

**DÜŞÜK SICAKLIKTA KİMYASAL BUHAR
BİRİKTİRME (CVD) YÖNTEMİYLE EPİTAKSİYEL
SiGe FİLM BÜYÜTME VE FİLM KARAKTERİZASYONU**

**GROWTH AND CHARACTERIZATION OF EPITAXIAL
SiGe FILM BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (CVD)
AT LOW TEMPERATURE**

AYLİN KANGALLI

PROF. DR. SELMA MUTLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Mart 2018

AYLİN KANGALLI'nın hazırlandığı “Düşük Sıcaklıkta Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemiyle Epitaksiyel SiGe Film Büyütme ve Film Karakterizasyonu” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nuray YILDIZ
Başkan



Prof. Dr. Selma MUTLU
Danışman



Prof. Dr.Osman EROĞUL
Üye



Prof. Dr.Semra İDE
Üye



Doç. Dr.Selis ÖNEL
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr. Menemşe Gümüşderelioğlu
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☒ **Tezimin/Raporumun 26/03/2021 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

13 / 04 / 2018



AYLİN KANGALLI

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel, yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/03/2018

AYLİN KANGALLI

ÖZET

DÜŞÜK SICAKLIKTA KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME (CVD) YÖNTEMİYLE EPİTAKSİYEL SiGe FİLM BÜYÜTME VE FİLM KARAKTERİZASYONU

Aylin KANGALLI

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selma MUTLU

Mart 2018, 82 sayfa

Tez çalışması kapsamında, indirgenmiş basınçta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD) yöntemiyle, düşük sıcaklıkta, silisyuma karşı seçici, silisyum üzerine tek kristal formda silisyum-germanyum-karbon (SiGeC) ve silisyum (SiCap) filmleri büyütülmüştür. Film büyütmede silisyum kaynağı olarak silan (SiH_4), germanyum kaynağı olarak german (GeH_4), bor kaynağı olarak diboran (B_2H_6) ve karbon kaynağı olarak da metilsilan (CH_3SiH_3) gazı kullanılmıştır. Büyütülen filmler, 0,25 μm SiGeC BiCMOS (Silisyum-Germanyum-Karbon Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) teknolojisi üretiminin ilk basamağı olan SiGeC HBT (Silisyum-Germanyum-Karbon Heterojonksiyon Çift Kutuplu Transistör) üretiminde transistörün baz bölgesinde uygulanmış ve filmlerin transistördeki elektriksel performansı değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ilk basamağında, RPCVD reaktöründe silan gazı kullanarak çalışılabilecek en uygun film büyütme sıcaklığı belirlenmiştir. Büyütülen SiGeC filmin kalınlığı, germanyum oranı ve film kalitesi spektroskopik elipsometre ile karakterize edilmiştir. Film kalınlığı ve büyütme süresi birlikte değerlendirildiğinde, 0,25 μm SiGeC BiCMOS teknolojisi üretiminin ilk basamağı olan SiGeC HBT

retiminde baz bölgesine bytlecek tek kristal SiGeC film için en uygun sıcaklık değerinin 625°C olduğu görülmüştür. İkinci olarak, SiGeC HBT teknolojisinde baz çukuru yan duvarlarında silisyum nitrür film bulunduğundan, büyütülen epitaksiyel SiGeC film için silisyuma karşı seçicilik çalışılmıştır. Seçicilik sağlayabilmek için film büyütme gazları içerisine hidroklorik asit (HCl) ilave edilmiştir. Spektroskopik elipsometre ile film kalınlığı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yan duvar filmlerin (0,1-1,0 µm ölçeğinde) morfolojik görüntüleri elde edilmiştir. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda epitaksiyel SiGeC film büyütmede 625°C' de 25 ml/dk HCl akışında silisyuma karşı seçiciliğin sağlandığı görülmüştür.

Çalışmanın ikinci basamağında, transistörün emiter bölgesine katkılanan fosfor iyonlarının baz bölgesine difüzyonunu engellemek için SiGeC filmi üzerine silisyuma karşı seçici, katkısız, tek kristal, silisyum (SiCap) filmi büyütülmüştür. İlk olarak, RPCVD reaktöründe silan gaz kaynağı ile çalışılabilecek, transistörde uygulanabilecek minimum film büyütme sıcaklığı belirlenmiştir. İkinci olarak, SiGeC film büyütmede olduğu gibi SiCap filminde de silisyuma karşı seçicilik çalışılmıştır. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda epitaksiyel SiCap film büyütmede 675°C'de 35 ml/dk HCl akışında silisyuma karşı seçiciliğin sağlandığı görülmüştür.

Bytlen filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu spektroskopik elipsometre, SEM, geçirmeli elektron mikroskobu (TEM), ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS) ve yüksek znrlkl X-ışınları difraksiyonu (HRXRD) analizleri ile yapılmıştır. SIMS analizinde transistör baz bölgesine silan ile düşük sıcaklıkta (625°C) büyütülen filmdeki bor iyonlarının transistörün baz bölgesinden kolektör bölgesine difzlenmediği görülmüştür. HRXRD analizi ile SiGeC filminin tek kristal formda olduğu ve filmin gerinmiş yapıda olduğu ispatlanmıştır. TEM analizi ile SiGeC filminin tek kristal formda olup, dislokasyon yoğunluğunun $\sim 3,6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu görülmüştür. Bytlen filmlerin elektriksel karakterizasyonu için, SiGeC ve SiCap filmleri SiGeC HBT transistörün baz bölgesine bytlmş ve transistörün elektriksel performansı için akım-gerilim (I-V) lmleri yapılmıştır. Diklorosilan ile yüksek sıcaklıkta büyütülen film ile silan ile düşük sıcaklıkta büyütülen film SiGeC HBT yapısına uygulanıp elektriksel olarak karşılaştırıldığında, silan gazı kullanılarak üretilen transistörün akım kazancının yaklaşık 10 kat fazla olduğu grlmştr.

Anahtar Kelimeler: SiGeC, SiCap, seçici epitaksiyel film büyütme, silan, düşük sıcaklıkta epitaksi, RPCVD, BiCMOS



ABSTRACT

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF EPITAXIAL SiGe FILM BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (CVD) AT LOW TEMPERATURE

Aylin KANGALLI

Master Thesis, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selma MUTLU

March 2018, 82 pages

In the scope of thesis, selective epitaxial growth of monocrystal silicon-germanium-carbon (SiGeC) and monocrystal silicon (SiCap) were deposited on silicon substrate at low temperature by using reduced pressure chemical vapor deposition (RPCVD) technique. Silane as silicon source, german as germanium source, diborane as boron source and metilsilane as carbon source were used at film deposition. SiGeC and SiCap films were applied SiGeC HBT (Silicon-Germanium-Carbon Heterojunction Bipolar Transistor) technology which is the first step of 0,25 μm SiGeC BiCMOS (Silicon-Germanium-Carbon Bipolar Complementray Metal Oxide Semiconductor) process technology and electrical performance of the films in the transistor was evaluated.

At the first step of the study, the optimum temperature of the film growth in the RPCVD reactor using silane was determined. The SiGeC film thickness, germanium ratio and film quality was characterized by spectroscopic ellipsometer. Evaluating with growth temperature and process time, the optimum temperature for a single crystal SiGeC film which grown at SiGeC HBT which is the first step of 0,25 μm SiGeC BiCMOS was found to be 625°C. Secondly, selective epitaxial SiGeC film was studied due to presence of silicon nitride film on the base sidewall SiGeC

BiCMOS transistor. Hydrochloric acid (HCl) was added to the process gases for creating selective property. Film thickness was characterized spectroscopic ellipsometry and images of surface morphology of sidewall was obtained by scanning electron microscopy (SEM). As a result of the characterization studies, selective epitaxial growth of SiGeC film was provided with 25 ml/min HCl gas flow at 625°C.

In the second step of the study, monocrystal SiCap film was grown on the SiGeC film. SiCap film prevents diffusion of phosphorus ions from emitter to base region. Initially, the optimum temperature of film growth with silane gas at RPCVD reactor was determined. Secondly, as in SiGeC film, selective epitaxial growth of SiCap film was also studied. As a result of the characterization studies, selective epitaxial growth of SiCap film was provided with 35 ml/min HCl gas flow at 675°C.

Structural and morphological characterization of epitaxial films was done by spectroscopic ellipsometer, SEM, transmission electron microscopy (TEM), secondary ion mass spectroscopy (SIMS) and high resolution x-ray diffraction (HRXRD) analysis. SIMS analysis has shown that boron ions couldn't diffuse into the collector region from the epitaxial SiGeC film which grown in the transistor base region using silane gas at low temperature (625°C). HRXRD analysis proved the SiGeC film to be a single crystal and strained form. TEM analysis has shown that dislocation density of SiGeC film which has the single crystal form is at a level of $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$. For electrical characterization of the growth film, SiGeC and SiCap films were grown to the base region of SiGeC HBT structure and current-voltage (I-V) measurements were evaluated for determining electrical performance of the transistor. The epitaxial films which grown at high temperature with SiCl_2H_2 (dichlorosilane) and low temperature with SiH_4 (silane) were applied to the SiGeC HBT structure. The films were electrically compared on the basis of current gain of transistor. The epitaxial films of silane gas at low temperature has approximately ten times more current gain than the films of dichlorosilane.

Keywords: SiGeC, SiCap, selective epitaxial growth, silane, low temperature epitaxy, RPCVD, BiCMOS

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğiyle daima beni yüreklendiren, tez çalışmam süresince engin bilgi birikimi ve tecrübeleri ile tez çalışmamın ilerlemesine büyük katkı sağlayan, her daim desteğini ve hoşgörüsünü eksik etmeyen çok değerli hocam Sn. Prof. Dr. Selma Mutlu'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Engin bilgi ve tecrübeleri ile tez çalışmamın şekillenmesine ve ilerlemesine büyük katkı sağlayan, sadece bilimsel alandaki deneyimlerini ve bilgisini paylaşmakla kalmayıp, her konudaki düşünce, yaklaşım ve tavsiyeleri ile beni yüreklendirip büyük hedeflere yönlendiren çok kıymetli yöneticilerim Sn. Aziz Ulvi Çalışkan ve Sn. Sema İmrahor İlyas'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince beraber çalışmaktan keyif aldığım, bilgi ve tecrübelerini paylaşan Duygu İşler Öksüz'e, YİTAL'de güzel vakit geçirdiğim Seda Arpacı'ya ve laboratuvarında çalışmamda emeği olan YİTAL ekibine,

Lise zamanından bu yana her zorluğun üstesinden beraber geldiğimiz ve mutluluklarımızı daha coşkulu yaşadığımız, beni her zaman olduğu gibi bu süreçte de motive eden Dilek Yıldırım'a, lisansta başlayan dostluğumuzun her geçen gün daha da ilerlediği, hayatımın her döneminde yanımda olacak olan çok sevgili arkadaşlarım Anıl Evren'e, Merve Gülşen'e, Sanem Kılınç'a, Selen Yağmur Baler'e, yüksek lisans döneminde dostluğunu kazandığım Tuğçe Gültan'a,

En sıkıntılı anlarımda bir telefon kadar uzağımda olan, her zaman beni destekleyen, benim için baba yarısı kelimesinin karşılığı olan Erdal Kangallı'ya, yengem Mehtap Kangallı'ya ve sohbetinden her daim keyif aldığım Yıldız Yeniköy'e,

Her türlü güzelliği ve zorluğu beraber paylaştığım, en zor zamanlarımı huzura dönüştüren, eşsiz hoşgörüsü ve anlayışıyla yanımda olan ve kendimi daima şanslı hissettiren Süleyman Yaman'a,

Beni bugünlere getiren, bana çalışma azmini aşıl原因an, hayattaki duruşunu, zekâsını ve becerisini örnek aldığım, eşi benzeri olmayan, her zaman yanımda hissettiğim canım babam Cafer Kangallı'ya, başarımda manevi katkısı çok büyük olan, sıkıntılı günlerde gösterdiği sonsuz anlayışıyla beni rahatlatan, huzur veren canım annem Satı Kangallı'ya, her zaman sevgisini ve desteğini tüm içtenliğiyle bana sunan canım abim Engür Kangallı'ya,

En içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	ix
ŞEKİLLER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2.GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Yarı İletkenler.....	4
2.2.1.Katkısız Yarı İletkenler.....	5
2.2.2.Katkılı Yarı İletkenler	5
2.2. Transistör.....	6
2.2.1.Çift Kutuplu Eklem Transistör (BJT)	7
2.2.2.Heterojonksiyon Çift Kutuplu Transistörler (HBT).....	9
2.2.3.Silisyum-Germanyum-Karbon Bazlı Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (SiGeC BiCMOS)	9
2.2.4.Transistör Karakteristikleri	10
2.2.5.Tümdevre Üretimi.....	11
2.3. İnce Film Büyütme Teknikleri	13
2.3.1.Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi	13
2.3.2.Epitaksiyel Film Büyütme	15
2.3.3.Reaksiyon Kinetiği	20
2.3.4.Bor Katkılı SiGe Film Büyütme	25
2.3.5.Düşük Sıcaklıkta Epitaksiyel Film Büyütme (LTE).....	26
2.3.6.Seçici Epitaksiyel Film Büyütme (SEG).....	27
2.3.7.SiGeC Film Üzerine Tek Kristal Silisyum (SiCap) Film Büyütme.....	28
2.4. Karakterizasyon Teknikleri	29
2.4.1.Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Difraksiyonu (HRXRD).....	29
2.4.2.Spektroskopik Elipsometre (SE).....	30
2.4.3.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	31
2.4.4.Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM).....	31

2.4.5.İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS)	31
2.4.6.Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi.....	32
3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	33
3.2. İndirgenmiş Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme (RPCVD) Sistemi	34
3.3.Epitakseyel Film Büyütme Öncesi Yüzey Temizlik ve Pasivasyonu	35
3.4.Epitakseyel SiGeC Büyütme	36
3.4.1.Sıcaklığın Epitakseyel SiGeC Film Büyütme Üzerine Etkisi	38
3.4.2.Seçici Epitakseyel SiGeC Film Büyütme	39
3.5.Epitakseyel SiCap Film Büyütme	42
3.5.1.Sıcaklığın SiCap Film Büyütme Üzerine Etkisi	42
3.5.2.Seçici Epitakseyel SiCap Film Büyütme	43
4.DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	45
4.1.Epitakseyel SiGeC Film Büyütme	45
4.1.1.Sıcaklığın SiGeC Film Büyütme hızı ve Ge Oranı Üzerindeki Etkisi.....	46
4.1.2.Seçici Epitakseyel SiGeC Film Büyütme	50
4.2.Epitakseyel SiCap Film Büyütme	53
4.2.1.Sıcaklığın SiCap Film Büyütme hızı Üzerindeki Etkisi.....	54
4.2.2.Seçici Epitakseyel SiCap Film Büyütme	58
4.3.Yapısal, Morfolojik ve Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları	61
4.3.1.HRXRD Analiz Bulguları.....	61
4.3.2.SIMS Analiz Bulguları.....	64
4.3.3.TEM Analiz Bulguları	66
4.3.4.Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sonuçları	68
5.GENEL SONUÇLAR	73
6.KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ	82

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 3.1. SiGeC film büyütme parametreleri.....	39
Çizelge 3.2. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiGeC film büyütme parametreleri	40
Çizelge 3.3. SiGeC ve SiCap film büyütme parametreleri	43
Çizelge 3.4. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiCap film büyütme parametreleri	44
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda SiGeC film büyüme hızı ve germanyum oranı*	46
Çizelge 4.2. Yapıya HCl gazı eklediğinde SiGeC film büyüme hızı ve 250 Å film büyütme için hesaplanan süre	48
Çizelge 4.3. 625°C’de büyütülen SiGeC filmine ait elipsometre sonuçları.....	50
Çizelge 4.4. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiGeC film büyüme hızı*	51
Çizelge 4.5. Farklı sıcaklıklarda SiCap film büyüme hızı*	54
Çizelge 4.6. Yapıya HCl gazı eklediğinde SiCap film büyüme hızı ve 150 Å film büyütme için hesaplanan süre	56
Çizelge 4.7. 675°C’de büyütülen SiCap filmine ait elipsometre sonuçları	58
Çizelge 4.8. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiCap film büyüme hızı*	58
Çizelge 4.9. SiGeC filmindeki dislokasyon yoğunluğunun hesaplanması.....	67

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 2.1. Yarı iletkenlerde Fermi enerji seviyesi	5
Şekil 2.2. p-tipi yarı iletken kristal yapısı ve enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.3. n-tipi yarı iletken kristal yapısı ve enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.4. BJT yapısı.....	8
Şekil 2.5. Heterojonksiyon çift kutuplu transistör yapısı.....	9
Şekil 2.6. npn transistörde giriş karakteristiği	10
Şekil 2.7. npn transistörde çıkış karakteristiği.....	11
Şekil 2.8. Tümdevre üretiminin şematik gösterimi (a) SiGeC BiCMOS üretimi tamamlanmış 100 mm silisyum pul (b) Silisyum pulda bulunan birbirinin aynısı olan 94 kırmıktan biri (c) SiGeC BiCMOS transistör yapısı	12
Şekil 2.9. Kimyasal buhar biriktirme işlemi sırasında gerçekleşen basamakların şematik gösterimi	14
Şekil 2.10. İnce film büyütme mekanizmaları (a) Volmer-Weber (b) Frank-van der Merwe (c) Stranski-Krastanov	14
Şekil 2.11. Silisyum üzerine büyütülen gerinmiş ve kusurlu formda $Si_{1-x}Ge_x$ film yapısı.....	17
Şekil 2.12. SiGe kafes yapısında germanyum oranına bağlı kritik SiGe film kalınlığı değişimi.....	18
Şekil 2.13. Kristal kafes yapısı içerisinde karbon-germanyum oranının kristal kusurlar üzerindeki etkisi	19
Şekil 2.14. Silisyum üzerine büyütülen $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ film yapısı	19
Şekil 2.15. Sıcaklığa bağlı film büyüme hızı değişim grafiği	21
Şekil 2.16. Farklı silisyum kaynaklarında sıcaklığa bağlı film büyüme hızı değişim grafiği (Bütün reaktantlar ~ 0.1 mol H_2 gazı içerir)	22
Şekil 2.17. Silan gaz kaynağı ile silisyum üzerine tek kristal silisyum film büyütmenin şematik gösterimi	23
Şekil 2.18. Silisyum üzerine $850^\circ C$ 'de büyütülen seçici tek (mono) kristal silisyum filmine ait SEM görüntüsü.....	27
Şekil 3.1.Epsilon 2000 (ASM) reaktör bölümü	35
Şekil 3.2. Silisyum pul yüzeyine epitaksiyel SiGeC film büyütme şematik gösterimi.....	38

Şekil 3.3. SiGeC film büyütme işlemi sırasında reaktör içerisindeki zamana bağlı basınç-sıcaklık değişim grafiği.....	38
Şekil 3.4. Seçici epitaksiyel SiGeC film büyütme işlem basamaklarının şematik gösterimi; (a) Silisyum pul üzerine sırasıyla 500 Å silisyumdioksit, 2000 Å polisilisyum, 1800 Å silisyumdioksit, 600 Å silisyum nitrür filmleri büyütme (b) Baz çukuru fotorezist şekillendirme (c) Baz çukuru kuru aşındırma (d) Yan duvar 300 Å silisyum nitrür ve 1200 Å silisyumdioksit filmleri büyütme (e) Yan duvar kuru aşındırma (f) Polisilisyum altı silisyumdioksit filmi ıslak aşındırma (g) Seçici epitaksiyel SiGeC film büyütülen pul örneği	41
Şekil 3.5. Silisyum pul yüzeyine epitaksiyel SiGeC ve SiCap film büyütme şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.6. SiCap film büyütme işlemi sırasında reaktör içerisindeki basınç-sıcaklık değişim grafiği	42
Şekil 3.7. Silisyum nitrür şekilli silisyum pulun baz çukuruna büyütülen epitaksiyel SiGeC ve SiCap filmleri şematik gösterimi	43
Şekil 4.1. Sıcaklığa bağlı SiGeC film büyüme hızı değişim grafiği.....	47
Şekil 4.2. SiGeC/Si filme ait elipsometre sonucu (a) 625°C'de büyütülen SiGeC filme ait Ψ ve Δ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi (b) ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen grafik.....	49
Şekil 4.3. 15 ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör	52
Şekil 4.4. 20 ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör	52
Şekil 4.5. 25 ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör	52
Şekil 4.6. Silisyum pulun ıslak aşındırma öncesi (a) ve sonrası (b) yüzey görüntüsü	53
Şekil 4.7. Sıcaklığa bağlı SiCap film büyüme hızı değişim grafiği	55
Şekil 4.8. SiCap/SiGeC/Si filme ait elipsometre sonucu (a) 625°C'de büyütülen SiGeC üzerine 675°C'de büyütülen SiCap filme ait Ψ ve Δ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi (b) ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen grafik	57

Şekil 4.9. 15ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör.....	60
Şekil 4.10. 25ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör.....	60
Şekil 4.11. 35ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör.....	60
Şekil 4.12. Silisyum yüzeyine büyütülen epitaksiyel SiGeC filmine ait X-ışını kırınım deseni.....	61
Şekil 4.13. Benzetim programıyla elde edilen veriler (a) Ölçüm (kırmızı) ve benzetim (yeşil) $\omega/2\theta$ verilerinin karşılaştırılması (b) SiGeC film içerisindeki germanyum oranı ve profili (c) Film gerinim yüzdesi	63
Şekil 4.14. Silisyum yüzeyine silan gazı ile büyütülen filmlerin derinliğe bağlı katkı konsantrasyonunun derinliğe bağlı profili	65
Şekil 4.15. Silisyum yüzeyine diklorosilan gazı ile büyütülen SiGeC filminin derinliğe bağlı katkı konsantrasyon profili.....	66
Şekil 4.16. Epitaksiyel SiCap/SiGeC/Si yapısına ait TEM görüntüsü	67
Şekil 4.17. Transistör çıkış karakteristiği (a) kutuplanma (b) kolektör-emiter gerilimine karşı kolektör akımı değişim grafiği	69
Şekil 4.18. npn tipi transistörün kutuplanması	70
Şekil 4.19. Baz-emiter gerilimine karşı baz ve kolektör akımı değişim grafiği ..	70
Şekil 4.20. Silan ve diklorosilan ile büyütülen SiGeC HBT transistörlerin çıkış karakteristiği (a) baz-emiter gerilimine karşı baz akımının değişimi (b) baz-emiter gerilimine karşı kolektör akımının değişimi	71
Şekil 4.21. Kolektör akımına karşı akım kazancı eğrisi	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	Angstrom
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
ψ	Genlik oranı
λ	Dalgaboyu
ε	Gerinim katsayısı
Δ	Faz değişimi
B	Bor
C	Karbon
P	Fosfor
Si	Silisyum
Ge	Germanyum
H ₂ SO ₄	Sülfürik Asit
HCl	Hidroklorik Asit
NH ₄ OH	Amonyum Hidroksit
GeH ₄	German
SiH ₄	Silan
B ₂ H ₆	Diboran
CH ₃ SiH ₃	Metil Silan
Si ₂ H ₆	Disilan
SiH ₂ Cl ₂	Diklorosilan
SiHCl ₃	Triklorosilan
Ge ₂ H ₆	Digerman
Cl ₂	Klor
SiO ₂	Silisyumdioksit
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür
α	Kafes Parametresi

ϵ	Kafesteki gerinme katsayısı
A	Arrhenius Sabiti
R	Gaz Sabiti
k	Reaksiyon Hız Sabiti
I	Akım
V	Gerilim
V_{CE}	Kolektör-emiter gerilimi
V_{BE}	Baz-emiter gerilimi
E_c	İletim bandı
E_v	Değerlik bandı
E_g	Bant aralığı
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_a	Alıcı enerji seviyesi
E_d	Verici enerji seviyesi
I_B	Baz akımı
I_C	Kolektör akımı
β	Akım kazancı

Kısaltmalar

CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
BiCMOS	Bipolar Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı iletken
BJT	Çift Kutuplu Eklem Transistör
HBT	Heterojonksiyon Bipolar Transistör
FET	Alan Etkili Transistör
MOSFET	Metal Oksit Yarı iletken Alan Etkili Transistör
OPON	Silisyumdioksit-Polisilisyum-Silisyumdioksit-Silisyum nitrür

MBE	Moleküler Demet Epitaksi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Geçirmeli Elektron Mikroskobu
SIMS	İkincil İyon Kütle Spektroskopisi
UHV CVD	Ultra Yüksek Vakumda Kimyasal Buhar Biriktirme
SE	Spektroskopik Elipsometre
HRXRD	Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Difraksiyonu
I-V	Akım-Gerilim
DC	Doğru Akım
LPCVD	Düşük Basıncıta Kimyasal Buhar Biriktirme
RPCVD	İndirgenmiş Basıncıta Kimyasal Buhar Biriktirme
APCVD	Atmosferik Basıncıta Kimyasal Buhar Biriktirme
LTE	Düşük Sıcaklık Epitaksi
SEG	Seçici Epitaksiyel Film Büyütme
NSEG	Seçici Olmayan Epitaksiyel Film Büyütme
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
MSE	Ortalama Karesel Hata

1. GİRİŞ

Bilgisayar ve elektronik endüstrisinin gelişmesindeki temel faktör, bilgisayarların beynini temsil eden mikroişlemcilerin işlem gücüdür. 1940 yılında üretilen ilk bilgisayarda henüz mikroişlemci teknolojisi gelişmediğinden ana yapı unsuru olarak devasa büyüklükte elektron tüpleri kullanılmıştır. Daha sonra 1950'li yıllarda yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle ve transistörlerin icadıyla elektron tüpleri yerini hızla transistörlere bırakmıştır. Elektron tüpleriyle karşılaştırıldığında transistörlerin daha az yer kapladığı, daha az elektrik tüketip yüksek hızda çalıştığı görülmüştür. Transistör, bir vananın açılarak veya kapatılarak su akışını kontrol etmesi gibi bir devredeki elektrik akımını ileterek veya keserek o devredeki akımı kontrol eden elektroniğin temel yapıtaşdır [1].

Gelişen teknoloji ile büyük hacimdeki bilgisayarların küçültülmesi için öncelikle mikroişlemcilerinin küçültülmesi gerektiğinden daha çok sayıda ancak küçük boyutta transistörler üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde üretilen transistörler nanometre boyutunda olup bir mikroişlemcide milyarlarca transistör bulunmaktadır. 2011 yılında Intel tarafından piyasaya sürülen Intel Core i7 mikroişlemcisinde toplam 2.270.000.000 transistör bulunmaktadır. Mikroişlemcideki transistör sayısının artırılmasıyla bilgisayardaki işlem hızı da artmıştır [2].

Transistörlerin tarihçesine bakıldığında, ilk nokta temaslı çift kutuplu transistör 1948 yılında Amerika' da Bell Laboratuvarında Walter H. Brattain ve John Bardeen tarafından yapılmıştır [3]. Daha sonra 1951 yılında William Shockley tarafından germanyum tabanlı çift kutuplu eklem transistör (BJT) geliştirilmiştir [4]. Germanyumun yüksek sıcaklıklarda yapısının bozulmasından dolayı silisyum tabanlı transistör üretimi gündeme gelmiştir. 1956 yılında ise ilk kez silisyumdan çift kutuplu transistör yapılmıştır [5]. Tez çalışmasının konusu olan epitaksiyel silisyum film, çift kutuplu eklem transistörde ilk kez 1960 yılında uygulanmıştır [6]. Transistör elektriksel performans ölçütlerinden biri olan kesim frekansını artırmak için 1975 yılında silisyum kafes yapısına germanyum eklenerek örgü uyumlu epitaksiyel silisyum-germanyum (SiGe) film büyütülmüştür [7]. Büyütülen film 1987 yılında SiGe HBT (Silisyum-Germanyum Heterojonksiyon Çift Kutuplu Transistör) teknolojisinde uygulanmıştır. Silisyum taban üzerine NMOS, PMOS ve SiGe HBT teknolojisinin tek

bir tümdevre üzerinde entegrasyonu ile 1992 yılında ismini transistörün baz bölgesine büyütülen epitaksiyel SiGe filminden alan SiGe BiCMOS (Silisyum-Germanyum Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) teknolojisi ortaya çıkmıştır. SiGeC BiCMOS teknolojisi, yüksek frekans uygulamalarında (radar, ultrason vb.) hem sayısal hem de RF analog tümdevrelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile geliştirilen elektronik sistem ürünleri endüstriyel, medikal, biyoteknoloji, güvenlik, savunma, uzay ve astronomi alanlarında kullanılmaktadır [8]. Ülkemizde YİTAL ve ASELSAN işbirliğiyle yürütülen 0,25 µm SiGeC BiCMOS teknolojisiyle yüksek performans ve tümleştirme avantajları kullanılarak faz dizili radarların alıcı-verici modüllerinde kullanılan düşük güçlü çekirdek tümdevrelerin üretilebilir duruma gelmesi hedeflenmektedir.

Gelişen SiGeC BiCMOS teknolojisindeki problemlerden birisi ısı bütçenin yüksek olmasıdır. Bu problemin çözümü düşük sıcaklıkta kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle büyütülen epitaksiyel film büyütme işleminde büyütme sıcaklığının düşürülmesi ile mümkündür. Film kalınlığı ve katkı profili sıcaklığın fonksiyonu olup, kristal yapının formuna bağlı olarak değişmektedir. Transistör baz bölgesine büyütülen epitaksiyel SiGeC filmini bor atomu ile katkılanmaktadır. Bor atomlarının baz bölgesinden kolektör bölgesine difüzyonun gerçekleşmesi transistördeki p-n jonksiyonlarını doğrudan etkileyeceğinden transistörün elektriksel performansını olumsuz etkilemektedir [9-10].

Bu tezin amacı, indirgenmiş basınçta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD) yöntemiyle silan gazı kullanarak, düşük sıcaklıkta, silisyum üzerine tek kristal formda SiGeC ve SiCap filmleri büyütülmesidir. Büyütülen filmlerin 0,25 µm SiGeC BiCMOS teknolojisinde uygulanabilmesi için, silisyum üzerinde film büyümesi gerçekleşirken yalıtkan film olan silisyum nitrür üzerinde epitaksiyel filmin büyümemesi gerekir. Bu formda film büyütme seçici epitaksiyel film büyütme denir.

Bu amaç doğrultusunda, düşük sıcaklıkta SiGeC ve SiCap film büyütebilmek için RPCVD reaktöründe silan gaz kaynağı ile çalışılabilecek minimum sıcaklık değerleri belirlenmiş ve silisyum nitrür filmin üzerinde büyümeyecek şekilde filme seçicilik özelliği kazandırılmıştır. Öncelikli olarak silisyum üzerine SiGeC filmi büyütülmüş, daha sonra bu filmin üzerine SiCap filmi büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu spektroskopik elipsometre, SEM, TEM, SIMS,

HRXRD ile yapılırken, filmin transistörde uygulanması sonucu elektriksel karakterizasyon için akım-gerilim ölçümü ile transistör akım kazancı ölçülmüştür.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, yapılan tez çalışmasının temelini oluşturan konularla ilgili literatür bilgisi verilmiştir. İlk olarak, transistörün temeli olan yarı iletkenler anlatılmıştır. Daha sonra, transistör ve transistör teknolojileri gelişim süreci ile tümdevre üretimi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, transistörün baz bölgesine büyütülen, tez kapsamında çalışılan epitaksiyel ince film büyütme için kullanılan teknikler, epitaksiyel SiGe, SiGeC ve SiCap filmlerinin kristal kafes yapısı, kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle düşük sıcaklıkta ve sadece silisyum üzerinde büyüyen (seçici) epitaksiyel film büyütme mekanizmaları anlatılmıştır. Son olarak, büyütülen epitaksiyel filmlerin morfolojik ve elektriksel karakterizasyonu için kullanılan teknikler anlatılmıştır.

2.1. Yarı İletkenler

İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alan, normal halde yalıtkan olup ancak ısı, ışık, manyetik etki altına bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçerek iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir. Yarı iletkenler kristal yapıya sahip olup atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır.

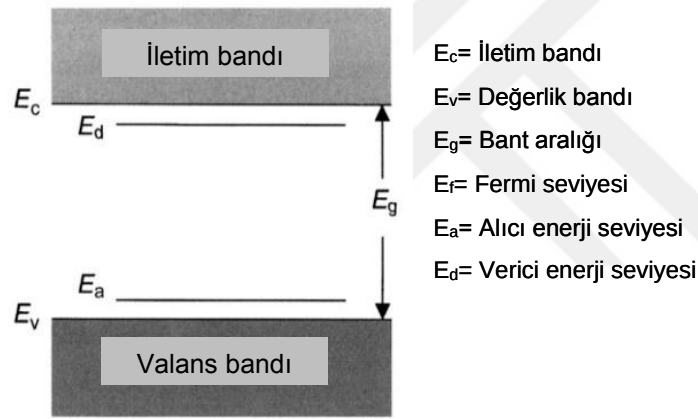
Elektronik devre elemanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan malzemeler silisyum ve germanyumdur. Her iki yarı iletken de doğadan elde edilmekte ve saflaştırılarak tek kristal hale getirildikten sonra diyot, transistör ve tümdevrelerin üretiminde kullanılmaktadır.

Silisyum, elektronik devre elemanlarının üretiminde en çok kullanılan yarı iletken elementtir. Atomik yoğunluğu 5×10^{22} atom/cm³ olup çekirdeğinde 14 proton bulunur. 4 valans elektronuna sahip olan silisyum atomları doğada özellikle kumda çok fazla miktarda bulunan hem yarı metal hem de yarı iletken olan elementlerden biridir.

Germanyum, çekirdeğinde 32 proton olup, 4 valans elektronuna sahiptir. Doğada oldukça az miktarda bulunduğundan germanyumun elde edilmesi oldukça zordur [11-13]. Transistör ve diyotlarda kullanımının tercih edilmesinin sebebi düşük güç kullanmaları ve ortama az ısı yaymalarıdır. Tarihte üretilen ilk transistör germanyum bazlı olup, germanyumun yüksek sıcaklıklarda yapısının bozulmasından kaynaklı 1954 yılından itibaren silisyum transistörler ile çalışılmaya başlanmıştır [5].

Karbon, transistör teknolojisinde yaygın olarak kullanılan, periyodik tabloda 4A grubunda yer alan yarı iletkenlerden biridir. Bant genişliğinin büyük olması ve ısı özellikleri iyi olması sebebiyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıma oldukça elverişlidir.

Atomlar yarı iletkenlerde hareket halinde olduklarından her yörüngedeki elektron belirli bir enerjiye sahiptir. Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi yarı iletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasında belirli bir boşluk bandı vardır. Valans elektronların bulunduğu en dıştaki enerji bandına valans bandı, bir sonraki banda iletkenlik bandı denir. Yarı iletkene iletkenlik özelliği kazandırmak için valans bandındaki elektronlara boşluk bandı seviyesinde ek enerji vermek gerekir. Valans bandındaki elektrona uygulanan enerji ile elektron atomu terk eder. Valans elektronun serbest hale geçmesiyle madde iletkenlik kazanır [12].



