

**POLİSİLİSYUM TABAKA ÜZERİNE FOTOLİTOGRAFI
YÖNTEMİ İLE 0,3 μm ŞEKİLLENDİRME
PROSESİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeliha ÖZDOĞAN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

**POLİSİLİSYUM TABAKA ÜZERİNE FOTOLİTOGRAFI
YÖNTEMİ İLE 0,3 μm ŞEKİLLENDİRME
PROSESİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zeliha ÖZDOĞAN
(521111008)**

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521111008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Zeliha ÖZDOĞAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**POLİSİLİSYUM TABAKA ÜZERİNE FOTOLİTOGRAFI YÖN-TEMİ İLE 0,3 μm ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİN OPTİMİZASYONU**” baş-
lıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Kamil ÜRGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali TANGEL
Kocaeli Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tümdevre üretimi elektronik, malzeme, kimya ve fizik disiplinlerinin tümünü kapsayan bir uygulama alanıdır. Üretim basamakları arasında önemli bir yere sahip olan litografi işlemi sırasında maskenin üzerinde bulunan mikro ya da nanometre boyutlu şekiller, birbirini takip eden bir takım kimyasal işlemler sonunda yarı iletken üzerine transfer edilmiş olur. Litografi işlemi sonrasında ise ince film kaplamanın bir sonraki tümdevre üretim adımlarında (aşındırma, iyon ekme vb.) mekanik, termal ve kimyasal dayanıklılığı sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle litografi adımı malzeme ve özellikle kimya mühendisliği kapsamına giren bilgilerin yoğunlukla kullanıldığı bir proses adımıdır. Bu doğrultuda tez konumu destekleyerek, bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Hüsnü Atakül'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında litografi konusundaki birikimini benimle paylaşarak yardımcı olan TÜBİTAK-YİTAL, Proje Yürütücüsü Dr. Aylin Ersoy'a, çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK-YİTAL, Enstitü Müdür Yardımcısı Dr. Aziz Ulvi Çalışkan'a, hem fikirleri ile destek veren hem de pul örneklerinin hazırlanmasında ve FIB görüntülerinin alınmasında yardımcı olan tüm YİTAL çalışanlarına ve özverilerinden dolayı eşime ve aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Zeliha ÖZDOĞAN
Kimya Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	5
2.1 Tümdevre Üretim Teknolojileri	5
2.2 Tümdevre Üretiminde Temel Proses Adımları	7
2.2.1 Litografi (Fotolitografi)	8
2.2.1.1 İnce filmin optik etkisi	16
3. LİTOGRAFİ PROSES PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	23
3.1 Fotorezist Kaplama.....	23
3.2 Fotorezist Kütleme İşlemi	26
3.3 Yansıma Önleyici Kaplama ve Kürlenmesi	28
3.4 Şekillendirme.....	31
3.5 Şekillendirme Sonrası Kütleme ve Banyo İşlemi.....	32
3.6 Sertleştirme.....	38
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
4.1 Kullanılan Materyal ve Kimyasallar	41
4.2 Proses ve Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar	41
4.3 Deney Örneklerinin Hazırlanması	43
4.4 Kullanılan Deneysel Tasarım Metodu	45
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	49
5.1 Fotorezist Kaplama ve Kürlenmesi	49
5.1.1 Varyans analizi (ANOVA)	53
5.1.2 Doğrulama testi	55
5.1.3 Kütleme işlemi	56
5.2 Yansıma Önleyici Kaplama ve Kürlenmesi.....	56
5.2.1 Yansıma ve yansıma dağılım değerlerinin optimizasyonu	57
5.2.1.1 Varyans analizi (ANOVA)	61
5.2.1.2 Doğrulama testi	63
5.2.2 Yansıma önleyici kaplama seçimi	64

5.2.2.1 Işıklandırma şiddetinin etkisi.....	65
5.2.2.2 Fokus derinliği.....	65
5.2.3 Kritik boyut dağılımı	68
5.3 Şekillendirme.....	72
5.4 Şekillendirme Sonrası Kürleme ve Banyo İşlemi	73
5.4.1 Şekillendirme sonrası kürleme	73
5.4.2 Banyo prosesi	75
5.5 Sertleştirme	77
5.5.1 Fotorezistin aşınma prosesine karşı direnci	77
5.5.1.1 Varyans analizi (ANOVA)	82
5.5.1.2 Doğrulama testi.....	84
5.5.2 Kritik boyutun değişimi	84
6. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR.....	91
EKLER	95
EK A.1	97
EK A.2.....	98
ÖZGEÇMİŞ	99

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
DUV	: Derin Ultraviyole
FIB	: Fokuslanmış İyon Demeti ile Görüntü Alan Cihaz
LPCVD	: Düşük Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme
NA	: Sayısal Açıklık (Numerical Aperture)
S/N	: Sinyal/Gürültü (Signal/Noise)
TMAH	: Tetrametil Amonyum Hidroksit Çözeltisi
UV	: Ultraviyole

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Optik litografide kullanılan ışık kaynakları.....	14
Çizelge 3.1 : Fotorezist kaplama prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.	26
Çizelge 3.2 : Fotorezist bileşenlerinin camsı geçiş ve bozunma sıcaklıkları.....	27
Çizelge 3.3 : Işıklandırma öncesi kütleme işleminin proses parametreleri ve sonuç değişkenleri.....	28
Çizelge 3.4 : Yansıma önleyici kaplama ve kütleme adımlarının parametreleri ve sonuç değişkenleri.....	31
Çizelge 3.5 : Şekillendirme prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.....	32
Çizelge 3.6 : Şekillendirme sonrası kütleme ve banyo prosesi için belirlenen proses parametreleri ve sonuç değişkenleri.....	37
Çizelge 3.7 : Sertleştirme prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.....	39
Çizelge 4.1 : Canon şekillendirme cihazının özellikleri.....	42
Çizelge 4.2 : Şekillendirme parametreleri.....	44
Çizelge 4.3 : Çalışmalarda kullanılan UV enerji yoğunluk değerleri.....	45
Çizelge 5.1 : Faktörler ve faktör Seviyeleri.....	49
Çizelge 5.2 : L ₈ ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.....	50
Çizelge 5.3 : Kalınlık ve kalınlık değişim oranı Sonuçları.....	51
Çizelge 5.4 : Kalınlığın sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.....	51
Çizelge 5.5 : Kalınlık değişiminin sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.....	51
Çizelge 5.6 : Faktör seviyeleri için ortalama sinyal/gürültü (S/N) oranları.....	53
Çizelge 5.7 : Kalınlık değerleri ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.....	54
Çizelge 5.8 : Kalınlık değişim oranları ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.....	55
Çizelge 5.9 : Yansımayı önleyici kaplamanın yapılmasını etkileyen faktörler ve seviyeleri.....	57
Çizelge 5.10: L ₉ ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.....	58
Çizelge 5.11: Kaplanmış ve kürlenmiş pulların yansıma ve yansıma değişim oranı sonuçları.....	58
Çizelge 5.12: Yansımanın sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.....	59
Çizelge 5.13: Yansıma değişiminin sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.....	59
Çizelge 5.14: Sonuç değişken olarak yansıma değeri ve dağılımı alındığında faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.....	61
Çizelge 5.15: Yansıma değerleri ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.....	62

Çizelge 5.16:	Yansıma değişim oranları ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.	62
Çizelge 5.17:	Yansıma önleyici kaplamaların kritik boyut ölçüm sonuçları.	69
Çizelge 5.18:	I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış pulların kritik boyut ölçüm sonuçları.	70
Çizelge 5.19:	Işıklandırma dozajı ve fokus değerleri.	73
Çizelge 5.20:	Şekillendirmeden sonra kürlenmiş pulların mikroskop görüntülerinden izlenen bölgelerin boyutları.	75
Çizelge 5.21:	Farklı banyo sürelerinde yapılan deneylerin sonuçları.	76
Çizelge 5.22:	UV ışığı ile küreme işleminin faktör ve faktör seviyeleri.	78
Çizelge 5.23:	Ortogonal diziler.	79
Çizelge 5.24:	Aşınma direnci deneyleri için L_{18} ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.	80
Çizelge 5.25:	Aşınma direnci (fotorezist kalınlık farkı) sonuçları.	80
Çizelge 5.26:	Hesaplanan Sinyal/Gürültü (S/N) oranları.	81
Çizelge 5.27:	Faktör seviyeleri için ortalama Sinyal/Gürültü oranları.	81
Çizelge 5.28:	Aşınma direnci deneyleri için Varyans Analizi sonuçları.	83
Çizelge 5.29:	UV ile küreme parametreleri.	85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Yarı iletken teknolojisinin gelişimi [1].....	1
Şekil 1.2 : Kritik boyutun ve şekillendirmede kullanılan dalga boyunun yıllar bazında değişimi [2].....	3
Şekil 2.1 : SiGe Bipolar /BiCMOS yol haritası.....	6
Şekil 2.2 : Silisyum pul ve kırmık.	7
Şekil 2.3 : Pozitif ve negatif maske.	9
Şekil 2.4 : Negatif ve Pozitif fotorezistin farkı.....	11
Şekil 2.5 : Pozitif fotorezistin kimyasal yapısı [3].	11
Şekil 2.6 : Şekillendirme cihazları [4].....	13
Şekil 2.7 : Sayısal açıklığın gösterimi [5].	15
Şekil 2.8 : Yarı iletken teknolojisinin gelişimi.	15
Şekil 2.9 : Fotorezist tabakasının optik modeli.	17
Şekil 2.10: i-line ışıklandırma sisteminde silikon tabaka üzerindeki serili rezisti açmak için gerekli olan enerjinin rezist kalınlığı ile değişim grafiği (swing ratio) [6].	18
Şekil 3.1 : Fotolitografi prosesinin adımları.	23
Şekil 3.2 : a) Döndürerek kaplama yapılan cihaz b) Döndürerek fotorezist kaplamanın şematik gösterimi [7].	24
Şekil 3.3 : Fotorezist serme işleminin adımları.	26
Şekil 3.4 : a) XHRi-11 kodlu yansıma önleyici kaplamanın 1000-2300 Angstrom kalınlık aralığındaki yansıma ölçüm sonuçları [8] b) Barli kodlu yansıma önleyici kaplamanın kalınlık değerlerine göre 365 nm dalga boyundaki yansıma değerlerinin modelleme sonuçları [9].	30
Şekil 3.5 : Yansıma Önleyici Kaplama Sonrası Pişirme Sıcaklığının Etkisi [10].	30
Şekil 3.6 : Fotoaktif maddenin (DNQ) UV ışık kaynağı altındaki reaksiyonu. ...	32
Şekil 3.7 : Banyo öncesi kürlleme yapılmış pul ile yapılmamış pul arasındaki fark.	33
Şekil 3.8 : Banyo işlemi [11].....	35
Şekil 3.9 : Farklı banyo proseslerindeki kontrast performansı [12].	36
Şekil 3.10: UV sertleştirme süreci.....	39
Şekil 4.1 : Canon i-line hizalama ve ışıklandırma cihazı.	42
Şekil 4.2 : FIB cihazı.	43
Şekil 5.1 : Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.	52
Şekil 5.2 : Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.	52

Şekil 5.3 :	Sonuç değişken olarak yansıma değeri alındığında faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.	60
Şekil 5.4 :	Sonuç değişken olarak yansıma dağılımı alındığında faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.	61
Şekil 5.5 :	Sonuç değişken olarak yansıma alındığında artıklara ait normal olasılık diyagramları.	63
Şekil 5.6 :	Sonuç değişken olarak yansıma değişimi alındığında artıklara ait normal olasılık diyagramları.	63
Şekil 5.7 :	İnce kaplama için fokus değişiminin şekillendirmeye etkisi.	66
Şekil 5.8 :	Kalın kaplama için fokus değişiminin şekillendirmeye etkisi.	67
Şekil 5.9 :	Pul ölçüm haritası.	68
Şekil 5.10:	I-Con 7 kodlu kaplama ile hazırlanmış pulda kritik boyut histogramı.	69
Şekil 5.11:	I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış pulların kritik boyut histogramı.	70
Şekil 5.12:	I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış ve ortalama kritik boyutu 301,10 μm olan pulun (Pul no:3) genelindeki boyut dağılımı.	71
Şekil 5.13:	Odaklama değerinin şekillendirme üzerine etkisi.	72
Şekil 5.14:	95 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (1.Örnek).	74
Şekil 5.15:	110 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (2.Örnek).	74
Şekil 5.16:	125 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (2.Örnek).	74
Şekil 5.17:	Litografi işlemi sonrası fotorezist tabakasının kesit görüntüsü.	77
Şekil 5.18:	Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.	82
Şekil 5.19:	Artıklara ait normal olasılık diyagramları.	83
Şekil A.1 :	Fotorezist kalınlığı 800 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü	97
Şekil A.2 :	Fotorezist kalınlığı 600 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü	98

POLİSİLİSYUM TABAKA ÜZERİNE FOTOLİTOGRAFI YÖNTEMİ İLE 0,3 μm ŞEKİLLENDİRME PROSESİNİN OPTİMİZASYONU

ÖZET

Yarı iletken teknolojisi haberleşme, bilişim ve otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır ve bu alanlardaki gelişmeler aynı zamanda yarı iletken teknolojisinin gelişimine bağlıdır. Yarı iletken teknolojisi temel olarak; optik yöntemler ve ince film kaplama teknolojileri (litografi) kullanılarak, kritik boyutun nanometre seviyesine inmesiyle birlikte gelişmektedir. Litografi prosesinin gelişimi sayesinde boyutların küçülerek birçok devrenin aynı anda üretilmesi, elektronik devrelerin ucuz ve az güç harcayan yapılar haline gelmesini sağlamıştır. Yarıiletken teknolojisinde, teknolojik seviyeyi belirleyen en önemli kriter tümdevredeki en küçük boyuttur ve kritik boyut olarak tanımlanır. Kritik boyutun küçülmesi daha hızlı çalışan devrelerin üretilmesini, iş kabiliyetinin artmasını, maliyetin düşmesini ve güç tüketiminin azalmasını sağlar ve kritik boyut küçüldükçe de litografi teknolojisindeki gelişmeler kaçınılmaz olmuştur.

1950’li yıllarından sonra yarıiletken üretim süreçlerinde çoğunlukla fotolitografi (optik litografi) kullanılmaya başlanmıştır ve tümdevre üretim basamakları arasında önemli bir yere sahiptir. Günümüzde fotolitografi işlemi için tercih edilen yöntemlerden biri UV-litografidir. Belirli bir dalga boyundaki UV ışık bir maske üzerinden, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı, silisyum pul üzerine serilmiş olan fotoreziste (ışığa duyarlı polimer) iletilir. Maskenin üzerinde bulunan mikro ya da nano boyutlu şekiller, birbirini takip eden bir takım kimyasal işlemler sonunda yarı iletken üzerine transfer edilmiş olur. Kritik boyut, şekillendirme yapılan dalga boyu ve ‘k’ sabiti ile doğru orantılı, lensin sayısal açıklığı (NA) ile de ters orantılıdır. Dalga boyu ve sayısal açıklık, şekillendirme cihazı (stepper) ve ışık kaynağı’nın özellikleri olduğu için kullanılan teknolojiye ait değerlerdir. Bu nedenle ‘k’ sabitinin standart proses şartlarında aldığı değer (0,75) çeşitli yöntemlerle düşürülerek, dalga boyundan daha küçük şekillendirmeleri gerçekleştirmek mümkün olur. Bu yöntemlerden en pratik ve ekonomik olanı, termal ve kimyasal proseslerden oluşan litografi prosesinin adımlarını optimize etmek ve şekil bozukluklarında en büyük paydaya sahip olan ince film ve yansıtıcı alt yüzey etkisini azaltmaktır. Şekillendirilecek boyut küçüldükçe, yüzey topografisi düzgün olmayan ve yansıtıcı olan pul yüzeyinde kritik boyut kontrolünü sağlamak ve ince film etkisini ortadan kaldırmak en kritik problemlerdir, çünkü ışığın istenmeyen bölgelere yansması şekil bozukluklarına ve ince film etkisi de kritik boyut farklılıklarına neden olur.

Bu çalışmadaki amaç da SiGeC HBT BiCMOS Teknolojisi için 0,3 mikron şekillendirme prosesini 365 nm dalga boyunda gerçekleştirebilmek için litografi prosesinin tüm adımlarını optimize etmek ve düzgün yüzey topografisine sahip olmayan yansıtıcı pul yüzeyinin negatif etkisini en aza indirmektir Standart koşullarda 365 nm (UV) dalga boyundaki ışık kaynağı ile şekillenebilecek en küçük kritik boyut 0,35 μm ’dir.

Litografi prosesinin tüm adımlarının sonuç değişkenleri ile bunları etkileyen faktörler ve seviyeleri, literatür ve kullanılan cihazların özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Fotorezist ve yansıma önleyici kaplamanın pul yüzeyine serilmesi ve son adım olan sertleştirme prosesi için faktörlerin optimum seviyeleri, deneysel tasarım metotlarından biri olan Taguchi yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Yarı iletken üretimi hem maliyetli hem de üretimi etkileyen çok fazla parametre olduğu için deneysel tasarım metotlarının, özellikle de Taguchi yönteminin sıklıkla kullanıldığı bir sektördür. Fotolitografi işlemi tespit edilen optimum parametre seviyelerinde gerçekleştirilerek düzgün bir profile sahip olan 0,3 mikron şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Yapılan şekillendirme işlemi de 'k' sabitinin standart olan 0,75 değerinden 0,5 mertebesine düştüğünü göstermektedir. Bu süreçte en önemli adımlar; yansıma önleyici kaplamanın seçimi ve şekillendirme ile kuru aşındırma prosesi dikkate alınarak, optimum fotorezist kalınlığının belirlenmesi olmuştur. Hem kritik boyut kontrolünü sağlamak ve hem de alt tabandaki topografiden dolayı şekillerde oluşacak bozulmayı önlemek için en etkili yöntemin alt taban üzerine uygulanan yansıma önleyici kaplama olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları özetlenirse;

- Şekillerin profilini bozmadan kritik boyutu sağlayabilmek için fotorezist kalınlığının aşındırma prosesine dayanacak şekilde incelenmesi gerekmektedir. Fotorezist kalınlığı 0,6 mikrona indirildiğinde kritik boyut sağlanmış ve fotorezist dibe kadar açılarak profil bozulmamıştır.
- Fotorezist kalınlığı üzerinde en etkili olan faktör serme işlemi sırasındaki son döndürme hızıdır ve 600 nanometre fotorezist kalınlığı için optimum seviye 5000 devir/dk' dır. Pulun yüzeyini tamamen kaplamak için gerekli olan rezist akıtma süresi 3 sn. (3 ml/sn) olarak bulunmuştur.
- Pul yüzeyindeki yansımayı ve yansıma değişimini minimum seviyeye düşürmek için serme prosesi parametrelerinin optimum seviyeleri, yansıma önleyici kaplama miktarı için 2 ml, ilk döndürme hızı için 500 devir/dk ve son döndürme hızı için 2500 devir/dk olarak bulunmuştur. Bu proses parametreleri kullanılarak pul yüzeyindeki yansıma düz silisyum pula göre %6 seviyesine düşürülmüştür.
- Işıklandırma sonrası yapılan kürtleme işlemi 110 C°' de gerçekleştirildiğinde, hem kritik boyutun sağlandığı hem de profil açısının 90°'ye daha yakın olduğu görülmüştür. Sıcaklık yükseldikçe profil bozulmuştur.
- Pul yüzeyindeki ışıklanmış ve ışıklanmamış alanların yansıma farkı karşılaştırılarak optimum banyo süresinin 60 saniye olduğu görülmüştür.
- Litografi prosesinin son adımı olan fotorezistin sertleştirme işlemine etki eden parametreler (son pişirme süresi, son sıcaklık ve yükselme eğimi), kuru aşındırma prosesine karşı pozitif fotorezistin direnci ve kritik boyuttaki değişim göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Son pişirme süresi ve yükselme eğiminin optimum seviyeleri 10 saniye ve 1,5 C°/saniye 'dir. Sadece aşınma direnci dikkate alındığında son sıcaklığın optimum seviyesi 170 C° olarak bulunmuş, fakat bu seviye 60 nm kritik boyut değişimine neden olduğu için, her iki sonuç değişken de dikkate alınarak optimum seviye 150 C° olarak belirlenmiştir.

OPTIMIZATION OF 0,3 μ m PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS PARAMETERS OVER POLYSILICON LAYER

SUMMARY

Integrated Circuit (IC) is a collection of electronic components, fabricated as a single unit, in which active devices (transistors, diodes, etc.) and passive devices (capacitors, resistors, etc.) and their connections are formed on a thin substrate of semiconductor material (typically silicon). Also they have an important role in the semiconductor technology. In the production of integrated circuits, five main processes; which are thermal processes, ion implantation, lithography, etching and deposition of layers, are applied to silicon wafers in many times repeatedly. After the design of the IC is completed, initially the layout of the circuit paths and electronic elements of a chip is created. Lithography is used to transfer this layout; consists of sets of geometric shapes; onto surface of wafer.

Semiconductor process technology is generally described by the critical dimension (CD); which is the smallest feature that needs to be patterned by the lithographic process and the most important characteristic in the semiconductor technology. Making the critical dimension smaller is the primary focus of improving semiconductor technology; because this dramatically increases the number of devices per unit area. Also making the CD smaller of a device will make a smaller chip. This means that the number of chips per wafer increases dramatically, and since costs are related with the number of wafers and not the number of chips to a wafer, costs will be notably reduced. The most important point is that; making the CD smaller makes devices more faster. Therefore, improvements in lithography technology means that; better, faster and more complex circuits will be at lower cost.

Photolithography; termed optical lithography, uses light to transfer a geometric pattern from a reticle to a light sensitive chemical (photoresist) on the wafer. Photolithography combines several steps in sequence; that are surface preparation and HMDS application; photoresist coating; soft baking; exposure and post exposure baking; development; and finally hard-baking. The wafer is initially put into the oven and heated to a temperature sufficient to dehumidify of the wafer surface. In the same oven a gaseous adhesion promoter (hexamethyldisilazane), is applied to promote adhesion of the photoresist to the wafer. Then, a light sensitive photoresist(PR) is spun onto the wafer forming a thin layer on the surface. In order to blow the excess photoresist solvent, the coated wafer is baked on a hotplate. The resist is then selectively exposed by the stepper through a mask (reticle) which contains the pattern information. The mask contains clear and opaque features that define the pattern to be created in the PR layer; in which areas exposed to the light are made either soluble or insoluble in a specific solvent known as a developer. In the case when the exposed regions are soluble, a positive image of the mask is produced in

the resist (positive PR). If the nonexposed regions are dissolved by the developer, a negative image results (negative PR). Finally hard-bake process is made via heat and UV energy in order to prevent deformation of photoresist patterns by other thermal processes used in semiconductor production.

Both negative and positive PR are used in the photolithography process; but usually the positive one is chosen because of the higher resolution capabilities. Positive PR composed of three main ingredients; which are the matrix material (resin), photoactive compound (PAC) and the solvent. The matrix material serves as a binder and establishes the mechanical properties of the film. It is usually inert to the incident UV radiation but provides the resist film with its adhesion and etch resistance. PAC converted into the acid under the exposure and that makes the resin soluble in the developer, on the other hand unexposed PAC is not soluble in the developer. So exposed areas on the wafer are solved during development process. The solvent keeps the resist in the liquid state until it is applied to the wafer.

Exposure systems; which produce an image on the wafer using a mask; may be classified by the optics that transfer the image from the mask to the wafer. The contact printer; which is the simplest one, puts a photomask in direct contact with the wafer and exposes it to a uniform light. Because contact printing can damage the surfaces of both the mask and the wafer; proximity and projection printing systems could be used in the production of integrated circuits. In proximity printing, the mask is brought in very close proximity to the wafer, not contacting with the wafer during exposure, thus preventing damage to the mask. But diffraction effects, because of the gap between the wafer and mask, limit accuracy of pattern transfer. Therefore the resolution obtained with the proximity printing is lower than the contact one. Finally; the most complicated one is projection printing; which uses a dual-lens system to project the pattern on the mask to the wafer by a de-magnification ratio between 1/4 and 1/10. They have a step and repeat mechanical system; so the wafer stage takes a step by the chip size and the illumination is repeated. Therefore they are called as stepper. The number of dies on the wafer is related to the chip size. Also they provide higher resolution than others and resolution is highly related with the wavelength of the light source.

The aim of this thesis is to achieve 0,3 micron photolithography process; which is a production step in the SiGeC HBT BiCMOS technology; with the i-line (365 nm) stepper. At standart conditions the smallest CD, which could be patterned by the 365 nm light source (Hg lamp), is 0,35 μm . At the beginning of the study a research about techniques to realize subwavelength lithography was made. The most economical and effective one was applied in order to pattern 0,3 micron wide holes on the polysilicon and oxide deposited wafer. All of the experimental studies were made in the Tubitak-UEKAE Semiconductor Technologies Research Laboratory (YITAL).

Critical dimension is a positive fuction of the wavelength and k_1 costant, but a negative function of the numerical aperture. Wavelength is directly related with the light source and NA with focusing optics of the illumination system. So these are specifications of the stepper. The value of the k_1 constant is around 0,75 for the standart normal illumination. By using super illumination mode; which is related with the input lens of the stepper; the value of the k_1 could be reduced. Also using some reticle techniques such as phase shift mask (PSM) or optical proximity correction (OPC) lead

to a reduction of the k_1 value. Finally the other way to decrease of the k_1 value is optimisation of the lithography process parameters and applying anti reflective coating in order to reduce reflective notching caused by light reflected into unwanted areas and thin film interference effects. From these techniques, the last one is chosen; because it is most practical and economic one. In the submicron range ($CD < \text{wavelength}$), thin film interference effects and substrate reflectivity play a very important role in linewidth control. Linewidth variation and reflective notching are results of the reflective substrate. Also small resist thickness differences across dies are induced by underlying topography and lead to changes in absorbed energy from optical projection steppers. These variations in resist absorbed energy are characterized by the "swing curve", which shows the periodic swing from a maximum dose to clear to a minimum dose to clear of PR as a function of film thickness. If swing ratio could be reduced to near zero, the resist process is able to tolerate changes in optical phase due to resist coating variations, deposited film thickness non-uniformity and topography of wafer.

The swing ratio could be reduced by decreasing substrate reflectivity via bottom layer anti-reflection coating (BARC) or decreasing resist surface reflectivity via top layer anti-reflection coating (TAR). In this study organic BARC was used; because it provides both the largest reduction in swing amplitude and reflective notching. BARC can reduce negative effects of topography and deposited film thickness non-uniformity by improved planarization and reduced reflectivity of the substrate. TAR requires not added etching process like organic BARC; because they are soluble in water. But TAR does not eliminate reflective notching from topographical features and is not effective to reduce swing amplitude as BARC.

Before starting to experimental works, all of the photolithography process steps have been analysed one by one and process parameters and response variables defined by taking into account literature search and capabilities of process equipments; which have been used in the experiments. Deposited layers on monocrystalline silicon wafers with diameter of 100 mm (4 inch) ; which were used in the experiments; are 500-600 Å thermal oxide, 1000 Å polysilicon and 1000 Å oxide respectively. Deposition system of polysilicon and oxide layers is low pressure chemical vapour deposition (LPCVD). Chemicals used in experiments are OIR 38A9 & OIR 620-09 as positive photoresists, OPD 262 (2,38% TMAH) as developer and I-CON 16 & I-CON 7 as BARC. Two types of photoresist and BARC were used in order to see effects of coating thickness on the pattern dimension and profile. As a exposure system, Canon FPA - 3000 i4 stepper was used. The NA value of the stepper is 0,63 and the wavelength of the light source (Hg lamp) is 365 nm. Quartz masks for the exposure system are imported in YITAL as chrome and photoresist coated; which are ready to pattern generation. For this study only one patterned mask is used. Therefore the mask was not a variable factor on the pattern dimension and profile. CEE 200X model spinner from Brewer Science was used for photoresist and BARC coating. Photoresist is poured automatically on the center of wafer from the cartridge dispensing system; but BARC is poured manually with a pipette. The developer used is from the same firm as spinner and model number is CEE 200XD. At the end of the photolithography process, hard-baking is made with heat and UV exposure via Fusion System's 200 PCU photostabilizer.

Reflection on the wafer after BARC coating and photoresist thickness were measured with the NanoSpec210 model film thickness measurement system from Nanometrics.

Photoresist thickness measurement was made on bare silicon wafers; because nonuniformities of deposited layers could cause inaccurate measurements. On the other hand; oxide and polysilicon deposited wafers have been used for BARC coating process optimization, because reflection on the substrate is changing with type and thickness of deposited layers. Vistec INS 3000 model microscope was used for measurements of pattern dimensions. This microscope gets images of patterns with UV or DUV light source and is capable of taking measurements of so small patterns ($0,3\ \mu\text{m}$). FIB (focused ion beam) tool was used to take profile images of patterns at the end of the photoresist process.

In the experiments, optimization of process parameters has been realized for each process step respectively. Although coating of BARC on the substrate is the first step of this lithography process, optimization of PR coating parameters has been done initially by considering PR thickness mean and uniformity of thickness. Because PR thickness measurement has been done on bare silicon wafers without BARC coating. Taguchi method and analysis of variance (ANOVA) have been used in order to find optimum levels of parameters and the most significant factors in both of response variables. Taguchi method provides an economical and systematic method for determining the optimum levels of process parameters. Depending on the objective, there are three different mean square deviations for the signal/noise ratios that can be defined including nominal-the-better, larger-the-better, and smaller-the-better. For this study, lower thickness and thickness nonuniformity on the wafer surface during the PR coating process is preferred. Therefore, the smaller-the-better S/N ratio formula was chosen for PR process. After determining optimum levels of parameters, value of response variable is calculated at the point of optimum levels and this calculated value is compared by making experiment at the same point for the verification of the Taguchi method. For PR coating process, OIR 620-09 coded PR gives the minimum thickness and the calculated value at optimum levels of parameters is $5650\ \text{\AA}$. By making experiment, the thickness was measured as $5850\ \text{\AA}$. Also nonuniformity of thickness was calculated as 1,2% and measured as 0,92%. As a result, measurement results are reasonable with calculated ones. Thickness measurement has been done after soft bake process; because it causes to diffuse of excess solvent in the PR and effects thickness. Soft bake process parameters (temperature & time) were determined by considering the literature and the degradation temperature of photoactive compound; which is $100\ ^\circ\text{C}$. The temperature was determined as $90\ ^\circ\text{C}$ and time as 60 sec.

In the second step of experiments; the most suitable BARC was selected for this study by considering reflection values on the wafer after BARC coating, the effect of exposure dose on the critical dimension and depth of focus values. The main difference between these two types of coating material is their kinematic viscosities and thus thickness on the substrate with same coating parameters. Kinematic viscosity of I-Con 7 is smaller than I-Con 16 and thus thinner coating could be done by using I-Con 7. Initially, Taguchi method was applied in order to find optimum levels of BARC coating parameters. Lower reflection and reflection nonuniformity on the wafer surface is preferred certainly. So, the smaller-the-better S/N ratio formula was chosen for BARC coating process. Three parameters (used chemical volume, first spinning rate and second spinning rate) and three levels for each parameter has been defined for this process step. So L9 design of Taguchi's arrays was used by considering the

number of parameters and levels. According to results of experiments, the minimum reflection value on the wafer with I-Con 7 is 3% and 15% with I-Con 16. In order to minimize both of response variables, optimum levels of parameters has been defined and the calculated value at the optimum point is 5,68% for the reflection and 12,5% for the nonuniformity with I-Con 7. Also experiment was done at optimum levels of parameters and the reflection was measured as 6% and the nonuniformity as 10,5%. Measurement results have been found reasonable with calculated ones. Then, the effect of exposure dose (J/m^2) on the critical dimension has been determined by measuring the critical dimension change by 100 J/m^2 increment. It has been found as 2% for the thinner material and 5% for the other. Depth of focus values are 1,2 μm for the thinner material and 0,6 m for the other. These results show that; we get smaller swing ratio by using thinner BARC material; because it decreases the reflectivity on the wafer more than the other. Also; we do not need thicker BARC coating for this substrate because of its nonuniformity level of topography. In the third step of experiments, exposure dose and focus values have been determined for both of BARC coating material. Exposure dose for I-con 7 coated wafer was found higher than other; because the exposure dose increases as reflection decreases.

