

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanokristalli-MOS (Metal-Oksit-Yarıiletken) Kapasitörlerde Zamana Bağlı
Kapasitans Ölçümleri

Alim BOZER

KIRIKKALE
HAZİRAN 2013

Fizik Anabilim Dalında Alim BOZER tarafından hazırlanan Nanokristalli-MOS (Metal-Oksit-Yarıiletken) Kapasitörlerde Zamana Bağlı Kapasitans Ölçümleri adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Saffet NEZİR

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 : Yrd. Doç. Dr. Mustafa YÜKSEL

06/06/2013

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

NANOKRİSTALLİ-MOS (METAL-OKSİT-YARIİLETKEN) KAPASİTÖRLERDE ZAMANA BAĞLI KAPASİTANS ÖLÇÜMLERİ

BOZER, Alim

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR

Haziran 2013, 63 sayfa

Bu tezde Plazma ile Zenginleştirilmiş Kimyasal Buhar Depolama (PECVD) tekniği kullanılarak SiO_2 yapılar içerisinde Ge nanokristalleri oluşturulmuştur ve yapısal özellikleri incelenmiştir. PECVD yöntemiyle oluşturulan amorf yapılara yüksek sıcaklık fırınında tavlama işlemi uygulanarak farklı sürelerde ısı verilmiştir ve yapıların amorf düzenden kristal hale geçmesi sağlanmıştır. Örnekler bir, üç ve beş katlı olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan örneklerin elektriksel ölçümleri alınarak yapısı hakkında bilgiler edinilmeye çalışılmıştır.

Üretilen örneklerin katman sayılarının değişmesinin elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Nanokristallerin şarj oldukları akım-gerilim (I-V) eğrilerindeki ani artışlarla gözlemlenmiştir. Ayrıca şarj kapasiteleri de kapasitans-gerilim (C-V) eğrilerindeki histerislerde gözlemlenmiştir. Histerislerde tek katlı örnekler arasında en fazla kayma 0,54 V olarak bulunmuştur. Kapasitans-zaman (C-t) ölçümleri alınmıştır ve Katman sayısının etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Örnekler Al omik kontak eklenmiş ve Metal Oksit Yarıiletken yapısı hazır hale getirilmiştir. Omik kontak direnci Geçirgen Çizgi Methodu (TLM) kullanılarak ölçülmüştür ve kaçak akım olup olmadığı kontrol edilmiştir. Ge nanokristaller TEM görüntüleriyle ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Germanyum Nanokristal, Kapasitans-Zaman, TEM, PECVD,

Kapasitans-Gerilim, Akım-Voltaj, Silisyum dioksit.

ABSTRACT

RETENTION TIME DEPENDENCE ON CAPACITANCE MEASUREMENTS OF MOS (METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR) CAPACITOR WITH NANOCRYSTALS

BOZER, Alim

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, MS. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Erdem YAŞAR

June 2013, 63 pages

In this thesis, Ge nanocrystals embedded in SiO₂ were formed using by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) technique and structural features were studied. Amorphous structures which were formed by the method of PECVD were transformed to crystals by applying annealing process at a high temperature furnace with by giving different periods of heat. Samples were created as one-layer, three-layer and five-layer. Informations about the structure of the samples were obtained by taking electrical measurements.

The effects of changes of layer numbers produced samples to electrical properties were studied. It was observed that Nanocrystals were charged that was due to the rapid increases in I-V curves. In addition, the hysteresis phenomenon was also observed in C-V measurement. This indicated that the charge storage effect resulted from the formed Ge nanocrystals. The highest slip obtained was found as 0,54 V in hysteresis among single layer samples. Capacitance-time (C-t) measurements were taken and the effect of layer numbers was investigated. Al ohmic contact was added to the samples hereby Metal Oxide Semiconductor structure was made available. Ohmic contact resistances were measured by using Transmission Line Method (TLM) and thus samples were checked for leakage. Ge nanocrystals were revealed with TEM images.

Keywords: Germanium Nanocrystal, Capacitance-time, TEM, PECVD,

Capacitance-Voltage, Current-Voltage, Silicon Dioxid

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam, danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Erdem YAŞAR'a, tezi oluşturma sürecinin her aşamasında yardımlarını ve bilgi birikimini bizlerden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Sedat AĞAN'a, deneyler esnasında destek olan arkadaşım Nebi Mustafa GÜMÜŐ'e, son olarak 1001 Araç. Projesi 109T129 no'lu proje ile çalıőmalarımızı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Aileme...

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Nanoteknoloji nedir?.....	1
1.2. Yarıiletkenler.....	3
1.3. Düşük Boyutlu Yapılar: Kuantum Kuyuları, Kuantum Telleri ve Kuantum Noktaları.....	5
1.4. Kuantum Hapis Etkisi.....	6
2. MATERYAL VE YÖNTEM	10
2.1. Klasik MOS-C yapısı.....	10
2.1.1. İdeal MOS kapasitörler.....	11
2.1.2. MOS-C Enerji Bant Diyagramı.....	13
2.1.2.1. Toplanma.....	13
2.1.2.2. Tükenim.....	14
2.1.2.3. Tersinme.....	15
2.2. Nanokristalli MOS kapasitör.....	17
2.3. MOS-C İçerisinde Ge Kuantum Noktalarının Yüklenmesi ve Boşalması.....	18
2.4. Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buharlaştırma Sistemi (PECVD).....	19
2.4.1. Nanokristal Oluşum Teorisi.....	22
2.4.2. Klasik Çekirdeklenme Teorisi.....	23
2.4.3. Ostwald Topaklanması.....	24
2.5. SiO _x Matris İçerisinde Oluşan Ge Nanokristaller.....	24
2.6. Tavlama Fırını.....	27

2.7. Geçirim Elektron Mikroskobu (TEM)	29
2.7.1. Elektronun Doğası.....	31
2.7.2. Elektronun Madde İle Etkileşimi.....	32
2.7.3. Geçirim Elektron Mikroskobunda Temel Görüntüler.....	34
2.7.3.1. Kırınım Görüntüsü.....	34
2.7.3.2. Aydınlık Alan Görüntüsü.....	35
2.7.3.3. Karanlık Alan Görüntüsü.....	35
2.7.4. TEM'e Sınırlandırmalar.....	36
2.8. Numune İnceltme Ve Delme İşlemi.....	37
2.9. Yüzey Temizleme İşlemi.....	40
2.10. Omik Kontakın Oluşturulması.....	41
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	43
3.1. Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri.....	43
3.2. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri.....	48
3.3. Kapasitans-Zaman (C-t) Ölçümleri.....	50
3.4. TEM görüntüleri.....	54
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma reaksiyonları.....	20
2.2. Örneklerin PECVD parametreleri.....	25
2.3. SiO _x film büyütme sırasında ortamdaki gazların etkileşme diyagramı.....	26

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Grup III, IV ve V yarıiletkenleri.....	4
1.2. Ge ve Si nanokristaller için serbest eksiton enerjisinin çapa bağımlılığı.....	8
2.1. Klasik MOS-C yapısı.....	10
2.2. İdeal MOS yapısının enerji bant şeması (p-tipi yarıiletken için).....	11
2.3. Bir MOS yapının eşdeğer devresi.....	12
2.4. MOS-C'nin negatif gerilim altındaki enerji-bant diagramı (toplanma).....	14
2.5. MOS-C'nin pozitif gerilim altındaki enerji-bant diagramı (tükenim).....	14
2.6. MOS-C'nin yüksek pozitif gerilim altındaki enerji-bant diagramı (tersinme)....	16
2.7. İdeal MOS yapısının elektronik şeması a) toplanma b) tükenim c) tersinme.....	16
2.8. Çeşitli nanokristal malzemeler ve nanokristal boyutunun bellekte tutma süresine etkisi.....	17
2.9. Pozitif gerilim ile Ge kuantum noktalarının yüklenmesi	18
2.10. Negatif gerilim ile Ge kuantum noktalarının boşalması	19
2.11. PECVD şeması. Paralel düzlemlı PECVD reaktörü.....	21
2.12. Altaş üzerine büyütölen sistemlerin yapıları.....	29
2.13. Geçirimli elektron mikroskopunun içyapısı.....	30
2.14. Numune ile etkileşim saçılan elektronlar.....	33
2.15. İki şekilde görüntü oluşturma; (a) aydınlık alan ve (b) karanlık alan.....	36
2.16. Kırıkkale Üniversitesi bünyesine “109T129” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında alınan ALLIED MultiPrep inceltme ve parlatma cihazı.....	38
2.17. Kırıkkale Üniversitesi bünyesine “106T043” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında alınan FISCHIONE Model 1010 iyon değirmeni.....	38
2.18. TEM numune hazırlama aşamaları.....	40
3.1. 900 °C 90 sccm GeH4 oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri. a) 15 dk tavlanmış b) 30 dk tavlanmış c) 60 dk tavlanmış.....	44
3.2. 900 °C 120 sccm GeH4 oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri a) 15 dk tavlanmış b) 30 dk tavlanmış c) 60 dk tavlanmış.....	44
3.3. 900 °C 150 sccm GeH4 oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri a) 15 dk tavlanmış b) 30 dk tavlanmış c) 60 dk tavlanmış.....	45

3.4. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış tek katlı örneğin C-V eğrisi.....	46
3.5. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış üç katlı örneğin C-V eğrisi.....	46
3.6. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış beş katlı örneğin C-V eğrisi.....	47
3.7. Üretilen MOS yapıların alanlarına bağlı kapasitans değeri.....	48
3.8. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış tek katlı örneğin I-V grafiği.....	49
3.9. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış üç katlı örneğin I-V grafiği.....	49
3.10. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış beş katlı örneğin I-V grafiği.....	50
3.11. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış tek katlı örneğin C-t grafiği.....	51
3.12. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış üç katlı örneğin C-t grafiği.....	52
3.13. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış beş katlı örneğin C-t grafiği.....	53
3.14. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 90 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü.....	54
3.15. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 120 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü.....	55
3.16. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 150 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü.....	55
3.17. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 120 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin kırınım deseni görüntüsü.....	56

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

I-V	Akım-Gerilim
C-V	Kapasitans-Gerilim
C-t	Kapasitans-Zaman
MOS-C	Metal-Oksit-Yarıiletken- Kapasitör
TLM	Geçirgen Çizgi Metodu
nm	Nanometre
K	Kelvin
°C	Santigrat derece
eV	ElektronVolt
A_{ox}	Oksit yüzeyi
ϵ_s	Dielektrik sabiti
A.C.	Alternatif akım
D.C.	Doğru akım
G	Gibbs serbest enerjisi
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

1.1. Nanoteknoloji nedir?

Nano, sözcük olarak bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelir. Bir nanometre, metrenin bir milyarda birine eşit bir uzunluk birimidir. İnsan saç teli çapının yaklaşık 100.000 nanometre olduğu düşünülürse ne kadar küçük bir ölçekten bahsedildiği daha rahat anlaşılabilir.

1947 yılında Clinton Davisson ve Lester Germer'in maddeyi oluşturan parçacıklardan, elektronların hem parçacık hem de dalga gibi davrandığını ispatlamasıyla ve yine bu ölçeklerde Heisenberg'in belirsizlik kuramını öne sürmesiyle kuantum fiziğinin temelleri atılmış oldu. Bu temel öğelerden doğan kuantum mekaniği sayesinde atom ve moleküller doğru olarak algılanıp anlaşıldı. Temel bilimler ve ilgili teknolojiler hızla gelişti. Kuantum mekaniği sayesinde, atomun enerji durumlarının neden kesikli olduğu, katıların klasik parçacık kuramı kullanarak hesaplanan bazı temel elektronik ve manyetik özelliklerinin neden gözlemlerden büyük sapmalar gösterdiği, artık bir bilmece olarak kalmaktan kurtuldu.

Nanoteknoloji vizyonunun ortaya çıkışı, 1959 yılında fizikçi Richard Feynman'ın malzeme ve cihazların moleküler boyutlarda üretilmesi ile başarılabilecekler üzerine yapmış olduğu ünlü konuşmasına dayandırılabilir [1]. Bu konuşmasında Feynman, minyatürize edilmiş enstrümanlar ile nanoyapıların ölçülebileceği ve yeni amaçlar doğrultusunda kullanılabileceğinin altını çizmiştir.

1965 yılı Nobel Fizik Ödülü'nü kazanan Richard Feynman daha 1959 yılında çoğunluğu Fizikçi bilim adamlarına yaptığı bir konuşmada küçük nesnelere ve küçültmeden bahsetmiş "neden Ana Britannica'yı toplu iğne başı kadar bir alana yazamayalım?" demişti. Dinleyicilerin çoğu için uçuk hatta komik olan bu düşünceler 25 yıl sonra gerçekleşti ve "Ana Britannica", bir bilgisayar çipi (yonga) üzerine yazıldı. "There's Plenty of Room at the Bottom" Richard Feynman'ın 1959'da

Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü Fizik Topluluğu'na yaptığı konuşmanın başlığıdır. Bu konuşmanın nanobilim ve nanoteknolojinin geleceğini tanımlaması nedeni ile nanobilim açısından özel bir önemi vardır. Feynman konuşmasında 2000'li yıllarda insanlar geriye dönüp baktıklarında neden 1960'lara kadar bu konu ile ilgili ciddi çalışmaların başlamadığını merak edecekler" demiştir. 1959'da Feynman'ın başlattığı akım günümüze kadar inanılmaz bir hız ve bilgi birikimi ile gelmiştir.

Bilindiği gibi bütün maddeler atomlardan oluşmaktadır. Özelliklerini de atomlarının dizilişlerinden alırlar. Atomları hareket ettirebilecek boyutlarda aletler geliştirilebildiği takdirde, doğadaki atomik dizilim taklit edilerek her şey kopyalanabilir [2]. Çünkü maddeleri farklı kılan, en küçük birim olan atomların dizilişlerindeki çeşitliliğidir. Atomları hareket ettirebilecek bir teknoloji de bu çeşitliliğe bir ölçüde ulaşabilir.

Yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturmaktadır. Nanoteknoloji de bu bağlamda "çok küçük maddelerin teknolojisi" olmaktadır. Nanoteknoloji kapsamına giren malzemeler herhangi bir büyüklüğü (uzunluk, genişlik veya kalınlık) 1 ile 100 nanometre arasında olan malzemelerdir. Sadece bir tek boyutu nanometre mertebesinde olan malzemeler dahi nanoteknoloji kapsamına girmektedir.

Aşırı derecede küçük boyutlara sahip yapılarda, hacimsel yapılar için geçerli olan fiziksel ve kimyasal yasalar geçerli değildir. Yani belli bir hacim kaplayan bir madde bir veya birden fazla boyutta (uzunluk, genişlik veya kalınlık) nanometre ebatlarında parçacıklara bölündüğünde, parçacıkların her biri baştaki hacimli maddenin özelliklerinden çok farklı ve beklenmedik özelliklere sahip olabilmektedir. Örneğin nano ölçekteki malzemelerin iletim özellikleri (momentum, enerji ve kütle) sürekli olarak değil kesikli olarak tarif edilmektedir. Benzer olarak, optik, elektronik, manyetik ve kimyasal davranışlar klasik değil kesikli olarak tanımlanmaktadır [3].

1.2. Yarıiletkenler

Bell Laboratuvarları'nda 1947 yılında Shockley, Bardeen ve Brattain tarafından yapılan ve bir yumruk büyüklüğünde olan ilk katı hal transistörün üretimiyle Germanyum yarı iletkeni etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Germanyum kristali, doğrultucularda, transistörlerde ve bütünleşmiş devre elemanlarında sıklıkla kullanılmaya başlanmış, daha sonraları Germanyumun tümleşik devrelerde yüksek sızıntı akımı göstermesinin anlaşılması ile birlikte bu yarıiletkenin yerine kullanılabilir yeni materyaller arayışına gidilmiştir. 1960'lı yıllardan sonra Silisyum kristalinin Germanyum kristaline göre çok daha az sızıntı akımı göstermesinin keşfiyle yarıiletken cihaz üretiminde Silisyum kristali Germanyum kristaline nazaran daha işlevsel hale gelmiştir. Bu yıllardan sonra Silisyum yarıiletkeni sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Gelişen teknoloji ile artan ihtiyaçlar kullanılan malzemelerin temel özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekli kılınmıştır [4, 5].

Birçok değişik kimyasal element ve bileşik yarıiletken olabilir. Periyodik tablonun IV. grubunda yer alan yarıiletken elementlerinden Silisyum, Germanyum ve Kalay elmas yapıda uzay örgüsü yüzey merkezli kübik (fcc) dir. Silisyum ve Germanyum teknolojik açıdan başlıca yararlanılan önemli yarıiletken elementlerdir [6].

Silisyum ve Germanyumun ait olduğu grup IV yarıiletken malzemelerin sahip oldukları dolaylı bant yapılarından dolayı, dolaysız bant aralığına sahip grup III–V ve grup II–VI yarıiletken bileşiklerine kıyasla daha kötü optik ve elektronik özellikler gösterdikleri bilinmektedir. Bu da, optoelektronik dünyasında grup III–V ve grup II–VI gibi dolaysız bant aralığına sahip yarıiletken ve onların bileşenlerini IV. grup yarıiletkenlerine karşın daha etkin bir konuma taşımaktadır [7].

