

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

$\text{SiO}_2:\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$ İnce Filmlerde Ge Nanokristallerin Elektron Mikroskobu ile
Görüntülenmesi ve Teknolojik Uygulamaları

Ahmet ÖZDEMİR

KIRIKKALE

HAZİRAN 2011

Fizik Anabilim Dalında Ahmet ÖZDEMİR tarafından hazırlanan $\text{SiO}_2:\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$ ince filmlerde Ge nanokristallerin elektron mikroskobu ile görüntülenmesi ve teknolojik uygulamaları adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Sedat AĞAN _____

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR _____

Üye : Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. İhsan ULUER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

SiO₂:Si/Ge/Si/SiO₂ İNCE FİLMLERDE Ge NANOKRİSTALLERİN ELEKTRON MİKROSKOBU İLE GÖRÜNTÜLENMESİ VE TEKNOLOJİK UYGULAMALARI

ÖZDEMİR, Ahmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR

Haziran 2011, 73 sayfa

Bu tez çalışmasında, SiO₂/Si/Ge/Si/SiO₂ çok katlı yapı içerisinde Ge nanoyapıların yapısal özelliklerinin HRTEM (Yüksek çözünürlüklü Geçirgen Elektron Mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir. İnce filmler GeH₄, SiH₄ ve N₂O gazlarının belirli akış oranları kullanılarak PECVD tekniği ile büyütüldü. PECVD cihazı kullanılarak üretilmiş örnekler, tavlammamış ve iki farklı sıcaklık değerinde tavlammış olarak hazırlanıp HRTEM görüntüleri alındı. Isıl tavlamanın Ge nanoyapıların özelliklerine olan etkileri saptandı. HRTEM yöntemi ile belirli bir sıcaklıktaki tavlamalardan Ge nanoyapıların oluşturulabileceği ve bu nanoyapıların yoğunluğunun tavlama sıcaklığı ve süresi ile ayarlanabileceği gösterildi. Ayrıca artan sıcaklığın nano yapıların oluşumunu doğrudan etkilediği tespit edildi.

Anahtar kelimeler: Ge nanoyapı, HRTEM, PECVD, Silikon dioksit, Çok katlı yapı.

ABSTRACT

INVESTIGATED WITH BY USING HRTEM OF NANOCRYTALS IN
 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$
THIN FILMS AND IT'S TECHNOLOGICAL PROPERTIES

ÖZDEMİR, Ahmet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, MS. Thesis

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR

January 2011, 73 pages

In this thesis, structural properties of Ge nanostructures in $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$ multilayers have been investigated by using HRTEM. Thin films have been grown with different flow rates of GeH_4 , SiH_4 and N_2O gases by PECVD method. In the next step, the HRTEM images of these films have been observed after processing with asgrown and annealing in two different temperatures. The effects of annealing on the specifications of Ge nanostructures have been examined. It was showed by HRTEM method that the Ge nanostructure could be produced with annealing them in definite temperature and the densities of these nanostructures could be cotrolled by the temperature and the duration of annealing time. Moreover it has been observed that rising the annealing temperature directly effected the formation of nanostructures.

Keywords: Ge Nanocrystal, HRTEM, PECVD, SiO_2 , Thin Film.

TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen ve bizim gibi genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR 'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Prof. Dr. Sedat AĞAN'a, deneysel tecrübelerini birebir uygulamalı anlatımlarla benimle paylaşan değerli bilim adamı, Sayın Dr. Bünyamin ŐAHİN'ne büyük fedakarlıklarla bana destek olan ve birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da maddi ve manevi konularda yardımlarını esirgemeyen AİLEM 'e teşekkür ederim. Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi 2009/41 numaralı BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Nano Teknoloji	3
2. MATERYAL VE YÖNTEM	11
2.1. Nanoteknolojinin Tekstildeki Uygulamaları	11
2.2. Nanoteknolojinin Sağlıkta Uygulamaları	13
2.2.1. Nano Tıp	14
2.2.2. Nanoteknolojinin İlaç Taşıyıcı Sistemler Üzerinde Uygulamaları	15
2.3. Nano Teknolojinin Sanayideki Uygulamaları	16
2.4. Nano Teknolojinin Elektronikteki Uygulamaları	17
2.4.1. Katılarda Bağlanma	18
2.4.1.1. İyonik Katılar	19
2.4.1.2. Kovalent Kristaller	20
2.4.1.3. Metalik Katılar	21
2.4.2. Metallerin Serbest Elektron Teorisi	21
2.4.3. Atomun Yapısı	23
2.4.4. Enerji Bantları Modeli	26
2.4.5. Katıların Bant Teorisi	28
2.4.6. Yarıiletken Nanokristallerde Enerji Seviyeleri	36
2.5. SiO ₂ Matrisi İçerisinde Yarıiletken Nanokristallerin Oluşumu	38
2.6. Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buharlaştırma Sistemi (PECVD)	40
2.7. Nanokristal Oluşum Teorisi	43
2.7.1. Ostwald Topaklanması	44

2.7.2. SiO _x İçerisinde Oluşan Ge Nanokristaller	45
2.8. Tavlama Fırını	46
2.9. İyon Bombardımanı İle Numune Hazırlama	48
2.10. Geçirgen Elektron Mikroskobu (TEM)	49
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	52
3.1. Giriş	52
3.2. Numune Hazırlama	52
3.3. TEM Sonuçları	53
3.3.1. Tavlınmamış Numunelerin TEM Görüntüleri	54
3.3.2. 700 °C de Tavlınmış Numunelerin TEM Görüntüleri	56
3.3.3. 850 °C de Tavlınmış Numunelerin TEM Görüntüleri	62
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kabullarda bulunması mümkün olabilen elektron sayıları	25
2.2. Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma reaksiyonları	41
3.1. 700 ⁰ C ve 850 ⁰ C deki numuneler için büyüme şartları	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Son dört asırda bilim ve teknolojiye meydana gelen değişimler.....	3
Şekil 1.2. Elektron ve deşiklerin farklı boyutlardaki hali. $d = 1, 2, 3$, için durumların yoğunluğu $\rho(E) \propto E^{d/2-1}$ formülüyle ifade edilir. Durum yoğunluğu: (a) hacimli, (b) kuantum kuyusu, (c) kuantum çizgisi, (d) kuantum noktası.....	9
Şekil 2.1. Şekilde basit kübik, yüzey merkezli kübik ve uzay merkezli kübik yapıdaki kristallerin temsili resmi.....	19
Şekil 2.2. a) C atomunun kovalent bağlanma yapısının elmas yapı gösterimi b) C atomunun elmas örgüdeki en yakın komşuların tetrahedral yapı (kapalı yapı) gösterimi.....	20
Şekil 2.3. Değişik sıcaklıklar için Fermi-Dirac dağılımının gösterimi.....	22
Şekil 2.4. Bohr atom modeline göre bir helyum atomunun yapısı.....	24
Şekil 2.5. Bohr atom modeline göre bir bakır atomunun yapısı.....	25
Şekil 2.6. Bir yarı iletkenin enerji bant modeli (katkısız yarıiletken).....	26
Şekil 2.7. Farklı büyüklüklerdeki yasak bölgeler 1) Yalıtkan 2) Yarıiletken ve 3) İletken.....	27
Şekil 2.8. İki atom bir araya gelirse her durum iki seviyeye bölünür.....	28
Şekil 2.9. Altı atom bir araya gelirse her durum altı seviyeye bölünür.....	28
Şekil 2.10. Çok sayıda atom bir araya gelirse her atomik seviye band şeklini alır...29	
Şekil 2.11. Sodyum atomu için enerji bantlarının gösterimi.....	29
Şekil 2.12. a) iletken b) yalıtkan c) Yarıiletkenler için enerji seviyelerinin temsili gösterimi.....	31
Şekil 2.13. Elmas yapıdaki Kristal yapının gösterimi.....	32
Şekil 2.14. Si gösterimi.....	32
Şekil 2.15. GaAs gösterimi.....	33
Şekil 2.16. Si için atom sayısına bağlı bant aralığındaki gösterimi.....	33
Şekil 2.17. Direk band aralığına sahip yarıiletkenler için enerji seviyeleri arası geçişler a) soğurma b) ışımaya spektrumu.....	35

Şekil 2.18. İndirek band aralığına sahip yarıiletkenler için enerji seviyeleri arası geçişler a) soğurma b) ışımaya spektrumu.....	35
Şekil 2.19. Yarıiletken nanokristallerde band aralığının nano krsital çapına bağlı değişim grafiği.....	37
Şekil 2.20. Plazma Destekli Kimyasal Buharlaştırma yöntemiyle numunelerin hazırlandığı sistemin şematik gösterimi.....	42
Şekil 2.21. Küçük kristallerin yüzey alanının hacmine oranı büyüklerinkine göre daha fazladır.....	44
Şekil 2.22. Si-Ge-O faz diyagramı (727 ⁰ C de 1 bar basınçta)	45
Şekil 2.23. Tavlama işleminde kullanılan Azot fırınının resmi.....	47
Şekil 2.24. Numune inceltme işleminde kullanılan FISCHIONE Model 1010 iyon değirmeni.....	48
Şekil 2.25. Numune inceltme işleminde kullanılan iyon değirmeninin şematik çizimi.....	49
Şekil 2.26. Geçirgen elektron mikroskopunun iç yapısı.....	51
Şekil 3.1. 350 ⁰ C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.....	54
Şekil 3.2. 350 ⁰ C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.....	54
Şekil 3.3. 350 ⁰ C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.....	55
Şekil 3.4. 350 ⁰ C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için elektron kırınım deseni....	55
Şekil 3.5. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	56
Şekil 3.6. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	57
Şekil 3.7. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	57
Şekil 3.8. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü. Alttaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO ₂ yalıtkan tabaka (4).....	58

Şekil 3.9. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (SiO ₂ haritası) HRTEM görüntüsü. Alttaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO ₂ yalıtkan tabaka (4).....	59
Şekil 3.10. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (GeO ₂ haritası) HRTEM görüntüsü. Alttaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO ₂ yalıtkan tabaka (4).....	59
Şekil 3.11. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (O ₂ haritası) HRTEM görüntüsü. Alttaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO ₂ yalıtkan tabaka (4).....	60
Şekil 3.12. 700 ⁰ C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	61
Şekil 3.13. 700 ⁰ C 7,5 dakika süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı filmlerde kristalleşmenin olduğu bölgelerden alınmış elektron kırınım deseni.....	62
Şekil 3.14. 850 ⁰ C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	63
Şekil 3.15. 850 ⁰ C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.....	63
Şekil 3.16. 850 ⁰ C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı filmlerde kristalleşmenin olduğu bölgelerden alınmış elektron kırınım deseni.....	64

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Geçirgen Elektron Mikroskobu
EDS	Elektron Dağılım Spektrometresi
ΔE	Yasak bölge
E_v	Valans bandı
E_f	Fermi enerjisi
E_c	İletkenlik bandı
V_t	Eşik gerilimi
E_g	Yasak enerji aralığı
g	Spektroskopik yarılma çarpanı
β	Bohr magnetonu
h	Planck Sabiti
λ	Dalga boyu
P	Momentum
c	Işık hızı

1.GİRİŞ

İnsanlar İlkçağ'dan beri, doğayı tanımaya çalışmışlardır. Hayatta kalmanın ve daha iyi yaşam koşullarının yollarını araştırmışlardır. Bu esnada ateşi keşfetmişler, kesici aletler bulmuşlardır. Günlük hayattaki mücadeleleri sonucu bilgi birikimine sahip olmuşlardır. Bu bilgi birikimleri sayesinde bilim oluşmuştur. Uygulamaya yönelik bilimsel çalışmalar sonucu, insan hayatını kolaylaştıran ürünler üretilmeye başlanmıştır. Yani “teknoloji” olarak adlandırılabilen kavram ortaya çıkmıştır. “Bilim” ve “teknoloji” çeşitli şekillerde tanımlanabilmektedirler. Aşağıda “bilim”in çeşitli tanımları verilmiştir. Bilim, neyin ne olduğunu tanımlamaktır. Bilim, özgür arayış ve eleştiri içeren bir etkinliktir. Bilim; bazı olgu veya olay kategorilerine ait iyi düzenlenmiş bilgiler bütünüdür. Bilim; yasalara uygun ya da deneysel yöntemlerle doğrulanmış belirli olgu, konu ya da olay kategorilerine ilişkin bilgileri bir araya getiren tutarlı bütündür. Bilim, nesnel dünyayı ve bu dünyada yer alan olgulara ilişkin tarafsız gözlem ve sistematik deneye dayalı zihinsel etkinliklerin ortak adıdır. Bilim; bilinmeyenleri bilinir kılma çabasıdır. “Teknoloji” kelimesi; sistematik olarak işlem yapma ve sanat, bilim kelimelerinden türemiş ve bugünkü anlamını kazanmıştır. “Teknoloji”nin çeşitli tanımları şöyledir [1]. Teknoloji, yararlı ürünler üretmeye ve yeni ürünler tasarlamaya yarayan bilgiler bütünüdür.

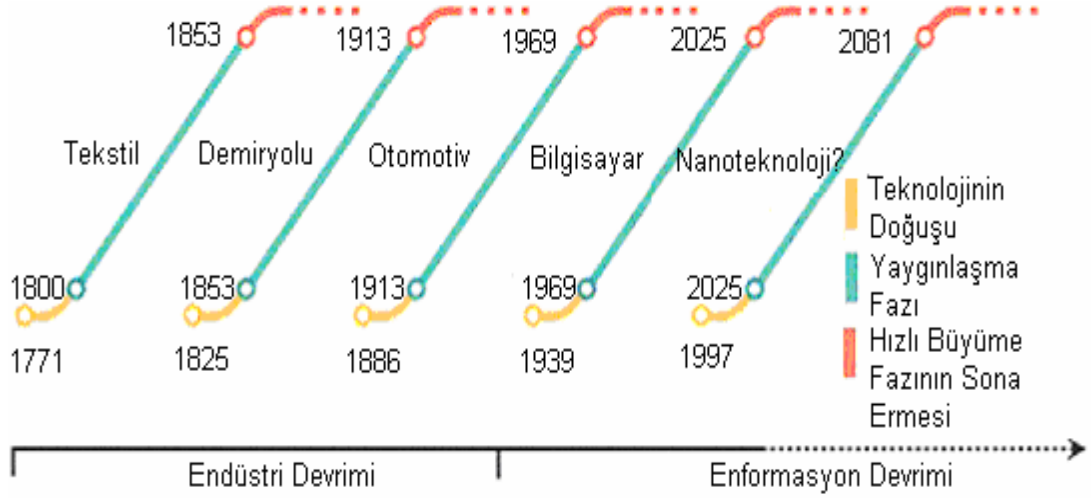
Teknoloji, girdileri çıktılara dönüştüren tüm fiziki süreçleri ve bu dönüşüme paralel gerçekleşen toplumsal düzenlemelerin ifadesidir. Teknoloji teknik bilgiler paketidir. Teknoloji, sanayinin çeşitli dallarında kullanılan takımların, işleme usullerinin ve yöntemlerinin incelenmesidir. Teknoloji, teknik bilgi, bilgi, buluş ve yenilik gibi doğrudan insan faaliyetlerinin değişik tiplerini içeren bir kısıtlama olup, verimlilik, büyüme, istihdam ve rekabet edebilirlik gibi ekonomik değişkenlerin açıklanmasında önemli rol teşkil eder.

Bilim ve teknoloji karşılıklı etkileşim içerisindedirler. Bilimdeki gelişme teknolojiye gelişmeyi sağladığı gibi teknolojiye gelişme bilimsel gelişmeyi sağlar. Bilim ve teknoloji, insanların ihtiyaçlarından dolayı doğmuştur. Bilimdeki ve teknolojiye gelişmeler de bu ihtiyaçlar sayesinde gerçekleşmiştir. Artık günümüzde ülkelerin refah seviyesini bilim ve teknolojiye kat etmiş oldukları mesafe belirler

hale gelmiştir. Teknoloji üreten ülkeler üretmeyen ülkelere daha zengin hale gelmişlerdir. Rönesans ve reform sayesinde insanlar üzerindeki dini baskı ortadan kalkmış ve bilim ve teknolojiye gelişim hız kazanmıştır. Günümüze varıncaya kadar bilim ve teknolojiye gelişme sayesinde; matbaa, telefon, cep telefonu, uçak, televizyon, internet, kağıt, mikroskop, fotoğraf makinesi, çamaşır makinesi, buzdolabı vb birçok yararlı buluşlar insanların hizmetine sunulmuştur. 18. yüzyılın sonundan itibaren her yüzyılda iki kere bilim ve teknolojiye yaşanan temel gelişmeler sayesinde insan hayatı derinden etkilenmiştir ve refah düzeyi artmıştır. Bunlardan ilk üç devrim, endüstri devrimi olarak nitelendirilmiştir ve tekstil, demiryolu ve otomotiv sanayisinde görülmüştür. 1970'li yıllarda otomotiv ve ilgili sanayiler hızla yayılma sürecini tamamlayıp rutin gelişme sürecine girmiştir. 2000'li yıllarda hala önemli bir sanayi olan otomotiv sanayisinde uluslar arası rekabet nedeni ile ürünler çok gelişmiştir ve kullanılan teknolojiler en üst düzeye gelmiştir, fakat kar marjları taşıt başına ortalama 400-500 dolar düzeyine kadar düşmüştür, sektörün katma değeri azalmıştır. 1940'lı yıllarda katı hal transistörün keşfedilmesi ve II. Dünya Savaşı'ndan sonra mikro elektroniğin ve silisyum teknolojisinin hızla gelişmesi ile bilgisayar ve daha sonra internet hızla yayılmıştır. Böylece bilgi (enformasyon) devrimi başlamıştır. Bu devrim her şeyi etkilemiş, bilimsel ve teknolojik gelişmeleri inanılmaz güç şekilde hızlandırmıştır.

20. yüzyılın sonunda bilim adamları nanometre ölçülerinde bilime yönelmişlerdir. Atomların doğrudan görüntülerini veren taramalı tünelleme mikroskobunun ve bundan türetilen atomik kuvvet mikroskobunun keşfi, nanometre boyutlarında fiziğe ve kimyaya çok güçlü bir göz kazandırmıştır. Bu mikroskoplarla nanometre alanında çeşitli süreçleri, etkileşimleri, kimyasal reaksiyonları gözlemek ve atomları teker teker kontrollü bir şekilde istenen yerlere taşıyıp yapay malzemeler oluşturmak mümkündür.

Şekil 1.1.'de her asırda iki kez insanoğlunun refahını arttıran bilim ve teknolojiye temel gelişmeler gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Son dört asırda bilim ve teknolojide meydana gelen değişimler [2]

Bilimde elde edilen gelişmeler ve varılan bu sonuç nanometre boyutlarında malzemelerin teknolojiye ne kadar büyük olanaklar kazandırabileceğini göstermiştir. Otomotiv ve benzeri imalat sanayilerinde kar marjlarının düşmüş olduğu ABD’de iktisatçılar bu olanakları herkesten önce görüp Başkan Clinton’ı etkileyerek nanoteknolojiyi öncelikli alan olarak ilan ettirmişlerdir. Bundan sonra, 1997’den itibaren konu bütün dünyada hızla gelişmiştir. Şimdi nanoteknoloji bilgisayar devrimini izleyen ve 21. yüzyıla damgasını vuracak bir teknoloji devrimi olarak değerlendirilmektedir [2].

1.1. Nano Teknoloji

Yunancada cüce demek olan nano ölçeği metrenin milyarda birine denk gelir. Nanometre ölçeği bir insanın saç telinin elli binde birine karşılık gelen bir büyüklüktür. Nanobilim ve nanoteknolojinin tam bir tanımı olmamakla birlikte, genel görüşe göre 1-100 nanometre boyutlarda maddelerin anlaşılması, kontrol edilmesi ve atomsal seviyede değiştirilip işlevsel hale getirilmesidir. Nanoteknoloji; fizik, kimya, biyoloji ve mühendislik gibi disiplinler arası bir konuma sahip olmasının yanı sıra, endüstri, savunma, ilaç, elektronik, tarım, sağlık gibi bütün alanlara potansiyel etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle birçok gelişmiş ülke tarafından kritik araştırma alanı olarak görülmekte ve desteklenmektedir. Bu konuda ilk çalışmalar, Japonya’da 1991 de Nano-tup adı altında Sumio Iijima tarafından başlatılmıştır [3]. Bu bilim dalı disiplinler arası bir bilim dalıdır. Disiplinden kasıt bir

başka bilim dalıdır. Yani birçok bilim dalının birleşerek, birbirine destek vererek, yukarıdaki tanıma uygun araştırma geliştirme yapmasıdır. Bu bilim dalları fizik, malzeme bilimi, robotik, kimya, biyoloji, makine mühendisliği, elektrik mühendisliği ve bunların alt dalları olabilir. Nanoteknoloji şimdiki bilim dallarının nanoseviyeye inerek orada araştırma yapması olarak da görülebilir. Yalnız nanoteknolojinin amacı şimdiki teknolojiyi nanoseviyeye indirmeye çalışmak değil, mikro düzeyde beceremediğimiz işleri nanoseviyede başarabilmek uğraşmaktır. Yani bir su molekülünün özelliklerini ortaya çıkarmak nanoteknoloji değildir. Suyun o düzeyde makro düzeyde olmayan özelliklerini bulmak ve kontrol etmek nanoteknolojidir.

Nanoteknolojide iki temel anlayış vardır: Biri aşağıdan yukarı inşa, diğeri yukarıdan aşağıya inşa. Aşağıdan yukarı inşa malzemeler ve aygıtlar, moleküler düzeydeki bileşenlerinden kimyasal yollarla otomatik olarak oluşturulur. Yukarıdan aşağıya inşa ise büyük boyuttaki malzemeleri küçülterek ürün elde etmektir. Günümüzde de inşaların çoğu bu yöntemle yapılmaktadır. Nanoteknolojide kullanılan aletlerden en yaygın olanı atomik kuvvet mikroskobu, taramalı tünelleme mikroskobudur. Elektron demeti litografyası, moleküler hüzme epitaksisi de nanomalzemeleri manipüle etmeye elverişli hale getirir ve alışılmamış özellikleri gözlemleyebiliriz. Nanoteknolojik ürünlere örnek olarak moleküler yapıya sahip polimerler, yeni bilgisayar çipi tasarımı, bronzlaşmama losyonu, kozmetik, ilaç taşıması verilebilir.

Nanoteknolojinin faydalarının yanı sıra muhtemel zararları da vardır. Nano ölçekte malzemelerin tek başlarına ya da başka atom grupları ile beraber iken nasıl davrandıklarını bilinmemektedir. Normal şartlarda zararsız olarak bilinen bir malzeme, nano ölçek hiç beklenmedik şekilde davranabilir. Mesela bazı karbon nanotüplerin asbest gibi davrandıkları, nanogümüşün bakterileri öldürdüğü elde edilen bilgilerden sadece birkaçına örnektir. Bu nedenle nanoteknoloji kontrollü bir şekilde geliştirilmelidir. Kuantum noktacıları ya da nanokristaller büyüklükleri 2-10 nm arasında değişen bir yarıiletken türüdür. Boyutlarının küçük olmasından dolayı kuantum noktacılarının özellikleri üzerinde kolayca oynanabilir ve böyle bu parçacıklar yeni uygulamalarda kullanılabilir. Kuantum noktacılarının özellikleri boyut ve atomik yapısına bağlıdır. Günümüzde nanobilim alanındaki bilgi birikimi akademik çevreler ve kolektif laboratuvar çalışmaları sayesinde hızlı bir biçimde

artmaktadır. Bu dinamik yapı nanoteknolojiyi geleceğin bilimi yapma konusunda sağlam bir şekilde ileriye götürmektedir.

Güncel bilim mesoskala olarak tabir edilen mikroskobik büyüklüklerle çalışmaktadır. Nanobilim ürünleri boyut olarak klasik fizik yasaları ile idare edilemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle nanoteknoloji, fizik kurallarının ortaya konulması güvenilir nanoteknoloji ürünleri için gerekli görülmektedir. Nanoteknolojinin; hasarlı dokuların iyileştirilmesi ve hastalıkların tedavisi amacıyla yönelik olarak gelişmeler göstermesi ile yakın gelecekte nanocerrahi ve nanonörocerrahi alanlarında kullanılabileceği öngörülmektedir. Yeni ve daha karmaşık uygulamalar sürekli olarak geliştirilmektedir. Nanotıp araştırma laboratuvarlarından klinik uygulamalara taşındığında rutin tıp pratiği sonsuza kadar değişecektir [4].

Nanoteknoloji bir yandan eski teknolojilere yeni bakış açıları getirirken diğer yandan da, daha önemli ve kritik olan, önceleri imkansız gibi gözüken yeni teknolojilere ve uygulamalara kapı aralamaktadır. Örnek olarak, malzemelerin özellikleri nanoteknoloji sayesinde daha iyi anlaşılmış, dolayısıyla bu malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda belirgin iyileştirmeler gözlenmektedir. Öte yandan, nanoseviyede işlevselleştirilmiş nanoparçacıklarla kanserli dokuların yok edilmesi ancak nanoteknolojiyle mümkün hale gelmiştir [5]. Nanoteknolojinin etkilemeyeceği bir alan düşünmek neredeyse imkansızdır.

Nanoteknoloji, kendi kendini temizleyen boyalardan, kirlenmeyen kumaşlara; esnek ama daha dayanıklı betondan, elmas kadar sert kaplamalara; kanserli hücrelerin vücuda zarar vermeden öldürülmesinden, günlerce etkisini kaybetmeyen kremlere; tek şarbon mikrobunu bile algılayabilen sensörlerden, bakterileri öldürdüğünden dolayı kokmayan çoraplara ve mikrop barındırmayan buzdolaplarına kadar hayatımıza girmeye başlamıştır. Bu teknoloji ile körlere yeniden görme, sağırlara duyabilme, felçliye yürüme imkanı sunulabilir. Enerji kaynaklarından elde edilecek tasarruf ile enerji maliyetlerini düşürülür. Dünyada açlık sona erdirilebilir. Üretim süreçlerini kısaltarak zaman ve maliyet kayıpları önlenir, rekabet gücü artırılabilir. Aids, kanser, diyabet gibi hastalıklar tedavi edilebilir. Nanoteknolojiyle yaşam kalitemizin yükselmesini sağlarız. Ucuz, çevre dostu ve verimli enerji kaynakları

ortaya çıkarılabilir. Ürün kalitemiz yükselir. İş göremez hale gelmiş organların yerine yeni organlar çıkarılabilir. Kirlenmiş dünyamız daha temiz hale getirilebilir. Çelikten yüz kat daha dayanıklı ama esnek betonlar yapılabilir. Bakteriden daha küçük nanobilgisayarlar üretilebilir. Bir kütüphanedeki bütün kitaplar bir küp şekerine depolanabilir. Nanoteknolojik ürünler üretimiyle, insanların yaşam standartları ve kalitesi yükseltilir, daha sağlıklı ve daha güvenli bir yaşam sunulabilir.

