



T. C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

KIZILÖTESİ BÖLGEDE Cr^{2+} : ZnSe LAZERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YADGAR HUSSEIN SHWAN AL-BAJALAN

DANIŞMAN
Doç.Dr. BURHAN DAVARCIOĞLU

AKSARAY, 2016



T. C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

KIZILÖTESİ BÖLGEDE Cr^{2+} : ZnSe LAZERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YADGAR HUSSEIN SHWAN AL-BAJALAN

DANIŞMAN
Doç.Dr. BURHAN DAVARCIOĞLU

AKSARAY, 2016

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 142310802 numaralı Tezli Yüksek Lisans öğrencisi, "YADGAR HUSSEIN SHWAN AL-BAJALAN", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KIZILÖTESİ BÖLGEDE $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ LAZERİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Burhan DAVARCIOĞLU

Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Abdülkadir YAŞAR

Çukurova Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Murat ESKİL

Aksaray Üniversitesi

Teslim Tarihi: 27 Ocak 2016

Savunma Tarihi: 22 Şubat 2016

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ve bu eserleri her kullanışımında alıntı yaparak yararlandığımı belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

YADGAR HUSSEIN SHWAN AL-BAJALAN

İmza

ÖNSÖZ

Orta kızılötesi (IR) ışıma; bilgi teknolojisi, endüstriyel işlemler kontrolü, fotokimya, fotobiyoloji ve ışık tedavisine yönelik çok çeşitli bilimsel ve teknolojik spektroskopi ve frekans metrolojisi uygulamalarında ilgi çekmektedir. “Orta kızılötesi” bölge oda sıcaklığında elektromanyetik spektrumun 2 ile 5 μm 'lik kısmını kapsar. Bununla birlikte, bu kalıcı engelin üstesinden gelmek amacıyla orta kızılötesi ışımasının oluşturulmasına yönelik alternatif teknolojiler önerilmiş, tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Özellikle, son on yıl içerisinde, birtakım yeni teknolojilerin ve devam eden yeniliklerin ve daha yerleşik tekniklerin çoğunda gerçekleştirilen çözümlerinin ortaya çıkışıyla orta kızılötesi kaynaklarında önemli ve yeni gelişmeler meydana gelmiştir. Konsantrasyon ve yayılım $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'de önemli bir role sahiptir. Soğurum katsayısı ile konsantrasyon arasında kuvvetli bir bağ vardır.

Zaman; kristal oluşumu veya $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ materyalinin hazırlanması esnasında soğurum katsayısını etkiler. ZnSe 'de Cr^{2+} iyonunun salım spektrumları ve soğurum spektrumları genel olarak, özellikle temel durum ile uyarılmış durum arasında, sırasıyla 2-5 μm ve 1.8 μm civarındadır. numune uygun bir pompa kaynağını gerektirir, $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ için birçok pompalama tekniği mevcuttur. Her teknik kaybı azaltmak ve kazanç ortamını oluşturmak için kullanılır ve her teknik ile kızılötesi bölge lazeri elde edilir. Başka bir teknik sürekli dalgalı enjeksiyon çekirdeğidir ve bu teknikte $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için pompalama sonucunda yüksek bir çıkış enerjisi elde edilir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, biyoloji ve tıp alanlarında birçok uygulamaya sahiptir.

TEŞEKKÜR

Eğitimime destekleyici bir çalışma ortamında devam etme şansı tanıyan Fizik Bölümü ve personeline en derin şükranlarımı sunarım. Aileme (Babam Hussein, Kardeşim Salam ve ayrıca Arkadaşlarıma) ve özellikle danışmanıma; Doç. Dr. Burhan DAVARCIOĞLU' na teşekkür etmek isterim. Çalışma sürecime katılanlara, görüşmeler esnasında değerli vakitlerini isteyerek paylaştıkları için ayrıca teşekkür ederim.

YADGAR HUSSEIN SHWAN AL-BAJALAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. ALTYAPI.....	4
2.1 Orta Kızılötesi Bölgede Lazer İçin Düşük Fonon Enerjili Kristal Ve İyon.....	4
2.1.1 Kristal büyüme	4
2.1.2 Cr^{2+} katkılı ZnSe	5
2.1.3 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ materyal özellikleri	6
2.2 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ Orta Kızılötesi Lazerinin Mekanik Ekstraksiyonu Ve ZnSe'nin Geçiş Metali ile Katkılanması	7
2.2.1 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ spektroskopisi	7
2.2.2 ZnSe filminde krom safsızlığı	11
2.2.3 ZnSe Yığılmasına katkılanan Cr^{2+} iyonunun uyarım mekanizması	12
2.2.4 Yük transfer süreci	15
2.2.5 Yayınım katkılı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ soğurumu ve fotoluminesansı.....	16
2.3 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ Esaslı Geniş Bant Orta Kızılötesi Katıhal Lazeri	18

2.3.1 Motivasyon.....	18
2.3.2 Bant genişliği dalgaboyu ölçeklendirme kuralı ve femtosaniye	19
2.3.3 Ultra çoklu çizgi ve ayarlanabilir tek frekans	20
2.3.4 Diyot pompalaması ile ayarlanabilir sürekli dalgalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri (kapsamlı ayarlanabilir $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$)	22
3. MATERİYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ İçin Kızılötesi Bölgede Q-anahtarlaması Ve Optik Pompalama	25
3.1.1 Kovuk içi pompalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$	25
3.1.2 Kazanç anahtarlama ile ayarlanabilir $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri ve enjeksiyon kaynağı	28
3.1.3 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin KERR-LENS Mod Kilitli İşletimi.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
4.1 Kızılötesi Bölge Uygulaması	33
4.1.1 Eser gaz tayini	33
4.1.2 Sağlık ve biyolojik uygulamalar	34
4.1.3 Fotoakustik uygulama	35
4.2 Bulgular.....	36
5. SONUÇ.....	41
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ÖZET

KIZILÖTESİ BÖLGEDE Cr^{2+} : ZnSe LAZERİ

Orta kızılötesi (mid-IR) ışıma; bilgi teknolojisi, endüstriyel işlemler kontrolü, fotokimya, fotobiyoloji ve ışık tedavisine yönelik çok çeşitli bilimsel ve teknolojik spektroskopik ve frekans metrolojisi uygulamalarında ilgi çekmektedir. “Orta kızılötesi” bölge oda sıcaklığında elektromanyetik spektrumun 2 ile 5 μm ’lik kısmını kapsar. Önemli atmosferik pencereleri kapsar ve çeşitli moleküler gazlar, toksik maddeler, hava, su ve toprak kirleticileri, insan nefesindeki bileşenler ve birtakım patlayıcı maddeler bu bölgede güçlü soğurum parmak izine (finger print) sahiptir. Birçok orta kızılötesi lazer kaynağı mevcuttur, ancak bu araştırma, orta kızılötesi bölgede Cr^{2+} : ZnSe katı hal lazeri olarak adlandırılan bir kaynağa odaklanmaktadır.

Bu kaynak “moleküler parmak izi” olarak bilinmektedir. Cr^{2+} : ZnSe son yıllarda ayrıca bir katı malzemede orta kızılötesi bölge lazeri olarak ortaya çıkmıştır. Cr^{2+} : ZnSe , birleşik iyon-konuk malzemesine dayanır. Öte yandan, lazerin icadından 40 yılı aşkın bir süre sonra, orta kızılötesi spektrumun büyük bir bölümü konvansiyonel lazerler için temel kısıtlamalardan ve en belirgin haliyle uygun kristallenmesi lazer kazanç materyallerinin eksikliğinden dolayı hala erişilemez durumdadır. Bu durum konvansiyonel katı hal lazerlerinin spektrum aralığını çoğunlukla $\sim 3 \mu\text{m}$ ’nin altındaki dalgaboyları ile sınırlandırır, daha büyük dalgaboylarında ciddi bir eş uyumlu (coherent) lazer kaynağı eksikliğine yol açar ve orta kızılötesi çalışma teknolojisinin genel ilerlemesi için önemli bir engel teşkil eder. Bununla birlikte, bu kalıcı engelin üstesinden gelmek amacıyla orta kızılötesi ışımasının oluşturulmasına yönelik alternatif teknolojiler önerilmiş, tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Özellikle, son on yıl içerisinde, birtakım yeni teknolojilerin ve devam eden yeniliklerin ve daha yerleşik tekniklerin çoğunda gerçekleştirilen çözümlerinin ortaya çıkışıyla orta kızılötesi kaynaklarında önemli ve yeni gelişmeler meydana gelmiştir. Cr^{2+} : ZnSe 1.800 μm ’de tulyum fiber lazeri ile pompalanır.

İlk işlemler, numunenin büyütülmesi ve Cr^{2+} iyonu ile katılanmasıdır. Numune hazırlamada ortaya çıkan en iyi faktör yayınımdır. Yayınım; sıcaklık ve konsantrasyon gibi faktörlere bağlıdır. Yayınım, parçacıkların (bir atom, iyon veya molekül...) daha yoğun bir bölgeden daha düşük yoğunluktaki bir bölgeye rastgele hareketle yayılması olarak tanımlanabilmektedir. Konsantrasyon ve yayınım Cr^{2+} : ZnSe ’de önemli bir role sahiptir. Soğurum katsayısı ile konsantrasyon arasında kuvvetli bir bağ vardır. Bunlara ek olarak, konsantrasyon dağılımı ile ilişkili başka bir parametre de numune uzunluğudur. Cr^{2+} : ZnSe için pompa enerjisi salım şiddetini etkilemektedir. Şekil 4.10’da gösterildiği üzere pompa enerji yoğunluğu arttıkça salım şiddeti de artar.

Anahtar kelimeler: Cr^{2+} : ZnSe lazerler, Orta IR lazer, Ayarlanabilir katı hal lazerleri, Difüzyon doping. Kalkojenit, Geçiş metal II-VI katkılı.

ABSTRACT

Cr²⁺: ZnSe LASER IN THE INFRARED REGION

The mid-infrared (mid-IR) radiation is of great interest for a wide range of scientific and technological applications of spectroscopy and frequency metrology of information technology, industrial process control, photochemistry, photobiology and photomedicine. The “mid infrared” region covers the portion of the electromagnetic spectrum between 2 to 5 μm at room temperature. Covers important atmospheric windows, and numerous molecular gases, toxic agents, air, water, and soil pollutants, components of human breath, and several explosive agents have strong absorption fingerprints in this region. There are many sources give mid infrared laser, this research focus on one source called Cr²⁺: ZnSe solid state laser in the mid infrared region.

This source is known as “molecular fingerprint”. In recent years Cr²⁺: ZnSe also emerged as mid infrared region laser in a solid material. The Cr²⁺: ZnSe depends on the ion-host combination material. On the other hand, more than 40 years after the invention of the laser, much of the mid-IR spectrum still remains inaccessible to conventional lasers due to fundamental limitations, most notably a lack of suitable crystalline laser gain materials. This has confined the spectral range of conventional solid-state lasers, mainly to wavelengths below $\sim 3 \mu\text{m}$, resulting in a severe shortage of coherent laser sources at longer wavelengths, and presenting a major obstacle to the widespread advancement of mid-IR science and technology. At the same time, alternative technologies for the generation of mid-IR radiation has been proposed, devised and developed, with the goal of overcoming this persistent barrier. In particular, over the past decade, there have been major new developments in mid-IR sources, driven by the emergence of a number of new technologies and continuing innovations and refinements in many of the more established techniques.

The Cr²⁺: ZnSe pump by thulium fiber laser at 1.800 μm . The first process, sample must be grown and doped with Cr²⁺ ion. Diffusion is the best factor appears during the sample preparation, diffusion depends on the same factors such as temperature and concentration. The diffusion can be defined as spread out of particle (an atom, ion or molecule...) through random motion from higher concentration region to lower concentration region. The concentration and diffusion have a great role in Cr²⁺: ZnSe. The absorption coefficient is associated strongly with concentration, while the concentration increases the peak absorption increase, The temperature is another factor which is affected on this laser process, the temperature is related to the concentration and diffusion. The emission intensity increase with increasing pump energy density

Keywords: Cr²⁺: ZnSe lasers, Mid IR laser, Tunable solid-state lasers, Diffusion doping, Chalcogenide, Transition metal doped II-VI.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1:	Beş bölgeli dikey elektrikli fırının deney düzeneği ve kristal sıcaklık Değerleri.....	5
Şekil 2.2:	Tetrahedral konfigürasyonda Cr^{2+} iyonlarının enerji düzeyine yarılmasının (a) konfigürasyon ve (b) diyagramları. Sadece iki beşli durum mevcuttur, E^5 ve T^5_2 lazer geçişleri içindir.....	6
Şekil 2.3:	Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin Cr:ZnSe bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci	8
Şekil 2.4:	Cr^{2+} katkılı II–VI ortamları için kazanç spektrumları. Ti:safir kristalinin spektrumu karşılaştırma için verilmiştir.....	8
Şekil 2.5:	Cr^{2+} katkılı II–VI ortamları için soğurum spektrumları ve olası pompa fonksiyonu kaynakları	9
Şekil 2.6:	Yayınım katkılı Cr:ZnSe pencerelerinin, Cr konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak IR soğurum spektrumları, farklı numuneler Cr için konsantrasyonları	11
Şekil 2.7:	Cr^{2+} :ZnSe zamanın bir fonksiyonu olarak soğurum spektrumları	11
Şekil 2.8:	ZnS bant aralığında Cr ile ilgili enerji düzeylerinin şeması; (a) , (b) ve ayrıca (c) Cr^+ ve Cr^{2+} iyonlarının 3d düzeyleri	12
Şekil 2.9	Cr^{2+} ve Fe^{2+} iyonlarının kabuk içi orta kızılötesi salımının, (a) sınırlı eksitondan enerji transferi; (b) komşu DAP'den enerji transferi (ET); (c) bir üç merkezli Auger tipi yeniden birleşim (TCAR) sürecinden kaynaklanan TM^{2+} iyonlaşması; (d) iyonlaşmış safsızlık aracılığıyla taşıyıcı tuzaklaması üzerinden bantlar arası uyarımının ana mekanizmalarını gösteren şematik diyagram.....	14
Şekil 2.10:	İyonlaşma geçişleri üzerinden Cr^{2+} alt bant optik uyarımını gösteren diyagram: (a) Tek foton etkileşimi üzerinden iyonlaşma. (b) İki pompa fotonu ile gerçekleşen ve iki orta kızılötesi fotonunun oluşmasını sağlayan çok adımlı iyonlaşma	15
Şekil 2.11:	Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin Cr:ZnSe bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci	16
Şekil 2.12:	5K'de ZnSe: Cr^{2+} (düz çizgi) ve katkısız ZnSe (kesikli çizgi) ile ölçülen temsili soğurum spektrumları.....	17
Şekil 2.13:	5K'de ZnSe:Cr fotolüminesansı 0.98 ve 2.2 μm 'de salım bantları sergiler	18
Şekil 2.14:	Deney düzeneği. İki benzer Cr^{2+} :ZnSe femtosaniye osilatörü, aynı 1.61 μm 'lik sürekli dalgalı Er katkılı fiber lazer ile pompalanır.....	20
Şekil 2.15:	Kogelnik/Littman kovuğunu esas alan ayarlanabilir tek frekanslı Cr^{2+} :ZnSe lazeri	21
Şekil 2.16:	160 mm bir FPI'den SLM çıkış spektrumunun girişim deseni. Spektrum çözünürlüğü, 7.7'lik interferometre inceliği ile sınırlıdır ve burada lazer çizgi genişliği üst sınırı 120 MHz'dir	22
Şekil 2.17:	Farklı metodlara göre büyütülen Cr:ZnSe kristallerinin soğurum spektrumları.....	23

Şekil 2.18: Diyot pompalı Cr:ZnSe lazerinin şematik diyagramı. OC: çıkış bağlaştırmacı Ch: kesici. Diyot: çift kırılmalı filtre	23
Şekil 2.19: Diyot pompalı Cr:ZnSe lazerinin çıkış karakteristikleri (a) ve (b) ayarlama eğrisi. (b) grafiğindeki gri çizgi, kovuk gidiş-geliş uzunluğuna göre normalleştirilen atmosfer soğurumunu gösterir	24
Şekil 3.1: Kazanç anahtarlamalı OPO kovuk içi Cr^{2+} :ZnSe lazerinin şematik diyagramı.....	25
Şekil 3.2: Dört farklı HR takımı ile birlikte kazanç anahtarlamalı Cr^{2+} :ZnSe lazerinin 1880 ile 3100 nm arasında tam ayarlama aralığı.....	26
Şekil 3.3: Kovuk içi pompalı Cr^{2+} :ZnSe lazerinin 1880 ile 2130 nm aralığında ayarlama eğrisi	27
Şekil 3.4: Enjeksiyon kaynaklı, kazanç anahtarlamalı ayarlanabilir Cr:ZnSe lazerinin şematik diyagramı	29
Şekil 3.5: (Renkli çizgiler) kaynaklı ve enjeksiyon kaynaklı kazanç anahtarlamalı Cr:ZnSe lazerinin doğrusal ve logaritmik (ek) ölçeklerde spektrumları. 30	
Şekil 3.6: Kerr-Lens mod kilitli femtosaniye Cr^{2+} :ZnSe lazerinin şematik diyagramı	31
Şekil 3.7: Serbest çalışma modunda ve MgF_2 prizma çifti ile birlikte Cr^{2+} :ZnSe lazeri içinsürekli dalga güç verimlilik eğrileri. Çıkış dalgaboyu yaklaşık 2400 nm'dir.....	32
Şekil 4.1: 3-5 μm 'lik spektrum bölgelerinde çeşitli moleküllerin soğurum bantlarının HITRAN benzetimi. Tüm türler özdeş görelî konsantrasyon ile çizilmiştir.....	34
Şekil 4.2: Karakteristik hidrokarbon kızılötesi soğurumu.....	35
Şekil 4.3: Fotoakustik spektroskopinin ilkeleri. Gelen fotonlar hedef molekülü bir rezonant dalgaboyunda uyarır	36
Şekil 4.4: Yayınım katkılı Cr:ZnSe'nin kızılötesi soğurum spektrumları.....	36
Şekil 4.5: Cr^{2+} :ZnSe soğurum spektrumları	37
Şekil 4.6: Kristal büyüme eksenî boyunca krom konsantrasyonu dağılımı	37
Şekil 4.7: Cr:ZnSe pencerelerinin farklı Cr konsantrasyonları için salım düşüş geçişleri. Daha yüksek Cr konsantrasyonlarında salım ömürlerinin azalması, Cr salımının baskılanmaya başladığını gösterir	38
Şekil 4.8: Cr^{2+} :ZnSe numunesinde 1.78 μm 'lik dalgaboyunda doğrusal ışık soğurum katsayısının krom konsantrasyonuna bağımlılığı.....	38
Şekil 4.9: Cr^{2+} :ZnSe için çıkış salım yeğînlîği-pompa enerjisi: OS'de (i) ~10 μm , (ii) ~1 μm toz (uyarım dalgaboyu: 1560 nm, pompa nokta çapı: 2.9 mm)	39
Şekil 4.10: Cr^{2+} :ZnSe'nin salım spektrumları.	39
Şekil 4.11: Serbest çalışma modunda ve MgF_2 prizma çifti ile birlikte Cr^{2+} :ZnSe lazeri için sürekli dalga güç verimlilik eğrileri. Çıkış dalgaboyu yaklaşık 2400 nm'dir	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Cr^{2+} katkılı ZnSe lazer kristalinin materyal özellikleri	7
Çizelge 2.2: Cr^{2+} katkılı lazer materyallerinin spektroskopi ve lazer parametresi	9



KISALTMALAR DİZİNİ

PVT	Fiziksel Buhar Aktarımı	Physical Vapour Transport
CVT	Kimyasal Buhar Aktarımı	Chemical Vapour Transport
FWHM	Maksimum Çizgi Genişliği	Full Width Half Maximum
CW	Sürekli Dalga	Continuous Wave
OPO	Optik Parametre Osilatörü	Optical Parameter Oscillator
ESA	Uyarılmış Durum Geçişleri	Excited State Absorption
τ	Salım Ömrü	LifeTime
RT	Oda Sıcaklığı	Room Temperature
E_a	Alıcı Merkezi	Acceptor Center
α_p	Puls Emilim Katsayısı	Peak Absorption Coefficient
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü	Fast Fourier Transform
EPR	Elektron Paramanyetik Rezonansı	Electron Paramagnetic Resonans
OC	Çıkış Elemanı	Output Coupler
KTP	Potasyum Titanil Fosfat Kristali	Sample Crystal (that uses a Potassium Titanyl Phosphate)
HWP	Yarım Dalga Plakası	Half Wave Plate
F	Filtre	Filter
HR	Ayrılma Aynaları	Tuning Mirrors (hight reflector)
TFP	İnce Film Polarizasyonu	Thin Film Polarizer
FR	Faraday Dönüştürücüsü	Faraday Rotator

1. GİRİŞ

1990'ların ortasında bir grup araştırmacılar tarafından bir lazer laboratuvarında oda sıcaklığında orta kızılötesi bölgede lazer materyali üretmek için yeni 1-2 değerlikli geçiş metali katkılı çinko selenür (ZnSe) gibi II-VI çinko kalkojenür bileşen sınıfı önerilmiştir [1-5]. Orta kızılötesi bölgenin dalgaboyu yaklaşık 2-5 μm 'dir ve bir "moleküler parmak izi" bölgesi olarak da adlandırılır [6]. Ayarlanabilir orta kızılötesi lazer, uzaktan algılama, optik haberleşme, tıp ve tanı gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Geçiş metali iyonu; örneğin Cr^{2+} geçiş metali ile gösterilir, iyon ZnSe'ye katılır, ZnSe II-VI gruplarına ait ve kristal yarı iletkenidir. Cr^{2+} katkılı ZnSe oda sıcaklığında lazer işlemlerinde kazanç ortamı elde etmek için kullanılır [7-10]. ZnSe kromunun serbest iyonunun enerji düzeyini küçük bir kristal alana yarılmasına uğratan bir tetrahedral koordinasyon bileşiğidir.

Tetrahedral koordinasyon bileşiğine katılanan Cr oktahedral koordinasyonundan farklıdır. ZnSe kristal alanı, Cr^{2+} iyonunun temel düzeyini ^5D üçlü T^5_2 ve ikili E^5 düzeyine yarar, burada T^5_2 temel haldir ve E^5 ise uyarılmış haldir, bu düzeyler arasındaki geçişler simetri sayesinde gerçekleşir, daha yüksek düzeylere geçişler ise spin ile engellenir. Geçiş metali krom Cr^{2+} ile katılanmış ZnSe yarı iletken kristali orta kızılötesi ayarlanabilir katı hal lazeri için etkin bir materyaldir [11-15]. Cr^{2+} iyonları ZnSe kristaline fiziksel buhar aktarımı yoluyla tekdüze bir şekilde katılır. Cr^{2+} 'nin temel durumu T^5_2 ve uyarılmış durumu E^5 arasındaki salım geçişi 2-3 μm 'dir ve bu geçiş merkezler arası geçiş olarak da adlandırılır [16]. Geçiş metali (Cr^{2+}) ile katılanan yığın kristal (ZnSe) bu materyali uygulamalar için bilhassa çekici hale getiren özellikler sağlar [17-25]. Krom geçiş metalidir ve ZnSe kristalindeki katyon ile katılanmıştır. Elektron paramanyetik rezonans (EPR) ölçümleri, kromun ZnSe'deki iki yük durumu ile ilişkilidir. Cr^{1+} ve Cr^{2+} bir sonraki durumun 10^{18} - 10^{19} atom/cm³ civarındaki konsantrasyon için daha kararlı olduğu görülür, dolayısıyla konsantrasyon Cr^{2+} :ZnSe lazer sistemi için çok etkili bir parametredir [26, 27].

Alıcı Cr^{1+} durumu, $\sim 1.69\text{-}2.2 \text{ cm}^{-1}$ 'lik 1 bant aralığı 6 foton uyarımı kullanılarak yük transferi ile bir elektronun değerlik bandından Cr^{2+} enerji düzeyine atılması yoluyla uyarılabilir [28, 29]. Yayınım; katkılama işleminde veya numune ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) hazırlamada önemli bir role sahip faktörlerden biridir ve konsantrasyon veya yayınım katsayısı ile ilişkilidir. Materyalleri hazırlamaya yönelik olarak fiziksel buhar aktarımı (FBA), kimyasal buhar aktarımı (CVT) ve Bridgeman yöntemi gibi birçok teknik mevcuttur, bu projede fiziksel buhar aktarımı (PVT) üzerine çalışma yapılmaktadır ve bu yöntemin üzerinde durulur [30, 31].

