

**Si(111)-(7x7) YÜZEYİNİN DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA STM
İLE İNCELENMESİ**

Can ALAŞALVAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2006
ANKARA**

Can ALAŞALVAR tarafından hazırlanan Si(111)-7x7 YÜZEYİNİN DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA STM İLE İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Gökay UĞUR
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından FİZİK Anabilim Dalında
Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Bora ALKAN

Üye : Prof.Dr.Ali GENCER

Üye : Prof.Dr.Süleyman ÖZÇELİK

Üye : Doç.Dr.Mehmet ÇAKMAK

Üye : Yrd.Doç.Dr.Gökay UĞUR

Tarih : 09/05/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Can ALAŞALVAR

Si(111) – 7x7 YÜZEYİNİN DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA STM İLE

İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Can ALAŞALVAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2006

ÖZET

Bu çalışmada, Taramalı Tünellemeli Mikroskop (STM) kullanılarak Si(111) – 7x7 numunesinin değişik sıcaklıklarda (25°C, -155°C ve 327°C) yüzey değişimi incelendi. İğne olarak elektrokimyasal yolla elde edilen tungsten uç kullanıldı. Bu numune 1250 °C sıcaklıkta ve 2×10^{-10} mbar basınçta içinden bir DC elektrik akımı geçirilerek ısıtıldı ve ani akımla temizlendi. Örnek sıcaklığı bir kızıl ötesi pyrometre ile ölçüldü. Yeniden yapılanan Si(111)-(7x7) yüzeyi doğrudan akımla ısıtma yöntemiyle hazırlandı. STM sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı.

Bilim kodu : 202.1.147
Anahtar kelimeler : Si(7x7), Taramalı Tünellemeli Mikroskop
Sayfa adeti : 67
Tez yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Gökay UĞUR

INVESTIGATION OF Si(111)-(7X7) SURFACE AT DIFFERENT TEMPERATURES WITH STM

(M.Sc. Thesis)

Can ALAŞALVAR

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

May 2006

ABSTRACT

In this work, by means of Scanning Tunneling Microscopy (STM) we studied the surface evolution of Si (111) 7x7 at different temperatures (25°C, -155°C ve 327°C) . We used tungsten electrochemically etched tips. The sample was heated by passing a dc electric current through it, and cleaned by flashing at 1250 °C below 2×10^{-10} mbar. We measured the sample high temperature with an infrared pyrometer. Si(111)-(7x7) reconstructed surface was prepared by direct current heating. The STM results are compared with the experimental findings.

Science code : 202.1.147

Key words : Si(7x7), Scanning Tunelling Microscopy

Page number : 67

Adviser : Yrd. Doç. Dr. Gökay UĞUR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca katkı ve yardımlarıyla beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Gökay UĞUR' a yine desteğini benden esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK' a ve laboratuarda görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, ayrıca DPT 2001K120590 nolu projenin yürütücüsü ve Fizik Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK' e proje kapsamında tez çalışmamın tamamlanmasını sağladığı için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1. Giriş.....	2
2.2. Kristal Yapı ve Kristal Örgü.....	2
2.2.1 İki boyutlu örgü.....	4
2.2.2. Üç boyutlu örgü türleri.....	6
2.2.3. Ters örgü vektörleri.....	9
2.3. Yarıiletkenlerin Kristalleştiği Yapılar.....	10
2.3.1. Sodyum klorür (NaCl) yapı.....	10
2.3.2. Sezyum klorür (CsCl) yapısı.....	11
2.3.3. Elmas kristal yapı.....	12
2.3.4. Çinko sülfür (ZnS) yapı.....	13
2.4. Yarıiletkenler.....	14
2.4.1. Katkılı yarıiletkenler.....	16
2.5. Yüzey Kristal Yapısı.....	17

Sayfa

3. YÜZEY ANALİZİNDE KULLANILAN TEKNİKLER.....	19
3.1. Giriş.....	19
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	19
3.3. Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM).....	21
3.4. Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM).....	22
3.4.1. STM için temel unsurlar.....	24
3.4.2. Elektron tünellemesi.....	26
3.4.3. STM çalışma modları.....	31
3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu.....	33
3.5.1. AFM için operasyon modları.....	36
3.6. Ultra Yüksek Vakum (UHV).....	38
3.6.1. UHV pompalama sistemi.....	39
3.6.2. Titanyum süblümleşme pompa (TSP).....	41
3.6.3. İyon pompası.....	42
3.6.4. Cryosorption pompa.....	44
3.6.5. Turbomoleküler pompa.....	44
3.6.6. Rotary pompa.....	44
3.6.7. Göstergeler (Gauges).....	44
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
4.1. Giriş.....	47
4.2. Numune Hazırlama.....	47
4.3. Ölçümler ve Tartışma.....	48
KAYNAKLAR.....	65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 7 kristal sistemi ve 14 Bravais örgüyü göstermektedir. Açılar derece cinsinden verilmiştir.....	7
Çizelge 2.2. NaCl yapıda kristalleşen bazı yarıiletkenler ve örgü sabitleri.....	11
Çizelge. 2.3. CsCl yapısında kristalleşen bazı yarıiletken kristallerin örgü sabitleri.....	12
Çizelge 2.4. Elmas yapıdaki bazı yarı iletkenlerin örgü sabitleri.....	13
Çizelge 2.5. ZnS yapıdaki bazı yarı iletkenlerin örgü sabitleri.....	14
Çizelge 2.6. Elektronikte yararlanılan bazı yarı iletkenler ve kullanım yerleri.....	17
Çizelge 3.1. Titanyum filmi pompalama hızına $1s^{-1} cm^{-2}$, de sıcaklığın etkisi.....	42
Çizelge 4.1. Değişik sıcaklık bölgeleri için STM ölçüm parametreleri.....	49
Çizelge 4.2. Ölçülen ve hesap edilen uzaklıklar.....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İki boyutlu bir kristal katı.....	3
Şekil 2.2. Wigner – Seitz ilkel hücresi.....	4
Şekil 2.3. İki boyutlu uzayda eğik örgü ve farklı birim hücreler.....	5
Şekil 2.4. İki-boyutlu uzaydaki özel örgü tipleri.....	6
Şekil 2.5. Örgü öteleme vektörleri ve aralarındaki açılar.....	7
Şekil 2.6. 7 kristal sistemin 14 Bravais örgüsü.....	8
Şekil 2.7. Sodyum klorür yapı.....	10
Şekil 2.8. Sezyum klorür yapı.....	12
Şekil 2.9. Elmas kristal yapı.....	13
Şekil 2.10. Kübik çinko sülfür'ün kristal yapısı.....	14
Şekil 2.11. Metal, yarıiletken, yalıtkan maddeler için bant enerji seviyeleri.....	15
Şekil 2.12. Si ve GaAs kristallerindeki tetrahedral bağlar.....	16
Şekil 3. 1. SEM' in şematik diyagramı.....	20
Şekil 3. 2. Elektron demeti ve numune etkileşimi.....	21
Şekil 3.3. STM' in şematik diyagramı.....	23
Şekil 3.4. STM'in elektronik devresi.....	24
Şekil 3.5. Bir tipin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.6. Elektrokimyasal kesme mekanizması.....	26
Şekil 3.7. U _y yükseklikli bir engel üzerine soldan gelen bir tanecik için dalga fonksiyonu.....	28
Şekil 3.8. Tip ile numune arasındaki tünelleme	29
Şekil 3.9. Numune ucuna negatif ve pozitif potansiyel uygulanmış durumlar.....	30
Şekil 3.10. Sabit akım modu.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 3. 11. Sabit yükseklik modu.....	32
Şekil 3.12. Bariyer yükseklik görüntüleme.....	33
Şekil 3.13. Atomik Kuvvet Mikroskopunun şematik diyagramı.....	34
Şekil 3.14. Piezoelektrik diske voltaj uygulandığında disk' in genişlemesi.....	34
Şekil 3.15 . Keskin ve keskin olmayan problemlerin gösterimi.....	35
Şekil 3.16. AFM kontak modda yüzey tarama.....	36
Şekil 3.17. Titreşim modunda prob titreşimindeki değişiklikler.....	37
Şekil 3.18. AFM' de cantilever bükülmesi.....	37
Şekil 3.19. Vakum pompalama basınç aralıkları.....	40
Şekil 3.20. İyon pompasının şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.21. Göstergelerin vakum basınç aralıkları.....	45
Şekil 4.1. Si (111) yüzeyinin (7x7) lik birim hücrenin gösterimi.....	47
Şekil 4.2. Yüksek sıcaklıkta (327°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe.....	55
Şekil. 4.3. Yüksek sıcaklıkta (327°C) adatomlar arasındaki mesafe.....	56
Şekil. 4.4. Yüksek sıcaklıkta (327°C) rest atomlar arasındaki mesafe.....	57
Şekil.4.5. Düşük sıcaklıkta (-155°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe.....	58
Şekil.4.6. Düşük sıcaklıkta (-155°C) adatomlar arasındaki mesafe.....	59
Şekil 4.7. Düşük sıcaklıkta (-155°C) rest atomlar arasındaki mesafe.....	60
Şekil 4.8. Oda sıcaklığında (25°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe.....	61
Şekil.4.9. Oda sıcaklığında (25°C) adatomlar arasındaki mesafe.....	62
Şekil 4.10. Oda sıcaklığında (25°C) rest atomlar arasındaki mesafe.....	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Tipik bir TSP görüntüsü.....	44
Resim 4. 1 Si(111) 7x7 yüzeyinin AFM görüntüsü.....	52
Resim 4.2. Yüksek sıcaklıkta alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüsü.....	54
Resim 4.3. Düşük sıcaklıkta alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüsü.....	54
Resim 4.4. Oda sıcaklığında alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri.....	55
Resim 4.5. Yüksek sıcaklıkta alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri.....	55
Resim 4.6. Düşük sıcaklıkta alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri.....	56
Resim 4.7. Oda sıcaklığında alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri.....	56
Resim 4.8. Yüksek sıcaklıkta alınan Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü.....	57
Resim 4.9. Düşük sıcaklıkta alınan Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü.....	57
Resim 4.10. Oda sıcaklığında alınan Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Amper
Al	Alüminyum
AlNi	Alüminyum nitrat
AlSb	Alüminyum antimon
Å	Angstrom
C	Karbon
CH ₃ CH(OH)CH ₃	İzopropil alkol
Cl	Klor
Cs	Sezyum
CsCl	Sezyum klorür
Cu	Bakır
CuCl	Bakır klorür
CuO	Bakır oksit
eV	Elektron volt
fcc	Yüzey merkezli kübik
Ga	Galyum
GaAs	Galyum arsenik
GaP	Galyum fosfat
Ge	Germanyum
I	Akım
InP	İndiyum fosfor
InSb	İndiyum antimon
Ir	İridyum
keV	Kilo elektron volt
kV	Kilo volt
mA	Mili amper

Simgeler**mV****Na****nA****NaCl****nm****NaOH****P****Pt****PbS****S****Se****Si****Sn****V****W****Zn****ZnS** **Φ** **Kısaltmalar**

Mili volt

Sodyum

Nano amper

Sodyum klorür

Nano metre

Sodyum hidroksit

Fosfor

Platinyum

Kurşun sülfür

Sülfür

Selenyum

Silisyum

Kalay

Volt

Tungsten

Çinko

Çinko sülfür

İş fonksiyonu

Kısaltmalar**Açıklama****AES**

Auger elektron spektroskopisi

AFM

Atomik kuvvet mikroskobu

ESKA

Kimyasal analiz için elektron spektroskopisi

FEM

Alan emisyon mikroskobu

FIM

Alan iyon mikroskobu

PS

Fotoelektron spektroskopisi

RMS

Kare ortalamalarının karekökü

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

STM

Taramalı tünelleme mikroskobu

TEM

Geçirmeli elektron mikroskobu

UHV

Çok yüksek vakum

XPS

X ışınları fotoelektron spektroskopisi

1. GİRİŞ

Taramalı Tünelleme Mikroskop (STM), yüzey analizinde kullanılan deneysel tekniklerin en güçlülerindendir. Bu teknikle atomların uzaydaki görüntüleri, moleküllerin büyüklükleri ve yerleşimleri, yüzey bozuklukları yüksek çözünürlükte elde edilebilmektedir.

Bu tezde Si(111)-(7x7) yüzeyi, Taramalı Tünellemeli Mikroskop (STM) ile çalışıldı. Bu çalışmanın yapılmasındaki en büyük etken, günümüzde kullanılan tüm elektronik aletlerin boyutlarının küçülmesi ve bu yüzden yüzey fiziğinin büyük önem kazanmasıdır. Yüzey özelliklerinin incelenmesi sonucu elde edilen sonuçlar, onların yapısal, pürüzlülük gibi temel özelliklerinin anlaşılmasında ve böylece teknolojiye kullanım sahasının belirlenmesinde büyük fayda sağlamaktadır. Vakum altında bir kristalin yüzeyi, hacim içindeki yapıdan oldukça farklıdır. En dıştaki birkaç atomik tabaka olarak tanımlanabilen yüzey, tümüyle temiz, üzerinde yabancı atomlar çökeltilmiş veya içi katkılanmış olabilir. Yüzey temiz ise, en dıştaki tabaka yapılandırılmamış bir yüzeyde atomik düzen hacim içindekiyle aynı olur. Ancak en dış tabaka aralığı biraz farklı olur. Bu çalışmada daha önce de çok iyi sonuçlar verdiği bilinen ve Omicron Firması tarafından temin edilen Si(111) numunesini kullanarak, onun yüzey özellikleri araştırıldı. Bu amaç için üç ayrı (oda(25°C), düşük(-155°C) ve yüksek (327°C)) sıcaklıkta STM ölçümleri yapıldı. Bu yüzeyler için yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar, daha önceki deneysel değerlerle hemen hemen uyum içinde olduğu bulundu.

Si yüzeyinin Si (111)-(7x7) şeklinde yeniden yapılanması, yüzey fiziğinde merak uyandıran en önemli problemlerden biridir. Son yıllarda bu yeniden yapılanmanın doğasını açıklamak için pek çok teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Si oda sıcaklığında kesildiğinde 2x1' lik bir yapı oluşturur. 300 °C üzerinde ısıtıldığında ise 7x7 yapıya ve 870°C' de ise daha kararlı bir yapıda olduğu gözlenmiştir[1,2,3,4]. Normal şartlar altında Si yüzeyi oksit bir tabaka ile kaplıdır. Bu tabakanın kaldırılması için numune ya ısıtılır yada iyon bombardımanına tutulur.

2. KURAMSAL TEMELLER

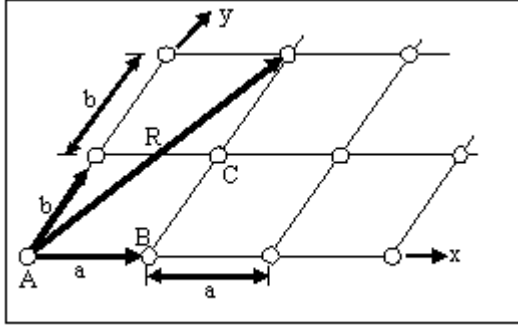
2.1. Giriş

Yarıiletkenlerin katılar içerisinde önemli bir yeri vardır. Elektronik devre elemanları başta olmak üzere pek çok uygulama alanına sahiptirler. Yarıiletkenler kristal yapıya sahiptir, ve yapılarının incelenmesi elektronik aletlerin tasarımı açısından önemlidir. Tabiatta doğal halde bulunduğu gibi laboratuvar ortamında bileşik halinde de elde edilebilirler.

Bu bölümde yarıiletkenlerin kristal yapıları ve örgüleri hakkında temel bilgiler yer almaktadır.

2.2. Kristal Yapı ve Kristal Örgü

Atomların üç boyutta periyodik olarak dizilmesiyle oluşan yapıya kristal denir. Dış görünüşlerinin düzenli olması, kristallerin, özdeş yapıtaşları olarak seçilebilecek birimlerin düzenli tekrarı sonucu oluştuklarını göstermektedir. Herhangi bir doğrultuda ilerlendiğinde atomlar arası uzaklık ve atomların geometrik özellikleri değişmez. Şekil 2.1’de iki boyutlu kristal bir yapı gösterilmektedir. x-ekseni üzerinde en yakın iki komşu atom arasındaki uzaklık a ve y - ekseninde en yakın iki komşu atom arasındaki uzaklık ise b ’dir. Kusursuz bir kristal, periyodikliğini x ve y eksenleri üzerinde eksi sonsuzdan artı sonsuza kadar sürdürür. A , B , C noktalarına yerleşecek bir gözlemci kristali bu üç noktadan aynı şekilde görür. İdeal bir kristal yapı aynı yapı birimlerinin uzayda sonsuz tekrarı ile elde edilir [5].



Şekil 2.1. İki boyutlu bir kristal katı

Kristali daha iyi tanımlayabilmek için, üzerine kurulduğu varsayılan noktalar grubuna örgü denir. Tüm kristallerin yapısı kendine has bir örgü ile tanımlanabilir. Örgünün düğüm noktasında bulunan atomlar grubuna baz, bazın uzayda tekrarlanmasına kristal denir. Bir bazdaki atomların cinsi, sayısı, aralıkları ve bağ açıları, diğer bütün bazlarda da aynıdır. Yani örgü ve baz kristal yapıyı oluştururlar. Bir kristal üzerinde yapılan simetri işlemleri kristali tekrar eski görünümüne getirir. Bir örgü $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ gibi üç temel öteleme vektörü ile tanımlanır. Buna göre $\vec{r}$ konumlu bir yerdeki atomdan baktığımızda kristalin görünümü nasıl ise $\vec{r}'$ konumlu bir yerde de aynı olur ve konum vektörü:

$$\vec{r}' = \vec{r} + n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad (2.1)$$

olarak verilir. Burada n_1, n_2, n_3 her değeri alabilen üç tam sayı değeridir. Herhangi $\vec{r}, \vec{r}'$ noktasından bakıldığında atomların dizilişini aynı kılan bir (n_1, n_2, n_3) tam sayı üçlüsü her zaman bulunabiliyorsa $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ vektörlerine ilkel öteleme vektörleri denir. Bir kristal için örgü öteleme vektörü şu şekilde ifade edilir:

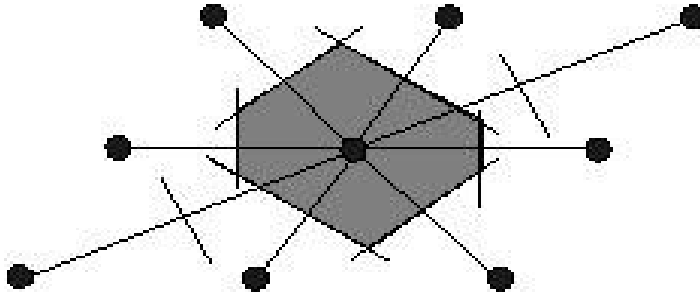
$$\vec{T} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad (2.2)$$

Örgü üzerindeki herhangi iki nokta bu tür vektörlerle birbirine ötelenebilir. İkel $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ eksenleriyle tanımlanan paralel kenar prizmaya ilkel hücre adı verilir. İkel hücre kristal öteleme işlemini tekrarlamak suretiyle tüm uzayı doldurur. İkel hücre aynı

zamanda minimum hacimli hücredir. İlkel hücrede her zaman bir örgü noktası vardır. Bir paralelkenar prizma şeklindeki ilkel hücre sekiz köşesinde de birer örgü noktasından oluşuyorsa, her bir örgü noktası sekiz ilkel hücre tarafından paylaşılmış olacağından, hücredeki toplam örgü noktası sayısı 1 olur: $8 \times 1/8 = 1$. Eksenleri $\vec{a}_1$, $\vec{a}_2$, $\vec{a}_3$ olan bir paralel kenar prizmanın hacmi, şu şekilde ifade edilir:

$$V_c = |\vec{a}_1(\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)| \quad (2.3)$$

İlkel hücre içindeki baza ilkel baz denir. İlkel bir hücre seçimi için diğer bir yol da Wigner - Seitz ilkel hücresidir.

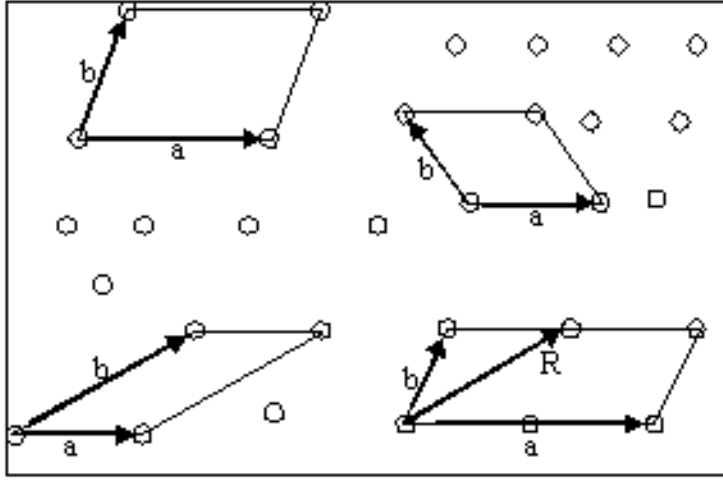


Şekil 2.2. Wigner – Seitz ilkel hücresi

Genel bir örgü için bir Wigner-Seitz birim hücresi, bir örgü noktasını diğerlerine birleştiren vektörlerin orta noktalarından geçen dik düzlemlerin sınırladığı en küçük hacim olarak tanımlanır [5].

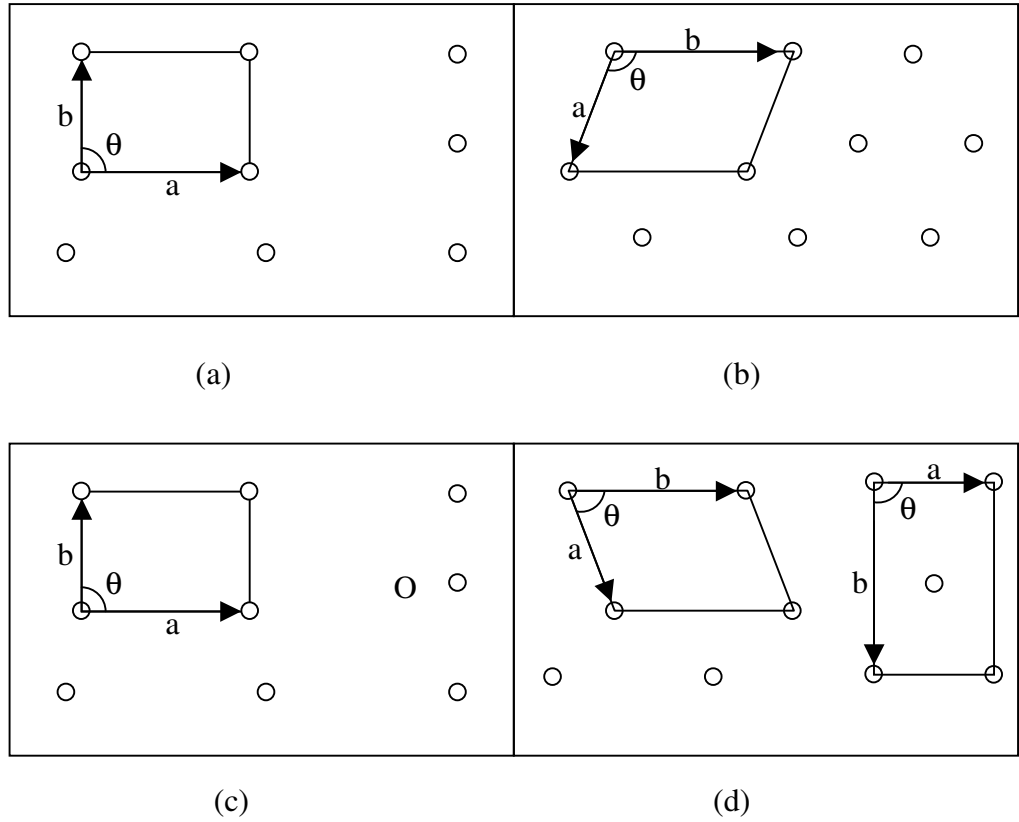
2.2.1. İki boyutlu örgü

Kristal örgüler, örgü öteleme ve daha farklı simetri işlemleri altında değişmeden kalırlar. Örgü öteleme vektörleri, $\vec{a}$ ve $\vec{b}$ 'nin büyüklükleri ile bu vektörler arasındaki θ açısı üzerine sınırlama getirilmediği takdirde sonsuz sayıda örgü elde edilebilir.



