

**SÜPERİLETKEN LİNEER HIZLANDIRICIDAN ELDE EDİLEN
SERBEST ELEKTRON LAZERİNE DAYALI KIZILÖTESİ
SPEKTROSKOPİSİ VE UYGULAMA ALANLARI**

Elif TATOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

Elif TATOĞLU tarafından hazırlanan “SÜPERİLETKEN LİNEER HIZLANDIRICIDAN ELDE EDİLEN SERBEST ELEKTRON LAZERİNE DAYALI KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ VE UYGULAMA ALANLARI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr., Pervin ARIKAN

.....

Tez Danışmanı, Fizik

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr., Ömer YAVAŞ

.....

Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr., Pervin ARIKAN

.....

Fizik, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr., Mustafa Kemal ÖZTÜRK

.....

Fizik, Gazi Üniversitesi

Tarih: 14/06/2012

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Elif TATOĞLU

**SÜPERİLETKEN LİNEER HIZLANDIRICIDAN ELDE EDİLEN SERBEST
ELEKTRON LAZERİNE DAYALI KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ VE
UYGULAMA ALANLARI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Elif TATOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2012

ÖZET

Bu çalışmada, kızılötesi serbest elektron lazerinin (IR SEL) fiziği anlatılmış ve SEL uygulamaları incelenmiştir. Türk Hızlandırıcı Merkezi projesinde kullanılması düşünülen SEL dalgaboyu aralığı 2.5-250 μm 'dir. Bu dalgaboyu aralığında dünyadaki SEL laboratuvarlarında yapılan endüstriyel ve bilimsel uygulamaları incelenmiş ve SEL laboratuvarlarında kullanılan malzeme, cihazlar, laboratuvar koşulları belirlenmiştir. Ayrıca incelenen bu uygulamaların, THM TARLA tesisinde kullanılacak olan osilatör SEL ile yapılabilecek malzeme-SEL etkileşimi için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Malzeme karakterizasyonu için kullanılan ince filmlerin büyütülmesi, kaplanması, işlenmesiyle ilgili yöntemler belirlenmiştir. Bunlardan PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) ile $\text{SiO}_2 - \text{SiN}$ ince filmlerinin büyütülmesi ve FTIR (Fourier Transform IR) Spektroskopisi ile karakterize edilmesi çalışmaları teorik ve deneysel olarak anlatılmıştır.

Bilim Kodu : 202.1.008
Anahtar Kelimeler : Kızılötesi spektroskopisi, SEL, lineer hızlandırıcı, IR SEL uygulama alanları
Sayfa Adedi : 82
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Pervin ARIKAN

**INVESTIGATION OF INFRARED SPECTROSCOPY AND ITS
APPLICATIONS BASED ON FREE ELECTRON LASER PRODUCED BY
SUPERCONDUCTING LINEAR ACCELERATOR**

(M.Sc. Thesis)

Elif TATOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

June 2012

ABSTRACT

The scope of this thesis is to represent the physics and the investigation of the applications of infrared free electron laser. The wavelength which is considered to be used at Turkish Accelerator Center is in the range of 2.5-250 μm . Among the industrial and scientific applications, and the material characterisation with FEL which performed in FEL laboratories around the world were investigated for this range of wavelength, and the used materials, devices and laboratory conditions determined for FEL laboratories. Moreover, applicability of interactions of material-FEL investigated for the establishment of THM IR FEL. The methods for the enlargement and coating of the films for the material characterisation were investigated. Among these methods with the help of PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) the $\text{SiO}_2 - \text{SiN}$ thin film enlargement and the studies about characterisation with FTIR (Fourier Transform IR) were presented as theoretically and experimentally.

Science Code : 202.1.008

Key Words : IR spectroscopy, FEL, linear accelerator, IR FEL applications

Page Number: 82

Adviser : Prof. Dr. Pervin ARIKAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Pervin ARIKAN’a, DPT destekli “Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarlarının Kurulumu” isimli proje kapsamında bilgilerinden yararlandığım Ankara Üniversitesi’nden Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ’a, Bilkent Üniversitesi İAL’de Class 100 temiz oda eğitimimi sağlayan Sayın Prof. Dr. Atilla AYDINLI’ya, bu zorlu dönemde bana daima yardımda bulunan biricik aileme ve eşim Adil AYTOĞAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma, DPT2006K – 120470 kodlu, “Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları” isimli proje tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİ	4
2.1. Elektromagnetik Spektrum ve Kızılötesi Bölge.....	4
2.2. Serbest Elektron Lazerinin Elde Edilmesi	7
2.2.1. Elektron tabancası.....	8
2.2.2. Paketleyici.....	9
2.2.3. Hızlandırıcı.....	10
2.2.4. Salındırıcı (Undulatör).....	12
2.2.5. Optik Kavite (Ayna sistemi).....	15
2.3. Serbest Elektron Lazeri (SEL).....	16
2.3.1. SEL çeşitleri.....	17
3. THM TARLA TESİSİ VE DENEY İSTASYONLARI.....	19
3.1 THM TARLA Tesisi.....	19
3.2 TARLA Deney İstasyonları.....	21
4. UYGULAMA DENEYİ.....	23
4.1. PECVD Cihazı ve İnce Film Büyütme.....	23
4.2. Örneklerin Hazırlanması.....	24
4.3. Büyütülen İnce Filmlerin FTIR Spektroskopisi ile Karakterizasyonu.....	27

Sayfa

5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	31
5.1 TARLA Genel Kızılötesi Spektroskopi Laboratuvarı.....	31
5.2 TARLA Genel Kızılötesi Spektroskopi Laboratuvarı için Gerekli Cihazlar.....	32
5.2.1. İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS).....	33
5.2.2. Fourier-transform spektrometresi (FTIR).....	34
5.2.3. Tarayıcı elektron mikroskopisi (SEM).....	36
5.2.4. Saçılmalı yakın alan optik mikroskopisi (SNOM).....	38
5.2.5. Elipsometre.....	40
5.2.6. Kilitli yükselteçler.....	41
5.2.7. Demet bölücü.....	42
5.2.8. IR rezonans çoklufoton iyonizasyonu (IR-REMPI).....	43
5.2.9. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBs).....	44
6. IR SEL' İN BİLİMSEL, ENDÜSTRİYEL VE MALZEME UYGULAMALARI.....	46
7. DÜNYADA IR SEL İLE BİLİMSEL, ENDÜSTRİYEL VE MALZEME UYGULAMALARI YAPAN LABORATUVARLAR.....	62
7.1 CLIO IR SEL Laboratuvarı (Orsay, Fransa).....	62
7.2. HZDR IR SEL Laboratuvarı (Dresden, Almanya).....	65
7.3. FELIX IR SEL Laboratuvarı (Nieuwegein, Hollanda).....	67
7.4. Jefferson IR SEL Laboratuvarı (Amerika).....	69
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR.....	74
EKLER.....	79
EK-1 Deney istasyonları ve temiz oda yerleşim planı.....	80
EK-2 Temiz oda.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Sİ ve Nİ hızlandırıcıların karşılaştırılması.....	12
Çizelge 3.1. TARLA elektron demet parametreleri.....	20
Çizelge 3.2. TARLA parametreleri.....	20
Çizelge 4.1. SiN (Silisyum Nitrat) büyütme için kullanılan parametreler.....	26
Çizelge 4.2. SiN (Silisyum Nitrat) ikinci kısım büyütme için kullanılan parametreler.....	26
Çizelge 4.3. SiON (Silisyum Oksinitrat) büyütme için kullanılan parametreler.....	26
Çizelge 4.4. SiON (Silisyum Oksinitrat) ikinci kısım büyütme için kullanılan parametreler.....	27
Çizelge 4.5. SiO (Silisyum Oksit) büyütme için kullanılan parametreler.....	27
Çizelge 4.6. Sınır titreşim frekansları ve onların fonksiyonel gruplarıyla ilişkileri.....	30
Çizelge 7.1. CLIO Laboratuvarının elektron demeti ve salındırıcı parametreleri.....	64
Çizelge 7.2. CLIO serbest elektron lazeri parametreleri.....	64
Çizelge 7.3. HZDR’de üretilen ışımının ana parametreleri.....	66
Çizelge 7.4 FELIX’e ait parametreler.....	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.....	4
Şekil 2.2. FTIR Spektrometresinin çalışma prensibi.....	6
Şekil 2.3. SEL'in şematik görünümü.....	7
Şekil 2.4. Termiyonik tabancanın çalışma düzeni.....	9
Şekil 2.5. Elektromanyetik dalga üzerinde ilerleyen elektron hareketi.....	10
Şekil 2.6. Salındırıcı magnet içinde elektron-dalga hareketi (CLIO).....	13
Şekil 2.7. Magnet içindeki parçacık hareketi.....	14
Şekil 2.8. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşme sonucu meydana gelen koherent ışınım.....	15
Şekil 2.9. Yükselteç SEL oluşumu.....	17
Şekil 2.10. SASE SEL oluşumu.....	18
Şekil 3.1. THM TARLA tesisinin şematik gösterimi.....	19
Şekil 4.1. PECVD şematik görünümü.....	24
Şekil 4.2. Bir araştırma elipsometrisinin şematik görünümü.....	28
Şekil 4.3. Tek bağ, ikili bağ, üçlü bağ ve parmaklı bölgesinde alınan titreşimlerin spektrumu.....	30
Şekil 5.1. SIMS tekniğinin çalışma prensibi (Leibniz Institute for Solid State and Material Research Dresden).....	33
Şekil 5.2. FTIR deney düzeneği şeması (CIC nanoGUNE, Nano Science Cooperative Research Center).....	35
Şekil 5.3. SEM deney düzeneği şeması (ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich).....	37
Şekil 5.4. SNOM deney düzeneğinin şeması (Nature Communications (birinci şekil), Neaspec (ikinci şekil)).....	39
Şekil 5.5. REMPI şematik gösterimi.....	44

Şekil	Sayfa
--------------	--------------

Şekil 6.1. 30 keV enerji için n-tipi silikon içine tavlama yapılmadan sadece bor implant edilmiş profil görünümü ($6.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ dozunda).....	48
Şekil 6.2. Deney düzeneğinin şeması.....	49
Şekil 6.3. (a) s-SNOM deney düzeneği: s- veya p-polarize ışığın (k dalga vektörüyle), bir SFM (tarayıcı kuvvet mikroskobu) ucun BaTiO_3 örneğinin yüzeyine yaklaştırılmasıyla saçılması (b) tek kristal BaTiO_3 örneğinin PFM (piezotepkimeli kuvvet mikroskobu) görüntüsü....	51
Şekil 6.4. (a) $\lambda = 16.7$ ve $17.2 \text{ } \mu\text{m}$ 'de iki boyutlu tarama görüntüleri (b) Yakın-alan saçılma sinyalleri, $16.4 \text{ } \mu\text{m} < \lambda < 17 \text{ } \mu\text{m}$ aralığında sinyaller çok güçlü.....	53
Şekil 6.5. Kuantum noktaların oluşumu.....	54
Şekil 6.6. THz pik yoğunluğu $\sim 6 \text{ MW/cm}^2$ ve $46 \text{ } \mu\text{m}$ (27 meV) SEL 4 K'de NIR demeti boyunca üretilen yanbandlardan alınan spektrum.....	55
Şekil 6.7. a) İki-foton QWIPs ve b) doğrusal QWIPs için band diyagramı, dalga fonksiyonu ve uygulama yönü.....	56
Şekil 6.8. SEL otokorelasyon ölçümleri için deney düzeneği.....	57
Şekil 6.9. (a) İki aniyon olan C_{76}^{-2} ve C_{76} arasındaki geometrik olarak optimize edilmiş D_2 kafes yapıları üzerinde, elektron yoğunluğu değişiminin haritalandırılması (b) C_{76}^{-2} iyonun izomeri olan D_2	58
Şekil 6.10. 1 ms atma süresi boyunca oluşan eriyik derinliği.....	59
Şekil 6.11. Uygulamada kullanılan FNC deney düzeneği.....	61
Şekil 7.1. CLIO laboratuvar binası.....	62
Şekil 7.2. HZDR laboratuvarının şematik görünümü.....	65
Şekil 7.3. FELIX deney düzeneği ve elektronik sinyalin spektroskopisi.....	68
Şekil 7.4. FELIX laboratuvarı deney istasyonları Şekil 7.4 FELIX laboratuvarı deney istasyonları.....	68
Şekil 7.5. JLAB SEL deney istasyonu.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Süper iletken dokuz hücreli RF kaviterler (FNAL).....	11
Resim 4.1. Sırasıyla PECVD cihazı, kullanılan bilgisayar ve depodaki gazlar.....	25
Resim 5.1. SIMS cihazı (Aalto University).....	34
Resim 5.2. FTIR cihazı (Ester Segal Lab).....	35
Resim 5.3. SEM cihazı (Silcox Research Group, Cornell University).....	37
Resim 5.4. SNOM cihazı (Nanounity).....	39
Resim 5.5. Elipsometre cihazı.....	40
Resim 5.6. Kilitli yükselteç (Lambda Photometrics).....	41
Resim 5.7. (a) İki renkli levha (b) Benek nokta (c) Polarize olmayan (d) Morötesi levha (e) Kızılötesi levha (f) Görünür ve NIR levha demet bölücüler.....	43
Resim 5.8. LIBs cihazı (Ocean Optics).....	45
Resim 6.1. 80 nm çaplı bir altın nanoparçacık taşıyan piramidal AFM destekli ucun dipten (örnek tarafından) görünüşü.....	50
Resim 6.2. Resim 6.2. Örnek yüzeyinde oluşan çatlakların süreye ve frekansa bağlı değişimi (1. örnek $\tau = 250 \mu s$, $f = 60 \text{ Hz}$, $\lambda = 100 \mu m$; 2. Örnek $\tau = 750 \mu s$, $f = 30 \text{ Hz}$, $\lambda = 100 \mu m$; 3. örnek $\tau = 1000 \mu s$, $f = 30 \text{ Hz}$, $\lambda = 100 \mu m$; 4. örnek $\tau = 1000 \mu s$, $f = 10 \text{ Hz}$, $\lambda = 200 \mu m$).....	60
Resim 6.3. Termograf SVIT ve THz görüntüsü.....	61
Resim 7.1. AFMIR-PTIR.....	63
Resim 7.2. FT-ICR kütle spektrometresi (Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance).....	63
Resim 7.3. Lazer uygulanmış polyester kumaş.....	70
Resim 7.4. Lazer mikroişleme ile oluşturulan 12 mikronluk mikro-optik Fresnel Lens parçaları. Bu resimler lazer ışınının mikro büyüklükteki yapılara nanometre seviyesinde hassasiyette şekil verilebileceğini gösterir.....	71

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

Simgeler	Açıklama
fs	Femtosaniye
ps	Pikosaniye
nC	Nano coulomb
λ	Dalgaboyu
ν	Frekans
c	Işık hızı
μm	Mikrometre
μJ	Mikro joule
W	Watt
MHz	Mega hertz
eV	Elektron Volt
Å	Angström
B	Bor
Ti	Titanyum
Si	Silisyum
SiO	Silisyum oksit
SiN	Silisyum nitrat
SiON	Silisyum oksinitrat
SiH₄	Silan
N₂O	Nitröz oksit
NH₃	Amonyak
LNO	Lityum niobate
Kısaltmalar	Açıklama

DPT	Devlet planlama teşkilatı
THM	Türk hızlandırıcı merkezi
TARLA	Turkish accelerator and radiation laboratory at Ankara
İAL	İleri araştırmalar laboratuvarı (Bilkent Üni.)
SEL	Serbest elektron lazeri
CW	Sürekli dalga
DC	Doğrusal akım
UV	Morötesi
GB	Görünür bölge
IR	Kızılötesi
FTIR	Fourier kızılötesi geçiş spektroskopisi
CVD	Kimyasal buhar depolama
PECVD	Plazma artırılmış kimyasal buhar depolama
ATR	Zayıflatılmış toplam yansıma
SIMS	İkincil iyon kütle spektroskopisi
SEM	Tarayıcı elektron mikroskobu
SNOM	Saçılmalı yakın alan optik mikroskobu
IR REMPI	IR Rezonans çoklu foton iyonizasyonu
IR MPED	IR elektron ayırma spektroskopisi
SOAs	Yarıiletken optik yükselteç
TOD	Termal optik dedektörü
IR MPD	Kızılötesi çoklu foton ayırma
LIBs	Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi
IOTs	İndükleme çıkışlı tüpler
NCW	Yalıtkan su
Nd:YAG	Neodymiyum-katkılı yitriyum alüminyum garnet
Kısaltmalar	Açıklama

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
OPO/OPA	Optik parametrik osilator/yükselteç
FT-ICR	Fourier geçiş iyon siklotron rezonans
MEMS	Mikro-elektrik mekanik sistemler
FNC	FIR-NIR dönüştürücü ile görüntüleme
ISO	Isoproponal
QD	Kuantum nokta
MBE	Moleküler demet epitaksi
QWIPs	Kuantum kuyu kızılötesi fotodedektör
PL	Fotoluminesans
XRD	X-ışınları kırınımı
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Almanya)
CLIO	Hızlandırıcı ve SEL merkezi (Orsay, Fransa)
FELIX	Hızlandırıcı ve SEL merkezi (Nieuwegein, Hollanda)
JLAB	Jefferson hızlandırıcı ve SEL merkezi (Amerika)
CERN	Avrupa nükleer araştırma merkezi
KEK	Japonya yüksek enerji fiziği merkezi
SASE	Kendiliğinden genlik artımlı yayınım
RF	Radyo frekans
Si	Süper iletken
Ni	Normal iletken
NIR	Yakın kızılötesi bölge
MIR	Orta kızılötesi bölge
IR	Uzak kızılötesi bölge

1.GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcı teknolojileri 21. yüzyılın jenerik teknolojilerinden uzay teknolojileri, nükleer teknoloji, malzeme teknolojileri, enerji teknolojileri arasında yer almaktadır [1].

Serbest elektron lazerleri ayarlanabilir dalgaboyu, tek enerjiye sahip olmaları, koherentlik, yüksek akı ve parlaklık özellikleri ile 2. ve 3. nesil sinkrotron ışınımı kaynaklarına üstünlük sağlamaktadırlar. Geniş dalgaboyu aralığına sahip bu lazerlerin günümüzde fiziksel araştırmalardan biyolojik ve kimyasal süreçlerin araştırılmasına, mikro-spektroskopik yöntemlerle analizden mikro-cerrahiye kadar onlarca alanda uygulama alanı mevcuttur. Özellikle ps uzunluklu ve nC yük yoğunluklu paketçiklerden oluşan çok düşük yayılım değerlerine sahip elektron demetlerine dayalı X-ışını bölgesine düşen serbest elektron lazerleri, gerek bilimsel araştırma gerekse uygulamalı alanlarda hızlandırıcıya dayalı yeni nesil lazerler olarak son on yılda büyük önem kazanmışlardır [2].

Hızlandırıcıların tarihi genel olarak, 1907’ de Schottky’nin Atomik Spektrum ve Sinkrotron Teorisi’ ni ortaya atmasıyla başlar. 1920’ de Greinaker’ in ilk kafes jeneratörünü kurması, 1922’ de Wideroe’ nün sürüklenme tüpleri ile modern doğrusal hızlandırıcı teorisini ortaya atması, 1928’ de Wideroe’ nün K ve Na iyonlarını doğrusal hızlandırıcıda hızlandırması ve betatron ilkesini ortaya koyması, yine 1928’ de Van de Graff’ ın ilk yüksek gerilim jeneratörünü yapması hızlandırıcı fiziğinde müthiş bir ilerleme kaydedildiğini gösterir. Bu olayların yanısıra 1932’ de Lawrence ve Livingston’ un 1,2 MeV’ lik siklotronu yapmaları, 1932’ te Cokroft ve Walton’ un kafes jeneratöründe hızlandırılan protonları Li atomları ile çarpıştırması ($Li + p \rightarrow 2He$), 1939’ da Hanson ve Varian Kardeşlerin Stanford’ da klaystron ve mikrodalga tüpünü yapmaları, 1941’ de Kerst ve Serber’ in ilk betatronu çalıştırmaları, 1941’ de Touschek ve Serber’ in depolama halkası formülasyonu geliştirmeleri, 1944’ te Ivonenko ve Pomerancuck’ un sinkrotron ışınımından dolayı dairesel elektron hızlandırıcılarında enerjiye bir üst limit gelmekte olduğunu fark etmeleriyle hızlandırıcı fiziğinin temelleri atılmış, 1945’ te Blewett’ in deneysel amaçlar için sinkrotron ışınımını elde etmesiyle deneysel aşamaya gelinmiştir.

Bundan sonra doğrusal hızlandırıcıların temelini 1947' de Alvarez, Berkeley' de ilk proton doğrusal hızlandırıcısını yapmasıyla atmıştır. Bunu 1949' da McMillan' ın 320 MeV' lik bir elektron sinkrotronunu yapması, 1951' de Motz' un sinkrotron ışınlamı için ilk kez wiggler (zigzaglayıcı magnet) uygulamasını gerçekleştirmesi, 1952' de Livingston' un Brookhaven' da 2,2 GeV' lik cosmotron yapması, 1954' te R.R. Wilson' un Cornell' de 1,1 GeV' lik elektron sinkrotronunu (AG) yapması, 1954' te Lofgren' in Betatron' da 5,7 GeV' lik protonların hızlandırması takip etmiştir.

Bu gelişmelerle beraber 1954' te bugün de dünyada büyük önem taşıyan Fransa - İsviçre sınırında (Cenevre) Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi CERN' le birlikte en büyük hızlandırıcı merkezi kurulmuş oldu. 1958' de Courent-Snyder' ın değişken gradyenli sinkrotron teorisi ve yüksek güçlü RF kaynaklar üzerinde yaptığı çalışmalar hızlandırıcı fiziğinde önemli bir yer arzetmektedir. CERN' ün kurulmasıyla beraber dünyada önemi anlaşılan hızlandırıcı merkezlerinin sayısı artmaya başladı ve 1959' da Almanya' da Elektron Sinkrotronu DESY, 1961' de Japonya' da Yüksek Enerji Fiziği Merkezi KEK kurularak hızlandırıcı fiziğinde büyük çapta ilerleme kaydedildi. SEL' in tasarımı ise ilk olarak 1970' da yine Stanford' da John Madey tarafından yapıldı. SEL ile yapılan ilk deney 1976' da lineer hızlandırıcıdan alınan bir elektron demetinin kullanılmasıdır. Artık 2005 yılına gelindiğinde Dünya' da 115' i büyük ölçekli ve parçacık fiziği araştırmalarına odaklanmış olmak üzere 15000' in üzerinde parçacık hızlandırıcısı bulunmaktadır [4, 8].

Klasik lazerlerden farklı olarak SEL'de enerji alışverişleri, sınır elektronlarının kuantum geçişleri yerine manyetik alan içerisinde serbestçe salınan elektron demetindeki elektronlarla ortam arasında gerçekleşen manyetik etkileşmelerle sağlanır. Sonuçta, atomik enerji seviyelerinden bağımsız elektronlar kullanıldığı için mm'den kızılötesine, vakum morötesi bölgeden yumuşak ve sert X-ışını bölgesine kadar geniş bir spektrumda, istenilen dalgaboyunda (THM için 2.5-250 μm aralığında) lazer ışınlamı elde edilebilir [2].

THz SEL ile katı ve gaz fazındaki malzemelerin yoğun lazer ışımasıyla etkileşimi, nanomalzemelerin ve biyolojik maddelerin aşındırılması, spektroskopi ve spektral seçim radyoskopi çalışmaları, holografi, tomografi ve interferometri çalışmaları [3], SNOM tekniği ile yapılan malzeme uygulamaları [18], yarıiletken kuantum kuyularında SEL uygulamaları [22], iyonların kızılötesi çoklufoton elektron ayrılma spektrumlarının incelenmesi [23], QWIPs termal görüntüleme [25], SEL ile malzemelerin nitritlenmesi [26], LIGA tekniği ile fotolitografi [28], LIB tekniğiyle ps-altı lazer atmanın dielektrik yarıiletkenlerle ve yarıiletken heteroeklemlerle etkileşimi [31] ve daha pek çok uygulama SEL ile yapılan malzeme karakteristikleri örneğidir.

Bu çalışmada, serbest elektron lazerinin elde edilmesi için gerekli elektron tabancası, paketleyici, hızlandırıcı, salındırıcı, optik kavite kısımlarının ayrıntılı incelenmesi ve THM TARLA tesisi deney istasyonlarında süperiletken doğrusal hızlandırıcıdan kızılötesi bölgede 2.5-250 μm dalgaboyu aralığında elde edilen ışınım ile bilimsel, endüstriyel ve malzeme uygulamalarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu uygulamaların araştırılmasında HZDR (Almanya), CLIO (Fransa), FELIX (Hollanda), JLAB (Amerika), Novosibirsk (Rusya), FEL-SUT (Japonya) gibi bazı SEL merkezlerinde yapılan çalışmalar incelenmiş, uygulamalarda kullanılan deney cihazları tespit edilmiştir. Böylece THM TARLA tesisi deney istasyonlarında uygulamalar için gerekli cihazların neler olabileceği konusunda fikir edinilmiştir. Ayrıca malzeme uygulamalarından ince film büyütme konusunda büyütme yöntemlerinden PECVD cihazının kullanımı ve temiz oda eğitimi ile ilgili deneyim kazanılmış, TARLA tesisinde yer alacak olan temiz oda ve deney istasyonunda bu gibi çalışmaların yapılabilmesi hedeflenmiştir.