Öte yandan, bu lazer ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) Tulyum fiber lazeri (Tm^{3+}) veya başka kaynaklar ile pompalanır. Pompa kaynaklarının dalga boyları kızılötesi bölgede olmalıdır [32]. Geçiş metali (Cr^{2+}) katkılı kalkojenürler (ZnSe) konusunda ilerleme kaydeden son araştırmalar, uygulamalı orta kızılötesi kaynak gelişiminde kayda değer çabalara cesaret vermiştir. Uygulamalara ve oda sıcaklığında katı hal lazerine yönelik yeni bir orta kızılötesi kazanç malzemeleri sınıfı olarak ortaya çıkmıştır [33-35]. Bu lazer ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) düşük maliyette, daha küçük ayna kovuğu ve rastgele lazerlere kıyasla küçük boyut gibi birçok ilginç özelliğe sahiptir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, orta kızılötesi bölgede geniş bir aralıkta ayarlanabilir sürekli lazer dalgası sağlar [36].

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için birçok pompalama tekniği mevcuttur ve bu tekniklerin her biri kayıpları azaltmak üzere kullanılır. Bunların yanı sıra, bu lazerin ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) soğurma piki $\sim 1.775 \mu\text{m}$ 'dir ve rezonans genişliği (FWHM) $\sim 365 \text{ nm}$ 'dir [37, 38]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ sistemi için en iyi pompa kaynağı seçilirken piyasadan elde edilebilen, oda sıcaklığında ve sürekli dalgada çalışma olasılığı gibi birtakım önemli kriterlerin karşılanması gerekir. Bunlara ek olarak, yüksek katkılama konsantrasyonunda iyon-iyon etkileşimi de optimum pompalama dalga boyunu sınırlandırır [38]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, elektromanyetik spektrumun orta kızılötesi bölgesinde kuvvetli bir soğurum ve salınım bandına sahiptir. 1990'ların sonlarında Lawrence Livermore National Laboratuvarlarında gerçekleştirilen öncü çalışma, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer etkisinin $2.5 \mu\text{m}$ civarında olduğunu göstermiştir [39, 40]. Bu tarihten itibaren çeşitli geçiş metali Cr^{2+} iyonu katkılı ZnSe 'lerde lazer etkisi gözlemlenmiştir. Bu katı hal lazerleri sınıfında en kapsamlı incelenen öğelerden birisi $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'dir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ orta kızılötesi bölgede önemli bir eş uyumlu ışınım kaynağı olmasını sağlayan spektroskopik özelliklere sahiptir.

Diğer taraftan, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin geçiş sürecinde fotoluminesans elde edilebilir [41-49]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ çıkış spektrumu, aşağıdaki bölümde açıklanan birçok önemli karakteristiğe sahiptir; $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerleri potansiyel olarak çok sayıda uygulama alanına sahiptir. Bu alanlardan biri yüksek harmonik jeneratördür [50]. Yeni çalışmalar, orta kızılötesi bölgesinde daha büyük merkezi orta dalgalılarına sahip femtosaniye uyarım lazerleri kullanılarak, derin morötesi ve yumuşak X-ışını bölgesinde harmoniklerin sınır dalgalıının artırılabilğini göstermiştir [51]. Bu tip dalgalııları, doğrusal olmayan dalgalıı dönüşüm şemalarını kullanarak elde edilebilir [52-55]. Alternatif olarak, bu büyük dalgalıılarında lazer ışımasını oluşturmak için $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ veya diğer kalkojenür lazerleri kullanılabilir.

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerlerinin diğer potansiyel uygulamaları spektroskopi, optik parametrik osilatörler pompalanması ve frekans metrolojisine yönelik orta kızılötesi optik saçakların büyütülmesini kapsar. Kalkojenür lazerlerinin gelişimi ve uygulamaları hakkında kapsamlı bir inceleme referanslarında bulunabilir [56-59]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerleriyle farklı işlem modları sergilenmiştir. Bu işlem modları şunları içerir: kazanç Q-anahtarlama, sürekli dalga (CW) [60], $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin KERR-LENS kilitli çalışma modu, Q-anahtarlama ve kızılötesi bölgesinde $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için optik pompalama. Ayrıca; kovuk içi pompalama vasıtasıyla, mikrometre bölgesini kapsayan bugüne kadarki en geniş ayarlama aralıkları bildirilmiştir.

Bu çalışma, oda sıcaklığında $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin sürekli dalgalı (CW), bant genişlemeli, dalgalıı ölçeklendirme kurallı, ultra çoklu çizgili ve ayarlanabilir tek frekanslı, karakteristik spektrumlu ve kazanç Q-anahtarlama işletimlerini ele alır. Özellikle bir optik parametrik osilatör (OPO) ile kaynak aktarımı ve kovuk içi pompalama, mikrometre bölgesinden uzanan geniş bir ayarlama aralığı ile sonuçlanmaktadır.

2. ALTYAPI

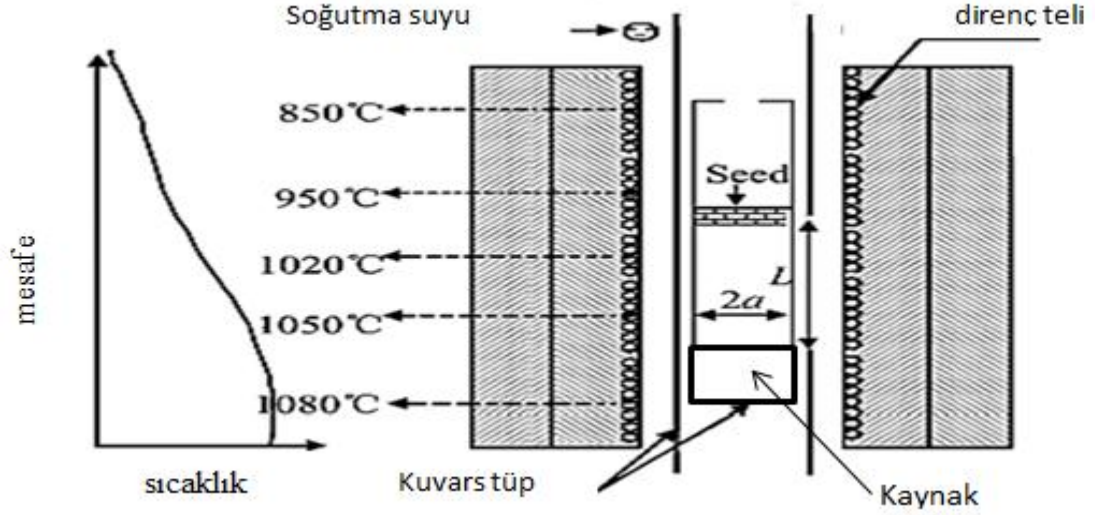
2.1 Orta Kızılötesi Bölgede Lazer İçin Düşük Fonon Enerjili Kristal Ve İyon

2.1.1 Kristal büyütme

Çinko kalkojenürler (ZnSe), II-VI bileşenine ait geniş bir bant aralığında yer alırlar [61]. Kristal büyütme için birçok yöntem mevcuttur. ZnSe'nin geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 1425°C'dir. Çinko selenür (ZnSe) eriyiğinden büyütme, kimyasal buharla büyütme, fiziksel buharla büyütme, solüsyonla büyütme ve hidrotermal ile büyütme gibi çeşitli yöntemlerle büyütülmüştür. Fiziksel buhar aktarımı (PVT) kristal büyütme için iyi bir tekniktir, fiziksel buhar aktarımı (PVT) ZnSe kristalinin büyümesine uygulanır, bu teknik ZnSe için daha uygundur. ZnSe kristalinin fiziksel buhar aktarımı ile büyütülmesinde çözülmesi gereken en önemli problem, fiziksel buhar aktarımının basit bir süblimleşme olması ve kristal büyütme esnasında büyük kristallerin elde edilmesi için uygun olmasıdır. Bu teknik, iletkenlik gibi fiziksel özellikleri yükseltmek amacıyla büyütülen kristale bazı metallerin eklenmesini sağlayabilir [62-71].

Orta kızılötesi lazer için faydalı materyal, Cr^{2+} iyonu ile katkılanmış ZnSe kristalidir. Numune (Cr^{2+} :ZnSe) mekanik ve kimyasal özellikler bakımından daha kararludur ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptir [72-77]. Krom iyonlarının kristal matrisindeki durumu, bu lazer ortamının titreşimsel lazerler arasında en yüksek kazancı ve verim kararlılığı sağlamasına imkan verir. Bu lazer, orta kızılötesi bölgede bir dalgaboyu verir. Cr^{2+} :ZnSe kristali orta kızılötesi bölgede bir sürekli dalga (ayarlanabilir lazer) lazeri üretmek bakımından daha başarılıdır. Burada ZnSe kristal büyümesi için fiziksel buhar aktarımı (PVT) kısaca tarif edilmektedir. Fiziksel buhar aktarımında, aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere beş bölgeli fırınlar ve kuvars büyütme tüpü kullanılır. Her bölge spesifik bir sıcaklığa sahiptir, yarı kapalı tüpün düşük sıcaklıklı bir bölgesine bir kaynak yerleştirilir, yüksek sıcaklıklı bölgeye ise toz yerleştirilir.

Beş farklı sıcaklık bölgesine sahip olan fırın sisteminde kuvarslı büyütme tüpleri kullanılır. Tüp yarı kapalı olup ve içerisindeki toplam basınç vakum ile ayarlanabilir (tüp 10^{-6} Torr'luk basınç altında deşarj edilebilir). Son olarak, bu $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ yarıkları engellemek amacıyla, Şekil 2.1'de gösterildiği üzere 30 saat boyunca $20^\circ\text{C}/\text{saat}$ 'lik bir hızda tavlama adımı gerçekleştirilir [78-83].



Şekil 2.1: Beş bölge dikey elektrikli fırının deney düzeneği ve kristali büyütme için sıcaklık değerleri [78].

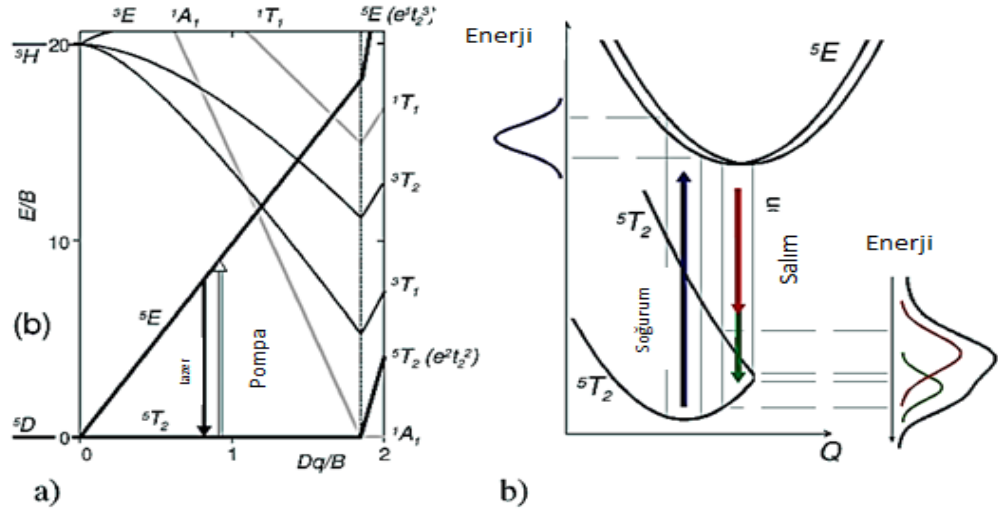
2.1.2 Cr^{2+} katkılı ZnSe

Cr^{2+} iyonları tetrahedral bölgelerde II-VI ana sistemlere yerleştirilir. Bu bölgeler tersinim simetrisine sahip değildir ve yüksek osilatör şiddeti (yüksek kesitler) ve tipik olarak birkaç mikrosaniyelik kısa bir ömür ile karakterize edilir. Tetrahedral bölgelerdeki Cr^{2+} iyonlarının diğer ayırt edici özelliği, optik geçişlerin kızılötesine yerleştirilen düşük kristal alan yarılmasıdır. Yukarıdaki kristallerde bulunan Cr^{2+} iyonları en basit tek elektron konfigürasyonuna ($e^2t^2_2$) sahiptir. Tek beşli durum olarak, d^4 konfigürasyonuna sahip serbest iyonun 5D temel durumunun kristal alan yarılmasından iki düzey (5T_2 ve 5E) oluşur (Şekil 2.2). Daha yüksek durumların hepsi tekliler veya üçlüler formundadır. Üst durumdan uyarılmış durum soğurum (ESA) geçişleri spin yasaklıdır. Bu bütün yönleriyle $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 'nin tüm titreşimsel katı hal lazerleri arasında en yüksek kazançla sahip olmasına olanak tanır ve oda sıcaklığında verimli geniş bantlı işletim sağlar.

Sonuç olarak, Cr^{2+} katkılı II-VI lazerleri, $2\text{-}4\text{ }\mu\text{m}$ 'lik dalgaboyu bölgelerine erişim sağlar ve olası en yüksek verimde düzgün ayarlanabilirlik sergiler. Ayrıca Watt seviyesinde çıkış güçleri ve yarı iletken lazerler için genelde erişilmez olan dar spektral çizgi genişliği gösterir.

Bu guruba ait kristallerden biri olan $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, seramik formda da oda sıcaklığında verimli diyot pompalı sürekli dalgalı ve mod kilitli işletimi sergiler. Bu lazerler günümüzde söz konusu dalgaboyu bölgesinde muhtemelen maliyeti en basit ve etkin hafif kaynaklardır [84-86]. Krom iyonu katkılama işlemleri boyunca kristal (ZnSe) içinde yayınımlanabilir ve yayınım sürecinde konsantrasyon mevcuttur. Ortalama Cr^{2+} iyon konsantrasyonu 0.8×10^{18} - 66×10^{18} iyon/ cm^3 aralığındadır [22]. Yayınım için kısa bir açıklama aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$D(t) = D(0) \text{EXP}[-E_{ad}/k_B T] \quad (2.1)$$



Şekil 2.2: Tetrahedral konfigürasyonda Cr^{2+} iyonlarının enerji düzeyine yarılmalarının (a) konfigürasyon ve (b) diyagramları. Sadece iki beşli durum mevcuttur, E^5 ve T_2^5 lazer geçişleri içindir. Daha düşük düzeyin Jahn-Teller yarılmaları dikkate alınmalıdır (Şekilde üç dalın ikisi gösterilmektedir) [62].

2.1.3 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ materyal özellikleri

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kristalinin materyal özellikleri, lazerin karakterizasyonunun anlaşılması bakımından çok önemlidir. Bu özellikler Çizelge 2.1’de gösterilmektedir. Listelenen kristaller arasında $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kristali, oldukça iyi mekanik ve kimyasal kararlılık ve ısı iletkenlik ile birlikte [87] yüksek salım kesitini [88] birleştiren belirgin karakteristikler ile kendini gösterir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ materyali, safir gibi bazı materyallere kıyasla nispeten yüksek bir ısıl mercekleme parametresine sahiptir, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kristalinin mercekleme parametresi dn/dT ile gösterilir ve $dn/dT \leq 70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ olmak üzere safirde $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ civarında olan değerden daha büyüktür.

Ancak örgü şeklinde uyarılmış durum soğurumu parazitli süreçlerin bulunmayışından dolayı genel olarak düşük ısıl yük ile dengelenir [89-92]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kristalinin örgü sabiti, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ gibi başka materyallerden farklıdır, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

kristalinin bant aralığı 2.8 eV'dir ve CdSe kristalinin 1.7 eV'lik bant genişliğinden daha küçüktür, diğer materyal özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

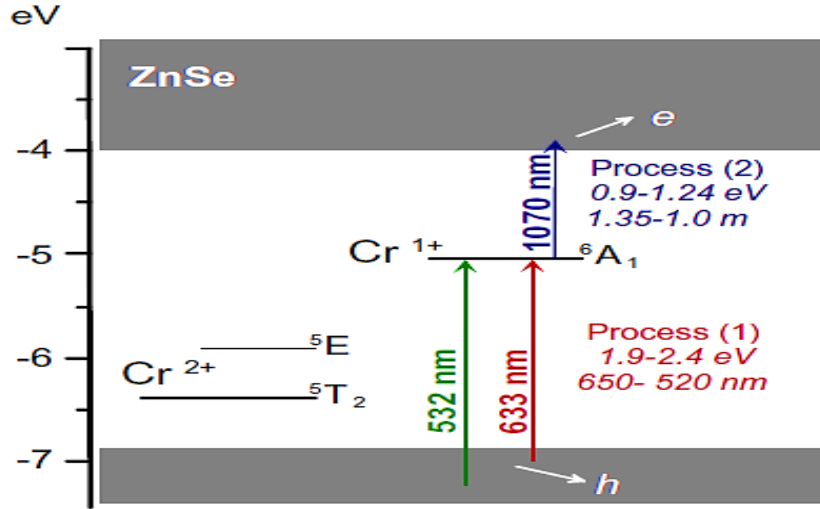
Çizelge 2.1: Cr²⁺ katkılı ZnSe lazer kristalinin materyal özellikleri.

	ZnSe
Isıl iletkenlik (W/m°C)	18
Isıl genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	7.3
Saydamlık aralığı (µm)	0.5-20
Bant aralığı (eV)	2.8
Isıl mercekleme (dn/dT(10 ⁻⁶ /°C))	70
Sertlik (knoop)	120
Kristal yapısı	Cubic
Üçüncü dereceden doğrusalsızlık n ₂ (10 ⁻²⁰ m ² /W)	170 (at 1.8µm)
Kafes sabiti (Å°)	5.67
İkinci dereceden doğrusalsızlık (pm/W)	30
Kırılma indisi (I _{las})	2.45

2.2 Cr²⁺:ZnSe Orta Kızılötesi Lazerinin Mekanik Ekstraksiyonu Ve ZnSe'nin Geçiş Metali ile Katkılanması

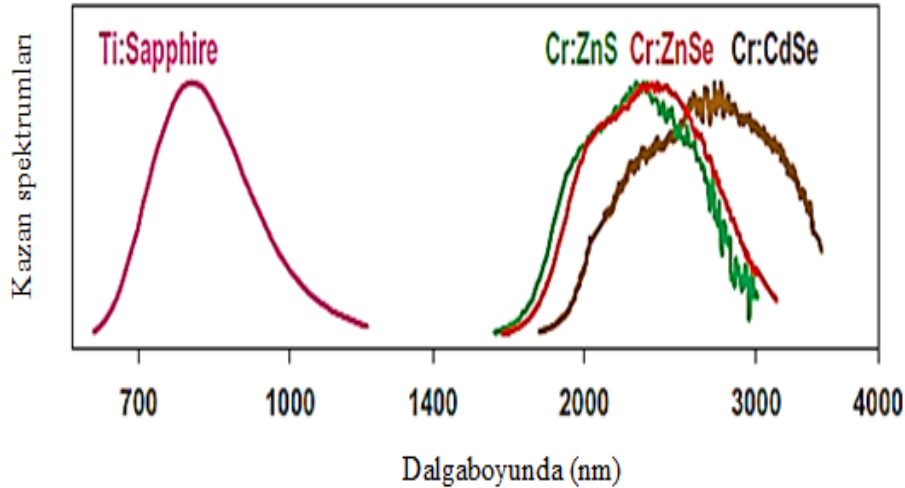
2.2.1 Cr²⁺:ZnSe spektroskopisi

Cr²⁺ (d⁴) iyonunun ZnSe yarı iletken kristal bileşenindeki spektroskopik özellikleri 1960'lardan itibaren [1-5] ve daha sonra 1970-1980'lerde [93-99] kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Lazer materyalleri olarak Cr²⁺ katkılı kalkojenürlerin ilk kapsamlı spektroskopik incelemesi, soğurum ve salım kesitlerinin ölçümü [100, 101] gerçekleştirilmiştir. Cr:ZnSe kristalinde çoklu temel durum terimi T₂⁵ içeride 0.46 eV'deki yasaklı aralığı kısıtlamaktadır [81]. Değerlik bandının sınırındaki durum Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

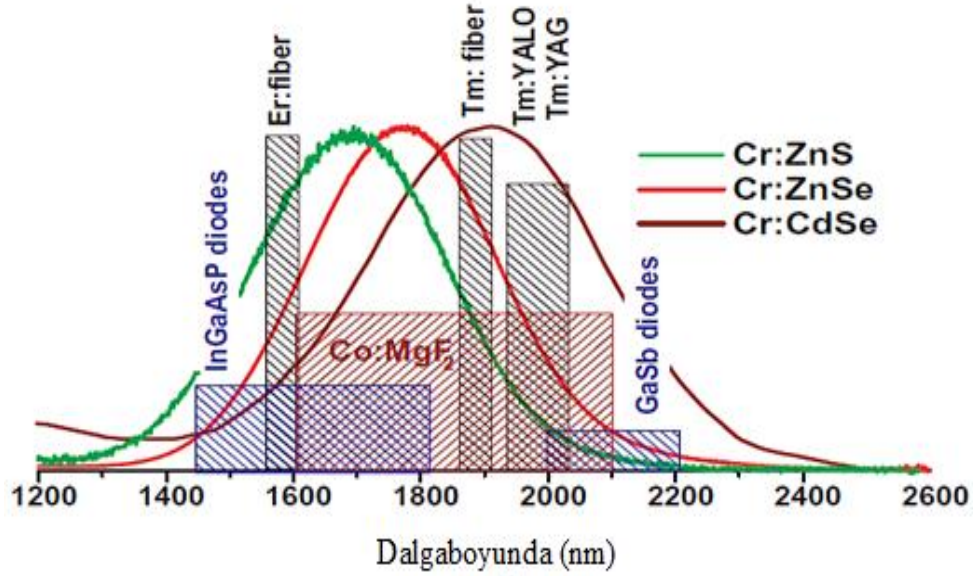


Şekil 2.3: Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci [81].

Cr^{2+} iyonunun ZnSe kristalindeki salım spektrumları ve soğurum spektrumları sırasıyla Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmektedir. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 'de $1.8 \mu\text{m}$ 'ye [2-4] yakın ortadaki geniş soğurum bandı, temel durum T_2^5 ile uyarılmış durum E^5 arasındaki geçişe karşılık gelir ve bu sistemde sadece spin izinli geçiştir. Paralel olarak, 2-3 μm arasındaki geniş bant ikili puls salımı, E^5 ve T_2^5 durumları arasındaki parite yasaklı ve ancak spin izinli elektron geçişine yansır [102-106].



Şekil 2.4: Cr^{2+} katkılı II–VI ortamları için kazanç spektrumları. Ti:safir kristalinin kazanç spektrumu karşılaştırma için verilmiştir [6].



Şekil 2.5: Cr^{2+} katkılı II-VI ortamları için soğurum spektrumları ve olası pompa kaynakları [81].

Laporte geçiş kuralına göre, d-durumları arasındaki elektrik dipol geçişlerinde parite yasaklıdır [107], bu nedenle farklı pariteye sahip d ve p orbitalleri karışık hale gelebilir. Sonuç olarak geçişler kısmen elektrik dipol izinli hale gelebilir, bu durumda geçişler, soğurum ve salım kesiti Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi olacak şekilde yüksek osilasyon şiddeti ile karakterize edilir.

Çizelge 2.2: Cr^{2+} katkılı lazer materyallerinin spektroskopi ve lazer parametresi.

