



KATIHAL LAZERLERİN ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN ETKİLERİ

İlhan KAHRAMAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATIHAL LAZERLERİN ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN ETKİLERİ

İlhan KAHRAMAN

Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI
Tez Danışmanı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATIHAL FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2017

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

İlhan KAHRAMAN tarafından hazırlanan “Katıhal laserlerin özelliklerine sıcaklığın etkileri” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü FİZİK Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI

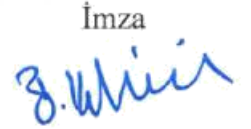
Başkan: Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI
Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza


Üye : Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU
Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza


Üye : Doç. Dr. Bayram KILIÇ
Yalova üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
16...11/2017

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATIHAL LAZERLERİN ÖZELLİKLERİNE SICAKLIĞIN ETKİLERİ

İlhan KAHRAMAN

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI

Katıhal lazerler geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen sanayi uygulamalarında genellikle tercih edilmemektedirler. Sanayi uygulamalarında yüksek güçlü lazerlere ihtiyaç olduğundan katıhal lazerler yüksek güçlerde ısıyla yüklenmeleri, sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, katıhal lazerlerinin ışın özellikleri değişmektedir. Bu tez çalışmasında, katıhal lazerlerine sıcaklığın etkileri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla bir Nd:YAG katıhal lazeri LASCAD® lazer benzeşim programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yöntemiyle modellenmiş ve farklı optik çıkış güçlerde analizleri yapılmıştır. LASCAD® lazer benzeşim programında modellenen parametrelere göre bir Nd:YAG katıhal lazeri üretilmiştir. Modellenen Nd:YAG katıhal lazerinin çıkış parametreleri dünyadaki benzerleriyle karşılaştırılmıştır ve model verileri ile benzer lazerin değişkenlerinin uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: LASCAD®, Nd:YAG katıhal lazerler, optik çıkış gücü, dalgaboyu, sıcaklığın etkileri, ışın kalitesi.

2017, viii + 61 sayfa.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECTS OF TEMPERATURE ON PROPERTIES OF SOLID STATE LASERS

İlhan KAHRAMAN

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI

Despite having wide area of utilization of solid state lasers, their usage is not generally preferred in the industry applications. Their temperature is increased when the solid state lasers have been pumped at high power as the high power lasers are needed in the industrial applications. Therefore the characteristics of the beam is changed. In this study, the effects of temperature on the solid state lasers have been analyzed theoretically and experimentally. For this purpose, an Nd:YAG solid state laser has been modeled by using the finite element approximation method (FEM) and has been analyzed on several optical output powers using a laser simulation program called LASCAD[®]. The Nd:YAG solid state laser has been established according to parameters modeled previously in this laser simulation program. The output parameters of this Nd:YAG solid state laser has also been compared with its similar types existing in the market. It is founded that the modelled parameters are in good agreement with similar types of lasers existing in the market.

Key words: LASCAD[®], Nd:YAG solid state lasers, optical power, wavelength, thermal effects, beam quality.

2017, viii + 61 pages.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım başta danışman hocam sayın Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI olmak üzere tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışmam boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda bana her türlü desteği veren değerli büyüğüm Mustafa IŞIK'a teşekkür ederim.

Deney çalışmalarına yardımcı olan Nizam MUZAFFEROĞLU'na, Kadir ARI'ya ve desteklerinden dolayı Ermaksan'a teşekkür ederim.

Tez çalışmama yardımcı olan Erdal ÖZTÜRK'e ve Haider NISAR'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep desteğini aldığım ve tez çalışmam boyunca yaptığı katkılardan dolayı babam Abdullah KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Eşim Rufina KAHRAMAN'a tez çalışmam boyunca gösterdiği sabırdan dolayı teşekkür ederim.

İlhan KAHRAMAN

Ocak, 2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
GRAFİKLER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
1.GİRİŞ	1
1.1. Lazerin Keşfi ve Nd:YAG Katıhal Lazerin Tarihsel Gelişimi	1
1.2. Nd:YAG Katıhal Lazerde Problemin Tanımlanması.....	2
1.3. Problemin Çözümü için Aranılan Yöntemler	4
1.4. Tez Çalışmasının Amacı.....	6
2. Nd:YAG KATIHAL LAZER	7
2.1. Lazerin Tanımı ve Nd:YAG Lazerin Çalışma İlkesi	7
2.1.1. Aktif (kazanç) ortam	8
2.1.2. Nüfus terslemesi.....	12
2.1.3. Optik pompalama mekanizması.....	12
2.1.3.1. Lamba ile pompalama	13
2.1.3.2. Diyot lazer ile pompalama.....	14
2.1.4. Optik geri besleme (rezonatör).....	16
2.1.4.1. Rezonatör çeşitleri.....	16
2.1.4.2. Kararlılık ölçütü	17
2.2. Nd:YAG Katıhal Lazerine Sıcaklığın Etkileri.....	18
2.2.1. Sıcaklığın dalgaboyuna etkisi	18
2.2.2. Sıcaklığın optik çıkış gücüne etkisi	20
2.2.3. Sıcaklığın ışın kalitesine etkisi	22

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. LASCAD® Lazer Benzeşim Programı	23
3.1.1. Nd:YAG katıhal lazerin modellenmesi	23
3.1.2. Nd:YAG katıhal lazerin termal analizi	25
3.1.3. Nd:YAG katıhal lazerin ışın analizi	27
3.2. SolidWorks® Çizim Programıyla Mekanik Tasarımın Yapılması	30
3.3. Deney Düzenekinin Yapımı	32
3.3.1. Kullanılan ürünler	32
3.3.2. Yapılan testler	36
3.4. Elde Edilen Sonuçlar	39
4. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR.....	48
EKLER.....	52
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Güneş ışını ile lazer ışını arasındaki fark	2
Şekil 1.2. Pompalayıcı diyot lazer deney düzeneği	7
Şekil 1.3. Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneği	7
Şekil 2.1. Nd:YAG katıhal lazerin genel gösterimi	8
Şekil 2.2. Nd:YAG seramik kristalinin soğurma ve emisyon grafiği	9
Şekil 2.3. Nd:YAG kristalinin enerji diagramı	10
Şekil 2.4. Dört enerji seviyeli Nd:YAG kristalinde lazer oluşumu	11
Şekil 2.5. Dört enerji seviyeli lazer sistemlerinde nüfus terslemesi	12
Şekil 2.6. Nd:YAG kristalin soğurma ve kripton ark lamba emisyon spektrumu	13
Şekil 2.7. Nd:YAG kristalini pompalamada kullanılan lambalar	13
Şekil 2.8. Flaş lamba ve diyot lazer emisyon grafiği	15
Şekil 2.9. CS model diyot lazer	15
Şekil 2.10. Kararlılık ölçütü diyagramı	18

Şekil 2.11. Diyot lazerin sıcaklığın etkisiyle dalgaboyunun artması...	19
Şekil 2.12. Akımın artırılmasıyla diyot lazerin sıcaklığının artması ve diyot lazeri oluşturan çiplerin arasındaki sıcaklık farkının artması...	20
Şekil 2.13. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak diyot lazerin dalgaboyunun artması ve çıkış güç yoğunluğunun azalması...	21
Şekil 2.14. Akımın artmasına bağlı olarak diyot lazerin dalgaboyunun ve çıkış güç yoğunluğunun artması...	21
Şekil 2.15. Kristalin ısıyla yüklenmesi sonucu optik eksen sapması...	22
Şekil 3.1. LASCAD® lazer benzeşim programıyla Nd:YAG katıhal lazerinin tasarlanması...	24
Şekil 3.2. Nd:YAG kristalinin ısıyla (W/mm^3) yüklenmesi...	25
Şekil 3.3. Nd:YAG kristalinin termal stresle (N/mm^2) yüklenmesi...	26
Şekil 3.4. Nd:YAG kristali üzerindeki 3 boyutlu sıcaklık dağılımı...	26
Şekil 3.5. Nd:YAG kristali üzerindeki 2 boyutlu sıcaklık dağılımı...	27
Şekil 3.6. Kararlılık ölçütünün farklı pompalama güçlerindeki değişimi	28
Şekil 3.7. Diyot lazerin Nd:YAG kristali üzerindeki ışınlarının dağılımı	28
Şekil 3.8. Nd:YAG kristalin 150 watt'la pompalandığında optik çıkış güç grafiği...	29
Şekil 3.9. SolidWorks® programıyla tasarlanan lazerin ölçülendirilmesi...	31
Şekil 3.10. SolidWorks® programıyla tasarlanan lazerin izometrik gösterimi	31
Şekil 3.11. Nd:YAG kristali	32
Şekil 3.12. Dielektrik aynalar	33
Şekil 3.13. Diyot lazer	34
Şekil 3.14. Bakır soğutucu gövde	34
Şekil 3.15. Soğutucu (çiller)	35
Şekil 3.16. Diyot lazer sürücüsü	35
Şekil 3.17. Sıcaklık (termokupl) sensörü	36
Şekil 3.18. Lazer güç ölçer sensörü	36
Şekil 3.19. Dalgaboyu ölçer (spektrometre)	37
Şekil 3.20. Diyot lazer deney düzeneğinin genel gösterimi	37
Şekil 3.21. Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneğinin iç gösterimi	38
Şekil 3.22. Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneğinin genel gösterimi	38
Şekil 3.23. Diyot lazerin 25 °C derecedeki gerilim - akım grafiği	39

Şekil 3.24. Diyot lazerin 25 °C derecedeki optik çıkış güç - akım grafiği...	40
Şekil 3.25. Diyot lazerin 25 °C derecedeki verim grafiği	40
Şekil 3.26. Diyot lazerin 25 °C derecedeki dalgaboyu - akım grafiği...	41
Şekil 3.27. Diyot lazerin 55 amper akımdaki dalgaboyu - sıcaklık grafiği...	41
Şekil 3.28. Diyot lazerin 20 amper akımdaki dalgaboyu grafiği...	42
Şekil 3.29. Nd:YAG katıhal lazerin optik çıkış güç - sıcaklık grafiği...	43
Şekil 3.30. Nd:YAG katıhal lazerin dalgaboyu grafiği	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Nd:YAG rod kristalinin özellikleri	24
Çizelge 3.2. Farklı pompalama güçlerindeki Nd:YAG lazerin ışın kalite değerleri	27
Çizelge 3.3. LASCAD® programıyla tasarlanan Nd:YAG lazerin verimi ve kıyası.....	30
Çizelge 3.4. Diyot lazerin özellikleri.....	33

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

ν	Frekans
λ	Dalgaboyu
h	Planck sabiti
E	Enerji
K	Kelvin Sıcaklığı
n	Kırılma İndisi
nm	Nanometre
s	Saniye
T	Sıcaklık
w	Watt

Kısaltmalar

Açıklama

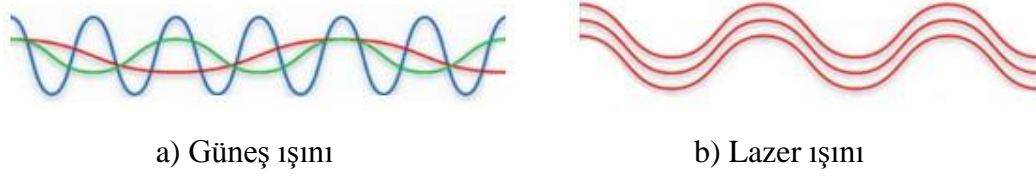
Nd:	Neodimyum
YAG:	İtriyum Alüminyum Garnet
Nd:YAG:	Neodimyum ile Katkılandırılmış İtriyum Alüminyum Garnet
NH_3 :	Amonyak
MAZER:	Zoruna Salınım ile Mikrodalganın Güçlendirilmesi
LASER:	Zoruna Salınım ile Işığın Güçlendirilmesi
CW:	Sürekli Mod
QCW:	Atımlı Mod
TEC:	Termoelektrik Soğutma
M^2 :	Işın Kalite Faktörü
a.u.:	atomik birim (a.u. = 3.5×10^6 w/cm ²)

1. GİRİŞ

1.1. Lazerin Keşfi ve Nd:YAG Katıhal Lazerin Tarihsel Gelişimi

Einstein tarafından yayınlanan kuantum radyasyon teorisinde kararlı bir atomun, enerjisi $h\nu$ olan bir fotonu soğurarak alt enerji seviyesindeki elektronu üst enerji seviyesine geçerek, kararsız hale gelebileceği fikrini öne sürülmüştür. Aynı teoriye göre kararsız bir atomun üst enerji seviyesindeki elektronu enerjisi $h\nu$ olan bir fotonla etkileşerek alt enerji seviyesine yeni bir foton salarak inmesine zorlanabilmektedir. Lazerin temelini oluşturan zoruna salınım mekanizması böylece Einstein tarafından başlatılmış oldu (Einstein 1917). Zoruna salınım mekanizması pratikte ilk kez Townes ve arkadaşları tarafından amonyak (NH_3) kullanılarak mikrodalganın zoruna salınım yoluyla güçlendirilmesi bir MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) cihazında gösterilmiştir (Townes ve ark. 1955). MASER eş zamanlı olarak Prohorov ve Basov tarafından da keşfedilmiştir. Bu çalışmalarından dolayı Townes, Prohorov ve Basov 1964 yılında nöbel ödülüne layık görüldüler. Townes ve Schawlow tarafından yayınlanan kızılötesi ve optik MASER'ler başlıklı makalede, MASER'in kızılötesi ve görünür bölgedeki dalgalaboylarında da çalışabileceğini öngörmeleri, lazerin keşfine ortam hazırlamıştır (Townes ve Schawlow 1958). Bu öngörü, Maiman tarafından yakut kristali kullanılarak 694.3 nm dalgaboyunda kırmızı ışın yayan ilk çalışan LASER'in (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) keşfi ile sonuçlanmıştır (Maiman 1960). Zoruna salınımdan oluşan lazer ışını, güneş ışınından farklı bazı özelliklere sahiptir. Lazer ışınının özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Lazer ışını eş fazlıdır (uyumludur)
- Lazer ışını tek renklidir (monokromatiktir)
- Bir lazer hüzmesi yönlendirilebilmektedir (ıraksama çok azdır)
- Lazer ışınının şiddeti, güneş ışığından çok daha fazladır



Şekil 1.1. Güneş ışını ile lazer ışını arasındaki fark

İlk keşfedilen lazer, alüminyum oksidin krom atomlarıyla katkılandırılmış yakut ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) kristaliden oluşan üç enerji seviyeli bir katıhal lazeriydi. 1964 yılında neodimyum atomlarıyla katkılandırılmış itriyum alüminyum garnet ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) kristali kullanılarak dört enerji seviyeli, flaş lamba ile pompalanan Nd:YAG katıhal lazeri keşfedilmiştir (Geusic ve ark. 1964). Lambaların spektrumları geniş olması, Nd:YAG katıhal lazerin düşük verimli olmalarına neden olmaktaydı. Bu nedenle Nd:YAG katıhal lazerler dar spektruma sahip yarıiletken lazerlerle pompalanma yöntemine gidilmiştir (Ross 1968). Yüksek güçlerde yaşanan termal ve mekanik problemlerden dolayı Nd:YAG katıhal lazerlerin aktif ortamında seramikten üretilen Nd:YAG kristali kullanılmaya başlanmıştır (Ikesue ve ark. 1995). Nd:YAG katıhal lazerleri sürekli ve atımlı modda lazer ışını üretebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı sanayide, askeriyede, tıpta ve bilimsel araştırmalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır (Eunchong ve ark. 2004).

1.2. Nd:YAG Katıhal Lazerde Problemin Tanımlanması

Lazerler aktif ortamlarına göre genel olarak dörde ayrılırlar. Bunlar; gaz, sıvı, katıhal ve yarıiletken lazerler olarak bilinmektedirler. Son yıllarda, katıhal lazerlerin verimlerinin yüksek olması ve kaliteli lazer ışınına sahip olmalarından dolayı birçok alanda tercih edilmektedirler (Ashoori ve ark. 2012). Özellikle sanayi uygulamalarda yüksek güçlü lazere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle sanayide genellikle 10600 nm dalgaboyunda yüksek güçlü karbondioksit gaz lazerler kullanılmaktadır. Bununla birlikte Nd:YAG katıhal lazerin ürettiği 1064 nm dalgaboyunda ki lazer ışını, karbondioksit lazerin ürettiği 10600 nm dalgaboyunda ki lazer ışınına göre 10 kat daha küçük çapta odaklanabilmesi ve sanayide kullanılan metallerin (çelik, alüminyum, bakır) 1064 nm dalgaboyunda daha kolay işlenebilmesi sanayi uygulamalarında (kesim, kaynak, delme, yüzey tavlama)

Nd:YAG katıhal lazerler karbondioksit lazerlere alternatif olabilmektedirler (Yasui ve ark. 1996). Nd:YAG katıhal lazerlerin çıkış gücünün artırılması sonucu bazı olumsuz etkilerle karşılaşmaktadır. Bu olumsuz etkilerin en önemlisi Nd:YAG katıhal lazerin ürettiği öz ısıdır. Nd:YAG kristalin ısıyla yüklenmesi, verim ve ışın kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda Nd:YAG katıhal lazer tam performansla çalışmamaktadır (Koechner 2006).

Nd:YAG katıhal lazerlerde genel olarak ısı dört ana nedenden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

1- Nd:YAG katıhal lazerini pompalamak için verilen foton enerjisi ile üretilen foton enerjisi arasındaki farktan dolayı ısı oluşmaktadır. Bu olay kuantum kusuru olarak bilinmektedir (Koechner 2006). Kuantum kusuru aşağıdaki gibi formülize edilmektedir.

$$q = h\nu_{\text{pompalama}} - h\nu_{\text{lazer}} \quad (1.1)$$

$$q = h\nu_{\text{pompalama}} (1 - \lambda_{\text{pompalama}} / \lambda_{\text{lazer}}) \quad (1.2)$$

Nd:YAG katıhal lazeri için kuantum kusur değerinin hesaplanması:

Nd:YAG kristali 808 nm dalgaboyunda pompalandığında, 1064 nm dalgaboyunda lazer ışını üretmektedir.

$$q = h\nu_{\text{pompalama}} (1 - \lambda_{\text{pompalama}} / \lambda_{\text{lazer}}) = h\nu_{\text{pompalama}} (1 - 808 \text{ nm} / 1064 \text{ nm}) = h\nu_{\text{pompalama}} 0.24$$

Yukardaki hesaplama göre Nd:YAG kristalini pompalamak için verilen optik enerjinin % 24 ısı enerjisine dönüşmektedir.

2- Nd:YAG katıhal lazerini pompalamak için kullanılan lambalar veya diyot lazerler, elektrik enerjisini optik enerjiye dönüştürürken ısı oluşturması sistemin sıcaklığı artmaktadır (Pfistner ve ark. 1994).

3- Nd:YAG katıhal lazerin aktif ortamı (kristali) şekil ve hacimsel nedenlerden dolayı pompalanan ışın enerjisini tam olarak soğuramaması, ısı oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Nd:YAG katıhal lazerin aktif (kristal) ortamı ve yansıtıcı yüzeyi tasarlanırken ilk göz önüne alınan faktör hacimsel ve şekil olarak pompalamaya ve soğutmaya uygun olmasıdır (Weber ve ark. 1998).

4- Nd:YAG katıhal lazerini pompalamak için kullanılan lambanın geniş spektrumda ışın üretmesi, pompalanan ışının kristal tarafından tam olarak soğurulamamasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda ısı meydana gelmektedir (Fan ve Byer 1988).

Yukarda sıralanan nedenlerden dolayı kristalin ısıyla yüklenmesi sonucu sıcaklığının artması, Nd:YAG katıhal lazerin ışın kalitesini ve verimini azaltmaktadır (Koechner 2006).

1.3. Problemin Çözümü için Aranılan Yöntemler

Nd:YAG kristalinin ısıyla yüklenmesi sonucunda karşılaşılan termal problemleri çözmek için bazı çözümler üretilmiştir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

1- Diyot lazerler kullanarak Nd:YAG kristalinin pompalanması verimi oldukça artırmıştır. Diyot lazerin Nd:YAG kristalinin soğurduğu maksimum dalgaboyunda ve dar spektrumda lazer ışını üretmesi, kristalin optik dönüştürmedeki verimini artırmış oluşan ıyı azaltmıştır. Aynı zamanda diyot lazerlerin elektrik enerjisini optik enerjiye dönüştürmedeki verimlerinin lambalara göre yüksek olması Nd:YAG katıhal lazerlerin verimini artırmıştır (Fan ve Byer 1988).

2- Nd:YAG katıhal lazerlerin 885 nm dalgaboyunda lazer ışını üreten diyot lazerler ile pompalanması, sistemde oluşan ısıyı azaltmıştır. Üretilen lazer ışını (1064nm) ile pompalanan lazer ışını (885 nm) arasındaki dalgaboyu farkının az olması, kuantum kusurunu azaltığından daha az ısı ortaya çıkmaktadır. Nd:YAG kristali 808 nm dalgaboyunda lazer ışını ile pompalanması sonucunda % 24 ısı oluşurken, 885 nm dalgaboyunda lazer ışını ile pompalanması sonucunda ise % 17 ısı oluşmaktadır (Frede ve ark. 2006).

3- Nd:YAG kristalin soğutulması için kristal silika malzemesinden yapılan tüp içerisine konumlandırılmaktadır. Silika tüp içerisinden su geçirilerek kristal soğutulmaktadır. Tüp silika yüzeyine çok katmanlı kaplamalar (dielektrik) yapılmaktadır. Bu şekilde tüp silika yüzeyinden geri yansımalar azaltılarak etkili pompalama yapılmaktadır (Mudge ve ark. 2000).

4- Asimetrik pompalanan Nd:YAG kristali üzerinde homojen olmayan ısı dağılımı meydana gelmektedir. Bunun sonucunda Nd:YAG katıhal lazerinin ışın kalitesini azaltmaktadır. Bu nedenle, kristalin homojen pompalanması için diyot lazer veya lambalar simetrik bir şekilde kristalin etrafına dizilmektedir (Yasui ve ark. 1996).

