



1.5 W laser diode double-end pumped slab geometry Cr: Nd:GSGG laser with thermal analysis and optimized holder design

Yusuf Öztürk^{1,2*}, Muharrem Kılıncı¹, Zekican Ertürk¹, Halime Nur Buzcu¹

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Antalya Bilim University, 07190, Döşemealtı, Antalya, Türkiye

²Antalya Bilim University, Laser Technology Laboratory (ABU LTL), Antalya, Türkiye

Highlights:

- Investigation of heat generation inside the Cr:Nd:GSGG gain medium
- Analyzing of temperature distribution in gain medium
- Performing of a holder design based on the simulation software

Keywords:

- Solid-State Lasers
- Laser Cavity
- Cr:Nd:GSGG
- Heat Generation
- Gaussian Beam
- Gain Medium (Crystal) Holder
- Holder Design

Article Info:

Research Article

Received: 05.01.2022

Accepted: 06.11.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1053971

Acknowledgement:

This study was supported by TUBITAK within the scope of 119E264 and 2209B

Correspondence:

Author: Yusuf Öztürk

e-mail:

yusuf.ozturk@antalya.edu.tr

phone: +90 242 245 0312

Graphical/Tabular Abstract

This manuscript provides a comprehensive analysis of the characteristics of unavoidable thermal effects in solid-state lasers and an end-to-end solution for the heat generated inside the gain medium. After a description of the basic physical mechanisms (Quantum defect, Upconversion, and Thermal Quenching of Fluorescence), Total Heat Generation Coefficient is calculated for suitable holder designed used in the practical operating conditions of a cavity to reduce the thermal effects and to increase lasing efficiency. In particular, simulations that have been performed with a finite-element model is used to theoretically simulate thermal lensing in Cr:Nd:GSGG crystals with pumping scenarios. Figure A shows the z-axis stress distribution for 3 different dimension and overall. The predicted values for thermally induced strengths are compared with experimentally observed previous results. Finally, necessary calculations for the new crystal holder design were made by the help of the simulation modelling for a 1.5 W Gaussian (TEM₀₀) laser diode double-end-pumped slab geometry Cr:Nd:GSGG crystal. The results were discussed deeply, and it is proven that the new holder design for this gain medium is suitable.

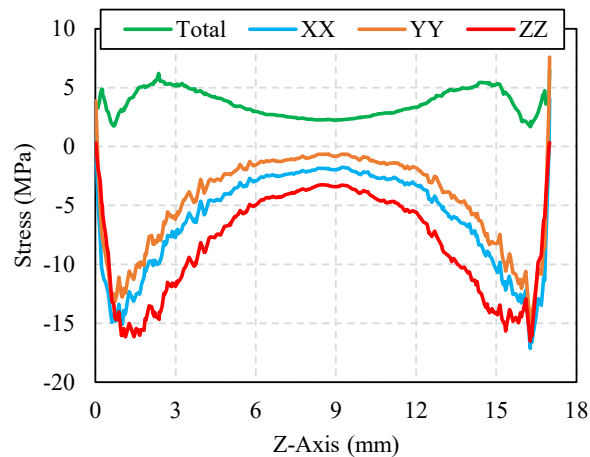


Figure A. z-Axis Stress Results for Cr:Nd:GSGG

Purpose: During the lasing process, heat is generated inside the gain medium that used in laser systems and it affects the lasing efficiency of the laser cavity. By analyzing the heat generation inside the Cr:Nd:GSGG gain medium, a suitable holder was designed for this solid-state laser cavity.

Theory and Methods: In the study, heat generation inside the Cr:Nd:GSGG laser gain medium was explained. Temperature distribution explained by mathematically. With the multiphysics software, theoretical part combined, temperature distribution and thermal stress analyze performed. Holder designed and tested on the multi-physics simulation software.

Results: Designed holder tested on the Multiphysics simulation software with the Cr:Nd:GSGG laser gain medium, and according to the literature maximum thermal stress 33 MPa and the designed results max at some point 15 MPa as depicted in Figure A. The temperature is max 308 K at the 1.5 W double end pump.

Conclusion: In the study, detailed explanation of the heat generation in the gain medium (Cr:Nd:GSGG crystal) is given step by step. Heat distribution formulas are listed in detail for a gaussian (TEM₀₀) double end pumped slab geometry laser system. After design processes and running the multiphysics software the results are obtained from the new holder deign. According to the results designed holder is suitable and can be used with different sized laser crystals.



Termal analiz ve iyileştirilmiş tutucu tasarımı ile 1,5 W lazer diyot çift-uç pompalı levha geometrisine sahip Cr: Nd:GSGG lazer sistemi

Yusuf Öztürk^{1,2*}, Muharrem Kılıncı¹, Zekican Ertürk¹, Halime Nur Buzcu¹

¹Antalya Bilim Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, 07190, Döşemealtı, Antalya, Türkiye

²Antalya Bilim Üniversitesi, Lazer Teknoloji Laboratuvarı (ABU LTL), Antalya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Cr:Nd:GSGG Lazer kristal (kazanç) ortamı içinde ısı oluşum mekanizmaları
- Kristal ortamında sıcaklık dağılım analizi
- Katı-hal lazer sistemleri için tutucu/soğutucu tasarımı ve optimizasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.01.2022

Kabul: 06.11.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1053971

Anahtar Kelimeler:

Katı hal lazerleri, termal-optik etkiler, Cr:Nd:GSGG, ısı üretimi, gauss ışın demeti, kazanç ortamı (kristal) tutucusu, tutucu tasarımı

ÖZ

Bu çalışmada katı-hal lazerlerde önlenemeyen sıcaklık etkileri karakteristiğinin kapsamlı analizi ve kazanç ortamında üretilen ısı için uçtan uca çözüm sunulmaktadır. Isı etkilerinin azaltılarak lazerin verimliliğini artırmak amacıyla temel fiziksel mekanizmalar (Quantum Kusuru, Yukarı Dönüştürme ve Floresan Yaşam Süresinin Termal Sönümlenmesi) açıklanarak kavitenin pratik çalışma koşullarında kullanılabilir olacak uygun bir tutucu tasarımı için Toplam Isı Üretim Katsayısı hesaplanmıştır. Özellikle çeşitli pompalama senaryolarıyla kullanılan Cr:Nd:GSGG kristallerindeki termal lens etkisinin teorik hesaplamalarında sonlu-elemanlar yöntemiyle benzetimler gerçekleştirilmiştir. Öngörülen termal uyarımlı gerilimler daha önce deneysel olarak gözlemlenen değer ile karşılaştırılmıştır. Son aşamada, 1,5 W Gaussian (TEM00) çift uç pompalı levha geometri Cr:Nd:GSGG kristalinin benzetimi yordamıyla yeni tip kristal tutucu tasarımı için gerekli hesaplama yapılmıştır. Sonuçlar derinlemesine tartışılarak bu kazanç ortamı için yeni tutucu tasarımının uygun olduğu gösterilmiştir.

1.5 W laser diode double-end pumped slab geometry Cr: Nd:GSGG laser with thermal analysis and optimized holder design

H I G H L I G H T S

- Investigation of heat generation inside the Cr:Nd:GSGG gain medium
- Analyzing of temperature distribution in gain medium
- Performing of designed holder on simulation software

Article Info

Research Article

Received: 05.01.2022

Accepted: 06.11.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1053971

Keywords:

Solid-state lasers, thermo-optical effects, Cr:Nd:GSGG, heat generation, gaussian beam, gain medium (crystal) holder, holder design

ABSTRACT

This manuscript provides a comprehensive analysis of the characteristics of unavoidable thermal effects in solid-state lasers and an end-to-end solution for the heat generated inside the gain medium. After a description of the basic physical mechanisms (Quantum defect, Upconversion, and Thermal Quenching of Fluorescence), Total Heat Generation Coefficient is calculated for suitable holder designed used in the practical operating conditions of a cavity to reduce the thermal effects and to increase lasing efficiency. In particular, simulations that have been performed with a finite-element model is used to theoretically simulate thermal lensing in Cr:Nd:GSGG crystals with pumping scenarios. The predicted values for thermally induced strengths are compared with experimentally observed previous results. Finally, necessary calculations for the new crystal holder design were made by the help of the simulation modelling for a 1.5 W Gaussian (TEM00) laser diode double-end-pumped slab geometry Cr:Nd:GSGG crystal. The results were discussed deeply, and it is proven that the new holder design for this gain medium is suitable.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *yusuf.ozturk@antalya.edu.tr, muharrem.kilinc@std.antalya.edu.tr, halime.buzcu@std.antalya.edu.tr, zekican.erturk@std.antalya.edu.tr / Tel: +90 242 245 0312