	ZnSe	$\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$
Puls salım kesiti (10^{-20}cm^2)	90	39
Puls λ_{em} (nm)	2450	780
Puls soğurum kesiti (10^{-20}cm^2)	87	6.5
Puls λ_{abs} (nm)	1780	500
Mod kilitli çıkış gücü (mW)	80	>1 W
Diyot pompalaması	Var	Yok

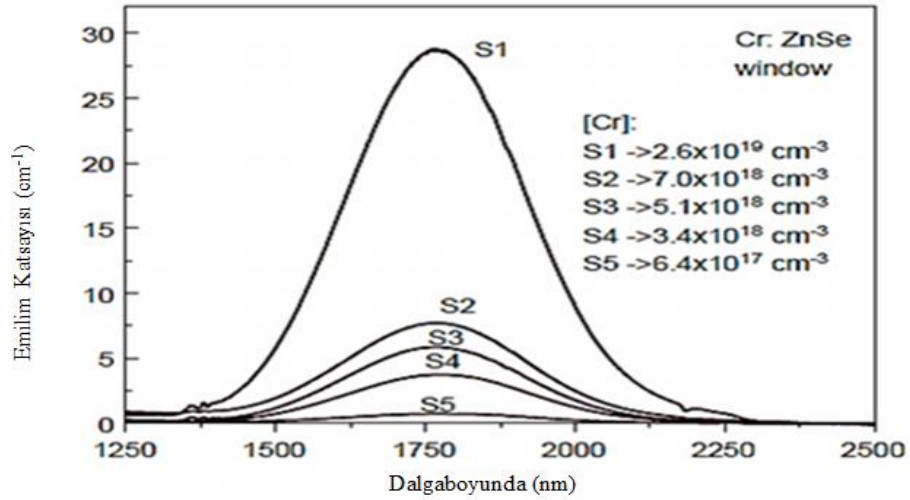
Oktahedral koordinasyonlu Ti^{3+} katkılı safirin kesiti, tetrahedral koordinasyonlu Cr^{2+} katkılı ZnSe’nin kesitinden küçüktür. Karşılık gelen çizgilerin, hem geçişin titreşimsel doğası, hem de dahil olan her iki düzeyin Jahn-Teller etkisinden dolayı ilaveten yarılmaları yüzünden geniş olduğu mutlaka dikkate alınmalıdır [108-110]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ temel durumunun ve uyarılmış durumunun Jahn teller yarılmalarının sırasıyla 340 cm^{-1} ve 40 cm^{-1} olduğu tahmin edilmektedir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ’nin puls salım kesiti $9 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ’nin puls soğurum kesiti ise $87 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ ’dir [100].

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ temel durumunun ve uyarılmış durumunun Jahn teller yarılmasının sırasıyla 340 cm^{-1} ve 40 cm^{-1} olduğu tahmin edilmektedir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin puls salım kesiti $9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin puls soğurum kesiti ise $87 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'dir [100].

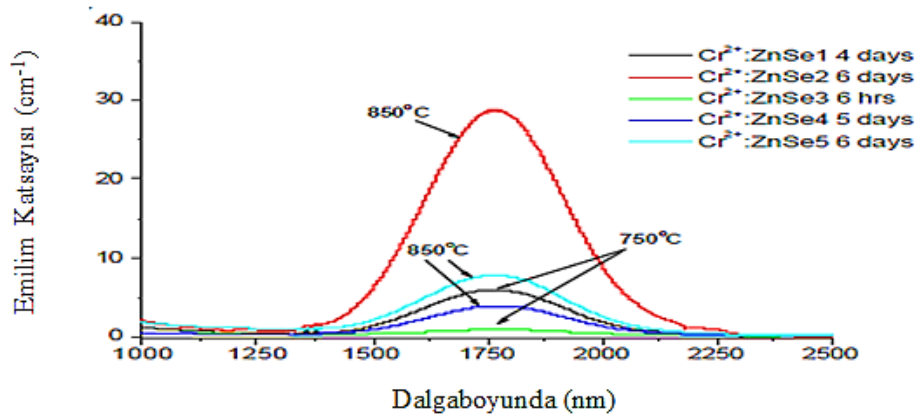
Salım ömrü birçok araştırmacı tarafından (τ) ile gösterilmektedir. Bunların çoğu, çeşitli kalkojenürlerdeki Cr^{2+} ömrünün mikrosaniye aralığında olduğunu ve $\sim 300 \text{ K}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda sabit olduğunu bildirmiştir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ışıyım ömrü $8 \mu\text{s}$ 'dir [16]. Bu ömür sıcaklığa bağlıdır, sıcaklık arttıkça ömür artar. Sıcaklık 4 K ile 300 K aralığında değişirse ömür sırasıyla $5 \mu\text{s}$ ile $8 \mu\text{s}$ aralığında değişir. 4 K ile 300 K arasındaki ömür ölçümü daha karmaşıktır, çünkü ömür, Jahn-Teller yarılmasından dolayı [108-110], geri soğurum veya karmaşık çoklu yapı arası etkileşim yüzünden açık değildir.

Son zamanlarda çoğunlukla çok kristalli ve ayrıca tek kristalli $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kristalleri için kapsamlı ömür ölçümleri gerçekleştirilmiştir [111-113]. Son yapılan çalışma sadece 77 K 'de $5.4 \mu\text{s}$ 'den 300 K 'de $5.6 \mu\text{s}$ 'ye doğru ömür artışı göz ardı edilmiştir. Bu sonuçlar, benzer $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ araştırmalarıyla da korelasyon halindedir ve Cr^{2+} ömrünün konsantrasyonla baskılandığı açıklanmıştır. Çok kristalli yapıların oda sıcaklığında ömrü $6.5 \mu\text{s}$ 'ye yakındır ve tek kristalli yapıların oda sıcaklığında ömrü $5.5 \mu\text{s}$ 'ye yakındır [114, 115]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ pencereleri için oda sıcaklığında çok kristalli soğurum ve salım özellikleri bir arada gösterilir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ yayılım faktörlerden biridir ve bu lazer işlemlerinde önemli bir role sahiptir.

Çinko Selenür 850°C 'lik yüksek bir sıcaklıkta CrSe tozu ile yayımlı katkılanır ve $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ civarında bir konsantrasyon elde edilir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için soğurum bandının merkezi 1760 nm 'ye yakındır ve merkezi salım dalgaboyu yaklaşık 2100 nm 'dir, salım bandı ise $2000\text{-}3000 \text{ nm}$ 'ye yakındır. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin rezonans genişliği 500 nm 'dir [116]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ penceresi için puls soğurum katsayısı, farklı konsantrasyon ile birlikte farklıdır (Şekil 2.6). Soğurum; sıcaklık ve yayılım süresi ile ilişkilidir [117], $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin arka plan soğurum spektrumları Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Yayınım katkılı Cr:ZnSe pencerelerinin, Cr konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak IR soğurum spektrumları, farklı numuneler Cr için konsantrasyonları [116].



Şekil 2.7: Cr²⁺:ZnSe’de zamanın bir fonksiyonu olarak soğurum spektrumları [108].

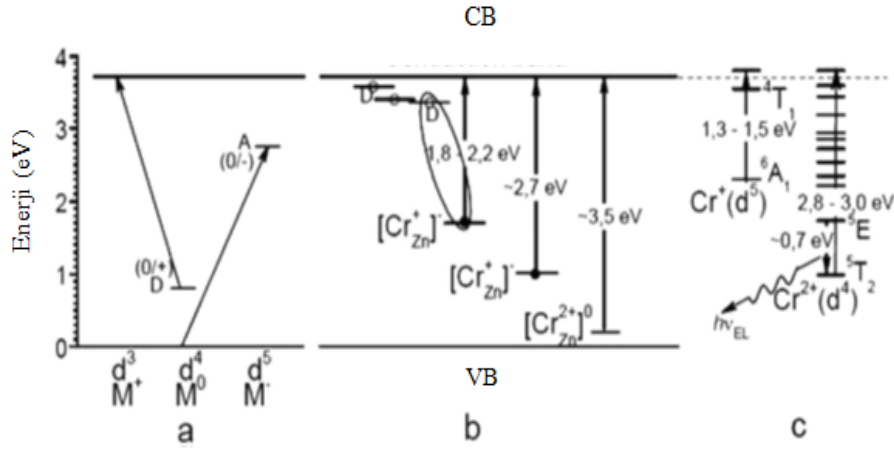
2.2.2 ZnSe filminde krom safsızlığı

Cr, spektroskopik özellikler bakımından önemli olduğu üzere, ZnSe kristal bileşiğine genelde Cr²⁺ yer değiştirme iyonu (3d⁴ konfigürasyonu) olarak ZnSe’ye dahil olur. Cr²⁺ iyonu Cr⁺ (3d⁵ konfigürasyonu) haline gelir, bu süreç, Cr²⁺ iyonlarının bir elektron yakalaması anlamına gelir. Cr²⁺ → Cr⁺ fotolüminesanı elektron paramanyetizma rezonans deneyi ile ortaya koyulmuştur, bu süreç ZnSe dışında diğer II-VI bileşiklerinde de ortaya çıkar [118-125].

Spektrumlar yapının fotoiletkenliğine bağlıdır [126, 127]. Cr⁺ ve Cr²⁺ iyonlarının sayısı birbirine bağlıdır, her iki iyon da Cr konsantrasyonu ile artmaktadır. Cr:ZnSe’de uyarılmış durum (E⁵) ve temel durum (T₂⁵) arasında lazer geçişi meydana gelir; bu düzeyler, ZnSe yarı iletkeninin tetrahedral kristal alanında

yarılan Cr^{2+} D^5 durumlarından oluşur. T_2^5 üçlü yarılmaması ve E^5 ikili yarılmaması, bir birleşik Jahn-Teller etkisi ve spin yörünge etkileşimi altında görülür [128, 129]. Fonon optik bantlarının deseni normalde Gauss tipidir. Cr katkılı ZnSe’de, katkılama işleminden sonra, Cr iyonlarının enerji düzeyleri ZnSe bant aralığında kayar, çünkü ZnSe kristal alanı iyonların enerji düzeylerini etkiler.

Geçiş metali (Cr^{2+}) safsızlığı ile katkılanmış ZnSe bileşiklerinin enerji düzeyi şeması çıkartılır, akabinde safsızlık düzeyleri D ile gösterilen verici durumu ve A ile gösterilen alıcı durumu şeklinde sınıflandırılır. Her iki durum da, bir elektronun (e) ve oyuğun (h) nötr geçiş metali safsızlık merkezinden (M^0) oluşan izovalan tıkaç tarafından yakalanması sonucu ZnSe kristalinin bant aralığında ortaya çıkar. D ve A enerji düzeyi iletim bandına göre farklıdır. $M^0 \rightarrow M^-$ değişimi gerçekleşir, başka bir ifadeyle $d^n \rightarrow d^{n+1}$ (Cr^{2+} iyonu için $n=4$) konfigürasyon değişimi gerçekleşir; bu süreç, $0/-$ ile gösterildiği üzere, değerlik bandından alıcı düzeyine (A) bir elektron geçişini ifade eder. $M^0 \rightarrow M^+$ ($d^n \rightarrow d^{n-1}$) değişimi gerçekleşir, bu süreç, $0/+$ ile gösterildiği üzere, verici (D) düzeyinden iletim bandına bir elektron geçişini ifade eder; her iki süreç de Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8: ZnS bant aralığında Cr ile ilgili enerji düzeylerinin şeması; (a), (b) ve ayrıca (c) Cr^+ ve Cr^{2+} iyonlarının 3d düzeyleri [55].

2.2.3 ZnSe yığına katkılanan Cr^{2+} iyonunun uyarım mekanizması

Cr^{2+} iyonu ZnSe yarı iletkenine katkılanır. Kristal enerjisi, krom iyonlarının enerji düzeylerini etkiler, ZnSe kristal alanı önceki bölümde tarif edildiği üzere krom iyonunun düzeylerini yarar. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer işlemlerinde uyarım mekanizması farklı durumlarda ortaya çıkar. Cr^{2+} iyon düzeyi uyarılmış duruma (E^5) ve temel duruma (T_2^5) ayrılır. Düzeyler E^5 ve T_2^5 arasındaki uyarım salımı, merkezler arası uyarım olarak adlandırılır. Düzeyler E^5 ve T_2^5 arasındaki salım dalgaboyu orta kızılötesi

bölgededir [130]. ZnSe kristalindeki Cr^{2+} iyonunda aşağıdaki reaksiyonlar aracılığıyla bantlar arası uyarım meydana gelir (Şekil 2.9). A-Bağlanma uyarımı, bu durumda enerji kabuk içi uyarımdan dolayı safsızlık durumuna aktarılır ve $(\text{Cr}^{2+})^*$ ile gösterilen bağlanma uyarımı olarak adlandırılır. Bu durumda herhangi bir iyonlaşma söz konusu değildir (Şekil 2.9) [131]. B-İkinci süreç geçiş metali uyarımı ile ilgilidir, bu durumda enerji kabuk içi uyarımdan $(\text{Cr}^{2+})^*$ dolayı verici-alıcı çiftinden geçiş metale (Cr^{2+}) aktarılır ve iyonlaşma bu durum için geçerli değildir [132]. C-Üçüncü süreç Auger tipi süreç olarak adlandırılır, bu süreçte bir Auger tipi süreçten dolayı Cr^{2+} iyonlaşması meydana gelir, akabinde bir delik veya elektron iyonlaşmış krom tarafından tekrar yakalanır ve A durumunda olduğu gibi orta kızılötesi fotoluminesans meydana gelir (Şekil 2.9c) [133]. D-Dördüncü süreç taşıyıcı tuzaklamasıdır. Bu süreç, iyonlaşmış safsızlıklar aracılığında gelişen taşıyıcı tuzaklamasının, Cr^{2+} safsızlığının yüksek düzeyde uyarılmış durumlarından biri boyunca ve dolayısıyla krom iyonlarının kabuk içi salımından dolayı devam etmesi ile ilgilidir (Şekil 2.9d) [131]. E-Doğrudan uyarım, ZnSe içindeki Cr^{2+} iyonunun darbe yüklü taşıyıcıları tarafından gerçekleştirilir.

$$h\nu_g = e_{\text{CB}}^- + e_{\text{VB}}^+ \quad (2.2)$$

(D) süreci ile ilgili bazı ilave yönergeler aşağıdaki reaksiyonlarda açıklanmaktadır. Nötr Cr^{2+} bir elektronu yakalar ve sonrasında yarı negatif yük durumuna geçer.



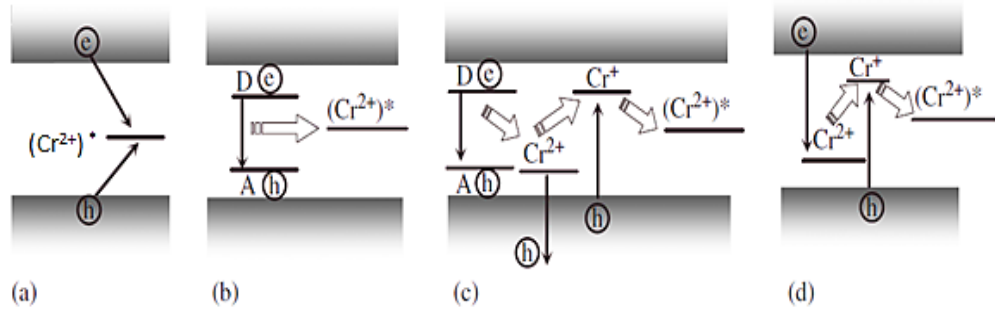
$(\text{Cr}^+)^-$ negatif yükü, oyuk gibi bir pozitif yükü çekmeye çalışır ve yeni bir reaksiyon oluşturur.



Bu reaksiyonundan (2.4) sonra iyon uyarılmış $(\text{Cr}^{2+})^*$ hale gelir ve akabinde uyarılmış $(\text{Cr}^{2+})^*$ iyonu orijinal durumuna geri dönmek için bir foton salar; aşağıdaki reaksiyonda olduğu gibi.



Bu reaksiyonu (2.5) orta kızılötesi bölgede dalgaboyu salımı yapar. Yukarıdaki reaksiyonlar (2.2, 2.3, 2.4) oyuk yakalama için de geçerlidir, yani oluk yakalama süreci, elektron yakalama süreciyle benzerdir [134].



Şekil 2.9: Cr^{2+} ve Fe^{2+} iyonlarının kabuk içi orta kızılötesi salımının, (a) sınırlı eksitondan enerji transferi; (b) komşu DAP'den enerji transferi (ET); (c) bir üç merkezli Auger tipi yeniden birleşim (TCAR) sürecinden kaynaklanan TM^{2+} iyonlaşması; (d) iyonlaşmış safsızlık aracılığıyla taşıyıcı tuzaklaması üzerinden bantlar arası uyarımının ana mekanizmalarını gösteren şematik diyagram [134].

Başka bir kısım uyarım, optik alt bant uyarımıdır (532 nm). Bu uyarım, fonon-iyonlaşma geçişi olarak bilinir. Optik alt bant uyarımı, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için fonon-iyonlaşma geçişi üzerinden orta kızılötesi lazer üretimine yönelik mekanizmalardan biridir [132, 135]. Bu geçiş çoğunlukla çarpan fotonun enerjisi ile ilgilidir. Oyuk valans bant'da ~ 1.9 eV enerjili optik uyarım ile serbest bırakılabilir, bu durumda Cr^{2+} iyonu Cr^+ durumuna geçer. Optik uyarım enerjisi ~ 0.8 eV'den büyük ise Cr^+ iyonu iletim bant'da bir elektron salar ve yüksek düzeyde uyarılmış bir durumda $\text{Cr}^+ \rightarrow (\text{Cr}^{2+})^*$ dönüşümü gerçekleşir. Her iki optik uyarım enerjisi de Şekil 2.10b'de açıklanmaktadır. Cr^{2+} alıcı merkezinin enerjisi " E_a " aşağı yönde artar, vericinin enerjisi " E_d " ise yukarı yönde artar; Şekil 2.9.

2.3 eV (532 nm) enerjili bir gelen foton, aşağıdaki reaksiyonda açıklandığı üzere, Cr^{2+} iyonunun Cr^+ şeklinde iyonlaşmasını sağlayarak valans bant'da bir oyuk serbest bırakılır (Şeki 2.9a).



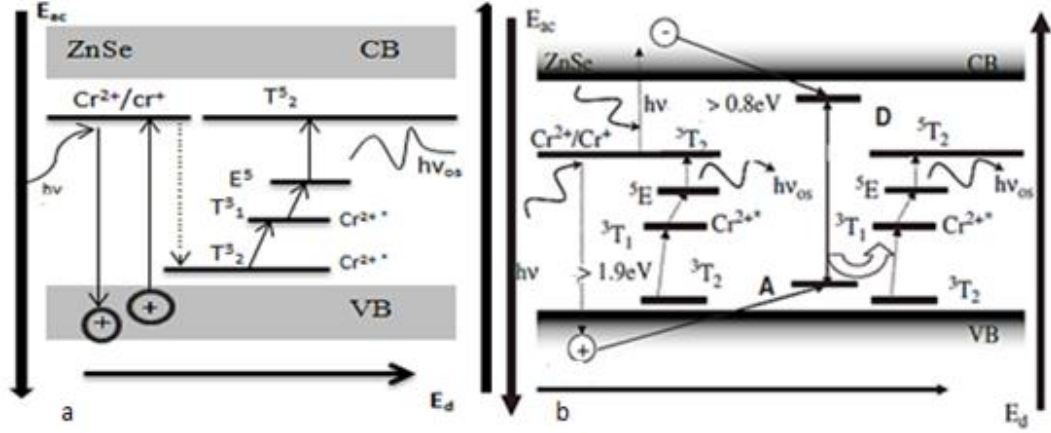
Bir Cr^+ iyonu bir oyugu çeker ve reaksiyon gerçekleşir.



Yüksek uyarılmış $(\text{Cr}^{2+})^*$ durumu ve orta kızılötesi foton salımı aşağıdaki reaksiyonda gösterilir.



Bir sonraki ikinci pompa iyonlaşması $\text{Cr}^+ \rightarrow \text{Cr}^{2+}$ dönüşümüne yol açar (Şekil 2.10b). İkinci pompa, aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere ikinci orta kızılötesi lazer eşiği sağlayabilir.



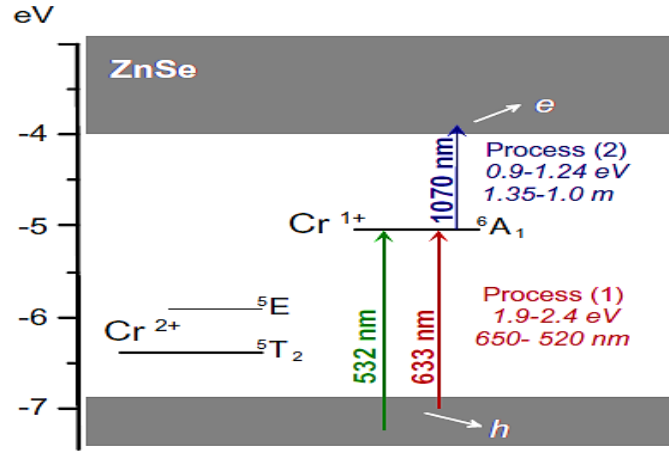
Şekil 2.10: İyonlaşma geçişleri üzerinden Cr^{2+} alt bant optik uyarımını gösteren diyagram: (a) Tek foton etkileşimi üzerinden iyonlaşma. (b) İki pompa fotonu ile gerçekleşen ve iki orta kızılötesi fotonunun oluşmasını sağlayan çok adımlı iyonlaşma [134].

2.2.4 Yük transfer süreci

Kristallerin yarı iletken doğası, yük transferi süreçlerinin fotorefraktif olayına yol açan serbest taşıyıcılar üretilmesi anlamına gelir. Oktahedral bölgelerin kararlılığı tetrahedral bölgelerinden daha fazladır [136]. Kovalent bağlanma tetrahedral bölgelerde daha çok rol alır, geçiş metali iyonlarında bu bölgelerde sıkça gözlemlenen çoklu değerlik durumlarına yol açar ve yük transferi süreçlerinin ihtimalini yükseltir. Oktahedral bölgelerde dahili geçiş ($e \leftrightarrow t^2$) önemli değildir. Yük tetrahedral bölgede bu tip bir uyarım için safsızlık merkezi orbitalinden tekrar dağıtılabilir [137, 138]. Dahili geçiş, ZnSe yarı iletkeninde tetrahedral koordinasyonlu Cr^{2+} iyonu için geçerlidir. Yük transfer süreci lazer performansı için çok önemlidir. Yük transfer süreci, tetrahedral bölgede aktif iyon içeren $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin elde edilmesi için oldukça uygundur. Bu lazerin ışıma salımı 2.5 μm civarındadır. Fotorefraktif doğa olayı, diğer geçiş metali katkılı kalkojenür (II-VI) bileşiklerinde (örneğin $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$) meydana gelen fotorefraksiyon mekanizmasına benzer şekilde Cr iyonuna yük transferini içerir [139]. Yük transfer süreci aşağıdaki formüller ile gösterilir.



$h\nu_B$: değerlik bandında bir oyuktur. e_{CB} : iletim bandında bir elektrondur. Serbest taşıyıcılarda değerlik bandından iletim bandına doğru iki adımlı elektron geçişleri $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ civarındaki yüksek krom konsantrasyonlarında gözlemlenir [144, 145]. ZnSe bant aralığındaki Cr^{2+} ve Cr^{1+} enerji düzeyleri iletim bandı kenarının altında Cr^{1+} için 1.24 eV ve Cr^{2+} için 2.26 eV'dir [140]. Birinci süreçte (2.9) yük transferi, gelen foton enerjisinin 1.9-2.4 eV olması halinde gerçekleşir. Bu süreç aktif Cr^{2+} iyonlarının sayısını azaltır (Şekil 2.11). İkinci süreç, $\sim 1 \mu\text{m}$ 'den kısa uyarım altında, Cr^{1+} iyonundan bir elektronun iletim bandına salınması ve akabinde Cr^{1+} iyonunun $[\text{Cr}^{2+}]^*$ haline gelmesi yoluyla gerçekleşir ve burada $[\text{Cr}^{2+}]^*$, yüksek düzeyde uyarılmış hal olarak adlandırılır [140, 141]. Nihai durumda iki süreç Cr^{2+} ve Cr^{1+} kızılötesi bölgede $2.4 \mu\text{m}$ 'ye yakın bir dalgaboyunun elde edilmesini sağlar [142].



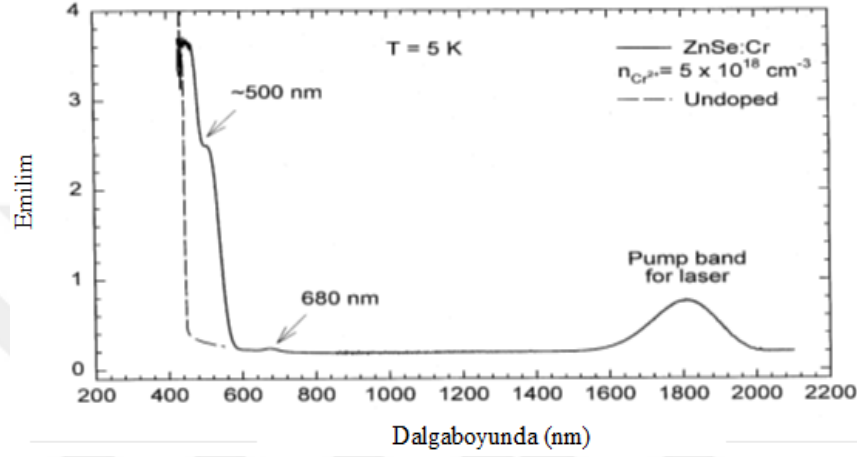
Şekil 2.11: Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin Cr:ZnSe bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci [81].