5- YAG kristalinin sadece orta kısmı neodimyum atomlarıyla katkılandırılmış ve kristal uçlardan pompalanarak termal etkiler azaltılmıştır. Böylece Nd:YAG katıhal lazerin verimi ve ışın kalitesi artırılmıştır (Sulc ve ark. 2002).

6- Nd:YAG katıhal lazerinde etkili ve hassas soğutma yapılabilmesi için termoelektrik soğutucu (TEC) olan ısı çifti (peltier) kullanılmıştır. Bu şekilde lazerin çıkış gücü ve ışın kalitesi sabit tutulmuştur (Dong ve ark. 2015).

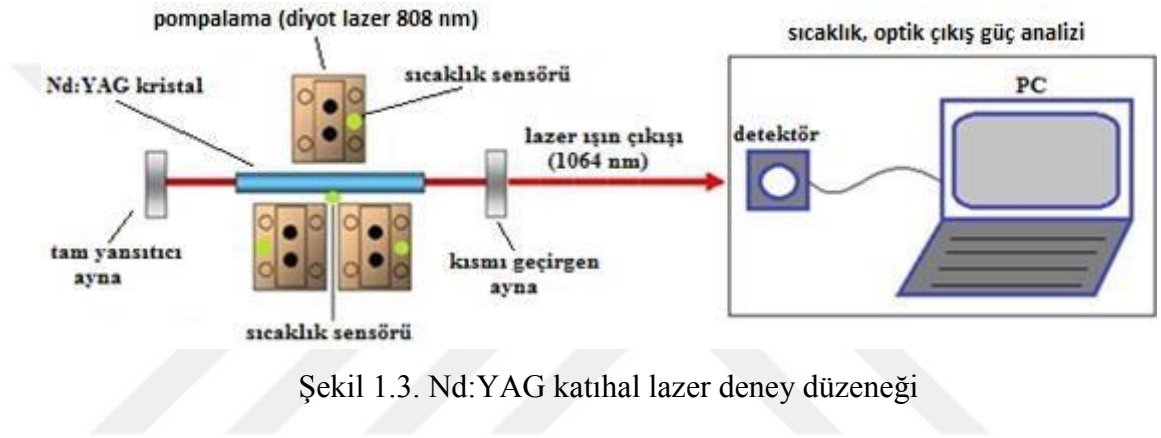
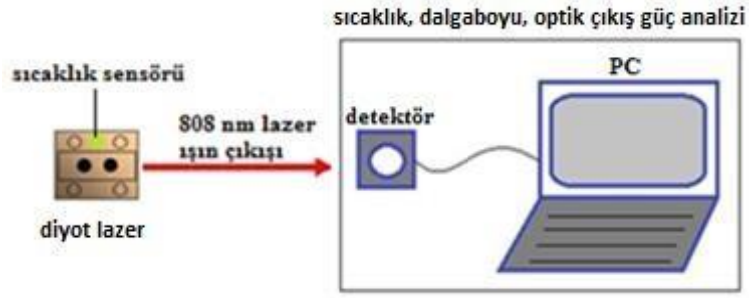
7- Isıl merceğin etkisini azaltmak için tek Nd:YAG kristalli aktif ortam yerine birkaç Nd:YAG kristalden oluşan aktif ortam kullanılmıştır. Kristaller arasına kuvars döndürücü (quartz rotator) yerleştirilerek ısıl merceğin ve çift kırınımın neden olduğu iki odak etkisi azaltılmıştır (Jin ve ark. 2008).

8- Nd:YAG katıhal lazerin aktif ortamında, Nd:YAG kristali yerine mekanik ve termal özellikleri daha iyi olan Nd:YAG seramik kristali kullanılmıştır. Seramik kristalin kullanılması yüksek güçlerde Nd:YAG katıhal lazeri üretilebilmesine olanak vermiştir (Qi 2005).

9- Nd:YAG katıhal lazerlerin aktif ortamında genellikle silindir şeklinde Nd:YAG kristali kullanılmaktadır. Kristalin ısı iletkenlik katsayısının (0.14 W/mK) düşük olması, silindir şeklindeki kristalin merkezinde oluşan sıcaklığın çepherlerdeki sıcaklıklardan farklı olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda ısıl merceğin oluşturması Nd:YAG katıhal lazerin ışın kalitesini azaltmaktadır. Yüksek güçlü Nd:YAG katıhal lazerlerde sıcaklığın etkisini azaltmak için kristal ince dikdörtgen şeklinde üretilerek uçlardan pompalanıp yan yüzeylerinden soğutulmaktadır (Kane 1983).

1.4. Tez Çalışmanın Amacı

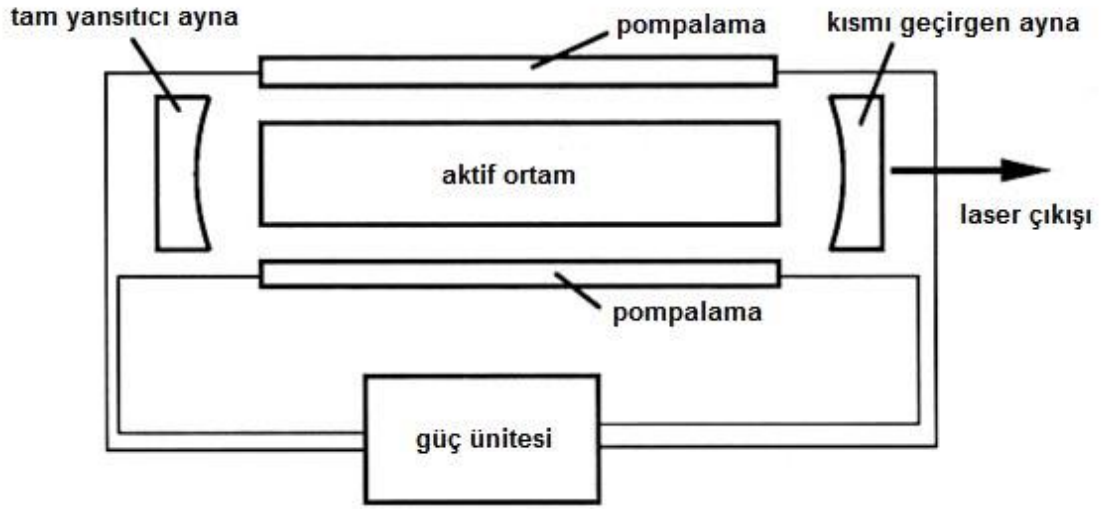
Bu tez çalışmasının amacı, sıcaklığın Nd:YAG katıhal lazerin üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Nd:YAG katıhal lazerin watt mertebelerinde ve sürekli modda (CW) çalışırken Nd:YAG kristalin ısıyla yüklenmesi sonucu sıcaklığının artması, üretilen 1064 nm dalgaboyundaki lazer ışının optik çıkış gücü ve ışın kalitesinin değişmesine neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında sıcaklığın etkilerinin incelenmesi için LASCAD® bilgisayar benzeşim programı kullanılarak bir Nd:YAG katıhal lazeri modellenmiştir. LASCAD® bilgisayar benzeşim programı ile modellenen Nd:YAG katıhal lazerin deney düzeneği aşağıdaki basit gösterimlerde ki gibi kurularak, sıcaklığın etkileri pratikte de incelenmiştir.



2. Nd:YAG KATIHAL LAZER

2.1. Lazerin Tanımı ve Nd:YAG Lazerin Çalışma İlkesi

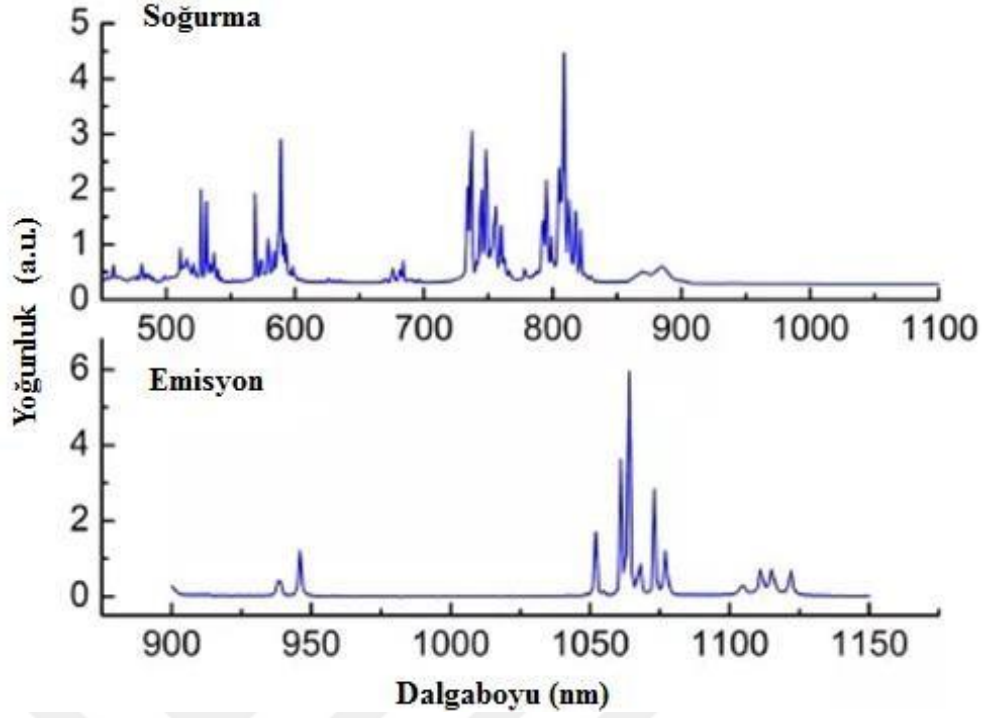
Lazer (laser) kelime anlamı olarak zoruna salınım ile ışığın güçlendirilmesi olan İngilizce "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Katihal lazerler genel olarak aktif (kazanç) ortam, optik pompalama (uyarma) mekanizması ve optik geri besleme (rezonatör) sisteminden oluşmaktadır. Nd:YAG katihal lazer sisteminin ana bileşenleri Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Nd:YAG katıhal lazerin genel gösterimi

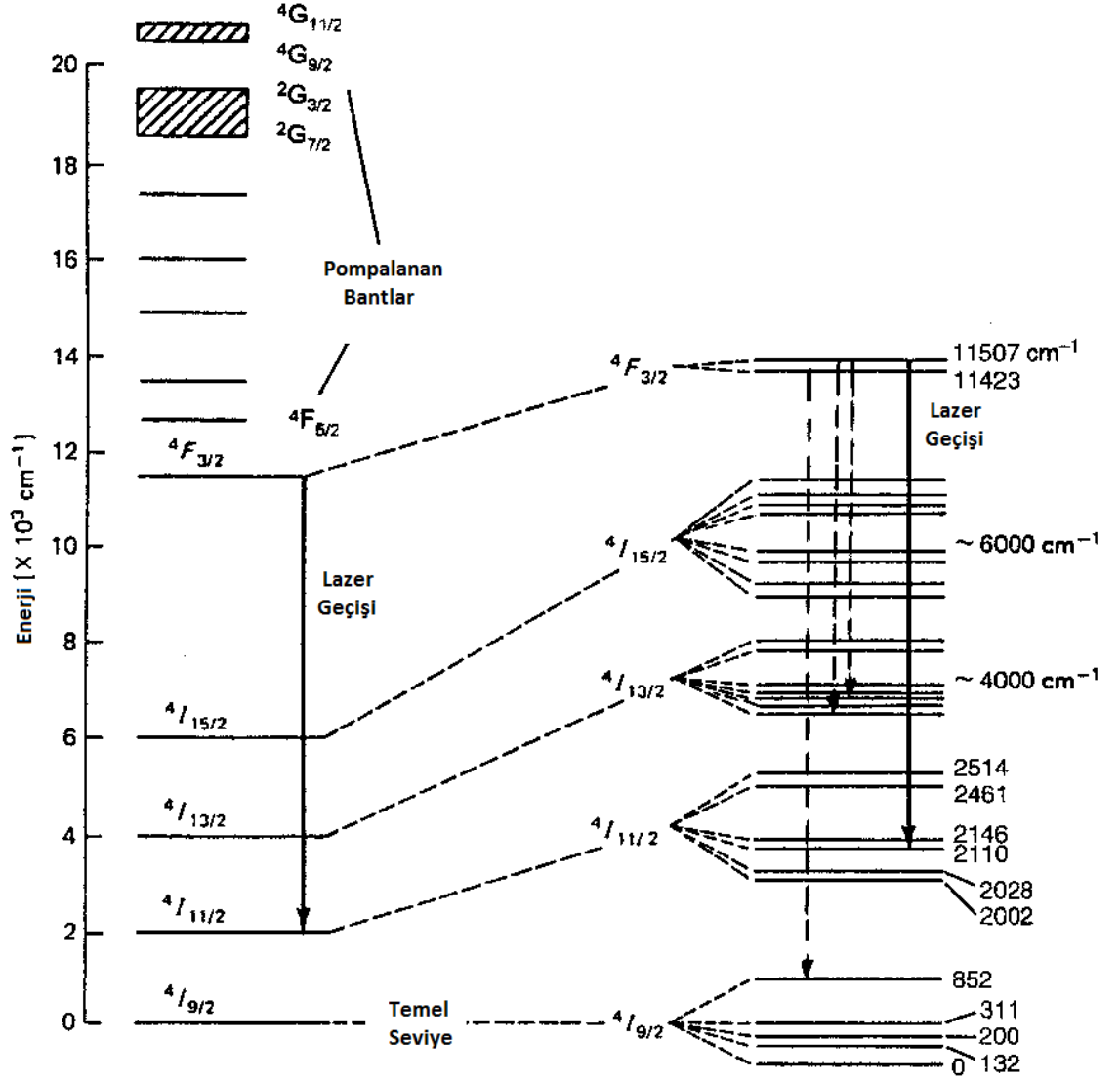
2.1.1. Aktif (kazanç) ortam

İlk keşfedilen lazerin aktif ortamında, üç enerji seviyeli yakut ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$) kristali kullanılmıştır. Yakut kristalinin elektronları üst enerji seviyesindeki ömürlerinin kısa olması nedeniyle yakut katıhal lazeri atımlı modda çalışmaktaydı. Zamanla katıhal lazerlerin aktif ortamında mekanik, termal ve optiksel özelliklerinden dolayı neodimyum ile katkılandırılmış yttrium alüminium garnet (Nd:YAG) kristali tercih edilmiştir (Koechner 2006). Czochralski yöntemiyle % 0.18 - 1.1 arasında neodimyum atomlarıyla katkılandırılmış Nd:YAG kristali üretilmektedir (Eunchong ve ark. 2004). Nd: YAG kristali 760 nm, 808 nm ve 885 nm dalgaboylarında etkili pompalanabilmektedir. 946 nm, 1064 nm, 1120 nm, 1320 nm ve 1440 nm dalgaboylarında ise emisyon yapabilmektedir. Şekil 2.2'de YAG seramik kristalinin % 0.6 oranında neodimyum atomları ile katkılanmasından oluşan soğurma ve emisyon dalgaboyu grafiği verilmiştir.



Şekil 2.2. Nd:YAG seramik kristalinin soğurma ve emisyon grafiği (Zhu ve ark. 2013)

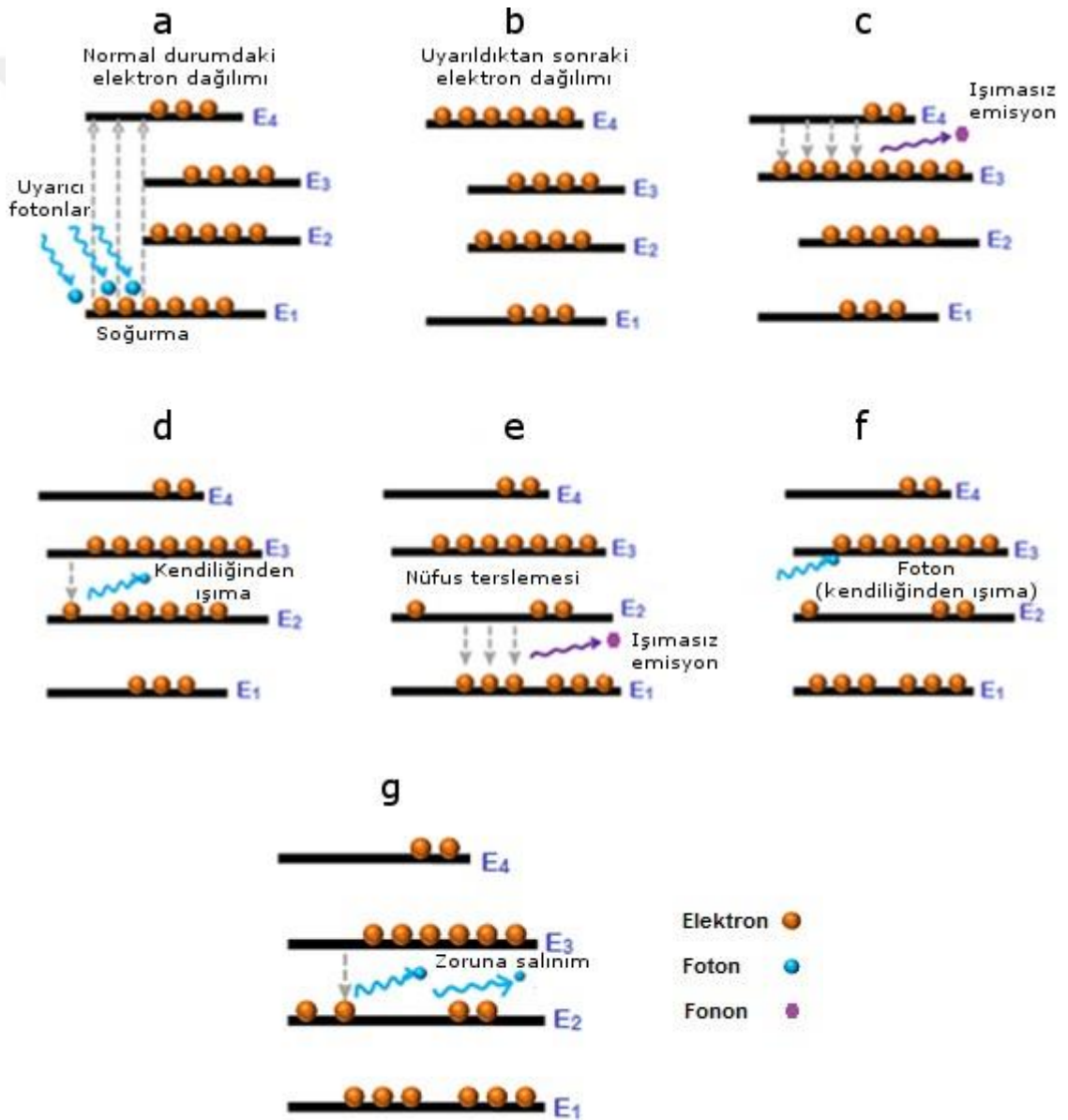
Üst enerji seviyelerindeki elektronlarının ömürleri yeterince uzun olmasının bir sonucu olarak Nd:YAG kristali sürekli modda (CW) çalışabilmektedir. Nd:YAG katıhal lazeri Q anahtarlama yöntemiyle nanosaniye aralıklarla megawatt mertebelerinde atımlı modda lazer ışını üretebilmektedir. Bu özellik başka bir kristali pompalayarak 266 nm ve 355 nm dalgaboylarında morötesi ve 532 nm dalgaboyunda görünür bölgede lazer ışını üretilebilme olanağı vermiştir. Nd:YAG kristalinin enerji bantları arasındaki $E4 \rightarrow E3$ (${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$), $E2 \rightarrow E1$ (${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$) geçişlerde ısı (fonon), $E3 \rightarrow E2$ (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) geçişte lazer ışını (foton) oluşmaktadır (Koechner 2006). Şekil 2.3'te Nd:YAG kristalinin enerji diyagramı verilmektedir.



Şekil 2.3. Nd:YAG kristalinin enerji diagramı (Koechner 2006)

Dört enerji seviyeli Nd:YAG kristali pompalandığında (Şekil 2.4. a), elektronların en çok bulunduğu temel enerji seviyesinden (E1) üst enerji seviyesine (E4) çıkmaktadırlar (Şekil 2.4. b). Kısa bir süre (230 μs) üst enerji seviyesinde (E4) kaldıktan sonra elektronların büyük bir bölümü doğrudan temel enerji seviyesine (E1) inmeden bir alt enerji seviyesine (E3) hızlı geçiş (fast delay) yaparak ısı (fonon) ortaya çıkarmaktadırlar (Şekil 2.4. c). Elektronlar yarıkararlı seviye (metastable) olarak bilinen E3 enerji seviyesinde belirli bir süre (550 μs) kaldıktan sonra foton yayarak bir alt enerji seviyesine (E2) geçmektedirler (Şekil 2.4. d). E2 enerji seviyesinden temel enerji seviyesine (E1) ısı ortaya çıkararak hızlı geçiş (30 ns) yapmaktadırlar (Şekil 2.4. e). E3 enerji seviyesinden

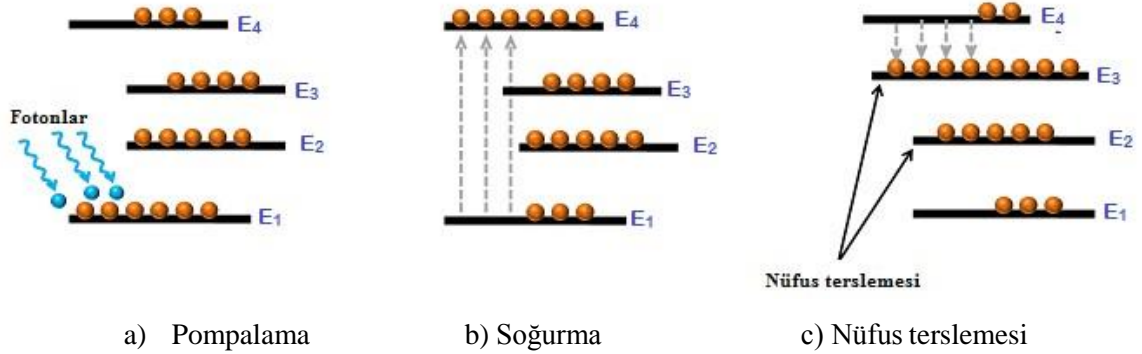
E2 enerji seviyesine geçişte oluşan kendiliğinden (spontaneous) emisyon her yöne rastgele yayılmaktadır. Aktif ortama paralel iki ayna (rezonatör) konulduğunda, kendiliğinden yayılan fotonlar aynaların ekseninde yansırarak E3 enerji seviyesindeki elektronlarla etkileşip (Şekil 2.4. f) aynı eksendeki tüm kararsız atomları salınım yapmaya zorlamaları sonucunda oluşan fotonlar (Şekil 2.4. g), zincirleme bir şekilde devam etmesiyle belirli bir yoğunluğa gelince kısmi geçirgen aynadan lazer ışını çıkmaktadır. Salınan fotonun; enerjisi, frekansı, fazı ve polarizasyonu etkileşilen fotonunki ile aynı olmaktadır (Koechner 2006).