1. Giriş (Introduction)

Lazerler, güncel teknolojik ihtiyaçlara uygun olarak farklı amaçlı uygulamaya ve kullanımlara hizmet eden bir ışık türü olarak değerlendirilmektedir. Lazer en kısa anlatımla uyarılmış ışımın salınması ile ışığın amplifikasyonu olarak tanımlanmaktadır. Lazer ışığı, doğal ışıktan farklı olarak uygulamaların teknik isterlerini karşılayan özellikleri sağlayacak biçimde yapay olarak elde edilmektedir. Lazerin oluşum mekanizması atomik ölçekte foton-madde etkileşim mekanizmalarını kullanmaktadır. Başlıca lazer türleri katı-hal lazerleri, gaz lazerler, yarı-iletken lazerler (lazer diyotlar) ve fiber-optik lazerler olarak sıralanmaktadır [1]. Malzeme ve yapısal özelliklere göre oluşturulan bu sınıflandırmanın dışında çalışma kipleri (sürekli dalga, Q-Anahtarlamalı, vb.), uygulama alanları gibi ilave kategorilere ayrıştırılabilmektedir. Günlük yaşamda lazerlerin yaygın kullanım alanları; lazerle eklemeli (katmanlı) imalat [1], materyal kesim işlemleri [2], dermatolojideki çok farklı işlemler [3], 3B mekan-nesne taraması [4], optik takip sistemleri [5], lazer kaynak prosesleri [6], kalıcı dövme yapımı [7], diş implant uygulamaları [8], petrol sızıntıları [9], taktiksel askeri operasyonlar [10], mukoza lezyon tedavisi [11] ve benzeri uygulama örnekleri görülmektedir. Tarafımızca katı-hal lazerler konusunda doyurulabilir Bragg yansıtıcılar (SBRs) kullanılarak Q-Anahtarlamalı 800 nm dalgaboyu civarında 18-40 KHz tekrar frekansında 1,5-4 µs darbe genişliğinde Cr-LiCAF lazer sistemi [12] ve 850 nm dalgaboyunda Q-Anahtarlamalı Mod-kilitlemeli (QML) Cr:LiCAF lazer sistemi [13] geliştirilmiştir. Birçok alana ve uygulamaya teknolojisine hizmet eden bu tür ışığın araştırılması ve geliştirilmesi üzerine yürütülen çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmanın da temel amacını oluşturan lazer sistemlerinde pompa gücü ihtiyaç kapsamında yüksek değerlerde uygulandığında aygıt veya daha spesifik olarak kazanç malzemesinde ısı artışı ve buna karşılık verimlilikte istenmeyen bir azalma meydana gelmektedir. Bu durumu önlemek için beklendiği üzere lazer kazanç ortamlarının soğutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu soğutma çözümü pratik olarak soğutucu kristal tutucular ve/veya su yordamıyla yapılmaktadır. Soğutma prosesine rağmen kristaldeki sıcaklık artışı nedeniyle verimlilikteki düşüş tam olarak önlenememektedir. Kristallerin kısmen veya tamamen ısınmasını önleyecek kristal tutucuların üretimi daha yüksek güçlerde çalışan ve verimli lazer kaynaklarının gelişimine önemli ölçüde katkı sağlayan yenilikçi bir adım olmaktadır.

Kullanım amacına uygun bir ısı emici kristal tutucu üretmek için öncelikle kristaldeki üretimin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ısının nasıl oluştuğu, gözlemlenen sıcaklık değeri, ısınmanın hangi parametrelere bağlı olduğu, bir soğutucu kristal tutucunun tasarım parametreleri, kristal tutucunun madde özellikleri, kristal tutucu kazanç ortamında soğutma mekanizmasının çalışma prensipleri gibi sorulara yönelik analizler yer almaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde farklı geometrik yapıdaki kristaller için ısı üretiminin ve sıcaklık dağılımı analizlerinin yapıldığı görülmektedir. Levha geometrisinde Nd:YVO4 kazanç ortamı için 4-diyot bar kullanılan deneysel düzenek için termo-mekanik analiz gerçekleştirilmiştir [14]. Aynı Nd:YVO4 kristal kullanılarak çift taraflı pompa ve tek taraflı pompa ile oluşturulan kavitede termo-optik etkiler araştırılmıştır [15]. Benzer bir çalışmada [16] Tm:YAG kazanç ortamı için çift taraflı pompa sistemi ile termal etkiler kolon simetrik olduğu varsayımı altında çok-parçalı bağlı (multi-segment bonded) modelleme yordamıyla incelenmiştir. Cr:LiSAF lazer kazanç ortamı için yapılan bir çalışmada [17] mikro ölçekteki çatlaklar veya üretim hataları ile termal stres etkisi sınırlı biçimde ele alınmıştır. Ümit Demirbaş'ın çalışmasında ince disk geometrisinde Cr:LiSAF ve Cr:LiCAF kazanç ortamlarının üretim kısıtlarının olmadığı durumlarda sürekli dalga durumundaki maksimum güç potansiyelleri ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Bu

çalışmada Cr:Colquiriite lazerlerin termal analizleri için gerekli olan parametreler tanımlanmakta, kazanç ortamının verimi ve sıcaklığın bu durumlara etkisi açıklanmaktadır. Sonuç olarak mevcut 3 W civarında çıkış gücüne sahip bu tipteki lazerlerin hipotetik olarak 15 W çıkış gücü verebileceği gösterilmiştir [18]. Fiber lazer sistemleri için yapılan bir başka çalışmada su ceketini kullanılarak Brinkam numarası temelinde boyutsuz biçimde sıcaklık dağılımının analitik analizi yapılmıştır [19]. Bu çalışmalar arasında başlıca farklılık kullanılan pompa tarzları ile kavite yapıları olarak karşımıza çıkmaktadır. Mevcut araştırmalarda eşzamanlı biçimde kazanç ortamı içinde üretilmiş ısının en aza indirilmesi için su soğutma sistemi ile tutucuların soğutma özellikleri de içeren uçtan uca gerçekçi ilave çalışmaların ortaya konulmadığı görülmektedir. İhtiyaç duyulan mekanik yapılarıdaki geometrik ve malzeme tabanlı tasarım parametreleri kullanılarak farklı konfigürasyonlardaki lazer kazanç ortamlarının fiziksel yapısına etkileri gibi unsurların analizi bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde incelenmektedir. Tasarım aşamasından başlanılarak ısı iletimin en iyilenmiş (optimum) olduğu bir yapıya ulaşılması hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla önerilen ve üretilen yapılar için ortaya konulan teorik analizler dışında çoklu-fizik araçlar yordamıyla modellenerek benzetimler gerçekleştirilmektedir.

Tutucunun ilk tasarımı sonrasında Cr:Nd:GSGG kazanç ortamında tutucunun performansının gerçekçi biçimde analiz edilmesi için literatür verileri tasarıma eklenerek sistem ölçüde analizler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında kayıtlanan veriler kullanılarak lazer pompa gücü ve demet (beam) yapısı gibi parametreler için geliştirilen matematiksel modellemeler benzetim ortamındaki çoklu-fizik aracına işlenmektedir. Bu sayede gerçek deneysel çalışmalara en yakın gerçekçi ön analizler yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Yapılan bu analizler sonucunda Cr:Nd:GSGG kazanç ortamı için sıcaklık farkından dolayı oluşan maksimum termal stres değerinin literatürde belirtilen 33 MPa'dan daha az olduğu tespit edilmiştir. Sistemin veriminin karşılaştırılması amacıyla farklı tasarım konfigürasyonlarının analizlere de bu çalışma kapsamında yer verilmektedir.

Bu çalışmada lazer kazanç ortamı Cr:Nd:GSGG kristalinin mevcut parametrelerinden yararlanılarak kazanç ortamındaki ısı üretiminin nedenleri, kazanç ortamındaki ısı dağılımı, kazanç ortamının ışıma aşamasındaki ısı kayıplarının en aza indirilmesi için tutucu tasarımı ve kazanç ortamının tutucuya bağlı termal stres değerleri incelenecektir. Makale dört bölüme ayrılmıştır. Giriş bölümünde oluşturulan deney düzeneğine ait genel bilgiler yer almaktadır. İkinci bölümde lazer kazanç ortamı olan kristallerin ısınma süreci ve pompa şekline bağlı olarak ısı dağılımının oluşumu incelenmektedir. Bu analizler dikkate alınarak gerçekleştirilen ideal tutucu tasarımına ait bilgiler üçüncü bölümde sunulmaktadır. Son bölümde de elde edilen analiz sonuçları ve değerlendirmeler yer almaktadır.

Şekil 1'de deneysel doğrulama amacıyla kurulan Cr:Nd:GSGG lazer kristali lazer kavitesinin şematik gösterimi ve Şekil 2'de aynı düzeneğe ait fotoğraf yer almaktadır. Sistem çift pompa mimarisinde 658 nm'de 1,5 W çıkış gücü üreten MMD çoklu-kip diyot (multimode diode) tipi lazer diyotlarla beslenmektedir. Lazer diyotundan gelen ışını yönlendirmek için yaklaşık olarak 45° açı ile yerleştirilmiş 2 adet yansıtıcı dielektrik tip ayna kullanılmaktadır. Işının odaklanmasında, odak uzaklığı $f=80$ mm olan küresel mercekler sisteme eklenmiştir. Lazer sisteminde ön görülen kavite ışın bel çapı (waist radius) teğetsel $\sim 86,16$ µm ve sagittal $\sim 44,5$ µm olarak ölçülmüştür.

Sürekli dalga lazer operasyonu için X tipi kavite sistemi; iki adet eğrilik yarıçapı $R=100$ mm olan kavite aynaları (M_1 , M_2), yüksek yansıtımlı (HR) ayna ve optik çıkış kuplörü (OC) kullanılarak

kurulmuştur. Kavite aynalarının yansıtma bant genişliği 900 – 1050 nm dalgaboyu aralığına ve ~99% yansıtma oranı değerine sahiptir. Çıkış kuplörü (aynası) ve yüksek yansıtımlı aynanın uzaklığı 27 cm olarak ayarlanmıştır. Kavite aynalarının lazer kristaline uzaklığı 5 cm olacak şekilde ve açısı astigmatik telafi için yapılan hesaplama sonucunda $2\theta = 26^\circ$ olacak şekilde konumlandırılmıştır. Astigmatik telafi için Eş. 1'deki bağıntı kullanılarak açı değerleri hesaplanmaktadır.

$$2f \sin \theta \tan \theta = Nt \quad (1)$$

Burada f aynanın odak uzaklığı, θ geliş açısı, t kristalin genişliği ve N ise Brewster açısının neden olduğu astigmatizm olarak tanımlanmaktadır. N değeri aşağıdaki Eş. 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$N = \frac{(n^2-1)\sqrt{n^2+1}}{n^4} \quad (2)$$

Burada n kazanç ortamı olarak kullanılan kristalin kırılma indis değerine karşılık gelmektedir.