Aim of fourth step of experiments is defining the post exposure bake temperature and duration; that the wafer surface should be subjected to developer solution. Three samples have been prepared by making post bake step at different temperatures (95°C, 110°C and 125°C). Microscope images of these three samples show that; dissolution rate of exposed PR is decreasing with increasing temperature and this effects pattern profiles negatively. The sample at 110°C gives the best result in terms of CD and pattern profile. For the develop time, six samples have been prepared by increasing time from 30 sec to 80 sec by 10 sec steps. After development process; the reflection on the exposed and non-exposed regions of the same wafer have been measured for six samples and differences between these two values have been calculated. 60 sec development time gives the highest difference of reflection. This result and FIB images show that; optimum development time is 60 sec. At the last step of experiments, optimization of hard-baking process parameters was made via Taguchi method. The optimum data set in order to maximize resistance of PR to etching is, 170 °C as final temperature, 1,5 °C /sec as ramp rate and 10 sec as post-bake time; which is realized at the final temperature without UV energy. But the final temperature was decreased to 150 °C by taking into consideration of CD change because of this thermal process.

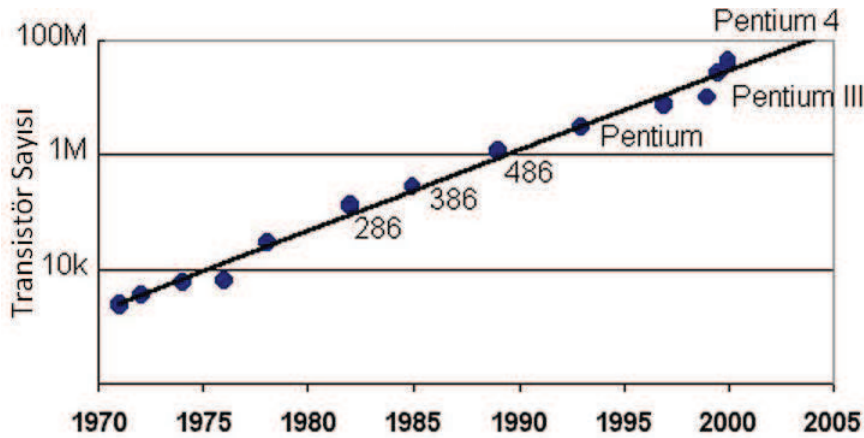
As a result of experiments, 0,3 μm photolithography process has been achieved by a stepper; whose NA is 0,63 and light source wavelength is 365 nm. This shows that; k_1 value was decreased from 0,75 to around 0,5 by decreasing the reflection on the substrate and making photolithography process at optimum levels of process parameters.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yarı iletken teknolojisi haberleşme, bilişim ve otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır ve bu alanlardaki gelişmeler aynı zamanda yarı iletken teknolojinin gelişimine bağlıdır.

Silisyumun doğada kolayca bulunan bir yarıiletken olması, kolayca işlenebilmesi ve hem elektriksel hem de mekanik özelliklerinin iyi olması, bu elementin yarı iletken teknolojinin temel yapıtaşı olmasını sağlamıştır. Son yıllarda GaAs, InP, GaN gibi diğer bileşikler çıkmasına ve bunlar silisyumdan daha yüksek performans göstermelerine rağmen ucuz ve kolay işlenme nedeniyle silisyum halen yarı iletken teknolojinin en yaygın malzemesidir [13].

Yarı iletken teknolojisinde önemli bir yere sahip olan tümdevreler, tasarımı yapılan verinin yarı iletken bir malzeme (silisyum, germanyum) üzerine birden fazla katman ve üretim adımı ile aktarılmasından oluşan elektronik devre topluluğudur. Tümdevrelerin önemli yapı taşlarından olan transistörler küçük boyutları ve güvenilirlikleri sayesinde modern elektronik sektöründe çok önemli bir yere sahiptirler. Intel'in kurucularından biri olan Gordon Moore 1965 yılında yarı iletken teknolojinin gelişimi hakkında son derece gerçekçi bir tahminde bulunmuştur. Moore'a göre bir tümdevredeki transistör sayısı her 18- 24 ayda iki katına çıkacaktır.



Şekil 1.1: Yarı iletken teknolojinin gelişimi [1].

Mikroelektronik teknolojisi temel olarak; optik yöntemler ve ince film kaplama teknolojileri (litografi) kullanılarak, kritik boyutun nanometre seviyesine inmesiyle birlikte gelişmektedir. Litografi prosesinin gelişimi sayesinde boyutların küçülerek birçok devrenin aynı anda üretilmesi, elektronik devrelerin ucuz ve az güç harcayan yapılar haline gelmesini sağlamıştır. Kelime anlamı itibariyle Litografi ışıqla yazma olarak tanımlanır. Litografi yöntemi öncelikle baskı devre (Printed Circuit Board) üretiminde kullanılmıştır. Yarıiletken endüstrisinin gelişmesi ile litografi prosesinin kullanım alanlarında önemli gelişmeler olmuştur. 1950 yıllarından sonra yarıiletken üretim süreçlerinde çoğunlukla fotolitografi (optik litografi) kullanılmaya başlanmıştır. Tümdevre üretim basamakları arasında önemli bir yere sahiptir. Günümüzde fotolitografi işlemi için en çok tercih edilen yöntemlerden biri UV-litografidir. Belirli bir dalga boyundaki UV ışık bir maske üzerinden, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı, silisyum pul üzerine serilmiş olan fotoreziste (ışığa duyarlı polimer) iletilir. Maskenin üzerinde bulunan mikro ya da nano boyutlu şekiller, birbirini takip eden bir takım kimyasal işlemler sonunda yarı iletken üzerine transfer edilmiş olur [14].

Yarıiletken teknolojisinde, teknolojik seviyeyi belirleyen en önemli kriter tümdevredeki en küçük boyuttur ve kritik boyut olarak tanımlanır. Tümdevre teknolojisinde kritik boyutun küçülmesi daha hızlı çalışan devrelerin üretilmesini, iş kabiliyetinin artmasını, maliyetin düşmesini ve güç tüketiminin azalmasını sağlar. Kritik boyut küçüldükçe de litografi teknolojisindeki gelişmeler kaçınılmaz olmuştur.

Şekil 1.2 'de görüldüğü üzere yaygın olarak kullanılan 365 nm (UV) dalga boyundaki ışık kaynağı ile şekillenebilecek en küçük kritik boyut 0,35 μ m'dir. Kritik boyut, dalga boyu ve 'k' sabiti ile doğru orantılı, lensin sayısal açıklığı (NA) ile de ters orantılıdır. Dalga boyu ve sayısal açıklık, şekillendirme cihazı (stepper) ve ışık kaynağı (yüksek basınçlı civa lamba) 'nın özellikleri olduğu için kullanılan teknolojiye ait değerlerdir. Bu nedenle 'k' sabitinin değerini düşürerek dalga boyundan daha küçük şekillendirmeler yapılabilir. Bu sabitin değerini düşürmek için çeşitli yöntemler uygulanabilir. Bunlardan birisi, faz kaydırmalı maske (phase shift mask) gibi pahalı teknolojiler kullanmaktır. Faz kaydırmalı maskeler pahalı olmakla birlikte, Türkiye'de üretimleri olmadığı için her maske ihtiyacında ve değişikliğinde yurtdışına bağımlılığa neden olacaktır. Bu sabiti düşürmek için bir diğer yöntem ise, şekillerin

Bu yöntemlerin sonuncusu ise termal ve kimyasal proseslerden oluşan litografi adımlarını optimize etmek ve şekil bozukluklarında en büyük paydaya sahip olan ince film ve yansıtıcı alt yüzey etkisini oldukça azaltmaktır. Şekillendirilecek boyut küçüldükçe, yüzey topoğrafisi düzgün olmayan ve yansıtıcı pul yüzeyinde kritik boyut kontrolünü sağlamak ve ince film etkisini ortadan kaldırmak en kritik problemlerdir, çünkü ışığın istenmeyen bölgelere yansması şekil bozukluklarına ve ince film etkisi de kritik boyut farklılıklarına neden olur.

litografi adımlarının optimizasyonu ve aynı zamanda düzgün yüzey topoğrafisine sahip olmayan yansıtıcı pul yüzeyinin negatif etkisini en aza indirmek seçilmiştir.

Ülkemizde çeşitli devlet ve özel üniversitelerde yarı iletken teknolojisi öğretim ve araştırma programlarına girmiş durumdadır. Ayrıca bazılarında uygulamalı araştırma laboratuvarları mevcuttur ve laboratuvar düzeyinde üretim çalışmaları yapılmaktadır. Fakat Türkiye'nin yarı iletken teknolojilerinde, tüm devre (IC-Integrated Circuit) üretimi yapan tek laboratuvarı TUBİTAK-BİLGEM-UEKAE (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu-Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi-Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü) bünyesinde faaliyetini sürdürmekte olan Yarıiletken Teknolojisi Araştırma Laboratuvarı'dır (YİTAL). YİTAL 1983 yılında kurulmuştur. Bipolar, ve $3\mu\text{m}$ & $1,5\mu\text{m}$ CMOS teknolojilerini geliştirerek, düşük hacimli ve askeri standartlarda tüm devre (IC -Integrated Circuit) üretimini gerçekleştirmiştir. Ayrıca fotodedektör üretim süreçlerini geliştirmiş ve bu süreçlerle üretilmiş olan dedektörler Türkiye'nin ihtiyaçlarına yönelik uygulamalarda kullanılmaktadır. Şu an ise $0,25\ \mu\text{m}$ SiGeC HBT BiCMOS teknolojisine ait süreçleri geliştirmektedir. Bu çalışmada yapılacak deneylerin tümü bu laboratuvarda gerçekleştirilecektir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1 Tümdevre Üretim Teknolojileri

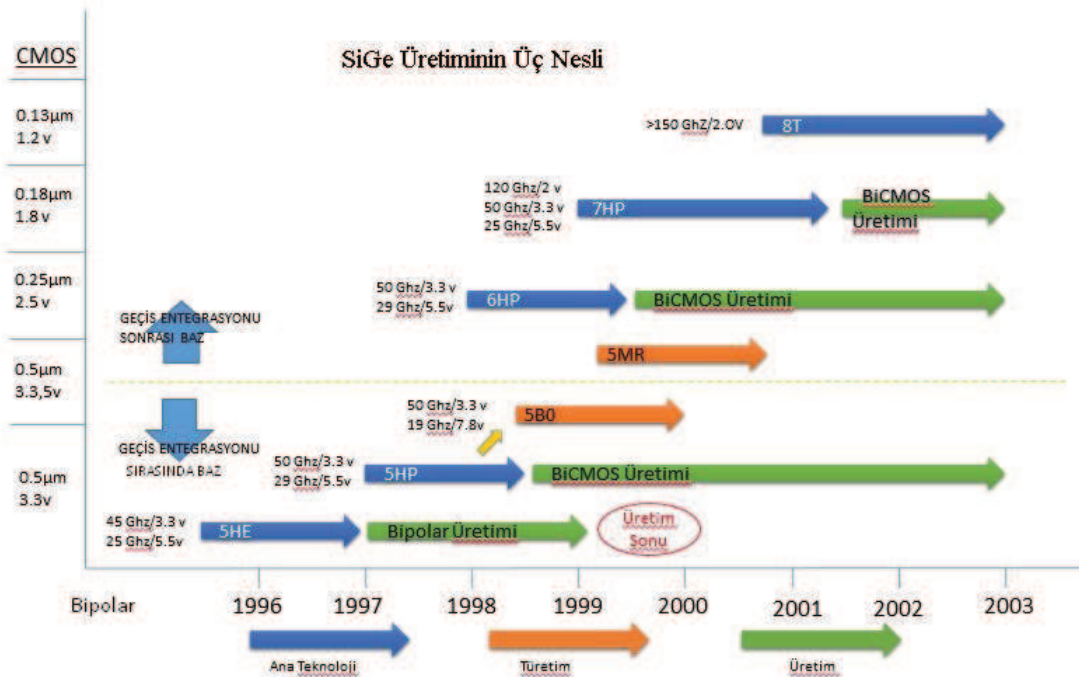
Tümdevre elemanları aktif ve pasif devre elemanları olmak üzere ikiye ayrılır. Aktif elemanlar üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılan transistörler olup, pasif elemanlar ise kapasite, direnç, endüktans gibi litografik açıdan çok zorlu olmayan yardımcı elemanlardır. Tümdevre (yonga, çip, mikroçip, tümleşik devre, entegre devre) aktif ve pasif elemanların aynı kırımk içerisinde yer aldığı ve birbirleri ile olan bağlantıları pul üzerinde depolanan metal ile sağlanan elektronik devreler topluluğudur.

Transistör teknolojisi evrimsel olarak Bipolar (BJT) transistörler, NMOS ve PMOS transistör tiplerinden oluşan CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) teknolojisi ve son olarak her iki tipin de aynı çipte yer aldığı BiCMOS (Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor) teknolojisi şeklindedir.

CMOS teknolojisi genel olarak sayısal sistemlerde kullanılır. Tasarım, modelleme ve üretiminin kolay olması sebebiyle baskın teknoloji haline gelmiştir. Ancak yüksek frekans ve güç gerektiren devrelerde Bipolar transistörlerin kullanılması kaçınılmazdır. Bipolar transistörler yüksek hızlı (yüksek frekanslı), düşük gürültülü olmak gibi özellikleriyle haberleşme ve radar teknolojisi gibi özel teknolojilerin üretiminde gerek koşuldur. Ayrıca analog işaretleri işlemede kullanılan teknolojidir. IBM'den alınan Şekil 2.1'deki yol haritası göstermektedir ki bipolar transistörlerin üretimi 1999 sonrası durup tamamen BiCMOS teknolojisine geçilmiştir.

Yüksek hızlı ve yüksek frekanslı tümleşik elektronik sistemlerin gereksinimi, SiGe BiCMOS teknolojisinin kullanımını tetiklenmiştir. Teknolojinin genel özellikleri düşük gürültü, yüksek doğrusallık ve güvenilirlik olarak sıralanabilir. Güvenilirlik, devrelerin yüksek besleme ve sıcaklığa dayanıklılığı olarak tanımlanır. SiGe BiCMOS teknolojisine sahip tranzistörler, 4 GHz frekansında 0,5 dB ve altında gürültü davranışları göstermektedir. Bu değerler, CMOS teknolojisi gibi ucuz maliyete sahip

teknolojilerden elde edilebilecek olan gürültü performanslarının çok daha ötesindedir [15].



Şekil 2.1: SiGe Bipolar /BiCMOS yol haritası.

Teknoloji otomotiv sektöründe çarpışma önleyici olarak, haberleşmede günümüzün en çok kullanılan cihazlarından olan cep telefonu ve tabletlerde, navigasyon cihazlarında (GPS, radar) ve savunma sanayinde radarlarda kullanılmaktadır.

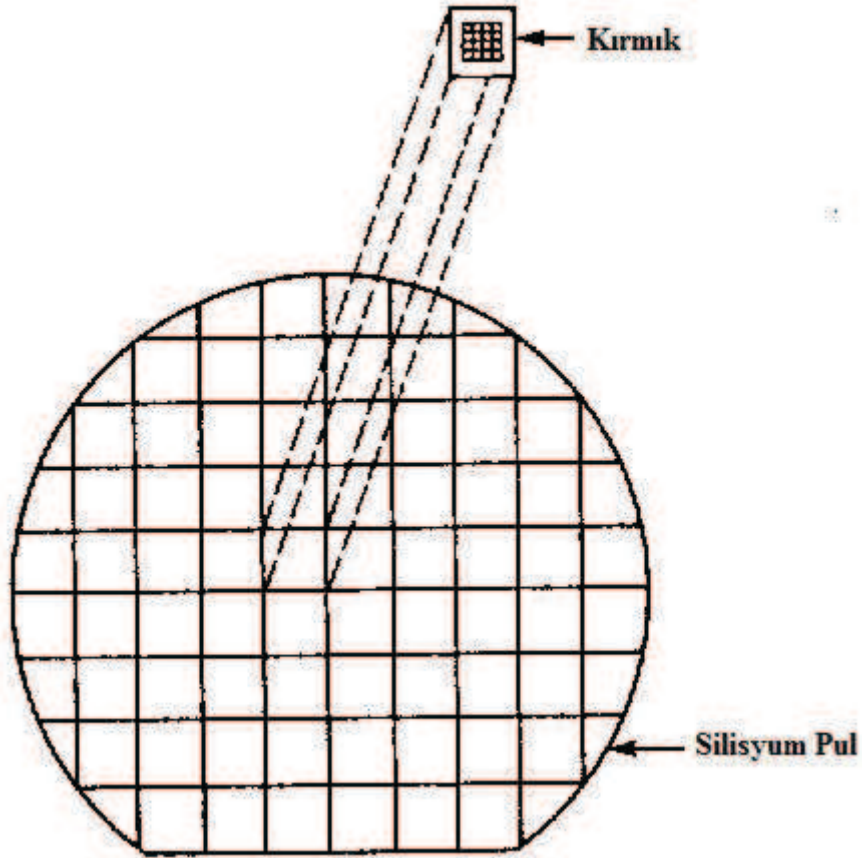
Bir tranzistör, iki n-tipi yarı iletken bölgesi, çok ince bir p-tipi yarıiletken tabaka ile ayrılmış bir düzen olarak gerçekleştirilebilir. Böyle bir tranzistör npn tipi olarak adlandırılır. Bunun tersi yani iki p-tipi yarıiletken bölge arasında ince bir n tipi tabaka oluşturularak gerçekleştirilen tranzistörler ise pnp tipi tranzistör olarak anılır. Her iki tranzistör tipinde de aradaki ince yarıiletken tabakaya baz, bunun iki yanındaki yarıiletken bölgelerden birine emetör, öbürüne kolektör denir.

Üzerine çalışılan boyut olan $0.3\ \mu\text{m}$ boyutu emetör ve baz bölgelerinin altlı üstlü yer alacağı emetör/baz çukuru bölgesidir ve transistörün hızı üzerinde en etkili parametredir. Kalan geniş aktif alan kollektördür. Bu kritik boyut teknolojiye adını veren boyuttur. Yani geliştirilmekte olan projenin adının $0,25\ \mu\text{m}$ SiGeC HBT

BiCMOS olmasının temelinde $0,3 \mu\text{m}$ şekillendirmenin daha sonraki proses adımları ile tabanda $0,25 \mu\text{m}$ 'a düşmesi yatar.

2.2 Tümdevre Üretiminde Temel Proses Adımları

Mikroelektronik teknolojisi mikrometre ve hatta nanometre boyutunda yapılardan oluştuğu için ortam son derece partiküllerden arındırılmış ve steril olmak zorundadır. Bu yüzden bütün yarı iletken üretimi temiz oda adı verilen alanlarda gerçekleştirilmektedir. Temiz odalar bir inç küpte boyutu bir mikrondan büyük partikül sayısına göre sınıflandırılmaktadır ve çoğu proses sınıfı 100'den küçük temiz oda ortamı gerektirmektedir. Günümüzde yüksek teknolojiye prosesler 1 sınıfı temiz odalarda gerçekleştirilmektedir. Tüm devrelerin alt yapıtaşı tek kristal yönelimli, standart bir çap uzunluğuna sahip (100 mm, 200 mm) ince dairesel silisyum levhalardır ve silisyum pul olarak adlandırılırlar. Bir silisyum pul üzerinde kırk boyutuna bağlı oranda tüm devre üretilebilir.



Şekil 2.2: Silisyum pul ve kırık.

Yarı iletken üretimi temel olarak; oksitleme, katman depolama, film şekillendirme (litografi), aşındırma ve katkılama adımlarından oluşur. Tasarımı yapılan bir elektronik devre üretiminin sağlanması için geometrik şekillerden oluşan bir yerleşim planı haline getirilir. Bu yerleşim planı öncelikle maske üzerine daha sonra ise pul yüzeyine aktarılır. Pul yüzeyine aktarıldığında bazı bölgeler açık kalırken, bazı bölgeler fotorezist ile korunur ve bir sonraki proses için maske görevi görür. Fotorezist ile korunmayan bölgeler bir sonraki adımda aşındırılır ve oluşturulan açıklıklardan silisyumun elektriksel özelliğini değiştiren katkı atomları kontrollü miktarlarda silisyum kristaline ekilir veya yüzeye bir katman depolanarak açıklık bulunan bölgede kontak oluşturulur [16]. Bir tüm devre üretim sürecinde kullanılan maske sayısı teknoloji seçimine bağlı olarak 6-18 arasında değişmektedir. Süreç adımlarının toplam sayısı ise 400'e kadar çıkabilmektedir.

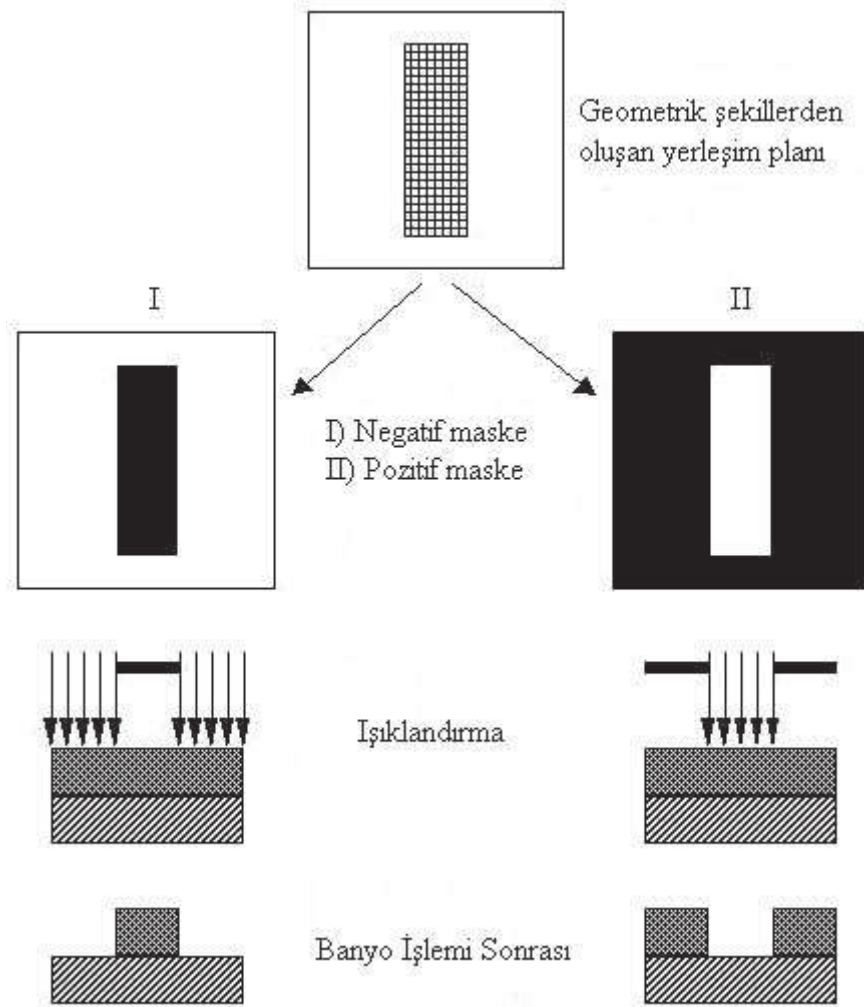
Aşındırma işlemleri kimyasal çözeltiler içerisinde ıslak olarak ya da aşındırmada kullanılan gazların plazma oluşturması ile kuru yöntemler ile yapılmaktadır. Tüm devre üretiminde boyutlar küçüldükçe ıslak aşındırma yöntemleri yetersiz kalmış ve kuru aşındırma yöntemlerinde gelişme sağlanmıştır. Katkılama, Si taban malzemesinin iletkenlik değişimini sağlamak amacıyla, iyon ekme ve/veya difüzyon yöntemleri ile yabancı atomların (B, P, As) katkılanması olarak tanımlanmaktadır. Katman oluşturma, Si pul üzerinde kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri ile istenen katmanların oluşturulması süreçlerini içermektedir. Tümdevre teknolojisinde kullanılan temel katmanlar yalıtım, maskeleme ve pasivasyon amaçlı kullanılan SiO_2 ve Si_3N_4 katmanları, geçit malzemesi olarak kullanılan polisilisyum, kontak ve bağlantı iletkeni olarak kullanılan alüminyumdan oluşmaktadır [17].

Pul üzerinde oluşturulan tümdevreler test edildikten ve çalışmayanlar işaretlendikten sonra kesilir ve kılıflanır. Bazı durumlarda tümdevreler kılıflama sonrası tekrar test edilir ve piyasaya sürülür.

2.2.1 Litografi (Fotolitografi)

Litografi tasarımcı tarafından belirlenen çizimin pul üzerine aktarılmasında kullanılan bir tekniktir. Bunun için bir bilgisayar programı (CAD) ile çizilen örnek öncelikle

maske üzerine aktarılır. Maskeler üzerindeki açık alanın (ışığın geçtiği alan) büyüklüğüne göre pozitif ve negatif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Pozitif maske ile çalışıldığında Şekil 2.3 'de görüldüğü üzere maske üzerindeki verinin pozitif görüntüsü pul üzerine geçer ve pul genelinde kapalı alanlar açık alanlara göre daha büyüktür. Negatif maske ile çalışıldığında ise maskedeki verinin negatifi pul yüzeyine geçer ve pul genelinde açık alanlar kapalı alanlara göre daha büyüktür.



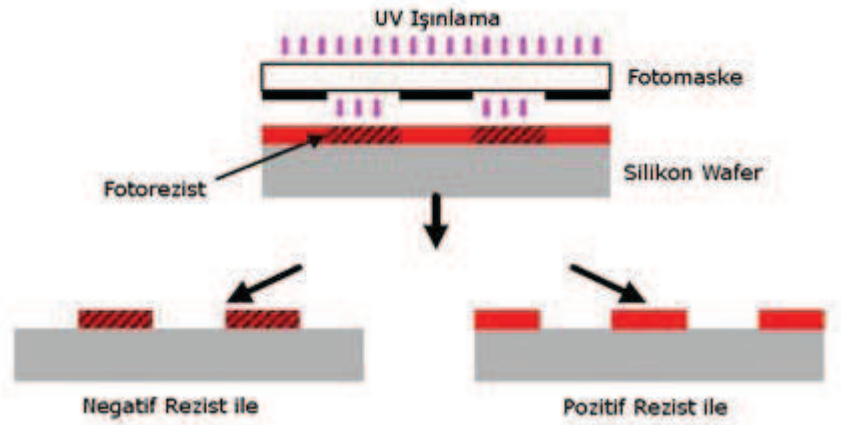
Şekil 2.3: Pozitif ve negatif maske.

Maskenin üzerinde bulunan mikro ya da nano boyutlu şekiller, fotolitografi prosesi adı altında birbirini takip eden bir takım kimyasal işlemler sonunda pul yüzeyine transfer edilmiş olur. Bu kimyasal işlemler silisyum pul yüzeyinin ısı ile nemi alındıktan ve yapışmayı kolaylaştırıcı bir kimyasal uygulandıktan sonra fotorezist polimerinin silisyum pul yüzeyine belirli kalınlıklarda ($0,5 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}$) ve uniform bir şekilde serilmesi ile başlar. UV ışığı ile yapılan ışıklandırma öncesinde ise hem polimerin

yapışmasını arttırmak, hem de polimer içinde bulunan çözücüü uçurmak için ısı ile ön koşullandırma işlemi yapılır. Pul yüzeyinde ışıklanan kısımda fotorezist özelliğini kaybeder ve bir sonraki aşamada çözünerek pul yüzeyinden bertaraf edilir. Çözücü ile işlem yapılmadan önce ışıklandırma sırasında oluşan stresi ortadan kaldırmak için ısı ile pozlama öncesi pişirme (post exposure bake) işlemi yapılır. Yarıiletken üretiminde fotolitografiden sonra gelebilecek aşındırma ve iyon ekme gibi proses adımlarında şekillenen fotorezistin termal ve fiziksel etkilere dayanabilmesi pullara ısı ve UV enerji ile son kütleme işlemi yapılır [18].

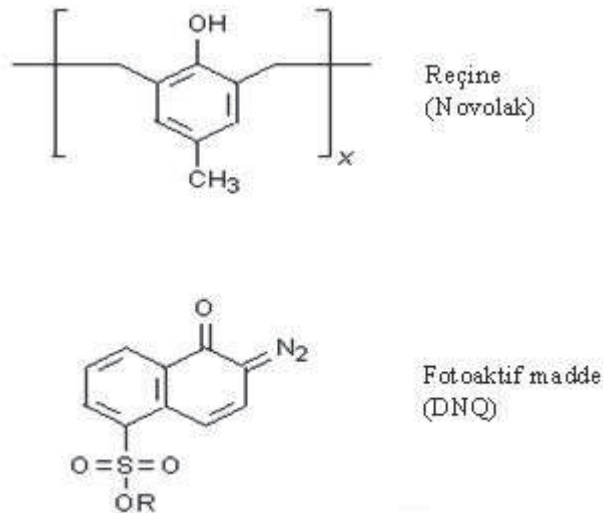
Yansıma önleyici kaplama pul yüzeyinin yansıma özelliklerine ve şekillenecek boyutlara göre fotorezist tabakasının altına ya da üstüne uygulanır. Altına uygulandığı durumlarda ön hazırlık adımı kaldırılır, çünkü pulların ön hazırlık işleminde kullanılan kimyasal (heksametil disilazan) ile yansıma önleyici kaplama reaksiyona girerek fotorezistin soyulmasına neden olabilmektedir [19].

Fotorezist ışığa duyarlı polimer yapıda bir kaplama malzemesidir. Pozitif ve negatif fotorezist olmak üzere iki çeşittir. Pozitif fotorezist kullanıldığında pulun ışık (UV vb.) gören alanları bir sonraki banyo işlemi sırasında çözünerek pul yüzeyinden uzaklaşır. Negatif fotorezist kullanıldığında ise Şekil 2.4’de görüldüğü üzere ışık gören alanlar sertleşerek banyo işlemi sırasında çözünmez ve ışık görmeyen alandaki fotorezist çözünerek pul yüzeyinden uzaklaşır. Böylece maske yüzeyinde bulunan şekillerin negatif pul yüzeyinde oluşur. Negatif fotorezistin yaklaşık %80’i ışığa duyarlı olmayan polimerden (poli (cis-isopren)) ve %20’si ise ışığa duyarlı çapraz bağları oluşturan etken maddeden oluşur. Ayrıca değişken oranlarda koruyucu solvent (n-butil asetat, n-hekzil asetat ve 2- butanol) içerirler. UV ışığa maruz kaldıklarında foto aktif olan etken madde ışığa duyarlı olmayan polimer ile reaksiyona girerek polimerin çapraz bağ oluşturmalarını sağlar ve kimyasal banyo işlemi sırasında çözünürlüğü ortadan kalkar. Ortamdaki oksijen çapraz bağların oluşmasını engellediği için ışıklandırma işlemi nitrojen gazının bulunduğu ortamda yapılır [20].



Şekil 2.4: Negatif ve Pozitif fotorezistin farkı.

