

T.C.
KİLİS 7 ARALIK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZUN DALGABOYLU YARIİLETKEN
DOYURULABİLEN SOĞURUCU AYNA YAPILARIN
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Serkan ÇAPAN

Danışman: Doç. Dr. Murat ODUNCUOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

KİLİS 2014

Her hakkı saklıdır.

KABUL VE ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Murat ODUNCUOĞLU danışmalığında, Serkan ÇAPAN tarafından hazırlanan “Uzun Dalgaboylu Yarıiletken Doyurulabilen Soğurucu Ayna Yapıların Teorik Olarak İncelenmesi “ adlı tez çalışması 11/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/ oy çokluğu ile Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri Unvanı, Adı Soyadı

İmza

Başkan Doç. Dr. Şükrü ÇAKMAKTEPE

(Kilis 7 Aralık Üniv. Eğitim Fakültesi İlköğretim Böl.)

Üye Doç. Dr. Murat ODUNCUOĞLU

(Gaziantep Üniversitesi Teknik Bilimler MYO.)

Üye Yrd. Doç. Dr. Sinan YAŞAR

(Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Edeb Fak. Fizik Böl.)

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü yönetim kurulunun..//...tarih ve .../....
Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Tez No:

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şükrü Çakmaktepe

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UZUN DALGABOYLU YARIİLETKEN DOYURULABİLEN SOĞURUCU AYNA YAPILARIN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Serkan ÇAPAN

Kilis 7 Aralık Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat ODUNCUOĞLU

Yıl: 2014 Sayfa: 46

Bu çalışmada ultra hızlı lazer kaynaklar için önemli bir unsur haline gelen az miktarda azot eklenmiş kuantum kuyu temelli uzun dalgaboylu yarıiletken doyurulabilen soğurucu ayna (SESAM) yapılar ve uygulamaları teorik olarak araştırıldı. SESAM yapılar kuantum kuyu veya noktalardan oluşturulan, ayna özelliği olan entegre yarıiletken soğurucu yapılardır. Temel özellikleri yeterince yüksek darbe enerjilerinde doyumluğa ulaşınca soğurma oranları azalması ve yansıtma oranlarının artmasıdır. SESAM aygıtların yüksek hızlı lazer üretimi ve yüksek hızlı anahtarlama gibi uygulamaları için temel cihazlardır. Doğrusal olmayan optik yansıtma yüksek tekrarlanma oranları ve darbe enerjilerini daha iyi anlayabilmek için kendi kendine başlayan pasif mod kilitlemeli SESAM yapıların incelenmesi gereklidir. SESAM yapılar ve özellikleri, kullanılan materyaller, optik yansıtma parametreleri ve hesaplama yöntemleri araştırıldı, hazırlanan programları yardımı ile grafikleri elde edildi.

Anahtar Sözcükler: SESAM, kuantum kuyu, DBR, Doyurulabilen Aynalar, ultra hızlı lazerler, Q anahtarlama, mod kilitleme

ABSTRACT

MSc. Thesis

THEORETICAL ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR SATURABLE ABSORBER MIRROR STRUCTURES

Serkan ÇAPAN

Kilis 7 Aralık University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ODUNCUOĞLU

Year: 2014 Page: 46

In this study, dilute nitride SESAM based structures and applications have been investigated theoretically. A SESAM is a mirror structure with a layer consisting of quantum wells or quantum dots. The fundamental characteristic of these devices are saturate at sufficiently high pulse energies which results reduction in the absorption and rise in the reflectivity. SESAM devices are useful for high-speed switching and high-technology device applications. At high repetition rates or pulse energies, nonlinear optical reflectivity is required to optimize the self-starting passive mode locking SESAMs. SESAM structures, material and optical reflectivity parameters are theoretically calculated and their graphs are obtained.

Keywords: SESAM, Kuantum Well, DBR, Saturable Mirror, Ultrafast Lasers, Q Locking, Mod Locking.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana yardım eden danışmanım Doç. Dr. Murat ODUNCUOĞLU'NA;

Fizik Bölümü Öğretim Üyelerine;

Beni bugünlere getiren annem GÜLŞEN ÇAPAN, babam ALİ ÇAPAN'A;

Canım ablam SERAP ŞİPAL'E

Her zaman yanımda olan eşim NİSA KAYA ÇAPAN'A teşekkürlerimi sunuyorum.

Serkan ÇAPAN

Kilis, TEMMUZ 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç.....	3
2. MATERYAL YÖNTEM.....	5
2.1 Yarıiletken Lazer Temelleri.....	5
2.2 Yarıiletken Lazerlerin Özellikleri.....	7
2.3 Ultra Hızlı Lazerler.....	11
2.4 Yarıiletken Mod Kilitleme Teknikleri.....	14
2.5 Pasif Mod Kilitleme.....	14
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	17
3.1 Yarıiletken Doyurulabilir Soğurucu Aygıtlar.....	17
3.2 Yarıiletken Doyurulabilir Soğurucu Aygıt Temelleri.....	17
3.3 Kuantum Kuyu Sistemler.....	19
3.4 GaInNAs/GaAs Kuantum Kuyu Yapısı.....	21
3.5 Yarıiletken Doyurulabilen Soğurucu Yansıma Tasarımları.....	24
3.6 Tasarım Kriterleri.....	25

3.7 Transfer Matris Metot.....	31
3.8 Elektrik Alanın Transfer Matris Yöntemi İle Hesaplanması.....	32
3.9 Yansıtma Parametrelerinin Hesaplanması.....	36
3.10 Doyurulamayan Kayıplar.....	38
3.11 Doyurulabilir Soğurma Kayıpları (Modülasyon Derinliği).....	40
3.12 Soğurma.....	36
3.13 Soğurucu Doyum Akısı.....	38
3.14 Doyurulabilir Akı (Saturation Fluence).....	40
4. SONUÇLAR.....	43
5. KAYNAKÇA.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Genel bir lazer kavite düzeneği.....	6
Şekil 2.2. Fiber optik kablo için dispersiyon dalga boyu grafiği.....	7
Şekil 2.3. İleri yönde beslenen bir aynı eklem (homojonksiyon) diyot.....	9
Şekil 2.4 Bir yarıiletken lazer için ışık çıkışı – akım yoğunluğu eğrisi.....	10
Şekil 2.5. Bir lazer diyotunun eşik akımı altında ve üstündeki tipik davranışı.....	11
Şekil 2.6. Ultra kısa atımların zaman ve frekans domainlerinde gösterimi.....	12
Şekil 2.7. Farklı şekillerdeki darbe üretimi.....	13
Şekil 2.8. Bir doyurulabilen soğurucu için soğurma değişimi.....	15
Şekil 3.1. Doyurulabilen soğurucu yapının yayılım-yoğunluk grafiği.....	18
Şekil 3.2. AlGaAs/GaAs kuantum kuyu hetero eklem yapısı.....	20
Şekil 3.3. İnterpolasyon metodu kullanarak hesaplanan örgü sabitinin değişen azot miktarına bağlı olarak değişimi değerleri.....	22
Şekil 3.4. GaInN/GaAs kuantum kuyu (In (x) %35 oranında) E ₋ ve E ₊ enerji seviyeleri.....	24
Şekil 3.5. Geçirgen bir yüzeye gelen ışının birden fazla yansımaları.....	24
Şekil 3.6. Transfer matris metot terminolojisi.....	26
Şekil 3.7. Çok katmanlı bir yapının gösterimi.....	27
Şekil 3.8. Elektrik alan yoğunluğunun uzaklığa bağlı olarak değişimi	29
Şekil 3.9. Katman sayısına bağlı olarak yansıtma spektrumunun dalga boyuna bağlı değişimi.....	31
Şekil 3.10. Yansımaların katman sayısına bağlı değişimi.....	32
Şekil 3.11. SESAM yapılar için yansıtma- darbe akısı değişimi	35
Şekil 3.12. Hesaplanan soğurma-darbe akısı grafiği	36

Şekil 3.13. Hesaplanan yansımanın doyum akısına bağlı değişim grafiği.....38

Şekil 3.14. Atım akışına karşı SESAM lineer olmayan soğurucu yansiyabilirlik değişimi

.....40

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan III-V yarıiletkenlerin materyal parametre değerleri [22].....	22
Tablo 3.2. Zıt geçiş band modeli parametreleri [27].....	23
Tablo 3.3. Hızlı Ve Yavaş Soğurma İçin Tipik Değerler [26].....	35
Tablo 3.4. Doyum Akısı Yansıma Parametreleri İçin Tipik Değerler [26].....	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

\hbar	Planck Sabiti
k_B	Boltzmann Sabiti
c	Işık hızı
e	Elektrik yükü
m_0	Serbest elektron kütlesi
L_Z	Kuyu genişliği
L_B	Engel genişliği
ΔE_C	İletkenlik bandı süreksizliği
ΔE_V	Valans bandı süreksizliği
E_g	Bant aralığı
T	Sıcaklık
α	Soğurma katsayısı
ω	Açısal frekans
t	Zaman
E	Elektrik alan
R	Yansıtma
d	Aktif bölge kalınlığı
λ_0	Merkezi dalgaboyu
n_0	Havanın kırılma indisi
n	Kırılma indisi
δ	Faz farkı
θ	Geliş açısı
Y	İnce filmin karmaşık kırılma indisi
M	Geçiş matrisi
m_e	Elektronun etkin kütlesi
T_R	İki ardışık darbe arasındaki zaman
L	Lazer boşluğunun uzunluğu
n	Mod sayısı
Ω	Birbirini takip eden modların iki frekans farkı
I	Maximum yoğunluk dur
τ_c	Serbest taşıyıcı durulma süresi
d	Malzeme kalınlığı
ΔR	Modülasyon derinliği
F_P	Darbe enerji dozu
ν	Gelen ışının frekansı
λ_B	Rezonans dalgaboyu
m	Tabakaları arasındaki sınır koşulları
M_m	Sistemin karakteristik matrisi
N_{n+1}	Sistemin taşıyıcı tabakasının kırılma indisi
n_s	Taşıyıcı tabakanın kırılma indisi
R	Yansıma şiddeti
I	Işık şiddeti

KISALTMALAR

SESAM	Yarıiletken Doyurulabilen Soğurucu Ayna (Semiconductor Saturable Absorber Mirror)
SAM	Yarıiletken Doyurulabilen Ayna, Semiconductor Absorber Mirror
DBR	Dağıtılmış Bragg Yansıtıcılar, Distributed Bragg Reflectors
VCSEL	Dikey kavite yüzey ışıklı lazer, vertical-cavity surface-emitting laser
RPM	Resonant mod kilitlemeli lazerler
FWHM	Yarı yükseklikteki tam genişlik, Full Width Half Maximum
A-FPSA	Fabry Perot doyurulabilen emici ile Q anahtarlama yöntemi kullanılmadan oluşturulan lazer
MBE	Moleküler Demet Epitaksi Kristal Büyütme, Molecular Beam Epitaxy

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler elektronik cihazlarda ve optoelektronik teknolojisinde; optik sınırlama, optik haberleşme, optik anahtarlama, mod kilitleme, foton enerjisini yükseltme ve optik sınırlama gibi doğrusal olmayan optikte geniş bir kullanım alanına sahiptir. Doğrusal olmayan optik, yüksek şiddetli ışık ile malzemenin soğurma, kırılma, yansıma gibi optik özelliklerinin değiştirilmesi konularını incelemektedir. Yarıiletkenlerin doğrusal olmayan alınganlıklarının büyük, tepki sürelerinin kısa olması sebebiyle doğrusal olmayan optik özellikleri vardır ve aygıt yapımı için uygun malzemelerdir. Yarıiletken lazerlerle yapılan çalışmalarda istenilen dalga boyunda üretilebilmekte ve ultra kısa atımlarla (puls) büyük enerjiler açığa çıkarabilmektedir.

Günümüzde ultra hızlı optik uygulamaları, üzerinde en çok çalışma yapılan konulardan biri olmuştur. Özellikle yüksek hızda veri transferinin ultra hızlı lazer teknolojisi ile gerçekleşebilmesi bu teknolojiye ilgiyi artırmıştır. Ultra hızlı lazer sistemleri zaman çözünürlüklü (time-resolved) sistemler kullanılarak yapılan araştırmalarda [1], optik-frekans metrolojisinde [2], terahertz üretiminde [3], çift foton ve CARS spektroskopisi (Koherent Anti-Stokes Raman Spektroskopisi) ve mikroskopisinde [4] ve optik uyumluluk (coherence) tomografisinde [5], tıp (göz-lazer cerrahisi ve diş hekimliği [6]) ve sanayide birçok alanda kullanılmaktadır. Ultra kısa darbeler çok önemli bir araştırma alanı olup birçok uygulamaları vardır. Bugün kısa darbeli lazer sistemleri dalga boyu ve darbe genişliğine bağlı olarak, bu tür tıbbi ve endüstriyel uygulamalar için temel araştırma alanlarından biridir. Ultra kısa darbelerin bir diğer önemli uygulaması yüksek hızlı optik iletişim sistemleridir. Yüksek bir tekrarlama oranına sahip yüksek bit hızlı darbe sistemleri için çok önemlidir [1,7].

Farklı tekniklerle ultra-kısa darbeler üretilebilir: [1,3]

- a. Q-Switching,
- b. Kazanç-Switching,
- c. Darbe sıkıştırma
- d. Mod-Kilitleme

Bu teknikler arasındaki temel fark darbe genişlikleridir. Mod-kilitleme tekniğinde piko-femto saniye aralığındaki darbe genişliği kullanılır. Mod-kilitli lazerler dalga boyu ve

darbe genişliğine bağlı olarak potansiyel bir dizi uygulamaları vardır. Lazerlerde ultra hızlı darbe üretim yöntemine mod kilitleme yöntemi denilmektedir. Bu yöntemde darbe süresi femtosaniye ve pikosaniye aralığında olmaktadır. Bu işlem sırasında parazit modlar oluşabilmektedir ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu durumu önlemek amacı ile modların kilitlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde çalışan lazerlere mod kilitli lazerler denir. Mod kilitleme işleminde, lazerin tepe gücü darbeler sırasında maksimize edilir. Lazer içine bir lineer olmayan eleman dâhil edilmesi ile bu yüksek yoğunluklu durum için mod kilitleme yöntemi daha az kayıp oluşmasına neden olur. Lazerlerde mod kilitlemenin lineer olmayan eleman ilavesinden başka yolları da bulunmaktadır fakat bu yollardan en kolay olanı bir doyurulabilen emici kullanmaktır [8, 9]. Q-anahtarlama, foton enerjisini yükseltme, yarıiletken doyurulabilen soğurucu aynalar (SESAM) ve mod-kilitleme gibi birçok teknolojik alanda kullanıldığı için bu malzemeler üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Şiddetin artırılması durumunda soğurma katsayılarının azalması özelliğine sahip malzemelere doyurulabilen soğurucular denir. Yüksek şiddetli ışına maruz kalan malzemelerin göstermiş oldukları doğrusal olmayan etkilerinden bir tanesi doyabilen soğurmadır. Birçok malzemenin soğurma katsayısı yüksek şiddetli ışına maruz kaldığı zaman düşmektedir. Lazer ışığının atma süresinin kısaltılmasında kullanılan bu özelliğe sahip malzemeler yarıiletken doyabilir soğurma aynaları (SESAM) yapımında ve lazer kavitelerinde kullanılmaktadır [10]. Literatürde katıhal lazerlerinin mod kilitli rejimde çalışıp süreli darbeler üretebilmesi için önerilmiş bazı pasif doyabilen soğurucular (DS) şöyle sıralanabilir: yarı iletken DS (SESAM), karbon nano tüp DS (KNT-DS) ve son olarak grafen DS (GDS). Bunlardan SESAM olarak adlandırılan doyurulabilen soğurucunun doygunluk eşiği ve modülasyon derinliği gibi parametreleri istenilen değerlerde olacak şekilde üretilmektedir. Bu özelliklere sahip olan malzemeler, darbeli lazerlerde lazer darbesinin şeklinin düzenlenmesinde ve lazerlerde yüksek şiddetli ışık elde edilmesine neden olan kavite yapımında kullanılabilirler.