Şekil 2.1. Yarı iletkenlerde Fermi enerji seviyesi [13]

Yarı iletkenleri içinde bulundurdıkları atomlara göre katkısız (intrinsic) veya katkılı (extrinsic) olmak üzere iki kategoriye ayrılır.

2.2.1. Katkısız Yarı İletkenler

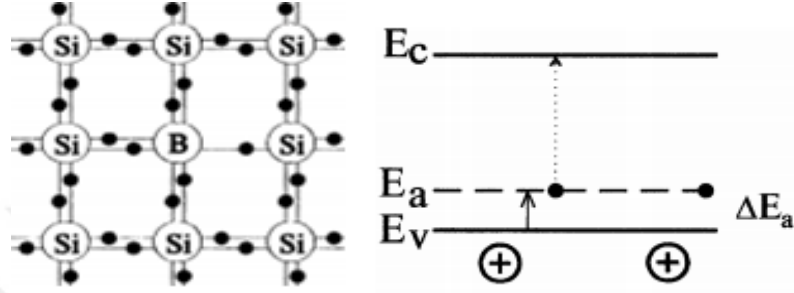
Katkısız yarı iletken içerisinde safsızlık bulunmayıp mutlak sıfır derecesinde hiç bir yük taşıyıcısı bulunmaz.

2.2.2. Katkılı Yarı İletkenler

Yarı iletkenlerdeki yük taşıyıcı sayısını artırmak için kristale uygun safsızlık atomları eklenerek katkılı yarı iletkenler oluşturulur. Katkılı yarı iletkenler p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki gruba ayrılır.

2.1.2.1. P-tipi Katkılı Yarı İletkenler

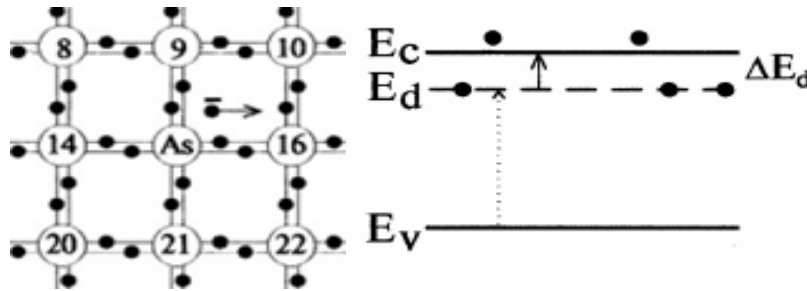
Silisyum kristal yapısına 3 valans elektronu bulunan safsızlık elementi (Al, B, In) eklendiğinde silisyum atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden 1 elektron alarak boşluk (hole) oluşur. Bu katkılanmış yarı iletkene p-tipi katkılı yarı iletken denir ve bu yarı iletkenlerde iletim boşluklar ile olur. Katkı maddesi ekstra boşluk oluşturarak iletkenliği artırır. Şekil 2.2'de bor atomlarının silisyuma bağlanması sonucu kristal yapıdaki değişim ve enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. p-tipi yarı iletken kristal yapısı ve enerji bant diyagramı [14]

2.1.2.2. N-tipi Katkılı Yarı İletkenler

Silisyum kristal yapısına 5 valans elektronu bulunan safsızlık elementi (P, As, S, Sb) eklendiğinde, 4 valans elektronu bulunan silisyumu 8 elektrona tamamlarken, fazla olan son elektron negatif yük taşıyıcı olarak ortaya çıkar. N-tipi katkılı yarı iletken olarak adlandırılan bu tür katkılanmış yarı iletkenlerde iletim elektronlar ile olur. Katkı maddesi, ekstra elektron sağlayarak iletkenliği artırır. Şekil 2.3'de arsenik atomlarının silisyuma bağlanması sonucu kristal yapıdaki değişim ve enerji bant diyagramı gösterilmiştir [15].



Şekil 2.3. n-tipi yarı iletken kristal yapısı ve enerji bant diyagramı [14]

2.2. Transistör

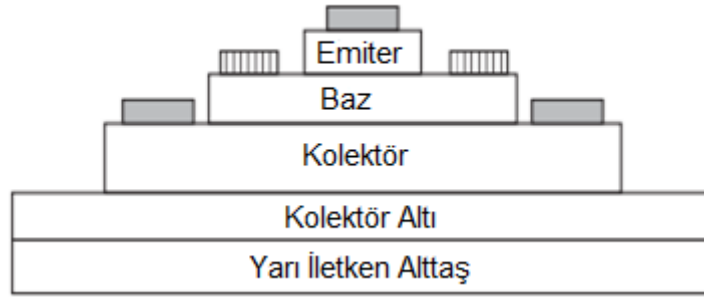
Elektronik endüstrisinin en temel yarı iletken devre elemanıdır. Elektronikte zayıf akım yükseltmesi ve sinyal şekillendirme işlemlerinde kullanılır. İlk transistör 1948

yılında Amerika'da Bell Laboratuvarında Walter H. Brattain ve John Bardeen tarafından yapılmıştır [3]. Bu transistörün esası, germanyum bir parça üzerinde iki madeni ucun çok yakın şekilde bağlanmasına dayanır. Daha sonra, 1951 yılında William Schockley tarafından germanyum bazlı transistör geliştirilmiştir [4]. Yarı iletken teknolojisi germanyum bazlı transistörler ile başlamış ancak germanyumun bant aralığının diğer yarı iletkenlere göre nispeten daha düşük olması, 80°C'nin üzerindeki çalışma sıcaklıklarında transistör kaçak akımının fazla olmasından dolayı germanyuma alternatif yarı iletken arayışına başlanmıştır. Silisyumun yüksek sıcaklıklarda daha düşük kaçak akımlı olması, günümüz transistör teknolojisinde yaygın olarak tercih edilme sebebidir. Aynı zamanda silisyumdioksit (SiO_2) çok iyi bir yalıtkan malzeme olup, yüksek sıcaklıklarda kolayca büyütülebilmektedir [16]. 1954 yılında ilk kez silisyumdan çift kutuplu eklem transistör (BJT) yapılmıştır. 1956 yılından sonra silisyum bazlı BJT'ler seri olarak kullanılmaya başlanmıştır [5]. Günümüzde ise transistörler mikron teknolojisi ile üretilebilir hale gelmiş ve tüm devrelerin içinde kullanılmaya başlanmıştır. Şu anda bir mikroişlemci milyarlarca transistörden oluşmaktadır. Mikroişlemci içerisindeki transistör sayısının artırılmak istenmesinin sebebi, mikroişlemci içindeki transistör sayısı arttıkça mikroişlemcinin hızı ve yapabildiği işlem sayısı da aynı oranda artmasıdır.

Tek kutuplu (unipolar) ve çift kutuplu (bipolar) olmak üzere iki tip transistör vardır. Tek kutuplu transistörde akım iletimi sadece çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşirken, çift kutuplu transistörde hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcıları görev yapar. Transistör teknolojisi BJT ile başlayıp, NMOS (n-Metal Oksit Yarı İletken) ve PMOS (p-Metal Oksit Yarı İletken) transistör tiplerinden oluşan CMOS (Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) teknolojisi ile devam eden ve bu iki tipin aynı tümdevre üzerinde yer aldığı BiCMOS (Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken) ile devam etmektedir.

2.2.1. Çift Kutuplu Eklem Transistör (BJT)

BJT içinde hem çoğunluk taşıyıcıları hem de azınlık taşıyıcıları görev yaptığından çift kutuplu eklem transistör ismini alır. Günümüzde transistörler yapım itibarıyla Şekil 2.4'de gösterildiği gibi tost görünümünde olup, transistör katmanları sırasıyla üst üste üretilir.



Şekil 2.4. BJT yapısı [17]

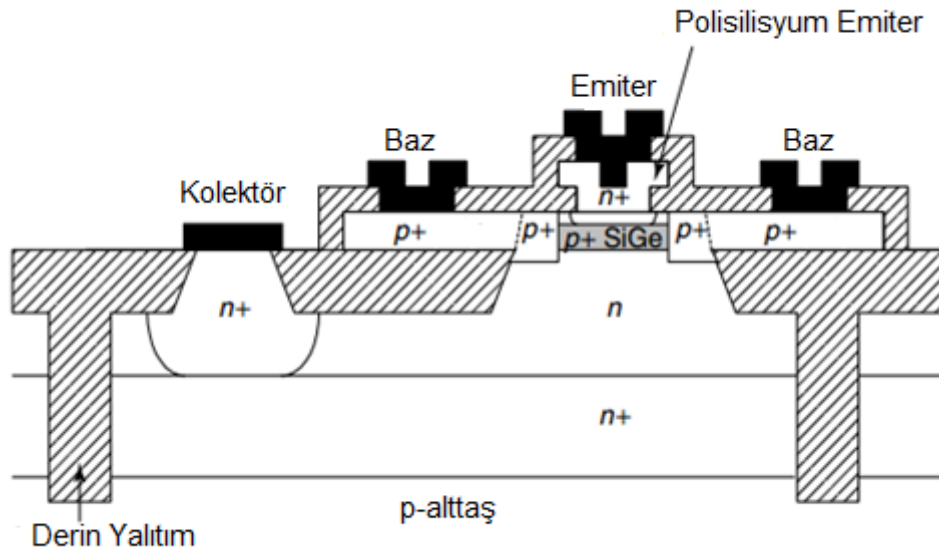
BJT' ler katkılandırılmış p ve n tipi malzeme kullanılarak üretilir. Npn ve pnp olmak üzere iki tip BJT transistör bulunur. 0,25 μm SiGe BiCMOS teknolojisi npn tipi transistör yapısında olduğundan npn tipi transistörler detaylı olarak anlatılmıştır. Npn tipi transistör iki adet n tipi yarı iletken madde arasına ince bir katman halinde bir adet p tipi malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur. Araya yerleştirilen baz tabakası iki büyük tabaka arasındaki elektron-boşluk geçişinde kontrol görevi yapar. Dolayısıyla transistör yapısında üç katman vardır. Transistörde her bir terminale işlevlerinden ötürü, emiter (emitter), baz (base), kolektör (collector) adları verilir. Ayrıca transistörlerde emiter-baz ve kolektör-baz birleşimi olmak üzere iki birleşim (jonksiyon) vardır. Transistörlerin elektriksel karakteristiğinde belirlemede baz, emiter ve kolektör olmak üzere üç temel akım vardır. Baz akımı, kolektör ve emiter akımına kıyasla daha küçük olmasına rağmen, emiter ve kolektör akımlarını kontrol ettiğinden oldukça önemlidir.

Npn tipi transistörde n tipi madde içerisinde çoğunluk akım taşıyıcısı olarak serbest elektronlar bulunurken, elektronların hareketi boşluk hareket yönünün tersine doğrudur. P tipi madde içerisinde ise çoğunluk akım taşıyıcısı olarak boşluklar bulunur. Transistör kutuplanması emiter, baz ve kolektöre belirli değerlerde ve işaretle (pozitif/negatif) DC gerilim ile beslenmesiyle mümkündür. Npn tipi transistörde doğru kutuplanmasında emitere negatif, kolektöre pozitif, baza ise emitere göre pozitif kutuplanma gerilimi uygulanır. Transistörde doğru kutuplanma yapıldığında transistör içerisinde geçen akımlar aynı zamanda dış devreden de geçer. Emiterdeki negatif yüklü elektronlar baz-kolektör geriliminin (V_{BC}) negatif kutbu tarafından birleşim yüzeyine doğru itilir. Elektronlar, emitere yayılıp birleşim yüzeylerinden geçerek kolektöre bağlı V_{BC} geriliminin pozitif kutbu tarafından çekilerek akım geçişi sağlanmış olur. Baz akımı değiştirilerek kolektör akımı kontrol

edildiğinden transistörde küçük akımlarla büyük akımları kontrol etme olanağı sağlanır [14,18,19].

2.2.2. Heterojonksiyon Çift Kutuplu Transistörler (HBT)

Heterojonksiyonlu yapılar, iki veya daha fazla IV. grup elementinin birleşmesi ile oluşur. Heterojonksiyon yapılar ile homojonksiyon yapılar karşılaştırıldığında, heterojonksiyon yapılar ile elektron ve delikler üzerinde kuvvetin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebileceği görülmüştür. Gelişen transistör teknolojisinde silisyum tabanlı transistörün baz bölgesine germanyum eklenerek silisyum-germanyum alaşımlı yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Yapıya germanyum eklenmesinin sebepleri, transistörün baz bölgesindeki bant aralığının ayarlanması, akım kazancının artırılması, daha hızlı olması ve daha düşük gürültüde çalışabilmesidir. HBT'lerin olumsuz tarafı ise karmaşık epitaksiyel büyütme işlemlerini gerektirmesidir. Şekil 2.5'de HBT katmanları şematik olarak gösterilmiştir [17]. Npn tipi transistörde baz bölgesine hetero yapıda p tipi silisyum-germanyum film büyütülür.



Şekil 2.5. Heterojonksiyon çift kutuplu transistör yapısı [20]

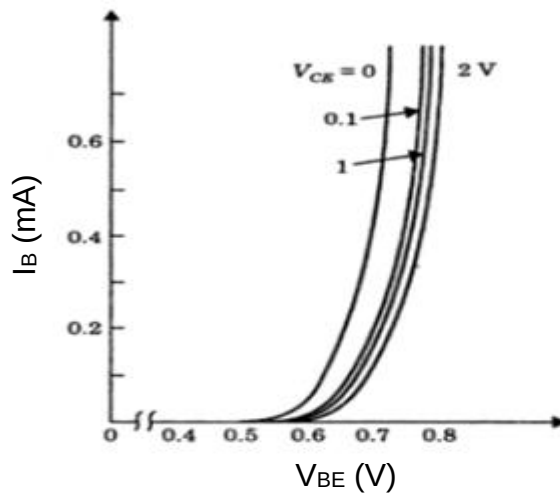
2.2.3. Silisyum-Germanyum-Karbon Bazlı Çift Kutuplu Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (SiGeC BiCMOS)

SiGeC BiCMOS teknolojisi silisyum yarı iletken malzeme üzerinde mikrodalga frekanslarda transistör geliştirmeye olanak sağlayan bir teknolojidir. CMOS

teknolojisi birim silisyum alanda en fazla transistör gerçeklenmesine olanak kılarak g tüketimini azaltmaktadır. HBT teknolojisi ise yüksek frekanslı alıcı-verici yapılarda performansı yüksektir. SiGe HBT teknolojisinin, CMOS retim teknolojilerine tam entegre edilmiş olmaları ile 1992 SiGeC BiCMOS devre teknolojisi tasarlanmıştır. 1994 yılında SiGeC BiCMOS teknolojisinde 200 mm silisyum pulla ticari üretim başlamıştır. Çok çeşitli mikrodalga ve sayısal fonksiyonun aynı mikroçip üzerinde gerçekleştirilmesine olanak sağlamakta ve bu sayede hem daha küçük hem de daha hızlı sistemler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknoloji ile geliştirilen elektronik sistem ürünleri medikal, güvenlik, savunma, biyoteknoloji, uzay, radyo, astronomi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Epitaksiyel SiGeC film büyütülerek üretilen SiGeC BiCMOS teknolojisiyle yüksek performans ve tümleştirme avantajları kullanılarak faz dizili radarların alıcı-verici modüllerinde kullanılan düşük güçlü çekirdek tümdevrelerin üretilebilir duruma gelmesi hedeflenmektedir. Yüksek frekanslarda çalışan tümdevreler ile haberleşme, tıp, otomotiv, g elektronik ve askeri elektronik gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [10].

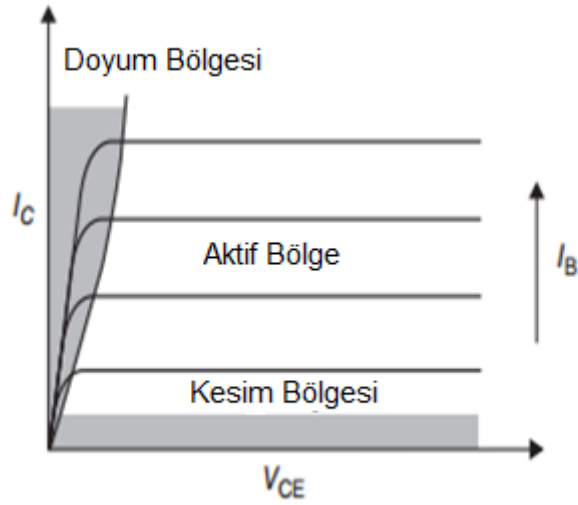
2.2.4. Transistör Karakteristikleri

Transistörde karakteristik eğri, elektriksel elemandaki akım-gerilim ilişkisini gösterir. Transistörde giriş ve çıkış olmak üzere iki tip karakteristik eğri bulunur. Giriş karakteristiği baz-emiter gerilimi (V_{BE}) ile baz akımı (I_B) arasındaki ilişkiyi verir. Kolektör-emiter gerilimine (V_{CE}) bağlı olarak baz akımı değiştirilir. şekil 2.6'da görüldüğü gibi baz akımındaki değişim ile baz-emiter gerilimi ölçülür.



şekil 2.6. npn transistörde giriş karakteristiği [21]

Transistör uygulamalarında aksi belirtilmedikçe transistörün iletme başladığı baz-emiter gerilimi 0.7 V olarak kabul edilir.



Şekil 2.7. npn transistörde çıkış karakteristiği [22]

Transistör çıkış karakteristiği kolektör-emiter uçlarından alınır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi baz akımındaki değişime bağlı olarak, kolektör akımı (I_C) ve kolektör-emiter gerilimi ölçülür. Transistör çıkış karakteristiğinde aktif, kesim (cutoff) ve doyum bölgesi olmak üzere üç çalışma bölgesi vardır. Aktif bölge, baz akımının 0A’dan büyük, kolektör-emiter geriliminin 0V’den büyük olduğu bölgedir. Bu bölgede transistörün çıkış akımı çoğunlukla baz akımına, bir miktarda kolektör-emiter gerilimine bağlıdır. Kolektör-emiter gerilimi belirli bir değeri aştığında transistörde kırılma olayı meydana gelir ve transistör yapısı bozulmaya başlar.

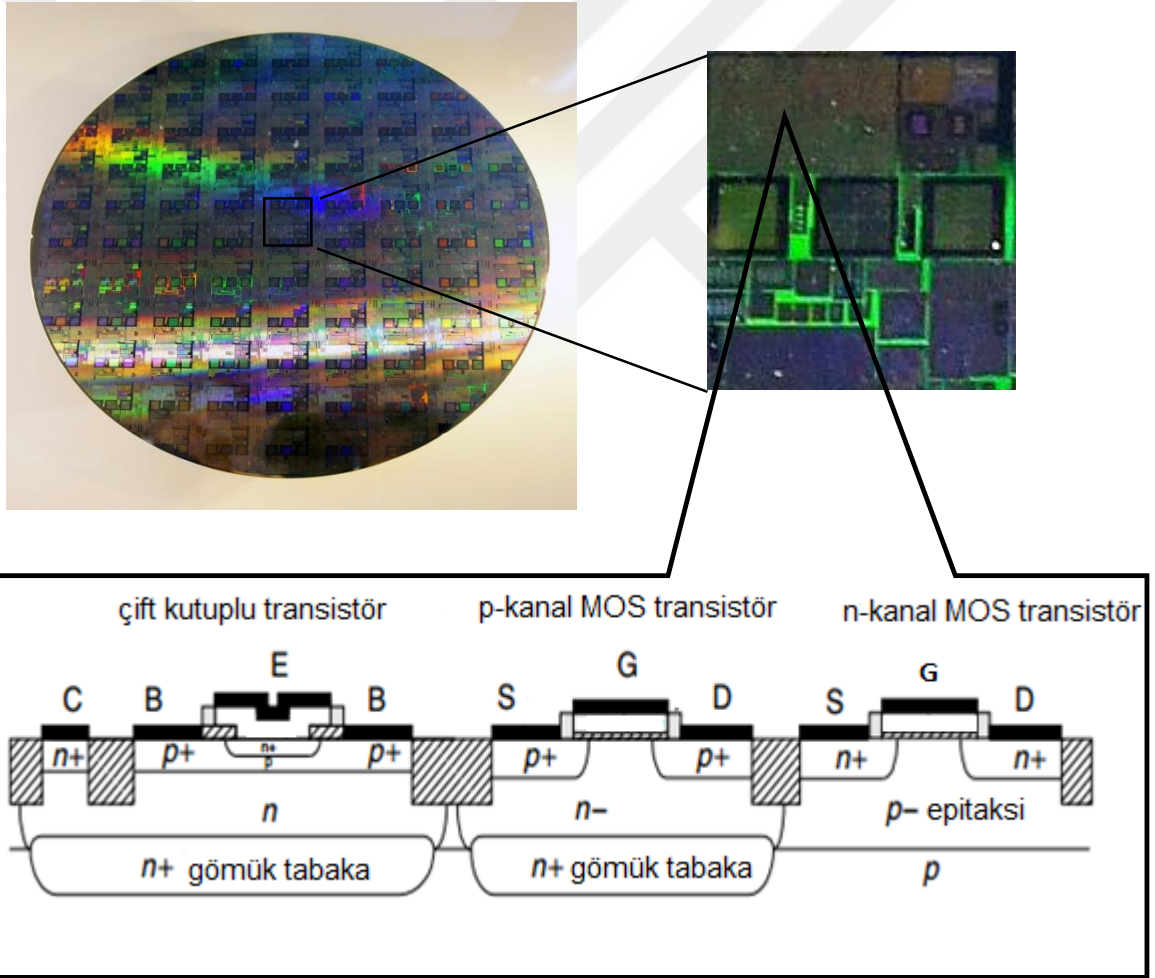
Kesim bölgesinde transistörün baz akımı 0 A olduğunda baz-emiter gerilimi de 0 V olacağı için kolektör akımının oluşmaz. Kolektör-emiter birleşimi çok yüksek direnç göstererek akım akmasına izin vermez.

Doyum bölgesinde baz akımı artırıldığında kolektör akımı da artarken R_C yük direnci üzerindeki gerilimi azaldığından V_{CE} gerilimi azalır. Kolektör-emiter doyum değerine ulaştığında baz-emiter jonksiyonu doğru yönde kutuplanır.

2.2.5. Tümdevre Üretimi

Tümdevre (mikroçip, yonga, entegre devre, çip) aktif ve pasif devre elemanlarının aynı kırımk içerisinde yer aldığı ve bu elemanların birbirleri ile bağlantılarının metal filmler ile sağlandığı elektronik devre topluluğudur.

Tümdevre üretiminde nanometre boyutunda yapılar çalışıldığından üretim ortamı temiz alan (clean room) olup, temiz alan 1 inç³ hacimde boyutu 1 µm'den küçük partikül sayısı 1-100 aralığında olan ortamdır. YİTAL'de gerçekleştirilen SiGeC BiCMOS transistör üretimi, tek kristal yönelimli silisyum pul yüzeyine uygulanan fotolitografi, plazma destekli aşındırma, gaz fazdan film depolama, yüksek sıcaklıkta oksitleme, iyon ekme ve epitaksiyel ince film büyütme gibi tekniklerin belirli bir sırada uygulandığı yaklaşık 300 adımdan oluşur. Bir tümdevrenin üretimi yaklaşık 3-4 ay kadar sürmektedir. Üretimi tamamlanan tümdevrelerin test ve kılıflanma işlemlerinin ardından ürün olarak kullanılabilir duruma gelmektedir. Şekil 2.8'de üretimi tamamlanan silisyum pul ve her bir kırmıkta bulunan milyonlarca transistörden birinin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.8. Tümdevre üretiminin şematik gösterimi (a) SiGeC BiCMOS üretilmiş 100 mm silisyum pul (b) Silisyum pulda bulunan birinin aynısı olan 94 kırmıktan biri (c) SiGeC BiCMOS transistör yapısı [20]

2.3. İnce Film Büyütme Teknikleri

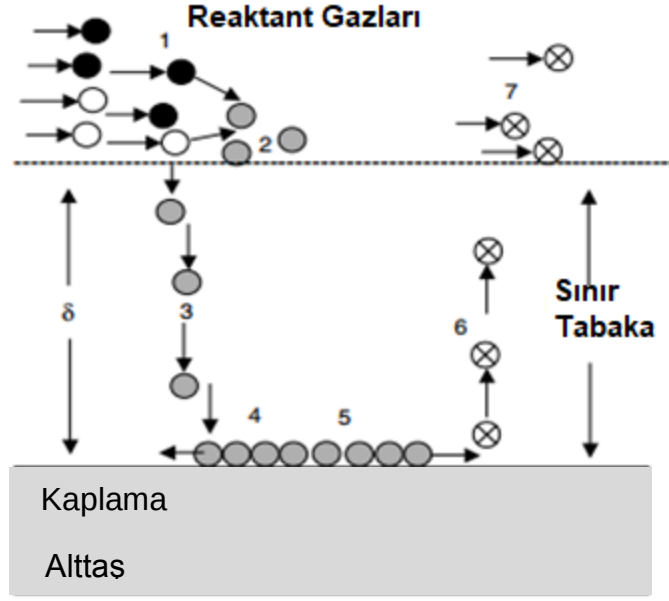
İnce film büyütme teknikleri, taban malzemesinin atomlarının veya moleküllerinin filmi destekleyerek ince bir katman halinde büyümesine olanak sağlayan farklı malzemeleri içerir. Büyütülen filmlerin kalınlığı nanometre (nm) boyutundan mikrometre (μm) boyutuna kadar uzanmaktadır. Kristal taban üzerine ince film büyütülmek istendiğinde ortam koşullarına (sıcaklık, basınç, malzemenin formu vb.) bağlı olarak polikristal, tek kristal ve amorf yapı olmak üzere üç şekilde film büyüyebilir. Polikristal yapılar, bölgesel olarak kristal yapıda olmalarına rağmen bir bütün olarak bakıldığında tek kristal özelliği göstermezler. Kristal yapılar, atom veya moleküllerin düzenli olarak yerleştiği yapılardır. Amorf yapılarda ise atomlar rastgele yerleşmiştir.

Son yıllarda ince film üretimi elektronik aygıt teknolojisinin gelişmesinin temelini oluşturmaktadır. İnce filmlerin kullanım amaçlarına göre belirli karakteristik özelliklere sahip olması gerekmektedir. İstenilen özellikler film büyütme koşullarına bağlı olarak ayarlanabilmektedir. İnce film büyütme teknikleri malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre katı, sıvı ve buhar fazdan biriktirme olmak üzere üçe ayrılır. Buhar fazdan biriktirme tekniği ise fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme olmak üzere ikiye ayrılır. Tez çalışmasında, film büyütme yöntemi olarak kullanılan kimyasal buhar biriktirme yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır.

2.3.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi

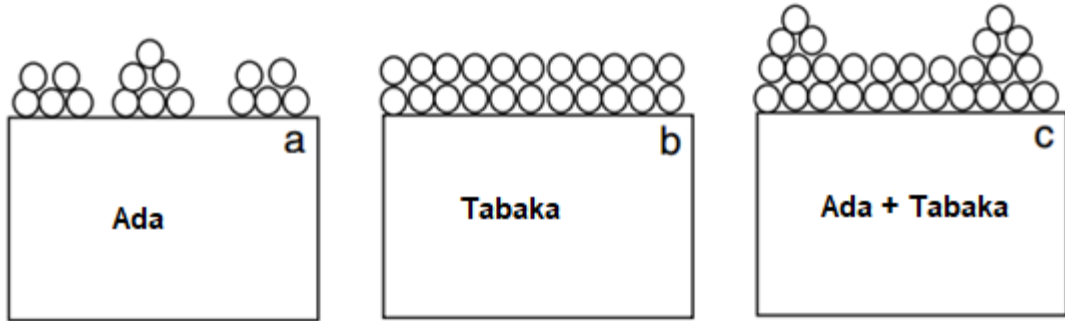
Kimyasal buhar biriktirme yöntemi buhar fazındaki reaktantların reaktör içinde ısı veya manyetik bir etkiyle alttaşı yüzeyinde depolanmasıdır. Bu yöntemle düşük sıcaklıklarda dahi film büyütme işlemi yapılabilir. Kimyasal buhar biriktirme yönteminde gerçekleşen olaylar Şekil 2.9'da gösterildiği gibi 7 adımdan oluşmaktadır.

- i. Reaktör içerisine reaktant gazlarının taşınımı
- ii. Reaktantlardan ara reaktantların oluşması
- iii. Reaktant gazlarının yüzeye doğru difüzyonu
- iv. Gazların yüzeyde adsorplanması
- v. Katı filmi oluşturmak için kimyasal reaksiyonların oluşması
- vi. Oluşan gazların alttaşı yüzeyinden desorpsiyonu
- vii. Oluşan gazların zorla yüzeyden ayrılması



Şekil 2.9. Kimyasal buhar biriktirme işlemi sırasında gerçekleşen basamakların şematik gösterimi [23]

Alttas üzerine ince film büyütölmek istendiğinde film büyütme koşullarına bağılı olarak büyüme mekanizması Şekil 2.10'da gösterildiğı gibi üçe ayrılır.



Şekil 2.10. İnce film büyütme mekanizmaları (a) Volmer-Weber (b) Frank-van der Merwe (c) Stranski-Krastanov [23]

Volmer weber: Kristal yüzeye tutunmuş olan atomlar, tabandaki atomlar yerine yanındaki atomlara bağlanarak adacıklar şeklinde film büyüme gerçekleşir. Yüzeye gönderilen atomlar birbirlerine alt tabakadan daha kuvvetli bağ ile bağlıdır. Yalıtkan tabaka üzerine metallerin büyümesi bu büyüme modunda gerçekleşir.

Frank van der Merwe: Kristal yüzeye tutunmuş olan atomlar, tabandaki atomlara bağlanarak üst üste dizili katmanlar halinde büyür. Yarı iletken tabaka üzerine yarı

iletken filmlerin büyümesi, kritik film kalınlığına kadar bu büyüme modunda gerçekleşir.

Stranski-Krastanov: Kristal yüzeye tutunmuş olan atomlar, başlangıçta tabaka halinde büyür ancak bir süre sonra gerinmenin artması, yüksek büyüme sıcaklığı gibi faktörlerden dolayı kritik kalınlığı aştığında adacıklar halinde büyümeye başlar [23]. SiGe film büyütmede germanyumun kristal kafes sabiti silisyumdan farklı olduğundan, silisyum üzerine büyütülen SiGe filminde çift eksenli basma gerinimi (negatif gerinim) meydana gelir. Büyütülen film, kritik film kalınlığını geçtiğinde Stranski-Krastanov büyümesi meydana gelir ve filmde bozulmalar başlar [24].

Günümüzde CVD yöntemleri mikro elektronik endüstrisinde yarı iletken (Si, Ge, III-V, II-VI) kaplamalarda, yalıtkan filmlerin (SiO_2 , Si_3N_4) ve metalik (Al, W) üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. CVD yöntemi kalın filmlerden ziyade ince film teknolojisi için kullanılmaktadır.

2.3.2. Epitaksiyel Film Büyütme

Epitaksi kelimesi yunanca kökenli olup üst üste dizilmiş anlamına gelir. Vakum ortamında ve belirli bir sıcaklıkta bir kristal tabaka üzerinde atomları tek kristal düzenine uygun bir şekilde dizerek büyütme tekniğidir. Büyütülen tabaka ile alt tabaka aynı ise homoepitaksiyel büyütme, büyütülen tabaka alt tabakadan farklı ise heteroepitaksiyel büyütme denir. Birçok vakum ortamında depolama işleminde düzensiz (amorf) yapılar büyürken, epitaksiyel büyütme işleminde kristal tabakalar meydana gelir. Film büyütme işlemi düşük sıcaklıkta gerçekleştiğinde polikristal filmler büyürken büyütme sıcaklığı yükseldiğinde tek kristal (epitaksiyel) filmler büyütülebilir [25].

Epitaksiyel filmler CVD yöntemiyle uygun ortam koşulları ayarlanarak büyütülebilir. CVD yöntemiyle epitaksiyel film büyütmede gerçekleşen işlemler;

- i. Reaktör haznesi H_2 gazı ile temizleme işlemi yapılır.
- ii. Reaktör haznesi yüksek sıcaklıklara ($\sim 900^\circ\text{C}$) ısıtılır.
- iii. Isıl dengeye ulaşıldıktan sonra, yüksek sıcaklıkta ($900-1000^\circ\text{C}$) birkaç dakika HCl gazı reaktöre gönderilerek hazne temizliği yapılır.
- iv. Reaktör sıcaklığı film büyütme sıcaklığına düşürülür.
- v. Film büyütme işlemi tamamlandıktan sonra reaktör sıcaklığı pul çıkarma sıcaklığına düşürülür.

vi. H_2 gaz akışı yerini N_2 gazı akışına bırakılarak sistem bekleme konumuna alınır. Transistör üretiminde epitaksiyel film büyütme tekniğinin kullanılmasının en önemi sebebi, film içerisine katılan atomların katkı konsantrasyonlarının kontrol edilebilmesidir. Katkı atomları malzemenin kimyasal bağlarını büyük oranda değiştirmese de, kristal kafes parametresini değiştirdiği için transistör teknolojisinde oldukça önemlidir [26].

Yüksek kalitede örgü uyumlu epitaksiyel filmler MBE (Moleküler Demet Epitaksi) [27,28] ya da CVD [29,30] yöntemiyle büyütülür. CVD tekniği, yarı iletkenlerde epitaksiyel ince filmlerin, metal ve yalıtkan filmlerin büyütülmesinde MBE tekniğine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. MBE tekniği ile üretilen filmler araştırma-geliştirme aşamasında olup, ticari olarak bir ürün üzerinde henüz kullanılmamıştır. Epitaksiyel film büyütme işlemi sırasında katkı atomlarının (bor, fosfor, arsenik vb.) büyütme işlemi sırasında yapıya eklenebilmesi ve büyütülen filmlerde seçicilik sağlanması MBE tekniğinde mümkün değilken CVD ile mümkündür [31]. Transistör üretiminde kullanılan CVD tekniği çalışma basıncına bağlı olarak, ultra yüksek vakumlu kimyasal buhar biriktirme (UHV-CVD 10^{-2} - 10^{-4} Torr) [32], düşük basınçta kimyasal buhar biriktirme (LPCVD 100 mTorr-1 Torr), indirgenmiş basınçta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD 1-100 Torr) [33,21], atmosferik basınçta kimyasal buhar biriktirme (APCVD 760 Torr) [34,14] olmak üzere 4'e ayrılır. UHV-CVD tekniğiyle silan ve german gaz kaynakları kullanılarak silisyum pul üzerine SiGe epitaksiyel film büyütme ilk kez Meyerson tarafından gerçekleştirilmiştir [32]. İndirgenmiş basınçta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD) yöntemiyle epitaksiyel film ilk olarak 1957 yılında Sangter tarafından büyütülmüştür [10].