2.2.5 Yayınım katkılı Cr^{2+} :ZnSe soğurumu ve fotolüminesansı

Cr^{2+} :ZnSe, kızılötesi bölgede verim veren oda sıcaklığında ayarlanabilir katı hal lazeri için iyi bir adaydır. Metal katkılı yarı iletken, yeni bir lazer ortam çeşidinin elde edilmesi için en iyi fırsattır [143]. Tetrahedral ve oktahedral koordinasyonlar, iyon katkılı kalkojenür lazer ortamlarında farklı bir kristal alan yarılmasına sahip iki faktördür ve oktahedral koordinasyonun kristal alanı tetrahedral koordinasyondan daha geniştir [144]. Cr^{2+} :ZnSe, ısı ve mekanik özellikler gibi birçok iyi özelliğe sahip olup ve orta kızılötesi bölgedeki lazer ortamları için ilgi çekicidir [145].

Cr^{2+} :ZnSe, lazer işletimi için mükemmel olarak tetrahedral koordinasyonludur. Bu lazer ortamları ile ilgili bir faktör olan kuantum verimi yüksek bir değere sahiptir ve Cr^{2+} :ZnSe için yaklaşık %100 olarak kestirilmektedir [145]. Diyot pompalama lazer

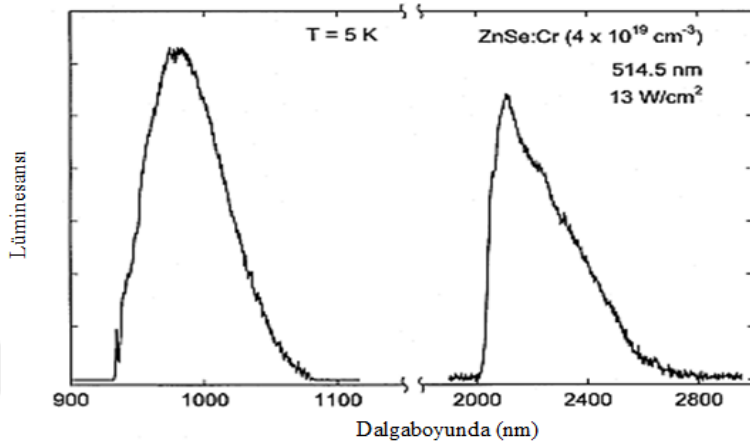
kullanıldığında $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ soğurum piki $\sim 1.8 \mu\text{m}$ 'dir [146]. Numune, önceki bölümde tarif edildiği üzere fiziksel buhar aktarımı (PVT) ile hazırlanmıştır. Cr^{2+} konsantrasyonu puls soğurum katsayısı ile ilişkilidir, puls soğurum katsayısı α_p ile gösterilir ve şu formül ile hesaplanır: $\alpha_p = 0.144 \times 10^{-17} n_{\text{Cr}^{2+}}$. Bu formül, α_p katsayısının krom konsantrasyonu ile orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Bunların yanı sıra konsantrasyon sıcaklık ile ilişkilidir ve dolayısıyla soğurum Şekil 2.12'de gösterildiği üzere çeşitli sıcaklıklarda hesaplanabilir.



Şekil 2.12: 5K'de $\text{ZnSe}:\text{Cr}^{2+}$ (düz çizgi) ve katkısız ZnSe (kesikli çizgi) ile ölçülen temsili soğurum spektrumları Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci Cr^{2+} ve Cr^{1+} düzeylerinin $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ bant aralığındaki konumları. Her iki yük transferi süreci [150].

Şekil 2.12'ye göre katkılı ve katkısız $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ arasında birçok farklı desen ortaya çıkmaktadır ve bu şekilde ayrıca konsantrasyona ve sıcaklığa karşılık gelen puls soğurum gösterilmektedir, yine Şekil 2.12'de gösterildiği üzere 5K'de üç soğurum bandı ortaya çıkmaktadır. Lazer işletimine yönelik ilgili soğurum, $1.8 \mu\text{m}$ 'ye civarında puls yapan geniş bant $B_2^5 (T_2^5) \rightarrow A_1^5 (E^5)$ olmaktadır [147]. 500 nm civarında gözlenen kuvvetli bir bant aralığı altı soğurum foton üretim süreci ile ilişkilidir: $\text{Cr}^{2+} + e_{\text{VB}} \rightarrow \text{Cr}^{1+} + h_{\text{VB}}$; bu soğurum bandı için 514.5 nm'lik uygun bir pompaya ihtiyaç duyulur [148]. 440 nm'ye yakın katkısız soğurum, son soğurum puls 680 nm'ye yakındır ve kuvvetli bir soğurumdur [149]. $T_2^5 (D^5) \rightarrow T_1^3 (H^3)$ dahili geçişi 680 nm'dir. Bu geçiş; geçiş süreçlerinde ortaya çıkan puls soğurumlardan biridir [149, 150]. Fotoluminesans, orta kızılötesi bölgedeki $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinde ilgi çekici bir kanumdur, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin Şekil 2.12'de gösterildiği üzere fotoluminesans üretmek için pompalamayı baskılaması gerekir. Şekil 2.13'ye göre, fotoluminesans iki puls içerir, birinci puls $0.9 \mu\text{m}$ civarındadır, ikinci puls ise

yaklaşık 2.2 μm 'dedir. İkinci puls fotolüminesans bant merkezi olarak adlandırılır, her iki değer de $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer işletiminde fotolüminesans salımı için iyidir. Doğrudan 680 nm soğurum bandına pompalanan uyarım yoluyla 5K'de de fotolüminesans gözlemlenmiştir. 678 nm'lik uyarım hem 0.980 μm hem de 2.2 μm ile sonuçlanmıştır. Fotolüminesans yoğunluğu, 514.5 nm'lik eşdeğer bir foton akısı ile üretilene kıyasla yaklaşık 10 kat daha düşüktür [150].



Şekil 2.13: 5K'de ZnSe:Cr fotolüminesansı 0.98 ve 2.2 μm 'de salım bantları sergiler [150].

2.3 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ Esaslı Geniş Bant Orta Kızılötesi Katıhal Lazeri

2.3.1 Motivasyon

Kristal katıhal genel olarak fizik bilimini, özellikle lazer alanında geliştirmeye yönelik kapsamlı bir etkiye sahiptir. Bu çalışma, Cr^{2+} iyonu ile katılanmış kristal katıhal ZnS kullanılarak lazer ortamlarının büyütülmesi üzerine odaklanır ve bu tip bir lazer, iyon katkılı kalkojenür olarak bilinir. Lazer kaynak ortamlarından biri olan $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, spektrumlar, geniş bant ve bant genişliği gibi birtakım ilgi çekici karakteristiklere ve özelliklere sahiptir. Bu lazer birçok önemli uygulama alanına sahiptir. Bu uygulamalar, söz konusu lazerin son on yıl içerisinde gelişimi için en iyi sebeptir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ yüksek çözünürlük spektroskopisine sahiptir ve bu lazerin çıkış dalga boyu kızılötesi bölgesindedir, ancak bu çalışma oda sıcaklığında 2-5 μm 'ye odaklanır. Bu lazer, bir diyot pompalaması gibi baskılama pompası için gerekli olan sürecin başarılı bir şekilde tamamlanması için ayrıca “moleküler parmak izi” bölgesi olarak anılır. Çoğu moleküler soğurum çizgi aralığı orta kızılötesi bölgelerde yer alır (örneğin CO_2 , CO ve N_2O). $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin dar ayarlama aralığı oda sıcaklığında yaklaşık 1800 cm^{-1} 'dir [151]. Katıhal lazer ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$) ışını oda sıcaklığında kontrol edilebilir.

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ iyi kalitede kalır ve kapsamlı ayarlama aralığında bir dar çizgi genişliğine sahiptir. Bu lazer, verim ve kararlılık sağlar. Son olarak $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ tetrahedral yapıya ve geniş bir bant aralığına sahiptir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, oda sıcaklığında orta kızılötesi lazer kaynağı üretimi için iyi bir adaydır [152-154].

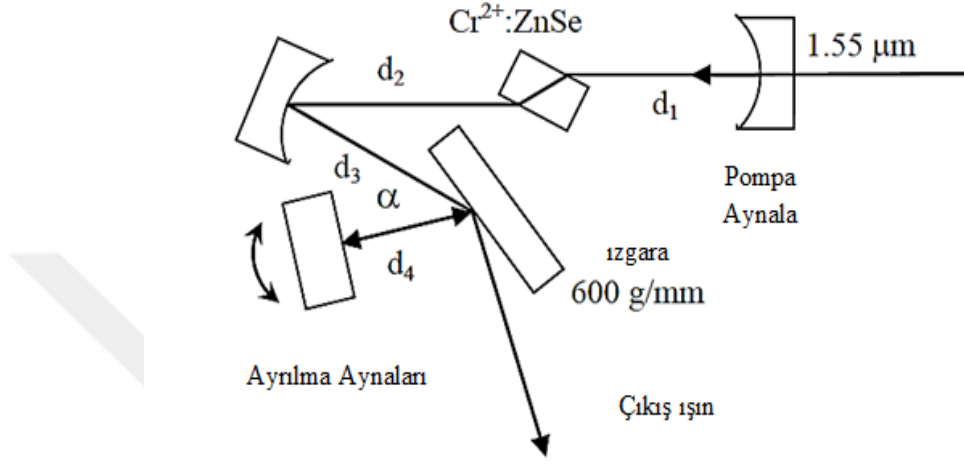
2.3.2 Bant genişliği dalgaboyu ölçeklendirme kuralı ve femtosaniye

Bant genişliği, lazer materyalinin ayarlanma ve kısa darbeler üretme kapasitesini belirleyen karakteristik spektrumlarından biridir. Bant genişliğinin birimi enerjidir, bant genişliği ($h\Delta\nu$) ile gösterilir ve bir üst durum ve bir alt durum arasındaki geçiş genişliklerinin toplamıdır. Dalgaboyu, geçiş enerjisi ($h\nu$) ile ters orantılıdır. Geçişin göreceli bant genişliği ($\frac{\Delta\nu}{\nu} = \Delta\lambda/\lambda$) kızılötesine doğru artar. Bant genişliği yarı logaritmik ölçek ile çizilir. $\Delta\lambda/\lambda$ oranı sabittir ve merkezi dalgaboyu lazer eşiğini dramatik düzeyde etkiler [155]. Eşikte gerekli pompa yoğunluğu için ölçeklendirme kuralı aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$I_{th} \propto 1/FOM \cdot 1/n_{QE} \cdot \Delta\lambda/\lambda_o \cdot n^2/\lambda_o^4 \quad (2.11)$$

n_{QE} : geçiş kuantum verimi, $n_{QE}=t/t_{rad}$ olarak tanımlanır; başarımlı ölçüsü (FOM-Figure Of Merit) lazerleme dalgaboyunun pompa dalgaboyunda soğurma katsayısına oranıdır. Yukarıdaki bağıntı, bant genişliği ve eşik güç yoğunluğunun hesaplanması bakımından faydalıdır. Pompa kaynağı mevcutken etkili geniş bant materyalini mümkün kılar [156, 157]. Yukarıdaki bağıntıda (2.11), (λ^4) önemlidir ve daha uzun dalgaboyu geçişi için eşik etkili bir şekilde azaltır. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ yüksek bir kuantum verimine ve FOM değerine sahiptir, bu sayede orta kızılötesi bölgesinde olmaktadır ve doğrudan diyot pompalaması yapılabilir. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ için (λ_o) $2.4 \mu\text{m}$ 'dir ve eşik yoğunluğu iki büyüklük mertebesi kadar farklıdır. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ darbe lazeri, 10 dönü optik çevrim civarında üretilebilir [158, 159]. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ ile üretilen ultra-kısa darbe bir sonraki bölümde açıklanmıştır. Bu çalışma, dual taraklı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer spektroskopisi için frekans ve zamanı tarif eder. Lazer frekans taramaları, kesin frekans ve zaman ölçümlerini kökten değiştirmiştir. Bir mod kilitli femtosaniye lazerinin düzenli darbe katarı, tam olarak darbe tekrar frekansına eşit aralığa sahip milyonlarca lazer moduna ait bir düzenli tarama spektrumunun elde edilmesini sağlayabilir. Piyasadan temin edilebilen lazer frekans taramaları artık kesin optik spektroskopi için rutin araçlar haline gelmiştir ve rastgele optik dalga şekillerinin sentezinde kullanılmaktadır.

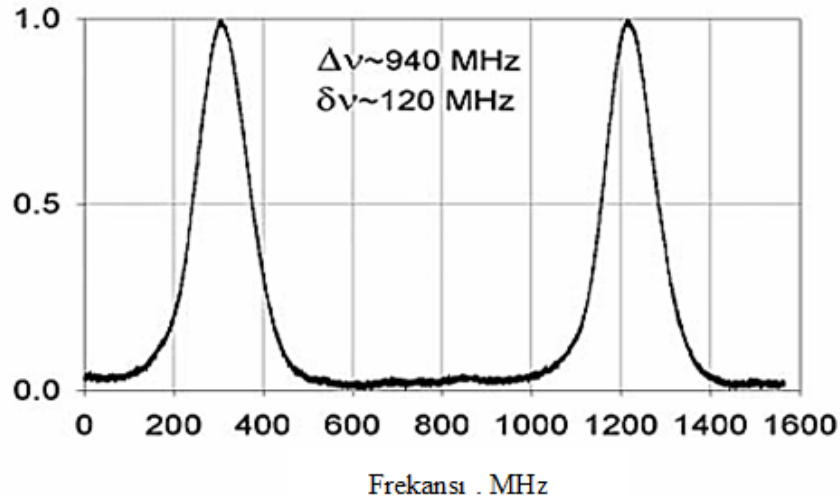
[170, 171]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ spektrumları için sürekli dalganın ultra geniş bant genişliği $2.5 \mu\text{m}$ 'de $\sim 135 \text{ nm}$ 'dir ve 200 nm genişliğinde $2400\text{-}2600 \text{ nm}$ bir çoklu çizgi sergiler. Ultra geniş banda katkı sağlayan birçok dalgaboyu çizgisi vardır. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin özel dağıtıcısı eşzamanlı olarak birçok dalgaboyunda işletilebilir, sürekli ultra geniş bandın çıkış spektrumları $2\text{-}3 \mu\text{m}$ civarındadır. Tek frekanslı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri Şekil 2.15'de gösterildiği üzere tekli uzunlamasına mod rejiminde işletilir.



Şekil 2.15: Kogelnik/Littman kovuğunu esas alan ayarlanabilir tek frekanslı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri [171].

Lazer tasarımı çok kompakttır, lazer kovuğu 10 cm 'dir, $R_2=50 \text{ mm}$ 'lik eğrilik yarıçapına sahip $R=25 \text{ mm}$ 'lik iki çukur ayna kullanılır, ızgara ise %50'lik altın yansıtıcı ile kaplı 600 g/mm 'den oluşur. Pompa ışını numuneye doğrudan 75° 'lik bir açıyla gelir, pompalama kaynağının dalgaboyu yaklaşık $1.55 \mu\text{m}$ 'dir, Kristalin soğurumu $\sim 70\%$ 'tir, boyutu $4 \times 8 \times 1 \text{ mm}$ olan numune termoelektrik soğutma birimine Brewster açısında yerleştirilmiştir, sıcaklık stabilizasyonu $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 'de sağlanmıştır. Lazerleme dalgaboyu kesin dalga metre ile kontrol edilmiştir.

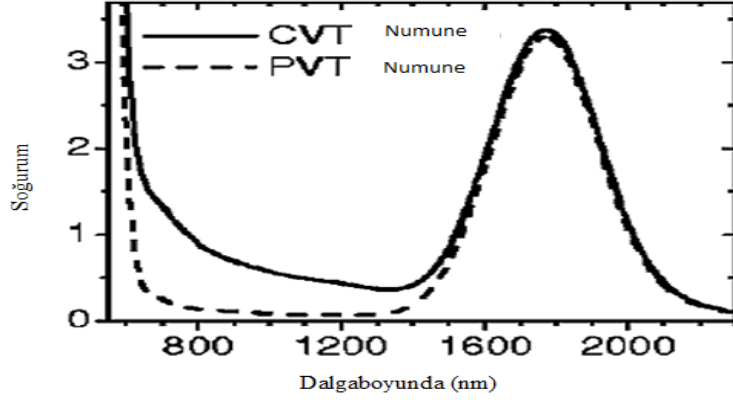
Lazerin çıktısı, taramalı interferometresi ile ekranda görüntülenir. Çizgi genişliği çıktısı 120 MHz 'dir. Ayarlama aralıkları $\sim 2.5 \mu\text{m}$ civarındadır. Çıkış gücü 156 mW kadardır (Şekil 2.16). Tek frekanslı çıkış lazeri, ızgara sıyırma açılarının düşük kırınım veriminden dolayı sınırlıdır.



Şekil 2.16: 160 mm bir FPI'den SLM çıkış spektrumunun girişim deseni. Spektrum çözünürlüğü, 7.7'lik interferometre inceliği ile sınırlıdır ve burada lazer çizgi genişliği üst sınırı 120 MHz'dir [171].

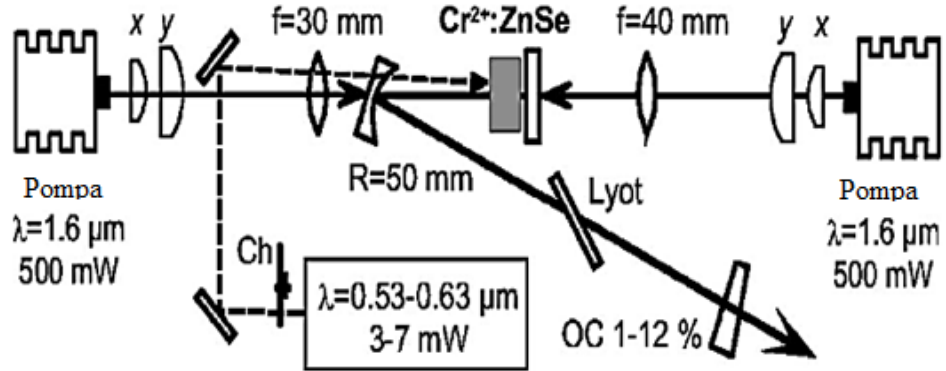
2.3.4 Diyot pompalaması ile ayarlanabilir sürekli dalgalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri (kapsamlı ayarlanabilir $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$)

Ayarlanabilir sürekli dalgalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ birçok önemli uygulamaya sahiptir. Bu lazer ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$), Cr^{2+} iyonu ile katkılanmış ZnSe kristalinden elde edilir. $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 'nin başka bir önemli avantajı ise kullanışlı bir şekilde ayarlanabilir ve diyot pompalı $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ lazer fikrini uygulanabilir kılan teknolojik olarak geliştirilmiş ve düşük maliyetli çok kristalli materyalin temin edilmesidir [172, 175]. Diyot lazeri pompası için iyi bir lazer kaynağıdır ve $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'yi pompalamak için kullanılır [174, 175]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, düşük uyarılmış durum soğurumu göz ardı edildiğinde, yüksek salım kesiti ($9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) gibi birçok ultra bant genişliği özelliğine sahiptir [176]. Sürekli dalgalı TEM_{00} $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 'nin çıkış gücü $\sim 1.7 \text{ W}$ 'dır ve ayrıca işletim ayarlanabilirliği $1.1 \mu\text{m}$ 'nin üzerindedir [174-179]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin ayarlanabilirliği diyot pompa kaynağı kullanıldığında oda sıcaklığında $3.5 \mu\text{m}$ 'nin üzerinde başlar, ancak lazerin tek aktarım modunda polarizasyonda optimum dalgaboyu 70 mW 'nin üzerinde $\sim 2.5 \mu\text{m}$ 'dir. Düşük güçlü görünür uyarım altında üst düzey lazer popülasyonundaki anlamlı değişimin deneysel gözlemine göre, lazer performansını etkileyen bazı faktörler, örneğin numunenin nasıl büyütüleceğini ve konsantrasyon oranı Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Farklı metodlara göre büyütülen Cr:ZnSe kristallerinin soğurum spektrumları [116].

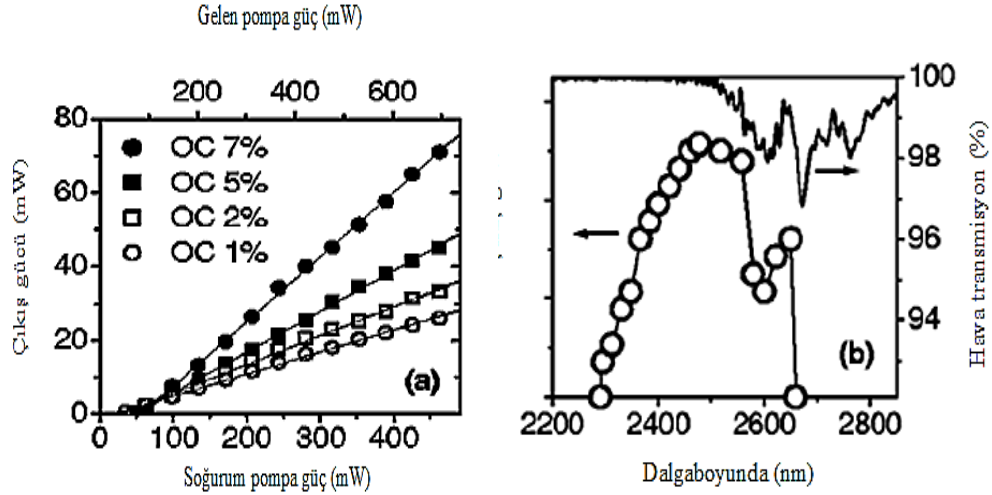
$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer düzeneği şunları içerir: tek kristal numunesi ($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$), $R=50$ mm eğrilik yarıçapında katlanan bir düz dikronik ayna, %1 ile %12 arasında değişen düz çıkış bağlaştırmacı, $1.6 \mu\text{m}$ 'de pompalama yapan ve her birinin gücü 500 mW olan iki lazer diyodu. İki mercek, numunenin sağ tarafına ve sol tarafına yerleştirilir. Her bir takımın odak uzaklığı sırasıyla 40 mm ve 30 mm'dir ve düzeneğin diğer kısımları Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Akabinde diyot pompası doğrudan numune üzerindeki nokta boyutuna odaklanır, pompa gücü oranı süreç esnasında tasarlanan silindirik mikro merceklerde sapmadan dolayı kayba uğrar, sürekli dalgalı lazer çıkışı Şekil 2.19'da %1'lik çıkış bağlaştırmacı ile gösterilir.



Şekil 2.18: Diyot pompalı Cr:ZnSe lazerinin şematik diyagramı. OC: çıkış bağlaştırmacı. Ch: kesici. Diyot: çift kırılmalı filtre [179].

Eşik gücü 30 mW'dir ve gelen güç (soğurma gücü) %7'lik OC ile birlikte 45 mW'dir, polarize TEM_{00} lazer çıkışı $\sim 71\text{mW}$ 'dir ve soğurma gücü 460mW'dir ve gelen güç 690 mW'dir, soğurma gücüne göre verimlilik eğimi %17.5'tir. Verimlilik eğimi gelen güce göre %11.5'tir. Çıkış gücü soğurma gücüne göre değişir, küçük soğurma gücü değerlerinde çıkış gücü çizgileri örtüşür (Şekil 2.22). Her bir çizgi

arasındaki mesafe çok küçüktür ve nanometre aralığına yakındır. Bu boşluklar Fabry-Perot rezonatörü kullanılarak genişletilebilir, akabinde bir çift boşluk kırılmalı filtre ile milimetre aralığına getirilir. Çıkış lazeri doğrusal polarize hale gelir ve nanometre aralığında dar bir tek spektrum çizgisinden oluşur (Şekil 2.22b). Lazer 350 nm üzerinden 2.3-2.650 μm aralığında sürdürülebilmiştir. Pompa ışını numuneye uygulanırken $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'de yük transferi meydana gelir [180-183]. Çıkış gücü, bir çıkış bağlaştırmacısı (OC) ile orantılıdır.