2. TEORİK BİLGİ

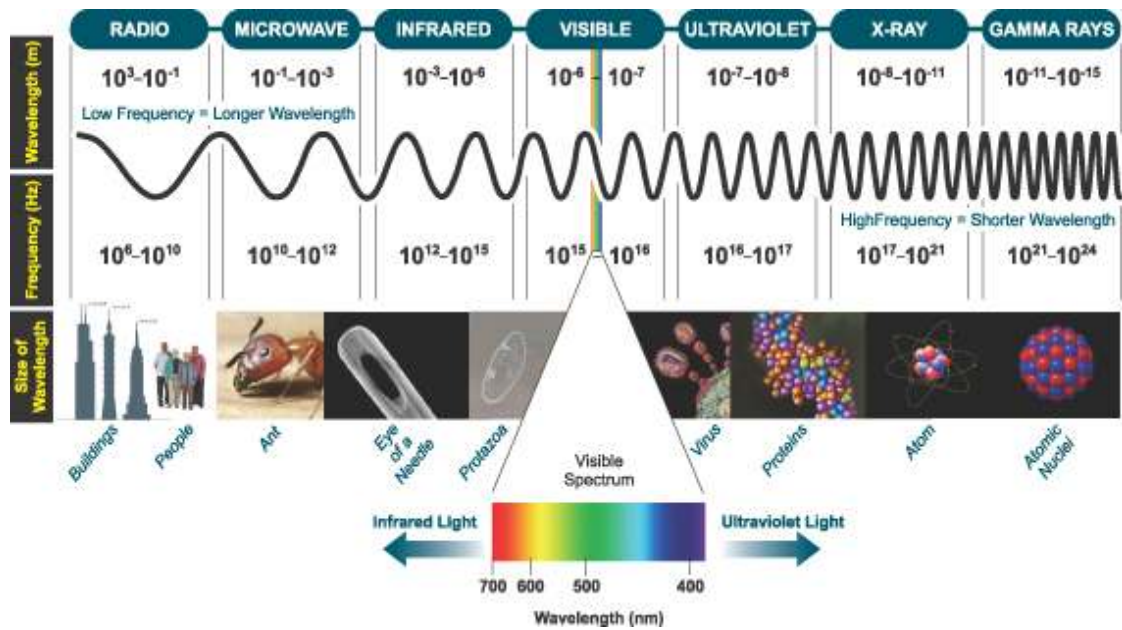
2.1. Elektromagnetik Spektrum ve Kızılötesi Bölge

Elektromagnetik spektrum, X-ışınlarından radyo dalgalarına kadar uzanan tüm elektromanyetik ışınları frekans ve dalga boylarına göre sınıflandırmaktır. Bu ışınların enerjileri dalga boyuna,

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

ifadesiyle bağlıdır. Denklemden h Planck sabiti, c ışık hızı, λ ışının dalga boyudur.

Spektrumda dalga boyuna bağlı olarak artan enerjilerine göre ışınlar; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi bölge, görünür bölge, morötesi bölge, X-ışınları ve gama ışınları olarak gruplandırılır. Radyo dalgalarından gama ışınlarına doğru gidildikçe ışının enerjisi ve frekansı artarken dalga boyu azalmaktadır (Şekil 2.1) [4].



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum

Spektrumun 1 ile 1000 μm arasındaki bölge, kızılötesi bölge olarak adlandırılır ve birçok bilimsel uygulama bu bölgede, özellikle orta kızılötesi denilen parmakizi bölgesinde, yapılır. Kızılötesi bölge üçe ayrılır. Yakın kızılötesi bölgede (NIR bölge, 0,78 μm -2,5 μm), kimyasal bağ boyunca atomların titreşim hareketleri incelenir, reaksiyon izlemede etkin bir bölgedir. Orta kızılötesi bölge (MIR bölge, 2,5 μm -25 μm), en çok uygulama yapılan bölgedir, parmakizi bölgesi olarak da adlandırılır. Uzak kızılötesi bölge (FIR bölge, 25 μm -1000 μm), metal ametal bağlarını içerdiği için özellikle anorganik bileşiklerin (koordinasyon bileşikleri) yapılarının aydınlatılması açısından önemlidir.

Dalga sayısı ($1/\lambda$), hem enerji hem de frekansla doğru orantılı olduğundan, kızılötesi spektroskopide genellikle doğrusal bir dalgasayısı ölçeği kullanılmaktadır. Dalgasayısı, dalgaboyunun tersidir. Titreşim frekansını kullanmak sayısal olarak ölçeklenmeye uygun olmadığından dalgasayısının kullanılması tercih edilmektedir.

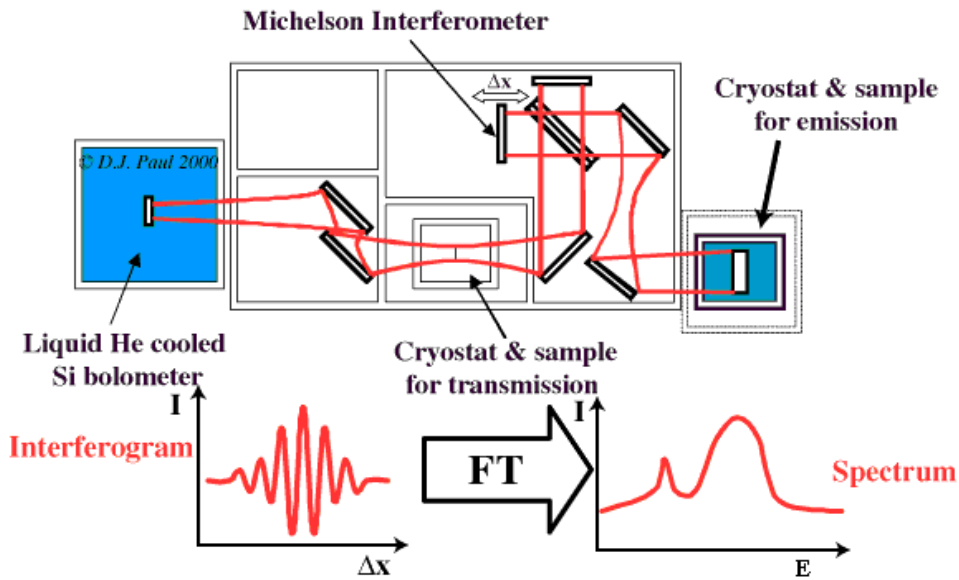
Kızılötesi ışınlar morötesi (UV), görünür bölge ve X-ışınları ile ilgili incelenen elektronik geçişlerin hepsini oluşturacak kadar enerjili değildir. Bu nedenle kızılötesi ışının soğrulması, çeşitli titreşim ve dönme halleri arasındaki enerji farklarının küçük olması yüzünden daha çok moleküler yapılarla sınırlıdır.

Kızılötesi ışının soğrulabilmesi için bir molekülün titreşim veya dönme hareketi sonucunda, molekülün dipol momentinde net bir değişme meydana gelmelidir. Sadece bu şartlar altında ışının değişen elektrik alanı ile molekül etkileşebilir ve moleküldeki hareketlerin birinin genliğinde bir değişmeye neden olur.

Titreşim enerji seviyeleri kuantumlu olup birçok molekül için kuantum halleri arasındaki enerji farkları orta kızılötesi bölgededir. Her bir titreşim hali birkaç dönme enerji seviyesine sahip olduğundan gazların kızılötesi spektrumu birbirine yakın çizgi serilerinden ibarettir. Öte yandan katı ve sıvılarda dönme sınırlı olduğu için böyle numunelerde ayrı ayrı titreşim/dönme çizgileri görülmez; onun yerine sadece biraz geniş titreşim pikleri görülür [6].

Kızılötesi (IR) soğurma spektroskopisi, IR ışınlarının molekülün titreşim hareketleri tarafından soğrulmasından dolayı, titreşim spektroskopisi olarak da bilinir. IR

spektroskopisinin çalışma ilkesi; moleküllerin IR ışığını soğurmasıyla titreşim ve dönme enerji seviyelerine uyarılmalarının ölçümüne dayanır. IR bölgesinin parmak izi bölgesinde (5-18 μm) gözlenen bantların tümü, incelenen moleküle özgüdür. FTIR spektroskopisinde interferometre, aynalar, IR ışınım kaynağı bulunan bir deney düzeneği kullanılır. IR kaynaktan çıkan ışınım, aynalar yardımıyla ikiye ayrılır. Bu ışınımların eş zamanlı olmamaları numune ile referans maddenin karşılaştırılmasını sağlar (Şekil 2.2).

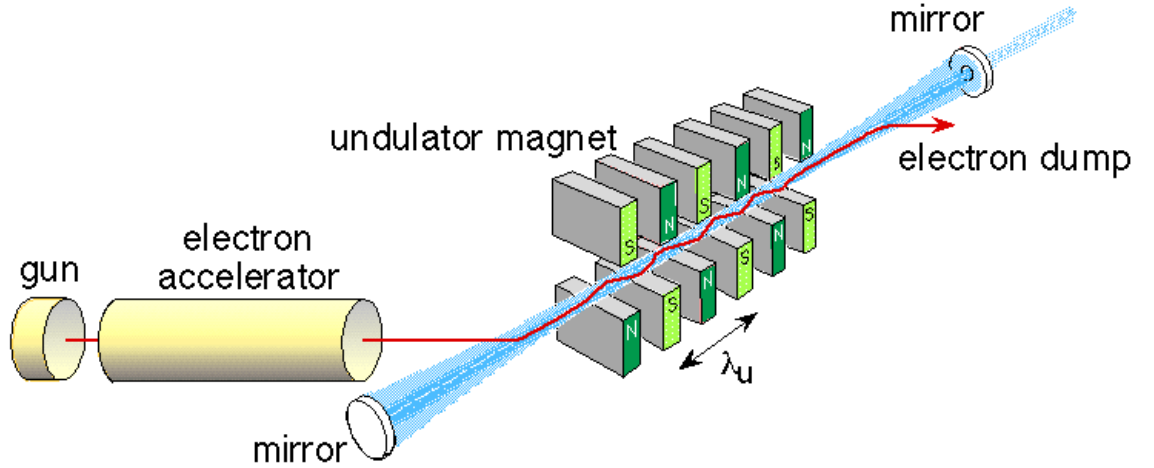


Şekil 2.2. FTIR Spektrometresinin çalışma prensibi

Klasik lazerin yerine serbest elektron lazeri kullanılarak ayarlanabilir dalgaboyu, yüksek akı ve parlaklık gibi önemli avantajlar sağlanabilir ve malzeme karakterizasyonu konusunda etkin çalışmalar yapılabilir. Zirai araştırmalar, gıda, mikrobiyoloji, ilaç geliştirme ve bakteriyoloji, mikro analiz, polimerlerin incelenmesi, analitik işlem teknolojileri, yüzey bilimi FTIR spektroskopisinin uygulanabildiği alanlardır. Endüstriyel uygulamalarda ise liflerin, elyafların ve kompozit yüzeylerin modifikasyonu, yüzeylerin lazerle cilalanması ve tavlanması, yüzeylerin karbonlanması gibi lazerle malzeme işleme kapsamında yapılan çalışmalar vardır [7].

2.2. Serbest Elektron Lazerinin Elde Edilmesi

Serbest elektron kaynağı, lineer hızlandırıcılardır. SEL, elektronun kinetik enerjisini koherent elektromagnetik ışımaya dönüştürme ilkesi ile çalışmaktadır. Bu dönüşüm salındırıcı adı verilen ve magnetik alan oluşmasını sağlayan magnetik salındırıcı ile gerçekleşmektedir. SEL, rölativistik bir elektron demetinin kutupları arasına sinüsel bir magnetik alan uygulanan salındırıcı magnetten (undulatör) geçişi esnasında, kinetik enerjisinin bir kısmını elektromagnetik ışıma yoluyla ayarlanabilir dalga boylu, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip monokromatik (tek renkli) ışıma dönüşmesi ile oluşur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. SEL'in şematik görünümü

SEL üç şekilde üretilmektedir. Bunlar elektron demetlerinin salındırıcı içinden geçiş sayısına göre sınıflandırılır. a) Yükselteç (Amplifier) modu: Eldeki bir normal lazer ışınının salındırıcı ışınımı ile güçlendirilmesi b) Osilatör (Oscillator) modu: Salındırıcı ışınının salındırıcının iki yanına konulmuş aynalarla bir optik kavite içerisinde güçlendirilmesi, c) Kendiliğinden genlik artımlı yayılım (SASE) modu: Elektron demetinin salındırıcı içerisinde bir kez geçirilirken optimizasyonun ışınının genlik olarak doyuma ulaşacak şekilde yapılmasıdır [9]. Bir serbest elektron lazeri elde edebilmek için; elektron kaynağına (elektron tabancası), bu kaynaktan çıkan elektronları sıkıştırmak için bir paketleyiciye, paketlenmiş elektronları rölativistik hızlara çıkarabilecek bir hızlandırıcıya, hızlandırılan bu elektronların

salınım yapmasını sağlamak için bir salındırıcıya ve oluşacak ışınımı yönlendirmek için bir optik kaviteye ihtiyaç vardır [10].

2.2.1. Elektron tabancası

Elektron tabancası elektron demetini üreten elektriksel bir cihazdır. Bir elektron tabancası, elektronların üretildiği katod ve odaklandığı elektrodlardan oluşur. Elektron tabancaları, elektronları yayma şekillerine göre termiyonik ve fotokatot tabanca olarak iki şekilde incelenebilir.

Termiyonik tabanca, elektronların oluşturulduğu katot, elektronları odaklayan Wehnelt silindiri ve anottan oluşmaktadır. Termiyonik tabancanın katottunda bulunan elektronlar, genel olarak yüzeye yakın yerde birikirler. Katot ısıtıldığında, elektronlar bağlı oldukları atomları bırakmaya yönelirler ve maddeden tesirli olarak sökülürler. Elektronların kinetik enerjisi, belirli bir zaman aralığında yüzey boyunca yapılan işe eşit olmaktadır. Bu minimum enerji, ‘iş fonksiyonu’ olarak bilinmektedir.

Verilen herhangi bir $T(^{\circ}\text{K})$ sıcaklığında yüzeyden yayınlanan elektronların maksimum akım yoğunluğu Richardson-Dushman denklemi ile verilir :

$$J = B_0 \cdot T^2 \cdot e^{(-\Phi / kT)} [\text{Amper/cm}^2] \quad (2.2)$$

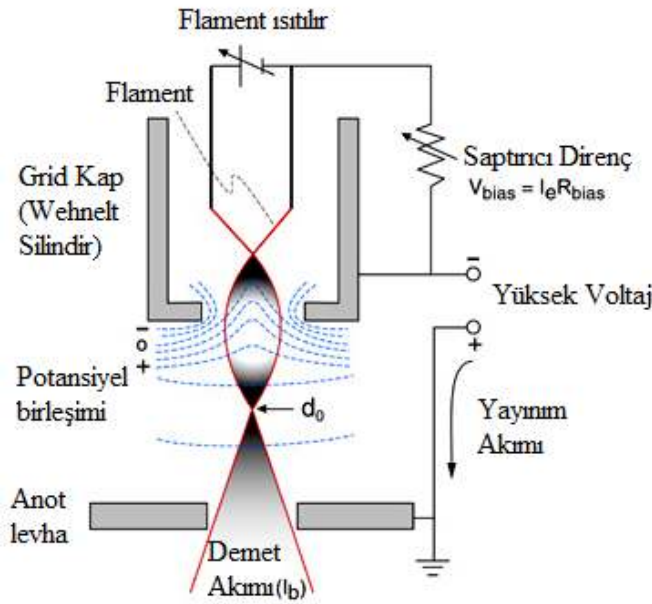
B_0 (Richardson-Dushman Sabiti) = $120 \text{ Amper cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$

k (Boltzmann Sabiti)= $1,371 \times 10^{-23} \text{ Joule /Kelvin}$

Φ = İş fonksiyonu (eV)

T = Sıcaklık (Kelvin)

[10]



Şekil 2.4. Termiyonik tabancanın çalışma düzeni

2.2.2. Paketleyici

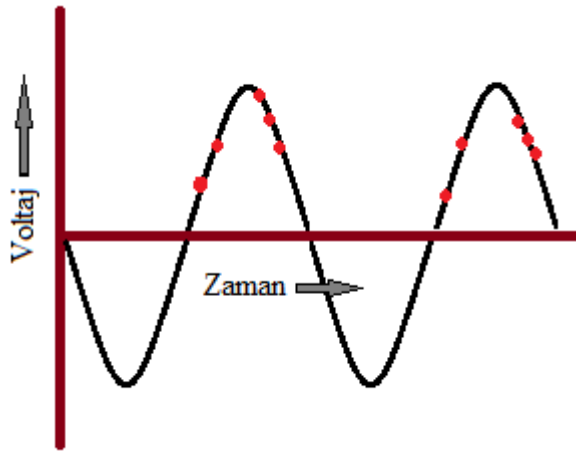
Elektron tabancasından çıkan elektron demeti, sıkıştırılarak etkin bir şekilde hızlandırılmak için alt harmonik paketleyici adı verilen RF(radyo frekans) kavitelere aktarılır. Paketleyicinin amacı, elektron tabancasından çıkan elektron demetini paketlemek, frekans değerini artırarak dalga boyunu küçültmek ve demeti hızlandırmaktır.

Alt harmonik paketleyiciden çıkan paketçikler daha yüksek frekans değerlerine çıkmak için ana paketleyiciye girerler. Ana paketleyici ile alt harmonik paketleyiciden daha yüksek RF'e sahiptir ve elektron demetlerinin yayınımlarını daha da küçülterek paketçiği sıkıştırmaya çalışırlar. Böylece sıkışan paketçiklerin hızları bir miktar daha artar. Daha sonra elektronlar artan hızları ile lineer hızlandırıcıya yönlendirilirler.

2.2.3. Hızlandırıcı

Ana paketleyiciden çıkan elektronlar rölativistik hızlara ulaşmak için lineer hızlandırıcıda hızlandırılarak optik kaviteye iletilirler.

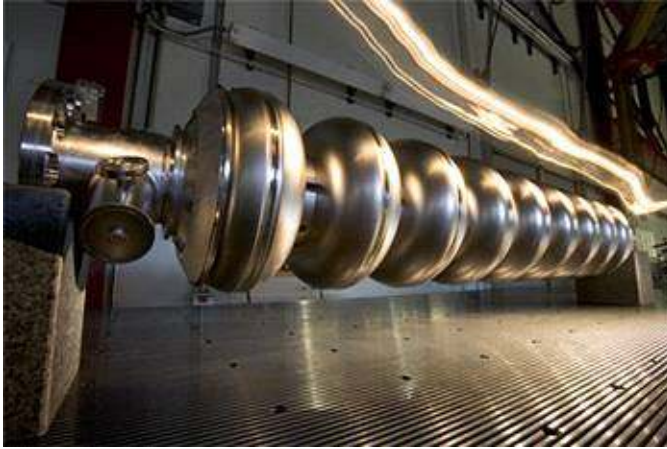
Işık hızlarına yakın hızlarda hareket eden elektronlar ve diğer parçacıklar için olan doğrusal hızlandırıcılar, özel bir dalga kılavuzu içinde hareketli bir elektromagnetik dalga kullanırlar [5]. Elektronlar dalganın tepesinde bir okyanus dalgası üzerindeki sörfçü gibi hareket ederler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Elektromanyetik dalga üzerinde ilerleyen elektron hareketi

Işık hızından daha yavaş hareket eden parçacıklar için değişik bir yapıya ihtiyaç duyulur. Çünkü dalga hızı parçacıkların basamakta kalmalarını sağlamak için yeterli derecede düşürülemez. Bu durumda parçacıkları yavaşlatma alanlarında korumak için sürüklenme tüpleri kullanılır.

Doğrusal hızlandırıcıların süperiletken (Sİ) ve normaliletken (Nİ) olmak üzere iki çeşidi vardır. Sİ kavite teknolojisi, hızlandırıcılarda ihtiyaç duyulan gücü azaltmak için kullanılır. Sİ hızlandırıcılar çok düşük öz dirence sahip olduklarından RF güç kayıpları çok düşüktür (Resim 2.1).



Resim 2.1. Süper iletken dokuz hücreli RF kaviteler (FNAL)

RF alanı kullanan Sİ hızlandırıcılarda, atmalar mikro paket yapısında olduğundan düşük pik akımı oluşur ve dolayısıyla hızlandırılmış elektronların paketçik yükü de düşük değere sahip olur. Sİ hızlandırıcılarda yüzey direnci çok küçük olduğundan, RF güç kayıpları neredeyse sıfırdır ve hızlandırma gradyeni 10 MV/m ile 20 MV/m mertebesinde dir. Sİ hızlandırıcıların aksine Nİ hızlandırıcılarda yüzey direnci yüksek değerlerde olduğundan kavite içerisinde yüksek RF güç kaybından dolayı, kavite içerisine belirli aralıklarla RF alanı pompalanır ve atmalı mikro paketçik yapıda elektron demeti hızlandırılır. Bundan dolayı, hızlandırıcı gradyeni 50 MV/m mertebesine kadar çıkar.

Nİ hızlandırıcılarda RF kavite içerisinde RF varlığı 10 μ s ile sınırlı olduğundan sadece bu süre içerisinde makro paketçikler hızlandırılabilir. Daha sonraki 0,1 s boyunca tekrar RF dolması beklenir ve bu 0,1 s boyunca hızlandırma yapılamaz. Bu hızlandırıcılar, atmalı mikro paketçik yapısında çalıştığından yüksek değerlerde pik akımı oluştururlar. Ancak az sayıda paketçik hızlandığından dolayı, ortalama akım düşüktür.

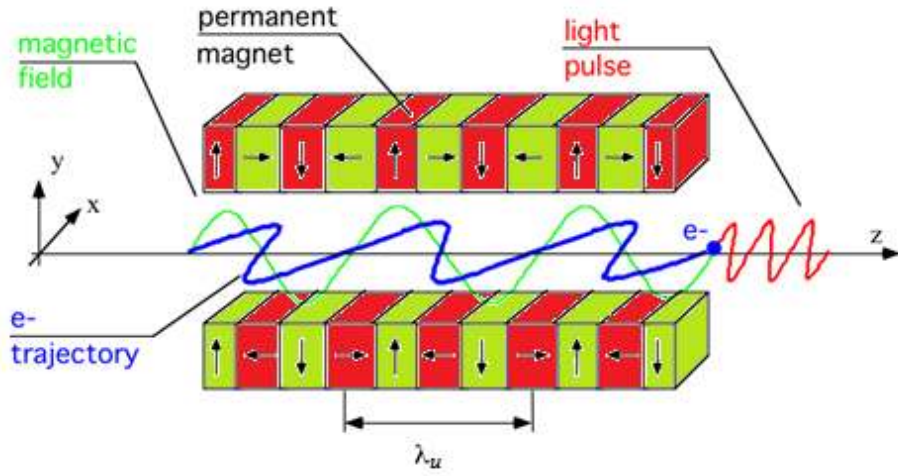
Sİ hızlandırıcılarında, atmanın tekrarlama oranı 13 MHz iken, Nİ hızlandırıcılarında 1GHz olmaktadır. Bu yüzden Sİ hızlandırıcılarda elde edilen lazerin ortalama gücü Nİ hızlandırıcılardan elde edilen lazerden yaklaşık 100 kat daha fazla olmaktadır. Çizelge 2.1’de Sİ ve Nİ hızlandırıcıların karşılaştırılması verilmiştir [5].

Çizelge 2.1. Sİ ve Nİ hızlandırıcıların karşılaştırılması [5]

PARAMETRELER		SÜPER İLETKEN	NORMAL İLETKEN
Çalışma Frekansı	MHz	1300	3000
Paket Tekrarlama Oranı	MHz	13-260	1000
Atma Uzunluğu	μ s	Sürekli	10
Atma Aralığı	s	Sürekli	0,1
Ortalama Akım	mA	1	0,02
Paket Boyu	ps	0,5-10	4
Demet Gücü	kW	40	0,8
Toplam Elektrik İhtiyacı	kW	600	210

2.2.4. Salındırıcı (Undulatör)

Salındırıcılar (Resim 2.2), elektron demetinin sinüsel hareket yapmasını sağlamak için zıt kutuplu magnetlerden oluşur. Salındırıcı içerisindeki magnetlerin özelliği, ana eksen boyunca eşli magnetler dizisi olmasıdır. Her biri zıt kutuplu olarak karşılıklı dizilir ve g gap aralığı ile birbirlerinden ayrılırlar.



Şekil 2.6. Salındırıcı magnet içinde elektron-dalga hareketi (CLIO)

Salındırıcının en önemli faktörü magnetik alandır. Magnetik alan, salındırıcı boyunca titreşim yapan sinüzoidal dalga halinde hareket eder. Dolayısıyla bu magnetik alan, salındırıcı içerisinde geçen elektronun hareketini de titreşimli hale getirir. Salındırıcının şiddeti elde edilecek lazerin dalga boyunu doğrudan etkiler. Bir salındırıcı için şiddet çarpanı,

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Burada e parçacık yükü, B magnetik alan, m elektronun kütlesi, c ışık hızıdır. $K \ll 1$ için, elektronun titreşim hareketinin genliği küçüktür ve radyasyon dar enerji bantları boyunca girişim desenleri sergiler. Eğer $K \gg 1$ ise elektronun titreşim genliği büyüktür ve elektronlar kararlı bir yörünge izleyemezler [10].