Malzeme ve imalat sektörü açısından bakacak olursak; malzemelerin atomik ve moleküler boyutlardan itibaren inşa edilmesi, konvansiyonel metotlar ile elde edilen malzemelere oranla daha sağlam ve hafif maddelerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu malzemeler, daha düşük kusur düzeyleri ve eşsiz dayanıklılık güçleri ile hali hazırdaki birçok endüstriyel süreç için devrimsel yenilikler getirecektir. Benzersiz ve alışılmamış özellikleri ile nano tüpler, elyaflar, lifler ve kaplama malzemeleri imalat yöntem ve tekniklerinin gelişmesine imkan sağlayacaktır [6].

Nano Elektronik Ve Bilgisayar Teknolojileri açısından değerlendirilirse elektronik araçların nanometre ölçeklerinde elde edilmesi ile halen kullanılan sistemlerinin işlem güçleri ve kapasiteleri bir kaç kat artacaktır. Nano teknolojinin kullanım alanlarından biri olarak gösterilen kuantum bilgisayarların geliştirilmesi ile günümüzün en modern bilgisayarları olan Pentium bilgisayarlar ile kıyaslanamayacak seviyelerde işlem gücü elde etmek olası bir durum haline gelecektir. Bunlara ek olarak elektronik araçlar için geliştirilen sensör, gösterge sistemleri ve sinyal iletimi alanlarında ciddi ilerlemeler kaydedilecektir [6,7].

Tıp ve sağlık sektörü açısından, nanoteknoloji yaşayan sistemlere moleküler seviyelerde müdahale etme imkanı yaratabilir. Yaşayan organizmalar ile etkileşime geçebilecek boyutlarda araçlar üretilmesi ile birçok yeni teşhis ve tedavi yöntemlerinin gelişmesi mümkündür. Yalnızca hastalığın bulunduğu veya yayıldığı bölgelere saldırarak ilaç veren makineler, insan vücudu içerisinde hareket edilmesine imkan sağlayan teşhis araçları, nano-teknolojinin tıp ve sağlık sektörü üstündeki potansiyel uygulamaları olarak gösterilebilir [8].

Havacılık ve uzay araştırmalarında, havacılık ve uzay araçları çok maliyetli teknolojilerdir. Bu araçların imalatı sırasında kullanılan malzemelerin ağırlığı

maliyetlerin yüksekliğinde çok önemli bir yer tutar. Nanoteknoloji bu malzemelerin ağırlığının önemli ölçüde azaltılması ile maliyetlerin düşürülmesini sağlayabilir. Bundan başka çekme direnci çelikten kat kat yüksek nano tüpler sayesinde dünya yüzeyinden atmosfere kadar yükselebilecek yapılar inşa edilmesi potansiyel uygulama alanları içerisinde yer alabilir. Böylece uzay araştırma maliyetlerinin büyük bir kısmını meydana getiren fırlatma maliyetleri düşürülebilir [6].

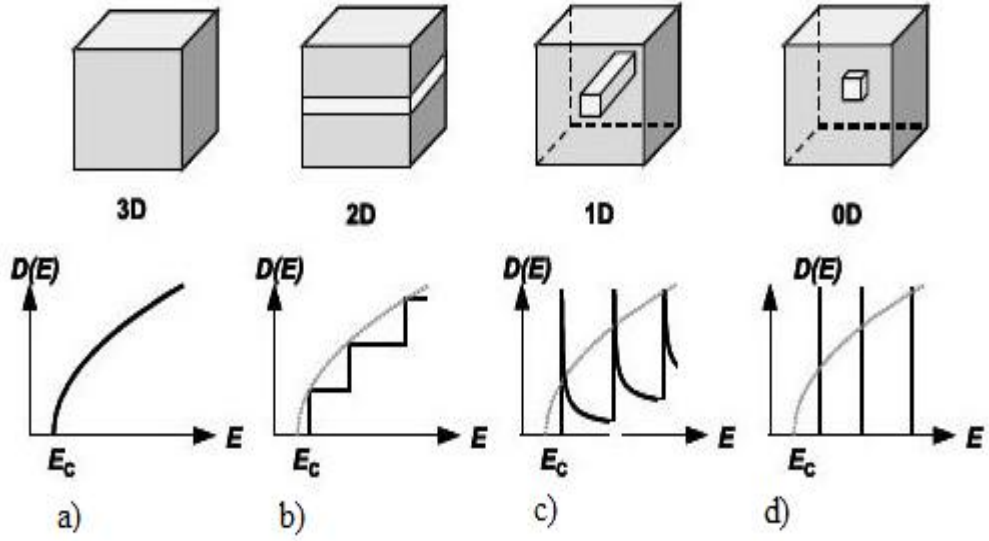
Çevre ve enerji boyutunda ise nano malzemelerin ve nano kompozitlerin fosil yakıt endüstrilerinin verimliliğini geliştirme potansiyeli bulunmaktadır. Nano kompozitlerin yaygın olarak kullanılması ile daha yüksek verimliliğe sahip motorların ve dolayısı ile daha temiz, çevre dostu ulaşım sistemlerinin kurulması olası olacaktır [6].

Bu güne değin bu alanda Nobel ödülü alan çalışmalar yapılmıştır. 1996 yılı kimya Nobel ödülü, Nano-scala da yapılan karbon Fullerene (buckyball) çalışmaları ile, .Robert F. Curl Jr., Sir Harold W.Kroto ve Richard E. Smalley'e verilmiştir [9]. Nanoteknoloji üzerine birçok çalışmalar yayınlanmıştır [10-13]. Örneğin yarıiletken malzemeler aracılığı ile elde edilen yarıiletken nano kristaller biyolojik etiket [14], lazer [15], güneş pili [16] gibi farklı alanlarda kullanıma sahiptir.

Nanoteknoloji bir yandan eski teknolojilere yeni bakış açıları getirirken diğer yandan da, daha önemli ve kritik olan, önceleri imkansız gibi gözüken yeni teknolojilere ve uygulamalara kapı aralamıştır. Örnek olarak, malzemelerin özellikleri nanoteknoloji sayesinde daha iyi anlaşılmış, dolayısıyla bu malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda belirgin iyileştirmeler gözlenmiştir. Öte yandan, nano seviyede işlevselleştirilmiş nano parçacıklarla kanserli dokuların yok edilmesi ancak nanoteknolojiyle mümkün hale gelmiştir. Nanoteknolojinin disiplinler arası bir bilim dalı olması; farklı alanlara hakimiyeti, farklı disiplinlerdeki bilim adamlarının müşterek çalışmalarını beraberinde getirdiği gibi, sonuçları itibariyle birçok alanı temelden etkileme potansiyeline sahiptir. Önümüzdeki yıllarda nanoteknolojinin birçok alan için ne kadar vazgeçilmez olduğu daha iyi anlaşılmaya başlanacaktır. Özellikle sağlık, savunma, tekstil, enerji, elektronik ve fotonik gibi alanlarda elde

edilecek katma değeri yüksek ürünler insanoğlunun hayatını kolaylaştırması beklenmektedir.

Maddenin temel özelikleri nano ölçek seviyesinde makroskobik boyuttan çok farklıdır. Nano boyutlarda kuantum fiziği devreye girmektedir. Bu boyutlarda malzemenin yapısı ile oynanarak bir çok olumlu ve istendik sonuçlar elde edilebilir. Bu boyutlarda malzemenin enerji ve momentumu kesiklidir. Nano parçacıkların fiziksel ve kimyasal özelikleri aynı malzemenin hacimli yapısına göre farklılıklar gösterir. Örneğin renk, znrllk, malzemenin dayanıklılığı, mobilitesi, kimyasal reaksiyonları ve biyolojik aktiviteleri nano boyutta farklılık gösterir [17]. Nanokristallerdeki elektron ve deşiklerin (hole) enerji seviyeleri kuantum nokta yapıların boyutları ile doğru orantılıdır. Kuantum nokta yapıların boyutları ne kadar küçük olursa enerji seviyeleri arasındaki fark da o kadar büyük olur. Bütün optiksel ve elektronik özellikler elektron seviyelerinin enerjilerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle malzemelerin boyutları ile oynanarak özellikleri değiştirilebilir [18]. Bir atomda olduğu gibi, nanokristallerdeki enerji seviyeleri de elektronların hapsine bağlı olarak kuantize olmuştur [19] Şekil 1.2' ye bakacak olursak



Şekil 1.2. Elektron ve deşiklerin farklı boyutlardaki hali. $d = 1, 2, 3$, için durumların yoğunluğu $\rho(E) \propto E^{d/2-1}$ formülüyle ifade edilir [20]. Durum yoğunluğu: **(a)** hacimli, **(b)** kuantum kuyusu, **(c)** kuantum çizgisi, **(d)** kuantum noktası.

1856'da Faraday maddenin yapısal özelliklerinin boyuta bağımlılığı üzerinde çalışan ilk kişidir [21]. Faraday gözlemlerinde bir metalin renginin metal boyutu küçüldükçe, belli bir değerden sonra boyuta bağımlı hale geldiğini gösterdi. 1857'de Faraday [22] yaptığı deneyle durağan atmosfer içindeki metal telleri fünüye patlatarak buharlaşma ile ince film kapladı. Faraday'ın metallerde gözlemlediği olgunun yarıiletkenler için de geçerli olduğu gözlemlenmiştir [23]. Bugün malzeme boyutlarının bir malzemenin elektriksel ve optik özellikleri ile ilişkili olduğu bilinmektedir.

Yarıiletken malzemeler etkili bir ışık yayıcısı oldukları için optik devre elemanları olarak kullanılırlar. Bu tür malzemeler genellikle sahip oldukları etkili ışık salma özelliklerinden dolayı GaAs ve InP gibi bileşik yarıiletkenlerden yapılmaktadır. Bu malzemeler LED'lerin, foto algılayıcıların, fiber optik malzemelerin ve

optoelektronik devre elemanlarının uygulama alanlarında kullanılırlar [24]. Bir malzemenin etkili ışık yayıcı olabilmesi o malzemenin bant yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Dolaylı bant yapısına sahip malzemeler bu özelliğinden dolayı etkili bir ışık yayıcı değildir. Ancak nano boyutta bu malzemeler dolaysız bir bant yapısı özelliği göstermektedirler [25]. Örneğin silisyum hacimli yapıda dolaylı bant yapısından dolayı etkili birer ışık yayıcı değil iken [26], nano boyutta etkili bir ışık yayıcı olabilmektedir. Son yıllarda SiO₂ içerisine yerleştirilen Ge ya da Si nanokristallerin, bellek aygıtları olarak kullanılabilceği ileri sürülmüştür [25,27-29].

Ge nanokristallerden gözlenen optik ve elektronik özelliklerin düşük boyutlarda ekziton Bohr çapının daha büyük olması nedeniyle Si nanokristallerinden daha etkili olacağı deneysel ve teorik çalışmalarda ortaya konmuştur. Ge kristalini kullanarak fotodetektör [30], ışık yayıcılar [31], transistörler [32], fotonik yapıllı aygıtlar [33], kuantum bilgisayarları [34] ve ışığa duyarlı malzemeler [35] elde etmek mümkündür.

Bu nedenlerden ötürü yarıiletken malzemelerin nano boyutta göstermiş oldukları bu üstün özelliklerin araştırılması büyük önem arz etmektedir. Tezimizde de bu konunun aydınlatılmasına yönelik katkıda bulunabilmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda (PECVD) plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma tekniği yardımı ile Si alttaş üzerine büyüteğimiz SiO₂ içerisinde Ge katkılı yarıiletken nanokristallerden oluşan ince filmler oluşturulmuştur. Elde edilen bu filmler daha sonra bir takım işlemlerden geçirilerek oluşan yapının incelenebilmesi için (TEM) geçirgen elektron mikroskobu aracılığı ile görüntülenmesi sağlanmıştır.

2. METERYAL VE YÖNTEM

2.1. Nanoteklojinin Tekstildeki Uygulamaları

Tekstil endüstrisi nanoteknoloji devrimi ile yeni bir sürece dahil olmaktadır. Nanomalzemeler kullanılarak daha önce hayal bile edemediğimiz çok çeşitli fonksiyonlara sahip kumaşlar elde edilebilmektedir. Örneğin üzerine bir bardak meyve suyu dökülen pantolonumuzun sahip olduğu suyu itme özelliği, kirlenmesine engel olabilmektedir. Yakın bir gelecekte, giydiğimiz tişört, üzerindeki nano sensörler sayesinde kalp atışlarımızı, vücut ısılarımızı ve kan şekerimizi düzenli kontrol ederek, istenmeyen bir durum olduğunda bizleri ya da kablosuz bir hatla doktorumuzu haberdar edebilecek. Son yıllarda her alanı etkilemeye başlayan nanoteknolojiden tekstil endüstrisi de nasibini alacak. Katma-değeri yüksek nanoteknoloji tabanlı akıllı tekstil ürünleri, en önemli ihracat kaynağımız olan tekstil endüstrisine soluk aldirabilir. Nanoteknoloji tekstil sektörü için gelecek vaat eden bir alandır. Tekstil sektörü şimdiden nanoteknolojinin etkisi altına girmiştir. Performansı geliştirmek veya tekstil malzemelerinde daha önce emsali görülmemiş işlevler ortaya çıkarmak amacıyla yapılan araştırmalar giderek gelişmektedirler [36].

Nanoteknoloji yeni bir teknoloji devrimi olarak algılanıyor ve bu teknolojinin 2025 yılına kadar gelişme sürecini tamamlayıp hayatın her alanına gireceği tahmin ediliyor. 19. uncu yüzyıl başlarında gelişmeye başlayan tekstil endüstrisi, nanoteknoloji sayesinde yeni bir döneme girmeye hazırlanıyor. Tekstilde kullanılan malzemelere nanometre boyutlarında farklı özellikler kazandırılması, çok önemli gelişmelere yol açacak. Örnek olarak, çorap ipliğinin gümüş nanoparçacıkları ile katkılanması, çorap içerisinde bakteri ve mikrop barınmasını engelleyeceğinden, kokması önlenmiş olacak. Suyu sevmeyen (iten) kumaşlardan üretilmiş tekstil ürünlerinde kirlenme engellenmiş, dolayısıyla yıkama ve tekrar ütüleme ihtiyacı en aza indirilmiş olacak. Böylece su harcanımı azalacak, hatta belirli bir süre sonra çamaşır makinelerine bile gereksinim kalmayacak. Esnek ve yıkanabilen nano sensörlerin ve aygıtların kumaş içerisine aktarılmasıyla, kullandığımız elbiselerimiz yeni boyutlar kazanacak; elbise artık görecek, duyacak, hissedecek, komut verecek ve enerji üretecek hale gelecek. Burada vurgulanması gereken önemli bir nokta şudur

ki: Nano aygıtların boyutları o kadar küçük olacak ki, elbiseyi giyene herhangi bir zorluk getirmeyecek. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla akıllı elbise üretilmesinde ümit verici sonuçlar elde edilmiş bulunuyor. ABD'nin Boston şehrinde 2000 yılında hayata geçirilen MIT Askeri Nanoteknoloji Enstitüsü, 15 yıl içerisinde askeri üniformaları nanoteknoloji sayesinde akıllı hale getirmeyi planlanmakta. Kimyasal ve biyolojik ajanları tespit edebilecek bu akıllı elbise, aynı zamanda kalbi duran askeri masaj yaparak hayata geri döndürebilecek. Savaş meydanında yaralanan askere ait bütün bilgileri kablosuz hatla merkeze bildirebilecek, gerektiğinde kısa süre içerisinde gerekli müdahalenin yapılmasına olanak sağlayacak. Üniforma, gerektiğinde çok sert bir zırha dönüşebileceği gibi, askerin gereksinim duyacağı enerjiyi güneşten sağlayacak. Bazılarını hayal bile edemediğimiz bu araştırmalar, nanoteknoloji sayesinde gerçek olmuş ve savaş meydanlarında askerin hayatını kolaylaştırmaya başlamış bulunuyor. Kumaş ipliklerine elektronik ve optik özelliklerin kazandırılması tekstil endüstrisinde yeni ufuklar açacak ve farklı uygulama alanlarının ortaya çıkmasına yol açacak. Örneğin, kendiliğinden aydınlatma özelliğine sahip bir masa örtüsü, farklı mekanların yaratılmasında bizlere yardımcı olacak. Rengarenk ve devamlı renk değiştiren kostümler, özellikle gençler arasında moda olacak, eğlence merkezlerine farklı bir canlılık kazandıracak. Bilkent üniversitesi tarafından Kısa süre önce geliştirilen yeni bir yöntemle kilometrelerce uzunlukta ve kumaş gibi dokunabilen ısı ve ışık sensörleri üretilmeye başlanmış bulunuyor. Yeni bir nano üretim teknolojisi olarak görülen bu yöntem, makroskobik boyutlardaki aygıtın termal çekme yöntemiyle daha küçük boyutlara indirilmesi prensibine dayanıyor. Ayrıca çok ucuza mal edilmesi ve esnek olması kumaşlarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kısa bir süre önce, ısıyı hissedilen fiberler, akıllı askeri üniformaların tasarımında kullanılmaya başlandı bile. Bu teknolojinin tekstil endüstrisinde yeni ufuklar açabilecek potansiyele sahip olduğu düşünülüyor. Belirli dalga boyuna sahip ışığı, geliş yönünden bağımsız olarak tümüyle yansıtabilen iplikler, bu yeni yöntemle üretilebilmekte. Bu ipliklerle dokunan kumaşlar, zararlı ışınlardan korunmak amacıyla kullanılabilir. Örnek olarak, ipliklerin yansıtma spektrumu 200 nanometre civarında seçilirse, morötesi ışığı yansıtan şapkalar üretmek mümkün. Ayrıca, fiberlerin yansıtma katsayısı altından daha yüksek olduğundan, boya katkı maddesi olarak da kullanılabilir. Son 10 yılda nanoteknolojinin gelmiş olduğu nokta, tekstil teknolojisi alanındaki hızlı gelişmeyi

desteklemiştir. Önümüzdeki 25 yıl içinde tekstil sektöründe nanoteknolojinin sebep olacağı öngörülen gelişmeler beklenmektedir. Bu gelişmelerin öncüsü askeri giysiler olacaktır. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) 21. yy'ın askerleri için nanoteknolojiyi kullanarak “süper üniformalar” geliştirmeye çalışmaktadır. Bu üniformalar, kamuflajı desteklemek üzere renk değiştirme, faz değiştiren malzemeler ile kırık durumunda destek vazifesi göreceğ biçimde sıkılaşıma hatta yapay kas geliştirme ve enerji depolayabilme gibi spesifik özelliklere sahip kumaşlardan (morph fabrics) oluşacaktır. Bu kumaştaki lifler, ortam sıcaklığı veya hava sirkülasyonuna bağlı olarak daralacaklardır veya genişleyeceklerdir. Nanosensör iliştirilmiş kumaşlar, askerin vücut sinyallerini tıp merkezine ileteceklerdir, kumaştaki entegre iletişim ve dolaşım ekipmanları ile yaralı bir askerin sağlık bilgilerini ve konumunu merkeze bildirerek müdahale hızını arttıracaklardır. Nanoteknoloji ile üretilmiş üniformalar günümüzde kullanılanlardan %80 daha hafif olacaklardır (kağıt ağırlığında ancak hafif ve esnek), ortamdaki biyolojik veya kimyasal tehlike durumuna moleküler düzeyde adapte olarak geçirgenliklerini kaybedeceklerdir. Bu üniformalar, ortamın sıcaklık, ışık, hava kalitesi vb değişikliklerini kolayca fark edeceklerdir, nano kaplamayla geliştirilmiş özel lifler karanlıkta dahi ayırt edilebilir olacaklardır, böylece askerler birbirlerini kilometrelerce uzaktan seçebileceklerdir, karanlık ortamlarda düşmanı ayırt edebileceklerdir [37].

2.2. Nanoteknolojinin Sağlıkta Uygulamaları

Nanoteknoloji, farklı özelliklere sahip ve daha gelişmiş yeni materyaller, araçlar ve sistemlerin elde edilmesi süreci olarak bilinmektedir. Dünyayı ve insan hayatının hemen her yönünü derinden etkilemesine mutlak gözüyle bakılan bu yeni teknolojinin en büyük katkısının tıp alanında olacağı ön görülmektedir. Özellikle klinikteki uygulama alanları potansiyel olarak çok fazla olduğundan, fiziyatristlerin nanoteknoloji alanına girmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu derlemede daha çok Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon alanı ile ilgili olarak nanoboyutlu kontrollü salınım sistemleri, doku mühendisliği, nanogörüntüleme, nanomikrobiyoloji ve nanotüpler üzerinde durulacaktır [38].

2.2.1. Nano Tıp

Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler organik yapıların makroskobik ve nanometrik formlarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik anlamda birbirinden farklı özellikler taşıdığını ortaya çıkarmıştır. Laboratuvar ortamında üretilmiş nanocihazların biyomoleküllerle etkileşime geçebileceğinin kanıtlanması sayesinde hem sağlıklı dokulardaki fizyolojik süreçler hem de hastalıkların fizyopatolojik temelleri daha iyi anlaşılmasına başlanmıştır.

Nanoteknolojideki bu gelişmelere paralel yeni bir bilimsel alan olarak ortaya çıkan “Nanotıp”, şimdiye kadar kabul edilen ve uygulanan tıbbi yöntemlerde önemli kavramsal değişiklikler yapması ve farklı tanı-tedavi alternatifleri sunması nedeniyle bütün dünyada üzerinde en çok çalışılan konulardan birisi haline gelmiştir [39].

Nanoteknoloji alanında önümüzdeki yıllarda beklenen gelişmelerin büyük kısmı tıp alanında gerçekleşecektir. Bu teknoloji neredeyse 17 yıldır bilinmesine rağmen nanotıp uygulamaları yeni yeni ivme kazanmaya başlamıştır. Nanoteknolojinin tıptaki kullanım alanları çok geniş olmakla birlikte bu derlemede, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon alanı ile ilgili olan nanoboyutlu kontrollü salınım sistemleri, doku mühendisliği, nanogörüntüleme, nanomikrobiyoloji ve nanotüpler üzerinde durulacaktır [40].

Nanopartiküllerin artmış kimyasal aktiviteye sahip olması ve doku bariyerlerini geçebilmesi sayesinde yeni ilaç hedefleme ve dağılım teknikleri geliştirilmektedir. Gelecekte tek bir hastalıklı hücreyi araştırıp bulup yok edecek nanopartiküller üretililecek, böylece bazı hastalıkların oluşumu çok erken dönemde engellenerek koruyucu sağlık hedefine ulaşılmış olacaktır. Bunlara ilave olarak nanoteknoloji sayesinde hastalıklı ya da hasar görmüş dokuların başarılı biçimde onarımı, ihtiyaç duyulan yapay organların yerine konulması gibi konularda vücudun kendi mekanizmalarının harekete geçirilmesi de mümkün olacaktır. Çok uzak olmayan bir gelecekte nanoteknolojinin tıbbi uygulanmasıyla, uzaktan takip ve tedavi olanakları gelişecek böylece hastanede tıbbi-cerrahi bakımın sağladığı faydalardan çok daha başarılı sonuçlar kolay ve ucuz biçimde ve hasta evinde otururken elde edilebilecektir.

Nanoteknolojinin tıbbi uygulamalarda çok geniş bir kullanım alanına sahip olması nedeniyle bu yöndeki çalışmalar uluslararası bilimsel rekabette ülkelerin gelişmişlik

düzeyini gösteren en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Nanotıp bugün için gelişmiş tüm ülkelerde bir devlet politikası olarak ele alınmakta ve bu konudaki çalışmalara büyük bütçeler ayrılmaktadır [41].

Nanobiyomateryallerin en önemli kullanım alanlarından biri de doku mühendisliğidir. Hücrelerin çoğalarak belli bir dokuya dönüşme sürecinde gerekli olan veya taşıyıcı yapılar nano materyallerden ve bu yapılar görevleri bitince yavaş yavaş bozulup kaybolacaklardır [42]. Bu tedavinin en heyecan verici yanı, kas iskelet sistemi hastalıkları ve merkezi ya da periferik sinir sistemi hastalıklarının tedavisinde önemli bir dönüm noktası oluşturacağına kesin gözüyle bakılmasıdır [43]. İnsan beyninde yaklaşık 15 milyar nöron mevcuttur ve her biri diğer nöronlarla 5-10 bin bağlantı yapmaktadır. Bu muazzam ağı yapay nanobot nöronlarla oluşturmak hasar gören sınırlı bir bölgeye (örneğin inme) müdahale etmek mümkün görünmektedir. Ayrıca nanobot nöronlar noral iyileşme ve rejenerasyonda rol oynayabilmektedir [43]. Bu bulgu inme, travmatik beyin yaralanması ve omurilik yaralanmaları sonrası iyileşmede büyük ümit vaat etmektedir. Nanobot nöronların kullanılabileceği diğer alanlar protez kontrolü ve duyarlılığını arttıran noral ara yüzler, beyin-bilgisayar ara yüzleri, implante edilebilen organ ve sensörlerdir.

2.2.2. Nanoteknolojinin İlaç Taşıyıcı Sistemler Üzerinde Uygulamaları

Mikro ve nanoteknolojinin biyomedikal arenaya uygulanması yeni teşhis ve tedavi edici sistemlerin geliştirilmesinde oldukça büyük potansiyele sahiptir. Bu teknolojinin gelişmesiyle hastalık ve risk şartlarının erken tanımlanması, daha az zarar ve daha kısa sürede iyileşme zamanının sağlanması ve daha düşük fiyatla daha kabul edilebilir sağlık-bakım sağlanması mümkün olacaktır [44]. Tıp ve biyolojide kullanılan örnekleri arasında basınç sensörleri, kalp pompaları, retinal implantlar, noral implantlar sayılabilir [45]. Biyomedikal sahada biyomedikal mikrosistemler (Bio MEMS) olarak bilinen bu cihazlar mikrometre boyutunda kontrol ile bir ameliyatın tam olarak yapılmasını, genel, genetik ve nörodejeneratif hastalıkların, allerjilerin, ağrının hızla taranarak bulunmasını mümkün kılacaktır [44].