Şekil 2.4. Dört enerji seviyeli Nd:YAG kristalinde lazer oluşumu

2.1.2. Nüfus terslemesi

Boltzmann istatistiğine göre termal denge durumunda ki atomların alt enerji seviyelerindeki elektronlarının yoğunluğu, üst enerji seviyelerindeki elektronların yoğunluklarından fazladır. Lazerin temelini oluşturan zoruna salınım olayının oluşabilmesi için atomların üst enerji seviyelerindeki elektron yoğunluğu, alt enerji seviyelerindeki elektron yoğunluğundan fazla olmalıdır. Bu nedenle katıhal lazerlerin aktif ortamına dışarıdan optik pompalama yapılarak üst enerji seviyelerindeki elektronların yoğunluğu artırılmaktadır. Bu fiziksel olay nüfus terslemesi (population inversion) olarak bilinmektedir (Koechner 2006). Şekil 2.5'te dört enerji seviyeli bir kristalin nüfus terslemesi gösterilmektedir.



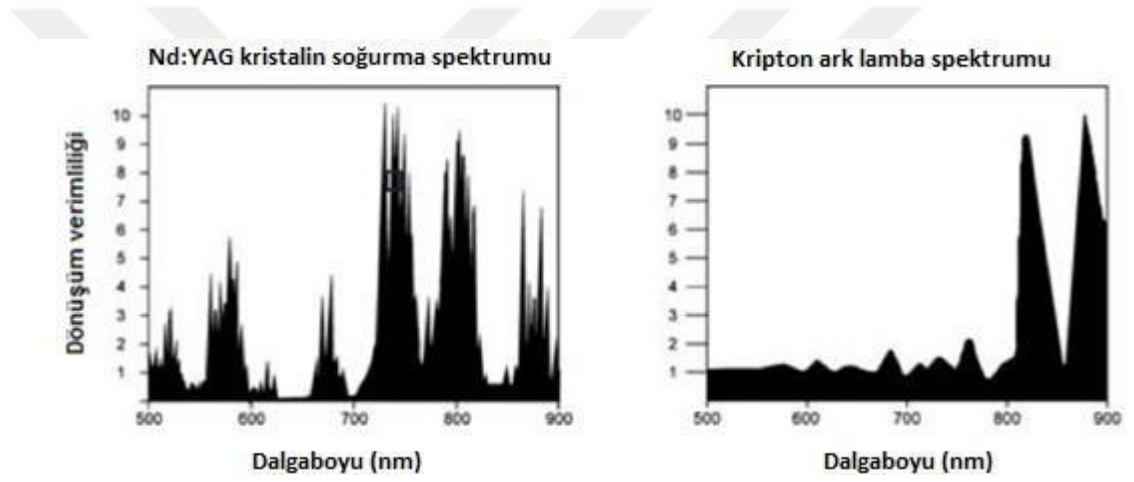
Şekil 2.5. Dört enerji seviyeli lazer sistemlerinde nüfus terslemesi

2.1.3. Optik pompalama mekanizması

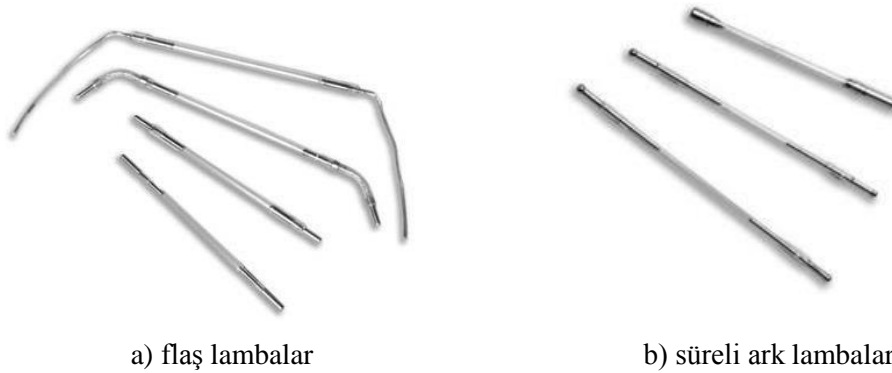
Nd:YAG katıhal lazerler birkaç farklı yöntemle optiksel olarak pompalanabilmektedirler. Uygulamalara göre değişmekte birlikte genellikle Nd:YAG kristalini pompalamak için lamba veya diyot lazerler kullanılmaktadır.

2.1.3.1. Lamba ile pompalama

Nd:YAG katıhal lazerler genel olarak ark veya flaş lambalar kullanılarak pompalanmaktadır. Nd:YAG katıhal laseri sürekli mod (CW) uygulamalarında xenon veya krypton ark lambaları kullanılmaktadır. Atımlı mod (QCW) uygulamalarında ise flaş lambalar kullanılmaktadır. Lambaların spektrumları tam olarak Nd:YAG kristalini karşılayamaması sistemin verimini azaltmaktadır. Nd:YAG katıhal lazer ark lamba ile pompalandığında yaklaşık olarak % 2-3 verimde elektrik enerjisini optik enerjisine dönüştürmektedir (Koechner 2006).



Şekil 2.6. Nd:YAG kristalin soğurma spektrumu ve krypton ark lamba emisyon spektrumu (Directed Light Inc.)



Şekil 2.7. Nd:YAG kristalini pompalamada kullanılan lambalar (Directed Light Inc.)

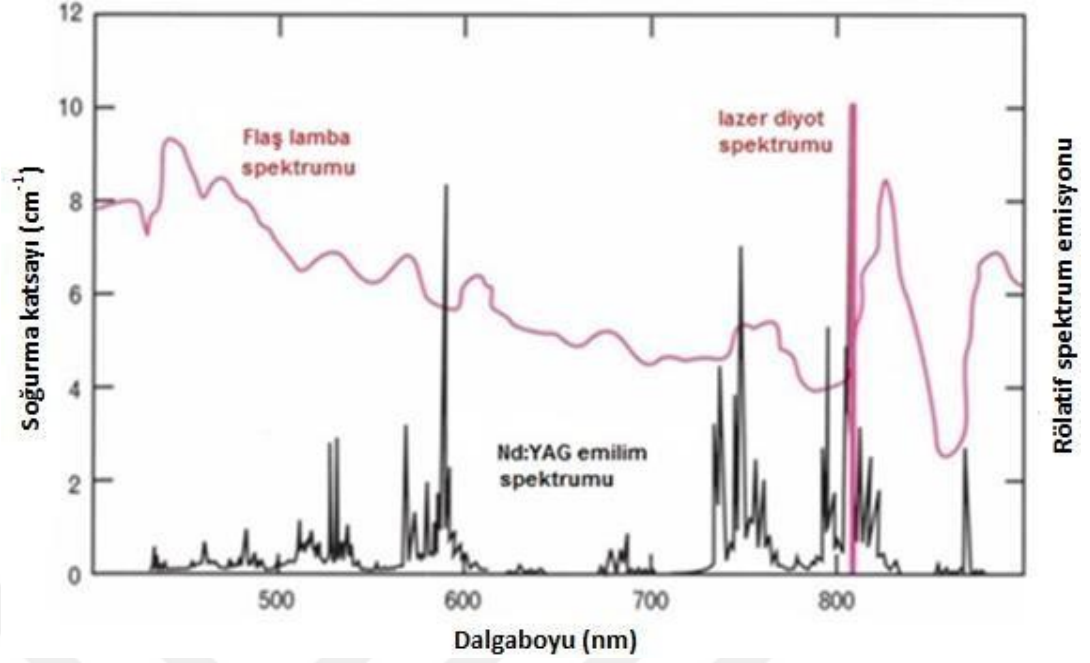
2.1.3.2. Diyot lazer ile pompalama

Nd:YAG kristali 730-760 nm, 790-820 nm, 860-890 nm dalgaboyları aralıklarında pompalanabilmektedir. Özellikle son yıllarda, 750-980 nm dalgaboyu aralığında watt mertebelerinde lazer ışını üretebilen alüminyum galyum arsenit (AlGaAs) ve indiyum galyum arsenit (InGaAs) tabanlı yarıiletken diyot lazerler geliştirilmiştir. Nd:YAG kristalinin merkez dalgaboyu 808 nm olacak şekilde 2 nm spektum genişliğindeki ışını maksimum soğurmaktadır. Diyot lazerlerin spektum genişliklerinin dar olması Nd:YAG kristalini etkili pompalama olanağı vermiştir. Nd:YAG katıhal lazer diyot lazer ile pompalandığında yaklaşık olarak % 10-15 verimde elektrik enerjisini optik enerjisine dönüştürmektedir (Koechner 2006).

Diyot lazerlerin aşağıdaki özelliklerinden dolayı Nd:YAG katıhal lazerlerin verimini artması, oluşan ısıyı azaltması, bakımını azaltması ve tasarımı kolaylaşması gibi özelliklerinden dolayı lambaların yerini almıştır.

- 1- Spektrumlarının dar olması
- 2- Verimlerinin yüksek olması
- 3- Çalışma ömürlerinin uzun olması
- 4- Kompakt yapıda olmaları
- 5- Atımlı ve sürekli modda çalışabilmeleri
- 6- Elektriksel olarak kolay sürülebilmeleri

Şekil 2.8'de % 1 oranında neodimyum atomlarıyla katkılandırılmış YAG kristalinin ışın soğurma grafiği verilmiştir. Aynı grafikte flaş lamba emisyon dalgaboyu ve diyot lazer dalgaboyu verilmiştir.



Şekil 2.8. Flaş lamba ve diyot lazerin emisyon grafiği (Fan 1998)

Şekil 2.9’da Nd:YAG katıhal lazerlerini pompalamada sıklıkla kullanılan 808 nm dalgaboyunda emisyon yapabilen 50 watt optik gücündeki CS model diyot lazer gösterilmiştir.



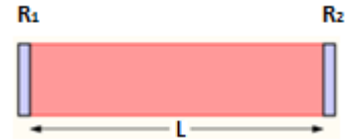
Şekil 2.9. CS model diyot lazer (Focuslight Inc.)

2.1.4. Optik geri besleme (rezonatör)

Lazer ışınının oluşabilmesi için aktif ortamındaki atomlar uyarılarak nüfus terslemesi yapılması ve bunun sonucunda oluşan fotonların kendiliğinden (spontaneous) saçılmalarını tek bir ekseninde çoğalması gerekmektedir. Fotonların tek bir ekseninde çoğalması geri besleme mekanizmasıyla (rezonatör) mümkün olmaktadır. Bu nedenle aktif ortamın iki ucuna aynalar konulmaktadır. Aynalardan biri tam yansımali diğeri kısmi geçirgen seçilmektedir. Aktif ortamındaki atomlar uyarılmaya başlanınca oluşan fotonlar rastgele saçılmaktadırlar. Uyarma yeterli düzeye geldiğinde oluşan fotonların aynaların ekseninde geri yansımaları sonucunda aynı eksenindeki karazsız atomlarıda aynı yönde foton salacak şekilde zorlamaktadırlar. Bunun sonucunda aynaların ekseninde zincirleme bir şekilde ışın çoğalması meydana gelmektedir. Bu şekilde zincirleme uyarılma ile gitgide aynı ekseninde çoğalan fotonlar belirli bir yoğunluğa (eşik değer) geldiğinde kısmi geçirgen aynadan çıkmaktadırlar. Böylece lazerin oluşmasını sağlayan aynalar (rezonatör), sistemi tamamlamaktadır (Koechner 2006).

2.1.4.1. Rezonatör çeşitleri

Rezonatörü oluşturan iki aynanın eğrilik yarıçaplarına göre rezonatörler özel isimler almaktadırlar (Koechner 2006). Bunlar;



1- Fabry-Perot ($R_1 = R_2 = \infty$)

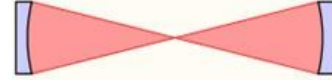
Birbirlerine paralel iki düz aynadan oluşan fabry-perot rezonatörü hizalanması zor olmasından dolayı genellikle mikro rezonatöre ($L < 1$ cm) sahip olan yarıiletken lazerlerde kullanılmaktadırlar.

2- Yarım küresel ($R_1 = L, R_2 = \infty$)



Bu tür rezonatörler kaliteli lazer ışın üretebilme özelliğine sahip olmasına karşın sistemin odağı aynalardan birinin üzerinde olmasından dolayı yüksek güçlerde ayna zarar görmektedir. Bu nedenle düşük güçlü, kalite lazer ışınına (gaussian beam) ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir.

3- Eş merkezli ($R_1 = R_2 = L/2$)



Kaliteli lazer ışını üretebilen bu konfigürasyon, aynaların odağı rezonatörün içinde olmasından dolayı yüksek güçlü lazerlerde kristal zarar görmektedir. Bu nedenle düşük güçlü, kaliteli lazer ışınına (gaussian beam) ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir.

4- İç ve dışbükey ($R_1 > L, R_2 = L - R_1$)



Rezonatörün pozitif ve negatif yarıçaplı aynalardan oluşmasının bir sonucu olarak lazer ışını rezonatörün içine odaklanmamaktadır. Aynı zamanda aynaların kolay hizalanmasından dolayı yüksek güçlü lazerlerde tercih nedeni olmuştur.

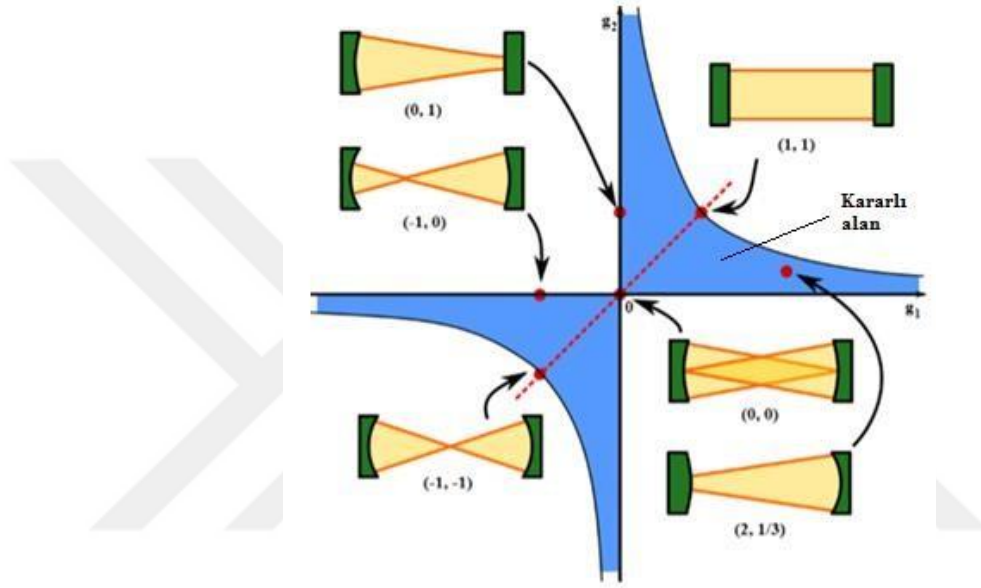
2.1.4.2. Kararlılık ölçütü

Aktif ortamda oluşan lazer ışını, iki ayna (rezonatör) içinde kalacak şekilde sürekli aynalar arasında yansiyarak çoğalması ve belirli bir eşik değere geldiğinde sadece kısmı geçirgen aynadan çıkması, rezonatörün kararlı yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Aşağıda verilen formüle göre Şekil 2.10'daki kararlılık grafiği oluşturulmaktadır (Koechner 2006).

$$0 \leq (1 - L/R_1) (1 - L/R_2) \leq 1 \quad (2.1)$$

$$g_1 = 1 - L/R_1 \quad g_2 = 1 - L/R_2 \quad (2.2)$$

Burada, g_1 ve g_2 sırasıyla birinci ve ikinci aynanın kararlılık parametresidir.



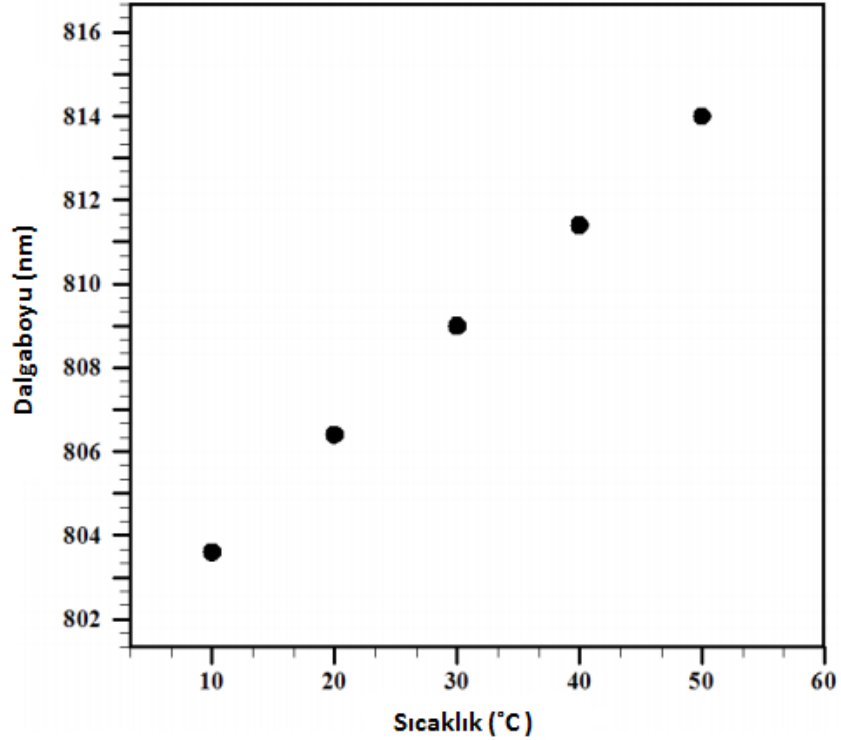
Şekil 2.10. Kararlılık ölçütü diyagramı

2.2. Nd:YAG Katıhal Lazerine Sıcaklığın Etkileri

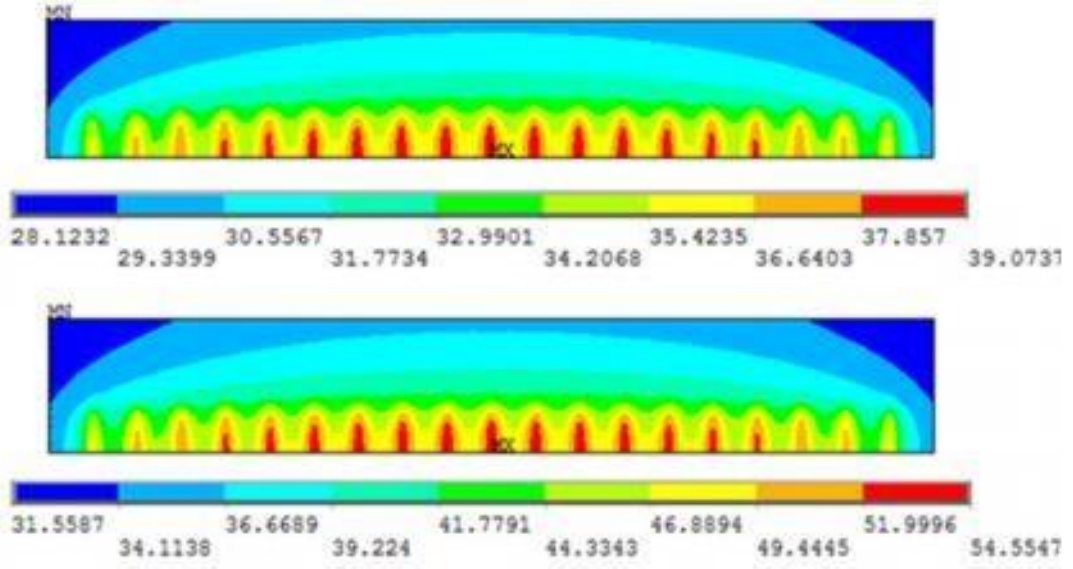
2.2.1. Sıcaklığın dalgaboyuna etkisi

Nd:YAG kristali 808 nm merkez dalgaboyunda 2 nm spektrum genişliğinde yüksek oranda lazer ışınını soğurmaktadır. Bu nedenle Nd:YAG katıhal lazerini etkili pompalamak için üretilen diyot lazerler, oda sıcaklığında (25°C) 808 nm dalgaboyunda emisyon yapacak şekilde tasarlanmaktadır. Ortamsal sıcaklığın artması veya verilen akımın artırılması sonucunda diyot lazerlerin sıcaklıklarının artması, lazer ışınının oluştuğu aktif bölgenin (junction region) genişmesine neden olmaktadır. Bu durum

yariletkenin yasak bant aralığının daralmasına neden olarak dalgaboyunu artırmaktadır (Piprek ve ark. 2002). Yarıiletkenlerin yapılarına göre değişmekle birlikte genellikle Galium Arsenit (GaAs) tabanlı yarıiletkenlerde sıcaklıktaki 1 °C derecelik artış 0.28 nm dalgaboyu artışına denk gelmektedir (Şekil 2.11). Şekil 2.12’de Nd:YAG kristalini pompalamak için kullanılan 808 nm dalgaboylu 60 watt optik gücündeki CS model diyot lazerin, gövdesiyle çipleri arasında sıcaklık farkı 20 amperde yaklaşık 11 °C (39.07 – 28.12) derece iken akım 60 ampere yükseltildiğinde bu fark yaklaşık 23 °C (54.55 – 31.55) derece olmaktadır. Diyot lazerlerin geometik yapısından ve yarıiletken çiplerin soğutucu gövdeye lehimleme kalitesine bağlı olarak çipleri arasındaki sıcaklık farkının oluşması, diyot lazerin spektrumunun genişlemesine neden olmaktadır. Diyot lazerlerin sıcaklık artışından kaynaklanan dalgaboyu artışı, Nd:YAG kristalinin maksimum değerde (808 nm) lazer ışını soğuramamasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, Nd:YAG katihal lazerlerin verimi azalmaktadır (Koechner 2006).