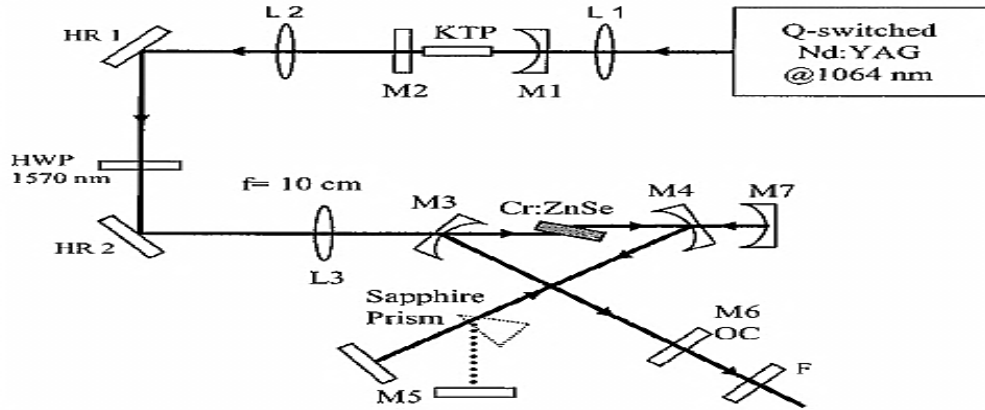
Şekil 2.19: Diyot pompalı Cr:ZnSe lazerinin çıkış karakteristikleri (a) ve (b) ayarlama eğrisi. (b) grafiğindeki gri çizgi, kovuk gidiş-geliş uzunluğuna göre normalleştirilen atmosfer soğurumunu gösterir [179].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ İçin Kızılötesi Bölgede Q-anahtarlama Ve Optik Pompalama

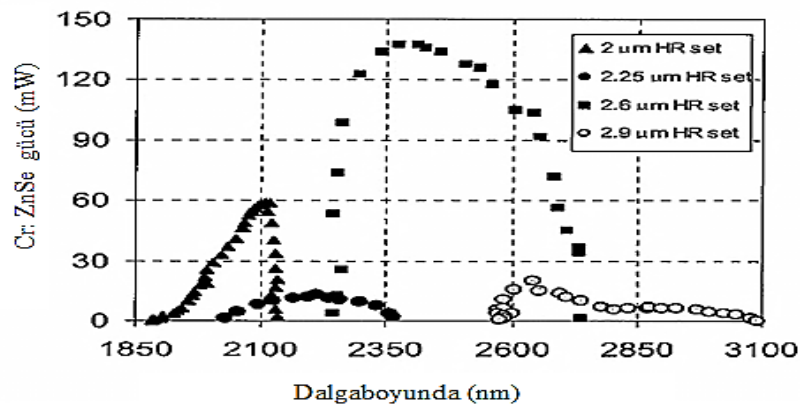
3.1.1 Kovuk içi pompalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ son yıllarda yeni bir lazer kaynağı olarak ortaya çıkmıştır. $\text{Cr}^{2+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ gibi çok sayıda iyon-konuk materyal vardır. Son zamanlarda $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kızılötesi bölgede bir lazer kaynağı olarak ortaya çıkmıştır [184, 185]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için en iyi geniş ayarlı lazeri elde etmeye yönelik farklı teknikler mevcuttur. Bu tekniklerden biri kovuk içi pompalama olarak adlandırılır. Bu teknik prizma, ızgara ve benzeri birçok bileşenden oluşur. Kovuk içi pompalama, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için performans lazerinin ve kazanç ortamının elde edilmesi bakımından faydalıdır [186-190]. 1570 nm'lik ışık üretmek için 20 mm uzunluğunda bir KTP kristali kullanılmıştır. 2 μm 'nin altında bir lazer işletiminin elde edilmesi için soğurum bandının alt kenarına yakın bir pompa dalgaboyunun seçilmesi önemlidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Kazanç anahtarlama OPO kovuk içi $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin şematik diyagramı. Ana pompa kaynağı, 1064 nm'de çalışan bir Q-anahtarlama 1 kHz Nd:YAG lazeridir. 1570 nm'lik ışık üretmek için 20 mm uzunluğunda bir KTP kristali kullanılmıştır. OPO kovuğu, M1 ile M7 aynaları arasında tertip edilmiştir. OPO kovuk içi $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ rezonatörü M3–M6 aynalarından oluşur. HWP: yarım dalga plakası; F: kalan pompayı 1,570 nm'de bloke etmeye yönelik filtre [190].

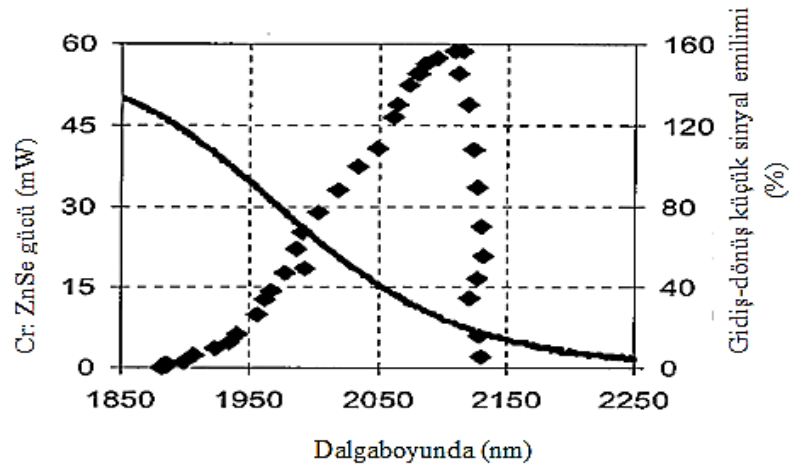
Bu teknik, 1 KHz üreten 1.04 μm 'lik Q-anahtarlama Nd-YAG lazer pompası içerir, ana pompa kaynağı olarak 145 ns'lik (FWHM) darbeler kullanılır. OPO rezonatörü, bir eğri dikronik giriş aynasından (M_1) ve düz çıkış bağlaştırmıcısından (M_2) oluşur, M_1 aynasının yarıçapı 10 cm'dir, çıkış bağlaştırmıcısının (OC) 1.7 μm 'deki geçirimi %32'dir. KPT optik parametrik osilatörün (OPO) ürettiği 65 ns (FWHM) darbe tekrar oranı 1 KHz'dir. Optik parametrik osilatör (OPO) kovuk içi $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ rezonatörü M_3 - M_6 aynalarından oluşur. HWP: yarım dalga plakası; F: kalan pompayı 1570 nm'de bloke etmeye yönelik filtrelendirir. Paralleleştirme için 10 cm odak uzaklığına sahip bir yakınsak mercek (L_2) kullanılır. İki ayarlama aynasına (HR_1 , HR_2) sahip optik parametrik osilatör çıkışı, numune M_3 ile M_4 arasına yerleştirilir. Pompalanan ışın numuneye L_3 merceğinin Brewster açısıyla çevrilmesi suretiyle mikrometre mertebesinde çok küçük bir noktada odaklanır. L_3 merceğinin odak uzaklığı 10 cm'dir. M_3 ve M_4 aynalarının her ikisi de yüksek yansıtıcılardır ve her birinin yarıçapı 10 cm'dir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, x doğrultusunda bir yassı uçlu yüksek yansıtıcı (M_5) ve yassı çıkış bağlaştırmıcısı (OC) (M_6) yerleştirilir. Numune 1.57 μm 'de küçük bir sinyal soğurumuna %43 oranında sahiptir. Spektrumun farklı kısımlarındaki ayarlamayı göstermek amacıyla, 2, 2.25, 2.6 ve 2.9 μm 'de yansıtıcılığı olan dört ayna takımı kullanılır ve bunların her birinin 1.57 μm 'de geçirimi %90'dır. M_4 aynasının arkasına yarıçapı 10 cm olan bir altın yansıtıcı ayna (M_7) yerleştirilir ve böylece kazanç ortamlarının iki geçişli olarak pompalanması sağlanır [188, 189]. Bu teknikte ayarlama, bir Brewster kesimli safir prizma kullanılarak sağlanır. Bu teknikte rol oynayan başka bir faktör kovuğun nemi veya kovuğun kirliliğidir ve nem bu koşulda %40 civarındadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Dört farklı HR takımı ile birlikte kazanç anahtarlama $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin 1880 ile 3100 nm arasında tam ayarlama aralığı. Mevcut Nd: YAG pompa gücü tüm durumlarda yaklaşık 1.8 W'dir. Lazer verimini artırmak için 2.25 m HR takımı dışında kovuk içi pompalama konfigürasyonu kullanılmıştır [190].

2 μm 'nin altındaki ayarlamayı gösteren Şekil 3.2 itibarıyla, 1.9 μm 'de %6'lık bir çıkış bağlaştırmacı ile birlikte, 1.79 μm ile 2.15 μm arasında %99'un üzerinde yansıtıcılığa sahip HR takımı kullanılır. Şekil 3.2, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin 2.1 μm 'de güç kazanç anahtarlamasını gösterir. Optik parametrik osilatörün $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için kullanılabilir tek geçişli pompalama gücü 460 mW'dır ve bu pompalama seviyesinde elde edilebilen $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ çıkış gücü 21 mW'dır. 460 mW'nin üzerinde tek geçiş mümkün değildir. Öte yandan, kovuk içi optik parametrik osilatör pompa gücü, Nd-YAG lazerinde kullanılan pompa gücünün 1.8 W olması halinde geçerlidir. Kovuk içi optik parametrik osilatörün pompa gücünün 810 mW olması halinde ise yaklaşık 60-70 mW'lık $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ gücü elde edilebilir. En iyi güç, %25 çıkış bağlantı elemanı kullanılarak HR takımıyla 2.6 μm ile elde edilir. Bu durumda, 2.365 μm 'de yaklaşık 1.2 W'lık kovuk içi optik parametrik osilatör gücünde 145 mW kadar yüksek bir lazer çıkış gücü elde edilir (Nd-YAG pompası 1.8 μm).

Gidiş-dönüş kovuk sürecinde enerji miktarı geri soğurum nedeniyle kayba uğrar (Şekil 3.3). Şekil 3.2 itibarıyla, tüm ayarlama aralıkları dört farklı ayna takımı kullanılarak elde edilmiştir, ancak burada numune sabittir. Lazer için en iyi geçerli ayarlama 1880 nm ile 3100 nm aralığında gerçekleşmiştir. Kristalin düşük soğurumundan dolayı, çıkış güçleri 2.700 μm ile 3.100 μm aralığında 20 mW'nin altındaki değerlerle sınırlı kalmıştır.



Şekil 3.3: Kovuk içi pompalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin 1880 ile 2130 nm aralığında ayarlama eğrisi. Düz eğri, kazanç ortamında geri soğurumdan kaynaklanan kestirilmiş gidiş-gelişli küçük sinyalli kovuk kaybı [190].

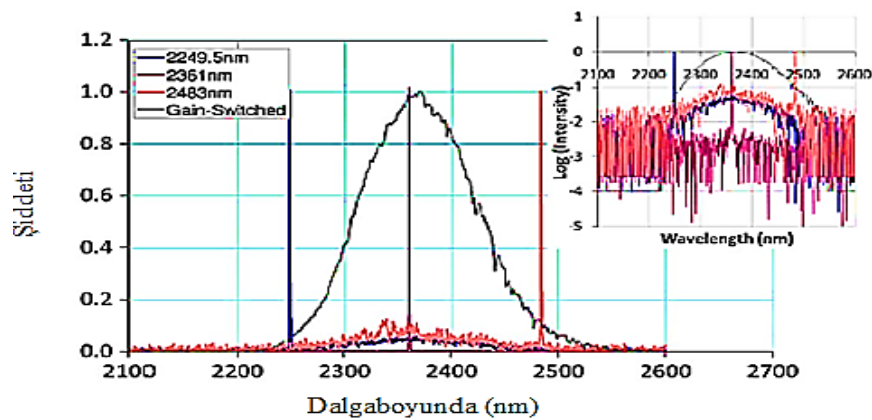
3.1.2 Kazanç anahtarlama ayarlanabilir $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri ve enjeksiyon kaynağı

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, kızılötesi bölgede en yaygın ayarlama aralığıdır ve ayrıca çok sayıda önemli özelliğe ve uygulamaya sahiptir [191-193]. Ancak, özellikle kazancın, kayıpların çok ötesinde olduğu kazanç anahtarlama işletim esnasında ve çok geniş bir spektrum bant genişliği üzerinden eşzamanlı lazerleme sağlar ve lazerin yukarıda belirtilen uygulamalarda etkili kullanımını sınırlar. Bu problemin çözümüne yönelik bir yaklaşım, kovuk içi dalgaboyu seçici elemanların, mesela kırınım ızgaralarının kullanılmasıdır [194, 195].

Ancak, kırınım ızgarasından kaynaklanan ilave katılım kaybı lazerleme eşiğini artırır ve mevcut osilatör çıkış gücünü sınırlandırır. Alternatif bir yaklaşıma göre, enjeksiyon kaynaklama yöntemi kullanılır ve burada, kazanç anahtarlama lazerin spektrum karakteristikleri, daha dar bir spektruma sahip bir tohum lazeri ile kontrol edilir. Kaynak lazeri bir uç ayna vasıtasıyla osilatöre bağlandığından, herhangi bir kovuk içi dalgaboyu seçici elemana ihtiyaç duyulmaz ve herhangi bir ilave kayıp yaşanmaz. Bu teknik, kovuk içi kayıp gibi kayıpların azaltılması için faydalıdır ve ayrıca kazanç ortamlarında uygun bir çıkış spektrumu sağlayabilir.

Bu çalışma, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer için enjeksiyon kaynak kazançlı anahtarlama üzerinde durur. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için kaynak enjeksiyonları kullanıldıktan sonra spektrumun bazı özellikleri iyileşmeye başlar, bazı spektrum karakteristikleri optimize olur, örneğin çizgi genişliği (FWHM) 125 nm'den 0.3 nm'ye düşer. Kaynağın ışık sebebi, ikinci bir ayarlanabilir sürekli dalgalı $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için kullanılabilir. Çıkış kaynak dalgaboyu 2.255 μm ile 2.455 μm 'ye yakındır ve çıkış enerjisi 2.395 μm 'de 598 μJ 'dur ve gelen pompa dalgaboyu ise 1KHz ile birlikte 1.57 μm 'dir. Şekil 3.4, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazerinin enjeksiyon kaynak, kazanç anahtarlama düzeneğini göstermektedir.

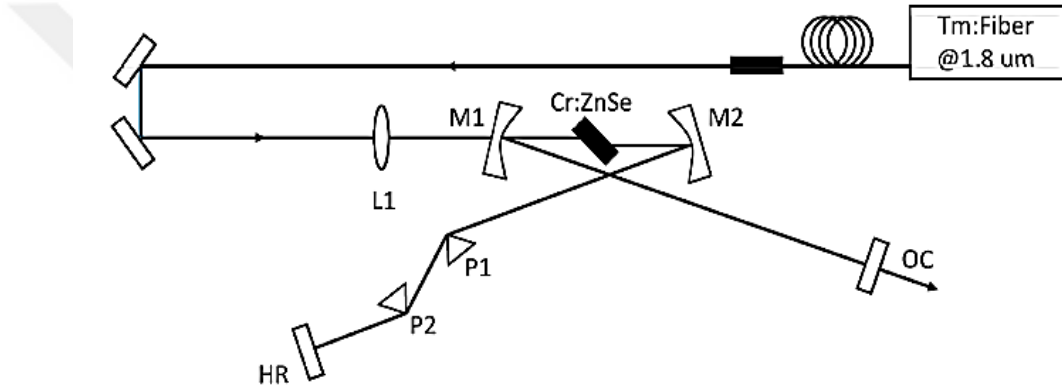
Çıkış ışını doğrudan M_6 aynasına yönlendirilir ve bu ayna anahtar osilasyonunu kazanmak için alüminyumdan oluşur ve ışın M_7 aynasına geçtikten sonra polarizedir ve yarım dalga formundadır, M_7 aynasının yarıçapı, ışın kaynağının koşutlanmış halde tutmak için faydalı olduğu üzere 4 cm'dir. Kazanç anahtarlamalı $Cr^{2+}:ZnSe$ lazer kristalin içinde kaynak lazerin kestirilen nokta boyutu yaklaşık 22 μm 'dir. İkinci bir yarım dalga plakası (HWP_2) sayesinde, kaynak ışınının polarizasyonu, kazanç anahtarlamalı osilatörden çıkan ışının polarizasyonu ile eşleşecek şekilde ayarlanır. Kazanç anahtarlamalı lazerin X tipi rezonatörü, her birinin eğrilik yarıçapı 20 cm olan iki eğri aynadan (M_8 ve M_9) ve OC_2 ve OC_3 olarak gösterilen iki çıkış bağlaştıracısından oluşur (Şekil 3.4). Çıkış bağlaştıracılarının (OC) geçirim değeri sırasıyla %6 ve %26'dır ve çıkış bağlaştıracıları, sürekli dalgalı kaynak ışını kazanç anahtarlama rezonatörüne bağlamak için kullanılır. Enjeksiyon kaynağı çıkışı OC_3 'ten alınır. Rezonatör uzunlukları 64 cm ve 71 cm'dir ve ışın çapı ise 80 μm 'dir. 95.5 MHz'lik dahili kazanç anahtarlama rezonatörü ile birlikte toplam kovuk mesafesi 157 cm'dir, $Cr^{2+}:ZnSe$ numunesinin uzunluğu 6.6 cm'dir, çok kristalli çizgi (C_2), numune Brewster açısında yerleştirilir. Nd-YAG lazer kristali 1.57 μm 'lik pompa dalgaboyuna sahip küçük sinyale %92 sahiptir. Pompa darbe genişliği (FWHM) ve darbe tekrarı sırasıyla 50 ns ve 1KHz'dir. Işın, keskinlik kenarı tekniği kullanılarak, 20 cm'lik odak uzaklığına sahip L_2 merceği vasıtasıyla $Cr^{2+}:ZnSe$ numunesine doğru aniden gönderilir, burada ışının çapı 90 μm 'dir. Bu süreç için $Cr^{2+}:ZnSe$ çıkış spektrumu Şekil 3.5'de gösterilmektedir, bu şekilde farklı dalgaboylarına sahip kaynaklanmış ve kaynaklanmamış spektrumlar doğrusal ve logaritmik ölçeklerde gösterilir.



Şekil 3.5: (Renkli çizgiler) kaynaklı ve enjeksiyon kaynaklı kazanç anahtarlamalı $Cr:ZnSe$ lazerinin doğrusal ve logaritmik (ek) ölçeklerde spektrumları [194].

3.1.3 Cr²⁺:ZnSe'nin KERR-LENS mod kilitli işletimi

Cr²⁺:ZnSe'nin KERR-LENS mod kilitli en son deneysel çalışmadır [196]. Kerr-Lens mod kilidi, Cr²⁺:ZnSe lazeri için kazanç ortamlarına yönelik olarak kullanılan bir tekniktir. Bu tekniğin uyarlanması Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bu teknik, Cr²⁺:ZnSe numunesini içerir ve pompa ışını numune üzerine Brewster açısı ile nokta boyutunda odaklanır ve pompalama kaynağı 1.8 μm 'dir. Kazanç ortamlarının küçük sinyal soğurumu 1.8 μm 'de %94'tür ve 2.4 μm 'de %1 geçirimli bir çıkış bağlaştırmacı (OC) kullanılır. Kovuk uzunluğu 159 cm'dir, İki çift Brewster kesimli MgF₂ prizması kullanılmaktadır ve bunların her ikisi de dağılım oryantasyonu için kullanılır ve mod çalışması için iyi bir role sahiptir.



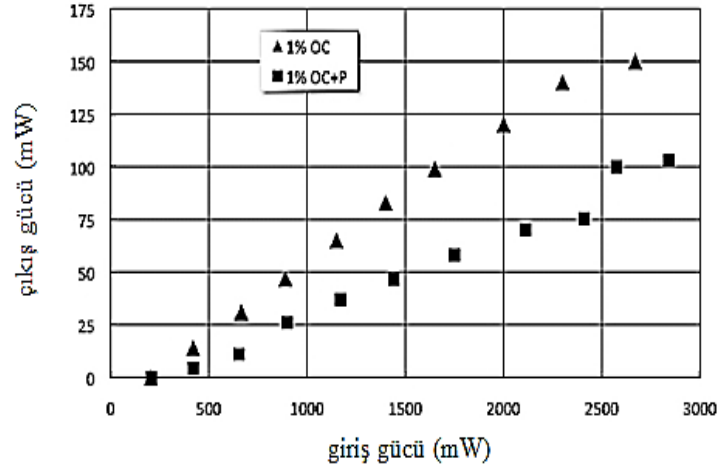
Şekil 3.6: Kerr-Lens mod kilitli femtosaniye Cr²⁺:ZnSe lazerinin şematik diyagramı [197].

Bu yöntem, Cr²⁺:ZnSe lazer performansını elde etmek için kullanılan tekniklerden biridir. Çıkış gücü, Şekil 3.7'de gösterilen giriş gücü ile bağlantılıdır. Lazer, 2.67 W'lık gelen pompa gücü ile üretilir. Süreç işletiminde gidiş-geliş veya rezonatör optikleri ya da prizmanın yetersiz yüzey kalitesi yüzünden kayıp meydana gelir. Prizma kalitesi lazer performansı için çok önemli bir faktördür. Prizma yerleşimi ve prizma çifti 2.42 μm 'de 1700 fs² olarak kestirilir. Cr²⁺:ZnSe'nin ve prizmaların dağılımı Sell Meier denklemi ile açıklanabilir [197]. Kazanç ortamı KERR-LENS mod kilitli işletim ile optimize edilir ve bu tekniğin çıkış dalgaboyu orta kızılötesi bölge civarındadır ve genişlik yaklaşık 66 nm'dir. Odaklama ve kovuk serpinmesinin tekrar optimizasyonu, 2420 nm'de 0.335'lik bir zaman-bant genişliği ürünü ile birlikte 95 fs kadar kısa darbelerin üretilmesini sağlamıştır [197].

Optimizasyon darbe genişliği ve enerji verisi ile, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kazanç ortam için mod kilitli işletimin darbe süresi şu denkleme göre hesaplanabilir:

$$\tau = 4 \parallel D \parallel / w \delta$$

τ : darbe süresi, $\parallel D \parallel$: grup gecikmeli serpinme büyüklüğü, w : kovuk içi darbe süresi δ : doğrusal olmayan katsayı $\delta = 2\pi n l / (\lambda A)$. l : kristal uzunluğu kırılma indisi, λ : vakum dalga uzunluğu, n : doğrusal olmayan kırılma indisi, A : etkili ışın alanı, yaklaşık olarak $\pi (w_0^2)_{\text{rms}}$, $(w_0)_{\text{rms}}$ = rms kazanç ortamlarındaki nokta boyutu. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için doğrusal olmayan kırılma indisi $1.4 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{W}$ 'dir ve literatüre göre en iyi değer $1.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{W}$ 'dir [198].



Şekil 3.7: Serbest çalışma modunda ve MgF_2 prizma çifti ile birlikte $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için sürekli dalga güç verimlilik eğrileri. Çıkış dalgaboyu yaklaşık 2400 nm'dir [198]

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kızılötesi Bölge Uygulaması

4.1.1 Eser gaz tayini

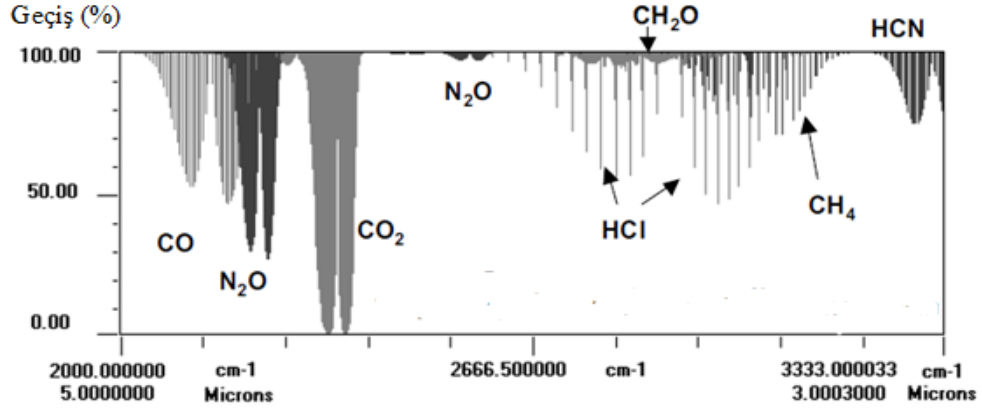
Spektroskopik eser gaz tayini karışık gaz optik soğurum spektrumlarının ölçülmesi suretiyle bilinen bir gazın veya gazların konsantrasyonunu saptama yollarından biridir. Bu prosedür, gaz soğurum karakteristikleri hakkında iyi bir niceliksel bilgi gerektirir. Bu bilgi, karmaşık ve yüksek düzeyde gelişmiş bir konu olan moleküler spektroskopi alanına girer. Birkaç temel spektroskopi kavramı ve formülü gaz tayinine doğrudan uygulanabilir.