Bu sistemler klasik imalat teknikleri kullanılarak üretilen cihazlarla karşılaştırıldığında önemli avantajlara sahiptirler [46-49]. Bunlar; daha küçük

boyutsal yapıda olmaları (mikroboyut) buna bağılı olarak yüzey alanı/hacim oranının artması. Aynı ve bitişik substrat üzerinde duyarlılığı, sinyal şartlarını ve aktivasyon fonksiyonlarını birleştirme yeteneğine sahip olmaları yani elektronik veya elektriksel bileşenlerin sistem üzerinde birleştirilebilmesi. Yüzlercesinin bir cihaz kadar kolay yapılabilmesi ve bu seri fabrikasyondan dolayı daha ucuz olmaları süper fonksiyonlar sağlamaları (duyarlık, çözümüleme gibi). Geometrik olarak kontrol edilebilmeleri küçük miktarlarda örnek hacmine sahip olmaları, yüksek kalitede üretilmeleri olarak sayılabilir.

2.3. Nano Teknolojinin Sanayideki Uygulamaları

Çağımızda endüstrinin geldiği seviye, bir yandan çok büyük ölçekli üretim, öte yandan yüksek kaliteli, gittikçe küçülen, nanometrik boyutlarda atom ileri teknoloji ürünleri ile hücre altı molekül düzeyinde işlemleri yapma, bunları teknolojiye aktarma (gen teknolojisi) noktasına ulaştı. Teknoloji giderek fonksiyonu çok, boyutları küçük ürünlere doğru kayıyor. En fazla fonksiyonu en küçük hacimde barındıran teknolojilere nanoteknolojiler ile ulaşılabilir. Günümüzde kullanılan üretim teknikleri, moleküler anlamda kaba tekniklerdir. Döküm, taşlama, tornalama vs. atomların büyük kitleler halindeki hareketlerine dayanır. Yapı taşları olan atomlar tek tek alınıp istenildiği gibi, üstelik de ucuza mal olacak şekilde birleştirilebilir. Bu gelişme özellikle bilgisayar sektöründe önümüzdeki yıllarda kullanıldığında tümüyle daha temiz, daha dayanıklı, daha hafif ve daha hassas ürünlerin üretilmesi mümkün olacaktır. Bu nano makineler aslında günlük hayatta kullanılan aletlerin ve sistemlerin çok küçük birer kopyaları olacaktır. Nanoteknolojik sistemlerin iki özelliği hayret uyandırıyor: Mikro montaj ve kendi kendine çoğalma. Bu şekilde moleküler boyutlarda ve hassasiyette robotlar üretilmesi söz konusu olabilecek.

Sürtünmenin endüstri ve çevreye olan olumsuz etkileri çok büyüktür. Bugün, endüstrileşmiş ülkelerde yıllık gayri safi milli hasılanın %5 kadarına yakın bir kısmın motorlu araçlar ve öbür hareket halinde olan mekanik sistemlerdeki sürtünme yüzünden kaybolduğu tahmin edilmektedir. Örneğin ABD’de bu kaybın yaklaşık 500 milyar dolar civarında olduğu düşünülmektedir. Sürtünme dolaylı yollardan hava ve çevre kirliliğine de sebep olmaktadır. Sürtünmeyi yenmek için harcanan yakıt enerjisinden kaynaklanan karbon dioksit ve diğer zararlı gazlar direkt olarak

atmosfere salınmakta ve bunlar da atmosferde hem sera gazlarının artmasına hem de eko sistemin bozulmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, motorlu araçlar ve öbür mekanik sistemlerde sürtünmeyi mümkün olan en düşük seviyelere indiren teknolojilere acilen ihtiyaç vardır. Aksi takdirde gün geçtikçe daha azalan ve yenilenmesi veya yerinin doldurulması kısa zamanda pek mümkün olmayan fosil bazlı enerji kaynaklarının tamamen tükenmesini önlemek pek mümkün olmayacaktır. Sanayi dönüşümünün etkilerini artırmak ve aynı zamanda üretimi ve tüketimi desteklemek amacıyla, nanoteknoloji, malzeme bilimleri tasarımı ve yeni üretim metotlarının etkin bir şekilde kullanımı bu alanın temel hedeflerindedir. Bu alanın, diğer alanlarla uyum içindeki tüm sanayi faaliyetlerini ve sektörel uygulamaları (malzeme bilimleri ve teknolojileri, yüksek performanslı imalat ve süreç teknolojileri, nanobiyoteknoloji veya nanoelektronik) desteklenmesi planlanmaktadır. Yüksek verimlilikli ve yüksek performanslı materyallere olan ihtiyacın artması ve artan güvenlik ve emisyon standartları otomobil üreticilerini nanoteknoloji gibi yeni teknolojilere yöneltmiştir. Nanoteknolojiyi kullanarak, otomobil endüstrisi yeni büyüme potansiyeli ve gelişme momentumu yakalayacaktır. Endüstri nanoteknolojiyi kullanarak masrafları özellikle boyalar ve kaplamalarda düşürebilirler. Örnek olarak nanomalzeme kaplamanın bir katmanı, muadili normal kaplamanın üç katmanıyla aynı özellikleri taşımaktadır. Ayrıca, nanomalzemelerin ileride katalitik konvertörde kullanılan az bulunan metallerin miktarını düşürebileceği ve 2010 yılına kadar yaklaşık 1 milyar dolar tasarruf sağlayacağı tahmin edilmektedir.

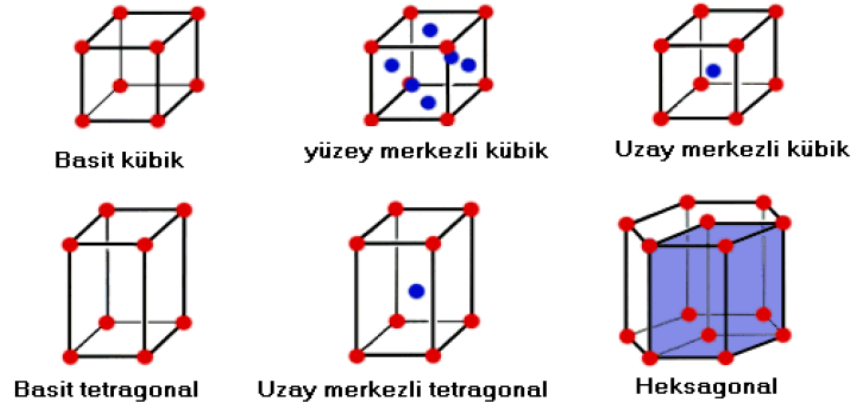
2.4. Nano Teknolojinin Elektronikteki Uygulamaları

Nano teknoloji, yalnızca minyatürize olmuş ürün ve üretim yapıları ortaya çıkarmayacaktır; bunun yanı sıra üretim sürecinde kullanılan materyaller atom ve moleküler düzeyde ele alınıp işleneceğinden atom (kuantum) fiziği devreye girecektir. Bu anlamda nano teknoloji çeşitli alanlarda yeni teknoloji, piyasa ve ürünlerin ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır. Gitgide “silikon sonrası” teknolojilerinin ne olacağı, nasıl şekilleneceği ve silikon teknolojisinin sadece kullanıcısı durumunda bulunan ülkemizin hangi yeni teknolojilerin gelişmesinde rol olabileceği önem kazanmaktadır. Boyutların küçülmesi ve nanometre boyutlarına

inilmesi nedeni ile nano elektronik olarak isimlendirilen elektronik aygıtların, silikon sonrasında önemli bir yer alması beklenmektedir. Nanofabrikasyon teknolojileri kullanılarak yaratılacak nanodedektör, nanolazer ve nanomodölatör aygıtlarının kullanıma girmesi ile daha yüksek hızlarda çalışan optik iletişim sistemleri, 2020 yılı ve sonrasında ihtiyaç duyulacak iletişim kapasitesini karşılayacaktır. Nanofotonik yapılar ve fotonik kristaller kullanarak madde ile elektromanyetik dalgaların etkileşmesini kontrol altına almak mümkündür. Bu etkileşimi moleküler seviyeye taşıyarak tek bir molekül ile nanofotonik teknolojiler kullanarak etkileşmek mümkün olacaktır. Bu etkileşim ise tek molekül hassasiyetinde sensör yapılmasını sağlayacaktır. Bu tür bir aygıtın özellikle moleküler biyoloji ve nanotıp bilimlerinde önemli uygulamaları olacaktır.

2.4.1. Katılarda Bağlanma

Bir kristalik katı, periyodik yapıyı kuran ve düzgün sıralar halinde yerleşmiş çok büyük sayıda atomu içerir. Moleküllerin bağlanma şekilleri, katılardaki bağların açıklanmasına da uygundur. Örneğin NaCl kristalindeki iyonlar, iyonik olarak bağlı iken, elmas yapıdaki karbon atomları kovalent bağ kurarlar. Diğer bir bağlanma şekli de bakır, gümüş, sodyum ve diğer metallerin bağlanmasının nedenini oluşturan metalik bağdır. Bazı katı maddeler amorf yapıda olmalarına karşılık, burada daha ziyade kristal malzemelerden söz edilecek. Kristallerde, atomlar, iyonlar veya moleküller genellikle ağ, veya şebeke (lattice) denen düzgün sıralanmalardan oluşmuştur. Şekilde basit kübik (b.c), yüzey merkezli kübik (f.c.c) ve cisim merkezli kübik (b.c.c) yapıdaki kristaller gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Şekilde basit kübik, yüzey merkezli kübik ve uzay merkezli kübik yapıdaki kristallerin temsili resmi.

2.4.1.1. İyonik Katılar

Pek çok kristal iyonik bağlanma yoluyla oluşur. Burada baskın etkileşme, iyonlar arasındaki Coulomb etkileşmesidir. NaCl kristaline bakılırsa, her Na^+ iyonu 6 en yakın komşu Cl^- iyonuna sahiptir ve her Cl^- iyonu da 6 en yakın komşu Na^+ iyonuna sahiptir. Na^+ iyonu tek bir Cl^- atomuna ait değildir. Her Na^+ diğer Na^+ iyonlarından dolayı itici Coulomb potansiyeline sahiptir. Ama bu daha küçük bir potansiyeldir çünkü diğer Na^+ daha uzaktadır.

Bu durumda net çekici potansiyel

$$U = -\alpha \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (2.1)$$

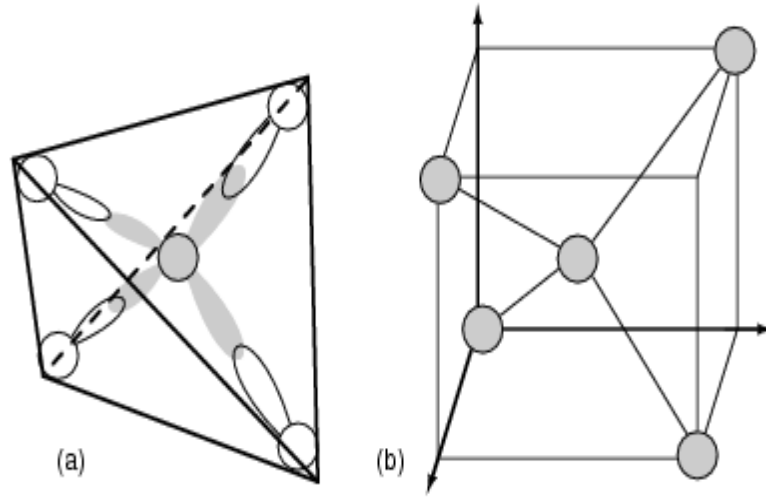
şeklindedir.

Burada α Madelung sabitidir. Eğer Na^+ sadece 6 Cl^- iyonu ile çevrili olsaydı, $\alpha = 6$ olurdu. Ama diğer Cl^- iyonlarının da var olmasından ötürü, NaCl kristalinde $\alpha = 1,75$ 'tir. Potansiyel aynı zamanda itici kuvvetleri de temsil eden terimleri içermelidir: Bu durumda toplam potansiyel

$$U = -\alpha \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m} \quad (2.2)$$

2.4.1.2. Kovalent Kristaller

Kovalent bağ çok kuvvetlidir ve iyonik bağ ile karşılaştırılabilir. Katı karbon elmas şeklinde iken atomları kovalent bağlı kristallerdir. Karbon, $1s^2 2s^2 2p^2$ elektron düzenine sahip olduğundan, dolu kabuk ($2p^6$) ya göre 4 elektron eksikliği vardır. Bu nedenle iki karbon atomu birbirlerini çok kuvvetli çekerler ve bağ (kohesif) enerjisi 7.3eV dur. Böyle bir bağ düzeni kurmak için her atom yaklaşık 4eV enerji gerektiren $1s^2 2s^2 2p^3$ düzeyine yükselmelidir.



Şekil.2.2. a) C atomunun kovalent bağlanma yapısının elmas yapı gösterimi b) C atomunun elmas örgüdeki en yakın komşuların tetrahedral yapı (kapalı yapı) gösterimi

Elmasın temel yapısı tetrahedral olarak adlandırılır. Her C atomu düzgün dörtyüzlünün merkezindedir ve bağlar arasındaki açı $109,5^\circ$ dir. Silisyum ve germanyum da benzer yapıya sahiptir. Kovalent kristallerin bağlanma enerjileri iyonik katılardan 4 kat daha büyüktür. Bu da kovalent katıların sertliğinin nedenini açıklar. Elmas oldukça serttir ve aşırı derecede yüksek erime noktasına sahiptir (4000K). Elmas aynı zamanda iyi yalıtkan ve görünür ışığa karşı geçirgendir.

2.4.1.3. Metalik Katılar

Metalik bağlar genel olarak iyonik veya kovalent bağlardan daha zayıftır. Metaldeki değerlik elektronları, metalin her yerinde hareket edecek şekilde serbesttir. Metal içinde büyük sayıda hareketli elektron vardır, bunlar serbest hareket ettiklerinden metallere + iyon gibi davranıp elektron gazıyla elektrostatik kuvvetlerle metali bir arada tutarlar.

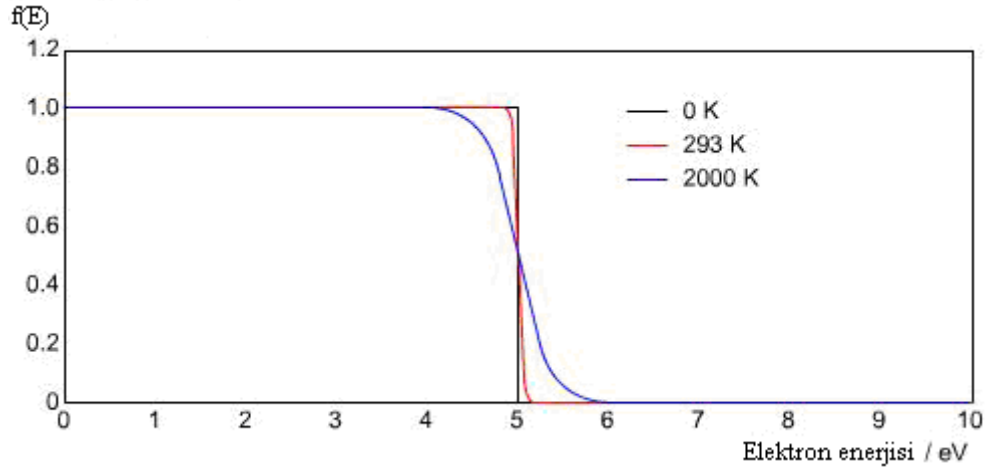
2.4.2. Metallerin Serbest Elektron Teorisi

Bu modelde, metaldeki değerlik(valans) elektronlarının metal içinde serbestçe hareket ettiği düşünülür ancak bu elektronlar metal içine hapsedilmiş durumdadır. Mikroskobik özellikleri makroskobik özelliklere bağlamak için parçacıklar topluluğuna istatistik fizik uygulanabilir. Elektronlar klasik istatistiğe değil, kuantum istatistiği olan Fermi - Dirac istatistiğine uyarlar. Fermi - Dirac istatistiği, dışarlama ilkesini göz önüne alır. Spini $1/2$ olan bütün parçacıklar (elektron, proton, nötron) fermiyonlar olarak adlandırılır ve bunlara bu istatistik uygulanmalıdır ve sistemin her durumunun yalnızca bir elektron tarafından doldurulma gereği vardır. Her durum, kuantum sayılarının bir takımı ile belirlenir. Fermiyonlar Pauli dışarlama ilkesine uymak zorundadır. Elektronun belirli bir E enerjili durumda bulunma olasılığı

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (2.3)$$

E_F Fermi enerjisidir.

$f(E)$ fonksiyonuna Fermi - Dirac fonksiyonu denir. $f(E)$ nin E'ye göre değişimi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.3. Değişik sıcaklıklar için Fermi-Dirac dağılımının gösterimi.

$$f(E) = \begin{cases} 1 & E < E_F \\ 0 & E > E_F \end{cases} \quad T = 0' \text{ da} \quad (2.4)$$

Yani 0 K de enerjisi Fermi enerjisinin altında bulunan bütün durumlar dolu iken, Fermi enerjisinden daha büyük enerjili bütün durumlar boşdur. $T > 0$ olan sıcaklıklarda $f(E) \rightarrow E$ şekilde kırmızı ve mavi eğrilerle gösterilmiştir. Fermi enerjisinden daha büyük enerjili seviyelerin sadece küçük bir kesri dolu, altındaki seviyelerin ise küçük bir kesri boşdur. Bir parçacığın hareketi L uzunluklu tek boyutlu kutuya sınırlanmış ise, izinli durumlar

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} n^2 \quad (2.5)$$

Bu enerji seviyelerine sahiptir. Bu izinli durumların dalga fonksiyonları

$\psi = A \sin(n\pi x / L)$ İle verilen duran dalgalardır ve bunlar $x=0$ 'da ve $x=L$ 'de $\psi = 0$ şartını sağlarlar.

Elektron konsantrasyonu arttıkça, E_F de artar. Metallerin Fermi enerjisinin büyüklüğü 5eV kadardır.

Fermi seviyesindeki elektronun hızı

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_F \quad (2.6)$$

$$V_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m}} \quad (2.7)$$

Fermi sıcaklığı ise, Fermi seviyesindeki elektronun sıcaklığıdır:

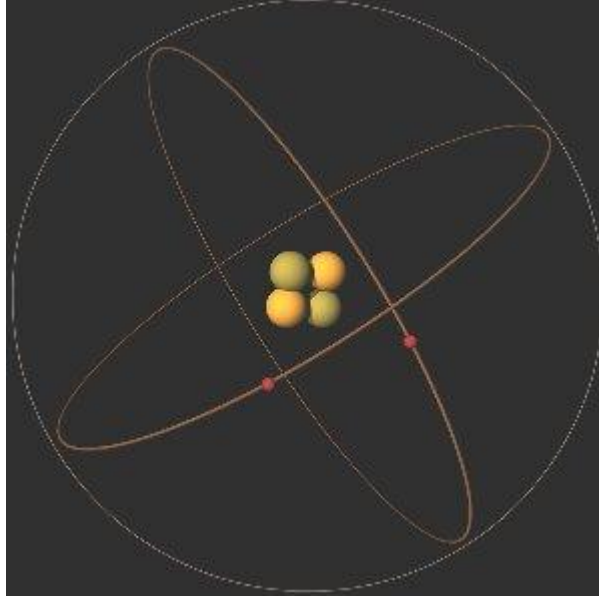
$$T_F = \frac{E_F}{k} \text{ dir.} \quad (2.8)$$

Özetle; bir metal, değerlik elektronları çok büyük sayıda enerji seviyeleri olan bir sistem olarak düşünülebilir. Elektronlar bu seviyeleri $E = 0$ 'dan başlayıp E_F 'de son buluncaya kadar, Pauli dışarlama ilkesine uyararak doldururlar. $T = 0K$ 'de Fermi enerjisinin altındaki bütün seviyeler dolu olduğu halde, Fermi enerjisinin üstündeki bütün seviyeler boştur.

2.4.3. Atomun Yapısı

Bir atom elektron, proton ve nötronlardan meydana gelir. Bir atomda bulunan elektron, proton ve nötronlar başka bir atomda bulunanlar ile aynıdır. Değişik atomlar arasındaki fark, bu atomlarda bulunan elektron ve proton sayıları ve bunların dizilişi ile ilgilidir. Elektron negatif elektrik yüküne sahiptir. Proton ise, elektronun sahip olduğu elektrik yüküyle aynı büyüklükte fakat pozitif bir yüke sahiptir. Proton elektronla aynı büyüklükte elektrik yüküne sahip olmasına rağmen, kütlesi elektronunkinden 1827 kat daha büyüktür. Birçok atomda nötron denen, kütlesi

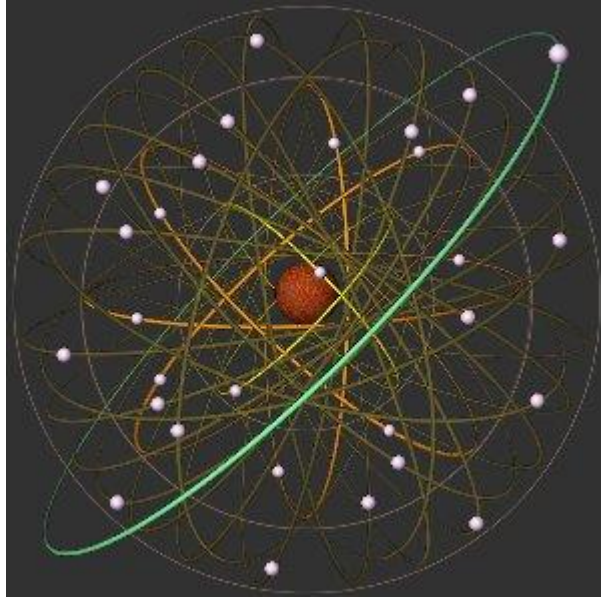
protonunkine yakın büyüklükte, elektrik yükü bulunmayan parçacıklar vardır. Bir minyatür güneş sisteminde olduğu gibi elektron, proton ve nötronlar Bohr atom modeline uygun olarak dizilirler. Şekil 2.4 de bir helyum atomu görülüyor.



Şekil 2.4. Bohr atom modeline göre bir helyum atomunun yapısı

İki adet pozitif yüklü proton ve iki adet nötronun bulunduğu çekirdek etrafında dönen iki adet negatif yüklü hafif elektronlar hep birlikte bir atomu oluşturur. Elektronlar atom çekirdeğine yörünge denen belirli bir uzaklıkta bulunurlar ve protonların çekim kuvvetini yenmeye yeten bir merkezci kuvveti yaratacak bir hızla dönerler. Elektronlar buldukları seviyede kalabilmeleri için belirli bir miktar potansiyel enerjiye sahip olmaları gerekir. Elektronlar çekirdekte daha uzak farklı bir enerji seviyesine geçmek için, uzay gemilerinde olduğu gibi, bir ilave enerjiye ihtiyaç duyarlar. Atom çekirdeği etrafında dönen bir elektronun belirli bir yörüngeden diğerine geçebilmesi için belirli bir kinetik enerjiye sahip olması gerekir. Bu enerjiye elektronun enerji seviyesi denir. Çok uzak bir yörüngedeki bir elektronun, çekirdeğe daha yakın bir yörüngeye inmesi sırasında enerjisini salması gerekir. Tam tersine daha uzak, yani bir üst yörüngeye çıkabilmesi için dışarıdan bir enerji alması gerekir. Atom çekirdeği etrafında dönen elektronların yörüngeleri hiç bir zaman rastgele değildir, aksine bu aralık, belirlenmiş enerji seviyesine bağlıdır. Bu değişik enerji seviyeleri, çekirdeğin etrafında dönen birbirine geçmiş farklı

büyükliklerde kabuklar gibi düşünülebilir. Bu kabuklar ve bu kabuklarda bulunan elektronların sayısı Pauli dışarlama prensibi ile tayin edilir. Bu prensibe göre, kabuklar ve bunlarda bulunması gereken elektron sayıları aşağıdadır.



Şekil 2.5. Bohr atom modeline göre bir bakır atomunun yapısı

Çizelge 2.1. Kabuklarda bulunması mümkün olabilen elektron sayıları

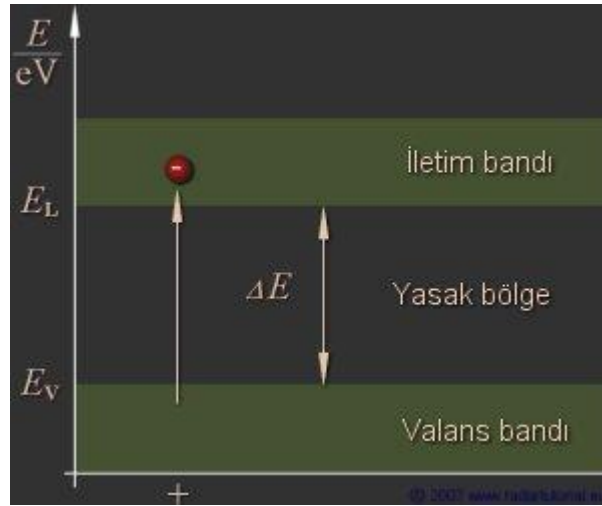
K-kabuğu	2 elektron	(n=1)
L-kabuğu	8 elektron	(n=2)
M-kabuğu	18 elektron	(n=3)
N-kabuğu	32 elektron	(n=4)

Ana kuantum sayısı n olan bir kabukta genel olarak $2 \cdot n^2$ adet elektron bulunur. Örneğin, 2. Kabuk'ta $2 \cdot 2^2$ yani 8 elektron bulunur. Önceleri sadece biçimsel bir

sınıflandırma sistemi olarak bakılan periyodik sistem elemanları artık Bohr atom modeli sayesinde fiziksel olarak da açıklanabiliyor.