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Şekil 1.1. Grup III, IV ve V yarıiletkenleri

Bu eksilerine rağmen günümüz teknolojisinde elektronik aygıtların ve tümleşik devrelerin çoğu IV. grup yarıiletkeni olan Silisyum kristali kullanılarak üretilmektedir. Si, GaAs ve InP vb. bileşik yarıiletkenlerinin yüksek hızlı performansları ve dolaysız bant aralığına sahip olmalarına karşın yarıiletken marketinin % 95' inden fazlasını işgal etmektedir. Bunun nedeni olarak ise kısaca şu sebepler gösterilebilir:

- Düşük materyal fiyatı, dünya üzerinde çok büyük miktarda bulunabilmesi ve ulaşım kolaylığı. (Silisyum dioksit ve silikatlar halinde yer kabuğunun % 25.7 sini oluşturur. Genelde silikat şeklinde bulunmakla birlikte, bütün tabii sularda, toz olarak atmosferde, birçok bitki ve hayvanların iskelet ve dokularında yaygın olarak bulunmaktadır.)
- Silisyum, oksijen ve azot gibi elementlerle kolaylıkla bağ yaparak SiO_2 ve Si_3N_4 gibi yalıtkan bileşikleri oluşturabilir. Bu yalıtkanların benzer yalıtkan malzemelere göre daha kolay üretilebilmesi ve güçlü özelliklere sahip olması
- Si, bileşik yarıiletkenlerine göre çok daha kolay üretilebilir ve bu nedenle de düşük fiyat avantajlarına sahiptir.
- Si, GaAs'dan 3 kat daha fazla termal iletkenliğe sahiptir ve bu nedenle de tümleşik devrelerde (IC), artan devre elemanı sayısına karşın soğutma

gereksinimlerini ve güç tüketimini en aza indirecek, ısıl iletkenliği üstün olan materyallere ihtiyaç duyulmaktadır. GaAs yerine Si altaş kullanılarak bu sorun nispeten çözümlenebilmektedir.

Yarıiletkenlerde $T = 0$ K de bütün elektronlar değerlilik bandında bulunur ve iletim bandında hiçbir elektron yoktur. Bunun için yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda zayıf iletkenlerdir. Mutlak sıfır üzerindeki herhangi bir sıcaklıkla bazı elektronlar ısıl enerjilerinin bir sonucu olarak değerlilik bandından iletkenlik bandına uyarılacaktır. Elektronlar geçiş yaptıklarında, boş holler değerlilik bandında bırakılır ve elektron-deşik çiftleri oluşur. Bağlı elektron-deşik çiftine eksiton adı verilir. Eksiton etkin kütlelerin tersiyle orantılı yörünge yarıçaplı ortak çekim merkezi etrafında dönen bir elektron ve deşik olarak ele alınabilir. Eksitonlar kristalde örgü boyunca ilerleyebilir ve kristal içinde enerji transferinde önemli bir yol haline gelir. Eksitonlar katıların lüminesansında önemli rol oynarlar.

1.3. Düşük Boyutlu Yapılar: Kuantum Kuyuları, Kuantum Telleri ve Kuantum Noktaları

Yarıiletkenlerde elektronun ve deşiğin (hole) dalga boyları (λ_e , λ_h) ve eksiton Bohr yarıçapı (a_B), örgü sabiti a_L den oldukça büyüktür. Dolayısıyla bir, iki ya da üç boyutta λ_e , λ_h ve a_B den karşılaştırılabilir derecede küçük fakat a_L den büyük parçacıklar yapmak mümkündür. Modern teknolojinin avantajlarıyla düşük boyutlu parçacıklar yapılabilmektedir [8-14].

Si ve Ge yapıların diğer yarıiletkenlerden daha fazla ilgi çekmesinin diğer bir nedeni de taşıyıcı dalga fonksiyonu üzerindeki hapis etkisindedir. Bu etki nano parçacığın çapının eksiton (elektron-deşik çifti) Bohr yarıçapından daha az olduğunda ortaya çıkar [15]. Yarıiletken nanokristaller küçük boyutlu kuantum noktalarıdır. Bir atomda olduğu gibi, nanokristallerdeki enerji seviyeleri de elektronların hapsine bağlı olarak kuantize olmuştur [16]. Nanokristaller içindeki elektron ve deşik (hole) enerji seviyeleri kuantum noktasının çapıyla orantılıdır. Nanokristaller ne kadar küçük olursa enerji seviyeleri arasındaki fark da o kadar büyük olur. Bütün optiksel ve elektronik

özellikler elektron seviyelerinin enerjilerine ve yoğunluğuna bağlı olduğu için, bu küçük yapıların boyutlarıyla oynayarak bu özellikler değiştirilebilir [17].

Bir yarıiletkende boyutlar eksitonik Bohr yarıçapına yaklaştığında kuantum hapis etkisi elektronik ve optik işlemlere karşı üstün olmaya başlar [18]. İki boyutta kuantum hapis etkisi ince film yapılarını kuantum teli özelliği katarken, üç boyutta hapis etkisi yapıları bir kuantum noktası gibi davranır [19]. Kuantum kuyular, kuantum telleri ve kuantum noktalar düşük boyutlu yarıiletken sistemlerin geometrik sınıflandırılmasını oluştururlar. Bu sınıflandırılma yapılırken taşıyıcı yükün hareketinin kaç boyutta sınırlı ve kaç boyutta serbest tutulduğu göz önüne alınır. Kuantum kuyularında taşıyıcı hareketi bir boyutta, kuantum tellerinde iki boyutta ve kuantum noktalarında ise her üç boyutta sınırlandırılmıştır. Taşıyıcı yükün serbest olarak hareket edebileceği boyut sayısı göz önüne alınarak, kuantum kuyular iki boyutlu, kuantum telleri bir boyutlu ve kuantum kuyular sıfır boyutlu sistemler olarak adlandırılır. Bu sistemlerde taşıyıcı yük elektron, deşik veya eksiton olabilir.

1.4. Kuantum hapis etkisi

Kuantum hapsi kısaca, kristal içerisindeki taşıyıcıların enerji seviyelerindeki değişimi açıklamaya çalışan bir model olarak açıklanabilir. Bu enerji seviyelerindeki değişimin çözümü basit kuantum mekanik problem (kutu içerisindeki parçacık problemi) ile bulunabilir. Etkin kütle yaklaşımını da kullanarak, m_e etkin kütleli bir elektron, m^* etkin kütleli deşigi bir boyutlu sonsuz potansiyel kuyusu içerisinde hapsedilmiş gibi düşünürsek, çözüm zamandan bağımsız Schrödinger denklemi potansiyel kuyusunun eninin karesi ile yasaklı enerji seviyeleri arasında ters orantılı bir bağıntı oluşturacaktır. Bu da taban enerji seviyesinin arttığı durumlarda potansiyel kuyusunun genişliğinin azalması ile sonuçlanacağı sonucunu doğurmaktadır. Bu analizleri kullanarak, iletkenlik bandındaki elektronlar ile deşiklik bandındaki deşikler için

$$E_c = \frac{E_g}{2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e a^2} \quad (1.1)$$

$$E_v = -\frac{E_g}{2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} - \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_h a^2} \quad (1.2)$$

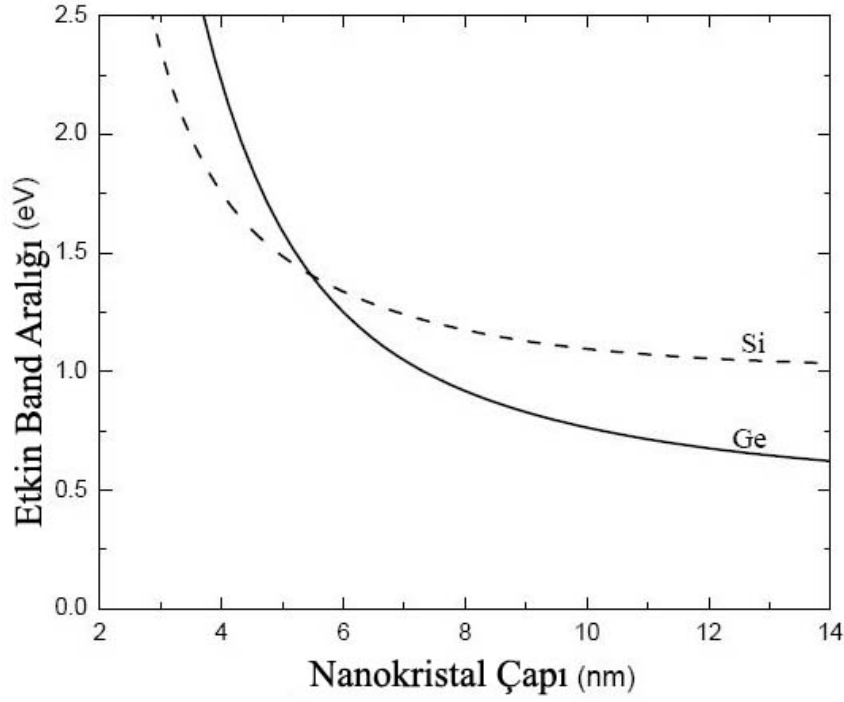
yazılabilir. E_g enerji aralığı, $\hbar k$ kristal momentumu, a ise potansiyel kuyusunun momentumudur. Denklem 1.1 ve Denklem 1.2 birleştirilirse hapsedilen enerji aralığı

$$E_g^{Hapsediaps} = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2a^2} \left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right) \quad (1.3)$$

olacaktır. Enerji aralığı kuantum hapsi artırıldığında bant aralığı enerjisi de artmış olacaktır.

Kuantum hapis etkisiyle kristal boyutunun fonksiyonu olarak grup IV elementlerinin bant yapıları ile oynamak optik ve elektronik özelliklerinde bazı önemli değişikliklere sebep olmaktadır [20, 21].

Bu konuyla ilgili olarak, Si ve Ge nanokristaller için nanokristal çapı optik bant aralığının bugüne kadar yapılmış birbirinden bağımsız teorik yaklaşımlar ile birlikte incelenmiştir [22-24].



Şekil 1.2. Ge ve Si nanokristaller için serbest eksiton enerjisinin çapa bağımlılığı

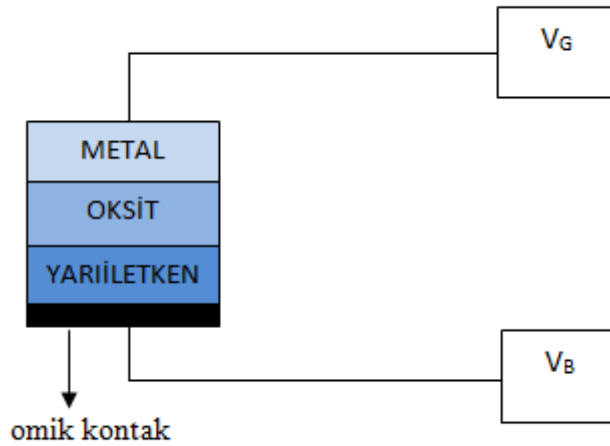
Germanyum Silisyuma göre eksiton Bohr yarıçapı ve özel bant yapısı nedeniyle birçok önemli avantaja sahiptir. Germanyum kristalinde kuantum hapis etkisi Silisyum kristalinden daha yoğun bir şekilde ortaya çıkmaktadır [25]. Ge kristallerin atomik Bohr çapı Si kristallerinden daha büyük olduğundan dolayı Ge kristali Si kristaline nazaran daha büyük çaplarda daha fazla ayarlanılabilir bant aralığına sahiptir. Küçük nanokristallerin deneysel olarak daha zor kontrol edilebileceği göz önüne alınırsa Ge kristali Silisyum kristaline karşın bu açıdan daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir [25]. Ge eksitonik Bohr yarıçapı yaklaşık 24,3 nm, Si için yaklaşık 4,9 nm'dir [26]. Ge kristallerin atomik Bohr çapının Si nanokristallerinden daha büyük olmasından dolayı Ge kristali Si kristaline nazaran daha büyük çaplarda daha fazla ayarlanılabilir band aralığı enerjisi sunmaktadır. Sonuç olarak kuantum hapis etkisi Ge nanokristaller için kabul edilir ve belirgin şekilde Si nanokristallere göre daha fazla telaffuz edilir olmaktadır. Ayrıca Ge doğrudan band geçişi 0,6 eV iken Si ki 1,12 eV'tur [24]. Ge nanokristallerinde görülen optiksel ve elektronik özelliklerin Si nanokristallerinden düşük boyutlarda eksiton Bohr çapının daha büyük olması nedeni ile daha etkili olacağı deneysel ve teorik olarak gözlemlenmiştir. Bu nanokristalleri kullanarak

fotodedektör [27], ışık yayıcı [28], tek elektron transistörü [29], fotonik yapı [30], kuantum bilgisayar [31], doğrusal olmayan optik ortam [32] ve ışığa duyarlı elementler [33] elde etmek mümkün olmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Günümüz teknolojisinde, özellikle de bilgisayar teknolojisinde cihaz performansının ve kullanılabilirliğin artırılabilmesi için boyutlar giderek küçülmektedir. Bilgisayar işlemcilerinde (CPU) ve belleklerinde (RAM) genellikle temel birim olarak MOS yapılar (MOSFET, CMOS ve MOS kapasitörler) kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeyi belirleyen Moore yasasına göre, bilgisayarların hızlarının artırılması için CPU ve RAM'lerde kullanılan transistör sayısı her 18 ayda iki katına çıkacaktır. Transistör sayısındaki bu hızlı artış ile birlikte birim alana entegre edilen transistör sayısının artmasını gerektirir. Kaplanan alanın artması istenilen bir durum olmadığından elektronik yapıların boyutunun küçültülmesi ön plana çıkmaktadır. Ancak boyutlardaki bu hızlı küçülme, cihazların sağlıklı çalışmamasına neden olan birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu sorunların en önemlileri sızıntı akımlarıdır. Söz edilen bu sorunları aşabilmek için yarıiletken teknolojisi, özellikle de MOS teknolojisi giderek önemini arttırmaktadır.

2.1. Klasik MOS-C yapısı



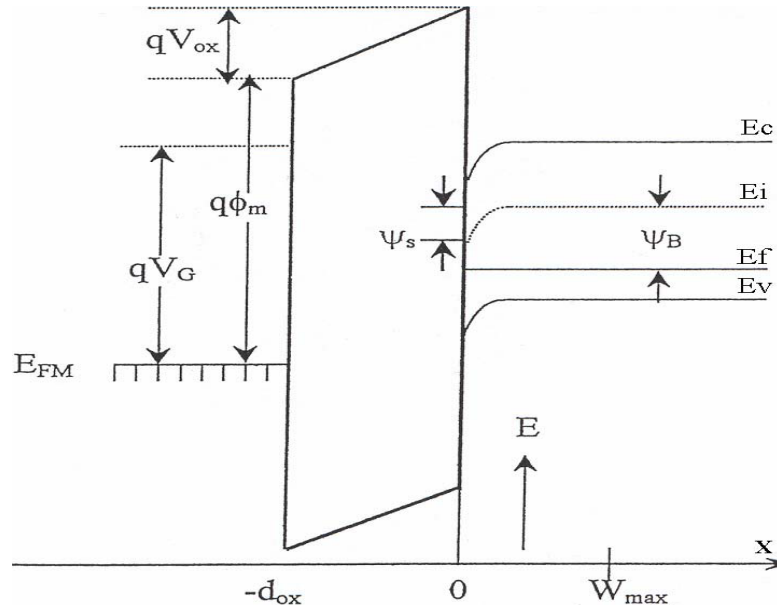
Şekil 2.1. Klasik MOS-C yapısı

Klasik MOS kapasitör Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bir Metal-Oksit-Yarıiletken’den oluşan bir yapıdır. Bu yapı bir yarıiletken alt yüzey, ince bir oksit tabakası ve en üstte geçit olarak adlandırılan bir metal kontakten oluşmaktadır. İkinci metal tabakası yarıiletkenin diğer yüzeyine omik kontak olarak kaplanmıştır.

Metal ile yarıiletken arasına oluşturulan yalıtkan bir oksit tabakası, metali yarıiletkenden izole eder ve yapıyı Metal-Yalıtkan-Yarıiletken yapıya dönüştürür [34-41]. Metal-Oksit-Yarıiletken yapısı MOS olarak adlandırılır. V_G metal plakaya uygulanan gerilimdir. V_G gerilimi, metal plaka omik kantağa göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir.

MOS yapılarda uygulanan doğru besleme geriliminin bir kısmı yarıiletken tüketim tabakasına düşerken bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer ve $V_G = V_{yi} + V_y$ şeklinde ifade edilir. Burada V_{yi} , uygulanan V_G geriliminin yarıiletken üzerine düşen kısmı, V_y ise yalıtkan üzerine düşen kısımdır. Bu yapının belirgin özellikleri yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken ara yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir.

2.1.1. İdeal MOS Kapasitörler



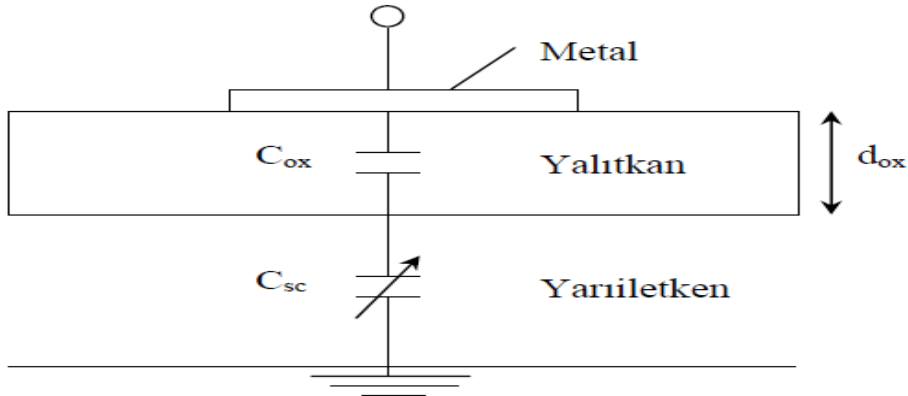
Şekil 2.2. İdeal MOS yapısının enerji bant şeması (p-tipi yarıiletken için)

İdeal bir MOS yapıda metal elektroda gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken ara yüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü oluşur. Termal denge durumunda ara yüzey bölgesindeki uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletkende metallere göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, ya uzay yükü bölgesini ya da ara yüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Uygulanan V_G gerilimi

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.1)$$

eşitliği ile yazılabilir. Bu ifade V_{ox} yalıtkan oksit tabaka üzerine düşen gerilim, ψ_s ara yüzeydeki bant gerilimidir.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Bu kapasitans MOS kapasitansı olarak adlandırılır. Bu yapıların özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyi belirler. Kapasitans ara yüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MOS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MOS yapının kapasitansı C , yalıtkan oksit tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları MOS kapasitansını verecektir.



