kazanmak (ya da kaybetmek) için kristal titreşimi (fonon) ilede etkileşime girmesi gerekmektedir. İndirek durumda, sistemde elektron-foton-fonon süreci olduğundan süreç daha yavaştır. Emilim, genellikle indirek geçişli malzemelerde sıcaklığa daha fazla bağlıdır. As, Sb, Bi gibi bazı malzemeler de indirekt aralık değeri negatif yani değerlik bandının maksimumu, iletkenlik bandının minimumundan daha yüksek değerdedir. Bu malzemelere yarı-metaller denir.

3.1.2. Hareketlilik ve sürüklenme hızı

GaAs 'in yüksek hareketlilik, doyurulmuş sürüklenme hızı ve yarı yalıtkan alttaş üzerine alet üretme kapasitesi gibi bir çok avantajı vardır. Bir yarıiletken yapı içinde, taşıyıcı elektron elektrik alana mağruz kaldığında bir kuvvet ($F = -qE$) gözlemlenir. Uygulanan elektirik alan boyunca taşıyıcı elektronlar hızlandığında taşıyıcı iyonları ile yarı iletken örgü arasındaki çarpışmalar için geçen zamana bağlı olarak alan gücünün fonksiyonu olan bir hız elde edilir. Bu hız, sürüklenme hızı (v) olarak tanımlanır.

Momentumun korunmasından dolayı, bu sürüklenme hızı (v) uygulanan elektrik alanla doğru orantılıdır. Şekil 3.5'de Si ile GaAs in elektron sürüklenme hızı görülmektedir.



Şekil 3.5. GaAs ve Si 'un elektron sürüklenme hızı[39]

Sürüklenme hızı Eş. 3.1 'deki gibi ifade edilebilir. Burada orantı faktörü çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zaman (τ_c) ve elektronun etkin kütlesine (m^*) bağlıdır. Bu orantı faktörü elektron hareketliliği olarak tanımlanır (μ) birimi $\text{cm}^2/\text{V-s}$ dir.

$$v = -\left(\frac{q\tau_c}{m^*}\right)E \quad (3.1)$$

Hareketlilik taşıyıcı ulaşımı için önemli bir parametredir çünkü bir elektronun hareketinin uygulanan elektrik alanından ne kadar güçlü etkilendiğini tanımlar. Eş. 3.1'de, hareketliliğin direkt olarak çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zamanla ilişkili olduğu gerçektir ki bu çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zamanı sırasıyla örgü saçılması ve kirlilik saçılmasıyla temelde belirlenilir. Örgünün termal titreşimler sonucu oluşan örgü saçılımı sıcaklık ile artar ve yüksek sıcaklıklarda baskın olur bu nedenle artan sıcaklık ile hareketlilik azalır. Başka bir yönden bir iyonize katkı (dopant) kirliliği yük geçişinin hareketleri sonucundaki kirlilik saçılması yüksek sıcaklıklarda daha az önemli olur.

Çalışma hızı, gerçek devre kapasitansı ve cihazın çalıştığı elektirik alan rejimi gibi faktörlere bağlıdır. Liner bölgedeki tipik alan güçlerinde GaAs'in hareketlilik tepesi silikonunkinden 6 kat daha büyüktür. Bu da GaAs cihazların Si'dan daha yüksek frekanslarda çalışabildikleri anlamına gelir.

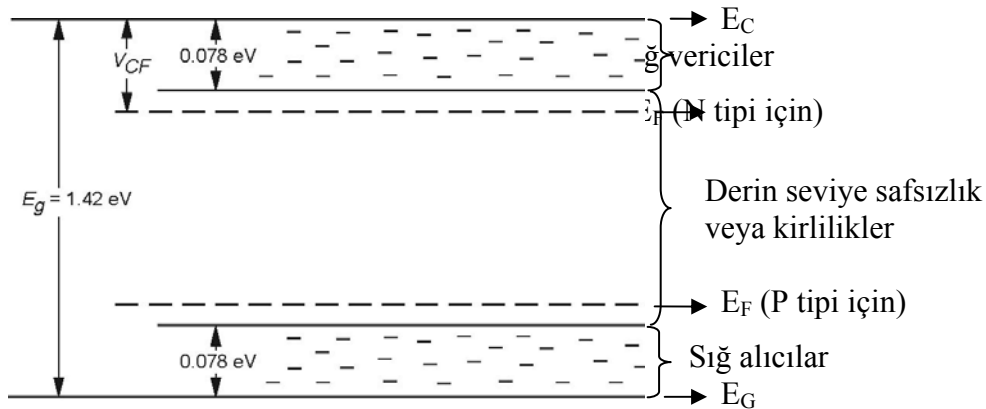
3.1.3. Kristal kusurları

Kusurlar üzerindeki çalışmalar önemlidir çünkü malzemedeki kusurlarının sayısı ve tipleri, malzemenin fiziki özelliklerini değiştirir. GaAs kristalin büyüme sürecini kontrol etme çabalarına rağmen bir çok kristal kusurlar, kaymalar ve kirlilikler içermektedir. Yapı içerisinde oluşan bu kusurlar, GaAs'in elektronik özellikleri üzerinde arzu edilen veya istenmeyen etkilere sahiptirler. Bu kusurların doğası ve gözlenen etkileri malzemedeki birleştirme metodu ve genel büyütme şartları ile belirlenir. Bir yarı iletkenin elektriksel özellikleri, büyüme ve işleme adımları

sürecinde malzemenin içine kimyasal kusurların (kirliliklerin) bilinçli olarak eklenmesiyle de geliştirilebilir.

Düzenli bir kristal yapı en kararlı haldedir ve enerjisi minimum seviyededir. Kusurun oluşması enerji gerektiren bir süreçtir bu yüzden kusurlu (düzensiz) bir kristal yapı daha yüksek enerjiye sahiptir. Bu da yapının elektriksel ve manyetik özelliklerini değiştirir. Böylelikle bizim için önemli olan optik yayma ve emme tayflarında da değişiklik olur. Çizelge 4.1’de verilen bilgiler ideal kristal yapı için geçerlidir. Uygulamalarda materyaller göz ardı edilebilecek düzeyde de olsa yabancı atom ve kristal kusurları içerdiklerinden tam anlamıyla ideal kristal yapı oluşturulamamaktadır.

Materyaller belirli özelliklerinin değiştirilmesi veya daha iyi duruma getirilmesi amacıyla çeşitli oranlarda katkılama da yapılabilirler. Katkı atomları, katkı seviyesine bağlı olarak yasak enerji aralığı içinde sık veya derin enerji seviyeleri olarak adlandırılan izinli enerji seviyeleri oluştururlar. Şekil 3.6 ‘da görüldüğü üzere bu seviyeler, verici atomlar için iletim bandından, alıcı atomlar için değerlik bandından iyonlaşma enerjisi kadar ayrılır. Alıcı atomlardan dolayı ortaya çıkan ve genellikle değerlik bandına yakın olan seviye, alıcı seviye olarak adlandırılır. Benzer şekilde, verici atomlardan dolayı ortaya çıkan ve genellikle iletim bandına yakın olan seviye, verici seviye olarak adlandırılır. Bu seviyeleri önemli kılan nokta, enerjilerinin ve doldurulma olasılıklarının sıcaklıkla değişmesidir.



Şekil 3.6. GaAs kirliliklerinin enerji bant diyagramı [40]

Yasak enerji aralığıyla karşılaştırıldığında çok daha küçük enerjili olan bu safsızlık seviyelerinin iyonlaşma enerjileri, basit ve temel bir yaklaşım olan hidrojen atomu Bohr modeli kullanılarak hesaplanabilir. Kristal kusurları ve seçimli katkılamadan kaynaklanan safsızlıklar, yasak bant aralığının orta bölgesinde sığ seviyelere göre daha yüksek enerjilere sahip seviyeler oluşturabilirler. Bu seviyelere derin safsızlık seviyeleri denir. Yüksek sıcaklıklarda bile elektron tuzakları ve saçılma merkezleri gibi davranışlarından, yarıiletkenin elektronik yapısı için oldukça önemlidirler. Derin safsızlık seviyelerinin iyonlaşma enerjisi Bohr modelinden hesaplanamaz ve s, p, d bantlarından gelen katkıların da göz önüne alınması gerekir[38].

Nokta Kusurları : İdeal bir kristal kafes oluşumundaki atomik boyutlardaki bölgesel kusurlara, noktası kusurları denir. Bu nokta kusurlar boşluk, bağ kırıkları, yerleşmemiş veya yanlış yerleşmiş atomlar, büyüme sürecinde kasıtlıca yerleştirilmiş katkı kirlilikleri içerebilir. Bir kristalde N_0 tane atomdaki kusurlu atom sayısı Eş. 3.2 ile belirlenir.

$$N=N_0 \cdot e^{-E/k} \quad (3.2)$$

GaAs 'da birçok oluşum kusurları gözlenir. Bu kusurların etkisi ve konsantrasyonu malzemenin büyüme yöntemleriyle belirlenir. GaAs 'deki oluşum kusurları hem arseniğin hem de galyumun boşluklarını içermektedir ki onların konsantrasyonu işleme süresince yapısını arseniğin aşırı basınçıyla belirlenir. Bu boşluk kusurların etkisi doğal derin verici tipi ve derin alıcı tipi olarak gözlenmektedir.

Arsenikle zenginleştirilmiş eriyik içerisinde büyüyen GaAs 'de EL2 önemli bir kusurdur. Bu kusur verici karakter gibidir ve enerji bandının tam ortasında bulunmaktadır. Bu kusur ısısal olarak çok karardır ve 900 ° C'ye kadar işleme sıcaklığına karşı koyabilir ve bir elektron tuzağı gibi davranır. Bu kusurun önemi P-tipi GaAs 'i yarı-yalıtkan malzemeye dönüştürülmesinde ve termel kararlılığında yatmaktadır[41-43].

Kaymalar : İdeal kristalde nokta kusurlarının bir boyutlu düzenine kayma denir. Kristal malzemenin elastik sınırından daha fazla şiddete maruz kaldığında oluşur. Kaymalar, kimyasal ve diğer nokta kusurları ile etkileşir. Bu etkileşim, kirlilik atomlarının yerleşmesi ile gerçekleşir.

Bir kayma, alttaşın (wafer) aşındırma özellikleri ve en önemlisi aletlerin elektriksel özelliklerini değiştirerek bant boşluğundaki tuzaklama aşamalarının başlangıcına çevirir. Kaymalar, genellikle kristal büyütme esnasında sıcaklığın gradyan varlığının bir sonucu olarak tanımlanabilir.

3.1.4. Termal özellikleri

GaAs'in termal iletkenliği $0,55 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ 'dir. Bu deger silikonun $1/3$ 'üne, bakırın $1/10$ 'una karşılık gelir. GaAs'in termal iletkenliği, malzemenin sıcaklığına bağlı olarak geniş bir aralıkta (yaklaşık $1/T$ oranıyla) değişir. Burada T kelvin sıcaklığıdır. Ancak, termal iletkenliği çok kısa bir sıcaklık aralığı üzerinden doğrusal kabul edilebilir. GaAs'in silikona göre termal direncinin yüksek olması, GaAs cihazların dayanıklılığını göstermekle birlikte GaAs bant genişliğinin kararlılık sergilemesinde devrenin üretimi esnasındaki termal özelliklerinin belirlenmesinde (devre dizaynında), kullanılan montaj tekniğindeki ve arayüzey uygulamalardaki sıcaklığın çok önemli olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Ayrıca cihazların güç kapasitesi entegre devre paketinde GaAs yoğunluğu ile birlikte alttaşın termal direnciyle sınırlıdır[44].

3.2. Yarıyalıtkan GaAs (SI- GaAs)

Yarıyalıtkan GaAs önemi, doğrudan iyon ekiminin olduğu cihazlardan kendini izole edebilme gerçeğine dayanır. Yarıyalıtkan alttaş, parazit kapasitelerde büyük azalma sağlaması birleşmelerdeki uyum sorununu azaltır. Böylelikle daha hızlı çalışan cihazların üretimi için avantaj sağlar.

Yarıyalıtkan GaAs 'in yarıiletken malzeme kalitesi sağlamak için aşağıdaki gereksinimleri karşılaması gerekir:

- 1- Aktif katmanda epitaxial büyüme veya iyon ekimi sırasında sıcaklık istikrar olmalıdır.
- 2- Alttaş etkin katmanında, sinyal ayırıcı ve ışık hassasiyeti türü istenmeyen madde arayüz etkileri olmamalıdır.
- 3- Isıl işlem sırasında, alttaş safsızlıklarda ve dışa yayılma tarafının etkin katman özelliklerinde hiçbir bozulma olmamalıdır.
- 4- Bozulmalar(Dislocations), hatalarının istifleme ve çökeltiiler gibi kristal kusurlar, mümkün olan en düşük yoğunluktadır.

3.3. Tambon Katman

Yarıyalıtkan malzeme üzerine verimli bir yarıiletken yapı elde etmek için, tambon katman teknolojisi geliştirilmiştir. Yarıyalıtkan alttaş üzerine büyütülen bir ara tambon katman nispeten kalın, yüksek-özdirençe sahip epitaxial bir katman olur. Tampon tabaka istenmeyen alttaş safsızlıkları ve kusurları için fiziksel bir engel oluşturur.

Katkısız GaAs eriyik içine oksijen veya krom eklenmesi ile yarıyalıtkan yapılabilir. GaAs kütlenin idealde özdirençi $10^{-6} \Omega\text{-cm}$ ile $10^{22} \Omega\text{-cm}$ kadardır, pratikte bu oran $10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ile $10^8 \Omega\text{-cm}$ aralığında olabilir. Yarıiletken öz dirençleri büyüme sırasında derin seviyedeki karşı katkılama ile kontrol edilebilir.

3.4. GaAs'in Düşük Sıcaklıkta Büyütülmesi (LT-GaAs)

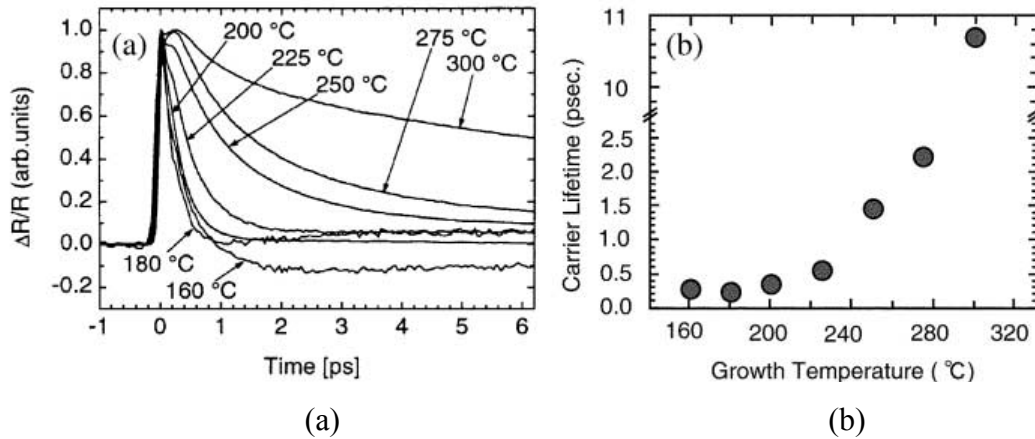
Farklı sıcaklıklarda yapılan bir çok GaAs kristal büyütmenin X-ray sonuçları üzerinde yapılan yorumlarda genel kabul gören 3 farklı büyütme sıcaklığı karşımıza çıkmaktadır. Bunlar :

- 1-) Yüksek sıcaklık ($t_g \geq 460^\circ\text{C}$),
- 2-) Orta sıcaklık ($280 \leq t_g \leq 460^\circ\text{C}$)
- 3-) Düşük sıcaklık ($t_g \leq 280^\circ\text{C}$)

Detaylı X-ışını kırınım çalışmaları GaAs katmanlarının büyütme sıcaklığını 250°C 'nin altına düşüğünde, onların örgülerinin tetragonal bükülmesiyle sonuçlandığını ve epitaxial katmanların örgü parametrelerindeki bir artışı gösterir. Bu etki genellikle Eş. 3.2'de verilen orantıyla karakterize edilir[45-46]. Burada a ve a_L sırasıyla alttaşın ve epitaxial katmanın örgü parametreleridir.

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{(a_L - a)}{a} \quad (3.2)$$

Şekil 3.7(a)'da görüldüğü üzere $\Delta a/a$ oranı, büyütme sıcaklığının(t_g) 160°C 'lere düşmesiyle artar. Bu sapmanın malzemenin fototaşıyıcı ömrünün ~ 1 ps altına düşürmesi terahertz anten yapılar için gerekli olan en önemli kriterin yerine gelmesi anlamını taşır buda bizim yukarıdaki sınıflandırmada düşük sıcaklığı tercih etmemizin sebebidir.

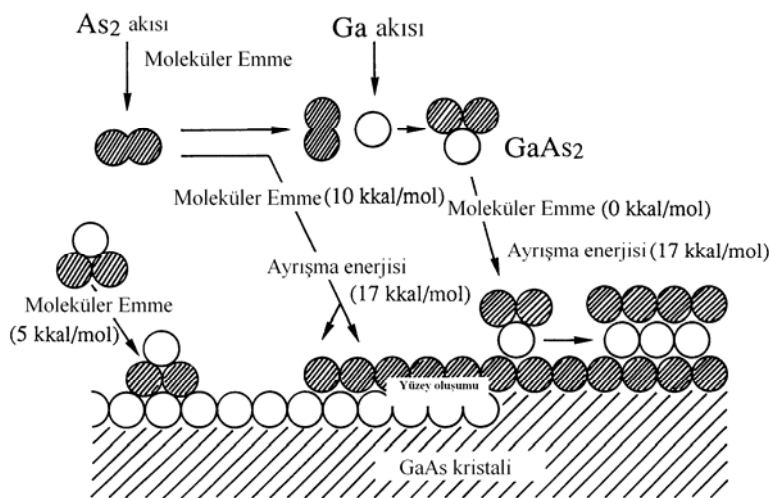


Şekil 3.7. GaAs büyüme sıcaklığının etkileri (a) büyütme sıcaklığının örgü parametresine etkisi (b) büyütme sıcaklığının taşıyıcı yaşam süresine etkisi[7].