2.4.4. Enerji Bantları Modeli

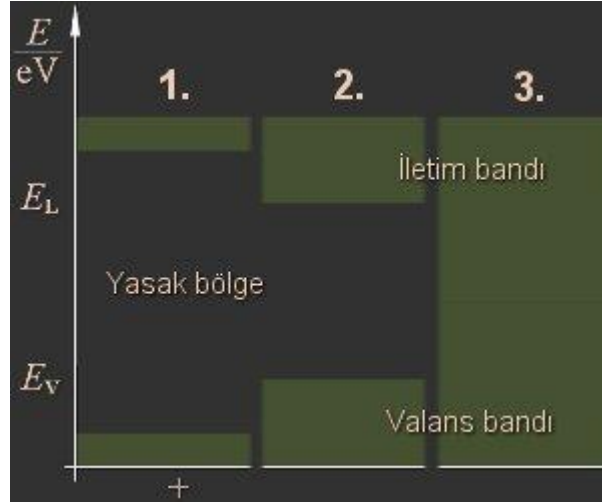
Bir atomik kabuğa dizilmiş elektronlar belirli bir enerji seviyesine sahiptir. Bir elektronun enerji seviyesi çekirdekten uzaklaştıkça artar. Bir elektronun enerjisi elektrik alanları, ısı veya ışık biçiminde olabilir. Eğer elektronların enerji seviyeleri, bu elektronları yörüngede kalmasını sağlayan çekirdeğin pozitif yükünden daha büyük ise, bu elektronlar atomdan koparlar ve serbest elektronlar haline gelirler. Bu serbest elektronlar, valans elektronları olarak da adlandırılan kabuk elektronlarına göre çok fazla enerjiye sahiptir.



Şekil 2.6. Bir yarı iletkenin enerji bant modeli (katkısız yarıiletken)

Elektriksel iletim olaylarını, elektronların mümkün olan değişik enerji durumlarının yer aldığı bir enerji şeması ile açıklayabiliriz. Valans elektronları valans bandında, iletim elektronları ise iletim bandında bulunurlar. İki bant arasındaki enerji farkına bant aralığı adı verilir. Valans elektronların kopabilmesi için varlığı gerekli olan bir minimum enerji nedeniyle, bir normal kafesten gelen hareketli yük taşıyıcılarının E_V valans bandı ve E_L iletim bandı arasındaki bölgede bulunan E enerji bölgesinde yer almaları mümkün değildir. Bu enerji bölgesi, yasak bölge olarak adlandırılır. İletim

bandı ve valans bandına ait enerji şeması yardımıyla elektriksel iletim olaylarını açıklayan modele bantlar-modeli denilir. Şekil 2.6.'da görülen iletim bandı ile valans bandı arasındaki ΔE enerji farkı yalıtkan, yarıiletken ve iletkeni karakterize eden önemli bir büyüklüktür. Şekil 2.7. yalıtkan (1), yarıiletken (2) ve iletken (3) ait farklı büyüklükteki yasak bölgeler görülüyor.

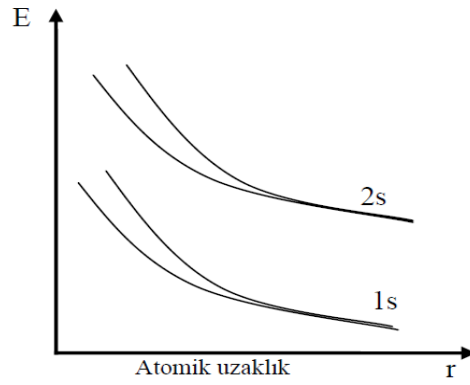


Şekil 2.7. Farklı büyüklüklerdeki yasak bölgeler 1)Yalıtkan, 2)Yarıiletken ve 3)İletken

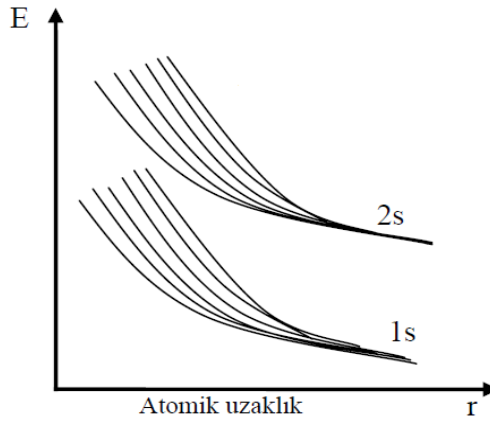
Yalıtkanlarda bant aralığı çok geniştir. Bant aralığı arttıkça bir valans elektronunun serbest bir iletim elektronuna dönüşebilmesi için daha fazla enerji gerekir. Yani, çok küçük bir akım için bile daha fazla enerji gerektiğinde bu eleman daha iyi yalıtır. Yasak bölge keza bu elemanda çok geniştir. Bir yarıiletkende bu yasak bölge daha dardır. Bir miktar ısı enerjisi verilmesi bile bir akım yaratabilir. Örneğin, germanyum yarıiletkende 50°C sıcaklık belirgin bir akımın akmasına neden olur. Son diyagramda iletim bandına kadar ulaşan bir valans bandını görülüyor. Pratik olarak yasak bölge mevcut değildir. Ufak bir enerji uyarımı ile valans elektronları iletim elektronlarına dönüşen bu eleman iyi bir iletkenidir.

2.4.5. Katuların Bant Teorisi

İki hidrojen atomu birbirine yaklaştığı zaman, ikisinin dalga fonksiyonları üst üste gelir ve 2 tane 1s durumu meydana gelir. Şekil 2.8.'de 1s ve 2s durumundaki iki atomu göstermektedir. Şekil 2.9.'da ise 1s ve 2s durumundaki altı atomu görmekteyiz. Katıyı meydana getirmek için çok sayıda atom bir araya gelirse, her atomik seviye bant şekline gelir. Şekil 2.10.'da enerji seviyeleri birbirine çok yakındır ve enerji bantları olarak adlandırılır.

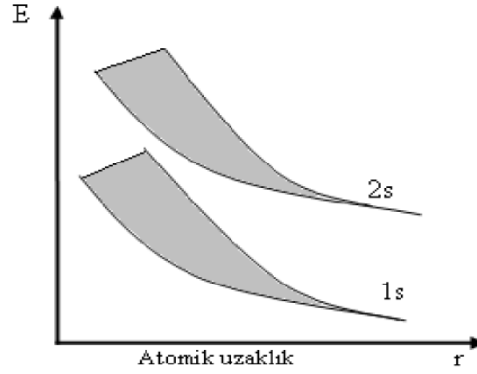


Şekil 2.8. İki atom bir araya gelirse her durum iki seviyeye bölünür



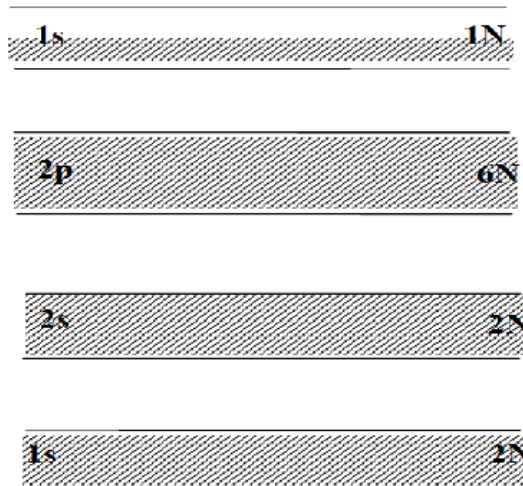
Şekil 2.9. Altı atom bir araya gelirse her durum altı seviyeye bölünür

Katıyı meydana getirmek için çok sayıda atom bir araya gelirse, her atomik seviye band şekline gelir. Enerji seviyeleri birbirine çok yakındır ve enerji bantları olarak adlandırılır.



Şekil 2.10. Çok sayıda atom bir araya gelirse her atomik seviye band şeklini alır

İyi iletken, elektronlarla dolu en yüksek enerji bandının sadece bir kısmının dolu olduğu durumu temsil eder. Na atomunu örnek olarak alırsak, enerji bandı şekil 2.11.'deki gibidir. $1s^2 2s^2 2p^6$ bandları tamamıyla doludur, 3s bandı yarı yarıya doludur. 3s bandı $2N$ mümkün enerji durumu içerir. Yörüngesel açısal momentumu 1 olan bir seviye $2(2l+1)$ elektron tutabilir. $2l+1$ yörüngesel açısal momentumun mümkün Yönelmelerinden 2 çarpanı ise, elektron spininin yönelmesinden çıkar. N atomlu bir sistem için her bandın alabileceği elektron sayısı $2(2l+1)N$ ' dir.



Şekil 2.11. Sodyum atomu için enerji bantlarının gösterimi

$$1s \rightarrow n=1 \quad l=0 \quad 2(1)N=2N$$

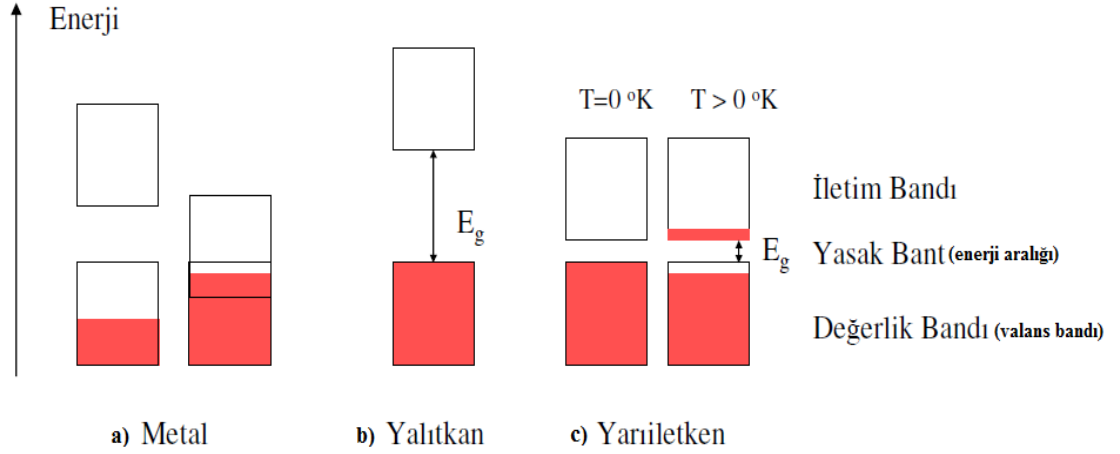
$$2s \rightarrow n=2 \quad l=0 \quad 2(1)N=2N$$

$$2p \rightarrow n=2 \quad l=1 \quad 2(3)N=6N$$

$3s \rightarrow n=2 \quad l=1 \quad 1(1)N=1N$ burada sadece 1N tane elektron bulunur ancak 2N tane seviye olduğundan yarı doludur. 3s in üzerindeki 3p bandı ise tamamen boştur. 3s bandında N tane de boş seviye vardır.

Metale bir potansiyel farkı uygulandığı zaman, elektronlar ivmelenir ve enerjileri artar. Birçok boş seviye bulunduğu elektronlar için daha yüksek enerji seviyelerine atlayabilirler. İyi iletkenlerin hepsinin karakteristik özelliği, en yüksek enerji seviyelerinin kısmi olarak dolu olması veya iki bandın üst üste gelmesidir. İki bandın üst üste gelmesine örnek Mg atomudur. $Mg(12) \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ 3s bandı doludur ama boş olan 3p bandı 3s bandına çakışır, dolayısıyla elektronların hareket edebileceği pek çok enerji seviyesi bulunur. İyi yalıtkan, elektronlarla dolu olan en üst seviyenin (valans band) tamamıyla dolu olduğu durumdur. Bundan sonraki yüksek enerji seviyesi iletkenlik bandı olarak adlandırılır ve bu band valans bandından bir “yasak enerji aralığı” ile (band gap) E_g ile ayrılır. E_g yalıtkanlarda tipik olarak 5 - 10eV civarındadır. Oda sıcaklığında (300K) ortalama kinetik enerji $\frac{3}{2} kT \approx 0,04 \text{ eV}$ dur ve hemen hemen hiçbir elektron iletkenlik bandına ulaşamaz. Yalıtkana bir potansiyel farkı uygulandığında, elektronların gideceği elektronik seviyeler olmadığı için akım oluşmaz.

Maddenin elektriksel özellikleri bu maddelerin elektronik band yapısı ile yakından ilgilidir.



Şekil 2.12. a) İletken b) Yalıtkan c) Yarıiletkenler için enerji seviyelerinin temsili gösterimi [50]

Enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boş ise kristal yalıtkan gibi davranır çünkü elektrik alan uygulandığında bant içinde boş yerler olmadığı için elektronlar hareket edemezler (yük taşıyamazlar)!

$$E_g^{\text{yalıtkan}} \gg E_g^{\text{yarıiletken}}$$

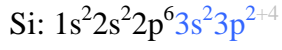
E_g (Ge) = 0,6 eV (yarıiletken) E_g (Si) = 1,12 eV (yarıiletken) E_g (C) = 5,4 eV (yalıtkan)

E_g (GaAs) = 1,43 eV (yarıiletken)

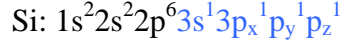
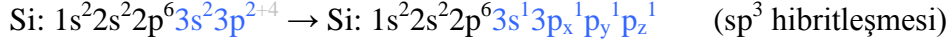
Yalıtkanlara benzer şekilde yarıiletkenlerin band şeması da valans band, enerji aralığı ve iletkenlik bandından oluşmaktadır. E_g aralığı bunlarda 1eV civarındadır. Oda sıcaklığında bazı elektronlar termal enerjiyi alarak iletkenlik bandına geçebilirler ve voltaj uygulandığında çok küçük bir akım oluşur. Yüksek sıcaklıklarda, daha fazla elektron üst banda atlayabilir. Bu etki yüksek sıcaklıklarda düzensizliğin artmasına neden olan etkiden fazladır, bu yüzden yarıiletkenlerin özdirenci sıcaklıkla azalır. Yarıiletkene bir voltaj uygulandığı zaman, iletkenlik bandındaki az sayıda elektron + elektroda yönelir. Valans banddaki elektronlar da aynı şeyi yapmaya çalışır, bunların ancak çok az bir kısmı yapar çünkü çok az boş seviye vardır. (Bu seviye iletkenlik bandına çıkan elektron tarafından boşalmıştır.)

Yarıiletkenler son yörüngesi yarım dolu olan elementlerdir: C, Si, Ge.

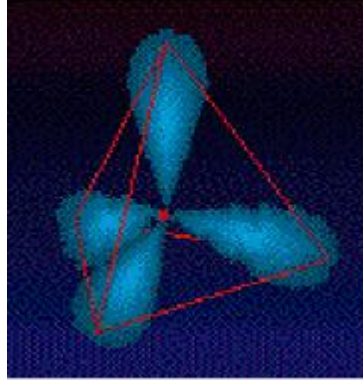
Örneğin silikonu ele alalım:



Si atomları bağ yapacağı zaman s ve p yörüngesindeki elektronlar hibritleşerek (sp^3 hibritleşmesi) dört bağ yaparak aralarında 120° olacak şekilde bağ oluşturur.

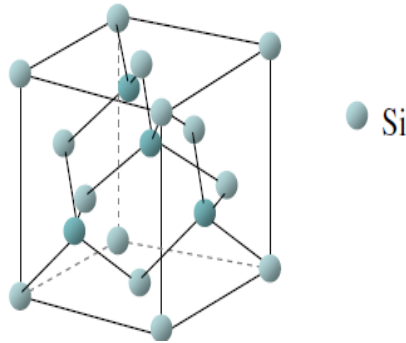


Bu hibritleşmenin sonucu olarak kovalent bağ oluşarak (elektron paylaşımı) elmas yapı olarak bilinen kristal yapı oluşur.



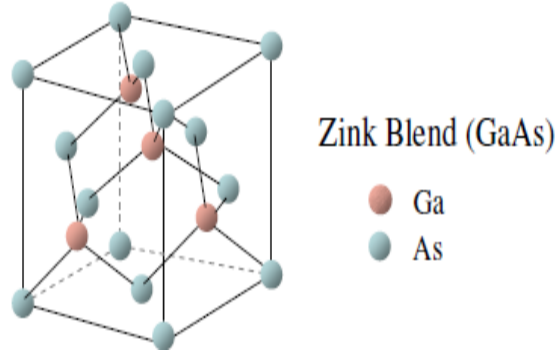
Şekil 2.13. Elmas yapındaki Kristal yapının gösterimi

Diamond (elmas) C, Si, Ge



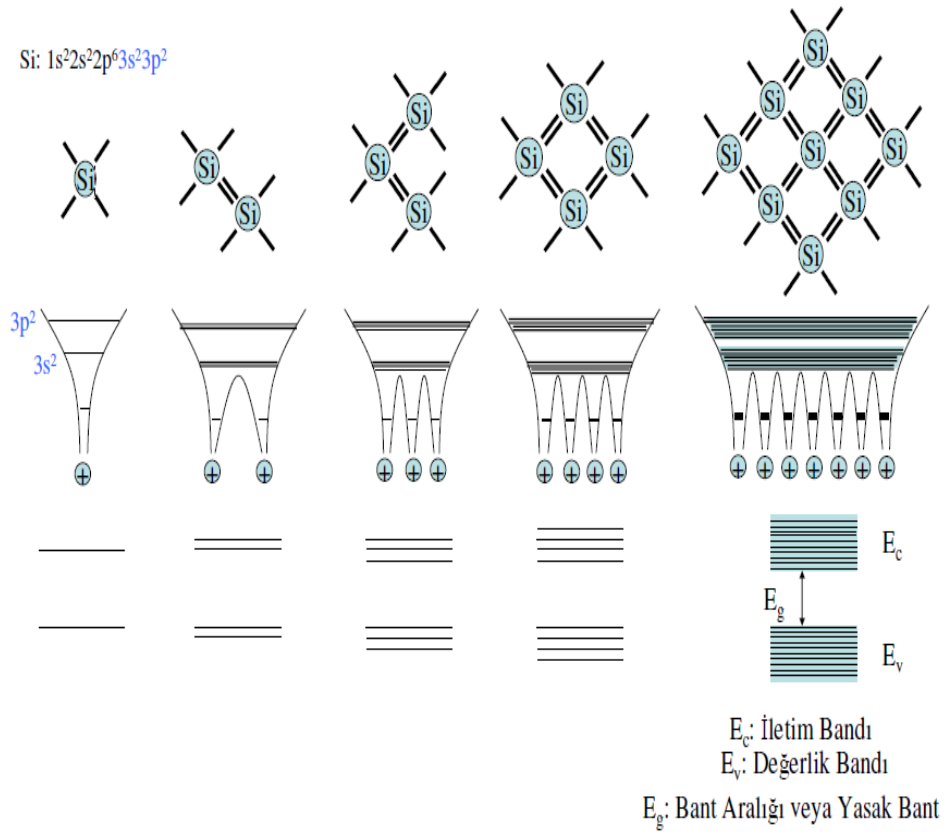
Şekil 2.14. Si gösterimi

Grup III ve V atomları da benzer bağ yaparak Zink Blend kristal yapıyı oluştururlar



Şekil 2.15. GaAs gösterimi

Yarıiletkenlerde bant yapısının oluşumunu silikon atomlarının kristali oluşturmak için bir araya getirerek açıklayalım



Şekil 2.16. Si için atom sayısına bağlı bant aralığındaki değişimin gösterimi

Katı malzemelerin çoğu kristal yapıya sahiptir. Kristal yapı, birim kristal hücrenin madde içerisinde tekrarlanmasından oluşur. Kristal yapı içerisinde atomlar bir araya

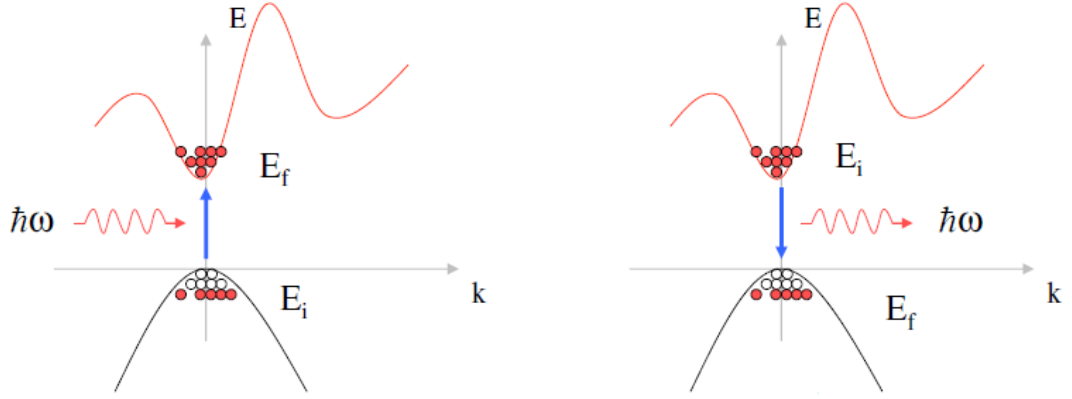
geldiğinde, atom içerisindeki elektronların enerji seviyeleri birbirinden etkilenecektir. Etkilenme valans elektronlarının bulunduğu valans kabuğunda olur. Kristal yapının biçimine bağlı olarak atomlar birbirine daha da yakın olduğunda valans kabukları iç içe geçecek ve valans elektronlarının enerji seviyeleri farklı değerler alacaklardır. Valans elektronlarının enerji seviyelerindeki farklılaşmalar nedeniyle valans elektronlarının değişik enerji seviyelerini içeren bir enerji bandı meydana gelir. Kristal yapının biçimine bağlı olarak bu enerji bandı ikiye ayrılabilir. İkiye ayrılmış bir enerji bandı yapısında iki bant arasında elektronların alamayacağı enerji seviyelerini içeren bir bant aralığı meydana gelir. Bu enerji bant aralığı yasak bant olarak adlandırılır. Enerjisi düşük elektronların bulunduğu bant valans bandı olarak tanımlanır. Valans bandında bulunan bir elektronun İletim bandı adını alan üst seviyeye çıkabilmesi için yasak banda karşılık gelen enerji miktarını kazanması gerekir.

Atomlarından ayrılarak iletim bandına geçen elektronlar serbest olarak malzeme içerisinde hareket edebilirler. Yarıiletkenlerdeki taşıyıcıların enerji E-k grafiği bize önemli bilgiler verir

Enerji bantlarının sekline göre yarıiletkenleri iki sınıfa ayırabiliriz. Eğer iletim bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji en düşük değere $k=0$ da sahip ise bu yarıiletkenlere doğrudan aralıklı (direk bant aralığına sahip) yarıiletkenler denir. Örnek olarak GaAs bileşik yarıiletkeni verilebilir.

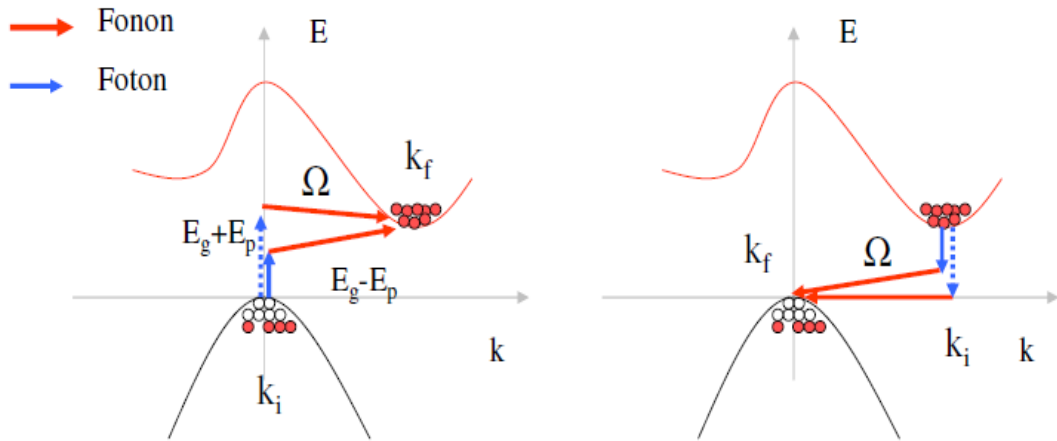
Eğer iletim bandı en düşük enerjiye $k \neq 0$ de sahip ise bu yarıiletkenlere indiren bant aralıklı denir Örnek olarak Si,Ge yarıiletkenleri verilebilir. Bir yarıiletkenin direk veya indirek bant aralığına sahip olması optik özelliklerini belirler ve Bu optoelektronik uygulamalar için kullanılıp kullanılmayacağı için en büyük kriterlerden biridir.

Direk band aralığına sahip yarıiletkenler: GaAs, InP



Şekil 2.17. Direk band aralığına sahip yarıiletkenler için enerji seviyeleri arası geçişler a) soğurma b) ışımaya spektrumu

İndirek band aralığına sahip yarıiletkenler, Si, Ge



Şekil 2.18. İndirek band aralığına sahip yarıiletkenler için enerji seviyeleri arası geçişler a) soğurma b) ışımaya spektrumu

2.4.6. Yarıiletken Nanokristallerde Enerji Seviyeleri

Silisyum bilindiği gibi elektronik endüstrisinde en çok kullanılan yarı iletken materyaldir diğeri ise germanyumdur. Germanyum ve silisyum tek kristal bir yapıya sahiptir. Mono kristal yapı her köşesinde bir atom bulunan düzgün dörtgen şeklindeki bir hücrenin dört yönde tekrarlanması ile oluşur bu karbonun elmas halindeki yapısına benzer. Eğer kristal saf değilse, içinde yabancı atom varsa veya kristalin işlenmesi sırasında sıcaklığın etkisi ile malzemede düzensizlik oluşturur. Bu düzensizlikler kristalin elektriksel özellikleri üzerinde olumsuz etki yapar bunun için elektronikte kullanılacak malzemenin mümkün olduğu kadar saf olması istenir. On milyarda bir saflık yeterli bir saflıktır (yani on milyarda bir atom yabancı atom yeterli kabul edilebilir). Doğadaki kristal yapıdaki malzemelerin çoğu polikristal (çoklu kristal yapıya sahiptir). Bu nedenle elektronik malzeme üretimine uygun değildir. Atomik yapıları dikkate alındığında silisyumun da germanyumun da son elektron yörüngelerinde 4'er elektron bulunur, fakat toplam elektron sayısı dikkate alındığında germanyumun 32, silisyumun 14 elektronu vardır. Bunun anlamı, elektron sayısı fazla olan malzeme atomun çekim kuvvetinden daha çabuk kurtulacağı için daha küçük bir enerji ile iletken olabileceğidir. Bir örnek vermek gerekirse germanyum diyotun iletme geçme voltajı 0,3 volt iken silisyumun 0,7 voltur. Yani iletim konusunda silisyum daha istikrarlı bir malzemedir. Germanyum yukarıda anlatılan atomik yapısı yüzünden özelliğini daha çabuk kaybedebilen bir malzemedir. İşte bu nedenden dolayı silisyum daha çok tercih edilir.