Şekil 2.3. Bir MOS yapının eşdeğer devresi

Şekil 2.3'deki eşdeğer devrenin çözümünde MOS kapasitansı aşağıdaki eşitlikle verilir

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.2)$$

Bu sonuca göre MOS yapısının eşdeğer kapasitansı, C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan oksit tabaka kapasitansı C_{ox} ise

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.3)$$

olarak verilir. Bağlıtıda ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, A_{ox} yalıtkan tabakanın yüzeyi ve d_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından, C_{ox} değeri uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MOS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece uzay yükü kapasitansı belirler.

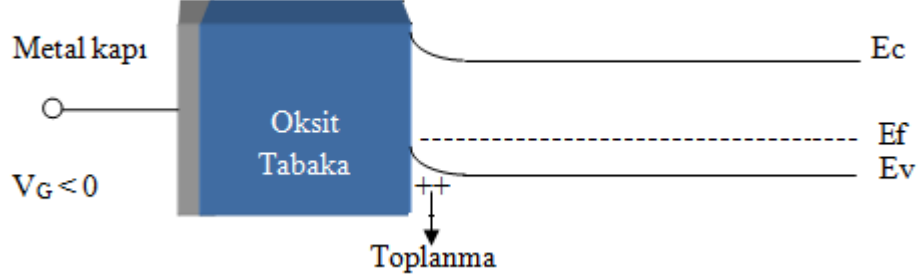
2.1.2. MOS-C enerji bant diyagramı

Metal kontağa uygulanan gerilimin türü ve büyüklüğüyle MOS-C yapısının enerji diyagramını değiştirmek mümkündür. Uygulanan gerilime göre değişim toplanma, tükenim ve tersinme olabilir.

2.1.2.1. Toplanma

Metal plakaya bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan deşikleri yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir. İdeal bir kapasitörde yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına sebep olur. Valans bandının yarıiletken ara yüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların ara yüzeyde birikmelerinden

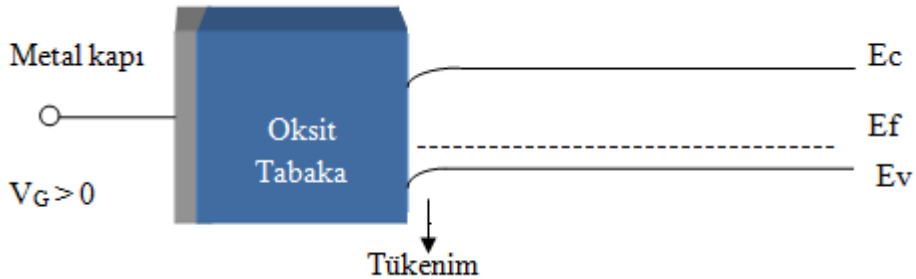
dolayı “toplanma” adı verilir. Bu durumda ara yüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur.



Şekil 2.4. MOS-C'nin negatif gerilim altındaki enerji-bant diagramı (toplanma)

2.1.2.2. Tükenim

Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) uygulandığı zaman, yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken ara yüzeyindeki deşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen W genişliğinde bir bölgede, deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Deşiklerin azaldığı bu bölgeye tükenim bölgesi, bu olaya “tükenim” olayı denir.



Şekil 2.5. MOS-C'nin pozitif gerilim altındaki enerji-bant diagramı (tükenim)

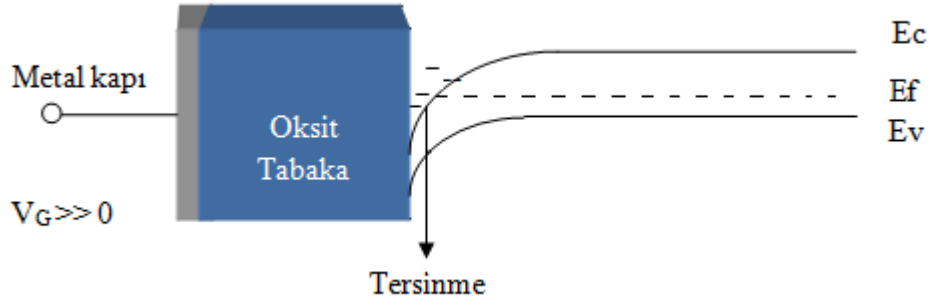
Bu olayda bantlar aşağı doğru bükölür ve çoğunluk taşıyıcı durumundaki deşikler ara yüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında, tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, Silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin besleme tükenimi ve katkı yoğunluğu 0,1-10 µm civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Tükenim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.4)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MOS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler.

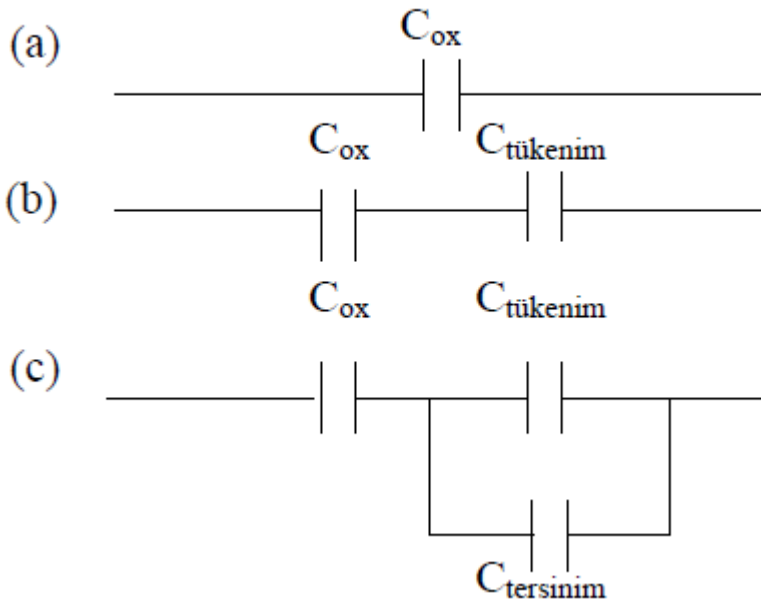
2.1.2.3. Tersinme

Metale daha büyük bir pozitif gerilim ($V_G \gg 0$) uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru bükölür. Doğal durumdaki enerji seviyesi E_c , Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır. Bu durumda MOS kapasitansını, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin A.C. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu A.C. sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasitans artan gerilimle yalıtkan oksit kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görölür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez ve kapasitans C_{min} 'da kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse kapasitans C_{min} 'un altında değerler alır.



Şekil 2.6. MOS-C'nin yüksek pozitif gerilim altındaki enerji-bant diagramı(tersinme)

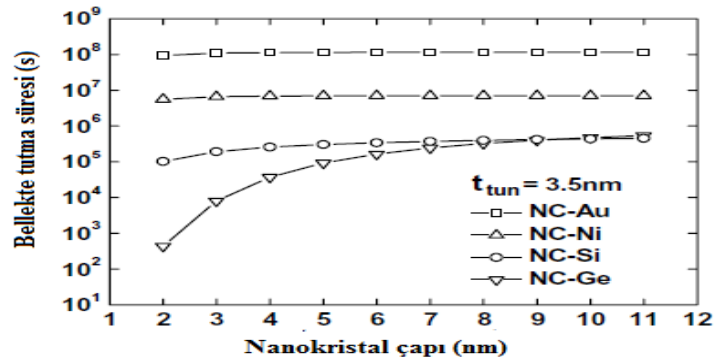
İdeal bir durumda yükler yarıiletken ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. D.C. gerilim altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez. Bir MOS yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 2.7'deki gibidir. Bu sistemler toplanma, tükenim ve tersinme adını alır.



Şekil 2.7. İdeal MOS yapısının elektronik şeması a) toplanma b) tükenim c) tersinme

2.2. Nanokristalli MOS kapasitör

Klasik MOS kapasitör yapısında yarıiletken ve iletken kısımlar arasında SiO_x matrisi içerisinde nanokristallerin büyütülmesiyle yapıya yeni avantajlı özellikler eklenmesi amaçlanmıştır. Yapılardan hızlı bellek üretebilme olanağı sağlamaktadır. Bellek kapasitesinin kullanılan nanokristal türüne ve yalıtkan matrisin özelliklerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir [42]. Silisyum nanokristal tabanlı bellek çalışmaları kalıcı bellek uygulamasını mümkün kılmıştır [43]. Nanokristal olarak üretilen yapıların performansları farklı şarj depolama özelliklerinden dolayı avantaj sağlamaktadır. Ancak program yazma/silme hızıyla bellekte tutma süresi arasında bir çelişki bulunmaktadır. Yazma/silme hızının artması için daha ince bir tünel oksidi gerekirken, kabul edilebilir bir bellekte tutma süresi (10 yıl gibi) daha kalın bir tünelleme oksidi gerektirmektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için son zamanlardaki bu konuyla alakalı çalışmaların büyük bir çoğunluğu farklı malzemelere ve yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerden elde edilen tünelleme ve kontrol oksitlerinin yapıları üzerine odaklanmıştır [44-48]. Bu tezatlığı çözebilecek bir diğer yol da şarjın tutulduğu potansiyel kuyusunun yapısının ya da derinliğinin oynanmasıyla mümkün olabilmektedir. Yazma için küçük, saklama için büyük olacak şekilde asimetrik bir engelin oluşturulmasıyla bu tezatlık durumunun ortadan kaldırılacağı öngörülmektedir. Ge ve Si heterojen-nanokristallerinin kullanımı bu tezatlığın ortadan kaldırılmasını mümkün kılmıştır [49]. Değişik gruplar nanokristal türünün ve boyutunun bellekte tutma süresine etkisini incelemiştir [50].

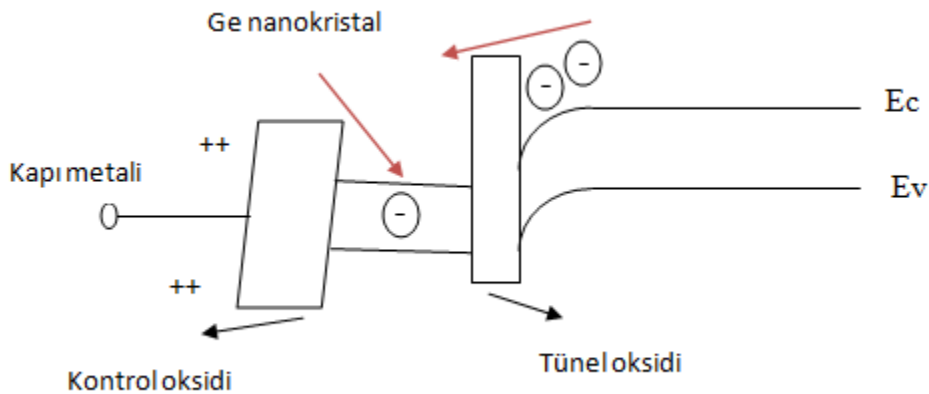


Şekil 2.8. Çeşitli nanokristal malzemeler ve nanokristal boyutunun bellekte tutma süresine etkisi [50]

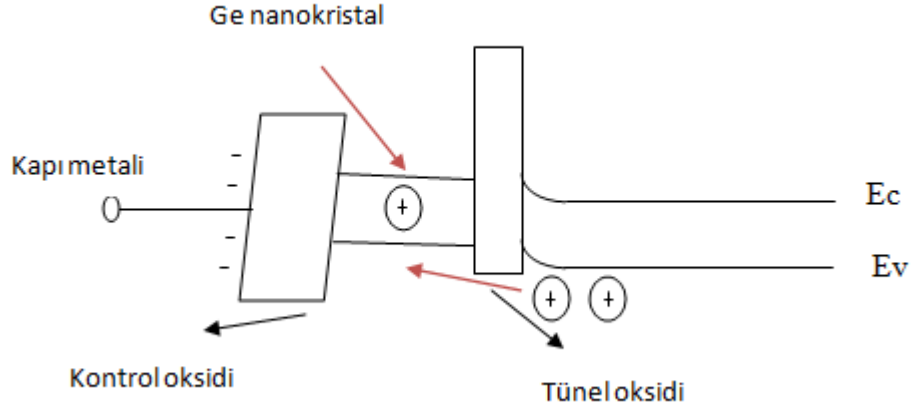
Aynı boyuttaki nanokristaller için metal nanokristallerde şarj kapasitesi yarıiletken nanokristallere göre daha iyi performans gösterdiği grafikten anlaşılmaktadır. Bu sonucun iki sebebi olabilir: ilki metal nanokristaller için elektron engel yüksekliğinin daha fazla olması, ikincisi ise metal nanokristaller için kuantum sınırlama etkisini zayıflığı sebep gösterilebilir. Nanokristal boyutu 5 nanometrenin altına indiğinde bellekte tutma süreleri oldukça fazla değişmektedir. Ancak bu 5 nm değerinin üzerinde kapasite bakımlarından her biri neredeyse kendi ilk değerlerine eşittirler. Silisyum ile Germanyum karşılaştırıldığında ise Germanyum'un etkin engel yüksekliği Silisyum'dan daha fazla olduğundan ve kuantum sınırlama etkisindeki avantajından dolayı daha ön plana çıkmaktadır.

2.3. MOS-C İçerisinde Ge Kuantum Noktalarının Yüklenmesi ve Boşalması

Ge nanokristallerin yüklenmesi ve boşalması olayı Fowler-Nordheim tünellemesi [51] ile açıklanabilir. Fowler-Nordheim tünellemesi elektrik alan sayesinde oluşur. Yüksek bir pozitif gerilim, kapı metaline uygulandığında enerji-bant diyagramı Şekil 2.9'daki gibi olur. Pozitif gerilim sayesinde bant bükülmesi gerçekleşir ve p-tipi Silisyum'un iletkenlik bandındaki elektronlar yalıtkan SiO₂ tabakasından tünelleme yaparak Ge kuantum kuyularına düşerler [52]. Böylece sistem yüklenmiş olur. Sistem ters besleme yapılmadığı sürece nanokristaller yük tutacaklardır.



Şekil 2.9. Pozitif gerilim ile Ge kuantum noktalarının yüklenmesi



Şekil 2.10. Negatif gerilim ile Ge kuantum noktalarının boşalması

Kapı metaline negatif gerilim uygulanırsa, oluşacak enerji bant diagramı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi yalıtkanlık bandındaki holler elektrik alan etkisinde kalırlar ve daha önce elektron tutan kuantum kuyularına çekilirler. Böylece elektron hol birleşmesi gerçekleşir ve sistem boşalmış olur.

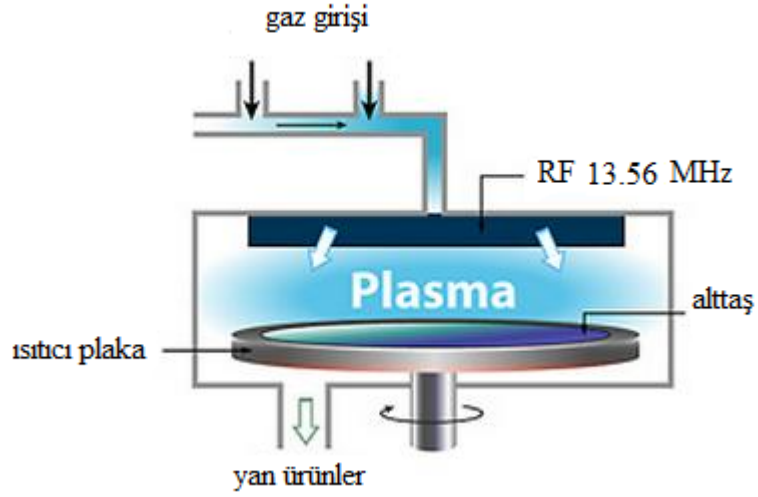
2.4. Plazma İle Güçlendirilmiş Kimyasal Buharlaştırma Sistemi (PECVD)

Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma yolu ile depolama tekniği (PECVD), kimyasal buhar depolama tekniğinden (CVD) birkaç artısı ile 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-katot 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.

Çizelge 2.1. Plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buharlaştırma reaksiyonları [53]

Elektron nőtür	
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 nőtür	$A^+ + BC \rightarrow A^+ B + C$
Yüzey reaksiyonları	$AB \rightarrow A \text{ (film)} + B$ $A^+ + CB \text{ (film)} \rightarrow A^+ C \text{ (film)} + B \text{ (film)}$



Şekil 2.11. PECVD şeması. Paralel düzlemlı PECVD reaktörü

Başlangıç olarak bu teknıkte tabakalar arasında uygulanan elektrık 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 SiH_4 gazının bileşenlerine ayrılması



şeklinde gerçekleşmektedir.

Eğer büyütme sırasındaki ortam basıncı 0.1 Torr civarında ise elektronların ve moleküllerin alabilecekleri ortalama serbest yol artacağından çarpışmaların sayısı

azalacaktır. Bu azalma gaz moleküllerinin 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 çıkarmaktadır [54].

2.4.1. Nanokristal Oluşum Teorisi

PECVD tekniğinde filmin büyütülmesinden sonra nanokristal oluşması 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 yaklaşık 40 yıl önce yayınlanabilmiştir. Modern parçacık kümelenme teorisi ise Lifshitz ve Slyezov [55] ve C. Wagner [56] tarafından modellenmiş olup G. W. Greenwood [57] tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde bu teori, yalıtkan matrisler içinde oluşturulan nanokristallere de uyarlanmıştır [58].