Yarıiletken doyurulabilen soğurucu ayna (SESAM) cihazlar ultra hızlı lazer kaynakların önemli bir bileşeni haline gelmiştir [11]. Doksanlı yılların başında mod-kilitli diyot-pompalı katı - hal lazerlerinin Q - anahtarlama olmadan sürekli dalga (CW) modunda çalışamayacağı ve bunun da pratik uygulamaları sınırlayacağı düşünülmüyordu. 1992

yılında SESAM ailenin ilk üyesi kullanılarak Q- anahtarlamasız pasif mod Nd: YLF lazer bulundu [4].

DeMaria et al. 1966 yılında doyurulabilen boya ile ilk olarak lazerlerde mod kilitleme yöntemini kullanmıştır [3]. Bu işlem aynı zamanda organik bir boyanın yerine bir yarıiletkende kullanılarak da yapılabilmektedir [12]. Çeşitli yarıiletken lazerlerde mod kilitleme yöntemi için kullanılan yarıiletkenler ilerleyen yıllarda artış göstermeye başladılar [12]. Çünkü yarıiletkenlerin soğurma kesit alanı çok geniş bir değer aralığındadır ve çok ince bir yapıya sahiptirler. Sadece 10nm lik bir kuantum kuyusu bile doyurulabilen soğurucu için yeterli olmaktadır. Yarıiletken yapılar kristal yapısının uyumlu olduğu bir malzeme üstünde tek kristal olarak büyütülerek doyurulabilen soğurucu yüzeyler oluşturulabilir.

Yarıiletkenlerin doğrusal olmayan veya doyurulabilen soğurma davranışı kullanılan lazer ışığının darbe enerjisi ile yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığına bağlıdır. Kullanılan lazer ışığının darbe enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığının yarısından büyük ve tamamından küçük ise $E_g > \hbar\omega \geq E_g/2$ doğrusal olmayan soğurma davranışı gözlenir. Fakat bu kural yarıiletken malzemesinin yasak enerji aralığında katkı veya kusurların olmadığı durumlarda geçerlidir. $\hbar\omega$ ışığınenerjisi ne kadar bant aralığına yaklaşırsa, malzemenin iki foton soğurma yapma olasılığı da o kadar artar ve rezonans durumunda maksimum olur. Bunun yanında $\hbar\omega > E_g$ olması durumunda da doyurulabilen soğurma gözlenebilir. Bu özelliğinden dolayı yarıiletken doyurulabilen soğurucu aynalar mod kilitleme (mode-locking) için kullanılmaktadır.

1.1 Amaç

Bu tez çalışmasında, SESAM yapı olarak 1,3 μm dalga boyunda çalışan GaInNAs/GaAs dikey kavite yapıli kuantum kuyu sistemleri araştırıldı. Düşük boyutlu kuantum kuyuları sistemlerin üretimindeki son teknolojik gelişmeler bu sistemlerin üretimini kolaylaştırmıştır. Kuantum yapılar hacimsel (bulk) benzerlerinden oldukça farklı yeni fiziksel özellikler göstermektedir [13] Bu nedenle son zamanlarda, bu sistemlerin elektronik ve fiziksel özelliklerini anlamak için birçok çalışma yapılmaktadır. Azot temelli yapıların azot (N) ve indiyum (In) konsantrasyonlarına bağlı olarak uzun dalga

boyunda çalışmaları sağlanabilmekte ve band sureksizlikleri ayarlanabilmektedir. Bu yarıiletken yapılar periyodik cetvelin III. gurubu (Ga, In, Al) ve V. grubu (As, P, Sb, N) elementlerinin bir araya getirilmesiyle oluşur. III-V azot gurubu (GaN, AlN ve InN ve bunların alaşımları) günümüzde en çok çalışmanın yapıldığı yarıiletkenler grubudur. Bu gruptaki alaşımlardan GaAs ile örgü uyumlu olarak üretilmekte ve aktif bölge malzemesi olarak kullanılmaktadır. Azot temelli sistemlerin avantajları, sıcaklık hassasiyeti ve iletim bandından elektron kaçışları benzer özelliklere sahip diğer yapılardan daha az olmasıdır.

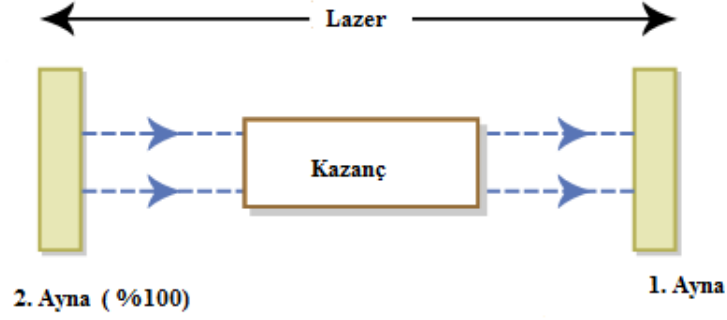
Ultra hızlı lazer sistemlerinde birçok avantajı bulunan azot temelli yapıların SESAM olarak tasarımı çalışmanın ikinci kısımda incelendi. Bu yapıda yüksek ve küçük kırılma indisli tabakalar epitaksiyel tabakalar olarak üst üste büyütölerek Bragg yansıma şartına uyan üst ve alt Dağılmış Bragg Yansıtıcılar (DBR) oluşturuldu. Bu dikey kavite yapıların seçtiği dalgaboyu Bragg yansıma şartını sağlandığı dalgaboyudur. Üçüncü bölümde yarıiletken lazerler, düşük boyutlu sistemler hakkında bilgiler verilmiş, temel terimler açıklanmıştır. Mod kilitleme, Q-anahtarlama metotları ve ultra hızlı lazer sistemleri anlatılıp, SESAM tasarım kriterleri araştırıldı. Azotlu yapıların materyal parametreleri hesaplanıp, ayrıca DBR yansıtıcıların özellikleri, yansıma katsayısının dalga boyuna ve yansıtıcılarının tabaka sayısına bağlı olarak değişimi sayısal simölasyonları sunuldu. Üçüncü bölümde ise grafikler yorumlandı, sonuçlar tartışıldı.

2. MATERYAL YÖNTEM

Yarıiletken doyurulabilen soğurucu ayna (SESAM) icadı ultra hızlı lazer sistemlerinin geliştirilmesi için önemli bir gelişme olmuştur. Günümüzde, SESAM mod kilitlemeli fiber lazerler, yarıiletken lazerler gibi birçok lazer türleri için önemli bir cihaz haline gelmiştir. Bu cihaz pasif mod kilitleme lazerde mod kilitleme işlemi tetiklemek için, resonatör uç ayna (end mirror) ya da bir çıkış bağlayıcı olarak kullanılır. Bu bölümde, yarıiletkenler ve uygulamaları, yansıtıcı ve soğurucu ayna yapıları, çalışma dalgaboyu için kullanılması gereken yarıiletken malzeme seçimi, özellikleri ile temel materyal parametreleri araştırıldı.

2.1 Yarı iletken Lazer Temelleri

Lazerin temel işlevi, belirli bir dalga boyunda, yüksek yoğunlukta, paralel hareket eden, aynı dalga boyundaki faz uyumlu ışık yaymasıdır. Lazer kelimesi kısaca (Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation) uyarılmış ışın hüzmesi ile ışığın güçlendirilmesi anlamını taşımaktadır. Işık yayılımı, uyarılmış üst enerji seviyesinden zemin durumuna ışımali geçişler aracılığıyla gerçekleşir. Lazer, optik frekanslarda faz uyumlu ışınım üretimi için kullanılan bir salıngaçtır (osilatör) ve dört ana kısımdan oluşur. Bunlar 1. optik kazanç ortamı, 2. optik kavite veya diğer adıyla resonatör, 3. uyarı (pompa) kaynağı ve 4. çıkış aynasıdır. Salınım elde etmek için kazanç ile geri beslemenin birleştirilmesi gerekir. Optik kazanç ortamı, yüksek yansıma katsayısı olan aynalardan kurulu optik kavite içerisine yerleştirilir. Optik kazanç elde etmek için, kazanç ortamını dışarıdan bir enerji kaynağı ile uyarmak gerekir. Atomların ışık yaymaya başlayıncaya kadar enerjiyle (elektrik, optik, manyetik) pompalanması sonucu ortaya çıkar. Kazanç ortamından geçerken güçlenen sinyalin bir kısmı, aynalar tarafından ortama tekrar gönderilir. Kavite içerisindeki ışık, aynalar arasında birçok kez yansiyarak güçlenir. Şekil 2-1 de genel bir kavite örneği görülmektedir.

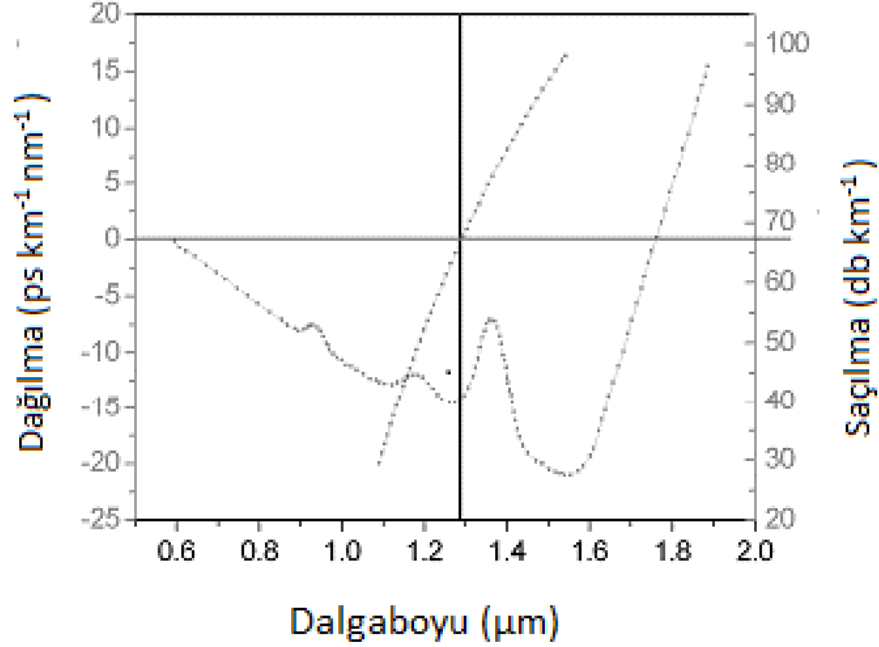


Şekil 2.1. Genel bir lazer kavite düzeneği

Eğer bir döngüdeki optik kazanç, kayıplardan daha fazla ise, optik salınım başlar ve yüksek parlaklığa ve elektromanyetik dalga özelliklerine sahip lazer ışığı üretilir. Üretilen ışık ve maddenin temel fiziksel özellikleri ile bunların etkileşimleri ve elektronik özellikleri optoelektronik adı altında incelemektedir [14]. Bu çalışmanın konusu da olan optoelektronik cihazlar geniş kullanım alanları ve verimlilikleri nedeniyle birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Son 50 yılda yapılan çalışmalar sayesinde p-n eklem, lazerler ve fiber optik kablolar konularında ve bu geliştirilen malzemelerin iletişim teknolojilerinde kullanımı konularında birçok yeni gelişmeler sağlanmıştır. Modern teknolojinin uygulanır hale gelmesi ve her geçen gün daha da geliştirilmesi nedeniyle, çok çeşitli özellikleri olan farklı ışık kaynaklarına ihtiyaç duyulmaya başlamıştır. Uzaktan algılama, tıbbi araştırma ve telekomünikasyon gibi çeşitli uygulamaların ve ihtiyaç duydukları ışık kaynaklarının oldukça farklı olması, araştırmacıları harekete geçirmiştir. Özellikle fiber optik haberleşme ağları ve tümleşik optik sistemler için gerekli olan lazerler en önemli ışık kaynaklarıdır.

Lazerin iletişim alanında kullanılabilmesi için aktarılan veri miktarının fazla, iletim hızının yüksek olması beklenmektedir. Özellikle optik haberleşme sisteminde bilginin taşındığı ortam olan fiber optik kabloda kullanılan lazerler ve optik yükselteçler için en uygun yapı 1.3 μm ve 1.55 μm (yasak bant aralığı 0.95 ve 0.78 eV) dalga boylarında olmalıdır [10]. Silika optik lifler için 1.3 μm ve 1.5 μm lazer kaynaklarının geliştirilmesi bu dalga boylarında daha az kayıp ve düşük dağılımın olmasından

kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu dalga boyunda çalışan yarıiletken lazerler özellikle fiber optik haberleşme sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır [15].



Şekil 2.2. Fiber optik kablo için dispersiyon dalga boyu grafiği

Şekil 2.2 de görüldüğü üzere fiber optik kablo yaklaşık 1.5 µm dalgaboyunda en düşük kayıp ve 1.3 µm de en düşük dağılım değerini alır. Bu çalışmada yarıiletken lazerlerin periyodik tablonun III-V gurubunda bulunan uzun dalga boyunda ışımaya yapan alaşımları araştırıldı. Bu amaçla yarıiletken lazerlerin çalışma karakteristiklerinin analizi yüksek hızlı optik linklerin tasarımında önemlidir. Mevcut lazerler günümüzde ihtiyaç duyulan yüksek hızlı haberleşme teknolojisinde yetersiz kalmakta ve ultra hızlı lazer sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

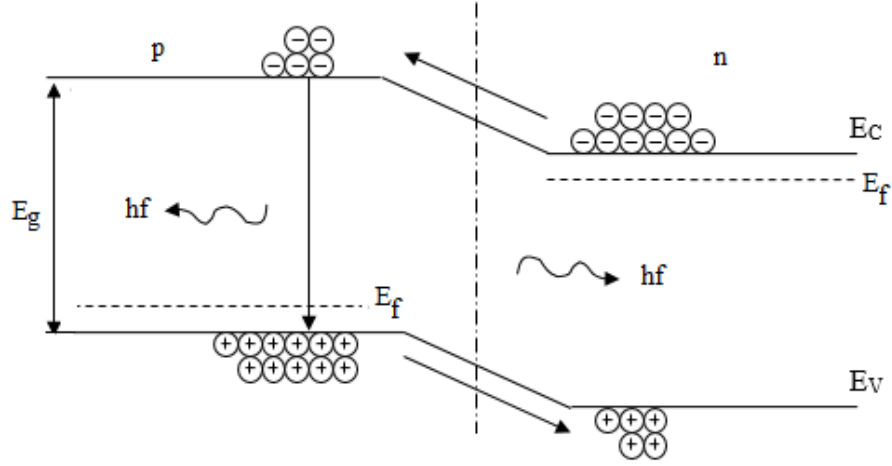
2.2 Yarı iletken Lazerlerin Özellikleri

Yarıiletken cihazların özellikleri, elektronların elektrik, elektromanyetik, mekanik ve manyetik dış etkilere karşı göstermiş oldukları davranışlar ile anlaşılır ve burada lazerlerin çalışma prensipleri de yarıiletken lazerlerde basit bir p-n eklemiyle taşıyıcıların hareketlerinin incelenmesi ile anlaşılabilir. Bir p-n eklemi p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin kontak haline getirilmesi ile oluşur. Diyot p-n ekleminden oluşan bir

yarıiletken aygıt olup dirençten farklı olarak lineer olmayan bir akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. n- ve p-tipi bölgeler aynı tip yarıiletkenlerden meydana gelirse bu eklem aynı eklem (homojunction), farklı malzemeler kullanılarak elde edilmişlerse farklı eklem (heterojunction) olarak adlandırılır. Özelliklerine göre görünür ışık (LED), lazer ışığı (lazer diyotlar) yayabilir, elektrik sinyallerini kuvvetlendirebilir ve transistör gibi farklı işlevlerde kullanılabilirler.