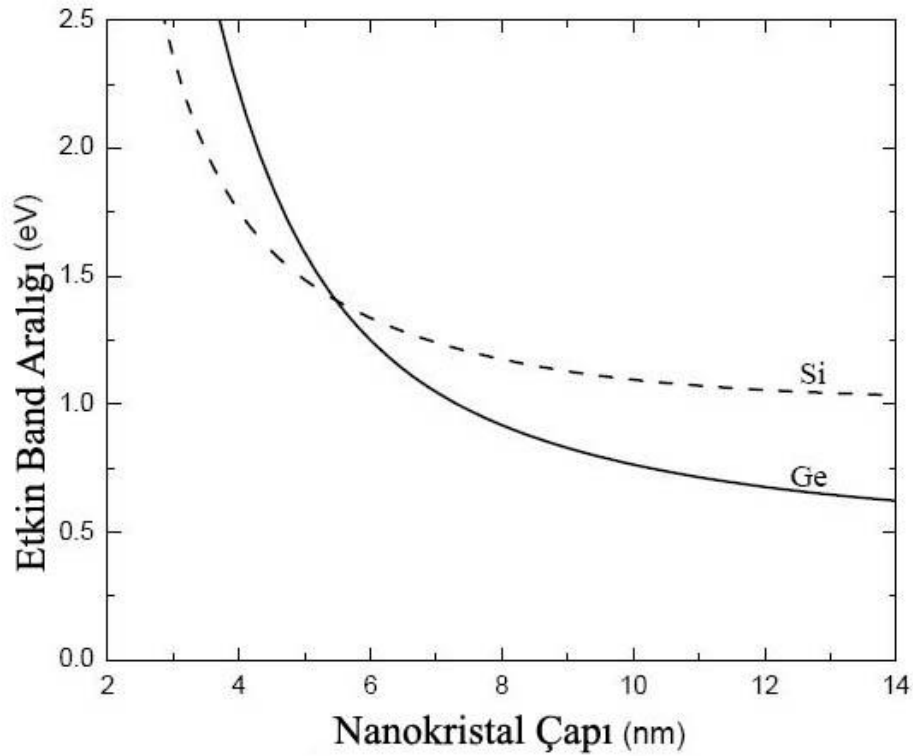
Işıyan yarıiletken malzemelerin hemen hepsi, sahip oldukları etkili ışık salma özelliklerinden dolayı GaAs ve InP gibi bileşik yarı iletken malzemelerden yapılmaktadırlar. GaAs ve InP gibi III-V grup yarıiletken malzemeler üstün elektriksel ve optik özelliklere sahiptir, GaAs ve InP elektronik teknolojisinde, optoelektronik uygulamalarında, mikrodalga uygulamalarında, LED' ler ve foto detektörlerden fiber optiğe kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar [51].

Ge nanokristallerinin yapısını inceleme çalışmaları ile ilgili olarak ilk çalışma çığlama yardımı ile büyütülmüş Ge filmlerinde tavlamanın etkisi ile oluşturulan Ge nanokristalleri ile başlamıştır [52].

Nano yapılar üzerinde yapılan optik çalışmalarda çok küçük boyutlarda kuantum hapis etkisi ile birlikte görünür bölge Fotoluminesans üzerine yoğunlaşmıştır. Kuantum hapis etkisinin bir etkisi olarak Silisyum nanokristallerden görünür bölgede ayarlanabilir bir dalga boyu aralığında ışıma elde edilmektedir.

Ge nanokristallerinde görülen optiksel ve elektroniksel özelliklerin Si nanokristallerinden düşük boyutlarda ekziton Bohr çapının daha büyük olması nedeni ile daha etkili olacağı deneysel ve teorik olarak gözlemlenmiştir. Bu nanokristalleri kullanarak fotodetektör [53], ışık yayıcı [54], tek elektron transistörü [55], fotonik yapı [56], kuantum bilgisayar [57], doğrusal olmayan optik ortam [58] ve ışığa duyarlı elementler [59] elde etmek mümkündür.

Etkin kütle yaklaşımı, elektron ve deşiklerin hapsedilmelerine bağlı olarak boyuta-bağlı birtakım özelliklerini verir. Ge ve Si yarıiletkenlerin ekziton enerjileri kristal yarıçapının fonksiyonu olarak Şekil 2.19 'de gösterilmiştir [60].



Şekil 2.19. Yarıiletken nanokristallerde band aralığının nano kristal çapına bağlı değişim grafiği [60]

Germanyum ekziton Bohr yarıçapı ve özel band yapısından dolayı önemli avantajlara sahiptir. Germanyumun ekzitonik bohr yarıçapı yaklaşık 24,3 nm dir, bu Si için 4,9 nm dir [61]. Ge kristallerinin atomik Bohr çapının Si nanokristallerinden daha büyük olmasından dolayı Ge kristali Si kristaline nazaran daha büyük çaplarda daha fazla ayarlanılabilir bant aralığı enerji yapısına sahiptir. Sonuç olarak kuantum hapis etkisi Ge nanokristalleri için kabul edilir ve belirgin şekilde Si nanokristallerine göre ön plandadır. Ayrıca Ge kristalinin doğrudan band geçişi 0,898 eV iken Si kristalinin 3,03 eV tur [62]. Küçük nanokristallerin deneysel olarak daha zor kontrol edilebileceği göz önüne alınırsa Ge nanokristali Si nanokristaline göre tercih edilebilir bir konuma gelmektedir.

2.5. SiO₂ Matrisi İçerisinde Yarıiletken Nanokristallerin Oluşumu

Son yıllarda yapılan çalışmalarda SiO₂ matrisinin içine yerleştirilmiş yarıiletken nanokristallerin daha iyi Fotoluminesans ışımaya performansı ve bu yapılardan hızlı bellek üretebilme olanağı sağlandığından teknolojik uygulamaları tercih edilmektedir. Ge nanokristaller kullanılarak SiO₂ matrisi içerisinde oluşturulan bellek uygulamaları gelecekte oluşturulacak uygulamalara yol gösterecektir. Bu konudaki çalışmalar nanokristallerin içerisinde bulunduğu matrisin özelliğine bağlı olarak değişken özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu yüzden görünür bölgede etkili ışımaya elde edebilmek için farklı matrislere ihtiyaç duyulmaktadır. Silisyum oksit içerisine yerleştirilen nanokristaller son on yıldır göstermiş oldukları üstün optik [63-66] ve elektriksel özelliklerinden [67] dolayı yoğun ilgi toplamaktadırlar. Silisyum oksit filmler termal oksidasyon, elektroliz, vakum depolama, plazma oksidasyon teknikleri [68] ya da PECVD tekniği ile büyütülebilmektedirler [69-73]. Bu tekniklerin yanı sıra silisyum oksit içerisindeki Ge nanokristaller Si_xGe_{1-x}O₂ ile Hidrojenin (H₂) reaksiyonu [74], ve Si_xGe_{1-x} alaşımının oksidasyonu ile oluşturulabilir [75]. Son olarak, Ge nanokristallerin iyon ekme yöntemi ile boyutları 2 ile 25 nm arasında kontrol edilebilir bir şekilde elde edileceği gösterilmiştir [76-78]. Bellek uygulamalarında SiO₂ ile nanokristaller arasındaki tünel oksit kalınlığının ve bu bölgedeki kristallerin boyutlarının, yoğunluklarının kontrol altında tutulması çok önemli bir olgudur. Amorf SiO₂ matrisler içine gömülü yarıiletken nanokristallerin yük depolama özelliğinden yola çıkılarak gelecekte flash bellek uygulamalarındaki

potansiyeli yoğun bir araştırma konusudur [79]. Günümüzde, SiO₂ matrisine yerleştirilen yarıiletken nanokristaller, daha iyi fotolüminesans ışımaya performansı ve bu yapıda flash bellek üretebilme olanağı sağladığından tercih edilmektedir. Yarıiletken kristaller genellikle 2-25 nm boyutunda kuantum noktalarıdır. Geleneksel bellek aygıtları oksit katmanlarına yerleştirilmiş yüzer-geçitli metal oksit kapasitörlerdir. (MOS) katman kalınlığı 7-10 nm dir ki kanal ve yüzer-geçit genellikle SiO₂ ile izole edilir [80]. Fakat bu yapıların dezavantajı kaçak akım varlığında bütün bilgiyi kaybetmeleridir. Nanokristal tabanlı bellek aygıtlarında sadece bir noktada ya da birkaç noktada yükün salınması aygıtın işini kapsamlı olarak etkilemez [80-82]. SiO₂ matrisine yerleştirilmiş yarıiletken nanokristallerden ilk fotolüminesans gösteriminin ardından, bu tür yapılara dayalı LED yapma olasılığı göz önüne alınmaktadır. Günümüzde, IV. grup yarıiletken nanokristalleri, elektrolüminesans sergiledikleri ve bu yüzden de Si bazlı LED yapımında kullanılma potansiyeline sahip oldukları için yaygın olarak araştırılmaktadır [83-94].

Mikro elektronik dünyasının iki önemli yalıtkanı olarak amorf silisyum ve silisyum nitrat kullanılmaktadır [95]. Ancak baskın olarak bu güne kadar silisyum üstünlüğünü sürdürmüştür [95,96] amorf silisyumun küçülen boyutlarla birlikte meydana gelen bazı zayıflıkları (düşük güvenilirlik [95,96]) ile alternatif olarak yeni yalıtkan malzemelere gün geçtikçe ihtiyaç duyulmakla beraber bu konu hakkında çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [95-97]. Yapılan çalışmalar sonucunda ileride amorf silisyum yerini silisyum nitrat ve silisyum oksinitrat matrislerine devredeceğini göstermektedir [98]. Son zamanlarda, alan etkili transistörlerde geçit oksidinin içine yerleştirilen Ge veya Si nanokristallerin, bellek aygıtları olarak kullanılabilmesi anlaşılmıştır [99-104]. SiO₂ içerisindeki Ge nanokristallerinde yük depolanabildiği ve bu depolanan yüklerin, nanokristaller yalıtılmış olduğu için, yer değiştirmelerinin engellendiği gözlenmiştir. Bu özelliğin güvenilirliği ve sürekliliği artıracığı gözlenmektedir. Tek bir oksit hatası, nanokristal tabanlı belleklerde, geleneksel yüzer geçite sahip kalıcı belleklerde olduğu gibi tam yük kaybına neden olmamaktadır. SiO₂ tabaka içindeki Ge nanokristallerinden kızılötesi spektral bölgede geniş bir elektrolüminesans ışımaya gözlemlenmiştir. SiO₂ içerisindeki Ge nanokristallerinde deneysel olarak yapılan çalışmalarda boyutları 2-5 nm arasında değişen, görünür bölgede 350-700 nm arasında ayarlanabilir bir ışımaya elde edildiği fotolüminesans deneyleri ile gözlemlenmiştir [105]. Daha büyük

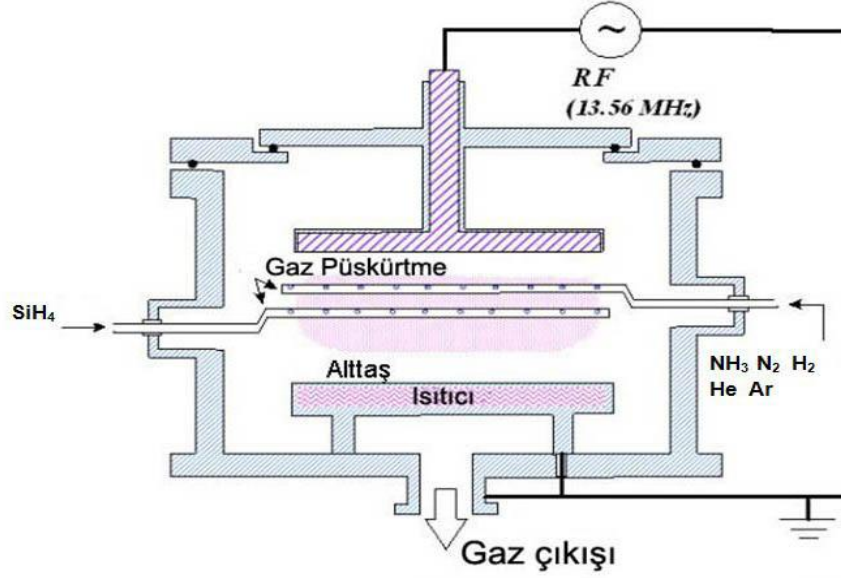
nanokristaller üzerinde çalışmalara rastlanmakta mümkündür [106]. SiO₂ içerisindeki Ge nanokristalinin yardımı ile üretilen kızıl ötesi fotodedektörler Ge nanokristalinin optik yutulma katsayısı uzun taşıyıcı yaşam süreleri yüksek fonon saçılmaları göz önüne alındığında büyük bir ilgi toplamaktadır [107-109].

2.6. Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buharlaştırma Sistemi (PECVD)

Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma yolu ile depolama tekniği (PECVD), Kimyasal buhar depolama tekniğinden (CVD) birkaç yönden öne çıkar. Bunlardan bir tanesi CVD tekniğinde büyütme sıcaklığı 700–900 °C arasında değişirken PECVD büyütme sıcaklığı daha düşük sıcaklıklarda, 150 – 350 °C arasında kullanılabilir. Plazma oluşumu ile birlikte, CVD tekniğindeki yüksek sıcaklıklarda çalışma gereksinimini ortalama olarak düşük sıcaklıklarda sağlayabilmektedir. Yüksek büyütme sıcaklıkları altında IC uygulamalarda bazı malzemeler arasında oluşabilecek difüzyonlar ve benzer sorunların en aza indirgenmesi sağlanmış olacaktır. Plazma biriktirme sistemi ana hatlarıyla, içerisinde plazmanın elde edildiği reaktör, birbirine paralel, disk şeklinde, iki elektrot, gazların bileşenlerine ayrılması için radyo frekanslı gerilim uygulayan RF jeneratörü, reaktöre kontrollü bir şekilde gaz akışını sağlayan iğne vana, akış ölçer ve düzenleyicilerin olduğu gaz girişleri ile çıkıştaki mekanik vakum pompasından oluşmaktadır. Paralel iki elektrot arasına doğru akım (DC) uygulanarak elektrik alanın katkısıyla elektrotlar arasında bir kaç pF değerinde bir kapasitans oluşur ve RF sinyali buraya uygulanır. Gazlar anot-katod arasına gönderilerek plazmanın sadece bu iki elektrot arasında oluşması sağlanmaktadır. Bu plazma oluşması istenilen kaplamanın cinsine göre ortamda bulunan SiH₄, GeH₄, N₂O gibi gerekli bulunan gazları bileşenlerine ayırır ve alttaş üzerinde ince bir film tabakası halinde kaplanmasını sağlar. PECVD reaksiyonları çizelge 2.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma reaksiyonları [110].

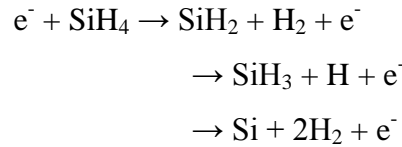
Elektron nôtür	
Uyarma	$e^{-} + A \rightarrow A^{*} + e^{-}$
Ayrışma	$e^{-} + AB \rightarrow A + B + e^{-}$
Elektron bağlanma	$e^{-} + A \rightarrow A^{+} + 2e^{-}$
Ayırarak bağlanma	$e^{-} + AB \rightarrow A^{+} + B + 2e^{-}$
Elektron iyon	
Yeniden birleştirme	$e^{-} + A^{+} \rightarrow A$
Ayırarak yeniden birleştirme	$e^{-} + AB \rightarrow A^{-} + B$
Yarı kararlı çarpışma	$A^{*} + G \rightarrow G^{*} + A + e^{-}$
İyon nôtür	$A^{+} + BC \rightarrow A^{+}B + C$
Yüzey reaksiyonları	$AB \rightarrow A(\text{film}) + B$ $A^{+} + CB(\text{film}) \rightarrow A^{+}C(\text{film}) + B(\text{film})$



Şekil 2.20. Plazma Destekli Kimyasal Buharlaştırma yöntemiyle numunelerin hazırlandığı sistemin şematik gösterimi.

Başlangıç olarak bu teknikte tabakalar arasında uygulanan elektrik alan ortamda bulunan gazların kinetik enerjilerinin artmasına ve bu sayede gaz ortamından ayrılan bazı gaz moleküllerin iyonize olmasına sebep olur ve iyonize olmuş moleküllerin birbirleri arasında etkileşimleri sonucunda reaksiyon başlatılır. İşlem devam ederken ortamda yeni elektronlar üretilmesi durmaz ve bu oluşum plazmanın oluşumu ile sonuçlanır.

Reaksiyonu Silan gazı için şekillendirecek olursak;



(2.9)

Eğer büyütme sırasındaki ortam basıncı 0,1 Torr civarında ise elektronların ve moleküllerin alabilecekleri ortalama serbest yol artacağından çarpışmaların sayısı

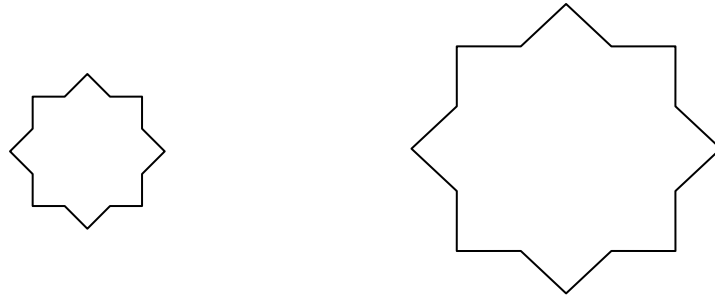
azalacaktır. Bu azalma gaz moleküllerin iyonizasyon oranının da azalmasını yol açacaktır. Diğer bir taraftan basınç 5 Torr ya da daha fazla seçilirse moleküllerin çarpışma oranları artacak ve plazma yeniden kararsız bir değişime maruz kalacaktır. İki olası durumda da büyütülecek tabakaların kalitesi, pürüzlülüğü istenilen kalınlık ya da düzene sahip olmayacaktır. Bununla birlikte literatürde oluşturma sırasında ortamda bulunan basınç değiştirilerek belirli limitler içerisinde oluşturulan filmler içerisindeki nanokristal yapıların üzerinde oluşan farklı etkiler ile ilgili çalışmalar bulmak mümkün olmaktadır. Plazma elektronların, iyonların radikallerin (çiftlenmemiş elektronlu atom veya moleküller) birbirleri arasında etkileşmeleri sağlamak açısından kullanılan etkili bir kimyasal ortamdır. Özellikle 1970 'lerden sonra, RF yardımı ile plazma oluşturma sıklıkla kullanılmaya başlanmış olup, bu yöntemle yüksek teknoloji gereksinimi duyulan özellikle büyük boyutlu elektronik devrelerde, ince film üretimi ve inceltme yöntemlerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. RF, diğer plazma türlerinden büyük boyutlarda uygulanabilir olması sebebiyle öne çıkmaktadır [111].

2.7. Nanokristal Oluşum Teorisi

PECVD tekniğinde filmin büyütülmesinden sonra nanokristal gözlenmesi beklenemez, ortamda bulunan atomlar nispeten kinetik enerjileri açısından zayıftırlar ve bir araya gelmek için belirli bir enerjiye ihtiyaç duyarlar. Fırınlama sırasında, kristal yapıların gelişimi difüzyon mekanizması yolu ile oluşur. Ostwald topaklanması olarak bilinen bu teoriye göre sıcaklığın ve sürenin etkisiyle küçük olanlar birbirleri arasında su damlaları misali bir araya gelerek daha büyük kristaller oluştururlar. Parçacıkların kümelenme teorisi, W.Ostwald tarafından 1900 yılında ele alınmış olup, ancak bundan yaklaşık 40 yıl önce ilk yayın basılabildiği. Modern parçacık kümelenme teorisi ise Lifshitz ve Slyezov [112] ve C. Wagner [113] tarafından modellenmiş olup G. W. Greenwood [114] tarafından model geliştirilmiştir. Günümüzde ise bu teori, yalıtkan matrisler içinde oluşturulan nanokristallere de uygulanabilmektedir [115].

2.7.1. Ostwald Topaklanması

Ostwald topaklanması, büyük kristallerin küçük kristallere oranla enerjik olarak daha çok tercih edildiğinden kendiliğinden gelişen bir olaydır. Kinetik olarak birçok küçük kristalin oluşumu tercih edilirken (küçük parçacıklar daha kolay çekirdek oluşturabilirler), termodinamik olarak daha büyük olanlar tercih edilirler. Kinetik açıdan, birçok küçük kristal oluşumu daha kolaydır. Fakat küçük kristallerin yüzey alanının hacmine oranı büyük kristallerinkine göre daha fazladır. Yüzeydeki moleküller, içerde iyi bir şekilde düzenlenmiş ve paketlenmiş olanlardan enerji bakımından daha az kararlıdır. Büyük kristaller, daha büyük hacim yüzey alanı oranıyla daha düşük bir enerji seviyesine sahiptirler. Küçük kristaller sahip oldukları enerjilerini azaltmak isteyeceklerdir. Böylece, küçük kristaller büyük kristallere dönüşerek (büyük kristaller tarafından yutulurken) daha düşük bir enerji seviyesine ulaşacaklardır. Gelişimin ilk safhalarından sonra, gelişim durmaz [116], daha küçük gruplar sistem tarafından yüzey potansiyelini indirgemek amacıyla daha büyük olanlara dönüştürülür. Sonuç olarak, gruplaşma evresi hacim oranı sabit kalır. Bir parçacığın atom kayıp hızı, ya parçacık-matris ara yüzünden transfer hızı ya da parçacıktan matrise doğru bir difüzyon tarafından kontrol edilir. Bu durumların her ikisi de Lifshitz-Wagner teorisine dahildir. Deneysel araştırmalardan [114,115,117,118] uyumlu öbeklerin gelişiminin difüzyon kontrollü olduğu anlaşılmıştır. Lifshitz-Wagner teorisi [119], istatistiksel bir analiz yaparak farklı bir yaklaşım ortaya çıkarmaktadır. Bu teori değişik boyuttaki parçacıkların sistemde var olduklarını göz önünde bulundurmaktadır. Bu teori yarı-kararlı-durum (quasi-steady-state) parçacık büyüklük dağılımına, orijinal büyüklük dağılımından bağımsız olarak ulaşıldığını öne sürmektedir.



Şekil 2.21. Küçük kristallerin yüzey alanının hacmine oranı büyüklerinkine göre daha fazladır.

2.7.2. SiO_x İçerisinde Oluşan Ge Nanokristaller

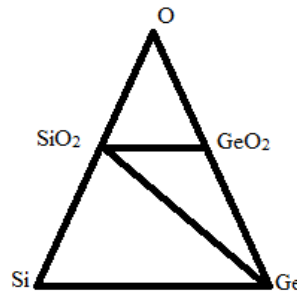
Her ne kadar Ge transistör araştırmaları için kullanılan ilk materyal olsa da, Si kadar geniş bir yelpazede kullanılan bir malzeme olmadı. Bunun nedeni GeO₂ nin durgun olmaması örneğın oda sıcaklığında ki bir suda GeO₂ çözülmez. Bunun bir nedeni de GeO₂ ve SiO₂ arasındaki büyük entalpi farklılığıdır. GeO₂ için entalpi 551kj/mol, SiO₂ için entalpi 910kj/mol dür [120]. Bu nedenle SiGe filmi oksitlenebileceğı atmosfere maruz kalacak olursa, Si ve Ge aynı anda SiO₂ ve GeO₂ oluşturacak şekilde oksitlenmeye başlar.



Oluşum ısılarının farkından dolayı GeO₂, serbest Si' ların olduğı yerde yeterince kararlı değildir. Böylece indirgenme reaksiyonu ile ara yüzey reaksiyonu aynı anda oluşarak, GeO₂ den Ge atomları kopar ve daha fazla miktarda SiO₂ oluşur. Bu olay ortamda serbest Si kalmayana kadar devam eder.



Sonuç olarak Si, SiO₂ oluşturacak şekilde tamamen oksitlenir. Bu şekilde arta kalan SiGe ile büyüyen SiO₂ arasındaki ara yüzeyde ayrılmış Ge atomları birikir [121].



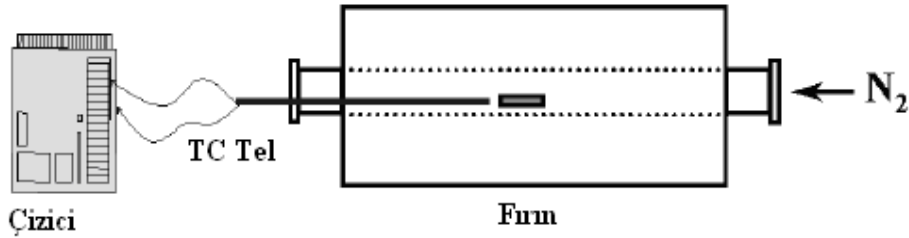
Şekil 2.22. Si-Ge-O faz diyagramı (727⁰C de 1 bar basınçta)

2.8. Tavlama Fırını

PECVD tekniği ile oluşan yapılar kristal değil amorf yapılardır. Ostwald filizlenme teorisine göre malzeme içerisinde bulunan farklı türdeki yapılar (SiO_2 ve Si_3N_4 içerisindeki Ge gibi) ancak dışarıdan bir etkileşme yardımı ile bir araya gelerek bir düzen oluşturabilirler, bugüne kadar nanokristal oluşturma amacı için bir kaç farklı yöntem denenmiştir, bununla birlikte bu yöntemlerin birbirleri arasında artı ve eksi etkilere sahip buldukları bilinmektedir. Örneğin lazer yardımı ile tavlama esnasında ortaya çıkan etkilerden bir tanesi tüm bir tabakanın fırınlanması için gerekli sürenin ya da imkanın kısıtlı olması, lazer ışınını tüm bir tabaka üzerine değil de sadece kısıtlı bir alana odaklayabilme gibi olasılıklar bazen eksi olarak gözükse de bütün bir tabaka üzerindeki sadece kısıtlı bir bölgede kristalleşmenin istenildiği uygulama ihtiyaçlarında artı bir özellik olarak kullanılmaktadır. Bugüne kadar kristal yapılar elde etmek için başvurulan yöntemlerin başında ısı tavlama öne çıkmaktadır. Fırınlama aşamasında örnekler N_2 , O_2 , Ar, H_2 gibi soy gazlar ya da vakum ortamında tutulabilirler. Bununla birlikte yarıiletken nanokristallerin oluşumunun değişik fırınlama ortamları ile bağlantılı olduğu bilinen bir gerçektir. Örneğin, SiO_2 matris içerisinde çok sayıda kırılmış, kopuk bağ yapılarının biliniyor olmasına rağmen, H_2 ortamında fırınlanmış örneklerde SiO_2 içerisindeki nanokristaller ve matris arasındaki yüzeyde mevcut olan bağları onarıcı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [122,123]. Bunun yanı sıra fırın ortamındaki su buharı ya da oksijenin varlığı, Ge atomlarının oksitlenmesi ile sonuçlanır ve uzun süreli tavlamalarda Ge nanokristallerin oluşumunu engeller. Bu yüzden, fırınlama aşamasında Ge atomlarının oksitlenmesini engellemek için vakum altında ya da N_2 atmosferi altında fırınlama iyi bir yoldur. Ancak bazı durumlarda N_2 ortamında bile fırınlama yapılmasına rağmen Si_3N_4 gibi farklı matrisler içerisindeki yüksek Ge nanokristallerin çok kısa sürelerde ve sıcaklıkta oksitlenmesi ile sonuçlanabilmektedir. Matris içerisinde bulunan nanokristallerin yüzeylerinin oksitlenmesi ile birlikte boyutlarının ayarlanabilmesine yönelik çalışmalar bilinmekle birlikte matris içerisinde oluşan oksit tabakalarının, optik ve yapısal olarak istenmeyen etkilere yol açtıkları da bilinmektedir. Bununla birlikte yine de yapı içerisindeki farklı GeH_4 gaz oranları için farklı sıcaklıklarda Ge nanokristali

oluşumuna rastlanmıştır. Germanyum kristalinin erime sıcaklığının üstünde ve bu bölgeye yakın sıcaklıklarda gözlenmesi beklenen etkiler Si_3H_4 içerisinde, Ge Si alttaş üzerine büyütülen Si_3N_4 ya da SiO_2 filmler içerisinde GeH_4 ve SiH_4 gibi gazların akış oranları değiştirilerek oluşturulmaya çalışılan Ge nanokristaller büyütme işleminin sona ermesi ile birlikte oluşması beklenemez. Bu nanokristal yapıları elde etmek için yapılan tavlama işlemlerinde vakum fırını kullanmak etkili bir yol olarak görülmektedir.