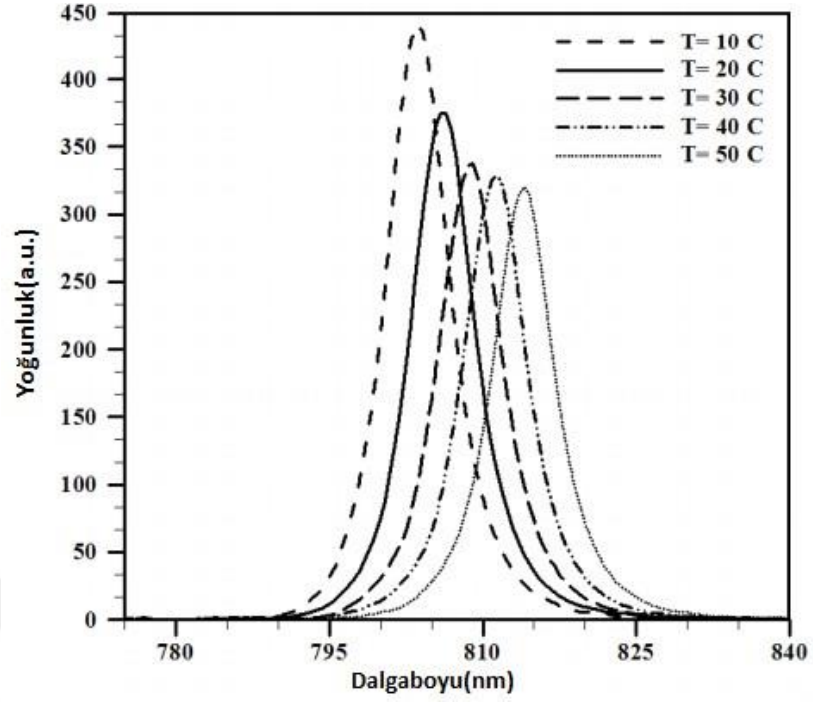
Şekil 2.11. Diyot lazerin sıcaklığın etkisiyle dalgaboyunun artması (Farsad ve ark. 2011)



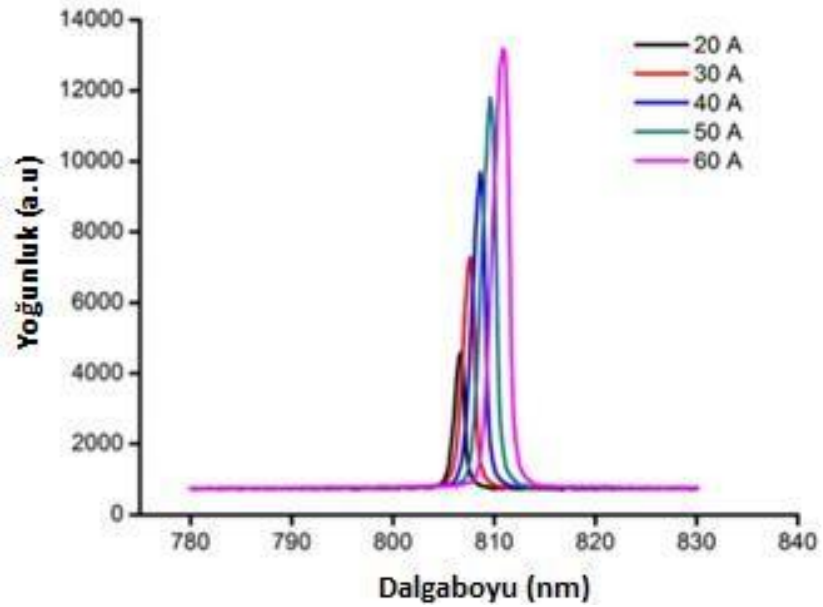
Şekil 2.12. Akımın artırılmasıyla diyot lazerin sıcaklığının artması ve diyot lazeri oluşturan çiplerin arasındaki sıcaklık farkının artması (Yan ve ark. 2013)

2.2.2. Sıcaklığın optik çıkış gücüne etkisi

Diyot lazerlerin optik çıkış gücü aktif bölgedeki (junction region) fotonların yoğunluklarıyla doğrudan ilgilidir. Diyot lazere uygulanan akımın artırılmasıyla birlikte aktif bölgede foton yoğunluğu artmaktadır. Fakat akımın artırılması aktif bölgede ki iç ve dış kayıpların artmasına neden olan taşıyıcı sızmaları (carrier leakage) ve ışınımsız farklı birleşimlerin (nonradiative recombination) artması diyot lazere verilen elektrik enerjisinin optik enerjiye dönüştürmedeki verimini azaltmakta oluşan ısıyı artırmaktadır (Piprek 2003). Nd:YAG kristalini pompalamak için kullanılan 808 nm dalgaboyundaki diyot lazerlerin sıcaklığın etkisiyle veriminin azalması, Nd:YAG katıhal lazerin ürettiği 1064 nm dalgaboyundaki lazer ışının verimini de azaltmaktadır (Koechner 2006).



Şekil 2.13. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak diyot lazerin dalgaboyunun artması ve çıkış güç yoğunluğunun azalması (Farsad ve ark. 2011)



Şekil 2.14. Akımın artmasına bağlı olarak diyot lazerin dalgaboyunun ve çıkış güç yoğunluğunun artması (Yan ve ark. 2013)

2.2.3. Sıcaklığın ışın kalitesine etkisi

Nd:YAG kristalinin soğurduğu optik enerjinin bir kısmını ısıya dönüştürmesi, kristalin genişmesine ve termal gradiyente neden olmaktadır. Genleşme sonucu kristal stresle yüklenmektedir. Termal gradiyent oluşması ise kristalde kırılma indisi değişmesine yol açmaktadır (Şekil 2.13). Bu etkilerin sonucunda, çift kırınım (birefringence), ısıl mercek (thermal lensing) ve çift odak (bifocusing) gibi optik kusurlar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda Nd:YAG katıhal lazerin ışın kalitesi azalmaktadır (Yu ve ark. 2003).



Şekil 2.15. Kristalin ısıyla yüklenmesi sonucu optik eksen sapması (COMSOL 2014)

Optik eksen sapması aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Koike ve Sugimoto 2006).

$$\text{Optik eksen sapması} = \Delta T \cdot \frac{dn}{dT} \cdot L + (\Delta T \cdot \alpha(T) \cdot L) = \Delta T \cdot L \left(\frac{dn}{dT} + \alpha(T) \right) \quad (2.3)$$

Burada;

$\frac{dn}{dT}$: sıcaklığa bağlı kırılma indis katsayısı

$\alpha(T)$: sıcaklığa bağlı liner genişleme katsayısı

L: rezonatörün uzunluğu

ΔT : Sıcaklık farkı

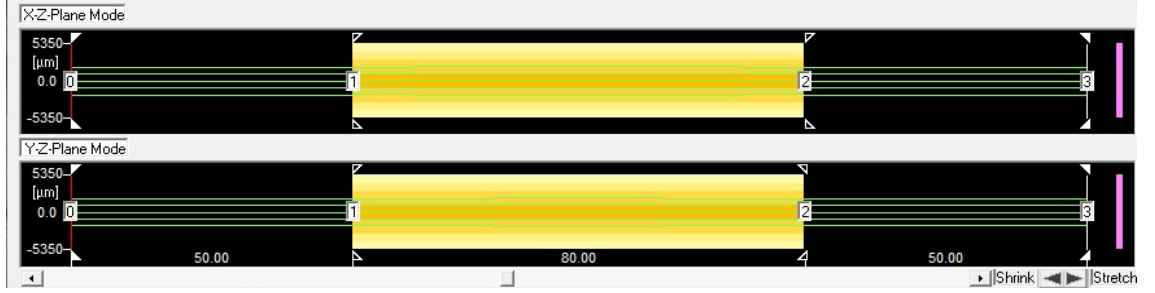
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. LASCAD[®] Lazer Benzeşim Programı

LASCAD[®] lazer benzeşim programı, aktif ortamında Nd:YAG ve Yb:YAG gibi kristallerin kullanıldığı katıhal lazerlerin, tasarımı ve analizlerinin yapıldığı bir yazılımdır. LASCAD[®] lazer benzeşim programıyla katıhal lazerlerinin ışın parametreleri olan optik güç (sürekli ve atımlı mod) ve ışın kalitesi hesaplanabilmektedir. Kristalin optik pompalanma sonucunda oluşan termal stres, mekanik stres, ısı yüklenmesi, sıcaklık artışı ve ısıl mercekleme gibi etkiler LASCAD[®] lazer benzeşim programında, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle hesaplanabilmektedir (LASCAD[®]).

3.1.1. Nd:YAG katıhal lazerin modellenmesi

Lazerin aktif ortamında % 1 oranında neodimyum atomları ile katkılandırılmış yttrium alüminyum garnet kristali (Nd:YAG) seçilmiştir (Çizelge 3.1). Kullanılan kristalin uzunluğu 80 mm, çapı 4 mm seçildi. Rezonatör olarak 180 mm uzunluğunda fabry-perot tipi bir rezonatör tercih edilmiştir. Rezonatörü oluşturan dielektrik aynalar düz ($R_1 = R_2 = \infty$) ve birbirine paralel olacak şekilde seçilmiştir. Dielektrik aynaların biri tam yansıtıcı (% 99,5 ve üzeri) diğer kısmı geçirgen (%5 geçirgen) seçildi. Nd:YAG kristalini pompalamak için üç adet 808 nm dalgaboyunda 50 watt'lık diyot lazerler 20 mm aralıklarla karşılıklı konumlandırılmıştır. Diyot lazerlerin optik çıkış güçleri toplamda 50 watt ve 150 watt olacak şekilde iki farklı optik güçlerde seçilerek, Nd:YAG kristali üzerindeki termal etkiler ve optik çıkış güç değerleri incelenmiştir. Nd:YAG katıhal lazerin tasarımı Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1. LASCAD® lazer benzeşim programıyla Nd:YAG katihal lazerin tasarlanması

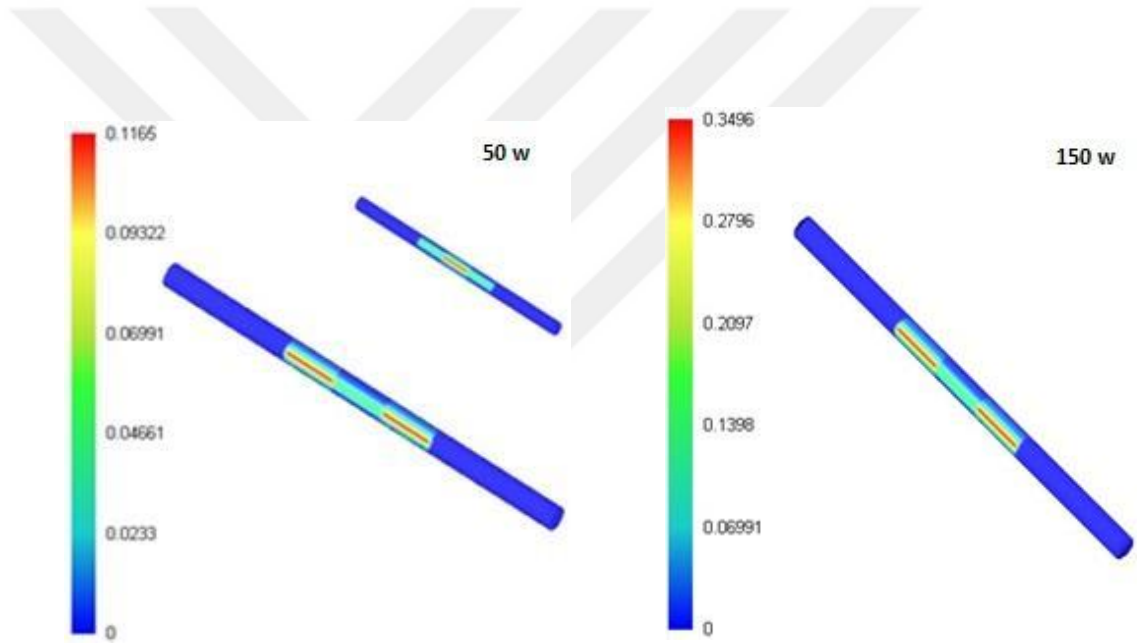
LASCAD® lazer benzeşim programına girilen Nd:YAG rod (silindir) şeklindeki kristalin 25 ° C derecedeki optik, mekanik ve termal özellikleri Çizelge 3.1’deki gibidir.

Çizelge 3.1. Nd:YAG rod kristalinin özellikleri (Altechna Co. Ltd.)

Formül	$Y_{2.97} Nd_{0.03} Al_5 O_{12}$
Kristal yapısı	[111] kübik
Uzunluk (mm)	100
Çap (mm)	4
Yoğunluk (g/cm^3)	4.55
Nd atomları ile katkı oranı (%)	~1
Kristalin uçları	Düz/düz
Termal iletkenlik (W/cm.K)	0.14
Termal genişleme katsayısı (1/K)	6.9×10^{-6}
Elastik modülü (N/m^2)	0.3
Poisson oranı	0.25
Kırılma indeksi	1.823
Termal şok direnci (W/m)	790
Emisyon dalgaboyu (nm)	1064
Soğurma dalgaboyu (nm)	808
Floresans ömrü (μs)	230

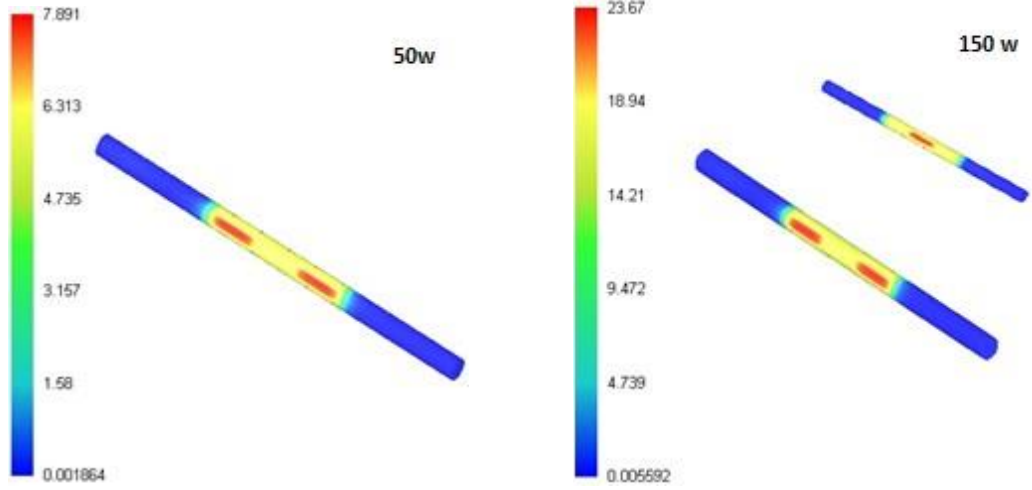
3.1.2. Nd:YAG katıhal lazerin termal analizi

Şekil 3.2’de Nd:YAG kristalinin, 50 ve 150 watt’lık optik pompalanma sonucunda farklı ısılarla yüklenmesi görülmektedir. Aynı zamanda diyot lazerlerin, kristalin karşısına konumlandırıldığı bölgelerde de en fazla ısıyla yüklendiği görülmektedir. Diyot lazerin karşısındaki bölgenin ve optik gücün artırılması, kristal tarafından daha çok lazer ışının soğurmasına neden olarak 1 mm³ hacminde ki ısı yükü artmaktadır. Nd:YAG kristali 50 watt’la pompalandığında, maksimum ısı yükü 0.12 W/mm³ iken 150 watt’la pompalandığında ısı yükü 0.35 W/mm³ olmaktadır.



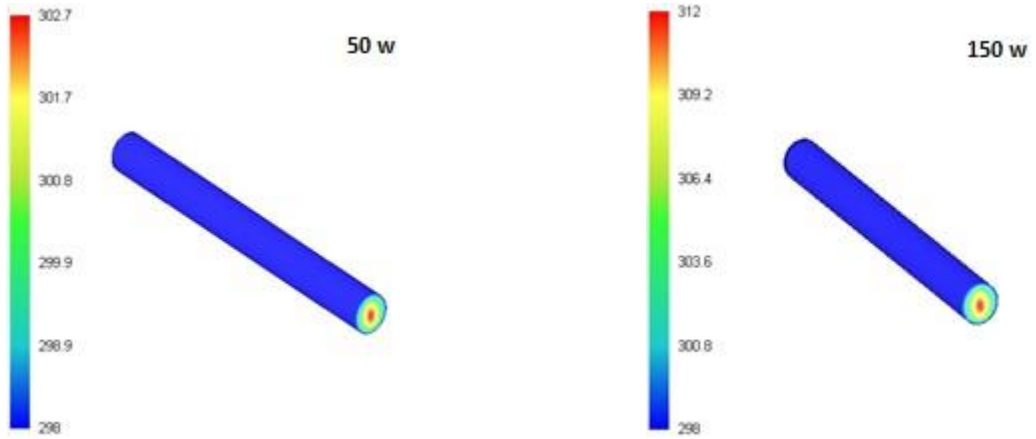
Şekil 3.2. Nd:YAG kristalinin ısıyla (W/mm³) yüklenmesi

Şekil 3.3’te Nd:YAG kristalinin 50 ve 150 watt’lık optik güçle pompalanması sonucunda farklı termal stresle yüklenmesi gösterilmektedir. Isı yükünün fazla olduğu bölgelerde genişleme meydana geldiğinden 1 mm² alanda ki termal stres artmaktadır. Kristal 50 watt’la pompalandığında maksimum termal stres 7.9 W/mm² iken 150 watt’la pompalandığında ise termal stres 23.7 W/mm² olmaktadır.