Şekil 2.3. İki boyutlu uzayda eğik örgü ve farklı birim hücreler

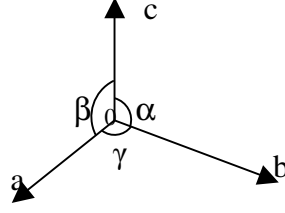
Şekil 2.3’de görülen örgü, herhangi iki $\vec{a}$ ve $\vec{b}$ vektörü ile çizilmiştir. Böyle genel bir örgüye eğik örgü denir ve sadece π ve 2π açıları kadar dönme simetrisi vardır. Değişmez kalan bir örgü kurmak istiyorsak $\vec{a}$ ve $\vec{b}$ vektörlerine kısıtlama getirmeliyiz. Başlıca 4 tür kısıtlama vardır ve her biri özel bir örgü türüne yol açar. Şekil 2.4’de görülen dört özel örgüye eğik örgüyü de dahil edersek, düzlemde 5 farklı örgü türü oluşur. Genel olarak tüm kısıtlamalar sonucu elde edilen örgü türlerine Bravais örgüleri adı verilir. İki boyutta toplam 5 adet Bravais örgüsü vardır [5].



Şekil 2.4. İki-boyutlu uzaydaki özel örgü tipleri a) Kare örgü. $a = b$, $\theta = 90^\circ$
 b) Hekzagonal örgü. $a = b$, $\theta = 120^\circ$ c) Dikdörtgen örgü. $a \neq b$, $\theta = 90^\circ$ d) Merkezli dikdörtgen örgü. $a \neq b$, $\theta = 90^\circ$

2.2.2. Üç boyutlu örgü türleri

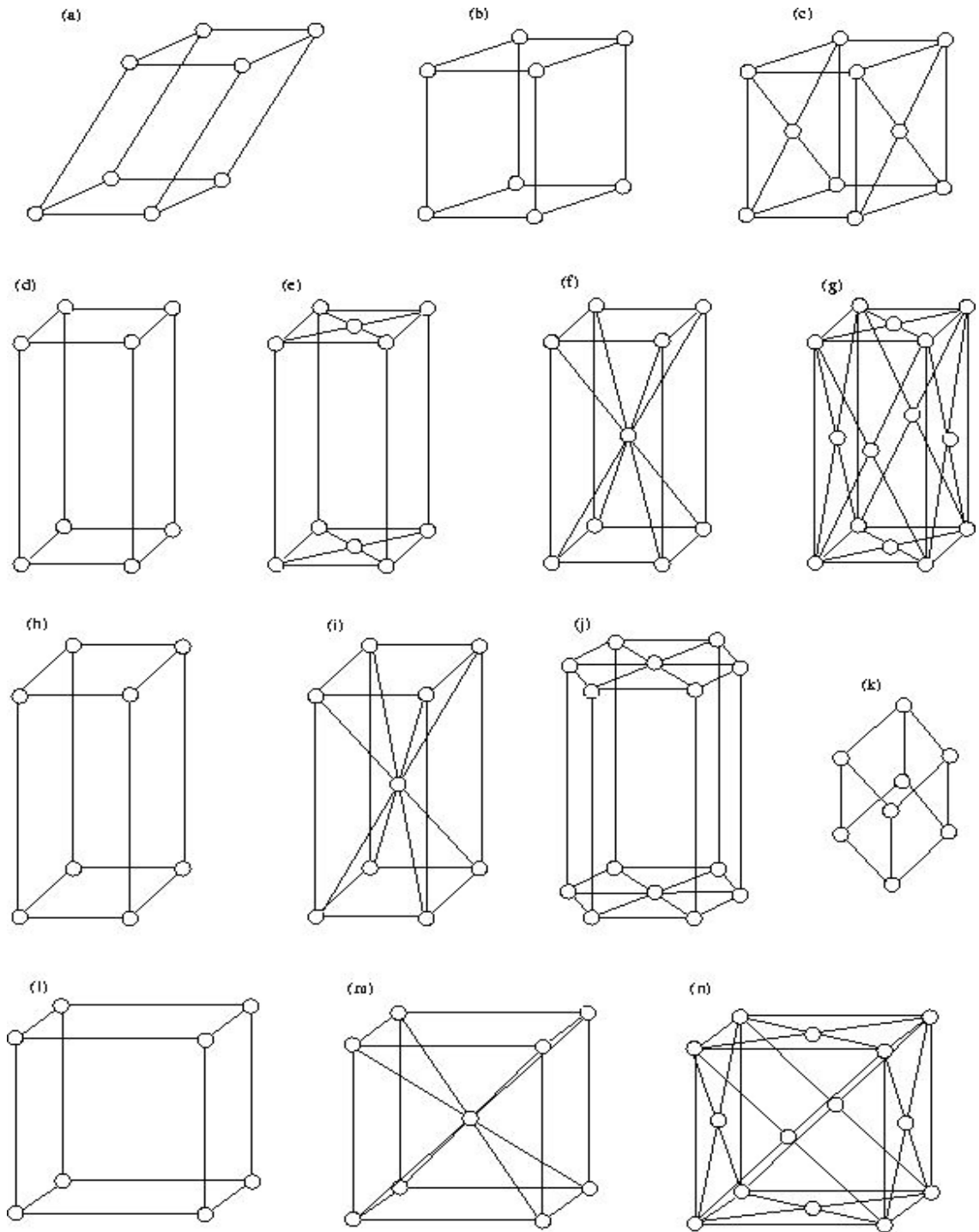
Üç-boyutlu uzayda, sadece 14 değişik Bravais örgü vardır. Bu sayının küçük olmasının sebebi, bir örgüye yüklenen öteleme simetrisi şartlarıdır. 14 Bravais örgü birim hücrenin şekil ve simetrisine sahip 7 kristal sistem olarak gruplandırılır. Bunlar; triklinik, monoklinik, ortorombik, tetragonal, kübik, trigonal (rombohedral) ve hegzagonal kristal sistemleridir. Graplama, geleneksel birim hücreler için, özel eksen bağımlılıklarına göre yapılır. Paralel yüzölçülerin kenarları a , b ve c örgü öteleme vektörleri ile belirtilir. Bu örgü öteleme vektörleri arasındaki açılar, Şekil 2.5’de görülmektedir.



Şekil 2.5. Örgü öteleme vektörleri ve aralarındaki açılar

Çizelge 2.1. 7 kristal sistemi ve 14 Bravais örgüyü göstermektedir. Açılar derece cinsinden verilmiştir.

Kristal sistemi	Bravais örgü	Birim hücre özellikleri
Triklinik	Basit	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Monoklinik	Basit Taban merkezli	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorombik	Basit Taban merkezli Cisim merkezli Yüzey merkezli	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	Basit Cisim merkezli	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Hegzagonal	Basit	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$
Trigonal	Basit	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Kübik	Basit Cisim merkezli Yüzey merkezli	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



Şekil 2.6. 7 kristal sistemin 14 Bravais örgüsü (a) Triklirik ; (b) ve (c) Monoklinik ; (d), (c), (f), (g) Ortorombik ; (h), (i) Tetragonal ; (j) Hegzagonal ; (k) Trigonal ; (l), (m), (n), Kúbik yapıları göstermektedir.

2.2.3. Ters örgü vektörleri

Brillouin bölgesi, işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla ters örgü vektörleri ile ifade edilirler. Ters örgü vektörleri $\mathbf{G}$ ile gösterilir. Katıhal fiziğinde ters örgü bir kristalin elektronik, titreşim özelliklerini incelememiz için gerekli olan dalga vektörlerinin bulunmasını sağlar [5]. Ters örgü vektörü Eş. 2.4 ile ifade edilir:

$$\mathbf{G}_m = \sum_{j=1,2,3} n_j \mathbf{b}_j \quad (2.4)$$

Burada n_j değerleri sıfır olabileceği gibi, pozitif ve negatif tamsayı değerleri de alabilirler, $\mathbf{b}_j$ değerleri ise, ters örgünün temel yer değiştirme vektörleridir. Birim hücrenin, gerçek ve ters örgünün hacimleri şu şekilde verilir:

$$V_c = \mathbf{a}_1 \cdot (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3), \quad V'_c = \mathbf{b}_1 \cdot (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{b}_3) \quad (2.5)$$

İfadede yer alan $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ ve $\mathbf{a}_3$ nicelikleri, bildiğimiz gerçek örgünün temel örgü vektörleridir. Bunları kullanarak ters örgü için temel örgü vektörleri $\mathbf{b}_1$, $\mathbf{b}_2$, $\mathbf{b}_3$ gerçek örgünün yer değiştirme vektörleri cinsinden

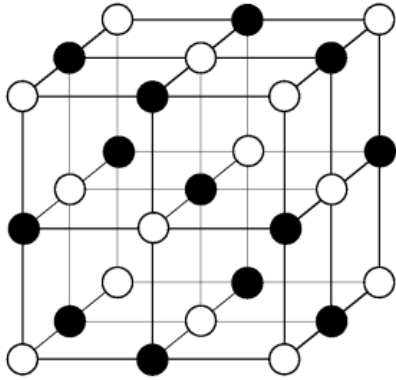
$$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{V_c} (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3), \quad \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{V_c} (\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1), \quad \mathbf{b}_3 = \frac{2\pi}{V_c} (\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2) \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir.

2.3. Yarıiletkenlerin Kristalleştiği Kristal Yapılar

2.3.1. Sodyum klorür (NaCl) yapı

Kaya tuzu olarak da tanınan sodyum klorürün Bravais örgüsü fcc'dir. Bravais örgü noktalarına yerleşen Na^+ atomları kendi başlarına bir fcc yapı oluştururlar. Cl^- atomları ise bir başka fcc yapı oluştururlar. Na^+ ve Cl^- atomları ardışık bir düzen içinde dizilecek şekilde, bu iki fcc yapıdan biri ötekinin içine yerleşerek NaCl kristalini oluşturur. İki fcc yapıdan birinin başlangıç noktası $[0,0,0]$ konumunda ise ötekinin başlangıcı $[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ noktasındadır veya bunun tam tersidir. Sodyum klorür, bir başka deyişle, $[0,0,0]$ noktasında bulunan Cl^- ve $[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ noktasındaki Na^+ atomu tarafından oluşturulan bir baza sahip bir fcc yapıdır.



Şekil 2.7. Sodyum klorür yapı

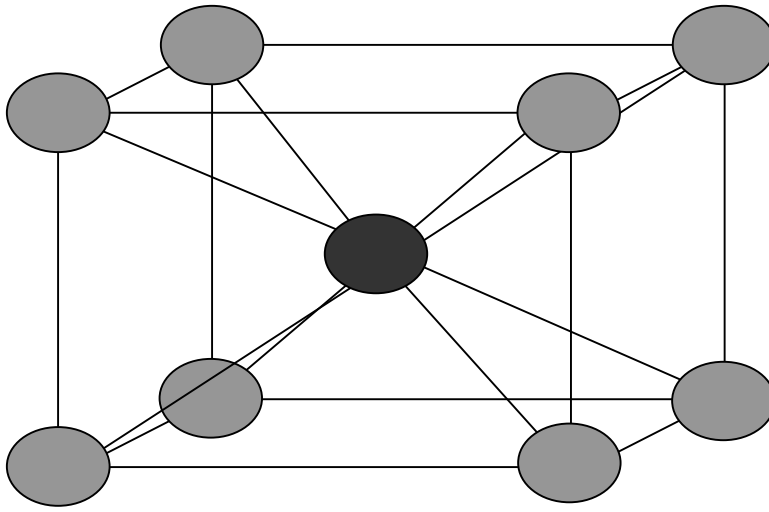
Sodyum klorür yapı; Na^+ ve Cl^- iyonları, dönüşümlü olarak, basit kübik örgünün örgü noktalarına yerleştirilerek de kurulabilir. Kristaldeki her iyonun zıt yüklü en yakın altı komşusu vardır [5].

Çizelge 2.2. NaCl yapıda kristalleşen bazı yarıiletkenler ve örgü sabitleri [5].

Yarı iletken	Örgüsabiti- $a(\text{\AA})$
CsCl	4.11
TlCl	3.84
TlBr	3.97

2.3.2. Sezyum klorür (CsCl) yapısı

Sezyum klorür yapı; Cs ve Cl atomlarının ayrı ayrı oluşturdukları iki basit kübik yapının iç içe girmesiyle oluşur. Bu iki yapıdan birinin başlangıcı diğerinin merkezine yerleşir. CsCl yapı, $[0, 0, 0]$ noktasındaki Cs ve $[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ noktasındaki Cl atomunun oluşturduğu baza sahip bir basit kübik yapıdır. İlkel hücre başına bir CsCl molekülü düşer. Her baz bir moleküldür. Bu kristal yapıda Cs atomları basit kübik örgü noktalarını doldururlar. Bu yüzden bu kristalin örgüsü basit kübik örgüdür. CsCl yapıda kristalleşen bazı yarıiletkenler ve örgü sabitleri Çizelge 2.3’ de verilmiştir.



Şekil 2.8. Sezyum klorür yapı

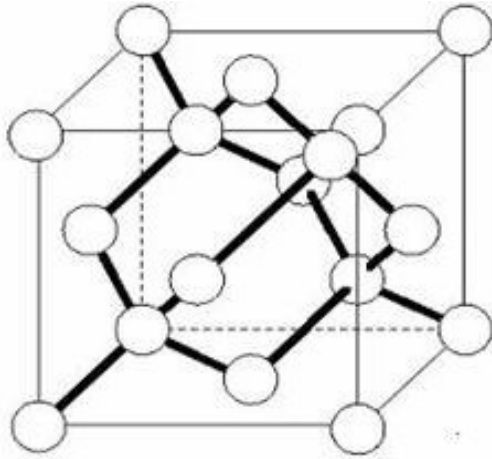
Çizelge 2.3. CsCl yapısında kristalleşen bazı yarıiletken kristallerin örgü sabitleri [5]

Kristal	Örgü sabiti- a (Å)	Kristal	Örgü sabiti- a (Å)
AlNi	2.82	TlSb	3.85
CuPd	2.99	TlBi	3.90
CuZn	2.95	TlI	4.18
AuZn	3.15	CsCl	4.11
AgZn	3.16	CsBr	4.28

2.3.3. Elmas kristal yapı

Karbon atomlarının oluşturduğu iki ayrı fcc örgü; birinin başlangıcı $[0,0,0]$ ve diğerinin başlangıcı $[\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}]$ konumunda olacak şekilde iç içe geçirilerek elmas yapı elde edilir. Elmas yapıda atomik konumların hepsi karbon atomları tarafından doldurulmuştur. Bu yapıda, en yakın komşu sayısı 4 ve ikinci en yakın komşu sayısı ise 12'dir. Birbirine değen en yakın komşu kürelerin merkezleri arasındaki uzaklık, küp köşegeninin dörtte biri kadardır. Elmas yapıda her bir karbon atomu en yakın dört

komşusuyla kovalent bağ yapmaktadır. Periyodik tablonun IV. grubunun iki elementi silisyum ve germanyum yarıiletkenleri elmas yapıda kristalleşirler [5].



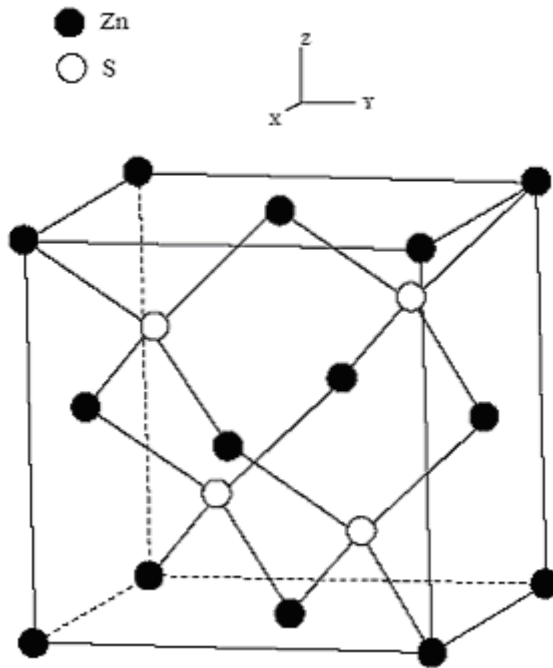
Şekil 2.9. Elmas kristal yapı

Çizelge 2.4. Elmas yapıdaki bazı yarı iletkenlerin örgü sabitleri [5]

Yarı iletken	Örgü sabiti- a (Å)
Karbon (C)	3.56
Silisyum (Si)	5.42
Germanyum (Ge)	5.65
Kalay (Sn)	6.46

2.3.4. Çinko sülfür (ZnS) yapı

Çinko sülfür yapı, Şekil 2.10'da gösterilen elmas yapıyla benzerdir. Aralarındaki tek fark, bazı oluşturan iki atomun (Zn ve S) aynı cins olmamasıdır. Bazı oluşturan çinko (Zn), [0,0,0] konumunda ise; kükürt (S), $[\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}]$ konumundadır. Her geleneksel birim hücrede dört ZnS molekülü bulunur. InSb, GaSb, GaAs, çinko sülfür yapısında kristalleşir.



Şekil 2.10. Kübik çinko sülfür'ün kristal yapısı

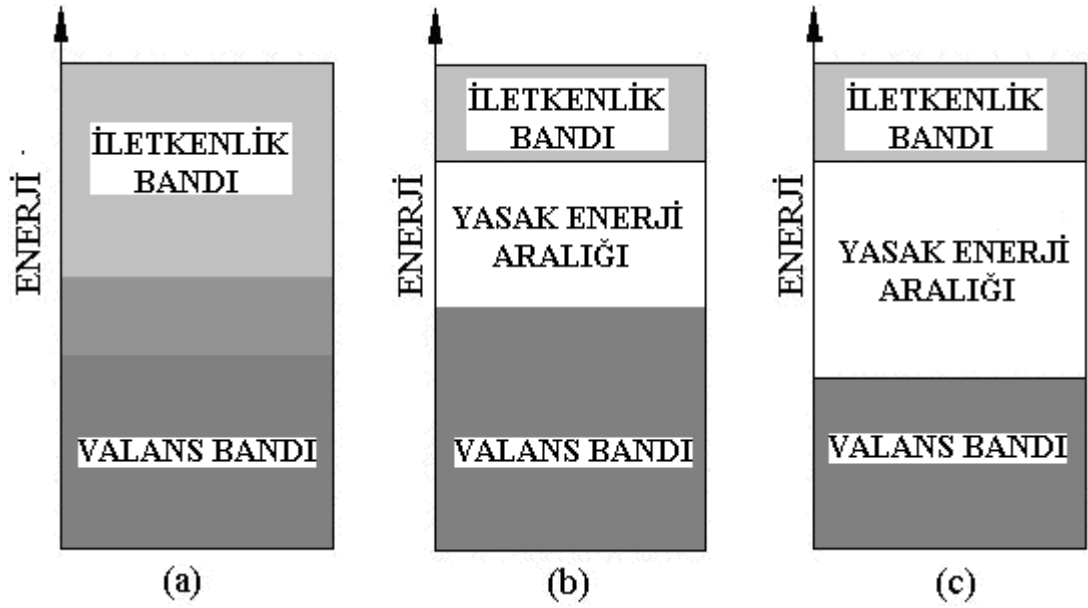
Çizelge 2.5. ZnS yapıdaki bazı yarı iletkenlerin örgü sabitleri [5]

Kristal	Örgü sabiti- a (Å)	Kristal	Örgü sabiti- a (Å)
CuI	6.05	GaP	5.45
CuCl	5.41	GaAs	5.65
ZnSe	5.66	GaSb	6.09
ZnS	5.41	ZnTe	6.09
AlSb	6.10	InSb	6.46

2.4. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar, normal halde yalıtkandırlar. Ancak ısı, ışık ve magnetik etki altında bırakıldığında

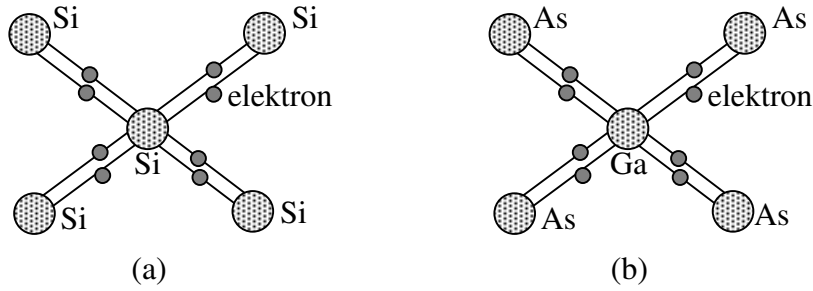
veya gerilim uygulandığında bir miktar değerlik elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanır. Yarıiletken katılarda dolu olan enerji bandına, değerlik bandı (valans bandı) ve değerlik bandının üzerindeki boş olan banda da iletkenlik bandı denir. Metallerde değerlik ve iletim bandı aynı olduğu halde yarıiletkenlerde bu yasak enerji aralığı denilen bir enerji aralığı ile birbirinden ayrılır. Yalıtkanlarda bu aralık daha da fazladır. Yasak enerji bandı E_g ile gösterilir.



Şekil 2.11. Metal, yarıiletken, yalıtkan maddeler için bant enerji seviyeleri (a) Metal , (b) Yarıiletken , (c) Yalıtkan maddeler için bant enerji seviyeleri

Yarıiletkenlerde E_g değerleri 1 eV ile 4 eV arasında değişir. E_g değerleri 2eV dan küçük olduğu durumlar için oda sıcaklığında uyarılan elektronların sayısı yeterli düzeyde olduğundan madde yarıiletken olmaktadır. Elektronlar, yasak enerji bölgesini geçecek şekilde uyarıldığında, değerlik bandının tepesi civarında boşluklar bırakarak iletim bandının tabanına geçerler. Boşluk ve elektronun her ikisi de elektrik alandan etkilendiği için elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Sıcaklığın yükselmesiyle elektron ve boşlukların sayısı hızla artar ve bu, yarı iletkenlerin önemli bir özelliği olan iletkenliğin sıcaklıkla büyümesini açıklar. Mutlak sıfır sıcaklığında (0 K), yarıiletkenlerin değerlik bandı tamamen dolu veya boştur. Elektronik bant yapısı tamamen dolu veya boş olduğunda elektrik akımı oluşturamaz ve yalıtkan olurlar [5].