Herhangi bir molekül veya atom, spesifik bir karakteristik enerji düzeyine ve spesifik elektromanyetik spektrum (EMS) özelliklerine sahiptir. Bu özellikler, molekül türünün, mesela atmosfer gazının tanınması ve miktar tayini için önemlidir. Işın spektroskopisi birtakım ayrı soğurum çizgilerinden oluşur ve her bir çizgi, çizgi genişliğine sahiptir. Moleküler dönme-titreşim durumları arasındaki geçiş orta kızılötesi bölgede meydana gelir. Orta kızılötesi bölge, birçok küçük molekül için soğurum bandının temelini oluşturur. Atmosferde çok sayıda işlenmiş gaz mevcuttur ve bunların konsantrasyonları normalde trilyonda kısım (10^{-12}), milyarda kısım (10^{-9}) ile milyonda kısım (10^{-6}) aralığında değişir. İşlenmiş gaz tayini basınca, sıcaklığa ve numune uzunluğuna bağlıdır. İşlenmiş gaz tayinine yönelik birçok teknik mevcuttur, ancak burada moleküllerin orta kızılötesi bölgede geniş bant soğurumu tarif edilmektedir (Şekil 4.1), geçiş ve soğurum bandı, gazın türünü ve konsantrasyonunu belirlemek açısından çok önemlidir ve numune hakkında bilgi verir.

Grafikte birçok molekülün soğurum bandı ve girişim çizgileri gösterilmektedir. N_2 gibi eş kaynaklı iki atomlu moleküller dışında birden çok atomlu molekül kızılötesi ışımayı soğurur. Moleküller elektromanyetik ışımaya maruz kaldıklarında elektronik, titreşimsel ve dönel durumlar arasında geçişler sergileyebilir ve bu geçişler soğurum spektrumları ile sonuçlanır.

Molekül kızılötesi spektrumların enerjisini soğurur; bu soğurum molekülleri ve akabinde moleküler değişimlerin durumunu etkiler, soğurum moleküllerin şekil,

boyut ve bileşim gibi fiziksel özelliklerine bağlıdır, dolayısıyla her molekül eşsiz bir spektrum ile karakterizedir. Çok atomlu moleküllerin spektrumları doğrusal ve bazı doğrusal olmayan sinyaller veya çizgiler içerir. Bu nedenle teknik söz konusu ise gaz tayini için kesin uygundur ve moleküler gaz hakkında bilgi verir [199, 200]. Bu teknik kademeli olarak ilerler ve bu tekniğin ilerleyişi esnasında bu tekniğe katkı sağlayan tüm faktörlerin optimize edilmesine çalışılır ve bu teknik, eser gaz tayini sürecinin gelişimine doğru bir şekilde uygulanabilir.



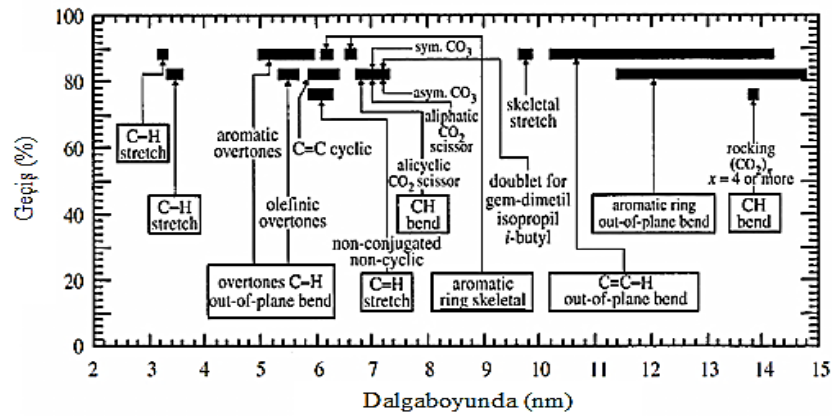
Şekil 4.1: 3-5 μm 'lik spektrum bölgelerinde çeşitli moleküllerin soğurum bantlarının HITRAN benzetimi. Tüm türler özdeş göreceli konsantrasyon ile çizilmiştir. Spektrum örtüşmesi, girişimsiz soğurum çizgilerinin seçimini kısıtlar [200].

4.1.2 Sağlık ve biyolojik uygulamalar

Orta kızılötesi lazeri biyolojik ve sağlık uygulamaları için iyidir, çünkü biyolojik ve sağlık alanları için uygundur. Bu uygulama, biyolojik ve fiziksel biliminin anlaşılması için faydalı olacaktır. Işığın kırılma prensibinden hareketle bir taraftan diğer tarafa dönerek aktarılma özelliği, biyolojik ve sağlık alanındaki çalışmalarda kullanılır. Birtakım çalışmalar optik özelliklere dayanır, bu teknik, moleküllerin soğurumunu ve ışımasını tanıyabilir, çünkü her biyolojik molekül orta kızılötesi bölgede eşsiz bir spektrum ile karakterizedir, bu teknik ayrıca görünmez dünyayı görünür hale getirir. Bu süreç, görünmez kimyasal süreçleri tarif eder ve açıklar.

Kızılötesi ışıma, kimyasal elementin bozukluğunu, boyutunu ve şeklini saptamak ve biyoloji açısından faydalıdır. Kızılötesi lazer sağlık ve biyolojik uygulamalar için daha duyarlı ve kesindir. Burada her molekül kendi eşsiz yanıtına sahiptir, orta kızılötesi bölge ayrıca kimyasal bileşimi, kirliliği tespit etmek ve sağlık tedavisine yönelik besinlerin saptanması için kullanılır. Şekil 4.2'de moleküllerin ve dalgaboyu uzunluğunun aktarımı görülmektedir.

Bir orta kızılötesi bölge, doğrudan insan gözüyle saptanamayan elektromanyetik spektrumlardır, çünkü orta kızılötesi lazerin dalgaboyu görünür bölgenin dışında yer alır. Görünür bölgelerin dışındaki diğer bölgeyi saptamak için, görünmez bölge tayinine yönelik yardımcı bir tekniğe ihtiyaç duyulur, bu teknik, görünmez bölgenin detektörler veya özel bilgisayarlar ile saptanmasında kullanılan tekniklerden biridir. Orta kızılötesi, dar bir çizgi genişliğine ve normal sıcaklıkta biyolojik ve sağlık uygulamaları için uygun olan iyi özelliklere sahiptir. Son olarak, bu uygulama sayesinde sağlık sürecinin kontrol edilebileceğinden ve gözlemlenebileceğinden ve bu uygulamanın çevreyi ve insan sağlığını korumaya yardımcı olduğundan bahsedilebilir [201].

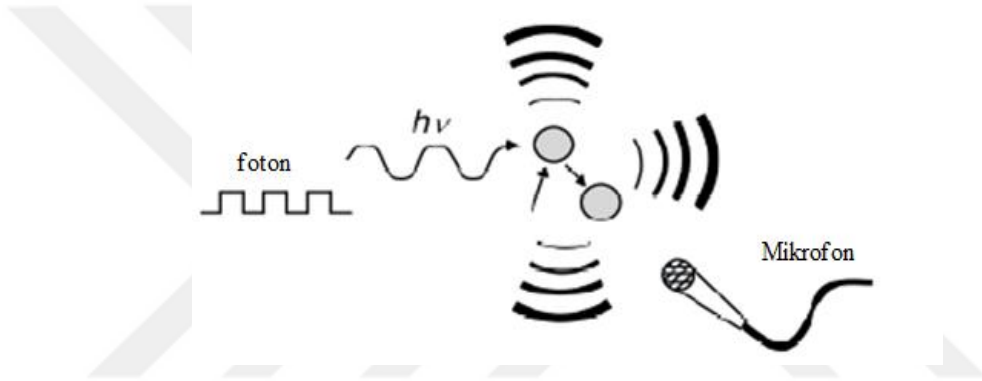


Şekil 4.2: Karakteristik hidrokarbon kızılötesi soğurumu [201].

4.1.3 Fotoakustik uygulama

Fotoakustik spektroskopi temel olarak duyarlı eser (miktar) gazı tayininde kullanılır. Işıma soğurumundan kaynaklanan akustik dalgaları içeren fotoakustik etkiye dayanır. Bu lazer spektroskopi uygulamasında; lazer ışını, özel olarak tasarlanmış bir hücrede bulunan bir seçili hedef gazı etkiler. Fotoakustik, soğurulan elektromanyetik enerjinin etki ölçümüdür. Fotoakustik, eser (miktar) gazı tayini ve uzaktan algılama için faydalıdır, fotoakustik fizik ve kimya alanında birçok olayın anlaşılması bakımından çok önemlidir. Öte yandan fotoakustik spektroskopi, diğer orta kızılötesi soğurum tekniklerinden dolayı, doğrudan ışık soğurumunun saptanmadığı ve ancak soğurucu ortam üzerindeki etkinin tayin edildiği, dolaylı bir tekniktir. Darbeli veya kesintili sürekli dalgalı lazer kaynaklarından gelen ışık, bir soğurucu ortamda ışıınımsal olmayan gevşeme süreçleri üzerinden geçici bir sıcaklık artışına yol açar ve bu sıcaklık artışı akabinde bir basınç değişimine veya ses dalgasına dönüşür (Şekil 4.3). Bu durum duyarlı bir mikrofona (mikrofonlar) ile saptanabilir. Akustik sinyal, hücredeki soğurucu moleküllerin konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir.

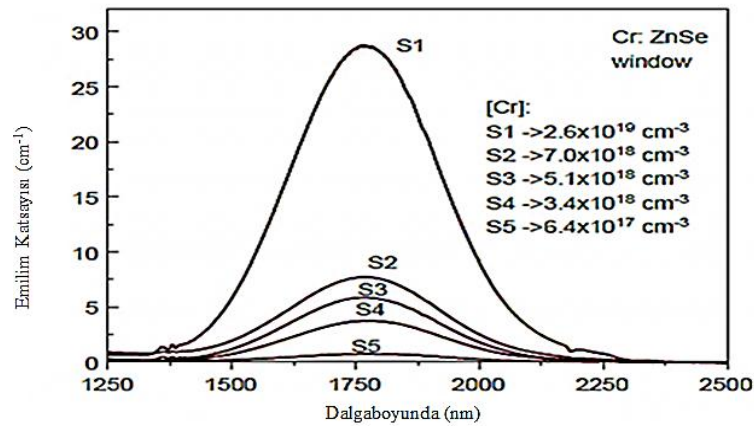
Sürekli dalgali lazer kaynakları söz konusu olduğunda, fotoakustik spektroskopi için iki işletim modu vardır: uyarıcı ışık herhangi bir hücre rezonansından uzak bir frekansta modüle edilebilir ya da bir akustik resonant frekansı ile çakışacak şekilde ayarlanabilir. İç rezonans modu genellikle daha büyük sinyaller elde etmek üzere düşük güçlü pompa lazerleri ile kullanılır. Ancak, sıcaklık ve gaz bileşimindeki değişimlerden dolayı ses hızındaki değişimden kaynaklanan enstrüman yanıtı değişimlerini minimize etmek için tedbirlerin alınması gerekebilir. Fotoakustik spektroskopi ideal olarak bir arkaplansız tekniktir: soğurucu gaz sinyali üretir ve bir soğurucu gazın yokluğunda herhangi bir akustik sinyal mevcut değildir. Son olarak, kızılötesi fotoakustik spektroskopi için kullanılabilir ve bu teknik, fiziksel biliminin öneminden dolayı, eser (miktar) gaz tayini ve kimya alanında faydalıdır [202-214].



Şekil 4.3: Fotoakustik spektroskopinin ilkeleri. Gelen fotonlar hedef molekülü bir rezonant dalgaboyunda uyarır. Çarpışmasal uyarım giderimi soğurulan enerjiyi yerel ısı ve basınç dalgalarına dönüştürür ve bu dalgalar bir mikrofon ile saptanabilir[200].

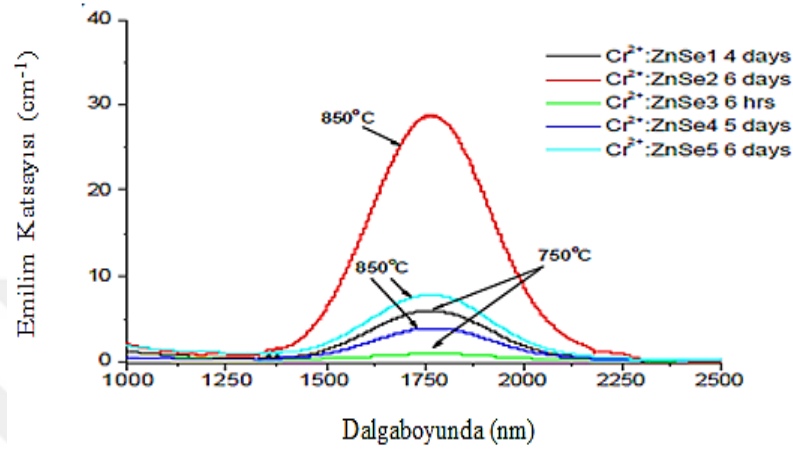
4.2 Bulgular

Konsantrasyon ve yayılım $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'de önemli bir role sahiptir. Soğurum katsayısı ile konsantrasyon arasında kuvvetli bir bağ vardır, konsantrasyon arttıkça soğurum pulsu artar (Şekil 4.4) [215].



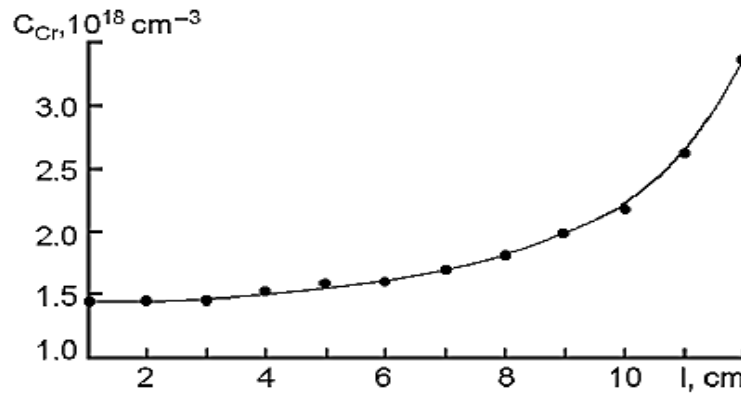
Şekil 4.4: Yayılım katkılı $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 'nin kızılötesi soğurum spektrumları [216].

Çoğu deneylerde, artan yayılım süresi ve sıcaklık ile birlikte soğurum katsayısının arttığı belirtilmiştir [117]. Numunedeki krom konsantrasyonu şu denkleme göre hesaplanır: $N = a/\sigma$; burada N: krom konsantrasyonu; a : soğurum katsayısı; σ : soğurum kesiti ($\sim 1.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$) [216]. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin soğurum katsayısı $\sim 1.750 \mu\text{m}$ 'dir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ soğurum spektrumları [108].

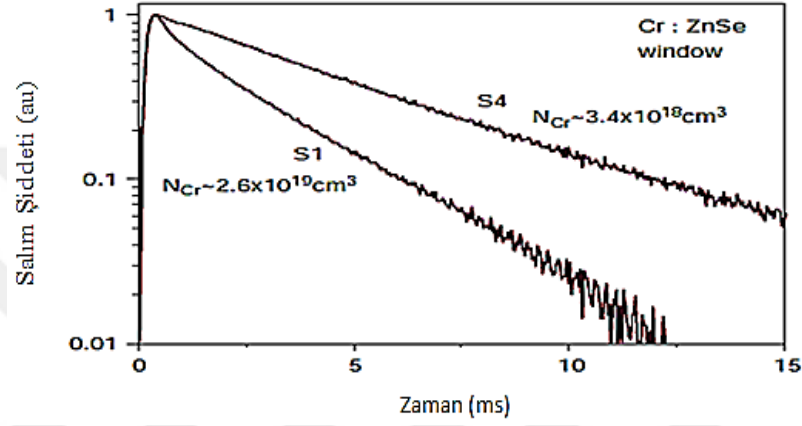
Zaman; kristal oluşumu veya $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ materyalinin hazırlanması esnasında soğurum katsayısını etkiler. Bunlara ek olarak, konsantrasyon dağılımı ile ilişkili başka bir parametre de numune uzunluğudur (Şekil 4.6). Şekil 4.6; konsantrasyonun numune uzunluğu ile üssel olarak değiştiğini gösterir.



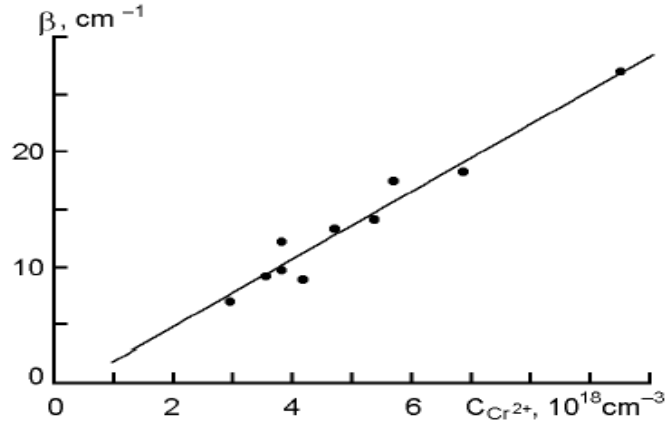
Şekil 4.6: Kristal büyüme eksenı boyunca krom konsantrasyonu dağılımı [217].

Konsantrasyon ve soğurum ile ilgili son ifade olarak, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ soğurumu $1.78 \mu\text{m}$ 'dir ve soğurum dalgaboyu ile Cr^{2+} konsantrasyonu arasındaki ilişki doğrusaldır (Şekil 4.8). Öte yandan konsantrasyon $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ salımını etkiler.

Düşük konsantrasyonlu numune için, Cr^{2+} ömrü bir üstel davranış sergiler ve ~ 5.1 μs 'lik ($1/e$ bozunma süresi) bir değere sahiptir (Şekil 4.7). Düşük sıcaklıkta (~ 15 K) ömür, oda sıcaklığındaki değere kıyasla sadece hafif düzeyde değişir ve bu da birim civarında kuantum verimini işaret eder. $\sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'ten yüksek Cr konsantrasyonları için ömür anlamlı ölçüde azalır ve üssel olmayan bir geçiş sergiler. Şekil 4.7'de gösterildiği üzere, $\sim 2.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'lük bir Cr konsantrasyonu için, Cr^{2+} ömrü sadece 2.4 μs 'lik bir değere düşer ve bu da Cr^{2+} salımının baskılandığını gösterir [215].



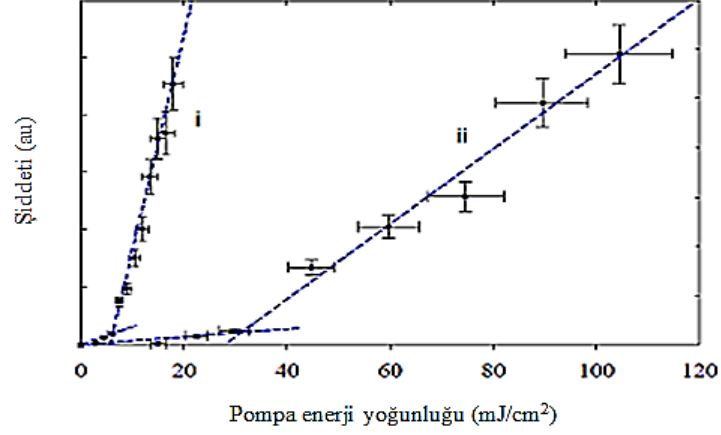
Şekil 4.7: Cr:ZnSe pencerelerinin farklı Cr konsantrasyonları için salım düşüş geçişleri. Daha yüksek Cr konsantrasyonlarında salım ömürlerinin azalması, Cr salımının baskılanmaya başladığını gösterir [116].



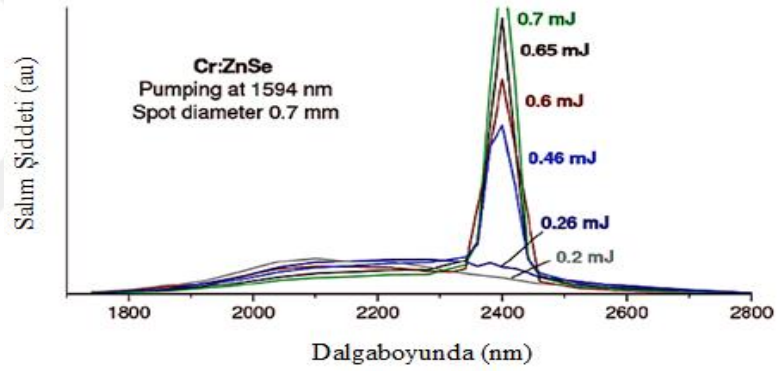
Şekil 4.8: Cr^{2+} :ZnSe numunesinde $1.78 \mu\text{m}$ 'lik dalgaboyunda doğrusal ışık soğurum katsayısının krom konsantrasyonuna bağımlılığı [217].

Cr^{2+} :ZnSe için pompa enerji yoğunluğu ve şiddeti açıklayıcıdır ve pompa enerji yoğunluğu, şiddeti ile orantılıdır. Numune boyutu lazerin şiddeti ile ilişkilidir. Cr^{2+} :ZnSe için çıkış salım şiddeti-pompa enerjisi ilişkisi için (Şekil 4.9) [215].

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için pompa enerjisi salım şiddetini etkilemektedir. Şekil 4.10'da gösterildiği üzere pompa enerji yoğunluğu arttıkça salım şiddeti de artar [216, 217].

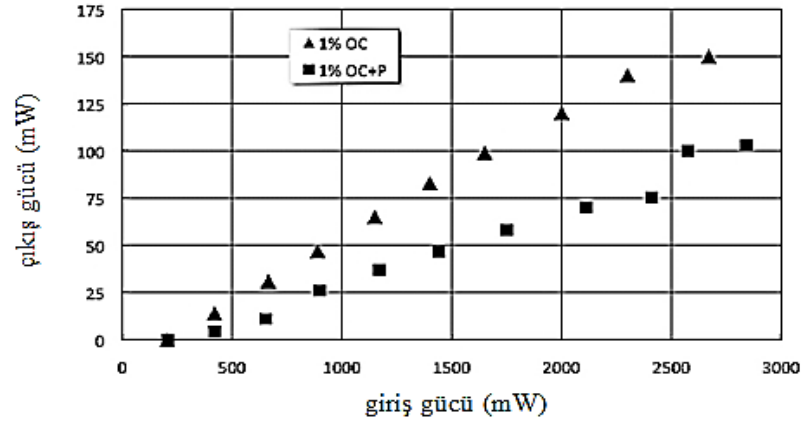


Şekil 4.9: $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için çıkış salım şiddeti - pompa enerjisi: Oda sıcaklığın'da (i) $\sim 10 \mu\text{m}$, (ii) $\sim 1 \mu\text{m}$ toz (uyarım dalgaboyu: 1560 nm, pompa nokta çapı: 2.9 mm) [216].



Şekil 4.10: $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin salım spektrumları [62].

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ için birçok pompalama yolu vardır. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazer sistemi için pompalama tipi önemlidir; çünkü giriş gücü, çıkış gücü ile ilişkilidir. Kerr-Lens mod kilit tekniğine göre, çıkış gücünün giriş gücüyle orantılı olduğu Şekil 4.11'de gösterilmektedir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için serbest çalışma modunda ve MgF_2 prizma çiftiyle sürekli dalga güç verimi söz konusu olduğunda, çıkış dalgaboyu Şekil 4.11'de gösterildiği üzere yaklaşık $2.400 \mu\text{m}$ 'dir [218].



Şekil 4.11: Serbest çalışma modunda ve MgF_2 prizma çifti ile birlikte $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için sürekli dalga güç verimlilik eğrileri. Çıkış dalgaboyu yaklaşık 2400 nm'dir [197].