GaAs yapıda, büyütme sıcaklığının(t_g) 250°C 'lerin altına inmesi Şekil 3.7(b)'de görüldüğü üzere bizim için idealdir. Düşük sıcaklıkta GaAs yapının büyütülmesi sırasında arseniğin aşırı birleşme isteği fototaşıyıcı ömrünü etkilemektedir. MBE teknolojisinin 200°C civarındaki arsenikli büyüttmeleri yapabilmesinden dolayı büyütme sıcaklığının kontrolündeki zorluğun aşıldığı görülmektedir. MBE

teknolojisinin düşük sıcaklıkta büyütme metodu sayesinde, LT-GaAs katmanları üzerinde çalışmalar başlamıştır. GaAs katmanlarının, LT-GaAs katmanları ile elektrofiziksel ölçüm parametreleri karşılaştırıldığında yüksek öz dirence ($\rho=10^2-10^3 \Omega\text{cm}$) ve düşük elektron hareketliliğine ($\mu\sim 10^{-1} \text{cm}^2/(\text{V.s})$) sahip olduğu görülür. İletkenliğin sıcaklık bağımlılığının analizi, $t_g < 250^\circ\text{C}$ 'de büyütülen katmanlarda derin katmanlar üzerinde beklenen iletme olduğu ($\log\sigma \sim T^{1/4}$) görülür. Büyütme sıcaklığının (t_g) $300^\circ\text{C} \sim 420^\circ\text{C}$ 'ye arttırılmasıyla beklenen iletmenin katkısı önemsiz olur ki burada yük hareketliliğinin ($500 \text{ cm}^2/\text{Vs} \sim 6000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) dramatik artışında gözlenir[47-48].

MBE'de GaAs kristal büyütmenin mekanizması hem deneysel hemde teorik metotlarla çokca çalışılmıştır. Arthur ve arkadaşları ile Faxon ve arkadaşları, GaAs yüzeyde As_2 ve As_4 adacıklarının emme mekanizmalarını araştırmışlardır. Onların ileri sürdüğü As_2 emme mekanizmasında As_2 molekülü GaAs yüzey ulaşır ve üst yüzey bölgelerine kadar ilerler. Bu üst yüzey Ga atomu kristal büyümesinde Ga-As bağı aktif yapan Ga alanında 2 Arsenik atomunu ayırır. Bu fikir reaksiyon ölçü teorisine dayanmasına karşın reaksiyonun deneysel tekniklerle açıkça gözlemlenemesi nedeniyle gerçek kristal büyütmenin detayları henüz bilinmemektedir[49].

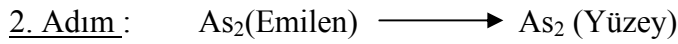
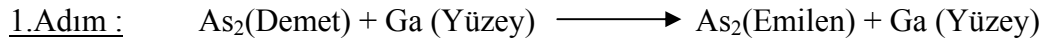


Şekil 3.8. Kristal yüzeyin gönderilen As_2 moleküllerinin bağlanma şekilleri[50]

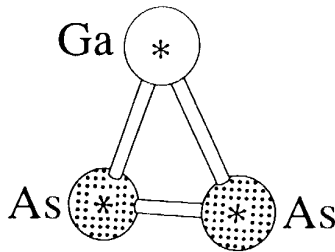
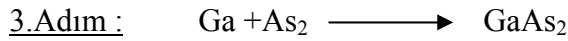
Gaz fazında epitaksiyal katmanların büyütülmesi şekil 3.8'de görüldüğü üzere emme, soğurma (desorption), yüzey yayılması gibi başarılı ve paralel basamakların bir

çoğunu içeren yüzey işlemlerinin kinetikleri ve büyütme aşamalarında kaçaklarında atomların birleşmesiyle sınırlıdır. Özellikle presipitatların oluşumu, bunların üst yüzeydeki birleşme çeşitlerini, Ga atomlarının aktif rolünün ne olduğunu iyi bilmeliyiz. MBE’de GaAs kristal büyütme mekanizması küçük adacık modelleriyle teorikte çalışılmasına karşın GaAs kristal büyütme mekanizması hakkında çok az rapor vardır. Bunun sebebi büyütme mekanizmasındaki değişimlerin nano boyuttaki ölçümünü mümkün kılan cihazların az olması, bu konuların araştırmaları sınırlamaktadır. Teorik çalışmalara göre As₂ moleküllerinin GaAs alttaş yüzeye tutunmaları ve sonrasında yüzeyde As presipitat oluşturma mekanizması aşağıdaki gibidir.

As₂ molekülü 23.5 Kkal/mol ve 9.6 Kkal/mol enerji bariyeri arasında, sırasıyla yüzey üzeri ile basamak alanında molekülü olarak emildiği ve yüzeyde hareket ettiği açıklanmıştır.



Ardından emilen As₂ molekülleri tavlama ya bağlı olarak (2. adımın gerçekleşmesi) üst yüzeye doğru büyümektedir. Yüzeye gelen As₂ parçacıkları Ga atomları ile bağ kurmaya çalışacaklardır(Şekil 3.9).



Şekil 3.9. GaAs₂ bağ yapısı

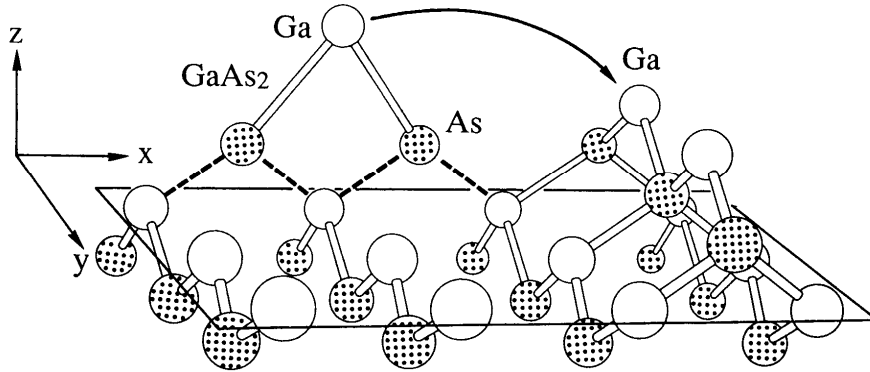
3.Adımda yüzeye ulaşan As_2 demeti yüzeyde serbet Ga atomu ile reaksiyona girer ve $GaAs_2$ adacığı oluşturur. Eğer molekül olarak emilen As_2 aktif Ga alanın ulaşamazsa, As_2 veya As_4 adacığı olarak yüzeyden savrulur(buharlaştır).

4.Adım : $Ga + As_2 (Yüzey) \longrightarrow$ yeni GaAs yüzey

veya

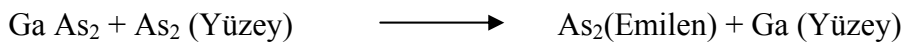
4.Adım : $GaAs_2 + Ga(Yüzey) \longrightarrow$ yeni GaAs yüzey

4.Adım da ise üretilen $GaAs_2$ adacığı GaAs yüzey ile reaksiyona girer ve kristal büyötmeye öncölük eder. Burada iki olasılık vardır. $GaAs_2$ 'nin Ga kısmı As dengeli yüzey ile reaksiyona girer veya $GaAs_2$ adacığının As kısmı Ga dengeli yüzey ile reaksiyona girer.



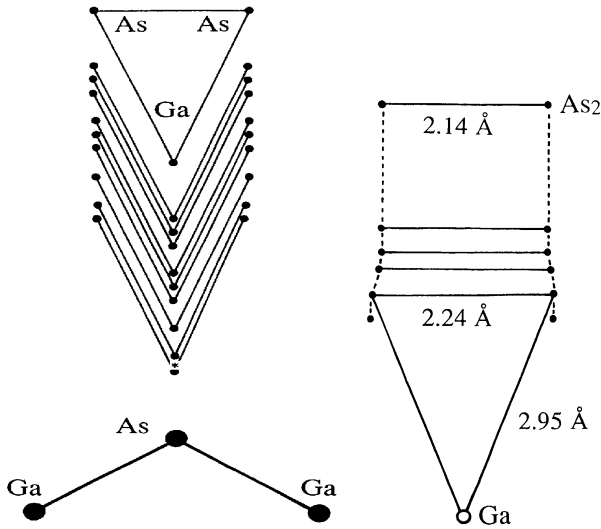
Şekil 3.10. As_2 moleküllerinin bağlanma geometrisi[50].

$GaAs_2$ adacığının Ga – As bağı zayıf olur ve Ga atomu GaAs kristalinin örgü tarafına yerleşir. $GaAs_2$ adacığının 2 As atomu yüzeyde molekül olarak emilen As_2 olur. Şöyleki, $GaAs_2$ emilimi As dengeli yüzey üzerinde yeni Ga yüzey ve molekül olarak emilen As_2 çeşitleri verir(Şekil 3.10).



Bu reaksiyonun enerji bariyeri yoktur ve sonuç olarak bu mekanizma düz GaAs yüzey için 23,5 Kkal/mol ve basamak alanı için 9.6 Kkal/mol enerji bariyerlerine sahip dağrudan emilimden daha elverişlidir.

Şekil 3.9'daki GaAs_2 yapı şekil 3.10 'daki gibi en uygun serbest GaAs_2 molekülünün geometrisine tutulur. GaAs_2 adacığı yüzeye yaklaşır ve enerji bariyersiz emilir. Bu noktada GaAs adacığı serbest olandan daha küçük olur, başka bir deyişle Ga–As bağ uzunluğu serbest GaAs_2 adacığının 2,95 Å 'nundan daha kısa olan 2.55 Å dur(şekil 3.11). As–As bağ uzunluğu serbest GaAs_2 nin 2.24 Å undan çok az uzun olan 2.22 Å dur. Bu geometri Ga–As uzunluğu 2.55 Å olan Ga dengeli $\text{GaAs}(100)$ yüzeyi üzerinde moleküler olarak emilen As_2 ile aynıdır. As – As bağ uzunluğu 2,4Å'dur[50].



Şekil 3.11. GaAs_2 yapıda atomlar arası bağ uzunlukları

3.5. LT-GaAs Katmanlarda Tavlamanın Adacık Oluşumuna Etkileri

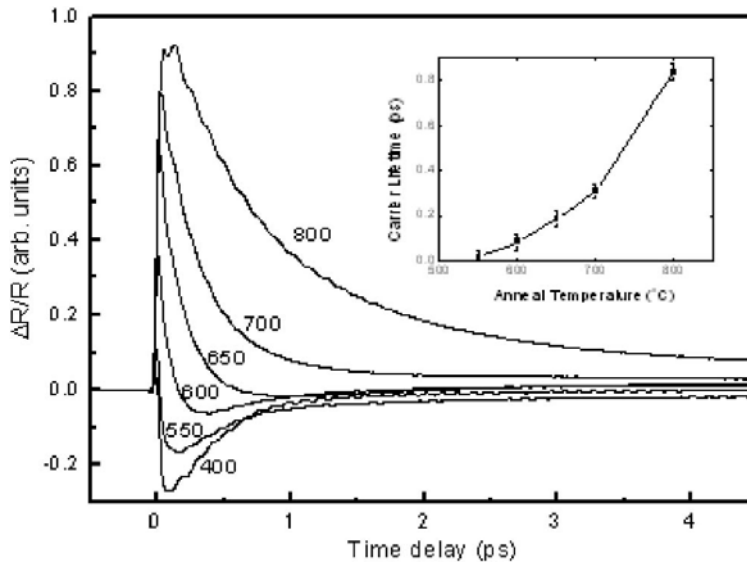
Moleküler ışın epitaksi (MBE) ile GaAs yapının büyütme sıcaklığı yaklaşık 180°C'de iken taşıyıcı ömrü düşük seviyelerde (~1 ps) olmasına rağmen hareketlilik (mobility) gibi elektriksel özellikleri terahertz yapılar için istenen düzeyde değildir.

Geleneksel yaklaşım, yarıiletken maddelerin özelliklerini değiştirmek için büyütme esnasında numuneye katkı (dopant) atomları ilave etmeyi temel alır. Bu yaklaşımda gerekli enerji seviyelerini sağlamak için uygun katkı atomunun (dopant) seçimi, epitaksiyel katmana katkı atomunu tanııtma metodları ve katkı yapılan maddenin yapısal bozuklukların olası güçlü etkilerini önlemek için optimum kristal şartları sağlamak gibi çeşitli problemlerin çözümlerine gereksinim vardır.

Son zamanlarda yarıiletken malzemelerin özelliklerini kontrol etmek için farklı bir yaklaşım geliştirildi. Yarıiletken malzemenin bileşenlerini, boşlukları ve kirliliklerini içeren nanometre boyutlarındaki adacık ile noktasal bozukluk topluluklarının eriyik malzemede oluşumunu (nonstoichiometric yapıyı) temel alan bu yaklaşıma ilk olarak, 1980'lerde aşırı arsenik içeren bir solüsyondan tek kristaller büyütme için kullanıldı[51].

Düşük sıcaklıkta büyütme kadar büyüme sonrasında başarılı bir tavlama süreci gereklidir. LT-GaAs katmanlarında etkin kendiliğinden yayılma katsayıları, stoichiometric GaAs'ın bilinen değerlerinden oldukça farklıdır. MBE'de büyütülen LT-GaAs katmanlarının $t_a > 400^\circ\text{C}$ 'de büyütme odasında (chamber içinde) tavlama malzemenin yapısında önemli değişikliklere yol açtığı tespit edilmiştir. LT-GaAs büyütülen GaAs yapıdaki aşırı arsenik miktarı, homojenlik sınırının fazlasıyla aşmıştır (superstoichiometric). As_{Ga} 'ın yayılması Ga boşluklarının yüksek konsantrasyonu ile kurulur. Fazla arseniğin tekrar dağılımı, yayılmadan geçerek oluşur. GaAs yapıda kümecikler şeklindeki bozuklukların oluşturulmasında arseniğin belirleyici faktör olarak kullanıldığı bu yaklaşımda katı fazdaki arsenikce zengin LT-GaAs numunenin çeşitli sıcaklıklarda tavlama sonucunda GaAs özelliklerinde belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. LT-GaAs yapı tavlama boyunca, mükemmeliyete yakın bir dereceye sahip olmasına karşın tavlama sıcaklıklarının artırılmaya başlaması ile Ga yapı içindeki As atomların yeniden düzenlenmesi nedeniyle arsenik fazlalığı epitaksiyel katmanın yüzeyinde nanometre çaplı arsenik kümelenmeleri (tepeciklerinin-presipitatlarının) kısmen oluşmaya başlamaktadır.

LT-GaAs katmanlarının matrisinde tavllanmış malzemenin özelliklerinin oluşumunda As adacıkları karar verici rol oynar. Bu nedenle parametrelerin belirlenmesi kritik bir önem taşımaktadır. Fermi seviyesinin metal-yarıiletken ortak yüzeyinde sabitlendiği çok iyi bilinir. GaAs-matris As-adacık ortak yüzeyinde, fermi seviyesi GaAs'da bant boşluğunun ortasına yakın sabitlenir, ki bu adacık etrafında yük taşıyıcılarının boşaltma bölgesinin oluşumuyla sonuçlanır[52]. Tavllanmış LT-GaAs katmanlarında As adacıklarının yoğunluğu oldukça yüksek ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) olmasından dolayı, adacıklar arasındaki ortalama mesafe boşaltma bölgesinin kalınlığının iki katından daha azdır. Sonuç olarak GaAs matrisi yarı-yalıtkan özellikleri sahip olur. Ayrıca, matris-adacık ortak yüzeyleri çevresindeki elektrik alanlar dengesiz yük taşıyıcılarının yüksek bir tekrar birleştirme oranı ve yakalamayı sağlar. Böylelikle adacık içeren LT-GaAs katmanlarında yük taşıyıcılarının yaşam ömrü düşer. Eğer adacık içeren LT-GaAs katmanları n- tipi veya p-tip iletkenlikli geleneksel katmanlarla birleşirse, epitaksiyal yapılarda elektron dağılımının kontrolü için bazı ek olasılıklar yükselir[53].



Şekil 3.12. LT-GaAs numunede tavlama sıcaklığının (t_a)değişiminin, örgü parametresine etkisi[54].

Oluşturulan As presipitatların yeni yapı formu, fototaşıyıcı ömrünü koruduğu gibi taşıyıcı yoğunluğu ($> 100 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ mertebesine) artarken , tavlanan katmanların öz direnci 10^2 - 10^3 'den 10^6 - $10^8 \Omega\text{cm}$ 'ye yükselir, $\Delta a/a$ oranı ise düşer. Bu tür oldukça

iyi tanımlanmış ters-konum kusurları ile GaAs band aralığı merkezine yakın hata dereceleri ile ilişkili, çok hızlı bir elektron-delik rekombinasyonu, nötr ortam sıcaklıklarında kalır ve yüksek iç alanları altında iyonize etkisi yoktur. Bu olagan üstü etkileri nedeniyle, birçok araştırmacı LT-GaAs için yarı iletken malzeme biliminin bir dalı olarak kusur çekim mühendisliği gibi düşünmektedir[55].

GaAs yarıiletken malzemenin fototaşıyıcı ömrü büyütme koşulları ve tavlama şartlarına bağlıdır. Tavlama sırasında, epitaksiyel katmanın yüzeyi ile As_2 molekülleri arasındaki etkileşim yapının kendini kendini en düşük enerji formuna sokma eğilimi ile alakalıdır. Burada katkı katışıklıkları (kirlilikleri) aşırı arseniği yakalamayı örtbas edeceği de unutulmamalıdır. LT-GaAs yapının RTA sistemi ile tavllanması belirli sıcaklıklara kadar stoichiometrik olmayan yapının ısının etkisi ile polimerleştiğini göstermektedir. Tavlama sıcaklığının artması ile As fazlalığı As_2 şeklinde büyüme yüzeyinin üzerindeki Ga atomlarına tutunmak isteyeceklerdir. $t_g < 250^{\circ}C$ 'de büyütülen ve sonrasında $t_a = 500^{\circ}C$ 'de 15-dakika tavlama ile, örgü parametresi stoichiometric GaAs'ın karakteristik bir değerini elde eder. Tavllanmış LT-GaAs katmanlarında kırınım çizgilerinin yarıgenişliği belirgin şekilde değişir, ki bu matris yapısının yüksek derecede mükemmelliğe sahip olduğunu belirtir. Galyum kusurlarının yoğunluğu da azalır, fakat hala yeterince yüksek kalır, başka bir deyişle onlar tavllanmış LT-GaAs katmanlarında ana kusurlar olurlar. Tavlama sıcaklığı $t_a = 600^{\circ}C$ 'de, LT-GaAs katmanlarının örgü parametresi alttaşın örgü parametresinden daha düşük olur[56].