En iyi bilinen yarıiletkenler; periyodik cetvelin IV. sütunundaki C (elmas), Si (silisyum) Ge(germanyum) ve α -Sn'nin oluşturduğu yarıiletkenlerdir. Bunlardan özellikle Si ve Ge elektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yarıiletkenler elmas yapıda kristalleşir. Elmas yapısı, özdeş iki atomun oluşturduğu bazlı bir fcc yapısıdır. Bu yapıda her atom düzgün dörtyüzlü (tetrahedron) oluşturacak şekilde yerleşen dört atomla çevrilidir.



Şekil 2.12. Si ve GaAs kristallerindeki tetrahedral bağlar

Üç-boyutlu tetrahedron teşkil eden Si atomları ile bu tetrahedronun merkezindeki Si atomu arasında oluşan kovalent bağların düzlem üzerindeki izdüşümleri Şekil 2.12'de görülmektedir. Bu bağlar, iki atomu birleştiren doğrultu boyunca ve zıt spinli iki elektron tarafından oluşturulur. Merkezdeki Si atomunu onun komşuları olan dört atoma bağlayan iki elektronlu kovalent bağlardır. Bağın uçlarındaki atomların her biri bağa bir elektron katkıda bulunur. Bu durum IV. gruptaki diğer elementler için de geçerlidir. III.-V. grup bileşikleri, yarıiletkenlerin önemli bir başka sınıfını oluşturur. Bu grubun en iyi bilinen yarıiletkenleri GaAs ve InSb'dir. GaP, InAs, GaSb, v.s. de bu sınıfa girer. Bunlar ZnS yapısında kristalleşirler. GaAs de, fcc örgünün bazını oluşturan iki atom Ga ve As'dir. Her atom, öteki cinsten dört atom tarafından çevrilidir ve bu atomlar düzgün dört yüzlü (tetrahedron) oluşturur [5].

2.4.1. Katkılı yarıiletkenler

Yarı iletkenlerin içerisindeki yabancı madde konsantrasyonu arttıkça yarı iletkenlerin özdirençleri azalmaktadır. Metallerde ise bu durum tam tersinedir. Katkılı bir yarı iletkende serbest yük taşıyıcıları kristalin bazı örgü noktalarına yerleşmiş olan

yabancı madde atomları tarafından sağlanır. Doğal bir yarı iletkende elektron ve boşlukların sayısı birbirine eşittir. Oysaki katkılı bir yarı iletkende bu eşit değildir ve katkılı yarıiletkenler bu orana göre iki tipe ayrılırlar. Katkı madde atomu kristalin kovalent bağlarına yeterli sayıdan bir fazla elektron sağlarsa, çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar olurlar ve bu halde yarıiletken n-tipi (negatif taşıyıcılı) olur. Eğer katkı madde atomu esas kristalin kovalent bağlarına yeterli elektron sağlayamazsa, yabancı madde atomunun bulunduğu yerde serbest bir boşluk meydana gelir ve yarıiletken p-tipi (pozitif taşıyıcılı) olur. Katkı maddeleriyle iletkenlikleri artırılan yarıiletkenler elektronik devre elemanlarının üretiminde oldukça önemli yer tutmaktadır [5].

Çizelge 2.6. Elektronikte yararlanılan bazı yarı iletkenler ve kullanım yerleri

Yarıiletken	Kullanılma yeri
Germanyum (Ge) (Katkısız)	Diyot, transistör, entegre, devre
Silikon (Si) (Katkısız)	Diyot, transistör, entegre, devre
Selenyum (Se) (Katkısız)	Diyot
Bakır oksit (kuproksit) (CuO) (Katkılı)	Diyot
Galliyum Arsenid (Ga As) (Katkılı)	Tünel diyot, laser, fotodiyot, led
İndiyum Fosfor (In P) (Katkılı)	Diyot, transistör
Kurşun Sülfür (Pb S) (Katkılı)	Güneş pili (Fotosel)

2.5. Yüzey Kristal Yapısı

Yüzey yapısı genellikle iki boyutta periyodik olur. Bu, tüm atomların bir düzlemde yer aldığı anlamına gelmez. Yüzey yapısı bazen, çökeltilmiş olan yabancı atomların yapısında olabilir. Yüzey fiziğinde iki boyutlu bravais örgüye ağ, hücreye de göz denir. Şekil 2.4’ de iki boyutta olabilecek beş ağ yapısından dördü gösterilmiştir. Beşincisi, göz vektörleri $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ arasında hiçbir simetri ilişkisi bulunmayan eğik

ağ' dır. Buna göre iki boyutlu ağ türleri eğik, kare, altıgen, dikdörtgen ve merkezli dikdörtgen olurlar. Yüzey yapısının ağını tanımlayan $\vec{c}_1, \vec{c}_2$ vektörleri ile referans vektörleri arasındaki ilişki bir $\vec{P}$ matrisi ile belirlenir[5].

$$\begin{bmatrix} \vec{c}_1 \\ \vec{c}_2 \end{bmatrix} = \vec{P} \begin{bmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Yüzey gözünün ters ağ vektörleri $\vec{c}_1^*, \vec{c}_2^*$

$$\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2^* = \vec{c}_2 \cdot \vec{c}_1^* = 0 \quad , \quad \vec{c}_1 \cdot \vec{c}_1^* = \vec{c}_2 \cdot \vec{c}_2^* = 2\pi \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanabilir[5].

3.YÜZEY ANALİZİNDE KULLANILAN DENEYSEL TEKNİKLER

3.1. Giriş

Bu bölümde, yüzey analizi için kullanılan mikroskobik teknikler hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra UHV (çok yüksek vakum) sisteminden ve vakum kavramından bahsedilecektir.

3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

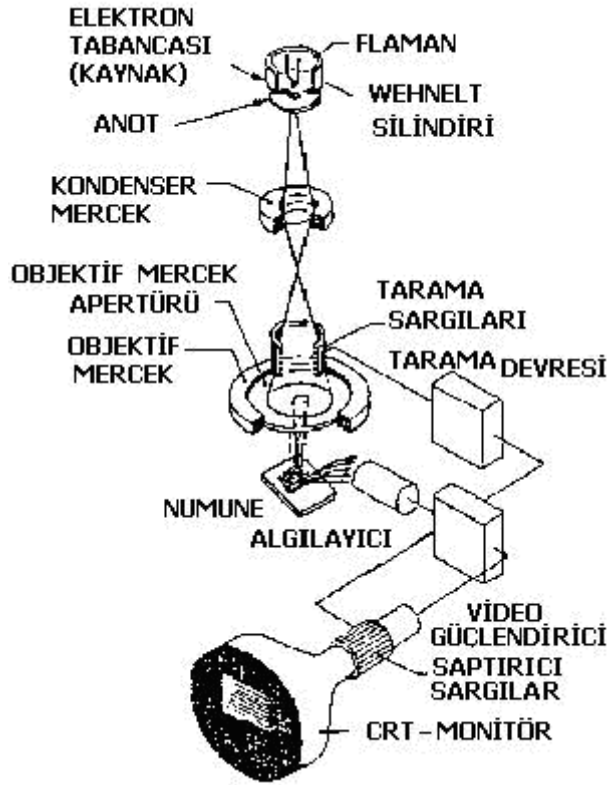
Taramalı Elektron Mikroskobunda, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlar numune üzerine odaklanır. Daha sonra bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkiler uygun algılayıcılarla toplanır. Elde edilen sinyal, sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışını tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir[6].

Taramalı elektron mikroskobu, optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu Şekil 3.1’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Optik kolon kısmında, elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için kondenser mercekleri, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apertürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır[6].

Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune

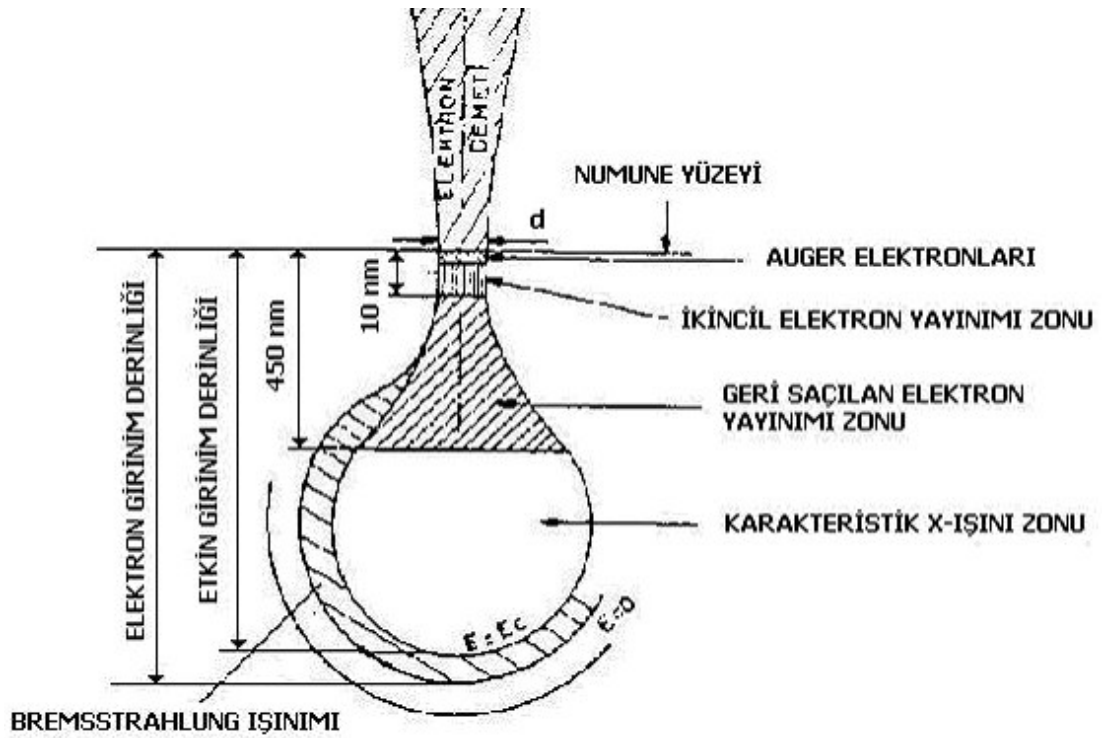
yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla dikdörtgensel olarak tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.



Şekil 3. 1. SEM' in şematik diyagramı [6]

Yüksek voltaj altında (yaklaşık 1- 10 keV) ivmelendirilen elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim Şekil 3.2' de şematik olarak gösterilmiştir. Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektronlar olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha

küçük bir derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır[6].



Şekil 3. 2. Elektron demeti ve numune etkileşimi [6]

3.3. Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM)

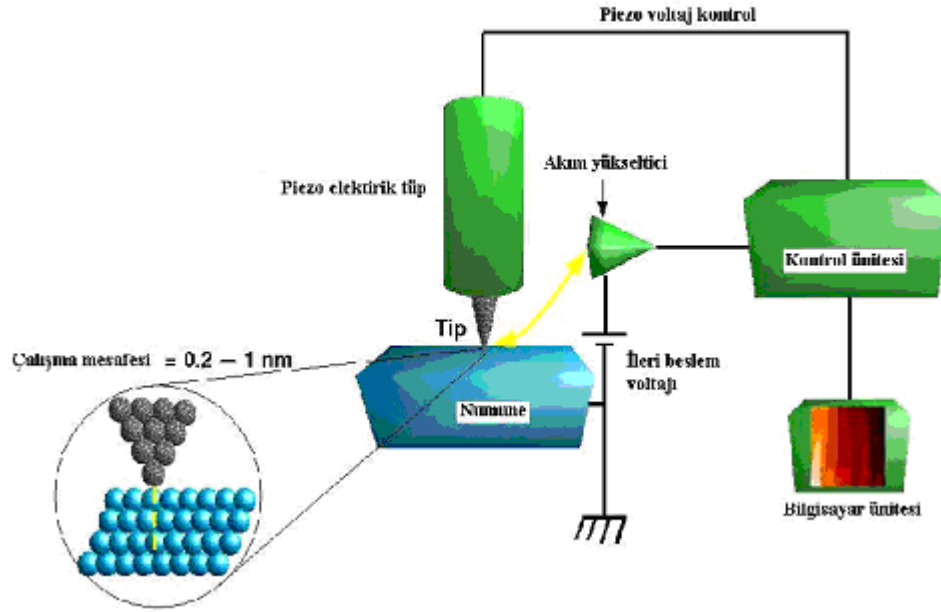
TEM, materyellerin mikroyapılarını çok yüksek çözünürlükte karakterize etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik numunenin morfolojisi, kristal yapıları ve eksiklikleri, kristal safhaları ve oluşumları hakkında bilgi almamızı sağlar. TEM'in çözünürlüğü yaklaşık 2.4 Å dur. Bu çok çeşitli yapısal bilgilerin elde edilmesi için çok ince numuneler üretilmesi gerekir ($100- 1000 \text{ Å}$). Bu teknik ışık mikroskobu ile aynı temel düşünceye dayanır. Ancak TEM' de farklı olarak fotonların yerine elektronlar, cam lenslerin yerine de elektromanyetik lensler kullanılmaktadır. Çok ince bir numunenin içine yüksek enerjili bir elektron demeti gönderilir. Bu elektron demeti, numune üzerinde küçük bir noktaya elektromanyetik lensler tarafından odaklanır ve floresan perde üzerinde oluşturulan görüntü dijital kamerayla kaydedilir. Elektronlar ışığın dalga boyundan çok daha küçük bir dalga boyunda

hızlandırılırlar. Elektronlar 200 keV’ da 0.025 Å dalga boyuna sahiptirler. Optik mikroskopun çözünürlüğü ışığın dalga boyuyla sınırlandırılırken elektron mikroskopunun çözünürlüğü elektromanyetik lenslerdeki doğal sapmalar tarafından sınırlandırılır[7]. Bunlardan başka yüzey analizinde Fotoelektron Spektroskopisi (PS), Auger Elektron Spektroskopisi (AEG), Alan Emisyon Mikroskobu (FEM), Alan İyon Mikroskobu (FIM) gibi teknikler de kullanılır.

3.4. Taramalı Tünelleme Mikroskobu (Scanning Tunneling Microscopy : STM)

Yüzey analizinde kullanılan Taramalı Tünelleme Mikroskobu, yüzey analizi için çok önemlidir. 1982’ de IBM laboratuvarında G. Binning ve W. Rohrer tarafından geliştirildi. Binning ve Rohrer bu çalışmalarından dolayı 1986 nobel fizik ödülünü almaya hak kazandılar[8].

STM’ le, yüzey karakterizasyonu, yüzey bozuklukları, moleküllerin büyüklükleri ve yerleşimleri, çok yüksek çözünürlükte atomların uzaydaki görüntüleri hakkında bilgi verir. STM atomik ölçekte çözünürlük sağladığı için bilimsel araştırmalarda ve endüstriyel alanlarda geniş kullanıma sahiptir. STM’ de çok ince metalik bir ucu iletken numuneye birkaç Å yaklaştırıp uç ile numune arasına ($U \leq 4V$) bir voltaj uygulanması durumunda, uç numune ile fiziksel temas halinde olmamasına rağmen numuneden uca veya uçtan numuneye doğru küçük bir elektrik akımı (0.01nA - 50nA) akar. Bu olay ‘Elektron Tünellemesi’ olarak adlandırılır. Akım veya uç pozisyonunda meydana gelen değişimlerden yüzeyin haritası çıkarılabilmektedir. Tünelleme akımının uç – numune aralığına exponansel bağlılığı yüksek dikey çözünürlükte sonuçlanır. 0.01Å’ a kadar dikey çözünürlük elde edilirken enine çözünürlük yaklaşık 0.1 Å’ dur. STM, çok yüksek vakum (UHV) ortamlarda kullanılabilir[8]. Şekil 3.3’ de STM’ in şematik diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. STM' in şematik diyagramı [9]

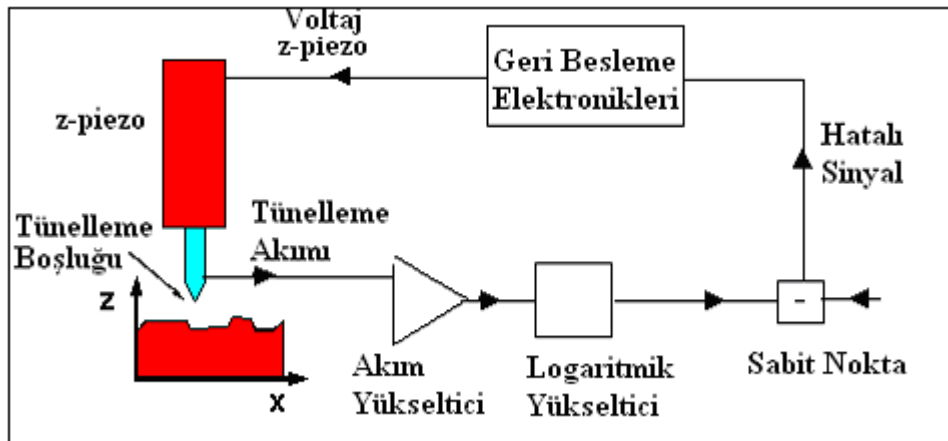
STM' de teknik açıları;

- Birkaç milimetreden 0,01nm' ye uç – numune mesafesini kontrol etme
- Hatasız kenar (yanal) pozisyonlama
- Kararlı uç – numune mesafesi
- Keskin uç
- 0,01nA – 50nA arasındaki akımı ölçme [10]

3.4.1. STM için temel unsurlar

- 1) Geribesleme devresi : Sabit akım modunda ölçüm yapılması durumunda Z-piezoyu (uç numune arasındaki boşluğu) kontrol etmek için bir geri besleme devresi kullanılmalıdır.

Tünelleme akımı, (0,01nA- 50nA) akım yükseltici tarafından gerilime çevrilir. Tünelleme boşluğuna göre çizgisel bir tepki almak için sinyal logaritmik bir yükseltici tarafından çevrilir. Logaritmik yükseltici daha önceden belirlenmiş bir voltaj ile karşılaştırılır. Hata sinyali geri besleme devresine geçirilir. Bu da akım belirleme noktası ve tünelleme akım küçülmesi arasındaki farkı tutmak amacıyla voltajı Z-piezo'ya uygular. Gürültü sinyal oranını düşük seviyede tutmak için dikkatli olunmalıdır. Ayrıca ölçümlerin hatasız olması için geri besleme tepki zamanı da en aza indirilmelidir[10].

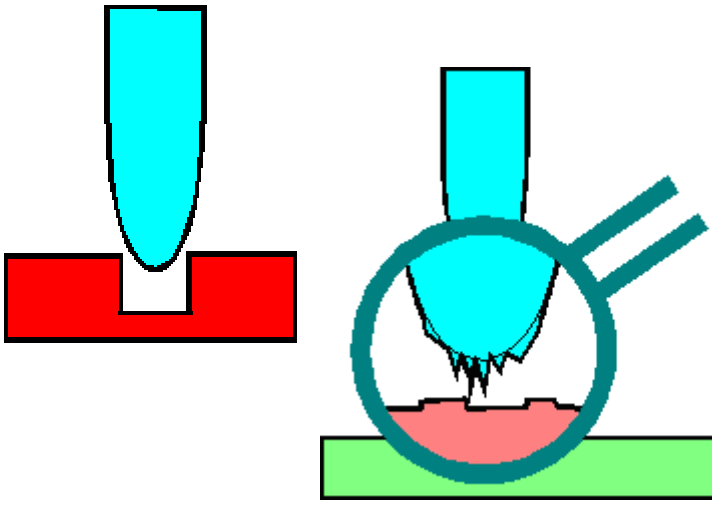


Şekil 3.4. STM'in elektronik devresi [10]

- 2) Titreşim izolasyonu: İyi atomik çözünürlük elde etmek için uç – numune arasını 0,01A' da sabit tutulması gerekir. Bu yüzden iç titreşimleri azaltmak veya dış titreşimlerden sistemi arındırmak kesinlikle gereklidir. Çevresel titreşimler arasında Binanın titreşmesi (15 – 20Hz), Koşan insanlar (2 – 4Hz), Vakum pompaları, Ses sayılabilir[10].

3) Uç (tip): STM deneyinde uç, en ustalık isteyen bölümdür. Kaba yapıları ölçmek için küçük bir eğime ihtiyaç duyar. Atomik znrlk için tek atomik ucu olan bir minitip'e ihtiyaç vardır.

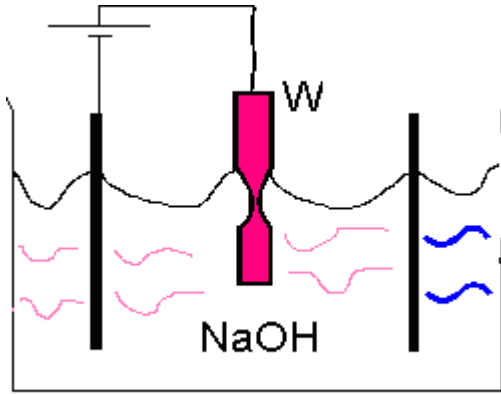
Uçlar genellikle tungsten (W), platinyum (Pt), altın (Au) ya da Pt – Ir telinden yapılır[10].



Şekil 3.5. Bir tipin şematik gösterimi [10]

Ucu yapmanın iki şekli vardır ;

- 1) Kesme ve döndürerek sürtme: Çok sivri ve keskin bir uç, mekanik olarak bir zımpara yada bileme taşı üzerinde sürtölerek elde edilebilir[10].
- 2) Elektrokimyasal kesme: Yapılacak ucun özelliğine uygun çözelti ve katot olarak kullanılacak elektrot seçilerek elektroliz kabı içine Şekil 3.6' da görüldüğü gibi yerleştirilir. Örneğin tungsten uç için uygun özelti NaOH ve katot da elik teldir. Daha sonra anot (uç) ve katot (elik tel) arasına uygun potansiyel uygulanarak çözelti yüzeyinde ucun kimyasal olarak aşınması sağlanır. Belli bir süre sonra yeterince iki tarafından aşınan uç, altta kalan parçanın çözelti içine düşmesiyle oluşur[10].



Şekil 3.6. Elektrokimyasal kesme mekanizması [5]

- 4) Pozisyonlama: Uç ile numune arasındaki mesafeyi kontrol etmek için ince pozisyon bulucu kullanılır. İnce pozisyon bulucu tarayıcı olarak da kullanılır. Her ince pozisyon tarayıcı piezokristal veya piezoseramik malzemeden yapılır. Angström mertebesindeki mekanik yer değiştirmeler bu malzemelerle sağlanır[10].
- 5) Bilgisayar sistemi : Akım değişimlerini veriye ve daha sonra da görüntüye dönüştürmek için kullanılır. Aynı zamanda ucun konumunu kontrol etmek için de kullanılır.