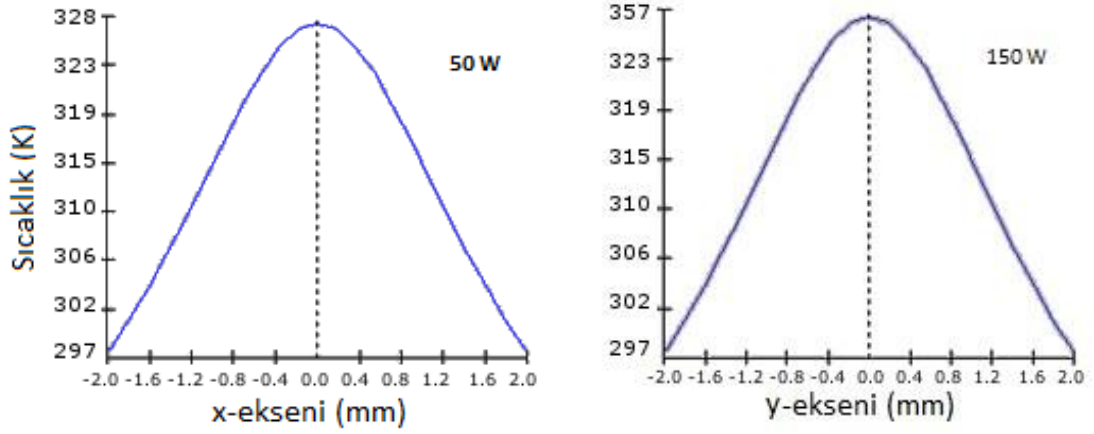


Şekil 3.3. Nd:YAG kristalinin termal stresle (N/mm^2) yüklenmesi

Şekil 3.4 ve 3.5'te Nd:YAG kristalinin 50 ve 150 watt'lık optik güçlerdeki pompalanması sonucunda farklı sıcaklık dağılımlarının oluşması gösterilmektedir. Optik pompalama gücü arttıkça sıcaklık farkıda artmaktadır. Kristal 50 watt'la pompalandığında sıcaklık farkı yaklaşık 5 K iken 150 watt'la pompalandığında bu fark 14 K çıkmaktadır. Sıcaklık farkı kristalin iletkenlik katsayısının neden olduğu termal gradiyentin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.4. Nd:YAG kristali üzerindeki 3 boyutlu sıcaklık dağılımı



Şekil 3.5. Nd:YAG kristali üzerindeki 2 boyutlu sıcaklık dağılımı

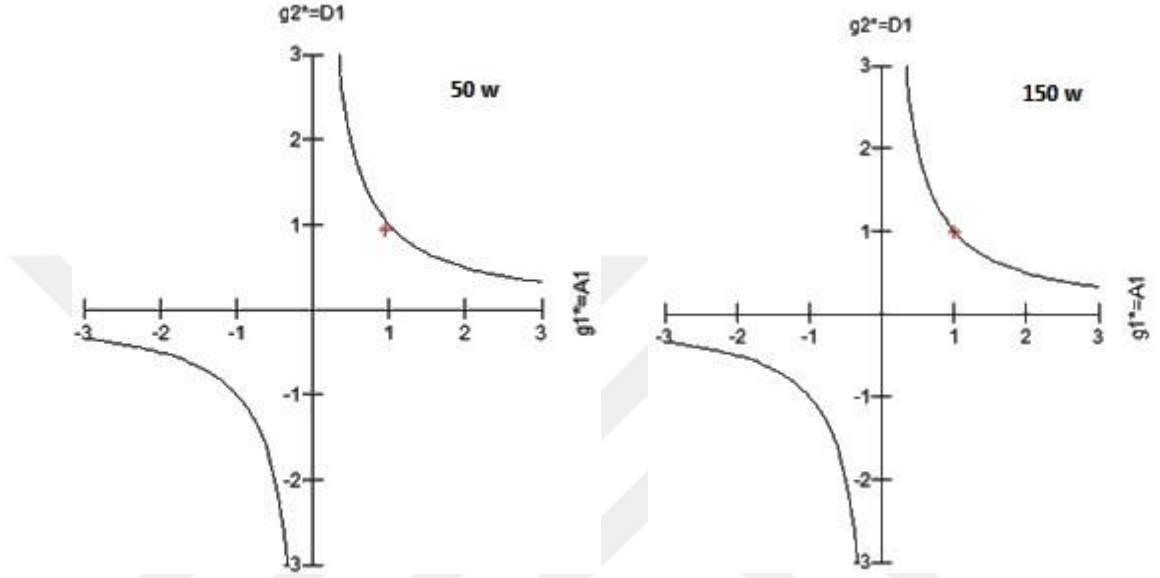
3.1.3. Nd:YAG katıhal lazerin ışın analizi

Çizelge 3.2’de Nd:YAG kristalinin farklı güçlerde (50 ve 150 watt) pompalanması, farklı ısıl mercekleştirmiş. Buda enine elektromanyetik modların artmasına ve dolayısıyla eksenlerdeki (x-y) ışın kalite faktörünün değişmesine neden olmuştur. Eksenlerdeki mod sayılarının artması sonucunda oluşan lazerin (1064 nm) ışın kalitesi azalmıştır. M_x^2 ve M_y^2 değerinin 1’den uzaklaşması ışın kalitesinin azaldığı anlamına gelmektedir. Kristal 50 watt’la pompalanırken x-eksenindeki M_x^2 ışın kalite faktörü 22.4 iken 150 watt’la pompalandığında ışın kalite faktörü 38.2’ye çıkmıştır.

Çizelge 3.2. Farklı pompalama güçlerindeki Nd:YAG lazerin ışın kalite değerleri

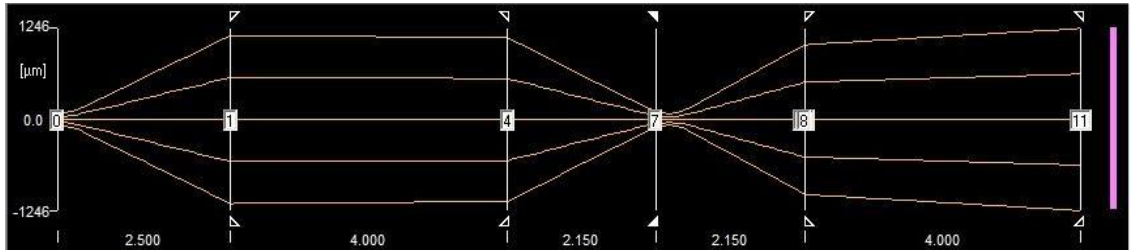
Pompalanan optik güç (W)	Isıl mercekleşme (mm)	TEM_n	TEM_m	M_x^2	M_y^2
50	x-z: 1929.6 y-z: 713.4	11	18	22.4	36.5
150	x-z: 648.2 y-z: 242.8	19	30	38.2	60.2

Şekil 3.6'da iki farklı optik pompalama güçlerindeki kararlılık ölçütünün değişimi gösterilmektedir. İki parabolik eğrinin arasındaki bölge kararlılık bölgesidir. Nd:YAG kristalinin 50 watt'lık optik pompalamada ki kararlılığı 150 watt'lık optik pompalamaya göre daha kararlı olduğu görülmektedir.



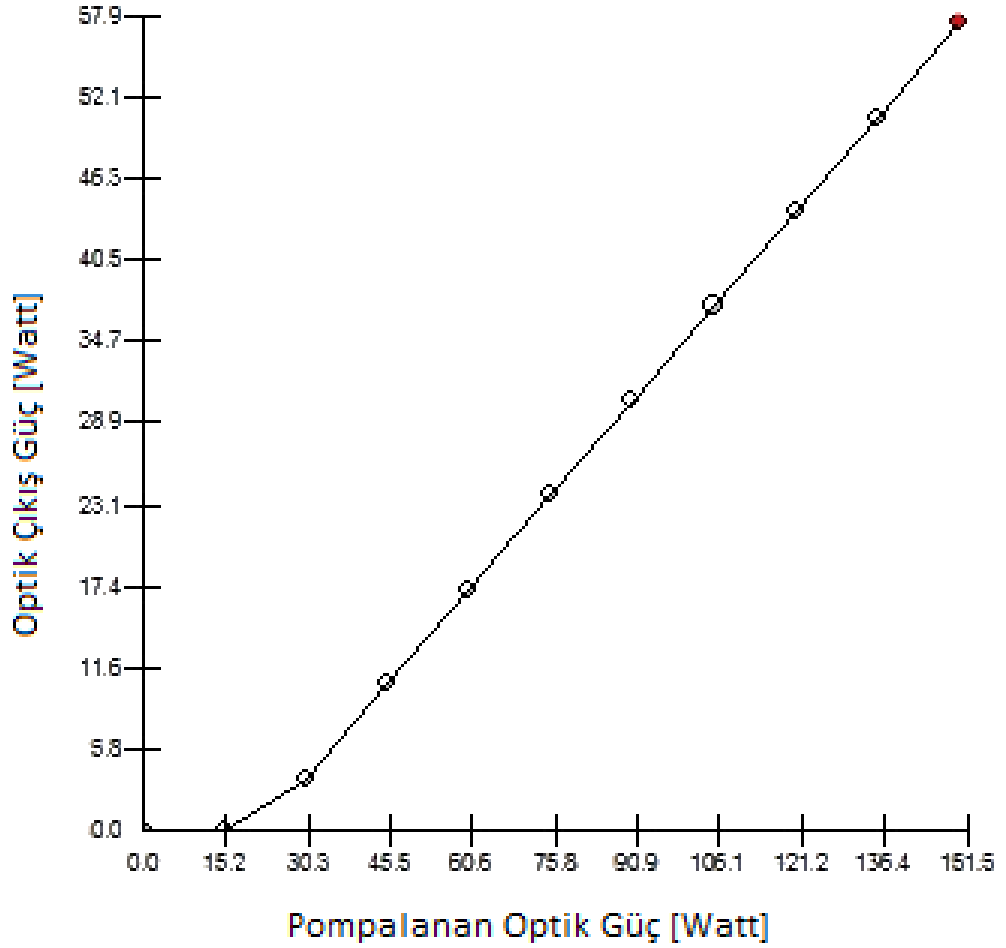
Şekil 3.6. Kararlılık ölçütünün farklı pompalama güçlerindeki değişimi

Şekil 3.7'de LASCAD® lazer benzeşim programında tasarlanan 4 mm Nd:YAG kristalini pompalamak için 2.5 mm uzaklığa konumlandırılmış diyot lazer ışınlarının y-eksenindeki dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Diyot lazerin Nd:YAG kristali üzerindeki ışınlarının dağılımı

Nd:YAG kristalinin 25 °C (298 K) derecede, 808 nm dalgaboyunda, 150 watt'lık optik güçle pompalanması sonucunda LASCAD® lazer benzeşim programın verdiği sonuç Şekil 3.8'deki gibidir. Kristalden 1064 nm dalgaboyunda maksimum 57.2 watt optik çıkış gücü çıkmaktadır. Kristalin eşik değeri (threshold) 15.2 watt'tır. Optik pompalama gücü artırıldıkça kristalin ürettiği 1064 nm dalgaboyundaki çıkış gücü liner olarak artmaktadır. Bunun nedeni, pompalama gücü artıkça kristal içerisindeki uyarılan atom sayılarının artması sonucu daha çok foton oluşmasıdır.



Şekil 3.8. Nd:YAG kristalin 150 watt'la pompalandığında optik çıkış güç grafiği

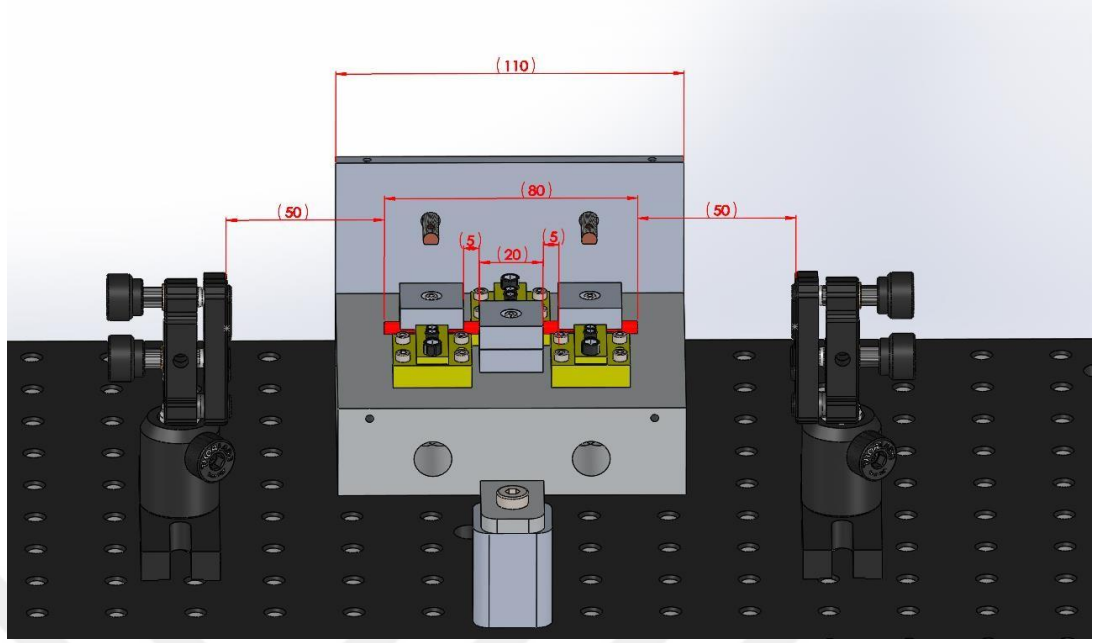
LASCAD[®] lazer benzeşim programı kullanılarak modellenen, 808 nm dalgaboyunda 150 watt'lık optik güçle pompalanan Nd:YAG katıhal lazerin, 1064 nm dalgaboyunda ki optik çıkış güç değeri ve optik dönüştürme verimi Çizelge 3.3'teki gibidir. Aynı zamanda yapılan tasarımın kıyas edilebilmesi için çizelgede başka bir Nd:YAG katıhal lazer referans olarak verilerek, optik verim değerleri karşılaştırılmıştır (Wang ve ark. 2004).

Çizelge 3.3. LASCAD[®] programıyla tasarlanan Nd:YAG lazerin verimi ve kıyası

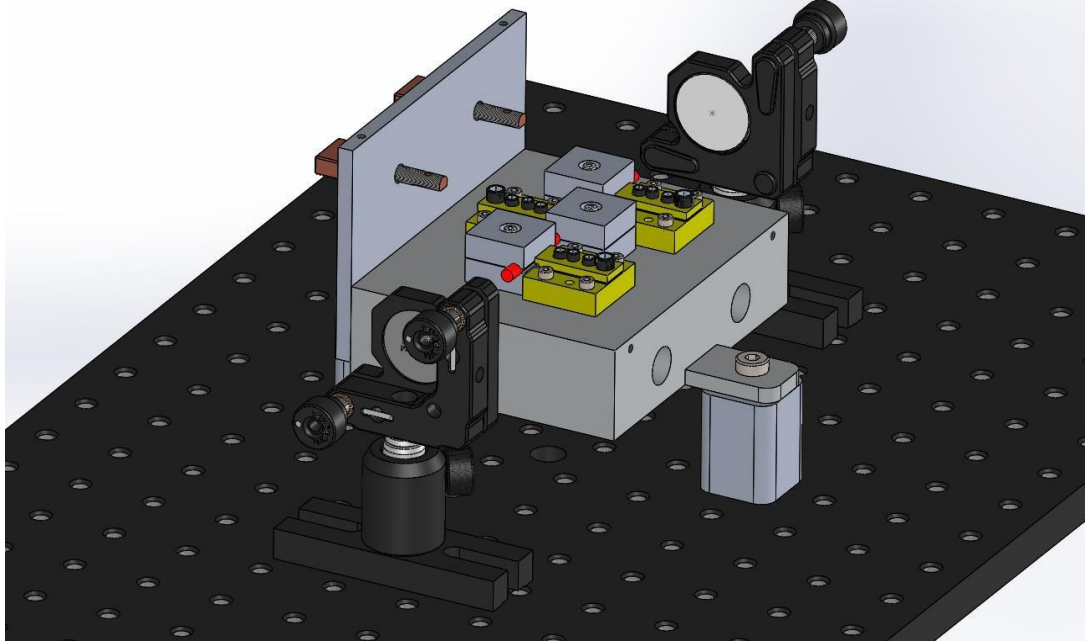
Özellik Tasarım	Pompalama dalgaboyu (nm)	Pompalama gücü (W)	Çıkış dalgaboyu (nm)	Çıkış gücü (W)	Optik verim (%)
LASCAD[®]	808	150	1064	57.29	~ 38
REFERANS	808	400	1064	170	~ 37

3.2. SolidWorks[®] Çizim Programıyla Mekanik Tasarımın Yapılması

SolidWorks[®] çizim programı kullanılarak LASCAD[®] lazer benzeşim programında modellenen Nd:YAG katıhal lazerinin parametrelerine göre mekanik bir tasarım Şekil 3.9 ve 3.10'daki gibi yapılmıştır. Mekanik tasarımda lazer rezonatörün boyu 180 mm'dir. Nd:YAG kristalinin boyu 80 mm, çapı 4 mm'dir. Üç adet CS model pompalayıcı diyot lazerler karşılıklı konumlandırılmıştır. Diyot lazerlerin soğutulması için gövdede 12 mm çapında su kanalları açılmıştır. Nd:YAG kristalinin soğutulması ve pompalanan lazer ışınının geri yansıtarak etkili pompalama yapılabilmesi için üç tane alüminyum tutucu tasarlanmıştır. Rezonatörü oluşturan aynalar, hassas ayarlı ayna tutucularla konumlandırılmıştır. Rezonatörün açıl ve kartezyen koordinatlarda ayarlanabilmesi için Nd:YAG katıhal lazerinin aynaları ayarlanabilen tutucular ve optik masa üzerinde toplanmıştır.



Şekil 3.9. SolidWorks® çizim programıyla tasarlanan lazerin ölçülendirilmesi



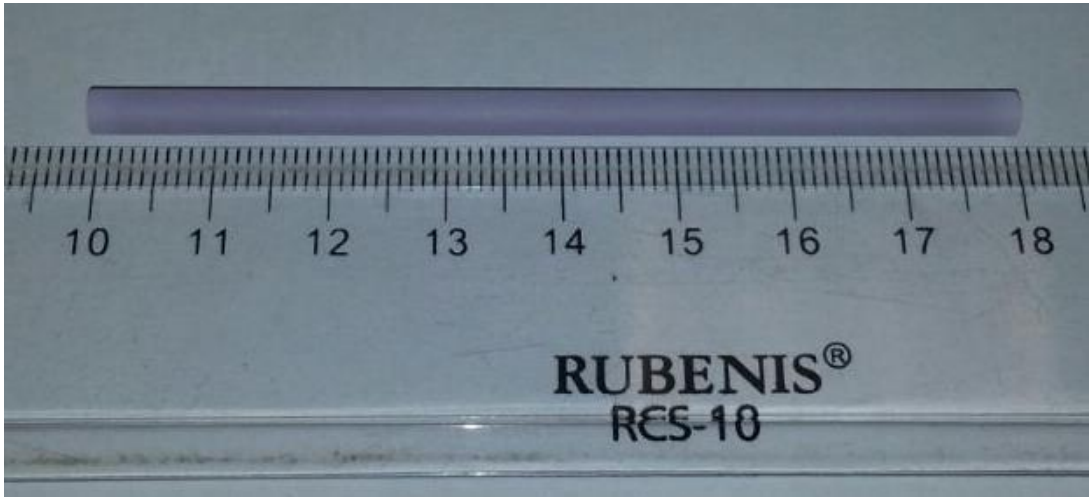
Şekil 3.10. SolidWorks® çizim programıyla tasarlanan lazerin izometrik gösterimi

3.3. Deney Düzeneginin Yapımı

Sıcaklığın Nd:YAG katıhal lazerin üzerindeki etkilerini incelemek için üç adet CS model diyot lazer ve bir adet Nd:YAG kristali, LASCAD® lazer benzeşim programında modellenen parametrelere göre bir deney düzenegi hazırlanmıştır. Deney düzenegi iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi kısımda, pompalayıcı diyot lazerin farklı akımlarda ve farklı sıcaklık değerlerinde, optik çıkış gücü ve dalgaboyu parametrelerindeki değişiklikler incelenmiştir. İkinci kısımda ise Nd:YAG katıhal lazer farklı sıcaklıklarda çalıştırılarak optik çıkış gücündeki değişiklikler incelenmiştir.

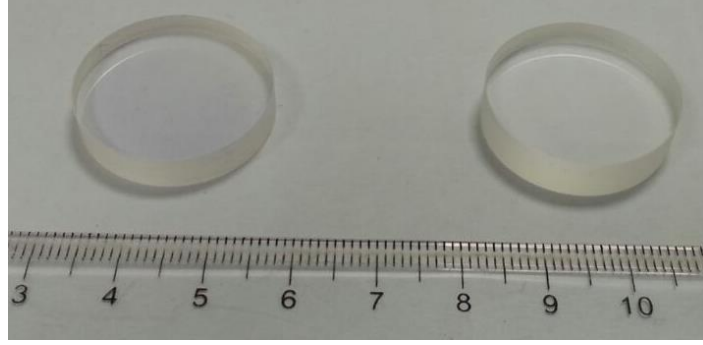
3.3.1. Kullanılan ürünler

Lazerin aktif ortamında 80 mm uzunluğunda, 4 mm çapında, % 1 oranında neodimyum atomlarıyla katkılandırılmış, iki ucu birbirlerine paralel kesilmiş ve geri yansıma kayıplarını önleyici optik kaplama yapılmış bir Nd:YAG kristali kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. % 1 oranında katkılandırılmış Nd:YAG kristali

Lazerin rezonatörü 25.4 mm çapında, 6 mm kalınlığında, 1064 nm dalgaboyunu % 99,5 ve % 95 oranında yansıtıcı iki adet dielektrik aynadan oluşturulmuştur (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Dielektrik aynalar

808 nm dalgaboyunda, 50 watt optik çıkış gücünde, CS model diyot lazer kullanılmıştır (Şekil 3.13). Deney düzeneğinde kullanılan diyot lazerin 25 °C derecedeki teknik özellikleri Çizelge 4'teki gibidir.

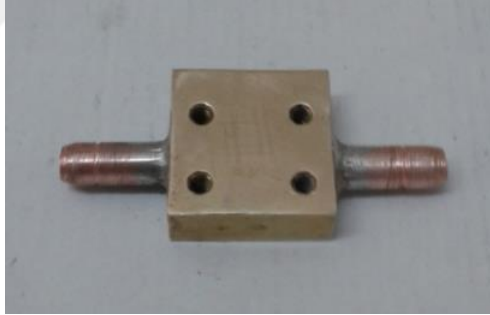
Çizelge 3.4. Diyot lazerin özellikleri (Focuslight Inc.)

Çalışma modu	Sürekli (CW) ve Atımlı (QCW)
Optik çıkış gücü (W)	50
Merkez dalgaboyu (nm)	808±3
Spektral genişlik (nm)	≤4 (yarım açıda)
Y- eksenindeki ışın açılma açısı (°)	40 (yarım açıda)
X- eksenindeki ışın açılma açısı (°)	8 (yarım açıda)
Eşik akımı (A)	~8
Çalışma akımı (A)	≤62
Çalışma voltu (V)	≤2
İdeal çalışma sıcaklığı (°C)	25



Şekil 3.13. Diyot lazer (Focuslight Inc.)

Deneyin birinci kısmında yapılan testlerde, diyot lazerin ürettiği ısıyı atmak için içerisinde su geçirilen bakır soğutucu gövde kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Bakır soğutucu gövde

Nd:YAG kristalinde ve diyot lazerlerde oluşan ısının atılması ve sıcaklığın istenilen değerde sabit tutulması için soğutucu (çiller) kullanılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Soğutucu (çiller)

Diyot lazerlerin elektriksel olarak sürülebilmesi için ihtiyaç olan 6 volt gerilimi ve 55 amper akımı üretebilen sürücü kullanılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Diyot lazer sürücüsü

3.3.2. Yapılan testler

Diyot lazer üzerindeki sıcaklık iki farklı metal alaşımın uçlarının kaynatılması ile elde edilen sıcaklık (termokupl) sensörü kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Sıcaklık (termokupl) sensörü

Diyot lazerlerin ve Nd:YAG katıhal lazerin optik çıkış gücünün ölçülmesi için bilgisayar destekli yüksek hassasiyetli lazer güç ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.18).