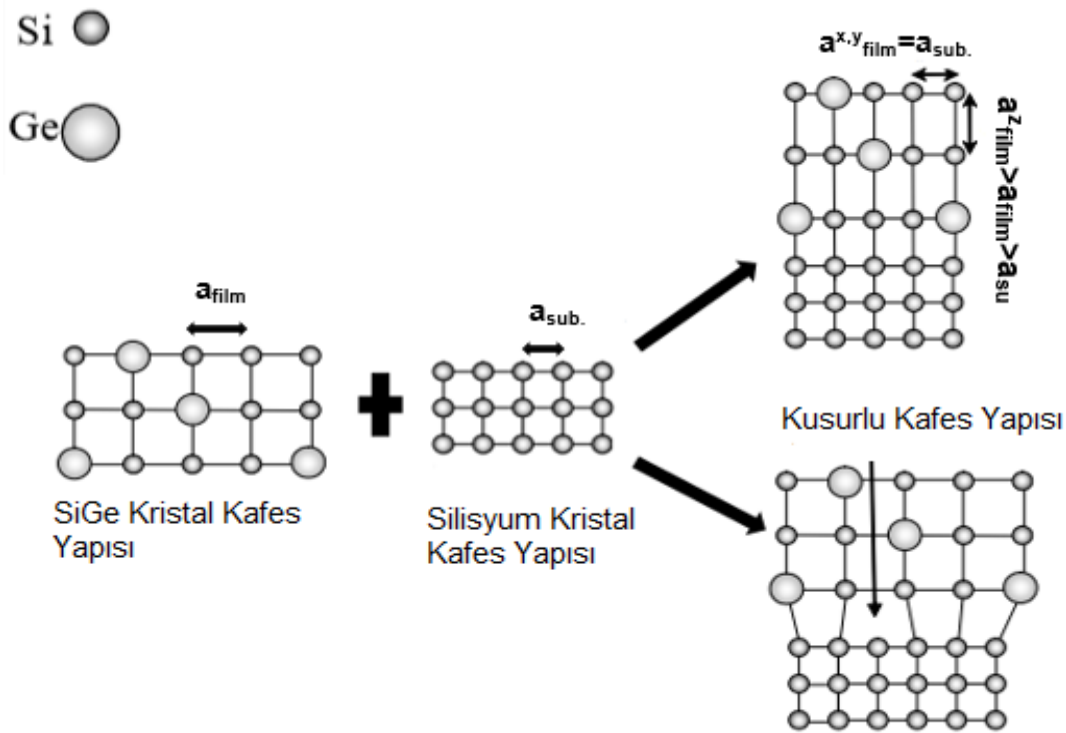
2.3.2.1. Epitaksiyel SiGe Kafes Yapısı

Silisyum ve germanyum aynı kristal kafes yapısına sahip iki malzeme olup $Si_{1-x}Ge_x$ yapısını oluşturur. Oda sıcaklığında silisyumun kristal kafes sabiti 5.431 Å olup, germanyumun kristal kafes sabiti 5.657 Å'dur. Farklı kristal kafes sabitine sahip yapılardan büyütülen filmin kristal kafes sabiti Eşitlik 2.1' de ifade edilen Vegard's yasası ile hesaplanır. Silisyum ve germanyumun kafes sabitlerinin birbirinden farklı olması kristal büyümede %4,18 uyumsuzluğa (mismatched) neden olur [35]. Bu durumda, $Si_{1-x}Ge_x$ kafes yapısındaki bağıl değişkenlik Eşitlik 2.2' deki gibi hesaplanır.

$$a_{\text{SiGe}} = (1-x)a_{\text{Si}} + xa_{\text{Ge}} \quad (2.1)$$

$$\epsilon = \frac{a_{\text{SiGe}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} = 0.00501x^2 + 0.03675x \quad (2.2)$$

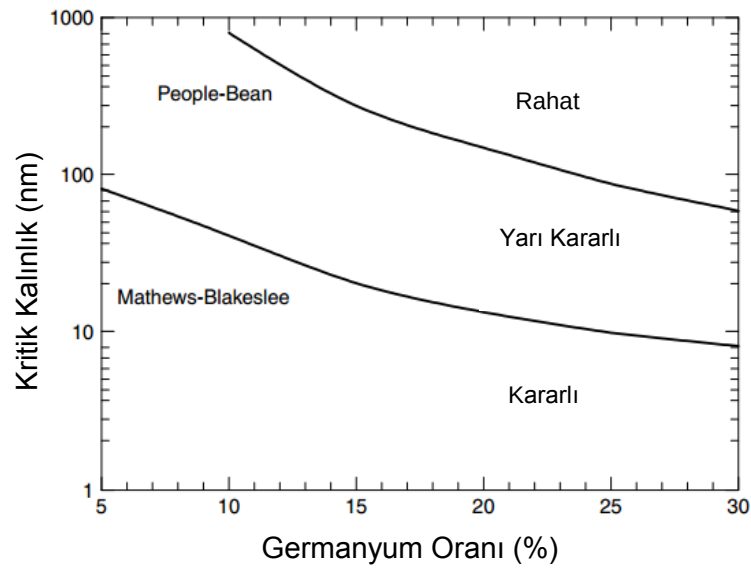
a_{SiGe} $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 'nin kafes sabiti, a_{Si} silisyumun kafes sabiti, a_{Ge} germanyumun kafes sabiti, x yapıda bulunan Ge oranı, ϵ kafes yapısındaki gerinmenin (strain) katsayısıdır. Epitaksiyel film büyütmede çekme yönünde gerinim uygulandığında gerinim katsayısı pozitif ($\epsilon > 0$), basma yönünde gerinim uygulandığında gerinim katsayısı negatif ($\epsilon < 0$) olur. Silisyumun örgü sabiti epitaksiyel olarak büyütülecek SiGe filminin örgü sabitinden büyük olduğundan büyütülecek epitaksiyel film basma gerinimi altındadır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi epitaksiyel SiGe filmin kristal kafes sabiti epitaksiyel silisyum kafes yapısından olduğundan iki tip büyüme mekanizması gerçekleşir. Belirli film kalınlığına kadar çift yönlü basma gerinimi oluşurken ve kritik kalınlıktan sonra kusurlu büyüme gerçekleşir.



Şekil 2.11. Silisyum üzerine büyütülen gerinmiş ve kusurlu formda $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ film yapısı [36]

Heteroepitaksiyel sistemlerde kafes yapısında gerinmenin katsayısı 1'den küçük ($\epsilon < 1$) olduğunda büyütülen film kristal yapıya uyumlu kabul edilir. Bu yapıya psödomorfik yapı denir. SiGe epitaksiyel film içerisindeki Ge yüzdesi arttıkça

psödomorfik tabaka içerisinde gerinmiş formda enerji depolanır. Gerinmiş formda olan yapıda belirli bir kalınlıktan sonra kafes içerisinde kusurlar oluşmaya başlayarak rahat (relax) forma geçer. Bu kalınlığa kritik film kalınlığı denir. Kritik film kalınlığını hesaplamada Matthews ve Blakeslee modeli kullanılır [37]. Mükemmel yapıda heteroepitaksiyel film büyötmek için büyötülecek olan film kalınlığının kritik film kalınlığını geçmemesi gerekir. Silisyum-germanyum epitaksiyel film büyötmeye bu kalınlık, yapıdaki Ge yüzdesi ve film büyötmeye sıcaklığının bir fonksiyonudur. Şekil 2.12'de göröldüğü gibi yapı içerisindeki Ge yüzdesi ve büyötmeye sıcaklığı arttıkça kritik kalınlık azalmaktadır.

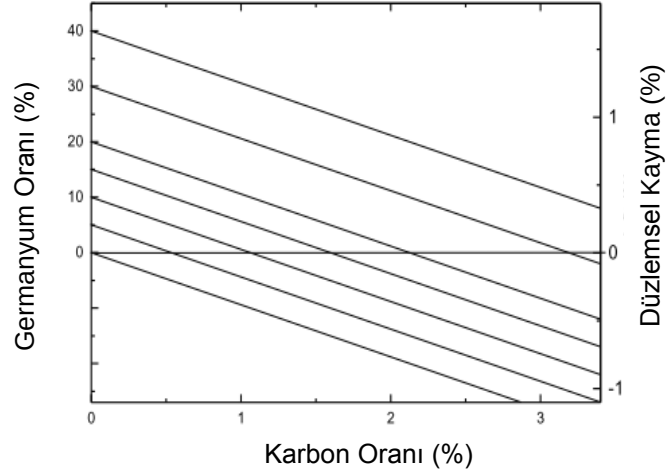


Şekil 2.12. SiGe kafes yapısında germanyum oranına bağı kritik SiGe film kalınlığı değişimi [36]

2.3.2.2. Epitaksiyel SiGe Kafes Yapısına Karbon İlavesi

SiGeC BiCMOS transistör yapısında epitaksiyel film büyötmeye filmi p tipi katkılanmak için kullanılan bor atomunun baz bölgesi dışına difüzyonu elektriksel baz genişliğinin artmasına bu da baz-kolektör jonksiyonunda parazitik bir akım bariyeri oluşmasına neden olmaktadır [35, 38]. Bu istenmeyen duruma çözüm olarak, kristal kafes yapısına %2'den az olmak koşuluyla karbon (C) atomu ilave edildiğinde bor atomlarının kolektör bölgesine difüzyonunu baskılayarak yük kaybının önleendiği görölmüştür. Karbon ilavesi %2'den fazla olduğunda kafes içerisinde Si-C bağları oluşmaktadır. Bu durum SiGeC filminin kristal yapısında kusurlara neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Şekil 2.13'de epitaksiyel film içerisinde bulunan karbon ve germanyum oranlarına göre kristal yapı içerisindeki değişim

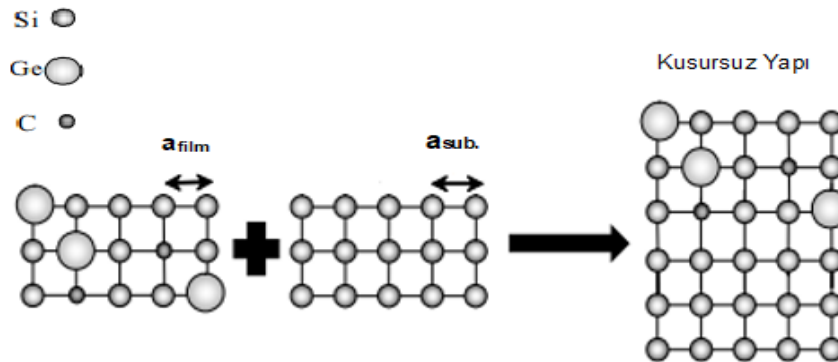
grafiği verilmiştir. 1:10 oranında karbon-germanyum bulunduğunda, karbonun varlığının SiGeC filmindeki kusurları azalttığı görülmektedir. Bu durumda SiGeC BiCMOS transistörde %20 germanyum içeren SiGeC filminde yaklaşık %2 oranında karbon bulunursa kafes içerisinde kusur olmadan, örgü uyumlu film büyütülebilir.



Şekil 2.13. Kristal kafes yapısı içerisinde karbon-germanyum oranının kristal kusurlar üzerindeki etkisi [39]

$Si_{1-y}C_y$ yapısında epitaksiyel film içerisindeki gerinim durumu $Si_{1-x}Ge_x$ yapısından tamamen farklıdır. Karbon atomları silisyum atomlarından boyut olarak daha küçük olduğundan, $Si_{1-y}C_y$ yapısının kristal kafes yapısı silisyumun kafes sabitinden daha küçüktür (Şekil 2.14). Epitaksiyel $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ filmi $Si_{1-x}Ge_x$ ve $Si_{1-y}C_y$ filmlerinin birleşimi olarak düşünülebilir. Vegard's yasasına göre yapıdaki kafes değişimi Eşitlik 2.3'deki gibi hesaplanabilir [40].

$$\epsilon = \frac{a_{SiC} - a_{Si}}{a_{Si}} = 0.10504y^2 - 0.44909y \quad (2.3)$$



Şekil 2.14. Silisyum üzerine büyütülen $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$ film yapısı [36]

Aynı zamanda Şekil 2.14’de görüldüğü gibi büyük boyutlu Ge atomlarının yanı sıra küçük boyutlu karbon atomlarının kafeste bulunması kristal yapının basma gerinimini düşürerek kristal kafes yapısının rahat forma geçmesini geciktirir [41,42]. Kristal yapı içerisindeki karbon atomları yer alan form ya da ara yer form olmak üzere iki şekilde yer alır. Epitaksiyel film büyütme sonrasında uygulanan ısı işlemler boyunca bor atomlarının kolektöre difüzyonunu engelleyen karbon atomunun iki tip mekanizması vardır. Birincisi, Eşitlik 2.4’de verilen yer alan formda bulunan karbon atomunun (C_s) silisyumun ara yer formuyla (I) birleşerek ara yer formundaki karbon atomuna (C_i) dönüşmesidir.



İkincisi ise, Eşitlik 2.5’de verilen yer alan formdaki karbon atomunun (C_s) parçalanarak ara yer formdaki karbon atomu (C_i) ve boşluk (V) oluşturmasıyla meydana gelen Frank-Turnbull reaksiyonudur.



Bor atomlarının difüzyonu ancak yer alan formda bulunan karbon atomları ile mümkündür. Osten ve Pressel düşük sıcaklık ve yüksek büyüme hızında epitaksiyel SiGeC filmi büyütüldüğünde yer alan formdaki karbon atomunun ara yer formdaki karbon atomuna oranının arttığını göstermiştir [39]. Film içerisindeki karbon yüzdesi arttıkça yüksek büyüme hızında yapıda bulunan karbon atomlarının neredeyse tamamı yer alan formdadır. Tam tersi olarak, düşük büyüme hızında ara yer formdaki karbon atomlarında artış olur. Ara yer formdaki karbon atomları baz bölgesinde bulunan bor iyonlarının kolektöre difüzyonuna engel olmaktadır [42].

Transistör uygulamasında epitaksiyel SiGeC filmi büyütmede karbon kaynağı olarak CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 gibi hidrokarbonlar, $Si(CH_3)_4$ ve $(Si(CH_3CH_2)_4$ gibi organosilikon bileşikler kullanılmıştır. Yüksek kalitede örgü uyumlu epitaksiyel SiGeC film büyütmede en uygun karbon kaynağının metilsilan (SiH_3CH_3) olduğu görülmüştür [43].

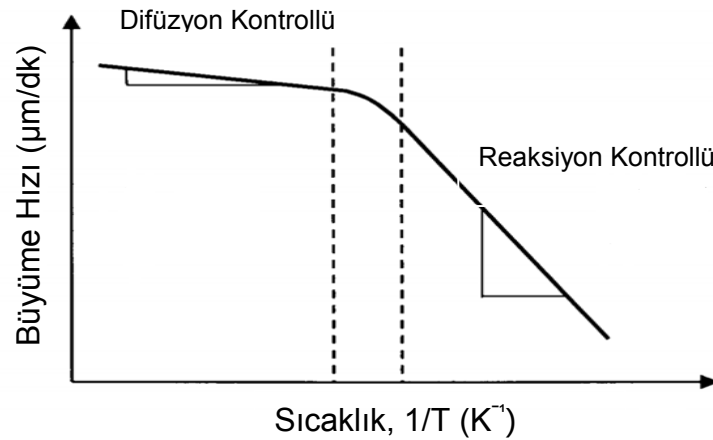
2.3.3. Reaksiyon Kinetiği

Epitaksiyel SiGeC film büyütmede CVD tekniğinin kullanılmasının iki temel sebebi vardır. Bunlar; CVD tekniğinin maliyetinin düşük olması ve silisyum kafes içerisinde bulunan germanyum, karbon atomlarının kompozisyonlarının kontrol edilebilmesidir. Aynı zamanda, kimyasal film büyütme reaksiyonlarında, reaksiyon

hızını etkileyen faktörler tepkimeye giren maddelerin konsantrasyonları, büyütme basıncı, büyütme sıcaklığı ve tepkimeye giren maddelerin fiziksel durumudur. Bütün bu parametrelerin kontrolü CVD tekniği ile mümkündür. Sıcaklık reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Russel ve Breiland yaptığı çalışmada SiGe filmin çok düşük basınçlardaki (<1 Torr) reaksiyon kinetiğini incelemiştir. Bu çalışma ile çok düşük basınçlarda sıcaklık arttıkça kristal yapı içerisindeki germanyum oranının azaldığı, yüksek sıcaklıklarda (>600°C) ise sıcaklık arttıkça germanyum oranının arttığı bilgisi edinilmiştir. Stoker ve Hildreth ise SiH₄, GeH₄ ve SiH₃CH₃ gazları kullanılarak büyütülen SiGeC filmin reaksiyon kinetiği incelemiştir. Sıcaklıkla reaksiyon hızının değişiminin etkisi Arrhenius eşitliği ile açıklanır. Eşitlik 2.6'da verilen Arrhenius eşitliğine göre reaksiyon hızı sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir.

$$\ln k = \ln A \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (2.6)$$

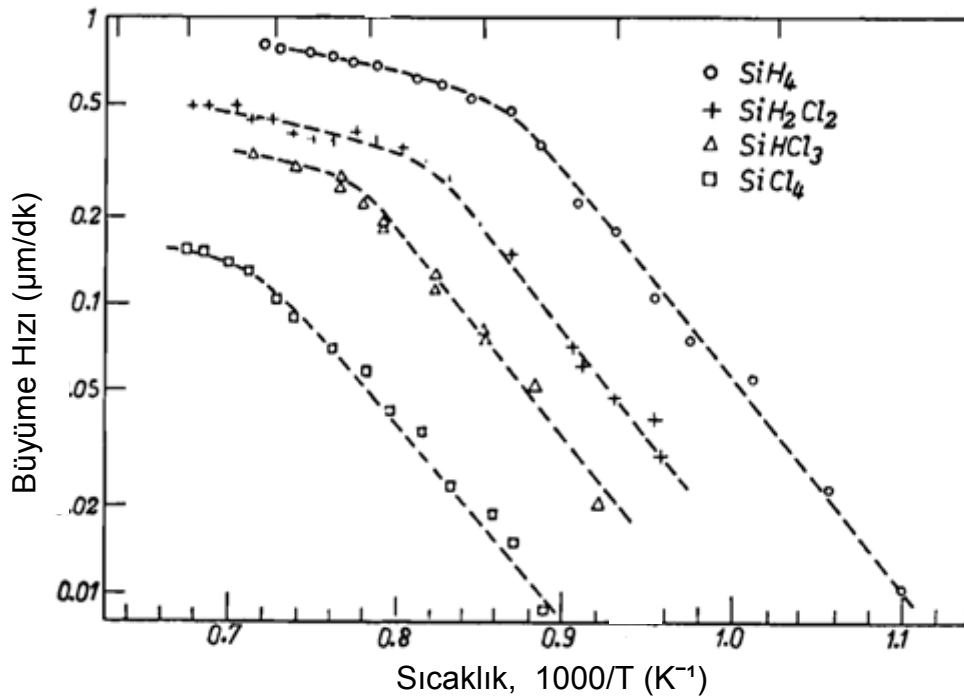
Eşitlikte yer alan k reaksiyon hız sabiti, A moleküllerin birbirine çarpma hızı, E_a reaksiyon aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti, T ise mutlak sıcaklıktır. Kimyasal film büyütme reaksiyonlarında film büyüme hızının (veya hız sabitinin) logaritmik değeri, değişen mutlak sıcaklık ile genellikle doğrusaldır. Arrhenius eşitliğine göre sıcaklık ile birlikte artan büyüme hızlarında difüzyon kontrollü ve kimyasal reaksiyon kontrollü olmak üzere iki bölge bulunur. Şekil 2.15 'de verilen Arrhenius eğrisine göre eğrinin sağ bölgesindeki eğim reaksiyonun aktivasyon enerjisini gösterir. Bu bölgeye kimyasal reaksiyon kontrollü bölge denir. Bu bölgede sıcaklıklar çok düşük aralıkta olsa dahi büyüme hızını büyük oranda etkiler. Burada büyüme hızı gazların akış hızına bağlı olmayıp, yüzeyde gerçekleşen reaksiyon hızına bağlıdır.



Şekil 2.15. Sıcaklığa bağlı film büyüme hızı değişim grafiği [44]

Grafiğin sol bölgesinde, sıcaklık arttıkça yüzey reaksiyon hızı eksponansiyel olarak artarak belirli bir sıcaklığın üzerinde bütün gaz molekülleri yüzeyde reaksiyona girer. Bir süre sonra yeni gönderilen gaz kütlesinden bağımsız hale gelen reaksiyon kütle taşınım limitine (difüzyon kontrolüne) girer. Bu durumda reaktör içerisindeki akışkanın dinamiği yüzeyde büyüyen filmin büyüme hızı ve homojenliği açısından önemli rol oynar [44-45].

Literatürde SiGeC BiCMOS teknolojisinde epitaksiyel SiGeC film büyütmede silisyum kaynağı olarak, silan (SiH_4), disilane (Si_2H_6), trisilan (Si_3H_8) diklorosilan (SiH_2Cl_2), triklorosilan (SiHCl_3), tetraklorosilan (SiCl_4) germanyum kaynağı olarak, german (GeH_4) ve digerman (Ge_2H_6) kullanılmaktadır. Şekil 2.16'da verilen grafikte görüldüğü gibi aynı koşullar altında büyüme hızı en düşük olan gaz kaynağı silan iken, büyüme hızı en yüksek olan ise tetraklorosilandır [45].

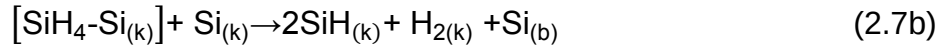


Şekil 2.16. Farklı silisyum kaynaklarında sıcaklığa bağlı film büyüme hızı değişim grafiği (Bütün reaktantlar ~0.1 mol H_2 gazı içerir) [25]

Mikroelektronik endüstrisinde büyütülen epitaksiyel filmlerde silisyum kaynağında yaygın olarak diklorosilan ve silan gaz kaynakları kullanılmaktadır. Silan gaz kaynağı kullanılarak büyütülen silisyum ve silan ve german gaz kaynağı kullanılarak büyütülen SiGe film büyütme mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.

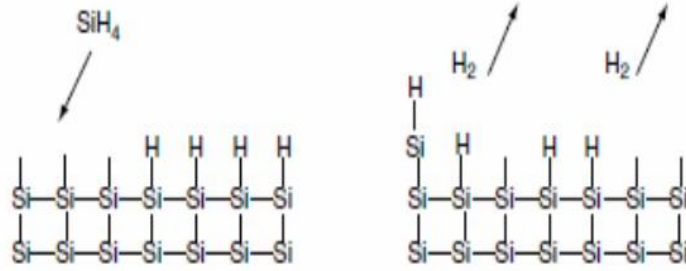
Silan (SiH₄) ile Silisyum Film Büyütme

Silan molekülleri iki silisyum bağıyla yüzeye adsorbe olurken, hidrojen atomları da yüzey pasifleştirme işlemini gerçekleştirir. Silisyum yüzeyindeki silan molekülünün hidrojenle parçalanma reaksiyonları aşağıda verilmiştir.



Eşitliklerdeki, Si_(s) silisyum yüzeyindeki boş silisyum atomlarını, Si_(b) yığın yapıdaki atomları gösterir. Yüksek sıcaklıkta film büyütme işleminde Eşitlik 2.7'de verilen silan gazının adsorpsiyonu daha hızlı gerçekleştiğinden reaksiyonu belirleyen adım adsorpsiyon adımıdır. Ancak düşük sıcaklıklarda reaksiyon hızını hidrojen desorpsiyonu (Eşitlik 2.8) belirler.

Eşitlik 2.8'de SiH bağları koparak silisyum yüzeyinde Si bağları oluşur ve film büyümeye başlar. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi silan molekülleri silisyum atomu ve hidrojen atomuna parçalanır. Hidrojen gazı, reaktör içerisinde silan gazı birlikte silisyum film büyütme yardımcı olurken, aynı zamanda silisyum yüzeyine adsorplanarak başka gazların yüzeye tutunmasını engeller [45].



Şekil 2.17. Silan gaz kaynağı ile silisyum üzerine tek kristal silisyum film büyütmenin şematik gösterimi [10]

Silan adsorpsiyonunda reaksiyon hızı birinci dereceden olup ifadesi Eşitlik 2.9'da verilmiştir.

$$r_a(\text{SiH}_4) = k_a \left(\frac{P_{\text{SiH}_4}}{RT} \right) \sigma_{\text{Si}} \quad (2.9)$$

Bu eşitlikte, $r_a(\text{SiH}_4)$ silanın adsorpsiyon hızı, k_a silan adsorpsiyon hız sabiti, P_{SiH_4} silanın kısmi basıncı, σ_{Si} ise silisyumda boşlukların yüzey kaplama katsayısıdır. Hidrojen desorpsiyonu da birinci receden olup reaksiyon hız ifadesi Eşitlik 2.10'da verilmiştir.

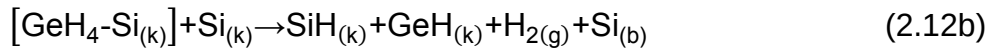
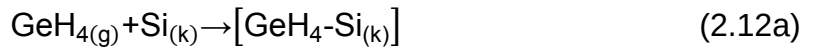
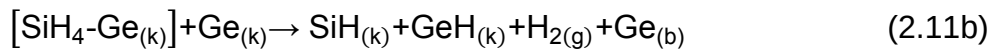
$$r_d(H_2)=k_d \sigma_{SiH} \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte, $r_d(H_2)$ hidrojen desorpsiyon hızı, k_d hidrojen desorpsiyon hız sabiti, σ_{SiH} adsorplanmış hidrojenin yüzey kaplama katsayısıdır.

Silan gazının hidrojen gazıyla parçalanma reaksiyonunda klor iyonu bulunmadığından tersinmez bir reaksiyondur. Yapısında klor bulunan silisyum kaynakları ile karşılaştırıldığında düşük sıcaklıkta epitaksiyel film büyütme daha uygundur. Büyütme işlemi düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden reaksiyonun belirleyici faktörü hidrojen desorpsiyonudur. Düşük sıcaklık süresince silisyum yüzeyinin hidrojen atomları ile bağlanması, film yapısını, katkı iyonlarının dağılımını ve film kalitesini bu da reaksiyon kinetiğini etkiler. Silan prosesinin dezavantajı yapısında klor iyonu bulunmadığından yalıtkan filmlere karşı seçici olmayıp, gaz fazındaki nükleasyon olma olasılığı yüksektir. Bu durum yüksek gaz akış hızı, indirgenmiş basınç ve düşük sıcaklık ile minimize edilebilir [46].

Silan (SiH₄) ve German (GeH₄) ile SiGe Film Büyütme

German gazının hidrojen gazıyla parçalanma reaksiyonu silan molekülünün parçalanma reaksiyonuna benzer olup iki reaksiyon da birinci derecedendir. Silan ve german moleküllerinin bir araya gelerek oluşturacağı yapıda german tarafında silan adsorpsiyonu gerçekleşirken (Eşitlik 2.11) silan tarafında german adsorpsiyonu (Eşitlik 2.12) gerçekleşir.



Diklorosilan (SiH₂Cl₂) ile SiGe Film Büyütme

Hidrojenle parçalanma reaksiyonu tersinir bir reaksiyon olup yapısında Cl^- bulunduğundan, büyüyen kristal atomlar yüzeyden aşınarak tekrardan gaz fazına döner. Bu mekanizma çok tabakalı epitaksiyel cihaz yapılarında p-n jonksiyonunda katkı profilinin bozulmasına neden olur. Bu istenmeyen durum büyütme sıcaklığının düşürülmesiyle baskılanabilir.

2.3.4. Bor Katkılı SiGe Film Büyütme

Yarı iletken kristaller bor atomu ile katkılандığında p tipi özellik göstermekte, bu durum da katkılanmanın kristal yapının optik ve elektriksel özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıklamaktadır. 0,25 µm SiGeC BiCMOS teknolojisinde transistör baz bölgesine büyütülen epitaksiyel SiGeC filmi yaklaşık 1×10^{19} atom/cm³ bor atomu ile p tipi katkılanmaktadır. Katkılama işlemi film büyütme işlemi sırasında (in-situ) veya film büyütme işlemi tamamlandıktan sonra implantasyon olarak dışarıdan (ex-situ) yapılabilir. Tez çalışmasında RPCVD yöntemiyle epitaksiyel SiGe film büyütmede bor katkılama işlemi film büyütme esnasında (in-situ) yapılır. Burada film büyütme işlemi süresince diboran (B₂H₆) gazı silan ve german gazlarına ilave edilir. Öncelikle diboran gazı ısıl işlemle Eşitlik 2.13'deki gibi BH₃ gazına parçalanır. Daha sonra silisyum kafes içersine Eşitlik 2.14'deki gibi yerleşir.



Bir malzeme içersinde atomların yayılım hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı olarak tanımlanan akı, J ile ölçülür. 1. Fick yasası net atom akısını açıklar (Eşitlik 2.15).

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.15)$$

Eşitlikte J, atomların yayılım akısı (atom/(m²s)), D, molekülün difüzyon katsayısı (cm²/saniye), C derişim (g/cm³) ve x, molekülün yüzeye paralel olarak kat ettiği mesafeyi (cm) gösterir. Zamana bağılı olarak difüzyonun değışimi ise 2. Fick yasası ile açıklanır (Eşitlik 2.16). Kafes içersindeki atomun dağılma hızını tanımlayan kısmi diferansiyel denklemdir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

Difüzyon katsayısı Arrhenius eşitliği ile açıklandığında (Eşitlik 2.17)

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) \quad (2.17)$$

Eşitlikte, E_a aktivasyon enerjisini, k reaksiyon hız sabitini, T ise mutlak sıcaklığı gösterir.

2.3.5. Düşük Sıcaklıkta Epitaksiyel Film Büyütme (LTE)

Transistör teknolojisinin gelişmesiyle birlikte boyutlar küçülmüş büyütülen epitaksiyel film tabakaları da incelmeye başlamıştır. Epitaksiyel filmin incelmesi film içerisine katılan katkı iyonlarının transistörün baz bölgesinden kolektör bölgesine dağılmasına neden olmuştur. Bu durumda transistörde katkı iyonlarının dışarıya yayılmasını engellemek için büyüme hızının düşürülüp reaksiyonun yüzey kontrollü olması gerekmektedir. Arrhenius eşitliğine göre (Eşitlik 2.6) film büyüme hızı sıcaklığın bir fonksiyonu olup, düşük sıcaklıklarda reaksiyon yüzey kontrollüdür [25].

HBT ve MOSFET yapılarında ısı bütçenin düşürülmesi (düşük sıcaklıkta film büyütme) yapıdaki alaşımların kompozisyonlarının kontrol edilebilmesi, katkı profilinin iyileştirilmesi ve yüzeyin film büyütme öncesi katılanmaması açısından kritiktir. SiGeC BiCMOS transistörün baz bölgesine p tipi bor katkılı epitaksiyel SiGeC film büyütülmektedir. Epitaksiyel SiGeC film büyütme sonrası uygulanan ısı işlemler (~1000°C) katkı iyonlarının baz bölgesinden kolektör bölgesine difüzyonuna neden olmaktadır. Bu durum transistörde p-n jonksiyonunu etkileyip, kolektör akımının düşmesine dolayısıyla da akım kazancının azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple SiGeC epitaksiyel film büyütme ve sonrasındaki işlemlerde sıcaklığın düşürülmesine ihtiyaç duyulmuştur.

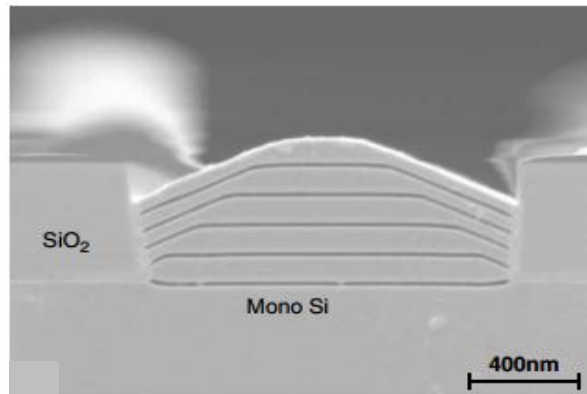
Düşük sıcaklıkta epitaksiyel film büyütme düşük basınçta ve yüzeyin hidrojenle pasivasyonu ile mümkündür. Literatürde kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle düşük sıcaklıkta epitaksiyel filmler 350-650°C arasında büyütülür. Sıcaklık aralığının bu kadar geniş olmasının sebebi büyütme basıncının birkaç mTorr mertebesinde atmosferik basınca kadar değişmesinden kaynaklanır [22,47,48]. Düşük sıcaklıkta epitaksiyel film büyütmenin belirli zorlukları şu şekilde sıralanabilir.

- Film büyütme sıcaklığı düştükçe, reaktör hazne içerisindeki oksijen ve nem miktarı kritik hale gelir.
- 850°C'den daha yüksek sıcaklıklarda büyüme hızı kütle taşınımı ile kontrol edilir. Bu durumda yüzeydeki atomların bir kısmı dışarda kalıp, büyüme adsorpsiyon tarafından sınırlanır. Ancak, düşük sıcaklıkta büyüme hızı reaksiyon kinetiği ile kontrol edilir. Bu durumda büyüme sıcaklığı ve gazların kısmi basıncı; büyüme hızı ve katkı konsantrasyonlarının dağılımını etkiler.

➤ Epitaksiyel film büyütme öncesi silisyum yüzeyindeki doğal silisyumdioksitin alınması büyütülen filmin kalitesini etkileyen en önemli parametredir. Film büyütülmeden önce yüzeydeki doğal silisyumdioksiti alabilmek için proses reaktör haznesinde hidrojen ile 900-1000°C gibi yüksek sıcaklıkta ısıtma (bake) işlemi ile silisyum yüzeyinin temizlenmesi sağlanır. Bu işlem, yüzeyi oksit bakımından temizlediğinden ancak bu şartlarda düşük sıcaklıkta dislokasyonsuz film büyütme mümkündür [10].

2.3.6. Seçici Epitaksiyel Film Büyütme (SEG)

Transistör temel katmanlarından emiter, baz ve kolektör katmanlarının elektriksel iletkenliğinin sağlanabilmesi için metalizasyon işlemi sonrası her bir katmanının kontak işlemi gerçekleştirilir. Transistör baz bölgesinin kontak tasarımı iki gruba ayrılmıştır. Epitaksiyel film büyütmeden önce baz kontağı şekillenirse seçici epitaksiyel film büyütme (SEG), film büyütme sonrası baz kontağı şekillenirse seçici olmayan epitaksiyel film büyütme (NSEG) olarak isimlendirilmiştir [49]. Transistör teknolojisinin gelişmesiyle birlikte SiGe HBT transistörlerde osilasyon frekansını artırmak ve parazitik dirençleri düşürmek için büyütülecek olan epitaksiyel filmler transistörün baz bölgesine seçici olarak büyütülmüştür. Seçici epitaksiyel film büyütmede silisyum üzerine tek kristal yapı büyürken, Şekil 2.18’de görüldüğü gibi yalıtkan filmlerin (silisyumdioksit, silisyum nitrür) üzerinde herhangi bir film büyüme işlemi gerçekleşmez.