3.4.2. Elektron tünellemesi

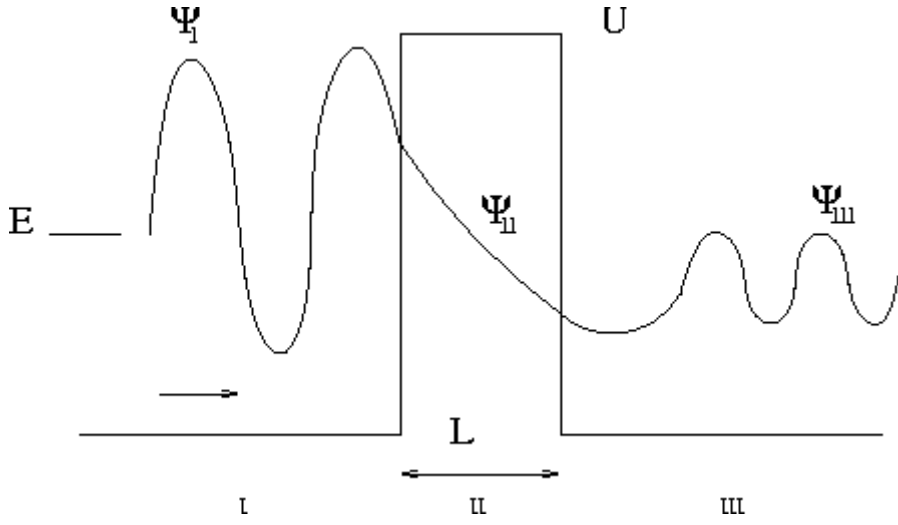
Kuantum mekaniğinin temel olaylarından biri de, bir taneciğin tünelleme yapmasıdır. Bir parçacık, sonlu yükseklik ve genişliğe sahip bir engele çarptığı zaman çok ilginç ve garip bir olay gerçekleşir. Yüksekliği U ve genişliği L olan bir dikdörtgensel engel üzerine E enerjili bir parçacığın geldiğini düşünelim. Burada parçacığın enerjisi E , engelin enerjisi U ' dan küçük olsun. Klasik Newton mekaniğine göre, parçacığın engeli geçebilecek kadar yeterli enerjiye sahip olmadığı için engeli geçemeyecek ve engel tarafından geri yansyacaktı. Fakat bu olayı kuantum mekaniğine göre ele alırsak durum farklı olacaktır. Kuantum mekaniğine göre bütün bölgeler, enerjisine bakmaksızın parçacık için kabul edilebilir bölgelerdir. Çünkü,

parçacığa bağlı madde dalgalarının genişliği her yerde sıfır değildir. Bu duruma ait tipik bir dalga biçimi Şekil 3.7’ de çizilmiştir. Bu şekilde dalganın engelin içine girmesi ve ötesine geçmesi gösterilmiştir. Engelin solunda (I. bölge) ve sağ tarafında (III. Bölge) dalga fonksiyonları sinüzoidaldir ve engel içinde (II. Bölge) üstel azalan bir fonksiyonla yumuşakça bağlanırlar. Parçacığın yerleşme olasılığı $|\Psi|^2$ ile orantılı olduğundan, engelin ötesinde, III bölgede parçacığın bulunma olasılığının sıfır olmadığı sonucuna varılır. Engelin diğer tarafında parçacığın bulunma olasılığına tünelleme adı verilir[11]. Parçacık engelin iç tarafında asla gözlenmese de (çünkü enerjinin korunumu ihlal olur), bu bölgeden geçebilir ve III bölgesinde gözlenebilir. Parçacık engele nasıl girebilir ve orayı nasıl geçebilir? Eğer parçacık klasik tanecik gibi tasvir edilirse bu sorunun yanıtı, parçacık engele giremez ve geçemez şeklinde olacaktır. Sadece parçacığa bağlı *de Broglie* dalgası engeli geçebilir. O halde, bu alışılmadık olayı açıklamak için dalga parçacık olayını ikilemine başvurmak zorunda kalınır[8].

Tünelleme olasılığı, bir T geçme katsayısı ve bir R yansıma katsayısı ile açıklanabilir. Geçme katsayısı, parçacığın engelin öbür tarafına geçme olasılığını ölçer, halbuki yansıma katsayısı parçacığın engel tarafından yansıtılma olasılığını ölçer. Gelen parçacık, ya engelden yansıyacak ya da engeli geçeceğinden, $T + R = 1$ koşulu gerekli olmalıdır. $T \ll 1$ çok yüksek veya geniş bir engel olduğu zaman elde edilen geçme katsayısı için yaklaşık bir ifade aşağıdaki gibi formülize edilmiştir[8].

$$T \approx e^{-2KL} \quad (3.1)$$

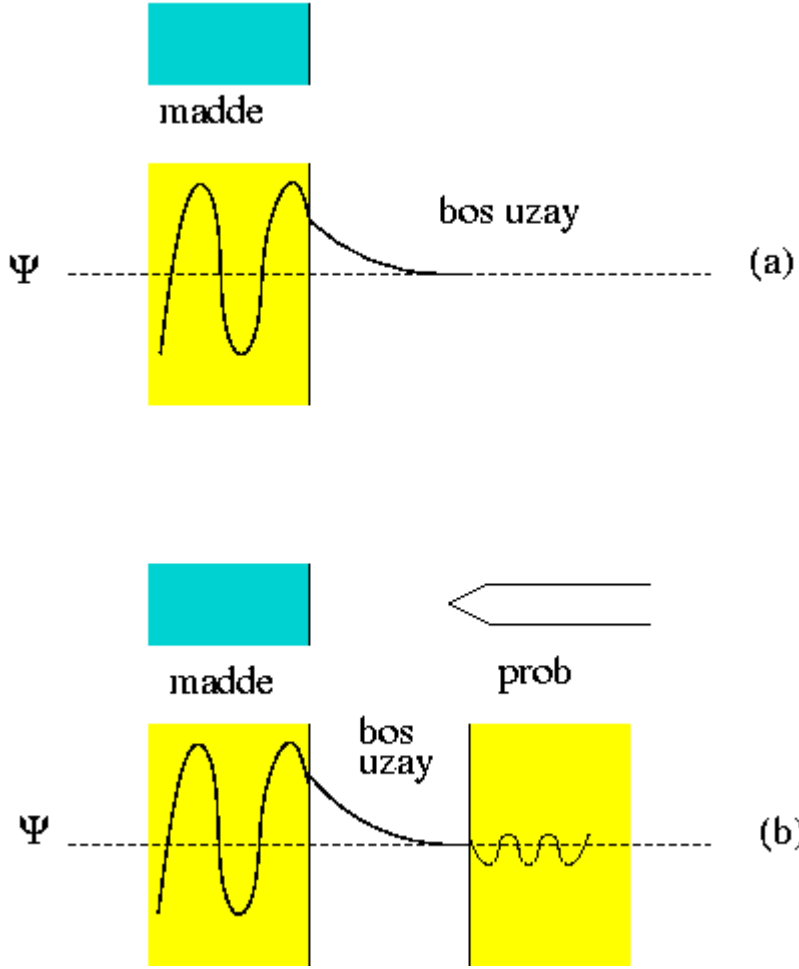
$$K = \frac{\sqrt{2m(U - E)}}{\eta} \quad (3.2)$$



Şekil 3.7. U yükseklikli bir engel üzerine soldan gelen bir tanecik için dalga fonksiyonu

I ve III bölgelerinde sinüzoidal, II bölgesinde de üstel olarak azalmaktadır. Herhangi bir adi mikroskop için ayırma gücü, görüntü yapmak için kullanılan dalgaların dalga boylarıyla sınırlıdır. O halde, bir optik mikroskop, $2000 \text{ \AA}$ dan daha iyi bir ayırma gücüne sahip olamaz. Elektron mikroskopları $4 \text{ \AA}$ veya daha kısa dalga boylu elektron dalgaları kullanarak $2 \text{ \AA}$ luk bir ayırma gücüne sahip olabilirler. $\lambda = h/p$ de Broglie formülünden bu dalga boyunu verecek elektronun gerekli momentumu 3100 eV/c olmalıdır. Bu momentum $v = p/m = 1.8 \times 10^6 \text{ m/s}$ lik bir elektron hızına karşılık gelir. Bu kadar yüksek hızda giden elektronlar numunenin içine girecekler ve bu yüzden tek tek yüzey atomları hakkında hiç bir bilgi vermeyeceklerdir[8].

STM' in çalışmasının arkasındaki temel fikir aşağıdaki Şekil 3.8' de görüldüğü gibi çok basittir. Çok sivri uçlu iletken iğne incelenecek yüzeye götürülür. Bu iğne, yüzey içindeki pozitif iyonlara çekildiği için, yüzeydeki bir elektron yüzey ve iğne arasındaki boş uzay içindeki bir elektronun sahip olacağından daha düşük bir toplam enerjiye sahip olur. Aynı şey iğnenin ucundaki elektronlar için de doğrudur. Klasik Newton mekaniğinde, elektronlar yüzey ve uç arasında hareket edemezler. Fakat elektronlar kuantum mekaniğine uydukları için yüzey ve uç arasındaki boşluk engelinden tünelleme yapabilirler[8].



Şekil 3.8. Tip ile numune arasındaki tünelleme a) İncelenecek numunenin yüzeyindeki bir elektronun dalga fonksiyonu. b) İletken bir probun sivri ucu yüzeyin yanına getirilir. Bir yüzey elektronunun dalga fonksiyonu prob ucuna doğru girer ve böylece elektron, yüzeyden uca doğru tünelleme yapabilir[8].

STM mükemmel bir yanal çözünürlüğe sahiptir. Yani örneğin yan düzlemindeki özelliklerini de ayırabilir. Kullanılan uç çok ince olduğu için yaklaşık olarak 2 Å genişlikli çok ince bir bölge içindeki yüzey elektronlarını inceleyebilir ve böylece çok ince ayrıntılar görülebilir[8].

Elektron tünellemeyi tanımlamanın diğer bir yolu zamana bağlı perturbasyon teoremini kullanan Bardeen Yaklaşımı'dır. E_ψ 'deki Ψ durumundan E_x 'deki x durumuna geçiş olasılığı FERMİ kuralına göre;

$$W = \frac{2\pi}{\eta} |M|^2 \delta(E_\psi - E_x) \quad (3.3)$$

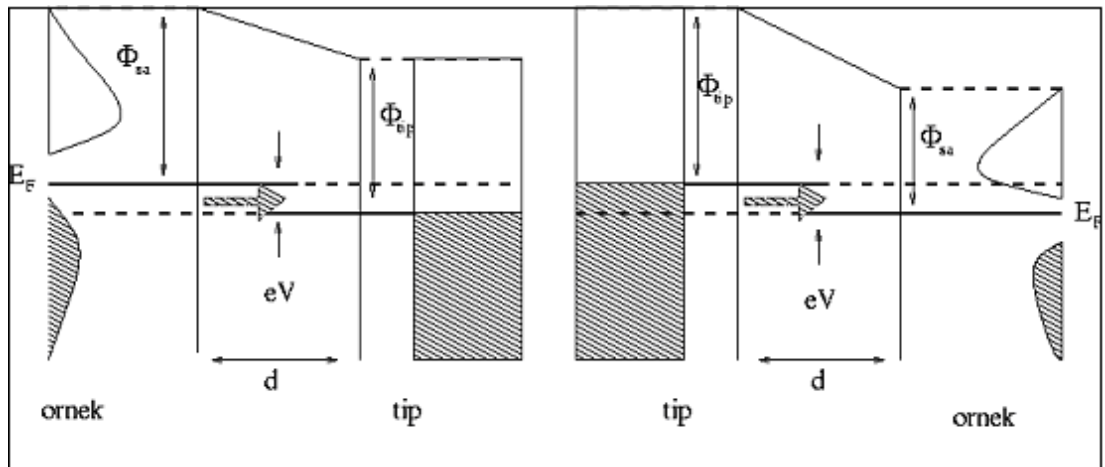
verilir. Tünelleme matris elemanı;

$$M = \frac{\eta}{2m} \int_{z=z_0} (\chi^* \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \chi^*}{\partial z} \psi) ds \quad (3.4)$$

şeklinde. V voltajının uygulanması ve ortalama Fermi enerjisinin dağılımı ($kT \ll E_E$) adım fonksiyonu yaklaşımı kullanılması durumunda akım ;

$$I = \frac{4\pi e}{\eta} \int_0^{eV} \rho_{sa}(E_F - eV + \varepsilon) \rho_{tip}(E_F + \varepsilon) |M|^2 d\varepsilon \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. Böylece akım, numune ve uç yerel durum yoğunluklarının bir kombinasyonu ile verilir ve tünelleme matris elemanı M tarafından dengelenir[10].

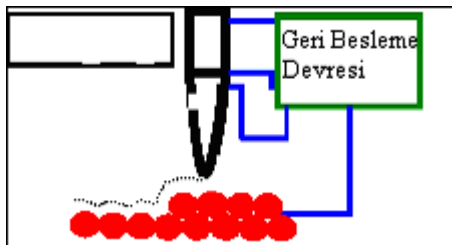


Şekil 3.9. Numune ucuna negatif ve pozitif potansiyel uygulanmış durumlar [10]

$\delta(E_{\Psi} - E_x)$ 'in anlamı şudur; bir elektron diğer bir elektrottaki aynı enerjili işgal edilmemiş yerlere tünelleme yapabilir. Numune ucunda negatif potansiyel olması durumunda yerleşik durumlar (işgal edilmiş durumlar) akıma yol açar. Aksine numune ucunda pozitif potansiyel olması durumunda numunenin yerleşik olmayan durumları daha önemlidir[10].

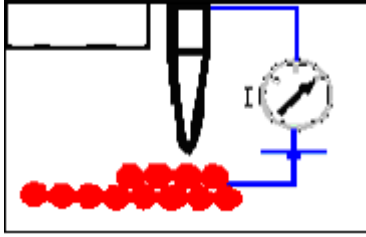
3.4.3. STM çalışma modları

Sabit akım modu: Tip geri besleme devresi kullanılarak akım sürekli sabit kalacak şekilde dikey olarak ayarlanır. Akım yerel durum yoğunluklarıyla orantılı olduğundan dolayı tarama esnasında uç, belirli bir sabit durum yoğunluğunu takip eder. Bu modda önce yüzey ve uç arasına uygun bir çalışma voltajı (2mV ile 2V) arası uygulanır. Ancak o zaman ölçülebilir. Tünelleme akımı elde etmek için uç, yüzeye yeteri kadar yaklaştırılır. Tünelleme akımı I ölçülürken, uç yüzeyi tarar. Bir geri besleme devresi tünelleme akımını sabit tutmak için dolayısıyla uç ve yüzey arasındaki L uzaklığını sabit hale getirmek için, ucun dikey konumu Z' yi değiştirir. (X,Y ; yanal koordinatlar) yan konumuna göre Z' nin grafiği çizilerek yüzeyin bir resmi yani görüntüsü yapılır. Bu mod tarihsel olarak ilk kullanılmıştır. Atomik olarak düzgün olmayan yüzeyleri incelemek için kullanılabilme avantajına sahiptir. Bununla beraber geri besleme devresi taramanın son derece yavaş olarak yapılmasını gerektirir. Sonuç olarak taranan örnek, görüntü bozukluklarından kaçınmak için uzun süre yerinde sabit tutulmalıdır[10].



Şekil 3.10. Sabit akım modu [10]

Sabit yükseklik modu: Bu modda ucun dikey pozisyonu değişmez. Bu mod atomik açıdan düz yüzeyler için uygundur. Akım monitörde izlenirken sabit voltajda ve hemen hemen sabit yükseklikte yüzeyi tarar. Sabit yükseklikli mod, atomsal düz yüzeyleri daha hızlı (sabit akım modundan 100 kez daha hızlı) taramayı sağlar. Çünkü uç yüzey üzerinde her noktada aşağı yukarı hareket etmek zorunda değildir[10].

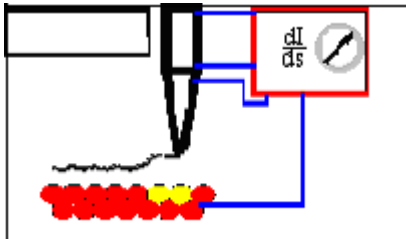


Şekil 3. 11. Sabit yükseklik modu [10]

Bariyer yükseklik görüntüleme: Şimdiye kadar homojen yüzeyler ele alındı. Yüzeyde homojen olmayan bir yüzeye rastlanıldığında iş fonksiyonu homojen olmayacaktır. Bu yerel bariyer yüksekliğini değiştirebilir. Yukarıda tarif edilen iki modu kullanarak neredeyse bir delik ya da ek atom elde ederiz. Bu ;

$$\frac{d(\ln I)}{ds} \propto \sqrt{\Phi} \quad (3.6)$$

ortaya çıkarır. Böylece iş fonksiyonu direk olarak geri beslemeye açık olduğundan dolayı akımı değiştirerek yapılabilen uç – numune mesafesinin değişiklikleriyle ölçülebilir[10].

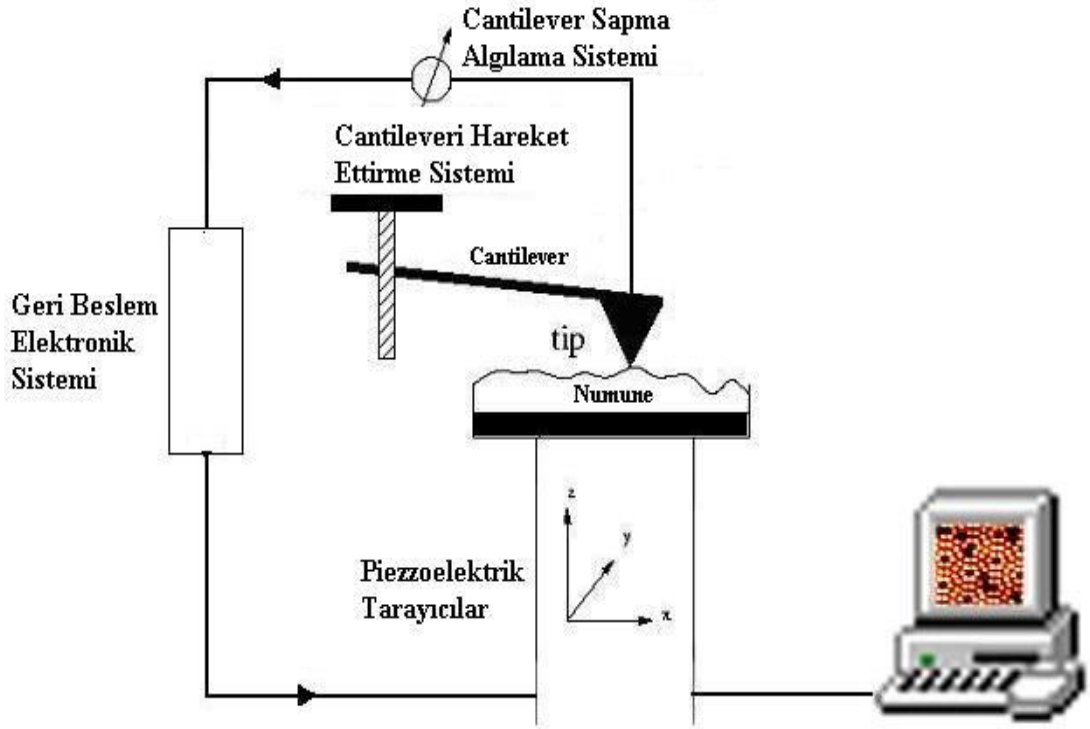


Şekil 3.12. Bariyer yükseklik görüntüleme [10]

3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

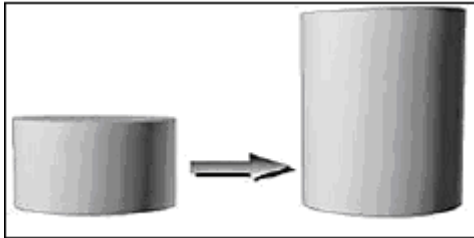
Atomik Kuvvet Mikroskobu, 1985’ de Bining, Calvin Quate ve Cristopher Gerber tarafından icat edildi. Optik ve elektron mikroskoplarına kıyasla AFM’ de örnek yüzeyin topografik görüntüsü çok hassas çözünürlükte elde edilebilir. AFM, numune yüzeyini angström mertebesinde 100 mikrona kadar ölçebilen bir metottur. Çok duyarlı bir iğnenin yüzeyi taramasıyla atomik seviyedeki kuvvetler de nanonewton hassasiyetinde ölçülebilir[12]. AFM, elektronik, telekominikasyon, biyoloji, kimya, otomotiv, uzay – havacılık ve enerji endüstrisi dallarında yüzey işleme ve malzeme problemlerinin çözülmesinde kullanılmaktadır. Hızla gelişen bir teknoloji için vazgeçilmez bir araçtır[13].

AFM’ nin çalışma prensibi Şekil 3.13’ de gösterilmiştir. Birkaç mikron uzunluğundaki keskin bir uç cantilever denilen bir yayın ucuna tutturulmuştur. Burada uç ve numune arasındaki etkileşim cantilever’ ın sapmasına sebep olmaktadır. Kuvvet sensörü sayesinde de bu cantilever’ deki sapmalar ölçülür ve görüntü ortaya çıkar[14].



Şekil 3.13. Atomik Kuvvet Mikroskobunun şematik diyagramı

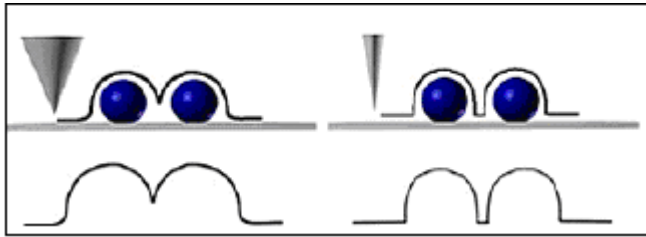
Mekanik hareket, bir elektromekaniksel aletle elektrik enerjisinden meydana gelmektedir. AFM’ de yüzey üzerinde probun yer değiştirme hareketi piezoelektrik seramikler sayesinde olur. Probun yer değiştirmesi ve doğrultusu piezoelektrik materyalin tipine bağlıdır. Şekil 3.14’ de elektrik potansiyeline maruz bırakılmış piezoelektrik bir materyalin yer değiştirmesi gösterilmiştir[14].



Şekil 3.14. Piezoelektrik diske voltaj uygulandığında disk’ in genişlemesi [14]

Burada piezoelektrik malzemenin genişleme miktarı uygulanan voltaja ve piezo-malzemeye bağlıdır. AFM’ de çözünürlük, taramada kullanılan probun geometrik

şekline bağlıdır. Yüksek çözünürlük elde etmek için çok keskin bir proba ihtiyaç vardır. Şekil 3.15’ de biri keskin diğeri keskin olmayan iki tane prob gösterilmiştir[14].



Şekil 3.15 . Keskin ve keskin olmayan probların gösterimi [14]

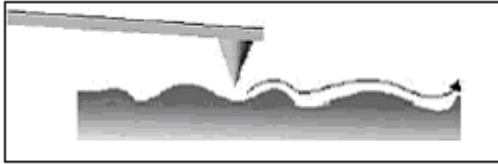
AFM’ de dikey çözünürlüğü etkileyen faktörler arasında akustik sesler, zemin titreşimi ve termal titreşimler sayılabilir. Maksimum dikey çözünürlük elde etmek için, minimize edilmiş titreşim aletlerine ihtiyaç vardır.