Pozitif fotorezist reçine, foto aktif madde ve çözücü olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Reçine pul yüzeyine yapışmayı sağlayarak, ışıklanmayan bölgenin bir sonraki proses adımı (iyon ekme veya aşındırma) maske görevi görmesini sağlar. Foto aktif madde kimyasal banyo sırasında çözünmeyi engeller, fakat pulun ışıklandırılan kısmında foto aktif madde bozularak reçinenin kimyasal banyo sırasında çözünmesini sağlar. Çözücü ise reçine ve fotoaktif maddeyi çözerek, fotorezist kimyasalının sıvı fazda olmasını sağlar. Bu sayede pul yüzeyinde ince film kaplama ($0,5 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$) gerçekleştirilir. Genellikle asetat tipi çözücüler kullanılır ve fotorezist kimyasalının %75'i çözücünden oluşur.



Şekil 2.5: Pozitif fotorezistin kimyasal yapısı [3].

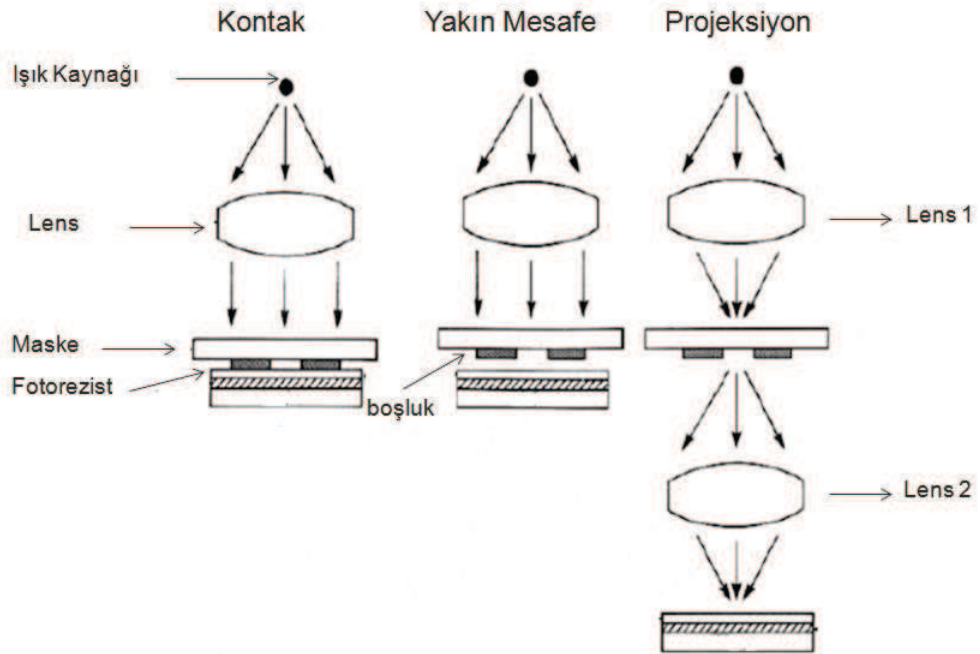
Günümüzde i-line ışıklandırmada kullanılan fotorezistin yapısında Şekil 2.5'de görüldüğü üzere reçine olarak genellikle fenol – formaldehit tipi polimer mevcuttur.

Işığa duyarlı foto aktif madde olarak ise DNQ (diazonaphthaquinone) bulunmaktadır. Novolak reçine bazik çözelti içerisinde (tetrametil amonyum hidroksit çözeltisi) çözünürken foto aktif madde bu tip çözeltiler içerisinde çözünmez. Fakat rezistin yapısında ikisi aynı anda bulunduğundan dolayı bazik çözelti içerisinde çok düşük bir hızda çözünürlükleri vardır. Fotoaktif madde belirli bir dalga boyunda ışığa ($300 \text{ nm} < \lambda < 450 \text{ nm}$) maruz kaldığında fotokimyasal olarak reaksiyona girer ve karboksil asit oluşumunu sağlar. Karboksil asidin bazik bir çözeltide çözünürlüğü novolak reçineye göre çok daha fazladır. Bu nedenle ışık gören alanların çözünürlüğü artarken, ışık görmeyen alanlar pul yüzeyinde kalır. Fakat ışık gören alanların çözünme hızını arttıran mekanizma henüz tam olarak çözülmemiştir ve araştırılmaktadır. DNQ içeren pozitif fotorezistler yapısında bulunan novolak reçinenin yapısına ve moleküler ağırlığına ve de fotoaktif maddenin değişik formlarına göre farklılık gösterirler. Şekil 2.5’de olduğu gibi fotoaktif maddenin R grubu olarak fotorezist üreticileri tarafından genellikle sülfonat (SO_3R) kullanılır. Fakat bu R grubun DNQ molekülünde birden fazla ve kimyasal yapının farklı noktalarında olmalarına göre fotorezistin belirli bir dalga boyundaki absorpsiyon karakteristiği değişir. Novolak resin ise krezol yapının farklı isomerlerinden (ortho, para vb.) ve bağ yapısından (ortho-ortho, ortho-para vb.) oluşturulduğunda farklılık göstermektedir. Ayrıca polimer yapının moleküler ağırlığındaki farklılıklar da fotorezistin bazik çözelti içerisindeki çözünürlüğünü etkilemektedir [21].

Negatif fotorezistin pozitif fotoreziste göre dezavantajı pul üzerinde ışıklanan bölümün ışık almayan bölüm gibi, kimyasal banyoda kullanılan çözücünün nüfuz ederek hacminin artması ve sonucunda şekillerde oluşan bozulmadır. Bu da şekillendirmenin çözünürlüğünü etkileyerek, negatif fotorezistin pozitif reziste göre litografi işleminde kullanımını kısıtlar. Çünkü pozitif fotorezistin ışıklanmayan bölgesinde negatif fotorezistin ışıklanan bölgesinde oluşan hacim artışı görülmez. Bu nedenle pozitif fotorezist kullanarak daha iyi çözünürlükte şekillendirme yapmak mümkündür [22].

Fotolitografi ya da optik litografide kullanılan şekillendirme cihazları gelişmişlik sırasına göre Şekil 2.6 ‘de verilmiştir. İlk olarak maske ile pulun birbirine kontak halinde olduğu ve pulun tek bir defada tümüne ışıklandırma yapıldığı cihazlarla şekillendirme yapılmıştır. Bu cihazlar daha basit ve ucuz cihazlardır. Fakat bu sefer de

maske pul boyutunda olduğu için kullanılan maskeler maliyeti artırır. Ayrıca maske ve pul birbirine değdiği için hem maske hem de pul zarar görebilir. Maskenin zarar gördüğü durumlarda tekrar maske üretimi gereklidir. İkinci sıradaki ışıklandırma cihazında maske ile pul arasında belli bir boşluk vardır. Bu cihazlar ile de tek bir defada pulun tüm yüzeyi ışıklandırıldığı için proses süresi kısadır, fakat maskeleri maliyetlidir. İlk cihaz ile farkı maske ile pul arasında mesafe olduğu için maske ya da pulun hasar görme riski azalırken, ışığın aradaki mesafede dağılmasından dolayı pul üzerindeki şekillerde çözünürlük azalır. Son sıradaki cihaz adımlayıcı (stepper) olarak adlandırılır; çünkü ikinci lens maske üzerindeki boyutu belirli bir küçültme ($1/5x$) ile pul yüzeyine aktarır ve cihaz kırmık boyu kadar adımlamalar yaparak pulun üzerinde kırmık boyutuna bağlı olarak birden fazla çip oluşmasını sağlar. Günümüzde optik litografide şekillendirme amaçlı kullanılan cihazların büyük çoğunluğu adımlayıcılardır. Optik litografi şekillendirme için belirli bir dalga boyundaki ışık kaynağını kullanırken, daha yeni teknolojiler olan elektron demeti litografi (Electron beam lithography) elektronları, iyon demeti litografi (Ion beam lithography) iyonları kullanır. Ayrıca yeni teknolojiler ile maskesiz şekillendirme yapmak da mümkündür.



Şekil 2.6: Şekillendirme cihazları [4].

Optik litografide kullanılan ışık kaynakları ve dalga boylarına göre çözünürlükleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir. YİTAL’de iki adet g-line ve bir adet i-line adımlayıcı vardır.

Çizelge 2.1: Optik litografide kullanılan ışık kaynakları.

Işık Kaynağı	Dalga Boyu (nm)	Çözünürlük (nm)
Hg Lamba (g-line)	436	400
Hg Lamba (i-line)	365	350
KrF	248	150
ArF	193	80
F2	157	—

Optik litografide çözünürlük, dalga boyu ile doğru orantılı, sayısal açıklık (NA) ile ters orantılı olup formülü aşağıdaki gibidir:

$$Kritik\ boyut = k_1 \lambda / NA \quad (2.1)$$

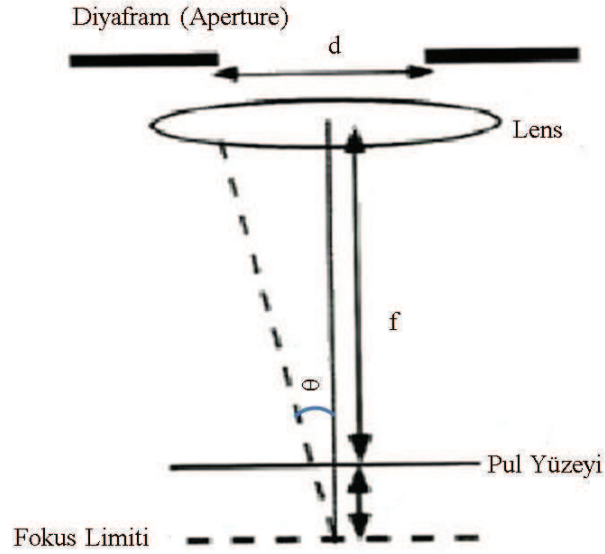
Formülün başındaki k_1 katsayısı litografi prosesinden ve pulun alt yüzeyinden gelecek etkileri temsil eder. Bu değer alabileceği minimum değer 0,25 iken, standart şekillendirme işlemi ile 0,75 değerinin altına düşmemektedir. 0,75 değerinin altına düşmek için çeşitli çözünürlük arttırıcı metotlar uygulanabilir. Bu yöntemler faz kaydırmalı maske (phase shift mask) kullanımı, tasarım aşamasında her şekle ayrı optik düzeltmede kullanılan poligonlar (optical proximity correction) eklemek ya da pul yüzeyinin topoğrafisini düzeltecek ve de yansımayı düşürecek kaplamalar kullanmak olabilir [23].

Sayısal açıklık(NA) ise kullanılan adımlayıcı cihazının bir özelliğidir ve lens yarıçapının odak uzaklığına bölünmesi ile bulunur. θ ‘nın çok küçük olduğu kabul edilir.

$$NA = \theta \approx \sin\theta = d/2f \quad (2.2)$$

d = lens çapı

f= odak uzaklığı

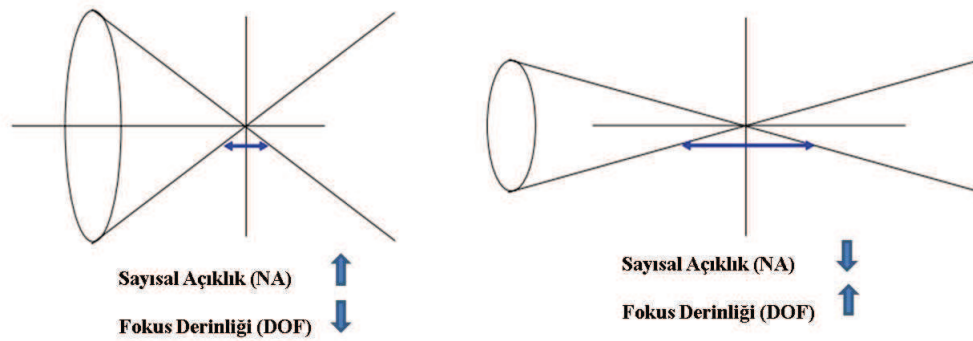


Şekil 2.7: Sayısal açıklığın gösterimi [5].

Şekillendirme cihazlarının bir diğer özelliği ise fokus derinliğidir. Bu terim, pul yüzeyindeki katmanların yükseklik farkından doğacak şekillendirme bozukluklarının, ne kadarlık bir yükseklik farkından sonra ortaya çıktığını tanımlar. Değer büyüdükçe, hataları telafi edebildiği yükseklik farkı artar. Aşağıdaki formülde görüldüğü gibi dalga boyu düştükçe fokus derinliği düşer, sayısal açıklık arttıkça ise fokus derinliği artar.

$$Fokus\ derinligi = k_2 x \lambda / NA^2 \quad (2.3)$$

Sonuç olarak şekillenebilecek kritik boyutu küçültmek için sayısal açıklığı büyütmek gerekirken, fokus derinliğini arttırmak için Şekil 2.8'deki gibi sayısal açıklığın değerini düşürmek gerekir. Sayısal açıklığın yükselmesi çözünürlüğü arttırırken fokus derinliğini düşürdüğü için, sayısal açıklığın değeri belli değerlerle sınırlıdır.



Şekil 2.8: Yarı iletken teknolojisinin gelişimi.

Fotorezist prosesi tüm devre üretim aşamasındaki en kritik proseslerden biridir; çünkü ardından uygulanacak proseslerde sıcaklık; mekanik ve kimyasal etkilere dayanıklı olması ve üzerindeki veriyi en doğru şekilde (boyut ve netlik) aktarması beklenir.

Kısaca aşağıdaki maddeleri sağlaması gerekmektedir;

- Kritik boyut farkının pul genelinde düşük olması
- Bütün katmanların birbirine hizalanmış olması
- Mekanik (fiziksel) sağlamlık
- Isıl (termal) dayanıklılık
- Kimyasal dayanıklılık
- İyi yapışkanlık
- Pürüzsüz duvarlar
- İyi çözünürlük

2.2.1.1 İnce filmin optik etkisi

İnce film etkisi kritik boyut farklılıklarına neden olan etmenler arasında en büyük paydaya sahip olduğu için bu konu ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Litografi işlemi sırasında pul yüzeyine kaplanan fotorezist filminde gelen ve yansıyan ışığın etkileşimi sonucu; ışık yoğunluğu fotorezist filminin derinliği boyunca çok hızlı bir değişime uğrar. Bu değişimin formülü aşağıda verilmiştir [18].

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.4)$$

α = absorpsiyon katsayısı

$z = 0$ (fotorezist tabakasının hava ile temas ettiği yüzey)

Fotorezist tabakasının derinliği boyunca değişen ışık yoğunluğu bir sinüs grafiği oluşturur ve bu değişim duran dalga etkisi olarak adlandırılır. Işık yoğunluğunun değişimi ile fotorezist tabakasının farklı derinliklerine farklı yoğunlukta ışık ulaşır. Bu farklılık ışıklandırma sonrası çözünme hızını etkiler. Yoğun ışık alan bölgeler daha kolay çözünürken, daha az yoğunlukta ışık alan bölgeler daha az çözünür. Bunun sonucunda ışıklandırma sonrası oluşan şeklin profilinde düzensizlikler oluşabilir. Fotorezist kaplamanın derinliği boyunca duran dalga oluşumuna ek olarak ince film etkisinin neden olduğu bir diğer etmen ise absorbe edilen ışığın rezist ve alt

tabakada bulunan katmanın kalınlığına bağlı olarak değişimidir. Absorbe edilen ışık miktarı ise sonuç olarak şekillendirme sırasında oluşan şeklin boyutunu (kritik boyut) etkilemektedir.

Şekillendirilecek boyut küçüldükçe, ince film etkileşimi optik litoğrafide kritik boyut kontrolünü sağlamak adına önemli rol oynamaya başlamıştır. Pul genelinde rezist kalınlık dağılımındaki düzensizlik, rezist tarafından absorblanan enerji miktarının değişimine neden olur. Mesela 365 nm dalga boyunda ışık kaynağı olan bir adımlayıcıda fotorezist kalınlığındaki 54 nm farklılık genellikle kullanılan pozitif fotorezisti açmak için gerekli olan enerji dozajını % 35 oranında etkiler ve bu varyasyonlar da rezist tarafından absorblanan enerjinin rezist kalınlığı ile değişimini gösteren grafiklerle (swing curve) karakterize edilir [24].

Fotorezist tabakasının optik modeli (Fabry-Perot etalon) ışıklandırma için gerekli olan enerjinin değişim oranı (swingratio) “S” için aşağıdaki analitik denklemi verir [25].

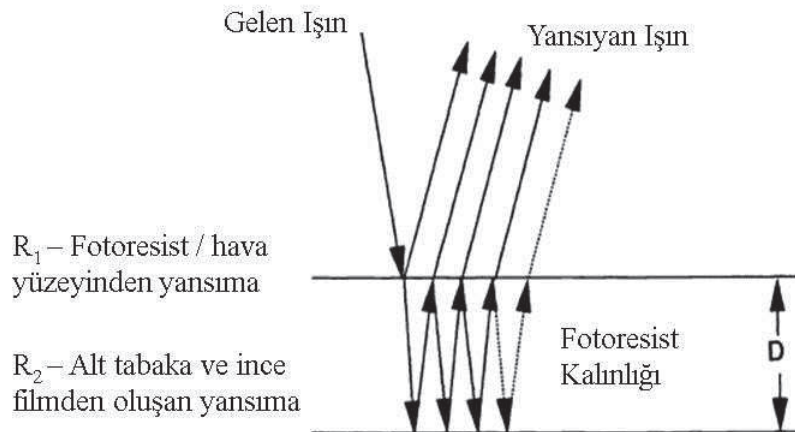
$$S \cong 4\sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha D} \quad (2.5)$$

R_1 = Fotorezist / hava arayüzündeki yansımaya

R_2 = Fotorezist / alt tabaka arayüzündeki yansımaya

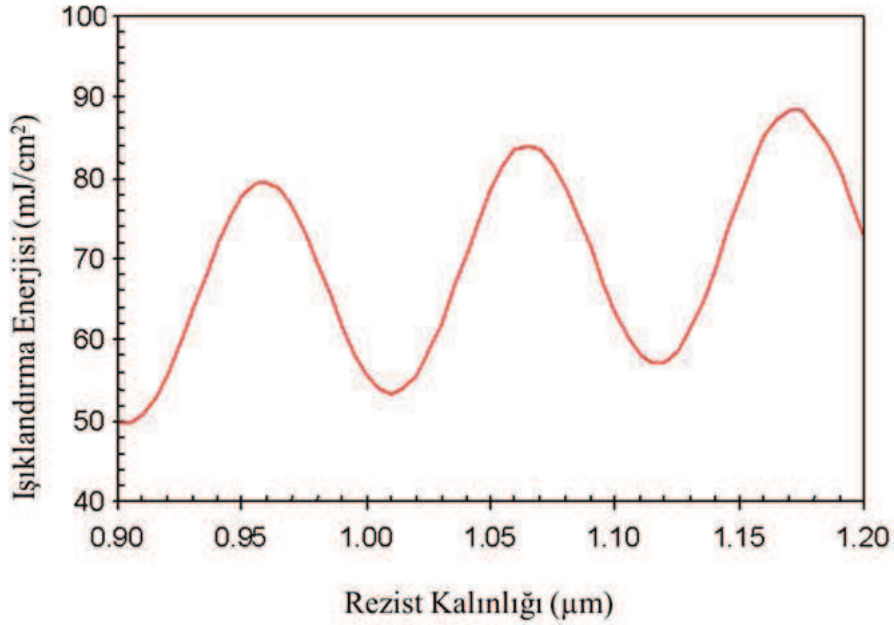
α = fotorezist geçirgenlik katsayısı

D = Fotorezist Kalınlığı



Şekil 2.9: Fotorezist tabakasının optik modeli.

Değişim oranı (swing ratio) deneysel olarak optimum ışıklandırma dozajının rezist kalınlığına göre değişimi gözlenerek tespit edilebilir. Deneysel olarak fotorezist tabakasını açmak için gerekli olan enerji rezist tabakasının kalınlığına göre sinüs eğrisi şeklinde değişim gösterir. Değişim oranı grafiğindeki açmak için gerekli olan enerji miktarı çoğunlukla düz silisyum tabaka üzerinden ölçülür. S değeri grafikte (Şekil 2.10) bulunan maksimum ve minimum enerji değerleri farkının ortalama enerji değerine bölünmesi ile elde edilir. Eğer değişim oranı sıfıra indirgenebiliyorsa, fotorezist prosesi rezist kalınlık değişiminden ve depolanan filmin topoğrafisi ile kalınlık değişiminden dolayı oluşabilecek optik fazdaki değişimleri ortadan kaldırabilir [25].



Şekil 2.10: i-line ışıklandırma sisteminde silikon tabaka üzerindeki serili rezisti açmak için gerekli olan enerjinin rezist kalınlığı ile değişim grafiği (swing ratio) [6].

Optik litografi tekniklerinde dalga boyu küçüldükçe ince film etkileri artmaktadır, çünkü silikon yüzeyine düşen ışığın dalga boyu küçüldükçe yansıma miktarı artar. Yukarıda rezist kalınlığına göre absorblanan enerjinin değişim oranını veren formüle göre değişim oranını düşürmek için aşağıdaki yollar izlenebilir [26].

- a) Rezist kalınlığı arttırılabilir (D)
- b) Rezist absorbsiyonu arttırılabilir (α)

- c) Taban yansımasını düşürmek (R2)
- d) Rezist yüzeyindeki yansımayı düşürmek (R1)

a) Rezist kalınlığını arttırmak:

Hedeflenen kritik boyut dalga boyundan daha küçük olduğu için rezist kalınlığını arttırmak çözünürlük kaybına neden olacaktır. Ayrıca kalınlığın artması şekillendirme işleminden bir sonraki adım olan aşındırma işlemini de etkilemekte ve profilin dikliği açısından kayıplar yaşanmaktadır.

b) Rezist absorpsiyonunu (α) arttırmak:

Fotorezist ışıklandırma sürecine ait ilk model Dill et.al. tarafından yapılmıştır. Fotorezistin absorpsiyon özelliğinin karakterizasyonu için iki parametre kullanmıştır. Bu nedenle bu parametreler A ve B Dill parametreleri olarak adlandırılır. Dill A parametresi ışıklandırma ile absorpsiyonu değişen bileşenleri temsil ederken, Dill B parametresi ışıklandırma sırasında absorpsiyonu sabit kalan bileşenleri temsil eder [27]. Rezist absorpsiyonu (α) A ya da B Dill parametreleri yükseltilerek artırılabilir. Dill A parametresi fotorezist içerisindeki fotoaktif bileşen konsantrasyonu artırarak ya da daha yüksek absorpsiyon katsayılı bir bileşen seçerek artırılabilir. Dill B parametresi ise ışık altında absorpsiyonu değişmeyen boya katılarak artırılabilir. Dill B parametresini yükseltmek değişim oranını düşürmek için daha etkili bir yöntemdir; çünkü uygun boyar maddeler kullanıldığında fotoaktif maddeye göre daha yüksek absorpsiyon katsayıları vardır ve absorpsiyon dereceleri ışık altında değişmez. Kritik boyut kontrolünü sağlamak için yukarıda verilen yöntemlerden en basit şekilde uygulanabilen seçenek boyalı fotorezist kullanımıdır. Fotorezist kaplamasına ek olarak yansıma önleyici kaplama yapmayı, şekillendirme sonrasında kaplamanın aşındırılmasını ve pul yüzeyinden uzaklaştırması için yapılacak kimyasal prosesleri ortadan kaldırarak hem proses süresini kısaltır hem de prosesin maliyetini düşürür. Fakat fotorezist içeriğine eklenen boya malzemesi fotorezistin hassasiyetini oldukça düşürür ve şekillendirme sonrasında yan duvar açılarından kayıp yaşanır. Sonuç olarak şekillendirme sonucu oluşan yapılarda özellikle de kritik boyut küçüldükçe çözünürlük ile ilgili önemli kayıplar gözlemlenir. Bu nedenle özellikle düşük boyutlarda

($\leq 0,5\mu\text{m}$) değişim oranını düşürmek ve aynı zamanda şekillendirme sırasında yan duvarların dikliğini bozmamak için daha etkili yöntemler uygulanmalıdır [24].

c) Taban Yansımasını Düşürmek:

Taban yansımasını düşürmek için inorganik ve organik kaplamalar mevcuttur. Taban yansımasını düşürmek için kullanılan inorganik yansıma önleyici kaplama (TiN, TiW ya da SiO_xN_y : H^{4-6}) rezist kalınlığına göre gerekli olan enerji dozajı değişim oranını %15 değerine kadar düşürmüştür; fakat organik kaplama kadar etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca şekillendirme sonrasında inorganik yansıma önleyici kaplamayı yüzeyden almak için tozutma (sputtering) işlemi yapmak gerekmektedir. Bu işlem de pul yüzeyinde partiküle neden olmaktadır. Organik yansıma önleyici kaplama ise pul yüzeyinden bertarafı açısından çeşitlilik gösterir. Bir kısmı bir sonraki proses adımı olan aşındırma işlemi sırasında kuru aşındırma ile yüzeyden uzaklaştırılırken bir kısmı şekillendirme sonrasında yapılan banyo işlemi sırasında yüzeyden uzaklaştırılır. İkinci durumda ışıklandırma sırasında kimyasal yapısı değişmiş olan fotorezist ile yansıma önleyici kaplamanın çözücüler benzerlik gösterir ve kaplamanın çözünürlüğünü özellikle kaplama işleminden sonra uygulanan ısı işlem etkilemektedir. Düşük sıcaklıklarda filmin çözünürlüğü artmakta ve reaksiyon tamamlanana kadar şekillerde kayıp noktalar oluşabilmektedir. Yüksek sıcaklık uygulandığında ise yansıma önleyici kaplamanın çözünürlüğü azalmakta ve pul yüzeyinden tam olarak uzaklaştırılamadığı için kalıntılar oluşmaktadır. Kritik boyuta göre uygun sıcaklık aralığı değişmektedir. Kritik boyut büyüdükçe uygun sıcaklık aralığı genişlemekte, kritik boyut küçüldükçe ise uygun sıcaklık aralığı daralmaktadır [10] [28].

d) Rezist Yüzeyindeki Yansımayı Düşürmek:

Fotorezist yüzeyine uygulana yansıma önleyici kaplamayı seçerken özellikle yansıma katsayısının fotorezistin yansıma katsayısının karaköku olmasına dikkat edilmelidir [29].

$$n_{TAR} = \sqrt{(n_{resist})} \quad (2.6)$$

365 nm dalga boyunda (i-line) kullanılan pozitif fotorezistin yansımaya katsayısı yaklaşık olarak 1,70 civarındadır. Bu nedenle kullanılacak olan yansımaya önleyici kaplamanın yansımaya indeksi yaklaşık olarak 1,30 olmalıdır. Bu tür malzemelerle çalışmak hem zor, hem de bu tür malzemelerin tedariği zordur. Fotorezist yüzeyine uygulanacak kaplamanın ideal kalınlığı ise aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$d = \lambda / (4n) \quad (2.7)$$

λ = ışıklandırma cihazının dalga boyu

n: yansımaya katsayısı

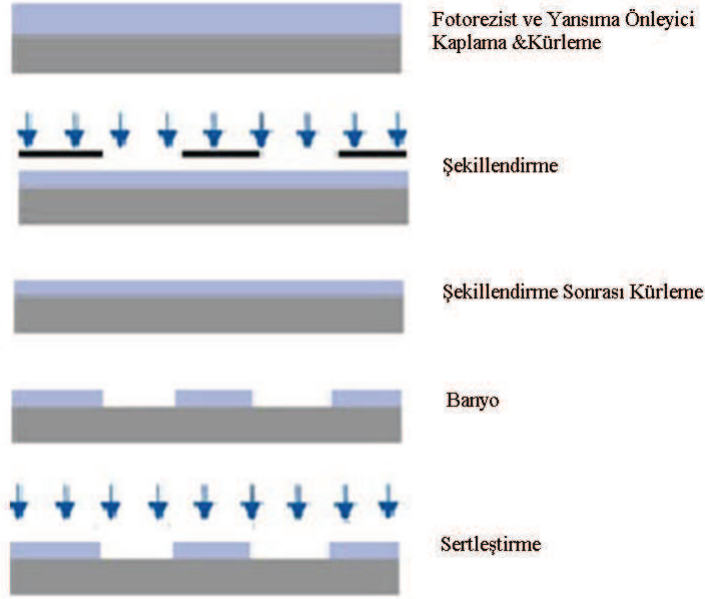
Yansımaya katsayısı 1,3 olan bir kaplama kullanılır ise yukarıdaki formüle göre 365 nm dalga boyunda yapılacak ışıklandırma için uygulanması gerek kalınlık yaklaşık olarak 700 Ångstrom'dur.

Rezist yüzeyine uygulanan yansımaya önleyici kaplama prosese sadece fazladan bir adım kaplama prosesi eklemiş olur; çünkü şekillendirme sonrası yüzeyden fotorezist ile birlikte aynı kimyasal işlem sırasında çözünerek pul yüzeyinden uzaklaştırılır. Kullanılan kaplamaya göre şekillendirme sonrası pişirme yapmadan suda çözünen çeşitleri de mevcuttur.

Steve S. Miura ve arkadaşları (1992) yansımayı düşürerek hem kritik boyut kontrolünü sağlamak ve hem de alt tabandaki topografiden dolayı şekillerde oluşacak bozulmayı önlemek için yukarıda bahsedilen yöntemlerin içinde en etkili olanın alt taban üzerine uygulanan yansımaya önleyici kaplama olduğu sonucuna varmışlardır. Boyalı fotorezist kullanmak en basit yöntem olmakla birlikte alt tabanın topoğrafisinde 100 nm'den daha fazla oluşan yükseklik farklılıklarını örtememekte ve de yan duvar açılarında kayba neden olmaktadır. Fotorezist yüzeyinin üzerine uygulanan yansımaya önleyici kaplama şekillendirme sonrası banyo ile yüzeyden uzaklaştırılabilmekte; fakat alt tabana uygulanan yansımaya önleyici kaplama gibi alt taban topoğrafisinin şekiller üzerindeki etkisini ortadan kaldıramamaktadır [24].

3. LİTOGRAFİ PROSES PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

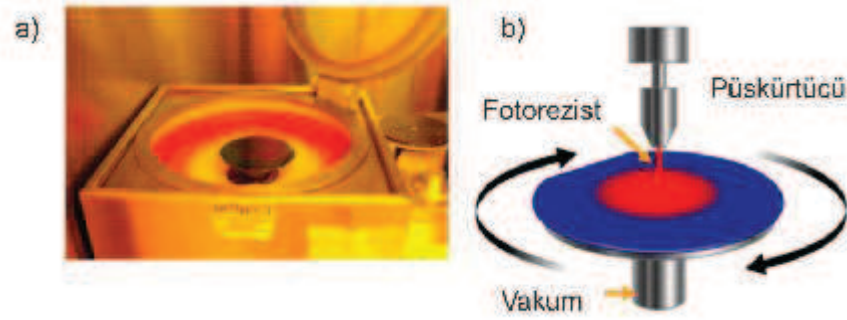
Litografi prosesi sırasında uygulanan adımlar Şekil 3.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Fotolitografi prosesinin adımları.

3.1 Fotorezist Kaplama

Fotorezist kaplamak için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar vakumlu döner tabla üzerinde pulu belirli bir hızda döndürerek kaplama, spreycaplama, daldırma yöntemi ile kaplama ve polimer silindirin rezisti pul yüzeyine transferi ile kaplama yöntemleridir. En çok kullanılan yöntem, pul yüzeyinde kaplama homojenliğini yüksek seviyede sağladığı için Şekil 3.2'deki gibi döndürerek kaplama yöntemidir.



Şekil 3.2: a) Döndürerek kaplama yapılan cihaz b) Döndürerek fotorezist kaplamanın şematik gösterimi [7].

Bu yöntemde pul vakumlu bir tabla üzerine ortalanarak yerleştirilir ve uygulanan vakum sayesinde pul yüksek hızlarda dönerken tabla üzerinde sabitlenir. Püskürtücü sistem tarafından pulun ortasına akıtılan fotorezist sıvısı, pulun dönmesi ile oluşan santrifüj (merkezkaç) kuvveti ile pulun tüm yüzeyine yayılır. Pulun tam orta kısmının tabla üzerine oturması, pul yüzeyindeki kaplama kalınlığı değişkenliğinin düşük oranda tutulması için oldukça önemli bir parametredir. Bu parametrenin kişiye bağımlılığını ortadan kaldırmak için pulu tabla üzerine yerleştirirken ayrıca bir aparat kullanılmaktadır.