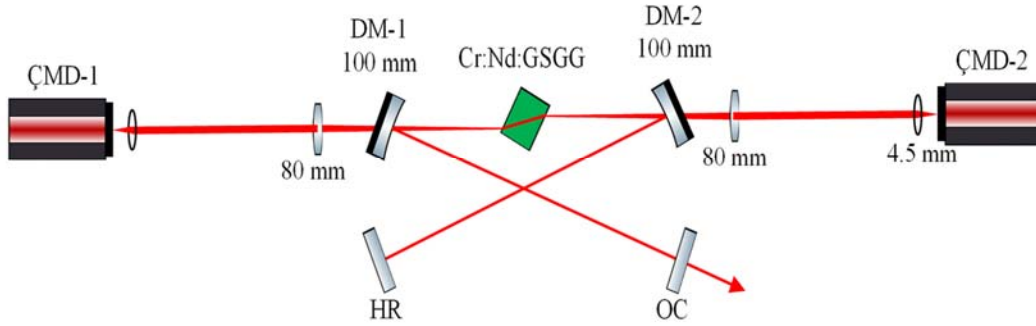
Lazer sisteminin en önemli bileşeni kazanç ortamı/materyali olarak 0,25% Cr (Krom) ve %0,015 Nd (Neodimyum) ile iki farklı element katkı, 17 mm uzunluk 11 mm genişlik ve 3,2 mm yüksekliğe sahip GSGG konak (host) kristali kullanılmaktadır. Kristalin tasarlanan tutucuya konulması evresinde gerekli ısı iletkenlik indium foil malzemesi ile sağlanmaktadır. Kristal, gelen ışının yansımaları azaltmak için Brewster açısıyla yerleştirilmektedir ve kristalin

içindeki ışının izlediği yol 12,36 mm olarak hesaplanmıştır. Deney sırasında kullanılan tutucu sürekli biçimde 15°C sıvı akışı soğutma sistemi ile desteklenmektedir. Sıvı akışını ve ayarlanan sıcaklığın korunmasını sağlamak için katı hal soğutma sistemi olan "Thermo Cube" cihazı kullanılmaktadır.

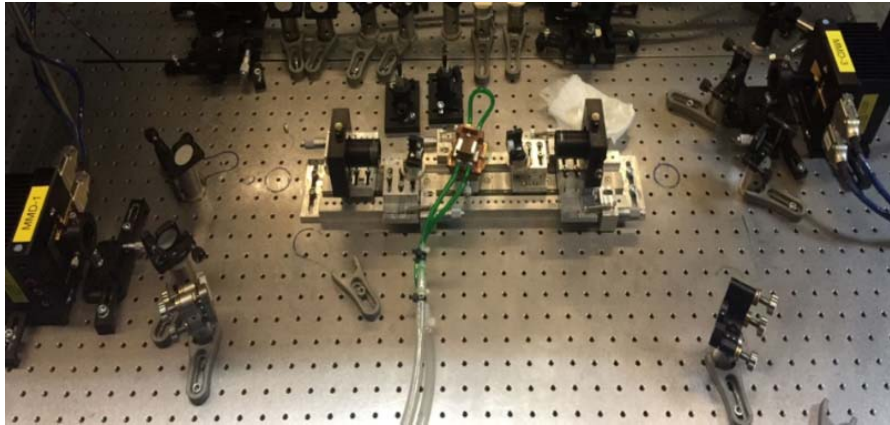
2. Lazerlerde Isı Üretimi İçin Teorik Analiz (Theoretical Analysis for Heat Generation in Lasers)

Geleneksel ekzotermik katı hal lazerlerinde uyarma ve uyarılmış emisyon süreçleri (frekans dönüştürme süreçleri) her zaman lazer ortamına verilen ısı enerjisi ile sonuçlanmaktadır. Lazer sistemindeki bu ısı artışı, lazer işleminin verimini ve çıkış ışın kalitesini düşürmekte, pompa gücünü ve kavite kararlılığını değiştiren termo-optik sapmalara, mercekleme oluşumu ve çift kırılmaya neden olmaktadır. Lazer kazanç ortamında ışınımsal olmayan geçişlere yol açan üç ana mekanizma tanımlanmaktadır: kuantum kusuru (quantum defect), yukarı dönüştürme (upconversion) ve floresan yaşam süresinin termal sönümlenmesi (thermal quenching of fluorescence). Bu ışımsız mekanizmalar, katı hal lazer sistemlerindeki ısı üretim kaynakları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu üç mekanizmanın tümü, bir lazer sisteminde çıkış gücü miktarını sınırlamaktadır [20]. Alt bölümlerde bu mekanizmalar ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

Kuantum Kusuru (Quantum Defect) olgusunda fiziksel lazer sistemlerinde kullanılan 4-Seviyeli Atom Lazer Modeli de dikkate alındığında üst yarı kararlı enerji durumu ile daha düşük yarı kararlı enerji durumu arasında lazerleme, diğer bir ifadeyle ışının (emisyon) meydana gelmektedir. Enerji seviyeleri arasındaki diğer geçişler



Şekil 1. Cr:Nd:GSGG Lazer Kavitesi Şematik Gösterimi (Schematics of Cr:Nd:GSGG laser cavity)



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan Cr:Nd:GSGG lazer düzeneğinin fotoğrafı. (Picture of the Cr:Nd:GSGG laser cavity used in experimental studies.)

sadece fonon oluşumu sağladığından "hızlı bozunum" veya "hızlı ışınımsız bozunum (fast non-radiative decay)" olarak adlandırılır. Örneğin, dört seviyeli lazer sisteminde sadece 2. seviye ile 1. seviye arasındaki lazerleme sonucunda fotonlar oluşmaktadır. Şekil 3'de Şekil 4 seviyeli kazanç ortamının gösterimi görülmektedir.

Hızlı bozunum olarak adlandırılan diğer geçişlerde 3. Seviye (uyarılmış) ile 2. Seviye (üst yarı kararlı) arasında ve 1. Seviye (alt yarı kararlı) ile 0. seviye (temel) arasında titreşim sonucunda ısı diğer bir ifadeyle fonon üretilmektedir. Başka bir anlatımla; kuantum kusuru, pompa dalga boyundaki pompa foton enerjisi ile merkez dalga boyundaki lazer foton enerjisi arasındaki fark nedeniyle ortaya çıkan ısınmaya karşılık gelmektedir. Kuantum kusurunun ısınma üzerindeki etkisinin hesaplanması için Eş. 3 kullanılmaktadır.

$$h_{heat} = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \quad (3)$$

Burada, h_{heat} ısı üretim katsayısı, λ_p pompa dalga boyu ve λ_l lazer dalga boyuna karşılık gelmektedir ve sonraki adımlardaki benzetimlerde bu parametreler kullanılmaktadır [21].

Yukarı Dönüştürme (Upconversion) mekanizmasında; üst yarı kararlı lazer seviyesindeki iki uyarılmış iyon etkileşime girdiğinde ve enerji alışverişinde bulunduğu zaman kazanç ortamında yukarı dönüşüm meydana gelir. Bir iyon, enerjisini komşu bir iyonla aktararak onun

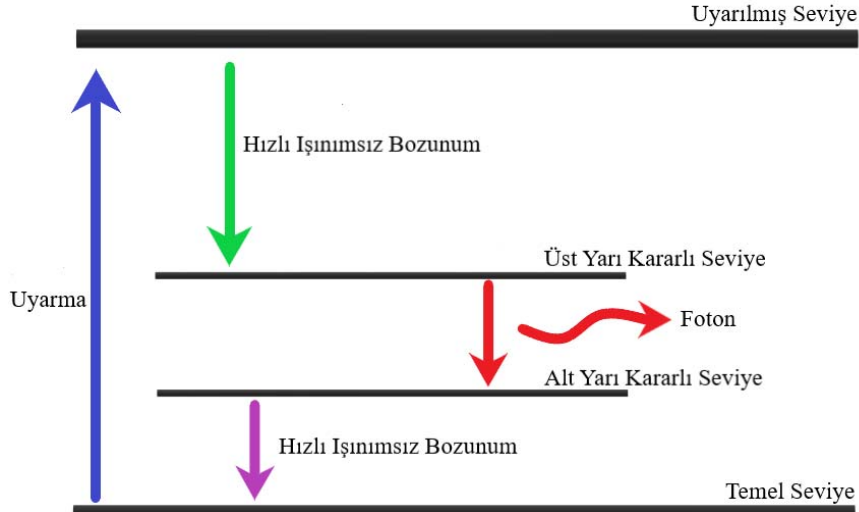
temel enerji seviyesine düşmesine neden olur. Enerji transferi, ikinci iyonu daha yüksekte bulunan uyarılmış bir duruma yükseltir. Isınma, daha yüksekte bulunan uyarılmış durumdaki iyonların ışınımsal olmayan bir şekilde alt lazer seviyesine gerilediğinde meydana gelir. Kuantum kusuru ile üst dönüşümün ısınma üzerindeki etkisinin hesaplanması Eş. 4 ile tanımlanmaktadır [22].

$$h_{heat} = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \left(\frac{s_{em}}{s_{em} + s_{ESA}} (MMF) \right) \quad (4)$$

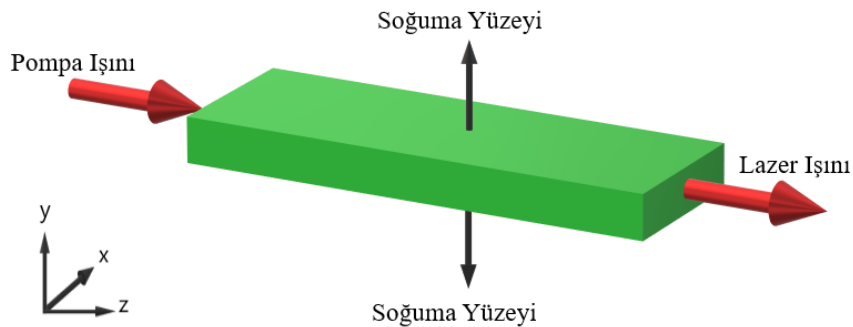
Burada, s_{em} (s_{ESA}) lazer dalga boyunda etkin uyarılmış emisyon (uyarılmış durum soğurma) kesit değeri ve MMF mod eşleştirme faktörüdür.