2.4.2. Klasik Çekirdeklenme Teorisi

Klasik çekirdeklenme teorisi 1925 yılında Volmer ve Weber'in [59] görüşleri üzerine oluşturulmuştur. Bir çekirdek oluşumu sırasında Gibbs serbest enerjisindeki değişiklik ΔG , yüzey terimlerin toplamına eşittir [60]. Bu durumda bir çekirdek oluşturmak için gerekli serbest enerji değişimi:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi.r^3.\Delta G_B + 4.\pi.r^2.\gamma \quad (2.6)$$

olarak gösterilir. Burada, yüzey serbest enerjisi basitçe yüzey gerilimi, γ olarak alınmıştır ve ΔG 'de ham serbest enerji değişimidir. Reaksiyonun serbest enerji değişimi negatif ise, çekirdeklenme olayı tercih edilir. Bir çekirdeğin r^* değerinden daha fazla büyümesi serbest enerjii düşürür. Bu yüzden, r^* kritik bir yarıçaptır ve

$$r^* = \frac{-2\gamma}{\Delta G_B} \quad (2.7)$$

olarak bulunabilir. Bu durumda kritik boyuttaki bir çekirdeği oluşturmak için gerekli serbest enerji değişimi ΔG^* , r^* 'nin Denkleme yerleştirilmesiyle

$$\Delta G^* = \frac{-16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_B)^2} \quad (2.8)$$

olarak bulunur.

2.4.3. Ostwald Topaklanması

Ostwald topaklanması kendiliğinden gelişen bir olaydır. Birçok küçük kristalin oluşumu kinetik olarak tercih edilirken (küçük parçacıklar daha kolay çekirdek oluşturabilirler), daha büyük olanlar termodinamik olarak tercih edilirler. Bu yüzden, kinetik açıdan, birçok küçük kristal oluşumu daha kolaydır. Fakat küçük kristallerin yüzey alanının hacmine oranı büyüklerinkine göre daha fazladır. Yüzeydeki moleküller, içerde iyi bir şekilde düzenlenmiş ve paketlenmiş olanlardan enerji bakımından daha az karardır. Büyük kristaller, daha büyük hacim yüzey alanı oranıyla daha düşük bir enerji seviyesi sunarlar. 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 daha küçük gruplar sistem tarafından yüzey potansiyelini indirgemek amacıyla daha büyük olanlara dönüştürürler [61]. Sonuç olarak, gruplaşma evresi hacim oranı sabit kalır. Bir parçacığın atom kayıp hızı, ya parçacık-matris ara yüzeyinden transfer hızı ya da parçacıktan matrise doğru bir difüzyon tarafından kontrol edilir. Bu durumların her ikisi de Lifshitz-Wagner teorisine dahildir. Deneysel araştırmalardan uyumlu öbeklerin gelişiminin difüzyon kontrollü olduğu anlaşılmıştır [62, 63].

Lifshitz-Wagner teorisi, istatistiksel bir analiz yaparak farklı bir yaklaşım ortaya çıkarmaktadır [64]. 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.

2.5. SiO_x Matris İçerisinde Oluşan Ge Nanokristaller

Silisyum oksit filmler ısı oksidasyon, elektroliz, vakum depolama, plazma oksidasyon teknikleri ya da PECVD tekniği ile büyütebilmektedirler. Bu tekniklerin yanı sıra

silisyum oksit içerisindeki Ge nanokristaller $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_2$ ile Hidrojenin (H_2) reaksiyonu ve $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ alaşımının oksidasyonu ile oluşturulabilir [65]. SiO_x filmleri büyütme için PECVD tekniğini kullanıldı. Oluşturulan filmler ile ilgili büyütme değişkenleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Örneklerin PECVD parametreleri

Katman	Gaz Akış Hızı (Sccm)	Basınç (Torr)	Büyüme Hızı (Å/s)
SiO ₂ : Ge	SiH ₄ : GeH ₄ : N ₂ O 180 : 90 : 180	1	3,75
SiO ₂ : Ge	SiH ₄ : GeH ₄ : N ₂ O 180 : 120 : 180	1	3,00
SiO ₂ : Ge	SiH ₄ : GeH ₄ : N ₂ O 180 : 150 : 180	1	2,5

RF; SiO₂: Ge katmanı için 10 W’ tır.

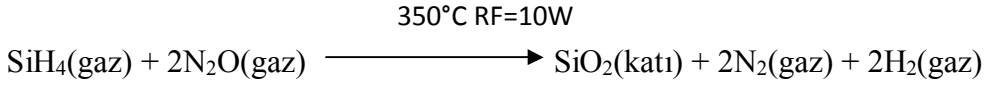
Gaz Kaynakları: SiH₄: N₂ içerisinde %2 SiH₄, GeH₄ : N₂ içerisinde %2 GeH₄, N₂O, NH₃, N₂, He ve NH₃: Saf

Alttaş Sıcaklığı: Si₃N₄ için 200 °C, SiO₂ için 350 °C

Tavlama Şartları: Örnekler farklı GeH₄ oranları için 900 °C, 15, 30 ve 60 dakika olmak üzere hazırlanmıştır.

PECVD tekniğinde SiO_x tabakası, ortamda bulunan SiH₄ ve N₂O gazlarının sıcaklık, plazma ve radyo frekanslarının etkisiyle etkileşime girmeleri sonucu oluşmaktadır [66].

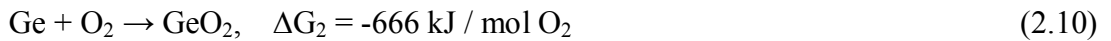
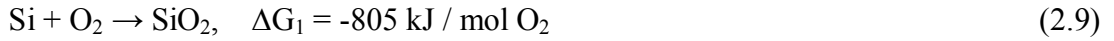
Çizelge 2.3. SiO_x film büyütme sırasında ortamdaki gazların etkileşme diyagramı



Ön görülen filmler PECVD ile Silisyum alttaş üzerine 180 sccm SiH₄, 180 sccm N₂O ve GeH₄ gazlarının değişik oranları kullanılarak, 1000 mTorr basınç altında 350 °C alttaş sıcaklığı ve RF gücü 10 W seçilerek sabit koşullar altında büyütülmüşlerdir. Büyütüldükten sonra kalınlığı 0,5 µm civarında örnekler azot ve vakum ortamında 900 °C sıcaklıkta 15, 30 ve 60 dk sürelerde fırınlanmıştır.

Aygıt üretimi için dielektrik bir ortamda yüksek yoğunlukta 10 nm den daha küçük aynı büyüklükteki kuantum nokta yapıların oluşturulabilmesi önemli bir işlemdir [67]. Bugüne kadar birçok bilim adamı oksit matris içersine kuantum noktaların gömülmesini amaçlamıştır. Bununla ilgili farklı yöntemler geliştirilmiştir.

SiO₂ ve GeO₂ oluşum sıcaklıkları arasındaki büyük farktan dolayı, Silisyum Germanyuma oranla daha aktiftir.



Bir SiGe filmi oksitlenebileceği atmosfere maruz kalacak olursa, Si ve Ge aynı anda SiO₂ ve GeO₂ oluşturacak şekilde oksitlenmeye başlarlar. Oluşum ısılarının farkından dolayı GeO₂, serbest Si'ların olduğu 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.



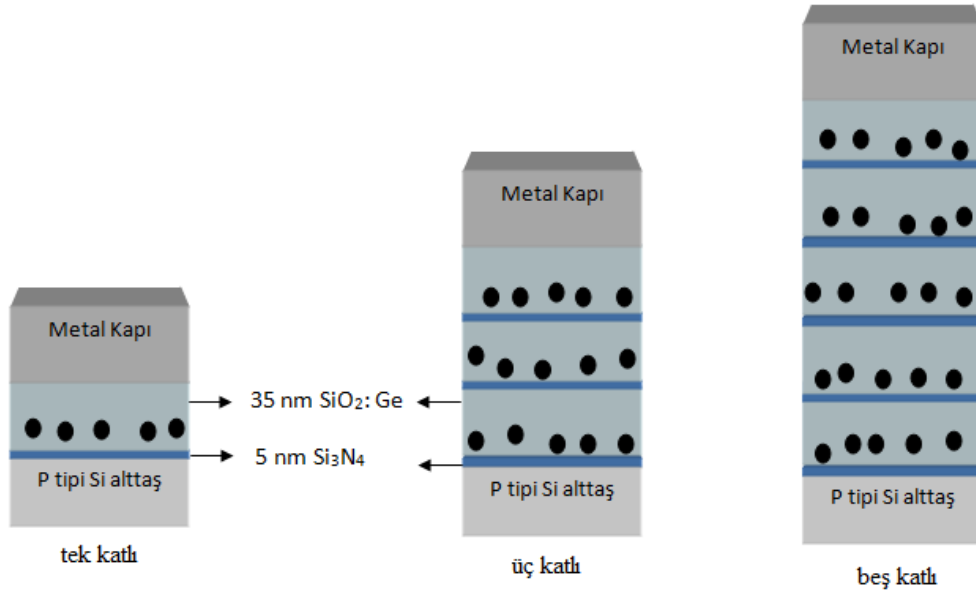
Bu şekilde artakalan SiGe ile büyüyen SiO₂ arasındaki ara yüzeyde ayrılmış Ge atomları birikir. SiO₂ büyürken özellikle SiO₂ çevresinde artakalan SiGe alaşımı içerisindeki Germanyumun kademeli bir artışı söz konusudur. Sonuç olarak Si, SiO₂ oluşturacak şekilde tamamen oksitlenir. Alttaş ile oluşan SiO₂ arasındaki ara yüzeyde Ge atomları toplanır.

Bu şekilde SiO_x matrisi içerisinde elde edilen kuantum nokta yapılar için kuantum hapsinden söz etmek mümkün olacaktır [68]. Kuantum noktaların büyüklükleri nano ölçekte küçüldükçe kuantum hapis enerjisi de daha önemli bir hal alır. Farklı guruplar kuantum noktaların boyut ve geometrisine bağlı olarak şarj sürelerini incelemiştir [69, 70].

2.6. Tavlama Fırını

PECVD tekniği ile Si alttaş üzerine büyütülen Si₃N₄ ya da SiO₂ filmler içerisinde GeH₄, SiH₄ gibi gazların akış oranları değiştirilerek oluşturulmaya çalışılan Ge nanokristaller büyütme işleminin sona ermesi ile birlikte oluşması beklenemez, bu aşamada oluşan yapılar kristal değil amorf yapılardır. Ostwald filizlenme teorisine göre malzeme içerisinde bulunan farklı türdeki yapılar (SiO₂ ve Si₃N₄ içerisindeki Ge gibi) ancak dışarıdan bir etkileşme yardımı ile bir araya gelerek bir düzen oluşturabilirler. Bugüne kadar kristal yapılar elde etmek için başvurulan yöntemlerin başında ısıl tavlama öne çıkmaktadır. Fırınlama aşamasında örnekler N₂, O₂, Ar, H₂ gibi soy gazlar ya da vakum ortamında tutulabilirler. Bununla birlikte yarıiletken nanokristallerin oluşumunun değişik fırınlama ortamları ile bağlantılı olduğu bilinen bir gerçektir. Örneğin, SiO₂ matris içerisindeki kırılmış, kopuk bağ yapılarının H₂ ortamında fırınlanmış örneklerde SiO₂ içerisindeki nanokristaller ve matris arasındaki yüzeyde mevcut olan bağları onarıcı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [71]. Bunun yanı sıra fırın ortamındaki su buharı ya da oksijenin varlığı, Ge atomlarının oksitlenmesi ile sonuçlanabilmektedir ve uzun süreli tavlamalarda Ge nanokristallerin oluşumunu engelleyebilir. Bu yüzden, fırınlama aşamasında Ge atomlarının oksitlenmesini engellemek için vakum altında ya da N₂ atmosferi altında fırınlama iyi bir yoldur. Ancak bazı durumlarda N₂ ortamında fırınlama, Si₃N₄ gibi farklı matrisler

içerisindeki 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. Yine de yapı içerisindeki farklı GeH_4 gaz oranları için değişken sıcaklıklarda Ge nanokristali oluşumuna rastlanmış, ancak Germanyum kristalinin erime sıcaklığının üstü ve bu bölgeye yakın sıcaklıklarda oluşan etkiler sebebiyle Si_3N_4 içerisinde, Ge nanoyapıları elde etmek için tavlama vakum ortamında yapmak etkili bir yol olarak görülmektedir. Fırınlama ortamına ek olarak, fırınlama 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 gözlemlenmektedir. Bu durum, fırınlama süresini de etkilemektedir. Örneğin, hacimli Ge ve Si sırasıyla, 938°C ve 1414°C erime sıcaklığına sahiptir. Ge için bu değerlerin üstünde olan fırınlama sıcaklıkları matris içerisindeki Ge ve Si atomlarının hareket yeteneklerini artırmaktadır. Hacimli Germanyuma göre nispeten yüksek olan erime sıcaklığıyla Silisyum yüksek sıcaklıklarda fırımlandığında 900°C üstü sıcaklıklarda SiGe alaşımının oluşmaya başlaması gözlemlenmektedir.



Şekil 2.12. Alttaş üzerine büyültülen sistemlerin yapıları

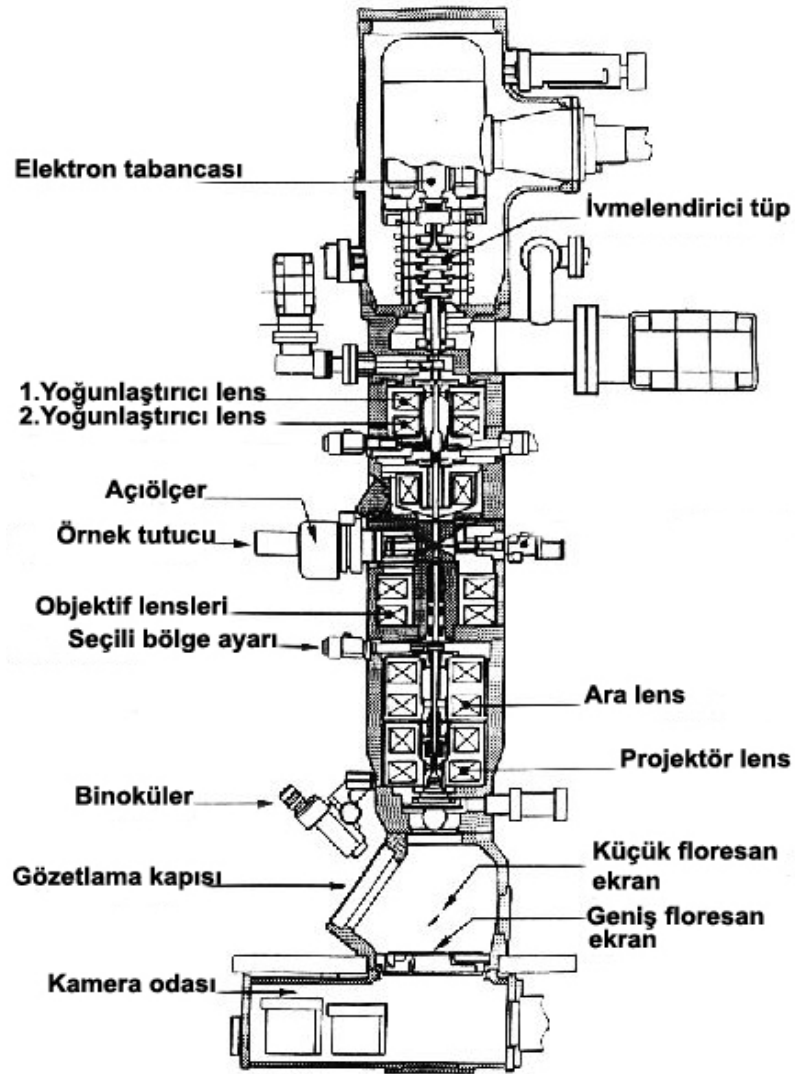
2.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

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 geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) Max Knoll ve Ernst Ruska tarafından 1930'larda yapılan çalışmaların sonucu geliştirilmiştir [72].

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 içyapısının incelenmesi geçirimli elektron mikroskobunda (TEM) yapılır.

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 yapısal karakterlerinin belirlenmesinde önemli bir araç olmuştur [73].



Şekil 2.13. Geçirimli elektron mikroskobunun içyapısı

Araştırılacak olan yüzey anot olarak seçilir ve bu yüzeye pozitif elektrik potansiyeli uygulanır. Katot olarak seçilen tabancadaki flaman elektron bulutu oluşuncaya kadar ısıtılır. Elektronların kolon üzerine düşmesini sağlamak için elektronlar pozitif potansiyelle ivmelendirilir. Geçirmeli elektron mikroskobu “TEM” kolon şeklinde üst üste dizilmiş manyetik merceklerden oluşur.

2.7.1. Elektronun Doğası

Uygulamada X ışınları metoduyla numuneler elektron kırınımı ile numune ölçümünden daha niceliklidir. Fakat elektronların X ışınları üzerindeki avantajı elektronların kolayca odaklanabilmeleridir. TEM de örneğin görüntüsü iletilen elektronlar ile oluşturulur.