Bu yaklaşım ilaveten LT-GaAs yapının bulkunda adacık dağılımını kontrol etmek için silikon, berilyum ve indiyum gibi isovalent katkılar kullanılabilir. Günümüzde In ile δ -katkılama en popülerdir[57]. Düşük sıcaklıkta MBE'de büyütülen GaAs (LT-GaAs) veya GaAs tabakalara iyon ekiminden iyi sonuçlar elde edilmesiyle bu yapılar THz vericiler ve dedektörler için kullanılmıştır. Oluşum sonrası tavllanmış LT-GaAs yapılarının bu ilgi çekici özellikler alet yapılarında tampon katmanların oluşumu metal-yarıiletken alan etkili transistörlerin backgating problemi ortadan kaldırabilir olduğunu göstermekte, elektronikte fotodetektörlerin tasarımı vb. birçok malzemenin üretim ve geliştirilmesinde umut vericidir. Unutulmamalıdır ki LT-GaAs yapıların

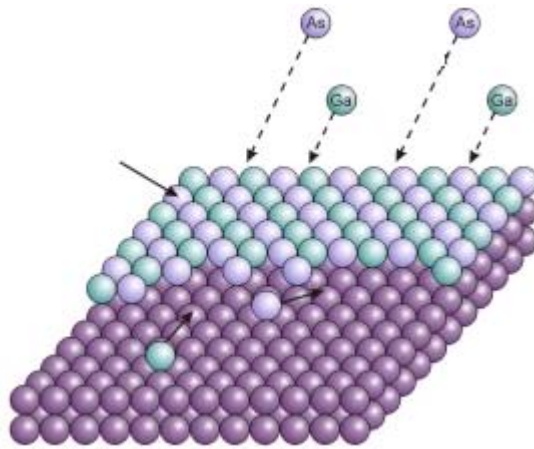
birçok özelliği, çeşitli gruplar tarafından dikkatlice incelenmesine rağmen, LT-GaAs yapının birçok elektrik ve fiziksel özelliklerin analizi tamamlanamamıştır.

4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

Bu tez çalışmasında incelenen LTG- GaAs numuneleri MBE yöntemi ile büyütüldü. LT-GaAs numunelerinin yapısal incelemeleri HR-XRD ve Optik mikroskop yardımıyla yapılmıştır.

4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

Günümüzde yarıiletken cihazlar, farklı özelliklere sahip çeşitli malzemelerin katman katman yığılmasıyla çok katmanlı yapı oluşturmaktadır. Elektronların katmanlar arasında nasıl hareket ettiği cihazın davranışını ve işlevini belirler. Örneğin bir transistör yapısında elektronlar sadece bir gerilim uygulandığı zaman geçmesine izin vererek bir anahtar gibi davranır. Bir diyot yapısında ise elektronlar katmanlardan geçerken lazer veya ışık üretmek üzere karşımıza çıkabilmektedir.



Şekil 4.1. Alttaş (Wafer) üzerine GaAs yapının büyütülmesi

Yarı iletken materyallerin nanometrik boyutlarda üretiminde karşılaşılan zorluklardan başında safsızlık gelir. Safsızlığın oluşturulabilmesi için geliştirilen yöntemlerin en başında elementlerin buharlaştırılarak büyütülmesi gelmektedir. Şekil 4.1 deki gibi materyallerin katman katman büyütebilmek için her bir katmana ait elementin çok yüksek saflıkta gaz demeti olarak büyüme yüzeyine gönderilmelidir. Atom veya moleküllerin alttaş üzerinde birikmesi ile bir tabaka oluşur. Büyütülecek

malzemenin bulunduğu kaptan ısıtılarak büyüme yüzeyine gönderilmesi sırasında oluşan gaz demetinin yoğunluğuna gaz akısı denir. Gaz akısının hasas kontrolü sayesinde katman kompozisyonu daha iyi ayarlanabilir.

Tek kristal numune üzerine yine tek kristal tabakaları büyütme işlemine epitaksi denir. Kristal büyütme kusurlarının olmaması için Czochralski ve Bridgman-Stockbarger temel epitaksi yöntemleri geliştirmişlerdir. Czochralski ve Bridgman teknikleri ile ince dilimler haline getirilebilen “çekirdek” kristal tabanlar (alttaş) üzerine tek kristal tabakalar olarak büyütülebilmekte ve böylece elde edilen katmanlı yapılar üstün özelliklere sahip olabilmektedirler.

Kristal büyütmede bir diğer sıkıntı ise kristal büyürken büyümeyle ilgili olarak kusurlarına oluşmasıdır. Bu konuda 1959 yılında Feynman, her bir atomu ve molekülü ayrı ayrı işlemeye imkan veren ve ihtiyaç duyulan boyutta (atomik boyuta) inebilen ilerlemeyi tanımlamıştır. Bu sayede yerçekimi kuvvetinin önemi azalacak, yüzey gerilimi ve Van der Waals kuvveti daha önemli hale gelecekti. Bu temel fikir akla yatkın görünmesi nanobilim ve nanoteknolojinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. MBE sisteminde büyütme odası, çok yüksek vakum (UHV) şartlarından dolayı (3×10^{-11} mbar) büyütme termodinamik dengeden bağımsız sayılabilir. MBE, UHV şartları altında (10^{-9} Torr) bir kristal yüzey ile atom veya termal enerjili moleküler demetlerinin etkileşim işlemlerini içeren bir epitaksiyel büyütme sürecidir. UHV ortamı, yabancı atomlar içermediği için yüzeyde bulunan boş bağlar farklı atomlarla bağ yapamaz ve katı yüzeylerin yüzey bileşeni deney sırasında değişmeden kalır[58].

Büyütülecek elemanların seçimi ve onların göreceli olarak katman oluşum, akılarının ayarlanabilmesi için her bir elementin ayrı bir kaptan (potadan) büyütme yüzeyine ulaşması sağlanmaktadır. Böylece bir yapının oluşmasında alttaşa eşit mesafede kapların yerleştirilmesi ile oluşturulan sisteme MBE adı verilir. MBE, esas olarak bir vakum buharlaştırma tekniğidir ve yüksek kalitede ince film büyütme için kullanılır. Bu metodla demet akısının ve birikme koşullarının çok daha kesin kontrol edilebilmesi nedeniyle vakum buharlaştırma tekniklerinden ayrılır.



Resim 4.1. Gazi Üniversitesi STARLAB’ ta bulunan V80H model MBE sistemi

1970’ li yıllarda ilk kez MBE sistemi kullanılmaya başlandı. MBE ile yapılan ilk çalışmalar, üç gruba elementler ile beş gruba elementlerden oluşan III-V grubu bileşikler ile yarıiletkenler oluşturuldu. MBE yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazları üretmek için bir çok farklı katman ve kompozisyonları oluşturabilmektedir. Bu da MBE’i yeni cihaz tasarım ve katman yapılarını araştırmak için güçlü bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır.

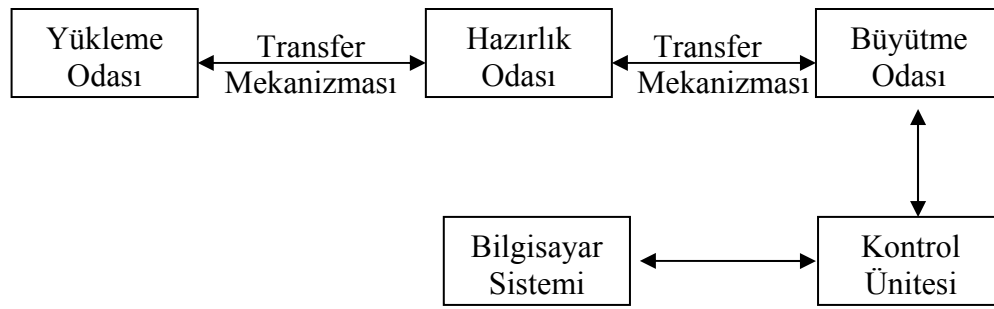
MBE sisteminde, yüksek vakum altında potalarda tutulan ve sistemin adını aldığı moleküler demetler alttaşa yönlendirilmiştir. Gönderilen moleküler demetteki atomlar alt tabakanın yüzeyine yapışarak birikmiş madde tabakasını oluştururlar. Büyütülen filmler tek kristal özelliğindedir. Bu sayede yarıiletken çoklu yapılar, ince filmler, mikron mertebesinde çok hassas bir şekilde elde edebilmektedir. Büyütme oranı tipik olarak birkaç Å/s mertebesinde olmaktadır[59]. Böylece büyütülen filmin yüzeyi çok düzgün olur.

MBE teknolojisi sayesinde kristal büyütme mekanizmaları kontrol edilebilir olmuştur. MBE teknolojinin GaAs katmanları büyütme için sağladığı önemli olan avantajları aşağıdaki gibidir:

- 1- Ultra yüksek vakum (UHV) (Toplam basınç $< 10^{-10}$ Torr) sayesinde ortamdan gelen istenmeyen katkılar ile birleşim olmaksızın yüksek saflıkta kristal büyütme izin verir.
- 2- Yüzeyde düzgün tabakalar oluşturmak için büyütme öncesinde, hazırlık odasında ve yüksek vakum ortamında taban numunenin (alttaşın) ısıtılması ($\sim 400^\circ\text{C}$) ile kirliliklerden arındırılabilir.
- 3- Üretilen numunedeki birleşimi oluşturan elementlerin birbirleri arasında meydana gelebilecek etkileşimi göz ardı edilecek seviyelere çekebilmektedir.
- 4- RHEED tekniği kullanılarak büyütme esnasında büyüme oranının kontrol, katman oluşum aşamaları ve yüzey kalitesi hakkında bilgi edinilebilir.
- 5- MBE'de büyüme hızı $1\mu\text{m/saat}$ veya tek katman/saniye civarında ayarlanabildiğinden tabakalar büyütme oranı sadece birkaç atom kalınlığında güvenilir bir şekilde imal edilebilmektedir.
- 6- Büyütme sürecinde düşük büyütme oranı katkı konsantrasyonu oranlarını kontrol edilebilmeye imkân sunar.
- 7- Ga, As ve diğer bileşenlerin, moleküler akışların (akı yoğunluklarının) kontrolü bireysel kaynaklarla sağlanır.
- 8- MBE yönteminde kaynak kesicilerinin hızlı bir şekilde hareket edebilmesi ($< 1\text{s}$) tabaka kalınlık hassasiyeti oldukça ileri düzeyde ayarlanmaktadır.
- 9- Katman (Epitaxial) büyütme şartlarında çeşitlilik sağlar (yükleme sıcaklığı, ana ve saf bileşenlerinin bileşimi)
- 10- Büyütme işlemi sırasındaki bütün aşamaların tam otomasyon ile yapılıyor olduğundan büyütme işleminin kontrolü tam olarak sağlanabilmektedir.
- 11- MBE kendi içindeki bölmeleri sayesinde numunenin müteakip defalarca tavlamlarını imkan verir.
- 12- Çevreye zararlı maddeler yayılmamaktadır.

MBE sisteminin düşük sıcaklıkta GaAs (LT-GaAs) tabakalarının büyütülmesi için sağladığı avantajlar aşağıdaki gibidir[60].

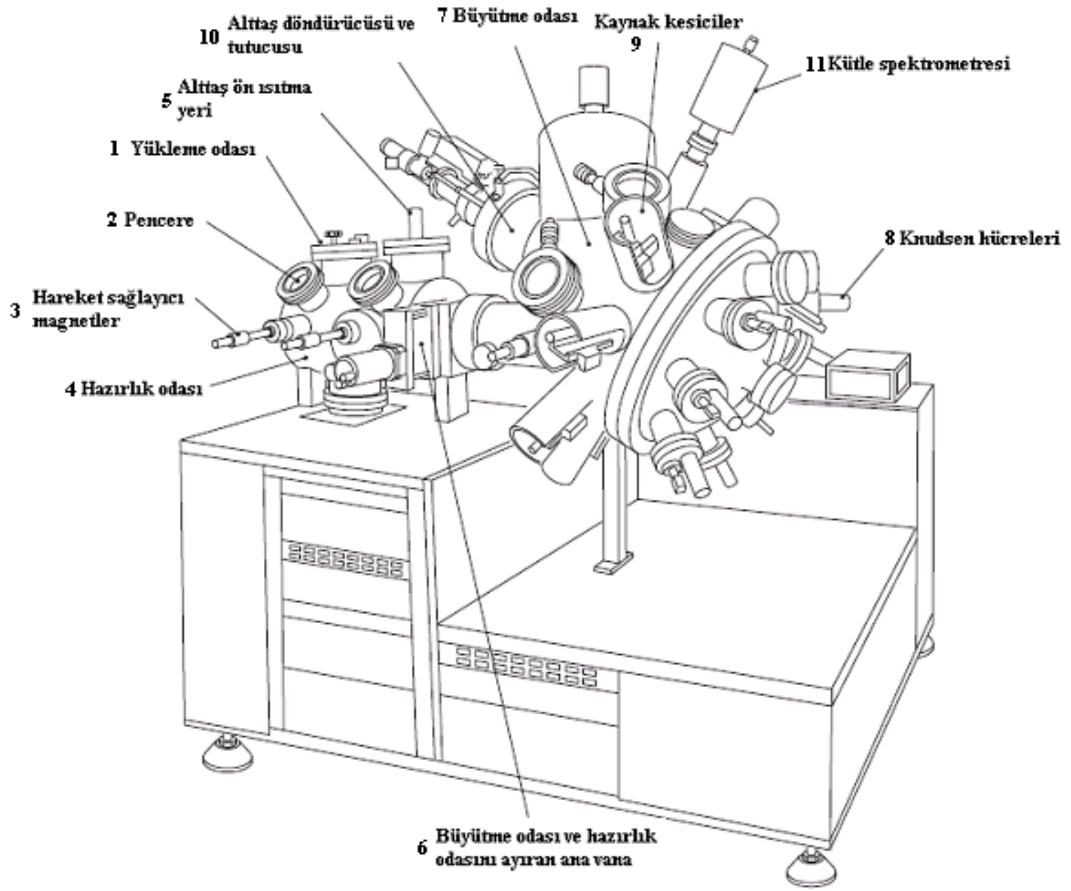
- 1- Büyütme esnasında alttaş sıcaklığı $t_g = 150\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında ayarlanabilir.
- 2- Arseniğin atmosferde bulunabilecek olası oksidasyon ürünlerini kaldırmak için alttaşların hazırlanma metodu yüzeylerin yüksek saflığını sağlar.
- 3- Galyum akı yoğunluğu $J_{Ga} = 10^{14} - 10^{15} \text{ atom/cm}^2\text{s}$ aralığı içindedir.
- 4- Arsenik ve Galyum akılarının birbirlerine oranı (J_{As}/J_{Ga}) 1-30 arasındadır.
- 5- Galyum akısı, Galyum Arsenid'in büyüme oranı ile sınırlıdır. GaAs katmanların büyümesi ($1\mu\text{m}$) çoğunlukla 1 saati bulur.



Şekil 4.2. MBE sisteminin blok gösterimi

MBE sistemleri özel üretim cihazlar olup, modüler bir yapıya sahiptirler. Laboratuarda kullandığımız MBE sistemi, yükleme odası, hazırlık odası, büyütme odası, kontrol ünitesi, bilgisayar sistemi olmak üzere 5 ana modülden oluşmakla birlikte bunlara eklenip çıkartılabilen diğer modüllerden oluşmaktadır.

Yükleme, hazırlık ve büyütme odası modüllerinin arasında numuneyi taşıma işlemini gerçekleştiren bir transfer mekanizması vardır. Bu mekanizmanın hareketi magnetler aracılığı ile sağlanmaktadır(Şekil 4.3(3)). Ayrıca bu modüllerin yüksek vakum şartlarında olmasını sağlayan pompa sistemleri mevcuttur.



Şekil 4.3. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi[61]

4.1.1. Yükleme odası

Yükleme odası üzerine kristal büyütmenin yapıldığı alttaşların atmosfere açıldığı giriş – çıkış birimidir. Bu işlem için elle kontrol edilen elektrik motorulu bir asansör mekanizması kullanılır(Şekil 4.3(1)). MBE sistemimizde asansör mekanizması 5 adet alttaş yüklenebilecek bir rafı barındırır. Uygun vakum şartlarında şekil 4.3(1)’de görülen yükleme asansörü açılarak alttaşın hazırlık odasına yüklenmesini sağlar. Yükleme odası bir O-ring vana ile hazırlık odasından ayrılmıştır. Şekil 4.3(1)’de görülen yükleme odasına alttaşları içeren kasetler raflara yüklendiği zaman, yükleme odasının kapağı kapatılır. Yükleme odası $\sim 10^{-9}$ mbar’lık basınçlara düşecek

şekilde turbo pompası yardımıyla vakumlanır. Bunun nedeni sistem içine kirliliğin girmesini minimum hale getirmektedir.

4.1.2. Hazırlık odası

Hazırlık odası, alttaşın ilk temizleme işleminin yapıldığı bölümdür. MBE sisteminde, büyütme esnasında, yüksek vakum seviyelerine kısa sürede düşürülebilmesi için büyütme odası ve hazırlık odası kapalı devre çalışma mantığı ile birbirlerinden bir vana ile ayrılmaktadır. Şekil 4.3(6)'da görülen bu vanalar kapatıldıktan sonra hazırlık odasının basıncı $\sim 10^{-10}$ mbar seviyelerine düşene kadar pompa yardımıyla vakumlanır. Çoğunlukla alttaş üzerinde bulunan yapı yarı-yalıtkan(SI) – GaAs ile GaAs'dir. Numune büyütme öncesinde, alttaşın yapısına bağlı olarak 1 yada 2 saat ısıtılarak alttaşın yüzeyinde bulunan su buharı ve kaba kirliliklerin temizlenmesi sağlanır. Bu işlemle kirliliklerin büyütme odasına girerek büyütülecek numune içinde safsızlıklar oluşturulması engellenmiş olur.