Floresan Yaşam Süresinin Termal Sönümlenmesi (Thermal Quenching of Fluorescence) analizinde kazanç ortamlarındaki iyonların floresan ömrü, önemli bir sıcaklık bağımlılığı gösterir. Düşük sıcaklıklarda, üst enerji seviyesindeki ömrü, sıcaklığa göre neredeyse sabittir. Kristalin sıcaklığı arttıkça yaşam süresi de hızla düşer. Kuantum kusuru ile floresan yaşam süresinin termal sönümlenmesinin ısınma üzerindeki etkisinin hesaplanması için Eş. 5 verilmiştir [23].

$$h_{heat} = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \left(\frac{\tau_f + \tau_c}{\tau_R + \tau_{sat}} \left(1 + \frac{\tau_c}{\tau_{sat}} \right) \right) \quad (5)$$



Şekil 3. 4-Seviyeli Kazanç Ortamı Atomik Enerji Seviyeleri ve Lazer Gösterimi (4-Level Gain Media Atomic Energy Levels and Laser Representation)



Şekil 4. Cr:Nd:GSGG Kristalinin İllüstrasyonu (Illustration of Cr:Nd:GSGG Crystal)

Burada, τ_f üst lazer seviyesi floresan ömrü, $1/\tau_R$ spontane ışınımsal bozulma hızı, I_{sat} lazer doygunluk şiddeti ve I_c kavite lazer şiddetine karşılık gelmektedir.

Kazanç ortamının ısıtma üzerindeki her üç etkisi de bilindiğinden toplam ısı üretim katsayısı (Total Heat Generation Coefficient) nihai olarak Eş. 6 ile formüle edilebilmektedir [18]. Toplam pompa gücünün kristal içinde ısıya dönüşen miktarı da termal güç yoğunluğunun kristalin toplam hacmi için integral alınarak hesaplanabilmektedir.

$$h_{heat} = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_1} \left(\frac{s_{em}}{s_{em} + s_{ESA}} (MMF) \frac{\tau_f + I_c}{\tau_R + I_{sat}} \right) \quad (6)$$

Nümerik analizlerde ve ölçüm düzeneğinde kazanç ortamı olarak Krom ve Neodimyum katkılı Gadolinyum Skandiyum Galyum Granat (Cr:Nd:GSGG) kristali kullanılmaktadır. Kristal Şekil 4’de gösterilen çift uç pompalı levha geometriye, 17 mm uzunluk, 11 mm genişlik ve 3,2 mm yüksekliğe sahiptir.

Deneysel düzenekte kullanılan değerler ve benzetimlerde ihtiyaç duyulan diğer termal, optik ve mekanik özellikler Tablo 1’de listelenmektedir.

Lazer diyotların farklı konfigürasyonları için çubuk-diyot pompalama, tek diyotlu Gauss pompalama, vb. pompalama teknikleri

kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sisteme Şekil 5’teki konfigürasyonda tek diyotlu pompalama (TEM₀₀) yapılmaktadır. Kazanç ortamı levha geometrisinde olduğundan formüller de levha geometrisiyle uyumlu biçimde yeniden düzenlenmektedir.

Isı dağılımı, kazanç ortamının parametrelerine ve pompalama tarzına bağlıdır. Örneğin, kristalin uzunluğu-genişliği-yüksekliği, kavite ışın bel çapı, kip eşleştirme faktörü vb. Levha geometrilerindeki ısı dağılımı Eş. 7 kullanılarak hesaplanmaktadır [14].

$$Q(x, y, z) = C \exp \left[-\frac{2y^2}{wS^2(z)} - \frac{2x^2}{wT^2(z)} - az \right] \quad (7)$$

Burada, soğurma katsayısı C katsayı sabiti Eş. 8, $wS(z)$ sığital ışın çapı Eş. 9 ve $wT(z)$ tanjantsal ışın çapı Eş. 10 ile hesaplanmaktadır.

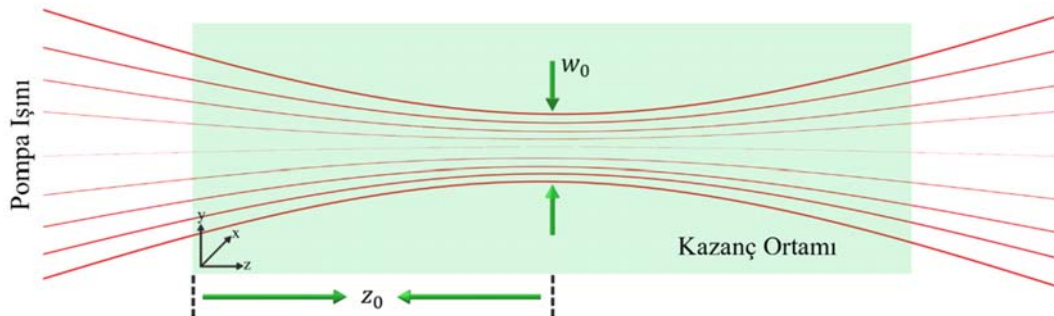
$$C = \frac{\eta_{heat} P_{ab}}{\int_0^L \int_{-M/2}^{M/2} \int_{-K/2}^{K/2} \exp \left(-\frac{2y^2}{wS^2(z)} - \frac{2x^2}{wT^2(z)} - az \right) dx dy dz} \quad (8)$$

Burada, P_{ab} pompa gücü, K, L, M kazanç ortamının derinliği, uzunluğu ve yüksekliği olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışma için kullanılan lazer sistemi ideal bir Gauss dağılımlı ışın ile pompalanmadığından, ışın bel çapı formülü referans makalesinden [30] farklı olarak fiziksel sitemimize uyumlu olarak tarafımızca yeniden düzenlenerek Eş. 9 ve Eş. 10 ile ifade edilmektedir.

Tablo 1. Cr:Nd:GSGG kristalinin özellikleri (Properties of Cr:Nd:GSGG crystal)

Parametre	Sembol	Değer
Pompa Dalga Boyu	λ_p	665 nm [22]
Lazer Dalga Boyu	λ_1	1064 nm [23]
Soğurma Katsayısı	a	256 m ⁻¹ [24]
Özısı	C_p	402,9 J/(kgK) [24]
Yoğunluk	ρ	6495 kg/m ³ [24]
Termal İletkenlik Katsayısı	K	6,02 W/(mK) [24]
Derinlik	K	11 mm
Uzunluk	L	17 mm
Yükseklik	M	3,2 mm
Mod Eşleştirme Faktörü	MMF	10
Kırılma İndisi	n	1,9424 [25]
Kavite Işın Bel Çapı (Tanjantsal)	wT_0	86,16 um
Kavite Işın Bel Çapı (Sığital)	wS_0	44,5 um
Kavite Işın Belinde Z-ekseni Değeri (Rayleigh Range)	z_0	8,5 mm
Sol Taraftan Toplam Emilen Pompa Gücü	$P_{ab, left}$	1,5 W
Sağ Taraftan Toplam Emilen Pompa Gücü	$P_{ab, right}$	1,5 W
Young’ın Modülü	E	210 GPa [26]
Poisson Oranı	ν	0,28 [26]
Termal Genleşme Katsayısı	A	7,5e-6 1/K [26]
Gerilme Direnci	TenS	33 094 835 Pa [27]



Şekil 5. Levha geometrisinde ışının Gauss dağılımı (Gaussian distribution of radiation in slab geometry)

$$wS(z) = wS_0 \sqrt{1 + \left[\frac{M^2 \lambda_p (z-z_0)}{n\pi w S_0^2} \right]^2} \quad (9)$$

$$wT(z) = wT_0 \sqrt{1 + \left[\frac{M^2 \lambda_p (z-z_0)}{n\pi w T_0^2} \right]^2} \quad (10)$$

Burada, wS_0 sagittal ışın bel çapı, wT_0 tanjansal ışın bel çapı, M^2 beam kalite faktörü, z_0 kavite ışın belinde z-ekseni değeri ve n merkez dalga boyunda kazanç ortamının kırılma indisine karşılık gelmektedir.

3. Tutucu Tasarımı (Holder Design)

Önceki bölümlerde açıklandığı üzere katı hal lazerler geleneksel biçimde ekzotermiktir. Bu durumda, verimi düşüren ekzotermik etkileri en aza indirmek için lazer kazanç ortamlarının soğutulması kritik öneme sahiptir. Kristalin yerleştirildiği tutucu da soğutma sürecindeki ana mekanizmalardan birine karşılık gelmektedir. Tutucu malzemenin termal iletkenlik katsayısı tasarımda kullanılan belirleyici parametrelerden biri olmaktadır. Bu kapsamda, farklı maddelerin termal iletkenlik katsayıları Tablo 2’de sunulmaktadır. Bakır, fiziksel/ısısal özellikler, fiyat avantajı ve sarfiyatından dolayı ısı transfer alanında günümüzde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir.