TEM içinde tipik bir elektron demeti akımı yaklaşık 0,1 – 1 μA dir. Bu numune düzleminden geçen 10^{12} elektrona tekabül eder. Genellikle ısıtılmış tungsten flamandan yayılan elektronlar yüzlerce keV enerjiler altında ivmelendirilirler. Yüksek hızlı elektronlar numune ile etkileşince hem kırınım hem de girişim yaparlar. Yüksek hızlarda elektrona eşlik eden de Broglie dalga boyu

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.12)$$

TEM içinde V potansiyeli altında hızlandırılan elektron eV kinetik enerjisi kazanır

$$eV = \frac{m_0 v^2}{2} \quad (2.13)$$

Elektron momentumu P

$$P = m_0 v = (2m_0 eV)^{1/2} \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan dalga boyunu uygulanan potansiyel farka bağlayan denklemi elde edilir.

$$\lambda = \frac{h}{(2m_0 eV)^{1/2}} \quad (2.15)$$

Hızlandırıcı gerilim artıkça elektronların dalga boyu azalır. Denklem ile relativistik olmayan dalga boylarını hesaplayabiliriz. Fakat 100 keV ve üzeri enerjilerde elektronun hızı ışık hızının yarısından daha fazla olduğundan rölativistik etki göz ardı edilemez. Dalga boyu için denklem

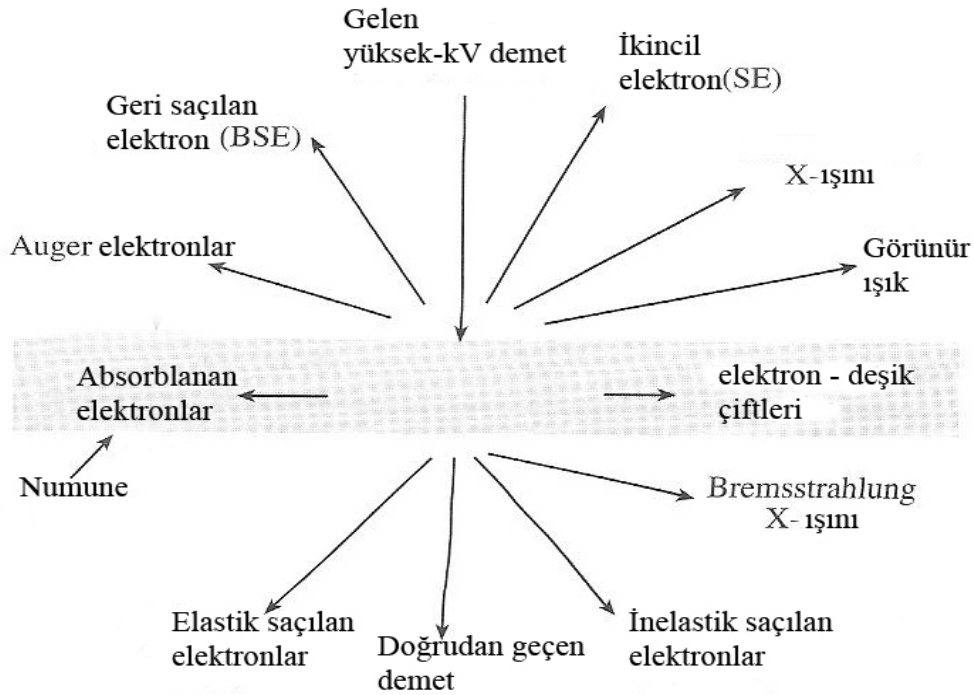
$$\lambda = \frac{h}{[2m_0 eV(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2})]^{1/2}} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır.

2.7.2. Elektronun Madde İle Etkileşimi

Elektron iyonize olmuş radyasyonun bir şeklidir. İyonize radyasyon kullanmanın avantajlarından birisi de numuneden çok çeşitli ikincil sinyallerin üretilmesidir. Yüzeyin üzerine yüksek enerjili elektron demeti gönderildiğinde; elektron enerjisinin bir kısmı geri yansır (x- ışını),enerjinin bir kısmı saçılır. Saçılma elektron demetinin madde ile etkileşmesi ile meydana gelir. Saçılma elastik (enerji değişimi olmayan) ya da inelastik (enerji değişimi olan) iki farklı yolla olur.

Saçılan elektronlar dalga yapılarına göre koherent ve koherent olmayan şekilde ayrılabiliriz [74]. Elastik saçılan elektronlar genellikle koherentken, inelastik saçılanlar koherent değildir. Numune ince ve kristal ise saçılma koherenttir. Genelde elastik saçılma görece küçük açılarda ($1-10^\circ$) meydana gelir. Büyük açılarda ($>10^\circ$) elastik saçılma daha fazla koherentlikten uzaklaşır. Numune kalınlığı arttıkça daha az elektron numuneyi geçip öne doğru saçılırken büyük bir kısmı geriye doğru saçılır. Yüzeyin diğer kısmına geçen elektronlar geçerken yüzeyin küçük bir kısmı veya o kısımdaki taneciklerle etkileşir. Yüzeyin diğer kısmına geçen elektronun enerji olarak incelenmesi Geçirmeli Elektron Mikroskopisini oluşturur.



Şekil 2.14. Numune ile etkileşip saçılan elektronlar

Numune ile etkileşen elektronlar ekranda görüntüyü oluştururlar. Bu görüntü objektif lenslerin vasıflarından fazlasıyla etkilenir. Kontras transfer fonksiyonu yardımıyla

aktarım özellikleri araştırılabilir. Bu fonksiyon objektif lenslerin arka düzleminde biçimlenen elektronların kırınım deseni genliğini ve fazını düzenler. Bu fonksiyon şu şekilde verilebilir

$$T(k) = -\text{Sin} \left[\frac{\pi}{2} C_s \lambda^3 k^4 + \pi \Delta f \lambda k^2 \right] \quad (2.17)$$

λ = dalga boyu, Δf = odakta sapma değeri, k = uzaysal frekans ve C_s küresel sapma katsayısıdır. Kontrast transfer fonksiyonunun birimi angströmdür. Elektron optiği kuralları içinde odak üzerinde terimi negatif odak sapmasını, odak altında terimi pozitif odak sapmasını ifade eder.

2.7.3. Geçirim Elektron Mikroskopunda Temel Görüntüler

Kristal yapıdaki maddelerin TEM incelemelerinde en çok dört çeşit temel görüntü kullanılır. Bunlar, elektron kırınım görüntüsü, aydınlık alan, karanlık alan ve yüksek çözünürlüğe sahip karanlık alan görüntüleridir.

2.7.3.1. Kırınım Görüntüsü

Yüksek voltaj altında ivmelendirilen elektronlar belli bir dalga boyuna sahip parçacıklar olarak düşünülebilir. Hızlandırılmış elektron dalga boyu, de Broglie bağıntısı ile tanımlanır.

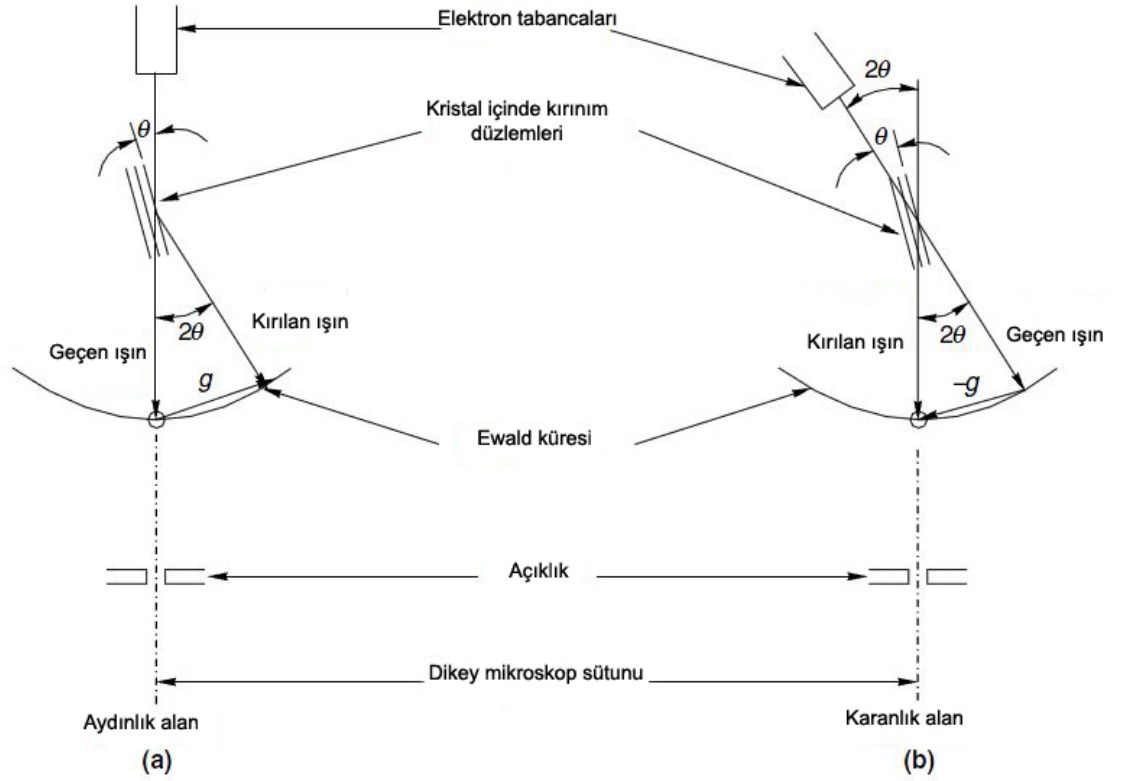
TEM'de elektron demetinin çok küçük dalga boyuna sahip olması nedeniyle Bragg şartı küçük açılarda sağlanır. Bu nedenle TEM'de ince bir numune içinden geçen elektron demeti, doğrudan geçen elektronlar ve kırınıma uğramış elektronlar olarak iki gruba ayrılır.

2.7.3.2. Aydınlık Alan Görüntüsü

Geçirim elektron mikroskobunda en önemli görevi objektif mercekle yapar. Mikroskop ekranında izlenen görüntü, bu merceğin arka odak düzlemi ile ilk görüntü düzleminde olan olayların büyütülmüş şeklidir. Numunenin atom düzlemleri gelen elektron demetine paralel ise, elektronlar numune içinden etkileşmeden geçer. Numunenin bazı yerinde atom düzlemleri Bragg şartını sağlarsa elektron demeti kırınımına uğrar ve bu bölgelerden direkt geçen elektron şiddeti azalır. Eğer objektif merceğin görüntü düzlemi doğrudan ekrana aktarılırsa, görüntüde yoğunluk bulunmaz. Fakat objektif cihaz açıklığı yansıma düzlemine yerleştirilir ve merkez (000) noktasından geçen elektron demeti seçilirse, görüntüde yoğunluk sağlanmış olur. Bu tür görüntü “aydınlık alan” görüntüsü olarak isimlendirilir.

2.7.3.3. Karanlık Alan Görüntüsü

Görüntüde elektronların numunenin etkileşmeden geçtiği bölgeler aydınlık ve kırınımın olduğu bölgeler karanlık olarak izlenir. Buna karşılık objektif cihaz, merkez noktaya yakın herhangi bir (hkl) noktasını oluşturan elektron demetini alacak şekilde yerleştirilirse, oluşan görüntü “karanlık alan” görüntüsü olarak adlandırılır. Bu görüntüde, seçilen (hkl) kırınım noktasının oluşumuna neden olan bölgeler parlak ve diğer kesimler de karanlık olarak izlenir.



Şekil 2.15. İki şekilde görüntü oluşturma; (a) aydınlık alan ve (b) karanlık alan [75]

2.7.4. TEM'e Sınırlandırmalar

TEM için numuneler çok ince olmalıdır (100 nm civarında) [76]. Birçok materyal elektronların geçebileceği kadar incelikte işlenip hazırlanmaya uygun değildir. Bazı materyaller inceltirilip hazırlanmaya uygundur ancak sertliklerinden dolayı hazırlanmaları oldukça uzun zaman alır. Bazı yüzeyler hazırlama aşamasında değişikliğe uğrarlar. Bundan dolayı incelenen gerçek yüzey değil değişen yüzeydir. İncelenen alan oldukça küçük olduğundan materyalin tamamının karakteristik özelliğini göstermeyebilir. Uygulanan elektriksel potansiyelden dolayı özellikle biyolojik materyaller başta olmak üzere değişikliğe uğrayabilirler.

2.8. Numune İnceltme Ve Delme İşlemi

Numuneler iyon değirmeni cihazına konulmadan önce inceltme işleminden geçmiştir. İnceltme işlemi ALLIED Multiprep 15-2000 cihazıyla yapılmıştır. Öncelikle örnekler 1000 µm X 500 µm boyutlarında kesilmiştir. Bu parçalardan iki tanesi film olan yüzeyleri birbirlerine bakacak şekilde kuvvetli yapıştırıcı ile film kaplanan yüzeyleri birbirine yapıştırılmıştır. Daha sonra yüzeyleri birbirine yapıştırılmış filmler bakır gride tam ortalananak şekilde dikkatlice yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi kuvvetli yapıştırıcının özelliğinden dolayı ısıtıcı üzerinde 90 °C sıcaklıkta yapılmış ve soğuması beklenmiştir. Soğuyan filmler inceltme cihazıyla yan yüzeylerinden örneklerin kalınlığı 50 µm olana kadar değişik kalınlıklardaki zımparalar kullanılarak hassas bir şekilde inceltmiştir ve iyon değirmeninde delinmeye hazır hale getirilmiştir.

İyon değirmeni cihazında iki iyonizasyon bölümü vardır. Bu bölümlerde maksimum 10 Kilovoltluk bir potansiyel altında meydana getirilen iyonlar deliklerden geçerek numune üzerine çarparlar, iyonların bu hareketi katotlar vasıtasıyla sağlanır [77]. 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. En çok kullanılan gaz ağırlık fiyat bakımından en uygun olan Argon gazıdır.



Şekil 2.16. Kırıkkale Üniversitesi bünyesine “109T129” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında alınan ALLIED MultiPrep inceltme ve parlatma cihazı



Şekil 2.17. Kırıkkale Üniversitesi bünyesine “106T043” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında alınan FISCHIONE Model 1010 iyon değirmeni

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 örneklerin iyice inceltilmesi önemlidir. Örneklerin kalınlıkları delme işlemi süresini oldukça etkilemektedir.

Hazırlanan numuneler iyon değirmeninde küçük açılarda (12°-17°) ve 360° rotasyonda delinmiştir. Rotasyonun 360° olarak seçilmesiyle delme işleminin homojen olması amaçlanmıştır. Delme işlemi Ar⁺ iyon değirmeniyle her numune için ortalama 4-6 saat süre içerisinde gerçekleşmiştir. İşlem esnasında enerji ve akım miktarı 5 kV ve 5 mA değerleri kullanılmıştır. Örnekler ortalarında oval delikler açılarak TEM'de incelemeye hazır hale getirilmişlerdir. TEM numune hazırlama işlemleri Şekil 2.17'de görsel olarak anlatılmaya çalışılmıştır.



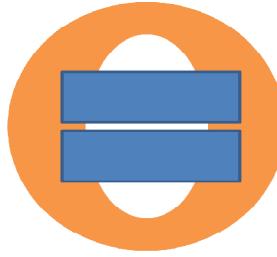
Flimler yüzleri birbirine gelecek şekilde kalıcı yapıştırıcı ile yapıştırılır.



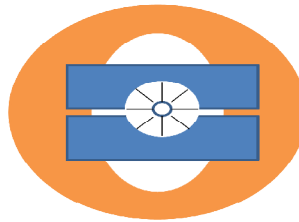
Geçici yapıştırıcı ile tutacak olarak kullanılacak metala yapıştırılır.



100 µm kalınlığa kadar zımpara ile inceltir.



Bakır pula yapıştırılır.



İyon değirmeninde delinir.

Şekil 2.18. TEM numune hazırlama aşamaları

2.9. Yüzey Temizleme İşlemi

İdeale yakın bir MOS yapabilmek için kullanılacak yarıiletken kristalinin yüzeyinin çok temiz olması gerekmektedir. İyi temizlenmemiş bir yarıiletken, yüzeyinde birçok

sayıda kusur bulundurabilir. Hassas ve dikkatlice yapılan bir yüzey temizleme işleminden sonra olabilecek yüzey kusurlarını en aza indirmiş oluruz. Bu çalışmada kullanılan kristal fabrikasyon olarak tek tarafı parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Ancak kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için çeşitli kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. MOS-C üretilirken büyütülen yalıtkan tabaka, MOS yapının hem elektriksel hem de dielektrik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu nedenle Silisyum yaprakların üzerine homojen bir oksit tabakanın büyütülmesi en önemli fabrikasyon adımlarından biridir. Bundan dolayı üzerine oksit büyütülecek yüzey ve onun üzerine oluşturulacak yalıtkan tabaka son derece temiz ve homojen olmalıdır. Homojen yapıyı elde etmek için yapılan kimyasal temizleme basamakları aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

1. Yarıiletken kristaller önce aseton su içerisinde ultrasonik banyoda yaklaşık 5 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulandı.
2. 20 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ve 20 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Yapılan bu işlemde yüzeyin önce tamamen oksitlenip daha sonra oksit tabakalarının tümü kaldırılarak temiz yüzey elde edildi.
3. Deiyonize suda 3 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
4. 20 ml %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve 100 ml deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. .
5. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 5 dakika durulandı.
6. Yapılan temizleme işlemleri esnasında alttaşın temizliğini koruması ve oksitlenmesini önlemek için kurulama işlemlerinin tamamı azot (N_2) ile yapılmıştır.

2.10. Omik Kontağın Oluşturulması

MOS-C yapı hazırlanırken omik ve doğrultucu kontağın oluşturulması Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarında hazırlandı. Yapıların hazırlanması için kullanılan düzeneğe flaman (tungsten) ve ince bir bakır levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda iyice temizlendi. Temizleme

işlemi, karbon-tetraklorür, trikloretilen ve aseton içerisinde 7 dakikalık süreler ile yapıldı ve daha sonra de-iyonize su ile iyice durulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi ve hemen vakumlama işlemine geçildi (10^{-6} Torr). Vakum 10^{-6} Torr'a ulaştığında, Flamanların biri üzerinden akım geçirilerek (35 Å) %99,9999'lük saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş Altın metal parçacıkları buharlaştırıldı. Yarıiletkenin mat olan yüzeyine 2000 Å Altın kaplama işleminden sonra numune ters çevrilerek yine 10^{-6} Torr basınç altında 3 dakika 300 °C'de tutularak Altın SiGe içerisine çöktürüldü ve omik kontak oluşması sağlandı. Daha sonra yine aynı yüzeye 1000 Å Au buharlaştırılarak kontak yapıldı (10^{-6} Torr basınçta). Üzerine çok sayıda 1 mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske metal buharlaştırma sistemine yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen Altın (Au) metal parçası, yaklaşık 10^{-6} Torr vakumda buharlaştırılarak kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1,5 mm çaplı) şeklinde ve 2500 Å kalınlığında Altın kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontakta oluşturulmuş oldu.