İleri yönde kutuplanmış GaAs ekleminden yapılmış olan ışık yayan diyot örnekleri büyütme tekniklerindeki teknolojik gelişmeler sonucunda istenilen dalgaboyu aralığında üretilmiştir. Temel olarak elektron – boşluk çiftinin, ileri yönde kutuplanmış bir p-n eklemının eklem düzlemine dik olarak taşınmasına dayanır. GaAs gibi bazı yarıiletkenlerde iletkenlik bandının minimumu (serbest elektronlar burada bulunur) ile valans bandının maksimumu aynı dalga vektörü (k) değerinde olurlar. İletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumunun aynı k değerinde olduğu yarıiletkenlere direkt band aralığına sahip yarıiletken denir ve elektronun iletkenlik bandından valans bandına geçmesi olayı rekombinasyon olarak adlandırılır. Germanyum gibi yarıiletkenlerde ise iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı k değerinde bulunmazlar. Bu durumdaki yarıiletkenler direkt band aralığına sahip olmayan yarıiletken olarak adlandırılır. Dalga vektörü taşıyıcıların momentumunu temsil eder ve direkt band aralığına sahip yarıiletkenler için bu momentum değeri sıfırdır. Yarıiletkenlerdeki taşıyıcılar enerjileri pompalama yöntemi ile arttırılırsa denge durumundaki enerjilerinden fazla enerjiye sahip olduğunda üst enerji seviyelerine çıkarlar. Belli bir zaman bu yüksek bir enerji seviyesinde kaldıktan sonra kazandıkları fazla enerjiyi yarıiletkenin bant aralığı enerjisine karşılık gelen fotonları yayarak kararlı hale geçerler. Bu geçiş sırasında dalga vektöründe değişiklik olmadığı için momentumun korunur. Rekombinasyon olayında enerjinin korunumu yasası ise enerjisi $hf = E_g$ olan fotonun yayınlanması ile sağlanır. Burada h Planck sabiti, f fotonun frekansı ve E_g yasak enerji aralığı enerjisidir. Yasak enerji aralığına sahip yarıiletken malzemelerin özelliklerine bağlı olarak rekombinasyon olayında yayınlanan fotonlar optik spektrumda görünür veya yakın-kızılötesi ışığa uygun bir enerjiye sahiptirler. Fotonların yayınlandığı rekombinasyon olayı ışımali rekombinasyon olarak adlandırılır. Direkt band aralığına sahip olmayan yarıiletkenler için ise elektron ve boşluk birleşmesi için uygun momentum transferinin yapılması gerekir. Bu işlem sırasında malzemeler

ışık (foton) yayınlamazlar. Foton yayınlanmayan elektron boşluk birleşmelerine ışımsız rekombinasyon denir ve taşıyıcılar fazla enerjilerini fonon etkileşmesi ile harcarlar.



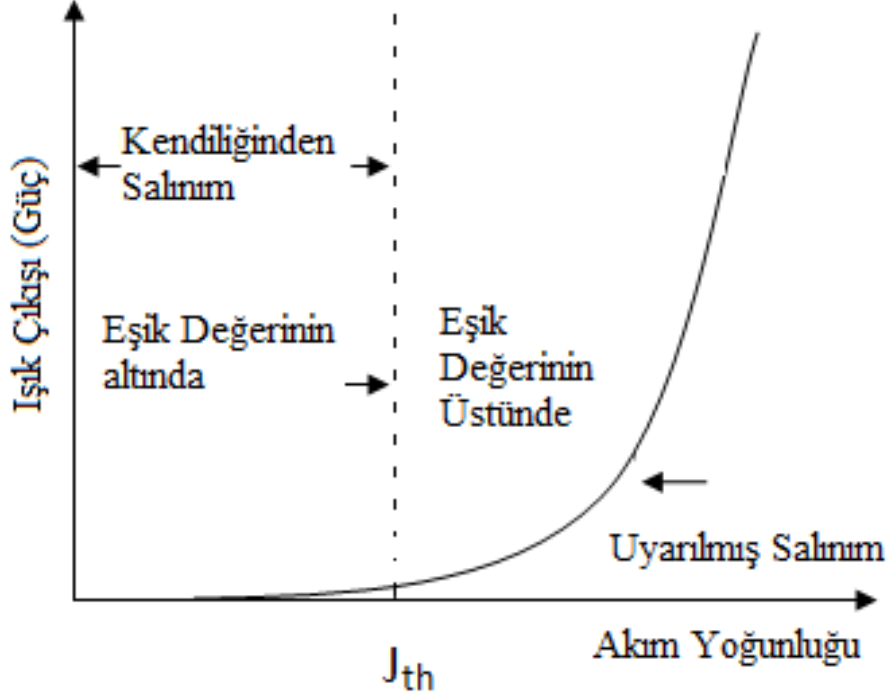
Şekil 2.3. İleri yönde beslenen bir aynı eklem diyot

Yarıiletken lazer ve ışık yayan aygıtlar üretebilmek için genellikle periyodik tablonun III. ve V. sütunundaki direk yasak bant aralıklı elementlerin bileşimlerine dayanan daha karmaşık yarıiletken malzemeler kullanılır. Bu tür yarıiletkenler III-V yarıiletkenler olarak adlandırılırlar. P-n eklemde ileri yönde besleme uygulanması ile elektronlar p bölgesine, boşluklar ise n bölgesine enjekte edilirler. Enjekte edilen azınlık taşıyıcılar, ışıklı ya da ışımsız olarak deplasman bölge dolaylarındaki çoğunluk taşıyıcılar ile yeniden birleşirler. Yeniden birleşme işleminin çoğu eklem bölgesi dolaylarında oluşmaktadır. Bu bölgede uyarılmış yayılım için gerekli olan şart $E_g < h\nu < (E_{Fn} - E_{Fp})$ enerjili fotonlar için sağlanmış olur. Şekil 2.3’de, ileri yönde beslenen bir p-n eklemi görülmektedir.

Lazer ışımalarının başlaması için lazer aygıt içindeki kazancının kayıplardan fazla olması yani aktif bölgede uyarılmış ışımaya oranının artması gerekmektedir. Kazancın kayıplardan büyük olduğu andaki akım değeri eşik akımı olarak adlandırılır. Eşik akım yoğunluğu Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Eşik akım yoğunluğu;

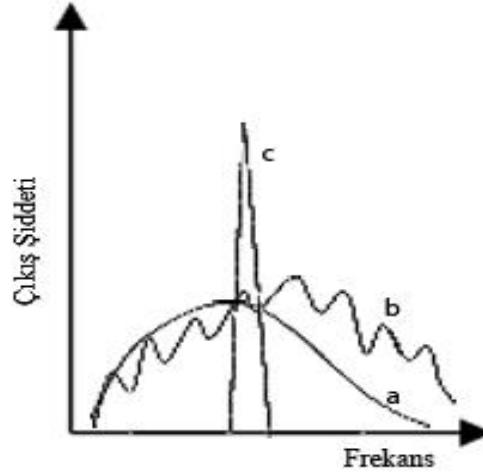
$$J_{th}(A/cm^2) = \frac{J_0 d}{\eta} + \frac{J_0 d}{g_0 \eta L} \left[\alpha + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right] \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifadedeki Γ sınırlama faktörü, g kazanç, α birim uzunluk başına kayıp, R yarılmış yüzeylerin yansıtması, L kavite uzunluğu, J_0 saydamlık akım yoğunluğu, d aktif bölge kalınlığı ve η kuantum verimidir.



Şekil 2.4. Bir yarıiletken lazer için ışık çıkışı – akım yoğunluğu eğrisi

Şekil 2.4’de bir lazer diyotunun eşik akımı altında ve üstündeki tipik davranışı gösterilmiştir. Eşik akımı adı verilen özel bir akım değerine kadar lazer çıkış gücünün hemen hemen sıfır olduğu görülmektedir. Bu akım değerinden itibaren, uyarılmışsalınım kendiliğinden yayılımla birlikte lazer ışımaya olayı başlar. Eşik akımı değerlerinden büyük değerlerde lazer çıkış gücü hızla artmaktadır



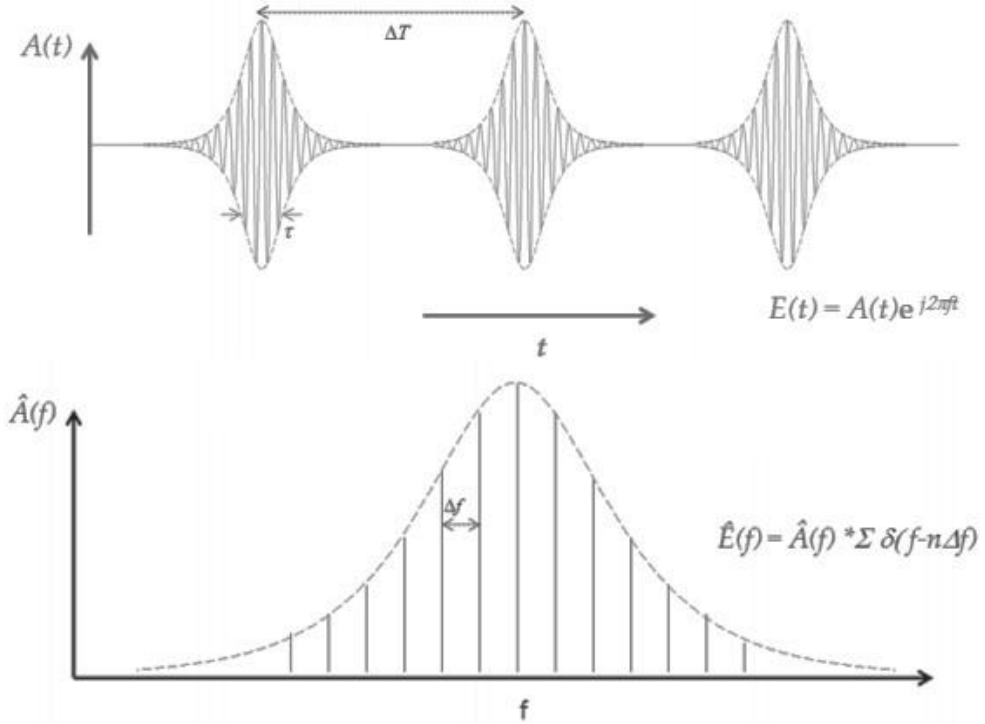
Şekil 2.5. Bir lazer diyotunun eşik akımı altında ve üstündeki tipik davranışı

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi eşik akımının altındaki akımlarda (a) doğal ışımaya baskın olmakta iken, (b) eşik akımının üstünde lazer modları spektruma egemen olmaya başlar. (c) eşik akımı değerinde ise lazer modları ortaya çıkmaya başlar. Lazer kavite uzunluğunun azalmasıyla modlar arasındaki mesafe artar ve kavitenin desteklediği mod sayısını da azalır. Bir merkezi modu olan tek modlu lazerler fiber optik haberleşme sistemlerinde (yüksek spektral saflığa sahip lazerler tercih edildiğinden) istenilen bir durumdur. Günümüz şartlarında daha yüksek hız, daha yüksek kaliteli görüntüleme, daha hassas ölçüm bize en çok yardımcı olan teknoloji ultra hızlı lazer teknolojisidir.

2.3 Ultra Hızlı Lazerler

Ultra hızlı lazerler, ürettikleri ışığın zamanla değişimine göre iki gruba ayrılır: Sürekli-dalga lazerleri ve atımlı (darbeli) lazerlerdir. Sürekli-dalga lazerlerinden elde edilen güç, zamana göre yaklaşık olarak sabit kalır. Yaklaşık, çünkü önlenemeyen gürültü kaynaklarından dolayı çıkış gücünde az da olsa daima salınımlar olabilir. Oysa darbeli lazerlerde, üretilen ışık kısa süreli darbeler şeklinde resonatörden çıkar. Değişik yöntemler kullanarak lazerlerden ışık darbeleri üretmek mümkündür [16]. Darbeli lazerler altında bulunan piko saniye ve femto saniye darbeli lazerlerin genel isimdir. Ultra hızlı lazerlerdeki darbe süresinin kısalığı ve bu sürede üretilen megawatt ve gigawatt tepe güç seviyeleri ile tanımlanır. Ultra hızlı lazerlerin (pikosaniye, femtosaniye darbeli) işleme mekanizması, sürekli dalga lazerlerden ve daha uzun atımlı

(mikro, nano saniye darbeleri) lazerlerden farklıdır. Bazı lazer uygulamaları için belirli bir tekrarlama oranına sahip atımlı optik darbeler gereklidir. Bu güç seviyeleri bu kadar kısa sürelerde ancak ultra hızlı lazerlerle sağlamaktadır.



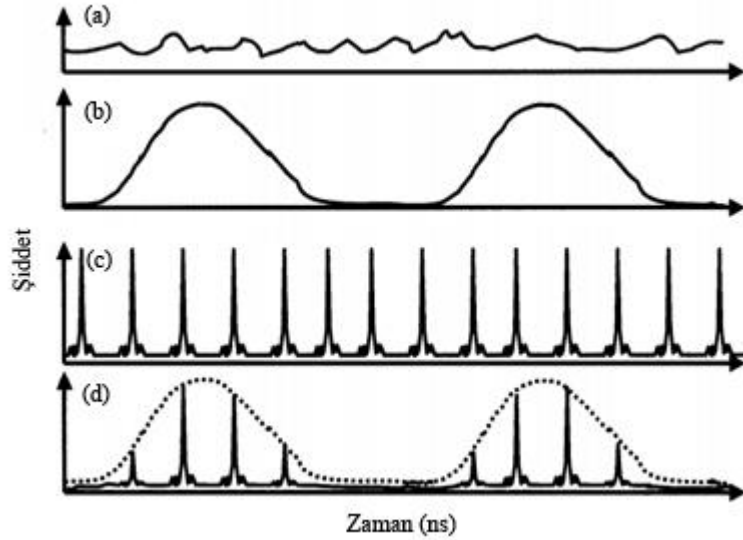
Şekil 2.6. Ultra kısa atımların zaman ve frekans domainlerinde gösterimi

Eğer atımlar ΔT zaman aralıklarına ayrılırsa, lazer $F_T = \Delta F = \frac{1}{\Delta T}$ formülüne uygun olarak tasarlanmalıdır. Fourier dönüşümü ayrıca frekans ile zaman bant genişliğinin birbirleriyle ilişkilerini şöyle ifade eder:

$$\tau_{FWHM} \Delta f_{FWHM} = \text{sabit} \quad (2.2)$$

Bunun sonucu olarak kısa atımlar elde etmek için lazerin spektral genişliğini ayarlamamız gerekir. Bu tekniğe mod-kilitleme denir. Mod kilitleme yöntemi ile anahtarlama yöntemi kullanılarak lazer ışınının gücü daha da artırılabilir. Mod kilitleme yönteminin temel fikrini anlamak için lazer kazanç ortamını iyi bilmemiz gerekmektedir. Bu kazanç ortamının uç aynaları arasında, sınır şartlarını sağlayan ve frekansı farklı olan birçok elektromanyetik dalga dağılımı oluşabilir. Bunların her birine kip veya mod adı verilir. Ardışık iki mod arasındaki frekans farkı kazanç ortamının

uzunluğuna bağlıdır. Mod kilitleme yöntemleri ile ışınım bandının altında bulunan mod'lar, yaklaşık olarak aynı fazla veya bir başka değişle eş zamanlı salınımına sokulur. Dolayısıyla “kilitleme” terimi, lazer ortamı içerisindeki her elektromanyetik mod'un fazının kilitlemesi veya sabit tutulmasıdır. Bunun sonucunda, lazer çok kısa süreli darbelerden oluşan bir periyodik darbe katarı üretmeye başlar.



Şekil 2.7. Farklı şekillerdeki darbe üretimi

İki ardışık darbe arasındaki zaman, lazer ortamı içerisindeki bir döngünün süresine eşittir. Elde edilebilecek en kısa darbe uzunluğu, optik kazanç bandının spektral genişliğine, lazer ortamı içerisinde kullanılan aynaların yansıma aralığına, ortamdaki doğrusal olmayan etkilere ve ortam kırınım endeksinin dalgaboyuna bağımlılığından kaynaklanan dağınım miktarına bağlıdır. Mod kilitleme basit bir şekilde, değişik fazda oluşan lazer ışınlarını rezonansa getirerek aynı modda olmasını sağlayan bir yöntemdir. Yüksek bir tekrarlama oranları korumak ve geniş bant yayılımı için birkaç mod kilitleme kategorisi vardır. Tüm mod kilitleme mekanizmaları arkasındaki fikir kısa bir darbenin bir bölümünü ayıklamak ve yükseltmektir. Bu amaçla rezonans kaybı ile zamana bağlı olarak değişen kazanç arasında bir mekanizma oluşturmaktır.