Tablo 2. Farklı maddelerin termal iletkenlik katsayıları [31].
(Thermal conductivity coefficients of different materials.)

Materyal	Termal İletkenlik Katsayısı k [W/m°C]
Gümüş	410
Bakır	385
Alüminyum	202
Nikel	93
Demir	73
Karbon Çelik, 1% C	43
Kurşun	35
Krom-Nikel Çelik (18% Cr, 8% Ni)	16,3

Lazer kristal tutucusunun tasarımının temel ilkesi, lazer kristali üzerinde pompalama işlemi ile üretilen ısının sistemden dışarı atılmasını sağlamaktır. Isı, iki sistem (veya bir sistem ile çevresi) arasında bir sıcaklık farkı nedeniyle aktarılan enerji formu olarak tanımlanmaktadır [31]. Isı aktarımı iletim, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bir sıcaklık farkının varlığı, tüm farklı ısı transferi yolları için gereklidir ve üç farklı transfer için de yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklık ortamına doğrudur. İletim yoluyla ısı transferi, parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin bir maddenin daha enerjik parçacıklarından

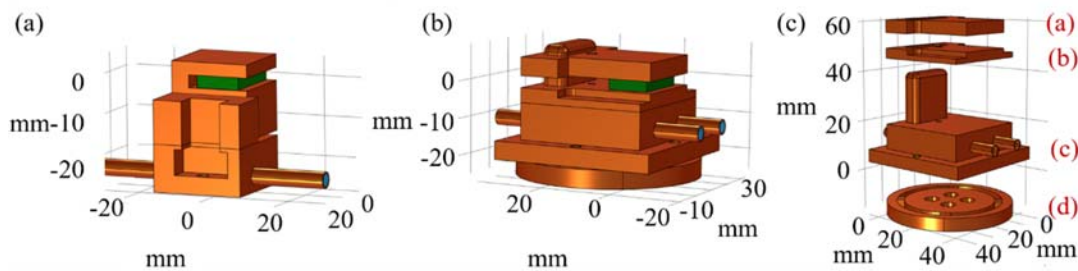
yanındaki daha az enerjili olanlara aktarılmasıdır [32]. İletim ısı transferi katılarda moleküler titreşim, sıvı ve gazların rastgele hareketleri sırasında moleküler difüzyon ve çarpışma yoluyla meydana gelmektedir. Konveksiyon, bir katı yüzey ile hareket halindeki bitişik sıvı veya gaz arasındaki enerji aktarım biçimi olarak tanımlanmakta ve iletim ile sıvı hareketinin birleşik etkilerini içermektedir. Radyasyon ısı transferine atom veya moleküllerin elektronik dizilimlerdeki değişimlerden kaynaklı elektromanyetik dalgalar veya fotonlar neden olmaktadır [33]. Daha iyi bir soğutma işlemi elde etmek için tutucu tasarım sürecinde sıvı akışı da verim artırıcı ilave bir mekanizma olarak kullanılmaktadır.

Şekil 6’a da laboratuvarımızda daha önce kullanılmakta olan referans tasarım gösterilmektedir. Mevcut bu yapıda, su akış kısmının tutucuda ortalanmaması ve bundan dolayı kazanç ortamına yakın tarafta daha fazla soğutmaya neden olması gibi bazı dezavantajlar söz konusudur. Bu durumda termal stres etkisi daha etkili hale gelmektedir. Ayrıca, bu tür tutucular kazanç ortamının (kristal) yerleştirildiği boş alanın yüksekliği değiştirilemediğinden her kazanç ortamı için farklı boyutlarda olmak zorundadır. Diğer bir dezavantajı ise son kullanıcının optik düzenek ve kavite ayarlamaları aşamalarında sınırlı hareket kabiliyetine sahip olmasıdır. Bu dezavantajın bir sonucu olarak, kullanıcının Brewster açısını (yansıma kayıplarını azaltmak için en iyi açı) ayarlaması ekstra çaba gerektirmektedir.

Şekil 6’da dikdörtgen prizma biçimindeki lazer kristalleri için gösterimi yapılan ve bu çalışma kapsamında özgün olarak tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen yeni tip soğutucuda; kristalin konumuna göre su akışı çift taraflıdır ve kristal merkezde bulunmaktadır. Bu değişim sayesinde kristalin uzak kenarları arasındaki soğutma aşamasında ortaya çıkan sıcaklık farkı olabildiğince azaltılarak termal stres etkisi bu yöntemle en aza indirilmiş olmaktadır. Şekil 6c’deki genişletilmiş görünümde “a” ve “b” parçaları farklı yükseklikteki kristallerle çalışmaya olanak sağlayan ayarlanabilir kısımlara karşılık gelmektedir. Planlandığı gibi “c” ve “d” kısımları da tüm tutucularda yer alan ortak kısımlardır. Kazanç ortamının şekline ve boyutuna göre “a” ve “b” kısmı değişebilir. Ayrıca “d” parçasının kazanç ortamı için 360 ° dönme kabiliyeti sağlaması tasarımın bir diğer önemli özelliğidir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Tasarlanan ve referans alınan tutucu konfigürasyonları için sonlu elemanlar modellemesi alt yapısında 2. bölümde sunulan eşitlikler kullanılarak hesaplanan Kelvin cinsinden genel sıcaklık dağılımları Şekil 7a, Şekil 7b ve Şekil 7c’de tutucu yüzeyleri sonuçları olarak gösterilmiştir. Tutucu tasarımı- 1’in sonucu, kristal üzerindeki maksimum sıcaklığın yaklaşık 308 K olduğunu gösterir; su soğutmasız tutucu tasarımı- 2 için yaklaşık 352 K; su soğutmalı tutucu tasarımı için yaklaşık 306 K’dır. Bu durumda, sonuçların genel



Şekil 6. ABU-LTL’de önceden kullanılan Tutucu Tasarımı 1 (a), çalışma kapsamında yeni tasarlanan Tutucu Tasarımı 2 (b) ve Tutucu Tasarımı 2’nin genişletilmiş görünümü.

(Previously used in ABU-LTL Holder Design 1 (a), newly designed Holder Design 2 (b) as part of the study and extended view of Holder Design 2.)

izlenimi, su soğutmalı tutucu tasarımı- 2'nin kazanç ortamı için daha iyi soğutma sağladığını ve su akışı olmayan tutucu tasarımı- 2 ile karşılaştırıldığında, su akışının tutucunun soğutma yeteneği üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça gözlemlenebilir.

Çalışmada kullanılan tutucular için Kelvin cinsinden genel izotermal kontur sıcaklık dağılımları Şekil 8a, Şekil 8b ve Şekil 8c'de aynı sıralamayla gösterilmektedir. Şekillerde Gauss ışın dağılımı açıkça görülebilir, ışın demeti beli kristalin kenarlarından kristalin ortasına doğru çift uçlu pompalanan lazer sistemleri için beklendiği gibi azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 8a ve Şekil 8c'de yer alan ısı dağılımları yordamıyla da su akışı etkisi açıkça belirlenebilmektedir.

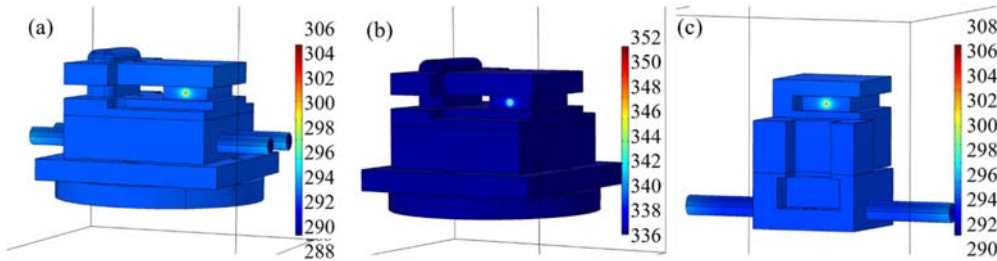
Kelvin cinsinden üç tutucu tasarımı için sıcaklığın "x" eksenine göre ($y=0$ ve $z=0$) dağılım grafikleri Şekil 9a'da gösterilmektedir. Benzer biçimde sıcaklığın "z" eksenine göre ($x=0$ ve $y=0$) dağılım grafikleri Şekil 9b'de, "y" eksenine göre ($x=0$ ve $z=0$) dağılım grafikleri Şekil 9c'de sunulmaktadır. Sıcaklık dağılımı karakteristiği beklendiği gibi Gauss ışın karakteristiği nedeniyle kazanç ortamının arkasına doğru azalmaktadır. Maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık arasındaki fark, su akışlı tutucu tasarımı-2 için 14 K, su akışsız tutucu tasarımı-2 için 18 K ve su akışlı tutucu tasarımı-1 için 16 K'dir. Bu sıcaklık farkları arttıkça termal stresin formülüne göre daha büyük termal strese neden olmaktadır. Bu nedenle, her üç tutucu tasarımı karşılaştırıldığında, su akışlı tutucu tasarımı-2 daha az termal strese neden olmakta ve soğutucu seçim kriterleri dikkate alındığında daha uygun olduğu anlamına gelmektedir.