Serbest elektron lazerinin dalga boyu; salındırıcının ardışık iki aynı kutup arasındaki uzaklık λ_u , salındırıcının kuvvet parametresi K , elektronun geliş doğrultusu ile gözlem doğrultusu arasındaki açı θ ve elektron demetinin Lorentz faktörü γ olmak üzere şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma e^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma e^2 \theta^2 \right) \quad (2.4)$$

Salındırıcı kuvvet parametresi K ,

$$K = eB_u\lambda_u/2\pi m_e c = 0,9337B_u[T]\lambda_u[cm] \quad (2.5)$$

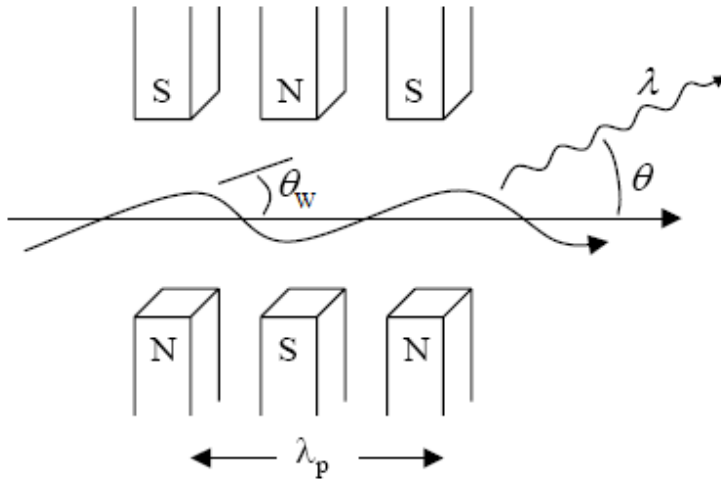
ifadesiyle verilir. Burada m_e elektronun durgun kütlesi, c ışık hızı ve $e = \sqrt{4\pi\alpha}$, $\alpha=1/137$ ince yapı sabitidir.

Elektronlar salındırıcı magnette s eksenı boyunca yol alırken yatay salınım hareketini indükleyen alan ile karşılaşır. Söz konusu manyetik alan, boyuna hız bileşeninde periyodik bir değışime neden olur. Bu durum parçacığın s eksenı boyunca olan hız bileşeni ile birleştğinde yatay eksen yönünde eğilmelere neden olur.

Parçacığı ideal yörüngesinde tutacak olan maksimum açı ; θ_w 'dir (Şekil 2.7) ve

$$\theta_w = \frac{\kappa}{\gamma} \quad (2.6)$$

ifadesiyle verilir.

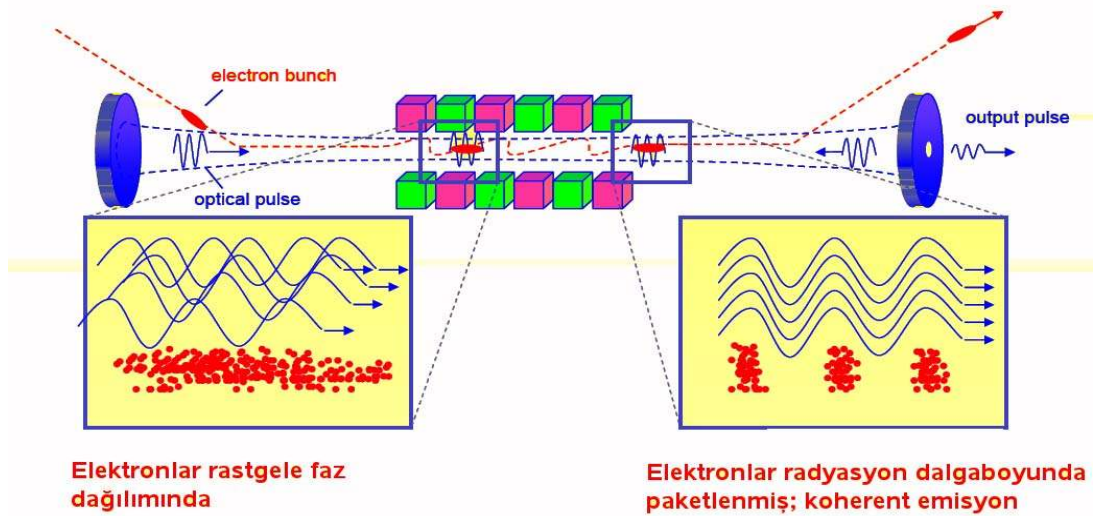


Şekil 2.7. Magnet içindeki parçacık hareketi

$K=1$ olan bir zigzaglayıcı ya da salındırııcı magnet içerisinde $\theta_w = 1/\gamma$ 'dır. Bu aslında sinkrotron ışınımının doğal yayılma açısı olarak bilinmektedir. Salındırııcı magnetlerde eğicilik çok zayıftır, bu sebeple çok küçük bir yayılma açısı ile bütün ışımaya neredeyse paralel olmaktadır [4, 5].

2.2.5. Optik Kavite (Ayna sistemi)

Bir optik kavite iki ayna, elektron demeti ve salındırııcı magnetten oluşur. Optik kavite içerisinde elektromagnetik dalga iki ayna arasında pek çok kez yansıdıktan sonra elektromagnetik dalga ve elektronlar arasında enerji alışverişi gerçekleşir. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşme sonucunda koherent ışımaya meydana gelir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşme sonucu meydana gelen koherent ışımaya

SEL'in yüksek verimlilikte ve kaliteli özellikte olması için, optik kayıplar çok küçük olmalıdır. Bunu sağlamak için de optik demet ile elektron demeti birbiriyle iyi örtüşmeli ve tekrarlama frekansına bağlı olarak değişen kavite uzunluğu (L) iyi ayarlanmalıdır. Kavite uzunluğu L ;

$$L = \frac{v T_{RF}}{2} \quad (2.7)$$

(T_{RF} ; RF alan periyodu, v ; parçacığın hızı) ile verilir. Optik kavite içerisinde kazanılan radyasyonun bir kısmının, yarı saydam aynalardan biri tarafından dışarıya çıkmasına izin verilir. Burada ayna saydamlığı iyi ayarlanmalıdır. Öyle ki yansıma ya da soğurma ile optik kavitenin toplam güç kayıpları güç kazancını geçmesin. Yansıtıcılık ve geçirgenlik özelliklerini istenilen değerlerde elde etmek için ayna malzemesi ve kaplaması önemlidir. Ayna malzemesi genelde altın veya gümüş ile kaplanmış bakır, silisyum olarak seçilir.

Hemen hemen bütün SEL osilatörlerde zaman içinde ayna deformasyonu gözlenir. Yüksek SEL gücünden kaynaklanan bu deformasyonların giderilebilmesi için çok katmanlı aynalarda aynaların üretiminde iyon katkılama teknolojisi kullanılmaktadır. Ayrıca bu katmanlar ısısal hasardan kaçınmak için safir üzerine katkılanabilmektedir. Metal aynalarda daha dirençli bir yüzey tabakası ve alt tabaka seçilmeli ve kullanılmalıdır. En iyi çözümün (kızılötesi bölgede) saf bakır, gümüş ya da altının bakır ya da molibden üzerine katkılanması olduğu görülmektedir [5, 10, 11].

2.3. Serbest Elektron Lazeri (SEL)

Salındırıcı magnetlerin oluşturduğu magnetik alana giren elektron demeti içindeki serbestçe hareket eden elektronlar bir ivme kazanır. Bu serbest elektronlarla ortam arasında gerçekleşen magnetik etkileşmeler sonucu elektronlar ışıma yayarlar. Bu ışıma istenilen lazer ışımasıdır. Elektronların atomik seviyelere bağlı olmamaları, çok geniş bir dalgaboyu aralığında (FIR bölgeden X-ışınlarına) SEL elde edilmesini sağlar. SEL ışıınının dalgaboyu, manyetik alanın veya elektron enerjisinin değiştirilmesi ile ayarlanmaktadır. Tek bir hızlandırıcı ve çoklu salındırıcılar kullanarak ışıınım geniş bir alanda ayarlanabilir olmaktadır. Elde edilen SEL'in dalgaboyu λ_u , K , ve γ Lorentz faktörüne bağlı olarak;

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2.8)$$

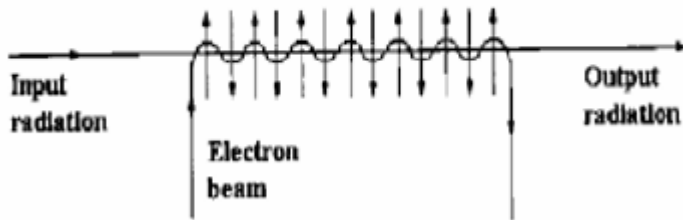
denklemiyle ifade edilir.

SEL'in kısa atmalara sahip olması (50 fs-10 ps), klasik lazerlerden 3-4 kat daha fazla parlaklık elde edilmesini sağlar. Serbest elektron lazerlerinin önemli avantajlarından bir diğeri ise kısa dalga boylarına sahip olmaları ve yüksek güçler üretebilmeleridir. Bu lazerlerle uzun ve sürekli olarak çalışma olanağı bulunur. Klasik lazerlerde belli bir güç sınırı vardır ve bu sınır aşıldığında lazer ısınarak bozulur. Örneğin kimyasal oksijen iyodin (COIL) lazerler yüksek güce, sadece 10 dakika boyunca ulaşılır, bu süre aşılnca lazer bozulur. IR SEL'ler ise yılda 2000 saat çalışma süresine ulaşabilir. Ayrıca SEL ışınının klasik lazerlere göre koherent olması, yüksek tekrarlama frekansına sahip olması (MHz mertebesinde), yüksek parlaklığı ($> \sim 10^{16}$ (foton/($\text{mm}^2 \text{ mrad}^2 0,1\% \text{ bg}$))), ortalama gücünün yüksek olması ($> 10\text{kW}$) bu lazerlerin kullanıcı potansiyelini arttırmaktadır [4, 5, 10, 11].

2.3.1. SEL çeşitleri

Prensiplerine göre yükselteç SEL, SASE SEL ve osilatör SEL olmak üzere üç çeşit serbest elektron lazeri bulunmaktadır.

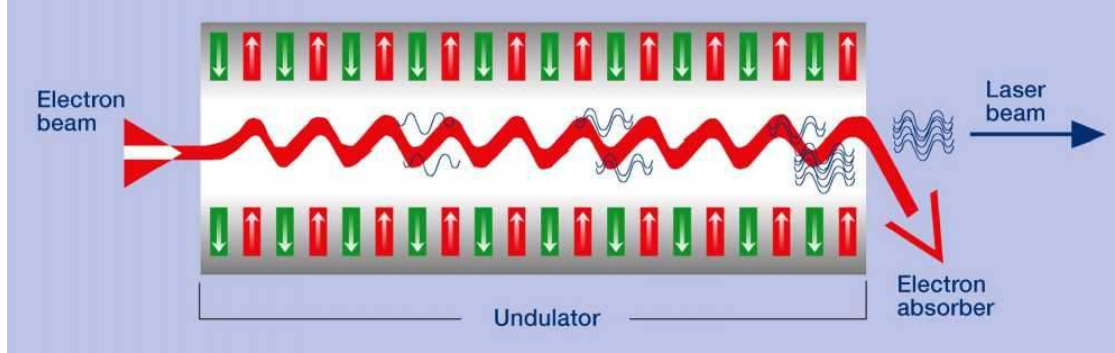
Yükselteç SEL:



Şekil 2.9. Yükselteç SEL oluşumu

Bu sistem ışınının dışarıdan verilen başka bir ışınım ile güçlendirilmesi prensibine dayanır.

SASE SEL:



Şekil 2.10. SASE SEL oluşumu

Kendiliğinden genlik artımlı yayılım (SASE) modu ile rölativistik elektron demetinin, kutupları arasında sinüsel bir magnetik alan uygulanan salındırıcı magnetten geçerken, kinetik enerjisinin bir kısmını ışıma yoluyla kaybetmesi sonucu elde edilen serbest elektron lazeridir.

Osilatör SEL:

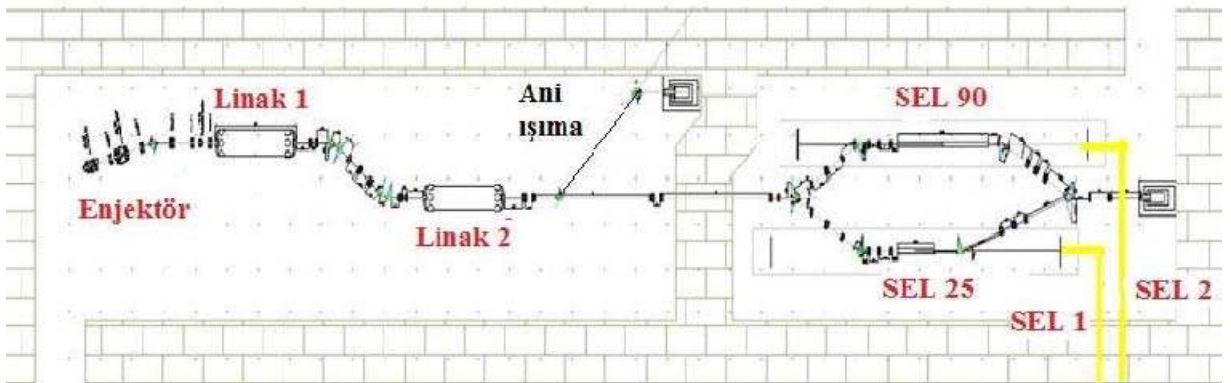
Elektron hızlandırıcısından elde edilen rölativistik elektron demeti, salındırıcı magnetten geçirildiğinde magnet eksenine boyunca ani salındırıcı magnet ışıması yapar. Yayılan ışıma iki ayna arasında tuzaklanarak salındırıcı magnetten sonradan giren elektron paketçikleri ile etkileşime girer. Elektron paketçikleri ile elektron magnetik alan arasındaki etkileşme, ışınının dalgaboyunun koherent yapılanmasını sağlar ve böylece SEL ışımasını oluştur (Bkz Optik Kavite(Ayna sistemi)) [49].

3. THM TARLA TESİSİ VE DENEY İSTASYONLARI

3.1. THM TARLA Tesisi

Devlet planlama teşkilatı (DPT) tarafından desteklenen, Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde toplam 11 üniversitenin katılımı ile yürütülen YUUP projesi kapsamında kurulması planlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara) tesisi süperiletken doğrusal hızlandırıcıya dayalı ışınım kaynağı olarak ülkemizde bir ilk olacaktır [45].

TARLA tesisi, 250 keV enerjili tamamı normal iletken enjektör, herbiri 20 MeV/m gradyenli iki süperiletken hızlandırıcı modül, 2,5 cm ve 9,0 cm periyotlu salındırıcı magnetle iki optik kavite sistemi kullanarak 2,5-250 μm aralığında IR SEL elde etmeyi amaçlamaktadır. Işınım için, Ostim, Ankara'da kurulumu devam etmekte olan, yüksek ortalama akıma sahip, elektronları maksimum 300 keV' lik enerjiye hızlandıracak olan DC termiyonik bir elektron kaynağı kullanılacaktır. Ana hızlandırıcıların herbirinin 9 süperiletken TESLA hücreli iki ELBE modulünü içermesi planlanmaktadır. Hedeflenen dalga boyu aralığı olan 2,5-250 μm bölgesini tarayabilmek için, iki farklı optik ayna (rezonator) sistemi kullanılacaktır. Periyot uzunlukları 2,5 cm and 9,0 cm olan salındırıcı magnet sistemlerinde aynalar arası uzaklık 11,53 metredir (Şekil 3.1) [50].



Şekil 3.1. THM TARLA tesisinin şematik gösterimi

Çizelge 3.1’de TARLA elektron demet parametreleri ve Çizelge 3.2’de lazer parametreleri verilmiştir [50].

Çizelge 3.1. TARLA elektron demet parametreleri

Parametreler	
Enerji (MeV)	15-40
Demet yükü (pC)	120
Ortalama demet akımı (mA)	1,6
Demet tekrarlama oranı (MHz)	13-26
Demet uzunluğu (ps)	0,6-8
Normalize enine yayılım (mm mrad)	< 16
Normalize boyuna yayılım (keV.ps)	< 50
Makroatma süresi (µs)	10-CW
Makroatma tekrarlama oranı (Hz)	1-CW

Çizelge 3.2. TARLA parametreleri

Salındırıcı Magnetler	SEL 25	SEL 90
Dalgaboyu (µm)	2,5-30	18-250
Mikroatma tekrarlama oranı (MHz)	13	13
Maksimum atma gücü (W)	~ 5	~ 2,5
Ortalama güç (W)	0,1-40	0,1-30
Maksimum atma enerjisi (µJ)	~10	~8
Atma uzunluğu (ps)	1-10	1-10

3.2. TARLA Deney İstasyonları

THM TARLA'dan elde edilecek 2,5-250 μm dalgaboyu aralığına sahip ışınının optik düzenekler ile deney odalarına taşınması planlanmaktadır. Merkezde 8 deney odasının bulunacaktır. Kurulması planlanan 8 deney odasında yapılması öngörülen araştırma ve geliştirme çalışmaları şu şekildedir:

- Foton Bilimi
- Malzeme Fiziği
- Yarıiletken Çalışmaları
- Biyoteknoloji ve Medikal Araştırmalar
- Doğrusal Olmayan Optik Çalışmaları
- Nanoteknoloji
- Fotokimya Çalışmaları

Ulaşılabilen kaynaklar ve merkezde çalışılabilecek konular çerçevesinde Türkiye potansiyeli araştırıldığında, THM'de kurulacak üç laboratuvar belirlenmiştir. Birinci laboratuvar lazer diyagnostik ve senkronizasyon odası, ikinci laboratuvar toplam frekans üretimi (SFG) ve pompa sonda (PPT) çalışmalarının yapılacağı doğrusal olmayan optik laboratuvarı, üçüncü laboratuvar ise IR SEL Spektroskopisi laboratuvarı olarak planlanmaktadır.

İlk laboratuvar olan lazer diyagnostik ve senkronizasyon odasında SEL foton atmalarının süresi, dalgaboyu, tekrarlama oranı, demet kazanç ve kayıp ölçümleri gibi ölçümlerin yapılması planlanmaktadır. Burada ayrıca SEL foton sinyalinin görünür sinyal sayesinde zamanlamasının ölçülmesi ve senkronizasyonun da yapılması düşünülmektedir.

İkinci laboratuvarda, malzeme fiziği ve yarıiletkenlerin araştırılması için IR bölgede yapılan bazı spektroskopik çalışmaların gerçekleştirilmesi düşünülmektedir. Bu teknikler moleküllerin titreşim modları ile ilgilidir. Parmakizi bölgesi olarak da adlandırılan MIR bölge bu teknikleri yapabilmek için uygundur. Bu laboraturda

doğrusal olmayan optik çalışmaları gerçekleştirebilmek için SFG ve Pompa Sonda Tekniğinin kullanılması düşünülmektedir.

Üçüncü laboratuvar olan IR SEL Spektroskopi laboratuvarında IR, FTIR ve Raman Spektrometreleri kullanılarak, katı, sıvı ve gaz örneklerin titreşim ve dönüş hareketlerinin özelliklerinin araştırılması ile ilgili çalışmaların yapılması planlanmaktadır [5].

Diğer 5 deney odası kullanım potansiyeli ve kullanıcı ihtiyacına göre şekillendirilecektir. THM IR SEL laboratuvarlarının planı EK-1 ve EK-2’de verilmiştir.

IR SEL kullanılarak bazı tekniklerle de uygulamalar yapılmaktadır. Bu teknikler:

- ✓ Sum Frequency Generation (Toplam Frekans Üretimi)
- ✓ Photon Echo Experiment (Foton Yansıma Deneyleri)
- ✓ Photoacoustic Spectroscopy (Foto Akustik Spektroskopi - FEL-PAS)
- ✓ Pump-Probe Experiments (Pompa Sonda Deneyleri)
- ✓ IR-MALDI Tekniği (Infrared Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization)
- ✓ IR-MAPLE Tekniği (Infrared Matrix Assisted Atmaed Laser Evaporation)
- ✓ IR-REMPI Tekniği (Infrared Resonance Enhanced Multiphoton Ionization)
- ✓ Near Field Microscopy (Yakın Alan Mikroskopisi)
- ✓ Multifoton Dağılımı / İon-SiklotronRezonans (MPD-ICR)
- ✓ Kütle Spektrometresi
- ✓ Titreşim Spektroskopisi (Vibrational Spectroscopy)
- ✓ Gas-Phase IR Spektroskopisi

olarak sıralanabilir [51, 52].

4. UYGULAMA DENEYİ

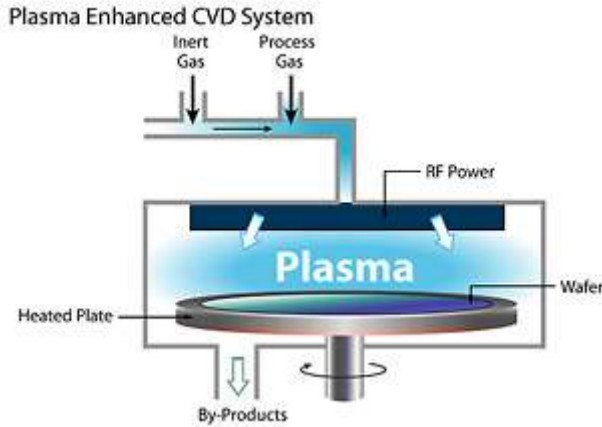
4.1. PECVD Cihazı ve İnce Film Büyütme

Kimyasal buhar depolama (CVD), gazların kimyasal reaksiyonları sonucunda ince katı filmlerin büyütülme işlemi olarak tanımlanır. Son birkaç on yılda özellikle plazma artırılmış kimyasal buhar depolama (PECVD) tekniğiyle geniş çapta uygulamalar yapılmıştır.

PECVD'nin en büyük avantajı, göreceli olarak daha düşük sıcaklıklarda (150- 350 °C) film büyütülebilmesidir. Klasik CVD işleminde standart işlem sıcaklığı 700- 900 °C' dir, bu sıcaklıklar kullanılan yöntemin metalleşme özellikleri veya sıcaklığa duyarlı diğer parçacıkları içeren sistemlerde uygulanabilirliğini sınırlar.

PECVD sisteminde radyofrekans (RF) güç, birbirine paralel iki elektrot tabaka arasında plazma üretir (Şekil 4.1). 400 °C' ye kadar ısıtılabilen elektrotlardan alttaki tabakaya örnekler yerleştirilirken üstteki tabakaya plazma üreten RF gücü uygulanır. Sistem 0,1-1 Torr basınç aralığında çalışabilir. Uygulanan RF frekansı 13,56 MHz' dir ve RF gücü 300 Watt'a kadar çıkabilir. Film büyütmede öncül olarak kullanılan uygun gazlar silan (SiH_4), amonyak (NH_3), nitroz oksit (N_2O)' tir.

Plazma, eşit hacimli pozitif ve negatif yüklü iyon ve elektronların konsantrasyonundan oluşan iyonize gazlardan oluşur. Elektronun enerjisi 1-20 eV aralığında ve elektron yoğunluğu 10^9 - 10^{12} / cm^3 aralığında değişmektedir. İlk önce çarpışma reaksiyonları yoluyla iyonize edilen ve çözünen gaz molekülleri ve birkaç elektronun kinetik enerjisi, uygulanan elektrik alanın enerjisiyle birleştirilir. Böylece yeni elektronlar üretilir ve işlem bir çığ gibi işlemeye devam eder, boşalma başlar. Bu işlem plazmadan akkor yayılımı olarak depolama boyunca gözlenir. İşlem süresince elektronlar, yüksek hareketlilikleri sebebiyle elektrotlarda ve duvarlarda kaybolur. Bu yüzden plazma bölgesine göre negatif yüklü bir bölge oluşturulur. Bu bölge akkor değildir ve "karanlık bölge" olarak adlandırılır. Karanlık bölgenin kalınlığı 0,1-10 mm arasındadır. Elektrotlara pozitif iyonların çarpması ve ikincil elektron reaksiyonlarıyla sürekli elektron akışı sağlanır. Dengenin korunabilmesi için üretilen ve kaybedilen elektron sayısı aynı olmalıdır.



Şekil 4.1. PECVD şematik görünümü

İşlemin dengede kalabilmesi için gerekli olan diğer bir parametre, basınçtır. Basınç 0,1 Torr' dan az olduğunda elektronların ve gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu artar ve bunun sonucunda çarpışma sayısı azalır. Bu yüzden gaz moleküllerinin iyonlaşma ve çözünme hızı düşer. Diğer taraftan basınç, 5 Torr' dan büyük olduğunda moleküler çarpışma hızı artar ve plazma tekrar dengesiz olur. Operasyonun bu iki bölgesinden kaçınılmalıdır, çünkü bu değerlerde sonuçlar eşit dağılımlı değildir, düzensizdir ve kalınlık, kırılma indeksi ve büyütülen tabakaların bileşiminin kontrolü zordur.

4.2. Örneklerin Hazırlanması

Bilkent Üniversitesi İleri Araştırmalar Laboratuvarı' nda (İAL) yapılan film büyütme çalışmalarında, alttaş materyal olarak büyütülen filmler için 3" çapında Si tabakalar kullanıldı. Örneklerin ortalama boyutları ~1,5-2 cm kadardır ve tabakanın kristal diziliminden dolayı hazırlanan örnekler dikdörtgen şeklindedir. Alttaş örnekleri hazırlandıktan sonraki temizleme işlemi çok önemlidir, çünkü büyütülecek filmin kalitesi yüzeydeki kirlilikten etkilenir. Temizlik için ilk tedbir işlemin bütün aşamalarının temiz bir ortamda yapılmasıdır. Bilkent Üniversitesi İAL' de bu işlemler Class 100 ve Class 10000 temiz odalarında yapıldı. Bu laboratuvarlarda örnek yüzeylerinden kalıntı molekülleri temizliği, ıslak kimyasal temizlik işlemiyle yapıldı. İlk önce oda sıcaklığında örnek yüzeyindeki kirlerin çözünmesi için asetonla

ve sonra isopropanol (ISO) içinde örnekler bekletilip, deiyonize su (DI) ile durulandı. En son örnekler basınçlı nitrojen gazı (N_2) ile kurulandı ve örnekler uygulamaya hazır hale getirildi.