Daha önce söylenildiği gibi numune yüzeyindeki atomlarla, prob üzerindeki atomlar arasındaki etkileşim sebebiyle bir mekanik kuvvet oluşur. Ancak prob ve numune arasındaki başka kuvvetlerde AFM görüntüsünde bir etkiye sahip olabilir. Bunlar, yüzey kirliliği, elektrostatik kuvvetler ve yüzey materyalinin özellikleridir. Yüzey kirliliği; numune yüzeyinde çevresel etkilerden dolayı oluşan kirlilik olabilir. AFM probu bu kirli yüzeyle etkileştiğinde, capillary kuvvetler probu yüzeye doğru çekebilir. Elektrostatik kuvvetler; yalıtkan yüzeyler, üzerlerinde yük biriktirebilirler. Bu yükler AFM’ deki prob ve cantilever’ ın üzerlerindeki yüklerle etkileşebilir. Bu kuvvetler tarama esnasında cantilever’ ı saptıracak kadar güçlü olabilir. Yüzey materyal özellikleri; heterojen yüzeyler farklı bölgelerde sert ve pürüzlü olabilirler. Prob yüzeyi tararken, yüzeyle probun etkileşimi, bir bölgeden başka bir bölgeye hareket ederken değişebilir. Kuvvetteki bu değişiklikler, heterojen yüzeylerdeki materyaller arasındaki farklılık için yararlı olan bir zıtlık verebilir[14].

3.5.1. AFM için operasyon modları

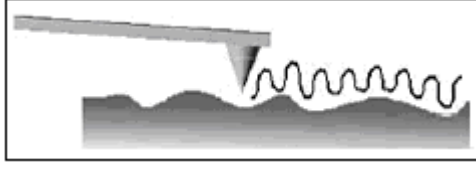
Topografi modları: Örnek taranırken, cantilever' ın sonundaki prob tarafından yüzeye sabit bir kuvvet uygulanır. AFM' deki cantilever' la kuvveti ölçme işi iki metotla yapılır. Bunlardan ilki cantilever' ın sapma miktarının doğrudan ölçülmesidir. İkinci metot ise cantilever' ı titreştirmek ve titreşim özelliklerindeki değişiklikleri ölçmektir[14].

Sapma modu: AFM' deki geribesleme kontrol ünitesi kullanılarak, sabit bir cantilever sapmasıyla örneği taramak mümkündür. Çünkü cantilever sapması, tarama esnasında yüzeye uygulanan sabit bir kuvvetle doğrudan orantılıdır. Bu tarama modu kontak mod olarak da adlandırılır. Bu modda yüzeydeki prob kuvveti bir nanonewton' dan daha azdır. Prob ile numune minimum kontak halindedir. Prob doğrudan yüzey topografisini takip eder. Görüntü ölçülürken, prob kuvveti daima sabittir[14].



Şekil 3.16. AFM kontak modda yüzey tarama[14]

Titreşim modu: AFM' deki cantilever bir piezoelektrik seramik kullanılarak titreştirilebilir. Titreşen cantilever yüzeyin yakınına geldiğinde, titreşen cantilever' ın genliği ve fazı değişebilir. Titreşim fazında ve genliğinde meydana gelen bu değişiklikler kolaylıkla ölçülebilir. Bu değişiklikler, yüzeydeki kuvvetle alakalıdır. Bu teknik, non- kontak mod olarak da adlandırılabilir. Bu modda tipin yüzeye dokunmaması çok önemlidir. Çünkü prob kırılabilir veya numune zarar görebilir. Titreşim modunda prob titreşimindeki değişiklikler, numune yüzeyindeki prob kuvvetini belirlemek için izlenir. Geri besleme ünitesi, titreşim genliğini ve fazını sabit tutmak için kullanılır[14].



Şekil 3.17. Titreşim modunda prob titreşimindeki değişiklikler [14]

Titreşim hassasiyet modları: Proba numune yüzeyinin etkileşmesi, numune yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Numune yüzeyindeki materyallerin etkileşimlerini ve hassasiyetlerini ölçmek mümkündür[14].

Titreşim materyal hassasiyet modu : Titreşim modunda da anlatıldığı üzere, yüzeyi tarama esnasında AFM cantilever' ı, yüzeyle prob arasındaki kuvveti ölçmek için titreştirilebilir. Bu titreşimin fazındaki ve genliğindeki değişme miktarı, yüzeyin kimyasal bileşimine ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Homojen olmayan numunelerde, kimyasal bileşenler ve değişik mekaniksel bölgeler arasında bir zıtlık gözlenebilir. Bu modda, titreşim genliği bir geribesleme ünitesiyle sabitlenirse, materyallerdeki zıtlık titreşim fazının değişikliklerinin ölçülmesiyle gözlenebilir[14].

Bükülme modu: AFM kontak modda, yüzeyin taranması esnasındaki cantilever' ın bükülme hareketini izlemek mümkündür.



Şekil 3.18. AFM' de cantilever bükülmesi[14]

Cantilever' ın bükülme miktarı yüzeyin kimyasal özelliklerindeki değişikliklerinin yanı sıra topografideki değişiklikler tarafından da kontrol edilir[14].

3.6. Ultra Yüksek Vakum (UHV)

UHV ortamı yabancı atomlar içermez. Bu yüzden deney esnasında yüzeyde bulunan boş bağlar farklı atomlarla bağ yapamaz ve katı yüzeylerin yüzey bileşeni değişmeden kalacaktır. Yani UHV ortamı yüzey çalışmaları için oldukça önemlidir.

UHV ortamına rağmen moleküler yoğunluk ($n = \frac{p}{k_B T}$) devamlı artar ve burada çok sayıda gaz molekülü vardır. Diğer yandan onların ortalama serbest yolu ($\lambda = \frac{f}{n\sigma^2}$) vakum çemberinin boyutlarından çok daha büyüktür. Bu, gaz molekülünün başka bir gaz molekülü ile karşılaşmadan önce pek çok kez iç yapıdaki elementler veya çemberin duvarları ile çarpışacağı anlamına gelir[15].

Vakum basıncı ölçümünde kullanılan birimlerden en yaygın olarak kullanılanlar Torr (veya mmHg), Pascal (SI, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$) ve milibar ($1\text{mbar} = 100\text{pa}$) dır. Bu birimler arasında $1\text{mbar} = 100\text{Pa}$ ve $1\text{mbar} = 0.75\text{Torr}$ şeklinde ilişki vardır[15].

UHV kullanılarak yapılan deneyler özel cihazlar gerektirir. Yüzey bilimi deneyleri için UHV sisteminde bir veya birkaç çember, pompa, vanalar, özel işlem elemanları (ısıtıcı, buharlaştırıcı, v.b parçalar), servis güç kaynağı, kontrol ünitesi ve bunun gibi yüzey analizlerine ihtiyaç vardır.

UHV sistem için kullanılan malzemeler, düşük buhar basıncına ve ısıtmalara dayanıklı olmak zorundadır. UHV’de kullanılan malzemenin nanmanyetik olması arzulanır. Düşük enerjili elektronların yayılımı kullanılarak yapılan yüzey analizleri için birçok aracın kullanılması gerekmektedir.

Vakum çemberi için kullanılan tüm parçalar 304 paslanmaz çelik olmalıdır. Bu çelik, yüzeyi çok parlatabilir, korozyona dirençli, düşük gaz geçirgenliği olan vakum materyallerine dönüştürülebilir. Çoğunlukla kullanılan diğer metaller ise bakır, alüminyum, Tantalyum, Tungsten ve Molibden gibi kolay işlenemeyen metallerdir. Tantalyum, Tungsten ve Molibden gibi metaller buharlaştırıcının ve örnek tutucunun

ana malzemesi olarak kullanılır. Manyetik alandan korumak için ise μ - metalleri kullanılır[15].

UHV için çoğunlukla cam malzemeler de kullanılır. Cam malzemelerin bazıları düşük gaz iletimi (örneğin He) ve iyi vakum karakteristiği gösterir. Fakat cam çabuk zarar görebilir. UHV'nin elektrik izolasyonu için değişik seramik çeşitleri kullanılır.

Plastik ve kauçuk düşük vakum karakteristiği gösterdiğinden UHV için uygun değildir. Bunlar sadece sistemin uç noktalarında kullanılır. Bununla birlikte UHV sistemlerinde birçok yüksek sıcaklık plastikleri (örneğin Teflon, Silikon, Viton gibi) kullanılır.

304 paslanmaz çelik malzemeler maksimum 450 °C ye kadar pratik olarak kullanılabilir. Bunlar 12-24 saat süreyle 200°C de tutulabilir. Buna rağmen bazı UHV sistemlerinde piezoseramik veya yüksek sıcaklık plastikleri (ki bunlar 150-250°C ye ısıtılabilirler) kullanılabilir.

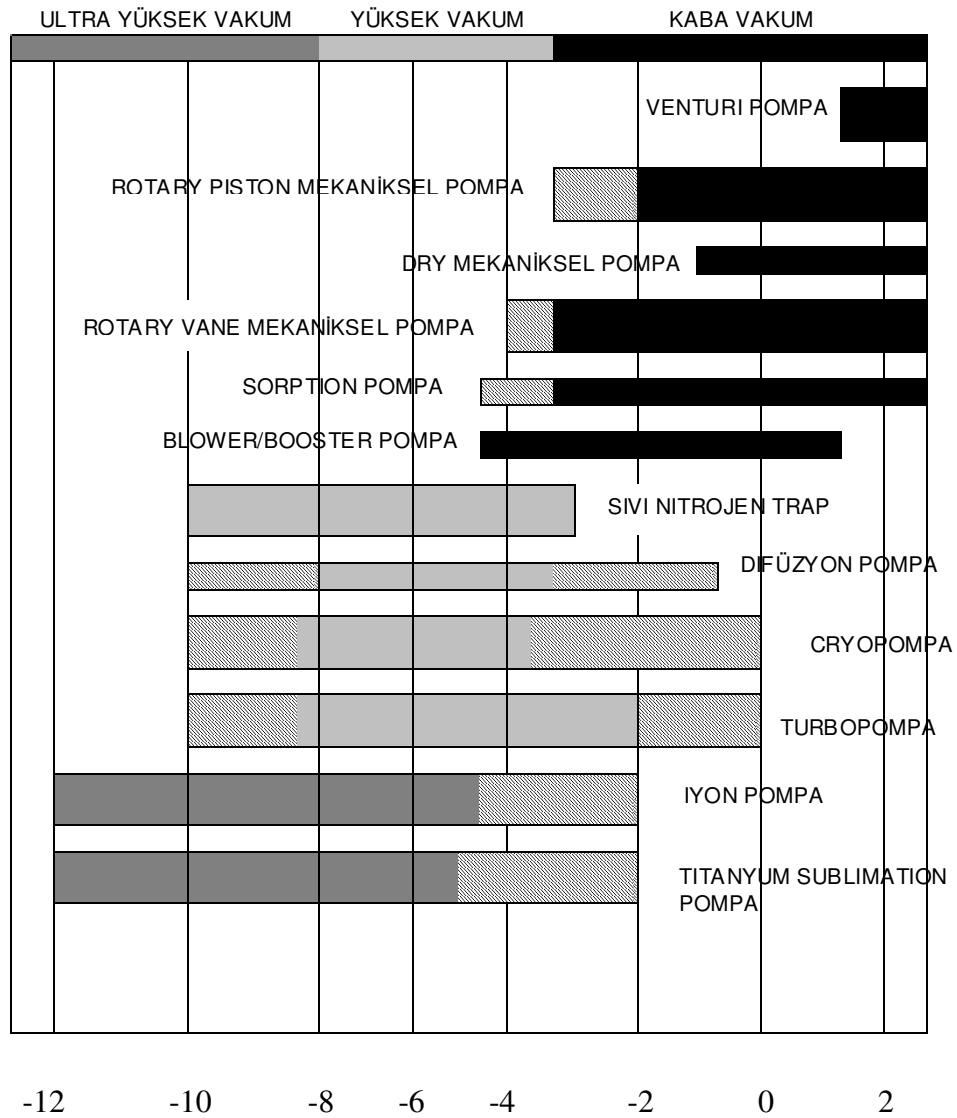
Sonuç olarak, UHV için her metal kullanılmaz ve kullanım şekline göre dikkatlice seçilmelidir. Çinko ve Kadmiyum çelikler çember içinde kullanılmaz çünkü bunların gaz salım özellikleri vardır ve bu durum sistemde sıkıntı yaratır[15].

3.6.1. UHV pompalama sistemi

Vakum sisteminin amacı çember içinde vakum elde etmektir. Pompalama sisteminin ana parçaları: pompalar, vanalar ve göstergelerdir. (*Gauge'lardır.*)

UHV sistemleri için atmosfer basıncını (760 Tor) 10^{-10} - 10^{-11} Tor seviyesinde olmalıdır Bu basınç değerine ulaşmak için pompalar kullanılır. Fakat bu büyüklüklere çıkmak için iki veya daha çok farklı pompaya ihtiyaç vardır. Bunlardan birisi Rotary Pompasıdır ki buna 'ilk pompalayıcı' denir. Diğeri de Cryosorption

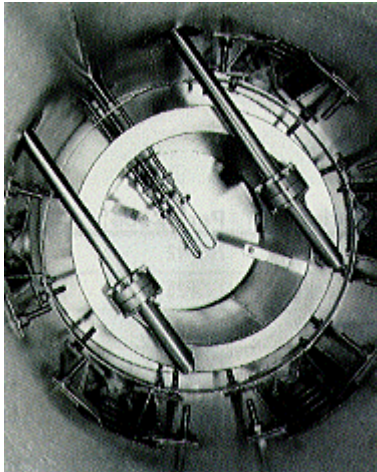
Pompa'sıdır. Bunları zenginleştirmek için ise İyon Pompası veya Turbomoleküler Pompa ile birlikte Titanyum Süblümleşme Pompa'ya ihtiyaç vardır. Bizim sistemimizde iyon Pompası, Titanyum Süblümleşme pompalar ve Rotary pompa kullanılır. Şekil 3.19' da vakum pompalama basınç aralıkları verilmiştir.



Şekil 3.19. Vakum pompalama basınç aralıkları: Burada basınç birimi tor olup 10' un üs katları şeklindedir[16]

3.6.2. Titanyum süblümleşme pompa(TSP)

Titanyum süblümleşme pompa, Resim 3.1' de görüldüğü gibi titanyum ve molidenyum alaşımından yapılmış flemanları içerisinde bulundurur. Bu flemanlar U şeklinde bükülmüş bir biçimdedir ve düşük elektrik direncine sahip bir taşıyıcıya monte edilmişlerdir. Dışarıdaki bir güç kaynağından sağlanan yüksek bir akım bu flemanların içerisinden geçirilir ve bu flemanlar kırmızıya yakın bir renk alırlar. Bu sıcaklıkta titanyum doğrudan flemanlardan süblümleşir. (Titanyum buharı sadece sıvı haldeyken süblümleşir). Bu süblümleşmiş buhar odacık duvarlarını kaplar[17].



Resim 3.1. Tipik bir TSP görüntüsü [17]

Bu sistemde bulunan odacık duvarının, düşük buhar basıncında aktif gaz molekülleriyle titanyum filminin rahat bir şekilde reaksiyona girebilmesi için geniş bir yüzey alanına sahip olması gerekir. İlk başta titanyum tabaka reaksiyona geçmez, TSP' den elde edilen buharlaşmanın tekrarlanmasıyla yerine yenisi yerleştirilmelidir. Bu zaman aralığında buharlaşmanın yeniden oluşması sistemin basıncına bağlıdır ve çizelgede gösterilen çeşitli gazlar yeniden pompalanmaya başlar. Bu basınç 10^{-5} mbar' dan 10^{-11} mbar' a 12 saatte gelir. Titanyum filminin pompalama hızını artırmak için sıvılaştıran odacık duvarının sıvı nitrojenle soğutulması

gerekir. Çizelge 3.1’ de oda sıcaklıklarında ve -196°C sıcaklıkta bir yüzey için pompalama hızları verilmiştir[17].

Çizelge 3.1. Titanyum filmi pompalama hızına $1\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$, de sıcaklığın etkisi [17]

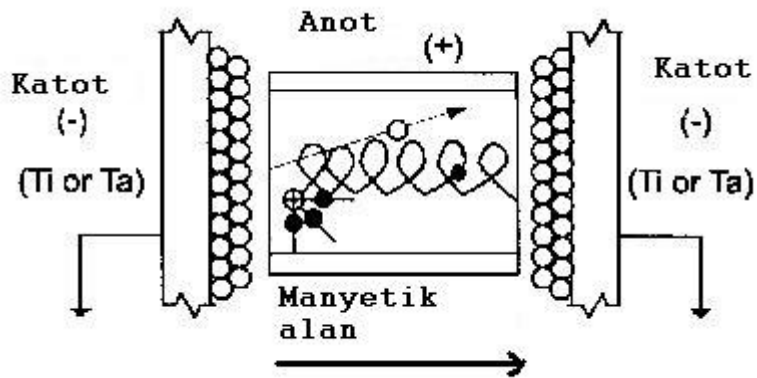
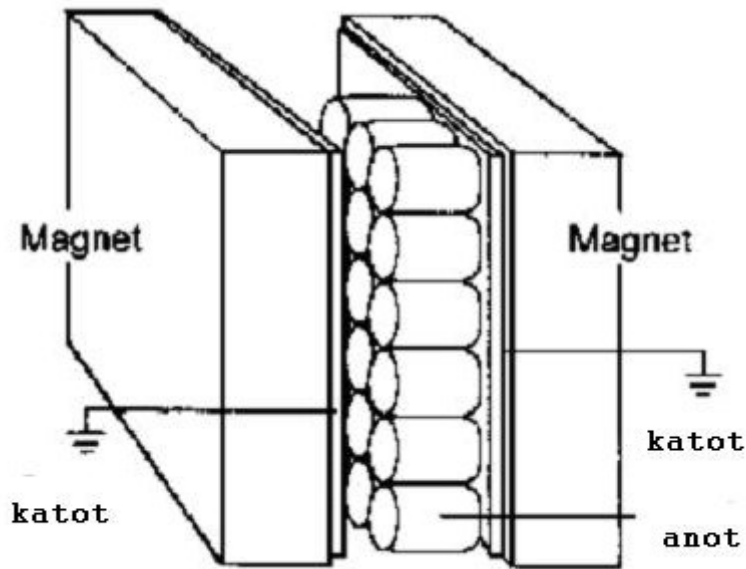
Gaz tipleri	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₂	
+ 20°C	3	4	9	9	8	3	0	0
- 196°C	10	10	11	11	9	14	0	0

3.6.3. İyon pompası

Vakum sistemindeki basınç, sorption pompası tarafından 10^{-3} tor’ a düşürüldüğünde devreye iyon pompası girer. İyon pompası sorption pompası gibi hareketli parçalar içermez. Bu yüzden yağ ve yağlayıcı maddelerde bulundurmaz. İyon pompası UHV için çok temiz ve mükemmel bir pompadır. Aynı zamanda sistemdeki basınç düştüğünde akım da düşer. Bunun iki yararı vardır. Birincisi pompa çok az güç çekeceği için oldukça ekonomiktir. İkincisi ise akımın azalması basınca bağlı olduğundan basınç ölçeri olarak da kullanılabilir. Böylece ayrı bir basınç ölçerine gerek kalmaz[18].

Pompalama işlemi iyon pompasının (Şekil 3.20’ de görüldüğü gibi) anot ve katoduna yüksek bir voltaj uygulanmasıyla başlar. Elektronlar anoda doğru hızlandırılır ve manyetik alan sebebiyle anot’ da spiral bir yol izlemeye zorlanır. Bu da elektronların daha fazla alanı süpürmesini sağlar. Aynı zamanda elektronların gaz molekülleriyle çarpışma olasılığını artıracak şekilde bir etki gösterir. Çarpışmada oluşan pozitif iyonlar aktif titanyum tabakasına çarparlar. İyonlar katot materyali ile birleşirler ve daha fazla katot materyali ortaya çıkarırlar. Bu olaylar anot yüzeyinde son bulur. Bu işlem aktif gaz molekülleriyle birleşmiş olan anodun yüzeyindeki kimyasal olarak aktif katot materyalini sürekli yeniden doldurur ve bunları sistemden

pompalar. Nitrojen, oksijen, hidrojen gibi kimyasal olarak aktif durumda bulunan gazların kaldırılması işlemine “gettering” denir[18].



Şekil 3.20. İyon pompasının şematik gösterimi [18]

Soy gazlar farklı bir şekilde ele alınırlar. Bu gazlar pompa yüzeyinde gizlenirler. Bu olay gazların katot içinde iyonlaştığı ve pompalandıkları zaman meydana gelir. Gazlar birkaç tabakaya etki ederler ve kendilerini katot tabakasına gömerler. Başka

iyonlar yüzeye çarptığında bu gazlar yeniden atılabilirler. Böylece bu tür gazların az bulunduğu yerlerde toplanırlar[18].

3.6.4. Cryosorption pompa

Cryosorption pompa çok temiz bir pompadır. Aynı zamanda ucuz ve basit bir sisteme sahiptir. Ancak titreşimler ciddi problemlere yol açabilir. Bu pompa aynı zamanda çok yüksek pompalama hızına sahiptir. Sistemdeki basıncı 760 tor'dan 10^{-3} tor'a kadar düşürmek için kullanılır. Bu pompada soğutma işlemi için sıvı nitrojen kullanılır[16].