Pascal cinsinden Genel Hacimsel Toplam Von Mises Stres Dağılımı Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c'de gösterilmiştir. Kristalin Von Mises Stresinin renk haritalarına göre, su akışına sahip tutucu tasarımı-2, kazanç ortamı için daha iyi bir stres dağılımı karakteristiği sağlamaktadır. Bu iyileştirme termal genişleme katsayısı tarafından indüklenen termal stres probleminin özellikle lazer sistemlerinin uç

rejimlerde pompalandığı güç ölçekleme çalışmalarında ilgili kazanç ortamı kristalinin dayanabileceği limitlerin belirlenmesinde büyük bir öneme sahiptir. Eğim verimliliği dışında kalan istenmeyen termal kayıpları azaltmanın bir diğer yöntemi düşük katkılama oranına sahip kazanç ortamlarının kullanımı olsa da bu durumda soğurma/emisyon dengesinin korunması gerekmektedir.

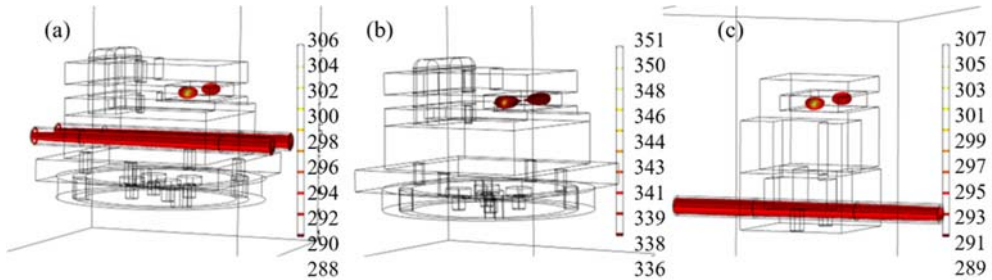
MPa cinsinden, X eksenine göre stres grafiği için stres grafikleri $y=0$, $z=0$ iken; Y eksenine göre stres grafiği $x=0$, $z=1$ mm iken; Z eksenine göre stres grafiği $x=0$, $y=0$ iken; z eksenine göre stres grafiği $x=0$, $y=$ genişlik/2 (kristalin yüzeyi) su akışlı tutucu tasarımı- 2, su akışsız tutucu tasarımı-2 ve su akışlı tutucu tasarımı- 1 için sırasıyla Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'de ardışık biçimde sunulmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi özellikle güç ölçekleme çalışmalarında kazanç ortam kristalinin zarar görmemesi için yeni tip tutucu ile başarılı stresin azaltılması iyileştirmesi önemli bir katkı olarak değerlendirilmektedir.

Stres grafiklerine göre üç tutucu karşılaştırıldığında, su soğutmalı yeni tutucu tasarımında en düşük stres değerlerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, literatüre göre, Cr:Nd:GSGG kristalinin herhangi bir kırılma (gerilme mukavemeti) olmadan dayanabileceği maksimum termal stres 33.094.835 Pa olarak belirlenmektedir. Su akışlı tutucu tasarımı-2, Cr:Nd:GSGG kazanç ortamının maksimum gerilme mukavemetinden daha az olan stres değerlerinde işlevsellik sağlanmaktadır. Benzer biçimde, su akışlı tutucu tasarımı-1, Cr:Nd:GSGG kazanç ortamının maksimum gerilme mukavemetinden daha az olan stres değerlerine sahip olduğu, ancak su akışsız tutucu tasarımı- 2, Cr:Nd:GSGG kazanç ortamının maksimum gerilme mukavemetinden daha fazla olan strese maruz kaldığı hesaplanmaktadır. Nümerik hesaplamalar sonucunda su akışlı tutucu tasarımı-2 ve su akışlı tutucu tasarımı-1 aygıtlarının Cr:Nd:GSGG kristali için uygun tasarımlar olduğu açıkça ortaya konulmaktadır. Su akışsız tutucu tasarımı- 2, tutucudan beklenen termal stres değerlerini aştığı için yeterli bulunmamaktadır.



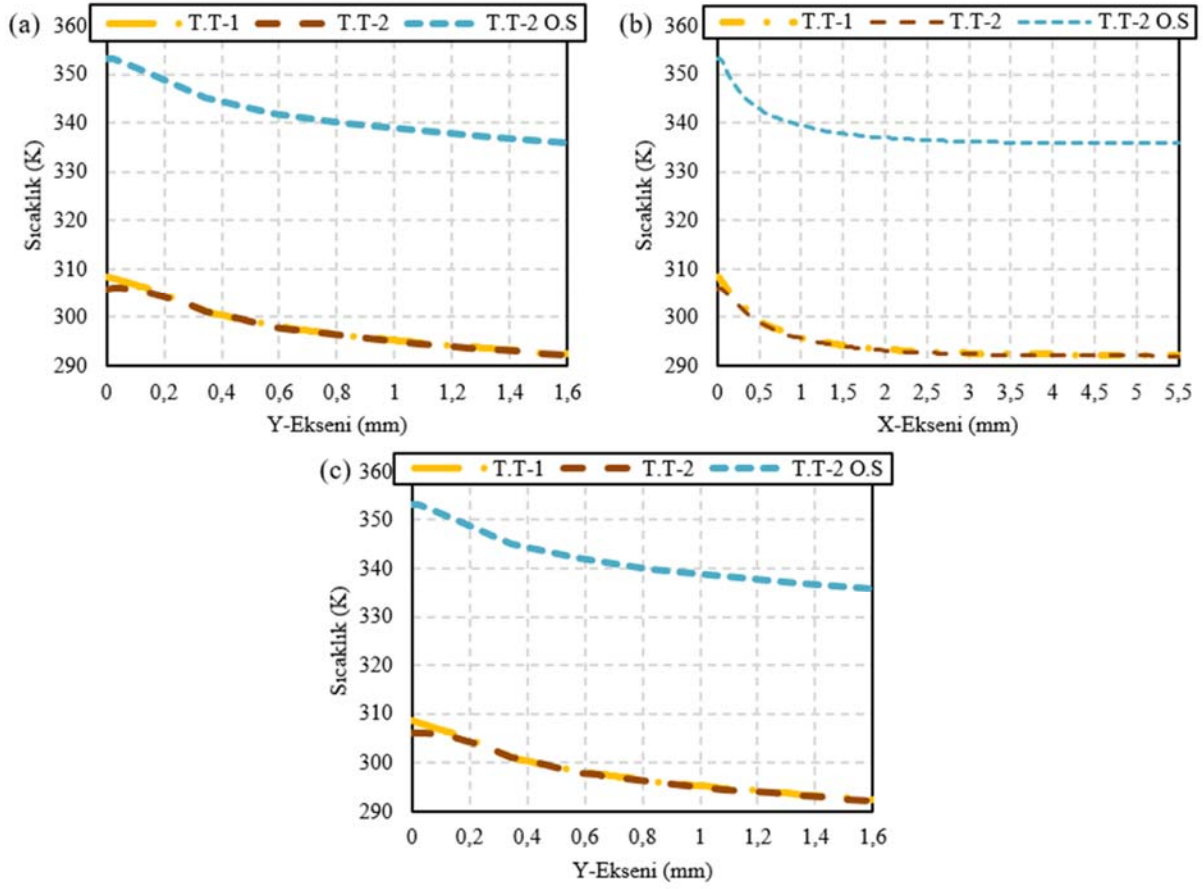
Şekil 7. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kelvin Cinsinden Genel Sıcaklık Dağılımlar: Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışı ile (a), Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışsız (b) ve Tutucu Tasarımı- 1 Su Akışı ile (c).

(General Temperature Distributions in Kelvin at Equilibrium Position at which Heat Exchange Ends: Holder Design - 2 with Water Flows (a), Holder Design - 2 without Water Flow (b) and Holder Design - 1 with Water Flow (c).)

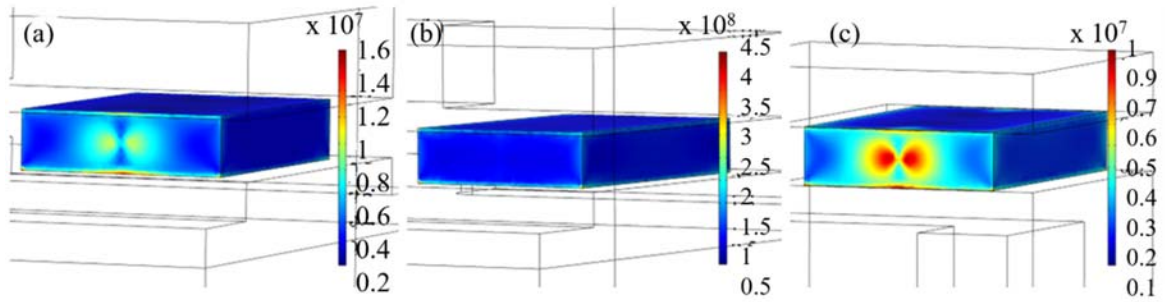


Şekil 8. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kristal Üzerinde Kelvin Cinsinden Genel İzotermal Kontur Sıcaklık Dağılımları: Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışı ile (a), Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışsız (b) ve Tutucu Tasarımı- 1 Su Akışı ile (c).