Şeki 3.18. Lazer güç ölçer sensörü

Diyot lazerlerin ve Nd:YAG katıhal lazerinin dalgaboylarını ölçmek için 400nm den 1100 nm dalgaboyuna kadar ölçüm yapabilen dalgaboyu ölçer (spektrometre) kullanılmıştır (Şekil 3.19).



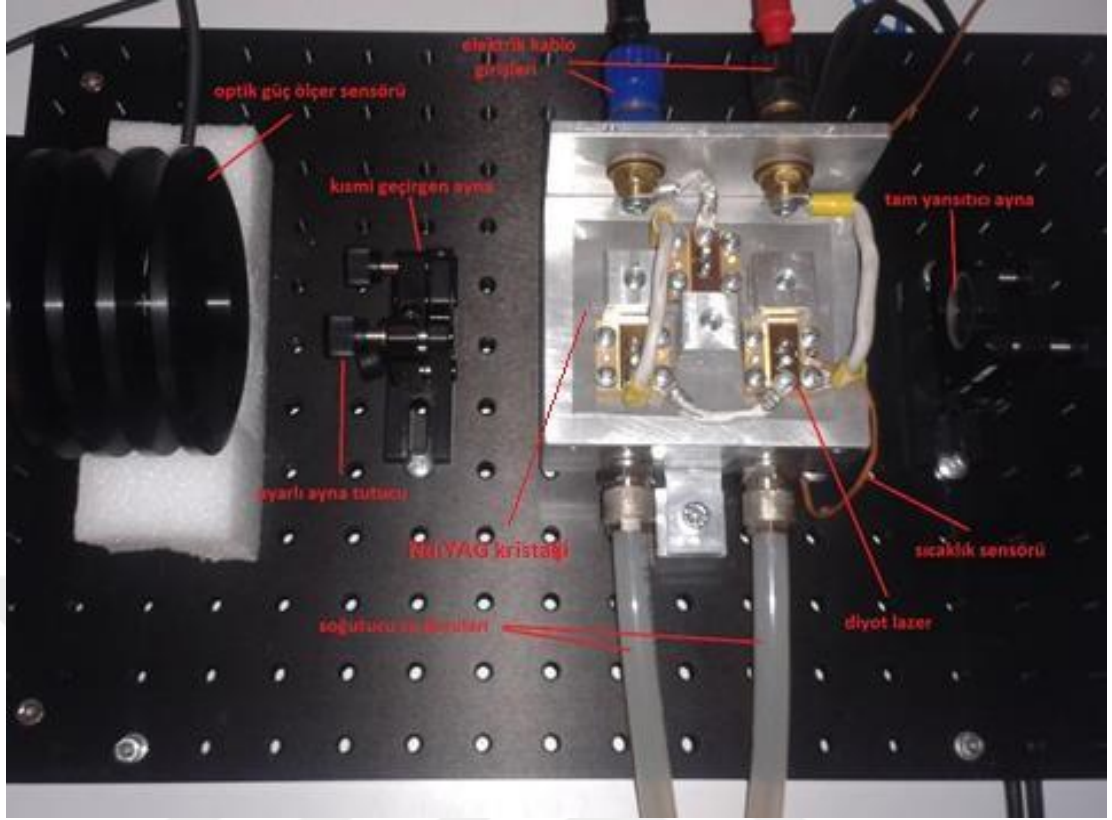
Şekil 3.19. Dalgaboyu ölçer (spektrometre)

Deney düzeneğinin birinci kısmının genel gösterimi ve herhangi bir çalışma anındaki görüntüsü Şekil 3.20'deki gibidir.



Şekil 3.20. Diyot lazer deney düzeneğinin genel gösterimi

Deney düzeneğinin ikinci kısmı olan Nd:YAG katıhal lazerinin genel gösterimi ve herhangi bir çalışma anındaki görüntüsü Şekil 3.21 ve 3.22'deki gibidir.



Şekil 3.21. Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneğinin iç gösterimi

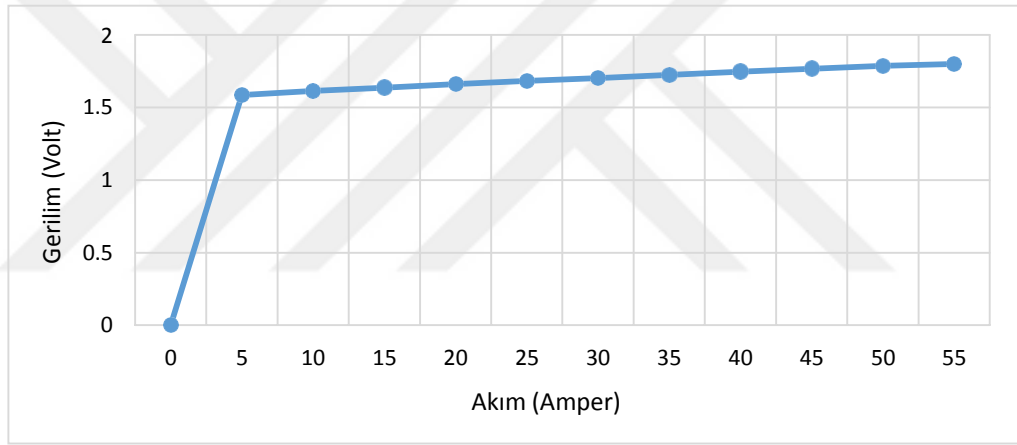


Şekil 3.22. Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneğinin genel gösterimi

3.4. Elde Edilen Sonuçlar

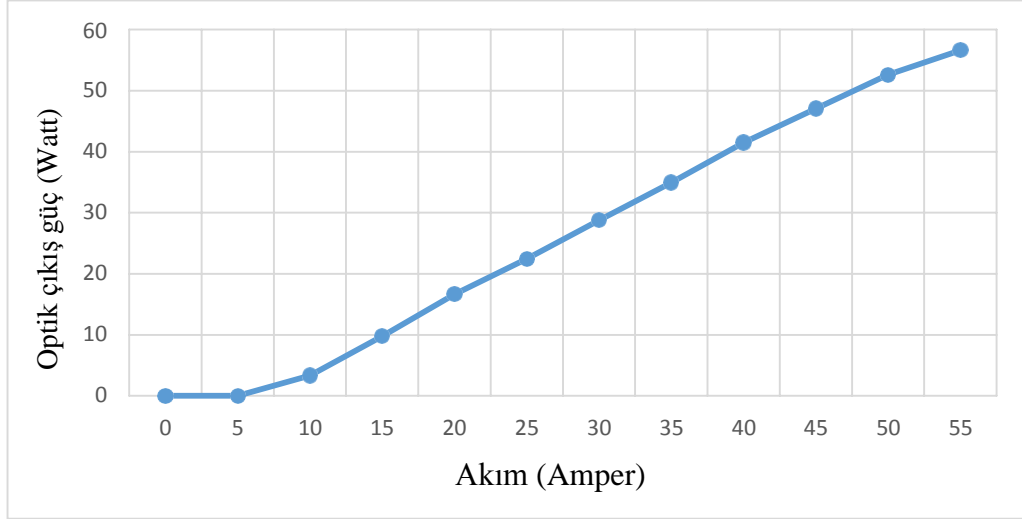
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlardan gerilim-akım, optik çıkış güç-akım ve verim grafikleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

şekil 3.23'te 25 °C derecedeki diyot lazere sıfırdan başlanarak akım sınırlandırılması olmadan 1.8 volta kadar gerilim verilmiştir. Sıfırdan 1.6 volta kadar gerilim hızlı bir artmış göstermiştir. Bu değerden 1.8 volta kadar gerilim liner olarak artmıştır. Diyot lazer 1.6 voltan itibaren elektriksel olarak açılmıştır ve ışımaya başlamıştır.



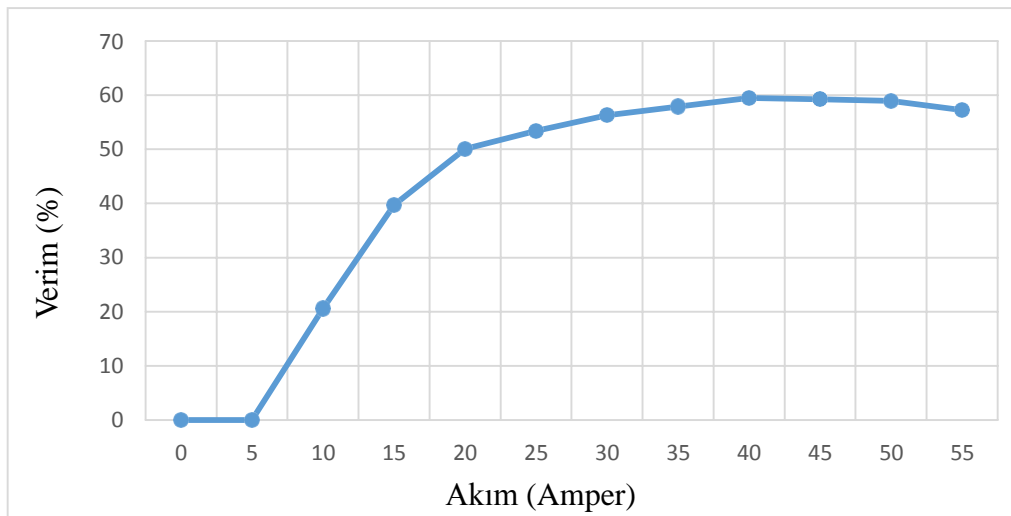
şekil 3.23. Diyot lazerin 25 °C derecedeki gerilim - akım grafiği

25 °C derecedeki diyot lazere uygulanan akımın artırılmasıyla optik çıkış gücün 5 amperden ışımaya başlayarak liner olarak artmıştır (şekil 3.24). Uygulanan akımın artırılmasıyla diyot lazerin optik çıkış gücünün artmasının nedeni diyot lazeri oluşturan yarıiletkenin i yapısında oluşan foton yoğunluğunun artmasıdır.



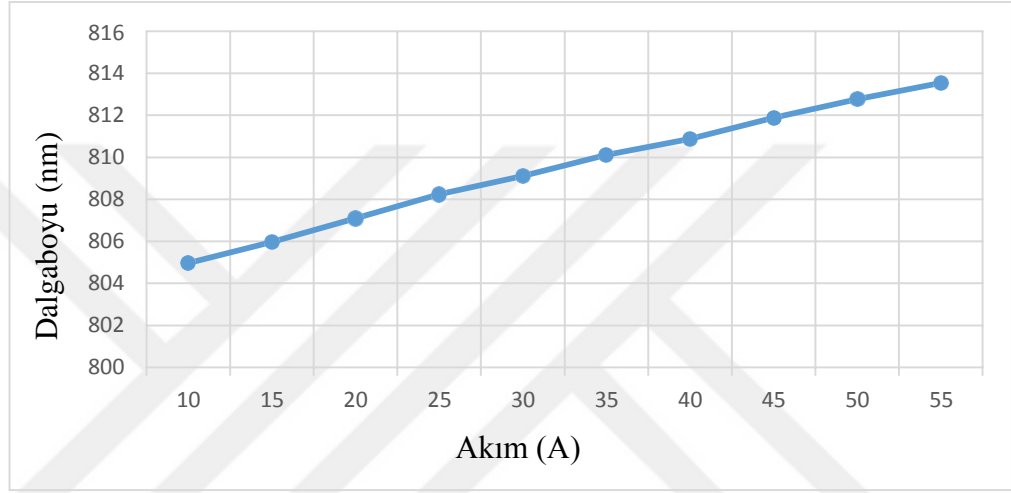
Şekil 3.24. Diyot lazerin 25 °C derecedeki optik çıkış gücü - akım grafiği

Şekil 3.25'te 25°C derecedeki diyot lazere uygulanan akımın 5 amperden başlayarak 15 ampere kadar lineer olarak artmaktadır. Maksimum verim 40 amperde yaklaşık % 60 olarak elde edilmiştir. Diyot lazerin verimi 40 amperden itibaren giderek azalmıştır. Verimin belirli bir değerden sonra azalmasının nedeni bölüm 2.2.2'de anlatılan diyot lazere uygulanan akımın artırılmasıyla taşıyıcı sızmaları ve ışınımsız farklı birleşimlerin artmasından kaynaklanmaktadır.



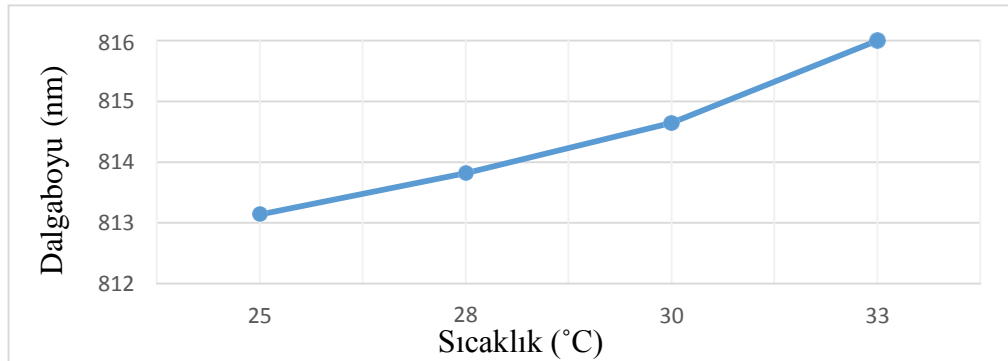
Şekil 3.25. Diyot lazerin 25 °C derecedeki verim grafiği

Şekil 3.26'da 25 °C derecedeki diyot lazere uygulanan akımın artırılması sonucu dalgaboyu artmaktadır. Diyot lazere uygulanan akımın artırılması sonucunda taşıyıcı sızmaları ve ışınımsız farklı birleşimlerin artması sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Diyot lazerin üzerindeki sıcaklığın artması diyot lazeri oluşturan yarıiletken yapının genişmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda yarıiletkenin yapının aktif bölgesindeki yasak band aralıklarının daralması, diyot lazerin dalgaboyunu artırmaktadır.



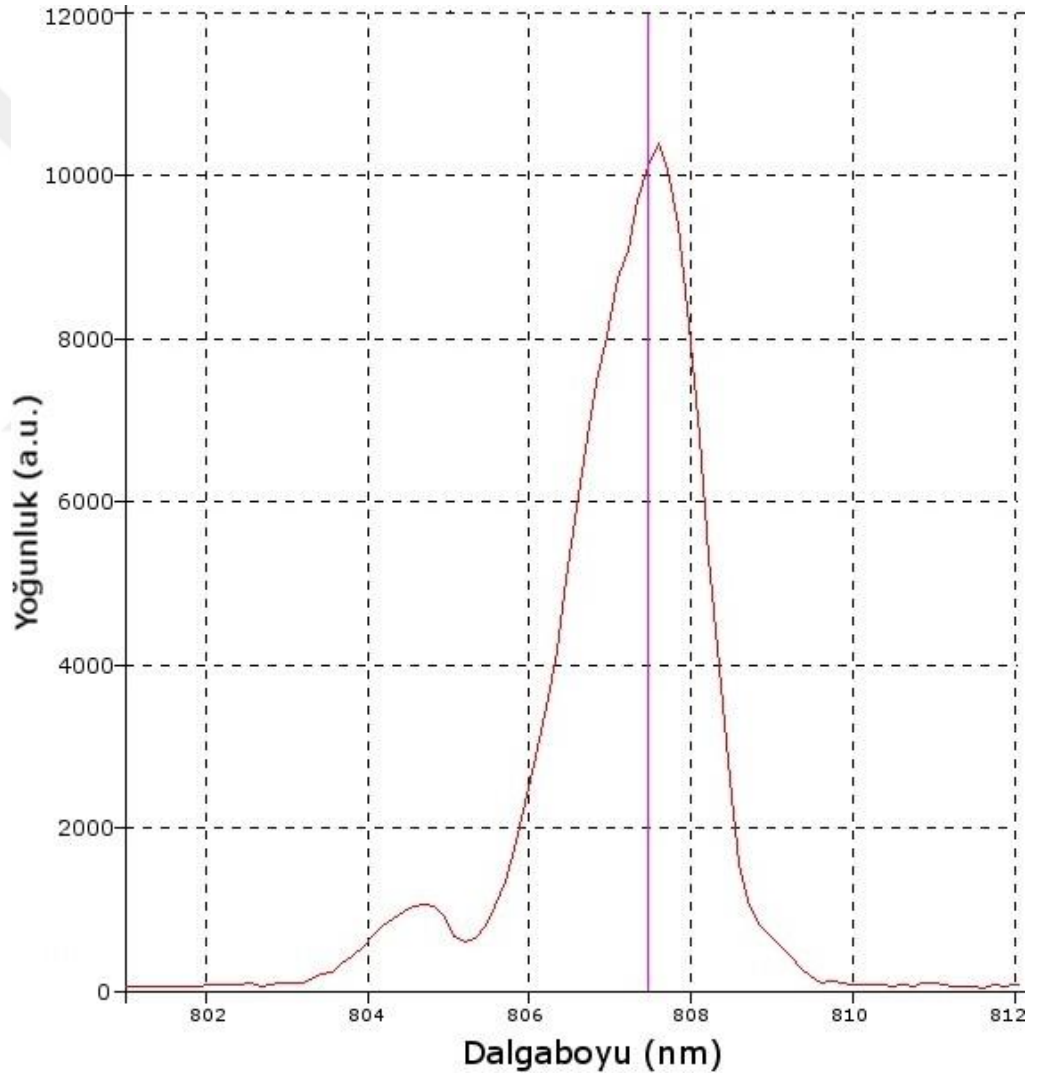
Şekil 3.26. Diyot lazerin 25 °C derecedeki dalgaboyu - akım grafiği

Şekil 3.27'de diyot lazere uygulanan 55 amper akım sabit tutulup, kontrollü bir şekilde diyot lazerin sıcaklığının artmasına izin verilerek, dalgaboyu değişikliği incelenmiştir. Sıcaklığın artması sonucu diyot lazerin dalgaboyuda artmaktadır. Bu durumun nedeni bölüm 2.2.1'de açıklanmıştır.



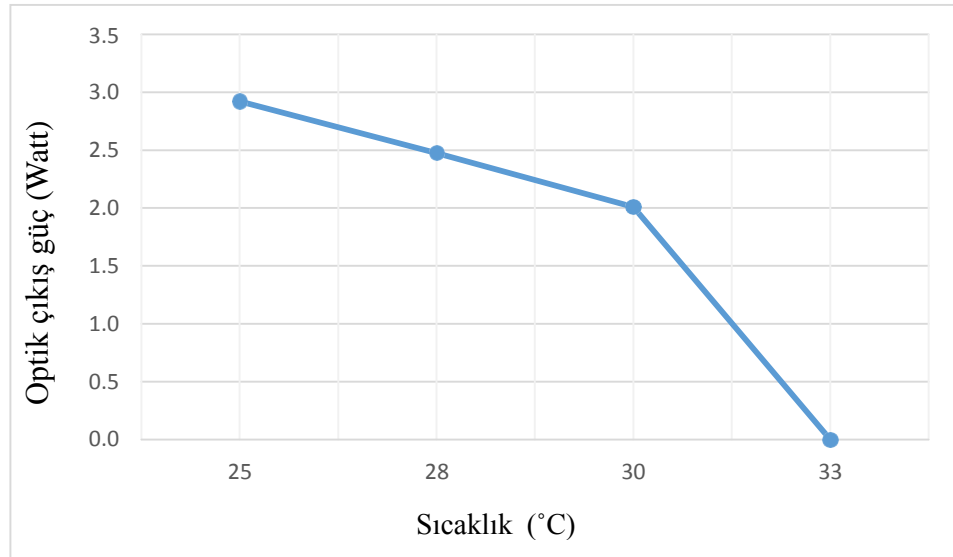
Şekil 3.27. Diyot lazerin 55 amper akımdaki dalgaboyu - sıcaklık grafiği

Şekil 3.28’de 25 °C derecede, 20 amper akımda diyot lazerin ürettiği dalgaboyu gösterilmektedir. Merkez dalgaboyunun 807.7 nm olduğu diyot lazerin yarım açıdaki spektrum genişliği 2.4 nm’dir. Diyot lazerin 803 nm dalgaboyunda civarında farklı bir güç yoğunluğunun oluşmasının nedeni bölüm 2.2.1’de anlatıldığı gibi diyot lazerin geometrik yapısından ve yarıiletkenin soğutucu gövdeye lehimleme kalitesinden kaynaklanmaktadır. Diyot lazerin sıcaklığının artması sonucunda dalgaboyu da artmaktadır. Spektrumu ise genişlemektedir. Bunun sonucunda Nd:YAG kristali pompalanan lazer ışını tam olarak soğuramamaktadır.