Temiz oda içerisinde bulunan PECVD cihazı çalıştırılmadan önce, bu odanın dışındaki soğutucu çalıştırılır. PECVD içinde plazma oluşumunu sağlayan azot vanası, depoda bulunan kullanılacak gazların vanaları ve bu gazların temiz odaya girişini sağlayan vanalar da açıldıktan sonra PECVD için kullanılan bilgisayar programı çalıştırılır.



Resim 4.1. Sırasıyla PECVD cihazı, kullanılan bilgisayar ve depodaki gazlar

PECVD cihazı içine ince film yerleştirilmeden önce cihaz içine azot verilerek vakum kırılır. Cihazın içindeki toz parçacıklarının da temizlenmesinden sonra hazırlanan ince film cihaz içine yerleştirildi. 1 Torr basınç altında, 12 W güç verilen cihaz 250 °C'ye ısıtılınca istenilen gaz akış oranları bilgisayara girilerek, belli bir zaman aralığında ince filmler büyütüldü. Gaz akış oranları, bu cihaz için, SiH_4 350 sccm, NH_3 50 sccm, N_2O 1000 sccm maksimum değerlerini geçmeyecek şekilde belirlendi (Çizelge 4.1-4.5).

Çizelge 4.1. SiN (Silisyum Nitrat) büyütme için kullanılan parametreler

Silan (%2 SiH ₄ /N ₂) akış oranı	180 sccm*
NH ₃ akış oranı	45 sccm
Basınç	1000 mTorr
RF gücü	12 W
Sıcaklık	250 °C
Zaman	5 dk

* sccm; Standart Cubic Centimeters per Minute

Çizelge 4.2. SiN (Silisyum Nitrat) ikinci kısım büyütme için kullanılan parametreler

Silan (%2 SiH ₄ /N ₂) akış oranı	180 sccm
NH ₃ akış oranları	5,15,25,35,45 sccm
Basınç	1000 mTorr
RF gücü	12 W
Sıcaklık	350 °C
Zaman	15 dk

Çizelge 4.3. SiON (Silisyum Oksinitrat) büyütme için kullanılan parametreler

Silan (%2 SiH ₄ /N ₂) akış oranı	180 sccm
NH ₃ akış oranları	25,50,75,100,125,150,200 sccm
N ₂ O akış oranı	15 sccm
Basınç	1000 mTorr
RF gücü	12 W
Sıcaklık	250 °C
Zaman	15 dk

Çizelge 4.4. SiON (Silisyum Oksinitrat) ikinci kısım büyütme için kullanılan parametreler

Silan (%2 SiH ₄ /N ₂) akış oranı	180 sccm
NH ₃ akış oranları	25,50,75,100,125,150,200 sccm
N ₂ O akış oranı	50 sccm
Basınç	1000 mTorr
RF gücü	12 W
Sıcaklık	250 °C
Zaman	15 dk

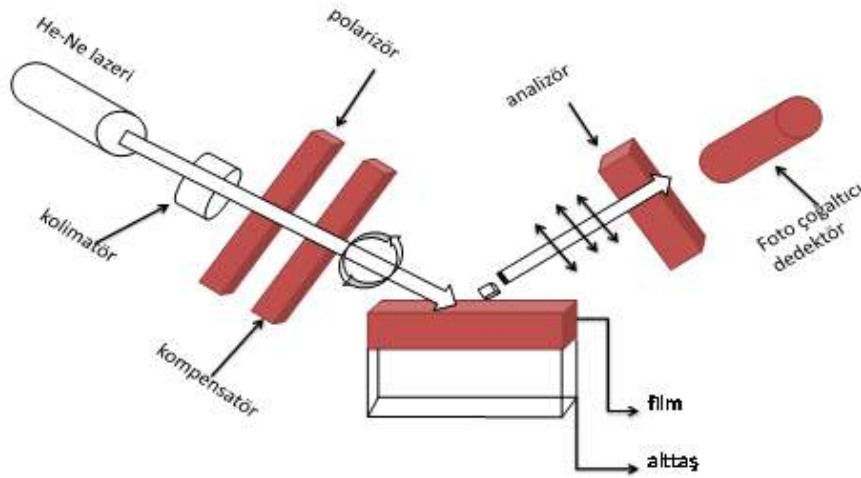
Çizelge 4.5. SiO (Silisyum Oksit) büyütme için kullanılan parametreler

Silan (%2 SiH ₄ /N ₂) akış oranı	180 sccm
N ₂ O akış oranları	25,50,100,150,200 sccm
Basınç	1000 mTorr
RF gücü	12 W
Sıcaklık	250 °C
Zaman	10 dk

4.3. Büyütülen İnce Filmlerin FTIR Spektroskopisi ile Karakterizasyonu

Depolanan filmlerin ölçümü ve kontrolü için özellikle ilgilenilen üç parametre vardır. Bunlar düzenli dağılıma sahip bir tabakanın kalınlığı, kırılma indeksi ve tabakanın yapısal bileşimidir.

Filmin kalınlığı bir elipsometre ile ölçülebilir. Elipsometreden monokromatik olarak yayılan eliptik polarize ışık demeti 632.8 nm dalga boyunda, filmin yüzeyinden ve aynı zamanda alttaşıla filmin birleşme yüzeyinden yansımaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Bir araştırma elipsometrisinin şematik görünümü

Yansımadan sonra bu iki bileşen farklı miktarlarda faz kaymaları yaşarlar ve aynı zamanda farklı miktarlarda yansıma sabitlerine sahiptirler. Yansıyan ışığın yoğunluğundaki, fazındaki ve polarizasyonundaki değişiklikler filmin kalınlığı ve kırılma indeksinin istenilen değerleri vermesi için analiz edilir. Ölçülen filmlerin kalınlığı ve kırılma indekslerinin ölçümlerinin doğruluğu, film-alttaş sistemine ve filmin kalınlığına bağlıdır.

İlgilenilen son özellik, büyütülen tabakaların kimyasal bileşimidir. Bunun araştırması orta kızılötesi (MIR) bölgede FTIR spektroskopisi kullanılarak yapılabilir.

En iyi sonucu görmek için, farklı sıcaklık, zaman ve gaz akış oranlarında SiO, SiN ve SiON filmler büyütüldü. SiON büyütmede O₂'nin N₂'ye göre kimyasal olarak daha aktif olmasından dolayı O₂ miktarının artmasıyla tüm durumlarda kırılma indeksi düşme eğilimi gösterir. Buna ek olarak NH₃'ün akış hızı arttığında, daha yüksek nitrojen miktarından dolayı, benzer şekilde filmin kırılma indeksi artar. Böylece SiN tabakalarla daha çok benzerlik sağlanır.

Filmlerin kalınlık değerleri kabaca 3000- 4300 Å arasında değişir. N₂'nin akış hızının artmasıyla filmin büyüme hızı da artar. Ayrıca NH₃'ün akış hızının artmasıyla depolama hızı düşer. Bu özellikler O₂'nin silan (SiH₄) ile reaksiyona girme isteğinin yüksek olmasından kaynaklanır. Özetle, ilk durumda reaktif O₂ konsantrasyonu arttıkça kimyasal reaksiyonda O₂, N₂'ye göre daha baskın hale gelir. Filmdeki azot

konsantrasyonunun artmasıyla film büyütme hızı azalır, bu yüzden filmin azot konsantrasyonunun artmasıyla azotla ilgili bağların oluşum olasılığı artar. Böylece büyütülen SiON film, SiN yapılara benzer fakat büyüme hızı SiO filmlerden daha düşük olur. Filmlerin büyüme hızları; $\text{SiN} < \text{SiON} < \text{SiO}$ şeklindedir.

Büyütülen filmlerin elipsometre ile ölçülen kırılma indeksleri 1,46 ve 2,00 arasında değişir. Elde edilen tabakalar, FTIR yöntemiyle analiz edildiğinde incelenen spektrumda, titreşim piklerinden N-H salınımları tespit edilir. 3500 cm^{-1} 'deki N-H salınımının overtonunun soğurmaya sebep olması bilindiğinden, bu band ayrıntılı olarak incelenmelidir. SiO ve SiN için elde edilen spektrumlardan en az N-H salınımı için uygun değerler seçilerek SiON filmler için bu değerler uygulanır.

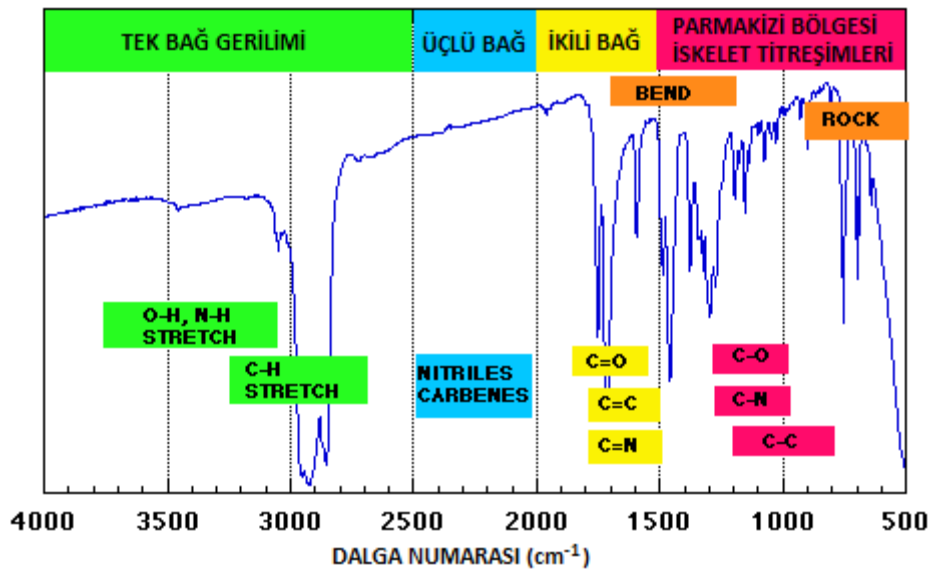
N-H overtonunun salınımlarının en az olması istenir, çünkü $1,55 \mu\text{m}$ 'de bu salınımlar soğurmaya sebep olur, bu da istenmeyen bir durumdur. Bu salınımlar, en uygun değerler seçilerek azaltılabilir fakat tamamen kaybolmaz. O zaman uygun sıcaklıklarda bir fırın içerisinde ince filmlere ısı tavlama yapılır. Bu yüzden ısı tavlamanın tabakaların yapı özelliklerine etkileri incelenmelidir. FTIR ve ATR yöntemleri ile tavlama sonucu N-H salınımının tamamen ortadan kaldırılabilir.

SiON filmlerin fiziksel özelliklerinin SiO ve SiN filmlerinin özelliklerinin arasında olması beklenir (Çizelge 4.6 ve Şekil 4.3). Böylece belirtilen tabaka bileşen karakteristiklerinin gözlenmesi SiON film özelliklerinin daha iyi kontrolünü sağlar [38-42].

Çizelge 4.6. Sınır titreşim frekansları ve onların fonksiyonel gruplarıyla ilişkileri

Fonksiyonel Grup	Gösterim	Gerilme Titreşim Frekansı(cm^{-1})	IR Bandının Gerilimi	Bağ Enerjisi (kJ mol^{-1})*
O—H		3200–3500	Güçlü, geniş	465
N—H		3100–3500	Orta	390
C—H		2700–3100	Güçlüden Ortaya	410
C≡N		2200–2400	Güçlüden Ortaya	890
C=C		2000–2200	Zayıf	840
C=O		1630–1800	Güçlü	745
C=N		1630–1680	Güçlü	615
C=C		1600–1680	Zayıf	610

*Bağ enerjisi en yakındaki 5 kJ mol^{-1} e yuvarlanmıştır.



Şekil 4.3. Tek bağ, ikili bağ, üçlü bağ ve parmakizi bölgesinde alınan titreşimlerin spektrumu

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. TARLA Genel Kızılötesi Spektroskopi Laboratuvarı

Genel kullanıcı laboratuvarı olarak planlanan bu laboratuvar, kızılötesi bölgede her türlü spektroskopi deneyinin yapılabilmesine olanak sağlanacaktır.

Optik masa, aynalar, lensler, Spektrometre, FTIR spektrometresi, Raman spektrometresi, dedektörler (THORLABS, NEWPORT, COVEGA, BESTEC, INOVAC, ECON, SPECTRA, QUANTUM ELECTRONICS...) bu laboratuvar, bulunacak cihazlar olup, titreşim ve raman spektroskopisi ile maddenin kızılötesi ışınlarının soğrulması veya saçılması ile ilgili deneyler, çevremizde bulunan katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin bu laboratuvar ortamında spektroskopik ölçümleri yapılabilecektir [46].

Malzeme karakterizasyonu çalışmalarında, optik masalar üzerine kurulmuş deney düzenekleri ns-ps mertebesinde spektrometreler, Ti:sapphire ya da Nd:YAG lazeriyle birlikte kullanılabilir. Bu deneylerde kullanılan malzemenin şiddete bağlı soğurma spektrumu, kırılma indisleri elde edilerek incelemeler yapılabilir. fs ölçümler için otokrolatörlere ihtiyaç vardır. Ayrıca ns lazerlerin tahrip gücü çok fazla olduğu için ve bu yüzden demetin gücünü azaltmak için kutuplayıcılar kullanılmaktadır. Deney düzeneklerinde kullanılan osilatörler de kullanılan lazerle senkronize olmalıdır.

Malzeme araştırmalarından ince film teknolojileri olarak vakum buharlaştırma sistemleri ile ince filmler kaplanabilir. Kaplanan ince filmlerin kalınlığı, tabakaları, yüzey pürüzsüzlüğü bir elipsometriyle incelenebilir ve bunlar üzerinde tavlama yapıldıktan sonra lazerle ince elektronik yollar işlenir ve böylece litografi çalışmaları yapılabilir.

Laboratuvar, makro atmalar üretecek şekilde lazerler tasarlanabilir. Bu şekilde malzemeyi işleyebilmek için istenilen sayıda makro atma genişliği oluşturulabilir. Yapılan bu lazerle hücredeki tek bir mitokondriye bile ulaşılabilir.

Laboratuvar koşulları deney sonuçlarını etkileyen önemli faktörlerden olup sıcaklık, nem, havalandırma, aydınlatma koşulları dikkate alınmalıdır. Laboratuvarlarda mutlaka hava sirkülasyonu yapabilen, HEPA (Yüksek Verimlilikte Partikül Yakalama) filtreli klimalar kullanılmalı, bunların soğutma kapasiteleri yüksek olmalı, gerektiğinde ısıtma yapabilmelidir. Her laboratuvar nem ve sıcaklık kontrolü için sensörlere sahip olmalıdır. Ayrıca hem hava sirkülasyonu hem de güvenlik için laboratuvarlar çift kapılı olmalıdır.

5.2. TARLA Genel Kızılötesi Spektroskopi Laboratuvarı için Gerekli Cihazlar

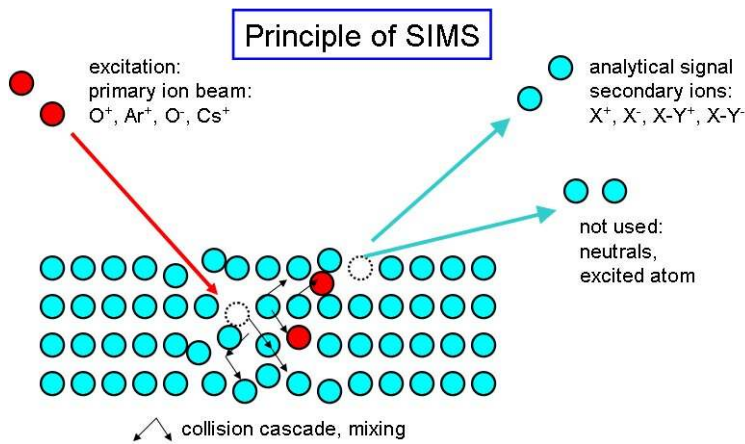
THM TARLA genel IR SEL spektroskopi laboratuvarı için malzeme uygulamalarında genel olarak kullanılabilecek cihazlar;

- İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS),
- Fourier-transform spektrometresi (FTIR)
- Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM),
- Saçılmalı yakın-alan optik mikroskobu (SNOM),
- IR rezonans çoklu foton iyonizasyonu (IR-REMPI),
- IR elektron ayırma spektroskopisi (IR-MPED),
- İyon kapanı kütle spektroskopisi,
- Yarıiletken optik yükselteç (SOAs),
- Yarıiletken tabakalar ve optik fiberler,
- Termal optik dedektörü (TOD)
- Michelson inteferometre deney düzeneği; aynalar, demet bölücü, akım önyükselteci, kilitli yükselteç, osiloskop
- Kızılötesi çoklufoton ayırma (IR MPD),
- TEA-CO₂ laser

- Si:Bi Raman laser
- Lazerle Oluşturulan Plazma Spektroskopisi (LIBs), olarak verilebilir.

5.2.1. İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS)

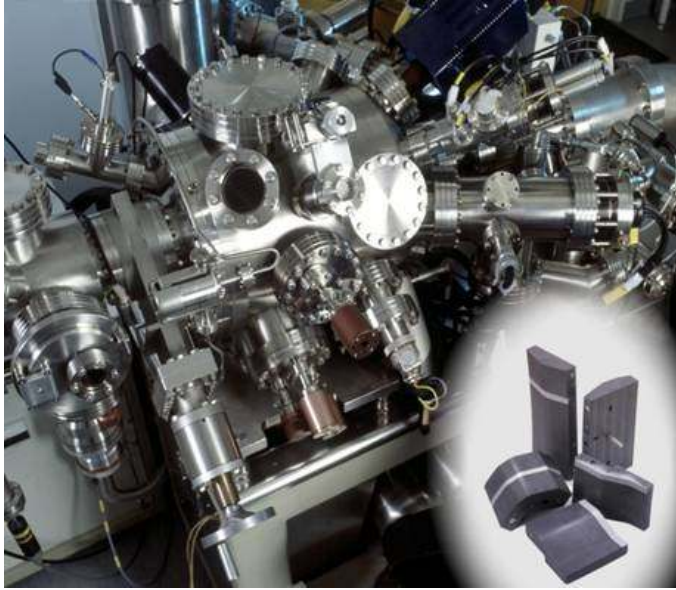
Bu yüzey analiz tekniği düzeneği birincil iyon demetiyle örnek yüzeyini bombardıman ediciden (genellikle galyum veya bizmut) ve püskürtücü ile ikincil iyonların püskürtülmesini sağlayan analizörden oluşur (Şekil 5.1). İkincil iyonların kütle/yük oranının ve örnekle dedektör arasındaki bu iyonların uçuş zamanlarının ölçümüyle, örneğin dış tabakalarının kimyasal yapısı ve elementsel bileşiminin belirlenmesi mümkündür.



Şekil 5.1. SIMS tekniğinin çalışma prensibi (Leibniz Institute for Solid State and Material Research Dresden)

Kullanım alanları;

- Organik ve inorganik malzemelerin (ince filmlerin, katı yüzeylerin vb) yüzey analizi
- Yüzey kirliliğinin tanımlanması
- Yüzey haritalandırılması
- Derinlik profilendirilmesi



Resim 5.1. SIMS cihazı (Aalto University)

Teknik özellikleri

Elementlerin saptanması : Hidrojen - uranyum, tüm izotoplar

Çözünürlük / duyarlılık : 0,0001 uma, $10^8 - 10^{11}$ at/cm² (ppb)

Derinlik çözünürlüğü : 1 – 3 monolayers

Yanal çözünürlük : ≥ 100 nm

Diğer karakteristikler : Derinlik profilinin haritalandırılması, $T = -196 - +600$ °C

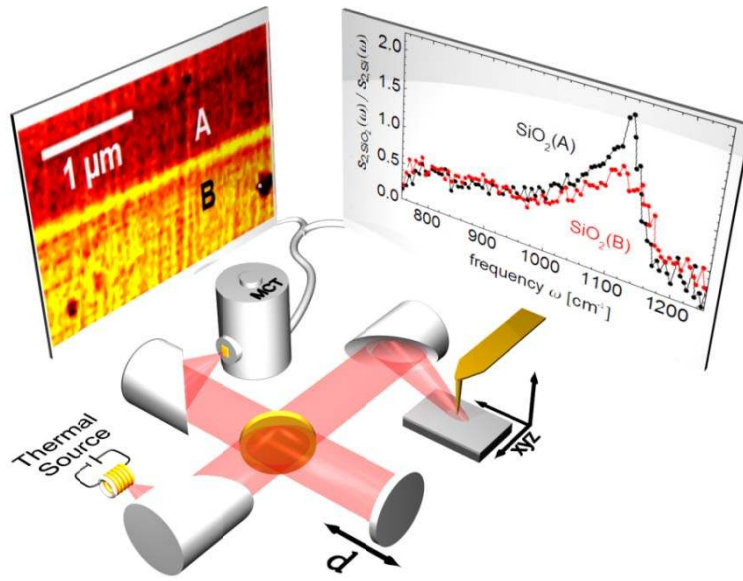
İmalatçı firma : IONTOF

Model : TOF-SIMS IV

[53]

5.2.2. Fourier-transform spektrometresi (FTIR)

FTIR spektroskopisi, organik ve inorganik elementlerin kimyasal bağlarına ve moleküler yapılarına ait bilgilerin edinilmesinde, bu elementlerin analizine çok uygundur. Aslında her bir molekül, titreşim modlarının karakteristikleri için gerekli dalgaboyundaki kızılötesi ışığı soğurur. Böylece bir kızılötesi spektrum, analizi yapılan molekülü tanımlar (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. FTIR deney düzeneği şeması (CIC nanoGUNE, Nano Science Cooperative Research Center)

Kullanım alanları;

- Yüzey ve derin kimyasal bileşimlerin tanımlanması
- Kirlilik analizi
- İnce film, yüzey kaplama ve monomoleküler film analizi
- Kalitatif, kantitatif ve yarı-kantitatif analizler



Resim 5.2. FTIR cihazı (Ester Segal Lab)

Teknik özellikler

Çözünürlük / duyarlılık : 0,5 cm⁻¹; 1 - 5% mass

Derinlik çözünürlüğü: 0,1 - 5 µm

Yanal çözünürlük: görüntüleme : ~ 5 µm

Diğer karakteristikler: Kızılötesi mikroskopisi (nokta nokta haritalandırma ve kızılötesi görüntüleme), fotoakustik hücre, derinlik analizi, yatay ATR ve mikro-ATR, dik açılı yansıma, dağınık yansıma (DRIFTS), değişken açı ölçümleri, IR polarizasyon ölçümleri.

İmalatçı firma : Digilab

Model : FTS7000

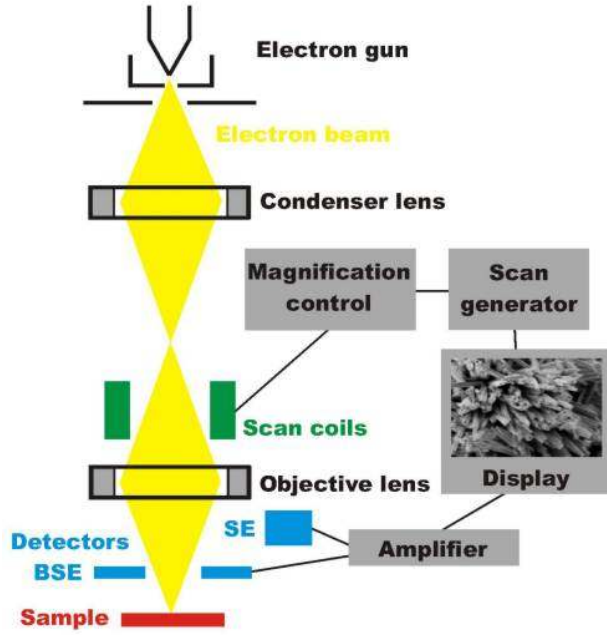
İmalatçı firma : BioRad

Model : FTS6000, FTS3000

[53]

5.2.3. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM)

Tarayıcı elektron mikroskopisi (SEM) hızlı, yüksek çözünürlüklü görüntüleme tekniğidir. Bir SEM yüzey taramaları için gerekli olan bir elektron demetinden ve yüzey ve gelen elektronlar arası etkileşmeden kaynaklanan sinyalleri (ikincil elektronlar, X-ışınları ve geri saçılan elektronlar) algılayan bir dedektörden oluşur (Şekil 5.3). Bir morfolojik çalışma için, yayımlanmış ikincil elektronlar görüntüyü yeniden yapılandırılmada kullanılır. Üç boyutlu bir görüntü, çökeltilerin veya mikrolehimlerin incelenmesini mümkün kılar.



Şekil 5.3. SEM deney düzeneği şeması (ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich)

Kullanım alanları;

- Küçük bölgelerin görüntülenmesi ve elementsel analizi,
- Tanımlama ve bozuklukların haritalandırılması,

olarak verilebilir.