Şekil 2.18. Silisyum üzerine 850°C’de büyütülen seçici tek (mono) kristal silisyum filmine ait SEM görüntüsü [10]

Seçici film büyütme için kullanılan en yaygın yöntem film büyütme gazlarına klor içeren (HCl, Cl₂) gazların eklenmesidir. Klor atomları silisyum ve germanyum atomlarının yüzey mobilitelerini arttırarak, silisyum üzerinde büyüyen nükleasyonların

filmle birleşmesine izin vermeden yüzeyden uzaklaştırılmasını sağlar. Böylece silisyum yüzeyinde birbirini takip eden büyüme/ aşındırma döngüsü meydana gelir. Silisyumdioksit veya silisyum nitrür filmlerin üzerine yönelen bu atomlar filmin büyüyeceği açık pencerelere doğru difüzyonu gerçekleştirir ve film büyüme işlemi başlar. HCl akışı az olursa silisyumdioksit veya silisyum nitrür filminin üzerinde poli(silisyum-germanyum) nükleasyonları büyümeye başlar. HCl akışı fazla olursa silisyum-germanyum filmini aşındırma miktarı artarak yüzeyi pürüzlendirir. Sonuç olarak HCl akışının en uygun bir değeri vardır.

Yüksek sıcaklık, yüksek büyüme hızı ve uzun film büyütme süresinde seçici film büyütme oldukça zordur. Bunun sebebi silisyumdioksit film üzerinde silan moleküllerinin yüzeye tutunma olasılığının olmasıdır [50-52]. Silisyumdioksit filmi üzerinde çekirdekler oluşabilir. Silisyumdioksit üzerinde oluşan çekirdek yapısı çok küçükse, kristal büyüme gerçekleşmeden atomlar çekirdekten ayrılır. Çekirdek yapısı kritik boyutu aşarsa, çekirdekler hızlıca büyüyeceğinden seçicilik azalır. Yüksek sıcaklık ve yüksek büyüme hızı büyük boyutta çekirdeklenmenin olmasına neden olur. Yüzeyde büyüyen çekirdeklerin boyutu, yüzey enerjisi ve serbest halde bulunan atomların yoğunluğuna bağlı olarak değişir [23].

2.3.7. SiGeC Film Üzerine Tek Kristal Silisyum (SiCap) Film Büyütme

SiGeC BiCMOS teknolojisiyle üretilen transistörde transistörün baz bölgesine büyütülen p-tipi katkılı SiGeC film üzerine katkısız, tek kristal, seçici silisyum (SiCap) filmi büyütülür. Transistör teknolojisinde SiCap filminin büyütülmesinin gereklilikleri;

- Transistörün baz bölgesine epitaksiyel film büyütüldükten sonra emiter bölgesine yaklaşık 1×10^{20} at/cm³ konsantrasyonda n-tipi fosfor katkılı polikristal film büyütülür. Transistör üretim süreçlerinden uygulanan yüksek sıcaklıktaki işlemlerde, yüksek katkılı fosfor atomlarının transistör emiter bölgesinden baz bölgesindeki tek kristal SiGeC film içerisine difüzyonuna engel olmak,
- Transistörde baz bölgesine büyütülen tek kristal SiGeC kristal formunu tekrardan tek kristal silisyum formuna dönüştürerek emiter polikristal silisyum filmin tek kristal silisyum üzerinde büyümesini sağlamak,
- Emiter-baz bağlantısındaki kapasiteyi ayarlamak,
- SiGeC filminin kararlılığını artırmak,

- Tek kristal SiGeC film büyütmede silisyum üzerine farklı kristal örgü sabitinde SiGeC filmi büyütüldüğünde yapıda kayma bozulmasının oluşmasını engellemektir [53-56].

2.4. Karakterizasyon Teknikleri

Yarı iletken karakterizasyon teknikleri, büyütülen kristal yapının fiziksel özellikleri hakkında bilgi verir. Karakterizasyon sonucu elde edilen veriler, incelenen yarı iletken kristal yapının amacına uygun alanlarda kullanımı için uygunluğu açısından esastır. Bu bölümde tez çalışması kapsamında büyütülen filmlerin karakterizasyonu için kullanılan ölçüm teknikleri anlatılmıştır.

2.4.1. Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Difraksiyonu (HRXRD)

Bir malzemenin atomik yapısı yüksek çözünürlüklü elektron mikroskopları (SEM, TEM) ile tayin edilebilirken, malzeme içerisindeki yapıların tayini için kırınım tekniklerine ihtiyaç vardır. Katıların atomik, moleküler ve kristal yapısını incelemek için en çok kullanılan yöntem X-ışını kırınımıdır. X-ışınları görünür bölge ışınlarından daha düşük dalga boyuna (0.1-100 Å) sahip olup daha yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Katıdaki atomlar arası mesafe, X-ışınları dalga boyu mertebesinde olduğundan kristal filmlerin atomik yapısı X-ışını kırınım desenleri yardımı ile incelenebilir. Numune yüzeyine θ açısı ile gelen bir X-ışını demetinin bir kısmı yüzeydeki atomlar tarafından saçılırken, bir kısmı da ikinci atomik tabakaya geçerek burada saçılmaya uğrar. X-ışını saçılması ve kırınımının temel prensibi olan Bragg Kanunu, gelen ışının dalga boyu λ , atomik düzlemler arası mesafe d , yansıma açısı θ olmak üzere Eşitlik 2.18'deki gibi ifade edilir.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.18)$$

HRXRD ince filmlerin yapı karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Epitaksiyel filmlerin karakterizasyonu için HRXRD kullanıldığında elde edilen bilgiler aşağıda tanımlanmıştır.

- ✓ Gerinim katsayısı (ϵ): Silisyum ile büyütülen epitaksiyel film arasındaki kristal kafes yapısı farklılığından kaynaklı filmde meydana gelen gerinimin katsayısı belirlenir.
- ✓ Film kalınlık ve kalitesi: Çok katmanlı yapılarda silisyum üzerine büyütülen epitaksiyel filmlerin kalınlıkları silisyum pikinin yanında görülen küçük pikler arasındaki mesafe ile belirlenir.

✓ Kompozisyon oranı: Büyütülen epitaksiyel filmin yapısındaki bileşenlerin oranı belirlenir [57-59].

2.4.2. Spektroskopik Elipsometre (SE)

Modern yüzey incelemeleri, yarı iletken filmler, soğurucu ve soğurucu olmayan malzemeler üzerindeki filmlerin incelenmesinde, numune yüzeyine zarar vermeyen bir teknik olduğundan son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elipsometre, ışığın bir malzemedan kırılması veya yansıması sırasında kutuplanmasında (polarizasyon)oluşan değişimi ölçme ve analiz etme yöntemidir. Işık kaynağından çıkan ışık polarizör açısı bilinen bir polarizörden geçirilerek polarizasyon durumu bilinen bir ışık elde edilir. Kutuplanmış ışık, örnekle etkileşerek ışığın kutuplanma durumunda bir değişime sebep olur. Bu değişim analizör ile farklı açılara ayarlanarak yansıyan veya geçen ışığın şiddeti fotodedektörden ölçülür. Deneysel teknikle elde edilen veriler Fresnel katsayılarına bağlı olan genlik oranı (Ψ) ve faz değişimi (Δ) ile ifade edilir. Bu iki parametre ile malzemenin optik özellikleri ve fiziksel boyutları hakkında bilgi edinilebilir.

Işığın gelme düzlemine paralel kutuplu yansıma genliğinin büyüklüğü, R_p , dik kutuplanmış yansıma genliğine, R_s , oranı elipsometredeki genlik oranı (Ψ) ifadesini Eşitlik 2.19'da vermektedir.

$$\tan \Psi = \frac{R_p}{R_s} \quad (2.19)$$

R_p ve R_s arasındaki faz farkı, elipsometrenin ikinci ölçüm parametresi olan faz değişimi (Δ) ile ifadesi Eşitlik 2.20 ile ifade edilir.

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \quad (2.20)$$

Burada Δ_p paralel yönde polarize olan ışığın faz farkı, Δ_s dik yönde polarize olan ışığın farkıdır.

Işığın kutuplanmadaki değişim matematiksel olarak ρ ile gösterilir. Elipsometrede ışığın kutuplanmasındaki değişimin faz farkı ve genlik parametreleriyle ifadesi Eşitlik 2.21'de verilmiştir.

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} \quad (2.21)$$

Elde edilen veriler her bir malzemenin optik sabitlerine ve ölçülen filmin özelliklerine bağlıdır. Böylece optik sabitleri bilinen malzemenin film kalınlığı, film kalınlığı bilinen

malzemeninse optik sabitleri bulunabilir. Elipsometrede ölçüm analizinin yapılabilmesi için ölçülen örneğin modelinin oluşturulması gerekir. Bu model örnekteki katmanların kalınlıkları ve optik parametreleri girilerek oluşturulabilir [60-63].

Literatür verisiyle örnek arasındaki uyumun matematiksel karşılığı olan ortalama karesel hata (MSE) değeri ölçümün bir çıktısı olup program tarafından hesaplanır (Eşitlik 2.22).

$$MSE = \frac{1}{2N-M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\psi_i^{\text{mod}} - \psi_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\psi,i}^{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{\text{mod}} - \Delta_i^{\text{exp}}}{\sigma_{\Delta,i}^{\text{exp}}} \right)^2 \right] = \frac{1}{2N-M} x^2 \quad (2.22)$$

Eşitlikte, i tek dalga boyu ve gelme açısı, σ standart sapma, N ψ ve Δ nın toplam sayısı, M arıtılan parametre sayısı, exp ve mod ise deneysel ve teorik verileri simgeler.

2.4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar malzeme yüzeyindeki atomlarla etkileşerek malzeme yüzeyindeki topografyası ve kompozisyon yapısına bağlı farklı sinyaller üretir [64,65].

2.4.4. Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM)

Görüntüleme ve kırınım tekniklerini bir arada kullanarak malzemelerinin yüzey morfolojisi ve kristal yapısı hakkında bilgi edinmek için kullanılan karakterizasyon tekniğidir. Çalışma prensibinde malzeme üzerine paralel elektron demeti gönderilerek kırınımına uğrayan ve yansıyan ışınları malzemenin altında toplar. Kırınımına uğrayan elektronlar katı örneğin kırınım yapısının altında bir yapıda gözlenir. Bu bilgi örnek maddenin atomik yapısının belirlenmesinde kullanılır. Epitaksiyel film büyütmede en önemli parametre kristal yapı içerisindeki dislokasyon yoğunluğunun (threading dislocation density) belirlenmesidir [66,56].

2.4.5. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS)

SIMS analizi, katıların yüzeyi veya derinliklerini analiz etmede kullanılan çok hassas bir tekniktir. Yüksek vakum ortamında numunelerin bir kaç mikrometre derinliğe kadar elementel, inorganik yapısı hakkında bilgi elde etmede kullanılan yüzey analitik tekniğidir. SIMS derinlik profilleri için kullanım modu Dinamik SIMS'tir.

Dinamik SIMS’de yüksek enerjili birincil iyon demeti kullanılarak yüzey aşındırılır. Yüzeyden çıkan/seçilen elementlerin ikincil iyon sayma hızının zamanın fonksiyonu olarak incelenmesiyle derinlik profili elde edilir. Dinamik SIMS’in birkaç nanometre seviyesinde çözünürlüğü bulunmaktadır. Bu teknikte iyon kaynaklarından elde edilen oksijen ve sezyum iyonları birkaç keV voltaj altında hızlandırılarak analiz edilecek numune yüzeyine çarptırılır ve yüzeyden sıçratılan iyonlar, manyetik alan altında kütlelerine göre ayrılır ve detektörle sayılır [68-70].

Günümüzde SIMS analizi başta yarı iletken malzemelerin analizi olmak üzere katı malzemelerin analizinde, numune yüzeyinde veya derinliklerinde bulunan elementlerin konsantrasyonu hakkında bilgi elde etmek için kullanılmaktadır. Yarı iletken teknolojisinde transistör katmanlarındaki katkı iyonlarının konsantrasyon miktarı ve büyütülen filmlerin derinlik profili hakkında bilgi edinmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektropozitif ve düşük iyonlaşma enerjisine sahip olan germanyum (Ge), oksijen (O₂) ve karbon (C) analizi için oksijen (O₂) atomları, bor (B) gibi elektronegatif iyonların saçtırılmasında ise sezyum (Cs) atomları kullanılır.

2.4.6. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi

Yarı iletken malzemenin elektriksel karakterizasyonunda standart olarak kullanılan yöntem akım-gerilim (I-V) ölçümleridir. Elektriksel karakterizasyonu için öncelikle transistörün doğru akım şartları belirlenir. Bu amaçla kurulan devrelere kutuplanma devreleri denir. DC polarma devreleri transistör baz, kolektör, emiter uçlarından statik akımların akmasını sağlar. Transistör girişinde herhangi bir AC sinyal yok ise transistör üzerindeki gerilim veya akımlar çalışma gerilim ve akımları olarak sabit değerlerde tutulur. Transistörün çıkış karakteristiği kolektör-emiter uçlarından alınır. Baz akımındaki değişime bağlı olarak, kolektör akımı (I_c) ve kolektör-emiter gerilimi ölçülür. Kolektör akımının baz akımına oranı transistörün akım kazancı ifadesini verir (Eşitlik 2.23).

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (2.23)$$

Bipolar transistörlerde transistörün baz, emiter ve kolektör katmanlarındaki filmlerin kalınlığı ve katkı konsantrasyonu, transistörün akım kazancı, belverme gerilimi, RF performansını iyileştirmek için optimize edilmesi gereken parametrelerdir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında Epsilon 2000 (ASM) cihazında indirgenmiş basınçta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD) yöntemiyle silisyum pul üzerine örgü uyumlu tek kristal silisyum-germanyum-karbon (SiGeC) ve bu film üzerine tek kristal silisyum (SiCap) filmleri büyütülmüştür. İlk olarak, farklı sıcaklıklarda epitaksiyel SiGeC film büyütülerek minimum film büyütme sıcaklığı belirlenmiştir. Büyütülen SiGeC filmin büyüme hızı, yapıdaki germanyum oranı ve film kalitesi spektroskopik elipsometre ile karakterize edilmiştir. İkinci olarak, büyütülen filmin sadece silisyum üzerinde büyümesi, silisyum nitrür filmi üzerinde büyümemesi amaçlanmıştır. Silisyuma karşı seçicilik için silisyum pul üzerinde yan duvarlarında silisyum nitrür film bulunan transistör baz çukuru oluşturulmuş ve bu bölgeye SiGeC filmi büyütülmüştür. Seçicilik çalışmasının karakterizasyonu için optik mikroskop, spektroskopik elipsometre ve SEM cihazları kullanılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci basamağında SiGeC filmi üzerine, emiter bölgesine katılan fosfor iyonlarının baz bölgesine difüzyonunu engellemek için katkısız tek kristal silisyum (SiCap) filmi büyütülmüştür. Epitaksiyel SiGeC film büyütme işleminde olduğu gibi SiCap filminde de çalışılabilecek minimum sıcaklık değeri belirlenmiştir. Tek kristal silisyum (SiCap) film büyütmenin ikinci aşamasında ise silisyuma karşı seçicilik çalışması yapılmıştır. Büyütülen filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonunda yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD), ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS), geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) cihazları kullanılmıştır. Büyütülen SiGeC ve SiCap filmleri SiGeC HBT transistörde uygulanmış ve akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır.

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler, deneysel çalışmalar, büyütme ve karakterizasyon yöntemleri kullanım amacına yönelik olarak tanıtılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

CZ (czochralski) yöntemiyle büyütülmüş, (100) yönelimli, direnci 8-12 Ω .cm, kalınlığı 500 μ m, çapı 100mm silisyum pullar Siebert Wafer (Almanya) firmasından satın alınmıştır.

Epitaksiyel film büyütmede kullanılan silan (SiH_4), german (GeH_4 , %1,5), azot (N_2), diboran (B_2H_6 , %0,1), metilsilan (SiH_3CH_3 , %1,5) gazları Linde Gaz A.Ş (Almanya) firmasından, hidrojen (H_2 , %99.999) gazı Air Liquide Gaz Sanayi ve Ticaret A.Ş (Türkiye) firmasından, hidroklorik asit (HCL , %99.9999), Versum Materials (ABD) firmasından satın alınmıştır.

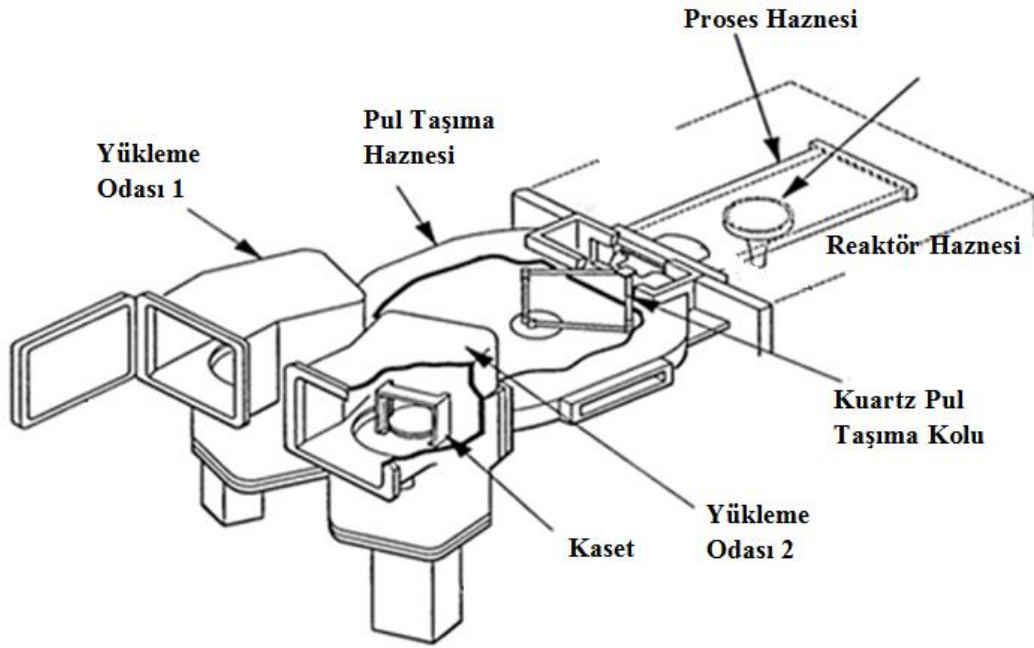
3.2. İndirgenmiş Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme (RPCVD) Sistemi

RPCVD yöntemiyle büyütülen epitaksiyel filmler, son yıllarda geliştirilmekte olan SiGeC BiCMOS transistörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında film büyütme işlemi için Epsilon 2000 (ASM) cihazı kullanılmıştır. Epsilon 2000 (ASM) RPCVD reaktörü, iki adet pul yükleme bölümü, pulu reaktöre taşıyan bölüm ve proses haznesi olmak üzere Şekil 3.1’de gösterildiği gibi üç ana bölümden oluşmaktadır. Sistemin çalışma sıcaklığı 575 ile 1200°C, çalışma basıncı ise 10-760 Torr arasında ayarlanabilmektedir. Epitaksiyel film büyütme için cihaz içerisine örnek yükleme ile takip eden işlem basamakları şu şekildedir:

- Pullar kaset içerisinde yükleme haznesine yerleştirilir.
- Hazne kapağı kapatılarak uygulanan vakum ile haznenin içerisindeki kirliliklerin uzaklaştırılması sağlanır.
- Kuartz kol yardımıyla bir adet pul yükleme haznesinden proses haznesindeki SiC kaplı grafit tabaka üzerine iletilir.
- Proses haznesindeki grafit tabakanın dönmesi sayesinde pul yüzeyine homojen bir şekilde film büyütülür.

Reaktör haznesi içerisinde yer alan 12 adet tungsten-halojen lamba ile reaktör iç sıcaklığı yüksek değerlere (500-1100°C) kadar çıkarılmaktadır. Reaktör içerisindeki sıcaklık, pul taşıyan (susceptor) parçanın merkezinde, önünde, arkasında ve kenarında olmak üzere dört bölgeden ısıölçer ile ölçülmektedir. Tez kapsamında reaktör haznesinde film büyütme işleminde silisyum kaynağı olarak silan (SiH_4), germanyum kaynağı olarak german (GeH_4), p tipi katkılama için diboran (B_2H_6), borun dışarıya difüzyonunu engellemek için karbon kaynağı olarak metilsilan (SiH_3CH_3) kullanılmıştır. Ortama hidroklorik asit (HCl) beslemesi ile filmi silisyuma seçici olarak büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Epitaksiyel filmi p tipi katkılamak için kullanılan gazın karıştırılması ve istenilen oranlarda seyreltilmesi için hidrojen (H_2) gazı kullanılmıştır. Proses haznesindeki kirlilikleri temizlemek ve pul yüzeyinde

istenmeyen silisyumu aşındırarak uzaklaştırmak için hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır. İşlem sonunda pulu dışarı almak üzere cihazın kapağı açıldığında ortamdaki gelen kirliliklerin içeriye girmesini önlemek için pul yükleme-boşaltma bölümü ve pulun reaktöre taşındığı bölüm daima azot (N_2) gazı ile temizlenerek ortam kirliliklerden korunmaktadır. Reaksiyon sonucu açığa çıkan gazların atmosfere verilmeden önce nötrleştirilmesi için gaz temizleyici üniteye (scrubber) gönderilmektedir.



Şekil 3.1.Epsilon 2000 (ASM) reaktör bölümü

3.3. Epitaksiyel Film Büyütme Öncesi Yüzey Temizlik ve Pasivasyonu

Tez çalışması kapsamında silisyum pul üzerine film büyütme işlemi öncesinde, pul yüzeyinde olası organik ve metalik kirlilikleri temizlemek amacıyla kimyasal banyolarda ıslak temizlik işlemi yapılmıştır. Bu işlem bütün epitaksiyel film büyütme çalışması için başlangıç adımı olup değiştirilmeden uygulanmıştır. Pul temizlik işlemi 4 adımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Ön Temizlik: Bu işlem için sülfürik asit ve hidrojen peroksit ile hacimce “3:1” oranında ($H_2SO_4:H_2O_2$) hazırlanan “Piranha” çözeltisi kullanılmıştır. Pullar, $125^\circ C$ ’de 10 dakika süresince hazırlanan kimyasal banyoda işlem görmüş ve daha sonra ultra

saf su içerisinde su direnci 10 MΩ.cm olana kadar yıkama işlemi yapılmıştır. Bu işlemin sonunda pul yüzeyindeki inorganik ve organik kirlilikler uzaklaştırılmıştır.

➤ SC-1: Silisyum pulların yüzeyindeki organik film kalıntılarını ve partikülleri uzaklaştırmak için amonyum hidroksit, hidrojen peroksit ve suyun hacimce “0,25:1:5” oranında (NH₄OH:H₂O₂:H₂O) karışımı ile bir kimyasal banyo hazırlanmıştır. Pullar 70°C’de 10 dakika süresince hazırlanan kimyasal banyoda işlem görmüş ve daha sonra ultra saf su içerisinde su direnci 10 MΩ.cm olana kadar yıkama işlemi yapılmıştır.

➤ SC-2: Silisyum pulların yüzeyindeki atomik ve iyonik kirlilikleri uzaklaştırmak için hidroklorik asit, hidrojen peroksit ile suyun hacimce “1:1:6” oranında (HCl:H₂O₂:H₂O) karışımı ile bir kimyasal banyo hazırlanmıştır. Pullar 70°C’de 10 dakika süresince hazırlanan kimyasal banyoda işlem görmüş ve daha sonra ultra saf su içerisinde su direnci 10 MΩ.cm olana kadar yıkama işlemi yapılmıştır.

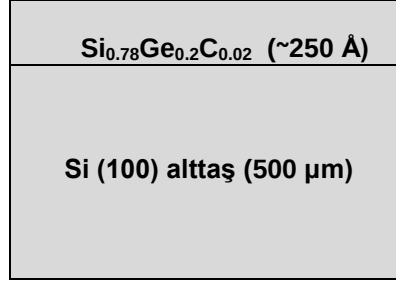
➤ HF Pasivasyonu: Bu işlem Marangoni cihazı ile yapılmıştır. Cihaz temelde yüzey pasivasyonu, yıkama ve kurutma olmak üzere 3 işlemi bir arada yapar. Pullar, cihaza yerleştirildikten sonra yüzeyi pasifleştirmek için hidroflorik asit ve suyun hacimce “1:200” oranında (HF:H₂O) karışımı ile hazırlanan çözeltide 2 dakika işlem görmüştür. Daha sonra ultra saf su ile 10 dakika yıkama işlemi yapılmıştır. Son olarak da pullara isopropil alkol ve azot (IPA/N₂) karışımı ile 5 dakika süresince kurutma işlemi uygulanmıştır.

3.4. Epitaksiyel SiGeC Büyütme

SiGeC film büyütme işlemi RPCVD yöntemiyle Epsilon 2000 (ASM) cihazında yapılmıştır. Epitaksiyel film büyütülecek pullar temizlenip yüzey pasivasyonu yapıldıktan sonra RPCVD cihazının pul yükleme bölümüne yerleştirilmiştir. Epitaksiyel film büyütmek için gerekli olan proses parametreleri (sıcaklık, basınç, süre, gazların akış hızı vb.) tanımlanmıştır. Reaktör içerisinde gerçekleşen işlemler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

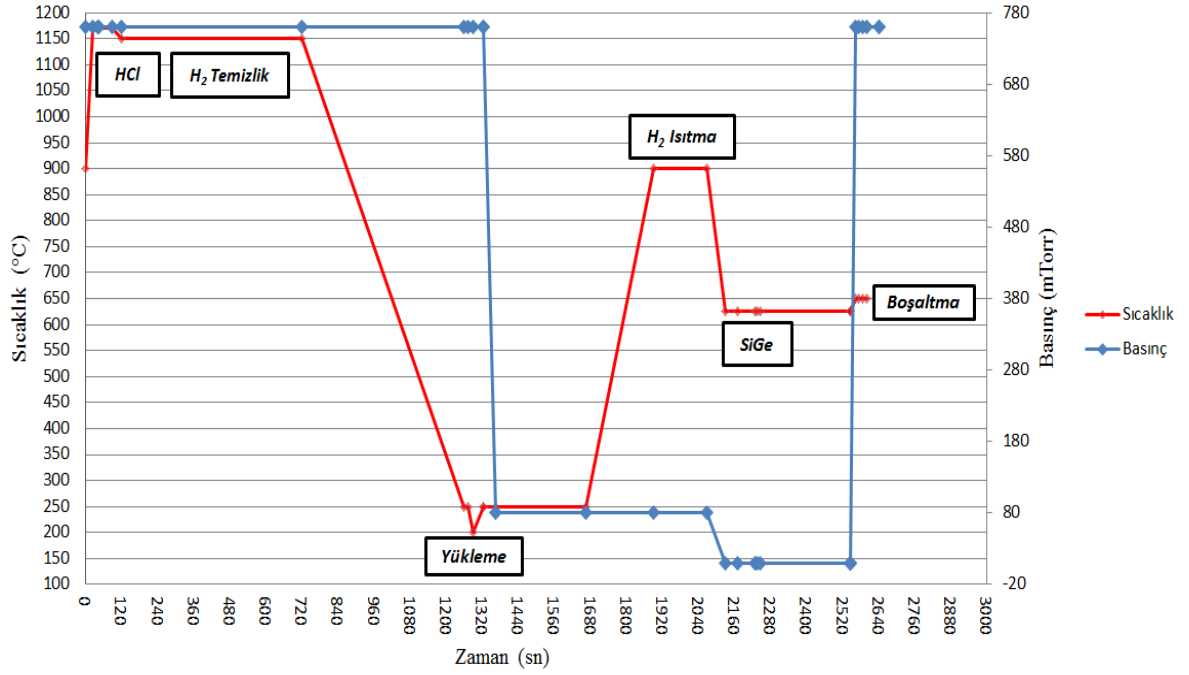
➤ Atmosferik basınçta reaktör sıcaklığı 900°C’den 1170°C’ye çıkarılarak 12 adet halojen lambanın kontrolü yapılmıştır. Böylece yüksek sıcaklık işlemleri öncesi lambaların hepsinin doğru bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

- Reaktör duvarlarında daha önce yapılan proseslerden kalıntı olması ihtimaline karşı 35 saniye süresince reaktör haznesinden atmosferik basınç ve 1170°C'de HCl gazı (19 lt/dk) ile H₂ gazı (60 lt/dk) geçirilerek reaktör temizleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra reaktör haznesi içindeki HCl kalıntılarından kurtulmak için 10 dakika süresince atmosferik basınçta 1150°C'de H₂ gazı (60 lt/dk) ile temizleme işlemi yapılmıştır.
- Pul yükleme işlemi 200°C'de yapılması gerektiğinden öncelikle atmosferik basınçta 1150°C'den 250°C'ye 9 dakika süresince sıcaklık düşürülmüştür. Hareketli robot kolu yardımıyla silisyum pul yükleme odasından alınarak reaktör içerisine atmosferik basınçta 200°C'de yüklenmiştir.
- Pul yüzeyindeki oksijen kirliliği epitaksiyel film büyütmede filmin kalitesini önemli ölçüde etkilediğinden, puldaki oksijen kirliliğinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu temizleme işlemi, 80 Torr basınçta 900°C'de reaktörden yüksek sıcaklıkta H₂ gaz akışı ile yapılır. Bu işlem için, öncelikle 250°C'deki reaktör iç basıncı atmosferik basınçtan 80 Torr'a 40 saniyede düşürülerek 5 dakika boyunca H₂ gazı (20 lt/dk) geçirilmiştir. Daha sonra, 80 Torr'da sıcaklık 250°C'den 900°C'ye kademeli bir şekilde 4 dakikada yükseltilmiştir. Bu sıcaklık ve basınçta H₂ gazı (20 lt/dk) 3 dakika süresince reaktöre gönderilmiştir.
- 80 Torr basınçta reaktör sıcaklığı 900°C'den uygulanan sıcaklığa (550-650°C) kademeli olarak 1 dakikada düşürülmüştür. Daha sonra proses basıncı olan 10 Torr'a 40 saniyede düşürülmüştür.
- Gaz hatlarında bulunan gazların yenilenmesi amacıyla proseste kullanılacak olan gazlar açılarak 100 saniye boyunca reaktöre gönderilmeden dışarıya (vent) atılmıştır. Daha sonra GeH₄ akışı 5 ml/dk'dan 125 ml/dk'a 10 saniyede yükseltilmiştir. Epitaksiyel film büyütülecek gazlar: SiH₄ (50 ml/dk), GeH₄ (125 ml/dk), H₂ (20 lt/dk), B₂H₆ (ADC:8,4), SiH₃CH₃ (10 ml/dk) 5 dakika süresince reaktöre gönderilmiştir.
- Büyütme sonrası bütün gazlar kapatılarak 600°C'de pul önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edilmiştir. Silisyum pul yüzeyine büyütülen epitaksiyel filmin şematik gösterimi Şekil 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.2. Silisyum pul yüzeyine epitaksiyel SiGeC film büyütme şematik gösterimi

Reaktör içerisinde meydana gelen basınç ve sıcaklık değişim eğrisi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SiGeC film büyütme işlemi sırasında reaktör içerisindeki zamana bağlı basınç-sıcaklık değişim grafiği

3.4.1. Sıcaklığın Epitaksiyel SiGeC Film Büyütme Üzerine Etkisi

Katkı iyonlarının difüzyonunu engellemek için filmin büyüme hızı da dikkate alınarak epitaksiyel film büyütmede çalışılabilecek minimum sıcaklık değeri belirlenmiştir. Epsilon 2000 (ASM) cihazında silisyum kaynağı olarak silan kullanıldığında çalışılabilecek minimum sıcaklık 600°C olup, bu sıcaklığın altındaki değerlerde büyüme hızının çok düşeceği belirtilmiştir. Bu bilgi doğrultusunda SiGeC film büyütmede 550-650°C arasında bütün büyütme parametreleri (ön temizlik şartları, SiH_4 , GeH_4 , B_2H_6 ve SiH_3CH_3 akış hızı, büyütme basıncı) sabit tutularak sıcaklığın büyüme hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Epitaksiyel film büyütmede proses parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. SiGeC film büyütme parametreleri

Epitaksiyel Film	Sıcaklık (°C)	Basınç (Torr)	SiH ₄ (ml/dk)	GeH ₄ (ml/dk)	B ₂ H ₆ (ml/dk)	SiH ₃ CH ₃ (ml/dk)	H ₂ (lt/dk)
SiGeC	550-650	10	50	125	8.3	10	20

Büyütülen filmlerin karakterizasyonları spektroskopik elipsometre ile yapılmıştır. Elipsometre ile filmin kristal kalitesi, kalınlığı ve yapıdaki bileşimler tayin edilmiştir.

3.4.2. Seçici Epitaksiyel SiGeC Film Büyütme

SiGeC BiCMOS transistörün baz çukuru yan duvarlarında silisyum nitrür film bulunmaktadır. Büyütülen epitaksiyel filmin transistör üretiminde uygulanabilmesi için büyütülen filmin yalnızca silisyum üzerinde büyümesi, silisyum nitrür film üzerinde büyümemesi gerekmektedir. Transistör üretiminde bu çalışmayı yapmak zaman ve maliyet açısından oldukça zorlu olduğundan daha kısa adımlardan oluşan transistör yapısına benzer yapılarla çalışılmıştır. Silisyuma karşı seçiciliğin test edilmesi için hazırlanan pulların hazırlık adımları aşağıda özetlenmiştir.

➤ Düz silisyum pula, öncelikle Bölüm 3.3’de anlatıldığı gibi temizlik ve pasivasyon işlemi uygulanmıştır. Temizliği yapılan silisyum pullara baz katmanları adı verilen sandviç yapısında üst üste OPON (Silisyumdioksit-Polisilisyum-Silisyumdioksit-Silisyum nitrür) filmleri büyütülmüştür. İlk katman olarak 720°C’de 600 mTorr’da düşük basınçta kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemiyle 500Å silisyumdioksit filmi büyütülmüştür. İkinci katman olarak 580°C’de 100 mTorr’da LPCVD yöntemiyle 2000Å polisilisyum filmi büyütülmüştür. Üçüncü katman olarak 720°C’de 200 mTorr’da LPCVD ile 1800Å silisyumdioksit filmi büyütülmüştür. Son katman olarak da 800°C’de 230 mTorr’da LPCVD ile 600Å silisyum nitrür filmi büyütülmüştür. Şekil 3.4a’da üst üste büyütülen katmanlar şematik olarak gösterilmiştir.