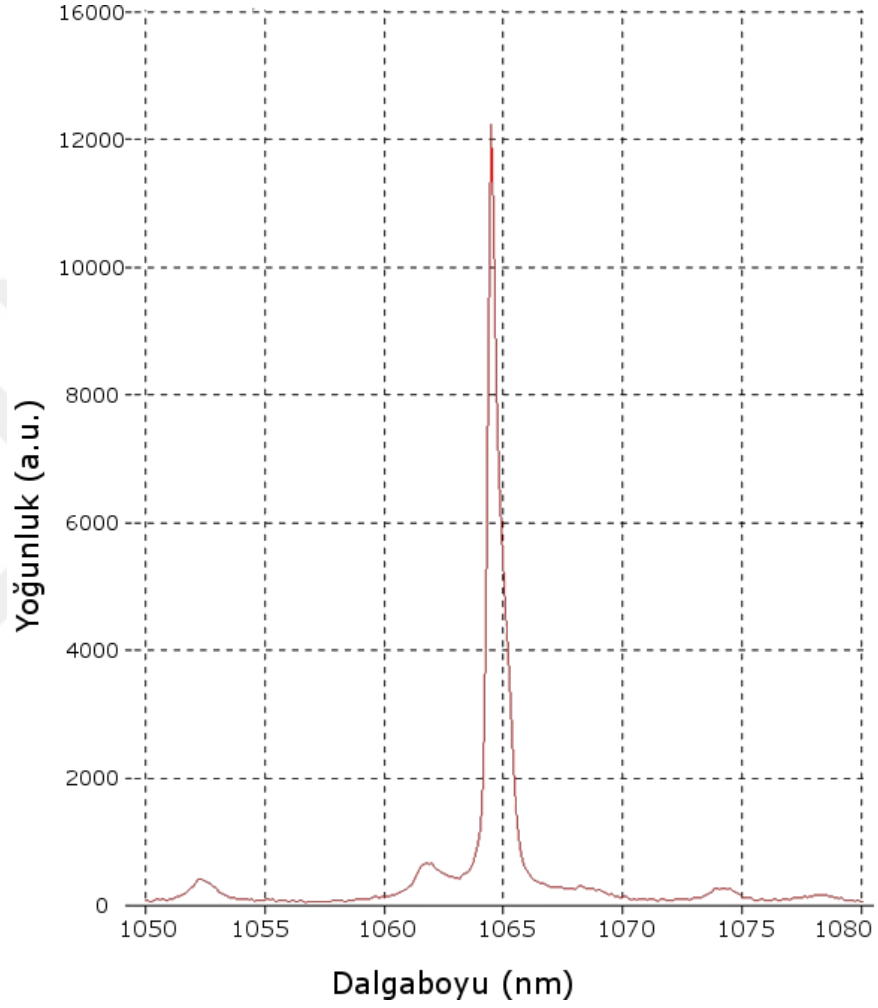
Şekil 3.28. Diyot lazerin 20 amper akımdaki dalgaboyu grafiği

Nd:YAG kristali diyot lazerlerle 150 watt'lık optik güçle pompalanmaktadır. Diyot lazerlerin sıcaklıkları 25, 28, 30 ve 33 °C derece olduğu anlarda pompaladıkları Nd:YAG kristalinin ürettiği optik çıkış güçleri Şekil 3.29'daki gibidir. Diyot lazerlerin sıcaklıklarının artması, ürettikleri dalgaboylarının Nd:YAG kristalinin maksimum soğurduğu 808 nm dalgaboyundan uzaklaşmasına ve böylece kristalin daha az optik gücü soğurmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda Nd:YAG kristalinin ürettiği 1064.1 nm dalgaboylu optik çıkış gücü azalmaktadır. Nd:YAG lazerinin 33 °C derece sıcaklıkta lazer ışını üretememesi, kristalin soğurduğu optik gücün eşik değerin altında kalmasındandır. LASCAD® lazer benzeşim programıyla tasarlanan Nd:YAG katihal lazeri 150 watt'lık optik güçle pompalandığında 57.29 optik çıkış gücü hesaplanmaktadır. Deney düzeneğinde Nd:YAG kristali 150 watt'la pompalandığında 25 °C derecede 2.92 watt'lık optik çıkış gücü vermektedir. Programla deney düzeneği arasındaki bu farkın oluşmasının temel nedeni rezonatörü oluşturan aynaların elle birbirlerine göre binde bir hassasiyetle tam olarak ayarlanamamasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir nedeni ise Nd:YAG kristalinin konulduğu alüminyum gövdenin kaplamasız olması, diyot lazerin ürettiği 808 nm dalgaboyunu geri yansıtamamasına neden olmasıdır. Aynı zamanda üretimden kaynaklanan mekanik kaçıklıkların, teknik çizimde verilen tolerans değerlerinden fazla olmasıdır.



Şekil 3.29. Nd:YAG katihal lazerin optik çıkış gücü - sıcaklık grafiği

Şekil 3.30'da Nd:YAG katıhal lazerin 2.47 watt optik çıkış gücünde çalıştırılırken Nd:YAG kristalinin çıkardığı 1064.1 nm dalgaboyu gösterilmektedir. Spektrumun geniş olmasının nedeni ve grafikte oluşan omuzların nedeni farklı enerji seviyelerinden de geçişlerin olmasıdır. Bu durum kristalin yapısından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.30. Nd:YAG katıhal lazerin dalgaboyu grafiği

Deneilerimizde lazer diyotları sürmek için güç kanağı kullanılmıştır ve bu kaynağın akım ve gerilim değerinin hata oranı % 0.4'tür. Optik güç ölçmek için kullanılan güç ölçerin hata oranı % 2'dir. Nd:YAG lazerin ve diyot lazerlerin güç ölçümlerdeki toplam hata oranı % 2.4'tür. Diyot lazerlerin sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan sıcaklık sensörünün hata oranı % 1'dir. Nd:YAG lazerinin ve diyot lazerlerin dalgaboylarını ölçmek için kullanılan spektromentrenin hata oranı % 0.3'tür.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, katıhal lazerlerine sıcaklığın etkileri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik çalışmada LASCAD® lazer benzeşim programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada ise bir Nd:YAG katıhal lazer deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, Nd:YAG kristalini pompalamak için kullanılan diyot lazerin, akım ve sıcaklığa bağlı olarak optik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir. Deneyin ikinci kısmında, Nd:YAG kristali üç adet diyot lazerle pompalanmıştır. Farklı sıcaklıklarda Nd:YAG kristalinde oluşan 1064.1 nm dalgaboylu lazer ışınının çıkış gücündeki değişiklikler incelenmiştir.

Nd:YAG katıhal lazerinin modellenmesi için LASCAD® programı kullanılmıştır. Nd:YAG kristali farklı optik güçlerde (50 ve 150 watt) pompalanarak kristal üzerindeki etkiler incelendi. Yapılan tasarıma göre Nd:YAG kristali 50 watt'lık optik güçle pompalandığında 1064 nm dalgaboyunda 12.68 watt optik çıkış gücü vermiştir. 150 watt'la pompalandığında ise 57.29 watt'lık optik çıkış gücü vermiştir. Pompalayıcı optik güç arttıkça Nd:YAG kristalin daha fazla optik güç soğurduğu ve kristalinin daha fazla ısıyla yüklendiği görülmüştür. Isı yükünün artması, Nd:YAG kristalinin sıcaklığını yükseltmiş ve kristal üzerindeki termal stresi artırmıştır. Bunun sonucunda Nd:YAG kristalin ürettiği ışın kalitesinin azaldığı görülmüştür. Yapılan tasarıma göre 50 watt optik güçle pompalanan Nd:YAG kristalinin ışın kalite faktörü y-ekseninde 36.5 iken 150 watt'la pompalandığında bu değer 60.2'e çıktığı hesaplanmıştır.

Deneyin birinci kısmı, Nd:YAG kristalini pompalamak için alınan üç adet diyot lazerden bir tanesi seçilerek, sıcaklığın diyot lazerin optik çıkış gücüne ve dalgaboyuna olan etkileri iki farklı yolla incelenmiştir. Birinci yolla yapılan incelemede, diyot lazerin sıcaklığı 25 °C derece sabit tutulup, akım sıfırdan başlanarak 50 ampere kadar artırılmıştır. Bu akım aralığında diyot lazerin optik çıkış gücü ve dalgaboyu liner olarak arttığı görülmüştür. Diyot lazer 10 amper akımdan itibaren liner olarak optik çıkış gücü sürülen akımla doğru orantılı olacak şekilde 50 amper akıma kadar devam etmiştir. Sürülen akımın artmasıyla diyot lazerin optik çıkış gücünün artması, oluşan foton yoğunluğunun ilgilidir. Diyot lazerin 50 amperin üzerindeki akımlarda linerliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun oluşmasına, akımın ışınımsız farklı birleşimlerini ve

taşıyıcı sızmalarını artması sonucu optik kayıpların artması neden olmaktadır. Bu etkilerin sonucunda diyot lazerin sıcaklığının artması, diyot lazeri oluşturan yarıiletkenin yasak bant aralığının kısılmasına neden olarak dalgaboyunu artmaktadır. Diyot lazer 25 °C derecede, 10 amper akımda 804.9 nm dalgaboyunda ışımaya yaparken aynı sıcaklıkta 50 amper akımda 812.7 nm dalgaboyunda ışımaya yaptığı görülmüştür. Diyot lazer 40 amper akımda maksimum verime (~ %60) ulaştığı, 40 amperin üzerindeki akımlarda ise verim giderek azaldığı görülmüştür. İkinci yolla yapılan incelemede, diyot lazer 55 amper akımda sabit tutularak soğutucu (çiller) devre dışı bırakılıp farklı sıcaklık (25, 28, 30, 33 °C) değerlerindeki dalgaboyu değişiklikleri incelenmiştir. Diyot lazer 25 °C derecede, 55 amper akımda 813.02 nm dalgaboyunda ışımaya yapmaktayken aynı akım değerinde diyot lazerin 33 °C derecedeki dalgaboyu 816.02 nm'ye çıktığı görülmüştür.

Deneyin ikinci kısmında, Nd:YAG kristali üç adet diyot lazerle pompalanarak kristalin oluşturduğu 1064.1 nm dalgaboyundaki optik çıkış gücü farklı sıcaklıklarda (25, 28, 30, 33 °C) incelenmiştir. Nd:YAG kristali 25 °C derecedeki diyot lazerlerle 150 watt'lık optik pompalama yapıldığında, 1064.1 nm dalgaboyunda 2.92 watt optik gücünde lazer ışını üretmektedir. Diyot lazerlerin sıcaklıkları 30 °C derecede olduğunda ve 150 watt optik gücündeyken Nd:YAG kristali pompalandığında, 1064.1 nm dalgaboyunda 2.01 watt optik çıkış gücünde lazer ışını üretmektedir. Diyot lazerlerin sıcaklıkları 33 °C dereceye çıktığında, Nd:YAG kristali ışımaya yapamamaktadır. Nd:YAG kristalinin ürettiği 1064.1 nm dalgaboylu optik çıkış gücü, diyot lazerlerin sıcaklıklarının artması sonucunda azalmaktadır. Nd:YAG kristalinin maksimum 808 nm dalgaboyunda ve 2 nm spektrum genişliğindeki ışını etkili soğurmaktadır. Diyot lazerlerin sıcaklıklarının artmasıyla dalgaboylarının 808 nm'den daha yüksek değerlere çıkması sonucunda Nd:YAG kristali verimli pompalanamamaktadır. Bunun sonucunda Nd:YAG kristalinin ürettiği 1064 nm dalgaboyundaki optik çıkış gücün, sıcaklıkla giderek azalmasına neden olmaktadır. Yapılan deneyde diyot lazerlerin sıcaklıkları 33 °C derecedeyken Nd:YAG kristalini pompaladığında, 1064 nm dalgaboyunda lazer ışını üretememesinin nedeni, kristalin soğurduğu optik gücün eşik değerinin altında kalmasıdır.

LASCAD® lazer benzeşim programında Nd:YAG kristali 150 watt optik güçle pompalandığında 57.29 optik çıkış gücü sonucunu vermektedir. Yapılan deney sonucunda Nd:YAG kristalinin 150 watt optik pompalanma sonucunda 2.92 optik çıkış

gücü elde edilmiştir. Programın verdiği sonuçla yapılan deney sonucunun farklı çıkmasının ana nedeni, elle rezonatörü oluşturan aynaların birbirlerine göre binde bir derece hassasiyetle ayarlanamamasından kaynaklanmaktadır.

Nd:YAG katıhal lazerinde çıkış gücünü artırmak için pompalayıcı optik gücün artırılması sonucuna sıcaklığın artması sistemin verimini azaltmaktadır. Nd:YAG kristalinin üzerindeki sıcaklığın artması, ürettiği 1064 nm dalgaboyundaki lazer ışınının kalitesini azaltmaktadır. Sonuç olarak, Nd:YAG katıhal lazerlerinde sıcaklık sınırlayıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

İleriki çalışmalarda, katıhal lazerlerde etkili soğutma yöntemleri üzerinde durularak katıhal lazerlerin aktif ortamında kullanılan kristalin üzerindeki sıcaklığın etkileri en aza indirme yöntemleri araştırılacaktır. Kristali pompalayıcı diyot lazerlerin dalgaboylarının sabit tutulması için farklı soğutma sistemleri geliştirilecektir.

KAYNAKLAR

- 1- **Einstein, A. 1917.** Quantum theory of radiation and atomic processes. *Physikalische Zeitschrift*, 18: 121-128.
- 2- **Gordon, J.P., Zeiger, H.J., Townes, C.H. 1955.** The Maser-New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer. *Physial Review*, 99(4): 1264-1274.
- 3- **Schawlow, A.L., Townes, C.H. 1958.** Infrared and Optical Masers. *Physial Review*, 112(6): 1940-1949.
- 4- **Maiman, T.H. 1960.** Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187(4736): 493-494.
- 5- **Geusic, J. E., Marcos, H.M., Uitert, L.G.V. 1964.** Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets. *Applied Physics Letters*, 4(10): 182–184.
- 6- **Ross, M. 1968.** YAG laser operation by semiconductor laser pumping. *Proceedings of the IEEE*, 56: 196-197.
- 7- **Ikesue, A., Kinoshita, T., Kamata, K., Yoshida, K. 1995.** Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycrystalline Nd:YAG Ceramics for Solid-State Lasers. *Journal of the American Ceramic Society*, 78(4): 1033-1040.
- 8- **Kanchanavaleerat, E., Cochet, M. D., Kokta, M., Stone, S. J., Sarkies, P., Sarkies, J., Sarkie, J. 2004.** Crystal Growth of High Doped Nd:YAG. *Journal Optical Material*, 26(4): 337-341.
- 9- **Ashoori, V., Shayganmanesh, M. 2012.** Heat Generation and Removal in Solid State Lasers: An Overview of Heat Transfer Phenomena, Ed.: Kazi, S., N., InTech, Rijeka, Hirvatistan, pp: 341-376.
- 10- **Yasui, K. 1996.** Efficient and stable operation of a high-brightness cw 500-W Nd:YAG rod laser. *Applied Optics*, 35(15): 2566-2569.

- 11- **Koechner, W. 2006.** Solid-State Laser Engineering. *Springer*, New York, USA, 750 pp.
- 12- **Pfistner, C., Weber, R., Weber, H.P., Merazzi, S., Gruber, R. 1994.** Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd: GSGG, and Nd: YLF Rods. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30(7): 1605-1615.
- 13- **Weber, R., Neuenschwander, B., Donald, M.M., Ross, M.B., Weber, H.P. 1998.** Cooling Schemes for Longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG Rods. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34(6): 1046-1053.
- 14- **Fan, T.Y. 1990.** Diode laser pumped solid state lasers. *THE LINCOLN LABORATORY JOURNAL*, 3(3): 413-426.
- 15- **Frede, M., Ralf, W., Dietmar, K. 2006.** 250 W end-pumped Nd:YAG laser with direct pumping into the upper laser level. *Optics Letters*, 31(24): 3618-3619.
- 16- **Mudge, D., Ostermeyer, M., Veitch, P.J., Munch, J., Middlemiss, B., Ottaway, D.J., Hamilton, M.W. 2000.** Power Scalable TEM₀₀ CW Nd:YAG Laser with Thermal Lens Compensation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(4): 643-649.
- 17- **Sulc, J., Jelinkova, H., Kubecek, V., Nejezchleb, K., Blazek, K. 2002.** Comparison of different composite Nd:YAG rods thermal properties under diode pumping. *SPIE* 4630: 128-134.
- 18- **Dong, J., Liu, X.S., Peng, C., Liu, Y.Q., Wang, Z.Y. 2015.** High Power Diode-Side Pumped Q-Switched Nd:YAG Solid-State Laser with a Thermoelectric Cooler. *Applied Sciences*, 5(4): 1837-1845.
- 19- **Jin, C.Q., Jun, P.Q., Bo, Z.H., Dong, Y.X., Yong, B., Jun, G.X., Young, Z., Fu, L.Y., Fu, C.D., Yan, X.Z. 2008.** High Efficient Diode-Side-Pumped Six-Rod Nd:YAG Laser. *Chinese Physics Letters*, 25(11): 3991-3994.
- 20- **Qi, Y., Zhu, X., Lou, Q., Ji, J., Dong, J., Wei, Y. 2005.** Nd:YAG ceramic laser obtained high slope efficiency of 62% in high power applications. *Optics Express*, 13(22): 8725-8729.

21- **Kane, T.J., Eckardt, R.C., Byer, R.L. 1983.** Reduced Thermal Focusing and Birefringence in Zig-Zag Slab Geometry Crystalline Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 19(9): 1351-1354.

22- **Zhu, H.Y., Xu, C.W., Zhang, J., Tang, D.Y., Luo, D.W., Duan, Y.M. 2013.** Highly efficient continuous-wave Nd:YAG ceramic lasers at 946 nm. *Laser Physics Letters*, 10(7): 1-4.

23- <http://directedlight.com/>

24- <http://www.focuslight.com.cn/>

25- **Piprek, J., White, K.J., Springthorpe, J.A. 2002.** What Limits the Maximum Output Power of Long-Wavelength AlGaInAs/InP Laser Diodes. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38(9): 1253-1259.

26- **Farsad, E., Abbasi, S.P., Goodarzi, A., Zabihi, M.S. 2011.** Experimental Parametric Investigation of Temperature Effects on 60W-QCW Diode Laser. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 5(11): 1462-1467.

27- **Yan, Y., Guan, Y., Chen, X., Lu, G.Q. 2013.** Effects of Voids in Sintered Silver Joint on Thermal and Optoelectronic Performances of High Power Laser Diode. *Journal of Electronic Packaging*, 135(4): 1-6.

28- **Piprek, J. 2003.** Semiconductor Optoelectronic Devices. *Academic Press*, California, USA, 279 pp.

29- **Yu, D.L., Tang, D.Y. 2003.** Experimental study of a high-power CW side-pumped Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 35(1): 37-42.

30- <https://www.comsol.com/>

31- **Koike, A., Sugimoto, N. 2006.** Temperature Dependences of Optical Path Length in Inorganic Glasses. *Reports of the Research Laboratory, Asahi Glass Co., Ltd.*, 56(): 1-6.

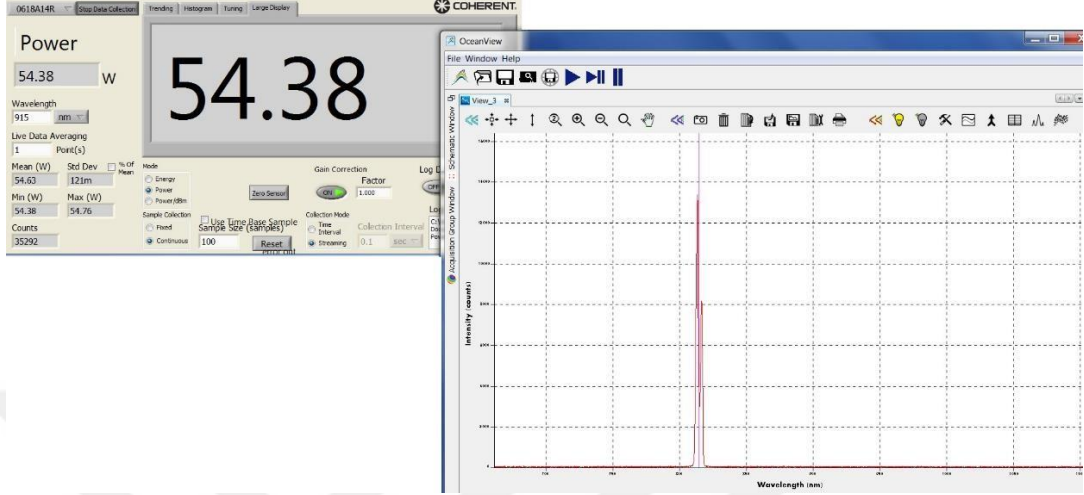
32- <https://www.las-cad.com/>

33- <http://www.altechna.com/>

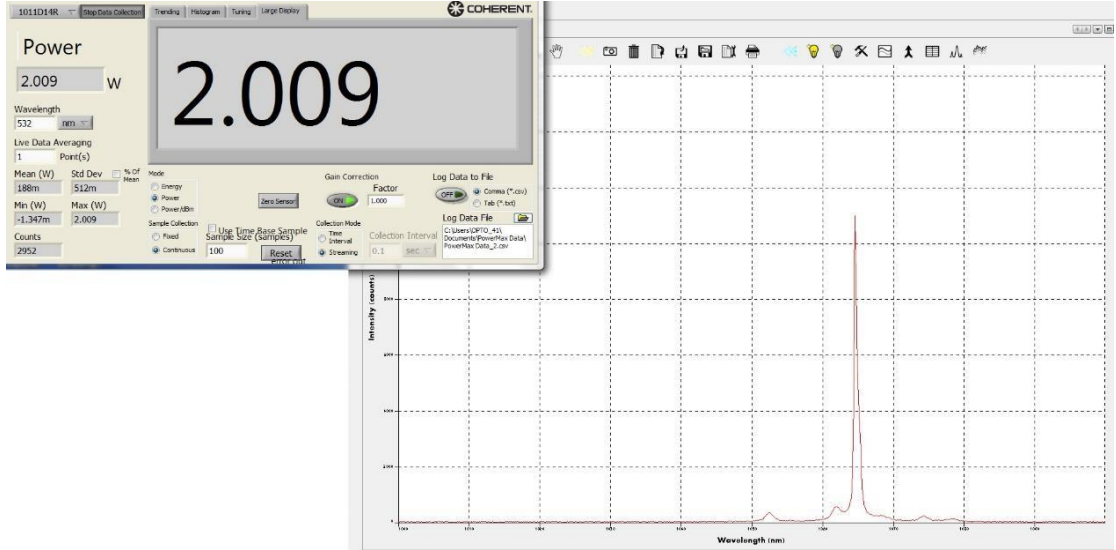
34- **Wang, H., Huang, W., Zhou, Z., Cao, H. 2004.** Experimental study of a high power and high efficiency CW diode side pumped Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 36(1): 69-73.