Resim 5.3. SEM cihazı (Silcox Research Group, Cornell University)

Teknik özellikler

Yanal çözünürlük: 2-5 nm

Diğer karakteristikler: Imaging

İmalatçı firma : Philips

Model : XL-20 (tungsten filament)

İmalatçı firma : Hitachi

Model : S-4700 (cold field emission gun)

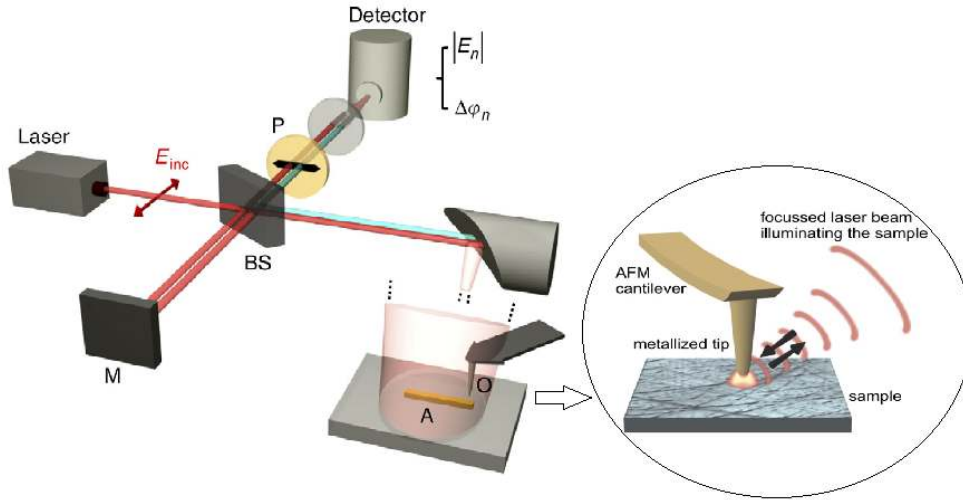
İmalatçı firma: FEI

Model : DB 235

[53]

5.2.4. Saçılmalı yakın alan optik mikroskobu (SNOM)

Saçılmalı yakın-alan optik mikroskopisinde lazer demetinin odaklanmasıyla aydınlatılmış standart metal kaplamalı AFM prob ucu kullanılır. Aydınlatılmış uç, bölgesel olarak örnek yüzeyini prob etmek için ultra küçük ışık kaynağı kullanılarak, kendi tepesinde bir nano odak üretir. Örnek ve uç arasındaki optik yakın-alan etkileşmelerinden dolayı saçılan ışık, yüzeyin bölgesel optik özellikleri (kırılma indeksi gibi) hakkında bilgi verir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. SNOM deney düzeneğinin şeması (Nature Communications (birinci şekil), Neaspec (ikinci şekil))

Örnek yüzeyinin topografisi taranırken, optik görüntüleme prob ucuyla interferometrik olarak (optik yükselteç ve faz görüntüleri eş zamanlı olarak elde edilir) saçılan ışığın algılanmasıyla gerçekleştirilir. SNOM çözünürlüğüne karşılık gelen nano odağın boyutu, sadece uç tepesinin çapı ile belirlenir. Spektrumun 10 nm'lik kısmı boyunca aynı çözünürlük elde edilen kızılötesi ve terahertz ışınımında olduğu gibi elektromagnetik dalgalar görünür ışıktan daha uzundur. Uygun dalgaboyu aralığında lazerlerle birleştirilen SNOM bir örneğin kimyasal, yapısal ve elektronik özelliklerini analiz edebilir ve klasik teknolojiyle karşılaştırıldığında 1000 kat daha yüksek çözünürlükte araştırma yapılabilir.



Resim 5.4. SNOM cihazı (Nanounity)

Görünürden terahertze geniş bir kızılötesi spektral bölge tarandığında nano ölçekli çözünürlükte SNOM, aşağıdaki gibi farklı malzeme özelliklerinin haritalandırılmasını ve belirlenmesini sağlar:

- Kimyasal karışımlar,
- Kristal yapısı,
- Mekanik gerilim
- Işınım hasarları
- Serbest yük taşıyıcı yoğunluğu ve hareketi
- Elektrik alan dağılımı

SNOM tekniği, en az ihtiyaç duyulan örnek hazırlama ile yapılan;

- Kızılötesi aktif kristal, polikristal veya amorf malzemeler,
- Yarıiletken nano devreler,
- Metamalzemeler ve nano antenler,
- Nano teller ve nano parçacıklar,
- Polimerler ve protein

araştırmaları için idealdir [54].

5.2.5. Elipsometre



Resim 5.5. Elipsometre cihazı

Spektroskopik elipsometri polimer yüzeyler, tek tabakalar, biyo alıcılar, proteinlerin yüzeye tutunması gibi karmaşık malzemelerin çalışılmasına olanak sağlar. Elipsometre ile görüntüleme, örneklerin mikro yapıları üzerinde alınan ölçümlerde, araştırılan malzemenin boyutlarını minimum bölgeye indirir.

Uygulamalar

- Mikro ölçekli örnekler: ince filmler
- Lazer yüzeyindeki yansıma önleyici kaplamalar
- Filmlerin yapısı: mikro desenli polimerler
- Mikroçipler: biyoçipler, protein etkileşimleri
- Düşük karışıklığa sahip örnek ölçümleri

[55]

5.2.6. Kilitli yükselteçler



Resim 5.6. Kilitli yükselteç (Lambda Photometrics)

Kilitli yükselteçler, gürültüdeki sinyalleri bulmak için tasarlanmıştır. Ölçülen sinyal olarak aynı frekansta referans bir sinyale ihtiyaç duyar ve sonra filtrelemeden önce bu sinyali giriş sinyalini demodüle etmek için kullanılır. Ayrıca iki referans frekansın toplam ya da fark ölçümlerine de olanak sağlanır. Kilitli yükselteçler, birkaç nV'luk oldukça küçük AC sinyallerini ölçebilir ve dedekte edebilirler.

Ayrıca:

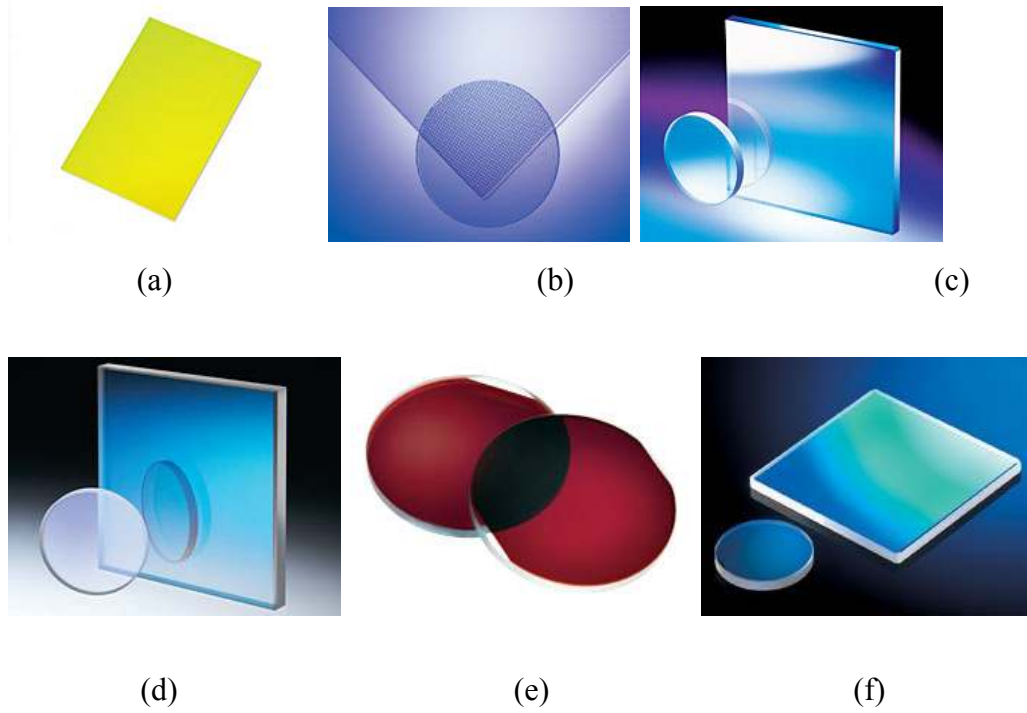
- AC'den DC'ye sinyal dönüştürücü,
- Fazmetre,

- Gürültü ölçümü,
- Spektrum analizi,
- Enerji yükseltmek amacıyla da kullanılmaktadırlar [5].

5.2.7. Demet bölücü

Demet bölücüler gelen ışığı ikiye ayırmak için kullanılan optik bileşenlerdir. Lazer veya aydınlatma sistemlerinde kullanılan ortak bileşenlerdir. Demet bölücüler aynı zamanda floresans uygulamaları, optik interferometre, yaşam bilimi, yarıiletken cihazlar için idealdir. Işık, genel yoğunluk, dalgaboyu veya polarizasyon durumu yüzdesi olarak ayrılabilir.

Kullanılacak deney düzeneğine göre birçok demet bölücü mevcuttur (levha, kübik, ince zar (pellicle), benekli nokta (polka dot) veya özel prizma). Gelen ışığı polarizasyon durumuna veya dalgaboyuna bağlı olarak özel bir oranda ayıran standart demet bölücüler, aydınlatılan alt gruplar veya tek yönlü aynalar için idealdir. Işığı dalgaboyuna göre bölen iki renkli demet bölücüler, genellikle lazer demet birleştirici olarak veya sıcak ya da soğuk geniş bantlı aynalar olarak kullanılırlar (Resim 5.7 (a)). Lazer demet işleyici için ideal olan polarize olmayan demet bölücüler bütün yoğunluktaki ışınları ayırabilir (Resim 5.7 (c)). Polarize demet bölücüler, genelde fotonik cihazlarda polarize durumdaki ışığı ayırmada kullanılırlar. Demet bölücülerin geri yansıtıcı kaplamaları morötesi, görünür ve kızılötesi bölgeler için tasarlanabilir (Resim 5.7 (d, e, f)).



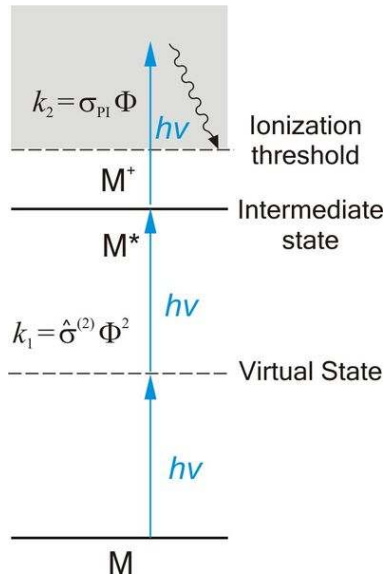
Resim 5.7. (a) İki renkli levha (b) Benek nokta (c) Polarize olmayan (d) Morötesi levha (e) Kızılötesi levha (f) Görünür ve NIR levha demet bölücüler

[56]

5.2.8. IR rezonans çoklu foton iyonizasyonu (IR-REMPI)

IR rezonans çoklu foton iyonizasyonu (IR-REMPI), atom ve moleküllerin spektroskopilerine uygulanan bir tekniktir. Pratikte, ayarlanabilir bir lazer uyarılmış bir seviyeye ulaşmak için kullanılabilir. İki foton ya da çoklu foton foto soğurma ile ilgili seçim kuralları, tekli foton geçişiyle ilgili seçim kurallarından farklıdır.

REMPI tekniği genellikle, elektronik olarak uyarılmış bir ara duruma soğurulmuş tekli veya çoklu rezonans fotonu ve bu durumu izleyen atom ya da molekülü iyonize eden diğer bir fotonu içerir. Tipik bir çoklu foton geçişini sağlayan ışık yoğunluğu, genelde tekli foton foto soğurmayı sağlayan ışık yoğunluğundan büyük ölçüde daha büyüktür. Bundan dolayı bir sonraki foto soğurma genellikle muhtemeldir. Eğer fotonlar sistemin iyonlaştırma eşik enerjisini aşmak için yeterli enerjiye ulaşırlarsa, bir iyon ve bir serbest elektron açığa çıkacaktır.



Şekil 5.5. REMPI şematik gösterimi

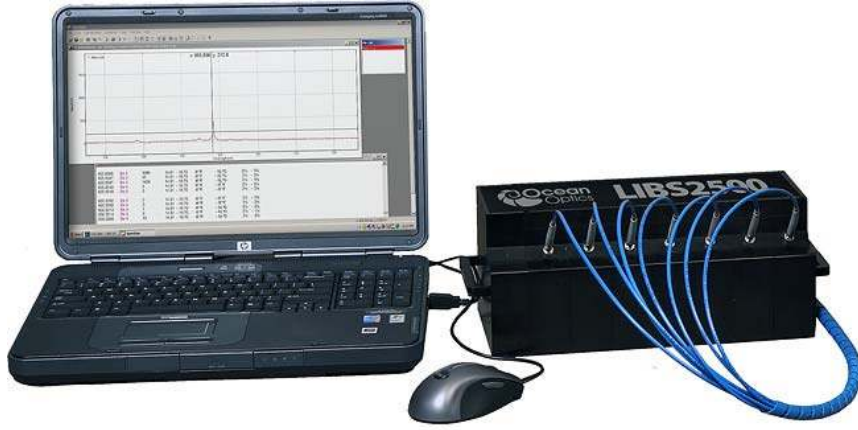
REMPI, tekli foton spektroskopik metodunun kullanılmadığı birçok durumda, örneğin moleküllerin rotasyonel yapılarının bu teknikle kolayca görülebilmesi gibi, spektroskopik bilgi sağlar.

[57]

5.2.9. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi (LIBs)

Lazerle Oluşturulan Plazma Spektroskopisi (LIBs), numune üstünde çok küçük bir alana (µm mertebesinde) odaklanan lazer atımı ile malzeme buharlaştırılarak plazma elde edilmesini ve plazmadaki uyarılmış parçacıklardan, çoğunlukla atomlardan, yayılan spektrumunu kullanarak nitel ve nicel bilgi alınmasını sağlayan analitik bir spektroskopik tekniğidir.

LIBs tekniği ile analiz yapılması için enerji kaynağı olarak lazer, odaklama-toplama optikleri ve yüksek çözünürlüklü dedeksiyon sistemi gerekir. Lazerle oluşturulan plazma spektroskopisi ile katı, sıvı ve gaz haldeki maddelerin bileşimleri, numune hazırlamadan önce analiz edilir. Hızlı ve yerinde analiz yapma imkanı ile yüksek çözünürlükte taşınabilir sistemler sunar.



Resim 5.8. LIBs cihazı (Ocean Optics)

Katılarda; metal, seramik, yarıiletken, diş ve biyoloji numuneler, sıvılarda; eriyik metaller ve işlenmiş sıvılar, gazlarda; endüstriyel baca gazları, havadaki aerosol ve kimyasal ajanların analizinde kullanılır [43].

6. IR SEL' İN BİLİMSEL, ENDÜSTRİYEL VE MALZEME UYGULAMALARI

Kızılötesi SEL kullanılarak yapılan bilimsel, endüstriyel ve malzeme çalışmaları için SEL'in yanında bazı spektrometreler, klasik lazerler de kullanılmaktadır. Görüntüleme teknikleri, malzemelerin kantitatif analizleri, kuantum kuyu ve kuantum nokta çalışmaları, yarıiletken heteroeklemlerle lazer etkileşimleri, holografî, litografi ve daha birçok uygulama SEL ile yapılabilmektedir. IR SEL ile yapılan bazı çalışmaların listesi şu şekilde verilebilir:

- IR yakın alan spektroskopisi ile iyon implant edilmiş silikonun yük taşıma konsantrasyonunun kantitatif tayini (10-14 μm) [19]
- IR saçılma yakın alan optik mikroskopisinde hapsedilmiş optik alan için altın nanoparçacık yakıt tankları (12,55-14,4 μm) [20]
- Yüksek güçte THz FEL için görüntüleme teknikleri (120 μm) [21]
- SEL kullanılarak fonon artımlı aralıksız Yakın-Alan Mikroskopisindeki izotropik olmayan kontrastı (15-20,5 μm) [22]
- C_{76}^{-2} nin IR multifoton elektron ayrılma spektroskopisinin incelenmesi (1600–700 cm^{-1}) [23]
- Yarı monte edilmiş kuantum noktalarında THz optik yanband emisyonları (46 μm) [24]
- İki fotonlu QWIPs içerisinde HZDR SEL'in otokoraleşyon ölçümleri ve fotoakım doyum çalışması (10,5 μm) [25]
- Metallerin FEL ile nitritlenmesi (3,1 μm) [26]
- Novosibirsk THz FEL: intrumental gelişme ve deneysel kazanımlar (yoğun lazer ışıınının katı ve gazlarla etkileşimi, biyolojik ve nanomalzemelerin ablasyonu, spektroskopi ve spektral seçilim radyoskopi, holografî, tomografî ve interferometri), (5-240 μm) [27]
- Novosibirsk THz SEL'de yüksek güçteki deneylerden yarı-optik seçilimli bileşiklere dayalı metal mesh'in geliştirilmesi ve uygulamaları (126 μm) [28]
- FEL radyasyonu altında IR multifoton Si ayırıcı Phenyltrifluorosilane (PhSiF_3)'ın çözünümü (860 and 970 cm^{-1} [11.62 ve 10,31 μm]) [29]

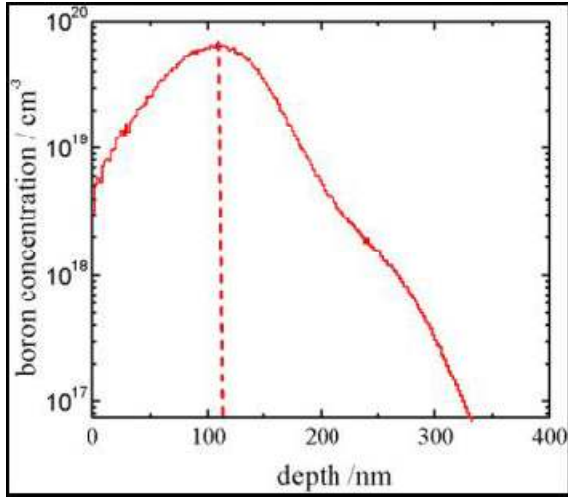
- Bi merkezinde IR Raman saçılımı ile Si'dan THz ışıma yapılması (14-22 μm) [30]
- ps-altı lazer atmosferinin dielektrik yarıiletkenlerle ve yarıiletken heteroeklemlerle etkileşimi (1053 nm) [31]
- İki-foton kuantum kuyu kızılötesi fotodedektörler ile kuadratik algılama (5,4 μm) [32]
- Oda sıcaklığında orta kızılötesi bölgede iki-foton fotodedektörü (5,4 μm) [33]
- Kızılötesi yakın alan tarama optik mikroskopi için aralıklı konsol kolu problemleri (5,8 μm) [34]
- Yarı saydam malzemelerin mikro delinmesi için yoğunluk soğurma etkileri (8 μm) [35]
- SEL ile uyarılmış radyoaktif NO ve CO 'in titreşimlerinin incelenmesi (NO için 5,33 μm ve CO için 4,67 μm) [36]
- IR SEL ile uyarılmış yüzey reaksiyonlarının incelenmesi (8,3 μm) [37]

Aşağıda yapılan bu çalışmaların bazılarının ayrıntıları verilmiştir:

Quantitative determination of the charge carrier concentration of ion implanted silicon by IR-near-field spectroscopy (2010, HZDR Almanya)

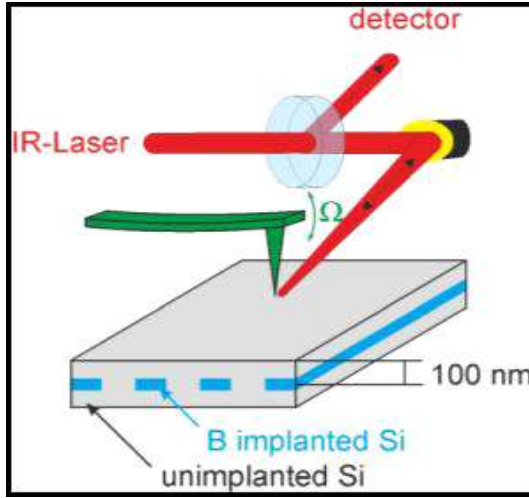
Yoğun bir SEL ile tarayıcı-tip yakın alan kızılötesi mikroskobun (s-SNOM) kombinasyonu olarak kullanılan bu çalışmada, uzaysal ve spektral olarak ayarlanabilir ışınım kaynağı, silikon içine katkılanmış tabakaların gömülmesinde kullanılmıştır. Bunun için 10'dan 14 μm 'ye kadar olan dalgaboyu aralığında çalışılmıştır. Aktivasyon taşıyıcılarının konsantrasyonu ve örneğin kantitatif değerlerinin doğruluğunun dielektrik fonksiyonu için yapılan analiz, temel Drude modeline dayanır. 10,6 μm dalgaboyunda sabitlenerek kontrol edilen deneyin interferometrik yakın alan sinyalleri kaydedilmiştir. Bu deneyde elde edilen faz bilgileri, spektral olarak yapılan deneylerde gözlenen taşıyıcı konsantrasyonu ile tamamen uyumludur.

SEL ölçümlerinin doğruluğunu kolayca sağlamak için sabitleme dalga boyunda (10,6 μm) uygulama yapabilecek CO_2 lazeri bu dalga boyunda kullanılarak örnek rezonansı 10,6 μm civarında hedefe odaklanmıştır. Böylece bir n-tipi Si (100) tabaka, $6,8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ dozunda bor atomları ile implant edilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. 30 keV enerji için n-tipi silikon içine tavlama yapılmadan sadece bor implant edilmiş profil görünümü ($6,8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ dozunda)

Derinlik profilinin piki değişen implantasyon enerjisi ile değiştirilebilir. Deneyde 30 keV implantasyon enerjisinde 100 nm'nin altında maksimum konsantrasyon elde edilebilen örnek yüzeyi kullanılmıştır. Yüzeydeki konsantrasyon ve 200 nm derinlikteki konsantrasyonun her ikisine göre taşıyıcı konsantrasyon piki büyüklük olarak bir mertebe daha geniştir. Katkılanmamış silikonun içine 12 μm mesafeyle ayrılan katkılanmış silikondan 4 μm genişliğinde şeritler oluşturulmasıyla implantasyon maskeleme yapılmıştır (Şekil 6.2). Daha sonra örnek yüzeyine kuru nitrojen gazında 1000 °C 'de 60 s boyunca ani ısı tavlama yapılmıştır. Yapılan bu örnek hazırlama işlemi, implantasyon sırasında püskürtmeden dolayı implant edilen bölgenin daha düşük olduğu yerlerde, AFM tarafından ölçülen yaklaşık 2 nm'lik implant edilmiş ve edilmemiş silikon arasında çok küçük yükseklik farkına sebep olur.



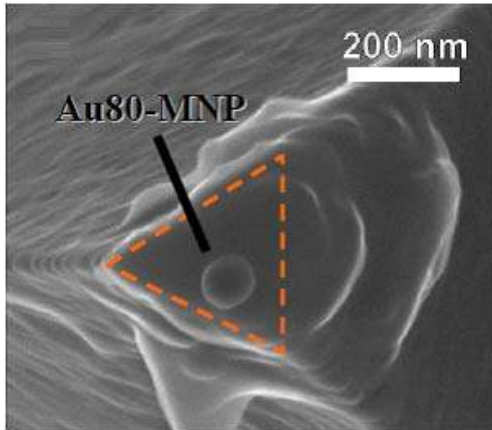
Şekil 6.2. Deney düzeneğinin şeması

Yakın alan ölçümleri, geçerli temassız modda s-SNOM kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.2). Düzenekteki destek, 60 nm salınım genliğinde ve 140 kHz rezonans frekansında salınım yapmıştır. Dalgaboyu 10 ile 14 μm aralığında ayarlı p-polarize kızılötesi ışık, yüzeyi taramakta kullanılan bir PtIr (platin iridyum) uç üzerine odaklanmıştır. Bu ucun ortalama gücü yaklaşık olarak 10 mW'tır. Demetin k-vektörü ve ucun x-ekseni arasındaki açı 20° civarındadır. Geri saçılan ışık yansıma modunda, bir cıva kadmiyum tellür dedektörü kullanılarak, tespit edilmiş ve bu ışık geri alan bileşenlerini bastırmak için 3. harmonik destek salınım frekansında demodüle edilmiştir. Örnek ölçümleri için en azından bir katkılanmış silikon şeridi kapsayan alan taranmıştır ve dalgaboyu her altı çizgide yavaş yavaş değiştirilmiştir. Optik yakın-alan genlik sinyali gelen güce normalize edildikten sonra implant edilmiş ve edilmemiş silikon arasındaki genlik sinyalindeki karşıtlık hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, geniş bir aralıkta ayarlanabilen bir serbest elektron lazeri kullanılarak bor implant edilmiş ve edilmemiş silikonlar arası dalgaboyuna bağlı genlik farkı ölçülmüştür. Kızılötesi taramalı SNOM tekniğiyle, iyon implantasyonundan elde edilen ve tavlamadan sonra beklenen değerlerin iyi bir uyum içinde olduğu görülmüş ve örneğin taşıyıcı konsantrasyonu ölçülmüştür [19].

Gold nanoparticle tips for optical field confinement in infrared scattering near-field optical microscopy (2008, HZDR, Almanya)

IR saçılma yakın alan optik mikroskopisiyle (SNOM) orta kızılötesi bölgede yapılan başka bir uygulamada, atomik kuvvet mikroskopuna (AFM) tutturulmuş altın nanoparçacık uçla prob edilmiş SNOM ve SEL yardımıyla elde edilen deneysel bulguların yarı-statik dipol modelle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bunun için belli dalgalı boylarında, etkili bir elektrik alan hapsi gereklidir ve bu da optik anten olarak hareket eden altın nanoparçacık yardımıyla elde edilir. Bir ferroelektrik lityum niobate (LNO) örneğinde indüklenmiş fonon polarizasyon rezonansının kullanılmasıyla örnek yüzeyinde elektrik alanının normal hapsedilmesi sağlanmıştır. Örnek yüzeyine SEL demetinin dalgalı boyu uzunluğuna yakın boyda bir piramidal AFM'ye tutturulmuş nanoparçacık uç ve belli bir açıda SEL demeti yöneltmiştir. Böylece altın nanoparçacık ucun uzaysal olarak yakın alan tarayıcısını sınırlandırdığı ve elde edilen tarama davranışının dipol modelle uyumlu olduğu gösterilmiştir (Şekil 6.3).