Tavlama fırını ticari tip Protherm marka 110 cm uzunluğunda 5 cm çapında maksimum sıcaklığı $1350\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa erişebilen içinden alumina bir borunun geçtiği düzenektir.



Şekil 2.23. Tavlama işleminde kullanılan Azot fırınının resmi

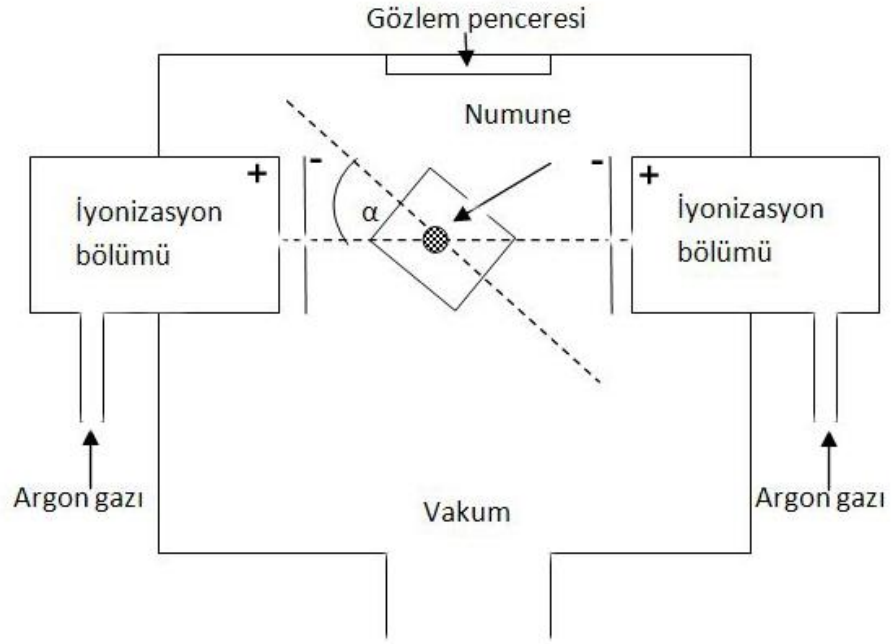
Azot gazı akış oranı 7 dak/lt olarak seçilmiştir, SiO_x : Ge örnekler bu fırın vasıtasıyla tavllanmışlardır. Örnekler fırın içerisine kuvars botlar vasıtası ile yerleştirilmektedirler. Fırlama ortamına ek olarak, fırlama sıcaklığının da nanokristal oluşumuna etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklıkla birlikte atomların hedef malzeme içindeki hareket kabiliyeti değişmekte ve hedef malzemenin cinsine göre düşük sıcaklıklarda nanokristal oluşması ya da daha büyük nanokristallerin aynı sıcaklıkta oluşması gözlenmektedir. Bu durum, fırlama süresini de etkilemektedir. Örneğin, hacimli Ge ve Si sırasıyla, $938\text{ }^\circ\text{C}$ ve $1414\text{ }^\circ\text{C}$ erime sıcaklığına sahiptir. Bu değerlerin üstünde olan fırlama sıcaklıkları matris içerisindeki Ge ve Si atomlarının hareket yeteneklerini artırmaktadır. Hacimli Germanyuma göre nispeten yüksek olan erime sıcaklığıyla silisyum yüksek sıcaklıklarda fırlandığında mesela $1000\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta SiGe alaşımının oluşmaya başlaması ile sonuçlanmaktadır.

2.9. İyon Bombardımanı İle Numune Hazırlama

Hazırlanmış olan numunelerin TEM görüntülerinin alınabilmesi için iyon bombardımanı ile numuneler üzerinde farklı açılarda ve incelikte delikler oluşturulur. Şekil 2.21 'de gösterilen numune hazırlama aygıtında iki iyonizasyon bölümü vardır. Bu bölümlerde 1 -10 kV bir potansiyel altında meydana getirilen iyonlar deliklerden geçerek numune üzerine çarparlar. İyonların bu hareketi katotlar vasıtasıyla sağlanır. Numune yüzeyine çarpan iyonların numune atomlarını yüzeyden fırlatmaları ile inceltme işlemi yapılarak delik açılması sağlanır. Sputtering adı verilen bu olayda iyonların enerjileri önemli rol oynar. İyonların enerjilerinin yüksek olması durumunda numunede ısınma, düşük olduğu durumda ise dağlama etkisi görülür. Bu yöntemde kullanılan iyonlar ağır atomlu gazlara aittir. Numune delme işleminde en çok tercih edilen gaz argon gazıdır. Buna karşın Kripton gazı Argona oranla daha ağır atomlu olmasına rağmen maliyeti çok yüksek olduğu için fazla tercih edilmemektedir.



Şekil 2.24. Numune inceltme işleminde kullanılan FISCHIONE Model 1010 iyon değirmeni.



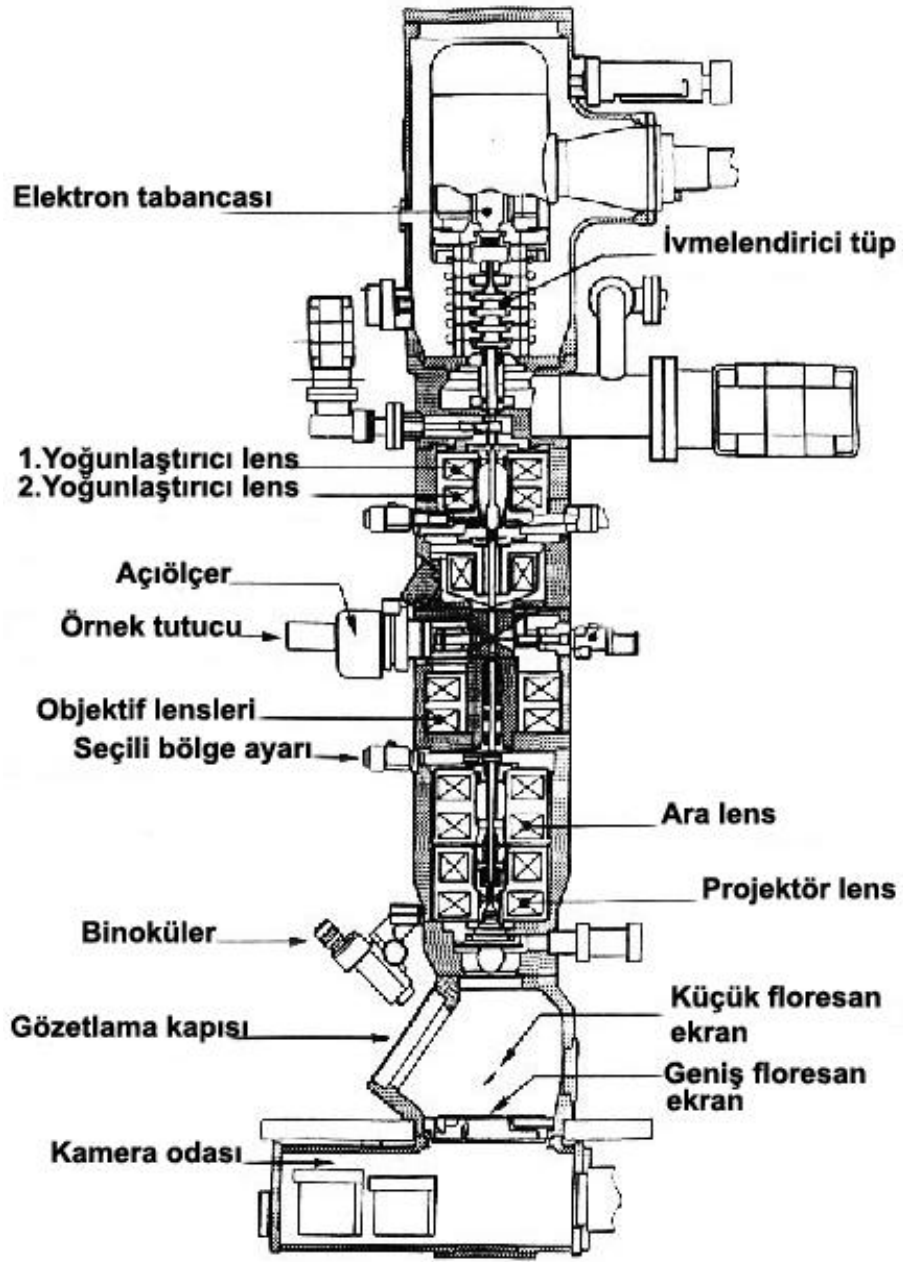
Şekil 2.25. Numune inceltme işleminde kullanılan iyon değirmeninin şematik çizimi.

İyon bombardımanı yönteminde iyonların enerjilerinin yanında iyonların numune üzerine geliş açıları da önemlidir. Ayrıca numunenin bombardıman sürecinde döndürülmesinin homojen bir yüzey elde edilmesi bakımından önemi büyüktür. Numune inceltme miktarı 0,1 μm (dakika) olduğundan bu yöntem ancak elektrolitik olarak parlatılmış ya da zımparalanmış numunelerin en son delik açma işlemini yapmak için tercih edilir. Bu yöntem içinde özellikle ikinci bir faz bulunan malzemeler ve reaktif özelliğe sahip malzemeler için kullanılır.

2.10. Geçirgen Elektron Mikroskobu (TEM)

Nanokristallerin gözlemlenmesi, nanometrik boyutlardaki parçacıkların özelliklerinin belirlenmesindeki zorluklar sebebiyle önemli bir konudur. Nanokristal gözlem; fotonlar, elektronlar, nötronlar, iyonlar veya atomik seviyede ince uçlardan meydana gelen sondalar ile yapılabilir. Elde edilen sonuçlar materyalin kimyasal ya da fiziksel ayrıntılarını, yapısal, geometrik ve topografik özelliklerini ortaya koyar. Birçok teknik birlikte veya tek başına malzemenin karakterize edilmesinde kullanılabilir. Optik araçlarla gözlemlenebilecek en iyi mesafe $0,5\lambda$ veya 250 nm' dir. Dolayısıyla

ışık mikroskoplarının çözünürlük limitleri ışığın dalga boyuyla sınırlı olmasından, cismin içinden geçirilen yüksek enerjili elektronların görüntülenmesi prensibine dayanan geçirgen elektron mikroskobu (TEM) Max Knoll ve Ernst Ruska tarafından 1930'larda yapılan çalışmaların sonucu geliştirilmiştir [124]. Yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronlar bir numune üzerine gönderilirse, elektronlar ile numune atomları arasında çeşitli etkileşimler olur ve numuneden değişik enerjide elektronlar ve x-ışınları çıkar. Bu etkileşimlerden yararlanılarak numunenin incelenmesi elektron mikroskobunun prensibini oluşturur. Eğer hızlandırılmış elektronlar ince numune üzerine gönderilmiş ise, elektronların bir kısmı etkileşmeden diğer kısmı da Bragg şartları sonucu kırınıma uğrayarak numunenin alt yüzünden dışarı çıkar. Bu tür elektronları kullanarak numunenin iç yapısının incelenmesi geçirgen elektron mikroskobunda (TEM) şekil 2.24. yapılıdır. Elektron mikroskopları temel ve fonksiyonel olarak, optik mikroskopların aynısıdır. Yani her iki mikroskopta çıplak gözle görülemeyen cisimleri büyütmek için kullanılır. İkisi arasındaki fark ise, optik mikroskopta ışık ışını, elektron mikroskobunda elektron kullanılmasıdır. TEM malzemelerin mikro ve nano yapısal karakterlerinin belirlenmesinde birincil araç olmuştur. Araştırılacak olan yüzey anot olarak seçilir ve bu yüzeye pozitif elektrik potansiyeli uygulanır. Katot olarak seçilen tabandaki flaman elektron bulutu oluşuncaya kadar ısıtılır. Elektronların kolon üzerine düşmesini sağlamak için elektronlar pozitif potansiyelle ivmelendirilir. Geçirgen elektron mikroskobu "TEM" kolon şeklinde üst üste dizilmiş manyetik merceklere oluşur.



Şekil 2.26. Geçirgen elektron mikroskobunun içyapısı.

3.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1.Giriş

Bu bölümde SiO₂ amorf matris içerisindeki Ge kristal yapıların hangi koşullar altında elde edildiği veya edilebileceğine ait HRTEM teknikleri kullanılarak alınmış veriler sunulmuştur. Çalışmada, hedeflenen ilk başta farklı matrisler içerisinde Ge nanokristalin oluşumunu anlamak daha sonra bu matrisler içerisindeki Ge nanokristallerin hareket kabiliyetlerini, oluşturdukları bağ ve yapıları karakterize etmeye çalışmaktır.

3.2. Numune Hazırlama

Ön görülen filmler PECVD (PlasmaLab 8510C) ile silisyum alttaş üzerine 200 sccm SiH₄, 180sccm N₂O ve 200sccm GeH₄ gazlarının değişik oranları kullanılarak, 1000 mTorr basınç altında 350 °C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10 W seçilerek sabit koşullar altında büyütüldü. Büyütülen filmlerin bir kısmı tavlama bir kısmı ise büyütüldükten sonra azot ve vakum ortamında 700 °C ve 850°C sıcaklıkların hepsi 7,5 dakika sabit sürelerde fırımlandı. Bu aşamada numuneler, elmas kesicide kesilerek 3 mm 'lik bakır ızgaralara yapıştırılmış daha sonra da zımpara ile inceltirilerek 50 mikron 'a varan numune kalınlıkları elde edilerek numuneler üzerinde nanometre boyutlarında parlatmalar sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler iyon değirmeninde (FISCHIONE Model 1010) küçük açılarda (10°-15°) ve 360° rotasyonda delindi.

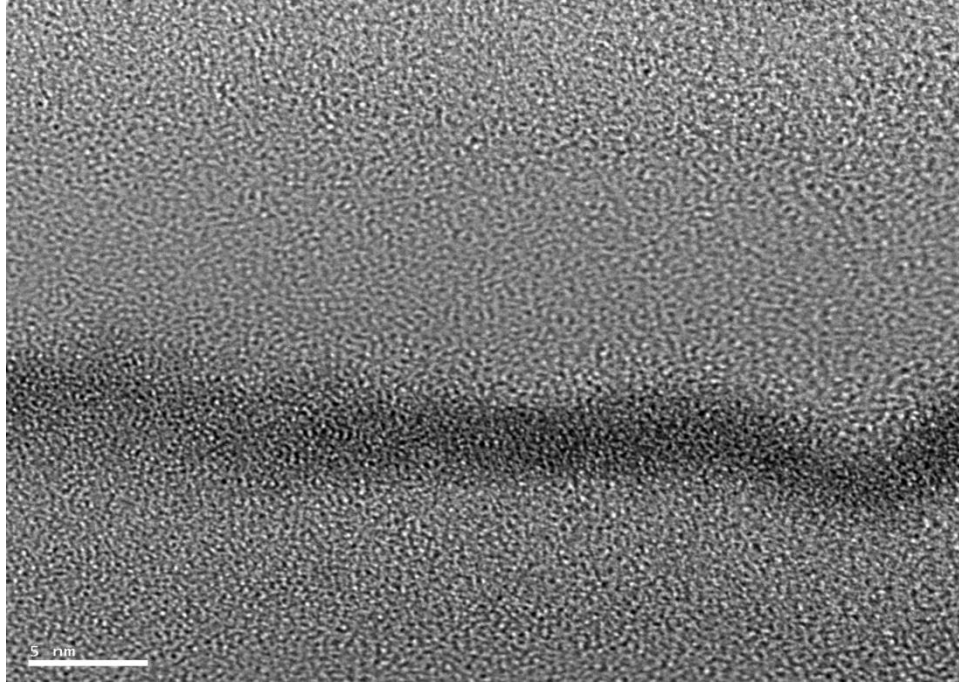
Çizelge 3.1. 700⁰C ve 850⁰C deki örneklerin PECVD parametreleri

GeH ₄ gaz Akış Hızı (sccm)	SiH ₄ gaz Akış Hızı (sccm)	N ₂ O gaz Akış Hızı (sccm)	Basınç (Torr)	Tavlama şartları (⁰ C,dk)	Altaş sıcaklığı (SiO ₂ için)	Katman
200	200	180	1000mTorr	700 ⁰ C 7,5dk	350 ⁰ C	SiO ₂ :Ge
				850 ⁰ C 7,5dk		

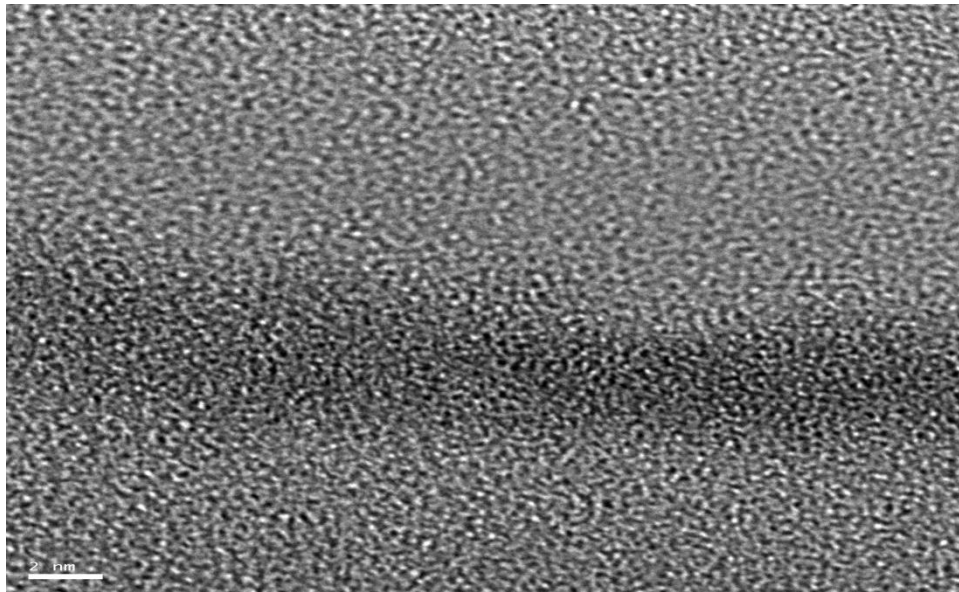
3.3.TEM Sonuçları

İyon Millede inceltme işleminden sonra hazır hale gelen numunelerin HRTEM görüntüleri Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü bünyesinde yer alan JEOL 2100F marka HRTEM (Yüksek. Çözünürlüklü Geçirgen Elektron Mikroskobu) ve Kırıkkale Üniversitesi, KÜBTAL JEM 3010 cihazıyla alınmıştır. Örneklerimizden alınan HRTEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.

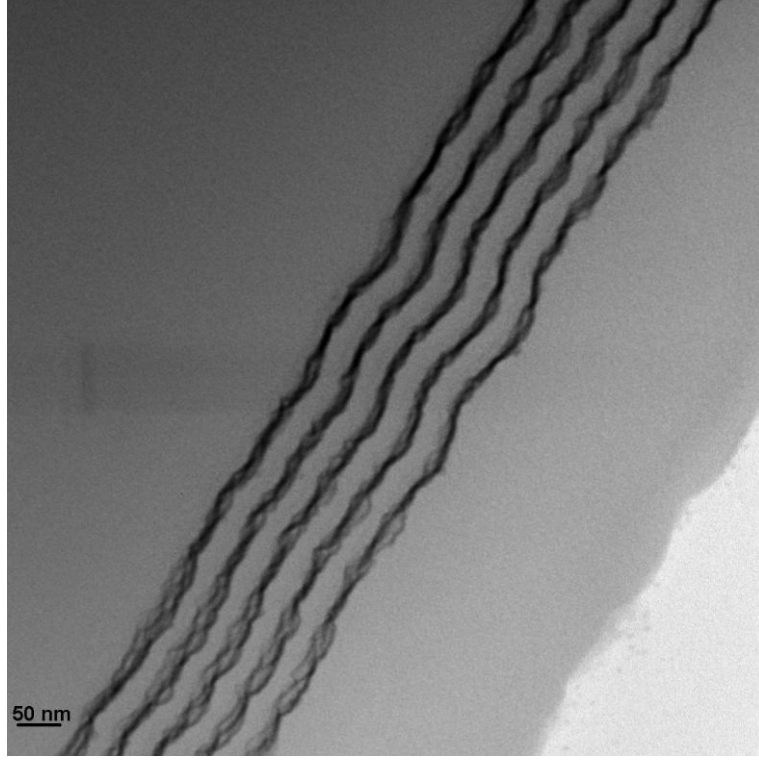
3.3.1. Tavlanmamış Numunelerin TEM Görüntüleri



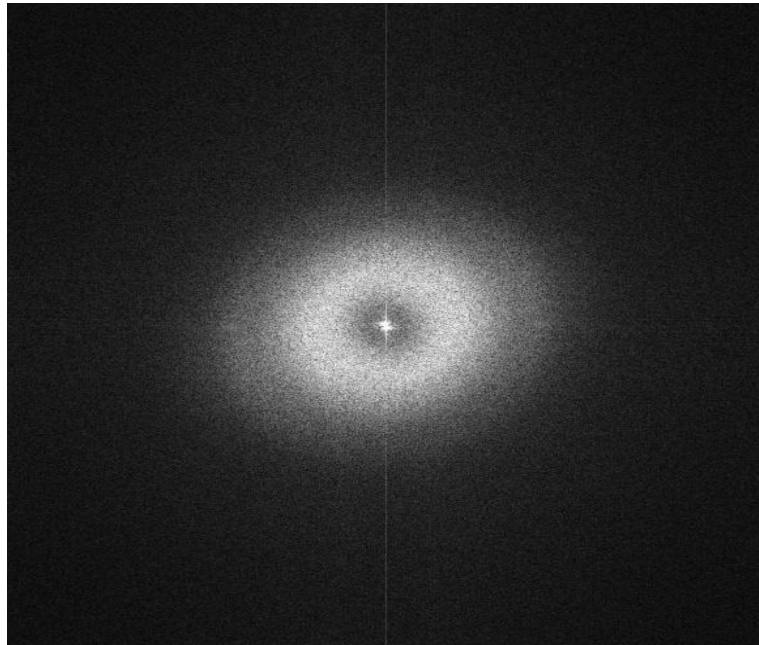
Şekil 3.1. 350⁰C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.



Şekil 3.2. 350⁰C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.



Şekil 3.3. 350⁰C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.

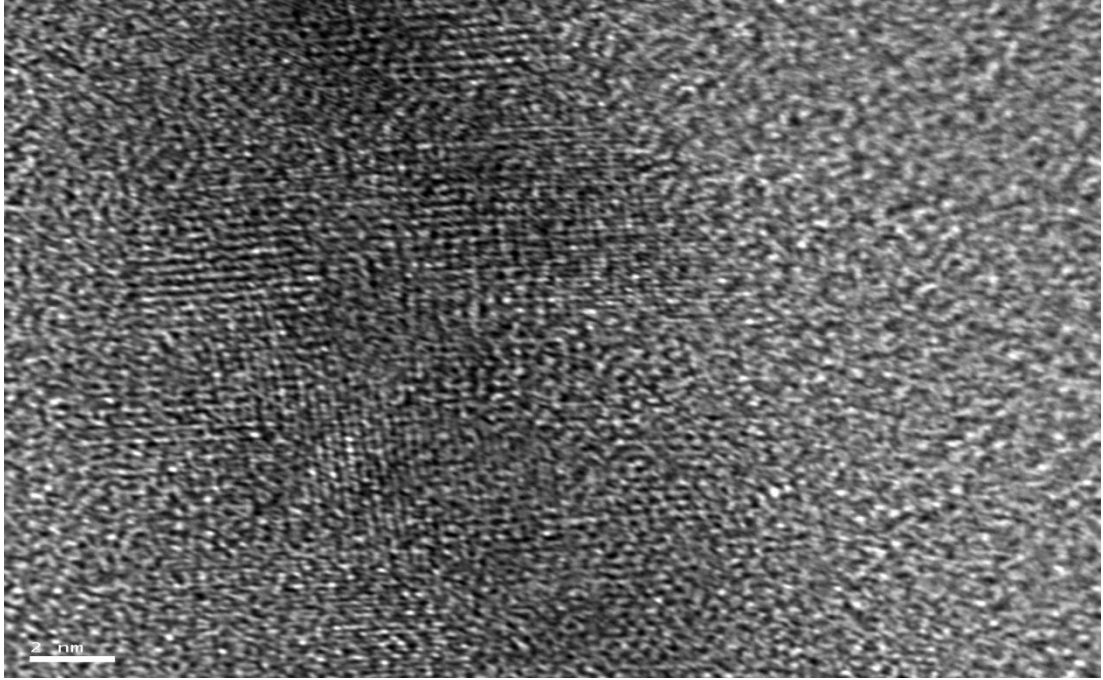


Şekil 3.4. 350⁰C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10W seçilerek sabit koşullar altında büyütülen Tavlanmamış 200 sccm Ge katkılı örnek için HRTEM görüntüsü.