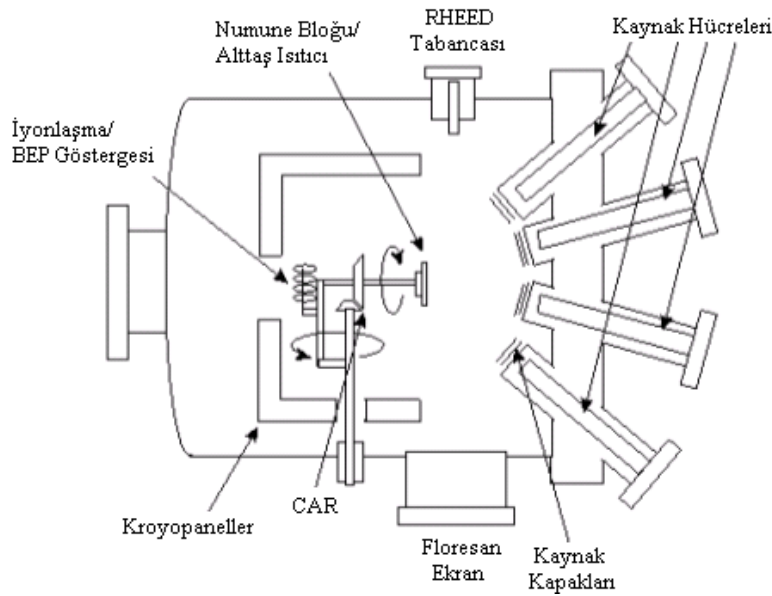
4.1.3. Büyütme odası

Alttaş büyütme işleminden önce alttaş tutucusunda bulunan ısıtıcının üzerine yatay olarak yerleştirilir. Daha sonra alttaş kaynak hücreleri tam karşısında olacak şekle getirilir. Alttaş tutucu mekanizma kendi etrafında dönebilmektedir. Şekil 4.3(10)'da görülen alttaş döndürücü mekanizma, alttaş üzerine gelen akının homojen dağılması için kullanıldığı gibi bu döndürme işlemi aynı zamanda RHEED ölçümlerinin yapılabilmesi için gerekli olan hizalamanın yapılmasında sağlar. Alttaşın yerleştirildiği kısım yani alttaş tutucu tantalum ısıtıcı ile ısıtılır. Termoçiftleri aracılığı ile sıcaklık kontrolü sağlanır. Bunlara ilaveten alttaşı yükleme ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreler, hücre kapakları(kesiciler), RHEED cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, akı ölçümü için iyon sayacı ve pencereden oluşmaktadır.

Büyütme odasında vakumu sağlayan iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası, turbo pompası ve cryo pompası vardır. Ayrıca sistemde büyütme yapılıyor iken

büyütme odasının dış kısmında bulunana ceket içinde sıvı azot dolandırılarak ek vakum sağlanır.

Gazi Üniversitesi Fizik bölümüne bağlı ileri teknolojiler laboratuvarında bulunan V80H MBE sisteminde 10 adet kaynak hücre içermektedir. Grup-III kaynakları olarak Al, Ga ve In bulunmaktadır. Katkı (dopant) kaynakları olarak, Si ve Be kullanılmaktadır. Grup-V kaynakları olarak As-Cracker, fosfat kaynağı olarak GaP ve Azot kaynağı olarakda Radyo-Frekans(RF) plazma kaynağı bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Büyütme odasının grafiksel gösterimi[61]

MBE sisteminde moleküler demet akışı elde etmek için katı halde bulunan kaynak malzemelerin bir kap içerisinde ısıtılarak gaz fazı ile yoğunlaşma fazı arasında dengede bulunması gerekir. Bazı kaynak malzemelerinin bu dengeye ulaşması için hücre sıcaklığı 1400°C'lere çıkmasıyla beraber potaların kimyasal yapısında bozulma ve gaz çıkışı olmayan malzemeden yapılmış olması gerekir. MBE sistemlerinde, kaynak materyalleri Pyrlotic Boron Nitride (PBN) malzemeden yapılmış potalara konulur. Bu potaların içine yerleştirildiği hücreler ise Knudsen yapıdadır. Potaların içine konan kaynak malzemelerin cinsine ve hücrenin alttaşa göre konumuna bağlı

olarak MBE sisteminde, silindirik ve konik şeklinde iki tür Knudsen hücre kullanılmaktadır.

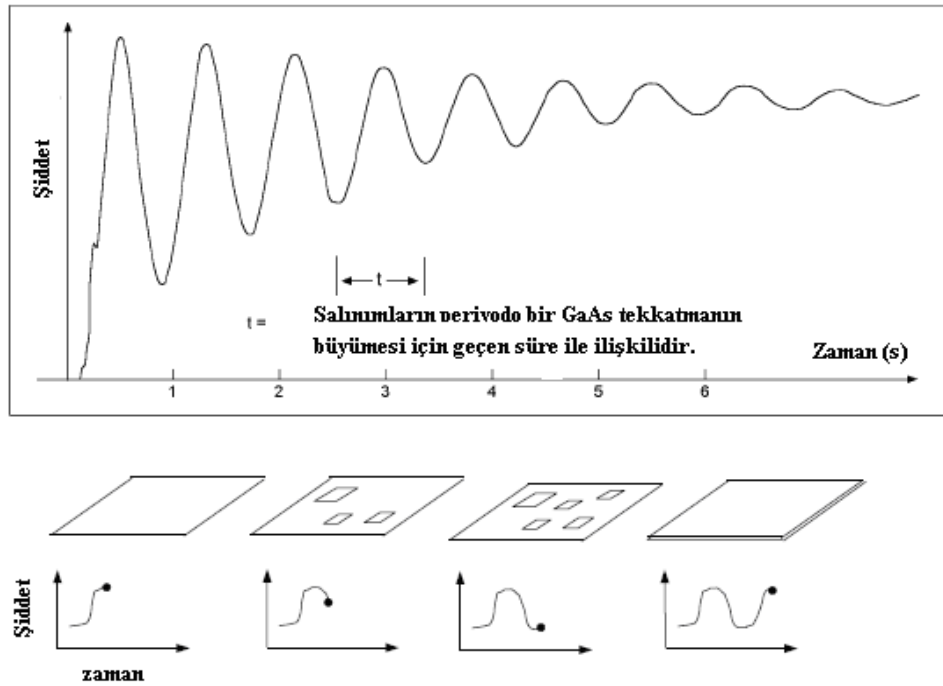
Knudsen hücre içinde kaynak malzemenin termodinamik olarak gaz fazı ile yoğunlaşma fazı dengede kalabilmesine yardımcı olmak için hücrede oldukça küçük bir çıkış aralığı vardır. Bu sayede denge basıncı bozulmamaktadır. Knudsen hücrelerin içindeki malzemenin sıcaklıkliğini denge konumunda tutabilmesi ve hücrenin her yerine nüfus edebilmesi için sarmal bir yapıda ısıtıcı - soğutucu yapıyı bünyesinde ihtiva eder. Her bir hücrenin ısıtma işlemi tantalum ısıtıcılar ile sağlanır. Soğutma işlemi ise hücrenin bağlı olduğu gömlekte (chamber) dolaşan azot gazı ile yapılır.

MBE sisteminde akının kontrolü için knudsen hücrelerin ağzına yerleştirilmiş kaynak kesiciler kullanılır. Yüksek vakum ve sıcaklık altında kaynak kesicilerin arızalanmaması için kesicilerin açılıp kapanmasında hava akımı ve bu akımı kontrol eden vanalar yardımıyla yapılır. Şekil 4.4'te kaynakların önünde görülen kaynak kesiciler 1 saniyeden daha kısa bir sürede açılıp kapanabilmektedir. Kaynak kesiciler büyüteceğimiz yapının kompozisyonunu yapmak için malzemelerin akısının kontrolünde kalınlık ve katkı miktarını belirlememizde büyük avantaj sağlamaktadır. Altaşa yönelmiş hücrelerden gelen malzemelerin kontrolünde bir sıkıntı olursa diye Altaş üzerinde ayrıca bir akı kesici bulunmaktadır.

As Kırma hücresi : Arsenik, V grubu elementi olduğundan bağ kurma isteği çok fazladır. Bu yüzden tetramer (As_4) şeklinde kullanılırlar. Araştırmaların sonucu tetramer (As_4) moleküllerine göre dimer (As_2) moleküllerinin 2 kat daha fazla altaşa tutunabildiklerini göstermiştir. Bunun anlamı As_2 ile büyütülen As bazlı numuneler elektriksel ve optiksel olarak daha kaliteli olmaktadır. MBE 'in dış kısmında bulunan arsenik hücresi iki bölümden oluşur. Birinci bölümde yüksek saflıkta bulunan As_4 molekülleri bir kanal aracılığı ile ikinci bölüme aktarılırken ikinci bölümde bulunan ısıtıcı düzeneğinin sıcaklığı ($900^{\circ}C$) ile As_2 dimer veya ikili moleküllere parçalanır. Böylelikle “cracker veya kırıcı” olarak adlandırılan As_2 moleküllerine çevirme işlemi gerçekleştirilmiş olur.

RHEED cihazı : RHEED (yüksek enerjili elektronların yansıma kırınımı) sistemi kabaca bir elektron tabancası ve RHEED deseninin görünmesini sağlayan bir fosfor ekrandan oluşmaktadır. Elektron tabancasından üretilen elektron demeti büyütülen numune üzerine gelir ve kırılan elektron demeti fosfor ekranda bir desen oluşturur. V80H sisteminde kullanılan RHEED sistemi 15 keV' luk bir elektron tabancasına sahiptir.

RHEED cihazı, MBE sistemi için hayati öneme sahiptir. RHEED sinyalinin salınım periyotları bir tek katmanın büyüme süresiyle orantılıdır. RHEED penceresinde oluşan kırınım deseni büyütme işlemi yapılmadan önce ve büyütme işlemi sırasında yüzeyin durumu hakkında bilgi verir.



Şekil 4.5. GaAs için RHEED salınım eğrilerinin periyodu ve zamanla değişimi[62].

Görüntülü iyon ölçer (MIG) : Büyütme odasında bulunan kaynak hücrelerden çıkarak alttaş üzerine yönelecek olan moleküllerin demetin akısını, Görüntülü İyon Ölçer (MIG) adı verilen bir iyon sayacı ile ölçülür. Akı ölçümü Tungstenden yapılmış bir filamentin tuzaklama yapması prensibine dayanır. Akı ölçümü yapılmak

istendiği zaman MIG moleküler demetin önüne getirilerek ölçüm alınır. MIG, iyon sayacı olarak kullandığı filamentin arkasında, ölçüm sırasında gelen demetin alttaş veya alttaş ısıtıcısının üzerine gelmesini engellemek için koruyucu bir plakaya sahiptir. Laboratuvarımızda bulunan MIG sistemindeki MIG sayacı üzerine düşen moleküler akıyı basıca dönüştürerek ekranda belirtir.

4.1.4. Kontrol  nitesi

Kontrol  nitesini kendi içinde 4 kısımda ayırabiliriz. Bunlar

- 1- Sistemde bulunan pompaların ve elektromekanik sistemlerin kontrol kartları bulunur.
- 2- Sensör, transdüser, gibi fiziksel büyüklükleri elektrik sinyallerini çevirerek ölçüm yapılabilmesini sağlayan elektronik kontrol kartları ve ölçüm cihazları bulunur.
- 3- Elektronik kartlardaki kontrol uçlarını, üzerindeki panelden düğmeler yardımı ile PID kontroller gibi üniteler ile bilgisayar olmaksızın sistemi yarı otomatik kontrol etmemizi sağlayan düzenekler bulunur.
- 4- Sistemin bilgisayarlı kontrolü için, sistemdeki düzeneklerden gelen elektrik sinyallerini bilgisayara, bilgisayardan gelen elektrik sinyallerini düzeneklere aktaran elektronik kartları üzerinde bulundurur.

4.1.5. Bilgisayar sistemi

Kontrol  nitesinde bulunan elektronik kartlar aracılığı ile sistem hakkında toplanan bilgiler çeşitli haberleşme protokolleri kullanılarak bilgisayar sistemine aktarılır. Bilgisayar sisteminde işletim sistemi olarak IBM OS/2 yazılımı bulunur. Bu işletim sistemi aracılığıyla büyütme aşamalarında kaynak kesicilerin açma-kapama operasyonları, alttaşın döndürülmesi gibi işlemler sistem tarafından yazılımsal olarak kontrol edilmekte ve sistemden gelen datalar görüntülenmektedir. Ayrıca yazılım sayesinde ısıtıcıların sıcaklıkları ayarlanması gibi sürekli olarak kontrol edilmesi gereken üniteler istenilen değer aralıklarında tutulması sağlanır.

4.2. Düşük Sıcaklıkta GaAs 'in MBE Yöntemiyle Büyütülmesi

Büyütme için kullandığımız numune, 3 inç'lik, yönelimli(100) ve 350 μm kalınlığında, iki yüzeyide cilalanmış epi-ready denilen yarı-yalıtkan (SI) GaAs alttaş üzerine büyütüldü. GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400°C'de 2 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve kaba kirliliklerden temizlenmesi sağlandı. SI-GaAs alttaş ilk önce 400°C'ye 0,2°C/s'lik artış faktörüyle ısıtıldı. Daha sonra alttaş sıcaklıkları 0,1°C/s'lik artış faktörüyle numune 690°C'ye çıkarıldı. Amacımız alttaş üzerindeki oksit tabakasının yok edilmesini sağlamaktır. RHEED gözlemlerini yaparak bu sıcaklıkta oksit tabakasının kalktığı gözlemlendi. Bu işlem bittikten sonra alttaş sıcaklığı yapının büyütülme sıcaklığı olan 250°C'ye düşürüldü. Ardından alttaş yapı üzerine ilk olarak 3000 Å (0,3 μm) kalınlığında katkısız GaAs tampon tabakası, daha sonra 1000 Å (1 μm) kalınlığında Arsenikce zengin GaAs tabaka büyütüldü. Büyüme işleminde alttaş sıcaklığına bağlı büyüme rejimi şeması şekil 4.6'daki gibidir.

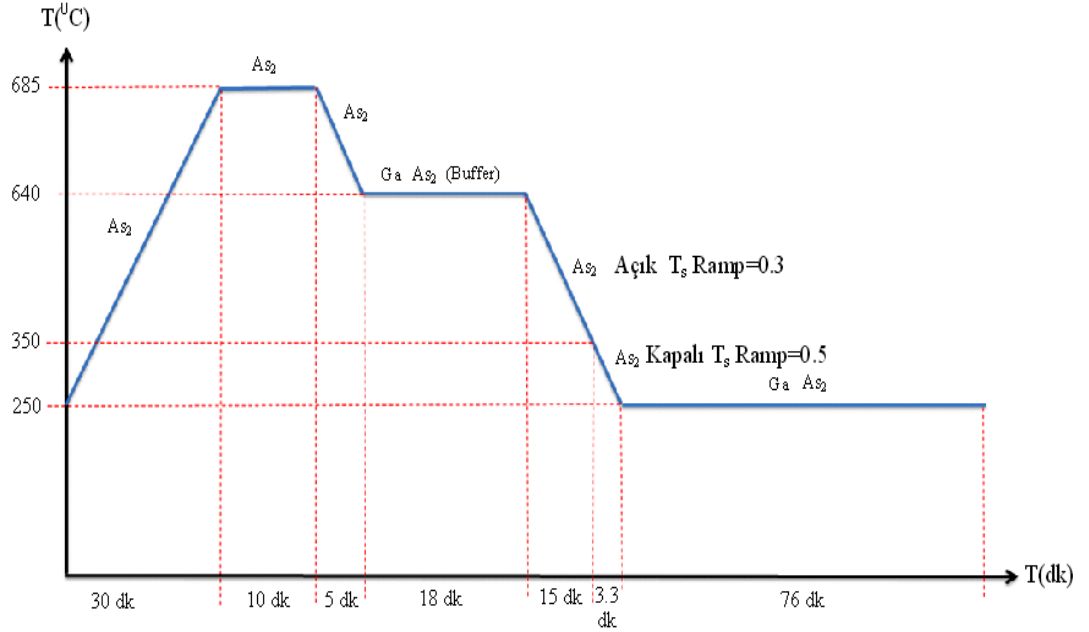


Şekil 4.6. GaAs için MBE'de büyüme periyodu

Büyütme aşamalarında alttaş yüzeyine gelen moleküler demetlerin, birleşme için kristal kafes ve termal emilime bağlı olarak yüzey göçleri olabilir. Burada atomların domino gibi dizilebilmesi alttaş yüzey sıcaklığına bağlıdır. MBE ile büyütme sıcaklığının düşük seviyelerde gerçekleştirilebilmesi sayesinde atomlar alttaş

yüzeyine geldiğinde yüzey göçü olmadan bağlanıp kalacağından bağ yapmayan kristal yapı artar.

$T_{\text{subT}} = 630^{\circ}\text{C}$	; Tamponun büyütülmesi esnasında alttaş sıcaklığı
$T_{\text{sub-GaAs}} = 250^{\circ}\text{C}$	; GaAs yapının büyütülmesi esnasında alttaş sıcaklığı
$T_{\text{Ga}} = 918^{\circ}\text{C}$	2,78 A°/s ; Tamponun büyütülmesi esnasında GaAs sıcaklığı ve akısı
$T_{\text{Ga}} = 902^{\circ}\text{C}$	2,20 A°/s ; GaAs yapının büyütülmesi esnasında GaAs sıcaklığı ve akısı
$T_{\text{Ga}} = 630^{\circ}\text{C}$	; Büyüme esnasında Galyum potanın sıcaklığı
$T_{\text{As}} = 358^{\circ}\text{C}$	; Bulk Arsenik sıcaklığı
$T_{\text{As}} = 950^{\circ}\text{C}$	; Kırma bölgesi sıcaklığı (Bu sıcaklıkta As_2 üretilir)



Şekil 4.7. GaAs için MBE'de zamana bağlı büyüme periyodu

4.3. Büyütülen Numunelerin Tavlanması

Katmanların termal tavlanması, hole tuzaklama zamanları için önemli bir araştırma sebebidir. Tavlama ile elektrik direnç artar ve buda katmanın verimliliğini artırır. MBE sisteminde numunemiz 3" (inç) çapında alttaş üzerine büyütmesi yapıldı.

Numunemizin farklı sıcaklıklarda tavlama ile yapının değişimini inceleyebilmek için alttaşıımızın merkeze yakın kısımlarından 8 farklı 1x1 cm büyüklüğünde parçalar kesilerek alındı. Bu parçalardan 1 adedi tavlamanadan ayrılarak ölçümler için baz alınmak üzere ayrıldı. Kalan parçalarımız sırayla termal tavlama ünitesinde (RTA) vakum altında aşağıdaki sıralamada yazılı parametreler uygulanarak tavlama işlemleri gerçekleştirildi.

- 1- Numuneyi tavlama ünitesine yerleştirmeden önce sistem atmosfere açıldığında ortama kirli hava girmesini engellemek için tavlama ünitesine N₂ gazı verilir. Böylelikle kısmi olarak kirliliklerin önüne geçilmiş olur.
- 2- Numune tavlama ünitesinin tutucusuna yerleştirilir ve ünitenin kapağı kapatılır.
- 3- Mekanik pompa devreye alınarak tavlama ünitesini vakum tutması sağlanır. Mekanik bir pompa yardımıyla basınç düşürülmeye başlanmasının sebebi Turbo moleküler pompanın ortam basıncı 10⁻¹ mbar seviyelerine inilmeden çalıştırılmasının pompaya zarar vermesidir.
- 4- Tavlama ünitesini vakumu 10⁻¹ mbar seviyesine geldiğinde, Turbo moleküler pompa devreye alınır ve basınç 10⁻⁷ mbar düşene kadar beklenir.
- 5- İstenilen basınca ulaşıldığında yeniden ortama N₂ gazı verilir ki numune ısıtıcının yüksek sıcaklıklara çıktığında numunenin ısıtıcıya yapışmasını engellesin.
- 6- Isıtıcı ünitesi açılarak ısıtıcı sıcaklığının ayarlanan değere çıkması beklenir. Isıtıcı sistemi sıcaklığını 1'dakikada yaklaşık 50⁰C artırır.
- 7- İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında tavlama süresince beklenir.
- 8- Süre bitiminde ısıtıcının elektriği kesilerek sistem soğumaya bırakılır. Aynı zamanda ortama verilen N₂ gazı kesilir.
- 9- Turbo moleküler pompa kapatılır.
- 10- Mekanik pompa kapatılır.
- 11- Kapak vakumdan kurtulduğunda numune yerinden alınır.