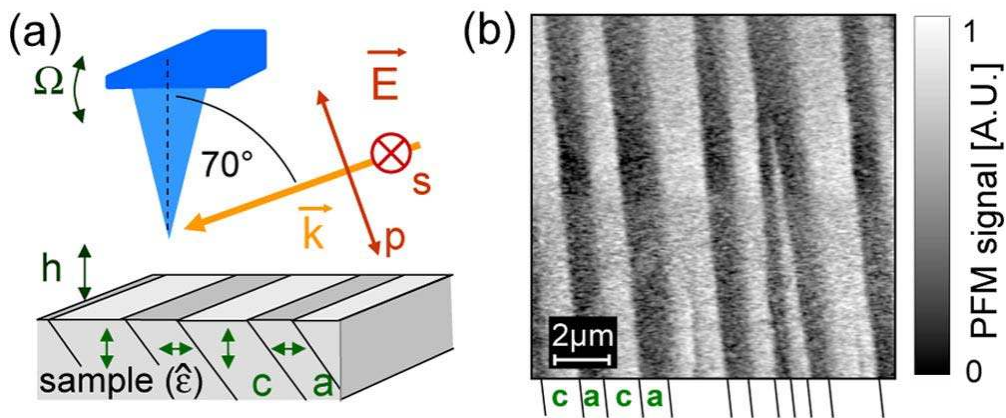


Resim 6.1. 80 nm çaplı bir altın nanoparçacık taşıyan piramidal AFM destekli ucun dipten (örnek tarafından) görünüşü

[20]

Anisotropy contrast in phonon-enhanced apertureless near-field microscopy using a free-electron laser (2008, HZDR, Almanya)

Bu çalışmada saçılmalı tarayıcı yakın-alan optik mikroskopisi ve spektroskopisi için ayarlanabilir optik kaynak olarak kızılötesi serbest elektron lazeri kullanılarak BaTiO₃'teki (Baryum titanit) ferroelektrik etki alanı görüntülenmiştir. Lazer fonon rezonansının spektrum aralığına ayarlandığında, ferroelektrik etki alanı malzemenin dielektrik özelliklerinin izotropik olmamasından dolayı bozulmaktadır. Yakın-alan etki farklılığı, örnek yüzeyine göre dielektrik tensör yöneliminin yakın-alan sinyali üzerinde net bir etkiye sahip olduğunu gösterir. Tarayıcı yakın-alan optik mikroskopisi (SNOM), yüzeylerin yüksek çözünürlükte görüntülenmesine izin verir. Oda sıcaklığında bu örnekler ana kristalin aksisi doğrultusunda düzlem içi ve düzlem dışı polarize ferroelektrik etki alanlarını oluşturur (Şekil 6.3). Bu tür örnekler çeşitli optik, elektro-optik ve elektromekanik devrelerde dalgakılavuzları, frekans çiftleyici, çalıştırıcı vb. olarak kullanılmaktadır ve kalıcı bellek devreleri, bilgi teknolojisinde yüksek- ϵ uygulamaları için çok uygundur. İzotropik olmayan karşılığı geliştirmek için, ayarlanabilir IR SEL kullanılarak örnek en yakın fonon rezonansına uyarılmıştır. İzotropik olmama durumundan dolayı fonon rezonans koşulları iki etki alanı için farklıdır.

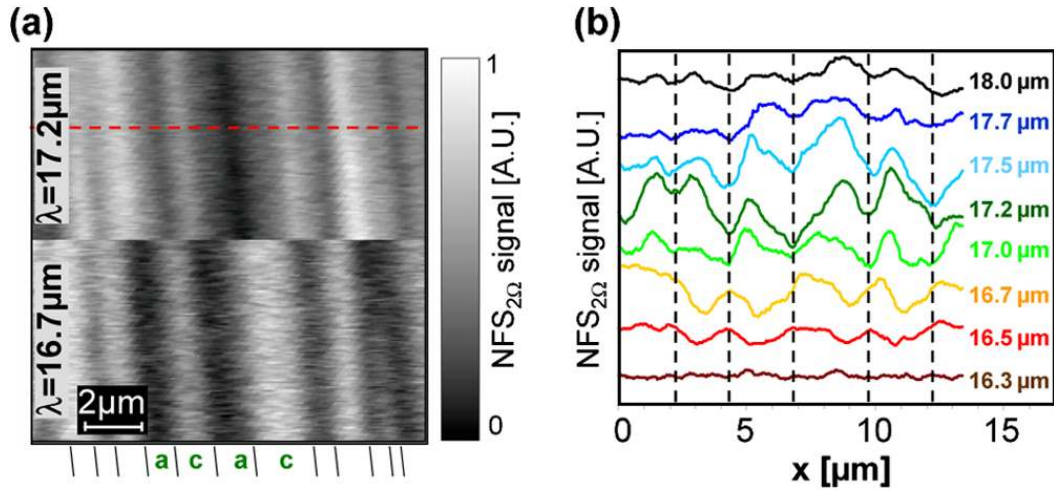


Şekil 6.3. (a) s-SNOM deney düzeneği: s- veya p-polarize ışığın ($\vec{k}$ dalga vektörüyle), bir SFM (tarayıcı kuvvet mikroskobu) ucun BaTiO₃ örneğinin yüzeyine yaklaştırılmasıyla saçılması (b) tek kristal BaTiO₃ örneğinin PFM (piezotepkimeli kuvvet mikroskobu) görüntüsü

Ölçüm düzeneği, örnek normaline göre 70° geliş açısında yaklaşık 10 nm çaplı uç ile kenar aydınlatma sağlayan SFM'den oluşur (Şekil 6.4 (a)). SFM, temel rezonans frekası $\Omega = 170\text{kHz}$ 'de desteğin salınım yaptığı, gerçek temassız modda çalışır ve uç-örnek arası mesafe örnek yüzeyiyle etkileşmeden kaynaklanan frekans kayması yolu ile kontrol edilir.

Bundan sonra tek kristal ferroelektrik BaTiO_3 'ün görüntüleme analizi ve yakın-alan IR spektroskopisi yapılmıştır. Ferroelektrik polarizasyon c -aksisi doğrultusunda yöneltmiştir. Yakın yüzey etki alanı dağılımı, s-SNOM deney düzeneğinde PFM olarak görüntülenmiştir (Şekil 6.4 (b)). Bu PFM görüntüsü, BaTiO_3 yüzeyinin $13.4 \times 13,4 \mu\text{m}^2$ 'lik genişlikteki alanını gösterir. Parlak ve karanlık çizgilere karşılık gelen c ve a_x etki alanları, sırasıyla birçok ferroelektrik etki alanı içeren topografik düz kristali gösterir.

Literatürde 5- 25 μm dalgaboyu aralığında görüntülemeler yapılmıştır. 19,5 μm ve 20,5 μm dalgaboylarında c ve a yönelimleri için, kullanılan malzemenin fonon rezonans enerjisi en yüksek olarak gözlenmiştir. Sistemin rezonans üzerinde saçılma kesitinin, kabaca $\lambda=16$ ve 18 μm arasında güçlü olarak ilerlemesi beklenmektedir. 16,3 ve 18 μm arasındaki rezonans bölgesinde bir dalgaboyu serisi için örnek yüzeyinin uç ile taranmasıyla yakın-alan saçılma verileri elde edilmiştir. Örnek hareket halindeyken, ucun konumu sabit tutulmuştur. Yüksek harmoniklerde fakat daha geniş sinyal-gürültü oranında, sinyal olarak aynı optik karşıtlığı gösteren ikinci harmonik sinyal görüntülenmiştir. $\lambda= 17 \mu\text{m}$ dalgaboyu civarında belirli konum pozisyonlarında minimum değişiklikte maksimumlar (ya da tam tersi durumda) gözlenmiştir (Şekil 6.4 (b)). $\lambda= 16,7$ ve $17,2 \mu\text{m}$ 'de iki boyutta sinyal titreşimleri çok iyi bir şekilde gözlenmiştir. Şekil 6.4 (a)'da c ve a etki alanları için rezonans durumlarına sırasıyla parlak ve karanlık alanlar karşılık gelir.



Şekil 6.4. (a) $\lambda = 16,7$ ve $17,2 \mu\text{m}$ 'de iki boyutlu tarama görüntüleri (b) Yakın-alan saçılma sinyalleri, $16,4 \mu\text{m} < \lambda < 17 \mu\text{m}$ aralığında sinyaller çok güçlü

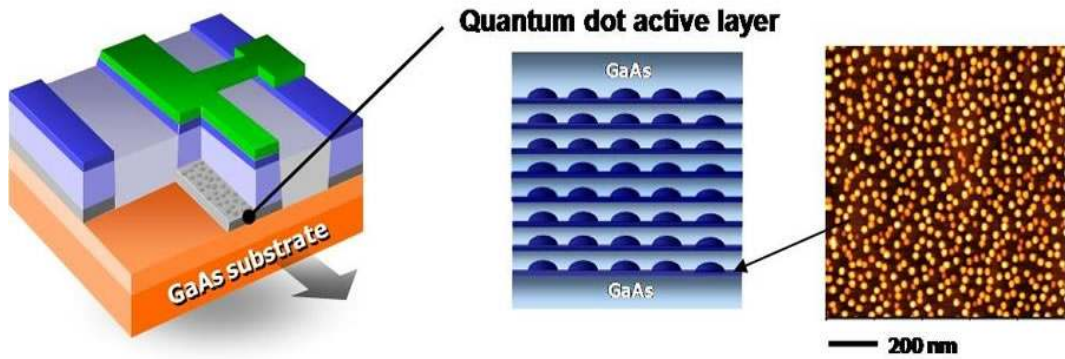
Özetle, optik izotropik olmayan malzemelerin yakın-alan etkileşimleri gösterilmiştir. Ferroelektrik BaTiO_3 içinde, IR fonon polaritonları $16\text{-}18 \mu\text{m}$ 'de uyarıldıklarında en güçlü yakın-alan çiftleri gözlenmiştir. SEL ve s-SNOM'un mükemmel kombinasyonu, organik ve biyolojik moleküller gibi tek nano-nesneler ve fotonik bant aralığı veya çoklu ferroik yapılar dahil geniş çapta çeşitli örneklerin izotropik olmayan yakın-alan fonon rezonanslarını verecektir [22].

Terahertz optical sideband emission in self-assembled quantum dots (2010, HZDR, Almanya)

Dalgaboyunda değişim, bütün optik sistemlerde optik yarıiletken yükselticiler (SOAs), yarıiletken lazerler ve optik fiberler kullanılarak başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Optik anahtarlama için alternatif bir metod; GaAs kuantum kuyularında THz elektro-optik (EO) modülasyondur. Bu teknikte SOAs ve lazer prensibinin aksine anahtarlama hızı; kazanç ve taşıyıcı dinamikleri gibi faktörlerle sınırlı değildir. Bir yarıiletken kuantum kuyu yapısında THz EO modülasyonu, hem NIR demet frekansının hem de THz demet frekansının toplamından oluşur.

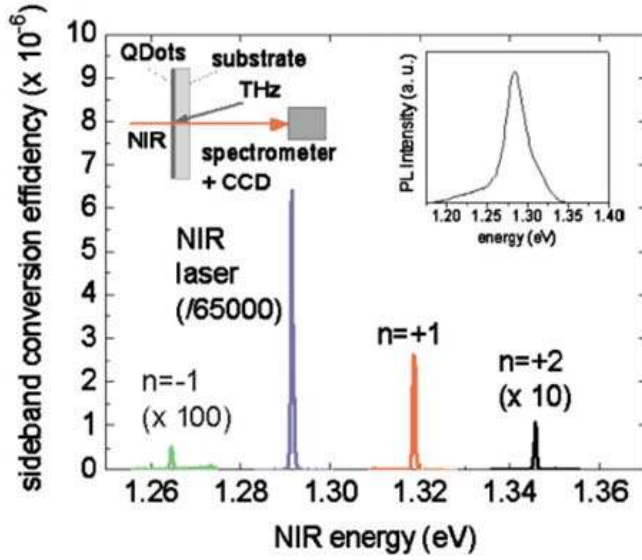
QD (kuantum nokta) heteroyapılarından optik yanbandlar oluşturmak için yapılan bu uygulamada, test geometrisi; THz ve NIR demetleri için optik seçim kurallarının

izin verdiği normal ıyırı sıcaklığında kuantum kuyularıyla karşılaştırıldığında daha basit bir dızenektir. Bu uygulama için incelenen rnek, MBE (moleküler demet epitaksi) tekniği ile büyütülmüş ve örnek 80 tane 50 nm genişliğinde GaAs bariyerleri ile ayrılmış olan tabakalar arasında kendiliğinden oluşan nominal InAs QD’lardan oluşmaktadır. Böylece oluşan QD’lar, tabakalar arasındaki yapısal ve elektronik birleşmeyi engeller (şekil 6.5).



şekil 6.5. Kuantum noktaların oluşumu

QD’lar, her biri ~ 2 nm kadar büyütülmüş Si katkılı tabakalardan transfer edilen elektronlarla bir araya toplanmıştır. Katkı yoğunluğu, her bir nokta en fazla bir elektoranla yüklü olacak şekilde kontrol edilmiştir. Isıl tavlama yapılan nokta tabakaların hemen hemen aynı olmaları sebebiyle, bu örnekten büyüme doğrultusunda istemli bir kırılma simetrisi yoktur. Deneyde NIR probe, tekrarlama hızı 13 MHz olan ~ 3 ps’lik bir SEL atması ile ayarlanabilir bir Ti:sapphire lazerle eş zamanlılığı sağlanarak, örnek boyunca NIR probe atmaları uygulanmıştır. Deney için örnekler sıcaklığı 4-350 K arasında değişen elmas pencerelerden oluşan sıvı He kabına yerleştirilmiştir. rneğe uygulanan NIR demeti salınımları sonucu her bir saçılım, spektrometredeki bir optik aę ve ışığa duyarlı bir kamera ile dedekte edilmiştir (şekil 6.6).



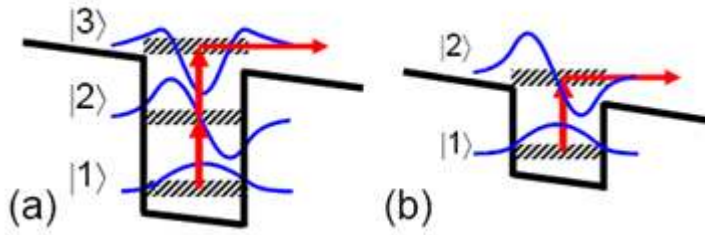
Şekil 6.6. THz pik yoğunluğu $\sim 6 \text{ MW/cm}^2$ ve $46 \mu\text{m}$ (27 meV) SEL 4 K’de NIR demeti boyunca üretilen yanbandlardan alınan spektrum

NIR demeti salınımı 1,29 eV’ta görülebilmektedir. Bu enerji 4 K’de fotoluminesans (PL) pikine karşılık gelir. Sonuç olarak üretilen bu yanbandların kuantum kuyular için etkisi gösterilmiş ve THz optik frekansında çalışılan farklı sıcaklıklarda tabakalar arasında kendiliğinden oluşan QD örneği kullanılarak optik yanbandların üretimi neticelendirilmiştir [24].

Autocorrelation measurements of the FELBE free-electron laser and photocurrent saturation study in two-photon QWIPs (2007, HZDR, Almanya)

QWIPs (kuantum kuyu IR fotodedektörler), termal görüntüleme için çok amaçlı ve yaygın teknolojiyi temsil eder. Buna ek olarak QWIPs, yüksek yapısal elektrik band genişliği sayesinde optik puls görüntüleme, heterodin dedeksiyon ve orta kızılötesi veri linkleri için yeni uygulamaların yapılmasına olanak sağlar. İki fotonlu QWIPs, 3-seviyeli n-tipi kuantum kuyularından oluşur (Şekil 6.7). Bu yüzden bir elektron yayılımı için iki kızılötesi fotonu gereklidir. Bunun sebebi, oluşan fotoakımın

kuadratik olarak gelen güce bağlı olmasıdır ve bu güç kuadratik dedektör devresinin çalışması için temel şarttır. Kuantum kuyusundan bir elektron çıkarmak için bir foton yeterli olmasına rağmen, Şekil 6.7 (b)'de karşılaştırma için doğrusal QWIP gösterilmiştir.

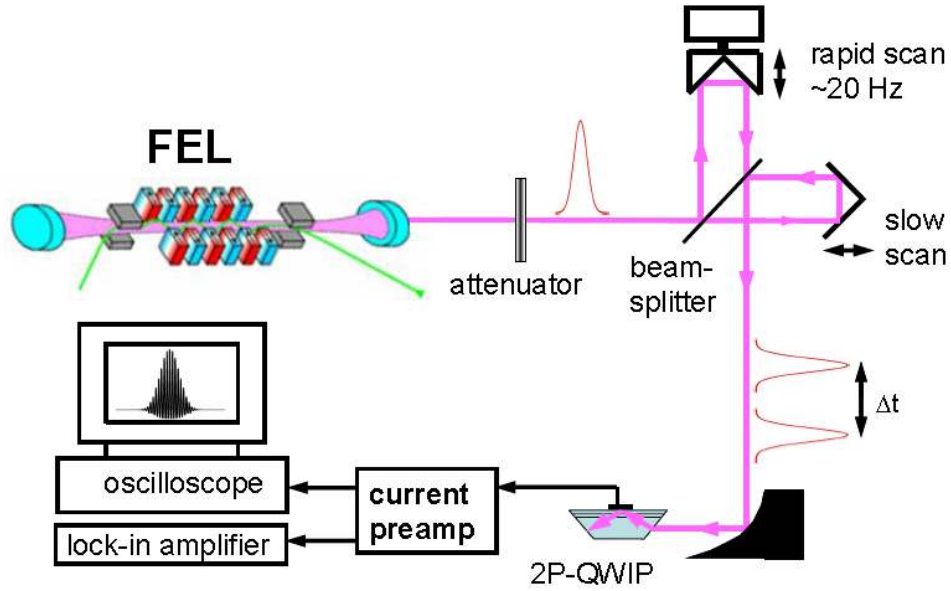


Şekil 6.7. a) İki-foton QWIPs ve b) doğrusal QWIPs için band diyagramı, dalga fonksiyonu ve uygulama yönü

İki fotonlu QWIP yapıları, yarı-yalıtkan GaAs alt tabakalar üzerine moleküler demet epitaksi (MBE) tekniğiyle büyütülmüştür. Aktif bölge, kuyu başına n-katkılanmış $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ tane elektron konsatrasyonu bulunan, 20 kuantum kuyusu içerir. Mesa dedektörleri $120 \times 120 \text{ } \mu\text{m}^2$ ve $240 \times 240 \text{ } \mu\text{m}^2$ 'lik bir alanda optik litografi ve ıslak-kimyasal aşındırma ile işlem yapmışlardır. $10,4 \text{ } \mu\text{m}$ dalgaboyunda bir pik gözlenen örnek, $7,6 \text{ nm}$ genişliğinde GaAs kuantum kuyusu ve 47 nm $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ bariyerlerini içerir. Çalışma kapsamında kullanılan diğer iki-fotonlu QWIP yapısı, $8 \text{ } \mu\text{m}$ dalgaboyunda pik gözlenen $6,8 \text{ nm}$ $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ kuyularından ve 47 nm $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ bariyerlerinden oluşur. Optik çiftlenim için standart 45° kristal yüzeyi kullanılmıştır.

Otokorelasyon ölçümleri için; bir % 50 demet bölücü, bir kol üzerinde genelde 20 Hz tarama frekansında çalışan bir karıştırıcı (APE tarama gecikmesi için) ve diğer kol üzerinde bir mertebe geciktiriciden oluşan Michelson interferometre düzeneğine SEL ışınımı gönderilmesiyle iki tane zaman gecikmeli atma üretilir (Şekil 6.8). Işıma, bir tane aksis-dışı parabolik ayna ile iki fotonlu QWIP cihazına 45 yüzey açısıyla odaklanmıştır. Fotoakım sinyali, bir akım önyükselteci ve dijital osiloskop kullanılarak kaydedilmiştir. SEL atma özelliklerinin hızlı görüntülenmesi için bu yaklaşım doğrudur, çünkü tüm otokorelasyon izleri sinyallerin ortalamaları

alınmaksızın tek hızlı 25 ms süreli taramalarla elde edilir. İnterferometrik otokorelasyon izleri $\lambda=10,5 \mu\text{m}$ dalgaboyunda alınmıştır.



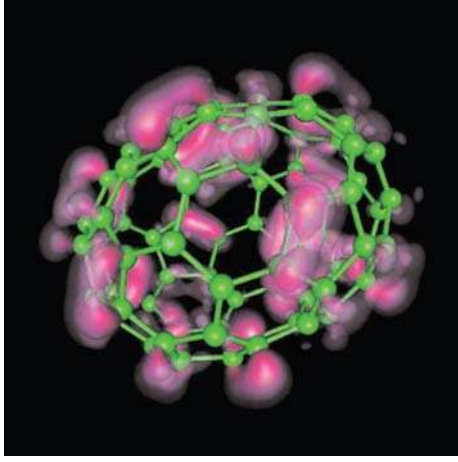
Şekil 6.8. SEL otokorelasyon ölçümleri için deney düzeneği

İki fotonlu QWIP sinyali, kapasitif boşalmasından veya soğurma yoğunlaşmasından ziyade iç konum yüklerinin üretilmesi sebebiyle sınırlandırılır. 77 K’de neredeyse gerçek kuadratik davranışlar elde edilir ve destek faktörlerinin beklenen sıfır zaman gecikme ve geniş zaman gecikme teorik değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında, kuadratik otokorelasyon ölçümleri, ek doğrusal ve orta alt bant termal yoğunluğundan yükselen sinyal katkısının varlığından dolayı engellenmiştir [25].

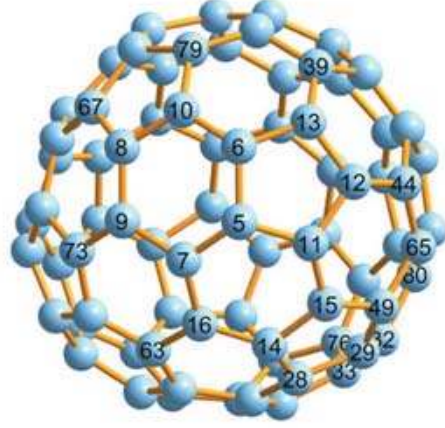
Infrared multiphoton electron detachment spectroscopy of C_{76}^{-2} (2009, CLIO,Fransa)

Negatif iyonların kızılötesi spektrumunun incelenmesi için SEL kullanılabilir. CLIO’da C_{76}^{-2} iyonu ile yapılan bir çalışmada (Şekil 6.9), bu iyonun kızılötesi çoklu foton elektron ayrılma spektroskopisi incelenmiştir. Bunun için kullanılan düzende SEL,

değiştirilebilen iyon kapalı kütle spektroskopisi içine çiftlenmiş ve burada üretilen iyonlar, iki oktipol iyon klavuzu yardımıyla, elektrodinamik iyon kapalı içine transfer edilmiştir. İyonlar vakum tankındaki bir ZnSe pencere boyunca SEL' in çıkışına odaklanmıştır.



(a)



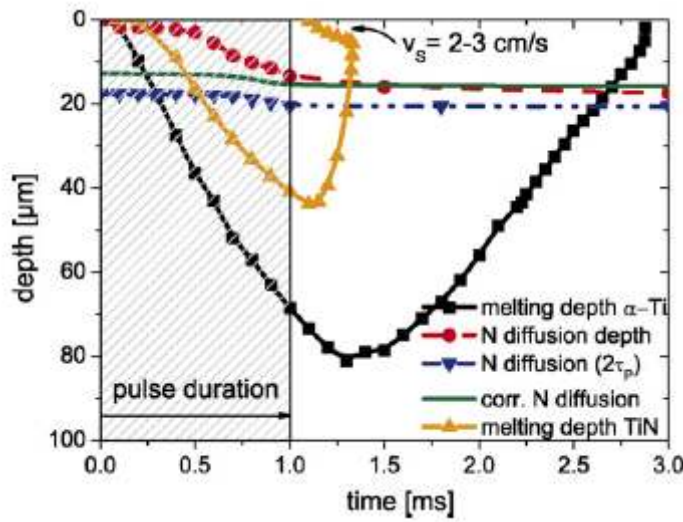
(b)

Şekil 6.9. (a) İki aniyon olan C_{76}^{-2} ve C_{76} arasındaki geometrik olarak optimize edilmiş D_2 kafes yapıları üzerinde, elektron yoğunluğu değişiminin haritalandırılması (b) C_{76}^{-2} iyonun izomeri olan D_2

Kızılötesi çoklufoton elektron ayrılma spektroskopisi olarak kullanılan deney düzeneğinde, kızılötesi dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak rezonans titreşim eksitonları, elektronların ayrılmasına sebep olmuştur. Sonuçta tekli negatif yükler kadar iyi olan diğer yüklü iyon çiftleri gözlenmiştir. Daha sonra IR-MPED (IR electron detachment spectroscopy) yardımıyla C_{76}^{-2} iyonunun titreşim spektrumu elde edilmiştir. Bu spektrum, taban durumundaki C_{76}^{-2} iyonunun kızılötesi-izinsiz titreşimlerinin üst seviyeden itibaren olan hesaplamalarıyla karşılaştırılmıştır. Spektrumda gözlenen aşırı elektron yoğunluğu ise bazı özel bağ uzunluklarının değişimine yol açmıştır [23].