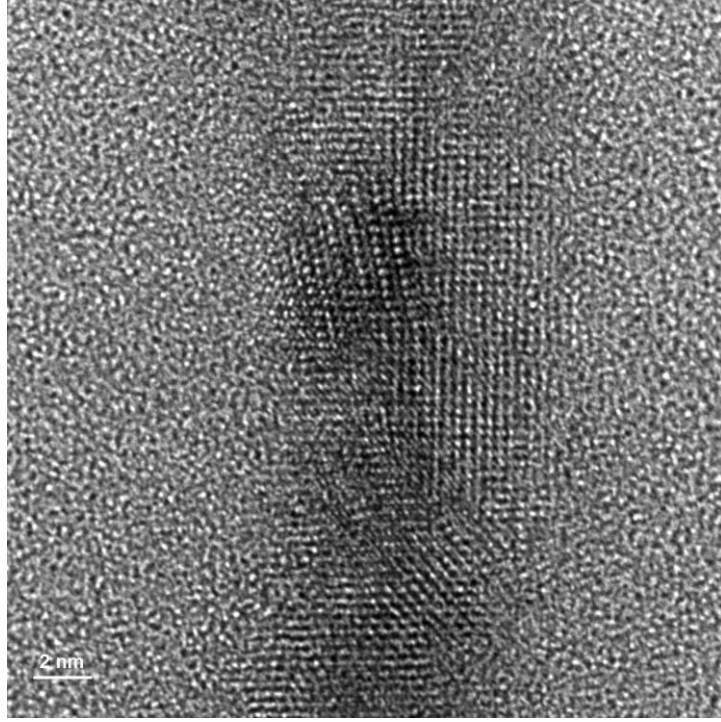
Tavlanmamış (as grown) şekil 3.1, şekil 3.2, şekil 3.3, çok katlı örneklerin TEM görüntülerine baktığımızda çok katlı yapının oluştuğu ancak kristalleşmenin gerçekleşmediği görülmektedir. Şekil 3.4. deki kırınım desenine bakıldığında da herhangi bir kristalleşmenin oluşmadığını söylemek mümkün olmaktadır.

3.3.2. 700 °C de Tavlanmış Numunelerin TEM Görüntüleri

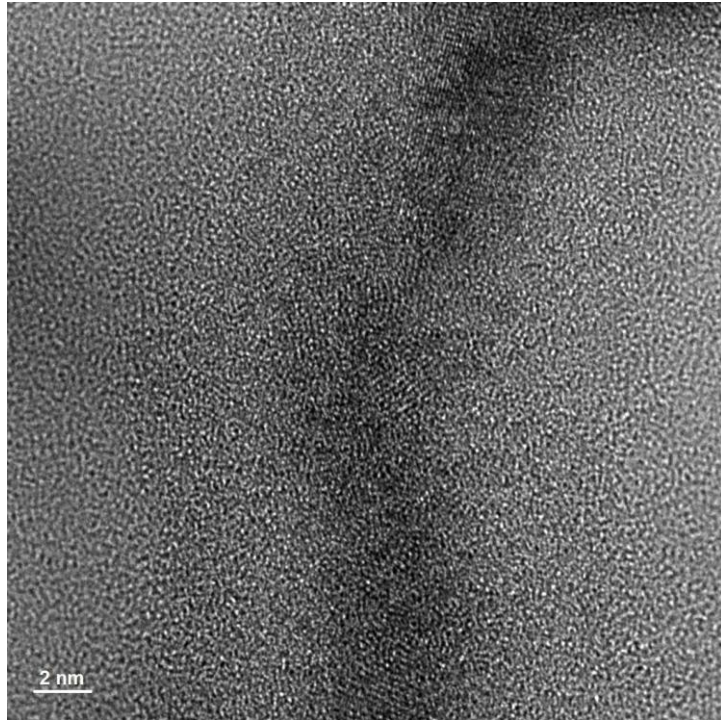
Bu kısımda ince filmlerin elde edildikten sonra 700 °C de 7,5 dakika süre ile tavlama işlemine tabi tutulan numunelerin TEM sonuçları aşağıdaki gibi verilmiştir.



Şekil 3.5. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.

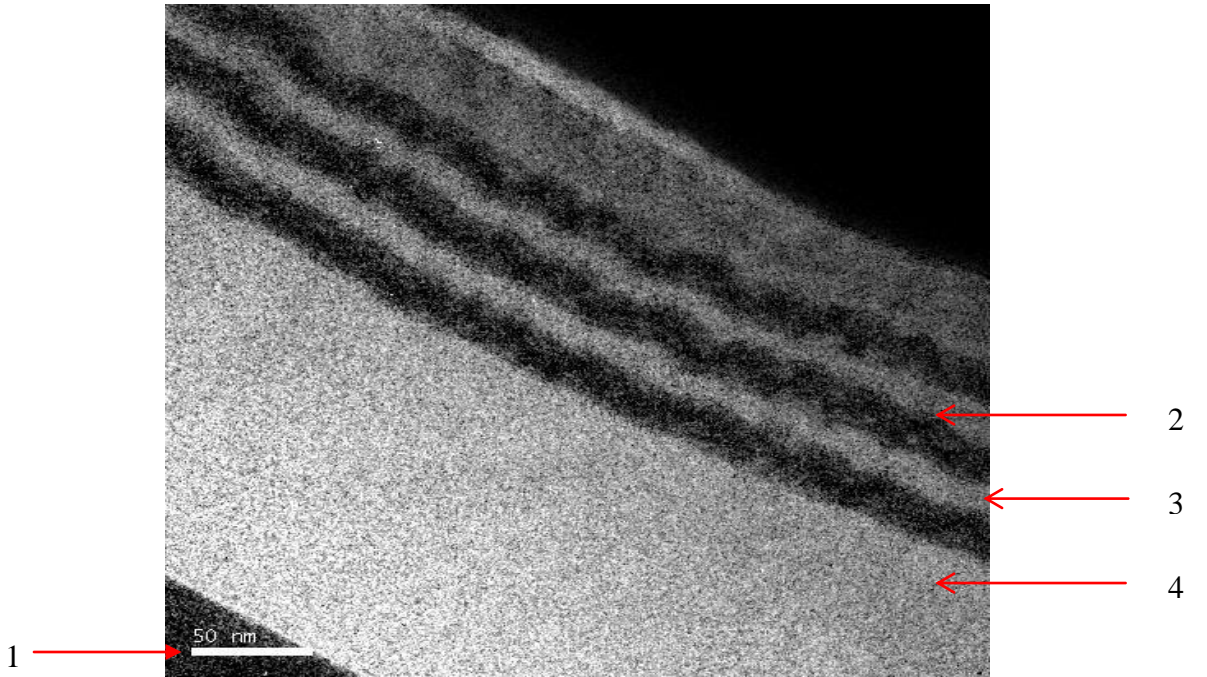


Şekil 3.6. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.



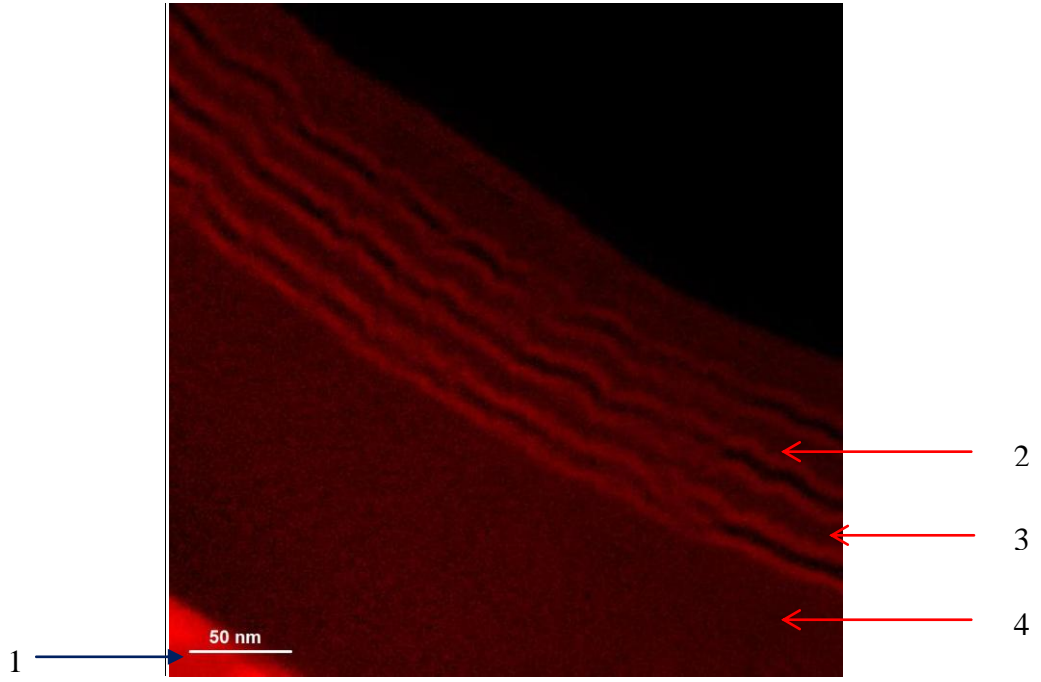
Şekil 3.7. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.

Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 700 °C de 7,5 dakikada tavllanmış numuneler için HRTEM görüntüleridir. Görüntülere baktığımızda siyah renkli kısımların Ge atomları olduğunu ve belirli bir kristal yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Öte yandan açık renkli kısım ise Si tabakasına karşılık gelmektedir. Tüm bu resimlerden yola çıkarak tavlamanın kristalleşme için önemli bir unsur olduğunu söylemek mümkündür.

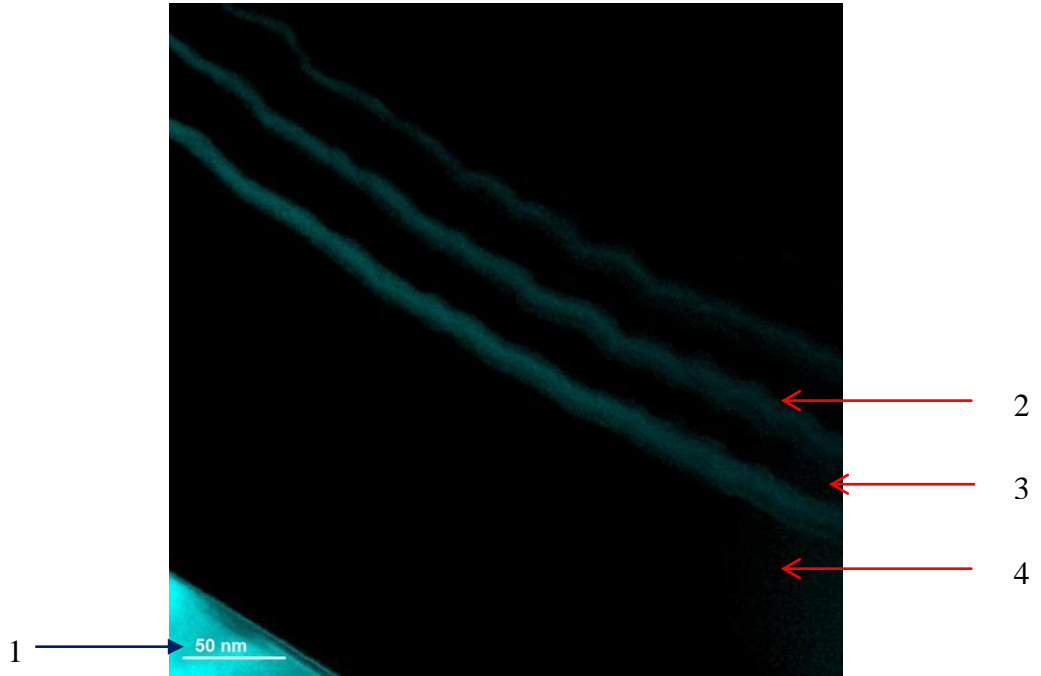


Şekil 3.8. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü. Altaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO₂ yalıtkan tabaka(4).

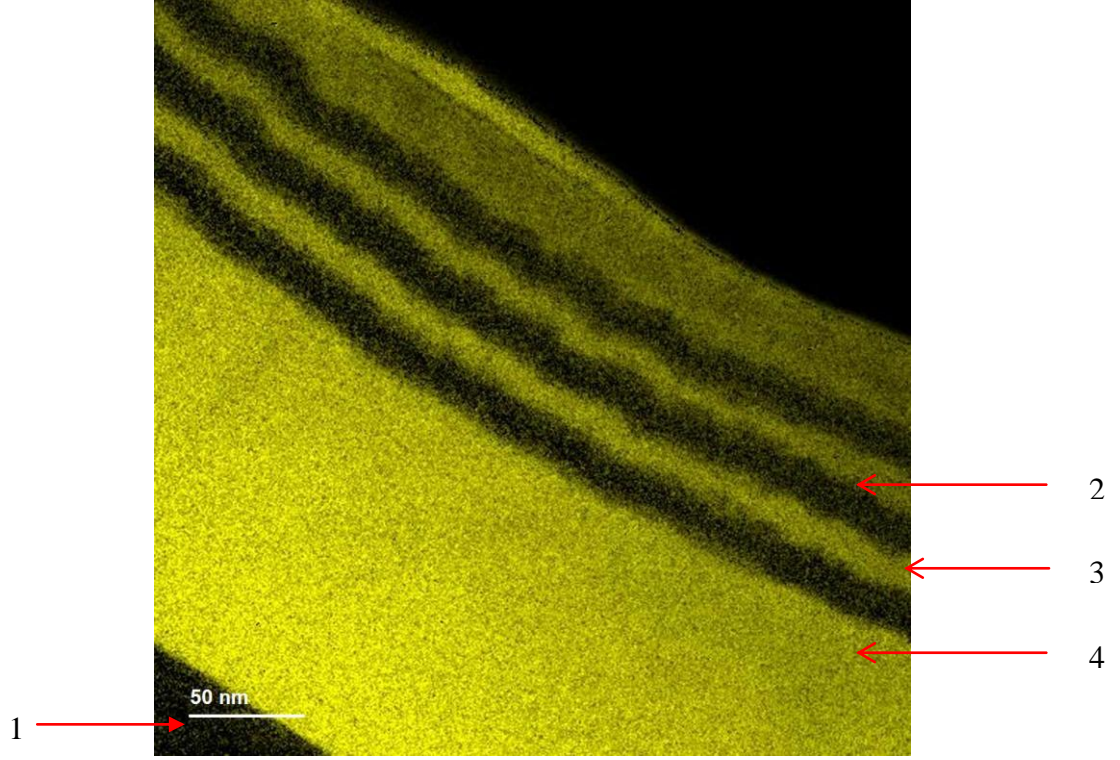
Bahsettiğimiz gibi SiGe filmi oksitlenebileceği atmosfere maruz kalacak olursa, Si ve Ge aynı anda SiO₂ ve GeO₂ oluşturacak şekilde oksitlenmeye başlar. Ürettiğimiz ince filmde yapmış olduğumuz EDS analizi bunu doğrulamaktadır. EDS analiziyle Si, Ge ve O₂' nin nerelerde var olduğu gözlenmektedir (Şekil.9, Şekil.10, Şekil.11). Analiz sonuçları incelendiğinde gerçektende Ge olan yerde O₂ var olduğu, aynı zamanda Si olan yerde de O₂' nin var olduğu gözlenmiştir.



Şekil.3.9. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (SiO₂ haritası) HRTEM görüntüsü. Altaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO₂ yalıtkan tabaka(4).

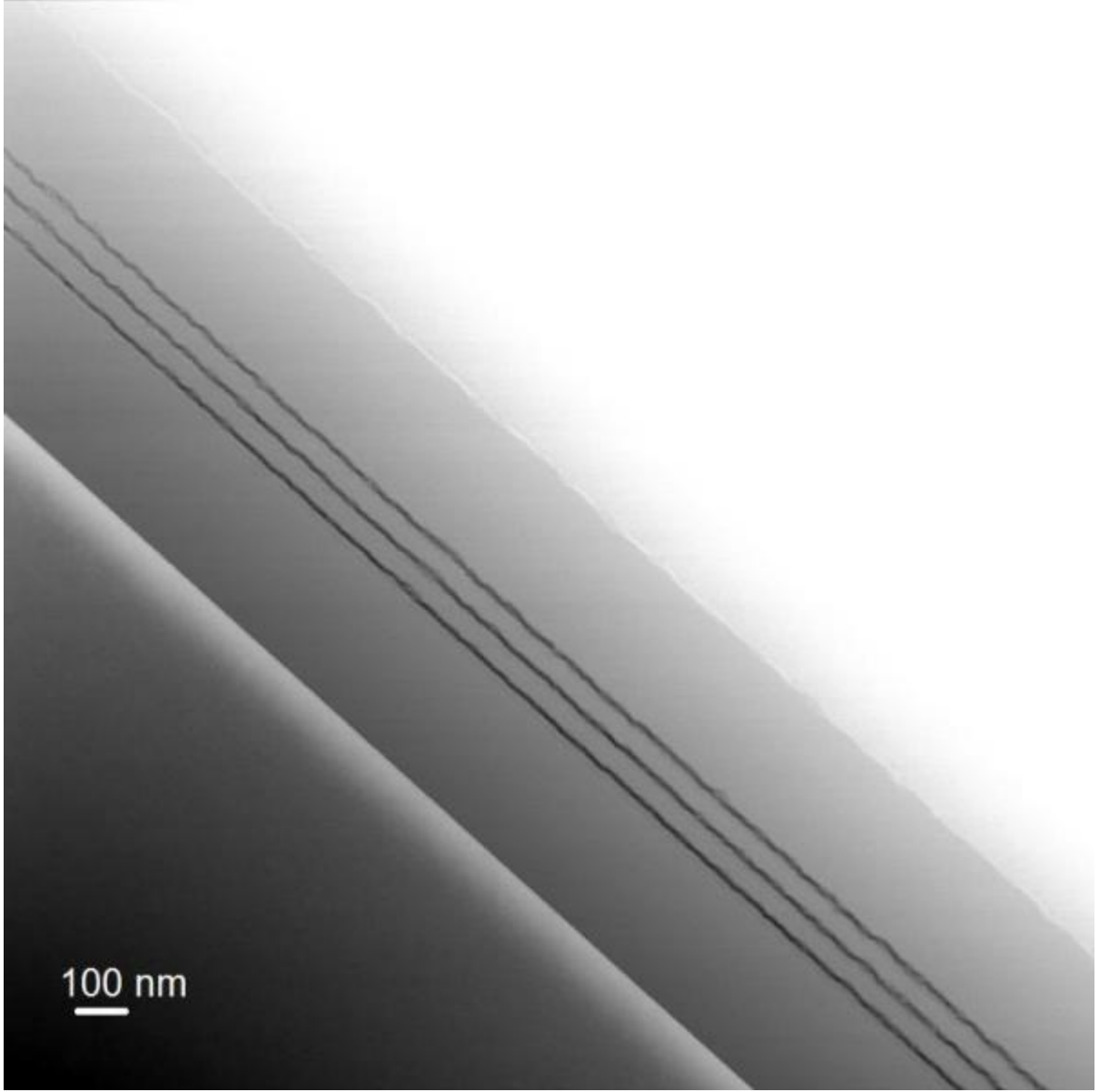


Şekil 3.10. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (GeO₂ haritası) HRTEM görüntüsü. Altaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO₂ yalıtkan tabaka(4).

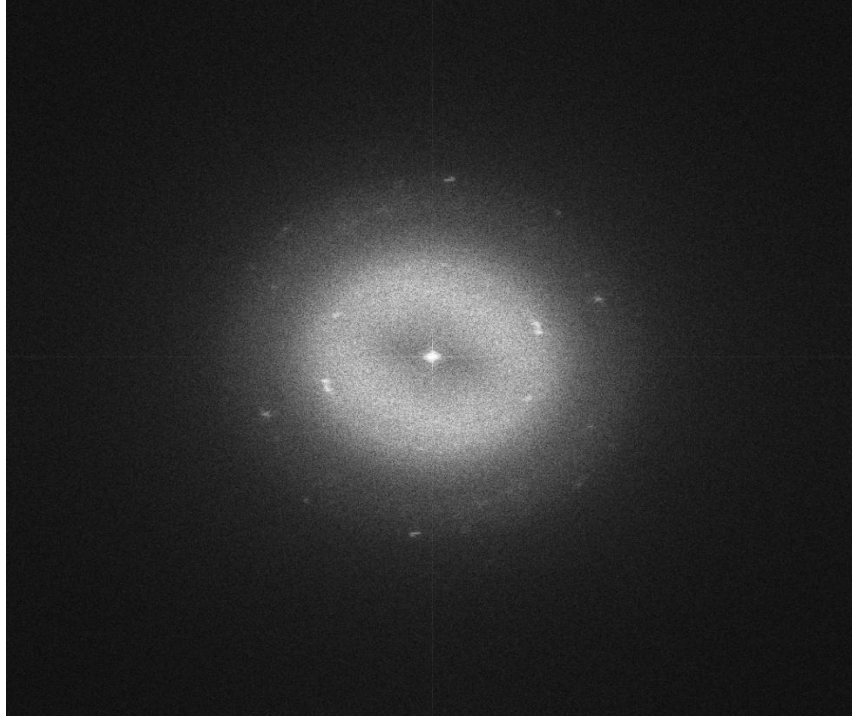


Şekil 3.11. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavlanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin EDS analizi yapılmış (O_2 haritası) HRTEM görüntüsü. Alttaş (1), Germanyum yapı (2), Silisyum yapı (3) ve SiO_2 yalıtkan tabaka(4).

Şekil 3.8, 3.9, 3.10 ve 3.11'e bakıldığında alttaş üzerine büyütülmüş yaklaşık 150 nm kalınlığındaki SiO_2 tabakasını, onun hemen üzerinden başlayarak üç kez tekrar eden Ge tabakası ve aralardaki Si yapısı çok rahat görülmektedir. Ayrıca yapılan EDS analizi sonucu şekil 3.9' da SiO_2 ' in haritası şekil 3.10' da GeO_2 ' in haritası ve şekil 3.11' de O_2 ' nin haritası gözükmemektedir. Buradaki Ge tabakası için yaklaşık 7-10 nm civarında, Si yapısının ise 5-8 nm civarında bir kalınlığa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.

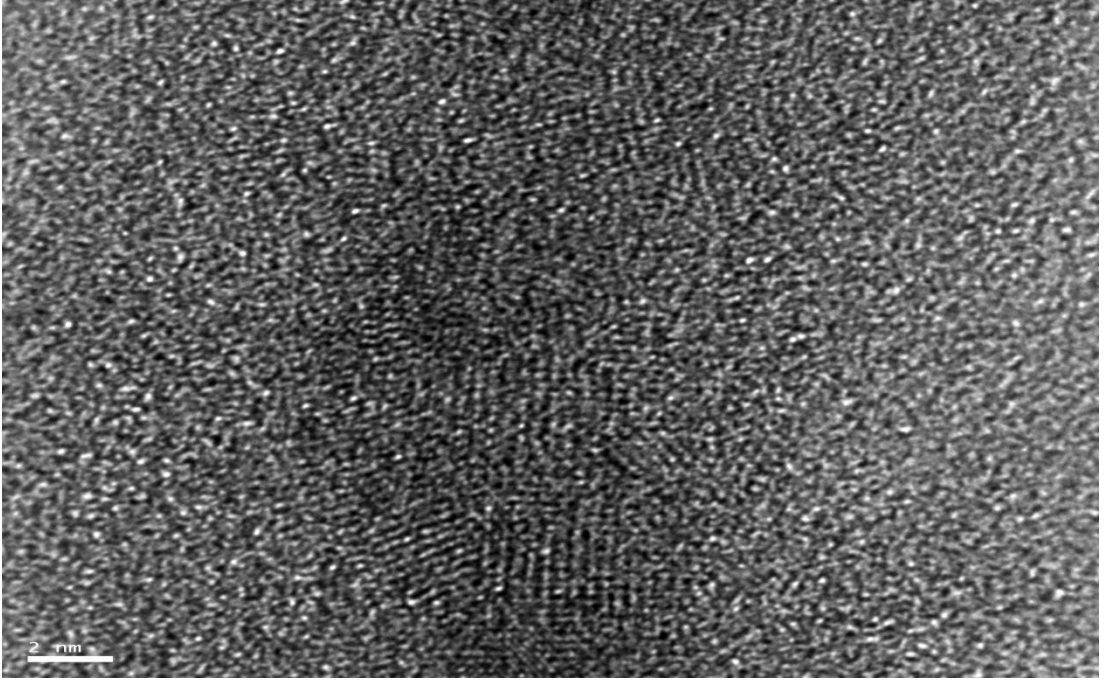


Şekil 3.13. 700 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı filmlerde kristalleşmenin olduğu bölgelerden alınmış elektron kırınım deseni.

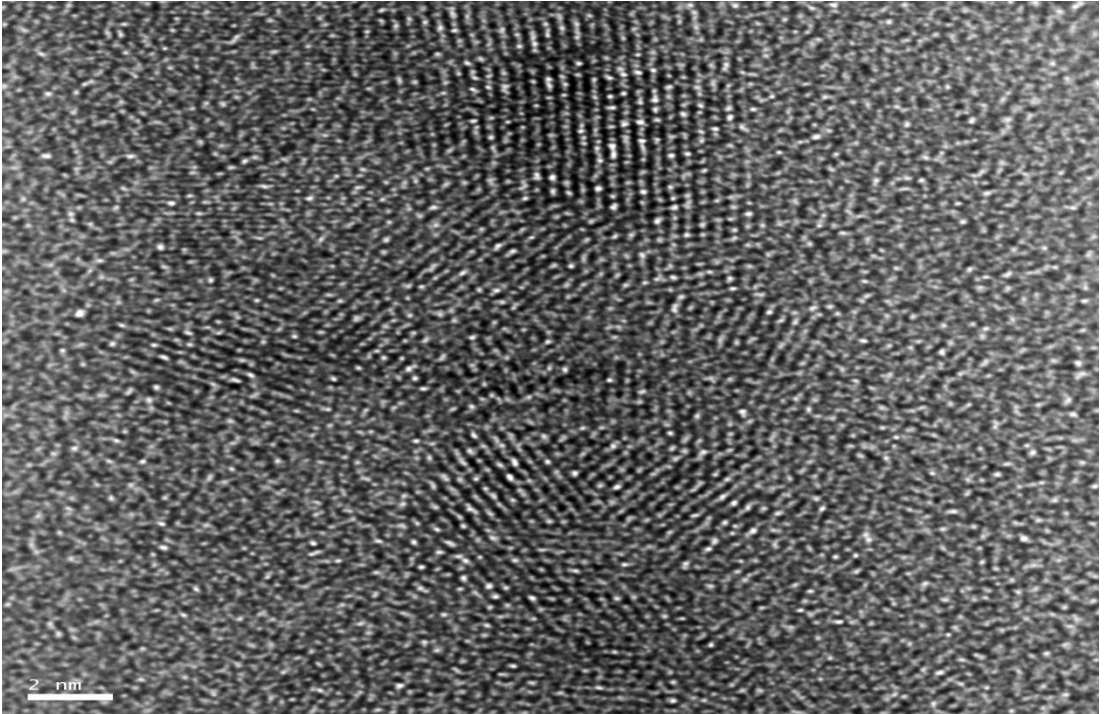
Desenden görüldüğü üzere tavlanan numunelerde kristalleşmenin olduğu görülmektedir.