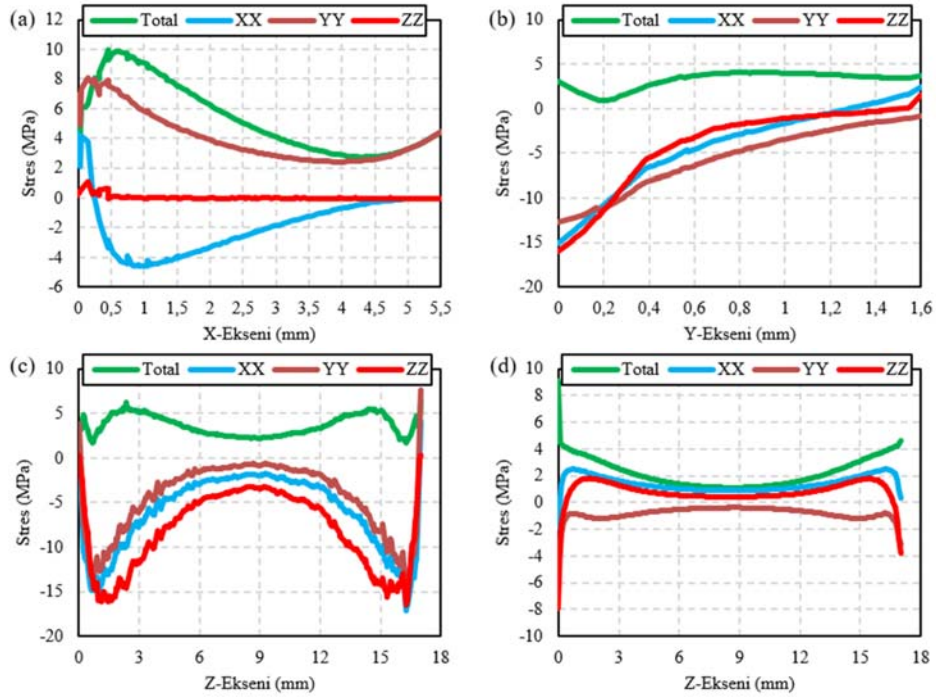
(General Isothermal Contour Temperature Distributions in Kelvin on the Crystal at Equilibrium Position at which Heat Exchange Ends: Holder Design - 2 with Water Flows (a), Holder Design - 2 without Water Flow (b) and Holder Design - 1 with Water Flow (c))



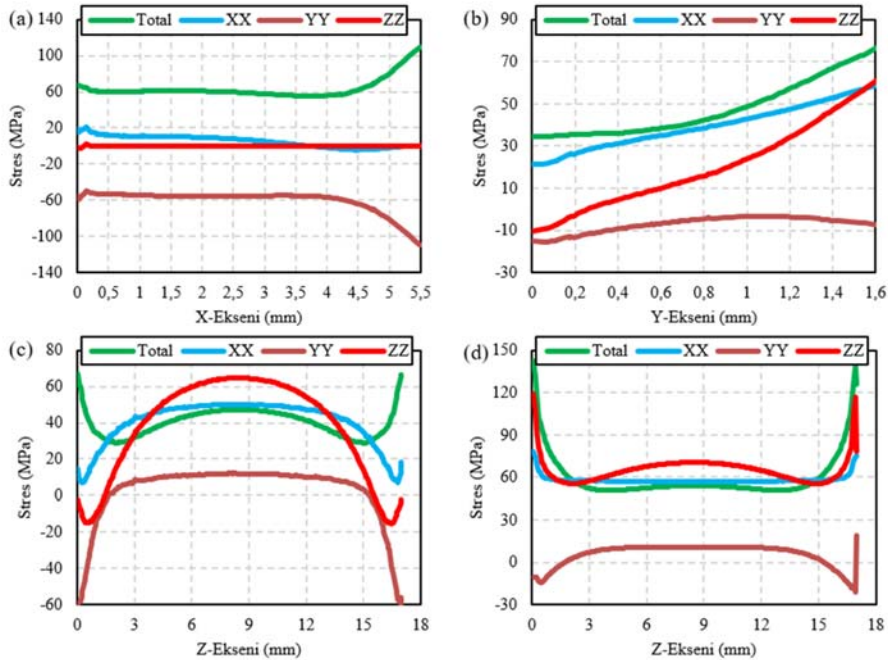
Şekil 9. X-Eksenine Göre ($y=0, z=0$) Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kristal Üzerinde Kelvin Cinsinden Sıcaklık Dağılımı Grafiği; Tutucu Tasarımı- 2 ve Su Akışı ile, Tutucu Tasarımı- 2 ve Su Akışı olmadan, Tutucu Tasarımı- 1 ve Su Akışı ile, (a) X-Eksenine Göre ($x=0, y=0$), (b) Y-Eksenine Göre ($x=0, z=0$), (c) Z-Eksenine Göre ($x=0, y=0$).
 (Graph of Temperature Distribution in Kelvin on Crystal at Equilibrium Position at which Heat Exchange Ends According to X-Axis ($y=0, z=0$); With Holder Design- 2 and Water Flow, With Holder Design- 2 and without Water Flow, With Holder Design- 1 and Water Flow, (a) By X-Axis ($x=0, y=0$), (b) To Y-Axis ($x=0, z=0$), (c) According to Z-Axis ($x=0, y=0$)).



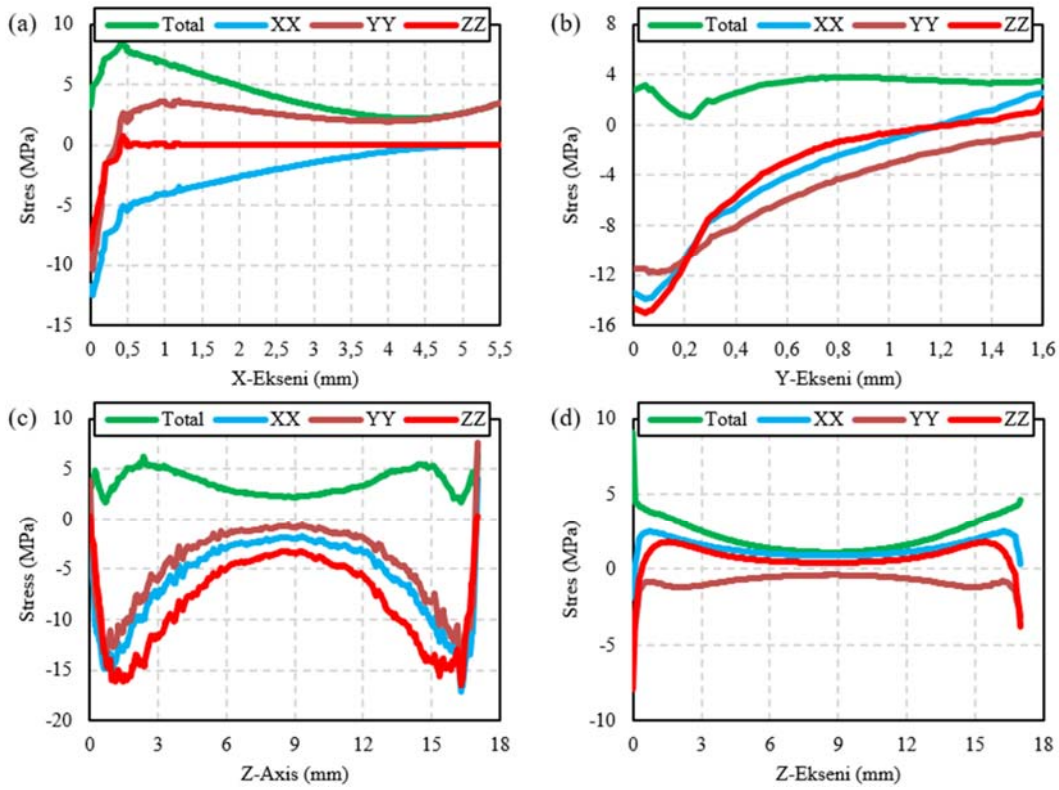
Şekil 10. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kristal Üzerinde Pascal Cinsinden Genel Hacimsel Toplam Von Mises Stres Dağılımları: Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışı ile (a), Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışsız (b) ve Tutucu Tasarımı- 1 Su Akışı ile (c).
 (General Volumetric Total Von Mises Stress Distributions in Pascal on the Crystal at Equilibrium Position at which Heat Exchange Ends: Holder Design - 2 with Water Flows (a), Holder Design - 2 without Water Flow (b) and Holder Design - 1 with Water Flow (c))



Şekil 11. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda, MPa Cinsinden Tutucu Tasarımı- 2 İçin Kristal Üzerindeki Stres Dağılımı. a) $y=0, z=0$ İken X Eksenine Göre Stres Grafiği; b) $x=0, z=1\text{mm}$ İken Y Eksenine Göre Stres Grafiği; c) $x=0, y=0$ İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği; d) $x=0, y= \text{Genişlik}/2$ İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği (Su Akışı ile).
(Stress distribution on the crystal for Holder Design-2 in MPa at Equilibrium Position at End of Heat Exchange. a) Stress Graph According to X Axis When $y=0, z=0$; b) Stress Graph According to Y Axis When $x=0, z=1\text{mm}$; c) Stress Graph According to Z Axis When $x=0, y=0$; d) Stress Graph According to Z Axis (with Water Flow) When $x=0, y= \text{Width}/2$)



Şekil 12. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda, MPa Cinsinden Tutucu Tasarımı- 2 İçin Kristal Üzerindeki Stres Dağılımı. a) $y=0, z=0$ İken X Eksenine Göre Stres Grafiği; b) $x=0, z=1\text{mm}$ İken Y Eksenine Göre Stres Grafiği; c) $x=0, y=0$ İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği; d) $x=0, y= \text{Genişlik}/2$ İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği (Su Akışı Olmadan).
(Stress Distribution on the Crystal for Holder Design-2 in MPa at Equilibrium Position at which Heat Exchange is Ended. a) Stress Graph According to X Axis When $y=0, z=0$; b) Stress Graph According to Y Axis When $x=0, z=1\text{mm}$; c) Stress Graph According to Z Axis When $x=0, y=0$; d) Stress Graph According to Z Axis (Without Water Flow) When $x=0, y= \text{Width}/2$)



Şekil 13. Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda, MPa Cinsinden Tutucu Tasarımı- 1 İçin Kristal Üzerindeki Stres Dağılımı. a) $y=0, z=0$ İken X Eksenine Göre Stres Grafiği; b) $x=0, z=1\text{mm}$ İken Y Eksenine Göre Stres Grafiği; c) $x=0, y=0$ İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği; d) $x=0, y=$ Genişlik/2 İken Z Eksenine Göre Stres Grafiği (Su Akışı ile).