Lazer, sürekli dalga (CW) optik bir osilatör olup Q-anahtarlı mod kilitleme Şekil 2.7 (a) da ki gibi çalışır [9]. Q-anahtarlaması yöntemi kullanılarak lazer ışınından çok kısa ve güçlü çıkışlar elde edilebilir. Yansıtıcılardan biri pompalama aralığına bir kısmında

ışınları yansıtacak bir diğer kısmında yansıtmayacak şekilde düzenlenir. Depo edilen enerji yansıtıcı hale getirilen ayna ile darbe olarak yayılır. Q-anahtarlama aynanın çok hızlı dönmesi veya lazer frekansında ışık soğurabilen malzemelerle ile gerçekleştirilebilir Bir yarı iletken lazerin mod kilitlemesi Şekil 2.7 (c) de görüldüğü gibi lazer çıkışı kavite gidiş-dönüş süresi (frekans tekrarlama oranı) tarafından belirlenen üniform ultra darbeleri (birkaç pikosaniye genişliğinde) şeklinde olarak oluşur. Mod kilitli lazerin çalışmasında iki temel metot aktif ve pasif mod kilitleme yöntemleridir. Aktif mod kilitleme için akustik-optik ve elektro-optik yöntemler kullanılırken pasif mod kilitleme yöntemi için doyurulabilen emici yapılar kullanılır. Bu çalışmada pasif mod kilitleme tekniği üzerinde durulacaktır.

2.4 Yarıiletken Lazer Mod Kilitleme Teknikleri

Lazer ışınının gücü mode kilitlenmesi ile artırılabilir. Birbirine yakın ve aralarında belirli bağıntının bulunduğu “kilitli” frekanslarda aynı zamanda titreşim meydana gelir. Yarıiletken diyot lazerler temel iki metot kullanılarak mode kilitleme yapılabilir. Bu yöntemler:

1. Aktif mod kilitleme
2. Pasif mod kilitleme

Aktif mod kilitleme kullanarak kısa optik darbe kaynak örnekleri sunulmaktadır. Bu metot yüksek hızlı iletişim teknolojileri için düşük pikosaniye darbeler sağlamaktadır ve dış boşluk ızgaralı aktif mod kilitleme yarıiletken lazerler üretmek için bir tekniktir. Bir yarı iletken diyot lazer aktif mod kilitleme, cihazın kazancının istenilen mod kilitleme frekansında (tekrarlama oranında) modüle edilmesidir. Mod kilitlemenin istikrarlı olması için AC sinyalinin periyodu kavite gidiş dönüş süresi aynı olmalıdır [17].

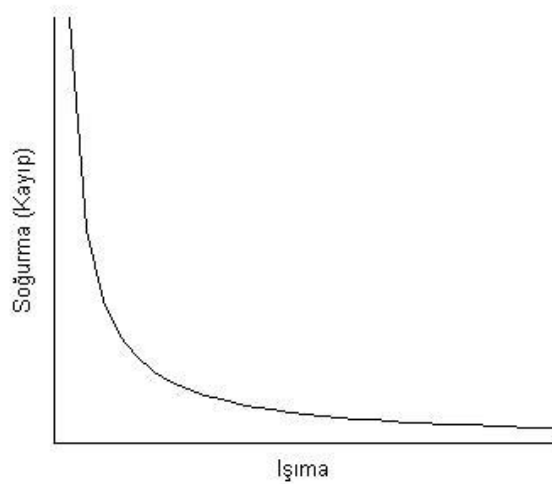
2.5 Pasif Mod Kilitleme

Aktif mod kilitleme için akustik-optik ve elektro-optik yöntemler kullanılırken pasif mod kilitleme yöntemi için doyurulabilen emici yapılar kullanılır. Doyurulabilen

soğurucu malzemeler, gelen ışığın şiddetinin artırılması ile ışığın soğurmasını (soğurma katsayısı) azaltan optik bir malzemedir. Pasif mod kilitleme için doyurulabilen soğurucu temel elemandır. Soğurucu kavite içerisindeki gereksiz gürültüleri soğurur ve kazanç bölgesine göndererek daha fazla geri besleme yapılmasını sağlar. Günümüzde daha çok pasif mod kilitlemede ve lazerlerde Q anahtarlamada kullanılmaktadırlar. Pasif mod kilitlemede, Şekil 2.8 de gösterildiği gibi, artan şiddetle soğurması azalan bir durum vardır. Doyurulabilen soğurucularda, şiddetli lazer ışığına maruz bırakılan malzemenin ölçülen soğurma katsayısının (α) gelen lazer ışığının şiddetine (I) bağıllığı,

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_S} \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada, α_0 doğrusal soğurma katsayısı ve I_S malzemenin doyuma ulaşma şiddetidir. Bu özelliklere sahip olan malzemeler, darbeli lazerlerde lazer darbesinin şeklinin düzenlenmesinde ve lazerlerde yüksek şiddetli ışık elde edilmesi için gerekli kavite yapımında kullanılabilirler. Lazer kavitesi içerisine doyurulabilen soğurucunun yerleştirilmesi ile elde edilirler. Lazer içerisindeki şiddeti düşük olan modlar doyurulabilen soğurucu tarafından soğurularak, lazerden yüksek kazanç alan modlar ise soğurulmadan kavite içerisinde ileri-geri hareket edebilirler. Bu şekilde lazerin tek modda çalışması sağlanır.



Şekil 2.8. Bir doyurulabilen soğurucu için soğurma değişimi

Lazer atmalarının şiddeti düşük olan kısımları, doyurulabilen soğurucu tarafından soğurulurken, atmaların şiddetli kısımları doyurulabilen soğurucudan geçer. Böylece zamanda daralan atma, kazanç ortamından geçerek yükseltilir. Bu işlem, kavite içerisinde tekrarlandığında ise, süreli ve şiddetli atmalar elde edilir. SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) yarıiletken yapı son 10 yılda [2] pasif mod kilitleme yöntemi ile çalışan lazerler için önemli bir bileşen olmuştur [3, 4]. Önemli olmasının sebebi geniş bir dalga boyu ve optik parametre aralığı için tasarlanabilmesidir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

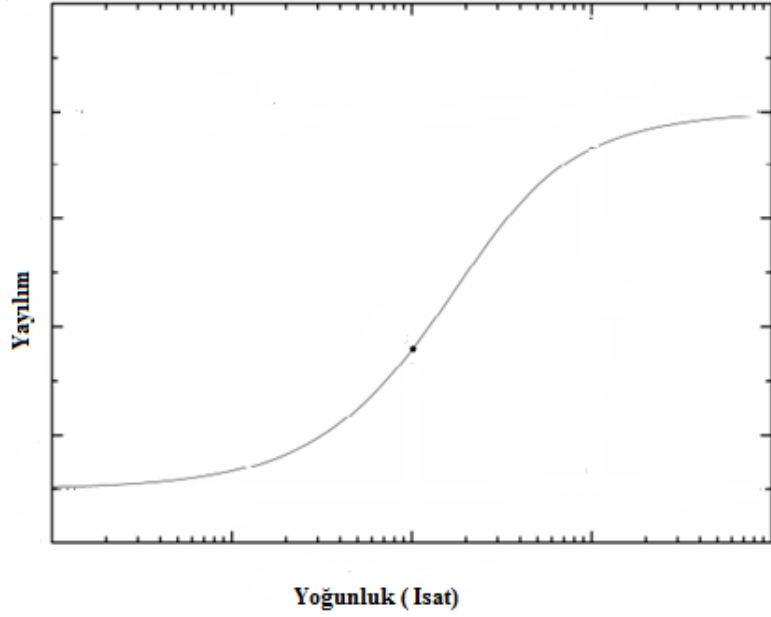
3.1 Yarıiletken Doyurulabilir Soğurucu Aygıtlar

Yarı iletken doyurulabilen soğurucu yansıtıcı (SESAM) önceki bölümde anlatılan pasif mod kilitli lazerlerde mod kilitlemeyi tetiklemek ve yüksek tekrarlamalı darbeler üretmek için kullanılır. Bu bölümde lineer olmayan bir yansıtıcı olan resonatör uç yansıtıcı aynalardan biri ya da çıkış dağıtıcısı olarak kullanılan SESAM veya (Doyurulabilen Bragg Yansıtıcı) aygıtlar incelendi.

SESAM aygıtların özellikleri, tabaka yapısı ve tasarım parametreleri araştırıldı.

3.2 Yarı iletken Doyurulabilen Soğurucu Aygıtlar Temelleri

Doyurulabilen soğurucu yapıyı daha iyi anlamak için düşük ışık şiddeti uygulandığında gelen ışığın şiddetinden bağımsız olarak lineer olmayan bir davranışa sahip iki seviyeli bir sistemler tasarlanmalıdır. Bu sistemin karakteristik doyum değerine (I_{sat}), (Şekil 3.1) seviyesinde üst seviye popülasyonu artarken alt seviye popülasyonu azalır. Geri kazanım süresinden sonra soğurucu, orijinal düşük yayılım davranışını korur. Yarıiletkenler doyabilen soğurucular kullanılarak çeşitli mod kilitleme lazerler yapılabileceği [4] gösterildi. Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerin soğurma kesitleri çok büyük (10^4 cm^{-1}) olduğu için yarıiletken soğurucular çok ince yapılmalıdır. Genellikle 10 nm tek bir kuantum kuyu yeterli olmaktadır. Epitaksiyel metotlarla büyütülen bu kuantum kuyu bir lazer kovuğundaki soğurucuya ilave edilmektedir. 1992 yılında ilk defa bu yöntemle üretilen ve ilerleyen yıllarda çok hızlı bir şekilde gelişen bu sistemler SESAM yapılar olarak bilinmektedir [9]. Doyurulabilen soğurucu, lineer olmayan optik bir kesicidir.



Şekil 3.1. Doyurulabilen soğurucu yapının yayılım-yoğunluk grafiği

SESAM lazer kovuğunda bulunan aynalar içerisine entegre edilmiş bir aygıttır. Bu emici katman için uzun dalga boyu aralığında ışıma yapan 10 nm kalınlığında, az miktarda azot eklenmiş GaInNAs yarıiletken kuantum kuyusu yapısı örnek alındı.

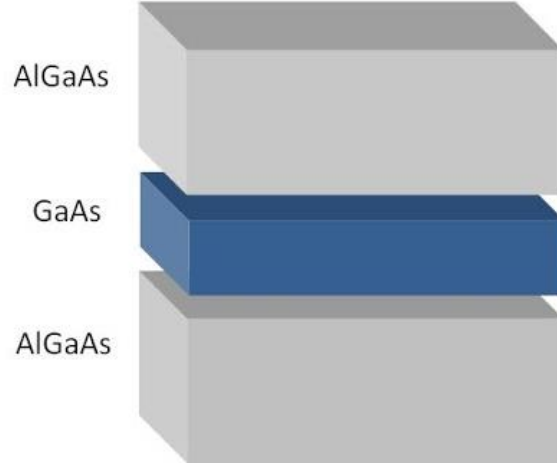
Günümüzde doyurulabilen soğurucu çoklu katmanlar içine yerleştirilebilmektedir. SESAM yapının verimli bir şekilde kullanılması için yapıyı oluşturan yarıiletkenin çeşitli koşulları yerine getirmesi gerekmektedir. İlk ve en önemli koşul uyarılmış taşıyıcıların yaşam zamanlarıdır ve bu taşıyıcıların kısa ömürlü olması gerekmektedir. SESAM ların yüksek tekraralama oranı ve kısa darbeler ile çalışabilmesi için, lazer darbesi sonrası denge koşullarına hızla geri dönülmesi gerekir. Bu durum iletim bandındaki boşluklarının fotonlarla uyarılmış taşıyıcılar tarafından doldurulması ile elde edilebilir. Yüksek kaliteli III-V yarıiletken kuantum kuyularında bu yaşam süresi 1 ns olabilmektedir ve bu süre aygıtlar için çok uzundur. Bu malzemelerde taşıyıcı geri birleşmesi ışıma ağırlıklı oluşur. SESAM yapılarında darbe aralıklarının pikosaniye altında olması için çalışma durumuna tekrar eski haline dönme (recovery) süresi (τ_c) 250 pikosaniye ve altında olması gerekir [2]. Bu değerlere derin seviye kusurları ile hızlı ışımasız geri birleşme sayesinde ulaşılabilir. InGaAs veya GaAs kuantum kuyu sistemler ile bu istenilen değerler elde edilmektedir [18]. GaInNAs büyütürken azot eklememizden kaynaklanan kusurlar sayesinde ışımasız geri birleşmeler sağlanabilir.

Bu avantajları nedenle 1.3 - 1.5 μm SESAM lar için azot temelli (GaInNAs) yarıiletken alaşımlar uygun bir materyal sistemidir [7, 19].

Yarıiletken materyallerin gelişimi ve band aralığı mühendisliği teknolojinin yaygınlaşması ile yeni doyurulabilen soğurucular geliştirilebilmiştir. Yarı iletken doyurulabilen soğurucu yapılar külçe (bulk) ya da kuantum kuyu yapılarında istenilen soğurma dalga boyunda ve tekrar eski haline dönme sürelerinde piko saniye-altı bölgesinde ve doyum akısında üretilebilmektedir. Optik uyarma ile oluşan elektron-boşluk çiftleri oluşur. Bu elektron-boşluk çiftleri külçe veya taşıyıcı hareketinin tek doğrultuda (L_z) sınırlandırıldığı iki boyutlu (kuantum kuyu) yarıiletken [20] kuantum kuyu yarıiletken soğurucularda nano saniye düzeyinde bantlar arası geçişlere ve taşıyıcı-taşıyıcı saçılma işlemlerine uğrarlar [10]. Boyutları ve taşıyıcıların hareketleri belli doğrultularda sınırlanan sistemler düşük boyutlu sistemler olarak adlandırılır.

3.3 Kuantum Kuyu Sistemleri

İki veya daha fazla yarıiletkenden oluşan ve iyon konumları sınır ve ara yüzlerde değişen eklemlere hetero-eklem denir [14]. Farklı tür yarıiletkenleri birleştirerek oluşturulan bu hetero eklemlerin ilginç elektrik ve optik özelliklerini vardır. Hetero eklem band aralıkları farklı iki yarıiletken ard arda büyütülürse kuantum kuyusu sistemleri oluştururlar. Şekil 3.2'de hetero eklem yapımın oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. Dar band aralığına sahip olan yarıiletken tabakası yeterince inceyse, yarıiletken ara yüzeyine dik doğrultuda yani yarıiletkenin büyütme doğrultusunda taşıyıcıların hareketleri kuantize olur (sınırlanır). İki boyutlu ya da kuantum kuyusu sistemleri olarak adlandırılan bu sistemlerde taşıyıcıların hareketi büyütme doğrultusunda kuantize olurken, büyütme doğrultusuna dik diğer iki doğrultuda hala serbesttir.



Şekil 3.2. AlGaAs/GaAs kuantum kuyu hetero eklem yapısı

Elektronlar bu potansiyel kuyusu içinde hareket ederler. Potansiyel kuyularında enerji kuantumlaşmış seviyelerde tanımlanır. Kuyu içindeki enerji seviyelerini, kuyu genişliği L boyunca duvarlardan yansıyarak oluşan kararlı dalgalar belirler. Kuantum kuyusunda oluşan kuantumlu (kesikli) enerji,

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m^* L^2} \quad (3.1)$$

ile verilir; burada E_n kuyu bölgesinde iletkenlik bandı kenarından ölçülen enerji, n pozitif tamsayı ($n = 1, 2, 3, \dots$), L kuyunun genişliği, m^* elektronun kuyu içindeki etkin kütesidir. Kuyu genişliği atomik boyutlara göre küçük olmasına rağmen elektronun kuyu içerisinde etkin kütleyle sahip olması bu farkı ortadan kaldırır. Kuyu içerisinde kesikli enerjilerin varlığı, bu seviyeler arasında gerçekleşen geçişlerin yaydığı ışınımın seçici yüzeyler tarafından soğurulması sonucu kanıtlanır.