Çizelge 4.1. Tavlama koşulları

Numune	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (Dakika)	Tavlama Ortamı	Tavlama Öncesi Basınç (mbar)	Tavlama Sırasında Basınç (mbar)	Isıtıcının Gerilimi (Volt)	Isıtıcının Akımı (Amper)
1.Numune	300	15	N ₂ 'li ortam	7.24x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻²	45.1	6.21
2.Numune	400	15		3.43x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻²	65.1	7.49
3.Numune	450	15		1.34x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻²	67.4	7.72
4.Numune	500	15		8.1x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻²	70.2	8.02
5.Numune	600	15		3.29x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻²	73.8	8.08
6.Numune	700	15		8.21x10 ⁻⁶	1.5x10 ⁻²	80.6	8.48
7.Numune	720	20		1.84x10 ⁻⁵	1.5x10 ⁻²	80.4	8.52

4.4. Yüksek Çözünürlükteki X – Işını Difraksiyonu (HR – XRD) Ölçümleri

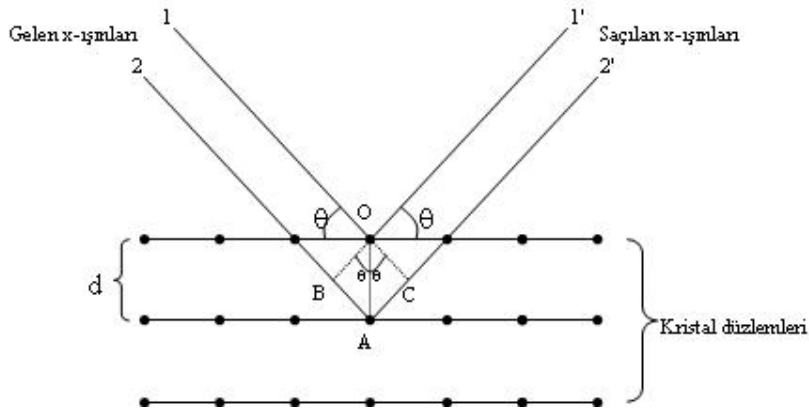


Resim 4.2. XRD cihazının resmi

Bir kristal yapı üzerine gönderilen X-ışınları demeti, kristal yapı içindeki atomlar tarafından saçılır. Bragg kanununa göre farklı atomik düzlemlerden saçılan ışınlar girişim yaparak birbirlerini kuvvetlendirmesi ile difraksiyon deseni oluşur. Numune hangi yapıda (saf, alaşım veya bileşik halde) olursa olsun daima karakteristik bir

difraksiyon deseni vardır. Bragg kanunu, kristal örgüde ortaya çıkan periyodik yapılanmanın örgü noktalarını dikkate alır. Örgü noktalarına karşılık gelen atomik düzen önemli değildir, bu düzen sadece ortaya çıkacak yansımanın şiddeti üzerinde göreceli bir etkiye sahiptir. Şekil 4.8 'de görüldüğü üzere farklı düzlemlerden saçılan ışınlar arasındaki yol farkı kullanılan ışının dalga boyunun tam katlarına eşit olmalıdır. Numunenin düzlemi ve x-ışını kaynağı arasındaki açı θ , Bragg açısıdır. [62].

X-ışınları, epitaksiyel tabakaları delip geçer ve böylece hem filmin hem de alttaşın özelliklerini belirlemek için bilgi verir. Resim 4.2'de görülen XRD cihazı, $5\text{\AA}$ ve 400 nm arasındaki ince film ve çok katmanlı yapıların tabaka kalınlıkları ve $0\text{-}20\text{\AA}$ arasında yüzey pürüzlülükleri için iyi sonuç verir. İnce film numunelerini incelemek için XRD kullanılırken iletim için alttaş çok kalın olduğunda bu ölçümler için yansıma geometrisi kullanılır.



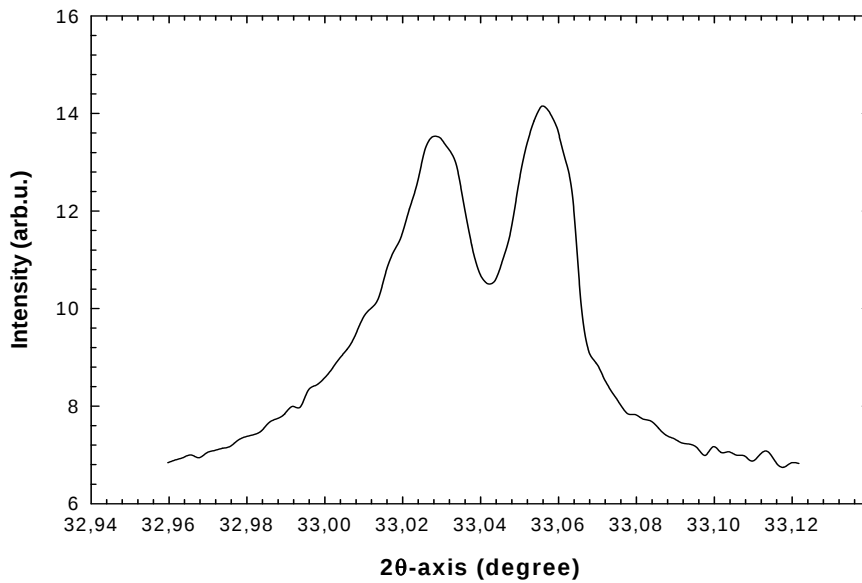
Şekil 4.8. Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması

Genellikle sıfır sıra piki bütün uydu pikleri arasında en yüksek şiddete sahiptir. X ışınları kaynak şiddetleri ile gözlenen uydu pikleri sayısı bağlantılı olduğunda, Uydu piklerinin şiddeti ara yüzey bileşimi ve pürüzlülük hakkında bilgiler verir. İnce filmin birim hücrenin şekli, simetrisi ve boyut olarak tayin edilir. Çoklu yapı tabakalardaki ölçümlerde filmde gelen ana difraksiyon piki çevresindeki uydu pikleri oluşur. Buradan elde edilen bilgiler kullanılarak numunenin kimyasal

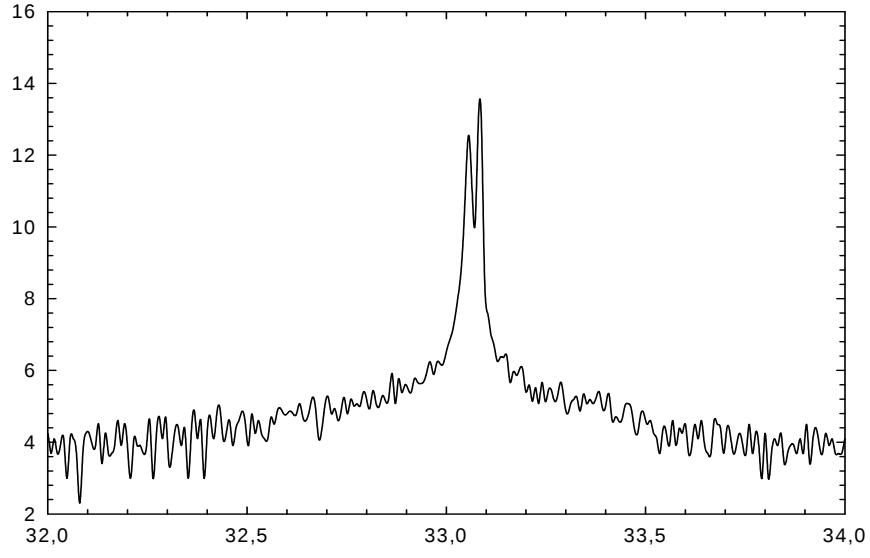
bileşenleri, kristal tabakanın kalınlığı, örgü kusurları ve örgü uyumsuzluğu gibi özellikler de belirlenebilir.

Çoklu heteroepitaksiyel tabakalarda süperörgü ölçümlerinde filmde gelen ana difraksiyon piki çevresindeki uydu pikleri bellidir. Yapılan ölçümlerde edilen difraksiyon desenlerinin simülasyonu epitaksiyel tabakanın kalınlık, ara yüzeylerinin kritik kimyasal, yapısal bilgileri, bileşik yüzdeleri, açısal pozisyonu ve örgü bozuklukları hakkında bilgi edinilir.

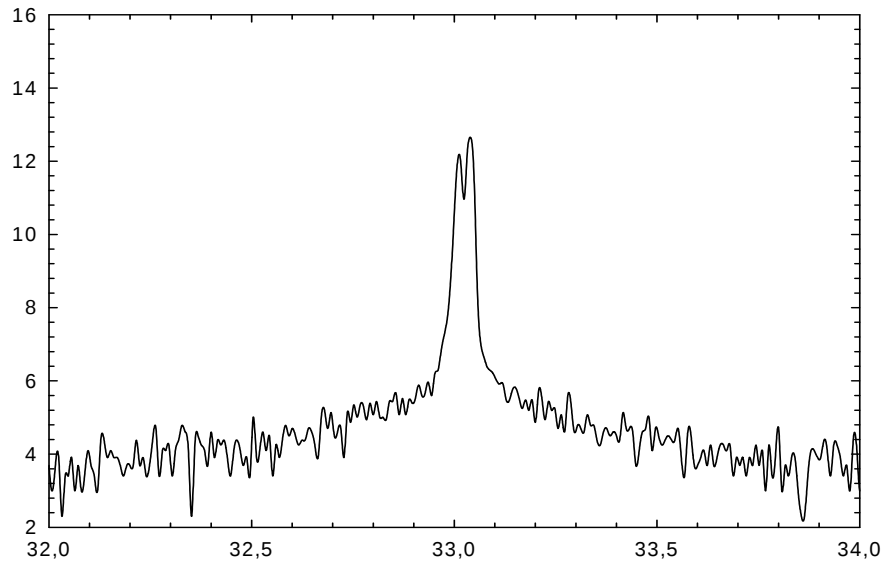
XRD ölçümleri sayesinde büyütülen numunedeki GaAs yapının stoichiometrisi hakkında bilgi toplamamıza yardımcı olur. Şekil 4.9’da tavlamanmamış numunemizde olduğu gibi 300°C (şekil 4.10), 400°C (şekil 4.11) ve 450°C (şekil 4.12) ‘de yapılan tavlamlarında da numunelerimizin XRD desenleri çift piklidir. Bu piklerden birincisi alttaş yapının piki olup ikinci pik epitaksiyel tabakaya aittir. Çift pik As akısının, Ga akısına göre gerekenden fazla olmasına bağlı olarak tabaka ve alttaşın örgü yapılarının farklı olması sonucu meydana gelir. Sol tarafta bulunan pikin tavlama sıcaklığı arttıkça GaAs ana pikine yaklaşarak onun altına girmesi yapının polimerleştiğini göstermektedir.



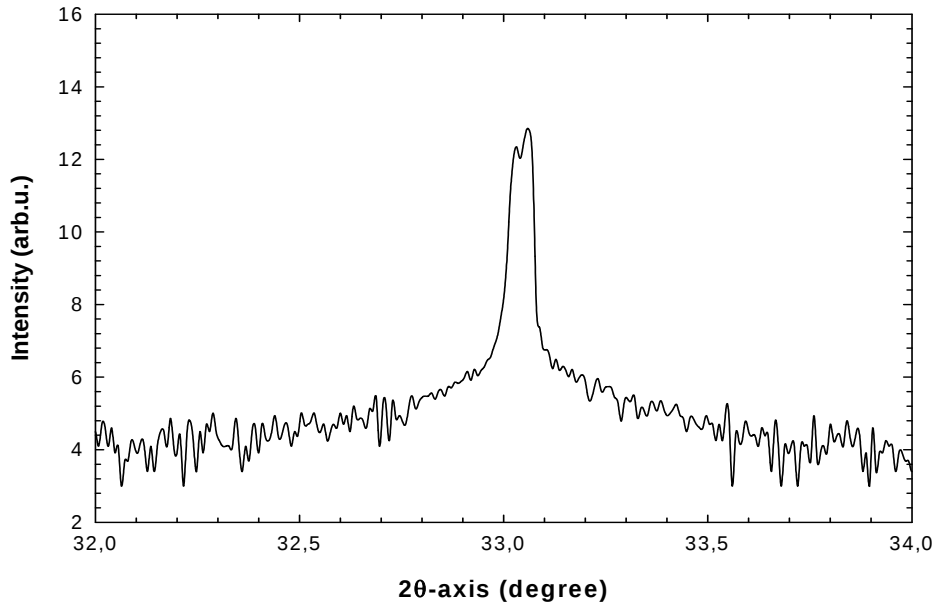
Şekil 4.9. Tavlamanmamış Numunenin HR – XRD deseni



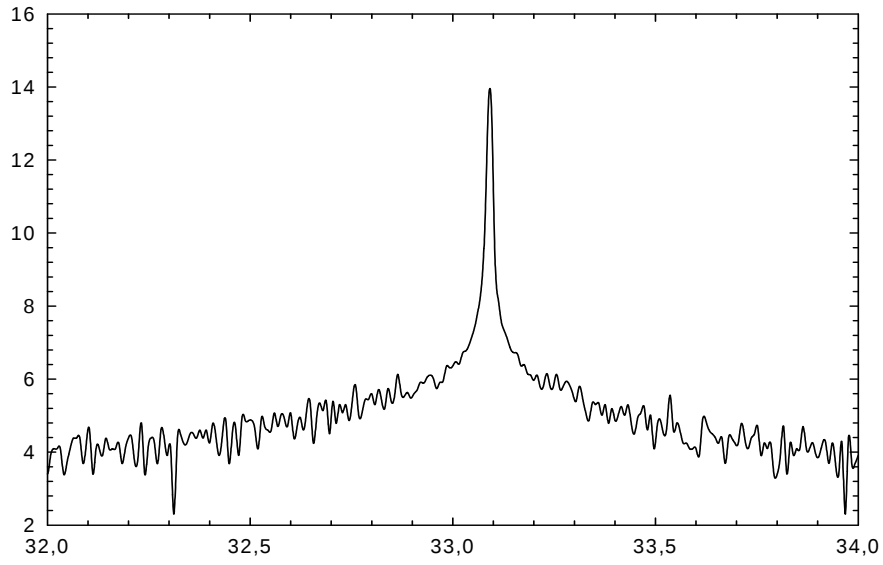
Şekil 4.10. 350 °C ‘de tavllanmış numunenin HR – XRD deseni



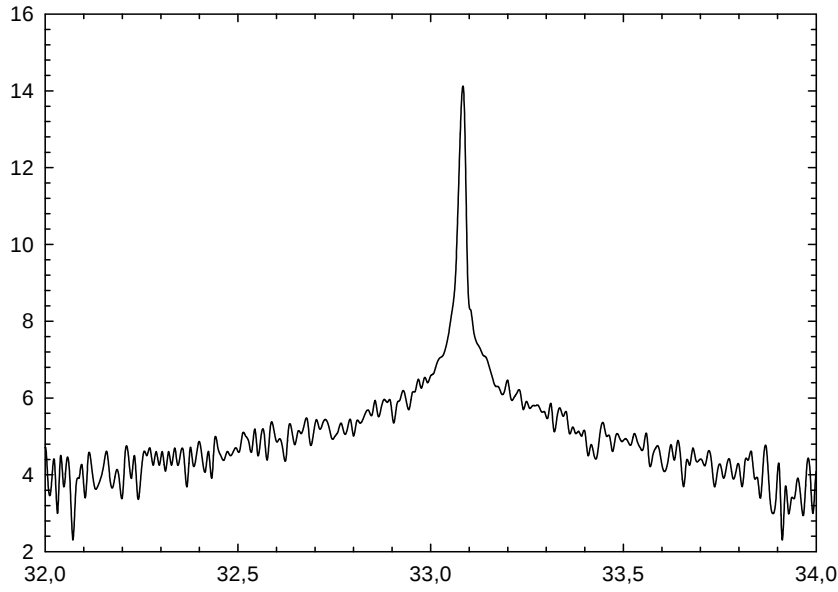
Şekil 4.11. 400 °C ‘de tavllanmış numunenin HR – XRD deseni