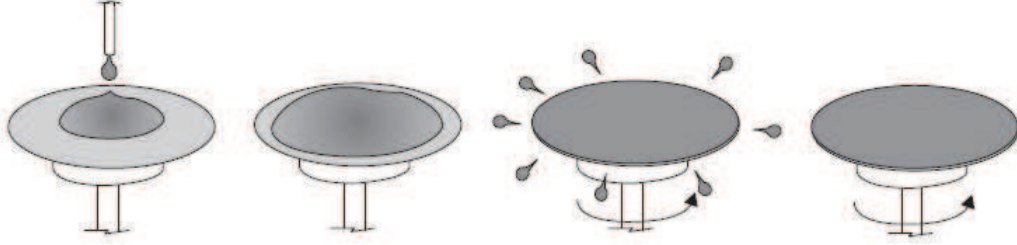
Fotorezist sıvısı pul yüzeyine, pul statik ya da dinamik konumdayken püskürtülebilir. Statik konumda pul tabla üzerinde dönmez iken dinamik konumda ise düşük hızda (500 devir/dk) döner. Sıvının püskürtüldüğü sırada pulun statik konumda olmasının en büyük dezavantajı fotorezist çözeltisinin pul yüzeyini tamamen kaplayabilmesi için daha yüksek miktarda kullanılması gerektiğidir. İlgili çözelti oldukça pahalı olduğu için pul başına kullanılacak miktarı arttırmak üretim maliyetini arttıracaktır. Ayrıca kaplama prosesi sırasında çözeltinin bir kısmı pul yüzeyinden cihazın haznesine yayıldığı için atık olarak biriktirilmektedir. Fotorezist çözeltisi içerisinde bulunan çözücü çevre açısından oldukça zararlı olduğu için atık miktarını arttırmak çevre kirliliği riskini yükseltecektir. Bir diğer dezavantajı ise ince film ile kaplanacak pul yüzeyinin ıslanabilirlik derecesi düşük ise statik konumda serme işlemi yapıldığında pul yüzeyinde fotorezist filminde boşluk oluşma riski olacaktır [30]. Bu nedenlerden dolayı yapılan deneylerde ve proste pulun dinamik olduğu konumda çözeltinin pul yüzeyine püskürtülmesi tercih edilmiştir.

Dinamik konumda püskürtme yaparken önemli olan çözeltinin pulun tam ortasından pulun tüm yüzeyine yayılmasıdır. Aksi takdirde kaplanan ince filmin kalınlık dağılımında düzensizlikler oluşur ve bu düzensizlikler pul yüzeyinde oluşacak şekillerin profil ve kritik boyutlarını olumsuz olarak etkiler. Bu riski ortadan kaldırmak için yukarıda da anlatıldığı üzere pulun merkezini tabla üzerine oturtmak için ayrı bir aparat kullanılmaktadır. Ayrıca püskürtme işlemi yapıldıktan sonra fotorezistin pulun yüzeyinde kademeli olarak yayılması için cihazın önceden ayarlanan son döndürme hızına ulaşmadan önce belirli bir süre düşük hızda dönmesi gerekmektedir. Düşük hızdan yüksek hıza geçiş için ayarlanan hızlanma ivmesi de polimerin pul yüzeyinde kademeli yayılmasında etkili olacaktır [31].

Yang ve Chang (2006), dönen tabla üzerinde fotorezist serme prosesinin sonuç değişkenlerini (kaplama kalınlığı ve kalınlığın pul yüzeyindeki değişim oranı) hangi parametrelerin ve ne oranda etkilediğine dair bir çalışma yapmışlardır. Fotorezist serme işleminde kullandıkları cihazın özelliklerini göz önünde bulundurarak değişken olarak fotorezist sıcaklığı, cihazın haznesindeki nem oranı, döndürme hızı ve fotorezistin akış debisi olmak üzere 4 adet parametre seçmişlerdir. Taguchi metodu kullanarak sadece 9 deney (L_9) sonucu ile sonuç değişkenlerin hedef değerlerini sağlayacak optimum parametre seviyelerini tespit etmişler ve Varyans Analizi (ANOVA) uygulayarak faktörlerden en etkili olanların fotorezist sıcaklığı ve cihazın haznesindeki nem oranı olduğunu tespit etmişlerdir [32].

Atthi ve çalışma arkadaşları (2009) ise Taguchi metodunun dört seviyeli (L_{16}) düzenini ve varyans analizini (ANOVA) kullanarak fotorezist serme prosesi üzerindeki etkili parametreleri ve bu parametrelerin optimum seviyelerini belirlemişlerdir. Kontrol edilen parametreler olarak fotorezist akıtma süresi (s), ilk dönme hızı (devir/dk), son dönme hızına çıkma ivmesi (Devir/dk/s) ve son dönme hızı olarak belirlemişlerdir. Sonuç değişkeni olarak ise fotorezist kalınlığını ve pul genelindeki kalınlık değişimini almışlardır. Fotorezist serme işlemi sırasında Şekil 3.3 'de olduğu gibi ilk adımda fotorezist pul yüzeyine belirlenen sürede akıtılır, ikinci adımda ilk dönme hızı ile pul geneline yayılır, üçüncü adımda belirlenen bir ivme ile cihaz son hıza çıkarken pul yüzeyinde fazlalık olarak bulunan fotorezist yüzeyden atılır. Yapılan bu çalışmada da serme işleminin 4 önemli adımın 4 önemli parametresi kontrollü

değişken olarak alınmıştır. Sonuç olarak ise kullandıkları fotorezistin viskozitesinin de etkisiyle fotorezist kalınlığı üzerindeki en etkili parametrenin son dönme hızı ve kalınlık dağılımını en fazla etkileyen parametrenin ise ilk dönme hızı olduğunu tespit etmişlerdir [33].



Şekil 3.3: Fotorezist serme işleminin adımları.

Çalışmalarda kullanılan cihazın (Brewer Science CEE 200 X model cihazı) özellikleri ve literatürde bulunan çalışmalar göz önünde bulundurularak fotorezist serme prosesine ait parametreler ve sonuç değişkenler Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Fotorezist kaplama prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.

Proses Parametreleri	Sonuç Değişkenler
* Fotorezist türü	
Fotorezist serme cihazı ile ilgili parametreler	*Fotorezist kalınlığı
* Fotorezist akıtma süresi	*Fotorezist kalınlık dağılımı
* İlk dönme hızı	
* Son dönme hızı	
* Hızlanma İvmesi	
Ortam ile ilgili parametreler	
*Sıcaklık	
*Nem oranı	

3.2 Fotorezist Kürleme İşlemi

Kürleme işlemi pulu belirli bir sıcaklığa ayarlanmış bir fırın içerisinde ya da belirli bir sıcaklığa ayarlanmış vakumlu tabla üzerinde belirli bir süre tutarak gerçekleştirilmektedir. Proses fırın içerisinde yapıldığında birden fazla pul aynı anda işlem görebilir, fakat bu iş için yaklaşık 30 dakika gibi bir süre gerekmektedir. Bu

nedenle kürleme işlemi çoğunlukla vakumlu tabla üzerinde gerçekleştirilir. Fotorezist serme işleminin ardından vakumlu tabla üzerine alınan pul 45-60 saniye arasında belirli bir sıcaklığa maruz bırakılır. Bu işlem sırasında fotorezistin yapısında yaklaşık %80-70 arasında bulunan çözücü miktarı % 20-10 civarına düşer ve rezistin serbest hacmi düşer.

Kürleme işlemi şu amaçlarla yapılmaktadır;

- Fotorezistin yüzeye yapışmasını iyileştirmek.
- Fotorezistin içerdiği çözücüü uçurarak, litografi işlemi sırasında açığa çıkan N2 gazı ve bir sonraki termal kuru aşındırma prosesi sırasında buharlaşan çözücünün neden olabileceği kabarcık oluşumunu engellemek.
- Çözücü miktarının düşmesi banyo işlemi sırasında ışıklanmış ve ışıklanmamış alanların çözünme hızları arasındaki farkı arttırır. Işıklanmamış alanların çözünürlüğü önemli ölçüde düşer.

Çözücü oranını kürleme işlemi sonunda düşük oranlara indirmek için, vakumlu tablayı çözücünün buharlaşma sıcaklığı olan 140 °C civarına kadar ısıtmak gerekmektedir. Fakat foto aktif madde 100 °C -120 °C civarında bozunmaya başladığı için çok yüksek sıcaklıklara çıkmak mümkün değildir. Bu nedenle fotorezisti oluşturan bileşenlerin bozunma sıcaklıkları (Td) göz önünde bulundurularak; bozunma sıcaklığı en düşük olan bileşene göre kürleme işleminin sıcaklığı belirlenmelidir [34].

Çizelge 3.2: Fotorezist bileşenlerinin camsı geçiş ve bozunma sıcaklıkları.

Bileşen	Camsı Geçiş Sıcaklığı °C	Bozunma Sıcaklığı °C
Novolak	70-120	150-300
Foto aktif madde (DNQ)	-	100

Vakumlu tabla üzerinde yapılan kürleme işleminin daha yaygın bir şekilde kullanılması ve deneyler sırasında da bu yöntem kullanılacak olması dolayı bu yöntemin proses parametreleri ve sonuç değişkenleri incelenmiştir.

Çizelge 3.3: Işıklandırma öncesi kürlenme işleminin proses parametreleri ve sonuç değişkenleri.

Proses parametreleri	Sonuç Değişkenleri
*Tabla Sıcaklığı	* Şekillendirme sonrası kabarcık oluşumu
*Proses Süresi	*Banyo işlemi sonrasında şekillerde bozulma

3.3 Yansıma Önleyici Kaplama ve Kürlenmesi

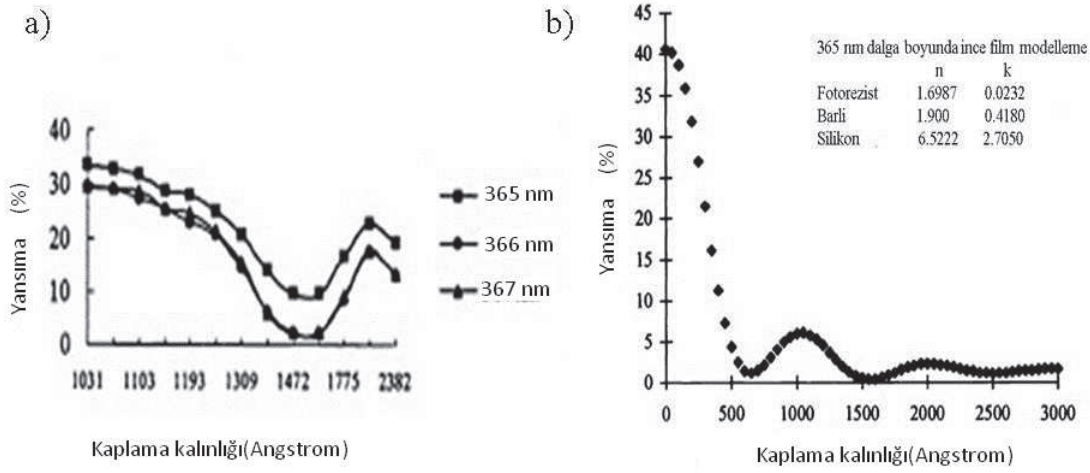
Optik litografi tekniklerinde dalga boyu küçüldükçe ince film etkileri artmaktadır. Silikon yüzeyine düşen ışığın dalga boyu küçüldükçe yansıma miktarı artar. Yansıma önleyici kaplama ise gelen ışığı önemli miktarda absorbe edebildiği için, şekillendirme sürecinde oluşabilecek duran dalga etkisini önemli miktarda azaltmış olacaktır. Özellikle bu çalışmada olduğu gibi ışığın dalga boyundan daha küçük boyutlarda çalışırken kritik boyut kontrolü yansıma önleyici kaplamanın seçimi ve proses optimizasyonu ile çok yakından ilişkilidir. İnce filmin optik etkisi bölümünde anlatıldığı üzere fotorezistin altına uygulanan yansıma önleyici kaplama pul yüzeyindeki topoğrafik yapıdan dolayı oluşacak yansımaları ve ince film etkisini ortadan kaldırır. Özellikle homojen olmayan alt tabaka kalınlığını (bir önceki üretim basamağında depolanmış olan alt katman) boşlukları doldurarak daha homojen hale getirir. Böylece pul yüzeyindeki kritik boyuttaki değişim oranı azalır. Fotorezistin üstüne uygulanan yansıma önleyici kaplama pul yüzeyindeki boşlukları doldurmadığı için topoğrafik yapıdan dolayı oluşan yansımaları engelleyemez, ayrıca duran dalga etkisini gidermede de alt tabakaya uygulanan yansıma önleyici kaplama kadar başarılı değildir. Bu nedenle temel hedef olan kritik boyut kontrolünü daha iyi sağlamak için çalışmalar sırasında alt tabakaya uygulanan organik yansıma önleyici kaplama tercih edilecektir [35].

Fotorezist tabakasının altına uygulanan kaplama, banyo prosesi sırasında aynı kimyasal çözelti içerisinde çözünen ve de çözünmeyip bir sonraki adım olan kuru aşındırma prosesi ile pul yüzeyinden uzaklaştırılan olmak üzere iki çeşittir. Kimyasal çözelti içerisinde çözünen kaplama kuru aşındırma gerektiren yansıma önleyici

kaplamaya göre hem aşınma sırasında alt tabakaya verilen zararı azaltmakta hem de ışık gören fotorezist ile aynı anda çözündüğü için proses süresini kısaltmakta ve maliyeti düşürmektedir. Fakat serme işleminden sonra uygulanan kürleme işleminin sıcaklığı ve süresi yansıma önleyici kaplamanın çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle düzgün bir profil elde etmek için ısıtma işlem parametrelerinin optimizasyonu oldukça kritiktir. Boyut küçüldükçe de ısıtma işlem aralığı daraldığı için prosesteki küçük salınımların ($\sim 1^\circ\text{C}$) sonucunda şekillerin profillerinde bozulmalar olabilir. Ayrıca kaplamanın çözünürlüğü etkilendiği için açık alanlarda yansıma önleyici kaplamadan dolayı kirlilikler oluşabilir [25].

Ron Eakin ve arkadaşları(1997) yaptıkları çalışmada yansıma önleyici kaplamanın kalınlığını arttırarak alt yüzeyin boşluklarını daha iyi doldurduklarını ve daha düz bir yüzey elde ederek kaplama kalınlığı / ışıktandırma enerjisi değişim oranını (swing ratio) düşürdüklerini savunmuşlardır. Böylece daha yüksek fokus derinliği elde ettiklerini, tüm puldaki kritik boyut dağılım aralığını daralttıklarını ve alt tabaka topoğrafisinden kaynaklanacak kritik boyut farklılığını düşürdüklerini göstermişlerdir. Yansıma önleyici kaplama için uygun kalınlığı seçerken alt yüzeyin yansımalarını düşürme oranını ve de pul genelindeki kritik boyut farklılığını minimum seviyeye indirgemeyi dikkate almışlardır. Kaplama işleminden sonra yapılan kürleme işlemi için ise 170, 200 ve 220 $^\circ\text{C}$ olmak üzere üç sıcaklık denemişler ve şekillendirilen pullardaki kritik boyut dağılımını, şekillerin profilini ve de fokus derinliğini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırılan değerler arasında farklılık gözlemlenemediklerinden dolayı kürleme işlemini daha yüksek sıcaklıklarda yapmak yerine 170 $^\circ\text{C}$ 'de yapmanın daha uygun olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak yapılan çalışmalarda kritik boyutun büyüklüğü ve şekillendirme yapılan yüzeyin pürüzlülüğü kalınlık seçimi ve kürleme sıcaklığının etkisini değiştirecektir. Fakat sonuç değişken olarak mutlaka yansıma özelliğine ve kritik boyut dağılımına bakılacaktır [36].

Şekil 3.4 'de iki farklı yansıma önleyici kaplamanın kaplama kalınlığına karşı değişik dalga boylarında yapılmış yansıma ölçümleri (a) ve modelleme (b) sonuçları bulunmaktadır. Sonuçta iki grafiğin davranışı birbirini ile benzerlik göstermektedir. Yansıma artan kalınlıkla öncelikle düşmekte ve daha sonra da artmaktadır. Yapılan bu çalışmada amaç en düşük kalınlık değerinde minimum yansıma değerini yakalamaktır.



Şekil 3.4: a) XHRi-11 kodlu yansımaya önleyici kaplamanın 1000-2300 Angstrom kalınlık aralığındaki yansımaya ölçüm sonuçları [8] b) Barli kodlu yansımaya önleyici kaplamanın kalınlık değerlerine göre 365 nm dalga boyundaki yansımaya değerlerinin modelleme sonuçları [9].

Çünkü şekillendirme açısından yansımayı mümkün olduğunca düşürmek gerekirken; bir sonraki adım olan aşındırma prosesi için de kaplama kalınlığını en düşük seviyede tutmak gerekmektedir.

Genellikle yansımaya önleyici kaplama prosesi yansımaya ve kalınlık ölçümü yapılarak optimize edilmiştir. Fakat ışıklandırma sonrası pişirme prosesi için çok az optimizasyon çalışması yapılmıştır. Işıklandırma sonrası pişirme işleminin rezist profili üzerindeki etkisini ve uygun enerji/fokus aralığını nasıl değiştirdiğini incelemek gerekmektedir. Çünkü kritik boyut küçüldükçe uygun sıcaklık aralığı daralmaktadır [8].



Şekil 3.5: Yansımaya Önleyici Kaplama Sonrası Pişirme Sıcaklığının Etkisi [10].

Şekil 3.4’de görüldüğü üzere yansımaya önleyici kaplamanın kalınlığı ile birlikte yansımaya değerleri de değişmektedir. Bu nedenle kalınlığı etkileyebilecek parametreler

(kullanılan kimyasal miktarı, kimyasalın akması sırasında tablanın dönme hızı, serme sırasındaki tablanın dönme hızı) dolayısı ile yansımayı da etkileyecektir. Çizelge 3.4 ‘de bu adıma ait değerlendirilecek tüm proses parametreleri ve sonuç değişkenler verilmiştir.

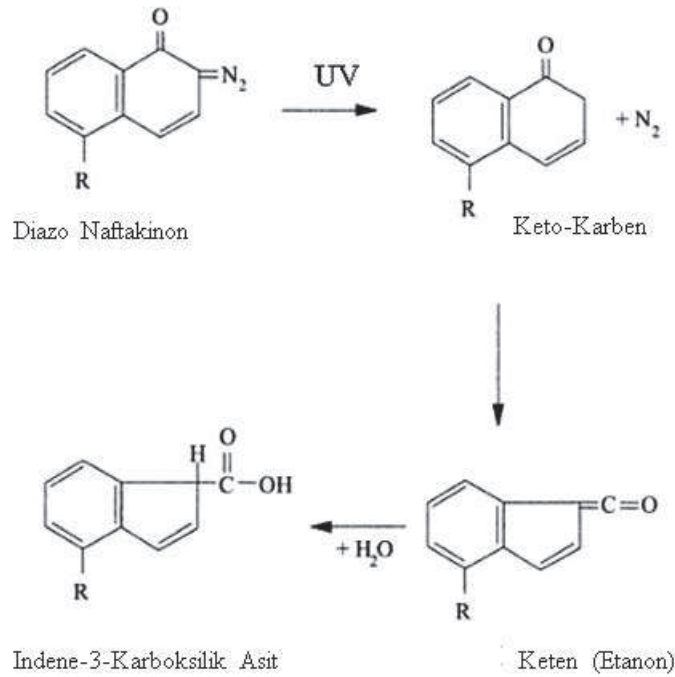
Çizelge 3.4: Yansıma önleyici kaplama ve kütleme adımlarının parametreleri ve sonuç değişkenleri.

Proses Parametreleri	Sonuç Değişkenler
* Yansıma önleyici kaplamanın seçimi	*Yansıma
*Kullanılan kimyasal miktarı	*Profil
*Kimyasalın akması sırasında tablanın dönme hızı (dev/dk)	*Fokus
*Serme sırasındaki tablanın dönme hızı (dev/dk)	Derinliği
* Kütleme sıcaklığı	*Kritik Boyut
* Kütleme süresi	Dağılımı
	* Işıklendirme Şiddetinin Etkisi

3.4 Şekillendirme

Şekillendirme işleminde fotorezist yapısında bulunan foto aktif madde (diazo naftakinon) belirli bir dalga boyundaki ışıığa (365 nm) maruz kalarak reaksiyona girer ve keto-karben oluşumu ile nitrojen açığa çıkmasını sağlar. Şekil 3.6’de görüldüğü üzere, keto-karben daha istikrarlı bir yapı olan etanon’a dönüşür. Daha sonra etanon fotorezist yapısında bulunan su molekülleri ile reaksiyona girerek karboksil asit oluşumunu sağlar.

Şekillendirme işleminin yapıldığı adımlayıcı (stepper) cihazında kullanıcı tarafından belirlenen ve pul yüzeyinde oluşan şekillerin boyut ve profilini etkileyen parametreler, ışıklendirme dozajı ve fokus değeridir. Adımdayıcı kullanıcı tarafından girilen fokus değerini pulun bulunduğu tablanın yüksekliğini +z ve -z yönünde değiştirerek ayarlar ve birimi de mikrometredir. Işıklendirme dozajının birimi ise Joule / m² olup, cihaz UV ışığın geçişini sağlayan perdenin bıçaklarının açık kalma süresini değiştirerek, birim alana düşen enerji miktarını ayarlar. Bıçakların açık kalma süresini ise civa lambanın yoğunluğuna ve de kullanıcı tarafından girilen dozaja göre ayarlar.



Şekil 3.6: Fotoaktif maddenin (DNQ) UV ışık kaynağı altındaki reaksiyonu.

Çizelge 3.5 ‘de Canon FPA – 3000 i4 cihazın özellikleri göz önünde bulundurularak şekillendirme prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri verilmiştir.

Çizelge 3.5: Şekillendirme prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.

Proses Parametreleri	Sonuç Değişkenler
* Işıklendirme Dozajı * Fokus Değeri	* Kritik Boyut * Netlik ve Şekillerde Bozulma

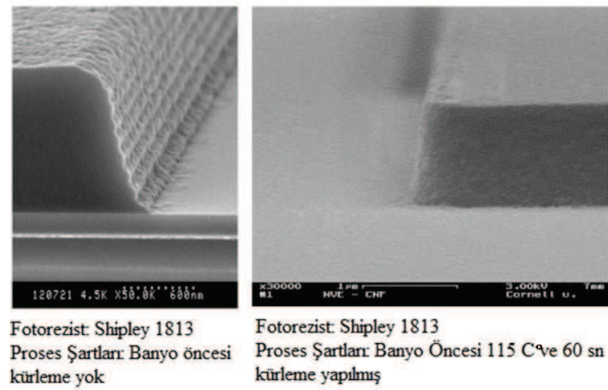
3.5 Şekillendirme Sonrası Kürtleme ve Banyo İşlemi

Fotorezist yapısında bulunan ışığa duyarlı fotoaktif maddenin (diazo naftakinon) UV ışığa maruz kalmasıyla oluşan karboksil asidin bir sonraki adımda bazik çözelti içerisinde çözünmesi, banyo işlemi olarak tanımlanmaktadır. Banyo işlemi sırasında, maskenin açık kısmından geçen UV ışık ile bozulan kısım çözünürken maskenin kapalı alanına denk gelen kısım pul yüzeyinde kalır. Böylece maskedeki şekiller pul yüzeyine aktarılmış olur ve kapalı alanlar bir sonraki yarı iletken proses adımında (aşındırma, iyon ekme vb.) maske görevi görürler [37]. Bu aşamada maske üzerindeki

veri pul yüzeyine aktarılmış olduğu için oluşan şekillerin boyutları, profilleri ve netlikleri verinin doğru aktarılması açısından kritik niteliklerdir.

Şekillendirme sonrası ve banyo işlemi öncesi yapılan kürleme işlemi, sıcaklık değeri pul yüzeyine uygulanan fotorezistin yumuşama noktasından daha yüksek sıcaklığa ayarlanmış bir vakumlu tabla üzerinde pulu belirli bir süre tutarak gerçekleştirilir. Genellikle uygulanan sıcaklık 110 °C civarında ve pulun vakumlu tabla üzerindeki duruş süresi de 1 ve 2 dakika arasındadır [38].

Sıcaklık uygulayarak yapılan bu kürleme prosesinin amaçlarından biri şekillendirme sırasında ortaya çıkan nitrojenden ve şekillendirme öncesi yapılan kürleme işleminden dolayı oluşan mekanik stresi azaltarak rezist yapışmasını iyileştirmektir. Ayrıca silisyum pul üzerine depolanan tabakadaki katman kalınlığında ve serilen fotorezist kalınlığında oluşan dağılım farklılıkları, fotorezist derinliği boyunca ışık yoğunluğunun değişimine neden olur. Işık yoğunluğu değiştiğinde reaksiyona giren fotoaktif maddenin (DNQ) yoğunluğu da değişeceğinden dolayı banyo prosesi sırasında fotorezist derinliği boyunca çözünme hızı değişecektir. Banyo prosesi öncesi yapılan bu kürleme işlemi ise, şekillendirme sırasında oluşan karboksil asidin termal olarak aktive edilerek foto aktif maddeden difüzyonunu sağlayarak z eksenini boyunca düzgün bir dağılım sağlar. Şekil 3.7 ‘ de görüldüğü üzere kürleme yapıldığında daha düzgün bir profil elde edilmiştir. Özellikle fotorezist serilen tabanın yansıma değerleri yüksek ise rezist derinliği boyunca duran dalga etkisinden dolayı ışıklandırma dozajının etkisi değişecek ve kürlemenin etkisi Şekil 3.7’de görüldüğü üzere daha net gözlemlenecektir.



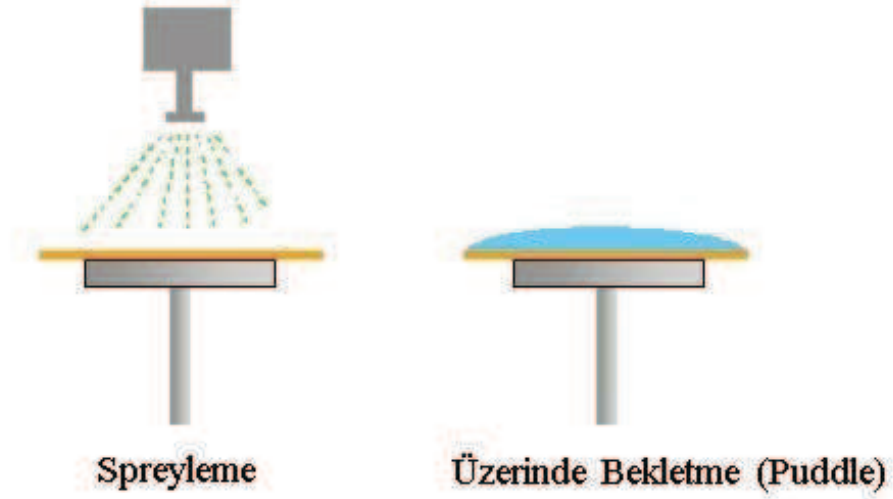
Şekil 3.7: Banyo öncesi kürleme yapılmış pul ile yapılmamış pul arasındaki fark.

Fakat şekillendirme işleminden sonra kürleme işlemine geçmeden önce belirli bir süre nitrojen gazının fotorezist tabakasından tamamen ayrılması için belirli bir süre beklemek gerekmektedir. Aksi takdirde kürleme işlemi sırasında fotorezist tabakası içerisinde kalan nitrojen gazının genleşmesi ile ince film tabakasındaki mekanik stres artarak yapışmayı olumsuz etkileyecektir. Bekleme süresi ise fotorezist kalınlığına bağlı olarak değişir. Kalınlık arttıkça bekleme süresi artacaktır.

Banyo çözeltisi olarak genellikle tetrametil amonyum hidroksit'in (TMAH) sulu çözeltisi kullanılır; çünkü yarı iletken prosesleri sonucunda oluşacak üründe performans ve güvenilirlik düşüşüne neden olacak serbest metal iyonu barındırmazlar. Konsantrasyonları normalite cinsinden belirtilir ve hem banyo çözeltisi maliyetini düşürmek hem de litografi işleminin yeterliliğini arttırmak için yapılan çalışmalar sonucunda bulunan değer 0,26 N olmuştur ve tümdevre üretiminde kullanılmak için üretilen çözeltilerin çoğunun normalite değerleri de bu değere yakındır [18].

Banyo işlemi 1970'li yıllarda ve 1980'li yılların başlarında sabit bir sıcaklıkta tutulan çözelti dolu tank içersine pulları daldırma yöntemi ile yapılmaya başlanmıştır. Daldırma yöntemi olarak anılan bu yöntem parti üretim şekline girmekle birlikte çok hassas prosesler için uygun bir yöntem değildir. Daha sonra yarı iletken üretiminde kritik boyutlar küçüldüğü için hem pul genelindeki kritik boyut dağılımını minimum seviyede tutmak hem de daha kontrollü bir üretim için pulların tek tek banyo edildiği spreyleme ve belirli bir miktar çözeltiyi pul yüzeyine akıtıp bekletme metodlarına geçilmiştir. Şekil 3.8 'de görüldüğü üzere spreyleme metodunda belirli bir basınçla çözelti pul yüzeyine püskürtülürken bu sırada pul da vakumlu tabla üzerinde belirli bir hızda döner. Bu sırada ışıklanan alanlardaki fotorezist çözelti içersinde çözünür ve bir sonraki adımda pul yüzeyine destile su akıtılarak çözeltinin pul yüzeyinden tamamen uzaklaşması sağlanır. En son adımda pul belirli bir hızda döndürülerek kuruması sağlanır. Bu yöntemde çözelti pul yüzeyine sürekli spreylenecek, çözeltinin yenilenmesi sağlanır ve bu sayede pulun tamamında ve puldan pula proses sonuçları farklılık göstermez. Fakat çok fazla TMAH çözeltisi tüketimine neden olduğu için hem çevreye verilecek zararı, hem de proses maliyetini artırır. Diğer yöntemde ise belirli miktarda çözelti pul yüzeyine akıtılır ve bu sırada pul çok düşük hızda (~ 50 devir/dk) döndürülerek çözeltinin pulun tüm yüzeyine tamamen yayılması sağlanır.

Çözelti belirlenen sürede pul yüzeyinde bekletildikten sonra spreyleme metodunda olduğu gibi pulun yıkanması ve kuruması sağlanır. Diğer metotlara göre kimyasal kullanımı oldukça az olduğu için yarı iletken üretiminde banyo prosesi için çoğunlukla tercih edilen bir metottur. Ayrıca proses performansı açısından spreyleme metodundan sonra gelmekle birlikte daldırma metoduna göre sonuçları oldukça iyidir.



Şekil 3.8: Banyo işlemi [11].