Kuantum kuyusunun yasak enerji bant aralığı; katkı yapılan yarıiletkenin cinsine, seçilen katkı konsantrasyonuna, değerlik ve iletim bantlarının süreksizliklerine bağlıdır. Ayrıca kuyu genişliği değiştirilerek kuantum kuyusunun bant aralıkları da değiştirilebilir. Önceki kısımda belirtildiği üzere, kuantum kuyusu parametreleri değiştirilerek sistemin optik özellikleri ayarlanabilir.

3.4 GaInNAs/GaAs Kuantum Kuyu Yapısı

GaInNAs düşük kayıplı soğurucular için çok uygun bir malzemedir. GaInNAs büyütme sıcaklığı 450 ° C, klasik InGaAs ya da GaAs malzemenin sıcaklığından daha yüksek olduğu için iletkenlikleri bu yapılara göre daha fazladır. Ayrıca GaInNAs/GaAs yapının iletkenlik bandı süreksizliği diğer alternatif uzun dalga boylu lazerlerden daha büyük olduğu için sıcaklık değişimlerinden az etkilenmektedir. Azot (N) atomlarının elektronegatifliğinin yüksek olması GaInNAs yapıların iletkenlik bandı süreksizliğinin yüksek değerlerde olmasını sağlar. Bu nedenle alternatif yapılarla karşılaştırıldığında çok daha iyi sıcaklık performansları vardır. İletkenlik bandı süreksizliğinin büyük olması kuyu içerisindeki taşıyıcıların engel tabakasına kaçmasını yani sızıntı akımını önler ve böylece lazer ışınması için gereken eşik akımı düşük olur. GaInNAs yapıların diğer önemli özelliği de azot miktarının artmasıyla band aralığının azalmasıdır. Bu durum temelde azot atomlarının yüksek elektronegatifliğinden kaynaklanır ve III-V grubu elementlerin oluşturduğu alaşımlardan farklılık gösterir.

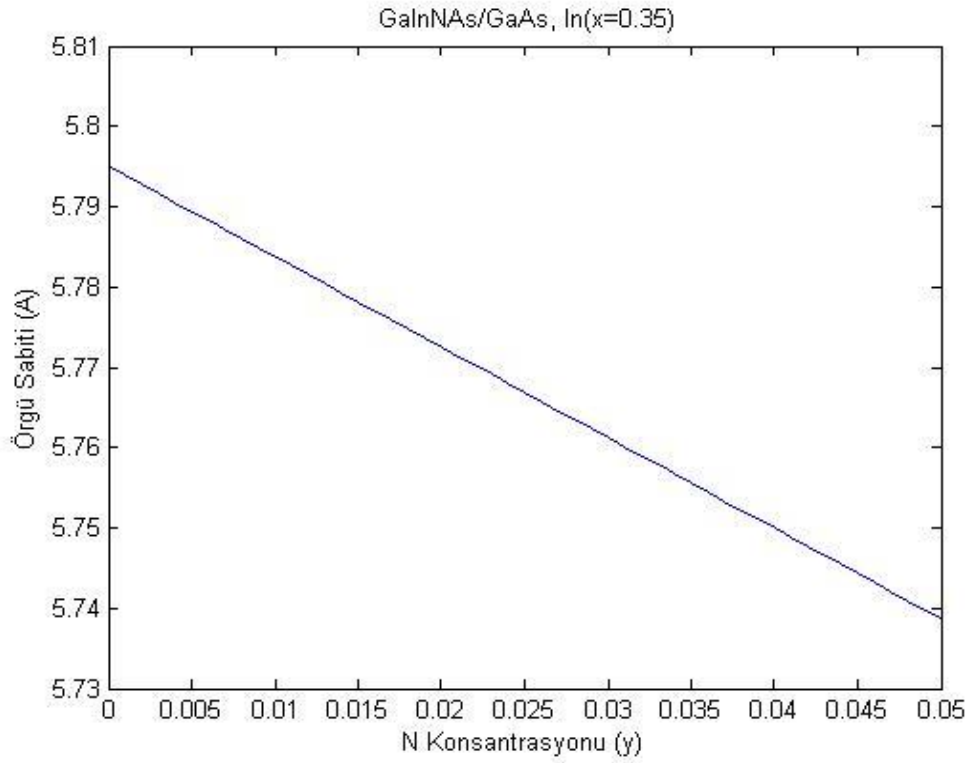
Direk band aralığına sahip GaInNAs yarıiletken kuantum kuyu materyal parametreleri interpolasyon yöntemi [20] ile hesaplanabilir. Kuantum kuyularda kuyu ve bariyere ait parametrelerinin teorik analizler yapılabilmesi için belirlenmesi gereklidir. Bu alaşımlara ait materyal parametreleri kompozisyona, oryantasyona bağlı olarak değişmektedir. Dörtlü yapıda $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ şeklindeki alaşıma ait materyal parametreleri ise

$$B_{A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}} = xyB_{AC} + (1-x)yB_{BC} + x(1-y)B_{AD} + (1-x)(1-y)B_{BD} \quad (3.2)$$

şeklinindedir. Burada $B_{AB,AC,AD,BD}$ ikili materyal parametreleri olup Tablo 3.1 de verilmiştir. Bu yöntem kullanılarak elektronun kütlesi, yasak enerji aralığı, spin ayrışma band uzaklığı, deformasyon potansiyelleri, örgü sabiti gibi birçok parametre hesaplanabilir.

Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan III-V yarıiletkenlerin materyal parametre değerleri [21]

Material	GaAs	GaN	InAs	InN
a_0 (Å)	5.6533	4.5	6.0584	4.98
E_g (eV)	1.424	3.299	0.417	0.78
Δ_0 (eV)	0.34	0.017	0.39	0.005
$m_e(m_0)$	0.067	0.15	0.022	0.14
$m_h(m_0)$	0.35	0.855	0.333	0.833
n	3.52	2.32	2.89	3.49



Şekil 3.3. İnterpolasyon metodu kullanılarak hesaplanan örgü sabitinin değişen azot miktarına bağlı olarak değişimi değerleri

Şekil 3-3'de interpolasyon yöntemi ile örgü sabitini, azot konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi hesaplanmıştır. Benzer şekilde diğer parametrelerde hesaplanabilmektedir.

Yasak bant aralığı ise eklenen azot miktarına bağlı olarak iletim bandında yarılmalara sebep olduğu için yasak bant aralığı farklı şekilde hesaplanabilir.

Düşük oranlarda azot içeren III-V grubu yarıiletkenlerin band yapısı ilk olarak “Band Anticrossing Model” (BAC) olarak adlandırılan bir modelle açıklanmıştır [22]. Çok düşük orandaki azot GaAs örgüsü içerisinde akseptör atomu gibi davranır ve E_N ile gösterilen lokalize akseptör seviyesinin oluşumuna sebep olur. N katkısı sonrasında sistemin yasak bant aralığı;

$$E_{\pm} = \frac{E_N + E_M \pm \sqrt{(E_N - E_M)^2 + 4V_{MN}^2}}{2} \quad (3.3)$$

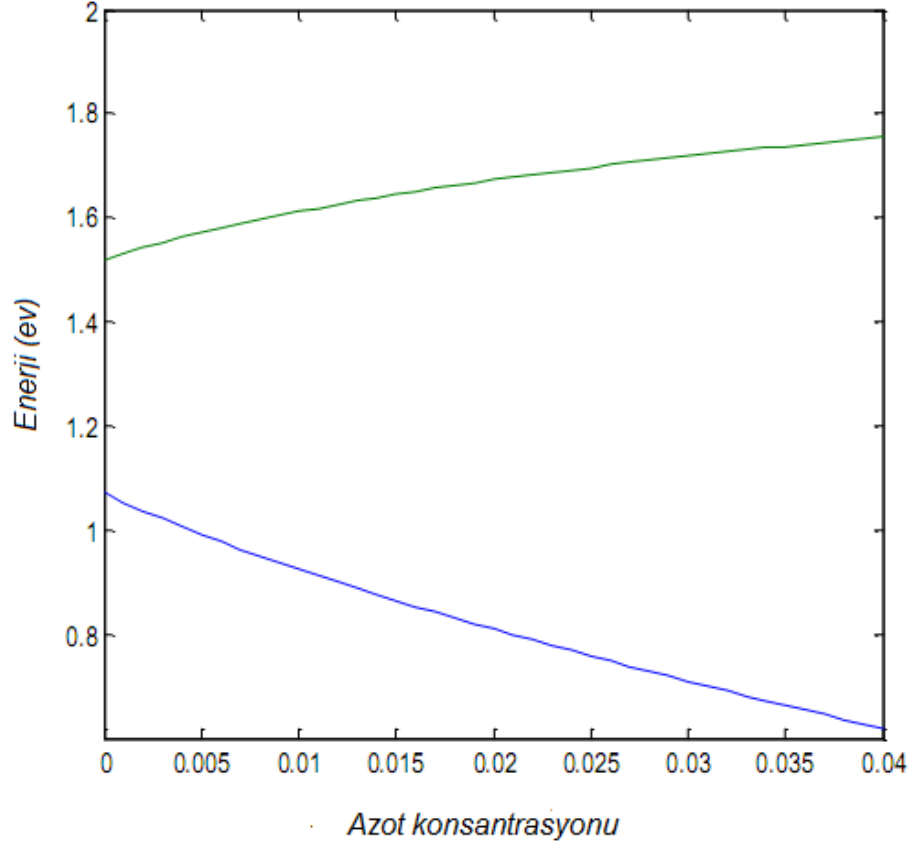
İle elde edilir. İletkenlik bandının N seviyesiyle etkileşmesi sonucu iletkenlik bandı parabolik olmayan iki seviyeye ayrılır. Bunlar E_+ ve E_- seviyeleridir. Burada E_M ev sahibi kristalin iletkenlik bandını gösterir V_{mn} matris elemanı, azot seviyesi ile ev sahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı seviyesi arasındaki etkileşimi tanımlar. V matris elemanı;

$$V_{MN} = C_{MN} \sqrt{y} \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır. İfadede C_{MN} çiftlenim sabiti y ise azot konsantrasyonudur. Hesaplamalarda kullanılan parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.2. Zıt geçiş band modeli parametreleri [23]

Parametre	GaInNAs/GaAs
E_M	$E_{0,InGaAs} - 1.55 y$ (eV)
E_N	1.52- 3.9 y (eV)
C_{MN}	2.7 (eV)



Şekil 3.4. GaInN/GaAs kuantum kuyu (In (x) %35 oranında) E₋ ve E₊ enerji seviyeleri

Şekil 3.4’de görüldüğü üzere iletim bandındaki yarıılma nedeniyle E₋ enerji seviyesinin aldığı değerlerle, yarıiletkenler 1.3 µm dalgaboyunda ışımaya yapabilmektedir.

GaInNaAs katıhal lazerleri, azot katkılı doyurulabilen soğurucu ayna (SESAM) yapılarla birleştirilerek mod kilitli ve ultra hızlı darbeli lazer ışınları üretilebilmektedir.

3.5 Yarıiletken Dooyurulabilen Soğurucu Yansıma Tasarımları

SESAM aygıtların farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Her tasarım, istenilen çalışma seviyesinde olan mod-kilitleme katı hal lazer ihtiyacını karşılamak üzere farklı olabilmektedir [14]. Aygıt tasarımlardan yüksek hassasiyetli anti-rezonant Fabry-Perot dooyurulabilen soğurucular (A-FPSA) 1992’de Nd: YAG ve Nd: YLF katı hal lazerlerin kuramsal ve kararlı pasif mod-kilitlemesini desteklemede kullanılan ilk iç boşluklu SESAM’dır [4]. Birçok katı hal lazer, femto saniyenin yanı sıra piko saniye sürelerle

atım oluşturup pasif olarak mod kilitlemelidirler [7, 12, 24]. Yüksek hassasiyete sahip A-FPSA, soğurucu ve onun boşluğunun toplam kalınlığını ayarlayarak anti rezonansa çalışan Fabry-Perot boşluğu oluşturarak iki DBR yansıtıcı arasında doyurulabilen soğurucu kısmı ve onun geçiş boşluğu arasında üst üste oluşturularak yapılabilir [25].

SESAM aygıt tasarımlarında soğurucu kısım katmanlar şeklindedir veya Dağıtılmış Bragg Ayna (DBR) yansıtıcının üzerindedir. Bu özelliğinden dolayı bu aygıt yüksek ayna olarak (SESAM) ya da çıkış dağıtıcı olarak kullanılır.

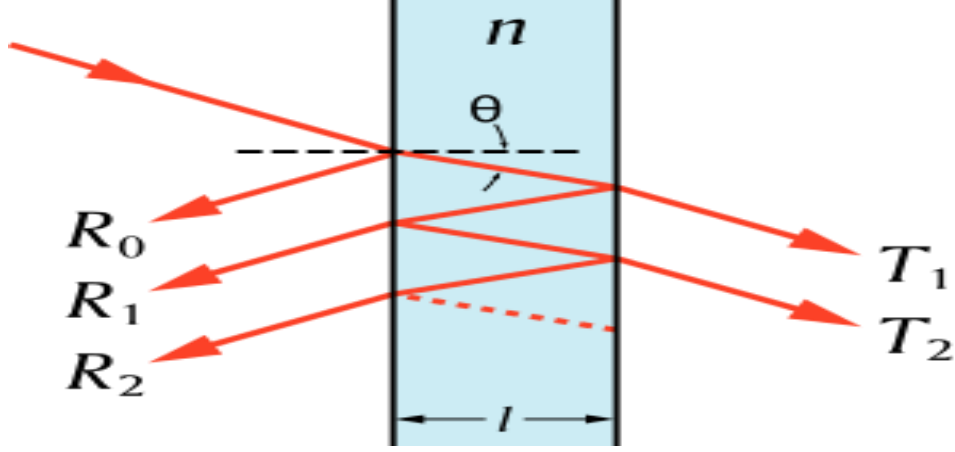
Yüksek hassasiyetteki SESAM'ın üst DBR yansıtması, doyurulamayan kayıpları azaltan, modülasyon derinliğini artıran ve soğurucu kısmını daha ileri düzeyde koruma sağlayan kaplama ile yer değiştirir. SESAM'ların bu tipi, düşük hassasiyetteki A-FPSA' dan çok daha iyi faaliyet gösterir [25].

3.6 Tasarım Kriterleri

SESAM, parametreleri dikkatli bir şekilde verimli ve optimum çalışmayı sağlamak üzere tasarlanmış lineer olmayan optik bir aygıttır. Bu kısımda temel SESAM parametreleri olan modülasyon derinliği, doyum akısı ve doyurulamayan kayıplar hakkında kısa bilgi verildi.

3.7 Transfer Matris Metot

Transfer matris yöntemi bir dalganın optik ve akustik yayılmalarını analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Elektromanyetik ya da akustik dalgalar çok katmanlı bir yapı içerisine girdiği zaman birden fazla yansıyan ve ilerleyen dalga vektörleri oluşacaktır. Bu yansıyan ve ilerleyen dalga vektörlerini hesaplama yöntemi olan transfer matris yöntemi SESAM yapılar içinde kullanılabilir. Şekil 3.5'de bu durum görülmektedir.