3.3.3. 850 °C de Tavllanmış Numunelerin TEM Görüntüleri

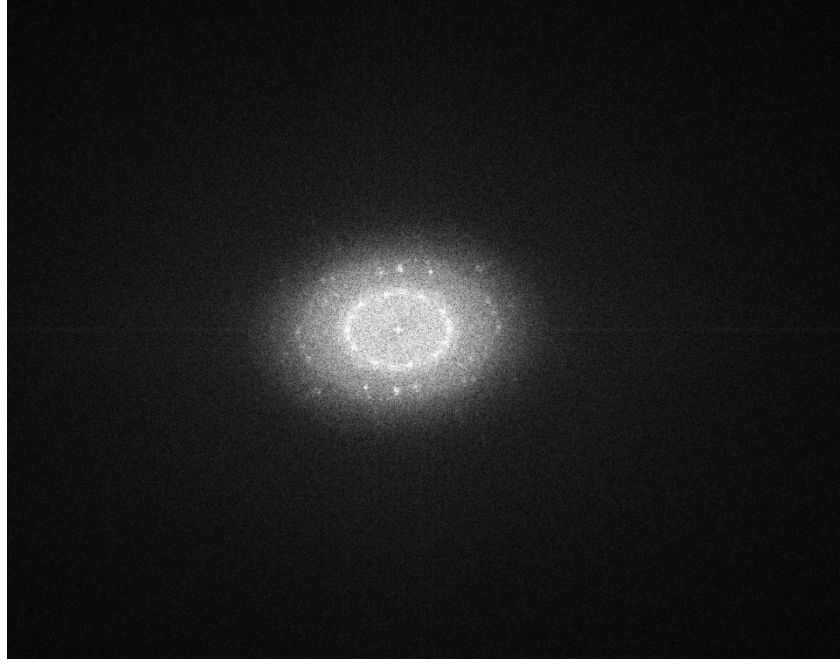
Bu kısımda yukarıda HRTEM görüntüleri verilen numunelerle aynı koşullarda büyütülmüş fakat daha sonra farklı sıcaklıkta tavllanmış örneklerin görüntüleri verilmiştir. Örnekler diğerlerinden farklı olarak 850 °C de 7,5 dakika süre ile tavllanmış ve HRTEM görüntüleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.14. 850 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.



Şekil 3.15. 850 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı örneğin HRTEM görüntüsü.



Şekil 3.16. 850 °C 7,5 dakika Süreyle tavllanmış 200 sccm Ge katkılı çok katlı filmlerde kristalleşmenin olduğu bölgelerden alınmış elektron kırınım deseni.

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ye bakıldığında 850 °C de 7,5 dakikada tavllanmış numunelerde 700 °C elde edilen HRTEM görüntülerinde olduğu gibi Ge tabakasının oluştuğunu söyleyebilmek mümkündür. Ancak 850 °C de tavlanan numunelerde kristalleşme miktarının daha fazla olduğu ve kristal yönelimlerinin daha belirgin olduğu söylenebilir. Literatür çalışmalarında da olduğu gibi artan tavlama süresi ile kristalleşmenin artması beklenen bir durumdur [125-127]. Nitekim bizim çalışmamızda da bu durum çok rahat bir şekilde görünmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında günümüz koşullarında çok popüler olan nanoteknolojinin farklı alanlarda ki uygulamaları üzerinde durulmuş ve elektronik alandaki uygulamalardan ayrıntılı bir biçimde bahsedilmiştir. Ayrıca elektronik alandaki uygulamaya örnek teşkil etmesi açısından ince filmlerde nanoyapıların oluşturulması ile ilgili bir çalışma yapıp örnek olarak sunulmuştur.

Farklı ince film büyütme teknikleri bu çalışmada tartışılmış, maliyet ve hazırlama bakımından PECVD tekniği seçilmiştir. Bu yöntem aracılığıyla ile $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$ çok katlı yapı içerisinde Ge nano yapılarının oluşum dinamikleri büyütme sırasında ortamda bulunan GeH_4 gaz akış oranı sabit tutulup tavlama olmaksızın ve iki farklı tavlama sıcaklığı değerlerinde çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında nanokristal oluşumu üzerine tavlamanın etkisi ayrıntılı bir biçimde irdelenmiş ve tavlama olmaksızın, 700°C ve 850°C sıcaklığında farklı örnekler için her bir numune için HRTEM görüntüleri alınmıştır. Sıcaklıklar belirlenirken Si-Ge-O faz diyagramı dikkate alınmıştır. Sıcaklık değerine ek olarak 7,5dk lık tavlama süresi sabit seçilerek sadece sıcaklığın etkisine bakılmıştır. $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}/\text{SiO}_2$ ince filmlerinde oluşan Ge nanokristallerin boyutlarının 5-10nm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ge yapıları oluşumu ve gelişimi HRTEM sonuçları ile açık biçimde gözlemlenmiştir. Artan sıcaklık parametresine bağlı olarak Ge yapıları nanokristallerin oluşumunun da arttığı, aynı zamanda kristalleşme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. HRTEM gözlemleri sonucundan yola çıkarak nanoyapıların oluşumunda ve gelişmesinde tavlama sıcaklığı değerinin çok önemli olduğunu söylemek mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ayhan, A., Dünden Bugüne Türkiye’de Bilim-Teknoloji ve Geleceğin Teknolojileri. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 455s, 2002.
- [2] Çıracı, S., Yüzyılda Yeni Bir Sanayi Devrimi: Nanoteknoloji. Bilim Ve Ütopya, Nanoteknoloji Devrimi, Bilkent Üniversitesi 2007.
- [3] Lijima, S., ‘‘Helical Microtubules Of Graphitic Carbon’’, Nature 354, 56, 1991.
- [4] Silav, G., Nanoteknoloji Ve Nöroşirürji, Türk Nöroşirürji Derneği Bülteni: P: 52-55. Sayı 14, 2007.
- [5] http://www.fen.bilkent.edu.tr/~mb/dokumanlar/NanoteknolojiDevrimiGeliyorTED_Mesale.pdf (Erişim tarihi : 05/01/2011)
- [6] Özdoğan, E., Demir, A., Seventekin, N., Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları. Tekstil Ve Konfeksiyon, 16(3):159-163. 2006.
- [7] Üreyen, M.E., Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları. Gemsan Teknik Bülten, Mayıs-Ağustos, 2-7, 2006.
- [8] Naschie, M.S.E., Nanotechnology for the Developing World. Chaos Solitons & Fractals, 30(4):769-773, 2006.
- [9] İşçi, C., Lecture Notes on Material Science, 2005.
- [10] <http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html> (erişim tarihi : 13/03/2010)
- [11] Foster, L.E., Nanotechnology: Science, Innovation and Opportunity, Prentice Hall, 2005.
- [12] İşçi, C., What is Nanotechnology?. Journal of Yaşar üniversitesi, 2006.
- [13] İşçi, C., Sanayide Nanoteknoloji Uygulamaları ve Nanokirlilik, 2007.
- [14] Bruchez, Jr.M., Moronne, M., Gin, P., Weiss, S., and Alivisatos, A.P., Science 281,2013, 1998.
- [15] Klimov, V.I., Mikhailovsky, A.A., Xu, S., Malko, A., Hollingsworth, J.A., Leatherdale, C.A., Eisler, H.J., and Bawendi, M.G., Science 290,314, 2000.
- [16] Huynh, W.U., Dittmer, J.J., and Alivisatos, A.P., Science 295, 2425, 2002.
- [17] Oberdörster, G., Oberdörster, E., and Oberdörster, J., ‘‘Nanotoxicology: anemerging discipline from studies of ultrafine particles’’. Environmental Health Perspectives 113(7):823-839, 2005.
- [18] Alivisatos, A.P., J. Phys. Chem. 100, 13226, 1996.

- [19] Lehmann, V., and Gösele, U., *Appl. Phys.* 58, 856, 1991.
- [20] Gaponenko, S.V., *Optical properties of semiconductor nanocrystal*, Cambridge University press, United Kingdom, 1998.
- [21] Martin, T., Bell and Sons, The Royal Institution of Great Britain, *Faradays diary*, Vol. VII, 63, 1936.
- [22] Faraday, M., *Phil. Trans.* 147, 145 1857.
- [23] Jaeckel, G., *Tech, Z., Phys.* 6, 301, 1926.
- [24] Tsu, DV., Lucovsky, G., Mantini, MJ., Local atomic structure in thin films of silicon nitride and silicon dimide produced by remote plasma-enhanced chemical-vapor deposition. *Phys Rev B.* 33,7069-76, 1986.
- [25] Perkowitz, S., *Optical characterization of semiconductor: Infrared, Raman and Photoluminescence Spectroscopy*, Academic Press, 27, 1993.
- [26] Pavesi, L., Dal Negro, L., Mazzoleni, C., Franzo, G., and Priolo, F., *Natures London.* 408, 440, 2000.
- [27] Delord, JF., Schrott, AG., Fain, SC., Nitridation of silicon (111): Auger and LEED results. *J. Vac. Sci. Technol.* 17, 517-520, 1980.
- [28] Gaponenko, S.V., *Optical properties of semiconductor nanocrystal*, Cambridge University press 41, 1998.
- [29] Brongersma, M.L., Polman, A., Min, K.S., and Atwater, H.A., *J. Appl. Phys.* 86, 759, 1999.
- [30] Wang, K.L., Liu, J.L., and Jin, G., *J. Cryst Growth* 237-239, 1892, 2002.
- [31] Wang, Y.Q., Kong, G.L., Chen, W.D., Diao, H.W., Chen, C.Y., Zhang, S.B., and Liao, X.B., *Appl. Phys. Lett.* 81, 4147, 2002.
- [32] Averin, D.V., and Likharev, K.K., *J. Low-Temp. Phys.* 77, 2394, 1986.
- [33] Meseguer, F., Blanco, A., Miguez, H., Garcia-Santamaria, F., Ibisate, M., and Lopez, C., *Coll. Surf.* 202, 281, 2002.
- [34] Shlimak, I., Vagner, I., and Safarov, V.I., in proceedings of the 25th International Conference on the physics of semiconductors, Springer, Osaka 2000.
- [35] Nishii, J., Kintaka, K., Hosono, H., Kawazoe, H., Kato, M., and Muta, K., *Phys. Rev. B*, 60, 7166, 1999.
- [36] Qian, L., Hinestroza, J.P., *Application of nanotechnology for high performance textiles. Journal of textile and apparel, technology and*

- management, 4(1): 1-7, 2004.
- [37] Kut, D., Güneşoğlu, C., Nanoteknoloji ve tekstil sektöründeki uygulamaları. *Tekstil & Teknik*, 224-230, şubat 2005.
- [38] Türk Fiz Tıp Rehab. Derg. 53 özel sayı 2: 13-7 p: 14, 2007.
- [39] Budak, Gürer, G., Daha Sağlıklı Bir Gelecek İçin “NanoTıp”, Köksav E-Bülteni (Kök Sosyal ve Stratejik araştırmalar Vakfı) : p: 1-2. 29 şubat 2008.
- [40] Türk Fiz Tıp Rehab. Derg. 53 özel sayı 2; 13-7 p: 14, 2007.
- [41] Budak, Gürer, G., Daha Sağlıklı Bir Gelecek İçin “NanoTıp”, Köksav E-Bülteni (Kök Sosyal ve Stratejik araştırmalar Vakfı) : p: 1-2. 29 şubat 2008.
- [42] Durucan, C., Biyomedikal ve Biyoteknolojik Uygulamalar. *Bilim ve Teknik* 465: 43, 2006.
- [43] Zafonte, RD., Brain injury research: lessons for reinventing the future. The 38th Zeiter Lecture. *Arch Phys Med Rehabil*, 88: 551-4, 2007.
- [44] Leoni, L., Desai, T.A., “Micromachined biocapsules for cell-based sensing and delivery” *Adv. Drug Deliv. Rev.* 56, 211-229, 2004.
- [45] Garyson, A.C.R., Shawgo, R.S., Li, Y., Cima, M.J., “Electronic Mems for triggered delivery” *Adv. Drug Deliv. Rev.* 56, 173-184, 2004.
- [46] Voldman, J., Gray, M.L., Schimdt, M.A., “Microfabrication in biology and medicine” *Biomed. Eng.* 01, 401-425, 1999.
- [47] Orive, G., Gascon, A.R., Hernandez, R.M., Dominguez-Gil, A., Pedraz, J.L., “Techniques: New approaches to the delivery of biopharmaceuticals” *Trends Pharmacol. Sci.* 25(7), 2004.
- [48] Voskerician, G., Shive, M.S., Shawgo, R.S., Recum, H.Von., Anderson, J.M., Cima, M.J., Langer, R., “Biocompatibility and biofouling of Mems drug delivery devices” *Biomaterials*, 24, 1959-1967, 2003.
- [49] Ziaie, B., Baldi, A., Lei, M., Gu, Y., Siegel, R.A., “Hard and soft micromachining for BioMems: review of techniques and examples of applications in microfluidixs and drug delivery” *Adv. Drug. Deliv. Rev.* 56, 145-172, 2004.
- [50] Sarı, H., yarıiletken fiziği: Elektronik ve optik özellikler, 11, 1-6, 2008.
- [51] Tsu, DV., Lucovsky, G., Mantini, MJ., Local atomic structure in thin films of silicon nitride and silicon diimide produced by remote plasma-enhanced chemical-vapor deposition. *Phys Rev B*, 33: 7069-76, 1986.

- [52] Kolobov, A.V., Wei, S.Q., Yan, W.S., oyanagi, H., Maeda, Y. and Tanaka, K., *Phys. Rev. B*, 67, 195314, 2003.
- [53] Wang, K.L., Liu J.L. and Jin, G., *J. Cryst Growth* 237-239, 1892, 2002.
- [54] Wang, Y.Q., Kong, G.L., Chen, W.D., Diao, H.W., Chen, C.Y., Zhang, S.B. and Lio, X.B., *Appl. Phys. Lett.*, 81, 4147, 2002.
- [55] Averin D.V. and Likharev, K.K., *J. Low-Temp. Phys.*, 77, 2394, 1986.
- [56] Meseguer, F., Blanco, A., Miguez, H., Garcia-Santamaria, F., Ibisate, M. and Lopez, C., *Coll. Surf.* 202, 281, 2002.
- [57] Shlimak, I., Vagner I. and Safarov, V.I., in *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors*, Springer, Osake, 2000.
- [58] Jie, Y.E., Xiong, Y.N., Wee, A.T.S., Huan, C.H.A. and Ji, W., *Appl. Phys. Lett.*, 77, 3936, 2000.
- [59] Nishii, J., Kintaka, K., Hosono, H., Kawazoe, H., Kato, M. and Muta, K., *Phys. Rev. B*, 60, 7166, 1999.
- [60] Takagahara, T. and Takeda, K., *Theory of quantum confinement effect on excitons in quantum dots of indirect-gap materials*. *Phys. Rev. B* 46, 15578, 1992.
- [61] Gu, G., et al. *Growth and electrical transport of germanium nanowires*. *J. Appl. Phys.* 90, 5747, 2001.
- [62] Böer, K.W., *Survey of Semiconductor Physics*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1990.
- [63] Masuda, K., Yamamoto, M., Kanaya, M. and Kanemitsu, Y.J., *Non-Cryst. Solids*, 299–302, 1079, 2002.
- [64] Kanemitsu, Y., Uto, H., Masumoto, Y. and Maeda, Y., *Appl. Phys. Lett.* 61, 2187, 1992.
- [65] Maeda, Y., Tsukamoto, N., Yazawa, Y., Kanemitsu, K. and Masumoto, Y., *Appl. Phys. Lett.* 59, 3168, 1992.
- [66] Scheglov, K.V., Yang, C.M., Vahala, K.J. and Atwater, H.A., *Appl. Phys. Lett.* 66, 745, 1995.
- [67] King, Y.C., King, T. J. and Hu, C., *IEEE Trans. Electron. Devices* 48, 696, 2001.

- [68] Sze, S.M., VLSI Technology, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [69] Shimizu-Iwayama, T., et al J. Phys.: Condens. Matter 5, L375, 1993.
- [70] Nogami, M. and Abe, Y., Appl. Phys. Lett. 65, 2545, 1994.
- [71] Craciun, V., Boulmer-Leborgne, C., Nicholls, E.J. and Boyd, I.W., Appl. Phys. Lett. 69, 1506, 1996.
- [72] Paine, D.C., Caragianis, C., Kim, T.Y., Shigesato, Y. and Ishahara, T., Appl. Phys. Lett. 62, 2842, 1993.
- [73] Hayashi, R., Yamamoto, M., Tsunetomo, K., Kohno, K., Osaka, Y. and Nasu, H., Japan. J. Appl. Phys. 29, 756, 1990.
- [74] Paine, D.C., Caragianis, C., Kim, T.Y., Shigesato, Y. and Ishahara, T., Appl. Phys. Lett. 62, 2842, 1993.
- [75] Craciun, V., Boulmer-Leborgne, C., Nicholls, E.J. and Boyd, L.W., Appl. Phys. Lett. 69, 1506, 1996.
- [76] Marstein, E.S., Gunnæs, A.E., Serincan, U., Turan, R., Olsen, A. and Finstad, T.G., 2002 Surf. Coatings Technol. 158, 544, 2002.
- [77] Marstein, E.S., Gunnæs, A., Serincan, U., Jørgensen, S., Olsen, A., Turan, R. and Finstad, T.G., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 207, 424, 2003.
- [78] Marstein, E.S., Gunnæs, A.E., Olsen, A., Finstad, T.G., Turan, R. and Serincan, U., J. Appl. Phys.
- [79] Ağan, S., Çelik-Aktaş, A., Zuo, J.M., Dana, A., Aydınli, A., Appl. Phys. A, 83, 107-110, 2006.
- [80] Tsoukalas, D., Dimitrikas, P., Kolliopoulou, S. and Normand, P., Mater. Sci. Engr. B, 124-125, 93, 2005.
- [81] Tawari, S., Rana, F., Hanafi, H., Harstein, A., Crabbe, E.F. and Chan, K., Appl. Phys. Lett., 68, 1377, 1996.
- [82] Wahl, J., Silva, H., Gokirmak, A., Kumar, A., Welser J.J. and Tawari, S., IEDM Technical Digest. 375-378, 1999.
- [83] Rebohle, L., Borany, J.von., Yankov, R.A., Skorupa, W., Tyschenko, I.E., Fröb, H. and Leo K., Appl. Phys. Lett. 71, 2809, 1997.
- [84] Lu, M.J., Wua X.M. and Yao, W.G., Mat. Sci. Eng. B 100, 152, 2003.
- [85] Zhang, J.Y., Ye Y.H. and Tan, X.L., Appl. Phys. Lett. 74, 2459, 1999.
- [86] Zhang, J.Y., Ye, Y.H., Tan X.L. and Bao, X.M., IEEE Appl. Phys. A 71, 299, 2000.

- [87] Lalic N. and Linnros, J., *J. Lumin.* 80, 263, 1999.
- [88] Franzò, G., Irrera, A., Moreira, E.C., Miritello, M., Lacona, F., Sanfilippo, D., Di Stefano, G., Fallica P.G. and Priolo, F., *Appl. Phys. A* 74, 1, 2002.
- [89] Matsuda, T., Kawabe, M., Iwata, H., Nonmembers and T. Ohzone, *IEICE T. Electron.* 11, 1895, 2002.
- [90] De La Torre, J., Souifi, A., Poncet, A., Busseret, C., Lemiti, M., Bremond, G., Guillot, G., Gonzalez, O., Garrido, B., Morante J.R. and Bonafos, C., *Physica E* 16, 326, 2003.
- [91] Irreraa, A., Pacifici, D., Miritello, M., Franzo, G., Priolo, F., Iacona, F., Sanfilippo, D., Di Stefano G. And Fallica, P.G., *Physica E*, 16, 395, 2003.
- [92] Shcheglov, K.V., Yang, C.M., Vahala K.J. and Atwater, H.A., *Appl. Phys. Lett.* 66, 745, 1995.
- [93] Muller, D., Knápek, P., Fauré, J., Prevot, B., Grob, J.J., Hönerlage B. and Pelant, I., *Nucl. Instr. and Meth. B*, 148, 997, 1999.
- [94] Rebohle, L., Von Borany, J., Fröb H. and Skorupa W., *Appl. Phys. B*, 71, 131, 2000.
- [95] Semiconductor Industry Association. *International Technology Roadmap for Semiconductors: 1999 edition.* (Austin, TX:International SEMATECH), 1999.
- [96] Muller, D.A., Sorsch, T., Moccio, S., Baumann, F.H., Evans-Lutterodt, K., and Timp, G., *Nature* 399, 758, 1999.
- [97] Shulz, M., *Nature* 399, 729, 1999.
- [98] Shi, Y., Wang, X. and Ma, T.P., *IEEE Transactions on Electron Devices* 46, 362, 1999.
- [99] Gaponenko, S.V., *Optical properties of semiconductor nanocrystal*, Cambridge University press, 41, 1998.
- [100] Perkowitz, S., *Optical characterization of semiconductor: Infrared, Raman and Photoluminescence Spectroscopy*, Academic Press, 27, 1993.
- [101] Pavesi, L., Dal Negro, L., Mazzoleni, C., Franzò, G. and Priolo, F., *Natures London.* 408, 440, 2000.
- [102] Delord, JF., Schrott, AG., Fain, SC., *Nitridation of silicon (111): Auger and LEED results.* *J. Vac. Sci. Technol.* 17, 517– 520, 1980.
- [103] Tsu, DV., Lucovsky, G., Mantini, MJ., *Local atomic structure in thin films of*

- silicon nitride and silicon diimide produced by remote plasma-enhanced chemical-vapor deposition. *Phys. Rev. B* 33, 7069–7076, 1986.
- [104] Brongersma, M.L., Polman, A., Min, K.S. and Atwater, H.A., *J. Appl. Phys.* 86, 759, 1999.
- [105] Wilcoxon, J.P., Provencio, P.P. and Samara, G.A., *Phys. Rev. B*, 64, 35417, 2001.
- [106] Heath, J.R., Shiang, J.J. and Alivisatos, A.P., *J. Chem. Phys.* 101, 1607, 1994.
- [107] Ryzhii, V., *Semicond. Sci. Technol.* 11, 759, 1996.
- [108] Bhattacharya, P., Stiff-Roberts, A.D., Krishna, S. and Kennerly, S.W., *SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. Proceedings of SPIE, International Society for Optical Engineering*, 46, 100, 2002.
- [109] Liu, H.C., Gao, M., McCaffrey, J., Wasilewski, Z.R. and Fafard, S., *Appl. Phys. Lett.* 78, 79, 2001.
- [110] Kiyotaka Wasa, Makoto Kitabatake, Hideaki Adachi. *Thin film materials technology : sputtering of compound materials* William Andrew, Inc United States p 46,49, 2004.
- [111] Goedheer, W.J., *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 9 page. 507, 2000.
- [112] Lifshitz, J.M. and Slyozov, V.V., *J. Phys. Chem. Solids* 19, 35, 1961.
- [113] Wagner, C., *Z. Elektrochem.* 65, 581, 1961.
- [114] Cahn, J.C., *The Mechanism of Phase Transformations in Crystalline Solids, Fundamentals of Physics Metallurgy*, Institute of Metals : London 103, 1969.
- [115] Bonafos, C., Colombeau, B., Carrada, M., Altibelli A. And Clavarie, A., *Mat. Sci. Eng. B* 88, 112, 2002.
- [116] Verhoeven, J.D., John Wiley and Sons *Fundamentals of Physical Metallurgy*, 400, 1975.
- [117] Verhoeven, J.D., John Wiley and Sons *Fundamentals of Physical Metallurgy*, 222, 1975.
- [118] Cahn, J.C., *The Mechanism of Phase Transformations in Crystalline Solids, Fundamentals of Physics Metallurgy*, Institute of Metals: London, 110, 1969.
- [119] Verhoeven, J.D., John Wiley and Sons, *Fundamentals of Physical Metallurgy*, 402, 1975.
- [120] Brian, I. and Knacke, O., *thermochemical properties of inorganic substances*,

springer, Berlin, 1973.

- [121] Hellberg, P.E., Zhang, S.L., D'Heurle, F.M. and Petersson, C.S., Journal of applied physics 82, 5779-5787, 1997.
- [122] Wilkinson, A.R. and Elliman, R.G., Phys. Rev. B, 68, 155302, 2003.
- [123] Neufeld, E., Wang, S., Apetz, R., Ch. Buchal, Carius, R., White C.W. and Thomas, D.K., Thin Solid Films, 294, 238, 1997.
- [124] Williams, D.B., Carter, C.B., Transmission electron microscopy: a textbook for materials science Plenum Press New York p. 5, 1996.
- [125] Ağan, S., Çelik-Aktaş, A., Zuo, J.M., Dana, A., Aydınli, A., Synthesis and size differentiation of Ge nanocrystals in amorphous SiO₂, Appl. Phys. A 83, 107-110, 2006.
- [126] Cai, Q., Zhou, H., Lu, F., The effects of thermal annealing in self-assembled Ge/Si quantum dots Applied Surface Science 253, 4792-4795, 2007.
- [127] Dana, A., Ağan, S., Tokay, S., Aydınli, A., Finstand, T.G., Raman and TEM studies of Ge nanocrystal formation in SiO_x:Ge/SiO_x multilayers, Phys. Sat. Sol. C 4, No.2, 288-291, 2007.