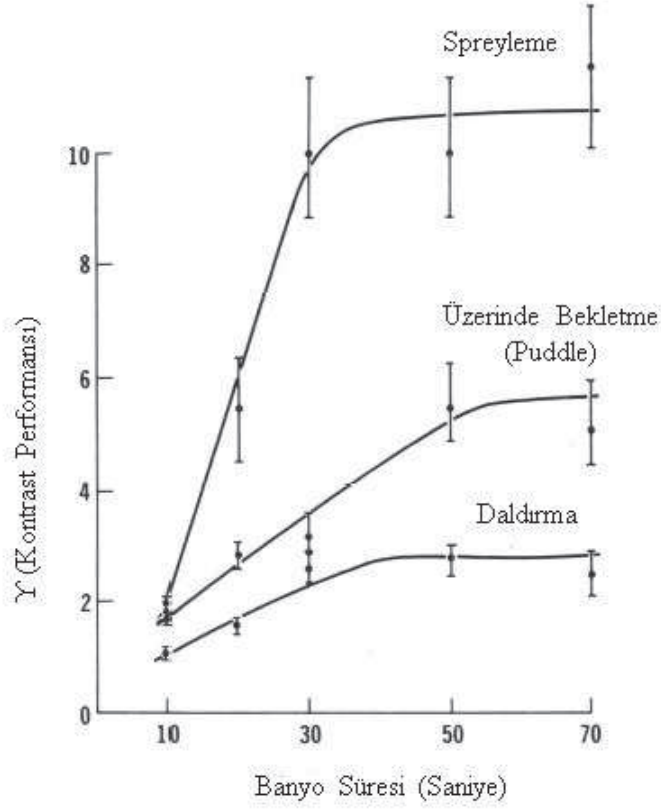
Şekil 3.9’de yukarıda bahsedilen üç metodun γ (kontrast performansı) ‘nın banyo süresine göre değişim grafiği bulunmaktadır. Bu grafikte kullanılan γ (kontrast performansı) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\gamma = [\log_{10}(E_0/E_i)]^{-1} \quad (3.1)$$

Formülde geçen E_0 değeri şekillendirme sırasında belirli bir dalga boyundaki UV ışık kaynağı ile bozulan fotorezistin pul yüzeyinden tamamen uzaklaştırıldığı ışıklandırma dozajını, E_i değeri ise ışıklanan bölgedeki rezist kalınlığının düşmesini sağlayan en düşük ışıklandırma dozajıdır. Çözünürlüğü yüksek şekillendirmelerde E_0 ve E_i değerleri birbirine yakın olacağından dolayı γ değeri de yüksek değerler alacaktır ve oluşan şekillerin profil açıları yüksek olacaktır [39].

Şekil 3.9 ‘de bulunan grafiği incelediğimizde spreyleme metodu en yüksek kontrast performansına sahip olmasına rağmen proses sırasında çok yüksek miktarda çözelti harcanmasına neden olduğu için tümdevre üretiminde tercih edilmemektedir. Üzerinde

bekletme (puddle) metodu ise kontrast performansı açısından ortalama bir değer sergilediğinden ve çözelti tüketimi açısından daha ekonomik olduğu için tercih edilen bir metoddur.



Şekil 3.9: Farklı banyo proseslerindeki kontrast performansı [12].

Şekil 3.9'deki grafik değerlerini elde etmek için yapılan deneylerde; düz silikon pul üzerine 1,8 mikron kalınlığında Shipley Microposit 1400-31 adlı rezist serilmiş ve ışıklandırma için g-line adımlayıcı kullanılmıştır. Üzerinde bekletme (puddle) yöntemi için pul yüzeyini tamamen kaplayacak şekilde çözelti akıtıldıktan sonra proses süresi olarak çözeltinin pul yüzeyinde durma süresi alınmıştır. Spreyleme metodunda ise 3 psi basınçtaki çözelti, pul 500 dk/devir hızda dönerken pul yüzeyine spreyleneştir. Daldırma metodu ise sıcaklığı kontrol edilen bir banyo içinde 22,5 C°'de gerçekleştirilmiştir.

Banyo prosesi bir çözünme prosesi olup; rezist tabakasının aşınması sadece fotorezist ile çözeltinin birbirine temas ettiği yüzeylerde gerçekleştirilir. Çözünme hızının analitik ifadesi banyo prosesinin kinetik modeli çıkartılarak oluşturulabilir.

Çözünmeyi etkileyecek faktörler sıcaklık ve fotorezist ile çözücünün temas ettiği yüzeyde fotorezist içeriğinde bulunan fotoaktif maddenin konsantrasyonudur. Çünkü çözünmeyi sağlayan mekanizma fotoaktif maddenin ışıklandırma sırasında karboksil aside dönüşerek bazik çözelti içersinde çözünür duruma gelmesidir. Bu sayede fotorezist tabakasının derinliği boyunca değişen fotoaktif maddenin yoğunluğuna bağlı olarak değişen çözünme hızı modellenenebilir. Aynı zamanda banyo prosesinin süresine bağlı olarak pul yüzeyinde kalan fotorezist kalınlığı da deneysel ve teorik olarak hesaplanmış ve iki sonucun birbiri ile benzerliği kinetik modelin doğruluğunu göstermiştir. Fakat her fotorezist ve çözücünün kimyasal yapısı farklı olduğu için kullanılan fotorezist ve çözücüye göre deneysel çalışma ve teorik hesaplama yapılmalıdır [40] [41].

Banyo prosesinin yarı iletken üretiminde en çok tercih edilen yöntemi olan çözeltinin pul yüzeyinde belirli bir süre bekletilmesi, YITAL laboratuvarında da kullanılmaktadır. Bu nedenle bu yöntemin proses parametreleri ve de sonuç değişkenleri değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.6: Şekillendirme sonrası kürlleme ve banyo prosesi için belirlenen proses parametreleri ve sonuç değişkenleri.

	Proses Parametreleri	Sonuç Değişkenler
Şekillendirme sonrası kürlleme	*Kürlleme Sıcaklığı *Kürlleme süresi	*Oluşan şekillerin profilleri
Banyo prosesi	*Çözelti Konsantrasyonu *Çözelti Sıcaklığı *Banyo Süresi	*Işıklanmış ve ışıklanmamış alan arasındaki kontrast farkı *Pul genelinde boyut dağılımı

3.6 Sertleştirme

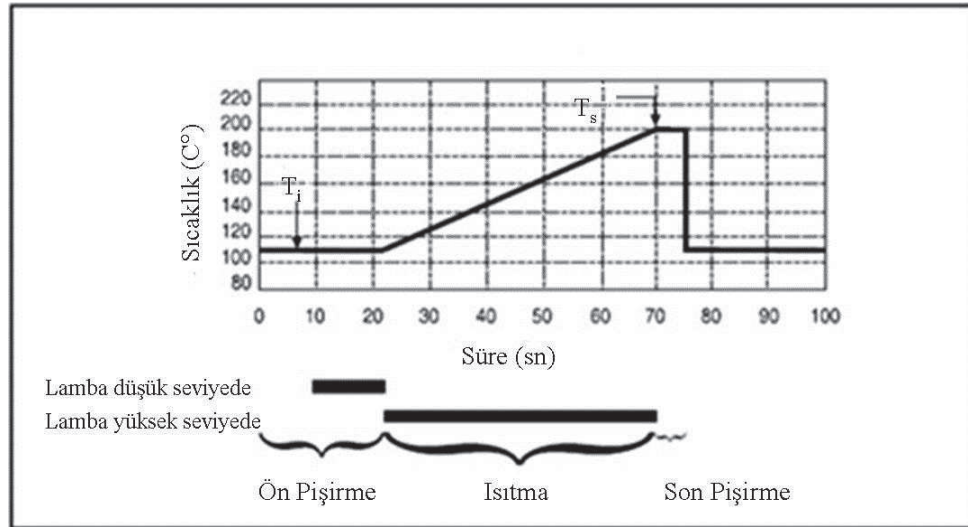
Fotolitografi işleminin son adımı sertleştirme işlemidir, bu sayede fotorezist kimyasalının bir sonraki yarı iletken üretim adımında (aşındırma, iyon ekme vb) uygulanan ağır termal proses şartlarına karşı direnci artar. Böylece termal proseslerin negatif etkileri olan şekillendirme sonrası kritik boyutun büyümesi ya da küçülmesi ve profilin bozulması gibi etkiler ortadan kalkar. Önceleri bu proses sadece vakum yardımı ile sıcak metal plaka ($\sim 110^{\circ}\text{C}$) üzerinde diğer kütleme işlemleri gibi yapılırken, 1985’de J.C. Matthews fotorezistin UV enerji ve ısı yardımı ile sertleştirilebileceğini ortaya koymuştur [42]. Bu sayede hem daha yüksek sıcaklıklara çıkılarak hem de UV enerjinin yardımı ile fotorezist polimerinin çapraz bağlarının artması sağlanmıştır. Ayrıca tek kat ve üst üste serilmiş fotorezistin bu şekilde kürlenmesi ile ilgili çalışmalarına devam ederek bir sonraki üretim adımı olan aşındırma prosesi üzerindeki etkilerini göstermiştir [43].

Fotoaktif madde, ortamdaki nem sayesinde UV ışık kaynağı altında reaksiyona girerek karboksil asit oluşumunu sağlar. Ortamda nem olmadığı takdirde ise rezist kaplı yüzeyin UV ışığa maruz kalması foto aktif madde ile novolak reçine arasında çapraz bağ oluşur ve sertleştirme işlemi gerçekleştirilir [44].

UV sertleştirme süreci, Şekil 3.10’de görüldüğü üzere Ön Pişirme (Pre-Bake), Isıtma (Ramp Up) ve Son Pişirme (Post-Bake) olmak üzere üç evreden oluşmaktadır. Fotorezist yüksek güçte UV ışığına ve polimerin camsı geçiş sıcaklığından (T_g) daha yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ön pişirme sırasında fotorezistin kararlılığını sağlayacak çapraz bağları oluşturur. Pul yüzeyi bu aşamada belirli bir süre, düşük sıcaklığa ($\sim 110^{\circ}\text{C}$) ve düşük seviyede UV enerjiye maruz kalır. Literatür araştırılarak ilk sıcaklığın, fotorezist üreticilerinin metal tabla üzerinde yapılan kütleme prosesi için önerdiği sıcaklıkla aynı değerde olduğu ve sürenin de 10 saniye olarak ayarlandığı tespit edilmiştir [45] [46]. Bu nedenle deneyler sırasında kullanılan fotoreziste uygun olarak ilk sıcaklık 110°C ve düşük seviyede UV enerjisine maruz bırakılan süre de 10 saniye olarak sabit alınmıştır.

Isıtma (Ramp Up) aşamasında, sıcaklık ilk sıcaklık seviyesinden son sıcaklık seviyesine belirlenen hız ($^{\circ}\text{C/s}$) ile çıkmakta ve aynı süre içinde yüksek seviyede UV enerjisi uygulanmaktadır. Bu aşamada optimize edilecek parametreler son sıcaklık ve hızdır. UV enerjisine maruz kaldığı süre, ilk ve son sıcaklık ile hızın bir fonksiyonu olduğu için dolaylı bir parametredir. Isıtmanın ardından Son Pişirme (Post-Bake) evresinde fotorezist UV ışığın gücü kesilerek, sadece yüksek sıcaklığa belirlen süre boyunca maruz bırakılır. Son aşamada optimize edilecek parametre ise süredir.

Prosesin yeterliliği ise litografi işleminden sonraki adım olan kuru aşındırma prosesi sırasında maske görevi gören fotorezist tabakasının aşınma direnci (kalınlık değişimi) ile ölçülebilir. Sertleştirme işleminin sonucunda ölçülen fotorezist kalınlığının aşınma prosesi sonrasında değişiminin minimum seviyede olması fotorezistin deforme olmadığını ve şekillerin profil ve kritik boyutlarında değişim olmadığını gösterir. Ayrıca şekillendirme sonrası ile sertleştirme işlemi sonrası yapılan boyut ölçümleri arasındaki farkın minimum seviyede tutularak sertleştirme işlemi sırasında şekillerin profilinin korunması gerekmektedir.



Şekil 3.10: UV sertleştirme süreci.

Çizelge 3.7: Sertleştirme prosesinin parametreleri ve sonuç değişkenleri.

Proses Parametreleri	Sonuç Değişkenler
* Son sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	* Aşınma direnci
* Son sıcaklığa çıkma hızı (eğim, $^{\circ}\text{C/s}$)	* Şekillendirme sonrası ile sertleştirme işlemi sonrası kritik boyut farkı
* Son pişirme süresi	

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerin tamamı Tübitak Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi, Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında (YITAL) yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı bölümde kaplama için kullanılan polimer (rezist) beyaz ışıktaki özelliğini yitirdiği için bu bölüm sarı ışık kullanılarak aydınlatılmaktadır; bu nedenle de “Sarı Oda” olarak anılmaktadır.

4.1 Kullanılan Materyal ve Kimyasallar

- Tek kristal yönelimli, dört inç (100 mm) çapında düz silisyum pullar .
- Pozitif fotorezistler (OİR 38A9 ve OİR 620-09), Fuji firmasından sağlanmıştır
- Yansıma önleyici kaplamalar (I-CON 16 (1600 Å) ve I-CON 7 (~700 Å)) Brewer Science firmasından temin edilmiştir.
- Banyo proses çözeltisi (OPD 262 (2,38% TMAH)) Fujifilm firmasından temin edilmiştir.
- Tüm şekillendirme işlemleri sırasında kullanılan kuvars maske (pozitif maske): Dışarıdan alınan, krom ve rezist kaplı kuvars maske camı üzerine veri Sarı Oda içerisindeki maske bölümünde aktarılmaktadır.

4.2 Proses ve Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar

- Fotorezist ve yansıma önleyici kaplama için Brewer Science firmasına ait CEE 200X kodlu cihaz kullanılmıştır. Fotorezist bir kartuşa doldurularak otomatik olarak pul yüzeyine akıtılırken, yansıma önleyici kaplama pipet yardımı ile işlemi yapan kişi tarafından manuel olarak pul yüzeyine akıtılır. Banyo prosesi için aynı firmaya ait CEE 200XD kodlu cihaz kullanılmıştır.

- Şekillendirme işlemleri için Canon firmasına ait FPA -3000 i4 model adımlayıcı kullanılmıştır. Makinanın özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Canon i-line hizalama ve ışıklandırma cihazı.

Çizelge 4.1: Canon şekillendirme cihazının özellikleri.

İşıklandırma Dalga Boyu	365 nm (i-line)
Sayısal Açıklık (NA)	0,63
Büyütme Oranı (Puldaki boyut / Maskedeki Boyut)	1/5 x
Çözünürlük	0,35 μ m
İşıklandırma Lambası	2.0 kW yüksek basınçlı civa lambası
Hizalama için kullanılan ışık kaynağı	HeNe Laser (633 nm) Geniş bant aralığına sahip Halojen lamba
Hizalama doğruluğu	$\leq 0,06 \mu$ m (ortalama + 3 σ)

- Sertleştirme işlemi için Fusion Systems’e ait 200PCU model cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz sayesinde hem UV enerji hem de ısı kullanılarak sertleştirme işlemi yapılmıştır.

- İnce film kalınlığı ve yansımaya ölçümlemlerini yapmak için Nanaometrics firmasına ait 210 NanoSpec model film kalınlığı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yansımaya ölçümleri 365 nm dalga boyunda yapılmıştır.
- Şekillendirme sonrası oluşan şekillerin profil görüntülerini almak için, Şekil 4.2 FIB (Focused Ion Beam) cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.2: FIB cihazı.

- Şekillendirme sonrası boyut ölçümleri için KLA firmasına ait UV ve DUV ışık kaynağı ile görüntü alabilen ve alınan görüntü üzerinden boyut ölçümü yapabilen Vistec INS3000 marka mikroskop kullanılmıştır.

4.3 Deney Örneklerinin Hazırlanması

- Katman Büyütme: Yansımaya ölçümleri uygulanacak ve şekillendirme sonrasında boyut ve profillerine bakılacak olan örneklerle, tüm devre üretimi sırasında depolanacak olan katmanlar uygulanmıştır. Yansımaya değerleri, pul yüzeyine depolanmış olan katman ve kalınlığına göre değişebilmektedir. Yansımaya değerlerinin değişimi de şekillerin boyut ve profillerini etkilemektedir. Alçak basınçlarda kimyasal buhar biriktirme yöntemi (LPCVD) ile depolanan atmanlar sırası ile 500-600 Å oksit, 1000 Å poli-silisyum ve 1000 Å oksittir.
- Fotorezist Kaplama: Kaplama için Brewer Science firmasına ait CEE 200 X model bir cihaz kullanılmıştır. Pul dinamik konumdayken fotorezist pul yüzeyine püskürtülmüştür. Kaplama kalınlığını ve dağılımındaki değişikliği minimum seviyeye indirmek için proses parametreler (kimyasal akıtma süresi, ilk döndürme hızı,

hızlanma ivmesi ve son döndürme hızı) temel alınarak ve iki farklı fotorezist kullanılarak 16 adet pul hazırlanmıştır.

- Fotorezist Kürleme Prosesi: Kürleme işlemi pulların 90 °C sıcaklığa ayarlanmış vakumlu bir tabla üzerinde 60 saniye süreyle tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir.
- Yansıma Önleyici Kaplama ve Kürleme Prosesi: Yansıma önleyici kaplama işlemi fotorezist kaplama için kullanılan yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yansıma önleyici vakumlu tabla üzerinde belirli bir hızla döndürülen pulların yüzeyine yüklenmiştir . Fakat YITAL laboratuvarlarında fotorezist bir kartuşa doldurularak sabit bir basınçta, reçetede belirlenen süre ile pul yüzeyinin tam ortasına püskürtülürken, yansıma önleyici kaplama kullanıcı tarafından pipet içeresine belirlenen miktarda alındıktan sonra serme işlemi sırasında manuel olarak pipetten pul yüzeyine püskürtülür. Bu yüzden fotorezist serme işlemine göre operatör bağımlılığı daha yüksektir. Kürleme prosesi, pulları 205 °C sıcaklığa ayarlanmış vakumlu bir tabla üzerinde 60 saniye tutularak gerçekleştirilmiştir .
- Şekillendirme: Şekillendirme işlemleri Canon firmasına ait FPA-3000 i4 model adımlayıcıda gerçekleştirilmiştir. Pul yüzeyindeki yansıma değerine göre ışıklandırma sırasında gerekli olan ışıklandırma şiddeti değişmektedir. Bu nedenle farklı yansıma önleyici kaplamalar kullanıldığında, numunelerin ışıklandırma dozajları da farklı olmuştur. Çizelge 4.2’de şekillendirme parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2: Şekillendirme parametreleri.

Yansıma Önleyici Kaplama	Işıklandırma Dozajı (J/m ²)	Fokus Değeri (μm)
I-Con 16	2200	0,3
I-Con 7	2600	0,3

- Şekillendirme Sonrası Kürleme Prosesi: Bu aşamadaki kürleme de Fotorezist serme işleminden sonra yapılan kürleme benzer bir şekilde yapılmıştır. Pullar, belirli bir sıcaklığa ayarlanmış vakumlu bir tabla üzerinde belirli bir süre tutarak kürlenmiştir. İşlem farklı sıcaklıklarda (95 °C, 110 °C, 125 °C) gerçekleştirilecek örnekler hazırlanmıştır.

- Banyo Prosesi: Brewer Science firmasına ait CEE 200 XD model cihaz kullanılmıştır. Çözelti 3 saniyelik periyodlar ile iki kez pul yüzeyine akıtılmış ve bu

sırada pul 55 devir/dk. hız ile döndürülerek çözeltinin pulun tüm yüzeyine yayılması sağlanmıştır. Çözeltinin pul yüzeyindeki bekleme süresi 30 ile 80 saniye arasında değiştirilerek 6 farklı pul hazırlanmıştır. Banyo işleminin bekleme adımından sonra çözeltinin pul yüzeyinden tamamen uzaklaştırılması için pul dinamik konumdayken 60 saniye süreyle deiyonize su ile yıkanmış ve ardından 5000 devir/dk hızla döndürülerek kuruması sağlanmıştır.

- Sertleştirme: Kütleme prosesi için Fusion Systems'e ait 200PCU kodlu cihaz kullanılmıştır. Cihazın lamba sistemi yüksek güçte UV kaynağına ve çok-yüzlü optik yansıtıcıya sahip olduğundan, pul yüzeyinde UV ışığının düzenli olarak yayılması sağlanmıştır. Işık kaynağı olarak birden fazla çeşit vardır. H-mod olarak tanımlanan kaynak, 250 nm dalga boyu altındaki UV radyasyonu engellediği ve en yoğun enerjiye 280 ve 330 nm arasında sahip olduğu için tercih edilmiştir. Çünkü kullanılan pozitif i-line fotorezist bu aralıktaki UV ışımda reaksiyona girmektedir. Ön pişirme ve ısıtma sırasında uygulanan düşük ve yüksek seviyedeki UV enerjinin yoğunluğu ise Fusions System's firmasının daha önce yaptığı çalışmaları baz alarak tarafımıza önerdiği değerlere ayarlanmıştır. Çizelge 4.3'de H-mod lambanın düşük ve yüksek UV enerji seviyesine ait güç ve yayılım değerleri verilmiştir. Tüm deneysel çalışmalar sırasında bu değerler; ön pişirme aşamasına ait sıcaklık ve süre değerleri gibi sabit alınmıştır.

Çizelge 4.3: Çalışmalarda kullanılan UV enerji yoğunluk değerleri.

Seviye	Yayılım (mW / cm ²)	Güç (Watt)
Düşük Seviye	105	2200
Yüksek Seviye	275	3800

- Kuru Aşındırma: Aşınma direnci ölçülen pullar STS aşındırma kümesi ICP'de HBr ve Cl gazları kullanılarak kuru aşındırma işlemine tabi tutulmuştur.

4.4 Kullanılan Deneysel Tasarım Metodu

Deneysel çalışmalarda üretim prosesinin her adımını etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin tek tek etkilerini deneysel olarak incelemek hem

kullanılan kimyasal maddeler ve cihazlardan dolayı pahalıya mal olmakta hem de çok uzun süreler gerektirmektedir. Bu durum göz önüne alınarak prosesi en fazla etkileyen parametreleri belirlemek ve parametrik deneysel çalışmaların sayısı azaltmak için deneysel çalışmalara başlamadan önce deney tasarımı yapılmıştır. Bunun için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi çizelgesi kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak mümkündür. Yarı iletken üretimi hem maliyetli hem de üretimi etkileyen çok fazla parametre olduğu için deneysel tasarım metodlarının, özellikle de Taguchi yönteminin sıklıkla kullanıldığı bir sektördür. Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün en az sayıda test edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlamasıdır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre, 2 veya 3 kademeli olarak belirlenmektedir. Ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir. Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{16} , 3 seviyeliler için L_9 ve L_{27} dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır [47].

Deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilirken hangi parametrelerin sonuç değişkenler üzerinde etkili olduğu Varyans (ANOVA) analizi ile değerlendirilmiş ve parametrelerin farklı seviyeleri arasındaki optimum kombinasyon, Taguchi yöntemi ile tespit edilmiştir. Kalite karakteristiği olarak Taguchi deneysel tasarım metodunun ‘en-küçük-en-iyi’ kalite karakteristiği kullanılmıştır. En-küçük-en-iyi karakteristiğinin kayıp fonksiyonu aşağıdaki gibidir [47].

$$L_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_i^2 \quad (4.1)$$

$$\eta_j = -10 \log L_j \quad (4.2)$$

n = test sayısı

y_i = ilgili deney numarasındaki kalite karakteristiği değeri

L_j = toplam kayıp fonksiyonu

η_j = ilgili deneydeki kayıp fonksiyon değeri (S/N oranı)

Varyans analizi ve taguchi yönteminin uygulanması için Minitab 14 programı kullanılmıştır. Son olarak da belirlenen optimum parametre seviyelerinde doğrulama testi yapılarak deneysel sonuç ile hesaplanan sonuç karşılaştırılmıştır.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

5.1 Fotorezist Kaplama ve Kürlenmesi

Pul yüzeyine yansıma önleyici kaplama uygulandığında fotorezist serme ve de fotorezistin pişirme işleminde kullanılan parametrelerde hiçbir değişiklik olmamaktadır. Bu nedenle fotorezist kalınlığının ve kalınlık değişim oranının optimizasyonu öncelikle yapılmıştır.

Fotorezist sıcaklığı ve kaplama yapılan cihazın haznesindeki nem oranı laboratuvar şartları ile eşit olarak kabul edilmiştir. Laboratuvar sıcaklığı ve nem oranı bütün prosesleri etkilediğinden dolayı bu değerleri belirli aralıklarda tutmak için laboratuvar genelinde gerekli alt yapı mevcuttur.

Öncelikle prosesi etkileyen faktörlerin seviyeleri Çizelge 5.1 ‘deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 5.1: Faktörler ve faktör Seviyeleri.

Sembol	Proses Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2
A	Fotorezist Akıtma Süresi (sn)	3	5
B	İlk Döndürme Hızı (devir/dk)	300	700
C	Hızlanma İvmesi ((devir/dk)/sn)	1500	2500
D	Son Döndürme Hızı (devir/dk)	3000	5000

Kaplama prosesi üzerinde etkisi olduğu düşünülen toplam 4 faktör vardır ve her faktör için iki seviye belirlenmiştir. 2 seviyeli 4 faktör olması durumunda kullanılabilecek standart Taguchi ortogonal dizileri L_8 , L_{12} , L_{16} ve L_{32} ‘dir. İki farklı fotorezist ile deneyler tekrarlanacağı için, bunlardan en düşük deney sayısına sahip olan L_8 ortogonal dizisi seçilmiştir ve Çizelge 5.2’de bu diziye ait deneysel tasarım planı bulunmaktadır. Prosesin bu adımında amaç fotorezist kalınlığını oldukça düşürmektir. Çünkü fotorezist kalınlığı arttığında şekli dibe kadar açmak için gerekli olan ışıklandırma enerjisi artmakta ve şekillerin ağız kısmı beklenen boyutun üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle de şekillerin profil açıları 90° ‘den uzaklaşarak profilde bozulmalar görülmektedir. Fotorezist kalınlığını düşürürken bir sonraki adım olan

aşındırma prosesinin şartlarını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir, çünkü kapalı alanları koruyan fotorezist tabakasının kalınlığı düştükçe aşındırma proses şartlarına dayanıklılığı etkilenecek ve kapalı alanların zarar görme ihtimali ortaya çıkacaktır. Bu nedenle hem fotorezist hem de aşındırma prosesinin şartları göz önünde bulundurularak optimum kalınlığın 0,5 – 0,6 mikron (5000 - 6000 Å) arasında olacağı belirlenmiştir.

Çizelge 5.2: L₈ ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.

Deney No	Proses Parametre Seviyeleri			
	Fotorezist Akıtma Süresi (A)	İlk Döndürme Hızı (B)	Hızlanma İvmesi (C)	Son Döndürme Hızı(D)
1	3	300	1500	3000
2	3	300	2500	5000
3	3	700	1500	5000
4	3	700	2500	3000
5	5	300	1500	5000
6	5	300	2500	3000
7	5	700	1500	3000
8	5	700	2500	5000

İki farklı fotorezist kullanılarak 8 adet deney tekrarlanmıştır. OiR 38A9 kodlu fotorezist ile en düşük 7500 Å kalınlığında kaplama elde edildiği için deneylere OiR 620-09 kodlu fotorezist ile devam edilmiştir. Ayrıca literatürde OiR 620-09 kodlu fotorezistin daha hassas işler için uygun olduğu belirtilmiştir. Çizelge 5.3 ‘de 8 adet deney sonucu verilmiştir. Kalınlık olarak verilen değer 10 adet ölçümün ortalaması, kalınlık değişim oranı ise bu 10 adet ölçümün maksimum ile minimum arasındaki farkın ortalamaya bölünmüş halidir.

Çizelge 5.3: Kalınlık ve kalınlık değişim oranı Sonuçları.

Deney No	Kalınlık (Angstrom)	Kalınlık Değişim Oranı %
1	8120	0,62
2	5764	1,08
3	5652	0,72
4	7488	0,25
5	5686	0,67
6	7241	0,18
7	7480	0,16
8	5692	0,61

Kalite karakteristiği olarak Taguchi deneysel tasarım metodunun ‘en-küçük-en-iyi’ kalite karakteristiği kullanılmıştır.

Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5 ‘de Minitab14 programı kullanılarak hesaplanmış sinyal/gürültü (S/N) oranları bulunmaktadır. Optimum seviye olarak S/N oranı en yüksek değeri veren seviye seçilmektedir. Ayrıca seviyeler arasındaki S/N oranları farklarından, faktörlerin sonuca etki oranlarını karşılaştırabiliriz.

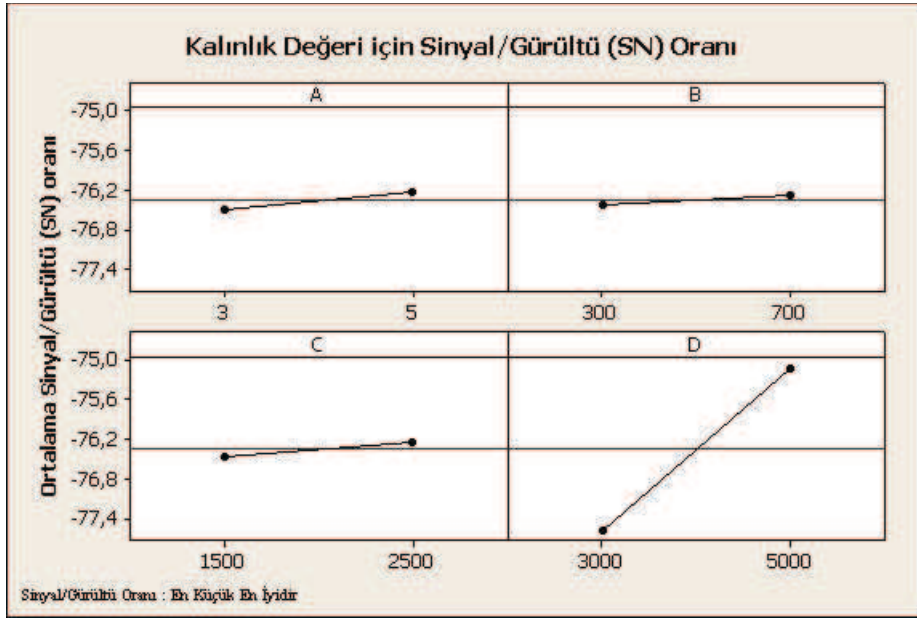
Çizelge 5.4: Kalınlığın sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.

Seviye	A	B	C	D
1	-76,48	-76,42	-76,45	-77,59
2	-76,22	-76,28	-76,25	-75,11
Fark	0,27	0,15	0,2	2,47
Sıralama	2	4	3	1

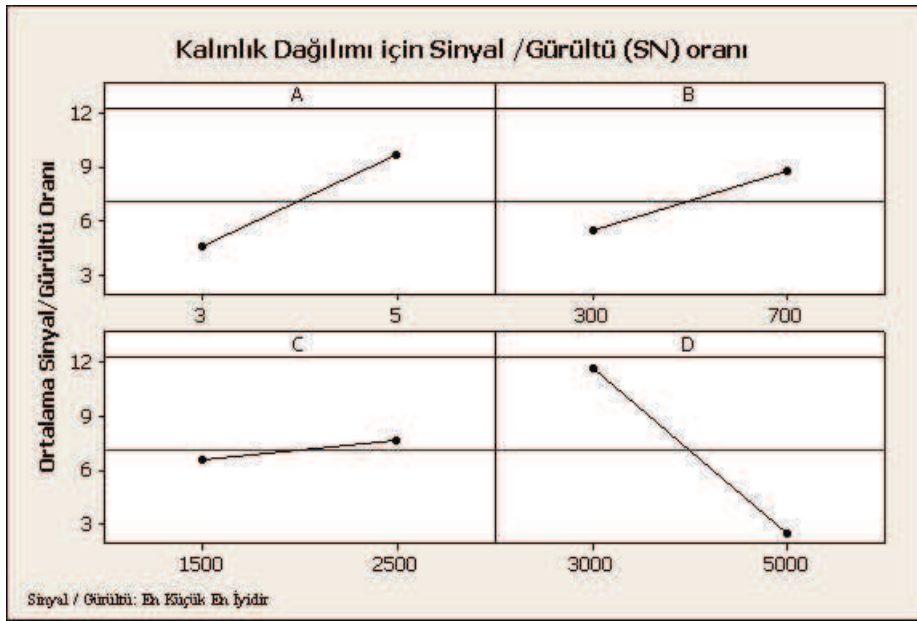
Çizelge 5.5: Kalınlık değişiminin sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.