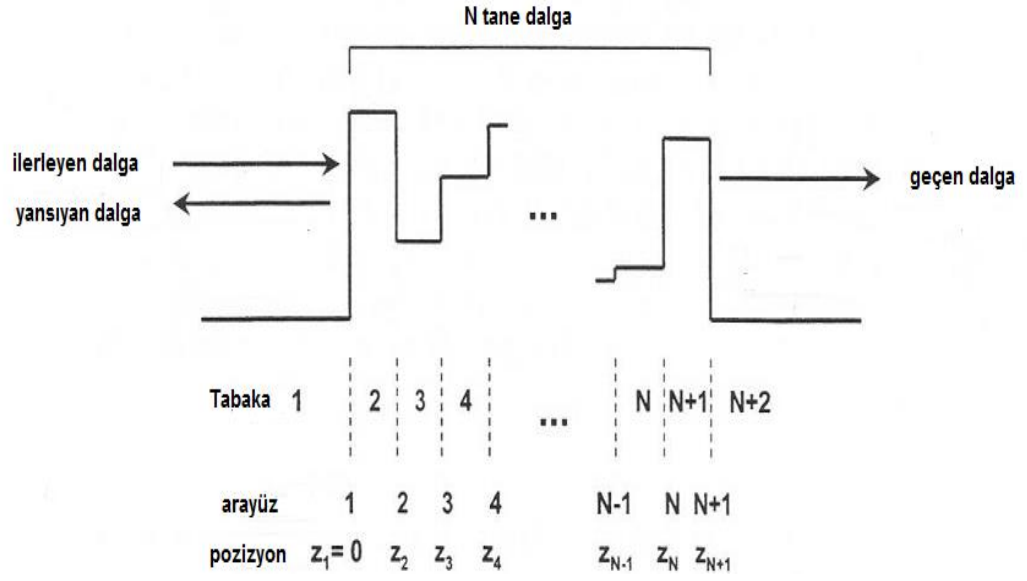
Şekil 3.5. Geçirgen bir yüzeye gelen ışının birden fazla yansımaları

Arayüzleri Şekil 3.5’de gösterildiği gibi, yansımaların kendileri de kısmen iletilir ve kısmen yansıtılır. Tam yol uzunluğuna bağlı olarak, bu yansımalar yıkıcı veya yapıcı girişim yapabilirler. Bir tabaka yapısının genel yansıma hesaplanması karmaşık bir durumdur. Sonsuz sayıda yansımaların toplamını bulmak gerekmektedir. Transfer matris metodu, bu gerçeğe dayanmaktadır.

Maxwell denklemlerinin elektrik alanında bir ortamdan diğerine sınırları boyunca süreklilik koşulları vardır. Elektrik alan bir tabakanın başlangıcında biliniyorsa, tabakanın sonunda da alan basit bir matris işlemi ile türetilmektedir. Tabakalarının hepsi ve daha sonra tek katmanlı matrislerin ürünü olan bir sistem matris olarak temsil edilebilir. Bu yöntem transfer matris yöntemi denir. SESAM yapıları için önemli bir parametre olan elektrik alan transfer matris yöntemi ile hesaplanır.

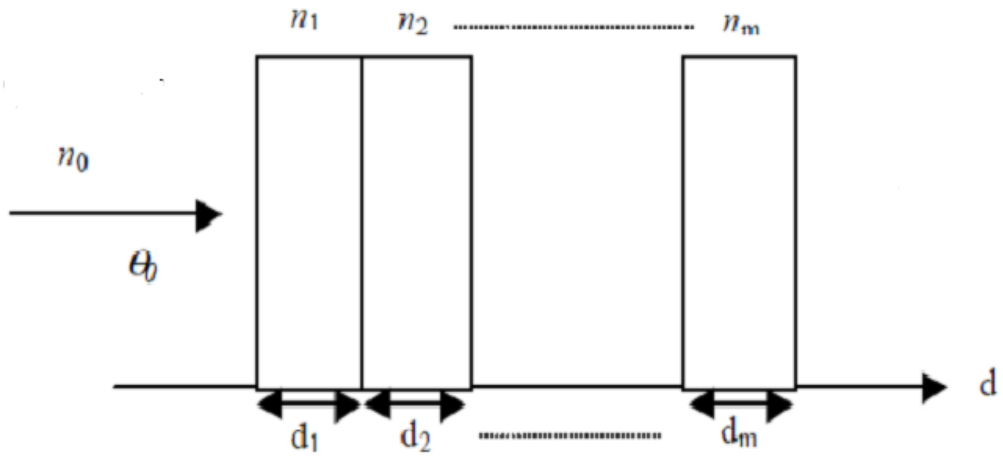
3.8 Elektrik Alanın Transfer Matris Yöntemi İle Hesaplanması

Sesam yapıları çok katmanlı olarak tasarımı edildiği için bu katmanların içindeki elektrik ve manyetik alan hareketleri ve yansımaları sesam yapıları için önemlidir. Çok katmanlı yapıların yansıma ve geçirgenliklerini hesaplamak için geçiş matris metodunu kullanıldı [26].



Şekil 3.6. Transfer matris metot terminolojisi [20]

Şekil 3.6'da çok katmanlı bir yapıya giren dalganın katman içindeki hareketi görülmektedir. Burada N katman sayısıdır.



Şekil 3.7. Çok katmanlı bir yapının gösterimi [20]

Şekil 3.7’de çok katmanlı bir yapı görülmektedir. Burada d tabaka kalınlıkları, n ise kırılma indisidir. Maksimum yansıtmanın oluştuğu durumda rezonans dalgaboyu λ_B nin

$$\frac{\lambda_B}{4} = d_m n_m \quad (3.5)$$

Denklem 3.5 şartını sağlaması beklenir. Yüzey arası $(m-1)$ ve m tabakaları arasındaki sınır koşulları kullanılarak dalga denklemleri yazılır.

$$E_{m-1}^+ = \frac{1}{t_m} [E_m^+ \exp(i\delta_m) + r_m E_m^- \exp(-i\delta_m)] \quad (3.6)$$

$$E_{m-1}^- = \frac{1}{t_m} [r_m E_m^+ \exp(i\delta_m) + r_m E_m^- \exp(-i\delta_m)] \quad (3.7)$$

Bu denklemler düzenlenirse,

$$\begin{pmatrix} E_{m-1} \\ H_{m-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_m & i\sin\delta_m/\mu_m \\ i\mu_m\sin\delta_m & \cos\delta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Buradan herhangi bir tabaka belirlenirse,

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \prod_{m=1}^N M_m \begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

M_m sistemin karakteristik matrisi olmak üzere,

$$M_m = \begin{pmatrix} \cos\delta_m & i\sin\delta_m/\mu_m \\ i\mu_m\sin\delta_m & \cos\delta_m \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ M_{sub} \end{pmatrix} E_{sub}^+ \quad (3.11)$$

olarak elde edilir. Bu denklem,

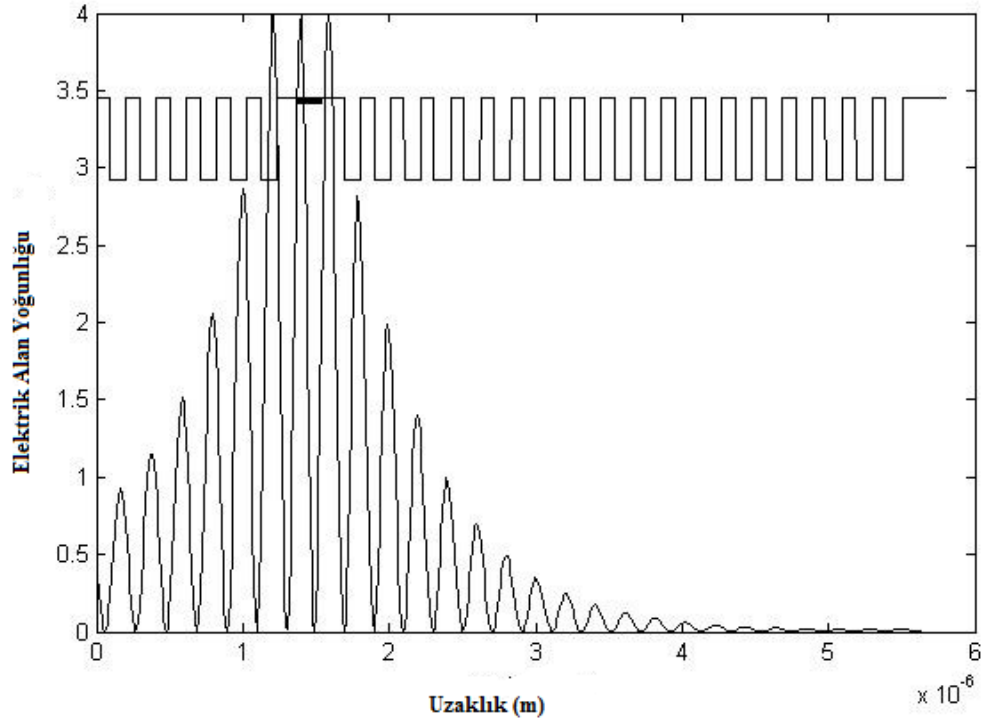
$$\begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ M_{sub} \end{pmatrix} E_{sub}^+ \quad (3.12)$$

$$E_n^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ M_{sub} \end{pmatrix} E_{sub}^+ \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Y optik geçirgenlik katsayısıdır ve $Y=H_0/E_0$ ile belirlenir.

Bu denklemleri düzenlersek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{m=1}^N M_m \begin{pmatrix} 1 \\ \mu_{sub} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$



Şekil 3.8. Elektrik alan yoğunluğunun uzaklığa bağlı olarak değişimi

Şekil 3.8’de çok katmanlı bir yapı içinde ilerleyen bir dalganın elektrik alanının uzaklığa bağlı değişimi hesaplanarak gösterilmiştir.

3.9 Yansıtma Parametrelerinin Hesaplanması

Elde edilen transfer matrisi ile elektrik alanın yanı sıra yansıma ve geçiş oranları da bulunabilir.

$$R = \left| \frac{\mu_0 B - C}{\mu_0 B + C} \right|^2 \quad (3.15)$$

$$T = \frac{4\mu_0 \mu_{sub}}{|\mu_0 B + C|^2} \quad (3.16)$$

Tabaka katmanları arasında soğurma olmadığı kabul edilirse

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & i\sin\delta_1/n_1 \\ in_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_2 \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

Bağıntısı elde edilir [27]. Burada δ_1 tabakalar da oluşan faz farkıdır.

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} d \cos \theta_1 \quad (3.18)$$

$$Y = \frac{C}{B} \quad (3.19)$$

ve yansıma katsayısı

$$r = \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y}, \quad (3.20)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada n_0 gelen ortamın kırılma indisidir. n tabakalı çok katmanlı bir sistemin karakteristik matrisi ise tek katmanlı sistemin karakteristik matrisinin her tabaka ile ayrı ayrı çarpımı ile bulunur.

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{r=1}^n \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & i \sin \delta_1 / n_1 \\ i n_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_{n+1} \end{pmatrix} = \prod_{r=1}^n M_i \begin{pmatrix} 1 \\ n_{n+1} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

N_{n+1} sistemin taşıyıcı tabakasının kırılma indisidir. Bu sistemin fazı ise;

$$\delta_r = \frac{2\pi n_r d_r \cos \theta_r}{\lambda} \quad (3.22)$$

bağıntısı ile verilir. Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m çift, çeyrek tabaka kalınlığına sahip tabaka sistemi için geçiş matrisi;

$$M = \sum_{i,j=1}^m (M_i M_j) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

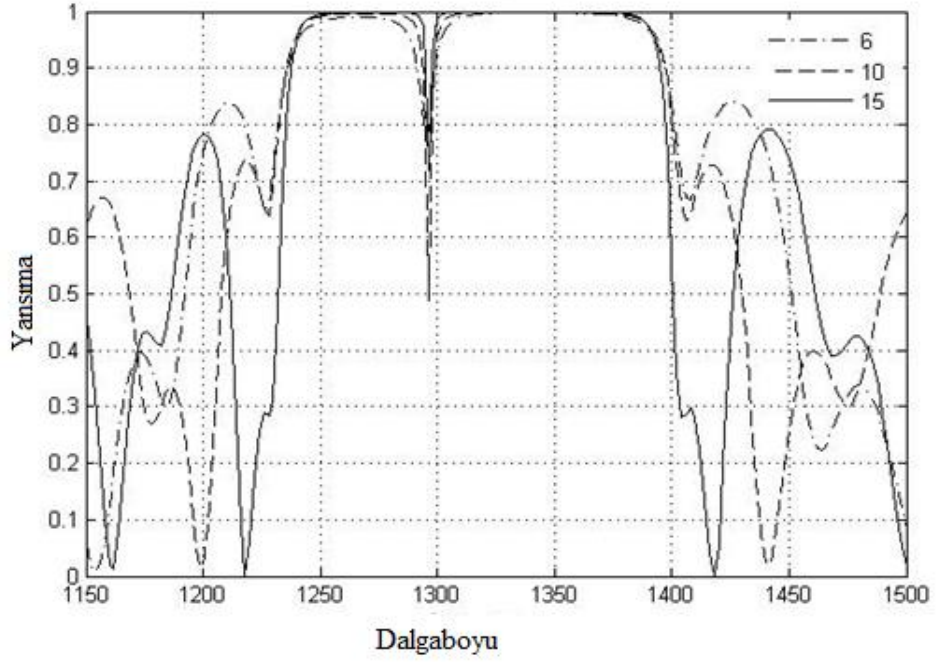
olacaktır. M_i , n_1 kırılma indisli ortamın, M_j ise n_2 kırılma indisli ortamın karakteristik geçiş matrisidir. Yansıma katsayısı bu ifadelerden yararlanılarak;

$$r = \frac{n_o M_{11} + n_o n_s M_{12} - M_{21} + n_s M_{22}}{n_o M_{11} + n_o n_s M_{12} + M_{21} + n_s M_{22}} \quad (3.24)$$

elde edilir. Burada n_s taşıyıcı tabakanın kırılma indisidir. Yansıma şiddeti ise;

$$R = |r|^2 \quad (3.25)$$

olarak verilir.



Şekil 3.9. Katman sayısına bağlı olarak yansıtma spektrumunun dalga boyuna bağlı değişimi

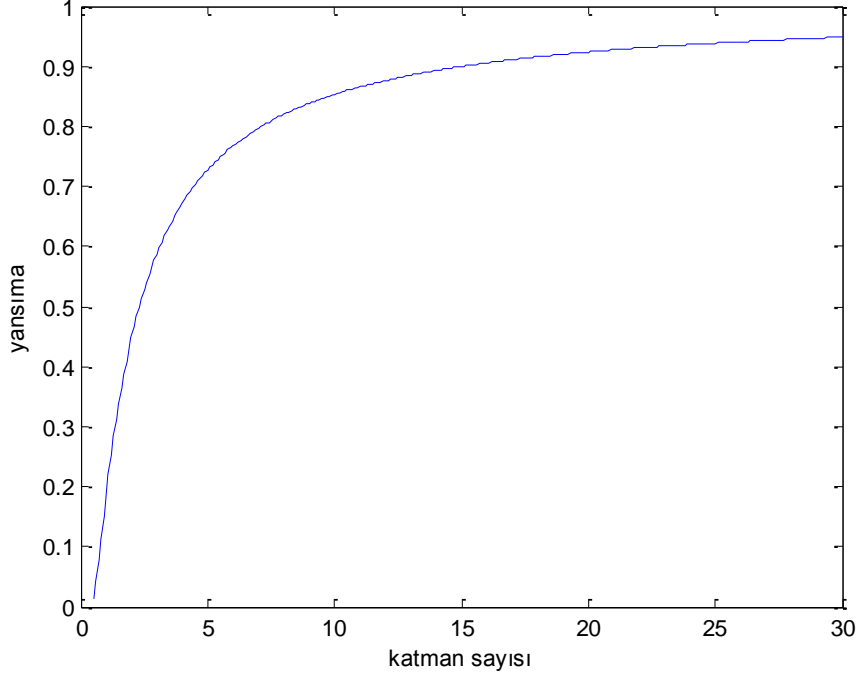
Şekil 3.9’da katman sayıları 6-10-15 olarak belirlenmiş ve buna bağlı olarak değişimi hesaplanmıştır.