EKLER



Diyot lazerin 25 °C derecede 52 amper akımdaki optik güç ve dalgaboyu grafiği



Nd:YAG lazerin 30 °C derece 150 w'la pompalamadaki çıkış güç - dalgaboyu grafiği

New Project - LASCAD 3.6.5

File Print Print to File Copy to Clipboard View FEA Laser Power CW Dyn. Multimode Analysis BPM Help

Yeni sayfa açılması Rezonatör türünün seçilmesi

Rezonatör parametrelerinin belirlenmesi

Rezonatör türünün seçilmesi

New Project

Type of Simulation

- Standing Wave Resonator
- Ring Resonator
- External Beam

Number of Face Elements

Wave Length [µm]

Beam quality M_x^2

Beam quality M_y^2

Help OK Cancel

The Unique Combination of Simulation Tools for LASer Cavity Analysis and Design:

- Thermal and Structural FEA
- Gaussian ABCD Algorithm
- Physical Optics Beam Propagation Code

Standing Wave Resonator

Show Additional Items Starting Conditions for Ext. Beam Help

X-Z Plane Mode

Change spacing (3) = 50.00 between (+) 50 %

Adjust Length Adjust Diameter

Rezonatörün optik parametrelerinin girilmesi

Mode only Mode + External Beam External Beam only

Parameter Field Wave Length: 1.06 µm

Help => General x-Plane Parameters y-Plane Parameters Apertures Miscellaneous Spot Sizes

Element Number	0	1	2	3
Element Type	Mirror	I-Face	I-Face	Mirror
Distances [mm]		50	80	50
x-Plane Param.				
Ang. of Incid.[deg]	0.0	0.0	0.0	0.0
Type-Param.[mm]	10000E4	10000E4	10000E4	10000E4
y-Plane Param.				
Refractive Index	1.0	1.823	1.0	1.0
Refr. Param.[1/mm²]	0.0	0.0	0.0	0.0
Gain Param.[1/mm²]	0.0	0.0	0.0	0.0
Apertures				
Miscellaneous				
Spot Sizes				
Type-Param.[mm]	10000E4	10000E4	10000E4	10000E4

Apply

C:\Users\pc\Desktop\COMPAN-1.LCD - LASCAD 3.6.5

File Print Print to File Copy to Clipboard View FEA Laser Power CW Dyn. Multimode Analysis BPM Help

Parameter Input & Start of FEA Code
2D Data Profiles and Parabolic Fit
3D Visualizer

Standing Wave Resonator

Show Additional Items Starting Conditions for Ext. Beam Help

XZ-Plane Mode

Change spacing: (3) = 50.0 between (+) 50 %

Adjust Length Adjust Diameter Mode only Mode + External Beam External Beam only

Parameter Field Wave Length: 1.06 μm

Help >> General x-Plane Parameters y-Plane Parameters Apertures Miscellaneous Spot Sizes

Element Number 0 1

Element Type Mirror I-Face

Distances (mm) 50 80

x-Plane Param	y-Plane Param	Apertures
Ang. of Incid. (deg.)	0.0	0.0
Type-Param. (mm)	10000E4	10000E4
Refractive Index	1.0	1.823
Refr. Param. (1/mm ²)	0.0	0.0
Gain Param. (1/mm ²)	0.0	0.0

Models Pump Light Boundaries Material Param. Doping & Mats. FEA Options

Crystal and pumping configurations

- Single or dual end pumped cylindrical rod
- Cylindrical rod with top hat profile of pump light along z-axis and supergaussian shape perpendicular to z-axis
- Single or dual end pumped slab
- Slab with top hat profile of pump light along z-axis and supergaussian shape perpendicular to z-axis
- Side pumped cylindrical rod
- Side pumped slab including sandwich configurations
- Cylindrical rod with numerical input of pump light distribution
- Slab with numerical input of pump light distribution

Click into the pictures to zoom in or out.
Examples are found in the subdir. EXAMPLES of the LASCAD application dir.
Tutorials are found in the subdir. TUTORIALS of the LASCAD application dir.

Length of rod (along z axis), mm 80.

Diameter of rod, mm 4.

Rezonatörün parametreleri girildikten sonra FEA'dan optik pompalamanın seçilmesi

Kristal şeklinin ve ölçülerinin belirlenmesi

Crystal, Pump Beam, and Material Parameters

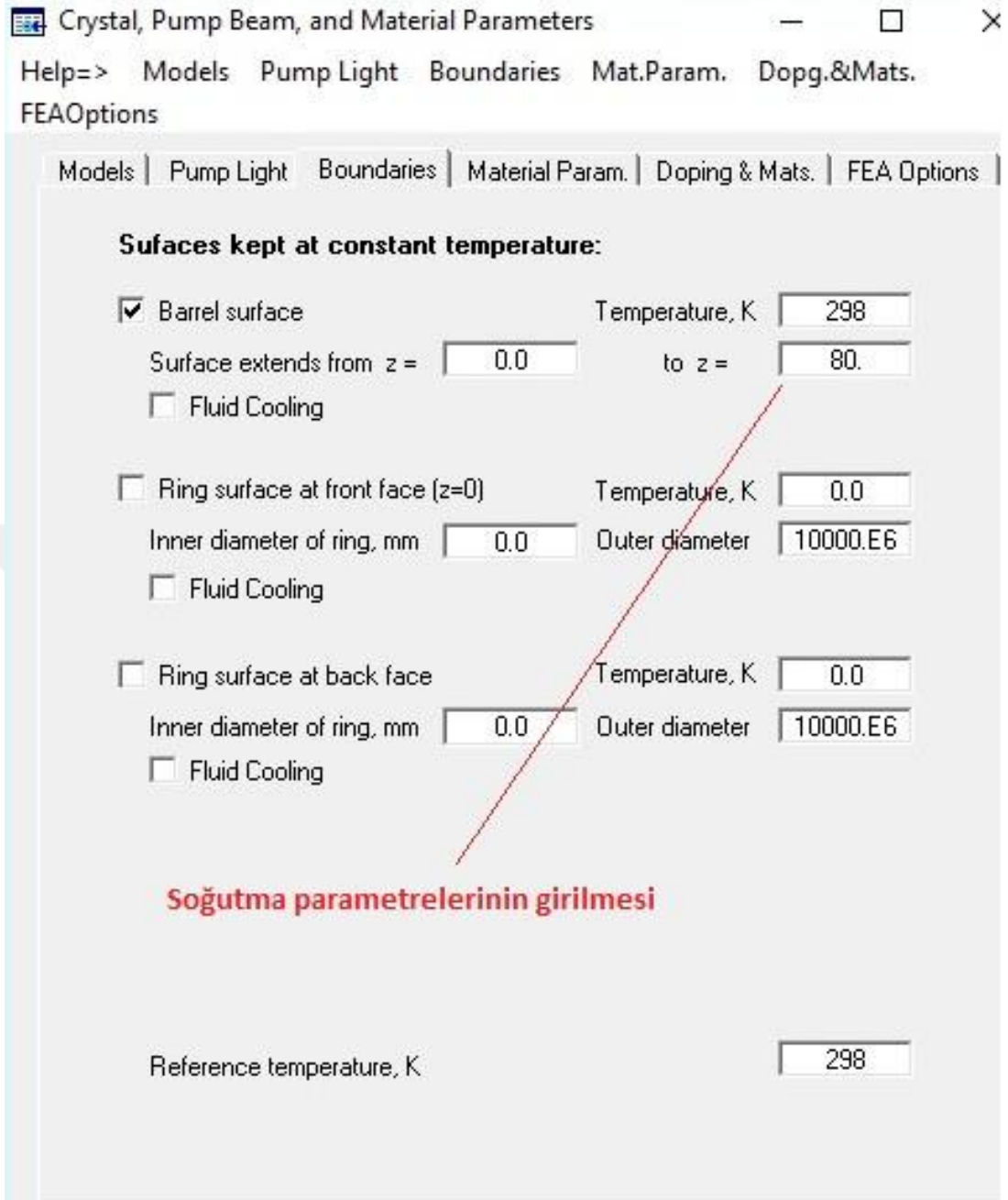
Help=> Models Pump Light Boundaries Mat.Param. Dopg.&Mats. FEAOptions

Models Pump Light Boundaries Material Param. Doping & Mats. FEA Options

Totally incident pump power, W	100.
Inner radius of flow tube	2.001
Outer radius of flow tube	2.002
Radius of cylindrical reflector	2.05
Distance of reflector from crystal axis	2.05
Distance of Diodes from crystal axis	4.
Refractive Index of cooling medium	1.
Refractive Index of flow tube material	1.
Length of diode bars	10.
Number of diode groups along rod axis	3
Number of irradiation directions	2
Angle between irradiation directions, degrees	360.
Fast axis FWHM of diodes, degrees	40.
Wave length of pump light, μm	0.808
Ref. index of crystal at pump wave length	1.823
x-coordinate of pump beam intersection point	0.0

Optik pompalama parametrelerin girilmesi

Show Pump Beam Show Laser Mode Show Pump Profile



Crystal, Pump Beam, and Material Parameters

Help=> Models Pump Light Boundaries Mat.Param. Dopg.&Mats. FEAOptions

Models | Pump Light | Boundaries | **Material Param.** | Doping & Mats. | FEA Options

Material A: Nd:YAG

	x-comp.	y-comp.	z-comp.
Thermal conductivity, W/(mmK):	0.0103	0.0103	0.0103
Coeff. of thermal expansion, 1/K:	6.9E-6	6.9E-6	6.9E-6
Elastic modulus, N/mm ² :	300000.	300000.	300000.
Poisson's ratio (xy yz xz comp.):	0.25	0.25	0.25
Refractive Index	1.823	1.823	1.823
Temp. depend. of refr. ind. dn/dT, 1/K	9.86E-6	9.86E-6	9.86E-6

Absorption Coeff. || 1/mm: 0.35

Heat efficiency factor: 0.3

Kristal parametrelerinin girilmesi

Stimulated emission cross section, mm²: 2.8E-17

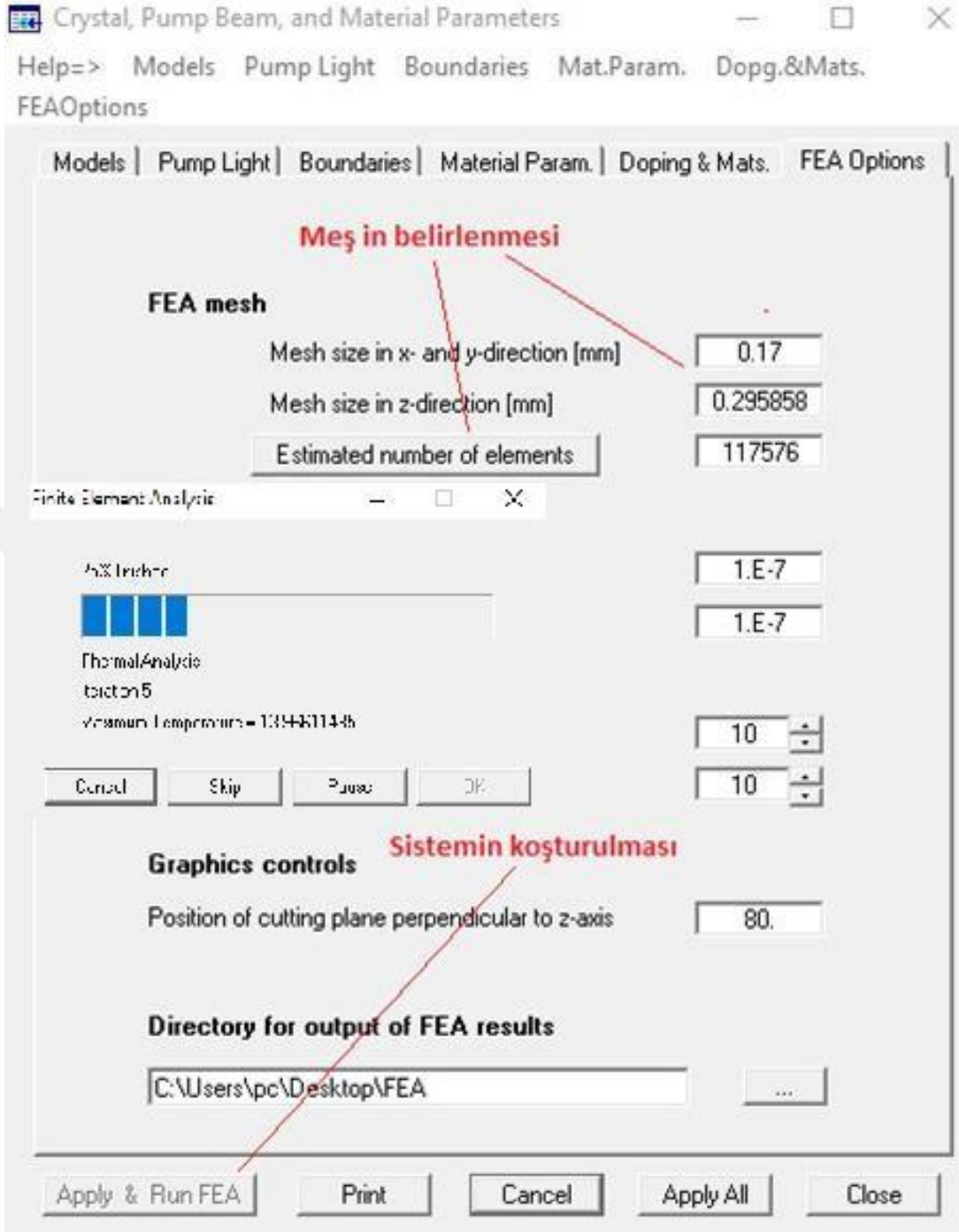
Spontaneous fluorescence lifetime, μs: 230.

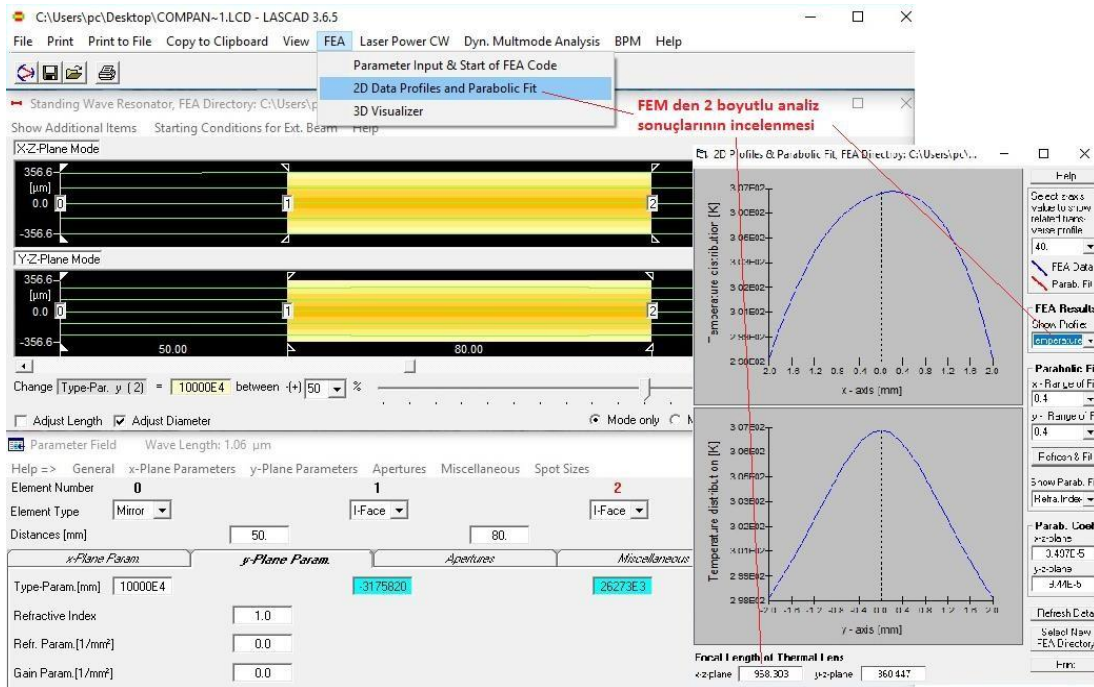
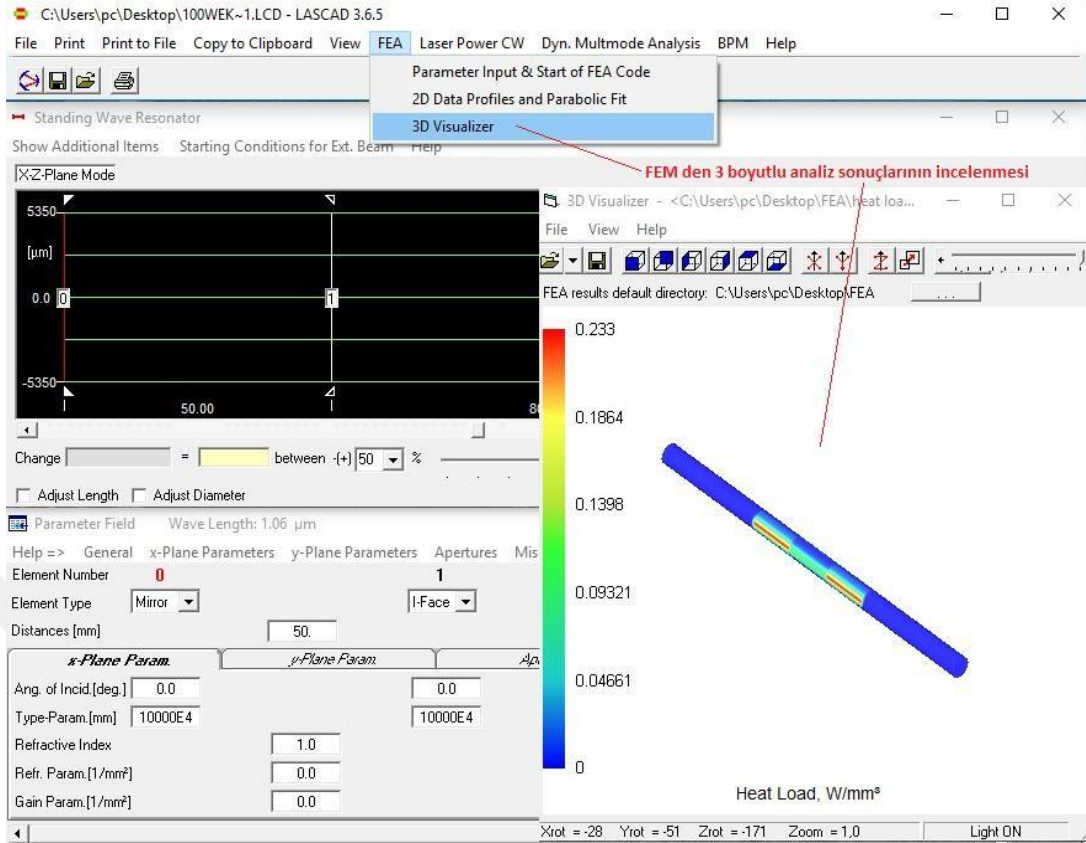
Pump efficiency: 0.8

3-Level-Laser-System

Composite material and temperature dependence of parameters:

- One material with temperature independent parameters
- One material with temperature dependent parameters
- Two materials A and B where material B may be a heat sink material
 - The beam is passing through mat. B
 - Param. of material A temp. depend.





Rezonatör parametrelerinin seçilmesi ve lazer optik güç çıkışı için sistemin koşturulması

Standing Wave Resonator, FEA Directory: C:\Users\pc\Desktop\FEA

Show Additional Items Starting Conditions for Ext. Beam Help

X-Z Plane Mode

Y-Z Plane Mode

Change = [] between +/- 50 %

Adjust Length Adjust Diameter

Parameter Field Wave Length: 1.06 μm

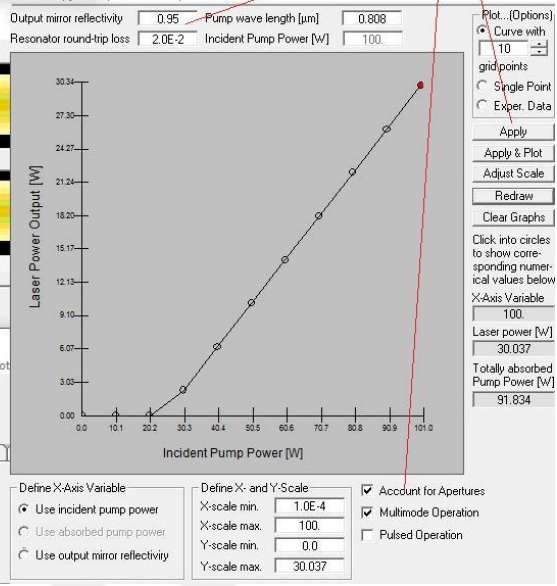
Help => General x-Plane Parameters y-Plane Parameters Apertures Miscellaneous Spot

Element Number 0 1

Element Type Mirror |Face

Distances [mm] 50. 80.

x-Plane Param	y-Plane Param	Apertures
Ang. of Incid [deg]	0.0	0.0
Type-Param [mm]	10000E4	36125E3
Refractive Index	1.0	
Refr. Param [1/mm ²]	0.0	
Gain Param [1/mm ²]	0.0	



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlhan KAHRAMAN

Doğum Yeri ve Tarihi : ÖZBEKİSTAN / 15.03.1985

Yabancı Dili : İngilizce / Rusça

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Nuri Erbak Lisesi / 2000-2004

Lisans : Dumlupınar Üniversitesi / 2006-2010

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi / -

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Ermaksan Makine / 2013 ...

İletişim (e-posta) : kahramanilhan85@gmail.com