Seviye	A	B	C	D
1	4,595	5,464	6,600	11,751
2	9,646	8,776	7,640	2,489
Fark	5,051	3,312	1,040	9,262
Sıralama	2	3	4	1

Fotorezist kalınlığı ve pul yüzeyindeki fotorezist kalınlık dağılımının sonuç değişkenler olduğu durumlarda, her bir faktörün S/N oranına olan etkisi ise sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.1: Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.



Şekil 5.2: Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, sonuç değişkeninin rezist kalınlığı olduğu durumda en düşük kalınlık değerinin elde edildiği optimum proses koşulları şu şekilde olmaktadır: fotorezist akitma süresi (A) = 5 s (2.seviye), ilk döndürme hızı parametresi (B) = 700 devir/dk (2.seviye), hızlanma ivmesi (C) = (2500 devir/dk)/s (2.seviye), döndürme hızı (D) = 5000 devir/dk (2. seviye)

Sonuç değişkeni olarak kalınlık değişim oranı alındığında ise Şekil 5.2’de görüldüğü üzere en homojen kaplama $A_2B_2C_2D_1$ noktasında elde edilmiştir. Rezist kalınlığını

ve rezist kalınlık dağılımındaki düzensizliği en düşük seviyede tutmak için parametrelerin optimum seviyeleri karşılaştırıldığında D parametresinin seviyesi farklılık göstermektedir. Bu nedenle öncelikle Çizelge 5.4 ve 5.5 ‘deki her seviye için hesaplanan ortalama sinyal/gürültü (S/N) oranları toplanarak toplam değerin nasıl davrandığına bakılmıştır. Çizelge 5.6’de görüldüğü üzere A, B ve C parametrelerinin ikinci seviyeleri, D parametresinin ise 1. seviyesi toplam S/N oranında optimum sonucu veriyor. Fakat öncelikle A₂B₂C₂D₁ noktasında elde edilecek fotorezist kalınlığı değerlendirilmelidir. Çünkü kalınlık dağılımlarına bakıldığında deney sonuçlarının çoğu kabul edilebilir seviyededir. (< 0,01 micron).

Çizelge 5.6: Faktör seviyeleri için ortalama sinyal/gürültü (S/N) oranları.

Seviye	A	B	C	D
1	-71,889645	-70,960245	-69,8516	-65,837
2	-66,573025	-67,502425	-68,611	-72,6257
Delta	5,31662	3,45782	1,240595	6,788705
Rank	2	3	4	1

A₂B₂C₂D₁ noktasında deney yapılmadığı için elde edilecek fotorezist kalınlığını hesaplamak için öncelikle Minitab 14 programı kullanılarak o noktadaki S/N oranı bulunmuştur. Daha sonra aşağıdaki 5.1 nolu formül kullanılarak kalınlık değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan kalınlık değeri 7312, 92 Angstrom ‘dur.

$$S/N = -10 \log y^2 \quad (5.1)$$

Hesaplanan kalınlık değeri (y = 7312,92 Angstrom) bulunan optimum noktadaki (A₂B₂C₂D₁) kalınlık değerinden oldukça yüksektir. Sonuç olarak toplam S/N oranına bakıldığında, fotorezist kalınlığını düşürmek olan öncelikli hedeften önemli ölçüde bir sapma görülmektedir. Bu yüzden parametrelerin sonuç değişkenler üzerindeki etki değerleri karşılaştırılarak optimum seviyelerini elde etmek daha doğru olacaktır.

5.1.1 Varyans analizi (ANOVA)

Ortalama kalınlık değerleri kullanılarak minitab 14 programı ile %95 güvenilirlik aralığında yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 5.7’de görülmektedir.

P değerleri karşılaştırıldığında fotorezist kalınlığı üzerindeki en etkili parametrenin son döndürme hızı olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgi literatür ile de örtüşmektedir. Diğer parametrelerin sonuç değişken üzerinde etkili olmadıkları görülmüştür. Bu nedenle fotorezist kalınlığını minimum seviyede tutmak için mutlaka son döndürme hızının 5000 devir/dk olarak ayarlanması gerekmektedir.

Çizelge 5.7: Kalınlık değerleri ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.

	Serbestlik Derecesi) (df)	Ortalama Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P
(A)	1	106953	106953	1,44	0,316
(B)	1	31125	31125	0,42	0,563
(C)	1	70876	70876	0,95	0,401
(D)	1	7097028	7097028	95,62	0,002
Hata	3	222661	74220		
Toplam	7	7528644			

$$S = 272,434 \quad R\text{-Sq} = \% 97,04 \quad R\text{-Sq (adj)} = \% 93,10$$

Kalınlık değişim sonuçları kullanılarak yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Sonuç değişken üzerinde en etkili parametre son döndürme hızıdır ve daha sonra da rezist akıtma süresi ile ilk döndürme hızı gelmektedir. Son döndürme hızının seviyesine, kalınlık değerine olan etkisine bakılarak karar verilmiştir. Rezist akıtma süresinin ise her iki sonuç değişken için hesaplanan P değeri 0,05’in üzerindedir. Kullanılan kimyasalın maliyeti ve doğaya verebileceği zarar düşünülerek kullanımının minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Saniyede 3 ml fotorezist akıtıldığı için 3 saniyeden 5 saniyeye çıkıldığında 6 ml daha fazla rezist kullanımına neden olacaktır. Bu nedenle proses optimizasyonu yapılırken bu değer 3 saniye olarak alınmıştır. B ve C değerleri ise her iki sonuç değişken üzerinde diğer parametreler kadar etkili olmamakla birlikte optimum seviyeleri her iki sonuç değişken için değerlendirildiğinde değişmediği için 2. Seviye olarak alınabilir.

Çizelge 5.8: Kalınlık değişim oranları ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.

	Serbestlik Derecesi) (df)	Ortalama Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P
(A)	1	0,13781	0,13781	7,81	0,068
(B)	1	0,08201	0,08201	4,65	0,120
(C)	1	0,00031	0,00031	0,02	0,903
(D)	1	0,43711	0,43711	24,77	0,016
Hata	3	0,05294	0,05294		
Toplam	7	0,71019			

$$S = 0,132838 \quad R-Sq = \% 92,55 \quad R-Sq (adj) = \% 82,6$$

5.1.2 Doğrulama testi

Yapılan deneysel tasarım ve varyans analizi sonuçları her iki sonuç değişken için de değerlendirilerek tespit edilen proses seviyelerine sahip $A_1B_2C_2D_2$ noktasında, doğrulama testi yapılmıştır. Deneysel tasarımın son adımı hesaplanan tahmini değer ile deneysel sonucun karşılaştırılmasıdır.

$$\mu = \text{genel ortalama} + A_1 \text{'in etkisi} + B_2 \text{'nin etkisi} + C_2 \text{'nin etkisi} + D_2 \text{'nin etkisi}$$

$$\begin{aligned} \mu &= -76,3516 + (-76,48 - (-76,3516)) + (-76,28 - (-76,3516)) + (-76,25 - (-76,3516)) \\ &+ (-75,11 - (-76,3516)) \\ &= -75,0653 \end{aligned}$$

5.1 nolu formül kullanılarak $y = 5665,85$ Angstrom olarak hesaplanmıştır.

Varyans analizine göre etkili olan D parametresinin etkisi tek başına değerlendirilir ise;

$$\mu = -75,11 ; y = 5695,082 \text{ Angstrom}$$

olarak hesaplanmıştır.

$A_1B_2C_2D_2$ noktasında deney yapılarak elde edilen sonuç 5850 Angstrom olarak ölçülmüştür. Hesaplanan değer ile deney sonucunda elde edilen değer birbirine yakın bulunmuştur.

- Fotorezist kalınlık dağılımı için;

$$\mu = 7,120 + (4,595 - 7,120) + (8,776 - 7,120) + (7,64 - 7,120) + (2,489 - 7,120) \\ = 2,14$$

5.1 nolu formül kullanılarak $y = \%1,28$ olarak hesaplanmıştır.

Varyans analizine göre etkisi en az olan C parametresinin etkisi değerlendirilmezse;

$$\mu = 1,62 ; y = \%1,2$$

olarak hesaplanmıştır.

A₁B₂C₂D₂ noktasında deney yapılarak elde edilen sonuç $\% 0,92$ olarak ölçülmüştür. Hesaplanan değer ile deney sonucunda elde edilen değer birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

5.1.3 Kürleme işlemi

Belirlenmesi gereken parametrelerden biri olan sıcaklığın fotoaktif maddenin bozunma sıcaklığı olan 100 °C'i geçmemesi gerekmektedir. Bunun için en yüksek çalışma sıcaklığı 90 °C olabilmektedir. Fotorezist üreticisi tarafından tavsiye edilen sıcaklık ise yine 90 °C dir. Diğer parametre olan süre ise literatür verileri ışığında 60 saniye olarak seçilmiştir. Proses koşullarının uygun olmaması durumunda bir sonraki adım olan şekillendirme prosesi sırasında ortaya çıkan N₂ gazından dolayı kabarcık oluşumu gözlemlenir. Sürenin gereğinden uzun tutulması halinde banyo aşaması sırasında ışıqlanan rezistin çözünmesi güçleşebilir. Şekillendirme sonrası kabarcık oluşumu ve alınan FIB görüntülerinde ışıqlanan bölümün açılmama sorunu gözlemlenmemiştir. Bu nedenle kürleme işlemi 60 saniye olarak yapılmaktadır.

5.2 Yansıma Önleyici Kaplama ve Kürlenmesi

Yansıma önleyici kaplamanın seçimi ve pul yüzeyindeki yansımayı minimum seviyeye indirmek bu çalışmanın en önemli adımlarından biridir. Yansıma önleyici kaplamayı değerlendirirken kalınlığı da önemli bir parametredir. Kaplama yapılan yüzeyin durumuna göre ince ya da kalın kaplama yapmak gerekebilir. Bir sonraki adımda yüzeyden kuru aşındırma prosesi ile uzaklaştırılacağı için, ince yapıldığı takdirde alt

katmana verilecek olan zarar azalacaktır. Fakat şekillendirme açısından her iki durum da değerlendirilmelidir. Bu nedenle biri kalın (1600 A°) ve diğeri daha ince (700 A°) olmak üzere iki çeşit yansıma önleyici kaplama seçilmiştir.

Öncelikle yansıma önleyici kaplamanın yansıma değerini ve bu değer in pul üzerindeki dağılımını minimum seviyeye indirmek için, Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak faktörlerin optimum seviyeleri belirlenmiş ve hangi parametrelerin prosesi etkilediğini tespit etmek için de Varyans Analizi (ANOVA) yapılmıştır.

5.2.1 Yansıma ve yansıma dağılım değerlerinin optimizasyonu

Yansıma önleyici kaplama için proses parametreleri ve belirlenen seviyeleri Çizelge 5.9' de verilmiştir.

Çizelge 5.9: Yansımayı önleyici kaplamanın yapılmasını etkileyen faktörler ve seviyeleri.

Sembol	Proses Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kimyasal Akıtma Miktarı (ml)	1,5	2	2,5
B	İlk Döndürme Hızı (devir/dk)	300	500	700
C	Son Döndürme Hızı (devir/dk)	2000	2500	3000

Üç seviyeli üç faktör olduğu için uygulanabilecek standart Taguchi ortogonal dizileri L_9 ve L_{27} dir. Hem kimyasal tüketimi hem de deney setindeki pulların yeterliliği açısından 9 adet deneyden oluşan L_9 ortogonal dizisi seçilmiştir.

Çizelge 5.10: L₉ ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.

Deney No	Proses Parametre Seviyeleri		
	Kimyasal Akıtma Miktarı (ml)	İlk Döndürme Hızı (dev/dk)	Son Döndürme Hızı (dev/dk)
1	1,5	300	2000
2	1,5	500	2500
3	1,5	700	3000
4	2,0	300	2500
5	2,0	500	3000
6	2,0	700	2000
7	2,5	300	3000
8	2,5	500	2000
9	2,5	700	2500

Çizelge 5.9 ‘ deki sonuçlar ışığında 9 adet pul hazırlanmış ve bunlar yansıma önleyici ince kaplama malzemesi (I-CON 7) kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama koşulları Çizelge 5.10’de verilmiştir. Kaplanmış pulların kütleme işlemi 205 °C ‘da ve 60 s sürelerle gerçekleştirilmiştir. Pulların yüzeyinde 10 adet noktadan yansıma değerleri (%) ölçülmüştür. Bu değerler, yansıması %100 kabul edilen sabit bir referansa göre ölçülen değerlerdir. Değişim oranı ise maksimum ile minimum değerler arasındaki farkın ortalama değere bölünmesi ile bulunmuştur. Çizelge 5.11 ‘de ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.11: Kaplanmış ve kürlenmiş pulların yansıma ve yansıma değişim oranı sonuçları.

Deney No	Yansıma (%)	Yansıma Değişim Oranı (%)
1	4	50,9
2	3	30,5
3	8	55,3
4	6	10,4
5	14	14,5
6	7	55,1
7	22	16,9
8	12	12,5
9	9	57,0

Yapılan ölçüm sonuçları Minitab14 programına girilerek “en küçük en iyidir” prensibine göre, Sinyal / Gürültü (S/N) oranları bulunmuştur.

Yapılan ölçüm sonuçları Minitab14 programına girilerek “en küçük en iyidir” prensibine göre, Sinyal / Gürültü (S/N) oranları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13’ de verilmiştir.

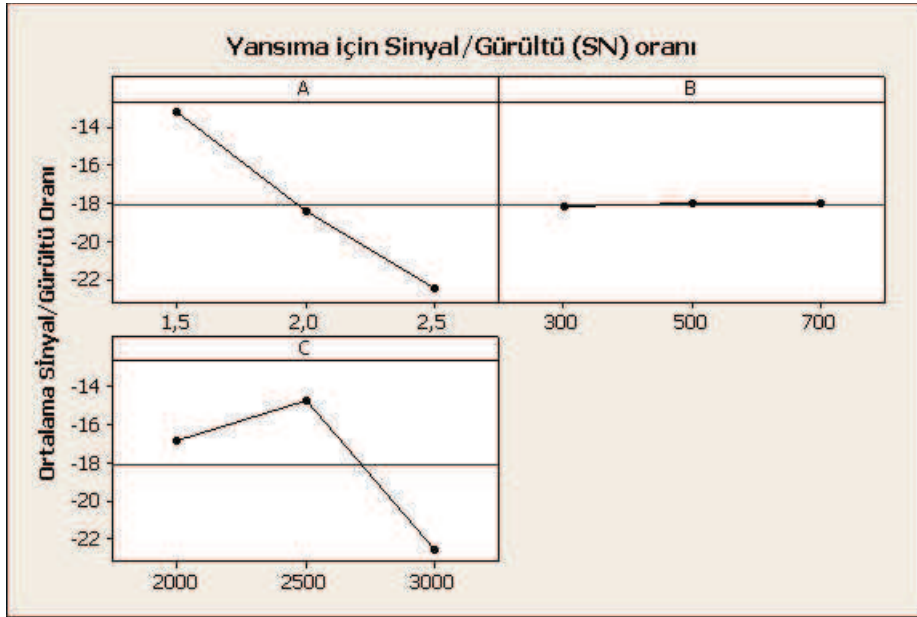
Çizelge 5.12: Yansımanın sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.

Seviye	A	B	C
1	-13,22	-18,15	-16,84
2	-18,46	-18,02	-14,73
3	-22,51	-18,02	-22,62
Fark	9,29	0,13	7,88
Sıralama	1	3	2

Çizelge 5.13: Yansıma değişiminin sonuç değişken olduğu durumda faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.

Seviye	A	B	C
1	-32,89	-26,34	-30,29
2	-26,14	-24,95	-28,38
3	-27,19	-34,93	-27,55
Fark	6,76	9,98	2,74
Sıralama	2	1	3

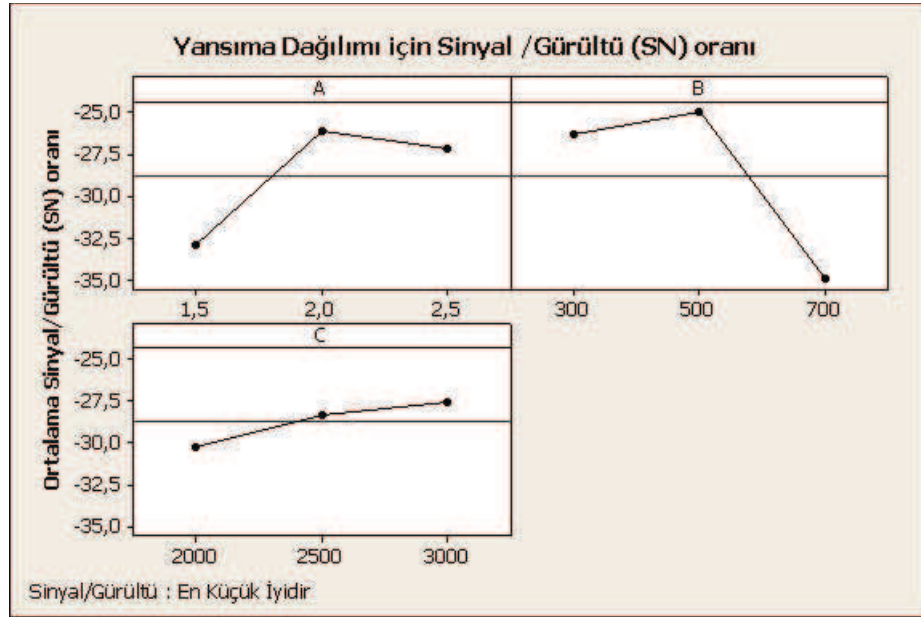
Yansıma değeri için faktörlerin S/N oranına olan etkisi Şekil 5.3’ de görülmektedir. Grafik incelendiğinde yansıma değerinin artan kimyasal miktarı (A) ile arttığı görülmektedir. Akıtılan kimyasalın pul yüzeyine yayılmasını sağlayan ilk döndürme hızı, etkisi en düşük olan parametredir. Son döndürme hızı prosesi etkileyen bir parametre olarak ortaya çıkmıştır. 2000 - 2500 devir/dk aralığında yansıma artan hız tarafından olumlu, 2500 -3000 devir/dk aralığında ise olumsuz şekilde etkilenmiştir. Bu sonuçlar literatür verileriyle uyumludur. Bölüm 3.3.’de anlatıldığı üzere, yansıma değeri kaplama tabakasının kalınlığındaki artışa paralel olarak düşmekte; fakat belirli bir kalınlık değerini geçince tekrar artma eğilimi göstermektedir. Son döndürme hızı da kalınlığı etkileyen bir parametre olduğu için yansıma değeri üzerinde bu etkiyi yaratmıştır.



Şekil 5.3: Sonuç değişken olarak yansıma değeri alındığında faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.

Şekil 5.4 'de yansıma dağılımı için proses parametrelerinin S/N oranına olan etkisi görülmektedir. Elde edilen sonuçlar yansıma dağılımını en fazla etkileyen parametrenin kimyasalın pul yüzeyini kaplamasını sağlayan ilk döndürme hızı olduğunu ortaya koymuştur. Hızdaki değişim (artış ve azalış) yansıma dağılımının homojenliğini bozduğu/düşürdüğü görülmektedir. İkinci etkili parametre ise kullanılan kimyasal miktardır. Optimum kimyasal miktarı 2 ml olarak belirlenmiştir. Bunun üzerindeki veya altındaki kimyasal miktarları yansıma dağılımındaki değişim oranını artırmaktadır. Yansıma dağılımını en az etkileyen parametre ise son döndürme hızı olmuştur.

Yansıma değeri için faktörlerin optimum seviyelerinin A için 1. seviye, B için 2. seviye ve C için de 2. seviye olduğu görülmüştür. Fakat $A_1B_2C_2$ noktasında, yansıma değişim oranı %30,5 olduğu için kabul edilebilecek bir değer değildir. Çalışmanın amacı hem yansıma değerini hem de yansıma değişim oranını düşürmek olduğu için faktörlerin her seviyesi için ortalama sinyal / gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.14' de sunulmuştur. Çizelge 5.14.' de bulunan ortalama S/N oranlarına göre, optimum seviyeler A faktörü için 2. seviye, B faktörü için 2. seviye ve C faktörü için de 2. seviyedir.



Şekil 5.4: Sonuç değişken olarak yansıma dağılımı alındığında faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.

Çizelge 5.14: Sonuç değişken olarak yansıma değeri ve dağılımı alındığında faktör seviyeleri için ortalama S/N oranları.

Seviye	A	B	C
1	-23,055	-22,245	-23,565
2	-22,3	-21,485	-21,555
3	-24,85	-26,475	-25,08
Fark	2,55	4,99	3,52
Sıralama	3	1	2

Kalın olan yansıma önleyici kaplama (I-CON 16) ile de aynı deneyler tekrarlanmış ve optimum seviyeler için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat yansıma değerinin en az %15 değerine indiği görülmüştür.

5.2.1.1 Varyans analizi (ANOVA)

Yansıma değerleri kullanılarak Minitab 14 programı ile %95 güvenilirlik aralığında yapılan varyans analizinin sonuçları Çizelge 5.15’de verilmiştir. P değerleri (<0,05) incelendiğinde, kullanılan kimyasal miktarının ve de son döndürme hızının yansıma değerlerini etkilediği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.15: Yansıma değerleri ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.

	Serbestlik Derecesi) (df)	Ortalama Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P
(A)	2	131,556	65,778	14,8	0,014
(C)	2	126,889	63,444	14,27	0,015
Hata	4	17,778	4,444		
Toplam	8				

$$S = 2,10819 \quad R\text{-Sq} = \% 93,56 \quad R\text{-Sq (adj)} = \% 87,13$$

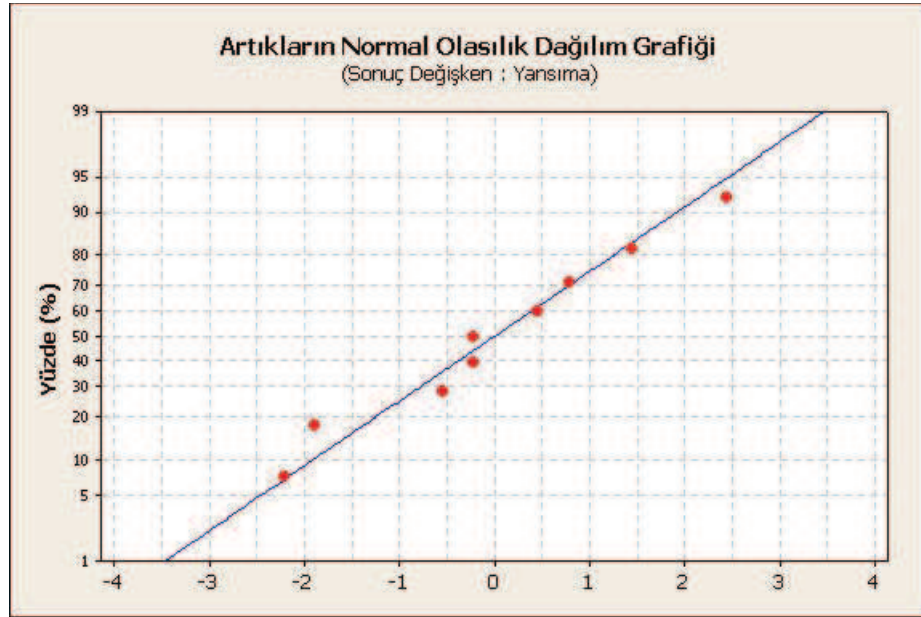
Benzer şekilde yansıma değişim oranlar için de varyans analizi yapılmıştır. Yine %95 güvenilirlik aralığında elde edilen sonuçlar Çizelge5.16’ de verilmiştir. Bu analiz sonuçları $P = 0,033$ ($<0,05$) değeriyle ilk döndürme hızının en etkili parametre olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.16: Yansıma değişim oranları ile yapılan Varyans Analizi sonuçları.

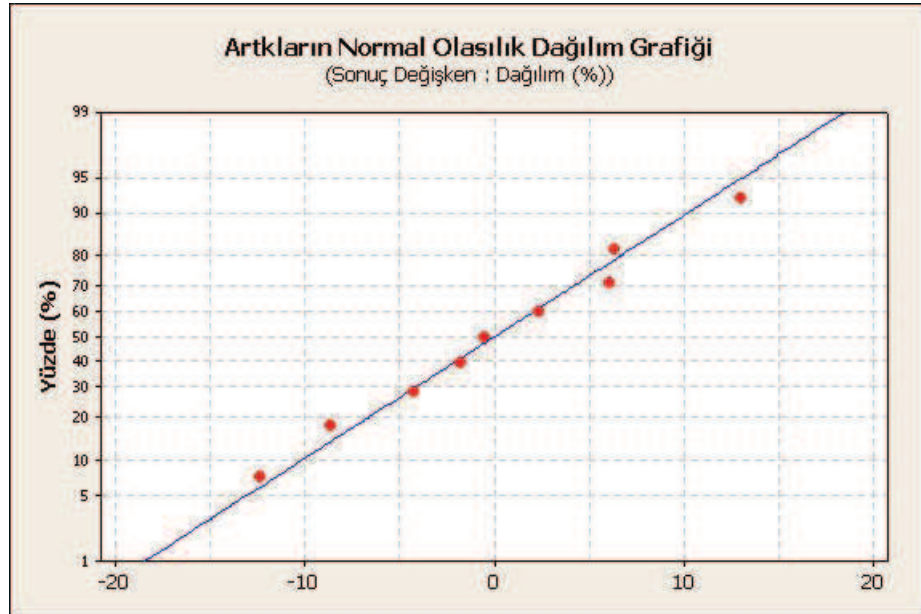
	Serbestlik Derecesi) (df)	Ortalama Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F	P
(A)	2	642,5	321,2	2,56	0,193
(B)	2	2273,3	1136,6	9,05	0,033
Hata	4	502,3	125,6		
Toplam	8				

$$S = 11,2056 \quad R\text{-Sq} = \% 85,31 \quad R\text{-Sq (adj)} = \% 70,6$$

Varyans analizlerinden elde edilen sonuçların anlamlı olup olmadıklarını belirlemek için artıkların normal olasılık diyagramları çizdirilmiştir. Yansıma ve yansıma değişimi için elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’ de sunulmuştur. Şekillerden görüldüğü gibi, görüldüğü üzere deneysel sonuçların dağılımı normal dağılıma uygun çıkmıştır. Bu da yapılan deneysel tasarımın doğru kurgulandığını göstermektedir.



Şekil 5.5: Sonuç değişken olarak yansima alındığında artıklara ait normal olasılık diyagramları.



Şekil 5.6: Sonuç değişken olarak yansima değişimi alındığında artıklara ait normal olasılık diyagramları.

5.2.1.2 Doğrulama testi

Yansima ve yansima değişim oranını etkileyen faktörlerin optimum proses koşulları ikinci seviyede oldukları anlaşılmaktadır. Bu nedenle $A_2B_2C_2$ noktasında doğrulama testi yapılmıştır.

- Yansıma değeri için;

$$\mu = \text{genel ortalama} + A_2\text{'in etkisi} + B_2\text{'nin etkisi} + C_2\text{'nin etkisi}$$

$$\mu = -18,06 + (-18,46 - (-18,06)) + (-18,02 - (-18,06)) + (-14,73 - (-18,06)) = -15,08$$

5.1 nolu formülden

$$y = \% 5,68 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

- Yansıma değişim oranı için;

$$\mu = \text{genel ortalama} + A_2\text{'in etkisi} + B_2\text{'nin etkisi} + C_2\text{'nin etkisi}$$

$$\mu = -28,74 + (-26,14 - (-28,74)) + (-24,95 - (-28,74)) + (-28,38 - (-28,74)) = -21,99$$

Yine 5.1 numaralı formül kullanılarak

$$y = \% 12,5$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu nokta deney setinde bulunmadığı için tekrar bu noktada deney yapılmış ve yansıma değeri % 6 ve değişim oranı % 10,5 olarak bulunmuştur. Hesaplanan değerler ile deney sonucunda elde edilen değerler birbirine yakındır.

5.2.2 Yansıma önleyici kaplama seçimi

Çalışmada, kalın ve ince yansıma önleyici kaplamaların yansıma değerleri karşılaştırılmış ve ince olan kaplamanın yansıma değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Fakat ikisi arasında seçim yapabilmek için sadece yansıma değerlerini karşılaştırmak yeterli değildir. Şekillendirme işlemi yapılarak iki kaplama çeşidi için ışıktandırma şiddetinin etkisini, fokus derinliğini ve son olarak kritik boyut dağılımını karşılaştırmak gerekmektedir.

Yansıma ölçümleri sırasında kullanılan pullara depolanmış olan katmanlar bu deney setinde kullanılan pullara da aynı yöntemle ve kalınlıkta depolanmıştır. Bölüm 5.2.1. 'de belirlenen koşullar ile yansıma önleyici kaplama yapılmış ve sonra vakumlu tabla üzerinde 205 °C'de ve 60 s süreyle pişirme işlemi yapılmıştır. Pişirme işleminden sonra pulların oda sıcaklığına dönmesi için yaklaşık 20 dakika bekletilmiş ve ardından fotorezist kaplama ve kütleme işlemi yapılmıştır. Fotorezist kaplama ve kütleme

parametreleri olarak Bölüm 5.1’de tespit edilen parametreler kullanılmıştır. Her kürleme işleminden sonra pulun tekrar oda sıcaklığına dönmesi için belirli süre beklemek gerekmektedir. Daha sonra aşağıda belirtilen koşullar ile şekillendirme işlemi yapılmıştır. Şekillendirme işleminden sonra sırasıyla yapılan kürleme, banyo ve son kürleme işleminin parametreleri Bölüm 5.4 ve 5.5.’de verilmiştir

5.2.2.1 Işıklandırma şiddetinin etkisi

Farklı ışıklandırma şiddetinde (Joule/m^2) şekillendirme işlemi yapılarak, ışıklandırma şiddetinin boyut üzerindeki etkisine bakılmıştır.

Kalın kaplama (I-Con 16) için;

2000 J / m^2 ışıklandırma şiddetinde boyut = 256 nm

3000 J / m^2 ışıklandırma şiddetinde boyut = 410 nm

Ölçümlerden elde edilen sonuçlar, 100 J / m^2 ışıklandırma şiddeti adımıyla boyutun ortalama 15,4 nm kadar değiştiğini ortaya koymuştur. Hedeflenen boyut 300 nm olduğu için her 100 J / m^2 ışıklandırma adımıyla boyutun % 5 oranında değiştiği görülmektedir

İnce kaplama (I-Con 17) için;

2500 J / m^2 ışıklandırma şiddetinde boyut = 285 nm

3500 J / m^2 ışıklandırma şiddetinde boyut= 346 nm

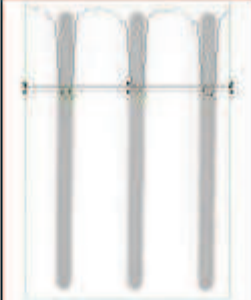
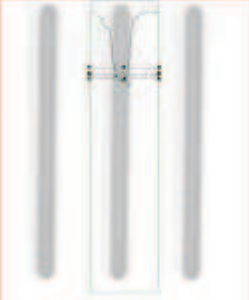
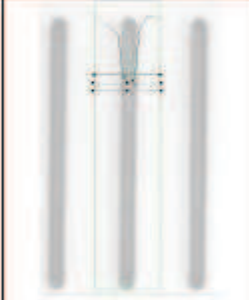
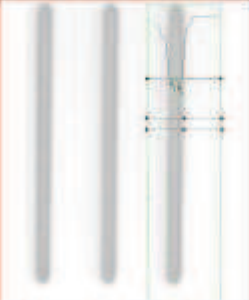
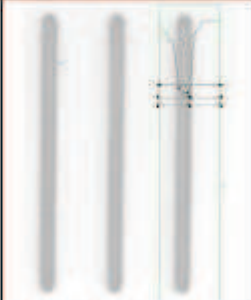
Buna göre 100 J / m^2 ışıklandırma şiddeti adımıyla boyuttaki ortalama değişim 6,1 nm olmuştur. 300 nm olan hedef boyut göz önüne alındığında ışıklandırmadaki her 100 J / m^2 luk ışıklandırma artışı boyutta yaklaşık % 2 oranında bir değişikliğe yol açmaktadır.