3.10 Doyurulamayan Kayıplar

Bunlar, özellikle DBR yansıtıcıların transmisyonu ve soğurmasından kaynaklanan kayıplardır. Doyurulamayan kayıplar, SESAMOC durumunda bile mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Aksi takdirde, lazer etkisiz kalır ve kararsız olma eğilimindedir. Uygun DBR materyallerinin seçilmesi ile soğurma kayıpları %0.1’in altına düşürülebilir. DBR tabakaların sayısının artması transmisyon kayıplarını minimize edebilir. Örneğin 980 nm dalga boyundaki diyot lazerleri mod kilitlemede kullanılan 26 çift AlAs/GaAs DBR yapılı SESAM yapılar tasarım dalga boyunda %0.1’in altında transmisyon kaybına sahiptirler. Ticari olarak mevcut SESAM yapılar tasarım dalga boyunda %0.3 den küçük olarak genel bir doyurulmayan kayba sahip olabilirler.

$$R = 1 - 4 \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^2 \frac{n_s}{n_H^2} \quad (3.26)$$

Bu denklemde R yansıtma, n_L alt katmanın kırılma indisi, n_H üst katmanın kırılma indisi, n_H katkılanan yapının kırılma indisi olmak üzere AlAs/GaAs yapısı için yansıtmanın katman sayısına bağılı grafiğı elde edildi. (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. Yansıtmanın katman sayısına bağılı değışimi

Yansıtma oranları geçiş matris yöntemi [26] ile hesaplandı. Yansıtma oranları dalgaboyuna bağılı olarak, simülasyon programı kullanılarak hesaplandı.

3.11 Doyurulabilir Soğurma Kayıpları (Modülasyon Derinliğı)

Doyurulabilir soğurma kayıpların toplam miktarı veya SESAM yansıtılabilirlik modülasyon derinliğı (ΔR), tasarım ile kontrol edilebilen bir parametredir. Bundan dolayı soğurucu kısmı ile örtüşen devamlı dalga kalıbının elektrik alan kuvvetinin karesi ile orantılıdır. Bununla birlikte bu doyurulabilir kayıp dalga boyuna bağılıdır. Çünkü yarı iletkenler dalga boyuna bağılı soğurma gösterirler. Sonuç olarak SESAM yansıtılabilirliğı dalga boyuna bağılı modülasyon derinliğine sahiptir. Soğurma rezonatörde sirküle eden ışık yoğunluğunun/şiddetinin bir fonksiyonudur. Hızlı doyurulabilir soğurma varsayıldığında Eşitlik (3.22) de ki gibi ifade edilir.

$$\alpha(l) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{l}{l_{\text{sat}}}} \quad (3.27)$$

Burada α_0 , küçük bir sinyal soğurmasıdır ve I_{sat} [10] tarafından verilen doyum yoğunluğudur.

$$I_{\text{sat}} = \frac{\hbar\omega}{\sigma_a \tau_a} \quad (3.28)$$

Burada $\hbar\omega$, lazer foton enerjisidir; τ_a soğurucu geri kazanım süresidir ve σ_a yarı iletkenler de soğurma kesit değeri denilen soğurma material parametresidir ve

$$\alpha = \sigma_a D(E) \quad (3.29)$$

$D(E)$ olarak hal yoğunluğu ve soğurma katsayısı ile ilişkilidir.

AR kaplı SESAM simülasyonlarında soğurucu kısım, alan yoğunluk modellerinin zirvesinde konumlanmaktadır. Bu yüzden küçük sinyal soğurması (doyurulabilir soğurma α_0) maksimumdur. Doyurulabilir soğurmayı azaltmak için doyurulabilir soğurma kısmı alan yoğunluğunun böyle bir soğurmayı indüklediği bir konuma değişir. Mod kilitleme teorileri, mod kilitlemeli lazer atım aralığı ile soğurucu modülasyon derinliği arasında ters bir ilişkinin olduğunu önermektedir [6], [18], [21].

$$\sigma_p \sim \left(\frac{2}{\Delta R}\right)^n$$

Üstel faktör $n > 0$ bir mod kilitleme teorisinden diğerine değişir.

Modülasyon derinliği (ΔR) dir. Modülasyon derinliği, denge durumunda tam doymuş SESAM ve aygıt arasındaki yansıtma farkını gösterir. Doyduktan sonraki kayıplara ise doyurulabilir olmayan kayıplar (ΔR_{ns}) denir. Bu kayıplar SESAM yapılar için istenmeyen bir durumdur ve mümkün olduğu kadar minimum seviyede olması gerekmektedir.

Darbe enerji dozu (F_p) da SESAM yapının yansıtıcılığını etkileyen bir parametredir. Modülasyon derinliğinin $1/\tau$ ya düştüğü çıktığı değere $F_p = F_{\text{sat}}$ denir ve modülasyon derinliğinin %37 ye düştüğü değere ise doyum akısı (F_{sat}) denir. Eğer $F_p \gg F_{\text{sat}}$

gerçekleştiği durumda yansıtıcılık azalır. SESAM tasarımı sırasında bu duruma dikkat etmek gerekmektedir. İdeal bir SESAM için

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{-\alpha I}{F_{Sat}} \quad (3.30)$$

Burada I doyum yoğunluğu, α soğurma katsayısıdır. Denklem 3.30'da F_{Sat} ile α 'nın ters orantılı olduğu görülmektedir.

$$F_{Sat} = \frac{h\nu}{2\sigma} \quad (3.31)$$

Burada σ tesir kesiti ν gelen ışının frekansıdır.

$$\alpha = \sigma N_D \quad (3.32)$$

$$I_{Sat} = \frac{h\nu}{2\sigma\tau} = \frac{F_{Sat}}{\tau} \quad (3.33)$$

Burada I_{Sat} doyum yoğunluğu dur ve SESAM yapılar için önemli bir parametredir çünkü I_{Sat} tek bir darbe ile ne kadar doyum olduğunu belirler. $I_{Sat} < 100$ MW/cm² olmalıdır. Değeri F_{Sat} ve τ ya bağlıdır.

SESAM yapının son yansıması R_f olmak üzere;

$$F_P = \frac{R_0}{R_0 - (R_0 - 1)\exp(-\frac{F_P}{F_{Sat}})} \quad (3.34)$$

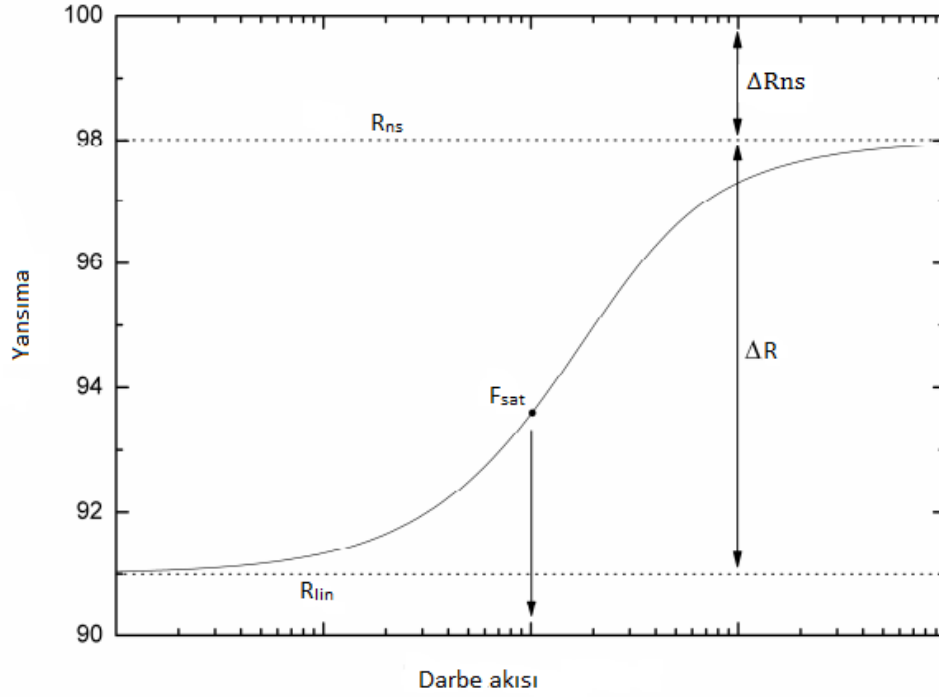
şeklinde bulunur.

$$R(F_P) = R_{ns} \frac{\log\left(\frac{R_0 - 1}{R_f - 1}\right)}{\log\left(\frac{R_0 - 1}{R_f - 1}\right) - \log\left(\frac{R_0}{R_f}\right)} \quad (3.35)$$

Denklem 3.35 ile R nin F_p ye bağlı denklemi elde edilir.

$R_{ns} = R(F_p \rightarrow \infty)$ değerine denir. Zayıf darbeler için ($F_p \rightarrow 0$) değerine yaklaşırken

Güçlü darbeler için ($F_p \rightarrow \infty$) sonsuz değerine yaklaşır.



Şekil 3.11. SESAM yapılar için yansıtma- darbe akısı değişimi

SESAM yapıların yansıtıcılığı soğurma katsayısı $R=1-A_0$, (A) ya bağlı olarak değişmektedir. Ans doyurulamayan kayıplar, A_0 küçük sinyallerdeki soğurma olmak üzere modülasyon derinliği (ΔR) denklem 3.36 ile hesaplandı.

$$\Delta R = A_0 - A_{ns} \quad (3.36)$$

olarak hesaplanır. Gevşeme süresi uzadıkça modülasyon derinliği artmaktadır. Tabloda hızlı soğurma ve yavaş soğurma için (ΔR) değerleri tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Hızlı ve Yavaş Soğurma İçin Tipik Değerler [26]

Hızlı soğurma	$\tau = 500$ fs	$\Delta R = 0.5 A_0$	$A_{ns} = 0.5 A_0$
Yavaş soğurma	$\tau = 30$ fs	$\Delta R = 0.8 A_0$	$A_{ns} = 0.2 A_0$

3.12 Soğurma

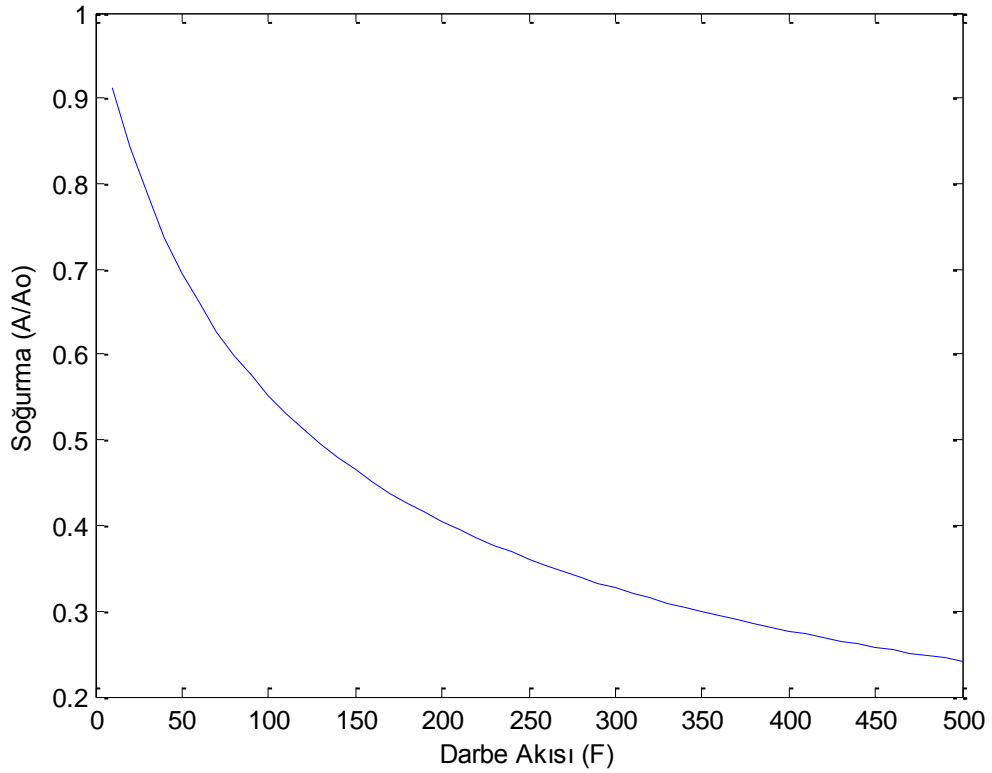
SESAM aygıtlar lineer olmayan optik aygıt olduğu için soğurma (A), doyum akısına bağlıdır. Bu ilişki denklem 3.37 ile verilir;

$$A(r) = \frac{A_0}{1+F/F_{sat}} \quad (3.37)$$

Burada A_0 doyurulabilir soğurma, F darbe akısı, F_{sat} doyum akısıdır.

$$A = \frac{1}{2\pi r_0^2} \int_0^\infty \frac{F(r)}{F_0} A(r) 2\pi r dr = A_0 \frac{F_{sat}}{F} \ln\left(1 + \frac{F}{F_{sat}}\right) \quad (3.38)$$

A değeri Şekil 3.12’de görüldüğü gibi darbe akısı değeri arttıkça soğurma (A/A_0) azalmaktadır.



Şekil 3.12. Hesaplanan soğurma- darbe akısı grafiği

GaInNAs için hesaplanan soğurmanın darbe akısına göre grafiği şekildeki gibidir. Küçük soğurmalar için $F < F_{sat}$, soğurmanın lineer olarak azaldığı görülmektedir.

Düşük sinyaller için A_0 elektrik alan gücü karesi ile orantılıdır. Bu nedenle SESAM aygıtlarında f_{sat} değerleri uygun bir değerde ayarlanabilir.

Kısa darbeler için iki foton soğurma etkisi toplam emilimi artırmaktadır.

$$A_{TPA} = \beta I d = \frac{\beta F d}{\tau_p} \quad (3.39)$$

Burada β iki foton soğurma katsayısı, I darbe yoğunluğu, d emici yüzey kalınlığı, F darbe akısı, τ_p darbe süresidir.

Bu formülü yansımaya formülüne eklenecek olursa

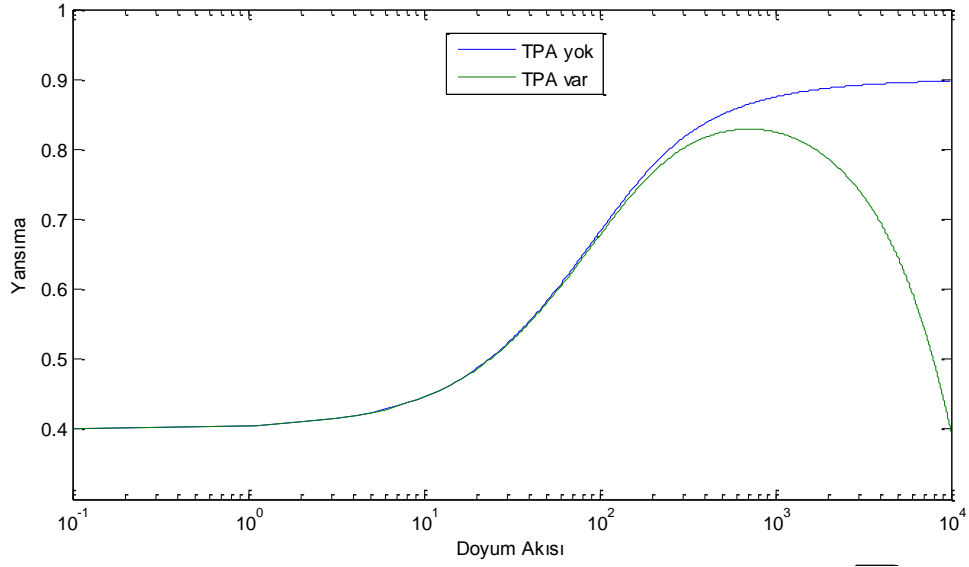
$$R = 1 - A_{ns} - \Delta R \frac{F_{sat}}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{F_{sat}} \right) - \frac{\beta F d}{\tau_p} \quad (3.40)$$

formülü elde edilir.