3.6.5. Turbomoleküler pompa

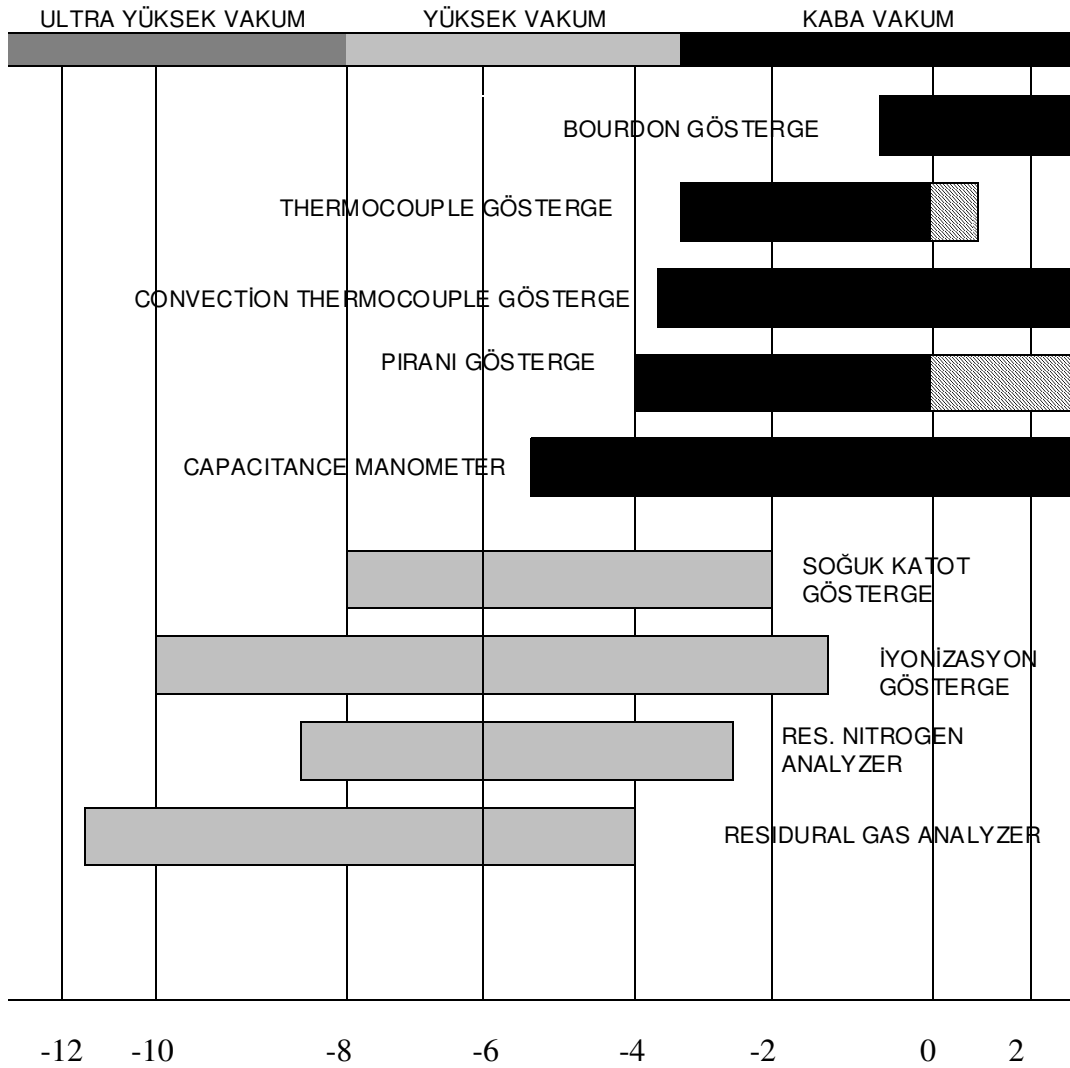
Çok temiz mekaniksel sıkıştırma pompalarıdır. Çok düşük UHV temel basıncına ulaşılması zordur. Bu pompa 10^{-3} ile 10^{-10} tor aralığında çalışır. Bu pompada gerekli olan periyodik bakım pahalı olabilir[16].

3.6.6. Rotary pompa

Rotary pompa düşük fiyatlı, dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Aynı zamanda yüksek pompalama hızına sahiptir. Yağ geri akışı kontrol edilmelidir. Bu pompa atmosfer basıncı olan 760 tor' dan 10^{-3} tor' a çıkmak için kullanılır[16].

3.6.7. Göstergeler (Gauges)

Vakum ve basınc ölçümünü gösteren cihazlardır. Bu göstergeler çok hassas cihazlar olup mekanik sarsıntıdan zarar görebilirler. Şekil 3.21' de basınç aralıklarına göre göstergeler gösterilmiştir[16].



Şekil 3.21. Göstergelerin vakum basınç aralıkları. Burada basınç birimi *tor* olup değerler 10' un üsleri şeklindedir[16]

Bourdon gösterge: Pozitif basıncı ve vakumu ölçmek için kullanılır. Vakum ölçüm duyarlılığı yaklaşık 0.1 *tor*' dur. Gazların kimyasal oluşumu için tamamen duyarsızdır[16].

Thermocouple gösterge: Bu göstergeler 1 mtor' dan 1000 mtor' a kadar sıcaklığı ölçebilirler. Bu gösterge çok dayanıklı, güvenilir ve ucuzdur[16].

Pirani gösterge: Bu göstergeler çok gelişmiş bir kontrol sistemini gerektirir. Thermocouple göstergelerden daha doğru ve daha hızlı gösterir. Ayrıca Pirani göstergeler gaz bileşenleri için duyarlıdır[16].

Kapasitans manometresi : Bu manometre geri besleme devresinde ve reaktör süreci içindeki basıncı ölçmek için kullanılır. Tek bir kapasitans manometresi, sadece 10^{-3} - 10^{-4} tor aralığındaki basıncı okuyabilir. Kapasitans manometresi son derece doğru ölçüm yapar. Hata payı % 1 oranındadır[16].

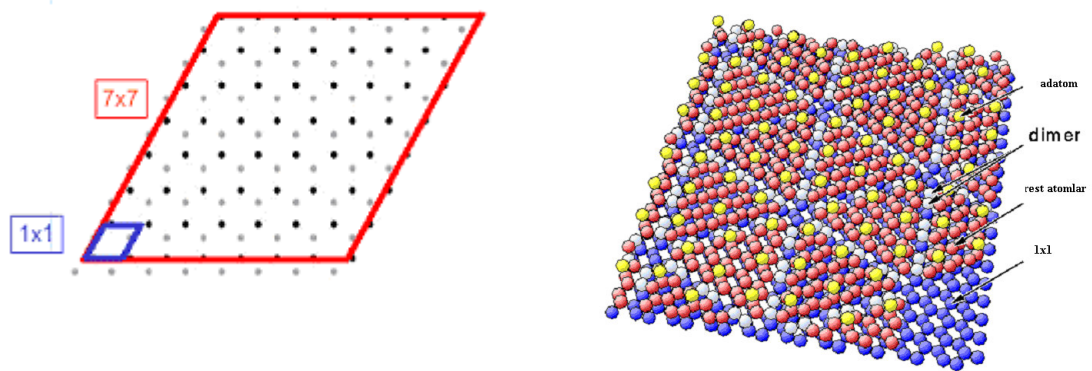
Sıcak flamen iyonizasyon gösterge: Bu göstergeler 10^{-3} - 10^{-11} tor aralığında çalışabilir. Ayarlandığında yaklaşık % 10 hata payı vardır[16].

Soğuk flamen iyonizasyon gösterge: Bu göstergeler, 10^{-2} - 10^{-8} tor aralığında çalışır. Sıcak flamen iyon göstergelerden daha dayanıklıdır fakat doğruluk payı onlardan düşüktür. Hata payı yaklaşık % 50 civarındadır[16].

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Giriş

Si yarıiletkeninin kristal yapısı elmas örgüdür. Si (111) – 7x7 yapıda toplam 49 tane 1x1' lik birim hücre vardır. Dört tane köşe boşluğu, sırt sırta gelmiş iki tane eşkenar üçgen oluşturur ve bu 7x7' lik birim hücredir. Her bir üçgen altı tane adatom ve üç tane de rest atom içerir. Bunlar , Şekil 4.1' de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Si (111) yüzeyinin (7x7) lik birim hücresinin gösterimi [19, 20]

4.2. Numune hazırlama

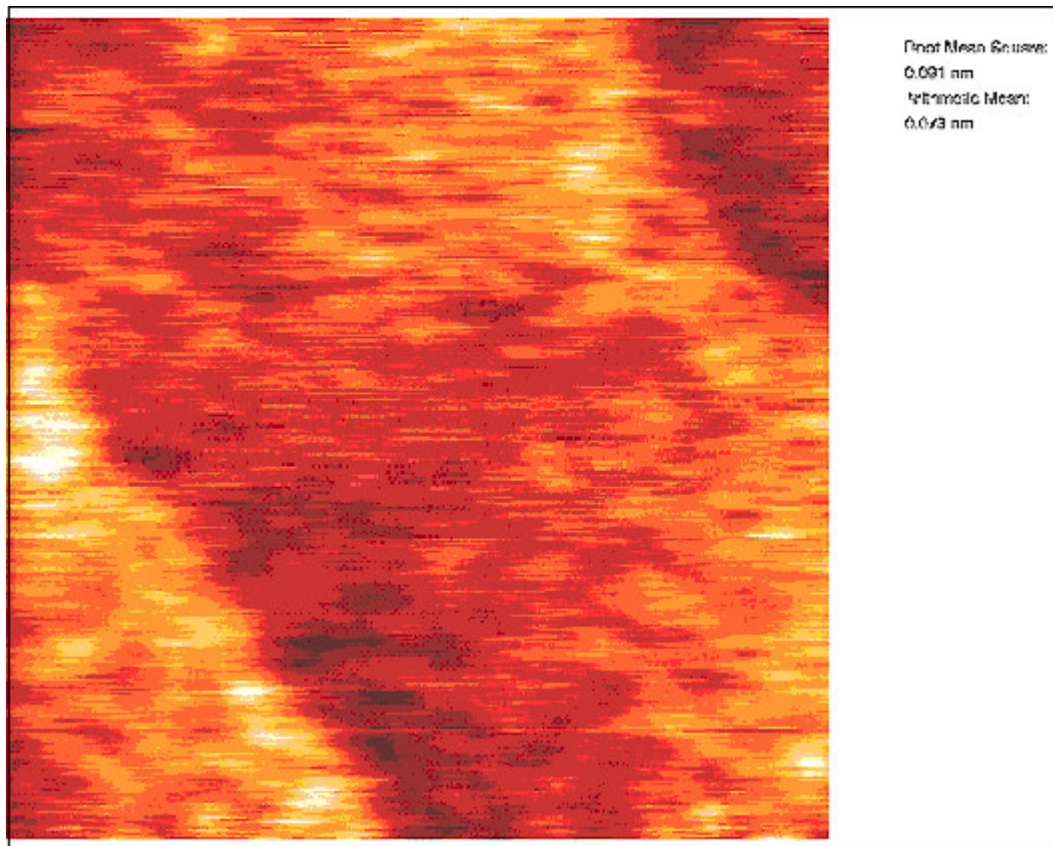
Bu çalışmada, Omicron firması tarafından bize sağlanan Si (111) yarıiletken numunesi kullanıldı. İlk önce Si ısıtma işlemi için kullanılacak olan özel numune tutucusuna uygun olarak 2x10 mm olarak kesildi. Numune tutucusuna yerleştirildikten sonra %99,8 saflıkta $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ (izopropil alkol) ile temizlendi. Numune cihaz içine yerleştirilip sistem vakuma alındı. İçerideki basıncın 2×10^{-10} mbar olduğu gözlemlendi. Daha sonra cihaz içinde aşağıdaki işlemler yapıldı.

- Numune birkaç saat direnç vasıtasıyla ısıtıldı. Bu işlem sistemin basıncı 10^{-10} mbar' a düştüğünde durduruldu. Bu aynı zamanda numune tutucusunun da temizlenmesini sağladı.
- Numunede bulunan yabancı atomların atılması ise 600 °C' de doğrudan ısıtma ile

- yapıldı. Bu işlem basıncın 10^{-10} mbar seviyesine geri döndüğünde durduruldu.
- c) Numune $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de birkaç saniye aralıklarla direk olarak akıma maruz bırakıldı. 10^{-9} mbar seviyesine geçtiğinde, işlem durduruldu ve basıncın 10^{-10} mbar Seviyesine geri dönmesi beklendi. Basıncıdaki değişim azaldığında işlem durduruldu.
- d) Numune soğumaya bırakıldı ve ölçümler alındı.

4.3. Ölçümler ve Tartışma

Bu çalışmada, STM ölçümlerine geçilmeden önce yüzeyin ne kadar pürüzsüz olduğunu gözlemlemek için $(250 \times 250 \text{ nm})$ ' lik bir alanda AFM ölçümü yapıldı ve Resim 4.1' de verildi. Ölçülen pürüzlülük parametresi (rms) (0.091 nm) olarak bulundu. Elde edilen bu ölçüme dayanarak yüzeyin oldukça düz olduğu sonucuna varıldı.



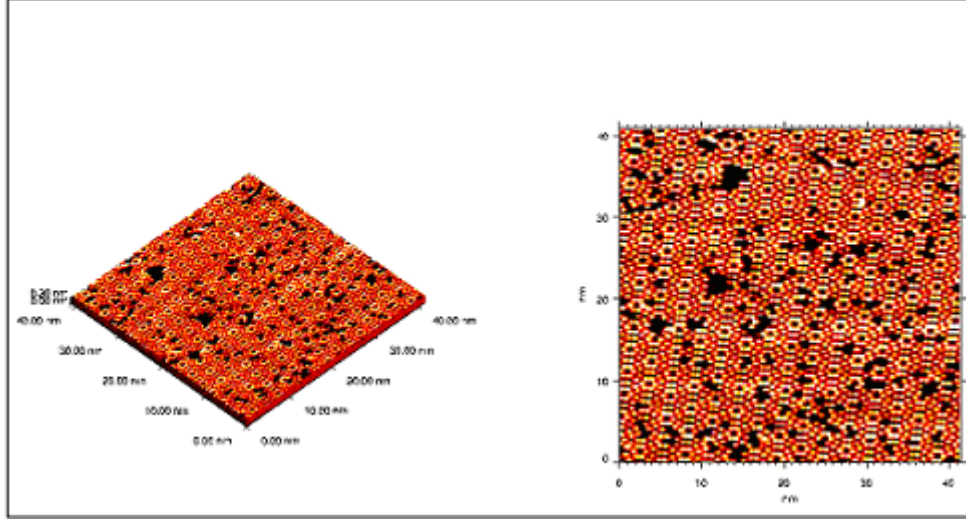
Resim 4. 1 Si(111) 7x7 yüzeyinin AFM görüntüsü.

AFM ölçümünden sonra üç değişik sıcaklık için STM ölçümleri yapıldı. Yüksek sıcaklık ile tanımladığımız bölge için numunenin üzerinden yaklaşık 60 dakika sabit akım ($I_h=300\text{mA}$) geçirildi. Cihaz içinde gerekli elektronik elemanlar kullanılarak, doğrudan ısıtma yöntemi de denilen bu yöntemle numune sıcaklığı $327\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarıldı. Numune sıcaklığı cihaz dışarısındaki belli bir uzaklıktan sıcaklıkölçer (pyometre) ile ölçüldü. Düşük sıcaklık bölgesi için sıvı azot kullanıldı ve numune sıcaklığı $-155\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürüldü. Oda sıcaklığı ölçümleri ise $25\text{ }^\circ\text{C}$ de yapıldı. Oda($25\text{ }^\circ\text{C}$), düşük($-155\text{ }^\circ\text{C}$) ve yüksek sıcaklık($327\text{ }^\circ\text{C}$) bölgelerindeki STM ölçüm parametreleri Çizelge 4.1' de verildi.

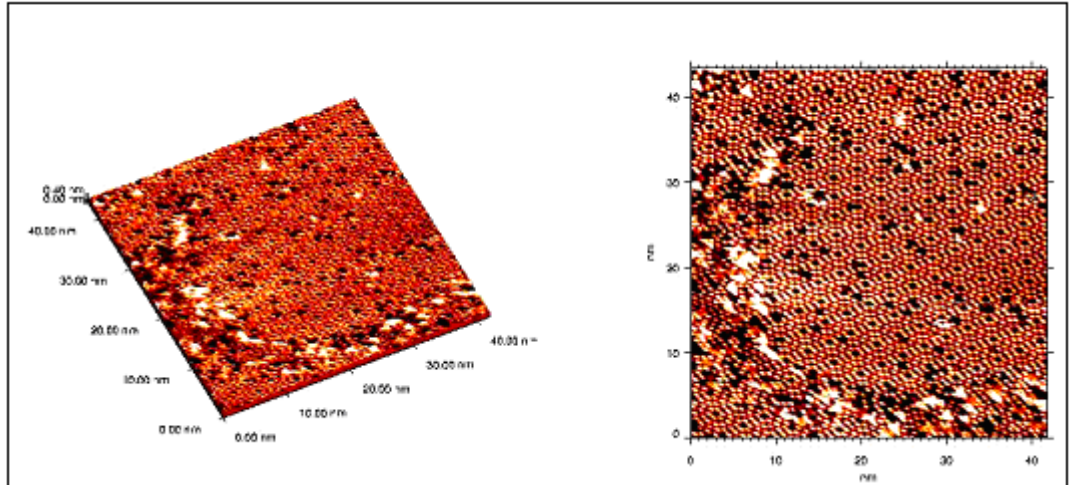
Çizelge 4.1. Değişik sıcaklık bölgeleri için STM ölçüm parametreleri

	BOŞLUK GERİLİMİ (V)	GERİ BESLEME AKIMI (NA)	DÖNGÜ KAZANCI	TARAMA HIZI (NM/S)	PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRESİ RMS(NM)
Oda Sıcaklığı	1,816	0,905	3,96	136.449	0,015
Düşük Sıcaklık	1,815	1,325	3,96	416.567	0,030
Yüksek Sıcaklık	1,815	1,269	4,05	500.000	0,041

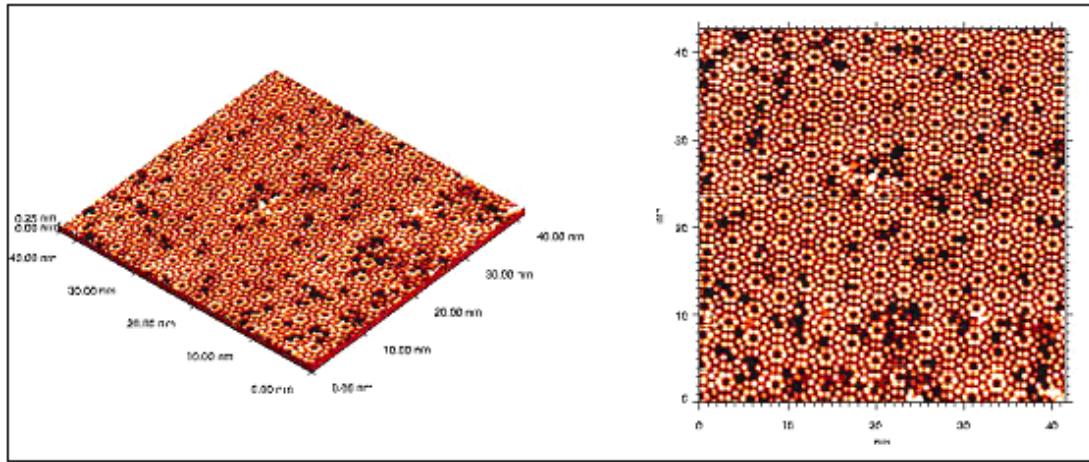
Üç sıcaklık bölgesinde yaklaşık $40\times 40\text{ nm}$ ' lik yüzeyde elde edilen görüntüler hem iki hem de üç boyutta Resim 4.2 , Resim 4.3 , Resim 4.4' de verildi. Bu yüzeyler için ayrıca ölçülen pürüzlülük parametreleri de Çizelge 4.1' de verildi.



Resim 4.2. Yüksek sıcaklıkta (327°C) alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüsü



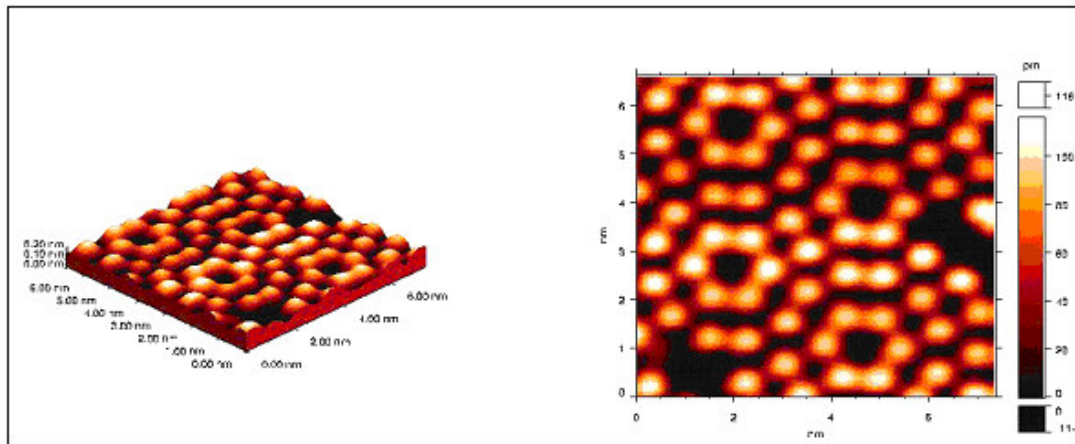
Resim 4.3. Düşük sıcaklıkta (-155°C) alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüsü



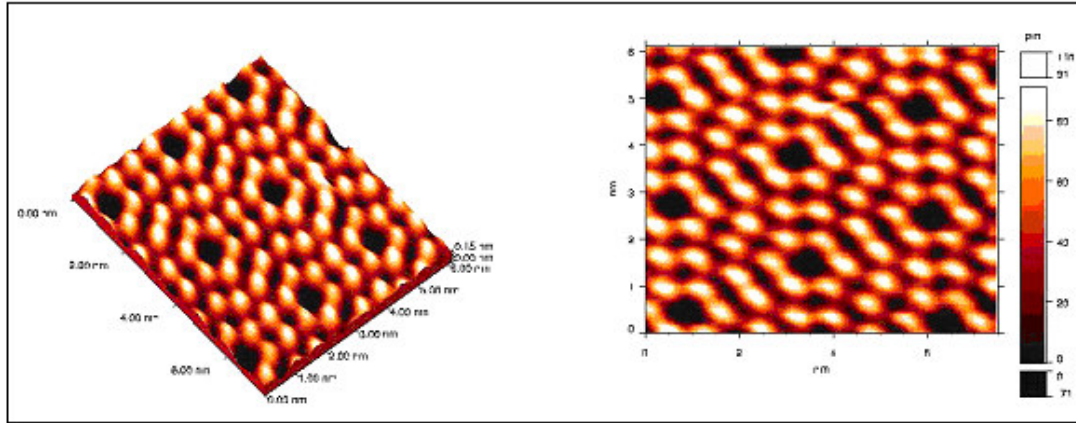
Resim 4.4. Oda sıcaklığında (25°C) alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri

Düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerindeki elde edilen görüntülerin oda sıcaklığına göre daha az net oluşunun sebebi Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi tarama hızının daha büyük olmasındandır. Oda sıcaklığında diğer sıcaklık bölgelerine nazaran tünelleme akım değerleri ve pürüzlülük parametreleri daha düşüktür.

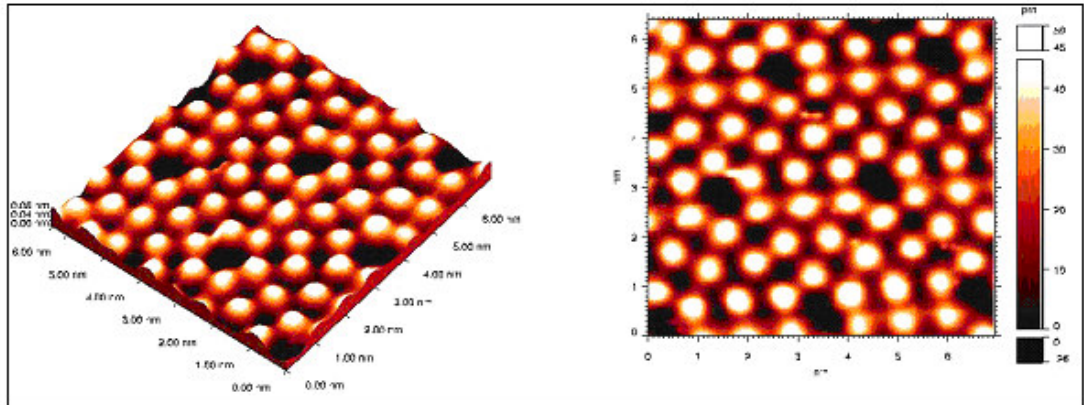
Üç sıcaklık bölgesi için 7x7’lik birim hücreyi görebilmek için yaklaşık 6X6nm’ lik bir yüzey seçildi ve bunlara ait iki ve üç boyutlu görüntüler Resim 4.5, Resim 4.6, Resim 4.7’ de verildi.