Şekil 4.12. 450 °C ‘de tavlanmış numunenin HR – XRD deseni

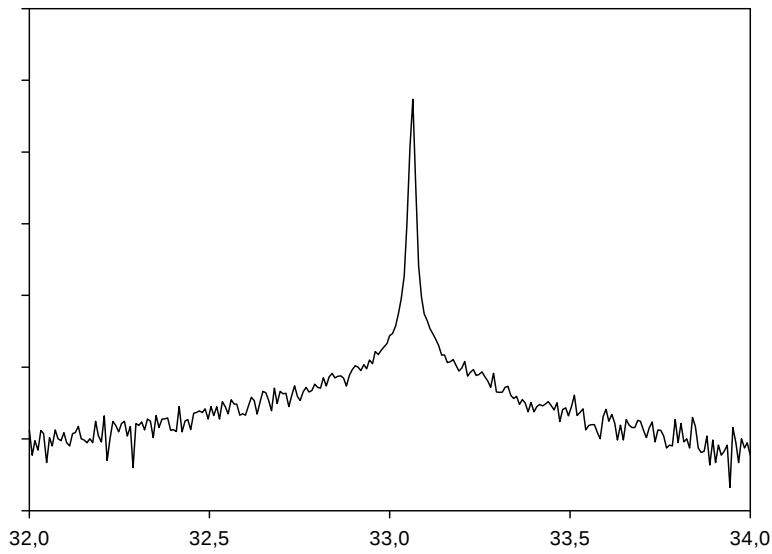


Şekil 4.13. 500 °C ‘de tavlanmış numunenin HR – XRD deseni

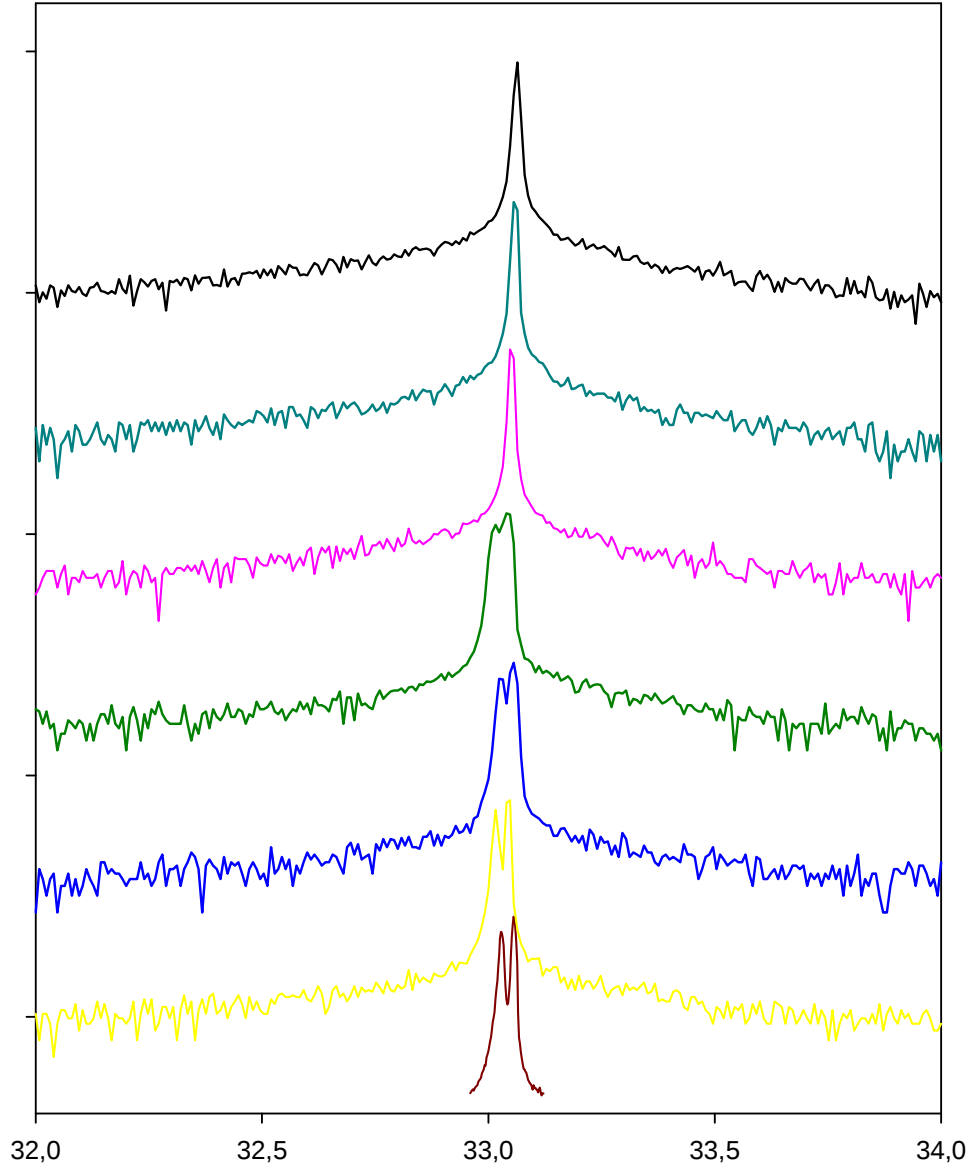


Şekil 4.14. 600⁰ °C de tavllanmış numunenin HR – XRD deseni

Tavlamaşı 500⁰C (şekil 4.13), 600⁰C (şekil 4.14) ve 700⁰C (şekil 4.15) ‘de yapılan numunelerin XRD desenlerinde tek pik görölmektedir. 700 °C’de 20 dakikalık tavlanan numunemizin diğere tavlamalardaki HR – XRD desenlere nazaran tek pikli ve bu piki şiddeti daha yüksektir.



Şekil 4.15. 700⁰ °C ‘de tavllanmış numunenin HR – XRD deseni



Şekil 4.16 . HR – XRD ile yapılan ölçümlerin tamamı

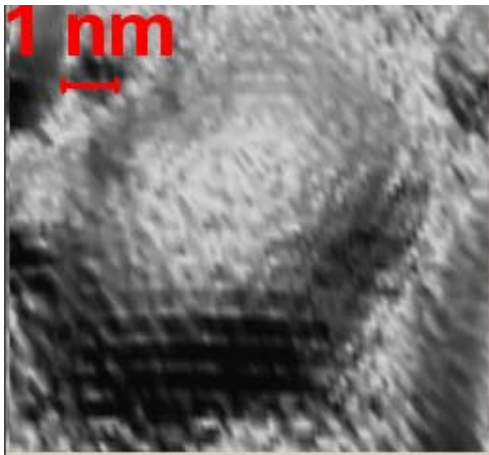
Şekil 4.16'daki grafiklerden de anlaşılacağı üzere tavlama sıcaklığının artması ile yapıdaki düzensizlikler ortadan kalkmaktadır. Fakat burada unutulmaması gereken husus yapı fazla yüksek ısılarda epitaksiyel tabakadaki arsenik yapı enerjiye doyduğunda As_2 molekülleri ortamdan ayrılacak bunu müteakip galyum atomları kendi aralarında birleşmeye başlayarak yapı deforme olacaktır.

4.5. Optik Mikroskop İncelemeleri

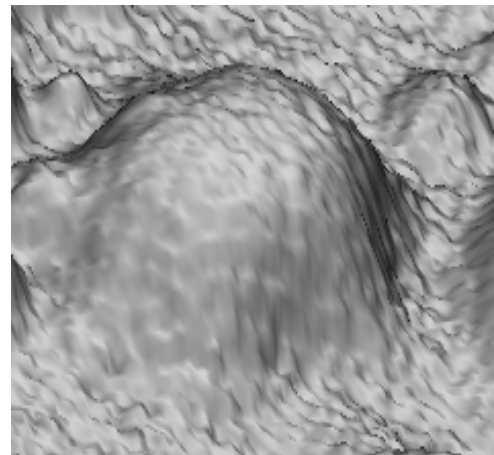


Resim 4.3. Leica DMLM Optik mikroskobu

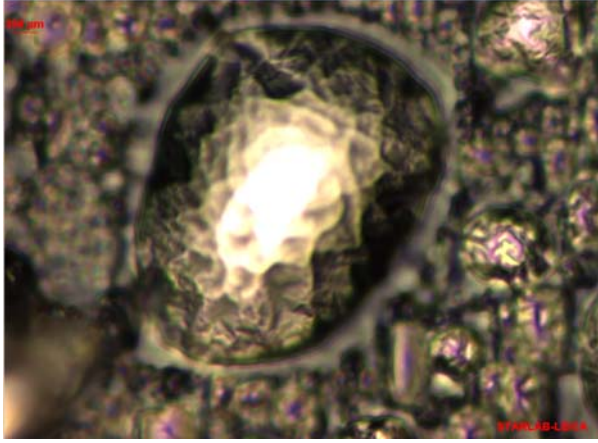
Leica DMLM optik mikroskobu modüler bir dizaynı, kararlılığı, ergonomik olması gibi pek çok özelliğe ile modern bir sistemdir. Leica, farklı yapılandırma özelliği sayesinde sanayi ve laboratuarlardaki mikroskop uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Optik mikroskop, materyalin yüzey incelemelerde geniş bir uygulama alanı sağladığından mikrosistemlerde, mikroyapının ölçümü, litografi ve analizi için kullanılır. Resim 4.3 de görüldüğü gibi değiştirilebilir mercek yapısı, gelişmiş kamera ve simülasyon programı sayesinde numune analizlerinde iyi bir görüntü kalitesi sağlayarak iş yükünü azaltan bir cihazdır. Optik mikroskopun verdiği ölçüm bilgileri sınırlı olmasına rağmen hızlı ve direkt olması bakımından değerli bir ölçüm metodudur.



(a)



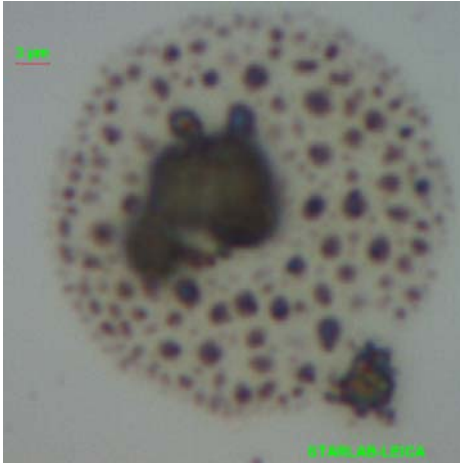
(b)



(c)

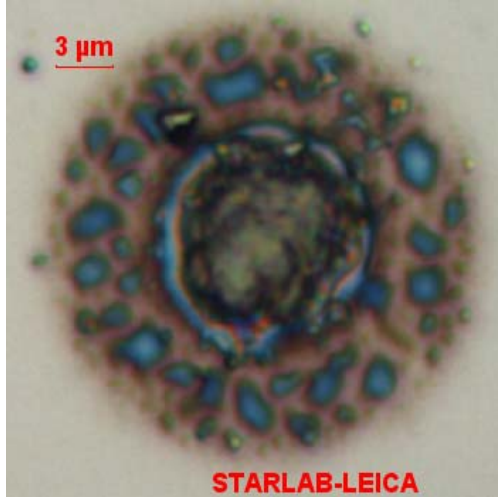
Resim 4.4. (a-b-c) Optik mikroskopta As küme (cluster) resimleri

Resim 4.4(a-b) 'de görülen presibitatlar literatür araştırmalarındakilere benzerlik göstermektedir. Resim 4.4(c) 'de görülen kümecik ise aşırı sıcaklık etkisi ile As_2 moleküllerinin yüzeyden uzaklaşarak geride kalan Galyum atomunun oluşturduğu bir kümelenmedir.

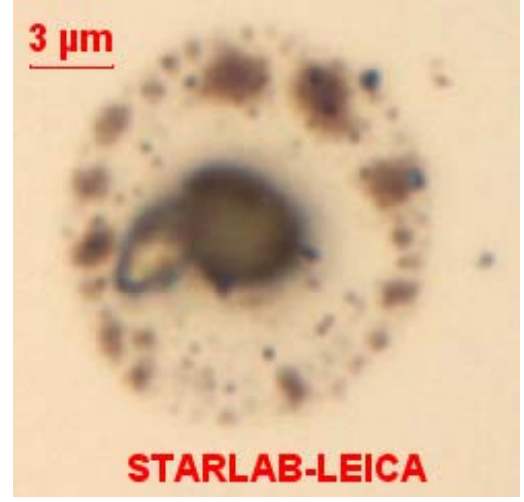


Resim 4.5. Optik mikroskopta $450^{\circ}C$ 'de tavlanmış numunedeki As kümelenmesi

Optik mikroskopun merceklelerinin büyütme oranı 10X2X100 ayarlı iken resim 4.5'de görülen görüntüler alınmıştır. Koyu renke görülen As kümelenmelerinin büyüklük olarak çok az miktardadır. Burada dikkatimizi çeken önemli unsur As presibitatların numunemizin yüzeyinde çukur olan bölgede görülmesidir. Bir nevi doğal kusur etrafında yapay bir kusur oluşmuştur.



(a)



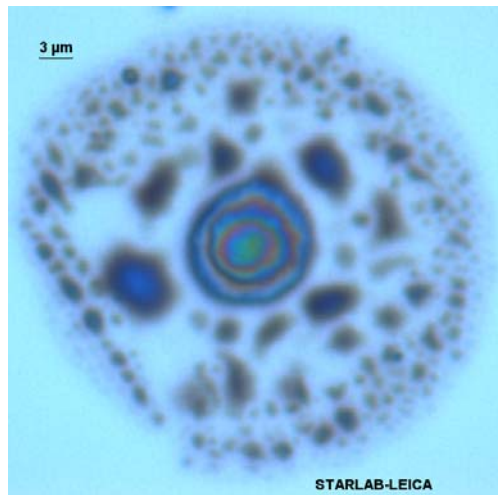
(b)



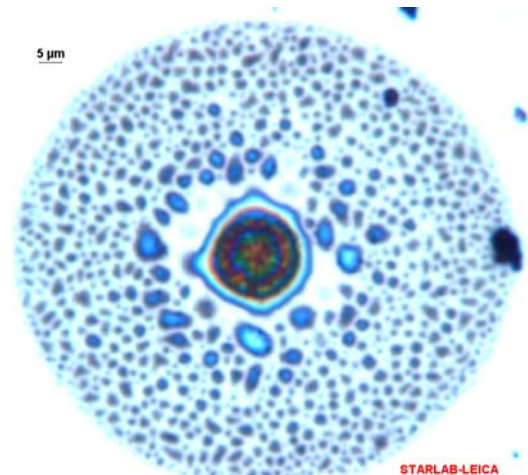
(c)



(d)



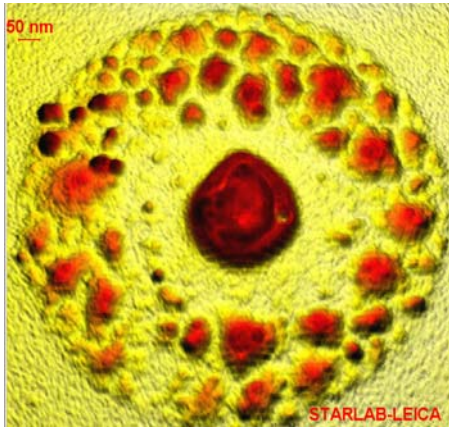
(e)



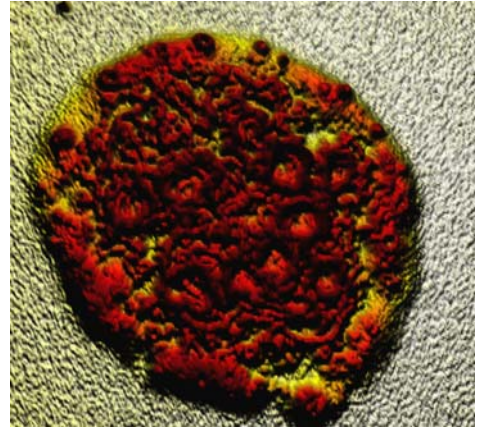
(f)

Resim 4.6. (a,b,c,d,e,f) 500 °C 'de tavlınmış numunedeki çeşitli As kümelenmeleri

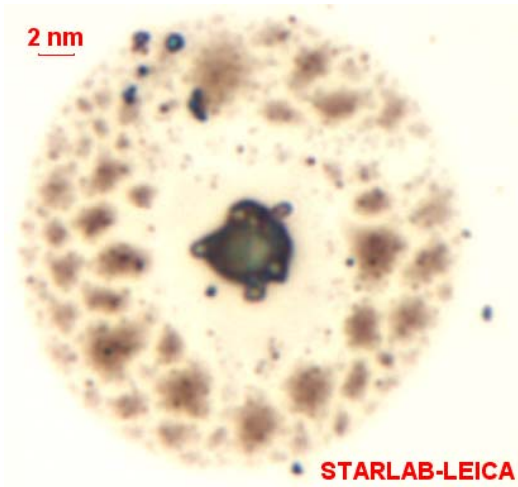
Resim 4.6 (a,b,c,d,e) 'da görülen görüntüler optik mikroskop merceklein büyütme oranı (10X1X50) ayarlı iken alınmıştır. Koyu kahve renke görülen ve yüzey kusurlar etrafında oluşan As kümelenmeleri sayı ve büyüklük olarak çok az miktardadır.



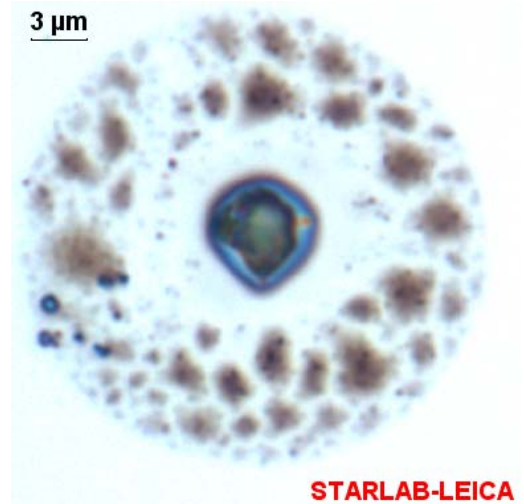
(a)



(b)



(c)



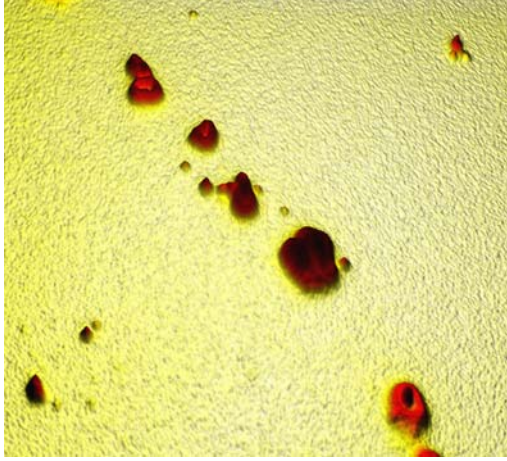
(d)

Resim 4.7. (a,b,c,d) 500 °C 'de tavlannmış numunedeki çeşitli As kümelenmeleri

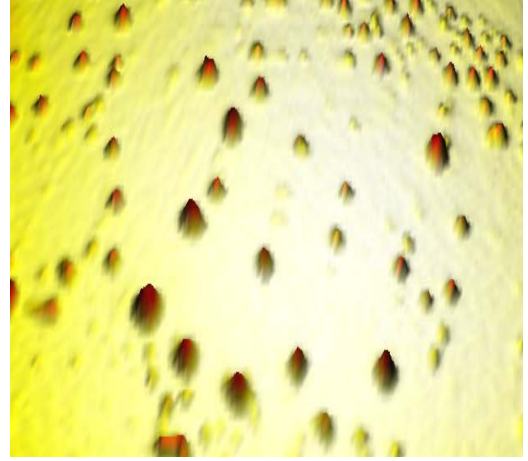
Resim 4.7 'de görülen görüntüler optik mikroskop büyütme oranı 10X2X100 ayarlı iken alınmıştır. Resimlerden de görüldüğü üzere kusurların etrafında oluşan As kümecikleri çok sayıda ve belirgin bir büyüklükte olmaya başlamıştır.