(Stress Distribution on the Crystal for Holder Design-1 in MPa at Equilibrium Position at which Heat Exchange is Ended. a) Stress Graph According to X Axis When $y=0, z=0$; b) Stress Graph According to Y Axis When $x=0, z=1\text{mm}$; c) Stress Graph According to Z Axis When $x=0, y=0$; d) Stress Graph According to Z Axis (with Water Flow) When $x=0, y=$ Width/2)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Cr:Nd:GSGG kristali ile geliştirilen katı-hal tipi lazer sisteminde kazanç ortamı ısı üretim mekanizmaları için ortaya konan yöntem ayrıntılı biçimde açıklamaktadır. Bu sistemlerdeki tutucu tasarımında kullanılan özellikler Cr:Nd:GSGG kristali için bir tabloda verilmiştir. Gauss (TEM₀₀) çift uçlu pompalı levha geometrisi lazer sistemindeki ısı dağılımı formülleri ayrıntılı olarak listelenerek bir tutucu tasarımı için kilit noktalar belirtilmiş ve yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Teorik hesaplamalar ve çoklu fizik programı benzetimleri sonuçları kullanılarak “su akışlı tutucu tasarımı- 2” tasarlanmış ve üretimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiklerde gösterilmiş ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Su akışlı tutucu tasarımı- 2'nin kazanç ortamından ölçülen maksimum sıcaklık değeri Cr:Nd:GSGG kristali için uygun çalışma sıcaklığı olan yaklaşık 306 K olarak tespit edilmiştir. Sıcaklık dağılımı için grafikler ayrıntılı olarak verilerek kazanç ortamındaki maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık arasındaki fark yaklaşık 14 K olduğu gösterilmiştir. Hesaplanan sıcaklık farkı değerinin, kazanç ortamının termal stresini dikkate alındığında Cr:Nd:GSGG kristali için uygun olduğu ortaya konulmuştur. Cr:Nd:GSGG kristalinin herhangi bir kırılma (gerilme mukavemeti) olmadan dayanabileceği maksimum termal stres 33.094.835 Pa olduğundan su akışlı tutucu tasarımı-2 için Termal stres dağılımı grafiklerinde bu değerin aşılmadığı doğrulanmıştır.

Teşekkür (Acknowledgment)

Projenin tüm aşamalarındaki katkılarından ötürü Antalya Bilim Üniversitesi- Lazer Teknolojisi Laboratuvarından Prof. Dr. Ümit

Demirbaş'a, Serdar OKUYUCU' ya ve PSL Elektronik San. ve Tic. A.Ş.'ye en derin teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (TÜBİTAK, 119E264) ve 2209-B- Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Desteği Programı (TÜBİTAK, 1139B412000644) kapsamında fonlanmıştır.

Kaynaklar (References)

1. Evren Y.A., Poyraz Ö., Investigation of residual stresses by micro indentation in selective laser melting, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (2), 1029-40, 2021.
2. Wu S.J., A hybrid method of ultrafast laser dicing and high-density plasma etching with water soluble mask for thin silicon wafer cutting, Materials Science in Semiconductor Processing, 74, 64-73, 2018.
3. Wu D.C., Goldman M.P., Wat H., Chan H.H., A systematic review of picosecond laser in dermatology: evidence and recommendations, Lasers in surgery and medicine, 53 (1), 9-49, 2021.
4. Panjvani K., Dinh A.V., & Wahid K.A., LiDARPheno-A low-cost lidar-based 3D scanning system for leaf morphological trait extraction, Frontiers in Plant Science, 10, 147, 2019.
5. Marquis D.C., Optical tracking; a brief survey of the field, Applied Optics, 5 (4), 481-487, 1966.
6. Özgültekin A.G., Başer T., Tekelioğlu O., Tamer E., Aydın B., Alpay B., Effects of different laser welding parameters on the microstructural and mechanical properties of an advanced dual phase steel grade, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 455-68, 2022.
7. Eggenschwiler C.D., Dummer R., Imhof L., Use of lasers for iron-induced accidental tattoos: experience at a tertiary referral center, Dermatologic Surgery, 46 (9), 1176-1182, 2020.

8. Chala M., Anagnostaki E., Mylona V., Chalas A., Parker S., & Lynch E., Adjunctive Use of Lasers in Peri-Implant Mucositis and Peri-Implantitis Treatment: A Systematic Review, *Dentistry Journal*, 8 (3), 68, 2020.
9. Fingas M., & Brown C.E., A review of oil spill remote sensing, *Sensors*, 18 (1), 91, 2017.
10. Kaushal H., & Kaddoum G., Applications of lasers for tactical military operations, *IEEE Access*, 5, 20736-20753, 2017.
11. Doriana A.F., Constantin M., & Norina F., Surgical lasers: a review of applications in the therapy of oral mucosa lesions, *Roman J Oral Rehabil*, 12, 24-31, 2020
12. Okuyucu S., Ozturk Y., & Demirbas U., Passively Q-switched Cr: LiCAF laser with a saturable Bragg reflector, *Applied Physics B*, 127 (4), 1-12, 2021.
13. Mekteplioglu M. F., Ozturk Y., Kärtner F. X., & Demirbas U., Tunable Q-switched mode-locked Cr: LiSAF laser, *Optics Communications*, 488, 126836, 2021.
14. Ma Z., Li D., Gao J., Wu N., & Du K., Thermal effects of the diode end-pumped Nd: YVO4 slab, *Optics communications*, 275 (1), 179-185, 2007.
15. Elahi P., & Morshedi S., Calculation of temperature distribution and thermo-optical effects in double-end-pumped slab laser, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84 (6), 1224-1230, 2011.
16. Jinge L., Ya W., Shuo L., Liangyu G., Chunting W., Yongji Y., ... & Guangyong J., Study on LD end-pumped multi-segment bonded Tm: YAG solid-state laser, *Optics Communications*, 480, 126452, 2021.
17. Krasnyh V.V., Kiselev I.A., & Sergeev A.A., Estimation of the thermal state and the destruction limits of the Cr: LiSAF laser active medium, 2020 International Conference Laser Optics (ICLO) IEEE, 1-1, Nov 2, 2020.
18. Demirbas U., Power scaling potential of continuous-wave Cr: LiSAF and Cr: LiCAF lasers in thin-disk geometry, *Applied Optics*, 57 (35), 10207-10217, 2018.
19. El H.A.M., Bani H.E., Al-Sawafta I., Sedaghat A., Alshabi M., & Rahman S., Thermal analysis of end pumped fiber lasers subjected to jacket fluid cooling, *Thermal Science*, 25 (2 Part A), 1023-1031, 2021.
20. Eichenholz J.M., Generation of high powers from diode pumped Cr³⁺ doped colquiriites", *Retrospective Theses and Dissertations*, University of Central Florida, Optical Science and Engineering, Florida, 1998.
21. Petit, J., Goldner, P., & Viana, B., Laser emission with low quantum defect in Yb: CaGdAlO₄, *Optics letters*, 30 (11), 1345-1347, 2005.
22. Okida M., Itoh M., Yatagai T., Ogilvy H., Piper J., & Omatsu T., Heat generation in Nd doped vanadate crystals with 1.34 μm laser action, *Optics express*, 13 (13), 4909-4915, 2005.
23. Sennaroglu A., Broadly tunable Cr⁴⁺-doped solid-state lasers in the near infrared and visible, *Progress in Quantum Electronics*, 26 (6), 287-352, 2002.
24. Yerebakan T., Demirbas U., Eggert S., Bertram R., Reiche P., & Leitenstorfer A., Red-diode-pumped Cr: Nd: GSGG laser: two-color mode-locked operation, *JOSA B*, 34 (5), 1023-1032, 2017.
25. Demirbas U., Uecker R., Fujimoto J.G., & Leitenstorfer A., Multicolor lasers using birefringent filters: experimental demonstration with Cr: Nd: GSGG and Cr: LiSAF, *Optics express*, 25 (3), 2594-2607, 2017.
26. Endo M., Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers, *Optics Express*, 15 (9), 5482-5493, 2007.
27. Chen Y., Sun D., Peng F., Zhang Q., Liu W., Gao J., ... & Zheng L., Growth and spectroscopic investigations of the 1.5 at. % Er: GSGG laser crystal, *Materials Research Express*, 4 (9), 096202, 2017.
28. Stokowski S.E., Nd: Cr: GSGG, will it replace Nd: YAG?, In *New slab and solid-state laser technologies and applications*, vol. 736, pp. 22-28. SPIE, 1987.
29. Pföstner C., Weber R., Weber H. P., Merazzi S., & Gruber R., Thermal beam distortions in end-pumped Nd: YAG, Nd: GSGG, and Nd: YLF rods, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30 (7), 1605-1615, 1994.
30. Shen Y., Gong M., Ji E., Fu X., & Sun L., Spatial dynamic thermal iteration model for 888 nm end-pumped Nd: YVO4 solid-state laser oscillators and amplifiers, *Optics Communications*, 383, 430-440, 2017.
31. Holman J.P., *Heat Transfer Tenth Edition*, McGraw-Hill Education, A.B.D., 2009.
32. Castro W., Elemental analysis of biological matrices by laser ablation high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-HR-ICP-MS) and high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICP-MS), *Doctoral dissertation*, Florida International University, 2008.
33. Cengel Y.A., *Introduction to thermodynamics and heat transfer*, McGraw-Hill, 846, New York, A.B.D., 1997.