Free electron laser nitriding of metals: From basis physics to industrial applications
(2007, JLAB, Amerika)

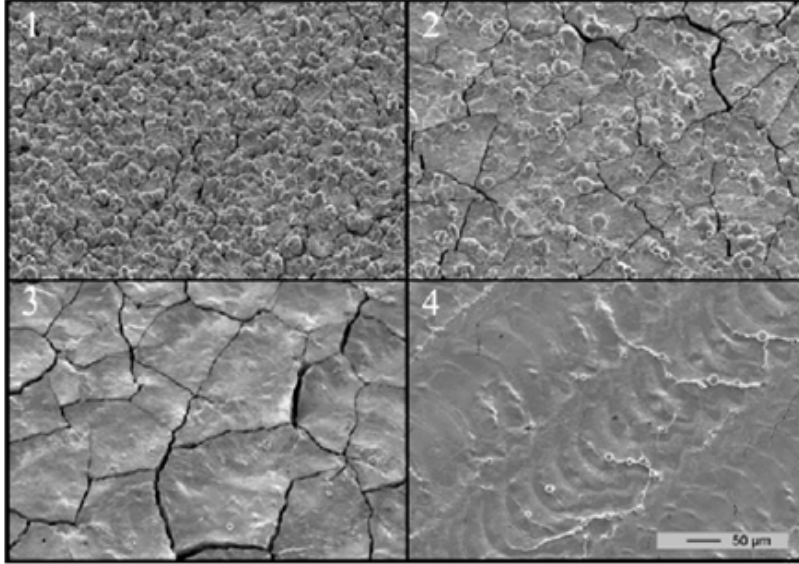
Ti ve alaşımları; düşük ağırlığı, düşük kirliliği, yüksek katılığı, kolay aşınması bakımından malzeme yapımında önemli rol oynar. JLAB’da yapılan bu uygulamada 3,1 μm dalgaboyunda, örnek yüzey üzerine SEL demeti odaklanmıştır. Böylece Ti örnekler üzerinde cm^2 başına yüzlerce J’lük makropuls etki ettirilmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. 1 ms atma süresi boyunca oluşan eriyik derinliği

Lazer nitritleme için örnekler önce içi tamamen boşaltılan ve sonra 10^5 Pa’da % 99,999 saflıkta nitrojen ile doldurulan odaya yerleştirilmiştir. Demet, silikadan yapılmış bir pencereden örnek yüzeyi üzerine uygulanmıştır. Örneğin tüm yüzeyi x-y yönünde hareket ettirilebilen bir bilgisayar ile kontrol edilmiştir. Örneklerin analizi ise SEM ile birlikte XRD kullanılarak yapılmıştır (Resim 6.2). Ti ile lazer demetinin etkileşiminden dolayı, Ti yüzeyi üzerinde bir plazma oluşmuş ve Ti içerisine nitrojen nüfuz etmiştir. Sonuçta üretim parametrelerinin uygunluğunun bir sonucu olarak farklı kalitelerde numune nitritleme işlemi yapılabilmiştir. Yaklaşık 5-80 μm ’de uygun nitrojen içerisindeki tabaka kalınlıkları ölçülmüş ve farklı süre ve frekanslarda örnekler karşılaştırılmıştır. Amaç; uygun sıcaklıkta istenilen katılıkta ve daha pürüzsüz bir yüzey elde etmektir. Ancak eriyik dinamikleri limiti burada önemlidir.

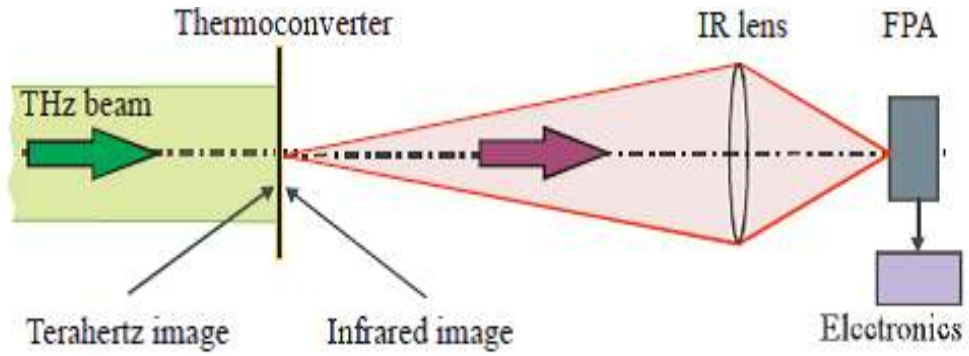
Bununla birlikte SEL’le nitritleme ile teknik tabakalar (technical coatings) üretmek mümkün fakat hâlâ kalite ve özellikle morfoloji açısından ilerleme devam etmektedir.



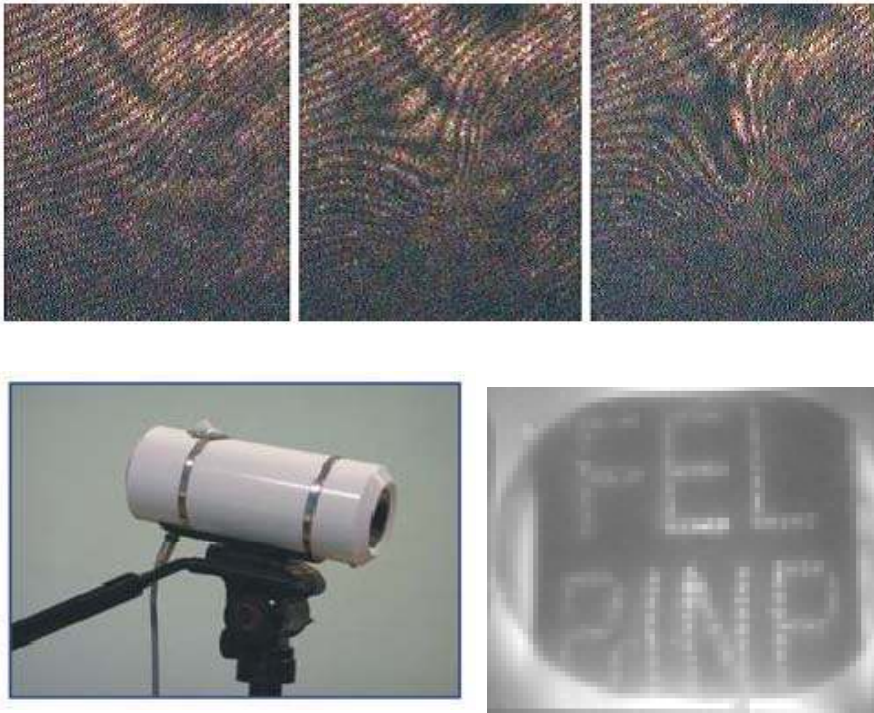
Resim 6.2. Örnek yüzeyinde oluşan çatlakların süreye ve frekansa bağlı değişimi (1. örnek $\tau=250\ \mu\text{s}$, $f=60\ \text{Hz}$, $\lambda=100\ \mu\text{m}$; 2. örnek $\tau=750\ \mu\text{s}$, $f=30\ \text{Hz}$, $\lambda=100\ \mu\text{m}$; 3. örnek $\tau=1000\ \mu\text{s}$, $f=30\ \text{Hz}$, $\lambda=100\ \mu\text{m}$; 4. örnek $\tau=1000\ \mu\text{s}$, $f=10\ \text{Hz}$, $\lambda=200\ \mu\text{m}$)

Imaging techniques for a high-power THz free electron laser (2005, Novosibirsk FEL, Rusya)

Uzak kızılötesi bölgede (120 mikron) yüksek güçte THz SEL ile görüntüleme yapılabilmektedir. Bunun için iki metod tanımlanır: birincisi THz radyasyonun yakın IR radyasyonuna dönüşmesine dayalı termograf ile görselleştirme, ikincisiye optik olarak transparan maddenin ısıtılması sonucu görünen fakat THz’de opak olan görünür ışık faz kayması kaydına dayanan görselleştirme. FNC (Visualization with a FIR-NIR converter) tekniği, THz radyasyonuna maruz bırakılmış belli bir yüzey sıcaklığında bir ince filmin büyütülmesinde kullanılır (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Uygulamada kullanılan FNC deney düzeneği



Resim 6.3. Termograf SVIT ve THz görüntüsü

FIR-NIR dönüşümü ile görselleştirme çok basit ve hassas bir metoddur. Isı yayılımını ve aynı şekilde enerji dağılımını çok iyi haritalandırır (Resim 6.3) ve yoğun THz demetinin izlenmesini rutin bir şekilde sağlar [21].

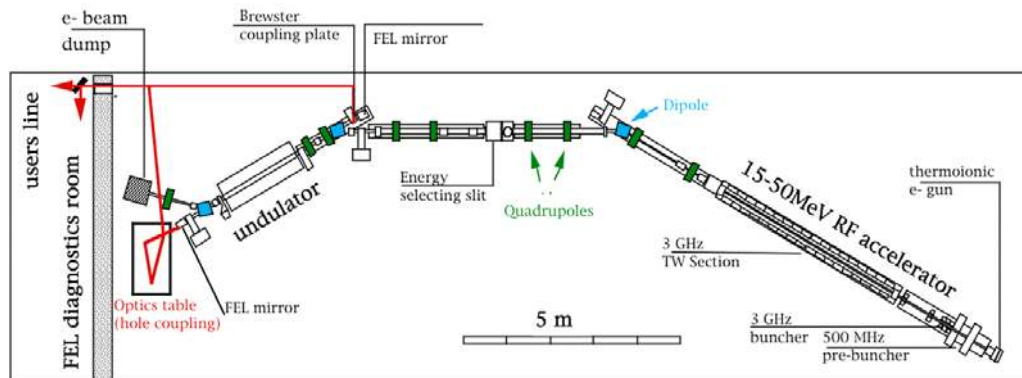
7. DÜNYADA IR SEL İLE BİLİMSEL, ENDÜSTRİYEL VE MALZEME UYGULAMALARI YAPAN LABORATUVARLAR

7.1. CLIO IR SEL Laboratuvarı (Orsay, Fransa)

(<http://clio.lcp.u-psud.fr/>)

CLIO Serbest Elektron Lazeri, her biri 1 m olan iki salındırıcıdan oluşur ve bu salındırıcılar birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Böylece orta kırmızıaltı bölge aralığında yaklaşık 20 μm ' ye kadar eş zamanlı olarak iki renkte ve birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilen ışınım elde edilebilir. CLIO, 20-50 MeV aralığında çalışan lineer bir hızlandırıcıya sahiptir. Işınımın dalga boyu 3-60 μm aralığındadır.

CLIO' dan alınan ışınım yedi deney istasyonunda kullanılmaktadır. Bu istasyonlardan E0 ve E5 olarak adlandırılan iki deney odası özel amaçlı kullanılmaktadır. Diyagnostik odası E7' de demetin kararlı hale getirilmesi ve demet parametrelerinin kontrolü için SEL fiziği, teşhis çalışmaları ve ışık deneyleri yapılmaktadır. Burada soğutulmuş kırmızıaltı algılayıcıları, monokromatörler ve optik düzenekler bulunmaktadır ve E5 ve E0 özel deney odaları, bu diyagnostik ve ışık çalışmalarından elde edilen sonuçların araştırılması için kullanılır.



Şekil 7.1. CLIO laboratuvar binası

AFMIR-PTIR Mikroskopi deney odasında; AFM (Atomic-Force Microscope), CO₂ lazer ve ayarlanabilir OPO (Optical Parametric Oscillator) sistemi bulunmaktadır.



Resim 7.1. AFMIR-PTIR

FT-ICR (Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance) spektrometresi E10 deney odasında 7 Tesla'lık bir magnet oluşturan kütle spektrometresi (Apex Qe, Bruker) yer almaktadır. Ayrıca 25 Hz'de (YAG pompa) nanoatma üreten OPO/OPA (Optical Parametric Oscillator/Amplifier) bulunan bu deney odasında 2000-4000 cm⁻¹ spektral aralığı tarayabilen bir lazer sistemi (Laservision) ve OPA' nın çıkışındaki DFG kullanılarak AgGaSe₂ kristaliyle 650-1800 cm⁻¹ spektral aralığında ayarlanabilen ikinci bir aşama vardır.



Resim 7.2. FT-ICR kütle spektrometresi (Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance)

Aşağıda CLIO laboratuvarının elektron demeti ve salındırıcı parametreleri Çizelge 7.1’de ve CLIO serbest elektron lazeri parametreleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. CLIO Laboratuvarının elektron demeti ve salındırıcı parametreleri

Enerji (MeV)	8- 50
Paketçik yükü (nC)	1
Ortalama akım (mA)	6
Pik akımı (A)	100
Normalize emittans (π mm mrad)	40
K salındırıcı parametresi	0- 2.2
Salındırıcı magnet periyodu (cm)	5.04
Manyetik alan (T)	0.97

Çizelge 7.2. CLIO serbest elektron lazeri parametreleri

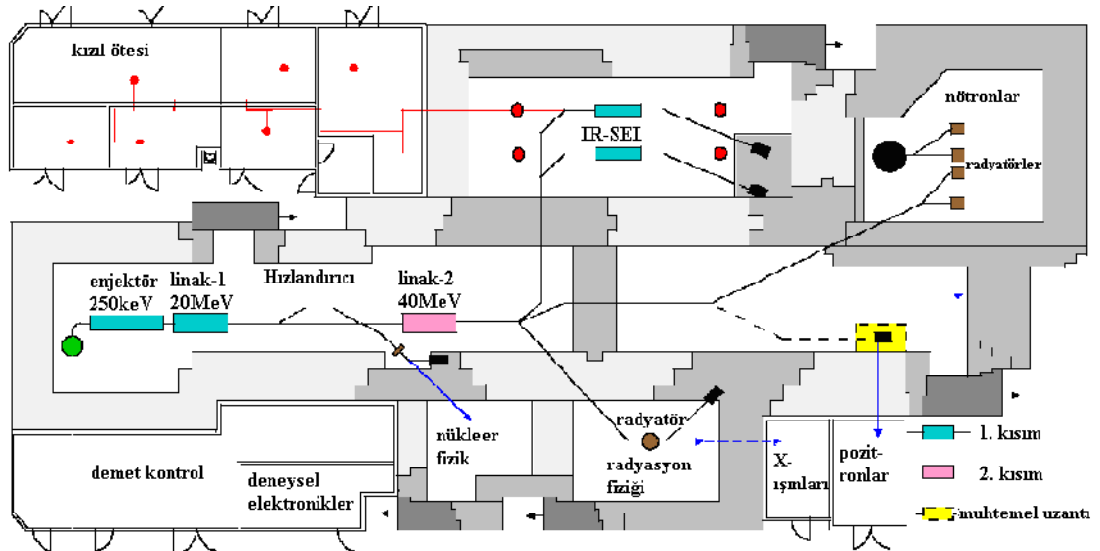
Dalgaboyu aralığı (μ m)	3-150
Paketçik uzunluğu ps (ayarlanabilir)	0.5 – 6
Max. ortalama güç (W @ 16ns/ 25 Hz)	1
Max. pik gücü (MW @1 ps)	100

CLIO’ da bulunan bu deney odalarında yüzey çalışmaları, elektrokimya çalışmaları, moleküler çalışmalar, yarıiletken ve kuantum kuyusu çalışmaları, alan kızılötesi deneyleri, yüzey foto yayınımları deneyleri, eczacılık çalışmaları yapılmaktadır [13].

7.2. HZDR IR SEL Laboratuvarı (Dresden, Almanya)

(<http://www.fzd.de>)

HZDR cw modda, 13 MHz tekrarlama hızına sahip bir atma ile çalışan, bir süperiletken lineer hızlandırıcıya sahip bir SEL laboratuvarıdır. Hızlandırıcı, 20 MV' ta iki süperiletken üniteye performans gösterir. Ortalama demet akımı 1 mA' dir. Elektron demeti, ikincil demetlerin (parçacık ve elektromanyetik ışıma) üretildiği birçok laboratuvara yönlendirilir. Atma enerjisi birkaç 100 nJ ve atma süresi birkaç pikosaniye mertebesinde. Tipik çalışma modu; birkaç 100 μ s' de 25 Hz' e kadar veya alternatif olarak sürekli 13 MHz SEL çalışma modunda makroatmalar için 13 MHz mikroatma tekrarlama hızı sağlar.



Şekil 7.2. HZDR laboratuvarının şematik görünümü

İki serbest elektron lazeri U27-FEL ve U100-FEL, U27 ve U100 undulatörleriyle (salındırıcı), değişen elektron enerjisi veya salındırıcı manyetik alanı sayesinde ayarlanabilir geniş dalgaboyu aralığında yoğun, koherent kızılötesi ışıma üretir. Çizelge 7.3'de HZDR'de üretilen ışımının ana parametreleri verilmiştir.

Çizelge 7.3. HZDR'de üretilen ışımının ana parametreleri

Parametre	IR
Elektron demet enerjisi (MeV)	12-34
Dalgaboyu aralığı (μm)	Salındırıcı U27 için: 3,5-22 Salındırıcı U100 için: 18-250
Maksimum paket yükü (pC)	77
Maksimum ortalama demet akımı (μA)	1000
Normalize edilmiş yatay yayılım/mm mrad (rms)	13
Normalize edilmiş düşey yayılım/keV ps (rms)	140
Mikro atma süresi (ps)	1-10
Mikro atma tekrarlama oranı (MHz)	13
Makro atma süresi (ms)	0,1-40/cw
Makro atma tekrarlama oranı (Hz)	1-25

Kızılötesi ışıma ilk önce bir diagnostik istasyonuna yönlendirilir ve sonra altı kullanıcı laboratuvarına dağıtılır. Yarıiletken spektroskopisi laboratuvarında, SEL ile eş zamanlı fs/ps Ti-Safir lazer bulunmaktadır. 8 Tesla'lık bir magneto-cryooptik ve FTIR spektrometre/mikroskopi ile tarama modları mevcuttur. Diagnostik ve yakın alan spektroskopisi çalışmaları için ayrı bir laboratuvar bulunmaktadır. Ayrıca özel bir teknik olarak ELBE'de kullanılan tarayıcı yakın alan optik mikroskopuyla (s-SNOM) yapılan deneyler için de bir laboartuar bulunmaktadır [12].

7.3. FELIX IR SEL Laboratuvarı (Nieuwegein, Hollanda)

(<http://www.rijnhuizen.nl>)

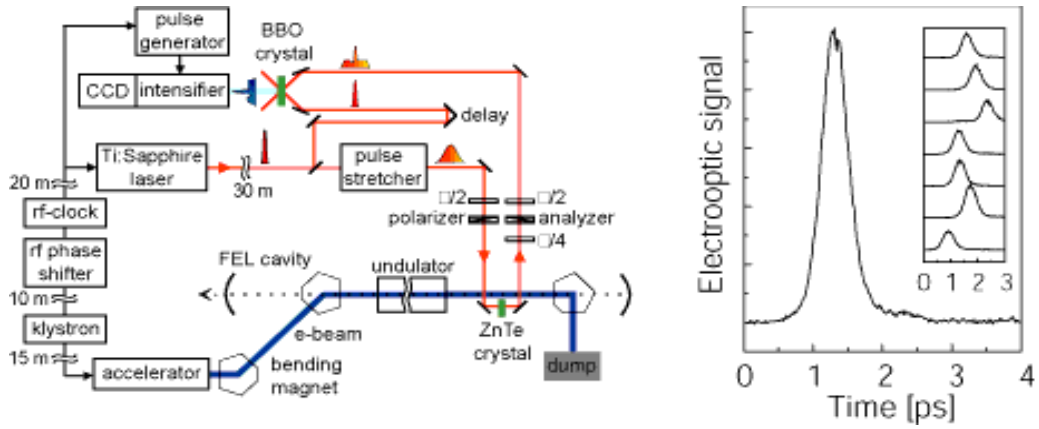
FELIX merkezi SEL1 ve SEL2 diye adlandırılan FELIX demet hatlarını ve FELICE demet hattını içermektedir. FELIX demet hattı 3-250 μm dalgaboyu aralığında koharent radyasyonu üretmektedir. İlk linak sonrasında elektron enerjisi 25 MeV' e ulaşmakta ikinci linak çıkışında ise 50 MeV' lik ışınlam elde edilmektedir. Bu ışınlamalar, her biri bir lineer hızlandırıcının arkasına yerleştirilmiş salındırıcılardan elde edilmektedir. FELIX'e ait parametreler Çizelge 7.4'teki gibidir.

Çizelge 7.4. FELIX'e ait parametreler

Dalgaboyu Aralığı	3-250 μm
Mikroatma Enerjisi	1 - 50 μJ
Mikroatma Gücü	0,5 - 100 MW
Mikroatma Tekrarlama Oranı	1 GHz ya da 25 MHz
Makroatma Tekrarlama Oranı	5 (10) Hz
Mikroatma Zamanı	6 - 100 optik döngü
Makroatma Zamanı	< 10 μs
Spektral Band Genişliği	0,4 - 7 %
Polarizasyon (doğrusal)	> 99 %

FELIX hızlandırıcı merkezinde moleküler fizik ve kimya, katıhal ve yarıiletken fiziği, SEL fiziği ve lazer fiziği alanlarında çalışmalar yapılmaktadır. FELIX' deki moleküler fizik ve kimya alanındaki çoğu çalışma moleküler dinamiği ile ilgilidir.

Diğer ana çalışma konuları; metal grupları dinamiği, hızlı soğutulmuş biyomoleküllerin kızılötesi soğurma spektroskopisi, Poly Aromatic Hydrocarbon iyonların ve diğer egzotik gaz fazındaki iyonların kızılötesi spektroskopisidir.



Şekil 7.3. FELIX deney düzeneği ve elektronik sinyalin spektroskopisi

FELIX ideal olarak yüksek güç ile kızılötesi moleküler parmak izi bölgeyi de kapsayan geniş bir dalgaboyu ayarlama aralığını birleştirir türdeki deneyler için uygundur. Çalışılan sistemler moleküler iyonları, kompleks, radikal ve metal grupları ve biyomolekülleri içerir. Sistemlerde kullanılan çeşitli deneysel metodlar, kütle spektrometrik iyon dedektörüne (TOF ve FTICR) dayanır.



Şekil 7.4. FELIX laboratuvarı deney istasyonları

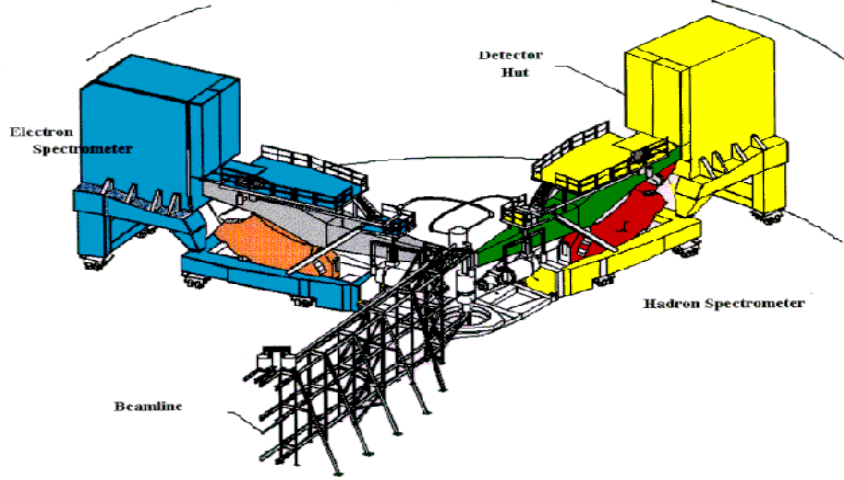
FELIX’ te diyagnostik laboratuvarından deney istasyonlarına giden ışınlamalar, 1. istasyondaki Lazer-desorpsiyon moleküler demet deney düzeneğine, 2-3-6a-8 ve 9. istasyonlardaki düzenli kullanıcılara gitmektedir. 10. istasyonda Fourier-Transform İyon Siklotron Rezonans Kütle Spektrometresi (FTICR) deney düzeneği uygulamaları yapılmaktadır. İstasyon 6b’ de iyon kapan deney düzeneği bulunmakta olup, istasyon 7a’ da lazer-desorpsiyon moleküler demet deney düzeneği yer almaktadır [5, 15,16].

7.4. Jefferson IR SEL Laboratuvarı (Amerika)

(<http://www.jlab.org/FEL>)

Malzemelerin yapı ve dinamiklerinde, JLab SEL Kullanıcı Tesisi foton enerjisi ve elektrik alanın her ikisi için diğer laboratuvarlara göre çok daha geniş sınırlı spektral alanlarda araştırma olanağı sunmaktadır. Bu yüzden dengede ve dengede olmayan malzemeler için lineer ve lineer olmayan spektral tepki fonksiyonları tanımlanabilir.

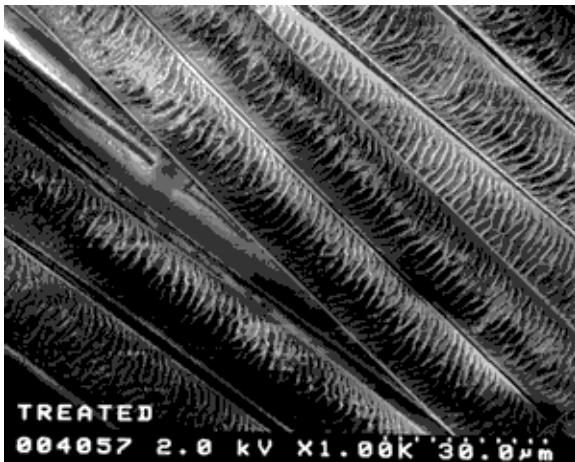
Özellikle SEL, protein katlanması ve protein özel fonksiyonlarından (fotosentez, metabolik yollar) kompleks malzemelere, non-Fermi metaller, süperiletkenler ve yarıiletkenler gibi malzemelerin özellikleri ile ilgili çalışmalar için alternatifsiz imkanlar sunar. Bu kaynak kimyasal reaksiyon dinamikleri, enerji ayrıştırmaları ile ilgili çalışmalara da olanak tanır.



Şekil 7.5. JLAB SEL deney istasyonu

JLAB' ta polimer yüzey işleme alanında sayısız uygulamalar vardır. Bugün hala doku, his ve görünüş olarak eksiklikleri olan doğal fiberden yapılmış polyester kumaşlar güzel bir örnektir.