5. SONUÇ

Bu çalışma kızılötesi bölge lazeri olarak $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için yapılan bir derlemedir. İlk olarak numune, fiziksel buhar iletim (PVT) yöntemiyle büyütülmüştür, akabinde numune (ZnSe) Cr^{2+} iyonu ile katkılanmıştır ve kristal büyüme süresince konsantrasyon yaklaşık 0.8×10^{18} - 66×10^{18} iyon/ cm^3 olarak bulunmuştur. Basınç yaklaşık 10^{-6} - 4×10^{-7} torr'dur. Numune büyütülürken yayınım meydana gelir ve bu yayınım konsantrasyona ve sıcaklığa bağlıdır. İyon yarı iletken kristale katkılanırken kristal alanı iyonların enerji düzeylerini etkiler. Krom iyonu uyarılmış duruma ve temel duruma ayrılır ve akabinde geçiş meydana gelir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ geçiş süreci genel olarak $2+ \rightarrow 1+ \rightarrow 2+$ şeklinde gösterilir ve $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'nin çıkış dalgaboyu 2-5 μm 'dir. Sürekli dalgalı ve kazanç anahtarlamalı lazerlemeyi göstermek için yayınım katkılı çok kristalli numuneler kullanılır. 1.570 μm 'lik KTP optik parametrik osilatör (OPO) ile gerçekleştirilen kovuk içi pompalama mikrometre bölgesinde sürekli ayarlama sağlar. İlaveten bir tek kristal $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ numunesi ile Kerr-Lens mod kilitlemesi gösterilir ve 2.420 μm 'de 95 fs'lik puslar üretilir. Bu çalışmalar, 2-5 μm dalgaboyu bölgesinde farklı lazer işletim planları için $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ kazanç ortamının çok yönlülüğünü gösterir. ZnSe 'de Cr^{2+} iyonunun salım spektrumları ve soğurum spektrumları genel olarak, özellikle temel durum ile uyarılmış durum arasında, sırasıyla 2-5 μm ve 1.8 μm civarındadır.

Çıkış lazerinin çizgi genişliği 120 MHz'dir, ayarlama aralığı 2.5 μm 'de 120 nm'nin üzerindedir, numune uygun bir pompa kaynağını gerektirir, $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ için birçok pompalama tekniği mevcuttur. Her teknik kaybı azaltmak ve kazanç ortamını oluşturmak için kullanılır ve her teknik ile kızılötesi bölge lazeri elde edilir. Başka bir teknik sürekli dalgalı enjeksiyon çekirdeğidir ve bu teknikte $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lazeri için pompalama sonucunda yüksek bir çıkış enerjisi elde edilir. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, biyoloji ve tıp alanlarında birçok uygulamaya sahiptir. Konsantrasyon ve yayınım $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 'de önemli bir role sahiptir. Soğurum katsayısı ile konsantrasyon arasında kuvvetli bir bağ vardır.

KAYNAKLAR

1. Page, R. H., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Payne, S., Beach, R. J. ve Krupke, W. F., 1995. Cr²⁺-doped II-VI crystals: new widely-tunable, room-temperature mid-IR lasers. In Lasers ve Electro-Optics Society Annual Meeting. 8th Annual Meeting Conference Proceedings, IEEE Vol. 2, pp. 449-450.
2. Page, R. H., DeLoach, L.D., Schaffers, K. I., Patel, F. D., Beach, R. L., Beach, S.A., Krupke, W. F., in: Payne, S. A., Pollock (Eds.), C.R., 1996. OSA Trends in Optics ve Photonics. Optical Society of America, Vol. 1, Washington, DC, p. 130.
3. Krupke, W. F., Page, R. H., DeLoach, L. D. ve Payne, S. A., 1996. U.S. Patent No. 5,541,948. Washington, DC: U.S. Patent ve Trademark Office.
4. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 32(6), 885-895.
5. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr²⁺-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 33(4), 609-619.
6. Davarcioglu, B. ve Baysal, M. B., 2012. Broadly Tunable Chromium Doped Zinc Selenide Laser in the Mid-Infrared Region. International Journal of Modern Engineering Research Vol.2., pp.288-296.
7. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Martyshkin, D., Moskalev, I. S., Mirov, M. ve Vasilyev, S., 2015. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr ve Fe-Doped II–VI Chalcogenides. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 21(1), 292-310.
8. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Martyshkin, D. V., Moskalev, I. S., Mirov, M. S. ve Gapontsev, V. P., 2011. Progress in mid-IR Cr²⁺ ve Fe²⁺ doped II-VI materials ve lasers [Invited]. Optical Materials Express, 1(5), 898-910.
9. Mirov, S., Fedorov, V., Moskalev, I., Martyshkin, D. ve Kim, C., 2010. Progress in Cr²⁺ ve Fe²⁺ doped mid-IR laser materials. Laser ve Photonics Reviews, 4(1), 21-41.

10. Kozlovsky, V. I., Akimov, V. A., Frolov, M. P., Korostelin, Y. V., Lveman, A. I., Martovitsky, V. P. ve Voronov, A. A., 2010. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase. *Physica status solidi (b)*, 247(6), 1553-1556.
11. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
12. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr²⁺-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 33(4), 609-619.
13. Mirov, S., Fedorov, V., Moskalev, I., Martyshkin, D. ve Kim, C., 2010. Progress in Cr²⁺ ve Fe²⁺ doped mid-IR laser materials. *Laser ve Photonics Reviews*, 4(1), 21-41.
14. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Moskalev, I. S. ve Martyshkin, D. V., 2007. Recent progress in transition-metal-doped II–VI mid-IR lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 13(3), 810-822.
15. Fedorov, V. V., Mirov, S. B., Gallian, A., Badikov, D. V., Frolov, M. P., Korostelin, Y. V. ve Voronov, A., 2006. 3.77-5.05- μ m tunable solid-state lasers based on Fe/sup 2+/-doped ZnSe crystals operating at low ve room temperatures. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 42(9), 907-917.
16. Fazzio, A., Caldas, M. J. ve Zunger, A., 1984. Many-electron multiplet effects in the spectra of 3 d impurities in heteropolar semiconductors. *Physical Review B*, 30(6), 3430.
17. Slack, G. A., Ham, F. S. ve Chrenko, R. M., 1966. Optical Absorption of Tetrahedral Fe²⁺(3 d 6) in Cubic ZnS, CdTe ve Mg Al 2 O 4. *Physical Review*, 152(1), 376.
18. Slack, G. A. ve O'Meara, B. M., 1967. Infrared Luminescence of Fe²⁺ in ZnS. *Physical Review*, 163(2), 335.
19. Slack, G. A., Roberts, S. ve Ham, F. S., 1967. Far-Infrared Optical Absorption of Fe²⁺ in ZnS. *Physical Review*, 155(2), 170.
20. Baranowski, J. M., Allen, J. W. ve Pearson, G. L., 1967. Crystal-Field Spectra of 3 dⁿ Impurities in II-VI ve III-V Compound Semiconductors. *Physical Review*, 160(3), 627.
21. Nelkowski, H. ve Grebe, G., 1970. IR-luminescence of ZnS: Cr. *Journal of Luminescence*, 1, 88-93.

22. Vallin, J. T., Slack, G. A., Roberts, S. ve Hughes, A. E., 1970. Infrared absorption in some II-VI compounds doped with Cr. *Physical Review B*, 2(11), 4313.
23. Grebe, G., Roussos, G. ve Schulz, H. J., 1976. Infrared luminescence of ZnSe: Cr crystals. *Journal of Luminescence*, 12, 701-705.
24. Godlewski, M. ve Kaminska, M., 1980. The chromium impurity photogeneration transitions in ZnS, ZnSe ve ZnTe. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 13(35), 6537.
25. Roussos, G., Schulz, H. J. ve Thiede, M., 1984. Luminescence ve related optical properties of iron ions in II-VI compounds. *Journal of Luminescence*, 31, 409-411.
26. Lehr, M. U., Litzenburger, B., Kreissl, J., Pohl, U. W., Selber, H. R., Schulz, H. J. ve Worschech, L., 1997. Identification of near-infrared luminescence in ZnSe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 9(3), 753.
27. Gezci, S., 1973. Edge emission ve deep centre luminescence in zinc selenide (Doctoral dissertation, Durham University).
28. Ivanov, V. Y., Semenov, Y. G., Surma, M. ve Godlewski, M., 1996. Anti-Stokes luminescence in chromium-doped ZnSe. *Physical Review B*, 54(7), 4696.
29. Lehr, M. U., Litzenburger, B., Kreissl, J., Pohl, U. W., Selber, H. R., Schulz, H. J. ve Worschech, L., 1997. Identification of near-infrared luminescence in ZnSe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 9(3), 753.
30. Ndap, J. O., Chattopadhyay, K., Adetunji, O. O., Zelmon, D. E. ve Burger, A., 2002. Thermal diffusion of Cr²⁺ in bulk ZnSe. *Journal of crystal growth*, 240(1), 176-184.
31. Williams, J. E., Fedorov, V. V., Martyshkin, D. V., Moskalev, I. S., Camata, R. P. ve Mirov, S. B., 2010. Mid-IR laser oscillation in Cr²⁺: ZnSe planar waveguide. *Optics express*, 18(25), 25999-26006.
32. Goetz, G., Zimmermann, H. ve Schulz, H. J., 1993. Jahn-Teller interaction at Cr²⁺ (d⁴) centres in tetrahedrally coordinated II-VI lattices studied by optical spectroscopy. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 91(4), 429-436.
33. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Graham, K., Moskalev, I. S., Badikov, V. V. ve Panyutin, V., 2002. Erbium fiber laser-pumped continuous-wave microchip Cr²⁺: ZnS ve Cr²⁺: ZnSe lasers. *Optics letters*, 27(11), 909-911.
34. Su, C. H., Feth, S., Volz, M. P., Matyi, R., George, M. A., Chattopadhyay, K. ve Lehoczky, S. L., 1999. Vapor growth ve characterization of Cr-doped ZnSe crystals. *Journal of crystal growth*, 207(1), 35-42.

35. Gallian, A., Fedorov, V. V., Mirov, S. B., Badikov, V. V., Galkin, S. N., Voronkin, E. F. ve Lalayants, A. I., 2006. Hot-pressed ceramic $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ gain-switched laser. *Optics express*, 14(24), 11694-11701.
36. Sorokina, I. T., 2003. Crystalline mid-infrared lasers (pp. 262-358). Springer Berlin Heidelberg.
37. Vallin, J. T., Slack, G. A., Roberts, S. ve Hughes, A. E., 1970. Infrared absorption in some II-VI compounds doped with Cr. *Physical Review B*, 2(11), 4313.
38. Demirbas, U., Sennaroglu, A. ve Somer, M., 2006. Synthesis ve characterization of diffusion-doped $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ve $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$. *Optical Materials*, 28(3), 231-240.
39. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
40. Kulakov, M. P. ve Balyakina, I. V., 1991. Solid state wurtzite-sphalerite transformation ve phase boundaries in ZnSe-CdSe . *Journal of crystal growth*, 113(3), 653-658.
41. Fedorov, V. V., Mirov, S. B., Gallian, A., Badikov, D. V., Frolov, M. P., Korostelin, Y. V. ve Voronov, A., 2006. 3.77-5.05- μm tunable solid-state lasers based on Fe^{2+} -doped ZnSe crystals operating at low ve room temperatures. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 42(9), 907-917.
42. Voronov, A. A. E., Kozlovskii, V. I., Korostelin, Y. V., Lveman, A. I., Podmar'Kov, Y. P., Skasyrskii, Y. K. ve Frolov, M. P., 2008. A continuous-wave $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser. *Quantum Electronics*, 38(12), 1113.
43. Adams, J. J., Bibeau, C., Page, R. H., Krol, D. M., Furu, L. H. ve Payne, S. A., 1999. 4.0-4.5- μm lasing of $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ below 180 K, a new mid-infrared laser material. *Optics Letters*, 24(23), 1720-1722.
44. Cerny, P., Sun, H., Burns, D., Roy, U. N. ve Burger, A., 2005. Spectroscopic investigation ve continuous-wave laser demonstration utilising single crystal $\text{Cr}^{2+}:\text{CdZnTe}$. In *Advanced Solid-State Photonics* (p. MF11). Optical Society of America.
45. Trivedi, S. B., Kutcher, S. W., Wang, C. C., Jagannathan, G. V., Hömmerich, U., Bluiett, A. ve Boyd, P. R., 2001. Transition metal doped cadmium manganese telluride: A new material for tunable mid-infrared lasing. *Journal of Electronic Materials*, 30(6), 728-732.
46. Hömmerich, U., Wu, X., Davis, V. R., Trivedi, S. B., Grasza, K., Chen, R. J. ve Kutcher, S., 1997. Demonstration of room-temperature laser action at 2.5 μm from $\text{Cr}^{2+}:\text{Cd} 0.85 \text{ Mn } 0.15 \text{ Te}$. *Optics Letters*, 22(15), 1180-1182.

47. Bluiett, A. G., Hömmerich, U., Shah, R. T., Trivedi, S. B., Kutcher, S. W. ve Wang, C. C., 2002. Observation of lasing from Cr^{2+} : CdTe ve compositional effects in Cr^{2+} -doped II-VI semiconductors. *Journal of Electronic Materials*, 31(7), 806-810.
48. McKay, J., Schepler, K. L. ve Catella, G. C., 1999. Efficient grating-tuned mid-infrared Cr^{2+} : CdSe laser. *Optics Letters*, 24(22), 1575-1577.
49. Sorokina, I. T., Sorokin, E., Di Lieto, A., Tonelli, M., Mavrin, B. N. ve Vinogradov, E. A., 2005. A new broadly tunable room-temperature continuous-wave Cr^{2+} : ZnSxSe1-x laser. In *Advanced Solid-State Photonics* (p. MD1). Optical Society of America.
50. Brabec, T. ve Krausz, F., 2000. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics. *Reviews of Modern Physics*, 72(2), 545.
51. Sorokina, I. T., Sorokin, E., Di Lieto, A., Tonelli, M. ve Vinogradov, E. A., 2004. Spectroscopy ve room-temperature continuous-wave lasing from a new gain material Cr^{2+} : ZnSxSe1-x . In *Conference on Lasers ve Electro-Optics* (p. CThE1). Optical Society of America.
52. Erny, C., Heese, C., Haag, M., Gallmann, L. ve Keller, U., 2009. High-repetition-rate optical parametric chirped-pulse amplifier producing 1- μJ , sub-100-fs pulses in the mid-infrared. *Optics Express*, 17(3), 1340-1345.
53. Erny, C., Heese, C., Haag, M., Gallmann, L. ve Keller, U., 2009. High-repetition-rate optical parametric chirped-pulse amplifier producing 1- μJ , sub-100-fs pulses in the mid-infrared. *Optics Express*, 17(3), 1340-1345.
54. Moses, J., Manzoni, C., Huang, S. W., Cerullo, G. ve Kaertner, F. X., 2009. Temporal optimization of Ultra broadband high-energy OPCPA. *Optics Express*, 17(7), 5540-5555.
55. Brida, D., Marangoni, M., Manzoni, C., Silvestri, S. D. ve Cerullo, G., 2008. Two-optical-cycle pulses in the mid-infrared from an optical parametric amplifier. *Optics Letters*, 33(24), 2901-2903.
56. Kück, S., 2001. Laser-related spectroscopy of ion-doped crystals for tunable solid-state lasers. *Applied Physics B*, 72(5), 515-562.
57. E. Sorokin, I. T. Sorokina, C. Fischer. ve M. W. Sigrist, "Widely Tunable Cr^{2+} :ZnSe Laser Source for Trace-Gas Sensing," in *Advanced Solid-State Photonics (TOPS)*, C. Denman ve I. Sorokina, eds., Vol. 98 of OSA Trends in Optics ve Photonics Optical Society of America, 2005, p. 826.
58. Sorokina, I. T., 2004. Cr^{2+} -doped II-VI materials for lasers ve nonlinear optics. *Optical Materials*, 26(4), 395-412.
59. Carrig, T. J., 2002. Transition-metal-doped chalcogenide lasers. *Journal of electronic materials*, 31(7), 759-769.

60. Wagner, G. J., Carrig, T. J., Page, R. H., Schaffers, K. I., Ndad, J. O., Ma, X. ve Burger, A., 1999. Continuous-wave broadly tunable Cr^{2+} : ZnSe laser. Optics letters, 24(1), 19-21.
61. Rosenberger, F., 1993. Growth of zinc selenide single crystals by physical vapor transport in microgravity. Alabama Univ., Huntsville Report, 1.
62. Sorokina, I. T., 2008. Broadbve mid-infrared solid-state lasers (pp. 225-260). Springer Netherlves.
63. Cutter, J. R. ve Woods, J., 1979. Growth of single crystals of zinc selenide from the vapour phase. Journal of Crystal Growth, 47(3), 405-413.
64. Huang, X. M.veIgaki, K., 1986. Growth ve exciton luminescence of ZnSe ve $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ single crystals. Journal of Crystal Growth, 78(1), 24-30.
65. Kuznetsov, V. A., 1991. The physical chemistry of the hydrothermal crystal growth ve the crystallization of some A_2B_6 crystals. Progress in Crystal Growth ve Characterization of Materials, 21(1), 163-193.
66. Cantwell, G., Harsch, W. C., Cotal, H. L., Markey, B. G., McKeever, S. W. S. ve Thomas, J. E., 1992. Growth ve characterization of substrate-quality ZnSe single crystals using seeded physical vapor transport. Journal of Applied Physics, 71(6), 2931-2936.
67. Fujita, S., Mimoto, H., Takebe, H. ve Noguchi, T., 1979. Growth of cubic ZnS, ZnSe ve $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ single crystals by iodine transport. Journal of Crystal Growth, 47(3), 326-334.
68. Cantwell, G., Harsch, W. C., Cotal, H. L., Markey, B. G., McKeever, S. W. S. ve Thomas, J. E., 1992. Growth ve characterization of substrate-quality ZnSe single crystals using seeded physical vapor transport. Journal of Applied Physics, 71(6), 2931-2936.
69. Hartmann, H. ve Siche, D., 1994. ZnSe single crystal growth by the method of dissociative sublimation. Journal of Crystal Growth, 138(1), 260-265.
70. Namikawa, Y., 2011. ZnSe Single Crystals Grown by Vapor Growth Methods ve Their Applications. Sei Technical Review, (72), 25.
71. Korostelin, Y. V., Kozlovsky, V. I., Nasibov, A. S., Shapkin, P. V., Lee, S. K., Park, S. S. ve Lee, S. H., 1998. Seeded vapour-phase free growth of ZnSe single crystals direction. Journal of Crystal Growth, 184, 1010-1014.
72. Komar, V. K., Nalivaiko, D. P., Sulima, S. V., Zagoruiko, Y. A., Fedorenko, O. A., Kovalenko, N. O. ve Dubina, N. G., 2009. ZnSe: Cr laser crystals grown by Bridgman method. Functional Materials, 16(2), 193.
73. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr^{2+} -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 33(4), 609-619.

74. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Graham, K., Moskalev, I. S., Badikov, V. V. ve Panyutin, V., 2002. Erbium fiber laser-pumped continuous-wave microchip Cr^{2+} : ZnS ve Cr^{2+} : ZnSe lasers. *Optics Letters*, 27(11), 909-911.
75. Carrig, T. J., Wagner, G. J., Sennaroglu, A., Jeong, J. Y. ve Pollock, C. R., 2000. Mode-locked Cr^{2+} : ZnSe laser. *Optics Letters*, 25(3), 168-170.
76. Sorokin, E. ve Sorokina, I. T., 2002. Tunable diode-pumped continuous-wave Cr^{2+} : ZnSe laser. *Applied Physics Letters*, 80(18), 3289-3291.
77. Kozlovskii, V. I., Korostelin, Y. V., Lveman, A. I., Podmar'kov, Y. P. ve Frolov, M. P., 2003. Efficient lasing of a Cr^{2+} : ZnSe crystal grown from a vapour phase. *Quantum Electronics*, 33(5), 408.
78. Hongjuan, C., Yongkuan, X., Wei, Y., Xianglu, Y., Ruyue, Y. ve Zhanping, L., 2009. Growth of CdS crystals by the physical vapor transport method. *Journal of Semiconductors*, 30(10), 103002.
79. Burr, K. F. ve Woods, J., 1971. Growth of ZnSe single crystals from the vapour phase. *Journal of Crystal Growth*, 9, 183-188.
80. Somorjai, G. A. ve Jepsen, D. W., 1964. Evaporation Mechanism of CdS Single Crystals. II. Diffusion Controlled Evaporation of Cadmium-ve Sulfur-Doped CdS. *The Journal of Chemical Physics*, 41(5), 1394-1399.
81. Sorokina, I. T., 2004. Cr^{2+} -doped II-VI materials for lasers ve nonlinear optics. *Optical Materials*, 26(4), 395-412.
82. Zhiyu, H., Beijun, Z. ve Shifu, Z., 2007. Study on CdSe single crystal growth speed with vapor phase method. *Functional Materials*, 38, 4044.
83. Page, I. L. H., Skidmore, J. A., Schaffers, K. I., Beach, R. J., Payne, S. A. ve Krupke, W. F., 1997. Demonstrations of Diode-Pumped ve Grating-Tuned ZnSe: Cr^{2+} Lasers. *OSA Trends in Optics ve Photonics*, 10, 208-210.
84. Sorokin, E., Naumov, S. ve Sorokina, I. T., 2005. Ultrabroadband infrared solid-state lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics*, *IEEE Journal of*, 11(3), 690-712.
85. Sorokina, I. T., 2004. Cr^{2+} -doped II-VI materials for lasers ve nonlinear optics. *Optical Materials*, 26(4), 395-412.
86. Sorokin, E., Sorokina, I., Lieto, A. D., Tonelli, M. ve Minguzzi, P., 2003. February). Mode-locked ceramic Cr^{2+} : ZnSe laser. In *Advanced Solid-State Photonics* (p. 227). Optical Society of America.
87. Glass, A. J. ve Guenther, A. H., 1974. Laser Induced Damage to Optical Materials, 1973: a Conference Report. *Applied Optics*, 13(1), 74-88.

88. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
89. Zunger, A., 1986. Electronic structure of 3d transition-atom impurities in semiconductors. *Solid State Physics*, 39, 275-464.
90. Vallin, J. T., Slack, G. A., Roberts, S. ve Hughes, A. E., 1969. Near ve far infrared absorption in Cr doped ZnSe. *Solid State Communications*, 7(17), 1211-1214.
91. Vallin, J. T., Slack, G. A., Roberts, S. ve Hughes, A. E., 1970. Infrared absorption in some II-VI compounds doped with Cr. *Physical Review B*, 2(11), 4313.
92. Kaminska, M., Baranowski, J. M., Uba, S. M. ve Vallin, J. T., 1979. Absorption ve luminescence of Cr^{2+} (d4) in II-VI compounds. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 12(11), 2197.
93. Grebe, G. ve Schulz, H. J., 1972. Interpretation of Excitation Spectra of ZnS: Cr^{2+} by Fitting the Eigenvalues of the Tanabe-Sugano Matrices. *Physica Status Solidi (B)*, 54(1), K69-K72.
94. Grebe, G. ve Schulz, H. J., 1974. Luminescence of Cr^{2+} centres ve related optical interactions involving crystal field levels of chromium ions in zinc sulfide. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 29(12), 1803-1819.
95. Grebe, G., Roussos, G. ve Schulz, H. J., 1976. Cr^{2+} excitation levels in ZnSe ve ZnS. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 9(24), 4511.
96. Renz, R. ve Schulz, H. J., 1988. Temperature dependence of the lifetime of excited states for 3d transition element centres in II-VI crystals. *Journal of Luminescence*, 24, 221-224.
97. Goetz, H.J. Schulz, J. *Lumin.* 40/41 415.
98. Goetz, G., Zimmermann, H. ve Schulz, H. J., 1993. Jahn-Teller interaction at Cr^{2+} (d 4) centres in tetrahedrally coordinated II-VI lattices studied by optical spectroscopy. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 91(4), 429-436.
99. Pradella, H. ve Pohl, U. W., 1987. Luminescence of the Cr^{+} Centre in ZnSe. *Physica Status Solidi (B)*, 141(2), K143-K146.
100. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
101. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr^{2+} -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 33(4), 609-619.