Bu sonuçlar da ince olan kaplama ile elde edilen yansımanın kalın kaplamayla elde edilene kıyasla daha düşük olduğunu ve böylece ışıklandırma şiddetinden daha az etkilendiğini göstermektedir.

5.2.2.2 Fokus derinliği

Prosesin bu adımıyla, şekillendirme yapılırken ışıklandırma şiddeti sabit tutularak fokus değeri değiştirilmiş ve bu koşullarda fokus derinlikleri karşılaştırılmıştır.

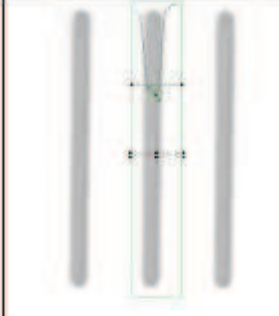
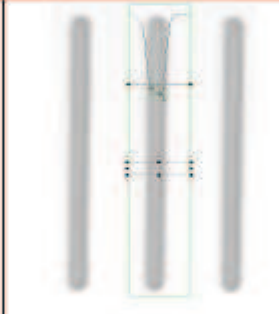
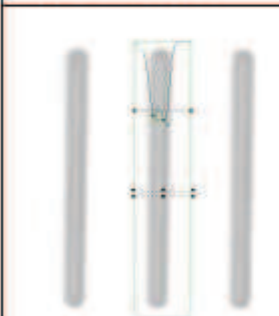
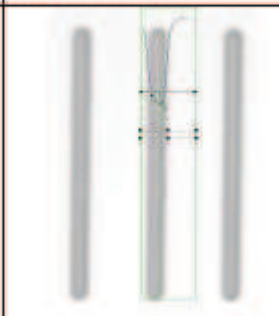
Şekil 5.7’ de ince kaplama için fokus değişiminin fokus derinliğini nasıl etkilediği görülmektedir. Işıklendirma şiddeti 2600 J/m^2 olarak sabit tutulmuştur. Değişik fokus değerlerinde alınan görüntülerden fokus derinliğinin $1,2 \mu\text{m}$ ($-0,3 \mu\text{m} / 0,9 \mu\text{m}$) olduğu tespit edilmiştir.

			
Fokus: $-0,75 \mu\text{m}$ Boyut: Ölçülemiyor	Fokus: $-0,60 \mu\text{m}$ Boyut: Ölçülemiyor	Fokus: $-0,45 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2605 \mu\text{m}$	Fokus: $-0,30 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2839 \mu\text{m}$
			
Fokus: $-0,15 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2913 \mu\text{m}$	Fokus: $0,15 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2999 \mu\text{m}$	Fokus: $0,30 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2984 \mu\text{m}$	Fokus: $0,45 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2879 \mu\text{m}$
			
Fokus: $0,60 \mu\text{m}$ Boyut: $0,3015 \mu\text{m}$	Fokus: $0,75 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2956 \mu\text{m}$	Fokus: $0,90 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2981 \mu\text{m}$	

Şekil 5.7: İnce kaplama için fokus değişiminin şekillendirmeye etkisi.

Şekil 5.8’ de ise kalın kaplama için fokus değişiminin fokus derinliğine olan etkisini belirlemek için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu çalışmalarda ışıklendirma şiddeti 2200 J/m^2 değerinde sabit tutulmuştur. Değişik fokus değerlerinde alınan görüntülerden fokus derinliğinin $0,6 \mu\text{m}$ ($-0,15 \mu\text{m} / 0,45 \mu\text{m}$)

olduğu tespit edilmiştir. İnce kaplamaya göre fokus derinliğinin yarıya düşmüş olması da, yansımalar değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

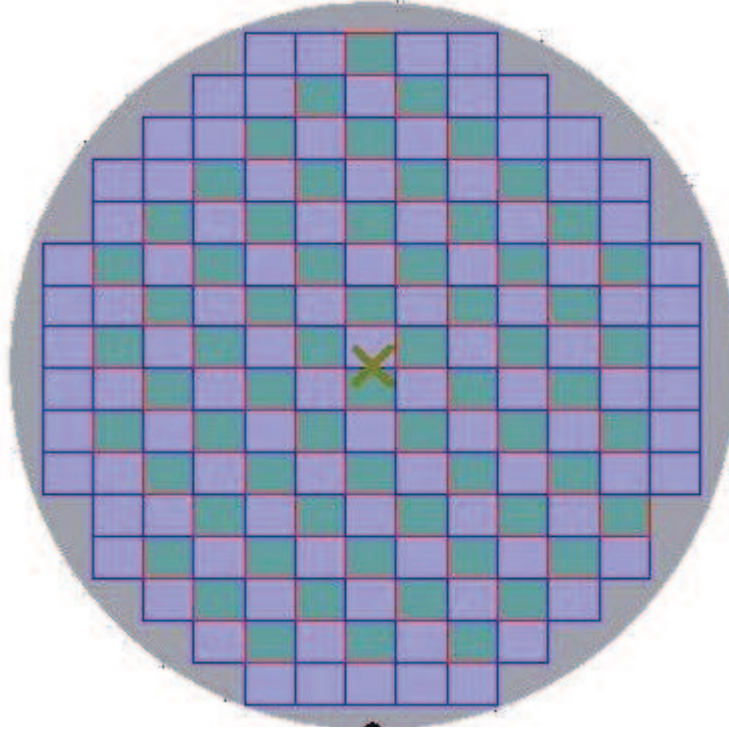
		
Fokus: $-0,6 \mu\text{m}$ Boyut: Ölçülemiyor	Fokus: $-0,45 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2332$	Fokus: $-0,30 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2655 \mu\text{m}$
		
Fokus: $-0,15 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2922 \mu\text{m}$	Fokus: $0 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2981 \mu\text{m}$	Fokus: $0,15 \mu\text{m}$ Boyut: $0,3030 \mu\text{m}$
		
Fokus: $0,30 \mu\text{m}$ Boyut: $0,2989 \mu\text{m}$	Fokus: $0,45 \mu\text{m}$ Boyut: $0,289 \mu\text{m}$	Fokus: $0,60 \mu\text{m}$ Boyut: $0,199 \mu\text{m}$

Şekil 5.8: Kalın kaplama için fokus değişiminin şekillendirmeye etkisi.

5.2.3 Kritik boyut dağılımı

Çalışmaların son bölümünde ışıktandırma şiddeti ve fokus sabit tutularak şekillendirme işlemi yapılarak pul genelindeki kritik boyut dağılımına bakılmıştır.

Kritik boyutun otomatik olarak ölçülebilmesi için KLA firmasına ait INS 3000 UV & DUV model mikroskopun otomatik tabla adımlama reçetesi oluşturulmuştur. Bu reçete sayesinde, Şekil 5.9' de görüldüğü gibi, cihaz pullar üzerinde önceden belirlenen noktalara otomatik olarak gidip odaklama ayarını (otomatik fokus) yaparak ölçümler almıştır. Cihaz ölçümleri her noktada iki defa tekrarlanarak gerçekleştirmiştir. Pul ölçüm haritası şekilde görülmektedir



Şekil 5.9: Pul ölçüm haritası.

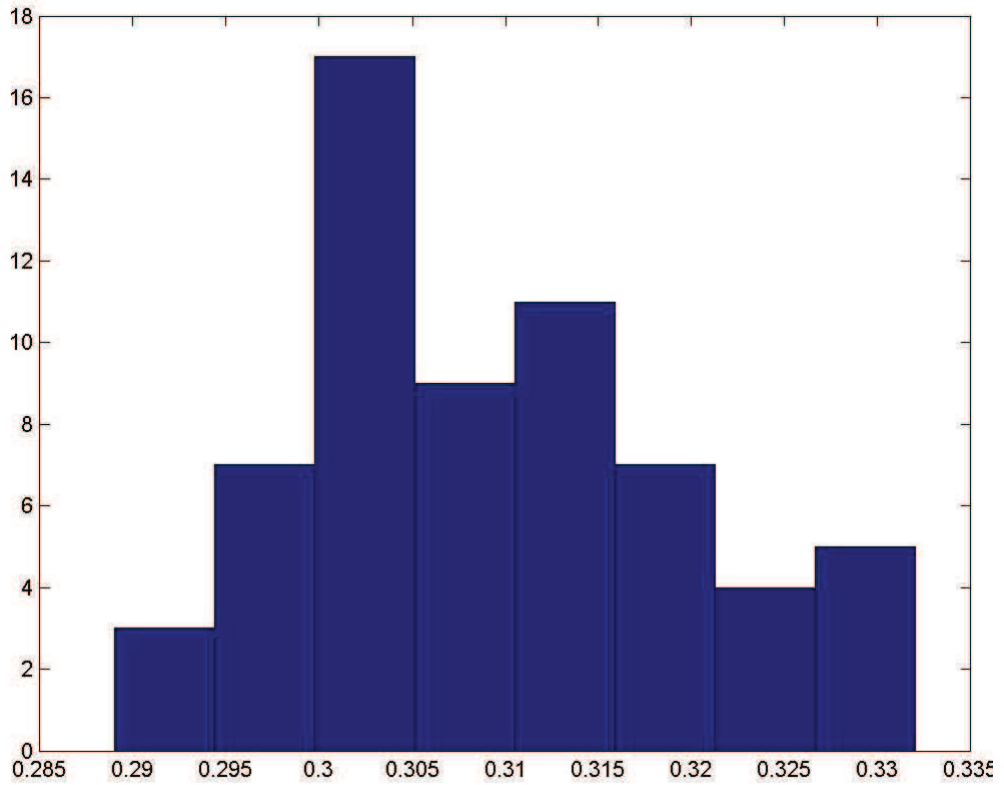
I-Con 7 kodlu yansımaya önleyici kaplama ile hazırlanmış olan pul 2600 J/m^2 ışıktandırma şiddeti ve $0,3 \mu\text{m}$ odaklama koşullarında şekillendirilmiştir. I-Con 16 kodlu yansımaya önleyici kaplama ile hazırlanmış olan pul ise 2200 J/m^2 ışıktandırma şiddeti ve $0,3 \mu\text{m}$ odaklama (fokus) değeri ile şekillendirilmiştir. Çizelge 5.17 'de iki kaplama türü için yaklaşık 60 adet kritik boyut ölçümünün ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Standart sapma değerlerine bakıldığında ikisi arasında

çok fazla fark olmamakla birlikte I-CON 7 kodlu kaplamanın daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bu da ince olan kaplamanın alt yüzeyin boşluklarını doldurmada yeterli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.17: Yansıma önleyici kaplamaların kritik boyut ölçüm sonuçları.

	I-Con 7	I-Con 16
Maksimum (μm)	0,332	0,321
Minimum (μm)	0,289	0,284
Ortalama (μm)	0,309	0,304
Standart Sapma	9,50	10,61

I-Con 7 kodlu kaplama ile hazırlanmış pulda yapılan kritik boyut ölçüm sonuçlarının dağılımı Şekil 5.10 'de görülmektedir. Görüldüğü üzere kritik boyut ölçüm dağılım sonuçlarının histogramı normal bir dağılım sergilemişlerdir.



Şekil 5.10: I-Con 7 kodlu kaplama ile hazırlanmış pulda kritik boyut histogramı.

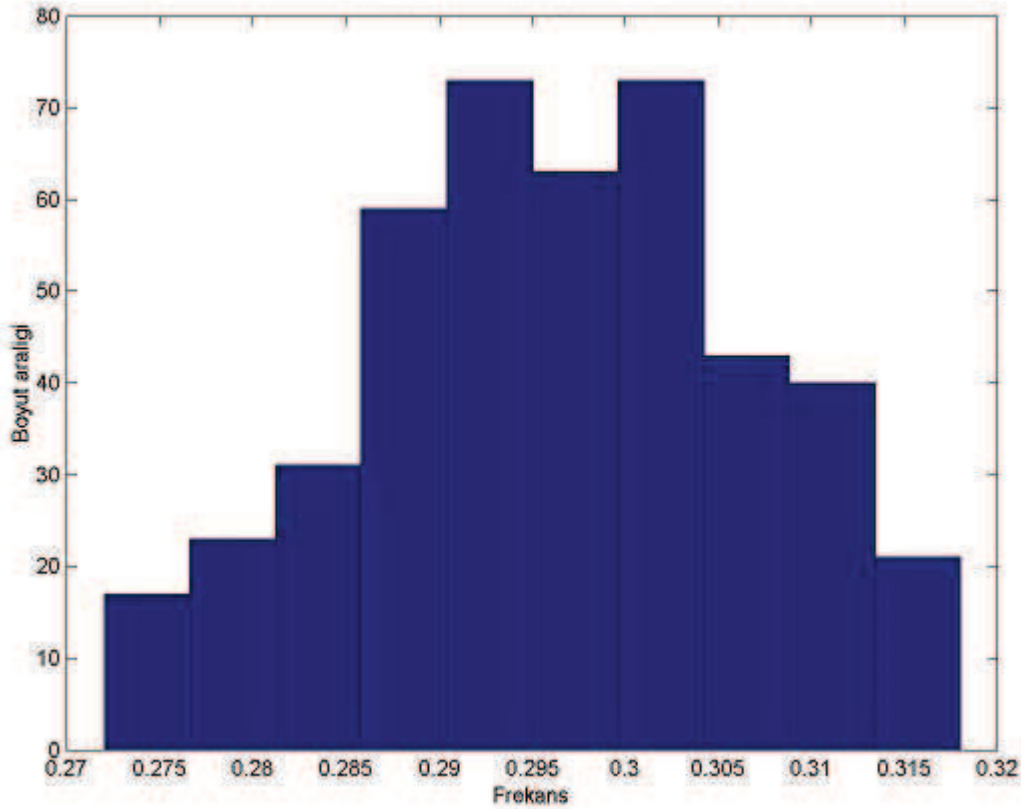
Pullardaki kritik boyut dağılımını incelemek için I-Con 7 kodlu yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış 7 adet pul yukarıda belirtilen koşullarda şekillendirilmiş ve her

pulun ortalama 60 adet kırmığında kritik boyut ölçümü otomatik olarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.18 ve Şekil 5.11’de görülmektedir.

Çizelge 5.18: I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış pulların kritik boyut ölçüm sonuçları.

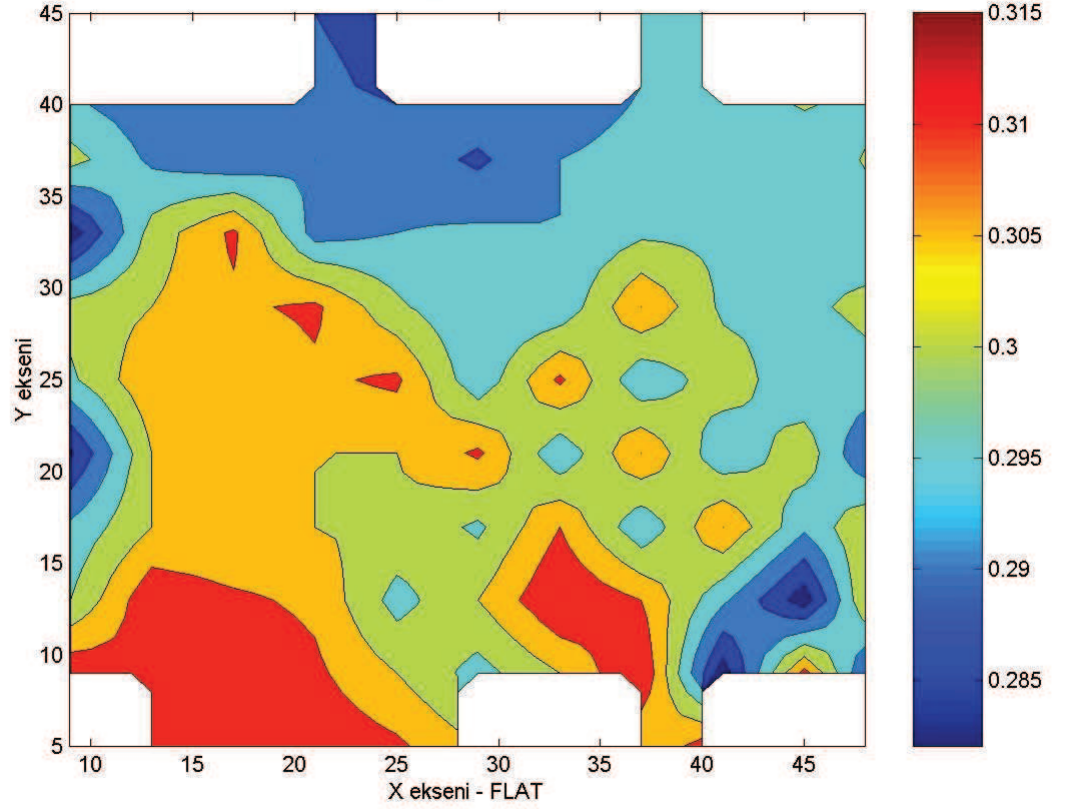
Pul No	Maksimum (μm)	Minimum (μm)	Ortalama (μm)	Standart Sapma
1	315	274	299,70	10,30
2	313	275	292,30	8,20
3	315	282	301,10	8,20
4	307	270	289,50	9,50
5	320	280	300,60	8,50
6	317	271	297,20	9,30
7	314	286	300,60	7,10

Şekil 5.11 ‘de görüldüğü üzere pullar arasındaki dağılım da normal bir dağılım sergilemektedir.



Şekil 5.11: I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış pulların kritik boyut histogramı.

Çizelge 5.18’de değerleri görülen 3 nolu pul için boyutların pul genelindeki dağılımı incelenmiştir. Şekil 5.12’ de görüldüğü üzere pulun kenarına doğru gittikçe boyutlar küçülmektedir. Bu durumun pulun kenar bölgelerinde artan fotorezist kalınlığından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

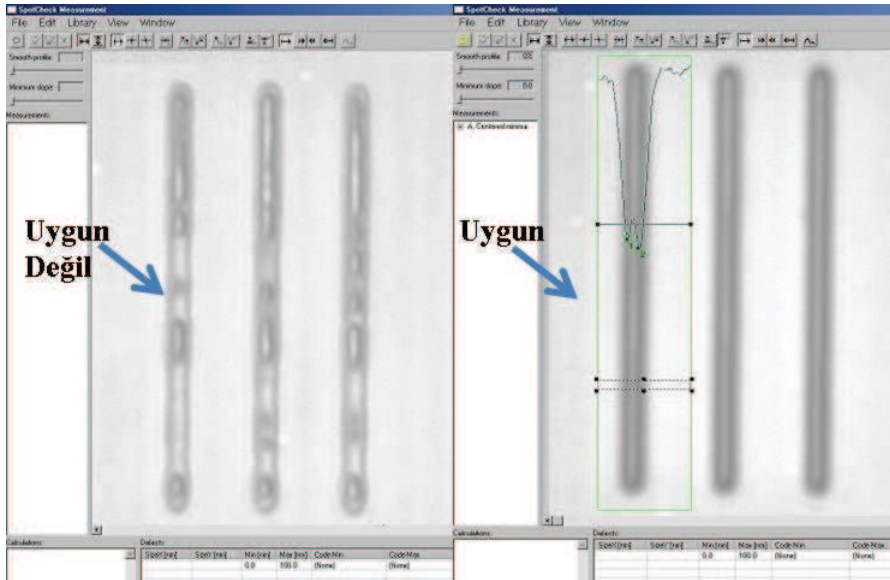


Şekil 5.12: I-Con 7 yansıma önleyici kaplama ile kaplanmış ve ortalama kritik boyutu 301,10 µm olan pulun (Pul no:3) genelindeki boyut dağılımı.

İki yansıma önleyici madde ile hazırlanan ürünler, yansıma ölçümü ışıklandırma şiddetinin etkisi, fokus derinliği ve kritik boyutun dağılımı gibi ölçümlerle karakterize edilmişlerdir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuç, ince yansıma önleyici kaplama (I-Con 7) ile hazırlanan ürünlerin daha iyi özellikler sergilediğidir. Bu durum göz önüne alınarak şekillendirme prosesi için bu maddenin kullanılması tercih edilmiştir.

5.3 Şekillendirme

Şekillendirme işlemi bir adımlayıcı (Canon FPA 3000 i4 model cihaz) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, odaklama (fokus) ve ışıklandırma şiddetini (dozajını) ayarlayabilme özelliğine sahiptir. İşlem sırasında bu parametreler değiştirilerek şekillendirme yapılmıştır. Cihaz odaklama değerini, pulun üzerinde durduğu tablayı z yönünde hareket ettirerek ayarlamaktadır. Işıklandırma dozajını ise ışık kaynağının önündeki bıçakların açık kalma sürelerini değiştirerek yapmaktadır. Çalışma sırasında önce her pul için nominal ışıklandırma dozajı ve odaklama değerleri tespit edilmiştir. Bunun için bir pula pulların her satırdaki kırmıklara farklı ışıklandırma dozajı ve her sütundaki kırmıklara ise farklı odaklama değeri uygulanmıştır. Pul yüzeyindeki katmanlar ve kalınlıkları aynı kaldıkça faktörlerin seviyeleri de değişmemektedir. Odaklama değeri değiştirildiğinde şekillerin netliğinde ve dolayısı ile profilinde bozulmalar görülür. Odaklama derinliği ise şekillerin netlik ve profillerinin bozulmadığı odaklama değer aralığıdır. Şekil 5.13’de odak değerinin şekillendirme üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 5.13: Odaklama değerinin şekillendirme üzerine etkisi.

Işıklandırma dozajı ise kritik boyutun değişimine neden olur. Bu çalışmada olduğu gibi düz maske ile şekillendirme yapıldığında ışıklandırma dozajı arttığında kritik boyut büyür, azaldığında ise fotorezist kalınlığı boyunca açılmama problemleri görülür.

Yansıma önleyici kaplama yapıldığında ışıklandırma sırasında yansıyan ışınlar azaldığı için normalde ışıklandırma cihazına girilen dozaj miktarı artmaktadır. Değişik dozaj ve odaklama değerleri ile ışıklandırılmış pulda öncelikle görüntünün en net olduğu odak değeri tespit edilir. Böylece pulun bir sütunu boyunca tüm kırmıklarda boyut ölçümü yapılarak ışıklandırma dozajı belirlenir. Çizelge 5.19’de kullanılan ışıklandırma dozajı ve fokus değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.19: Işıklandırma dozajı ve fokus değerleri.

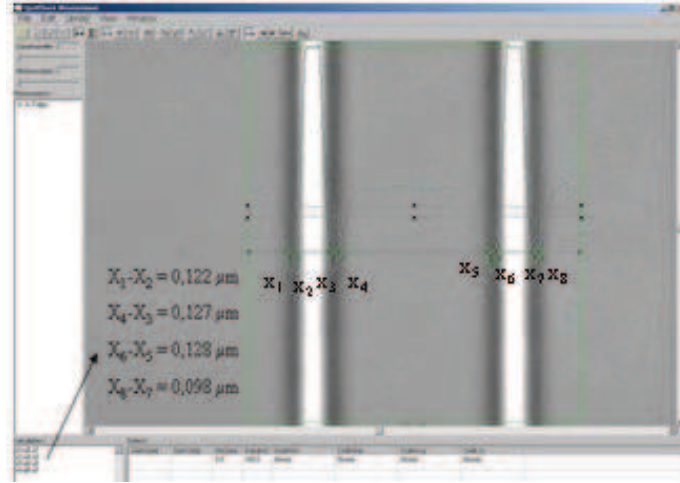
	I-Con 7	I-Con 16
Işıklandırma dozajı (J/m ²)	2600	2200
Fokus (μm)	0,3	0,3

5.4 Şekillendirme Sonrası Kürleme ve Banyo İşlemi

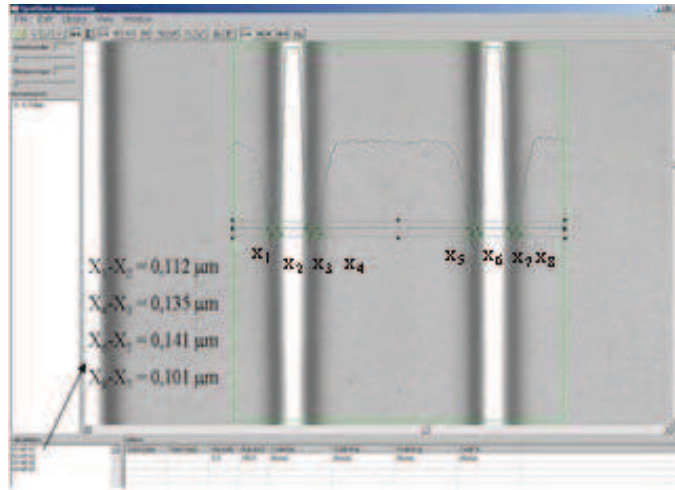
5.4.1 Şekillendirme sonrası kürleme

Kürleme işlemi banyo prosesi sonrasında oluşan şekillerin profillerini etkilediği için değişik sıcaklıklarda kürleme işlemi yapılan pulların DUV (Derin UltraViyole) ışık kaynağı ile görüntüleri alınmıştır.

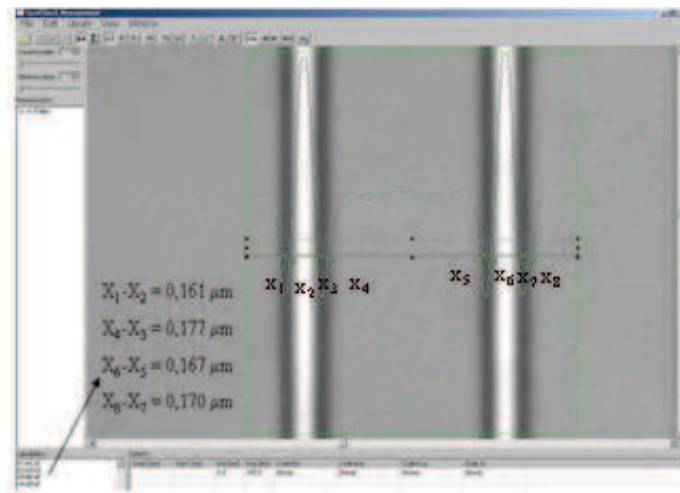
Kürleme işlemi 95°C, 110°C ve 125°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıklarda hazırlanan örnekler sırasıyla Örnek-1, Örnek-2 ve Örnek-3 olarak kodlanmıştır. Örneklerin görüntüleri sırasıyla Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’de gösterilmiştir. Görüntülerdeki beyaz bölgeler banyo sırasında çözünerek fotorezistin yüzeyden uzaklaştığı açık alanları göstermektedir. Şekillerin üzerinde genişlikleri gösterilen siyah bölgeler ise profil hakkında bilgi vermektedir. Siyah bölgenin genişlemesi profil açısının 90° ‘den uzaklaştığını göstermektedir.



Şekil 5.14: 95 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (1.Örnek).



Şekil 5.15: 110 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (2.Örnek).



Şekil 5.16: 125 °C’de kürleme yapılan pulun DUV görüntüsü (2.Örnek).

Şekillerdeki siyah ve beyaz bölgeler arasında yer alan ve geçişi sağlayan gri bölgenin genişlikleri şekil içinde verilmemiştir. Bu genişlikler Çizelge 5.20 'de verilmiştir.

Çizelge 5.20: Şekillendirmeden sonra kürlenene pulların mikroskop görüntülerinden izlenen bölgelerin boyutları.

	Beyaz Bölge (μm)		Gri Bölge (μm)	
	1.şekil	2.şekil	1.şekil	2.şekil
1.örnek	0,284	0,290	0,141	0,154
2.örnek	0,282	0,286	0,08	0,084
3.örnek	0,238	0,247	0,083	0,078

Şekillerden görüldüğü gibi, şekillendirmeden sonra kürlenene pulların özellikleri kürlenme sıcaklığıyla değişebilmektedir. 95 °C'de yapılan kürlenmede beyaz bölgenin açılmasında bir sorunla karşılaşılmanıştır. Bu bölgenin ortalama boyutu 0,287 μm olarak ölçülmüştür. Ancak bu örnekte geçiş bölgesi (gri bölge) diğer iki örnektekine kıyasla daha geniş olduğu gözlenmiştir. Bu örnekteki siyah bölge ile gri bölgenin toplam genişliklerine bakıldığında bu örneğin profil açısından Örnek-2 ile aynı durumda olduğu görülmektedir. Sıcaklık yetersiz kaldığı durumlarda ışıklanmayan bölgedeki fotorezistin kalkması gibi bir sorunla karşı karşıya kalınabilmektedir.

Kürlenme sıcaklığı 110 °C'a çıktığında (Örnek-2) ise hem açık alanların boyut ortalaması hem de profil açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle kürlenme işleminin 110 °C ve literatürde geçen 60 s süre ile yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sıcaklık daha da yükseltilerek 125 °C' a çıkarıldığında (Örnek-3) beyaz bölgenin daraldığı görülmektedir. Bu da sıcaklığı olması gerekenden yüksek olduğu göstermektedir. Bu yüksek sıcaklıkta fotorezistin çözünme hızının düşmektedir.

5.4.2 Banyo prosesi

Çözeltinin sıcaklığı laboratuvar koşulları ile aynı kabul edilmiştir. Çözeltinin pul yüzeyindeki bekleme süresi 30 ile 80 s arasında değiştirilerek 6 adet farklı numune hazırlanmıştır. Işıklandırma sırasında pulların her satırındaki kırmıklara farklı ışıklandırma dozajı uygulanmış ve hangi ışıklandırma dozajında hedeflenen 0,3 μm ' lik kritik boyuta ulaşılabilceği araştırılmıştır. Çizelge 5.21 'de banyo prosenin

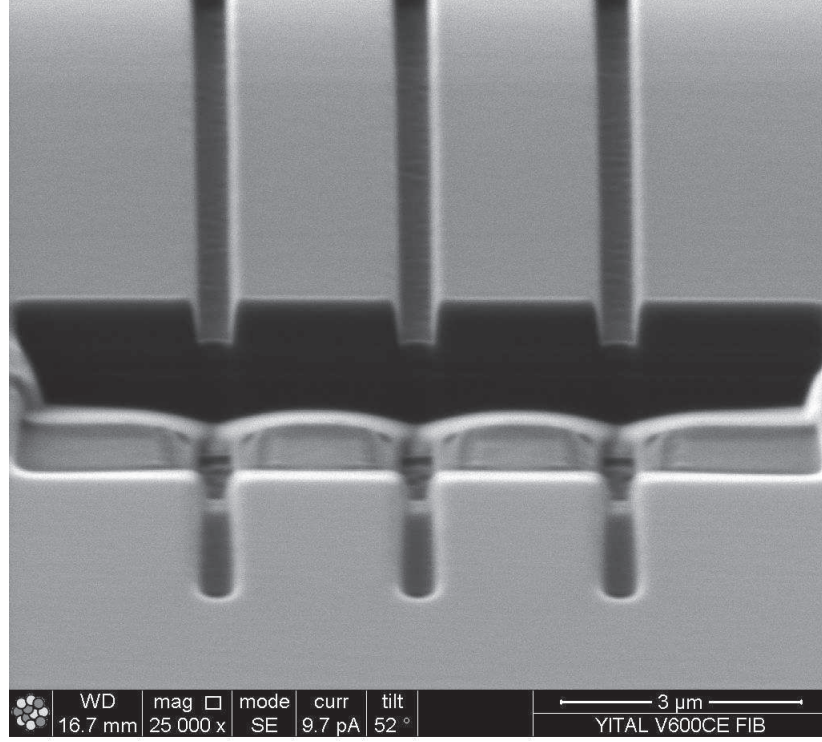
gerçekleştirildiği koşullar verilmiştir. Ayrıca banyo süresinin yeterliliğini tespit etmek için ışıktanmış ve ışıktanmamış alanların yansıma ölçümleri yapılarak aradaki fark hesaplanmıştır. Farkın büyümesi iki alan arasındaki kontrastın arttığını göstermekte ve aynı zamanda iki bölgenin üzerindeki fotorezist kalınlığı hakkında bilgi vermektedir. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5.21: Farklı banyo sürelerinde yapılan deneylerin sonuçları.