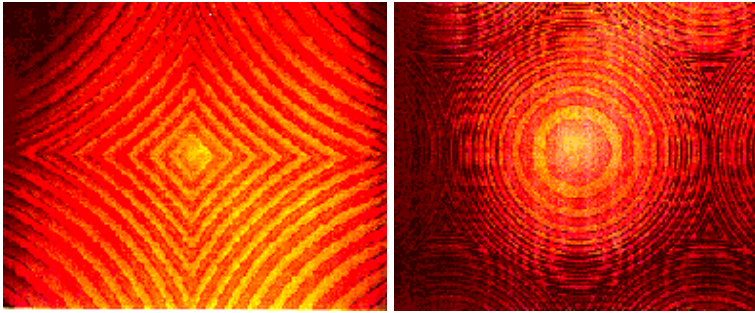
Yüksek hacim yüzey işleme için endüstriyel ölçekli SEL' in ilerlemesi, önemli gelişmelere yol açar. SEL' in diğer olası polimer yüzey işleme uygulamalarıyla, daha kolay geri dönüşümlü gıda paketlenme, daha dayanıklı ve etkileyici halı döşeme, daha güçlü ve çok amaçlı kompozit malzemeler ve soğutmaya gerek kalmaksızın gıdaların nakliyesi ve depolanması için antimikrobiyal yüzeyler yapılabilecektir.



Resim 7.3 Lazer uygulanmış polyester kumaş

Yüzeyi klasik bir lazerden gelen morötesi ışığa maruz bırakılarak mikropürüzlü hale getirilmiş polyester kumaşa ait yukarıdaki elektron mikrografi, lazerin yüzey dokusuna etkisini göstermektedir. Bu tür lazer uygulaması bir polimer veya fiber ürüne yeni sürtünme, filtreleme, ıslatma veya görünüm karakteristikleri verebilir. Ticari olarak önemli uygulamalar çok parçalı film ürünler veya kompozit yapıların oluşturulması, filtrelerde kullanılması için daha etkin fiberler ve sentetik fiber kumaşların geliştirilmiş dokunma hissi için daha iyi adhezyon içerir.

Bir SEL, boyutları mikron seviyesinde olan ve aynı özelliklerini koruyan üç boyutlu mekanik yapıların üretilmesinde kullanılabilir. SEL ile mikroişlemeye örnek olarak ultrayüksek yoğun CD ROM teknolojisi ve geliştirilmiş mikro-optik aletler verilebilir.



Resim 7.4. Lazer mikroişleme ile oluşturulan 12 μm 'lik mikro-optik Fresnel Lens parçaları. Bu resimler lazer ışınının mikro büyüklükteki yapılara nanometre seviyesinde hassasiyette şekil verilebileceğini gösterir.

SEL sertleştirme, pürüzsüzleştirme, desenleme ve metallerin korozyon dayanımının geliştirilmesi için kullanılabilir. Bu uygulamalar klasik lazerler kullanılarak gösterilmiştir ancak yüksek güçlü ve ucuz lazer yetersizliğinden dolayı ticari olarak henüz kullanılamamaktadır [14,18].

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Devlet planlama teşkilatı (DPT) tarafından desteklenen, Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde toplam 11 üniversitenin katılımı ile yürütülen, YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) projesi kapsamında, Ankara Üniversitesi Gölbaşı Kampüsü'nde kurulumu devam etmekte olan Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) TARLA tesisi için uygun araştırma konuları belirlenmiştir. TARLA süperiletken doğrusal hızlandırıcıdan elde edilecek serbest elektron lazerine dayalı kızılötesi serbest elektron lazerinin bilimsel, endüstriyel ve malzeme araştırmalarına yönelik yapılan uygulamalar için kızılötesi spektroskopi laboratuvarında benzer uygulamaların yapılabilirliği anlatılmıştır.

Serbest elektron lazerinin elektron tabancasıyla elde edilişi, hızlandırıcı kısmı ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Kızılötesi spektroskopinin çalışma ilkesinden bahsedilerek bu spektroskopi ile SEL'in birlikte kullanıldığı uygulamaların teorisine değinilmiştir. Dünyadaki malzeme karakterizasyonu ile ilgili çalışmalardan yola çıkılarak, SEL-spektroskopi ilişkisi ortaya konulmuştur. Böylece uygulamalardaki SEL kaynağı ile klasik lazerin senkronize edilmesi sonucu yüzeylere uygulanması ve spektroskopi yardımıyla karakterizasyonu detaylıca verilmiştir.

2,5 ile 250 μm dalgaboyu aralığını kapsayacak şekilde yarıiletken kuantum kuyu çalışmaları, iyonların kızılötesi çoklufoton elektron ayrılma spektroskopilerinin incelenmesi, nanoparçacıkların kızılötesi saçılma yakın alan optik mikroskopisiyle incelenmesi, THz bölgede yapılan yarıoptik seçilimli bileşiklere yapılan fotolitografi uygulamaları, kızılötesi çoklufoton Si ayırıcı bileşiklerin çözünümü, THz bölgede ışınlama, ps-altı lazer pulsunun dielektrik yarıiletkenlerle ve yarıiletken heteroeklemlerle etkileşimi gibi birçok çalışma incelenmiştir. Bunun için SEL ve spektroskopi yöntemiyle yapılan çalışmalar ve makaleler tezde anlatılmıştır. Bu incelemeler sonucunda klasik lazer ile SEL'in senkronizasyonu sonucu uygulanan yüzeylerin bazı spektroskopilerle analizlerinin nasıl yapıldıkları anlatılmıştır. Bu analizlere yönelik Bilkent Üniversitesi İAL'de alınan ince film büyütme ve büyütülen filmlerin FTIR spektroskopisi ile analizi eğitimi alınmıştır. İnce film büyütme tekniklerinden PECVD tekniği ve FTIR ile malzeme analizi anlatılmıştır.

HZDR, CLIO, FELIX, JLAB gibi dünyada yapılan IR SEL deneylerinde kullanılan cihazlar tespit edilmiş, THM TARLA spektroskopi laboratuvarında kullanılabilecek cihazlardan bazıları tez içerisinde anlatılmıştır. Ayrıca dalgaboyu, puls tekrarlama hızı, tekrarlama frekansı, ortalama güç gibi pek çok SEL parametresinin THM TARLA IR SEL parametreleri ile uygunluğu karşılaştırılmıştır.

Son kısımda bilimsel, endüstriyel ve malzeme uygulamaları yapan ELBE, CLIO, FELIX, JLAB gibi dünyadaki IR SEL laboratuvarları anlatılmış ve bu merkezlerde yapılan uygulamalardan bahsedilmiştir.

Dünyadaki hızlandırıcı merkezlerine göre geniş bir dalgaboyu aralığını kapsayacak olan THM TARLA tesisinde, tezde incelenen benzer çalışmaların yapılması ve bu çalışmaların daha da geliştirilmesi ülkemizde bilimin ilerlemesine büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Yavaş, Ö., “Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi”, **UPHDYO-VII**, Bodrum (2011).
2. Yavaş, Ö., “4. Nesil ışınlım kaynağı olarak serbest elektron lazerleri”, **I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi**, Ankara (2001).
3. Knyazev, B. A., Kulipanov, G. N., Vinokurov, N. A., “Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumental achievements”, **Meas. Sci. Technol.**, 21, 054017 (2010).
4. Tural, M., “Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazerinin Temel ve Uygulamalı Araştırmalarda Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı Prof. Dr. Ömer Yavaş, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2008).
5. Uşun, A., “Süperiletken Doğrusal Hızlandırıcıdan Elde Edilen Serbest elektron Lazerine Dayalı Pompa Sonda Tekniği ve Uygulamaları”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2012).
6. Gazi Üniversitesi, “IR (Kızılötesi) Spektroskopisi” ders notları <http://.ppt> (2009).
7. Tatoğlu, E., Arıkan, P., “THM süperiletken lineer hızlandırıcıdan elde edilen serbest elektron lazerine dayalı bilimsel ve endüstriyel uygulamalar”, **27. Uluslararası Fizik Kongresi**, İstanbul, 498 (2010).
8. Yavaş, Ö., “Parçacık hızlandırıcılarının tipleri ve fiziği”, **I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları Yaz Okulu**, Ankara Üniversitesi, Ankara (2005).
9. Aksakal, H., Kocaöz, Ü., “THM kızılötesi SEL yükselteç modunun fizibilite çalışması”, **SDÜ Fen Dergisi(e-dergi)**, 4 (2), 165-170 (2009).
10. Yiğit Gezgın, S., “Serbest elektron lazeri parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 34-52 (2009).
11. Özkorucuklu, S., “Serbest Elektron Lazeri (SEL) Fiziği”, **VII. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu (VII. UPHDYO)**, Bodrum, Muğla (2009).
12. İnternet: ELBE Web Sitesi <http://www.fzd.de> (1999).

13. Internet: CLIO Web Sitesi <http://clio.lcp.u-psud.fr> (2001).
14. Internet: JLAB Web Sitesi <http://www.jlab.org/FEL> (2001).
15. Internet: FELIX Web Sitesi <http://www.rijnhuizen.nl> (2000).
16. Dutch Institute for Fundamental Energy Research, “IR facility-FOM Rijnhuizen annual report 2009”, **DIFFER**, Nieuwegein, Hollanda, 92-96 (2009).
17. Neil, G. R., “Thomas Jefferson National Accelerator Facility FEL industrial applications”, **Newport News VA 23606 USA**, 88-92 (1997).
18. Kelley, M. J., “An FEL for the Polymer Processing Industries”, **SPIE Int'l Society for Optical Eng.**, SPIE 2988 , 240-244 (1997).
19. Jacob, R., Winnerl, S., Schneider, H., Helm, M., Wenzel, M. T., Ribbeck, H. G., Eng, L. M., Kehr, S. C., “Quantitative determination of the charge carrier concentration of ion implanted silicon by IR-near-field spectroscopy”, **Optical Society of America OPTICS EXPRESS**, 18 (25), 26206-26213 (2010).
20. Wenzel, M. T., Härtling, T., Olk, P., Kehr, S. C., Grafström, S., Winnerl, S., Helm, M., Eng, L. M., “Gold nanoparticle tips for optical field confinement in infrared scattering near-field optical microscopy”, **Optical Society of America OPTICS EXPRESS**, 16 (16), 12302-12312 (2008).
21. Cherkassky, V. S. , Knyazev, B. A., Kubarev, V. V., Kulipanov, G. N., Kuryshev, G. L., Matveenko, A. N., Petrov, A. K., Popik, V. M., Scheglov, M. A., Shevchenko, O. A., Vinokurov, N. A., “Imaging techniques for a high-power THz free electron laser”, **Proceedings of the XV International Synchrotron Radiation Conference — SR 2004**, 55 (1), 102-109 (2005).
22. Wagner, M., Schneider, H., Stehr, D., Winnerl, S., Andrews, A. M., Schartner, S., Strasser, G., Helm, M., “Observation of the Intraexciton autler-townes effect in GaAs/AlGaAs semiconductor quantum wells”, **The American Physical Society**, 105 (16), 167401 (2010).
23. Hampe, O., Neumaier, M., Boese, A.D., Lemaire, J., Niedner- Schatteburg, G., Kappes M. M., “Infrared multiphoton electron detachment spectroscopy of C_{76}^{-2} ”, **The Journal of Chemical Physics**, 131, 124306 (2009).

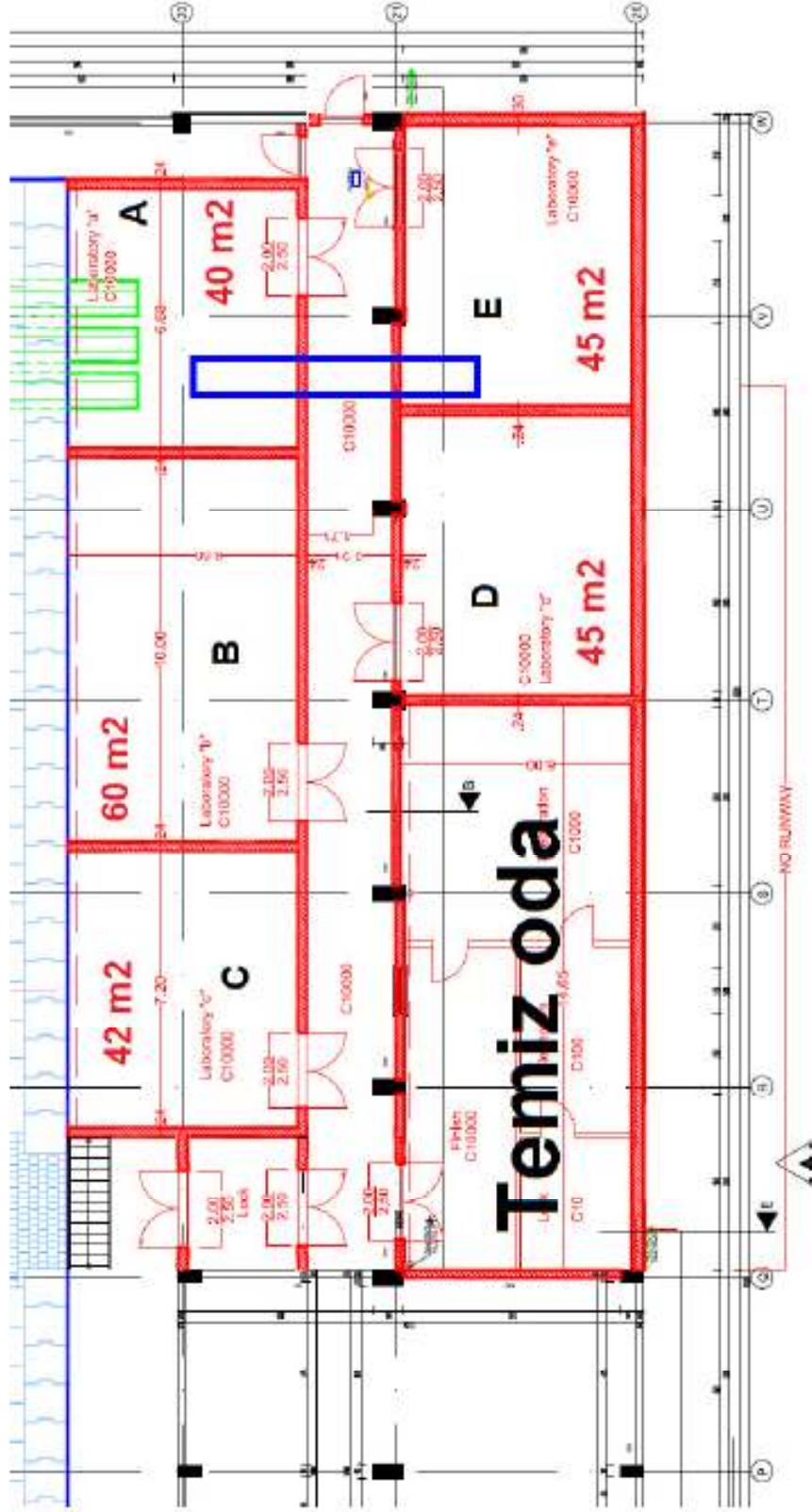
24. Sandall, C., Porter, N. E., Wagner, M., Schneider, H., Winnerl, S., Helm, M., Wilson, L., “Terahertz optical sideband emission in self-assembled quantum dots”, *Applied Physics Letters*, 96, 201105 (2010).
25. Schneider, H., Drachenko, O., Winnerl, S., Helm, M., Walther, M., “Autocorrelation measurements of the FELBE free-electron laser and photocurrent saturation study in two-photon QWIPs”, *Proc. SPIE*, 6471, 64710T (2007).
26. Höche, D., Rapin, G., Kaspar, J., Shinn, M., Schaaf, P., “Free electron laser nitriding of metals: From basis physics to industrial applications”, *Applied Surface Science*, 253, 8041–8044 (2007).
27. Knyazev, B. A., Kulipanov, G. N., Vinokurov, N. A., “Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements”, *Meas. Sci. Technol.*, 21, 054017 (2010).
28. Kuznetsov, S. A., Kubarev, V. V., Kalinin, P. V., Goldenberg, B. G., Eliseev, V. S., Petrova, E. V., Vinokurov, N. A., “Development of metal mesh based quasi-optical selective components and their application in highpower experiments at Novosibirsk Terahertz FEL”, *Proceedings of FEL*, MOPPH032, 89-92 (2007).
29. Chernyshev, A. V., Nomaru, K., Petrov, A. K., Chesnokov, E. N., Gorelik, S. R., Kuibida, L. V., Akberdin, R. R., Kuroda, H., “Infrared multiphoton Si isotope selective dissociation of Phenyltrifluorosilane under Free Electron Laser irradiation”, *J. Phys. Chem. A*, 107, 9362-9367 (2003).
30. Pavlov, S. G., Böttger, U., Eichholz, R., Abrosimov, N. V., Riemann, H., Shastin, V. N., Redlich, B., Hübers, H. W., “Terahertz lasing from silicon by infrared Raman scattering on bismuth centers”, *Applied Physics Letters*, 95, 201110 (2009).
31. Apostolova, T., “Theoretical study of sub-to-picosecond laser pulse interaction with dielectrics, semiconductors and semiconductor heterostructures”, *Journal of Physics: Conference Series*, 113, 012045 (2008).
32. Schneider, H., Liu, H. C., Winnerl, S., Song, C. Y., Drachenko, O., Walther, M., Faist, J., Helm, M., “Quadratic detection with two-photon quantum well infrared photodetectors”, *Infrared Physics & Technology*, 52, 419–423 (2009).
33. Schneider, H., Liu, H. C., Winnerl, Drachenko, O., Helm, M., Faist, J., “Room-temperature midinfrared two-photon photodetector”, *Applied Physics Letters*, 93, 101114 (2008).

34. Masaki, T., Ono, A., Inouye, Y., Kawata, S., Kuroda, H., “Apertured cantilever probes for infrared near-field scanning optical microscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 71-72 (2002).
35. Hanada, Y., Imamura, T., Toyoda, K., “Volume absorption effect for micro drilling of semi-transparent materials”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 90-95 (2002).
36. Ogi, Y., Endo, T., Tsukiyama, K., Kondoh, H., Tono, K., Ogawa, Y., Hamada, Y., Ohta, T., Kuroda, H., “Detection of vibrationally hot NO and CO excited by free electron laser”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 108-112 (2002).
37. Asakura, K., Sato, S., Irokawa, K., Kuroda, H., “Surface reaction induced by FEL-IR”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 118-119 (2002).
38. Mattsson, K. E., “Plasma-enhanced growth, composition, and refractive index of silicon oxy-nitride films”, *J. Appl. Phys.*, 77(12), 6616-6623 (1995).
39. Moule, A. J., Meerholz, K., “Interference method for the determination of the complex refractive index of thin polymer layers”, *Applied Physics Letters*, 91, 061901 (2007).
40. Swanepoel, R., “Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 16, 1214-1223 (1983).
41. Ay, F., “Silicon oxynitride layers for applications in optical wavaguides”, Yüksek Lisans Tezi, Danışmanı Prof. Dr. Atilla Aydın, *Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-59 (2000).
42. Bevington, P. R., Robinson, D. K., “Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences 1st ed.”, *Mc Graw Hill*, New York, 187-192 (1994).
43. İnternet: BEAM Ar-Ge Web Sitesi <http://www.beamarge.com/libs.php> (2012).
44. İnternet: Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Web Sitesi <http://hte.ankara.edu.tr/index.php> (2010-2012).
45. İnternet: Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi Web Sitesi <http://thm.ankara.edu.tr/> (1999-2012).

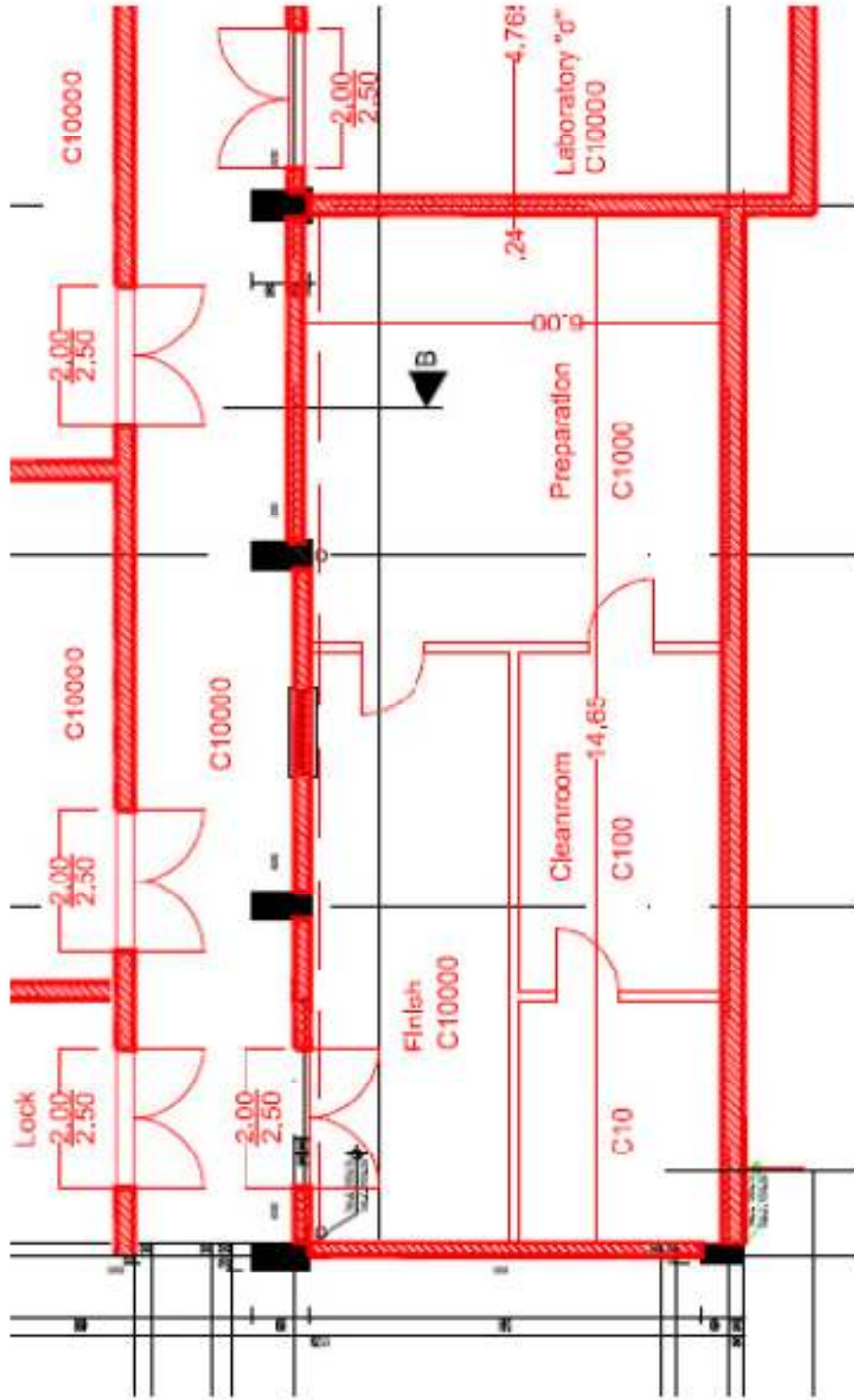
46. Arıkan, P., “THM IR SEL deney istasyonları, uygulama alanları ve kullanıcı potansiyeli” sunumu, *Teknik Komiteler Ortak Toplantısı*, Ankara Üniversitesi, Ankara (2009).
47. Ben-zvi, I., “Photoinjectors”, *OCPA International Accelerator School*, Singapore, 158-175 (2002).
48. Wang, S., “RF electron linac and microtron”, *OCPA International Accelerator School*, Singapore, 256-278 (2002).
49. Tural, M., “IR SEL ile Mikroskopi ve Spektroskopi Uygulamaları”, *Ankara Üni.Fizik Müh. Bölümü*, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2007).
50. Özkorucuklu, S., “ Status of TARLA”, *III.ISAC Meeting*, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2011).
51. Arıkan, P., “The Status of Experimental Stations”, *ISAC-IMAC Raporu*, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2011).
52. Özkorucuklu, S., “The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA)”, TARLA, Gölbaşı, Ankara, (2011).
53. İnternet: Thin Film Research Laboratories (GCM), Kanada <http://www.gcmlab.ca/en/tof-sims.php> (2008-2012).
54. İnternet: Neaspec Research Laboratory, Almanya <http://www.neaspec.com/products-services/our-technology> (2012).
55. İnternet: The A to Z Nanotechnology, Sydney, Avusturalya <http://www.azonano.com/equipment-details.aspx?EquipID=512> (2012).
56. İnternet: Edmund Optics Inc., Amerika <http://www.edmundoptics.com/optics/beamsplitters/> (2012).
57. İnternet: From Wikipedia, the free encyclopedia http://en.wikipedia.org/wiki/Resonance_enhanced_multiphoton_ionization (2012).

EKLER

EK-1 Deney istasyonları ve temiz oda yerleşim planı



EK-2 Temiz oda



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TATOĞLU AYTOĞAN, Elif

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 10.10.1987 Ankara

Medeni hali : Evli

e-mail : elif_ttoglu@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2009
Lise	Özel Çağrı Fen Lisesi	2005

Yabancı Dil

İngilizce

Bildiriler

1. Tatoğlu, E., Arıkan P., “THM Süperiletken Lineer Hızlandırıcıdan Elde Edilen Serbest Elektron Lazerine Dayalı Bilimsel ve Endüstriyel Uygulamalar” konulu sunum, IX. THM YUUP Çalıştayı, Ankara Üniversitesi, 3-5 Aralık 2010.
2. Tatoğlu, E., Arıkan P., “THM Süperiletken Lineer Hızlandırıcıdan Elde Edilen Serbest Elektron Lazerine Dayalı Bilimsel ve Endüstriyel Uygulamalar” konulu poster sunumu, 27. Uluslar arası Fizik Kongresi, İstanbul Üniversitesi, 14-17 Eylül 2010.