102. Kaminska, M., Baranowski, J. M., Uba, S. M. ve Vallin, J. T., 1979. Absorption ve luminescence of Cr^{2+} (d4) in II-VI compounds. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 12(11), 2197.
103. Ivanov, V. Y., Shagov, A. A., Szczerbakow, A. ve Godlewski, M., 2001. Excitation mechanism of blue anti-Stokes ve 2.4 μm infrared emission in ZnSe : Cr. *Physica B: Condensed Matter*, 308, 942-944.
104. Terashima, K. ve Takena, M., 1991. Typical macroscopic defects in ZnSe crystals grown from the melt. *Journal of Crystal Growth*, 110(3), 623-625.
105. Fazzio, A., Caldas, M. J. ve Zunger, A., 1984. Many-electron multiplet effects in the spectra of 3 d impurities in heteropolar semiconductors. *Physical Review B*, 30(6), 3430.
106. Nelkowski, H. ve Grebe, G., 1970. IR-luminescence of ZnS : Cr. *Journal of Luminescence*, 1, 88-93.
107. Vallin, J. T. ve Watkins, G. D., 1974. EPR of Cr^{2+} in II-VI lattices. *Physical Review B*, 9(5), 2051.
108. Jahn, H. A. ve Teller, E., 1937. Stability of polyatomic molecules in degenerate electronic states. I. Orbital degeneracy. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical ve Engineering Sciences* (Vol. 161, No. 905, pp. 220-235). The Royal Society.
109. Bersuker, I. B. ve Blake, A. B., 1987. The jahn—teller effect ve vibronic interactions in modern chemistry: Plenum, New York, 1984 (ISBN 0-306-41319-1). xiv+ 319 pp. Price US \$45.00. *Analytica Chimica Acta*, 201, 371.
110. Engleman, R., 1972. *The Jahn-Teller Effect in Molecules ve Crystal s*, Willey-Interscience, New York.
111. Burger, A., Chattopadhyay, K., Nday, J. O., Ma, X., Morgan, S. H., Rablau, C. I. ve Payne, S. A., 2001. Preparation conditions of chromium doped ZnSe ve their infrared luminescence properties. *Journal of crystal growth*, 225(2), 249-256.
112. Ebrahim-Zadeh, M.veSorokina, I. T., 2008. *Mid-infrared coherent sources ve applications*. Springer Science ve Business Media.
113. Sorokina, I. T., 2008. *Broadbve mid-infrared solid-state lasers* (pp. 225-260). Springer Netherlands.
114. McKay, J. ve Schepler, K. L., 2001. *Solid-state ve diode-laser technology review*.
115. Yakimovich, V. N., Levchenko, V. I., Yablonski, G. P., Konstantinov, V. I., Postnova, L. I. ve Kutas, A. A., 1999. Vapour growth of bulk ZnSe single crystals. *Journal of Crystal Growth*, 198, 975-979.

116. Hömmerich, U., Jones, I. K., Nyein, E. E. ve Trivedi, S. B., 2006. Comparison of the optical properties of diffusion-doped polycrystalline Cr: ZnSe ve Cr: CdTe windows. *Journal of crystal growth*, 287(2), 450-453.
117. Ndap, J. O., Chattopadhyay, K., Adetunji, O. O., Zelmon, D. E. ve Burger, A., 2002. Thermal diffusion of Cr²⁺ in bulk ZnSe. *Journal of Crystal Growth*, 240(1), 176-184.
118. Jelínková, H., Korvea, P., Doroshenko, M. E., Basiev, T. T., Šulc, J., Němec, M. ve Kosmyna, M. B., 2007. Cr²⁺: ZnSe laser pumped by 1.66 μm or 1.97 μm radiations. *Laser Physics Letters*, 4(1), 23.
119. Vlasenko, N. A., Oleksenko, P. F., Mukhlyo, M. A., Denisova, Z. L. ve Veligura, L. I., 2013. ZnS: Cr ve ZnSe: Cr thin-film waveguide structures as electrically pumped laser media with an impact excitation mechanism. *Annalen der Physik*, 525(12), 889-905.
120. Jaszczyn-Kopec, P., Gallagher, J., Kallmann, H. ve Kramer, B., 1965. Electron ve hole trapping in ZnS phosphors investigated by electron-paramagnetic-resonance ve luminescence methods. *Physical Review*, 140(4A), A1309.
121. Williams, D. M., Krick, J. A. ve Remington, J. S., 1976. Pulmonary infection in the compromised host: part I. *American Review of Respiratory Disease*, 114(2), 359-394.
122. Taki, T. ve Bō, H., 1968. The Decay Behavior of Photo-Induced Electron Spin Resonance of Chromium in Zinc Sulfide. *Journal of the Physical Society of Japan*, 25(5), 1324-1329.
123. Fedorov, V. V., Gallian, A., Moskalev, I. ve Mirov, S. B., 2007. En route to electrically pumped broadly tunable middle infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors. *Journal of luminescence*, 125(1), 184-195.
124. Godlewski, M. ve Kaminska, M., 1980. The chromium impurity photogeneration transitions in ZnS, ZnSe ve ZnTe. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 13(35), 6537.
125. Martynov, V. ve Gorn, I., 1987. Optical Recharging of Chromium Ions in Zinc Selenide. *Kristallografiya*, 32(1), 131-136.
126. Vlasenko, N. A., Oleksenko, P. F., Denisova, Z. L., Mukhlyo, M. O. ve Veligura, L. I., 2008. Cr-related energy levels ve mechanism of Cr²⁺ ion photorecharge in ZnS: Cr. *physica status solidi (b)*, 245(11), 2550-2557.
127. Bernhardt, B., Sorokin, E., Jacquet, P., Thon, R., Becker, T., Sorokina, I. T.,... ve Hänsch, T. W., 2010. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with 2.4 μm Cr²⁺: ZnSe femtosecond lasers. *Applied Physics B*, 100(1), 3-8.
128. Vallin, J. T. ve Watkins, G. D., 1974. EPR of Cr²⁺ in II-VI lattices. *Physical Review B*, 9(5), 2051.

129. Goetz, G., Zimmermann, H. ve Schulz, H. J., 1993. Jahn-Teller interaction at Cr^{2+} (d^4) centres in tetrahedrally coordinated II–VI lattices studied by optical spectroscopy. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 91(4), 429-436.
130. Grebe, G.veSchulz, H. J., 1974. Luminescence of Cr^{2+} centres ve related optical interactions involving crystal field levels of chromium ions in zinc sulfide. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 29(12), 1803-1819.
131. Godlewski, M., Zakrzewski, A. J.veIvanov, V. Y., 2000. Auger-type excitation ve de-excitation processes in rare earth ve transition metal doped semiconductors. *Journal of Alloys ve Compounds*, 300, 23-31.
132. Surma, M. ve Godlewski, M., 1995. Nonradiative recombination processes in wide bve gap II-VI phosphor materials. *Radiation Effects ve Defects in Solids*, 135(1-4), 213-216.
133. Godlewski, M.veKaminska, M., 1980. The chromium impurity photogeneration transitions in ZnS, ZnSe ve ZnTe. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 13(35), 6537.
134. Fedorov, V. V., Gallian, A., Moskalev, I. ve Mirov, S. B., 2007. En route to electrically pumped broadly tunable middle infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors. *Journal of Luminescence*, 125(1), 184-195.
135. Zakrzewski, A. ve Godlewski, M., 1990. Isolated iron ve chromium as recombination centers in ZnS. *Journal of Applied Physics*, 67(5), 2457-2461.
136. Orgel, L. E., 1966. An introduction to transition-metal chemistry: ligve-field theory. Taylor ve Francis.
137. Zunger, A. ve Lindefelt., 1983. Electronic structure of transition-atom impurities in semiconductors: Substitutional 3 d impurities in silicon. *Physical Review B*, 27(2), 1191.
138. Singh, V. A. ve Zunger, A., 1985. Electronic structure of transition-atom impurities in GaP. *Physical Review B*, 31(6), 3729.
139. Glass, A. M., Johnson, A. M., Olson, D. H., Simpson, W. ve Ballman, A. A., 1984. Four-wave mixing in semi-insulating InP ve GaAs using the photorefractive effect. *Applied Physics Letters*, 44(10), 948-950.
140. Bhaskar, S., Dobal, P. S., Rai, B. K., Katiyar, R. S., Bist, H. D., Ndap, J. O. ve Burger, A., 1999. Photoluminescence study of deep levels in Cr-doped ZnSe. *Journal of Applied Physics*, 85(1), 439-443.
141. Lehr, M. U., Litzenburger, B., Kreissl, J., Pohl, U. W., Selber, H. R., Schulz, H. J. ve Worschech, L., 1997. Identification of near-infrared luminescence in ZnSe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 9(3), 753.
142. Ivanov, V. Y., Shagov, A. A., Szczerbakow, A. ve Godlewski, M., 2001. Excitation mechanism of blue anti-Stokes ve 2.4 μm infrared emission in ZnSe: Cr. *Physica B: Condensed Matter*, 308, 942-944.

143. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
144. Henderson, B. ve Imbusch, G. F., 1989. *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids* Oxford University Press.
145. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr²⁺-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 33(4), 609-619.
146. Thijs, P. J., Tiemeijer, L. F.veBisma, J. J. M., 1994. Progress in long-wavelength strained-layer InGaAs (P) quantum-well semiconductor lasers ve amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30, 477-499.
147. Erny, C., Heese, C., Haag, M., Gallmann, L. ve Keller, U., 2009. High-repetition-rate optical parametric chirped-pulse amplifier producing 1-μJ, sub-100-fs pulses in the mid-infrared. *Optics Express*, 17(3), 1340-1345.
148. Godlewski, M. ve Kaminska, M., 1980. The chromium impurity photogeneration transitions in ZnS, ZnSe ve ZnTe. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 13(35), 6537.
149. Grebe, G., Roussos, G. ve Schulz, H. J., 1976. Cr²⁺ excitation levels in ZnSe ve ZnS. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 9(24), 4511.
150. Rablau, C. I., Ndap, J. O., Ma, X., Burger, A. ve Giles, N. C., 1999. Absorption ve photoluminescence spectroscopy of diffusion-doped ZnSe: Cr²⁺. *Journal of Electronic Materials*, 28(6), 678-682.
151. Bluiett, A. G., Hömmerich, U., Shah, R. T., Trivedi, S. B., Kutcher, S. W. ve Wang, C. C., 2002. Observation of lasing from Cr²⁺: CdTe ve compositional effects in Cr²⁺-doped II-VI semiconductors. *Journal of Electronic Materials*, 31(7), 806-810.
152. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
153. PAGE, R. H., SCHAFFERS, K. I., DELOACH, L. D., WILKE, G. D., PATEL, F. D., TASSANO, J. B. ve BURGER, A., 2002. Cr²⁺-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *SPIE milestone series*, (173), 308-318.
154. Fazzio, A., Caldas, M. J.veZunger, A., 1984. Many-electron multiplet effects in the spectra of 3 d impurities in heteropolar semiconductors. *Physical Review B*, 30(6), 3430.

155. Sorokin, E. ve Sorokina, I. T., 2002. Tunable diode-pumped continuous-wave Cr^{2+} : ZnSe laser. *Applied Physics Letters*, 80(18), 3289-3291.
156. Albers, P., Stark, E. ve Huber, G., 1986. Continuous-wave laser operation ve quantum efficiency of titanium-doped sapphire. *JOSA B*, 3(1), 134-139.
157. Moulton, P. F., 1986. Spectroscopic ve laser characteristics of $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$. *JOSA B*, *Journal of the Optical Society of America B*, 3(1), 125-133.
158. Sorokina, I. T., Sorokin, E. ve Carrig, T., 2006. Femtosecond pulse generation from a SESAM mode-locked Cr: ZnSe laser. In *Conference on Lasers ve Electro-Optics (p. CMQ2)*. Optical Society of America.
159. Sorokina, I. T. ve Sorokin, E., 2007. Chirped-mirror dispersion controlled femtosecond Cr: ZnSe laser. In *Advanced Solid-State Photonics (p. WA7)*. Optical Society of America.
160. Coddington, I., Swann, W. C. ve Newbury, N. R., 2008. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs. *Physical Review Letters*, 100(1), 013902.
161. Bernhardt, B., Ozawa, A., Jacquet, P., Jacquety, M., Kobayashi, Y., Udem, T. ve Picqué, N., 2010. Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy. *Nature Photonics*, 4(1), 55-57.
162. Keilmann, F., Gohle, C. ve Holzwarth, R., 2004. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer. *Optics Letters*, 29(13), 1542-1544.
163. Schliesser, A., Brehm, M., Keilmann, F. ve van der Weide, D., 2005. Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing. *Optics Express*, 13(22), 9029-9038.
164. Yasui, T., Saneyoshi, E. ve Araki, T., 2005. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution ve rapid data acquisition. *Applied Physics Letters*, 87(6), 061101.
165. Ganz, T., Brehm, M., Von Ribbeck, H. G., van der Weide, D. W. ve Keilmann, F., 2008. Vector frequency-comb Fourier-transform spectroscopy for characterizing metamaterials. *New Journal of Physics*, 10(12), 123007.
166. Giaccari, P., Deschênes, J. D., Saucier, P., Genest, J. ve Tremblay, P., 2008. Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method. *Optics Express*, 16(6), 4347-4365.
167. Jacquet, P., Mveon, J., Bernhardt, B., Holzwarth, R., Guelachvili, G., Hänsch, T. W. ve Picqué, N., 2009. Frequency comb Fourier transform spectroscopy with kHz optical resolution. In *Fourier Transform Spectroscopy (p. FMB2)*. Optical Society of America.
168. Newbury, N. R., Coddington, I. ve Swann, W., 2010. Sensitivity of coherent dual-comb spectroscopy. *Optics express*, 18(8), 7929-7945.

169. Bernhardt, B., Sorokin, E., Jacquet, P., Thon, R., Becker, T., Sorokina, I. T., ... ve Hänsch, T. W., 2010. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with 2.4 μm Cr^{2+} : ZnSe femtosecond lasers. *Applied Physics B*, 100(1), 3-8.
170. Moskalev, I., Fedorov, V. ve Mirov, S., 2004. Multiwavelength mid-IR spatially-dispersive CW laser based on polycrystalline Cr^{2+} : ZnSe. *Optics Express*, 12(20), 4986-4992.
171. Mirov, S. B., Fedorov, V. V., Moskalev, I. S. ve Martyshkin, D. V., 2007. Recent progress in transition-metal-doped II–VI mid-IR lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 13(3), 810-822.
172. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.
173. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B. ve Burger, A., 1997. Cr^{2+} -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 33(4), 609-619.
174. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B., ve Burger, A., 1997. Cr^{2+} -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 33(4), 609-619.
175. Wagner, G. J., Carrig, T. J., Page, R. H., Schaffers, K. I., Ndad, J. O., Ma, X. ve Burger, A., 1999. Continuous-wave broadly tunable Cr^{2+} : ZnSe laser. *Optics letters*, 24(1), 19-21.
176. Podlipensky, A. V., Shcherbitsky, V. G., Kuleshov, N. V., Levchenko, V. I., Yakimovich, V. N., Mond, M. ve Kück, S., 2001. Efficient laser operation ve continuous-wave diode pumping of Cr^{2+} : ZnSe single crystals. *Applied Physics B*, 72(2), 253-255.
177. Sorokin, E. ve Sorokina, I. T., 2002. Tunable diode-pumped continuous-wave Cr^{2+} : ZnSe laser. *Applied Physics Letters*, 80(18), 3289-3291.
178. Sorokin, E., Sorokina, I., Lieto, A. D., Tonelli, M. ve Minguzzi, P., 2003. Mode-locked ceramic Cr^{2+} : ZnSe laser. In *Advanced Solid-State Photonics* (p. 227). Optical Society of America.
179. Sorokin, E. ve Sorokina, I. T., 2002. Tunable diode-pumped continuous-wave Cr^{2+} : ZnSe laser. *Applied Physics Letters*, 80(18), 3289-3291.
180. Burger, A., Chattopadhyay, K., Ndad, J. O., Ma, X., Morgan, S. H., Rablau, C. I. ve Payne, S. A., 2001. Preparation conditions of chromium doped ZnSe ve their infrared luminescence properties. *Journal of Crystal Growth*, 225(2), 249-256.

181. Rablau, C. I., Ndap, J. O., Ma, X., Burger, A. ve Giles, N. C., 1999. Absorption ve photoluminescence spectroscopy of diffusion-doped ZnSe: Cr²⁺. Journal of Electronic Materials, 28(6), 678-682.
182. Pradella, H. ve Pohl, U. W., 1987. Luminescence of the Cr⁺ Centre in ZnSe. Physica Status Solidi (b), 141(2), K143-K146.
183. Kreissl, J. ve Schulz, H. J., 1996. Transition-metal impurities in II–VI semiconductors: characterization ve switching of charge states. Journal of Crystal Growth, 161(1), 239-249.
184. Welford, D. ve Moulton, P. F., 1988. Room-temperature operation of a Co: MgF₂ laser. Optics Letters, 13(11), 975-977.
185. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 32(6), 885-895.
186. Page, R. H., Schaffers, K., DeLoach, L. D., Wilke, G. D., Patel, F. D., Tassano Jr, J. B., ve Burger, A., 1997. Cr²⁺-doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 33(4), 609-619.
187. Sorokin, E. ve Sorokina, I. T., 2002. Tunable diode-pumped continuous-wave Cr²⁺: ZnSe laser. Applied Physics Letters, 80(18), 3289-3291.
188. Wagner, G. J., Carrig, T. J., Page, R. H., Schaffers, K. I., Ndap, J. O., Ma, X. ve Burger, A., 1999. Continuous-wave broadly tunable Cr²⁺: ZnSe laser. Optics Letters, 24(1), 19-21.
189. Sorokina, I. T., Sorokin, E., Di Lieto, A., Tonelli, M., Page, R. H. ve Schaffers, K. I., 2001. Efficient broadly tunable continuous-wave Cr²⁺: ZnSe laser. JOSA B, 18(7), 926-930.
190. Sorokin, E., Naumov, S. ve Sorokina, I. T., 2005. Ultrabroadband infrared solid-state lasers. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 11(3), 690-712.
191. Cankaya, H., Cizmeciyan, M. N., Beyatlı, E., Gorgulu, A. T., Kurt, A. ve Sennaroglu, A., 2012. Injection-seeded, gain-switched tunable Cr: ZnSe laser. Optics Letters, 37(2), 136-138.
192. Demirbas, U. ve Sennaroglu, A., 2006. Intracavity-pumped Cr²⁺: ZnSe laser with ultrabroad tuning range between 1880 ve 3100 nm. Optics Letters, 31(15), 2293-2295.
193. Fischer, C., Sorokin, E., Sorokina, I. T. ve Sigrist, M. W., 2005. Photoacoustic monitoring of gases using a novel laser source tunable around 2.5 μm. Optics ve Lasers in Engineering, 43(3), 573-582.

194. Cankaya, H., Cizmeciyan, M. N., Beyatlı, E., Gorgulu, A. T., Kurt, A. ve Sennaroglu, A., 2012. Injection-seeded, gain-switched tunable Cr: ZnSe laser. *Optics Letters*, 37(2), 136-138.
195. Berry, P. A. ve Schepler, K. L., 2010. High-power, widely-tunable Cr²⁺: ZnSe master oscillator power amplifier systems. *Optics Express*, 18(14), 15062-15072.
196. Cizmeciyan, M. N., Cankaya, H., Kurt, A. ve Sennaroglu, A., 2009. Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr²⁺: ZnSe laser at 2420 nm. *Optics Letters*, 34(20), 3056-3058.
197. Sennaroglu, A., Demirbas, U., Cankaya, H., Cizmeciyan, N., Kurt, A. ve Somer, M., 2010. Chromium-doped zinc selenide gain media: from synthesis to pulsed mid-infrared laser operation. In *OPTO* (pp. 75981B-75981B). International Society for Optics ve Photonics.
198. Tittel, F. K. ve Richter, D., 2003. Mid-infrared laser applications in spectroscopy,” in *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*. In *Solid State Mid-Infrared Laser Sources*, IT Sorokin ve KL Vodopyanov (Eds.), Springer Verlag, Topics Appl. Phys.
199. Rothman, L. S., Rinslve, C. P., Goldman, A., Massie, S. T., Edwards, D. P., Flaud, J. M., ve Schroeder, J., 1998. The HITRAN molecular spectroscopic database ve HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition. *Journal of Quantitative Spectroscopy ve Radiative Transfer*, 60(5), 665-710.
200. Tittel, F. K., Richter, D. ve Fried, A., 2003. Mid-infrared laser applications in spectroscopy. In *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources* (pp. 458-529). Springer Berlin Heidelberg.
201. Waynant, R. W., İl ev, I. K. ve Gannot, I., 2001. Mid-infrared laser applications in medicine ve biology. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical ve Engineering Sciences*, 359(1780), 635-644.
202. Moeckli, M. A., Hilbes, C. ve Sigrist, M. W., 1998. Photoacoustic multicomponent gas analysis using a Levenberg–Marquardt fitting algorithm. *Applied Physics B*, 67(4), 449-458.
203. Oomens, J., Persijn, S., de Vries, H., Reuss, J., Parker, D. ve Harren, F., 1998. Laser based photoacoustic trace gas detection; Applications in post-harvest physiology. In *Quantum Electronics Conference, 1998. 1998 QEEC. European* (pp. 38-38). IEEE.
204. Moeckli, M. A., Fierz, M. ve Sigrist, M. W., 1996. Emission factors for ethene ve ammonia from a tunnel study with a photoacoustic trace gas detection system. *Environmental Science ve Technology*, 30(9), 2864-2867.
205. Nägele, M. ve Sigrist, M. W., 2000. Mobile laser spectrometer with novel resonant multipass photoacoustic cell for trace-gas sensing. *Applied Physics B: Lasers ve Optics*, 70(6), 895-901.

206. Ageev, B. G., Ponomarev, Y. N. ve Sapozhnikova, V. A., 1998. Laser photoacoustic spectroscopy of biosystems gas exchange with the atmosphere. *Applied Physics B*, 67(4), 467-473.
207. Harren, F. J., Cotti, G., Oomens, J. ve Hekkert, S. T. L., 2000. Photoacoustic spectroscopy in trace gas monitoring. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*.
208. Bohren, A. ve Sigrist, M. W., 1997. Optical parametric oscillator based difference frequency laser source for photoacoustic trace gas spectroscopy in the 3 μm mid-IR range. *Infrared Physics ve Technology*, 38(7), 423-435.
209. Bozóki, Z., Sneider, J., Gingl, Z., Mohácsi, Á., Szakáll, M., Bor, Z. ve Szabó, G., 1999. A high-sensitivity, near-infrared tunable-diode-laser-based photoacoustic water-vapour-detection system for automated operation. *Measurement Science ve Technology*, 10(11), 999.
210. Bijnen, F. G. C., Harren, F. J. M., Hackstein, J. H. P. ve Reuss, J., 1996. Intracavity CO laser photoacoustic trace gas detection: cyclic CH₄, H₂O ve CO₂ emission by cockroaches ve scarab beetles. *Applied Optics*, 35(27), 5357-5368.
211. Kapitanov, V. A., Ponomarev, Y. N., Song, K., Cha, H. K. ve Lee, J., 2001. Resonance photoacoustic spectroscopy ve gas analysis of gaseous flow at reduced pressure. *Applied Physics B*, 73(7), 745-750.
212. Webber, M. E., Pushkarsky, M. ve Patel, C. K. N., 2003. Fiber-amplifier-enhanced photoacoustic spectroscopy with near-infrared tunable diode lasers. *Applied Optics*, 42(12), 2119-2126.
213. Pushkarsky, M. B., Webber, M. E., Baghdassarian, O., Narasimhan, L. R. ve Patel, C. K. N., 2002. Laser-based photoacoustic ammonia sensors for industrial applications. *Applied Physics B*, 75(2-3), 391-396.
214. Fried, A. ve Berg, W. W., 1983. Photoacoustic detection of HCl. *Optics Letters*, 8(3), 160-162.
215. Sorokina, I. T., 2004. Cr²⁺-doped II–VI materials for lasers ve nonlinear optics. *Optical Materials*, 26(4), 395-412.
216. Kim, C., Martyshkin, D. V., Fedorov, V. V. ve Mirov, S. B., 2008. Mid-infrared Cr²⁺: ZnSe reom powder lasers. *Optics Express*, 16(7), 4952-4959.
217. Komar, V. K., Nalivaiko, D. P., Sulima, S. V., Zagoruiko, Y. A., Fedorenko, O. A., Kovalenko, N. O. ve Dubina, N. G., 2009. ZnSe: Cr laser crystals grown by Bridgman method. *Functional Materials*, 16(2), 193.
218. DeLoach, L. D., Page, R. H., Wilke, G. D., Payne, S. ve Krupke, W. F., 1996. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy ve laser demonstration of a new class of gain media. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32(6), 885-895.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Yadgar Hussein SHWAN AL-BAJALAN

Doğum Tarihi ve Yeri: 05.02.1987 - Sulaimani, Irak

E-posta adresi : yadgarshwan87@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Sulaimani Üniversitesi, 2007-2011