TPA etkisi ile oluşan doyum akısının yansımaya bağlı grafiği, tablodaki tipik değerler kullanılarak hesaplanmış ve grafiği elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Doyum Akısı Yansımaya Parametreleri İçin Tipik Değerler [26]

Parametre	Sembol	Değer
İki foton soğurma katsayısı	β	25 cm/GW
Doyum Akısı	F_{sat}	50.6 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$
Emici Yüzey Kalınlığı	d	2 μm
Doyurulamayan Kayıplar	A_{ns}	0.1
Modülasyon Derinliği	ΔR	0.5
Darbe Süresi	τ_p	100 fs



Şekil 3.13 Hesaplanan yansımanın doyum akısına bağlı değişim grafiği

3.13 Soğurucu Doyum Akısı

Enerji yoğunluğu ya da atım akışı (O), atım yoğunluğundan ziyade doyurulabilir soğurucu doyum işlemini değerlendirmek için kullanılır. Bundan dolayı her doyurulabilir soğurucu kendi kendine sınırlı geri kazanım süresine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Mod kilitlemeli bir lazerde akım akısı; ortalama çıkış optik gücü (P_{av}), çıkış dağıtıcı yansıması (R), atım tekrar oranı ve SESAM üzerindeki lazer ışın demeti alanı (A)'ndan tahmin edilir. Doyum akışı Eşitlik 3.41 ile verilir.

$$\Phi = \frac{P_{av}}{(1-R).F.A} \quad (3.41)$$

SESAM'ın doyuma ulaşması yansiyabilirliğin geçici olarak %100'e değiştiği zaman meydana gelmektedir. Doyma durumu, kendi kendine Q anahtarlanmanın her hangi bir değişim ile ilgili olarak atım kararlılığının yanı sıra pasif mod kilitleme faaliyetinin kurulmasında gereklidir. Darbe doyum akışı denilen miktar $\Phi_{sat} = I_{sat}\tau_a$ atım akışı olarak tanımlanır. Bu Eşitlik 3.42'de ifade edildiği gibi soğurucunun soğurmasını %50'lik küçük sinyal soğurmaya (α_0) düşürür. Temel kural olarak atım akışı birkaç kez olmalıdır. Bu özellikle doyum akışı; SESAM yavaş bir doyurulabilir soğurucuya sahip olduğunda olur. Bununla birlikte daha yüksek atım akışı farklı lazerlerde gözlemlendiği gibi

atım dökümü (çoklu atımlama) ile sonuçlanır [20]. Bu yüzden eşitlik 3.41 aşağıdaki gibi yeniden yazılmalıdır:

$$\alpha(\Phi_0) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{\Phi}{\Phi_{sat}}} \quad (3.42)$$

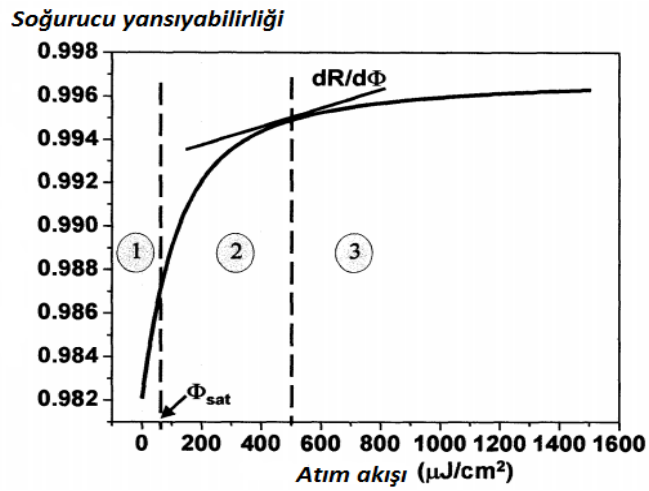
Atım akışına bağlı olarak SESAM yansımalarını tanımlayan uygun bir yaklaşım, eşitlik 3.43'de verilmiştir.

$$R(\Phi) = R_{sat} \left[\left(1 - \Delta R \frac{\Phi_{sat}}{\Phi} \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Phi}{\Phi_{sat}}\right) \right) \right] \quad (3.43)$$

Burada R_{sat} tam olarak doymun olduğunda ~ 100 (bu yüzden $100 - R_{sat}$) R_{sat} SESAM yansımaları, rezidüel doymun olmayan kayıptır.

$\Phi_{sat} = 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $\Delta R = 1\%$ ve doymun olmayan kayıp = 0.3% ($R_{sat} = 99.7\%$) olan tipik SESAM yansiyabilirlik eğimi Şekil 3.14.'de gösterilen üç faaliyet bölgesini gösterir;

Doyum altında: SESAM yansiyabilirlik eğimi ($dR/d\Phi$) daha büyük bir değere sahip olmasına rağmen ancak rezonatördeki atım oluşum formundan dolayı neredeyse sabittir. Doymun seviyesinde iken; SESAM yansiyabilirlik eğimi önemli değişimler ile karşılaşırken doymun seviyesi üzerinde yansiyabilirlik eğimi önemli bir değişim göstermez. Buda çoklu atım başlangıcını gösterir. Yüksek atım sıklığında ($\Phi \gg \Phi_{sat}$) çoklu atım kararsızlıkları baskın olan lazer uygulamasıdır. Aynı zamanda yansiyabilirlik artık atım akışından etkilenmez. Çünkü o, maksimum değere ulaşmıştır.



Şekil 3.14. Atım akışına karşı SESAM lineer olmayan soğurucu yansiyabilirlik değişimi

3.14 Doymurulabilir Akı (Saturation Fluence)

SESAM yarıiletken yapıya gelen lazer ışınıın soğurması iki şekilde gerçekleşir. Bunlar çizgisel soğurma ve çizgisel olmayan soğurma olarak adlandırılır. Yarıiletken soğurucu yüzeye bir lazer ışını geldiği zaman taban seviyesinde olan atomları birinci uyarılma seviyesine çıkarabilecek kadar enerjisi varsa ışığın bir kısmı soğurulur. Bu olay çizgisel soğurma olarak adlandırılır. Çizgisel soğurma Beer Lambert yasası ile açıklanır.

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (3.44)$$

Burada I_0 gelen ışık şiddeti, I çıkan ışık şiddeti, α çizgisel soğurma katsayısı ve d malzemenin kalınlığıdır. Çizgisel olmayan soğurma ise gelen ışının özellikleri ile malzemenin optik özelliklerine bağlıdır. Çizgisel olmayan soğurma gelen ışık şiddetine ya da akıya bağlı olarak malzemenin geçirgenliğindeki değişiklik olarak isimlendirilir. Lazer ışığının şiddeti artarsa soğurma katsayısı azalabilmektedir. Bu durum uyarılmış enerji seviyelerinin tamamen dolmasından kaynaklanır. Dolayısıyla soğurma katsayısı (α), gelen ışık şiddeti I ' ya ve I_s ye bağlıdır.

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (3.45)$$

Burada α_0 çizgisel soğurma katsayısı. I_s doyum eşik şiddetidir. Soğurma olayı uyarılan elektronun tekrar taban dönmesi için geçen sürenin, gönderilen ışının atım süresinden uzun olduğu durumlarda gösterir.

Yarıiletkenlerde çizgisel soğurma ile serbest taşıyıcı üretildiğinde bu taşıyıcılar fonon yardımı ile soğurma yaparak iletim bandından daha yüksek seviyelere geçebilirler. Bu duruma serbest taşıyıcı soğurması denir [28]. Bu durum Denklem 3.46 da gösterilmiştir.

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha_0 I - \sigma_c N_c(I) I \quad (3.46)$$

Burada $N_c(I)$ taşıyıcı yoğunluğu, σ_c serbest taşıyıcı tesir kesitidir.

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{\alpha I}{\hbar \omega} - \frac{N_c}{\tau_c} \quad (3.47)$$

Burada τ_c serbest taşıyıcı durulma süresi dir. Gelen ışığın atım süresi, taşıyıcı durulma süresinden kısa ise Denklem 3.47'de 2. terim ihmal edilebilir. Akıda ki azalma;

$$\frac{dF}{dz} = -\alpha_0 \left(1 + \frac{F}{2F_{sat}}\right) F \quad (3.48)$$

$$F_{sat} = \frac{\hbar f}{\sigma_A} = I_A T_A = \frac{\hbar^2}{2TZ_F|M|^2} = \frac{\hbar^2 n_0}{2TZ_{F0}|M|^2} \quad (3.49)$$

Denklemi ile elde edilir. GaAs yapılar için atım süresi $T=20$ fs, kırılma indisi $n_0= 3$ alındığında

$$F_{sat} = \frac{\hbar^2 n_0}{2TZ_{F0}|M|^2} = 35 \mu j/cm^2$$

F_{sat} değeri $35 \mu j/cm^2$ olarak bulunmaktadır. Burada Z_{F0} serbest uzay empedansı olarak adlandırılır ve değeri 337Ω dir.

Bu bölümde incelemiş olduğumuz önemli SESAM parametrelerinden modülasyon derinliği; tabaka sayısı ve elektrik alan yoğunluğunun artması ile artarken, doyurulabilir akı; tabaka sayısı ve elektrik alan yoğunluğu ile artmakta, doyurulabilir olmayan kayıplar ise düşük sıcaklıkta üretim ve kristal kusurları ile azalmaktadır [29].

Bu çalışmada Tablo 3.1’de gösterilen değerler kullanılarak GaInNAs yapı için F_{sat} değeri $50,64 \mu j/cm^2$ olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ultra hızlı lazerlerde anahtar rol oynayan azot temelli uzun dalgaboylu yarıiletken doyurulabilen soğurucu ayna (SESAM) yapılar araştırıldı. Temel özellikleri yeterince yüksek darbe enerjilerinde doygunluğa ulaşınca soğurma oranları azalması ve yansıtma oranlarının artmasıdır. SESAM aygıtların teknolojik olarak önemi artmakta ve yüksek hızlı lazer üretimi ve yüksek hızlı anahtarlama gibi uygulamaları bulunmaktadır. SESAM yapıların materyal, optik yansıtma parametreleri, hazırlanan programları yardımcı modülasyon derinliği doyum akısı doyurulabilir olmayan kayıplar incelendi.

Az miktarda azot eklenen uzun dalgaboylu GaInNAs/GaAs kuantum kuyu sistemlerini ve bunlara ait materyal parametrelerini incelendi. Alaşımlara ait materyal parametreleri hazırlanan program yardımı ile hesaplandı. Hesapladığımız parametrelerin azot (N) oranına bağlı değişimleri grafikler üzerinde incelendi. Elde edilen sonuçları azot katkılı SESAM yapılar için kullanıldı.

Ayrıca sesam yapılar için önemli bir parametre olan doyurulabilir akı (F_{sat}) değeri teorik olarak hesaplandı ve yansıtıcılığının soğurma ve darbe akısına bağlı değişimleri simülasyon programı kullanılarak hesaplandı ve grafikleri elde edildi. TPA etkisinin yansıtıcılığa etkisi hesaplanarak grafikleri elde edildi.

Çok katmanlı yapıların yansıtma ve geçirgenliklerini hesaplamak için geçiş matris metodunu kullanıldı.

Geçiş matris yöntemi ile SESAM yapıların yansıtma ve şiddet grafikleri hazırlandı. DBR yansıtma oranlarının dalgaboyuna bağlı grafikleri katman sayısına bağlı olarak incelendi.

Geçiş matris yöntemi ile sesam yapıların elektrik alanı hesaplandı. Yansıtmanın dalga boyuna bağlı değişiminin katman sayısına bağımlılığını incelemek için program yazıldı ve grafikler elde edildi.

Son bölümde ise tipik değerler kullanılarak temel SESAM aygıt parametreleri açıklandı ve özellikleri hakkında bilgiler verildi. Azot temelli yapılar için yapılan hesaplamalar eklendi. Ultrahızlı lazerler için azot temelli uzun dalgaboylu SESAM yapılar araştırıldı.

KAYNAKÇA

- [1] Kartner, F.X., I.D. Jung, and U. Keller, Soliton mode-locking with saturable absorbers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1996. 2(3): p. 540-556.
- [2] Paschotta, R. and U. Keller, Passive mode locking with slow saturable absorbers. *Applied Physics B*, 2001. 73(7): p. 653-662.
- [3] DeMaria, A.J., D.A. Stetser, and H. Heynau, Self Mode- Locking Of Lasers With Saturable Absorbers. *Applied Physics Letters*, 1966. 8(7): p. 174-176.
- [4] Ippen, E.P., D.J. Eilenberger, and R.W. Dixon, Picosecond pulse generation by passive mode locking of diode lasers. *Applied Physics Letters*, 1980. 37(3): p. 267-269.
- [5] Keller, U., et al., Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber. *Optics Letters*, 1992. 17(7): p. 505-507.
- [6] Billings, C.W. and J. Tabak, *Lasers: The Technology and Uses of Crafted Light*. 2006: Facts On File, Incorporated.
- [7] Rutz, A., et al., 1.5 μm GaInNAs semiconductor saturable absorber for passively modelocked solid-state lasers. *Electronics Letters*, 2005. 41(6): p. 321-323.
- [8] Rutz, A.S., GaInNAs SESAMs and VECSELs at 1.3 and 1.5 μm wavelength, in *Electrical Engineering 2008*, ETH: Zürich.
- [9] Keller, U., et al., Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1996. 2(3): p. 435-453.
- [10] Buyanova M., C.W., *Physics and Applications of dilute nitrides*. 2004, New York, London: Taylor & Francis.

- [11] Zaugg, C.A., et al., Absorber and gain chip optimization to improve performance from a passively modelocked electrically pumped vertical external cavity surface emitting laser. *Applied Physics Letters*, 2014. 104(12): p.
- [12] Keller, U., 2.1 Ultrafast solid-state lasers, in 2 Short and ultrashort pulse generation, G. Herziger, H. Weber, and R. Poprawe, Editors. 2007, Springer-Verlag.
- [13] Siegman, A.E., *Lasers*. 1986: University Science Books.
- [14] Fishbane, P.M., S.G. Gasiorowicz, and S.T. Thornton, *Physics: For Scientists and Engineers with Modern Physics*. 2005: Pearson Prentice Hall.
- [15] Agrawal, G.P. and N.K. Dutta, *Long-wavelength semiconductor lasers*. 1986: Van Nostrand Reinhold.
- [16] Silfvast, W.T., *Laser Fundamentals*. 2004: Cambridge University Press.
- [17] Siegman, A.E. and D.J. Kuizenga, Modulator frequency detuning effects in the FM mode-locked laser. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1970. 6(12): p. 803-808.
- [18] Haiml, M., et al., Optical nonlinearity in low-temperature-grown GaAs: Microscopic limitations and optimization strategies. *Applied Physics Letters*, 1999. 74(21): p. 3134-3136.
- [19] Liverini, V., et al., Low-loss GaInNAs saturable absorber mode locking a 1.3- μm solid-state laser. *Applied Physics Letters*, 2004. 84(20): p. 4002-4004.
- [20] Babaoğlu, M., Az Miktarda Azot Eklenmiş Uzun Dalgaboylu Yüzey Işıması Yapan Lazer Yapılar, in *Fizik Anabilim Dalı*. 2011, Kilis 7 Aralık Üniversitesi: Gaziantep.
- [21] Vurgaftman, I. and J.R. Meyer, Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 2003. 94(6): p. 3675-3696.
- [22] Shan, W., et al., Band Anticrossing in GaInNAs Alloys. *Physical Review Letters*, 1999. 82(6): p. 1221-1224.
- [24] Ursula, K., Recent developments in compact ultrafast lasers. *Nature*, 2003. 424(6950): p. 831-838.

- [25] Spence, D.E., P.N. Kean, and W. Sibbett, 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Optics Letters*, 1991. 16(1): p. 42-44.
- [26] http://www.batop.com/information/SAM_infos.html#Parameters (mayıs 2014)
- [27] M. Oduncuoğlu, B. Gönül, *Physica E*, 27, 253–261, (2005).
- [28] Sutherland, R. L, Mc Lean D. G and Kirkpatrick, S. 2003. *Handbook of Nonlinear Optics*. Marcel Dekker Press
- [29] C.Z. Ning, *Semiconductor Nanowire Lasers*. In James J Coleman, A. Catrina Bryce, Chennupati Jagadish, editors: *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 86, Burlington: Academic Press, 455-486 (2012)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Serkan ÇAPAN

Doğum Yeri: GAZİANTEP

Doğum Tarihi: 17/03/1984

E posta: capanserkan@gmail.com

Lisans Eğitimi: Uludağ Üniversitesi Fizik Bölümü

Çalıştığı Kurum: Gaziantep Fen Bilimleri Dersanesi, Fizik Öğretmeni