➤ En üst katmanında silisyum nitrür film bulunan pul yüzeyine ışığa duyarlı malzeme (fotorezist) döner kaplama yöntemiyle kaplanmış, Şekil 3.4b’de gösterildiği gibi ışıklandırma ile baz çukuru maskesi kullanılarak şekillendirme yapılmıştır.

➤ Şekil 3.4c’de gösterildiği gibi şekillenmeyen kısımlardaki sırasıyla silisyum nitrür, silisyumdioksit ve polisilisyum tabakalarına kuru aşındırma işlemi uygulanarak baz çukuru açılmıştır.

- Şekillendirme esnasında kullanılan fotorezist tabakasının silinmesi için baz çukuru açılan pul, hacimce (3:1) oranında ($H_2SO_4:H_2O_2$) hazırlanan kimyasal banyoda $125^{\circ}C$ 'de 1 saat işlem görmüştür. Daha sonra ultra saf su içerisinde su direnci 10 M Ω .cm olana kadar yıkama işlemi devam etmiştir. Bölüm 3.3'de anlatıldığı gibi temizlik işlemi uygulanmıştır.
- Şekil 3.4d'de gösterildiği gibi $800^{\circ}C$ 'de 230 mTorr'da LPCVD ile 300Å silisyum nitrür ve $720^{\circ}C$ 'de 600 mTorr'da LPCVD ile 1200Å silisyumdioksit filmleri sırasıyla büyütülmüştür.
- Büyütülen silisyum nitrür ve silisyumdioksit tabakası Şekil 3.4e'de gösterildiği gibi kuru olarak aşındırılmıştır.

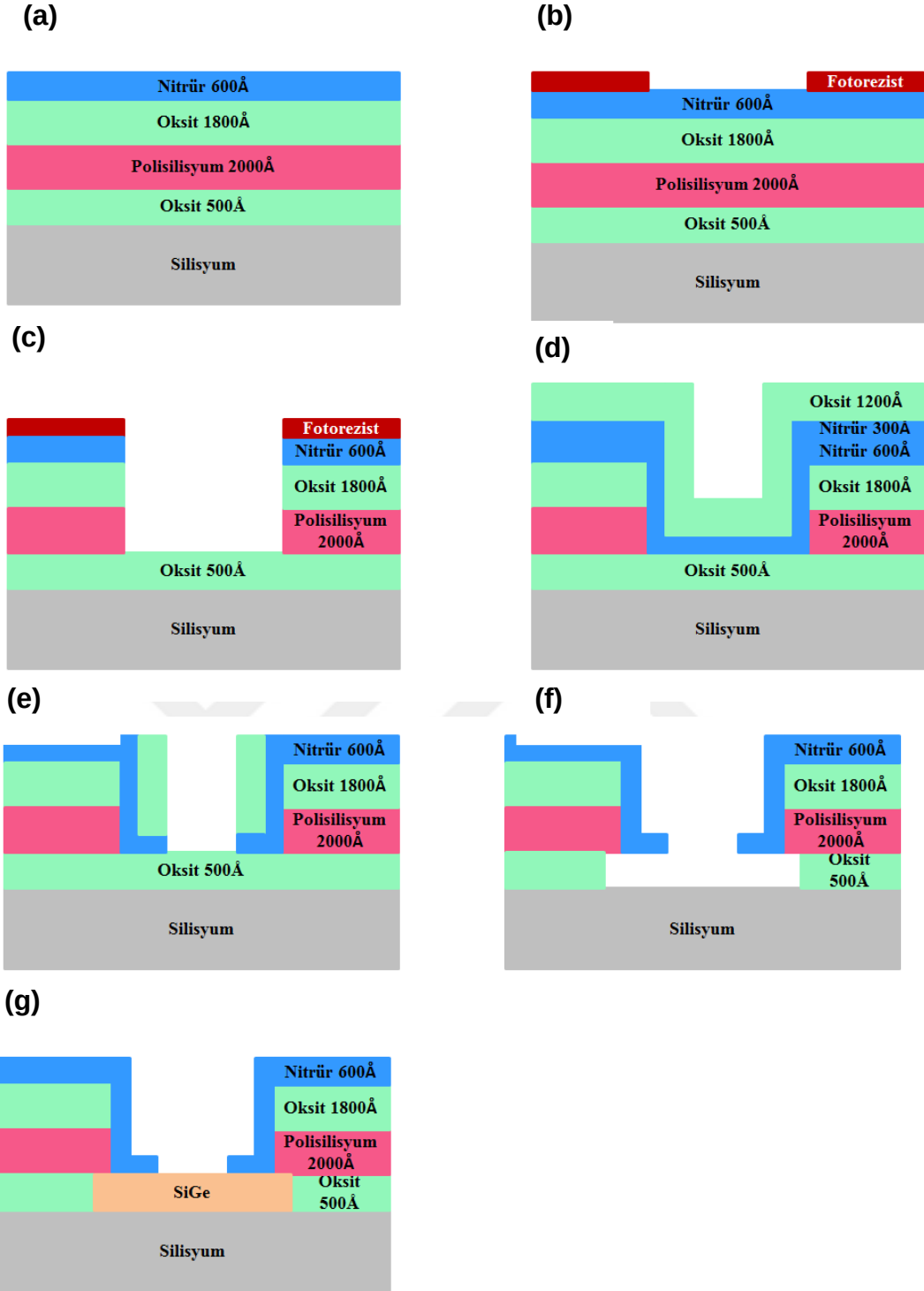
Baz katmanlarının ilki olan 500Å silisyumdioksit Şekil 3.4f' de gösterildiği gibi hidroklorik asit/su ($HF:H_2O$) çözeltisinde hacimce 1:10 oranında hazırlanan çözeltide kimyasal tank içerisinde 2 dakika aşındırılmıştır. Daha sonra ultra saf su içerisinde su direnci 10 M Ω .cm olana kadar yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Silisyumdioksitin tamamen aşındığından (silisyum tabakasına inildiğinden) emin olmak için elipsometre ölçümünde silisyum üzerindeki silisyumdioksit kalınlığı 0Å ölçülmüştür. Son olarak, tekrar temizlik işlemi uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra pullar epitaksiyel SiGeC film büyütme için hazır hale gelmiştir. Film büyütmede seçicilik sağlayabilmek için proses gazları içerisine belirli oranda HCl gazı eklenmiştir. HCl gazı içerisinde bulunan Cl^- iyonları, büyütülen epitaksiyel filmin aynı zamanda aşındırılmasına neden olduğundan en uygun HCl akışı belirlenmiştir.

Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi $625^{\circ}C$ 'de farklı HCl akışlarında diğer proses parametreleri sabit tutularak seçici epitaksiyel SiGeC film büyütülmüştür.

Çizelge 3.2. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiGeC film büyütme parametreleri

Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Basınç (Torr)	SiH_4 (ml/dk)	GeH_4 (ml/dk)	B_2H_6 (ADC)*	CH_3SiH_3 (ml/dk)	H_2 (lt/dk)	HCl (ml/dk)
625	10	50	125	8,4	10	20	15
625	10	50	125	8,4	10	20	20
625	10	50	125	8,4	10	20	25

*ADC: Atomik Katkı Konsantrasyonu (Diboran gazının hidrojen gazı ile seyreltilerek sisteme gönderilme katsayısı)



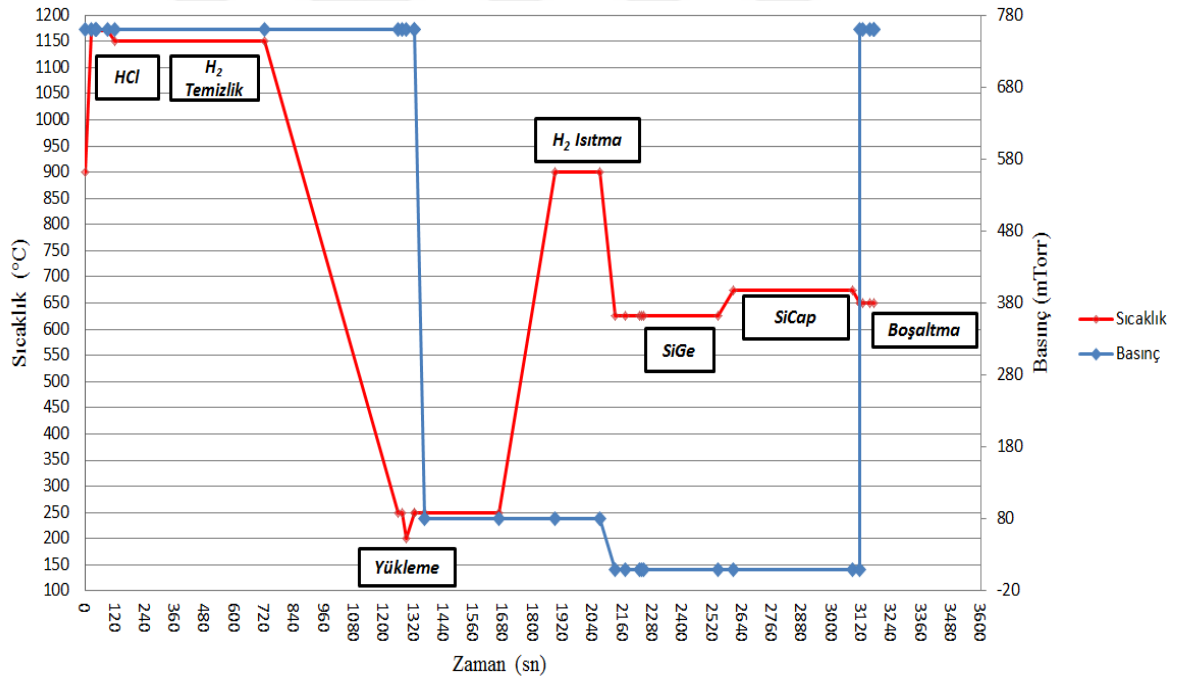
Şekil 3.4. Seçici epitaksiyel SiGeC film büyütme işlem basamaklarının şematik gösterimi; (a) Silisyum pul üzerine sırasıyla 500 Å silisyumdioksit, 2000 Å polisilisyum, 1800 Å silisyumdioksit, 600 Å silisyum nitrid filmleri büyütme (b) Baz çukuru fotorezist şekillendirme (c) Baz çukuru kuru aşındırma (d) Yan duvar 300 Å silisyum nitrid ve 1200 Å silisyumdioksit filmleri büyütme (e) Yan duvar kuru aşındırma (f) Polisilisyum altı silisyumdioksit filmi ıslak aşındırma (g) Seçici epitaksiyel SiGeC film büyütülen pul örneği

3.5.Epitaksiyel SiCap Film Büyütme

Epitaksiyel SiCap film büyütme işlemi Epsilon 2000 (ASM) cihazında yapılmıştır. Epitaksiyel SiGeC film büyütmedeki aynı işlem basamakları takip edilerek film büyütme işleminde SiH₄ ve H₂ gazı ile Şekil 3.5’de gösterildiği gibi tek kristal SiGeC film üzerine tek kristal silisyum (SiCap) film büyütülmüştür. Şekil 3.6’da reaktör içerisinde gerçekleşen basınç ve sıcaklık değişim eğrisi gösterilmiştir.

SiCap (~150 Å)
Si _{0.78} Ge _{0.2} C _{0.02} (~250 Å)
Si (100) alttaş (500µm)

Şekil 3.5. Silisyum pul yüzeyine epitaksiyel SiGeC ve SiCap film büyütme şematik gösterimi



Şekil 3.6. SiCap film büyütme işlemi sırasında reaktör içerisindeki basınç-sıcaklık değişim grafiği

3.5.1. Sıcaklığın SiCap Film Büyütme Üzerine Etkisi

Epitaksiyel SiCap film büyütmenin ilk basamağında film büyüme hızına göre RPCVD reaktöründe büyütülebilecek minimum sıcaklık değeri belirlenmiştir. 625°C’de büyütülen SiGeC filmi üzerine 625-700°C arasında 4 farklı sıcaklıkta

SiCap filmi büyütülmüştür. SiGeC ve SiCap film büyütme için proses parametreleri Çizelge 3.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. SiGeC ve SiCap film büyütme parametreleri

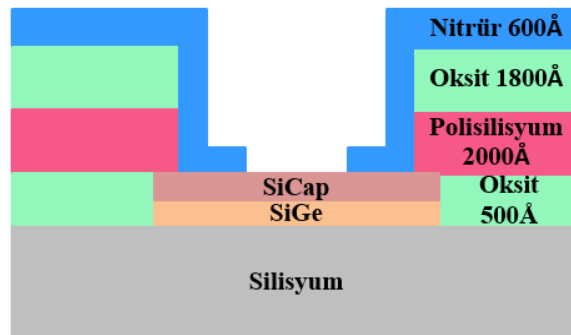
Epitaksiyel Film	Sıcaklık (°C)	Basınç (Torr)	B ₂ H ₆ (ADC*)	CH ₃ SiH ₃ (ml/dk)	SiH ₄ (ml/dk)	GeH ₄ (ml/dk)	H ₂ (lt/dk)
SiGeC	625	10	8,4	10	50	125	20
SiCap	625-700	10	-	-	50	-	20

*ADC: Atomik Katkı Konsantrasyonu (Diboran gazının hidrojen gazı ile seyreltilerek sisteme gönderilme katsayısı)

Büyütülen filmlerin karakterizasyonu spektroskopik elipsometre ile yapılmıştır.

3.5.2. Seçici Epitaksiyel SiCap Film Büyütme

SiGeC BiCMOS transistör baz çukurunda silisyum üzerine öncelikle SiGeC filmi bu filmin üzerine de SiCap filmi büyütülür. SiCap filmi de tıpkı SiGeC filmi gibi baz çukuru yan duvarlarındaki silisyum nitrür filminde büyümeyip, silisyuma karşı seçici olması gerekmektedir. Epitaksiyel SiGeC filmi büyütmede olduğu gibi SiCap filminde de silisyum üzerinde film büyümesi ve silisyum nitrür üzerinde film büyümemesi için büyütme gazları içerisinde belirli oranda HCl gazı eklenmiştir. Bölüm 3.4.2'de anlatıldığı gibi silisyum nitrür şekilli pullar hazırlanmıştır. Epitaksiyel film büyütme adımına gelindiğinde Şekil 3.7'de gösterildiği gibi 625°C'de büyütülen SiGeC filmi üzerine 675°C'de farklı akış hızlarında HCl ilavesi ile (15, 25, 35 ml/dk) SiCap filmi büyütülmüştür. Film büyütme parametreleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Silisyum nitrür şekilli silisyum pulun baz çukuruna büyütülen epitaksiyel SiGeC ve SiCap filmleri şematik gösterimi

Çizelge 3.4. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiCap film büyütme parametreleri

Sıcaklık (°C)	Basınç (Torr)	SiH ₄ (ml/dk)	H ₂ (lt/dk)	HCl (ml/dk)
675	10	50	20	15
675	10	50	20	25
675	10	50	20	35

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirmesi sunulmuştur. Çalışma kapsamında silisyum kaynağı olarak silan (SiH_4) kullanılmış ve silan ile düşük sıcaklıkta, gerinmiş yapıda, silisyuma seçici ve tek kristal SiGeC ve SiCap filmleri büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu spektroskopik elipsometre, SEM, TEM, SIMS ve HRXRD analizleri ile yapılmıştır. Analiz sonuçlarında büyütülen filmlerin yapısal olarak SiGeC BiCMOS transistörün baz bölgesinde kullanımına uygun olduğu görülmüştür. Elektriksel olarak uygunluğunu test etmek için büyütülen filmler, SiGeC BiCMOS teknolojisinin ilk adımı olan SiGeC HBT üretiminde uygulanmış ve transistörün elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır.

4.1. Epitaksiyel SiGeC Film Büyütme

Tez çalışmasının hedefi, büyütülen epitaksiyel filmin SiGeC BiCMOS transistör teknolojisinde uygulanabilmesidir. $0,25\ \mu\text{m}$ SiGeC BiCMOS teknolojisinde transistörün boyutları gereği baz çukuruna büyütülecek olan epitaksiyel SiGeC filmin kalınlığı $\sim 250\ \text{\AA}$, kristal kafes içerisindeki germanyum oranı ise %15-20 arasında olması gerekmektedir [72]. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak epitaksiyel SiGeC film büyütmede film büyüme hızı saptanarak, transistör üretiminde uygulanabilecek minimum film büyütme sıcaklığı belirlenmiştir. Büyütülen filmlerin karakterizasyonu spektroskopik elipsometre ile yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elipsometre ile büyütülen filmin kalınlığı, yapıda bulunan kompozisyonların oranı, yüzey pürüzlülüğü ve kristallik durumu karakterize edilmiştir. Analiz, YİTAL'de bulunan J.A.Woolam marka elipsometre cihazı ile yapılmıştır.

İkinci olarak, belirlenen büyütme sıcaklığında transistör baz çukuruna büyütülen filmin yalnızca silisyum üzerinde büyümesi, silisyum nitrür film üzerinde büyümemesi için silisyuma seçicilik çalışması yapılmıştır. Epitaksiyel film büyütmede baz çukuruna büyütülen filmlerin, yan duvarlardaki silisyum nitrür filminin durumu SEM ile karakterize edilmiştir. SEM analizleri Sabancı Üniversitesinde bulunan JEOL JEM 4501 marka cihaz ile yapılmıştır.

4.1.1. Sıcaklığın SiGeC Film Büyüme hızı ve Ge Oranı Üzerindeki Etkisi

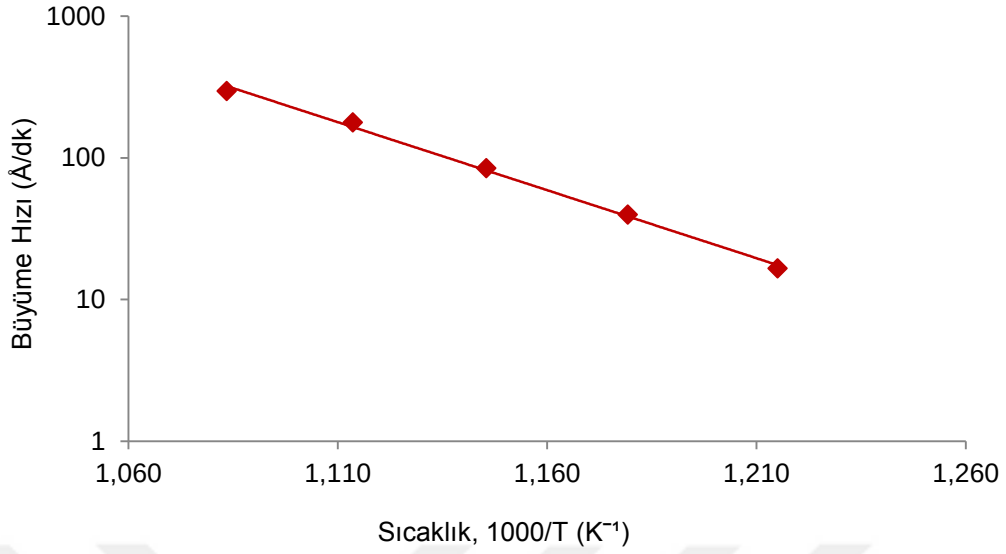
Bu çalışmada sıcaklıkla SiGeC film büyüme hızının değişimini incelemek üzere farklı film büyütme sıcaklıklarında (550-650°C) diğer bütün proses parametreleri sabit tutularak epitaksiyel SiGeC filmi büyütülmüştür. Film büyütme işlemi sırasında büyütme basıncı (10 Torr), gazların akış hızları SiH₄ (50 ml/dk), GeH₄ (125 ml/dk), B₂H₆ (ADC:8,4), SiH₃CH₃ (10 ml/dk), H₂ (20 lt/dk) ve büyütme süresi (260 s) sabit alınmıştır. Elde edilen filmin kalınlığı ve kristal kafes içerisindeki germanyum oranı spektroskopik elipsometre ile ölçülmüş ve değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Spektroskopik elipsometrede ölçüm verilerinin nasıl elde edildiği bu çalışmanın sonunda detaylı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda SiGeC film büyüme hızı ve germanyum oranı*

Sıcaklık (°C)	Proses Süresi (s)	Film Kalınlığı (Å)	Büyüme hızı (Å/dk)	Ge (%)
550	260	71 ± 1	17 ± 0,3	16 ± 0,0020
575	260	166 ± 2	38 ± 0,5	15 ± 0,0008
600	260	360 ± 5	83 ± 1,1	14 ± 0,0005
625	260	762 ± 5	176 ± 1,0	13 ± 0,0030
650	260	1270 ± 7	298 ± 1,5	11 ± 0,0007

*Her bir sıcaklık değerinde 5 deneme yapılmış ve silisyum pul her bölgesi ayrı ayrı ölçülerek ortalama değerler standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.1’de film büyütme sıcaklığı arttıkça büyüme hızı artmakta ve yapı içerisinde germanyum oranı ise azalmaktadır. Bu değişim, reaksiyon kinetiği ile açıklanabilir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle film büyütme işlemi kinetik bir reaksiyon olup, silan ve germanın hidrojenle parçalanması tersinmez bir reaksiyondur. Kimyasal reaksiyonlarda reaksiyon hızı, gazların akış hızı, büyütme sıcaklığı ve büyütme basıncına bağlıdır. Dolayısıyla kristal büyüme hızı(film birikim hızı), etki eden parametrelerin fonksiyonu ve büyüme katsayısı ile orantılı olarak ifade edilebilir. Bu durumda büyüme hızının logaritmik değişimine karşı film büyütme sıcaklığı grafiğe geçirildiğinde değişimin doğrusal olduğu görülür (Eşitlik 2.6).



Şekil 4.1. Sıcaklığa bağlı SiGeC film büyüme hızı değişim grafiği

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi film büyütme sıcaklığı arttıkça film büyüme hızı artmaktadır. Düşük sıcaklıkta epitaksiyel film büyüme, reaksiyon kontrollü olduğundan büyütme sıcaklığındaki değişim küçük olsa dahi reaksiyon hızını büyük oranda etkilemektedir (Şekil 4.1). Belirtilen büyüme hızlarına göre 550°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda transistörün baz çukuruna epitaksiyel SiGeC film büyütülebilir. Ancak, transistörde bu filmin kullanılabilmesi için büyütülen filmin transistörün baz çukurunun yan duvarlarındaki silisyum nitrür filmi üzerinde büyümemesi gerekir. Seçicilik diye adlandırılan bu durum, yapıya HCl gazı eklenerek sağlanır [50-52]. Klor iyonları, silisyumu ve silisyum-germanyumu doğrudan aşındıran bir kimyasal olduğundan film büyütme işlemi sırasında silisyum üzerinde hem aşınma hem de büyüme işlemi gerçekleşir. Bu durumda yapıya HCl gazı eklendiğinde büyüme hızının azalması gerekir. HCl ilavesi ile farklı sıcaklıklarda büyütülen filmlerin kalınlıkları spektroskopik elipsometre ile ölçülmüştür. Film kalınlığı ve proses süresi bilinen filmlerin farklı sıcaklıklardaki büyüme hızı ve bu büyüme hızlarında ~250 Å SiGeC film büyütme için gerekli olan süre hesaplanmıştır (Çizelge 4.2)

Çizelge 4.2. Yapıya HCl gazı eklediğinde SiGeC film büyüme hızı ve 250 Å film büyötmek için hesaplanan süre

Sıcaklık (°C)	Film Büyüme hızı (Å/dk)	HCl İlaveli Film Büyüme hızı (Å/dk)	250 Å Film Kalınlığı için Hesaplanan Süre (dk)
550	17 ± 0,3	8 ± 0,1	30 ± 0,48
575	38 ± 0,5	19 ± 0,3	13 ± 0,18
600	83 ± 1,1	42 ± 0,5	6 ± 0,08
625	176 ± 1,0	88 ± 0,5	3 ± 0,02
650	298 ± 1,5	147 ± 0,8	2 ± 0,01

Seçicilik için eklenen HCl gazının SiGeC film büyüme hızını yaklaşık iki kat azalttığı Schafer ve ark. tarafından yapılan çalışmada rapor edilmiştir [51]. Çizelge 4.2'ye göre 625°C'de ~250 Å SiGeC film büyötmek için gerekli olan süre ~3 dakika iken 625°C'den daha düşük sıcaklıklarda proses süresinin oldukça uzun olacağı görölmektedir. Tek kristal film büyötmeye işlemlerinde film büyötmeye süresi arttıkça kafes yapısı bozularak dislokasyonlar oluşmaya başlamaktadır.

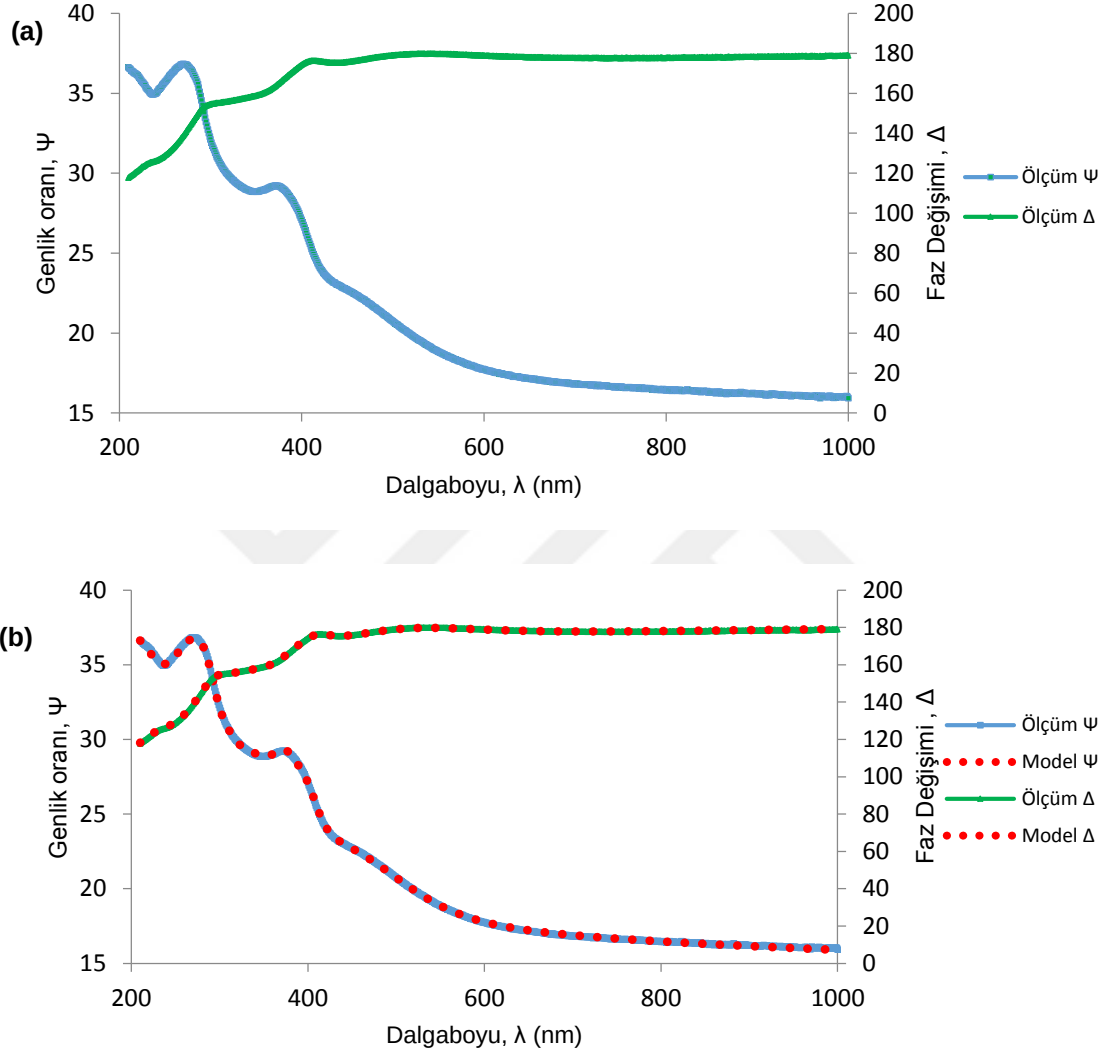
Transistörde uygulanacak SiGeC film büyötmeye sıcaklığını belirlemek için transistörün baz bölgesine katkılanan bor atomlarının difüzyonu en önemli parametredir. Transistör üretiminde baz bölgesine büyötölen bor katkılı SiGeC filminin sıcaklığının yüksek olması veya film büyötmeye süresinin uzun olması SiGeC filmindeki bor iyonlarının transistör baz bölgesinden kolektör bölgesine difüzyonuna neden olmaktadır. Bu da transistörün elektriksel performansını olumsuz etkileyeceğinden istenmeyen bir durumdur [9]. Difüzyon, 2. Fick yasası ile ifade edilmektedir (Eşitlik 4.1).

$$c=c_0 \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (4.1)$$

Eşitlikte, D difüzyon katsayısı, c herhangi bir zamandaki konsantrasyon, c_0 yüzey konsantrasyonu, t süre, x ise atomların bu sürede aldığı mesafedir. Eşitliğe göre bir noktadan bir noktaya difüzyonu gerçekleştiren atomların aldığı yol, difüzyon katsayısı ve ısıtım işlem süresinin karekökü ile orantılıdır. Bu durumda difüzyon, sıcaklık ve film büyötmeye süresine bağlıdır [9]. Büyötölecek olan filmin sıcaklığı ve büyötmeye süresi, yani film büyüme hızı transistör üretiminde en önemli parametrelerden biridir. Bütün

bu durumlar değerlendirildiğinde, transistörde uygulanacak SiGeC epitaksiyel film büyütme için uygun sıcaklığın 625°C olduğu görülmüştür.

➤ Silisyum üzerine 625°C’de ~250 Å SiGeC filmin detaylı olarak spektroskopik elipsometre ile karakterizasyonu yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. SiGeC/Si filme ait elipsometre sonucu (a) 625°C’de büyütülen SiGeC filme ait Ψ ve Δ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi (b) ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen grafik

Elipsometrede film karakterizasyonu yapılırken gerçekleştirilen işlemler sırasıyla aşağıda özetlenmiştir.

➤ Büyütülen filmin modeli belirlenmiştir. Elipsometredeki SiGeC/Si modeli literatürde tek kristal ve gerinmiş SiGeC film yapısının optik sabitlerine göre oluşturulmuştur.

➤ Ölçüm alınacak dalga boyu 200-1000 nm olarak belirlenmiştir.

➤ Işığın kutuplanmasındaki değişimine bağlı olarak faz değişimi ve genlik Eşitlik 2.16'da verilen denkleme göre ölçülmüştür.

➤ Filme ait literatür verisiyle oluşturulan model ve örnek eğrisi ile üst üste çizdirilmiştir

Örneğe ait genlik oranı (Ψ) mavi eğri, faz değişimi (Δ) yeşil eğri ile gösterilmiştir. (Şekil 4.2a) Literatürdeki SiGeC/Si yapısına ait genlik oranı ve faz değişimi kırmızı noktalarla gösterilerek modele ait verilerle üst üste çizilmiştir (Şekil 4.2b). Model tek kristal ve gerinmiş yapıdaki SiGeC filmin optik sabitleriyle oluşturulmuştur.

Elde edilen filme ait elipsometrede alınan verilerle literatür verilerinin uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.2). Çizelge 4.3'de 625°C'de büyütülen SiGeC filmine ait ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. 625°C'de büyütülen SiGeC filmine ait elipsometre sonuçları

SiGeC Film Kalınlığı (Å)	Ge (%)	MSE
250 ± 3	15 ± 0,0030	1,9 ± 0,2

Yapılan ölçüm sonucunda örnek filme ait parametrelerin literatür verisiyle uyumlu olduğu görülmüştür. MSE değeri ~1.9, büyütülen filmin kalınlığı istenilen kalınlık olan ~250 Å, germanyum ise ~%15 ile istenilen aralıkta olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3). MSE değeri, büyütülen filmin SiGeC film modeline birebir uyduğunu matematiksel olarak göstermekle birlikte filmin gerinmiş yapıda ve tek kristal olarak büyüdüğünü de göstermektedir [73,74]. Elde edilen tüm veriler değerlendirildiğinde, 0,25 µm SiGeC BiCMOS transistörde SiGeC film büyütme için uygulanacak en uygun sıcaklığın 625°C olduğu görülmektedir.

4.1.2. Seçici Epitaksiyel SiGeC Film Büyütme

Epitaksiyel SiGeC film büyütmenin ikinci basamağında SiGeC BiCMOS transistör yapısında silisyuma karşı seçicilik özelliği kazandırılmıştır. Silisyum pul yüzeyine sırasıyla silisyumdioksit, polisilisyum, silisyumdioksit, silisyum nitrür (OPON) filmleri büyütülmüştür. Daha sonra, baz çukuru açılmış ve çukur yan duvarlarına silisyum nitrür film büyütülmüştür. Seçici epitaksiyel film büyütme için proses gazları içerisine HCl gazı eklenmiştir. Çizelge 4.4'de farklı HCl akış hızlarında epitaksiyel film kalınlığı, büyüme hızı ve yapıdaki germanyum oranı verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiGeC film büyüme hızı*

HCl (ml/dk)	Proses Süresi (s)	Film Kalınlığı (Å)	Film Büyüme hızı (Å/dk)	Ge (%)
15	180	267 ± 5	89 ± 1,2	18 ± 0,0020
20	180	223 ± 3	74 ± 1,1	15 ± 0,0007
25	180	191 ± 2	63 ± 1,0	20 ± 0,0020

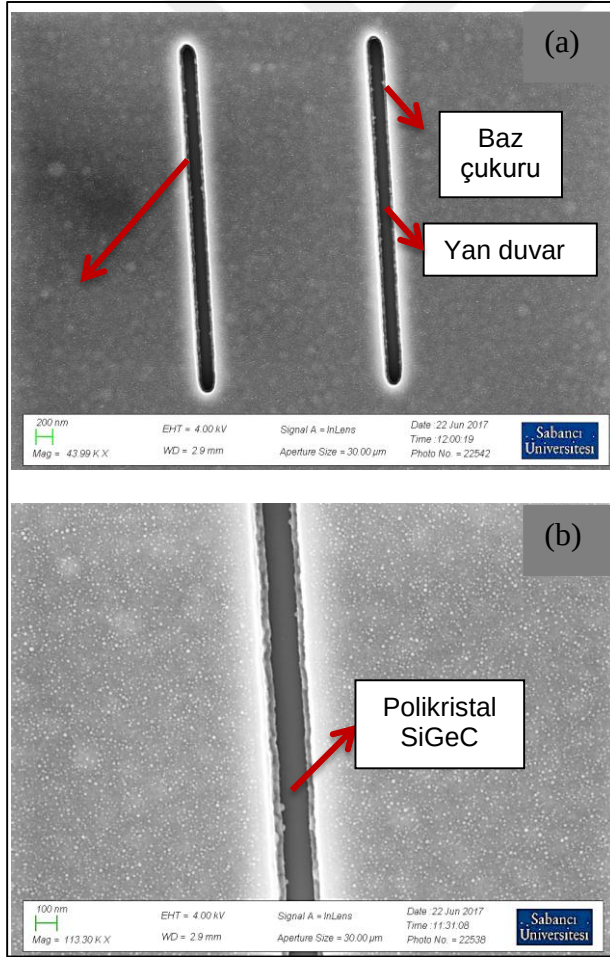
*Her bir HCl akış hızı değerinde 5 deneme yapılmış ve silisyum pul her bölgesi ayrı ayrı ölçülerek ortalama değerler standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.4’de görüldüğü gibi film büyütme işleminde belirlenen HCl gazı akış hızlarında epitaksiyel SiGeC filmin büyüdüğü ve büyüme hızlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, Bölüm 4.1.1’de ifade edildiği gibi HCl gazı akış hızı arttıkça SiGeC filmi aşındığından film büyüme hızı yarı yarıya düşmektedir. Transistör baz çukurlarında kalıntı olup olmadığı ve silisyum nitrür filmin üzerinde polikristal formda SiGeC filmin büyümediğini doğrulamak için baz çukurlarının görüntüsü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile bakılmıştır. Seçici epitaksiyel film büyütmede ilk olarak HCl akış hızı, 15 ml/dk olarak ayarlanmış ve SEM ile silisyum pul yüzeyine bakılmıştır.