Numelerin omik kontak direçleri Agilent 4200 TLM ölçümleri alınarak kısa devre olup olmadığı kontrol edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri

C-V ölçümleri Hp 4284A LCR metre ile oda sıcaklığında alınmıştır. Genel olarak [-9 V, 0 V] arasında, 0.01 V/s hızda taranmışlardır. Bahsi geçen voltaj değerleri farklı denemeler sonucunda bulunmuştur. Cihazlar -10 V'a kadar dayanmaktadır. -10 V geçildiği zaman yalıtkan tabakalar (Si_3N_4 ve SiO_2) iletken hale geçmektedir ki bu hiç istenilmeyen bir durumdur.

Ölçülen kapasitans-voltaj eğrilerinde gözlenen histerisislerden, şarj tutma kapasitesi yüksek olan tek katlı MOS-C'nin büyütme parametreleri referans alınarak, üç katlı ve beş katlı MOS-C yapıları elde edilmiştir. Yapıların histerisisleri dikkatlice incelenmiştir.

Teorik olarak histerisis hesaplama

$$\Delta V_{FB} = \frac{q_{nc}}{\epsilon_{ox}} \left(t_{cox} + \frac{\epsilon_{ox} t_{nc}}{2\epsilon_{Ge}} \right)$$

ΔV_{FB} : Histerisis farkı

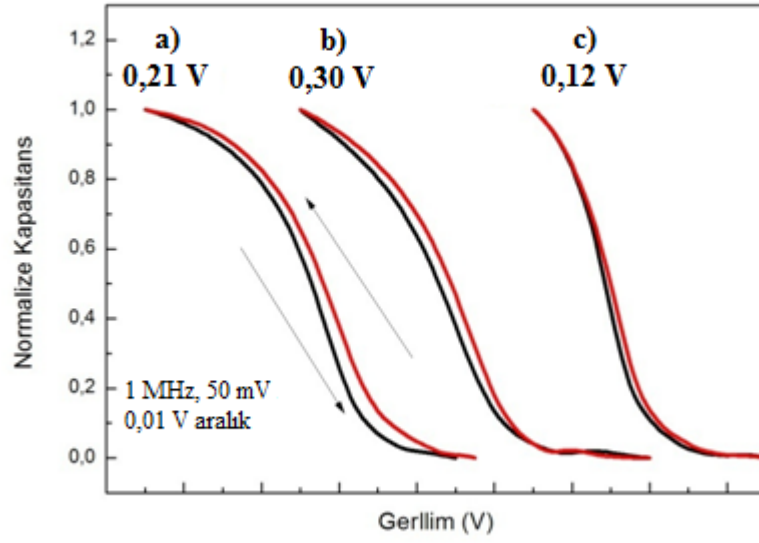
q_{nc} : Nanokristal yükü

ϵ_{ox} : Oksit tabakasının dielektriksel geçirgenlik katsayısı

t_{cox} : Kontrol oksidin kalınlığı

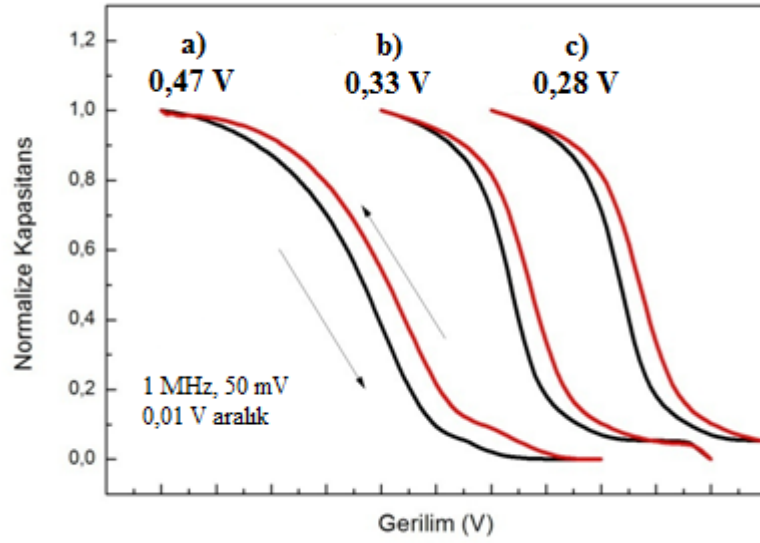
t_{nc} : Nanokristalli tabakanın kalınlığı

ϵ_{Ge} : Nanokristalli tabakanın dielektriksel geçirgenlik katsayısı



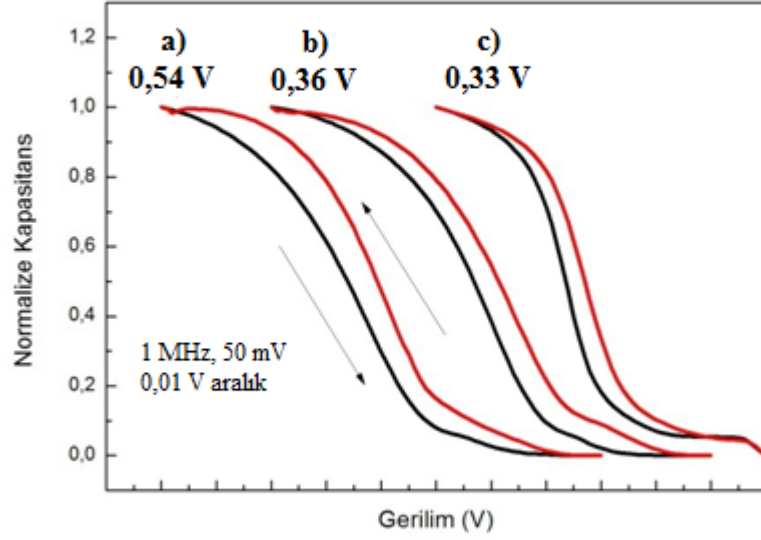
Şekil 3.1. 900 °C 90 sccm GeH₄ oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri

a) 15 dk tavllanmış b) 30 dk tavllanmış c) 60 dk tavllanmış



Şekil 3.2. 900 °C 120 sccm GeH₄ oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri.

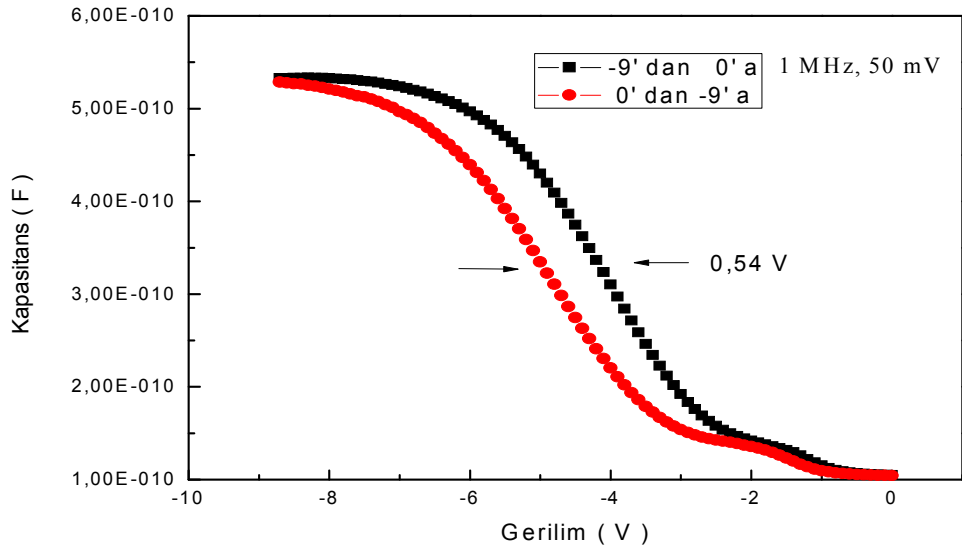
a) 15 dk tavllanmış b) 30 dk tavllanmış c) 60 dk tavllanmış



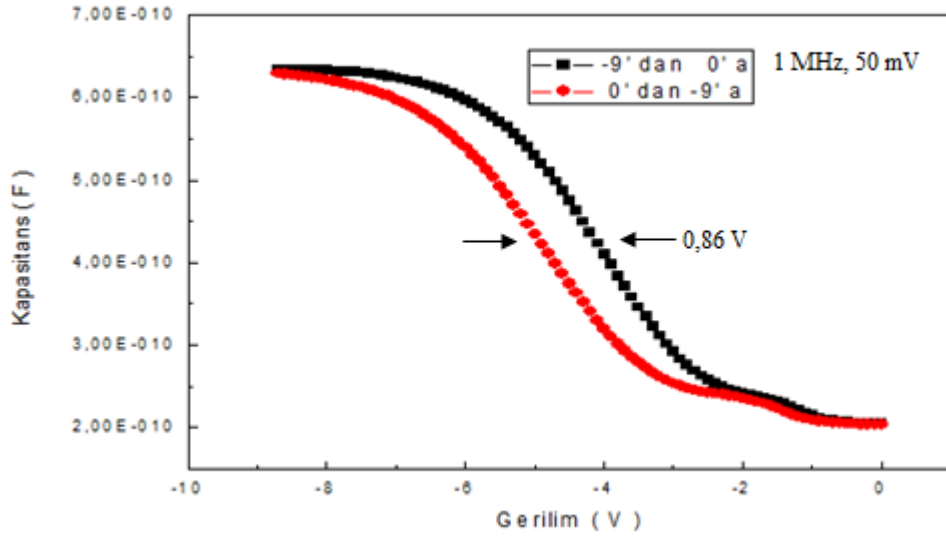
Şekil 3.3. 900 °C 150 sccm GeH₄ oranlı tek katlı numunelerin C-V eğrileri.

a) 15 dk tavllanmış b) 30 dk tavllanmış c) 60 dk tavllanmış

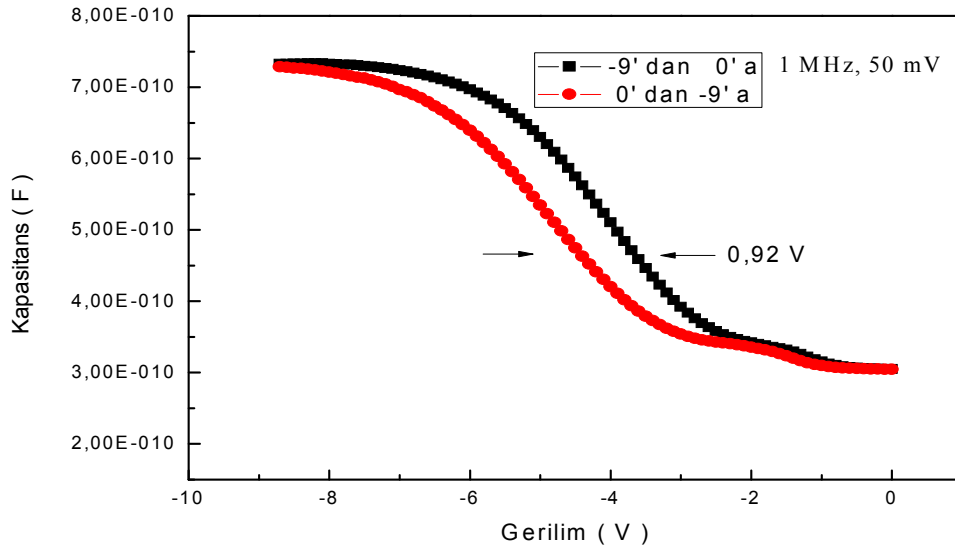
Tek katlı örneklerden alınan Kapasitans-Voltaj eğrilerinde en fazla kayma 150 sccm gaz akış miktarı ve 900 °C de 15 dakika tavlanan örnekten elde edilmiştir ve bu değer 0.54 V olarak ölçülmüştür. Bu örneği referans olarak alıp aynı değerlerde işlemler uygulanılarak bu örneğin üç katlı ve beş katlı türleri üretilmiştir. Referans alınan tek katlı numuneden üretilen üç ve beş katlı örneklerden elde edilen Kapasitans-Voltaj eğrileri Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.4. 900 °C 150 scm 15 dk. tavllanmış tek katlı örneğin C-V eğrisi



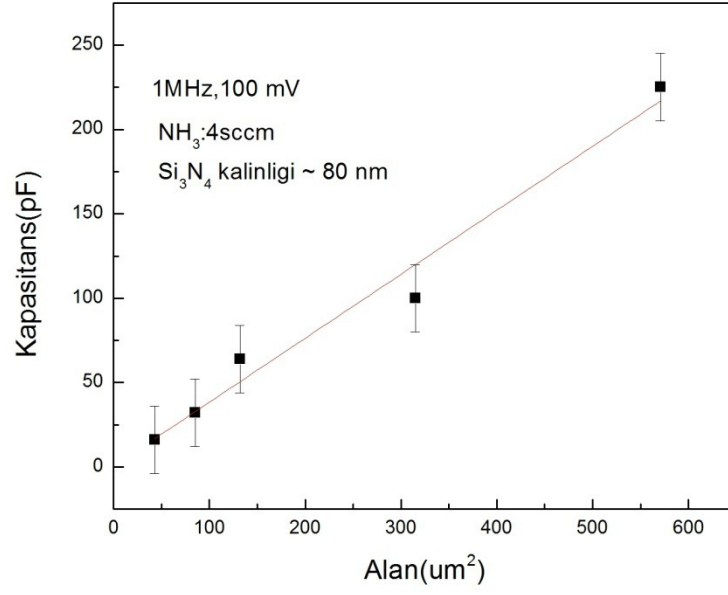
Şekil 3.5. 900 °C 150 scm 15 dk. tavllanmış üç katlı örneğin C-V eğrisi



Şekil 3.6. 900 °C 150 scem 15 dk. tavllanmış beş katlı örneğin C-V eğrisi

Üç yapının histerisislerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar bize MOS-C'lerde katman sayısı arttıkça şarj tutma özelliklerinin değiştiğini göstermektedir. Katman sayısı arttıkça histerisis aralığının açıldığını buda bize şarj tutma miktarlarının arttığını göstermektedir.

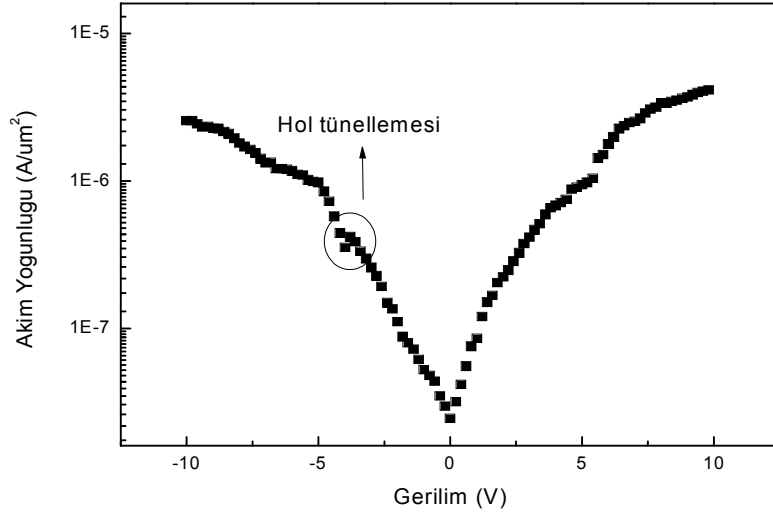
Çalışmalarımızda, Germanyum nanokristaller yüksek sıcak fırınlarında, 900 °C tavlama sıcaklığı ve farklı sürelerde ısıtılmıştır. Üretim aşamasında seçilen üç farklı gaz akış miktarıyla da sistematik yakalanmış ve bu etkenlerin nanokristal oluşumuna etkileri farklı ölçüm teknikleriyle incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre değiştirilen her bir parametrenin nanokristal boyutuna ve oluşumuna etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Nanokristaller oluşturulduktan sonra, MOS-C (metal oksit yarıiletken kapasitör) sistemine entegre edilerek bir dizi elektriksel ölçüm alınmış ve nanokristallerin şarj kapasiteleri incelenmiştir. C-V eğrilerindeki histerislere bakıldığında en iyi kristallenen örneklerin en iyi şarj tutma özelliği göstermediği görülmüştür. Fakat nanokristal boyutu ve kristal oluşum şartları da şarj tutma kapasitesine etki etmektedir.