Resim 4.8 'de görülen görüntüler optik mikroskop büyütme oranı (10X2X100) ayarlı iken alınmıştır. Resim 4.6 daki görüntülere göre daha belirgin büyüklükte. Ayrıca

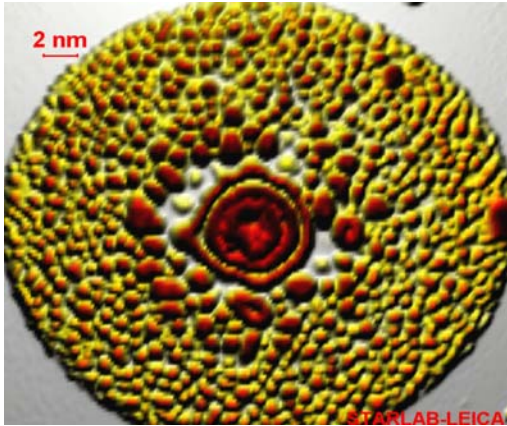
yüzey kusur olmayan bölgelerde As kümeleri oluşmaya başlamıştır. Kümelenmelerin büyüklük düşüktür.



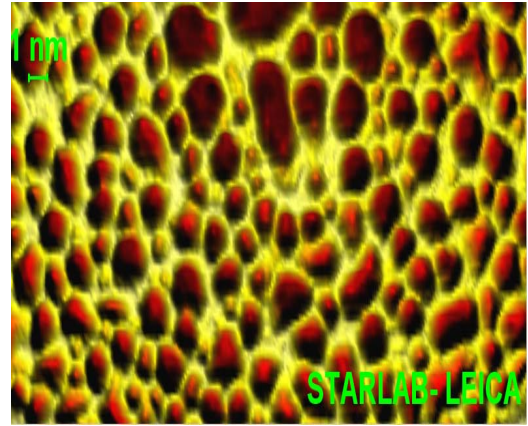
(a)



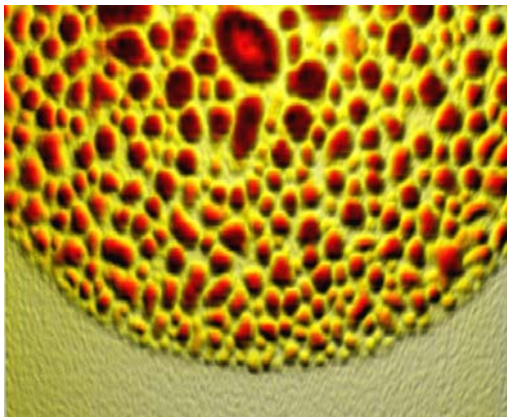
(b)



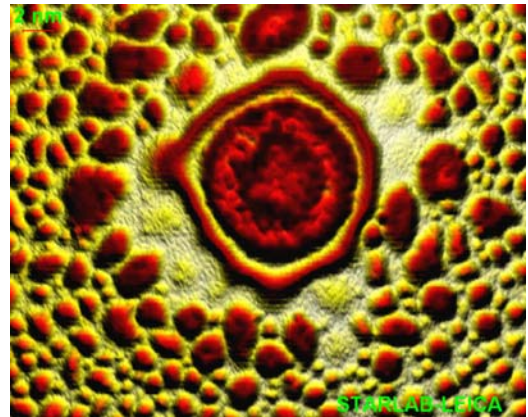
(c)



(d)

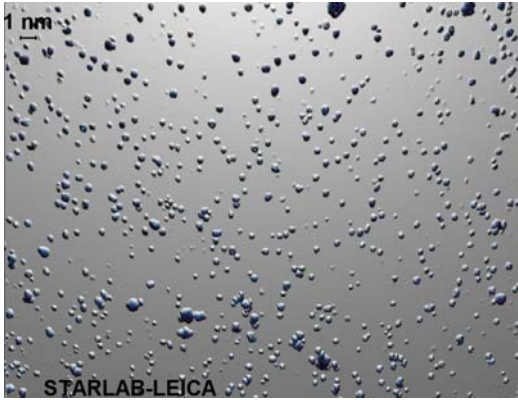


(e)



(f)

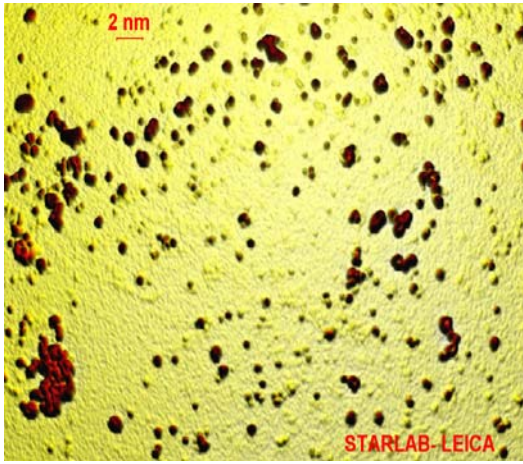
Resim 4.8. (a,b,c,d,e) 700 °C 'de tavllanmış numunedeki çeşitli As kümelenmeleri



(a)



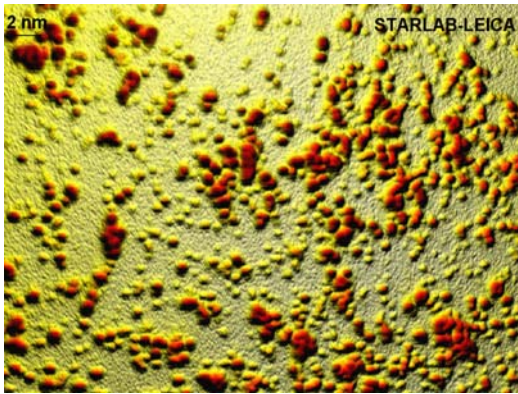
(b)



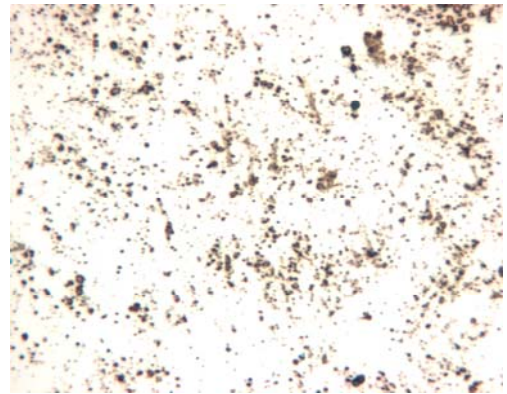
(c)



(d)



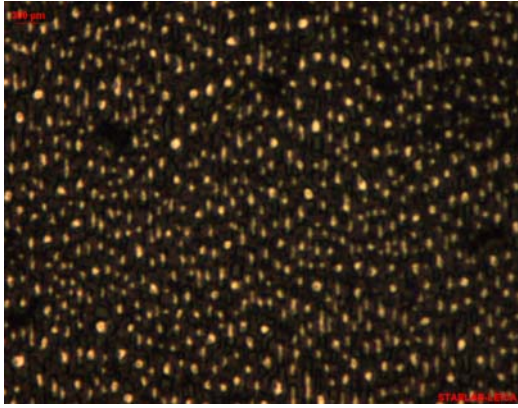
(e)



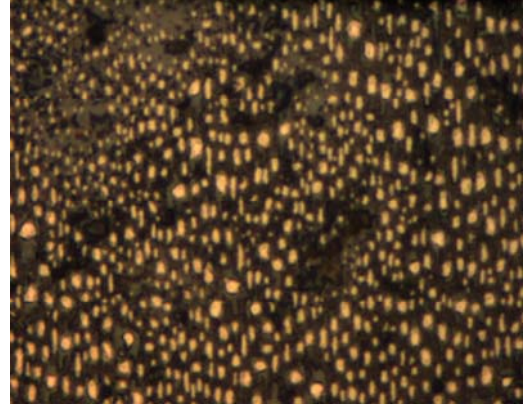
(f)

Resim 4.9. (a,b,c,d,e,f) 700 °C 'de tavlanmış numunedeki çeşitli As kümelenmeleri

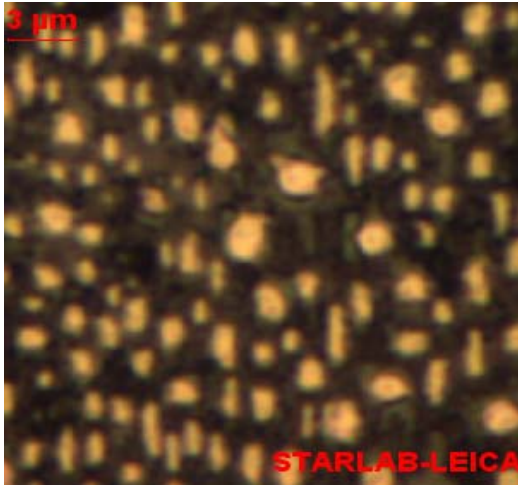
Resim 4.9 da görülen görüntüler optik mikroskop büyütme oranı (10X2X100) ayarlı iken alınmıştır. Artık yüzey kusurlarından bağımsız olarak As kümelenmeleri numune yüzeyinin her bölgesinde düzensiz bir yapıda görülmektedir.



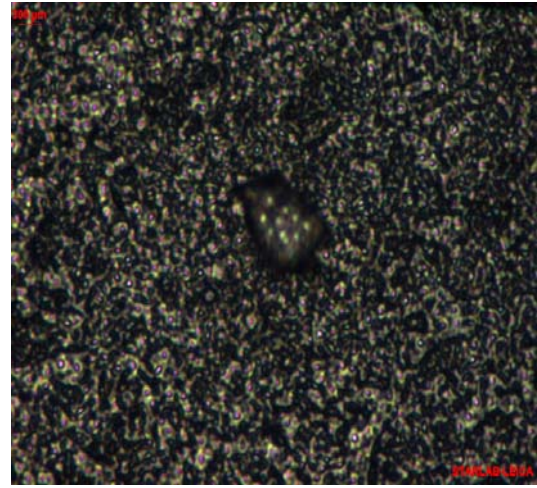
(a)



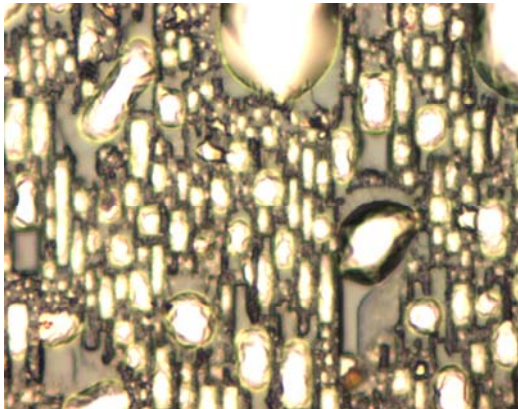
(b)



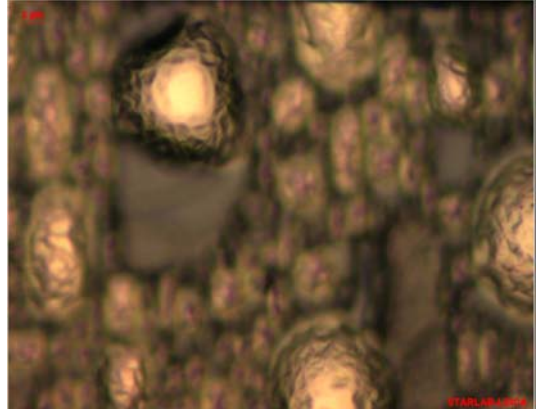
(c)



(d)



(e)

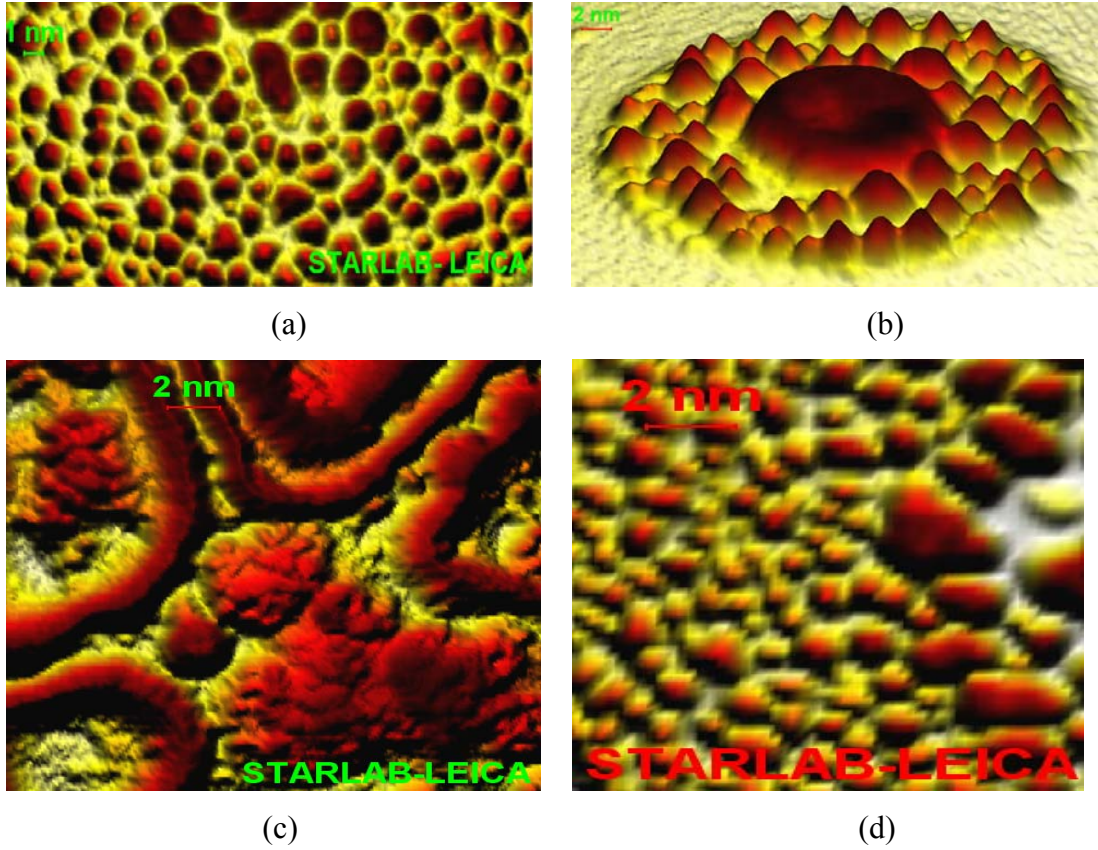


(f)

Resim 4.10. (a,b,c,d,e,f) 800 °C 'de tavlanmış numunedeki kümelenmeler

Resim 5.8'de görülen görüntüler optik mikroskop büyütme oranı 10X2X100 ayarlı iken alınmıştır. 500 °C deki numune görüntüsüne nazaran 600 °C Koyu kahve renke

RTA tavlama ünitesinde 800°C de tavlama istenirken numunemizdeki As atomlarının buharlaşarak geride kalan Ga tabakanın yüzeydeki durumunu göstermek.



Resim 4.11. Optik mikroskopta 700°C de 20 dakika tavllanmış numune As kümelenmesi

LT-GaAs katmanlarının yapılarının optik mikroskopla yapılan yüzey taramasında tavllanmış malzemede epitaksiyal katmanın bulkü üzerinde rasgele dağılmış arsenik çökeltilerinin (adacıkları) bir izlenimini ortaya çıkarır. Adacıkların tipik konsantrasyonu ve ortalama lineer boyutu sırasıyla $\sim 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ ve $\sim 5\text{ nm}$ 'dir. Bu nicelikler $J_{\text{As}}/J_{\text{Ga}}$ oranı ve büyütme, t_g ve tavlama, t_a , sıcaklıkları ve zamanı ile ilgili ve bağlıdır. Adacıkların hacim üzerinde bazı limitlerde değişen boyutlarıyla rastgele dağılımını gösterir. Adacık yapıların analizi, adacıkların boyutlarına bağlı olarak kristal yapılara sahip olduğunu gösterir. Çapı 3 nm 'yi aşan adacıklarda arseniğin altıgen örgü karakteristiğine sahiptir, ki bunlar bir dereceye kadar adacık-matris ortak yüzeyinde esnek şiddetlerle bozar. Daha küçük adacıklar için, örgü kübiğe yaklaşır.

Bu adacıkların atomik yapısındaki veri LT-GaAs katmanlarının elektronik yapı ve özelliklerini modelleme de kullanılır.

Moiré saçakları adacıkların kristal yapılara sahip olduğunu gösterir. Adacıkların yapısının boyutlarına bağlı olduğunu gösterdi. Çapı 3 nm'yi aşan adacıklar arseniğin altıgen örgü karakteristiğine sahiptir, ki bunlar bir dereceye kadar adacık-matris ortak yüzeyinde esnek şiddetlerle bozar. Daha küçük adacıklar için, örgü kübiğe yaklaşır. Bu adacıkların atomik yapısındaki veri LT-GaAs katmanlarının elektronik yapı ve özelliklerini modelleme de kullanılır.

6. SONUÇ

Terahertz alıcı ve vericiler konusunda yaptığımız literatür araştırmasında iyi bir fotokarıştırıcı yapının hem alıcı hemde verici olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Kullanacağımız çalışma frekansı belirlendikten sonra fotokarıştırıcının anten şekli ve boyutlarının hesaplaması yapılabilmektedir. Yüksek frekanslarda anten yapıya uygulanacak enerji miktarının artması anten yapısı ile alıcı-verici arasındaki transmisyon hattının empedans uyumu ve verimi düşürme sorununu yarıiletken yapının üzerine antenin elektrot yapısı büyütülerek (gömülerek) vericiden uygulanan enerjinin tamamı elektromanyetik sinyallere dönüşümü sağlanmıştır. Fotokarıştırıcı yapılardaki önemli bir unsur THz frekanslarını yük empedansı yüzünden kontrol etmenin zorluğudur. Taşıyıcı yoğunluğunun ölçeği pikosaniye'nin üzerinde olması durumunda çok hızlı lazer sinyalleri oluşur. Buna bağlı olarakta parametrelerin belirlenmesi kritik bir önem taşımaktadır

Yüksek frekanslarda elektrik enerjisi antenin ortasından beslendiği ve her alternansta kutuplar değiştiği için terahertz sinyal üretiminde yarıiletken kristallerin kullanılması doğru bir seçimdir. Bununla birlikte kristallerin büyüme mekanizmasındaki değişimlerin nano boyuttaki ölçümünü mümkün kılan cihazların sayısının az olması, ayrıca geniş bant terahertz sinyalleri algılama yöntemleri hakkında bilgi ve yöntemlerin kullanılacağı materyaller az bulunması araştırmaları sınırlamaktadır. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar bize terahertz sinyalleri algılamak üzere üretilen yapıların yüksek tekrarlama frekansında çalışabilmesi için elektron tuzaklama parametreleri oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

Günümüzde kristal yapılar içinde LT-GaAs yapıdaki iyonlaştırılmış arsenik üst yüzey kusurlarının, elektron tuzaklama işlemini ultra kısa zaman diliminde (<1 ps, pikosaniyeden düşük) gerçekleştirdiği genel olarak kabul görmüştür. LT-GaAs nonstoichiometric bir yapıda olmasına bağlı olarak yapıdaki yük yaşam zamanları, başka bir deyişle stoichiometry ile alakalı kusurlar kontrol edilebilir. Düşük sıcaklıkta büyütülmüş GaAs katmanlarında nötr üstyüzey kusurların As/Ga

yoğunluğu iyonlaştırılmış kusurlarındakinden oldukça fazladır. Buda LT-GaAs’de dengede olmayan taşıyıcı yoğunluğunun rahatlatma zamanını öne çıkartmaktadır.