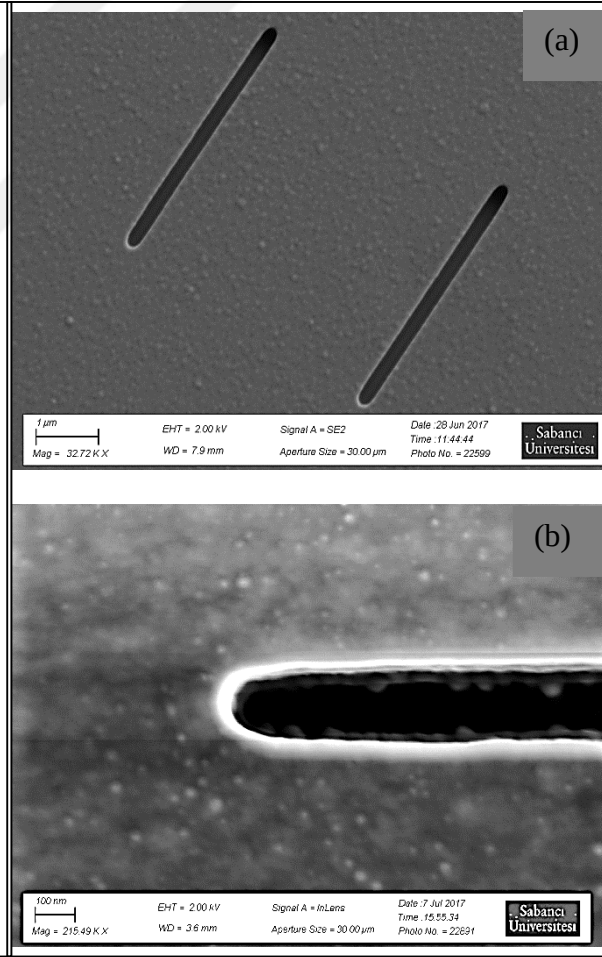
Şekil 4.3’de görüldüğü gibi silisyum nitrür filmin pürüzlü olduğu ve baz çukurunun içlerinde kirlilikler olduğu görülmüştür. Bu görüntü SiGeC filminin sadece silisyum üzerinde büyümeyip silisyum nitrür üzerinde de polikristal SiGeC olarak büyüdüğünün göstergesidir. 15 ml/dk HCl ile silisyuma karşı seçiciliğin sağlanmadığı görülmüştür. Bu durumda 2. denemede HCl akış hızı artırılarak 20 ml/dk yapılmıştır.

Şekil 4.4’de ikili transistör yapısında silisyum nitrür film yüzeyinin pürüzlü olduğu, tekli transistör yapısında ise baz çukurunda kirlilik olduğu görülmüştür. Seçicilik çalışması için yapılan 3. denemede HCl akış hızı bir miktar daha artırılarak 25 ml/dk olarak belirlenmiştir.

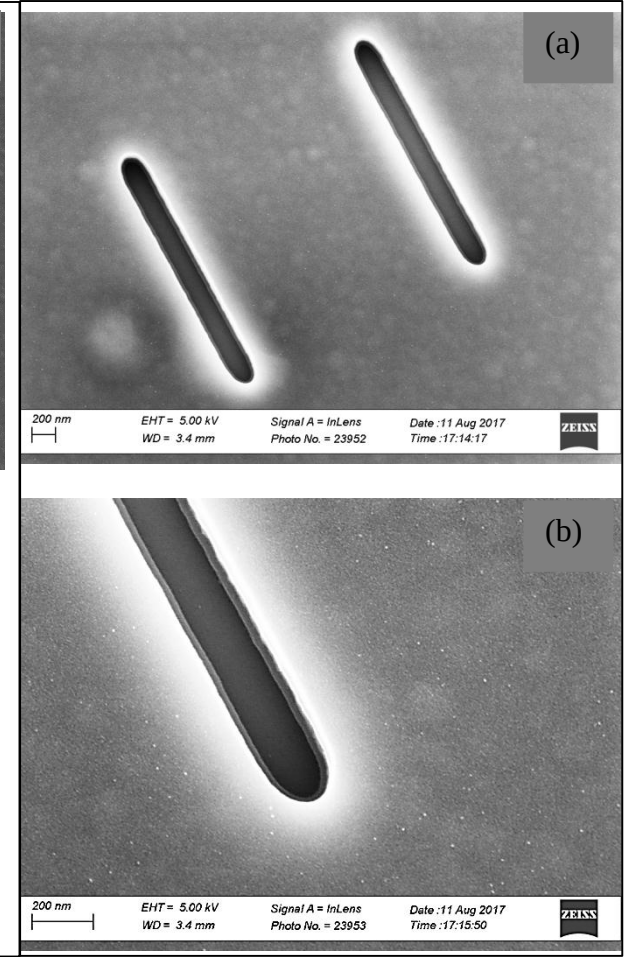
Şekil 4.5’de ikili transistörde silisyum nitrür filmin pürüzsüz olduğu ve tekli transistörde baz çukurunun temiz olduğu, silisyum nitrür film üzerinde polikristal SiGeC filmin büyümediği görülmüştür.



Şekil 4.3. 15 ml/dk HCl akış hızı ile transistor baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistor (b) tek transistor

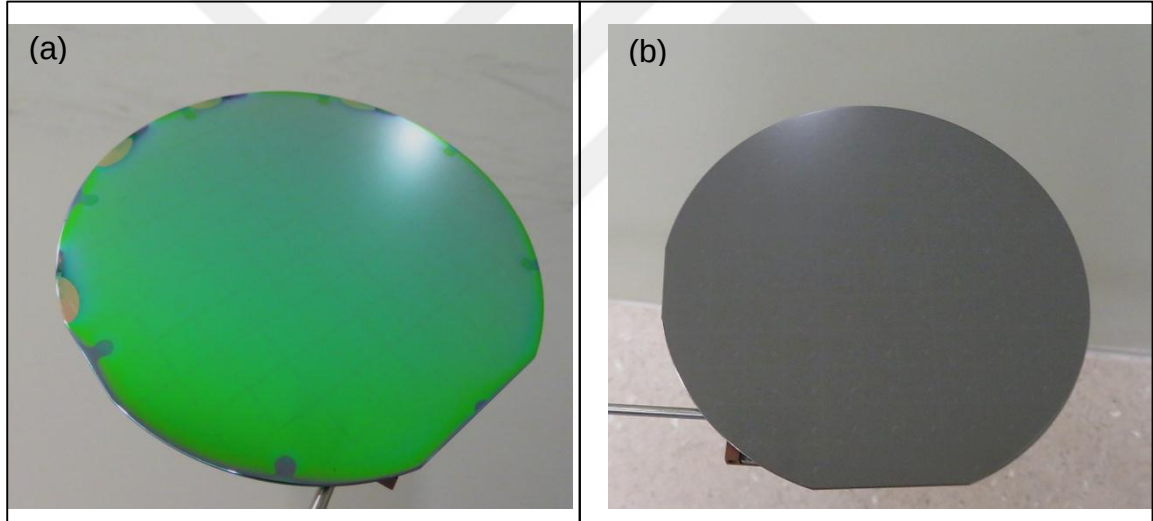


Şekil 4.4. 20 ml/dk HCl akış hızı ile transistor baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistor (b) tek transistor



Şekil 4.5. 25 ml/dk HCl akış hızı ile transistor baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistor (b) tek transistor

Elipsometre ve SEM analiz sonuçlarına göre 3. denemede sadece silisyum üzerinde epitaksiyel SiGeC filminin büyüdüğü, silisyum nitrür filmin üzerinde ise SiGeC filminin büyümediği sonucuna varılmıştır. Silisyum nitrür filminin üzerine epitaksiyel SiGeC film büyümediğini başka bir yöntemle doğrulamak için film büyütülen pula ıslak aşındırma işlemi uygulanmıştır. Transistör yan duvarlarında ve yüzeyde bulunan silisyum nitrür filmini aşındırmak için, silisyum pul ıslak aşındırma yöntemiyle fosforik asitte (H_3PO_4) $120^{\circ}C$ 'de 1 saat işlem görmüştür. Fosforik asit silisyum nitrür filmini aşındırırken, film üzerinde büyüyen polikristal formdaki yapıları aşındıramaz [75]. Islak aşındırma işlemi sonucunda optik mikroskop ile pul yüzeyine bakıldığında pul yüzeyindeki silisyum nitrür filminin aşındığı görülmüştür (Şekil 4.6). Silisyum nitrür filmin tamamen aşınması yüzeyde polikristal formda herhangi bir yapının büyümediğinin göstergesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda 25 ml/dk HCl akış hızı ile büyütülen epitaksiyel SiGeC filmin sadece silisyum üzerinde büyüdüğü, silisyum nitrür filminde büyümediği görülmüştür.



Şekil 4.6. Silisyum pulun ıslak aşındırma öncesi (a) ve sonrası (b) yüzey görüntüsü

4.2. Epitaksiyel SiCap Film Büyütme

$0,25 \mu m$ SiGeC BiCMOS teknolojisinde, transistörün emiter bölgesine n tipi 1×10^{20} atom/cm³ katkı konsantrasyonunda polikristal silisyum film büyütülür. Baz bölgesine ise p tipi 1×10^{19} atom/cm³ katkı konsantrasyonunda epitaksiyel SiGeC filmi büyütülür. Yüksek katkılı emiter bölgesindeki katkı iyonlarının düşük katkılı baz bölgesine difüzyonunu engellemek için iki tabaka arasında katkısız tek kristal silisyum film büyütülmesi gerekir [9]. SiGeC BiCMOS transistörün elektriksel modeline göre transistörün boyutları gereği, baz çukurunda SiGeC film üzerine

büyütülecek olan epitaksiyel SiCap film kalınlığının ~ 150 Å olması gerekmektedir [72]. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak, epitaksiyel SiCap film büyütmede film büyüme hızına bakılarak, transistör üretiminde uygulanabilecek minimum film büyütme sıcaklığı belirlenmiştir. Büyütülen filmlerin karakterizasyonu spektroskopik elipsometre ile yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elipsometre ile büyütülen filmin kalınlığı ve kristallik durumu karakterize edilmiştir.

İkinci olarak ise belirlenen büyütme sıcaklığında transistör baz çukuruna büyütülen filmin yalnızca silisyum üzerinde büyümesi, silisyum nitrür film üzerinde büyümemesi için silisyum filmine karşı seçicilik çalışması yapılmıştır. Epitaksiyel film büyütmede baz çukuruna büyütülen filmlerin, yan duvarlardaki silisyum nitrür filmin durumu SEM ile karakterize edilmiştir.

4.2.1. Sıcaklığın SiCap Film Büyüme hızı Üzerindeki Etkisi

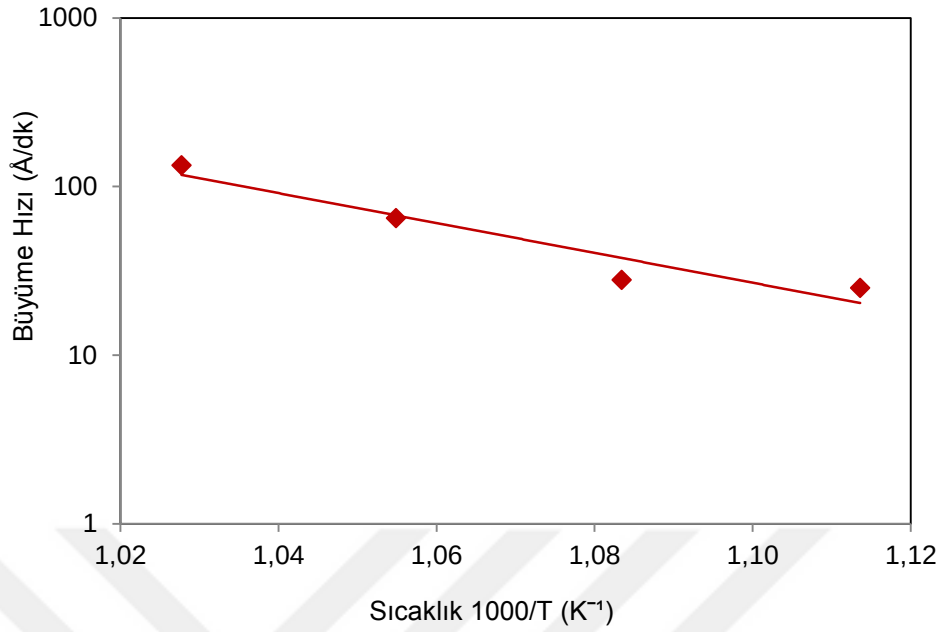
Bu çalışmada sıcaklıkla SiCap film büyüme hızının değişimini incelemek farklı sıcaklıklarda ($625-700^{\circ}\text{C}$) diğer bütün proses parametreleri sabit tutularak SiGeC film üzerine epitaksiyel SiCap filmi büyütülmüştür. Film büyütme işlemi sırasında büyütme basıncı (10 Torr), gazların akış hızı (50 ml/dk SiH_4 , 20 ml/dk H_2) sabit alınmıştır. Film kalınlığı ve kristal kafes içerisindeki germanyum oranı spektroskopik elipsometre ile ölçülmüş ve değerler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı sıcaklıklarda SiCap film büyüme hızı*

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Proses Süresi (s)	Film Kalınlığı (Å)	Film Büyüme hızı (Å/dk)
625	300	123 ± 2	$25 \pm 0,3$
650	300	139 ± 2	$28 \pm 0,3$
675	300	326 ± 5	$65 \pm 0,9$
700	300	664 ± 12	$134 \pm 2,5$

*Her bir sıcaklık değerinde 5 deneme yapılmış ve silisyum pul her bölgesi ayrı ayrı ölçülerek ortalama değerler standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir.

Büyüme hızının logaritmik değişimine karşı sıcaklık grafiğe geçirildiğinde değişimin doğrusal olduğu görülür (Eşitlik 2.6).



Şekil 4.7. Sıcaklığa bağlı SiCap film büyüme hızı değişim grafiği

Şekil 4.7 incelendiğinde 650°C'ye kadar sıcaklık azaldıkça film büyüme hızı belirgin biçimde azalmıştır. Düşük sıcaklıkta epitaksiyel film büyütmede reaksiyon kinetik kontrollü olduğundan film büyütme sıcaklığındaki değişim küçük olsa dahi reaksiyon hızını büyük oranda etkilemektedir. Çalışılan bütün sıcaklıklarda film büyüme hızı düşük de olsa epitaksiyel SiCap filminin büyüdüğü görülmüştür. Ancak transistörde bu filmin kullanılabilmesi için baz çukuru yan duvarlarında bulunan silisyum nitrür filminin üzerinde film büyümesinin gerçekleşmemesi gerekir. Silisyuma karşı seçiciliği sağlamak için yapıya HCl gazı eklenmiştir. Seçicilik için eklenen HCl akışı tek kristal silisyumun büyüme hızını yaklaşık 5 kat azalttığı, Schafer ve ark. tarafından yapılan çalışmada rapor edilmiştir [51]. Yapıya HCl gazı eklediğinde farklı sıcaklıklardaki film kalınlıkları elipsometre ile ölçülmüştür. Film kalınlığı ve proses süresi bilinen filmlerin farklı sıcaklıklardaki büyüme hızı ve bu büyüme hızlarında ~150 Å SiCap film büyütme için gerekli olan süre hesaplanmıştır (Çizelge 4.6).

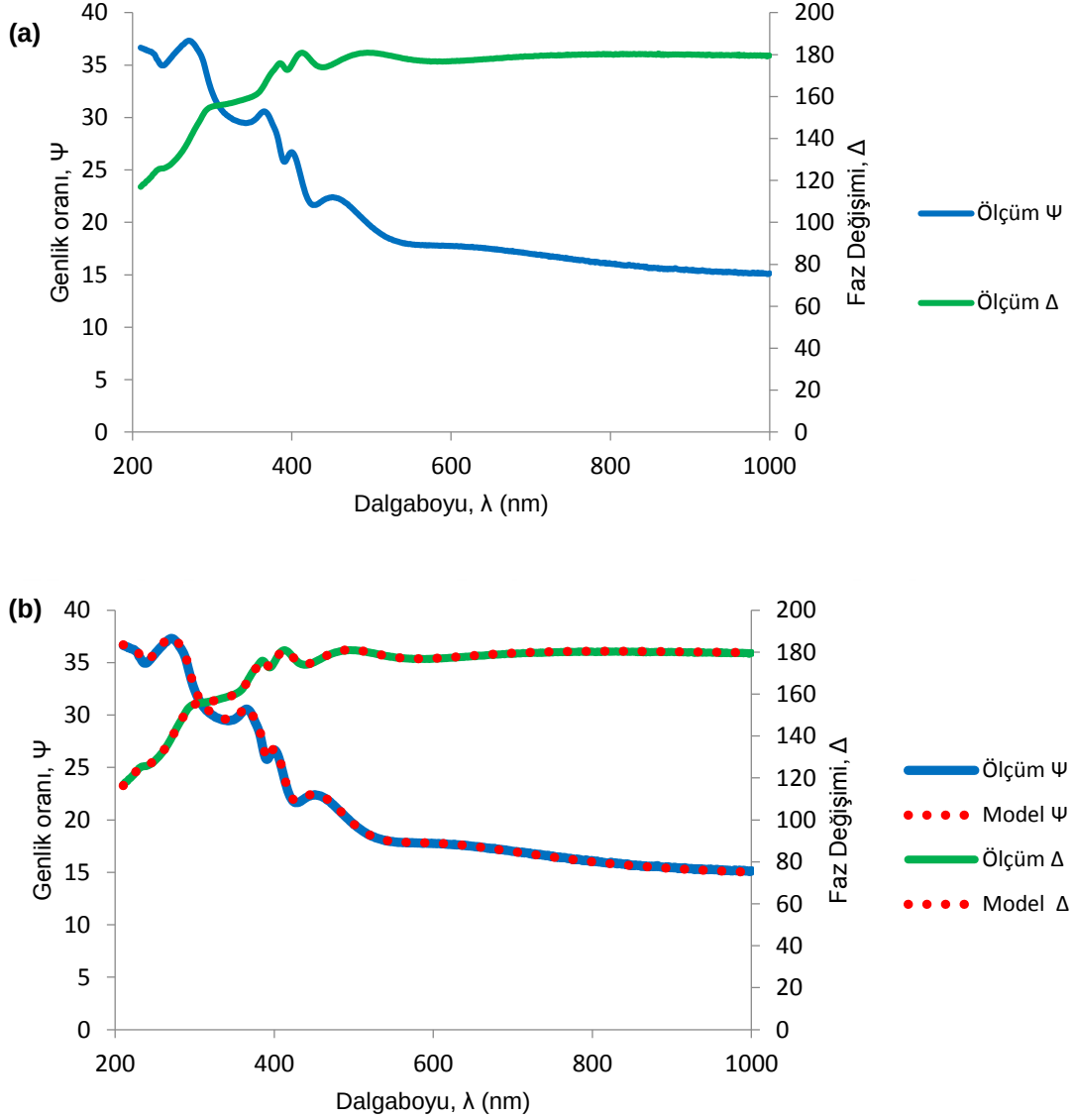
Çizelge 4.6'ya göre 675°C'de ~150Å SiCap film büyütme için gerekli olan süre yaklaşık 12 dakika iken 625°C'den daha düşük sıcaklıklarda proses süresinin oldukça uzun olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Yapıya HCl gazı eklediğinde SiCap film büyüme hızı ve 150 Å film büyötmek için hesaplanan süre

Sıcaklık (°C)	Film Büyüme hızı (Å/dk)	HCl İlaveli Film Büyüme hızı (Å/dk)	150Å Film Kalınlığı için Hesaplanan Süre (dk)
625	25 ± 0,3	5 ± 0,1	30 ± 0,39
650	28 ± 0,3	6 ± 0,1	27 ± 0,29
675	65 ± 0,9	13 ± 0,2	11 ± 0,16
700	134 ± 2,5	26 ± 0,5	6 ± 0,10

SiCap film büyötmek sıcaklığını belirlemek için transistörün baz bölgesine katılan bor atomlarının dışarıya difüzyonu en önemli parametredir. Eşitlik 4.1'e göre kafes içerisinde bir noktadan bir noktaya difüzyon, sıcaklık ve film büyötmek süresinin fonksiyonudur. Transistör üretiminde baz bölgesinde bor katkı SiGeC film üzerine büyötülen SiCap filminin sıcaklığının yüksek olması veya film büyötmek süresinin uzun olması SiCap filminin altında bulunan SiGeC filmindeki bor iyonlarının transistör baz bölgesinden kolektör bölgesine difüzyonuna neden olmaktadır. Bu da transistörün elektriksel performansını olumsuz etkileyeceğinden istenmeyen bir durumdur [9]. Bu durum değerlendirildiğinde epitaksiyel SiCap film büyötmek için uygun sıcaklığın 675°C olduğu görölmüştür.

Film karakterizasyonu için SiGeC film üzerine 675°C'de ~150 Å SiGeC film büyötölmüş ve daha sonra elipsometre ile karakterize edilmiştir. Elipsometredeki SiCap/SiGeC/Si modeli literatürde tek kristal ve gerinmiş SiGeC ve SiCap filmlerin optik sabitlerine göre oluşturulmuştur. Işığın kutuplanmasındaki değişimine (ρ) bağı olarak faz değişimi (Δ) ve genlik oranı (Ψ) ölçölmüştür ($\rho = \tan \Psi e^{i\Delta}$). Örneğe ait genlik oranı (Ψ) mavi eğri ile faz değişimi (Δ) yeşil eğri ile gösterilmiştir (Şekil 4.8a). Literatürdeki Si/SiGeC/Si yapısına ait genlik oranı ve faz değişimi kırmızı noktalarla gösterilerek modele ait verilerle üst üste çizilmiştir (Şekil 4.8b). Model tek kristal ve gerinmiş yapıdaki SiGeC filmin optik sabitleriyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.8. SiCap/SiGeC/Si filme ait elipsometre sonucu **(a)** 625°C’de büyütülen SiGeC üzerine 675°C’de büyütülen SiCap filme ait Ψ ve Δ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi **(b)** ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen grafik

Yapılan ölçüm sonucunda örneğe ait verinin literatür verisi ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.8b). Bu uyumun matematiksel karşılığı olan MSE değeri $\sim 3,3$ büyütülen SiGeC filmin kalınlığı ~ 250 Å, germanyum ise $\sim 15,6$, büyütülen SiCap filmin kalınlığı ~ 150 Å ile hedeflenen değerlere ulaşıldığı görülmüştür (Çizelge 4.7). MSE değeri, büyütülen filmin SiGeC/SiCap film modeline birebir uyduğunu matematiksel olarak göstermekle birlikte filmin gerinmiş yapıda ve tek kristal olarak büyüdüğünü de göstermektedir [73,74]. Elde edilen tüm veriler değerlendirildiğinde,

0,25 μm SiGeC BiCMOS transistörde SiCap film büyütmek için uygulanacak en uygun sıcaklığın 675°C olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7. 675°C’de büyütülen SiCap filmine ait elipsometre sonuçları

SiGeC Film Kalınlığı (Å)	Ge (%)	SiCap Film Kalınlığı (Å)	MSE
250 $\pm$ 3	15 $\pm$ 0,0030	150 $\pm$ 2	3,3 $\pm$ 0,3

4.2.2. Seçici Epitaksiyel SiCap Film Büyütme

SiGeC BiCMOS transistörde baz çukuru yan duvarlarında silisyum nitrür filmi bulunduğundan SiCap filminin de silisyuma seçici olması gerekmektedir. Seçicilik çalışması için yan duvarlarında silisyum nitrür film bulunan, baz çukurunda ise silisyum olan yapının oluşturması gerekmektedir. Bunun için öncelikle silisyum üzerine baz katmanları olarak isimlendirilen OPON filmleri büyütülmüştür. Sonraki aşamada pullara kuru aşındırma ile baz çukuru açılmış ve yan duvarlara silisyum nitrür film büyütülmüştür. Bölüm 4.1.2’de SiGeC filmini seçici büyütmek için HCl akış hızı 25 ml/dk olarak belirlenmişti. Bu çalışma ve yapılan bir takım ön çalışmalar değerlendirilerek silisyum nitrür filmine karşı seçicilik için 15-25-35 ml/dk HCl akışı ile çalışılmıştır. Çizelge 4.8’de farklı HCl akışlarında elipsometre ile ölçülen film kalınlığı ve hesaplanan büyüme hızı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı HCl gazı akış hızlarında SiCap film büyüme hızı*

HCl (ml/dk)	Proses Süresi (s)	Film Kalınlığı (Å)	Film Büyüme hızı (Å/dk)
15	530	207 $\pm$ 6	23 $\pm$ 0,1
25	530	144 $\pm$ 6	16 $\pm$ 0,1
35	530	87 $\pm$ 4	10 $\pm$ 0,1

*Her bir HCl akış hızı değerinde 5 deneme yapılmış ve silisyum pul her bölgesi ayrı ayrı ölçülerek ortalama değerler standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.8’ e göre belirlenen HCl gazı akış hızları için epitaksiyel SiCap filmin büyüdüğü ve büyüme hızlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

Proses gazları içerisinde HCl gazı eklenmediğinde yalnızca film büyütüldüğünde, film büyüme hızı 65 Å/dk iken, 25 ml/dk HCl eklendiğinde büyüme hızı 16 Å/dk olup, büyüme hızını yaklaşık 5 kat azaldığı görülmüştür.

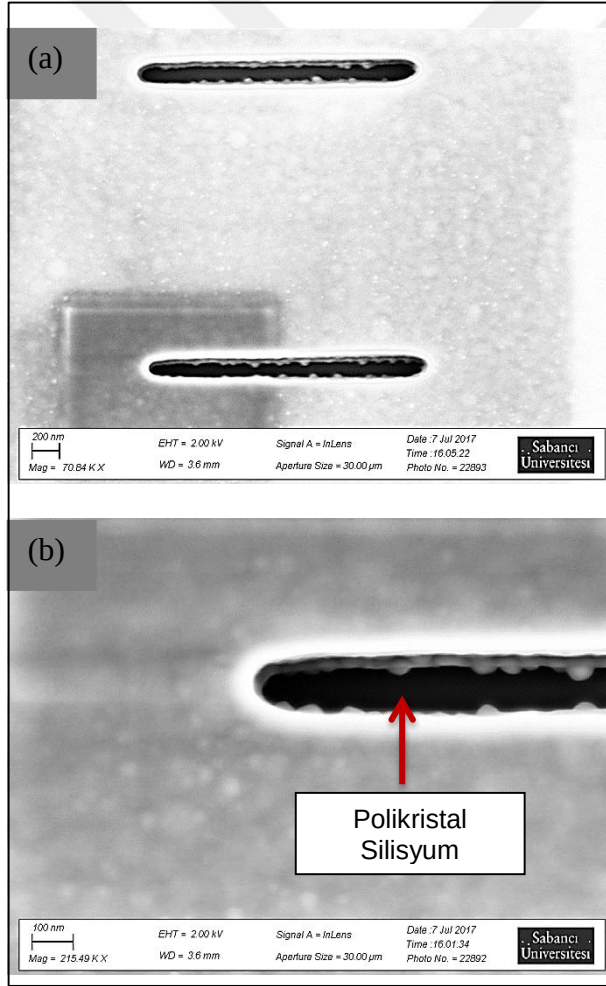
Transistör baz çukurlarında kalıntı olup olmadığı ve silisyum nitrür filmin üzerinde polikristal silisyum yapısının büyümediğini doğrulamak için baz çukurunun içi ve silisyum nitrür yüzeyini incelemek için SEM analizi yapılmıştır. SEM analizinde baz çukuru açılan transistör yapılarının yan duvarlarına bakılmıştır.

Seçicilik için, ilk olarak HCl akış hızı 15 ml/dk olarak ayarlanmış ve SEM ile silisyum pul yüzeyine bakılmıştır. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi silisyum nitrür filmin pürüzlü olduğu ve baz çukurunun içlerinde kirlilikler olduğu görülmüştür. Bu görüntü, SiCap filminin sadece silisyum üzerinde büyümeyip silisyum nitrür üzerinde de polikristal silisyum olarak büyüdüğünü göstermektedir.

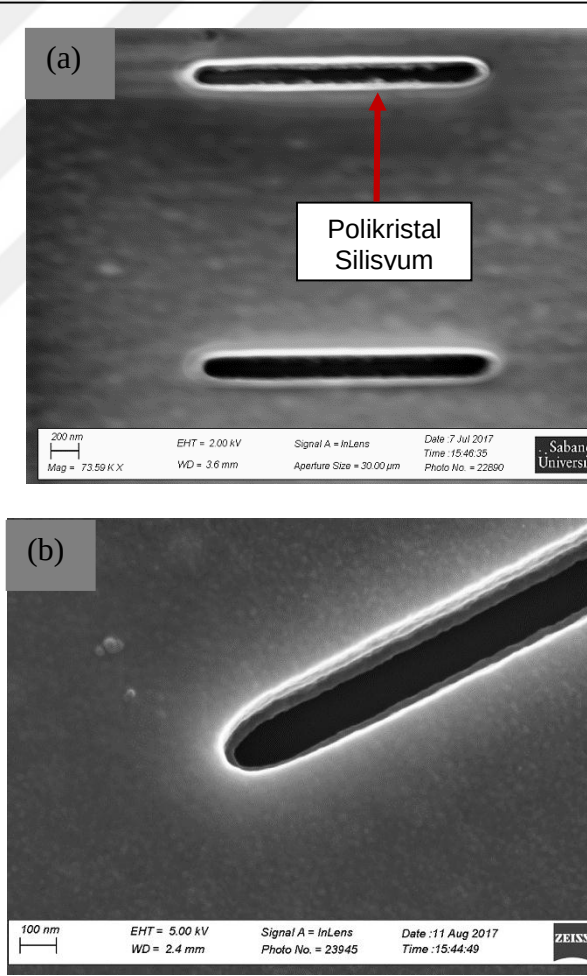
İkinci denemede, HCl akış hızı artırılarak 25 ml/dk HCl akış hızında işlem tekrarlanmıştır. Şekil 4.10'da ikili transistör yapısında silisyum nitrür filmin yüzeyinin pürüzlü olduğu, tekli transistör yapısında ise baz çukuru içlerinin kirliliği olduğu görülmüştür.

Seçicilik çalışması için yapılan üçüncü denemede HCl akış hızı bir miktar daha artırılarak 35ml/dk olarak uygulanmıştır. Şekil 4.11'de ikili transistörde silisyum nitrür filmin pürüzsüz olduğu ve tekli transistörde baz çukurunun temiz olduğu, silisyum nitrür film üzerinde polikristal silisyum filmin büyümediği görülmüştür.

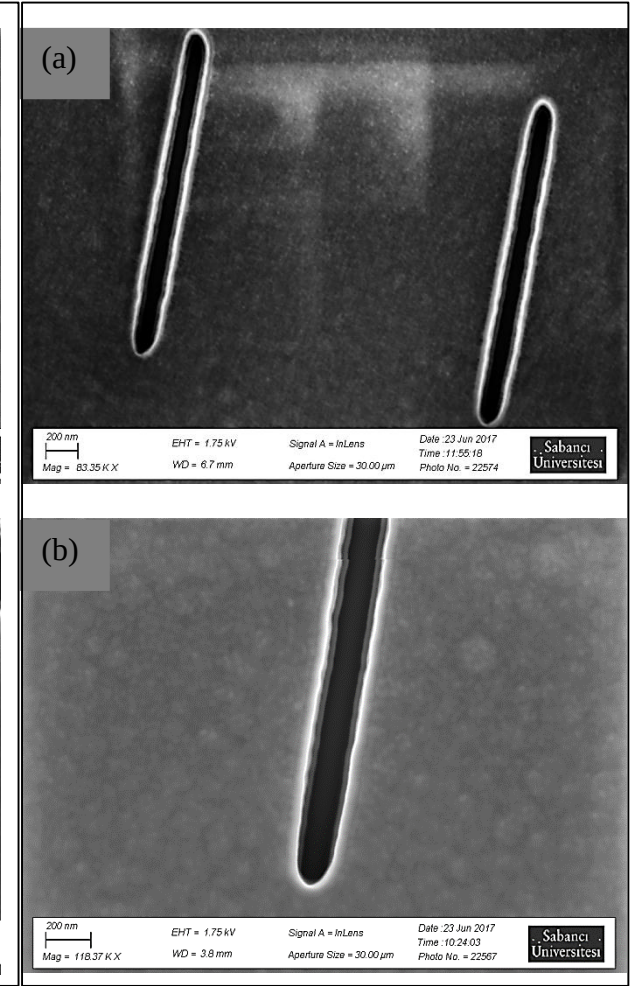
Sonuç olarak, 35 ml/dk HCl akış hızı ile 675°C'de büyütülen epitaksiyel SiCap filmin sadece silisyum üzerinde büyüdüğü, silisyum nitrür filminde büyümediği böylece silisyuma seçicilik özelliğinin kazandırıldığı görülmüştür.