Resim 4.5. Yüksek sıcaklıkta (327°C) alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri

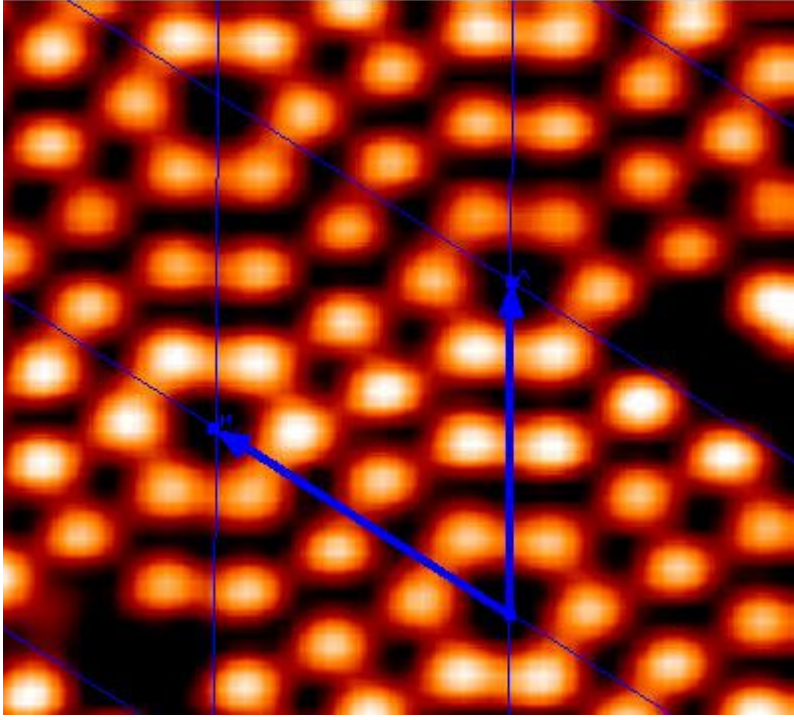


Resim 4.6. Düşük sıcaklıkta alınan (-155°C) iki ve üç boyutlu STM görüntüleri

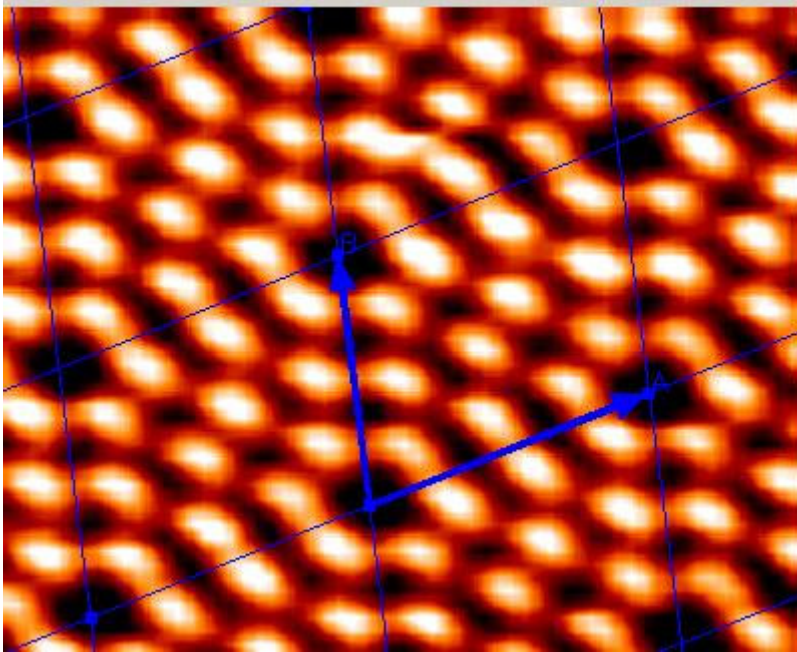


Resim 4.7. Oda sıcaklığında (25°C) alınan iki ve üç boyutlu STM görüntüleri

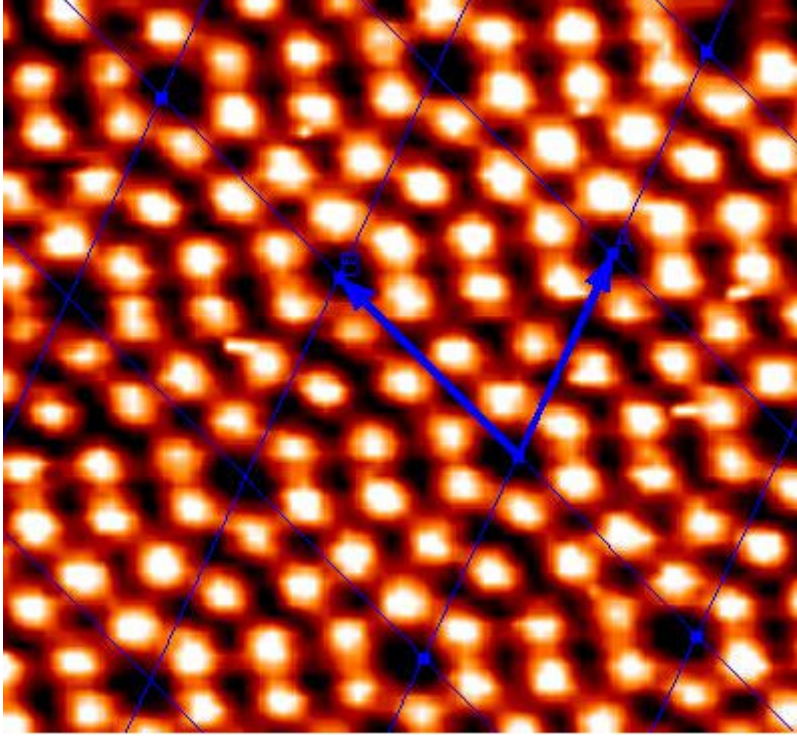
Bu yüzeyler üzerinde Si (111)- 7×7 ' nin birim hücresi Resim 4.8, Resim 4.9, Resim 4.10' da gösterildi.



Resim 4.8. Yüksek sıcaklıkta (327°C) alınan Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü

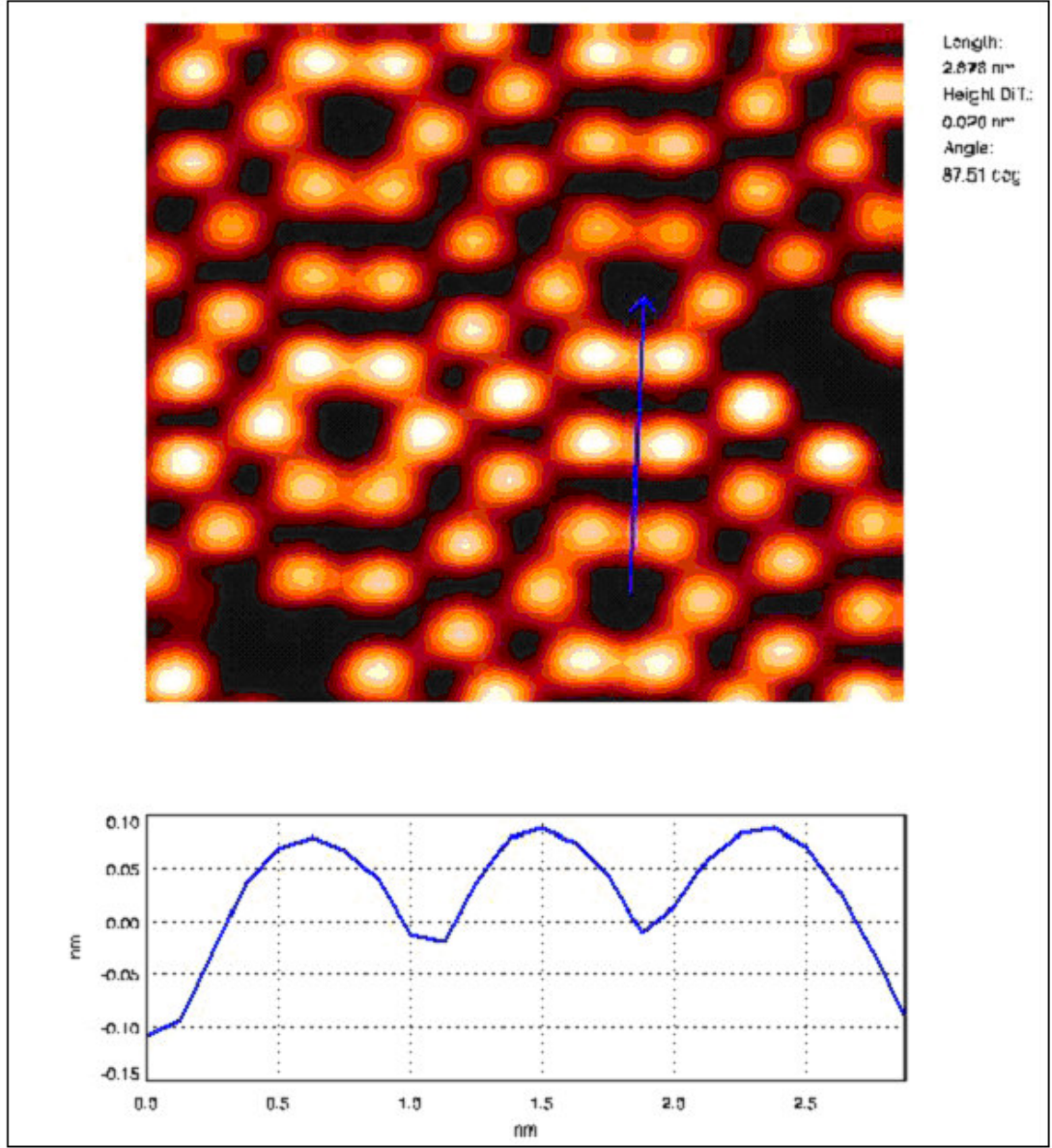


Resim 4.9. Düşük sıcaklıkta alınan (-155°C) Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü

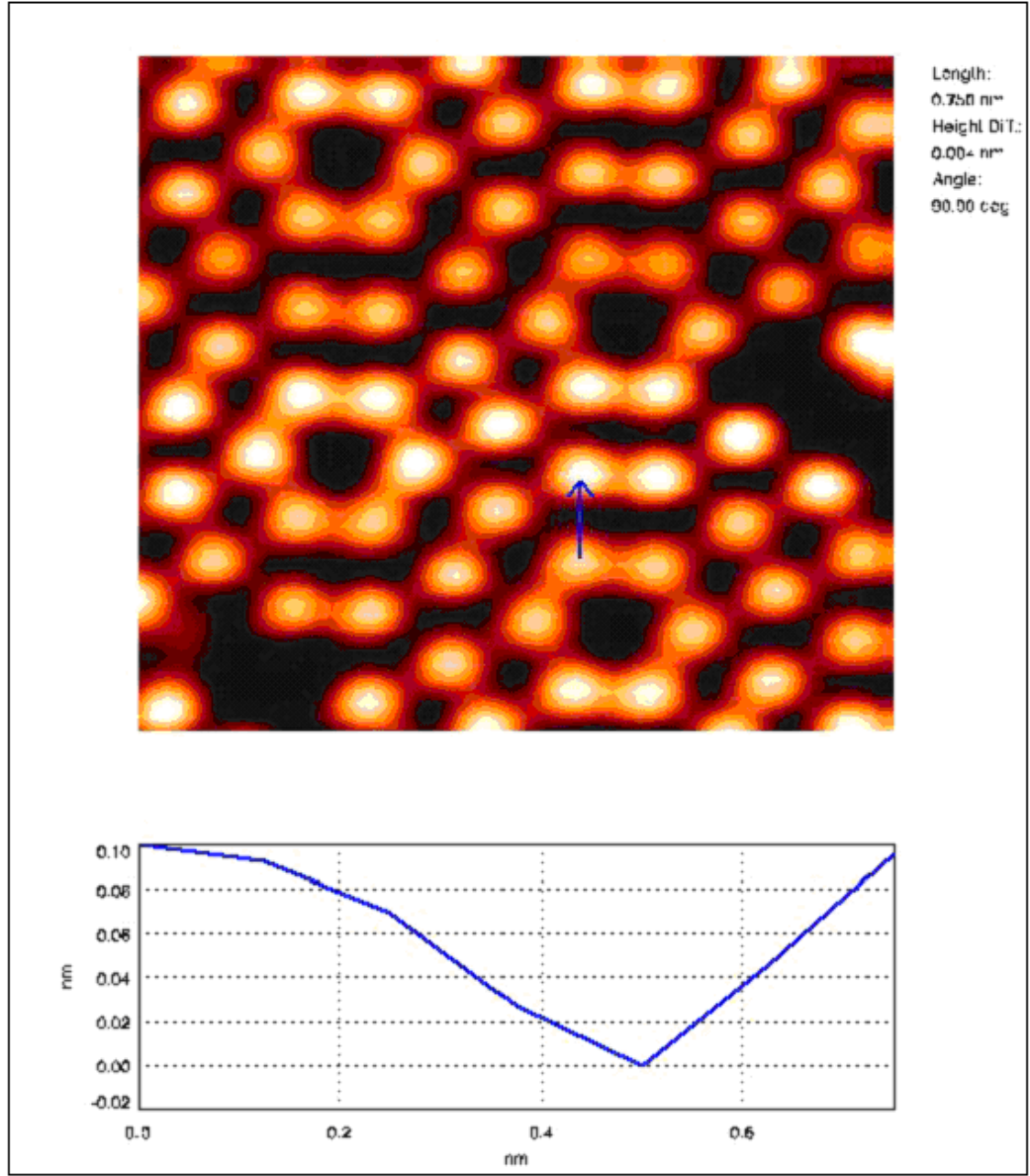


Resim 4.10. Oda sıcaklığında (25°C) alınan Si(111)-7x7' nin birim hücre görüntüsü

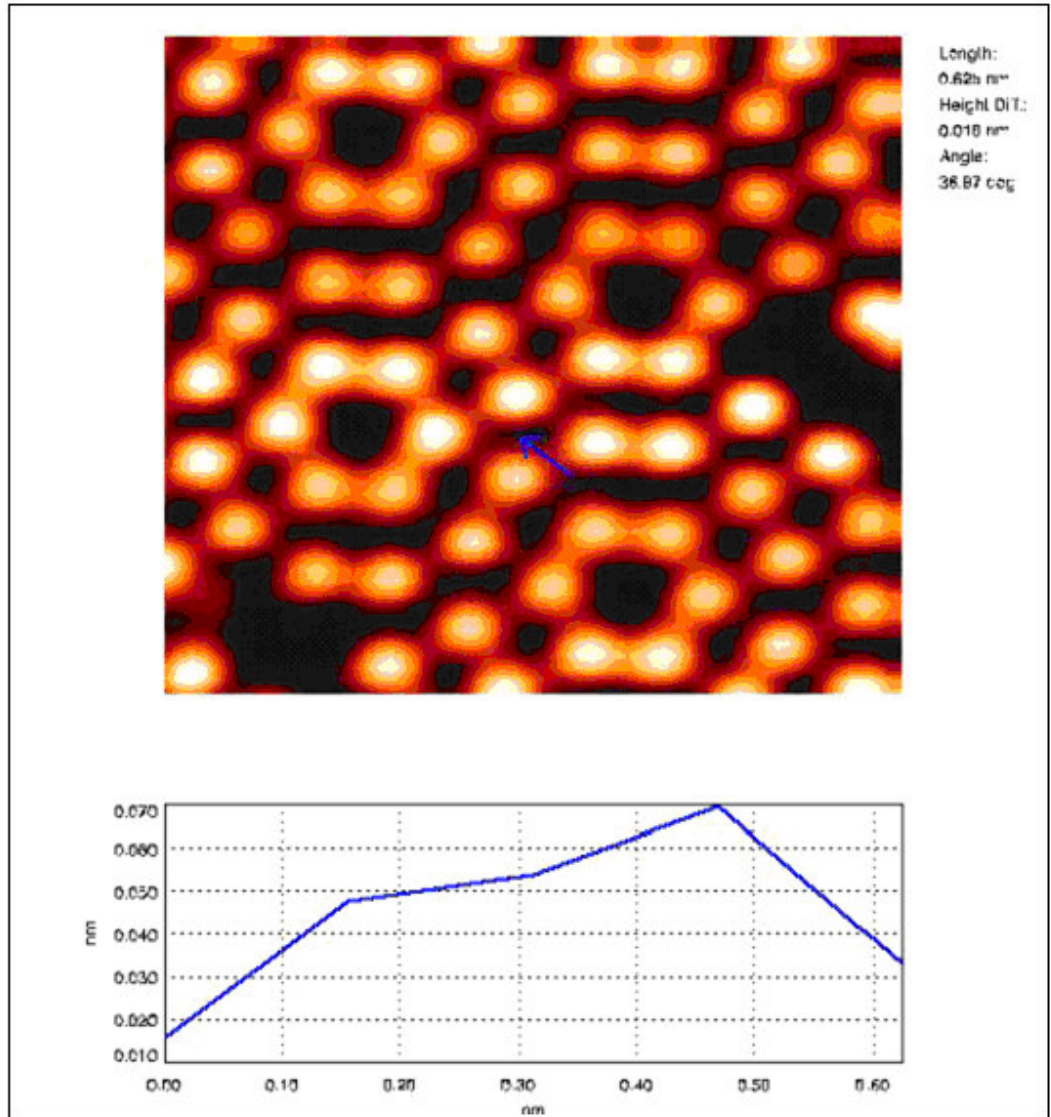
Oda sıcaklığında elde edilen görüntülerin daha önceki teorik ve deneysel çalışmalarla uyduğu görüldü. Ayrıca Si' un örgü sabitini bulmak için değişik sıcaklıklarda çeşitli analizler yapıldı. İlk önce Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da görüldüğü gibi köşe boşlukları, adatomlar ve rest atomlar arasındaki uzaklıklar ölçüldü.



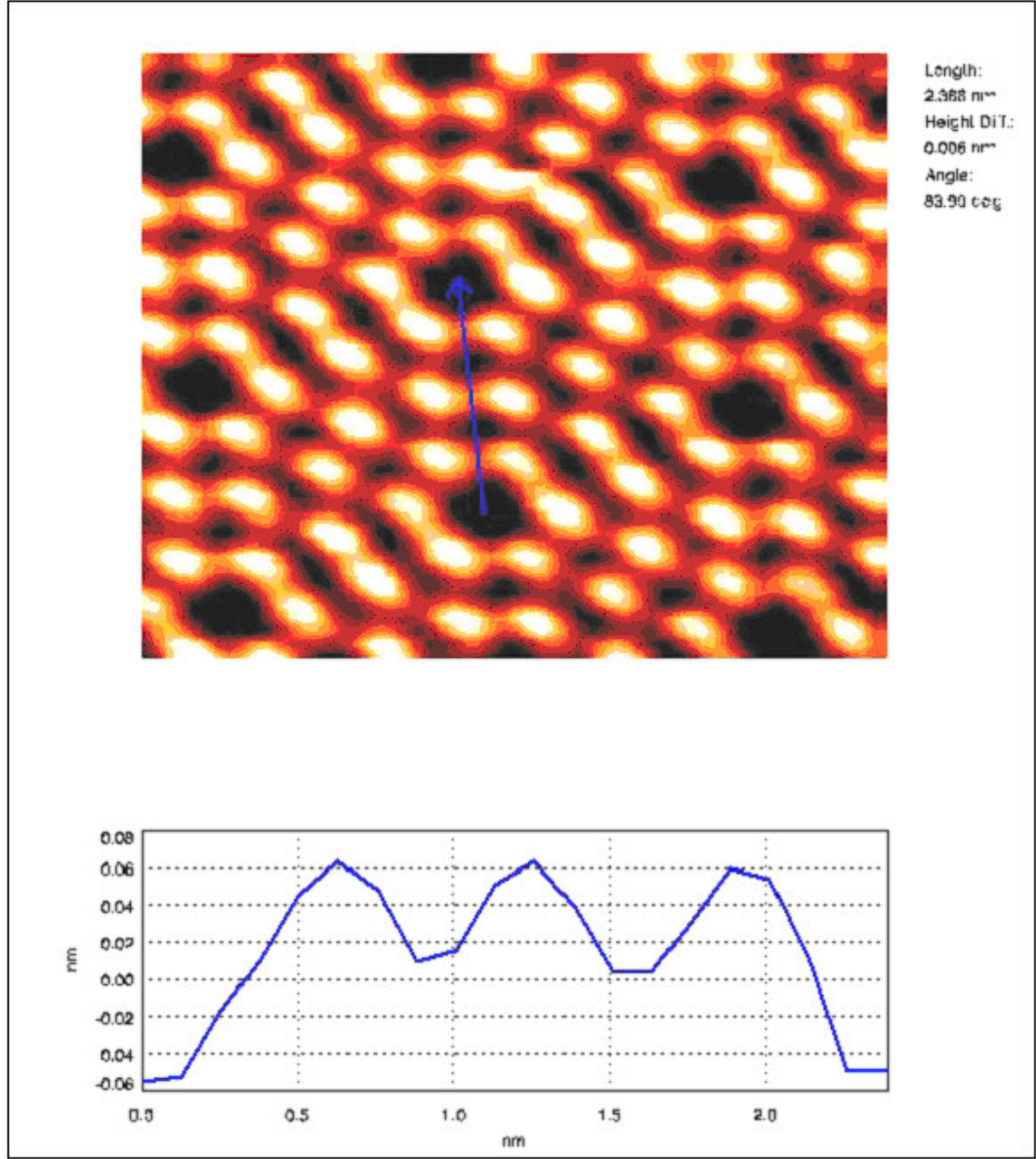
Şekil 4.2. Yüksek sıcaklıkta (327°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe



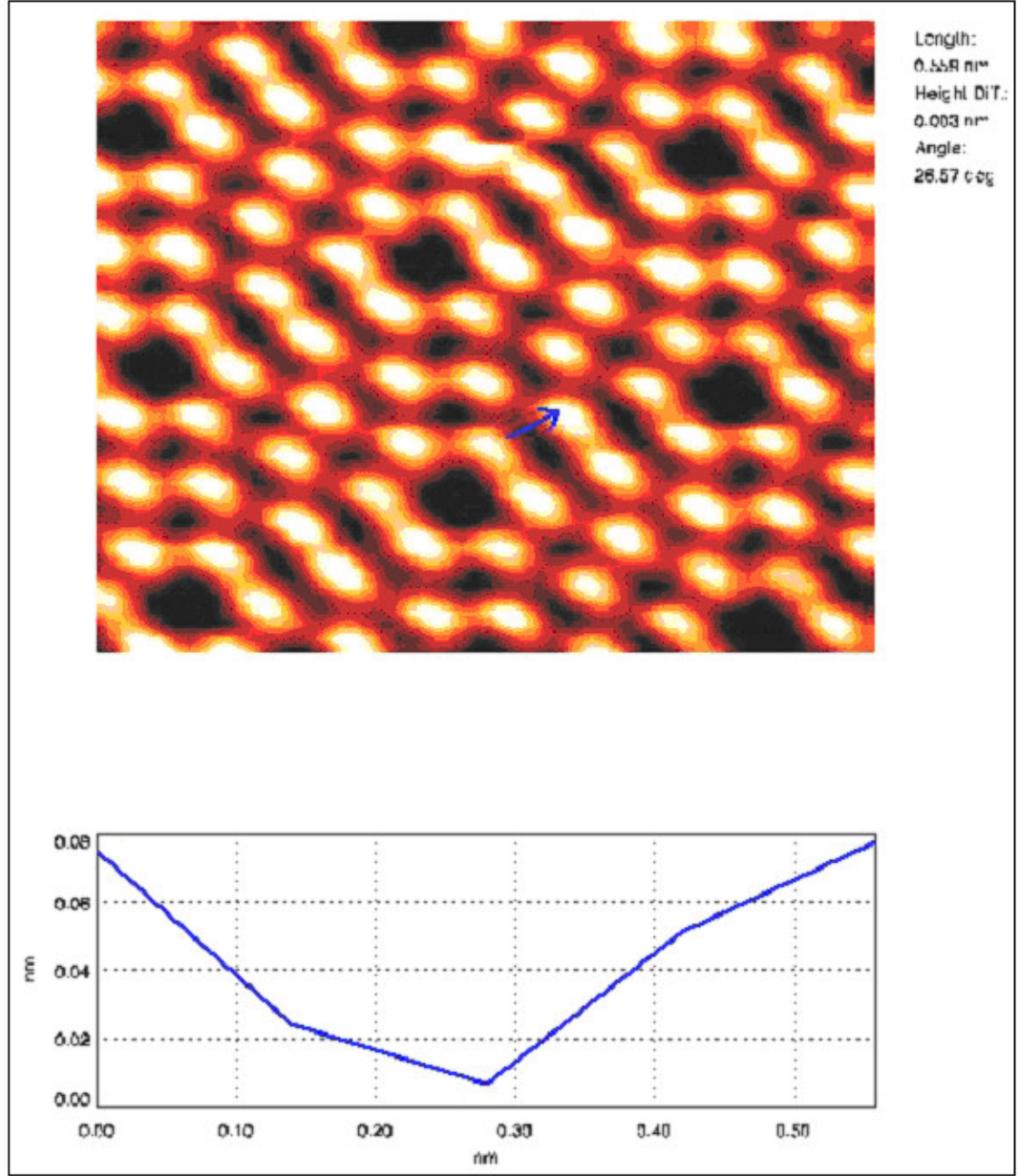
Şekil 4.3. Yüksek sıcaklıkta (327°C) adatomlar arasındaki mesafe



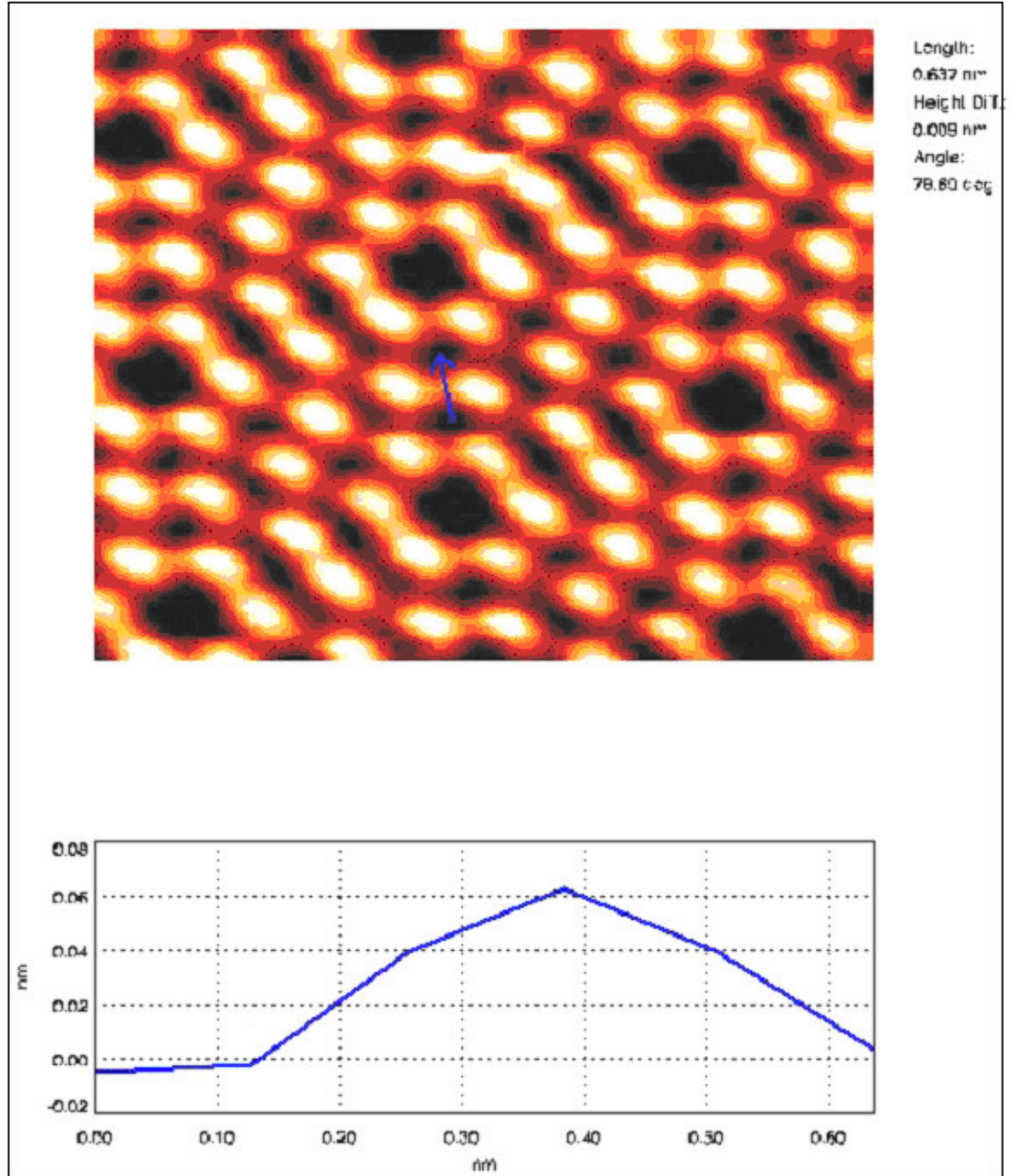
Şekil 4.4. Yüksek sıcaklıkta (327°C) rest atomlar arasındaki mesafe



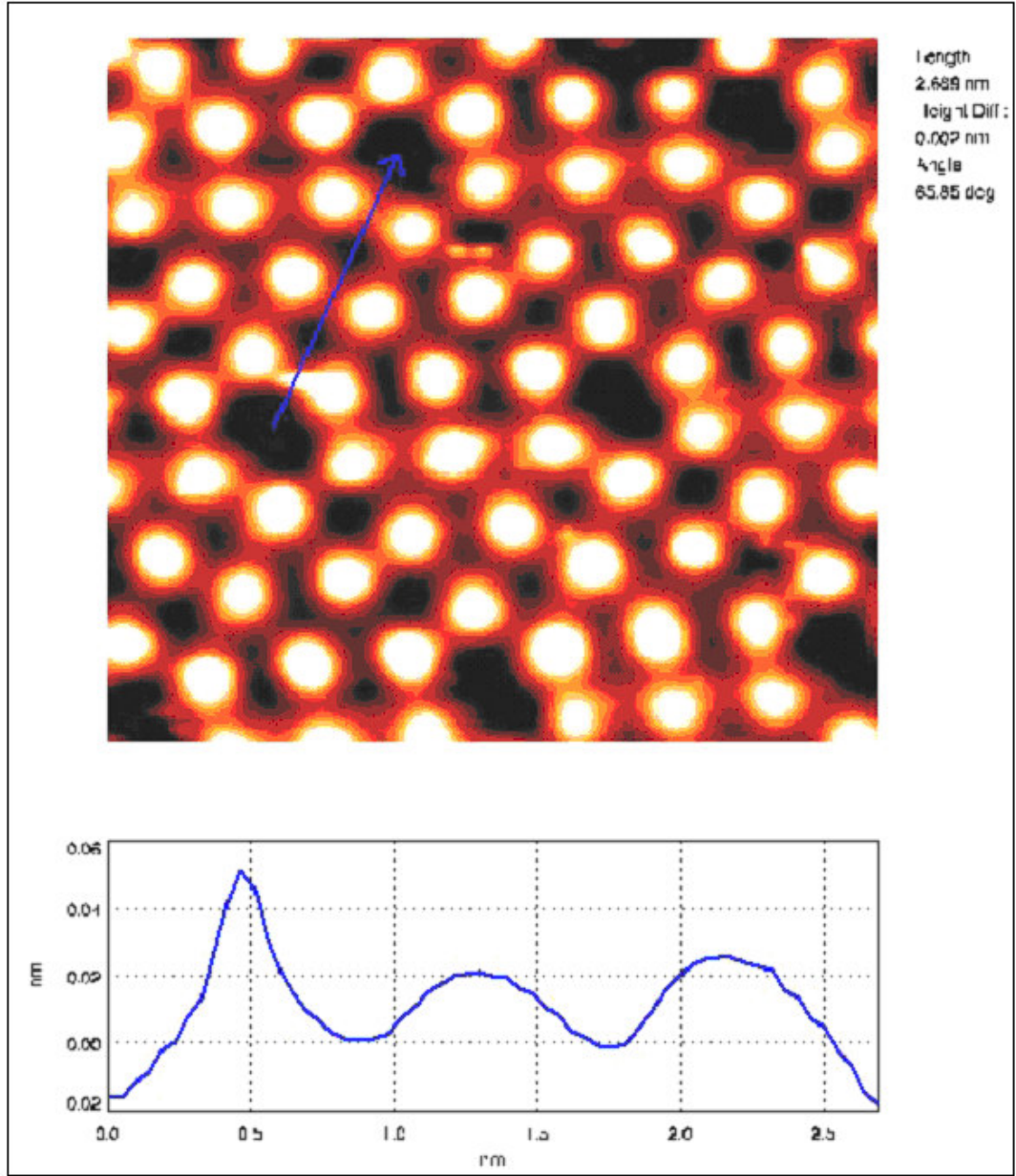
Şekil 4.5. Düşük sıcaklıkta (-155°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe



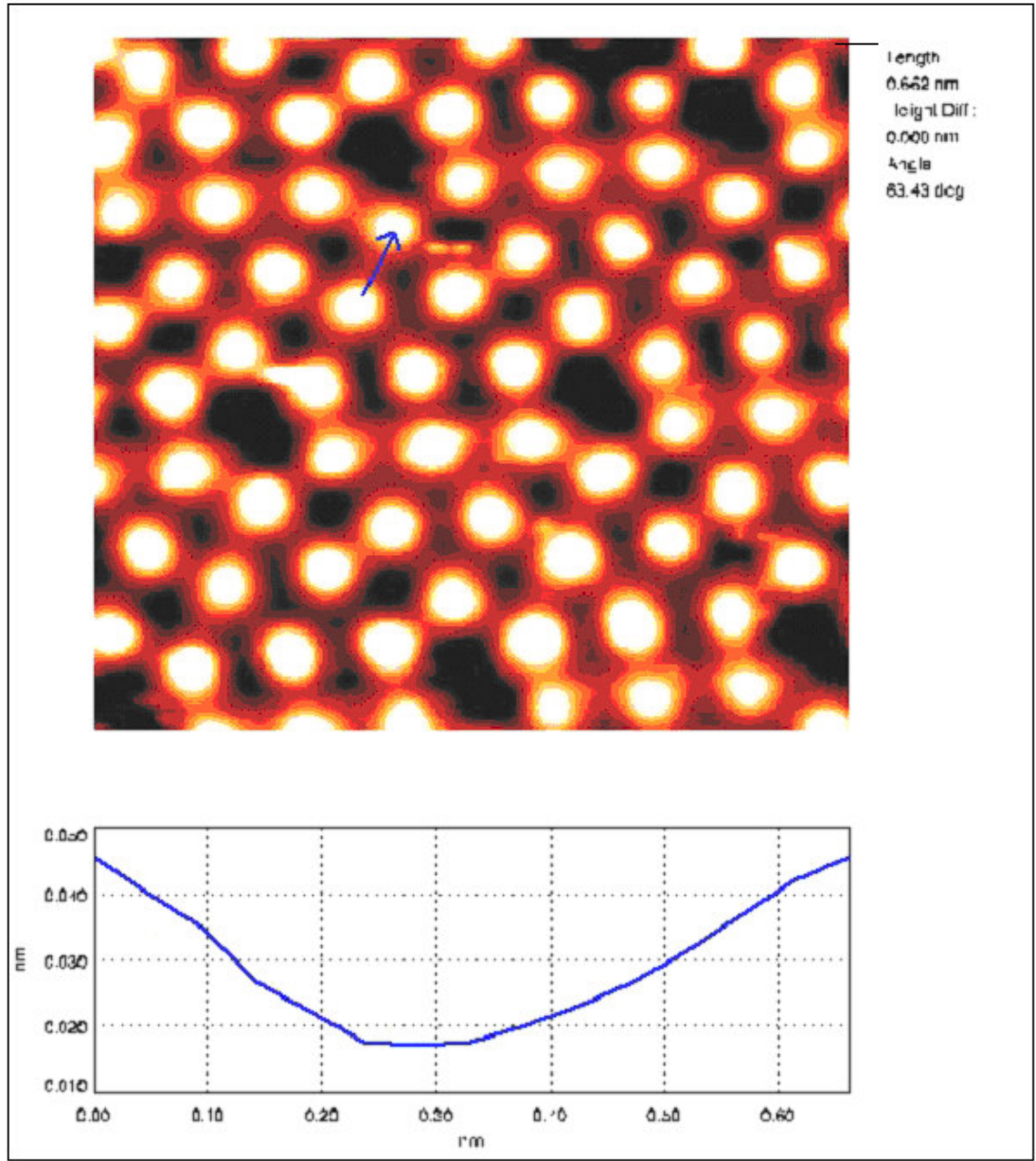
Şekil 4.6. Düşük sıcaklıkta (-155°C) adatomlar arasındaki mesafe



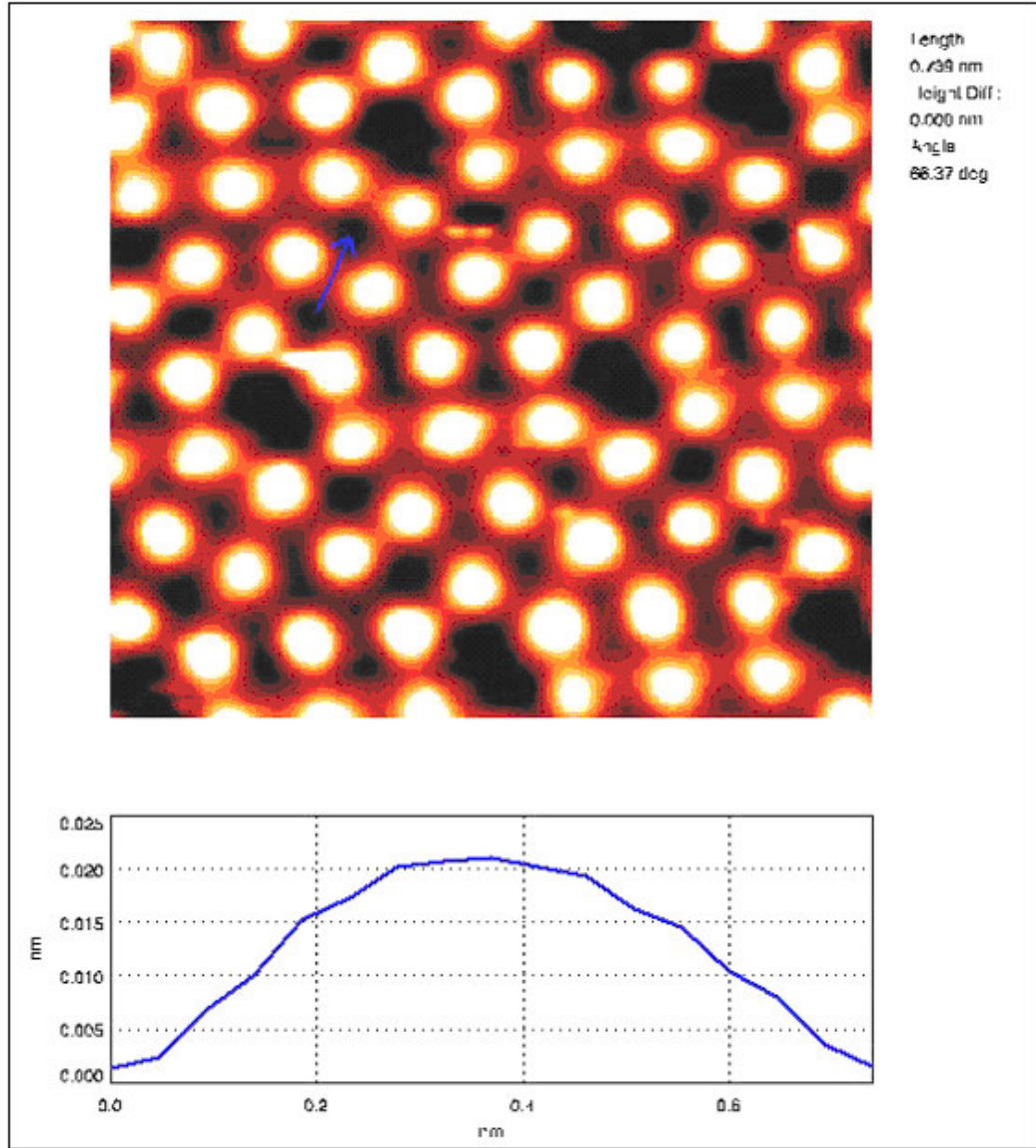
Şekil 4.7. Düşük sıcaklıkta (-155°C) rest atomlar arasındaki mesafe



Şekil 4.8. Oda sıcaklığında (25°C) köşe boşlukları arasındaki mesafe



Şekil 4.9. Oda sıcaklığında (25°C) adatomlar arasındaki mesafe



Şekil 4.10. Oda sıcaklığında (25°C) rest atomlar arasındaki mesafe

Çizelge 4.2 Ölçülen ve hesap edilen uzaklıklar

Sıcaklık	Köşe boşlukları arasındaki mesafe (c-h) (nm)	Adatom (nm)	Rest atom (nm)	Köşe boşluklarından hesaplanan örgü sabiti (nm)	Adatomlar arası uzaklıktan hesaplanan örgü sabiti (nm)
Oda sıcaklığı	2,689	0,662	0,739	0,543	0,540
Düşük sıcaklık	2,368	0,559	0,637	0,478	0,456
Yüksek sıcaklık	2,878	0,750	0,629	0,581	0,612

Ölçülen köşe boşlukları ve adatomlar arasındaki mesafeden gidilerek Si için örgü sabitleri her üç sıcaklık bölgesi için, Şekil 2.9 ve Şekil 4.1 göz önünde bulundurularak ayrı ayrı hesaplandı ve Çizelge 4.2’ de verildi. Oda sıcaklığında hesaplanan örgü sabiti deneysel değer olan [5] 0,543nm ile tam uyuşmaktadır. Düşük sıcaklık bölgesinde atomlar arası mesafenin azaldığı, yüksek sıcaklık bölgesinde ise bu mesafenin arttığı yapılan ölçümlerden anlaşılmaktadır. Yine köşe boşlukları ve adatomlar arasındaki mesafeden teorik olarak hesapladığımız örgü sabitlerinin değerleri deneysel değerlerle uyuşmaktadır.

KAYNAKLAR

1. H. Kobayashi, K. Edamoto, M. Onchi, and M. Nishijima, “ Reactions of atomic hydrogen with the Si(111) (7×7) surface by high resolution electron energy loss spectroscopy”, *J. Chem. Phys*, 78: 7429 (1983).
2. G. Schulze and M. Henzler, “ Adsorption of atomic hydrogen on clean cleaved silicon (111)” , *Surf. Sci*, 124: 336 (1983).
3. K. Mortensen, D. M Chen, P.J. Bedrossian, J.A. Golovchenko, and F. Besenbacher, “ Two reaction channels directly observed for atomic hydrogen on the Si(111)-7×7 surface” , *Phys. Rev*, B 43: 1816 (1991).
4. J.J. Boland “ The importance of structure and bonding in semiconductor surface chemistry: hydrogen on the Si(111)-7 × 7 surface” , *Surf. Sci*, 244: 1 (1991).
5. KITTEL C., ‘Introduction to Solid State Physics’, *John Wiley&Sons*, Inc., 1-39, 139-163, 381-385 (1986).
6. İnternet: SEM- Taramalı Elektron Mikroskopu, <http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm> (2005).
7. İnternet: Transmissing Electron Microscope, <http://www.stanford.edu/group/snl/tem.htm> (2006).
8. Serway, A.,R., “Serway, 3 ed.”,Çev. Ed. Çolakoğlu, K., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 1205-1208 (1996).
9. İnternet: CNRS-IRC, Theory/ Scanning ProbeMicroscopies (STM/AFM) Service, <http://catalyse.univ-lyon1.fr/websmcp/english/0theoriechamproche.html> (2005).
10. İnternet: STM Theory, <http://www.fkf.mpg.de/ga/research/stmtutor/stmtheo.html> (2000).
11. Spanos, L., “Studies of Silicon Surface Roughness Using Fractals, Atomic Force Microscopy and Spectroscopic Ellipsometry”, Ph. D. Thesis, *Univercity of North Carolina at chapel Hill*, 23-29 (1994).
12. İnternet: Chapter 3 Atomic Force Microscopy, <http://www.friedli.com/research/PhD/force/chap3.html> (2006).
13. İnternet: STM, http://yunus.hacettepe.edu.tr/~emrecan/stm/stm_t_index.htm (2006).
14. İnternet: General Tutorial- Atomic Force Microscopy,

www.lot-oriel.com/site/site_down/pn_tutorial_deen.pdf (2005).

15. Oura, K., Lifshits, V.G., Saranin, A.A., Zotov, A.V., Katayama, M., “Surface science”, **Springer**, Osaka and Vladivostok 19-37, 159-168 (2003)
16. Internet: EE-527: MicroFabrication Vacuum Systems,
<http://www.ee.washington.edu/research/microtech/cam/PROCESSES/PDF%20FILES/VacuumSystems.pdf> (2006)
17. Internet: VG Scienta E Commerce,
http://www.vacgen.com/asp/catalogue.asp?url=http%3A//www.vacgen.com/catalogue/section-7/page07_16.htm&frame=1 (2006).
18. Internet: The Ion Pump- Don't try UHV without it,
<http://www.stthomas.edu/physics/research/atomtrappers/summer99/vacuum/ion/> (2006).
19. Internet: Si(111)- (7x7) DAS model (Takayagani/Tong),
<http://www.fhi-berlin.mpg.de/th/personal/hermann/Si7x7surface.gif> (2006).
20. Internet: Si(111): Bulk 1x1 and Reconstructed 7x7 Unit Cells,
http://www.courses.vcu.edu/PHYS550/lectures/PHYS550_STMAFM.PDF (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Alaşalvar, Can
Uyruğu : TC
Doğum tarihi ve yeri : 13.10.1980 Giresun
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0505 507 10 03
e-mail : canalasalvar@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	19 Mayıs Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2003
Lise	Giresun Lisesi	1997

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Müzik, Buz Pateni