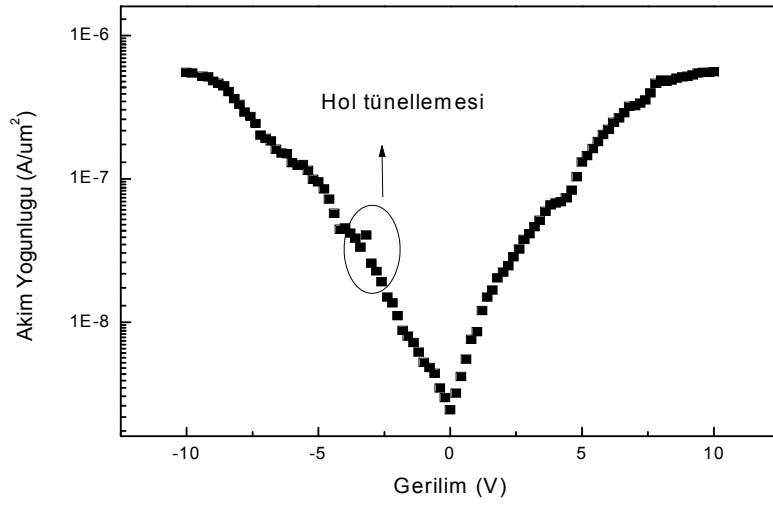
Şekil 3.7. Üretilen MOS yapıların alanlarına bağlı kapasitans değeri

3.2. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

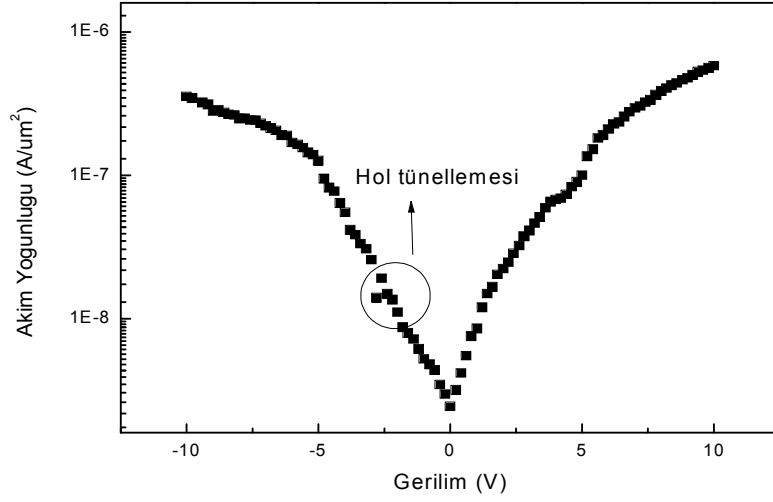
Örnekler [-10V, 10V] arasında 0.05V/s hızla taramıştır ve ölçümler tek katlı, üç katlı ve beş katlı 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış MOS-C örneklerinden alınmıştır. Katman sayılarına göre tek katlı, üç katlı ve beş katlı MOS-C'lere ait I-V grafikleri Şekil 3.8., Şekil 3.9. ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Grafiklerde hol tünellemesi olayı görülmektedir. I-V grafiklerinde ani düşüşler tünelleme olduğunun göstergesidir. Katman sayısı arttıkça kaçak akım miktarının düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. $900\text{ }^{\circ}C$ 150 sccm 15 dk. tavllanmış tek katlı örneğin I-V grafiği



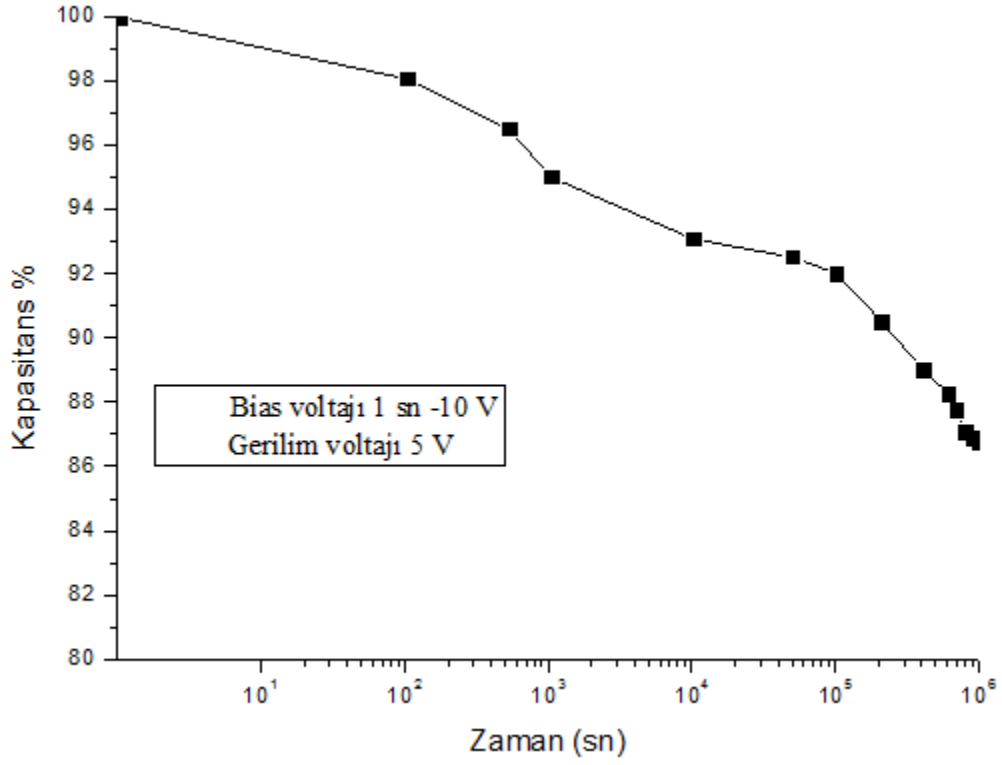
Şekil 3.9. $900\text{ }^{\circ}C$ 150 sccm 15 dk. tavllanmış üç katlı örneğin I-V grafiği



Şekil 3.10. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış beş katlı örneğin I-V grafiği

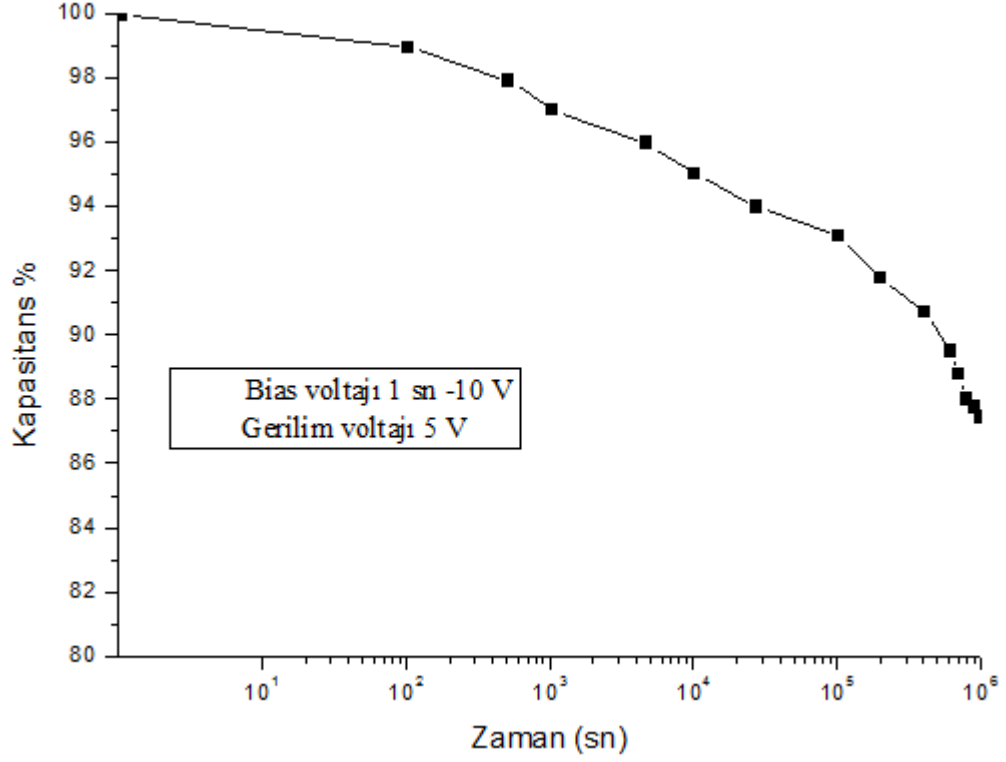
3.3. Kapasitans-Zaman (C-t) Ölçümleri

Ölçümler 900 °C 150 sccm 15 dk. tavllanmış tek katlı, üç katlı ve beş katlı MOS-C'ler için oda sıcaklığında alınmıştır. Örnekler 1 saniye -10 V Bias (öngerilim) voltajı uygulanmış 5 V'luk gerilim verilerek şarj kaybı zamana bağlı olarak incelenmiştir. Alınan ölçümlerden katman sayısının artmasının şarj tutmaya etkisi incelenmiş ve katman sayısının artmasının şarj tutma süresini arttırdığı gözlemlenmiştir.



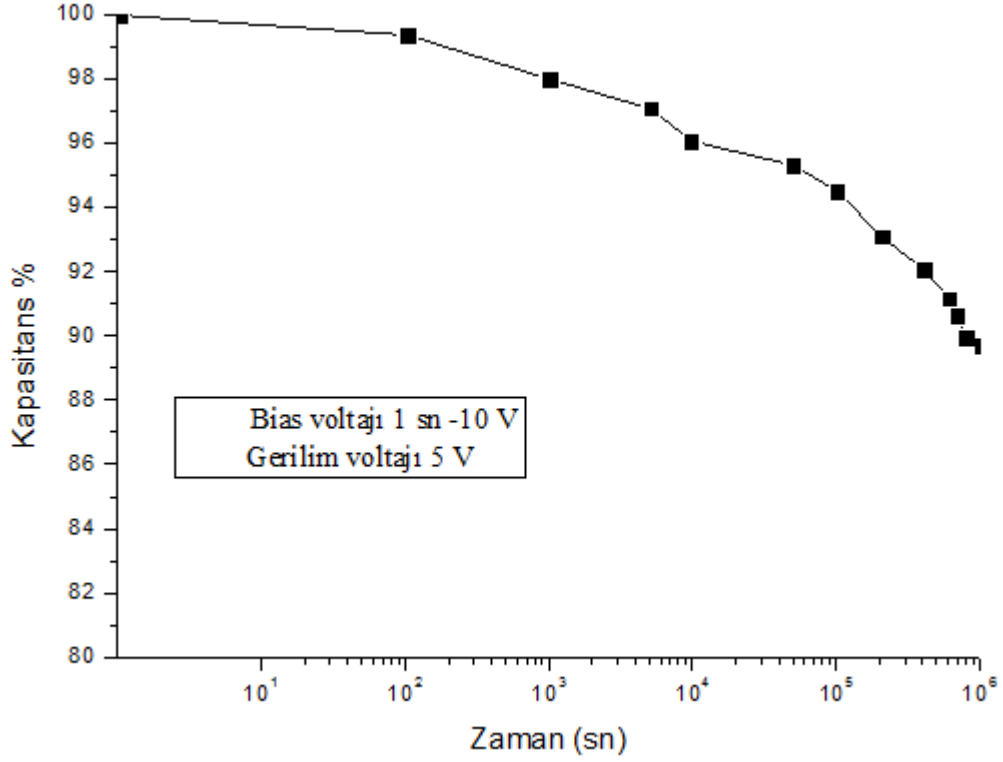
Şekil 3.11. 900 °C 150 scem 15 dk. tavlanmış tek katlı örneğin C-t grafiği

Oluşturulan tek katlı MOS-C için kapasitans değerinin 10³ saniye sonra (16.6 dakika) %95,00281 değerinde 10⁵ saniye sonra (27.7 saat) %92,00449 değerinde 10⁶ saniye sonra (11.5 gün) ise %86,71533 değerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.12. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavlanmış üç katlı örneğin C-t grafiği

Oluşturulan üç katlı MOS-C için kapasitans değerinin 10³ saniye sonra (16.6 dakika) %96,98484 değerinde 10⁵ saniye sonra (27.7 saat) %93,06008 değerinde 10⁶ saniye sonra (11.5 gün) ise %87,45087 değerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.13. 900 °C 150 sccm 15 dk. tavlanmış beş katlı örneğin C-t grafiği

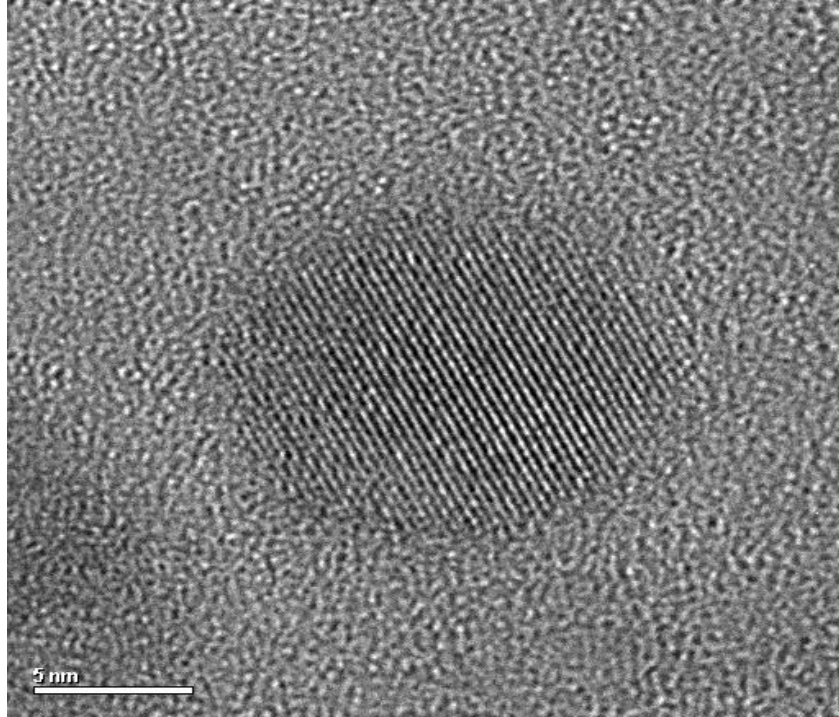
Oluşturulan beş katlı MOS-C için kapasitans değerinin 10³ saniye sonra (16.6 dakika) %97,98989 değerinde 10⁵ saniye sonra (27.7 saat) %94,49747 değerinde 10⁶ saniye sonra (11.5 gün) ise %89,70241 değerinde olduğu gözlenmiştir.

Tek katlı örnek için başlangıçta (10³ saniyede) yaklaşık %5 lik bir şarj kaybı olmuştur. Bu nispeten kısa sayılabilecek süre için %5 lik kayıp yüksektir ancak devam eden süreç içerisinde 10⁵ saniyede %3 lük ve 10⁶ saniyede %5.3 lük kayıp olmuştur bu da şarj tutmanın iyi olduğunu gösterir. Gözlenen azalmayı açıklayabilecek iki olası durum vardır. Birincisi nanokristaller içerisinde sınırlanmış elektronlar arası Coulomb itmesi [78] ve yanıl yük kaybı [79] olabilir. Baştaki hızlı kayıp Ge nanokristaller içerisindeki elektronların birbirini itmesinden kaynaklanmış olduğu düşünülebilir. Sonraki uzun sürede kaybın yavaşlamasının nedeni ise yük taşıyıcıların dağılımı esnasında elektronların hareketinin tünel oksit tabakasına doğru olmasına dayandırılabilir.

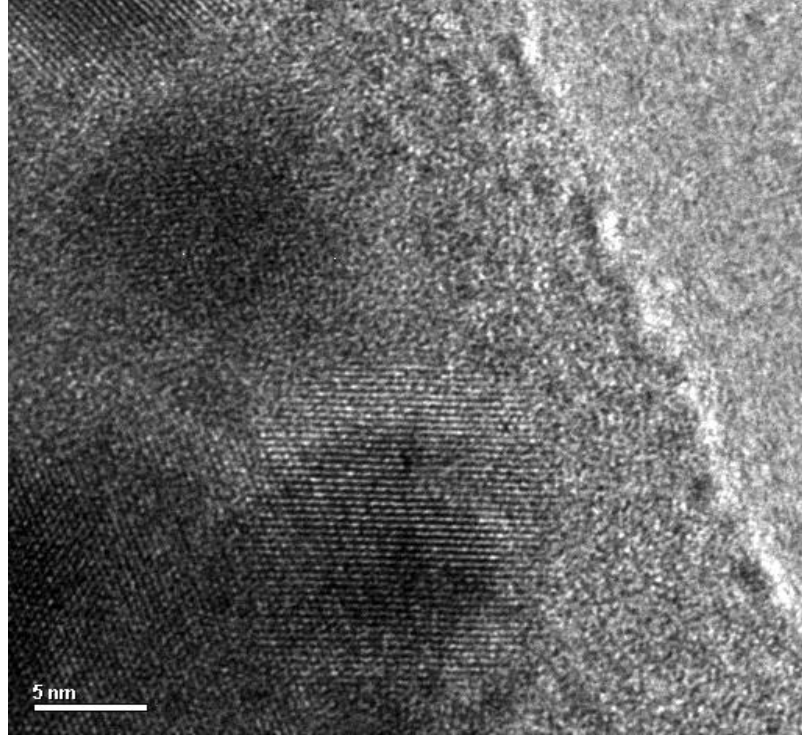
Diğer örnekleri incelediğimizde (üç katlı ve beş katlı) aynı süreler içinde katman sayısının artmasıyla kapasitans değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Tek katlı örnek için 10^6 saniyede kayıp %13.3 iken üç katlı örnekte %12.6 ve beş katlı örnekte %10.3 olarak ölçülmüştür. Katman sayısı arttıkça oksit tabaka sayısı da arttığı için (engel sayısı arttığı için) kaybın azaldığı düşünülebilir.