Şekil 4.9. 15ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör



Şekil 4.10. 25ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör



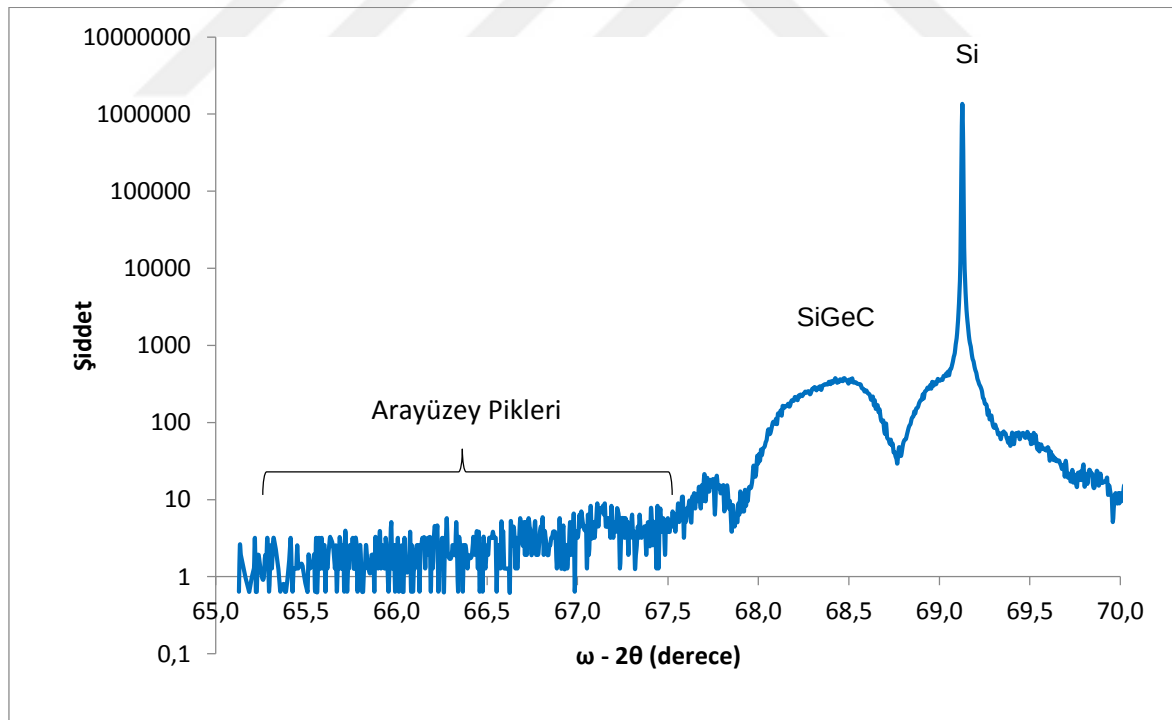
Şekil 4.11. 35ml/dk HCl akış hızı ile transistör baz çukuruna büyütülen filmin SEM görüntüleri (a) ikili transistör (b) tek transistör

4.3.Yapısal, Morfolojik ve Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

SEM ve elipsometre analizleri baz alınarak büyütme parametreleri belirlenen SiGeC ve SiCap filmlerinin yapısal ve morfolojik karakterizasyonunda yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HRXRD), geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ve ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS) kullanılmıştır. Elektriksel karakterizasyon için, SiGeC BiCMOS transistörün baz çukuruna epitaksiyel filmler büyütülmüştür. Transistörün giriş ve çıkış karakteristiğini gösteren I-V eğrileri alınmıştır.

4.3.1. HRXRD Analiz Bulguları

Tez çalışması kapsamında X-ışını kırınımı teknikleri ile kristal yapının tayini, kristal kafes sabiti (a), ince filmlerde oluşan gerinim katsayısı (ϵ), yapı içerisindeki alaşımların oranı (x) karakterize edilmiştir. Ölçümler Gebze Teknik Üniversitesinde bulunan Rigaku marka Smart-Lab yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı kullanılarak, (100) silisyum alttaş üzerine büyütülmüş, SiGeC ve SiCap tabakasından oluşan yapının (65° - 70°) aralığındaki dik geometride (out-plane) ω - 2θ taraması Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Silisyum yüzeyine büyütülen epitaksiyel SiGeC filmine ait X-ışını kırınım deseni

Büyütülen filmlerin örgü parametrelerini belirlemek amacıyla X-ışını kırınım desenlerinden pik pozisyonları belirlenmiştir. Katmanlı yapıların ölçümünde filmde

gelen ana difraksiyon piki çevresinde film içerisinde bulunan alaşımların pikleri yer alır [59].

Birim hücresi a örgü parametresi ile karakterize edilen kübik yapıli bir kristal için düzlemler arası uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki Eşitlik 4.2 ile ifade edilir.

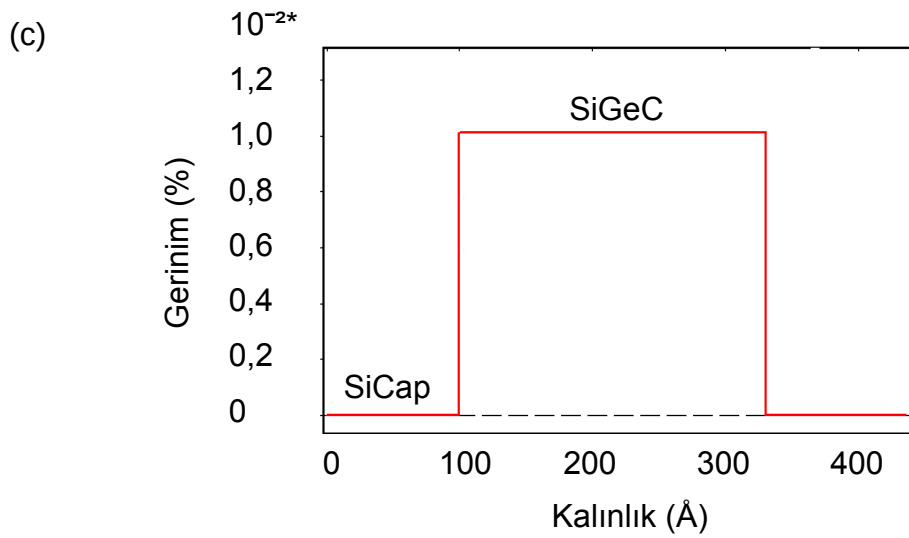
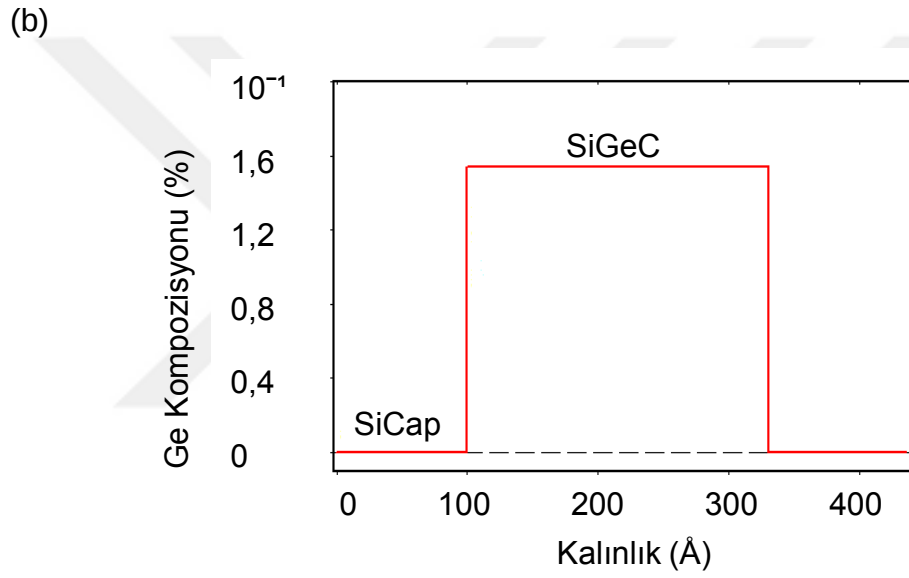
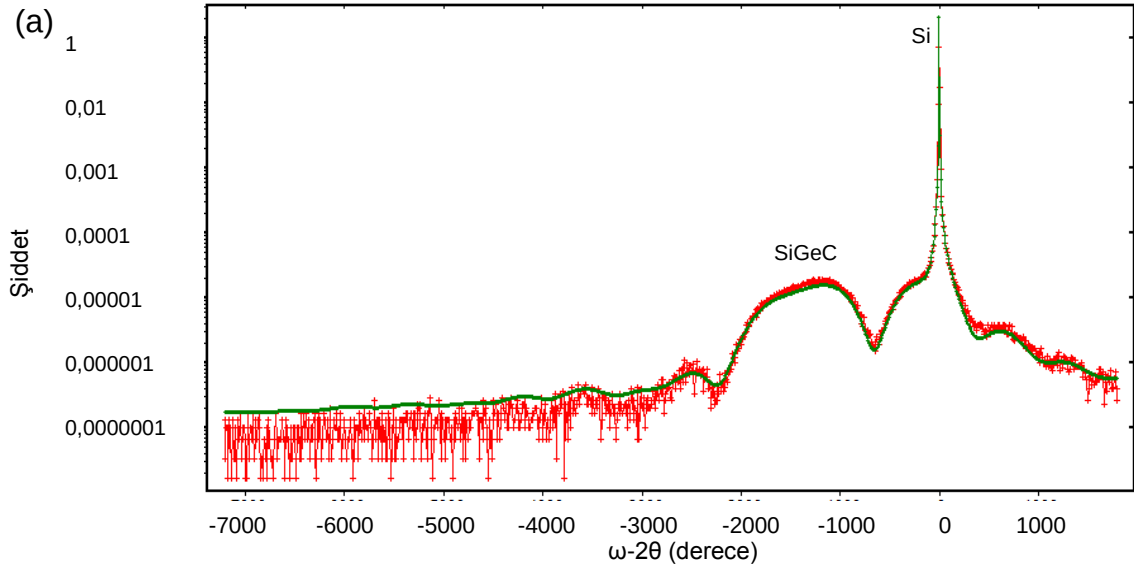
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.2)$$

Eşitlik 2.18'de verilen Bragg kanundan örgü parametresi Eşitlik 4.3 ile hesaplanır.

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (4.3)$$

Şekil 4.12'de 69,2°'de gözlenen yüksek şiddetli pik silisyum puldan, 68,6°'de gözlenen pik ise SiGeC katmanından kaynaklanan kırınım pikleridir. Silisyum ve germanyum için kristal kafes sabitlerinin birbirine yakın olması ve büyütülen film kalınlığı kritik film kalınlığını aşmadığından filmler örgü uyumlu olarak büyümüştür. HRXRD'de arayüzey piklerin (interference peak) olması büyütülen SiGeC filmin gerinmiş formda olduğunu göstergesidir [59, 76-78].

Literatürde epitaksiyel SiGeC filmlerin HRXRD grafikleri deneysel verilerin yanı sıra bir benzetim programı verisi ile birlikte verilir. Bu çalışmada IHP firmasına ait RCRefSimW benzetim programı kullanılmıştır. Şekil 4.13a'da büyütülen filmin benzetim programıyla oluşturulan kırınım deseni (yeşil) ve ölçüm sonucu elde edilen kırınım deseni (kırmızı) birlikte çizdirildiğinde bu iki eğrinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4.13b'de SiGeC film yapısındaki germanyumun profilin kare olduğu ve yapıda ~%16 oranında bulunduğu elipsometre verisiyle doğrulanmıştır. Silisyum üzerine silisyumun kristal kafes sabitinden farklı kafes sabitine sahip silisyum-germanyum film büyütüldüğünden filmde gerinme meydana gelir. Gerinme, filmde optik kayıplara yol açtığından transistör karakteristiği açısından önemli bir parametredir. Şekil 4.13c' de filmde meydana gelen gerinme yüzdesinin %1,0 olduğu ve literatür verisiyle uyumlu bir değerde olduğunu görülmüştür. Benzetim programıyla elde edilen verilere göre kristal yapıdaki germanyum oranı ~%16, karbon oranı ise ~%2 olarak bulunmuştur. Bu durumda büyütülen epitaksiyel film $\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.16}\text{C}_{0.02}$ olarak isimlendirilebilir.

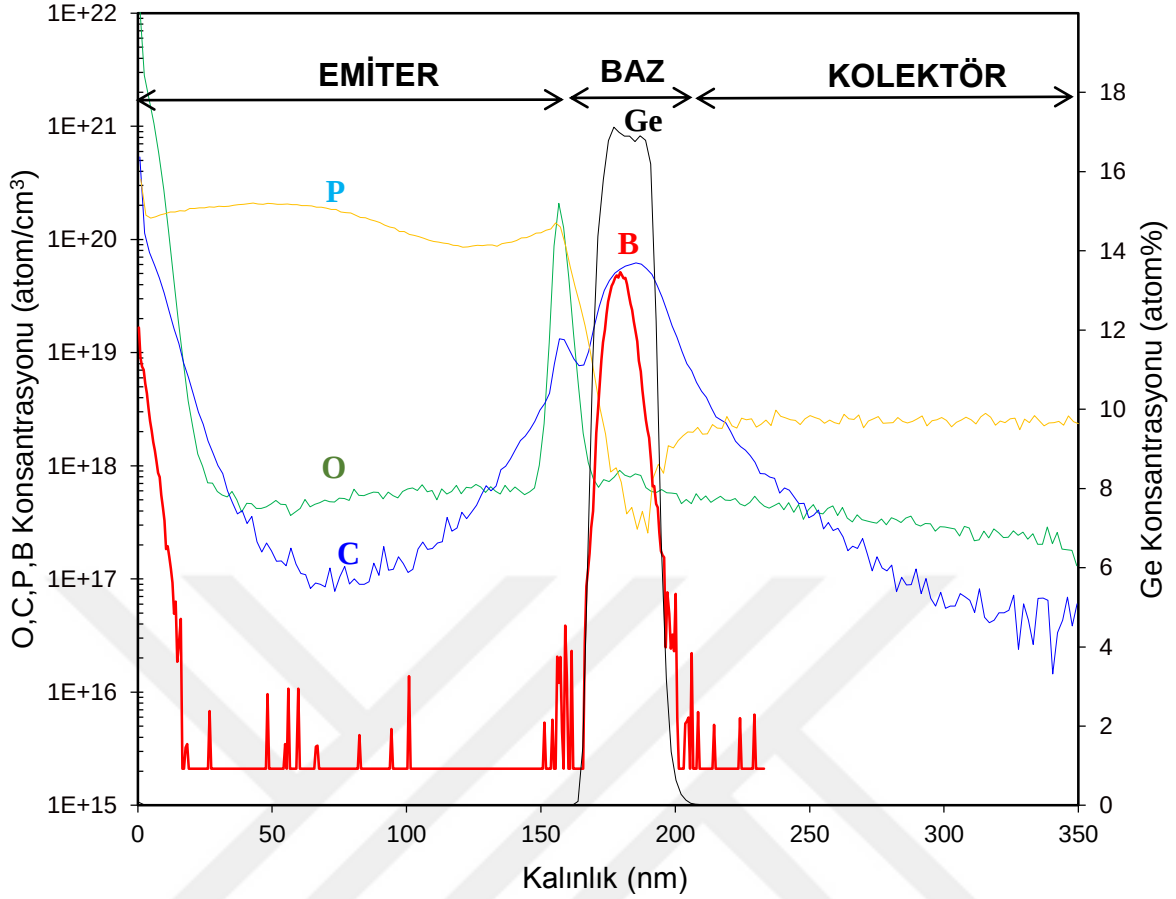


Şekil 4.13. Benzetim programıyla elde edilen veriler (a) Ölçüm (kırmızı) ve benzetim (yeşil) $\omega/2\theta$ verilerinin karşılaştırılması (b) SiGeC film içerisindeki germanyum oranı ve profili (c) Film gerinim yüzdesi

4.3.2. SIMS Analiz Bulguları

SIMS analizinde derinlik profili bir veya birden fazla ikincil iyon sinyalinin şiddeti, zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmesiyle elde edilmektedir. Tez çalışması kapsamında SiGeC BiCMOS transistörün baz bölgesine büyütülen bor katkı epitaksiyel SiGeC filmindeki katkı ve safsızlık atomlarının yoğunluklarının belirlenmesi için yapılmıştır. Analiz Evans Analytical Group (Amerika) firmasında yaptırılmıştır.

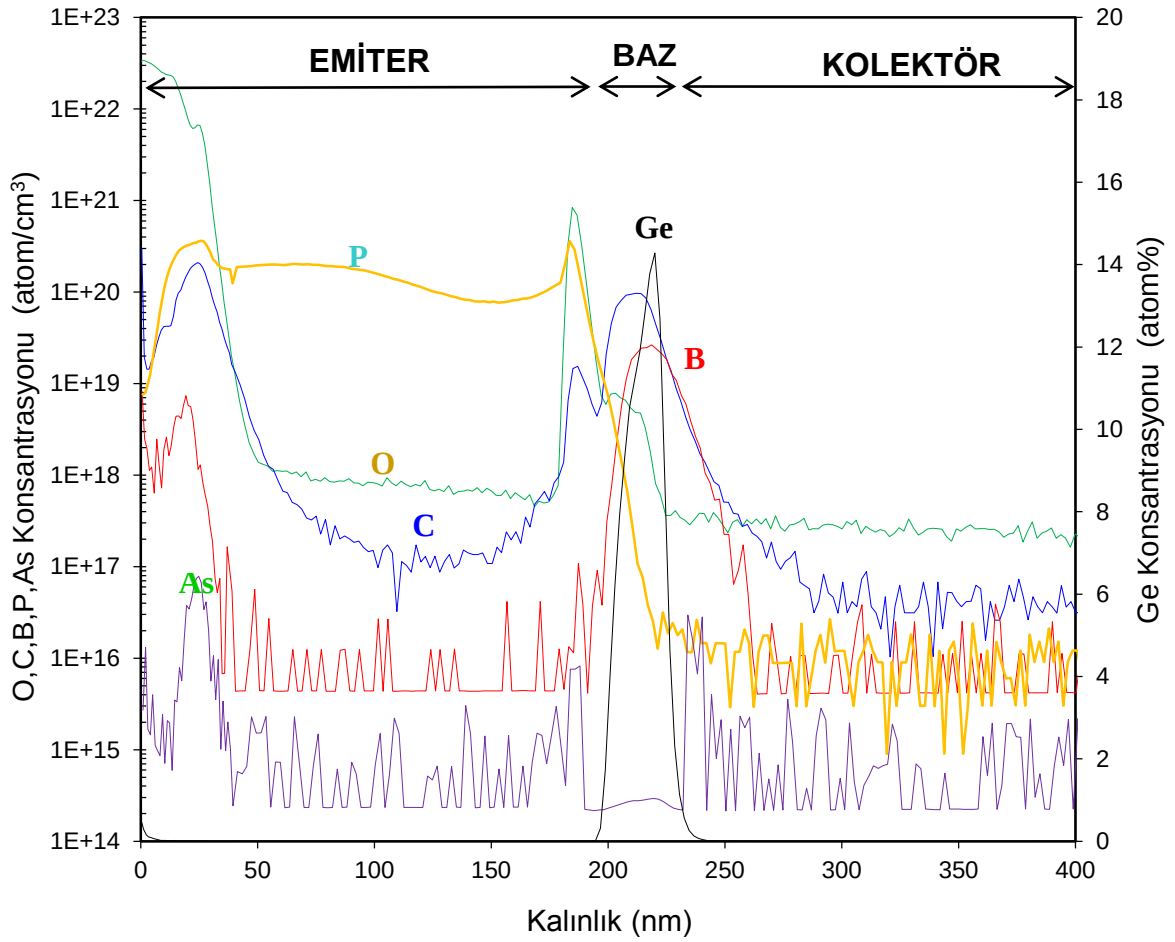
0,25 μm SiGeC BiCMOS teknolojisinin gelişmesindeki temel sorunun ısı bütçe olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Isı bütçenin düşürülmek istenmesinin sebebi, yüksek sıcaklık işlemlerinin baz bölgesine katılan bor iyonlarının kolektör bölgesine difüzyonuna sebep olmasıdır [79]. Bu istenmeyen durumu minimize etmek için tez çalışmasının konusu olan SiGeC film büyütme sıcaklığı silan gazı kullanılarak 625°C 'ye kadar düşürülmüştür. Silan gazı kullanarak 625°C ' de büyütülen epitaksiyel SiGeC filminin SIMS analiz sonucu Şekil 4.14'de verilmiştir. Silisyum pula 625°C ' de silan gazı kullanılarak epitaksiyel ~ 250 Å bor katkı SiGeC ve ~ 150 Å SiCap filmleri büyütülmüştür. Daha sonra emiter bölgesinde yaklaşık ~ 1500 Å fosfor katkı polikristal silisyum büyütülmüştür. Şekil 4.14'de transistörün baz bölgesine katılan bor iyonlarının baz bölgesinden kolektör bölgesine difüzyonun gerçekleşmediği görülmüştür. Bu grafik p-n jonksiyonlarının transistörde istenen formda oluştuğunun göstergesidir. Silan gaz kaynağı kullanılarak istenilen bor profili elde edilmiş olup transistörün elektriksel olarak performansı da ölçülmüş ve bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



Şekil 4.14. Silisyum yüzeyine silan gazı ile büyütülen filmlerin derinliğe bağlı katkı konsantrasyonunun derinliğe bağlı profili

Literatürde seçici epitaksiyel SiGeC film büyütmede yaygın olarak diklorosilan (SiCl_2H_2) gazı kullanılmaktadır. Diklorosilan gazı kullanılarak yüksek sıcaklıkta (725°C ' de) büyütülen epitaksiyel SiGeC filminin SIMS analiz sonucu Şekil 4.15'de verilmiştir. SIMS çalışmasında düz silisyum pul yüzeyine transistörün temel katmanları olan kolektör, baz ve emiter katmanları sırasıyla büyütülmüştür. Kolektör katmanı da arsenik iyonu katkılanarak $\sim 2000 \text{ \AA}$ epitaksiyel silisyum film büyütülmüştür. Baz katmanında 725°C 'de diklorosilan gazı kullanılarak epitaksiyel $250 \text{ \AA}$ bor katkılı SiGeC ve $150 \text{ \AA}$ SiCap filmleri büyütülmüştür. Daha sonra emiter katmanında fosfor iyonu katkılanarak $\sim 1500 \text{ \AA}$ polikristal silisyum büyütülmüştür. Grafiğe bakıldığında baz bölgesindeki yüksek konsantrasyonlu ($1 \times 10^{19} \text{ at/cm}^3$) p tipi katkı iyonlarının kolektör bölgesindeki düşük konsantrasyonlu ($1 \times 10^{18} \text{ at/cm}^3$) n tipi katkı iyonlarına difüzyonun gerçekleşmesi kolektör bölgesinin p tipi katkılanmasına sebep olmuştur. Bu istenmeyen durum transistörün performansını doğrudan

etkilemekte olup akım-gerilim ölçümünde kolektör akımını düşürdüğü görülmüştür. Transistör ölçüm sonucu elektriksel karakterizasyon bölümünde tartışılmıştır.

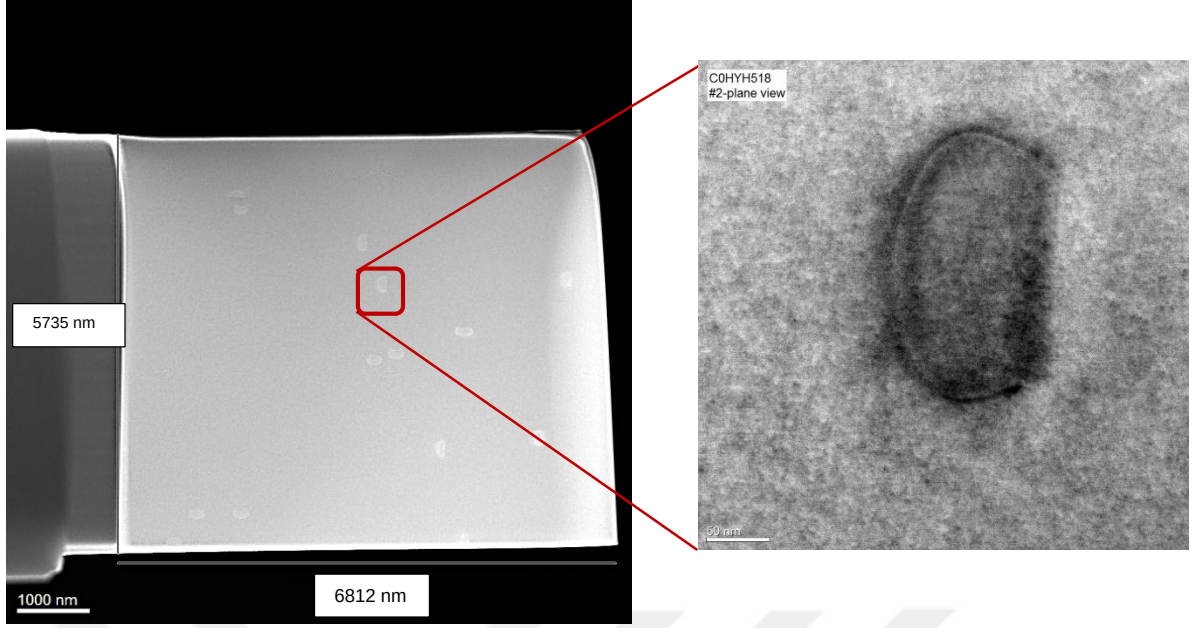


Şekil 4.15. Silisyum yüzeyine diklorosilan gazı ile büyütülen SiGeC filminin derinliğe bağlı katkı konsantrasyon profili

4.3.3. TEM Analiz Bulguları

Büyütülen epitaksiyel filmlerin kristal yapısı, kristal yapı içerisindeki dislokasyon yoğunluğu, yüzey morfolojisi hakkında detaylı bilgi edinmek için kullanılmıştır [66,56]. Dislokasyonlar kristal yapı içerisinde eksik kalmış atomsal düzlemlerdir.

Tez çalışması kapsamında TEM karakterizasyonu Evans Analytical Group (Amerika) firmasında FEI Technai TF-20 FEG/TEM cihazı ile 200Kv da aydınlık alan (BF) TEM ve yüksek açılı açışal karanlık alan (HAADF) STEM modunda alınmıştır. TEM analizinde film içerisindeki kusurlar, gönderilen ışının yönünü etkileyeceğinden, kusurları belirlemede oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Silisyum üzerine büyütülen epitaksiyel SiCap/SiGeC/Si yapısına ait TEM görüntüleri Şekil 4.16' da sunulmuştur.



Şekil 4.16. Epitaksiyel SiCap/SiGeC/Si yapısına ait TEM görüntüsü

Şekil 4.16' daki TEM görüntüsü ile 1000nm büyötmeye sahip fotoğraf kullanılarak dislokasyon yoğunluğu Çizelge 4.9' da hesaplanmıştır. Büyötülen tek kristal filmlerdeki dislokasyon yoğunluğu, kristalin birim hacmindeki kusurların sayısını temsil etmektedir.

Çizelge 4.9. SiGeC filmindeki dislokasyon yoğunluğunun hesaplanması*

Kusurların Sayısı (adet)	Fotoğraf boyutu (μm^2)	Dislokasyon yoğunluğu (cm^{-2})
14	39.07	3.6×10^7

*Ortalama değler alınmıştır.

Çizelge 4.9'a göre büyötülen epitaksiyel filmin dislokasyon yoğunluğu $\sim 3.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ mertebesindedir. Kristal kafes içerisindeki dislokasyon yoğunluğu büyötülen filmin gerinim katsayısına bağılı olarak değışmekle birlikte, bugüne kadar yapılan çalışmalarda gerinmiş yapıda epitaksiyel SiCap/SiGeC/Si yapısının dislokasyon yoğunluğu $1 \times 10^6 - 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ civarındadır [80,81]. Büyötülen filmlerin dislokasyon yoğunluğu düşük olarak adlandırılabilir seviyededir. Dislokasyon yoğunluğunun düşük olması filmlerin kristalleşme seviyesinin iyi olduğunun bir göstergesidir.

Dislokasyon yoğunluğu epitaksiyel film büyötmeye önemli bir parametre olup, transistör performansını doğrudan etkilemektedir. Transistöre büyötülen epitaksiyel

filmlerde dislokasyon yoğunluğunun fazla olması, kusurlar arasından sızıntı akımının artmasına bu da elektronik gürültünün oluşmasına sebep olduğundan istenmeyen bir durumdur. [82].

4.3.4. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sonuçları

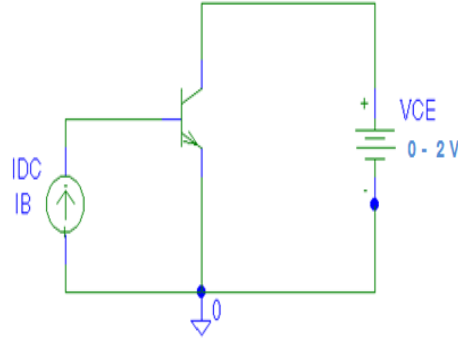
Tez çalışmasının temel amacı büyütülen epitaksiyel filmlerin SiGeC BiCMOS transistör gerekliliklerine uygun olmasıdır. Bu kapsamda büyütülen epitaksiyel SiGeC ve SiCap filmleri, yapısal ve morfolojik karakterizasyonları tamamlandıktan sonra SiGeC BiCMOS transistörün ilk üretim aşaması olan SiGeC HBT teknolojisinde uygulanmıştır. Transistörün DC akım-gerilim ölçümleri YİTAL'de bulunan Cascade Microtech's Inc. cihazı ile yapılmıştır.

Transistörün temel çalışma prensibi, elektronları emiter ucundan ileri yönde kutuplanmış baz emiter jonksiyonundan, baz katmanını da geçerek ters yönde kutuplanmış baz-kolektör jonksiyonuna ulaştırarak, kolektör ucuna iletmektir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken iki nokta vardır. Birincisi, baz bölgesinden geçerken azınlık taşıyıcısı olan elektronların minimum birleşme (rekombinasyon) ile yok olmadan kolektöre ulaşmasıdır. İkincisi, iletimde kutuplanan emiter-baz jonksiyonunda, emitere geçen delik akımının en düşük değerde tutulmaya çalışılmasıdır. Bu nedenle emiter bölgesine polikristal silisyum film büyütülür.

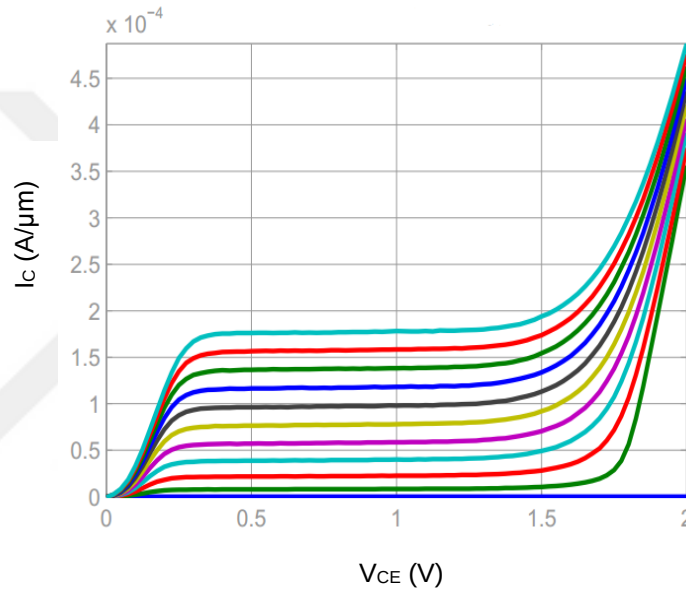
Transistörlerin parametreleri çıkış ve Gummel öz eğrileri ile belirlenmektedir. Transistörün çalışma noktasını belirlemek için öncelikle transistöre ön kutuplanma yapılması gerekmektedir. Kutuplanmanın genel nedeni, transistörü açık duruma getirerek çıkış karakteristiğini en doğrusal bölgesinde çalışmaktadır. Bunun için transistörün baz bölgesine bir DC gerilim kaynağı bağlanır ve baz bölgesine DC akım uygulanır. Üretimi tamamlanan SiGeC HBT transistörde emiter alanı ($A_E=0,13 \times 2 \text{ um}^2$) olan transistörün çıkış karakteristiğini belirlemek için kolektör-emiter gerilimini 0 V'dan başlayarak 2 V'a kadar baz akımındaki değişimine bağlı olarak, kolektör akımı ölçülmüştür.

Şekil 4.17'de (a) ve (b)' de'de sırasıyla transistörün kutuplanma şekli ve bu kutuplanmaya bağlı ölçüm sonucu verilmiştir.

(a)



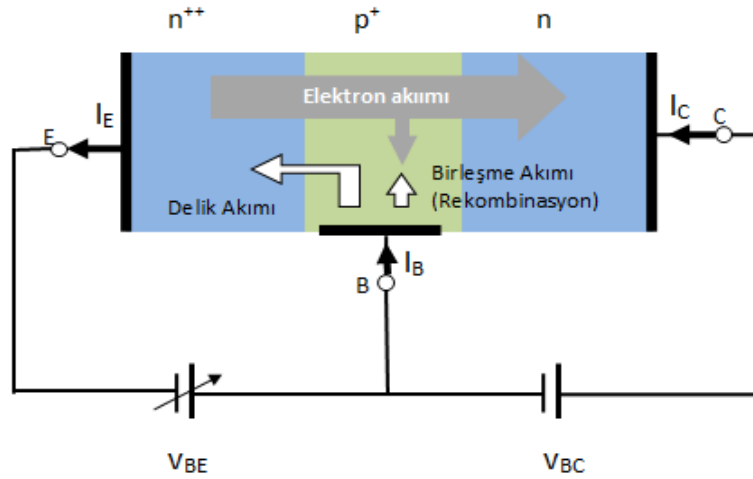
(b)



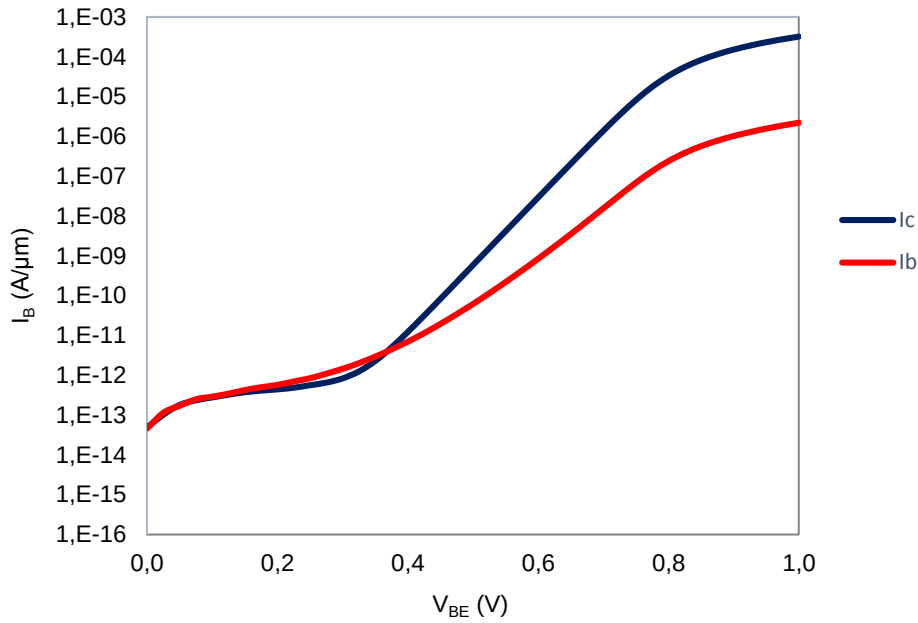
Şekil 4.17. Transistör çıkış karakteristiği (a) kutuplanma (b) kolektör-emiter gerilimine karşı kolektör akımı değişim grafiği

Şekil 4.17'de görüldüğü gibi 0-2V taramasında 1.7V'dan sonra transistörde kırılma olayı meydana gelerek bozulmaya başlamıştır.