Yapılan bir çok deneysel çalışma sonucunda As cluster oluşumunun kontrol edilmesi için gerekli parametrelerin akı oranı J_{As}/J_{Ga} , büyütme sıcaklığı (t_g), tavlama sıcaklığı (t_a) ve tavlama süresine bağlı olduğunu göstermiştir. Her bir büyütmenin, aşırı arsenik yoğunluğuna karşılık gelen bir sınırlama değerine sahip olduğu; SI-GaAs alttaş katmanının aşırı arseniği yakalaması $t_g < 300$ °C’de başladığı ve $t_g \approx 150$ °C’de maksimuma seviyeye ulaştığı literatür çalışmalarından bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda büyütme yöntemi kullanılarak, GaAs yapı yüzeyine gönderilen arsenik fazlalıklarının yüzeyde homojen olmayan bir dağılım sergilemesini sağlanır. Ardından büyüme işlemi bittikten sonra yapı tavlama yaparak kümelenmelerin oluşması (büyümesi) sağlanır. Çalışmamızda MBE ‘de büyüttüğümüz LT-GaAs numunemizden kestiğimiz 7 adet parçayı (1cmx1cm) farklı sıcaklıklarda tavlayarak yapımızdaki sıcaklığa bağlı değişimleri ile buna bağlı olarak yüzeyde Arsenik kümeciklerinin oluşumunu inceledik.

RTA sistemi ile N₂’li ortamda tavladığımız ilk 2 numunemizin (350 °C, 400 °C) XRD analizlerinde çift pik görülmekle birlikte tavlamadan tuttuğumuz numuneye göre sıcaklık arttıkça soldaki pikimiz sağa doğru kaydığı gözlenmektedir. Bu 2 numunemiz üzerinde optik mikroskop ile yaptığımız incelemelerde ise gözle görülür bir As kümelenmesine rastlanmamıştır. , 450 °C ‘de tavladığımız numunemizin XRD analizinde soldaki pikin ana pik altına tam girmemesine karşılık (piklerin birleşerek tek pik olmaya başladığı) optik mikroskopla yaptığımız yüzey taramasında bir iki yüzey kusur etrafında As kümelenmesi görülmektedir. 500 °C ve 600 °C lerdeki tavlamalarda kümelenme oluşumlarının yüzeye dağılmaya başladığı ve belirgin bir şekil aldığı gözlenmektedir. 700°C’de 15 dakika tavladığımızda numunede kümelenme sayısının fazla olmasına karşın kümeciklerin boyutunun yeteri kadar büyük olmadığı gözlemlenmiştir. 700°C’de 20 dakika tavladığımız farklı bir numunede tavlama süresini artmasına bağlı olarak kümelenmelerin çok sayıda, çaplarının ve büyüklüklerinin diğer numunelerden fazla olduğu görülmüştür. 800 °C de 20 dakika tavladığımız numunede ise epitaksiyel tabakanın deforme olduğunu As

moleküllerinin yüzeyi terk etmesi sonucu Galyum kümelenmesinin oluştuğu görülmektedir.

Tavlama sürecinde 500⁰C'nin üstüne çıkılmasıyla, GaAs yapı yüksek mükemmeliyet derecesine sahip olmakla birlikte nano boyutlardaki arsenik kümelenmeleri madde eriyiğinde oluşur. Tavlama sıcaklığındaki artışına paralel olarak As adacıklarının sayı ve boyutlarında artış olmakla birlikte LT-GaAs katmanlarının 800 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda termal tavlama tam anlamıyla büyüme yüzeyindeki As yoğunluğunda bir düşüşe sebep olur.

Oluşan numuneler üzerinde optik mikroskoptaki gözlemlerimizi HR–XRD ile yaptığımız ölçümlerde desteklemektedir. Yapılan tartışmalar sonucunda 700 °C de tavlanan numunenin terahertz anten yapımında kullanabileceği gibi bu malzemenin transistörlerde, mikro-elektronik devrelerde tampon katmanlar olarak, hızlı opto-elektronik aletlerin yaygın bir kısımda ise aktif katmanlar gibi kullanımın son derece ilgi çekici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Dragoman, D., Dragoman, M., “Terahertz fields and applications”, *Progress in Quantum Electronics*, 28:1,66 (2004).
2. Krotkus, A., Bertulis, K., and Adomavicius, R., “Low temperature MBE grown GaAs for terahertz radiation application,” *Proceeding 12th GaAs Symposium*, Amsterdam, 287-290 (2004).
3. Mikulics, M., Marso, M., Adam, R., Fox, A., Förster, A., Kordos, P., “Low temperature grown MBE GaAs for terahertz Photmixers”, *Proceedings EDMO*, Vienna, 155-159 (2001).
4. Mikulics, M., Camara, I., Marso, M., Fox, A., Förster, A., Kordos, P., “Generation of THz radiation by photomixing in low-temperature grown MBE GaAs”, *ASDAM*, Slovika, 231-234 (2004).
5. Mikulics, M., Michael, E., A., Schieder, R., Stutzki, J., Güsten, R., Marso, M., Van der Hart, A., Bochem, H., P., Lüth, H., and Kordoš, P., “Traveling-wave photomixer with recessed interdigitated contacts on low-temperature-grown GaAs”, *Applied Physics Letters*, 88:041118-1,3 (2006).
6. Hu, Q., “Terahertz quantum cascade lasers and electronics academic and research staff”, Terahertz Quantum Cascade Lasers and Electronics 28, *Photonic Materials, Devices and Systems*, RLE Progress Report, 145:1-28 (2004).
7. Sakai, K.(Ed.), and Tani, M., “Introduction to terahertz pulses”, Terahertz Optoelectronics, *Springer*, New York, 1,6,23 (2004).
8. Philipp, M., Graf, U., U., Wagner-Gentner, A., Rabanus, D., and Lewen, F., “Compact 1.9 THz BWO local-oscillator for the great heterodyne receiver”, *Infrared Physics & Technology*, 51-59, (2007).
9. Ulu, Y., A., “Al_xGa_{1-x}As/GaAs Nano yapıların kimyasal aşındırma yöntemi ile incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-6 (2007).
10. Erdoğan, K., “Antenler-1(İnce Antenler)”, *Karadeniz Teknik Üniversitesi M.M.F. Elk. Hab. Müh.*, Trabzon, Genel Yayın No : 165, 48: 1-15 (1993).
11. Akkaya, İ., “Anten teorisine giriş”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi*, İstanbul,1-212 (1989).
12. Ahmed, S., Melloch, M., R., McInturff, D., T., Woodall, J., M., and Harmon, E. S., “Low-temperature grown GaAs tunnel junctions,” *Electron. Letters*, 33:1585-1587 (1997).

13. Kono, S., Tani, M., Gu, P., and Sakai, K., "Detection of up to 20 THz with a low-temperature-grown GaAs photoconductive antenna gated with 15 fs light pulses," *Applied Physics Letters*, 77:4104-4106 (2000).
14. Shen, Y., C., Upadhyaya, P., C., Linfield, E., H., Beere, H., E., and Davies, A., G., "Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters", *Applied Physics Letters*, 83:3117-3119 (2003).
15. Hu, Q., "Terahertz quantum cascade lasers and real-time T-rays imaging", *Electrical and Computer Engineering seminar*, Madison, 1-31 (2007).
16. Gregory, I., S., Baker, C., Tribe, W., R., Bradley, I., V., Evans, M., J., Linfield, E., H., Davies, A., G., and Missous, M., "Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission", *IEEE- Journal Of Quantum Electronics*, 41:717-728 (2005).
17. Piao, Z., Tani, M., and Sakai, K., "Carrier dynamics and terahertz radiation in photoconductive antennas", *Japanese Journal of Applied Physics*, 39:96-100 (2000).
18. Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K., and Nakashima, S., "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs", *Applied Opt.*, 36:7853-7859 (1997).
19. Auston, D., "Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon", *Applied Physics Letters*, 26:101-103 (1975).
20. Lee, C., H., "Picosecond optoelectronic switching in GaAs", *Applied Physics Letters*, 30:84-86 (1977).
21. Auston, D., H., Johnson, A., Smith, P., R., Bean, J., C., "Picosecond optoelectronic detection, sampling, and correlation measurements in amorphous semiconductors", *Applied Physics Letters*, 37:371-373 (1980).
22. Smith, P., R., Auston, D., H., Johnson, A., M., Augustyniak, W., M., "Picosecond photoconductivity in radiation-damaged silicon-on-sapphire films", *Applied Physics Letters*, 38:47-49 (1981).
23. Mourou, G., Stancampiano, C., V., Antonetti, A., Orszag, A., "Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser-driven semiconductor switch", *Applied Physics Letters*, 39:295-296 (1981).
24. Heidemann, R., Pfeiffer, T., Jager, D., "Optoelectronically pulsed slot-line antennas", *Electron. Letters*, 19:316-317 (1983).
25. Smith, P., R., Auston, D., H., Nuss, M., C., "Subpicosecond photoconducting dipole antennas", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24:255-260 (1988).

26. Tani, M., Herrmann, M., Sakai, K., "Generation and detection of terahertz pulsed radiation with photoconductive antennas and its application to imaging", *Measurement Science and Technology*, 13:1739–1745 (2002).
27. Mikulics, M., Wu, S., Marso, M., Adam, R., Förster, A., van der Hart, A., Kordoš, P., Lüth, H., and Sobolewski, R., "Ultrafast and Highly Sensitive Photodetectors With Recessed Electrodes Fabricated on Low-Temperature-Grown GaAs", *IEEE Photonics Technology Letters*, 18: 820-822 (2006).
28. Nemec, H., Pashkin, A., Kuzel, P., Khazan, M., Schnull, S. and Wilke, I., "Carrier dynamics in low-temperature grown GaAs studied by terahertz emission spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, 90:1303-1307 (2001).
29. Liu, D., and Qin, J., "Carrier dynamics of terahertz emission from low-temperature-grown GaAs", *Applied Optics*, 42:3678-3683 (2003).
30. R.-H. Yuang, Y.-J. Chien, J.-L. Shieh, and J.-I. Chyi, "High-speed GaAs metal-semiconductor-metal photodetectors with recessed metal electrodes", *Applied Physics Letters*, 69:245–247 (1996).
31. Cui, L., J., Zeng, Y., P., and Zhao, G., Z., "Terahertz pulse generation with LT-GaAs photoconductive antenna", *Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*, 87:143 (2006).
32. Cai, Y., Brener, I., Lopata, J., Wynn, J., Pfeiffer, L. and Stark, J., B., "Coherent terahertz radiation detection: direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection", *Applied Physics Letters*, 73:444-446 (1998).
33. Liu, T., A., Tani, M., Pan, C., L., "THz radiation emission properties of multienergy arsenic-ion-implanted GaAs and semi-insulating GaAs based photoconductive antennas", *Journal of Applied Physics*, 93:2997-3000 (2003).
34. Brown, E., R., Smith, F., W., and McIntosh, K., A., "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors," *Journal of Applied Physics*, 73:1480-1485 (1993).
35. Welker, H., Naturforsch, Z., "Über neue halbleitende Verbindungen", *Zeitschrift Naturforschung*, A7:744-749 (1952).
36. Sze, S., M., *Semiconductor Devices Physics and Technology*, **J. Wiley**, New York, 18-39 (1985).
37. Pierret, R., F., *Semiconductor Fundamentals*, **Addison-Wesley Publishing**, New York, 1-19 (1989).

38. Kayali, S., "GaAs MMIC reliability assurance guideline for space applications", **JPL Publication**, NASA Lewis Research Center Shason Microwave Corporation, 16-22 (1996).
39. Williams, R., "Modern GaAs Processing Methods", **Artech House Publishers**, Dedham, MA, 1-437 (1990).
40. Casey, H.C., "Diffusion in III-V compound semiconductors", **Atomic Diffusion in Semiconductors**, (D. Shaw, Editor), Plenum, New York, 197-199 (1973).
41. Look, D., C., Walters, D., C., Manasreh, M., O., Sizelove, J., R., Stutz, C., E., and Evans, K., R., "Anomalous hall effect results in low-temperature molecular-beam-epitaxial GaAs: Hopping in a dense EL-2 like band", **Physics Rev. B**, 42:3578-3581 (1990).
42. Chiang, S., Y., "Properties of vacancy defects in GaAs single crystals", **Journal of Applied Physics**, 46:2986-2991 (1975).
43. Martin, G., M., Terriac, P., Makram-Ebeid, S., Guillot, G. and Gavand, M., "Evidence for the creation of the main electron trap in bulk GaAs" **Applied Physics Letters**, 42:61-63 (1983).
44. Wemple, S., "Thermal design of power GaAs", **GaAs FET Principles and Technology**, (DiLorenzo, J. Editor), **Artech House**, Dedham, MA, 25-29 (1982).
45. Bert, N., A., Chaldyshev, V., V., Kolesnikova, A., L., and Romanov, A., E., "Stress Relaxation Phenomena in Buried Quantum Dots", **Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology**, 1:297-336 (2008)
46. Lavrent'eva, L., G., Vilisova, M., D., Preobrazhenskii, V., V., and Chaldyshev, V., V., "Low-temperature molecular beam epitaxy of GaAs Influence of crystallization conditions on structure and properties of layers", **Crystallography Reports**, 47:118-127 (2002)
47. Kono, S., Tani, M., Gu, P., and Sakai, K., "Detection of up to 20 THz with a low-temperature-grown GaAs photoconductive antenna gated with 15 fs light pulses," **Applied Physics Letters**, 77:4104-4106 (2000).
48. Luo, J., K., Thomas, H., Morgan, D., V., and Westwood, D., "Transport properties of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature and the effects of annealing", **Journal Applied Physics**, 79:3622-3629 (1996).
49. McIntosh, K., A., Brown, E., R., Nichols, K., B., McMahon, O., B., DiNatale, W., F., and Lyszczarz, T., M., "Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs", **Applied Physics Letters**, 67:3844-3846 (1995).

50. Fukunishi, Y., and Nakatsuji, H., "Mechanism involving a GaAs₂ intermediate cluster", *Surface Science*, 281-290 (1993).
51. Chaldyshev, V., V., Preobrazhenski, V., V., Putyato, M., A., Semyagin, B., R., Bert, N., A., Kunitsyn, A., E., Musikhin, Yu., G., Werner, P., and Tret'yakov, V.V., "Arsenic cluster superlattice in gallium arsenide grown by low-temperature molecular-beam epitaxy" *Atomic Structure and Non-Electronic Properties of Semiconductors*, 32:1036-1039 (1998).
52. Kasai, S., Watanabe, M., and Ouchi, T., "Improved terahertz wave intensity in photoconductive antennas formed of annealed low-temperature grown GaAs", *Japanese Journal of Applied Physics*, 46:4163-4165 (2007).
53. Brown, E., R., Smith, F., W., and McIntosh, K., A., "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors," *Journal of Applied Physics*, 73:1480-1484 (1993).
54. Giordana, A., Glembocki, O., J., Glaser, E., R., Gaskill, D., K., Kyono, C., S., Twigg, M., E., Fatemi, M., Tadayon, S., and Tadayon, B., "Characterization of crystalline low temperature GaAs layers annealed from an amorphous phase", *Journal of Electronic Materials*, 22:1391-1393 (1993).
55. Chaldyshev, V., V., Preobrazhenski, V., V., Putyato, M., A., Semyagin, B., R., Bert, N., A., Kunitsyn, A., E., Musikhin, Yu., G., Werner, P., and Tret'yakov, V., V., "Arsenic cluster superlattice in gallium arsenide grown by low-temperature molecular-beam epitaxy" *Atomic Structure and Non-Electronic Properties of Semiconductors*, 32:1036-1039 (1998).
56. Youn, D., H., Lee, S., H., Ryu, H., C., Jung, S., Y., Kang, S., B., Kwack, M., H., Kim, S., Choi, S., K., and Kim, G., H., "Effects of post-growth annealing on the structure and electro-optical properties of low-temperature grown GaAs", *Journal of Applied Physics*, 103:123528-123528-5 (2008).
57. Boitsov, A., V., Bert, N., A., Chaldyshev, V., V., Preobrazhenskii, V., V., Putyato, M., A., Semyagin, B., R., "As cluster array formation in GaAs grown by molecular-beam epitaxy at a low temperature and delta doped with phosphorus", *Semiconductors*, 43:266-268 (2009).
58. Suda, A., and Otsuka, N., "Arsenic flux dependence of incorporation of excess arsenic in molecular beam epitaxy of GaAs at low temperature", *Applied Physics Letters*, 73:1529-1531 (1998).
59. Brown, E., R., McIntosh, K.A., Smith, F.W., Manfra, M.J., and Dennis, C.L., "Measurements of optical heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs", *Applied Physics Letters*, 62:1206-1208 (1993).

60. Lavrent'eva, L., G., Vilisova, M., D., Preobrazhenskii, V.V., and Chaldyshev, V.V., "Low-temperature molecular beam epitaxy of GaAs: Influence of crystallization conditions on structure and properties of layers", *Crystallography Reports*, 47:118–127 (2002).
61. Altuntaş, H., "Al_xGa_{1-x}As/GaAs Kuantum kuyulu fotodedektör yapılarının üretilmesi ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-3,51,31 (2009).
62. Kınacı, B., "In_xGa_{1-x}As / GaAs çoklu kuantum kuyu yapısının MBE tekniği ile büyütülmesi, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-18,27-28 (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞEN, Şener
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.10.1975 Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (506) 534 61 07
 e-mail : senerssen2003@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Fırat Üniv./ Elektronik-Bil. Öğretmenliği Bölümü	2002
Lise	Ankara Yıldırım Beyazıt E.M.L. /Elektronik	1992

İş Deneyimi

Yıl	Kurum	Görev
2003-	Milli Eğitim Bakanlığı	Bilgisayar Öğretmeni

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar Teknolojileri, Mikrodenetleyiciler ile hobi devreleri, Basketbol