3.4. TEM görüntüleri

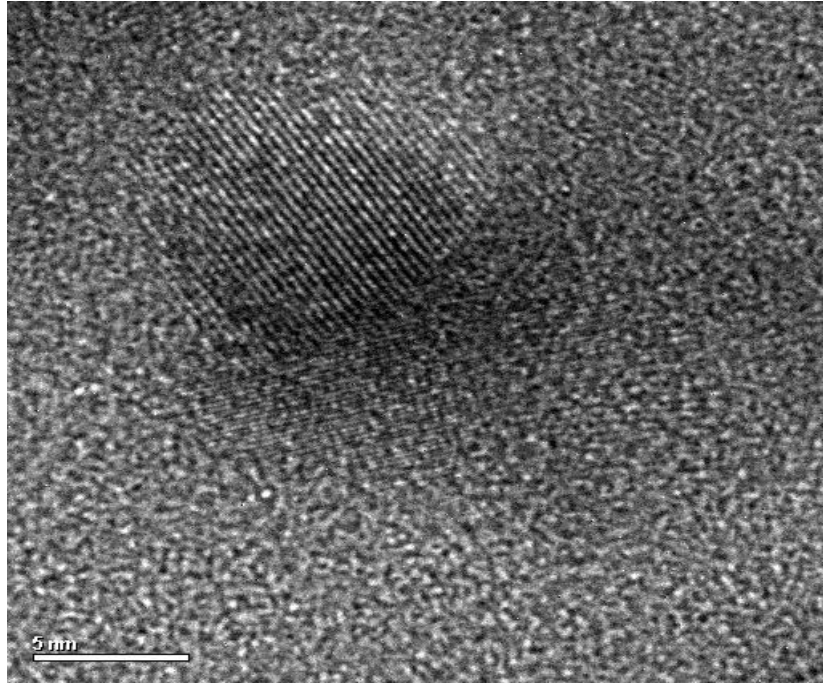
TEM görüntüleri 900 °C de 15 dakika tavllanmış 90, 120 ve 150 sccm gaz akışıyla büyütülen tek katlı örnekler için alınmıştır. Açık renkli kısımlar Silisyum alttaştır. Koyu renkli öbek şeklindeki kısımlar ise bir araya gelmiş Germanyum nanokristalleridir. Kristalleşmelerin oldukça düzgün bir şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir.



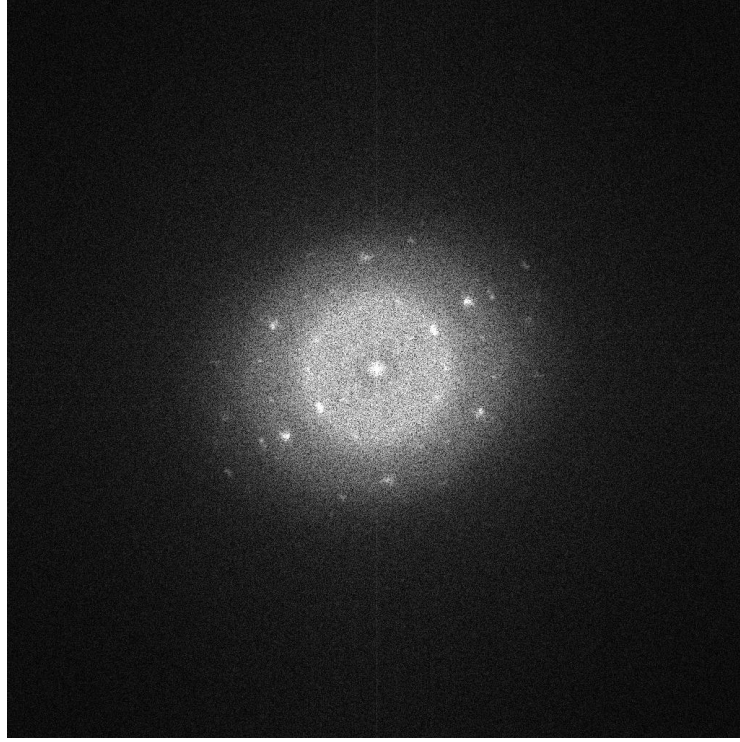
Şekil 3.14. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 90 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü



Şekil 3.15. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 120 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü



Şekil 3.16. 900 °C de 15 dakika tavllanmış 150 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin TEM görüntüsü



Şekil 3.17. 900 °C de 15 dakika tavlanmış 120 sccm Ge akıtılarak büyütülen tek katlı örneğin kırınım deseni görüntüsü

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde Germanyum nanokristal oluşumu ve nanokristallerin MOS-C yapısına uygulanması incelenmiştir. Nanokristaller tavlanaarak oluşturulacağından tavlama şartlarıyla oynanmıştır. Sıcaklık olarak 900 °C seçilmiştir. Tavlama süreleri 15, 30 ve 60 dakika olarak seçilmiştir. Örnekler PECVD'de farklı gaz akış oranlarıyla üretilmiştir. Gaz akış miktarları olarak 90, 120 ve 150 sccm seçilmiştir. PECVD'de oluşturulan örneklere omik kontakları eklenmiş ve Ge nanokristalli MOS yapı hazır hale getirilmiştir. Kontaklarda kaçak olmadığı TLM ölçümleriyle gözlenmiştir.

Hazırlanan örneklerin Kapasitans-Voltaj (C-V), Akım-Gerilim (I-V), Kapasitans-Zaman C-t ve TEM ölçümleri alınmıştır. C-V ölçümleri 900 °C de 150 sccm gaz akıtılarak 15 dakika tavllanmış farklı katman sayılı örnekler için alınmıştır. Üç yapının histerisislerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar bize MOS-C'lerde katman sayısı arttıkça şarj tutma özelliklerinin değiştiğini göstermektedir. Katman sayısı arttıkça histerisis aralığının açıldığını buda bize şarj tutma miktarlarının arttığını göstermektedir. C-t ölçümlerinde de aynı şekilde katman sayısının artması kapasitans özelliğinin de artmasına sebep olmuştur. I-V grafiklerinde ise ani düşüşler gözlenmiştir bu da tünelleme olduğunun göstergesidir. Katman sayısı arttıkça kaçak akım miktarının düştüğü gözlemlenmiştir. Zamana bağlı kapasite ölçümleri de aynı şekilde 900 °C de 150 sccm gaz akıtılarak 15 dakika tavllanmış bir, üç ve beş katlı örnekler için alınmıştır. Ge nanokristalleri tavlama fırınında ısı verilerek Ostwald topaklanması gereğince Küçük kristaller sahip oldukları enerjilerini azaltmak istediklerinden, küçük kristaller büyük kristallere dönüşerek daha düşük bir enerji seviyesine ulaşmışlar ve birer öbek şeklinde toplanmışlardır. Oluşan bu öbek şeklindeki Ge nanokristaller TEM görüntülerinde ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Anonim, [http://metamodern.com/2009/12/29/theres-plenty-of-room-at-the-bottom"-feynman-1959/](http://metamodern.com/2009/12/29/theres-plenty-of-room-at-the-bottom) (Erişim tarihi: 04.05.2013)
- [2] A. P. Alivisatos, J. Phys. Chem. 100, 13226, 1996.
- [3] Oberdörster G, Oberdörster E and Oberdörster J Nanotoxicology: an emerging discipline from studies of ultrafine particles, Environmental Health Perspectives 113, 7:823-839, 2005.
- [4] Roderick, E. H. and Williams, R. H., 1988 MetalSemiconductor Contacts, Claredon Pres, Second Edition, Oxford, 1988.
- [5] Dağdelen, F., Doktora tezi, Metal-Kompleks Yarıiletken Schottky Diyotların Elektronik Özelliklerinin Belirlenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2004.
- [6] Donald A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices ,McGraw-Hill Co. Inc., NewYork, 2003.
- [7] Tokay M.S., Ge Nanokristallerin SiNx ve SiOx matris İçerisindeki Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kırıkkale Üniversitesi, Fen-Edb. Fakültesi, 2006.
- [8] Agan, S., Dana, A. and Aydınli, A., TEM studies of Ge nanocrystal formation in PECVD grown SiO₂:Ge/SiO₂ multilayers, J. Phys., Condens. Matter 18,5037-5045, 2006.
- [9] Agan S., Celik Aktas 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.
- [10] Hu, J. *et al.* Linearly polarized emission from colloidal semiconductor quantum rods. *Science* 292, 2060, 2001.
- [11] Chan, E. M., Mathies, R. A. & Alivisatos, A. P. Size-controlled growth of CdSe nanocrystals in microfluidic reactors. *Nano Lett.* 3, 199, 2003.

- [12] Skorupa, W., Rebohle, L. & Gebel, T. Group-IV nanocluster formation by ionbeam synthesis. *Appl. Phys. A* 76, 1049, 2003.
- [13] Marzen, F., Baron, T., Papon, A. M., Truche, R. & Hartmann, J. M. A two steps CVD process for the growth of silicon nanocrystals. *Appl. Surf. Sci.* 214, 359, 2003.
- [14] A. Dana, S. Ağan, S. Tokay, A. Aydınli, T. G. Finstand *Phys. Stat. Sol.* 4, No.2,288-291, 2007.
- [15] Cullis A.G., Canham L.T., and Calcott P.D.J., *J. Appl. Phys.*, 82, 909, 1997.
- [16] Lehmann V. and Gösele U., *Appl. Phys.* 58, 856, 1991.
- [17] Alivisatos A. P., *J. Phys. Chem.* 100, 13226, 1996.
- [18] Kayanuma Y., *Phys. Rev. B* 38, 9797, 1988.
- [19] Weisbuch, C. and Vinter, B. *Quantum Semiconductor Structures, Fundamentals, and Applications* Academic, San Diego, CA, 1991.
- [20] G. He and H. A. Atwater, *Phys. Rev. Lett.* 79, 1937, 1997.
- [21] L. E. Brus, P. F. Szajowki, W. L. Wilson, T. D. Harris, S. Schuppler, and P. H. Citrin, *J. Am. Chem. Soc.* 117, 2915, 1995.
- [22] N. A. Hill and K. B. Whaley, *Phys. Rev. Lett.* 75, 1130, 1995.
- [23] 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.
- [24] Böer, K. W., *Survey of Semiconductor Physics*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1990.
- [25] Gu, G., Burghard, M., Kim, G.T., Düsberg, G.S., Chiu, P.W., Krstic, W., Roth, S., Growth and electrical transport of germanium nanowires, *J. Appl. Phys.*, 90, 5747, 2001.
- [26] Gu G. et al. *J. Appl. Phys.* 90, 5747, 2001.
- [27] Wang, K.L., Liu J.L. and Jin, G., *J. Cryst Growth* 237-239, 1892, 2002.

- [28] 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.
- [29] Averin D.V. and Likharev, K.K., *J. Low-Temp. Phys.*, 77, 2394, 1986.
- [30] Meseguer, F., Blanco, A., Miguez, H., Garcia-Santamaria, F., Ibisate, M. and Lopez, C., *Coll. Surf.* 202, 281, 2002.
- [31] Shlimak, I., Vagner I. and Safarov, V.I., in *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors*, Springer, Osake, 2000.
- [32] Jie, Y.E., Xiong, Y.N., Wee, A.T.S., Huan, C.H.A. and Ji, W., *Appl. Phys. Lett.*, 77, 3936, 2000.
- [33] Nishii, J., Kintaka, K., Hosono, H., Kawazoe, H., Kato, M. and Muta, K., *Phys. Rev. B*, 60, 7166, 1999.
- [34] Sing, A., Reinhard, K. C., Anderson, W. A., “Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions”, *J. Appl. Phys.*, 68(7): 3475-3479, 1990.
- [35] Chattopadhyay, P., Daw, A. N., “On the current transport mechanism in a metalinsulator-semiconductor diode”, *Solid State Electron.*, 29(5): 555-560, 1986.
- [36] Yu, A.Y.C., Snow, E. H., “Surface Effects on Metal-Silicon Contacts”, *J. Appl. Phys.*, 39: 3008. 1968.
- [37] Depas, M., Van Meirhaegh, R. L., Laflere, W. H. and Cardon, F., “Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation”, *Solid State Electron.*, 37: 433-441, 1994.
- [38] Card, H. C., Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, *J.Phys.D: Appl. Phys.*, 4:1589-1601, 1971.
- [39] Sze, S. M., “*Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.*”, John Wiley & Sons, New York, 362-390, 1981.
- [40] Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu N., and Tataroğlu, A., “The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in

- Al/SnO₂ p-Si Schottky diodes”, *Solid State Electron.*, 47(10): 1847-1854, 2003.
- [41] Goetzberger, A., Klausmann, E. and Schulz, M. J., “Interface states on semiconductor/insulator surfaces”, *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6-1, 226-233, 1976.
- [42] Choi, W. K., Chim, W. K., Heng, C. L., Teo, L. W., Ho, V., Antoniadis, D. A. and Fitzgerald, E. A., Observation of memory effect in germanium nanocrystals embeded in an amorphous silicon oxide matrix of metal-insulator semiconductor structure, *Applied Physic Letters*, Vol. 80, Number 11, 2002.
- [43] Tiwari S, Rana F, Hanafi H, Hartsten A, Crabbe EF, Chan K. *Appl Phys Lett*; 68:1377–9, 1996.
- [44] Chen JH, Wang YQ, Yoo WJ, Yeo YC, Samudra G, Chan DS, et al. *IEEE Trans Electron Devices*; 51:1840–8, 2004.
- [45] Panchaipetch P, Uraoka Y, Fuyuki T, Tomyo A, Takahashi E, Hayashi T, et al. *Appl Phys Lett*; 89:093502, 2006.
- [46] Yuan CL, Darmawan P, Setiawan Y, Lee PS, Ma J. *Appl Phys Lett*; 89:043104, 2006.
- [47] Baik SJ, Lim KS. *Appl Phys Lett*; 81:5186–8, 2003.
- [48] Liu Y, Dey S, Tang S, Kelly DQ, Sarkar J, Banerjee SK. *IEEE Trans Electron Devices*; 53:2598–602, 2006.
- [49] Zhao D, Zhu Y, Li R, Liu J. *IEEE Trans Nanotechnol*; 5:37–41, 2006.
- [50] Weihua Guan, Shibing Long, Ming Liu, Qi Liu, Yuan Huan, Zhigang Li, Rui Jia *Solid State Electronics*; 806-811-809, 2007.
- [51] Oxtoby, D. W., Nucleation of First-Order Phase Transitions, *Acc. Chem.Res.*, 31 2, pp., 91–97, 1998.
- [52] Henan, N., Liangcai, W., Zhitang, S. and Chun, H., Memory characteristics of an MOS capacitor structure with double-layer semiconductor and metal heterogeneous nanocrystals, *J. Semicond.*, 30, 114003, 2009.

- [53] Kiyotaka W., Makoto K., Hideaki A.. Thin film materials technology : sputtering of compound materials William Andrew, Inc United States p 46,49, 2004.
- [54] Goedheer W. J., Plasma Sources Sci. Technol., 9 page.507, 2000.
- [55] Lifshitz J. M. and Slyozov V. V., J. Phys. Chem. Solids 19, 35, 1961.
- [56] Wagner C. Z., Elektrochem. 65 581, 1961.
- [57] Cahn J. C., The Mechanism of Phase Transformations in Crystalline Solids, Fundamentals of Physics Metallurgy, Institute of Metals: London 103, 1969.
- [58] Bonafos C., Colombeau B., Carrada M., Altibelli A. and Clavarie A., Mat. Sci. Eng. B 88, 112, 2002.
- [59] M. Volmer and A. Weber, Z. Physik. Chem. 119 277, 1925.
- [60] Fundamentals of Physical Metallurgy, J. D. Verhoeven, John Wiley and Sons 220, 1975.
- [61] Fundamentals of Physical Metallurgy, J. D. Verhoeven, John Wiley and Sons 400, 1975.
- [62] Fundamentals of Physical Metallurgy, J. D. Verhoeven, John Wiley and Sons 222, 1975.
- [63] The Mechanism of Phase Transformations in Crystalline Solids, Fundamentals of Physics Metallurgy, J. C. Cahn, Institute of Metals: London 110, 1969.
- [64] Fundamentals of Physical Metallurgy, J. D. Verhoeven, John Wiley and Sons 402, 1975.
- [65] Paine D. C., Caragianis C., Kim T. Y., Shigesato Y., and Ishahara T., Appl. Phys. Lett. 62, 2842, 1993.
- [66] Wolf S., Tauber R. N., Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology, Vol. 1, 2nd Ed., Lattice Press, 2000.
- [67] Baron, T., Pelissier, B., Perniola, L., Mazen, F., Hartmann, J. M. and Rolland, G., Chemical vapor deposition of Ge nanocrystals on SiO₂, Applied Physics Letters Vol 83, Number 7, 2003.
- [68] Niquet, Y. M., Allan, G., Delerue, C. and Lannoo, M., Quantum confinement in germanium nanocrystals, Applied Physics Letters, Vol 77, s 8, 2000.

- [69] Teo, L. W., Choi, W. K., Chim, W. K., Ho, V., Moey, C. M., Tay, M.S., Heng, C.L., Lei, Y., Antoniadis, D. A., Fitzgerald, E. A., Size control and charge storage mechanism of germanium nanocrystals in a metal-insulator-semiconductor structure, *Applied Physics Letters*, Vol. 81, 19, 3639 – 3641, 2002.
- [70] Liu, Z., Lee, C., Narayanan, V., Pei, G., Kan, E.C., Metal nanocrystal Memories, Device design and fabrication, *Electron Devices*, Vol. 49, 9, pp. 1606-1613, 2002.
- [71] Wilkinson A. R. and Elliman R. G., *Phys. Rev. B* 68 155302, 2003.
- [72] Williams D. B., Carter C.B., *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*, Plenum Press New York s. 5, 1996.
- [73] Justin H. Pot, Why Are Electron Microscopes Important?, http://www.ehow.com/about_5312071_electron-microscopes-important.html (Erişim tarihi: 05.06.2013).
- [74] Williams D. B., Carter C.B., *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*, Plenum Press New York s. 22, 1996.
- [75] Thomas G., and Goringe M.J., *Transmission Electron Microscopy of Materials*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [76] Jenkins T. E., *Semiconductor Science*, Prentice-Hall, 1995.
- [77] Barna A', Pe'cz B., Menyhard M., *Micron* 30 267–276 PERGAMON, 1999.
- [78] O. Winkler, F. Merget, M. Heuser, B. Hadam, M. Baus, B. Spangerberg, H. Kurz, *Microelectron. Eng.* 61, 497, 2002.
- [79] J. K. Kim, H. J. Cheong, Y. Kim, J.Y. Yi, H. J. Park, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2527, 2003.