Şekil 4.18'de transistörün fiziksel özelliklerinin belirleneceği gummel öz eğrisi için gereken kutuplanma şematik olarak gösterilmiştir. Npn tipi transistör kutuplanmasında emiter ve kolektör bölgesindeki elektronların büyük bölümü kolektöre doğru küçük bölümü ise yalnızca emiterden baz elektroduna doğru akmaktadır. Elektron akışı dış devrede de devam eder ve böylece emiter, kolektör ve baz akımları oluşur. Şekil 4.19'da npn transistörde kutuplanma gerilimine bağlı üretilen transistörün ölçme sonucu bulunmaktadır.



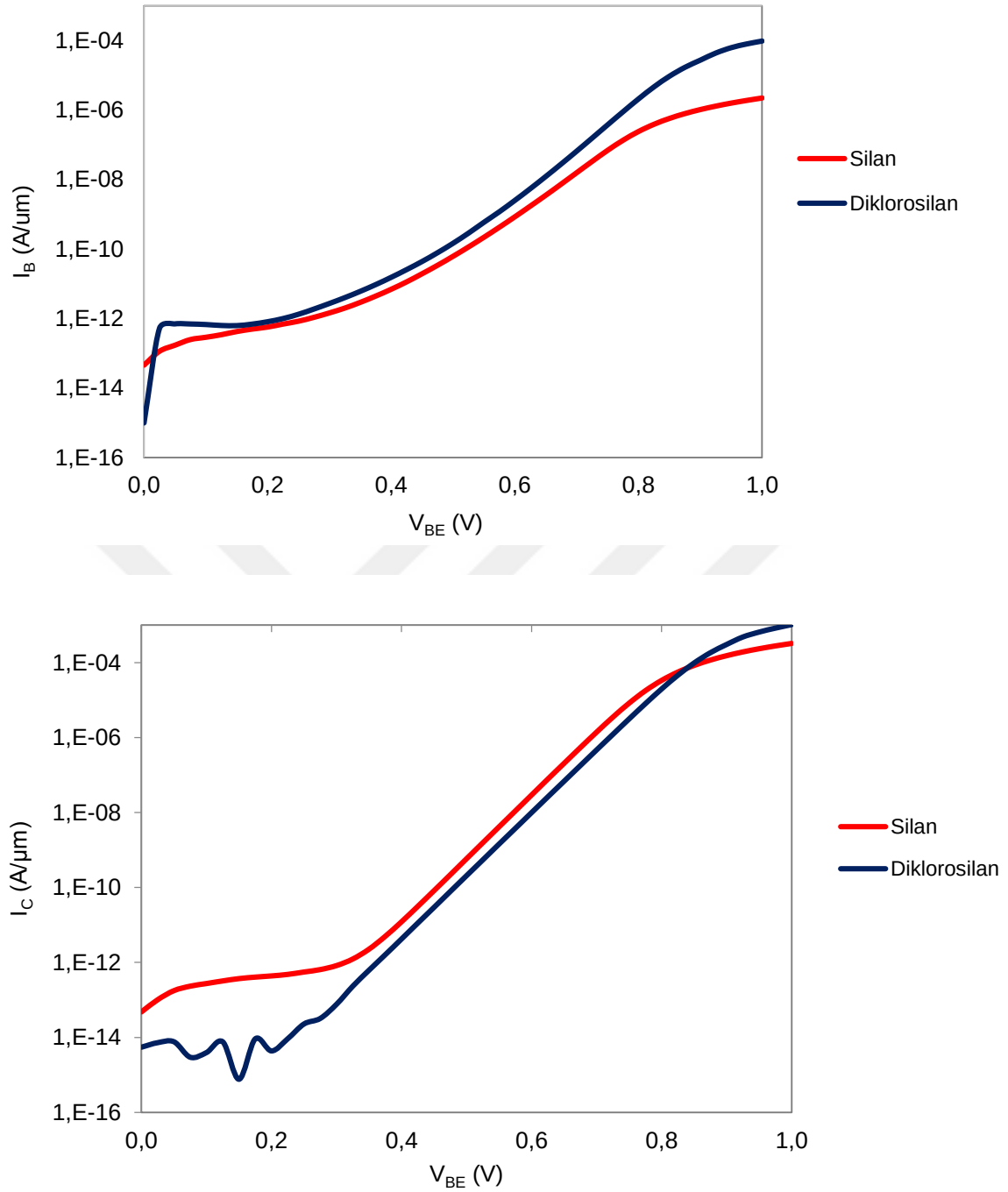
Şekil 4.18. npn tipi transistörün kutuplanması



Şekil 4.19. Baz-emiter gerilimine karşı baz ve kolektör akımı değişim grafiği

Şekil 4.19'da $V_{BE} = 0V$ 'da baz akımı emiter-baz jonksiyonundaki fakirleşmiş bölge içinde oluşan üreme ve yeniden birleşme olayı ile oluşan difüzyon akımı olup $2 \times 10^{14} \text{ A}/\mu\text{m}$ mertebesinde.

Tez çalışmasının amacı olan silan gazı ile 625°C 'de film büyütme işleminin farını göstermek için diklorosilan ile 725°C 'de büyütülen filmler transistöre uygulanmış ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Şekil 4.20'de silan ile 625°C 'de üretilen SiGeC HBT'in baz ve kolektör akımının diklorosilan ile 725°C 'de üretilen SiGeC HBT transistörlerle karşılaştırılması verilmiştir.

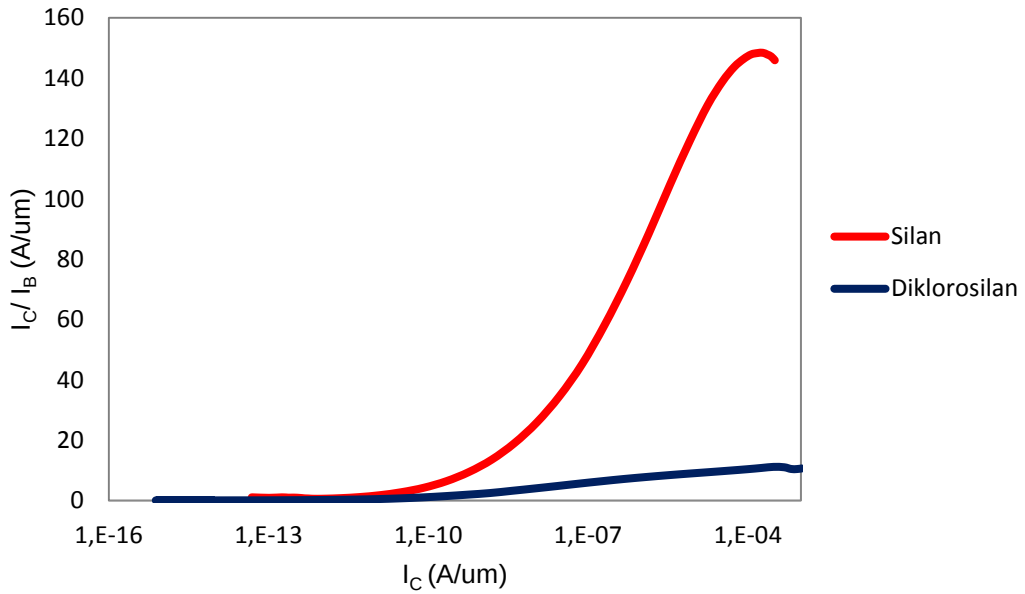


Şekil 4.20. Silan ve diklorosilan ile büyütülen SiGeC HBT transistörlerin çıkış karakteristiği **(a)** baz-emiter gerilimine karşı baz akımının değişimi **(b)** baz-emiter gerilimine karşı kolektör akımının değişimi

Şekilden de açık olarak görüldüğü gibi transistörün çalışma potansiyeli olan 0,7V'da baz akımının $1,6 \times 10^{-8}$ A kolektör akımının ise $1,4 \times 10^{-6}$ A dir. Silisyum kaynağında diklorosilan kullanıldığında 0,7V'da baz akımının $6,6 \times 10^{-8}$ A kolektör akımının ise $4,7 \times 10^{-7}$ A dir. Silan ile üretilen transistörde diklorosilan ile üretilen transistöre göre

düşük baz-emiter geriliminde daha düşük baz akımı oluşturmuştur. Baz akımının düşük baz-emiter geriliminde daha düşük gerçekleşmesinin temel nedeni baz bölgesi içindeki birleşmelerle yok olan (rekombinasyon) azınlık taşıyıcıların daha az olmasıdır. Bu ise baz bölgesi içinde büyütülen epitaksiyel SiGeC filmindeki kristal kusurlarının daha az olması ile açıklanmaktadır.

Silan ile gerçekleştirilen SiGeC HBT transistörün baz akımının düşmesine ilave olarak kolektör akımında da benzer geometrideki transistörlerle karşılaştırıldığında artış gözlenmiştir. Diklorosilan ile gerçekleştirilen transistörde Bölüm 4.3.2’de verilen SIMS verisine göre baz bölgesi katkısı olan bor iyonlarının silisyum-germanyum bölgesinin dışına çıkması ile baz bölgesi içinde bir enerji bariyeri olduğu görülmüştür. Bu nedenle, diklorosilan ile gerçekleştirilen transistörlerden beklenen kolektör akımı elde edilememekte idi. Silan ile gerçekleştirilen daha yüksek kolektör akımı ve daha düşük baz akımı elde edilmiştir. Şekil 4.21’de kolektör akımına karşı kolektör akımının baz akımına oranını veren akım kazancı (β) eğrisine göre diklorosilan ile gerçekleştirilen transistörde maksimum akım kazancı 11 iken silan ile gerçekleştirilen SiGeC HBT transistörün maksimum akım kazancı 148 olarak ölçülmüştür. Epitaksiyel film büyütmede diklorosilan yerine silan gazı kullanımının transistör akım kazancının yaklaşık 14 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 4.21. Kolektör akımına karşı akım kazancı eğrisi

5. GENEL SONUÇLAR

Sunulan tez çalışması kapsamında, SiGeC BiCMOS transistörün baz bölgesinde bulunan tek kristal silisyum üzerine tek kristal SiGeC ve SiCap filmleri silisyum kaynağında silan kullanılarak düşük sıcaklıkta büyütülmüştür. Epitaksiyel filmler RPCVD yöntemiyle büyütülmüş, yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen önemli bulgular bu bölümde özetlenmiştir.

❖ Literatürde SiGeC BiCMOS transistörde tek kristal SiGeC ve SiCap filmlerinde silisyum kaynak açısından yaygın olarak diklorosilan (SiH_2Cl_2) kullanılmaktadır. Silisyuma seçici film büyütülmek istendiğinde yapısında klor iyonu bulunduğundan silisyum nitrür film üzerinde polikristal filmlerin oluşmasına engel olmaktadır. Ancak katkı iyonu olan bor atomlarının kolektöre difüzyonuna sebep olduğundan transistörün elektriksel performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple tez çalışmasının özgünlüğü olan silan gaz kaynağı kullanılarak silisyuma seçici epitaksiyel filmler büyütülmüştür.

❖ RPCVD yöntemiyle silisyum kaynağı olarak silan kullanıldığında silisyum üzerine tek kristal film büyütmede, büyütülen filmin transistör yapısına uygunluğu ve transistörün ısı bütçesi göz önüne alındığında çalışılabilecek minimum sıcaklık değerinin SiGeC filmi için 625°C , SiCap filmi için 675°C olduğu görülmüştür. En uygun sıcaklık belirlemede filmlerin karakterizasyonu YİTAL'de bulunan spektroskopik elipsometre ile yapılmıştır. Elipsometre ile film kalınlığı, film büyüme hızı, yapıdaki alaşımların oranı belirlenmiştir.

❖ Büyütülen filmlerin tek kristal silisyum üzerinde büyüüp, silisyum nitrür filmi üzerinde büyümemesi için büyütme gazları içerisine HCl gazı eklenmiştir. HCl gazının fazla olması silisyumu aşındırıp film büyüme hızını düşürürken, az olması da silisyum nitrür filminin üzerinde polikristal filmlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda HCl gazının en uygun bir değeri vardır. SEM görüntülerine göre SiGeC film büyütmede 625°C 'de 10 Torr basınçta HCl gazı en uygun akış hızı 25 ml/dk iken SiCap film büyütmede 675°C 'de 10 Torr basınçta HCl gazı en uygun akış hızının 35 ml/dk olduğunda silisyum nitrür filminde epitaksiyel filmlerin büyümediği görülmüştür.

❖ Epitaksiyel film büyütmede büyütme gazları içerisine eklenen HCl gazı ile literatürde de rapor edildiği gibi SiGeC film büyüme hızının 2 kat azaldığı, SiCap film büyüme hızının ise 5 kat azaldığı saptanmıştır.

❖ Büyütülen filmlerin yapısal analizi HRXRD ile yapılmıştır. Yapının ω -2 θ taramasından kaliteli tek kristal filmin elde edildiği görülmüştür. Bu taramada silisyum pikin sol tarafında SiGeC piki belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda hedef kalınlık, %Ge oranı ve film gerinme katsayısına ulaşıldığı görülmüştür. HRXRD ile yapısal analiz sonucunda film kalitesinin transistör yapısına uygun olduğu görülmüştür.

❖ Gelişen teknoloji ile birlikte transistör performansındaki temel problem emiter-baz-kolektör katmanları arasında katkı iyonlarının sıcaklıkla birlikte yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru difüzyonunun gerçekleşmesidir. Transistör baz bölgesindeki SiGeC film yapısında bulunan Ge, B, O, C atomlarının film derinliğine bağlı profili için SIMS analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda silan gazı kullanılarak 625°C'de büyütülen epitaksiyel SiGeC filmde karbon atomlarının kafes içerisindeki bor atomlarının difüzyonunu engellendiği görülmüştür. Diklorosilan gazı kullanılarak 725°C'de büyütülen epitaksiyel SiGeC filmde karbon atomlarının kafes içerisindeki bor atomlarının difüzyonunu engellemediği, bor atomlarının baz bölgesinden kolektör bölgesine yayıldığı görülmüştür.

❖ SIMS analiz sonucuna göre düşük sıcaklıkta kafes içerisinde bulunan karbon atomları 'yer alan' formda bulunduğundan ve bor iyonlarının difüzyonunun sıcaklıkla doğru orantılı olduğundan sıcaklığın düşürülmesi bor atomlarının difüzyonunu engellediği görülmüştür.

❖ Büyütülen filmin kristal yapısı, yapı içindeki dislokasyon yoğunluğu ve yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek için TEM analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda filmin tek kristal formda olduğu görülmüştür. Film içerisindeki dislokasyon yoğunluğu $\sim 3.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Literatürle karşılaştırıldığında tek kristal yapılar için uygun değerde olduğu görülmüştür.

❖ Büyütülen epitaksiyel SiGeC ve SiCap filmleri YITAL'de geliştirilmekte olan SiGeC HBT prosesinde baz bölgesine büyütülmüştür. Silisyum kaynağı olarak diklorosilan kullanılarak üretilen transistör ile silan kullanarak üretilen transistörün elektriksel sonuçları karşılaştırılmıştır. Silan ile üretilen transistörde düşük V_{BE} 'lerde

daha düşük baz akımı olduğu görülmüştür. Bu durumun temel nedeni baz bölgesi içindeki birleşmelerle yok olan (rekombinasyon) azınlık taşıyıcıların daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise silan ile büyütülen SiGeC içindeki kristal kusurların daha az olması ile açıklanmaktadır. Transistörün çalışma potansiyeli olan 0,7V'da baz akımının $1,6 \times 10^{-8}$ A kolektör akımının ise $1,4 \times 10^{-6}$ A olduğu görülmüştür. Silisyum kaynağında diklorosilan kullanıldığında 0,7V'da baz akımının $6,6 \times 10^{-8}$ A kolektör akımının ise $4,7 \times 10^{-7}$ A olduğu görülmüştür. Silan gazı kullanılarak düşük sıcaklıkta üretilen transistörde kolektör akımının baz akımına oranı olan akım kazancı, maksimum 148, diklorosilan gazı kullanılarak yüksek sıcaklıkta üretilen transistörde ise akım kazancı maksimum 11 olarak tespit edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Brtein, E., Kumdan Mikrolemciye uzanan uzun ince yol, TBTAK Bilim Teknik Dergisi, 44-47, **2012**.
- [2] Brtein, E., Moore Kanunu ve post silisyum çağına doğru, TBTAK Bilim Teknik Dergisi, 38-43, **2013**.
- [3] Bardeen, J. Brattain, W.H., The transistor, a semi-conductor triode, *Physical Review*, 71, 230–231, **1947**.
- [4] Shockley, W., Sparks, M., Teal, G.K., p–n junction transistors, *Physical Review*, 83, 151–162, **1951**.
- [5] Tanenbaum, M. Thomas, D.E., Diffused emitter and base silicon transistors, *Bell System Technical Journal*, 35, 23–34, **1956**.
- [6] Theuerer, H.C., Kleimack, J.J., Loar, H.H., Christensen, H., Epitaxial diffused transistors, *Proceedings of the IRE*, 48, 1642–1643, **1960**.
- [7] Kasper, E., Herzog, H.J., Kibbel, H., A one-dimensional SiGe superlattice grown by UHV epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 8, 1541–1548, **1975**.
- [8] Hame, D.L., Crabbe, E.F., Cressler, J.D., Comfort, J.H., Sun, J.Y., Stiffler, S.R., Kobeda, E., Burghartz, J.N., Gilbert, M.M., Malinowski, J., Dally, A.J., A high-performance epitaxial SiGe-base ECL BiCMOS technology. *Technical Digest IEEE International Electron Devices Meeting*, 19-22, **1992**.
- [9] Ryum, B.R., Kim, S., The effect of dopant outdiffusion on the neutral base recombination current in Si/SiGe/Si Heterojunction Bipolar Transistors, *Etri Journal*, 15, 61-69, **1994**.
- [10] John D. Cressler, *The Silicon Heterostructure Handbook: Materials, fabrication, devices, circuits and applications of SiGe and Si strained layer epitaxy*, (eds: Cressler, J.D.), Taylor & Francis, Boston, 3-157, **2006**.
- [11] Grahn, H.T., *Introduction to Semiconductor Physics*, World Scientific, Singapore, 1-32, **1999**.
- [12] Balkanski, M., Wallis, R.F., *Semiconductor Physics And Applications*, Oxford University Press, New York, 1-42, **2000**.
- [13] Yacobi, B.G., *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*, (eds: Brodie, I., Sher, A.), Kluwer Academic Publishers, Canada, 59-144, **2004**.
- [14] Levinstein, M., Simin, G., *Transistors: From Crystals to Integrated Circuits*, (eds: Perelman, M.M.), World Scientific Publishing, Singapore, 1-197, **1998**.
- [15] Godse, A.P., Bakshi, U.A., *Electronic Devices & Circuits-I*, Technical Publications Pune, India, 1-34, **2008**.
- [16] Stout, L.M., *Column IV Alloy Growth, Characterization and Heterojunction Device Fabrication*, Doctor of Philosophy, Arizona State University, United States, **1996**.
- [17] Gao, J., *Heterojunction Bipolar Transistors for Circuit Design: Microwave Modeling And Parameter Extraction*, John Wiley & Sons Pte Ltd, Singapore, 1-115, **2015**.

- [18] Kumar, B., Jain, S.B., *Electronic Devices And Circuits*, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delphi, 184-216, **2008**.
- [19] Sharma, A.K., *Semiconductor Electronics*, New Age International Publishers, New Delphi, 55-81, **2001**.
- [20] Ashburn, P., *SiGe Hetrojunction Bipolar Transistors*, John Wiley & Sons Ltd, England, 1-186, **2003**.
- [21] Hartmann, J.M., Loup, V., Rolland, G., Laugier, F., Vannufel, C., Semeria, M.N., SiGe growth kinetics and doping in reduced pressure-chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth*, , 236, 10–20, **2002**.
- [22] Boer, W.B., Meyer, D.J., Low-temperature chemical vapor-deposition of epitaxial Si and SiGe layers at atmospheric-pressure, *Applied Physics Letter*, 58, 1286–1288, **1991**.
- [23] Pattanalk, A.K., Sarin, V.K., Basic principles of CVD Thermodynamics and kinetics, *Chemical Vapor Deposition*, (eds: Park, J.H., Sudarshan, T.S.), The Materials Information Society, United States, 23-45, **2001**.
- [24] Salemi, A., *Low temperature epitaxy growth kinetic and modelling of SiGe for BiCMOS*, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, **2011**.
- [25] Sherman, A., *Chemical Vapor Deposition for Microelectronics: Principles, Technology and Applications*, (eds: Bunshah, R.F., McGuire, G.E.), Noyes Publications, California, 1-90, **1987**.
- [26] Pohl, U.W., *Epitaxy Of Semiconductors: Introduction to Physical Principles*, (eds: Rhodes, W.T., Stanley, H.E., Needs, R.), Springer, Berlin, 2-9, **2013**.
- [27] Spadafora, M., Terrasi, A., Mirabella, S., Piro, A., Grimaldi, M.G., Scalese, S., Napolitani, E., Marino, M.D., Salvador, D.D., Carnera, A., Dry oxidation of MBE-SiGe films: rate enhancement, Ge redistribution and defect injection, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 8, 219–224, **2005**.
- [28] Kasper, E., Lyutovich, K., Strain adjustment with thin virtual substrates, *Solid State Electronics*, 48, 1257–1263, **2004**.
- [29] Yamamoto, Y., Kopke, K., Weidner, G., Tillack, B., Epitaxial growth of Si:C/Si/SiGe into cavity formed by selective etching of SiGe, *Solid State Electronics*, 53, 824–827, **2009**.
- [30] Jang, J.H., Phen, M.S., Siebein, K., Jones, K.S., Craciun, V., Observation of defects evolution in strained SiGe layers during strain relaxation, *Materials Letter*, 63, 289–291, **2009**.
- [31] Crippa, D., Rode, D.L., Masi, M., Epitaxial growth techniques: molecular beam epitaxy, *Silicon Epitaxy: Semiconductors and semimetals*, (eds: Willardson, R.K., Weber, E.R.), Academic Press, Unites States, 151-182, **2001**.
- [32] Di, Z., Zhang, M., Liu, W., Lin, C., Chu, P.K., Fabrication of thick, high-quality strained SiGe layer on ultra-thin silicon-on-insulator and modeling of film strain, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 7, 393–397, **2004**.
- [33] Menon, C., Radamson, H.H., Landgren, G., High quality SiGe epitaxial layer grown by RPCVD using Dichlorosilane, *The Third International Euro*

- Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, 201–204, **2000**.
- [34] Kamins, T.I., Meyer, D.J., Kinetics of silicon-germanium deposition by atmospheric-pressure chemical vapor-deposition, *Applied Physics Letter*, 59, 178-180, **1991**.
 - [35] Dismukes, J.K., Ekstrom, L., Paff, R.L., Lattice parameter and density in germanium–silicon alloys. *The Journal of Physical Chemistry*, 68, 3021–3027, **1964**.
 - [36] Hallstedt, J., *Epitaxy and characterization of SiGeC layers grown by reduced pressure chemical vapor deposition*, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, **2004**.
 - [37] Matthews, J.W., Blakeslee, A.E., Defects in epitaxial multilayers. III. Preparation of almost perfect layers, *Crystal Growth*, 32, 265–273, **1976**.
 - [38] Brossard, F., Vandelle, B., Chevalier, P., Dutartre, D., Improved carbon incorporation in selective epitaxial growth of SiGe:C for HBT Applications, SiGe Technology and Device Meeting, **2006**.
 - [39] Osten, H.J., Supersaturated carbon insilicon and silicon/germanium alloys, *Materials Science and Engineering*, 36, 268-274, **1996**.
 - [40] Powell, A., Iyer, S., Silicon-Germanium-Carbon alloys extending Si based heterostructure engineering, *Japan Journal of Applied Physics*, 33, 2388-2391, **1994**.
 - [41] Stein, B.L., Yu, E.T., Croke, E.T., Hunter, A.T., Laursen, T, Bair, E.A., Mayer, J.W., Ahn C.C., Measurement of band offsets in Si/Si_{1-x}Ge_x and Si/Si_{1-x-y}Ge_xC_y heterojunctions, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 15, 1108-1111, **1997**.
 - [42] Zaumseil, P., X-ray Diffraction Studies of the influence of Substitutional Carbon on SiGe Interdiffusion in SiGe/Si Superlattices, *Solid State Phenomena*, 69-70, 203-208, **1999**.
 - [43] Kanzawa, Y., Nozawa, K., Saitoh, and M. Kubo, Dependence of substitutional C incorporation on Ge content for Si_{1-x-y}Ge_xC_y crystals grown by ultrahigh vacuum chemical vapor deposition, *Applied Physics Letters*, 77, 3962-3964, **2000**.
 - [44] Rinaldi, A.M, Crippa, D., CVD Technologies for Silicon: A Quick Survey, *Silicon Epitaxy*, (eds: Willardson, R.K., Weber, E.R.), Academic Press, Unites States, 1-50, **2001**.
 - [45] Cavallotti, C., Masi, M., Epitaxial Growth Theory: Vapor Phase And Surface Chemistry, *Silicon Epitaxy*, (eds: Willardson, R.K., Weber, E.R.), Academic Press, Unites States, 51-86, **2001**.
 - [46] Liehr, M., Greenlief, C.M., Kasi, S.R., Offenber, M., Kinetics of silicon epitaxy using SiH₄ in a rapid thermal chemical vapor deposition reactor, *Applied Physics Letter*, 56, 629-631, **1990**.
 - [47] Damlenocourt, J., Low temperature epitaxy of Si and SiGe using disilane based chemistry for electronic purposes, *The Electrochemical Society*, 28, 343-348, **2010**.

- [48] Sedgwick, T.O., Berkenblit, M., Kuan, T.S., Low temperature selective epitaxial growth of silicon at atmospheric pressure, *Applied Physics Letters*, 54, 2689-2691, **1989**.
- [49] Boer, W.B., Tersptra, D., Berkum, J.G.M., Selective versus non-selective growth of Si and SiGe, *Materials Science And Engineering*, 67, 46-52, **1999**.
- [50] Choi, A.R., Choi, S.S., Kim, J.T., Cho, D.H., Han, T.H., Shim, K.Y., Low temperature selective epitaxial growth of SiGe layers using various dielectric mask patterns and process conditions, 254, 6081-6085, *Applied Surface Science*, **2008**.
- [51] Schafer, H., Böck, J., Stengl, R., Knapp, H., Aufinger, K., Wurzer, M., Boguth, S., Rest, M., Schreiter, R., Meister, T.F., Selective epitaxial growth of SiGe:C for high speed HBTs, 224, 18-23, *Applied Surface Science*, **2003**.
- [52] Wirths, S., Buca, D., Tiedemann, A.T., Bernardy, P., Hollander, B., Stoica, T., Musysler, G., Breuer, U., Mantl, S., Low temperature RPCVD epitaxial growth of Si_{1-x}Ge_x using Si₂H₆, Ge₂H₆, *Solid State Electronics*, 83, 2-9, **2013**.
- [53] Cressler, J. D., SiGe HBT technology: A new contender for Si-based RF and microwave circuit applications, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46 , 572–589, **1998**.
- [54] Houghton, D. C., Gibbings, C. J., Tuppen, C. G., Lyons, M. H., Halliwell, M. A. G., The structural stability of uncapped versus buried Si_{1-x}Ge_x strained layers through high temperature processing, *Thin Solid Films*, 183, 171–182, **1989**.
- [55] Noble, D. B., Hoyt, J. L., Gibbons, J. F., Thermal stability of Si/Si_{1-x}Ge_x/Si heterojunction bipolar transistor structures grown by limited reaction processing, *Applied Physics Letter*, 55, 1978–1980, **1989**.
- [56] Houghton, D. C., Strain relaxation kinetics in Si_{1-x}Ge_x/Si heterostructures, *Journal of Applied Physics*, 70, 2136-2151, **1991**.
- [57] Singh, J., *Electronic And Optoelectronic Properties Of Semiconductor Structures*, Cambridge University Press, New York, 1-107, **2003**.
- [58] Ayers, J., Kujofsa, T., Rago, P., Raphael, J., *Heteroepitaxy of Semiconductors: Theory, Growth and Characterization*, Taylor & Francis Group, USA, 267-269, **2017**.
- [59] Ferrari, C., Buffagni, E., Rossi, F., Strain and composition determination in semiconductor heterostructures by high resolution x-ray diffraction, *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*, Elsevier, USA, 75-111, **2013**.
- [60] Azzam, R.M.A., Bassara, N.M., *Ellipsometry and polarized light*, Elsevier, Canada, 529, **1987**.
- [61] Woollam, J., A., *Spectroscopic Ellipsometry Data Acquisition And Analysis Software*, J.A. Woolam Co., Lincoln, 696, **2012**.
- [62] Vedam, K., Spectroscopic ellipsometry: a historical overview, *Thin Solid Film*, 313-314, 1-9, **1988**.

- [63] Chen, J., *Spectroscopic Ellipsometry Studies of II-VI Semiconductor Materials and Solar Cells, Physics, Doctor of Philosophy*, The University of Toledo, Ohio, 268, **2010**.
- [64] Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Fiori, C., Lifshin, E., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Plenum Press, New York, 1-689, **2007**.
- [65] Young R.A., Kalin, R.V., *Scanning Electron Microscopic Techniques for Characterization of Semiconductor Materials, Microelectronic Processing: Inorganic Material Characterization*, American Chemical Society Symposium Series, 295, 49–74, **1986**.
- [66] Fox, A., Heinemann, B., Rücker, H., Double polysilicon SiGe HBT architecture with lateral base link, *Solid State Electronics*, 60, 93-99, **2011**.
- [67] Skibitzki, O., Yamamoto, Y., Schubert, M.A., Tillack, B., Lateral solid phase epitaxy of amorphous grown Si_{1-x}Ge_x layers on SiO₂/Si (100) substrates using in situ RPCVD postannealing, *Thin Solid Films*, 593, 91-95, **2015**
- [68] Ehrke, H., Maul, H., Quantification of Ge and B in SiGe using secondary ion mass spectrometry, *Materials science in Semiconductor Processing*, 8, 111-114, **2005**.
- [69] Lu, S., Kottle, M8., Zollner, S., Chen, W., High depth resolution secondary ion mass spectroscopy (SIMS) analysis of SiGe:C HBT Structures, *American Institute of Physics*, 550, 672-678, **2001**.
- [70] Tillack, B., Yamamoto, Y., Knoll, D., Heinemann, B., Schley, P., Senapati, B., Krüger, D., High performance SiGe:C HBTs using atomic layer base doping, *Applied Surface Science*, 224, 55-58, **2004**.
- [71] Schroder, D.K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, 1-251, **2006**.
- [72] Hashimoto, T., Tokunaga, K., Fukumoto, K., Yoshida, Y., Satoh, H., Kubo, M., Shima, A., Oda, K., SiGe HBT technology based on a 0.13µm process featuring an fmax of 325Ghz, *Electron Device Society*, 2, **2014**.
- [73] Kriso, C., Triozon, F., Delerue, C., Scheneider, L., Abbate, F., Nolot, E., Rideau, D., Niquet, Y.M., Mugny, G., Tavernier, C., Modeled optical properties of SiGe and Si layers compared to spectroscopic ellipsometry measurements, *Solid State Electronics*, 129, 93-96, **2016**.
- [74] Fujiwara, H., *Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications*, John Wiley & SonS, 262-274, **2003**.
- [75] Seo, D., Bae, J.S., Oh, E., Kim, S., Lim, S., Selective wet etching of Si₃N₄/SiO₂ in phosphoric acid with the addition of fluoride and silicic compounds, *Microelectronic Engineering*, 118, 66-71, **2013**.
- [76] Cavallini, A., Polenta, L., *Electrical characterization of nanostructures, Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*, Elsevier, 55-91, **2008**.
- [77] Mooney, P.M., Chu, J.O., SiGe Technology: Heteroepitaxy and High Speed Microelectronics, *Annual Review Materials Science*, 30, 335-362, **2000**.

- [78] Xue Z.Y., Chen, D., Liu, L.J., Jiang, H.T., Bian, J.T., Wei X., Di, Z.F., Zhang, M., Wang, X., Fabrication of high quality strained SiGe on Si substrate by RPCVD, *Chinese Science Bulletin*, 57, 1862-1867, **2012**.
- [79] Mirabella, S., Salvador D.D., Napolitani, E., Bruno, E., Priolo, F., Mechanisms of boron diffusion in silicon and germanium, *Applied Physics*, 113, **2013**.
- [80] Jain, S.C., Harker, A.H., Cowley, R.A., Misfit strain and misfit dislocations in lattice mismatched epitaxial layers and other systems, *Philosophical Magazine A*, 75, 1461-1515, **1997**.
- [81] Lutz, M. A., Feenstra, R. M., Legoues, F.K., Influence of misfit dislocations on the surface morphology of Si_{1-x}Ge_x films, *Applied Physics*, 66, 724-726, **1995**.
- [82] Mooney, P.M., Strain relaxation and dislocations in SiGe/Si structures, *Reports: A Review Journal*, 17, 105-146, **1996**.
- [83] Pürçek, G., Metallerde Mukavemet Artırıcı Mekanizmalar, **2007**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Aylin Kangallı
Doğum Yeri : Malatya
Medeni Hali : Bekar
E-posta : aylinkangalli@gmail.com
Adres : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü,
BEYTEPE/ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri Düzey

İş Deneyimi

01.02.2016 – : Araştırmacı Mühendis, BİLGEM/TÜBİTAK
GEBZE/KOCAELİ

Deneyim Alanları

Yarı İletken Teknolojileri, Kimyasal Film Büyütme

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA**

Tarih: 26/03/2018

Tez Başlığı / Konusu: **Düşük Sıcaklıkta Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemiyle Epitaksiyel SiGe Film Büyütme ve Film Karakterizasyonu**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 75 sayfalık kısmına ilişkin, 12/03/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

26/03/2018

Adı Soyadı: AYLİN KANGALLI

Öğrenci No: N14120710

Anabilim Dalı: KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

Programı: KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Selma MUTLU