Proses Süresi (sn)	Işıklandırma Dozajı (Joule/m ²)	Işıktanmış ve ışıktanmamış alanlar arasındaki yansıma farkı (%)
30	3300	1,6
40	3100	4,8
50	2900	10
60	2600	28
70	2600	18,93
80	2600	4,55

Yapılan ölçümler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Banyo süresi azaldıkça kritik boyutu elde etmek için gerekli olan ışıklandırma dozajı artmaktadır. Işıktanmış ve ışıktanmamış bölgeler arasındaki yansıma farkının düşük olması ışıktanmış alandaki fotorezistin alt tabana kadar açılmadığını göstermektedir. Bu nedenle ağız kısmı 0,3 m olan fakat tabana doğru daralan “v” şeklinde bir profil elde edilecektir.
- Banyo süresi 60 sn olan numunede yansıma farkının en yüksek olduğu görülmüştür.
- Banyo süresi uzadıkça ışıklandırma dozajının etkilenmediği, fakat yansıma farkının tekrar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu da banyo süresi uzadıkça ışıktanmamış alanlardaki rezistin de aşınmaya başladığını göstermektedir.
- Optimum banyo süresi 60 saniyedir. Şekillendirme sonrası yapılan kütleme ve banyo prosesi parametrelerinin profil üzerindeki etkisini görebilmek için, belirlenen proses şartları ile hazırlanan pulun FIB cihazında kesit görüntüsü alınmıştır. Şekil 5.17’ de bulunan profil görüntüsü optimizasyon çalışmalarını doğrulamaktadır.



Şekil 5.17: Litografi işlemi sonrası fotorezist tabakasının kesit görüntüsü.

5.5 Sertleştirme

Fotolitografi prosesinin sonunda UV enerji ve ısı yardımı ile uygulanan kürleme işlemi; yarı iletken üretimine ait bir sonraki proste fotorezist polimerinin dayanıklılığını etkilediği için önemli bir proses adımıdır. Bu bölümde sertleştirme işlemine ait proses parametreleri, fotorezistin yarı iletken üretim adımlarından biri olan aşınma prosesine karşı direnci ölçülerek değerlendirilmiştir. Böyle bir çalışma 0,3 micron şekillendirme işleminden sonra pula aşındırma prosesinin uygulanıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak aşındırma prosesi ısısal (termal) bir proses olduğu için şekillendirilen malzemenin boyutları da etkilemektedir. Bu nedenle ikinci adımda, aşınma direnci için optimum olan proses seviyelerinin kritik boyut üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.5.1 Fotorezistin aşınma prosesine karşı direnci

Aşınma direnci sonuç değişken olarak incelendiğinde, proses parametreleri Taguchi metodunun en-düşük-en-iyi kalite kontrol karakteristiği kullanılarak optimize

edilmiştir. Proses parametrelerinin önem dereceleri varyans analiz metodu ile elde edilen P değerleri kullanılarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında pozitif fotorezist (OİR 38 A9) kullanılmıştır. Deney sonuçları ise 1 mikron ve daha ince kalınlıklarda serilen tüm Novolak rezistler için geçerlidir. Çünkü burada önemli olan rezistin kimyasal yapısını oluşturan temel bileşenler ve de kalınlığıdır. Silisyum pullara fotorezist kaplandıktan sonra deneysel tasarım sonucu belirlenen parametreler ile UV kürleme işlemi uygulanmıştır. Ardından ilk rezist kalınlıkları pulun 5 noktasından Nanometrics Nanospec 6100 ile ölçülmüş ve her pula ait ortalama kalınlık değeri kaydedilmiştir. Daha sonra pullar kuru aşınma prosesine gönderilmiş ve aşınma işlemi sonrasında tekrar 5 noktadan rezist kalınlıkları ölçülerek ortalama değerleri kaydedilmiştir. Sonuç olarak ilk ve son ölçüm arasındaki farkın düşük olması bize rezistin aşınma prosesine karşı direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Son sıcaklık parametresine ait seviyeler belirlenirken fotorezistin kimyasal özelliğini kaybederek pul üzerine sıvandığı maksimum sıcaklık (180 °C) ve sabit alınan ilk sıcaklık (110 °C) göz önünde bulundurulmuştur. İlk sıcaklıktan son sıcaklığa çıkma hızı için değerlendirme yapılırken cihazın kullanım kılavuzu ve literatürde geçen seviyeler değerlendirilmiştir. Son kürleme için literatürde bulunan veriler toplandığında, bazen hiç uygulanmadığı; uygulandığında ise sürenin 10 s olarak alındığı görülmüştür. Ayrıca parametrelerin aralıklarını belirlerken, uygulanacak bir sonraki proses adımının (iyon ekme, aşındırma vb.) da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada bir sonraki adım kuru aşındırma olduğundan dolayı faktör aralıklarını dolayısı ile de faktör seviyelerini belirlemeye etki etmiştir. UV ışığı ile kürleme işleminde aşınma direncini etkileyen faktörler ve seviyeleri Çizelge 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5.22: UV ışığı ile kürleme işleminin faktör ve faktör seviyeleri.

Sembol	Proses Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Son kürleme (sn)	0	10	
B	Son sıcaklık (°C/sn)	130	150	170
C	Eğim (sn)	1	1,5	2

Faktörlerin seviyeleri birbirinden farklı olduğu için minitab programında karışık seviyeli ortogonal dizi seçilmiştir. Son kütleme süresi iki seviyeli; son sıcaklık ve eğim ise üç seviyeli faktörlerdir. Minitab 14 programının sunduğu ortogonal diziler Çizelge 5.23 'de verilmiştir. Bunlar arasından L_{18} ortogonal dizisi faktörlerin sayı ve seviyelerine uyduğu ve en düşük deney sayısına sahip olduğu için seçilmiştir. Ayrıca serbestlik derecesi olarak değerlendirildiğinde; A parametresinin serbestlik derecesi 1, B ve C parametrelerinin serbestlik derecesi 2 olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumda gruptaki tüm faktörlerin serbestlik derecesi toplamı 5, ortogonal dizinin (L_{18}) ise 17 (=18-1) dir.

Çizelge 5.23: Ortogonal diziler.

Orthogonal Diziler	Karışık Seviyeli Dizaynlar	
	2-Seviye	3-Seviye
L18	1	1-7
L36	1-11	2-12
L36	1-3	13
L54	1	3-25

Deneylerde kullanılan L18 ortogonal dizisi ve bu ortogonal diziye göre deneylerde uygulanacak faktör seviyelerinin düzeni Çizelge 5.24'de verilmiştir.

Çizelge 5.24: Aşınma direnci deneyleri için L₁₈ ortogonal dizisi deneysel tasarım planı.

Deney No	Proses Parametre Seviyeleri		
	Son kütleme (A)	Son sıcaklık(B)	Eğim (C)
1	0	130	1
2	0	130	1,5
3	0	130	2
4	0	150	1
5	0	150	1,5
6	0	150	2
7	0	170	1
8	0	170	1,5
9	0	170	2
10	10	130	1
11	10	130	1,5
12	10	130	2
13	10	150	1
14	10	150	1,5
15	10	150	2
16	10	170	1
17	10	170	1,5
18	10	170	2

Deneyler sonucunda ölçülen fotorezist kalınlıklarının ilk ölçüm sonuçlarından farkı (Angstrom) Çizelge 5.25’de verilmiştir.

Çizelge 5.25: Aşınma direnci (fotorezist kalınlık farkı) sonuçları.

Deney No	Aşınma Direnci	Deney No	Aşınma Direnci
1	922	10	821
2	868	11	839
3	1006	12	827
4	992	13	794
5	890	14	775
6	849	15	844
7	891	16	763
8	843	17	720
9	841	18	714

Çizelge 5.25’de verilen ölçüm sonuçları Minitab 14 programına girilmiş ve Çizelge 5.26 ’de gösterilen Sinyal/Gürültü oranları bulunmuştur.

Çizelge 5.26: Hesaplanan Sinyal/Gürültü (S/N) oranları.

Deney No	S/N oranı (dB)	Deney No	S/N oranı (dB)
1	-59,6428	10	-58,4950
2	-59,2306	11	-58,0827
3	-59,4630	12	-58,3151
4	-59,4055	13	-58,2577
5	-58,9933	14	-57,8454
6	-59,2257	15	-58,0778
7	-58,7515	16	-57,6036
8	-58,3392	17	-57,1914
9	-58,5716	18	-57,4238

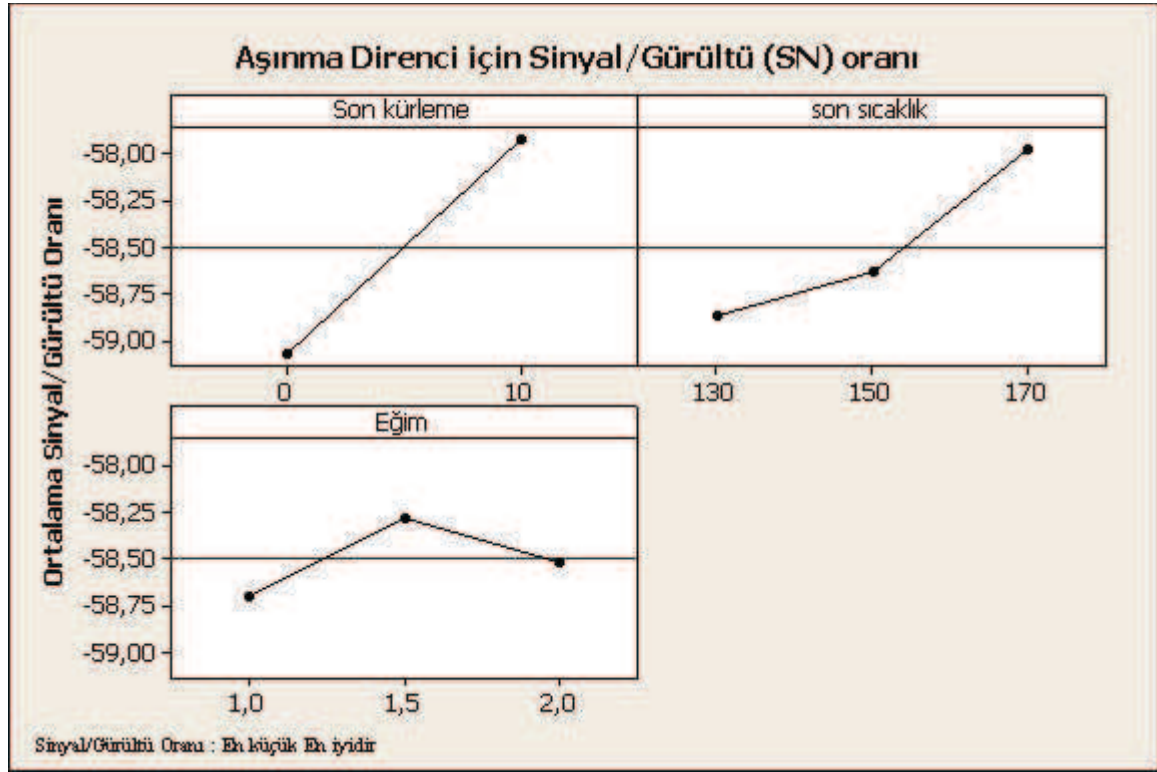
Çizelge 5.27 'de ise faktörlerin her seviye için hesaplanan ortalama S/N oranları görülmektedir. Çizelgedeki veriler incelendiğinde en etkili parametrenin son kürleme süresi olduğu anlaşılmaktadır. Son kürleme süresinin en iyi aşınma direncini veren optimum seviyesi ise 10 sn olan 2. seviyedir. İkinci etkili faktör olarak son sıcaklık ve eğimin diğerlerine göre daha etkisiz bir faktör olduğu görülmüştür. B (son sıcaklık) faktörü için en yüksek S/N oranı 3.seviyede ve C (eğim) faktörü için 2. seviyede elde edilmiştir.

Çizelge 5.27: Faktör seviyeleri için ortalama Sinyal/Gürültü oranları

Level	A	B	C
1	-59,07	-58,87	-58,69
2	-57,92	-58,63	-58,28
3		-57,98	-58,51
Delta	1,15	0,89	0,41
Rank	1	2	3

Her bir faktörün S/N oranı üzerindeki etkisini grafiksel olarak Şekil 5.18'de görülmektedir.

Çizelge 5.27'deki değerler ve Sekil 5.18'de bulunan grafikler incelendiğinde fotorezistin aşınma prosesine karşı direnci arttıran optimum seviyenin A₂B₃C₂ olduğu görülmüştür.



Şekil 5.18: Faktörlerin S/N oranı üzerindeki etkisi.

5.5.1.1 Varyans analizi (ANOVA)

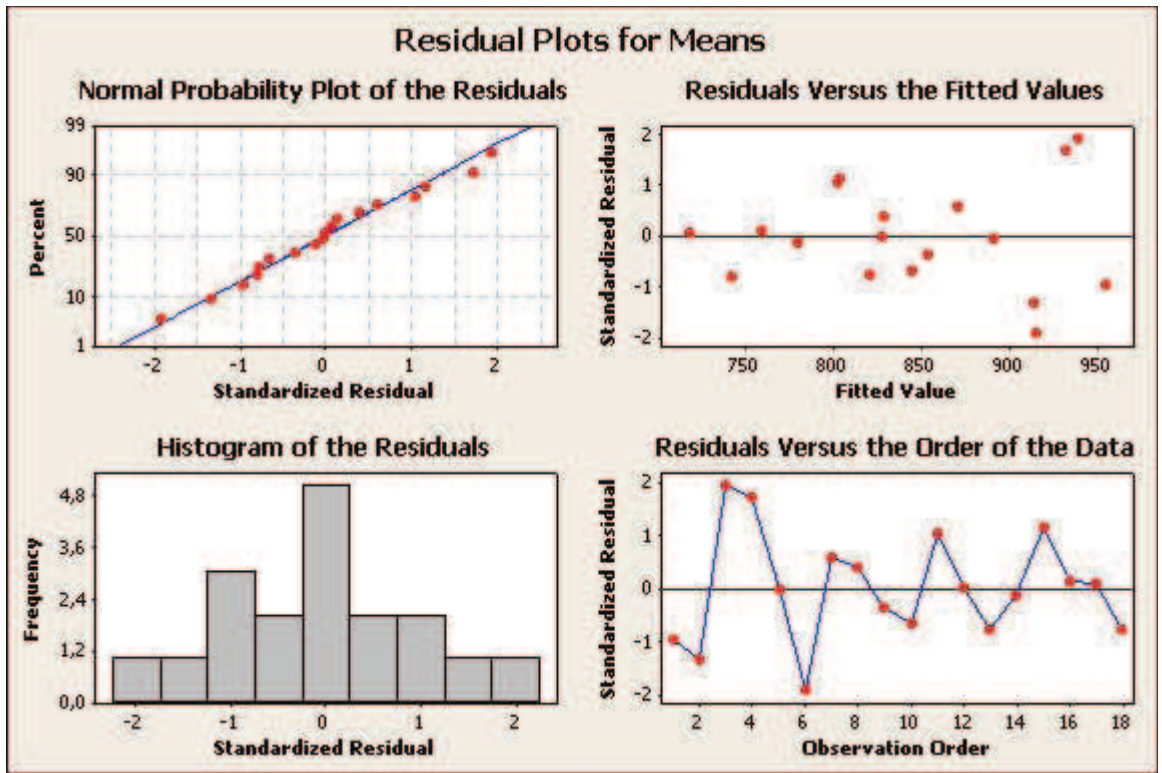
Çizelge 5.28’de Varyans Analizi sonuçları bulunmaktadır. Faktörlerin etkileri çizelgedeki P değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. %95 güven aralığında 0,05’den küçük P değeri veren ($P < \alpha$) parametreler için sıfır hipotezi reddedilerek, parametrelerin sistem için önemli olduğu görülmüştür. Bu durumda son kütleme süresi (A) ve son sıcaklık(B) sistem üzerinde etkili faktörler iken eğimin (C) diğer faktörlere göre sistem üzerindeki etkisi düşüktür.

DeneySEL sonuçların anlamlılığını belirlemek için artıkların (residual) normal olasılık diyagramları çizdirilmiştir. Şekil 5.19’de görüldüğü üzere, deneySEL sonuçların dağılımı normal dağılıma uygun çıkmıştır

Çizelge 5.28: Aşınma direnci deneyleri için Varyans Analizi sonuçları.

	Serbestlik Derecesi) (df)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kareler Toplamı	F	P
Son kütleme (A)	1	56113	56113	31,25	0,000
Son sıcaklık(B)	2	23268	11634	6,48	0,012
Eğim (C)	2	5179	2590	1,44	0,275
Hata	12	21547	1796	-	-
Toplam	17	106106	-	-	-

$$S = 42,37 \quad R-Sq = \% 79,7 \quad R-Sq (adj) = \% 71,2$$



Şekil 5.19: Artıklara ait normal olasılık diyagramları.

Varyans analizi sonuçları Şekil 5.19'deki grafikleri desteklemekte ve en etkili parametrenin en yüksek F değeri ile son kütleme süresi olduğunu göstermektedir. Taguchi metodu uygulanırken; parametrelerin birbiri ile etkileşimi olmadığı varsayımı yapılmış ve Varyans analizinde de etkileşim parametrelerinin P değerleri çok yüksek olduğu için hesaplamaya katılmamıştır.

5.5.1.2 Doğrulama testi

Taguchi tekniği ile optimizasyonda son aşama, optimum seviyeleri kullanarak aşınma direnci sonucunu tahmin etme ve bulunan sonucun aynı seviyelerde (optimum seviye, $A_2B_3C_2$) gerçekleştirilen deney sonucu ile karşılaştırılmasıdır.

Optimum koşulda ($A_2B_3C_2$) beklenen sonucu bulmak için 5.1 numaralı formül uygulanmıştır.

$$\mu = \text{genel ortalama} + A_2 \text{ 'nin etkisi} + B_3 \text{ 'ün etkisi} + C_2 \text{ 'nin etkisi}$$

$$\mu = -58,49 + (-57,92 - (-58,49)) + (-57,98 - (-58,49)) + (-58,28 - (-58,49))$$

$$\mu = -57,19 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

$$y = 723,19 \text{ Angstrom olarak hesaplanmıştır.}$$

Optimum seviyede ($A_2B_3C_2$) gerçekleştirilen deney sonucu 720 Angstrom bulunmuştur. Sonuç olarak tahmin edilen değer (723,19 Angstrom) ile deney sonucu birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

5.5.2 Kritik boyutun değişimi

Dokuz adet pul, proses parametrelerinin belirlenen optimum seviyelerinde şekillendirilmiş ve mikroskopta her pul üzerinden 10 ayrı kırmıkta kritik boyut ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalamaları alınarak kaydedilmiştir. Daha sonra aşınma direncine dayanıklılık göz önünde bulundurularak tespit edilen optimum faktör seviyelerinde sertleştirme (UV kürleme) işlemi yapılmış ve daha önce yapılan boyut ölçümü aynı şekilde tekrarlanmıştır. 9 adet pulun UV kürleme işlemi sonucundaki boyut değişiminin ortalaması $0,06 \mu\text{m}$ ' dur. Bu değer $0,3 \mu\text{m}$ prosesi için oldukça yüksek bir değerdir ve dolayısıyla profili de etkileyecektir. Aynı işlemler son sıcaklık 150°C ' ye düşürülerek tekrarlanmış ve ortalama boyut farkı $0,02 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

Sertleştirme adımının optimum faktör seviyeleri tespit edilirken sadece aşınma direncini değerlendirmek litografi prosesi açısından oldukça yanlıştır. Çünkü bu termal prosesin, litografinin temeli olan kritik boyut ve şekillerin profillerini doğrudan

etkilediği görülmüştür. Bu nedenle sonuç değişken olarak aşınma direnci ve kritik boyut değişimi beraber değerlendirilmiş ve son sıcaklığın seviyesi 150°C olarak tespit edilmiştir. Böylece pulun yüksek UV enerjiye maruz kaldığı süre ve son pişirme sırasında uygulanan sıcaklık düşmüştür.

Sertleştirme prosesi sırasındaki boyut değişimi göz önünde bulundurularak bu çalışma sırasında yapılan boyut ölçümlerinin tümü son adım olan sertleştirme işleminden sonra yapılmıştır ve optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen parametre seviyeleri Çizelge 5.29 'de verilmiştir.

Çizelge 5.29: UV ile kütleme parametreleri.

Başlangıç sıcaklığı (°C)	Ön pişirme süresi (sn)	Son sıcaklık (°C)	Yükselme Eğimi (°C/sn)	Yüksek Güçte UV ışıklandırma süresi (sn)	Son pişirme süresi (sn)
110	10	150	1,5	27	10

6. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikroelektronik teknolojisinde kritik boyutun küçülmesi daha hızlı çalışan devrelerin üretilmesini, iş kabiliyetinin artmasını, maliyetin düşmesini ve güç tüketiminin azalmasını sağlar. Bu çalışmanın amacı da 365 nm dalga boyunda ışıktandırma yapan ve sayısal açıklığı (NA) 0,6 olan bir adımlayıcı ile 300 nanometre (dalga boyundan küçük) olan kritik boyutu şekillendirilebilmek için, litografi proses parametrelerinin optimum seviyelerini belirleyerek k_1 sabitini 0,5 mertebesine düşürmektir.

Proses seviyelerinin optimizasyonunda deneysel tasarım metodlarından biri olan Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Yarı iletken üretimi hem maliyetli hem de üretimi etkileyen çok fazla parametre olduğu için deneysel tasarım metodlarının, özellikle de Taguchi yönteminin sıklıkla kullanıldığı bir sektördür. Taguchi metodunun parametre tasarımı aşamasında uygulanması, proses açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır, çünkü proses uygulamaya alınmadan önce; parametrelerin hedeflenen sonuç üzerindeki etkileri hakkında önceden bilgi edinilebilmekte ve böylece proses zaman ve maliyet kaybı olmadan uygulamaya alınabilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalardan şu genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Şekillerin profilini bozmadan kritik boyutu sağlayabilmek için fotorezist kalınlığının aşındırma prosesine dayanacak şekilde incilmesi gerekmektedir. Şekillendirme sonrası alınan kesit fotoğrafında görüldüğü üzere (Ek1) pulların üzerine rezist 0,8 mikron kalınlıkta kaplandığında , hem kritik boyut üst kısımda 0,4 mikrona çıkmış hem de dibe doğru rezist açılmamıştır. Fotorezist kalınlığı 0,6 mikrona indirildiğinde ise kesit fotoğrafında görüldüğü üzere (Ek2) kritik boyut sağlanmış ve fotorezist dibe kadar açılarak profil bozulmamıştır.
- Fotorezist kalınlığını etkileyen en önemli faktör kaplama işlemi sırasındaki uygulanan son döndürme hızıdır. 600 nanometrelik fotorezist kalınlığı için bu parametrenin optimum seviyesi 5000 devir /dk ' dır. Pulun yüzeyini tamamen

kaplamak için gerekli olan rezist akıtma süresi 3 s dir. Saniyede 3 ml rezist akıtılmaktadır.

- Hem krtik boyut kontrolünü sağlamak ve hem de alt tabandaki topoğrafiden dolayı şekillerde oluşacak bozulmayı önlemek açısından en etkili yöntem fotorezist tabakasının altına yansıma önleyici kaplama uygulanmasıdır. Pul yüzeyindeki yansımayı ve yansıma değişimini minimum seviyeye düşürmek için serme prosesi parametrelerinin optimum seviyeleri, yansıma önleyici kaplama miktarı için 2 ml, ilk döndürme hızı için 500 devir/dk ve son döndürme hızı için 2500 devir/dk dır. Bu proses parametrelerini kullanarak pul yüzeyindeki yansıma %6'ya düşürmek mümkündür.

- Işıklandırma sonrası yapılan kürlleme işlemi 110°C'da gerçekleştirildiğinde hem kritik boyuta hem de 90°'ye yakın bir profil açısına ulaşılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda profil bozulmaktadır.

- Banyo süresi azaldıkça kritik boyutu elde etmek için gerekli olan ışıklandırma dozajı artmaktadır. Işıklanmış ve ışıklanmamış bölgeler arasındaki yansıma farkının düşük olması ışıklanmış alandaki fotorezistin alt tabana kadar açılmadığını göstermektedir. Banyo süresinde uzama ışıklandırma dozajının etkilememekte, ancak yansıma farkı tekrar düşmektedir. Bu da banyo süresi uzadıkça ışıklanmamış alanlardaki rezistin de aşınmaya başladığını göstermektedir. Banyo süresi 60 s olan örnek en yüksek yansıma farkına ulaşmaktadır.

- Litografi prosesinin son adımı olan, fotorezistin sertleştirme işlemine etki eden parametreler (son pişirme süresi, son sıcaklık ve yükselme eğimi) kuru aşındırma prosesine karşı pozitif fotorezistin direnci ve kritik boyuttaki değişim göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Sadece aşınma direnci dikkate alındığında son sıcaklığın optimum seviyesi 170 °C olarak bulunmuş, fakat bu seviye 60 nm kritik boyut değişimine neden olduğu için, her iki sonuç değişken de dikkate alınarak optimum seviye 150 °C olarak belirlenmiştir.

Öneriler:

Litografi prosesinin tüm adımlarının sonuç değişkenleri ve bunları etkileyen faktörlerin optimum seviyeleri tespit edilerek, kritik boyutun dalga boyundan daha düşük seviyeye inmesi sağlanmıştır. Bu süreçte en etkili olan adım ise pul yüzeyine yansıma

önleyici kaplama uygulamak olmuştur. Daha ayrıntılı bir inceleme için bir simülasyon programı kullanarak, daha fazla faktörün ve faktör seviyelerinin daha dar aralıklardaki etkisini görmek gerekmektedir, çünkü yarı iletken sektörü hem maliyetli hem de kullanılan kimyasallar açısından çevreye zarar verdiği için yapılabilecek deney sayısı kısıtlıdır. Ayrıca deney sonuçlarında elde edilen profil görüntüsü simülasyon sonuçları ile de desteklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1**, <<http://barrett-group.mcgill.ca/tutorials/nanotechnology>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [2] **Kahng, A.B. ve Pati, Y.**, (1999). Subwavelength Lithography and its Potential Impact on Design and EDA, DAC '99 Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference- pp. 799-804, New York.
- [3] **Nishi, Y. ve Doering, R.**, (2012). Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, CRC Press.
- [4] **Url-2**, <<http://www.ece.gatech.edu>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [5] **Url-3**, <<http://www.southalabama.edu/engineering/ece/faculty/akhan/Courses/EE439-539-fall07>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [6] **Mack, C.A.**, (2007). Fundamental Principles of Optical Lithography, Wiley.
- [7] **Url-4**, <<http://www.scme-nm.org>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [8] **Tsai, S.F., Chen, C.Y., Chan, K.T., Gao, H.Y. ve Ku, C.Y.**, (1996). Post Exposure Baking Temperature Effect on Resist Profile with Bottom Anti – reflective Coating, Optical Microlithography IX, Santa Clara, CA.
- [9] **Johnson, J.R.**, (1995). A sub-half micron I-line photolithography process using AZ Barli, Optical/Laser Microlithography VIII, Santa Clara, CA.
- [10] **Url-5**, <<http://www.brewerscience.com/products/arc/dry-etch-arc-coatings/365nm-products/wide-c-coating>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [11] **Url-6**, <<http://www.cnf.cornell.edu/cnfprocessphotoresists.html>>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [12] **Marriott, V.**, (1983). High resolution positive resist developers: A technique for functional evaluation and process optimization, SPIE Proceedings Vol 0394: Optical Microlithography II, p144-151, Santa Clara, CA.
- [13] **Url-7**, <www.chiphistory.org>, alindigi tarih: 04.04.2014.
- [14] **S.Wolf ve Tauber, R.**, (2000). Silicon Processing for the VLSI ERA, Volume 1, Process Technology, 2nd Edition.
- [15] **Heves, E., Kaynak, M. ve Gürbüz, Y.**, (2006). UWB uygulamasına özgü SiGe BiCMOS Karıştırıcı Tasarımı, IEEE Signal Processing and Communications Applications, Ankara.

- [16] **İmrahor İlyas, S.**, (1996), Tümdevre üretiminde polisilisyumun plazma ortamında aşındırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [17] **Ataman, A.**, (1995). Mikroelektronikteki gelişmeler ve YİTAL'de geliştirilen 3m-CMOS prosesi, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa.
- [18] **Levinson, H.J.**, (2001). Principles of Lithography, Spie Press.
- [19] **Tsai, S.F., Chen, C.Y., King-Terk Chan, H.Y.G. ve Ku, C.Y.**, (2003). Post Soft-bake Delay Effect on CD Variation in DUV Resist, *Proc of SPIE*, **5039**, 968–975.
- [20] **Url-8**, <<http://www.ee.washington.edu/research/microtech/cam/PROCESSES/>>, alındığı tarih: 04.04.2014.
- [21] **Url-9**, <<http://chem.rochetter.edu/>>, alındığı tarih: 04.04.2014.
- [22] **Url-10**, <<http://www.siliconfareast.com/lithoptical.htm>>, alındığı tarih: 04.04.2014.
- [23] **Kwok, A. ve Wong, K.**, (2001). Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography, Spie Press.
- [24] **Miura, S.S., Lyons, C.F. ve Brunner, T.A.**, (1992). Reduction of linewidth variation over reflective topography, Optical / Laser Microlithography V, San Jose, United States.
- [25] **Brunner, T.**, (1991). Optimization of Optical Properties of Resist Processes, Advances in Resist Technology and Processing VIII-1446.
- [26] **Lin, Q.Y., Chun, D.X. ve Chu, R.**, (1997). Process and Resolution Enhancement Using a New Inorganic Bottom Anti-reflective Layer for I-line Lithography, Proc. SPIE 3051, Optical Microlithography X, Volume 3051, p.204-214, Santa Clara, USA.
- [27] **Url-11**, <www.Drlitho.com>, alındığı tarih: 04.04.2014.
- [28] **Krisa, W., Garza, C. ve Mckee, J.**, (1995). 0,35 μ m i-line poly processing with a bottom antireflective coating (BARC), Proc. SPIE 2440, Optical/Laser Microlithography VIII, p.609-618, Santa Clara, USA.
- [29] **Williams, P., Shao, X. ve Strassner, K.**, (2001). The contributions of organic anti-reflective coatings in modern optical lithography, Semicon China Technical Symposium, Beijing, China.
- [30] **J.Riege, Canlas, A., D.Barone, D.Crawford, Y., S.Mony ve Ebrahimi, N.**, (2007). Resist Dispense Volume Reduction Using the Six Sigma Methodology, CS MANTECH Conference, Texas, USA.
- [31] **MicroSystems, H.**, Product Bulletin PI 2525, PI 2555, PI2574.

- [32] **Yung-Kuang ve Tsun-Ching**, (2006). Experimental analysis and optimization of photo resist coating process for photolithography in wafer fabrication, *Microelectronic Journal*, **37**(8), 746–751.
- [33] **Atthi, N. ve Nimitrakoolchai, O.**, (2009), Study of optimization condition for spin coating of the photoresist film on rectangular substrate by Taguchi design of an experiment, Yüksek Lisans Tezi, Songklanakarin J.Sci Technology, India.
- [34] **W.Jones, S.**, (2008). Photolithography, IC Knowledge.
- [35] **Lim, Y.H., Kim, Y.K., Choi, J.S. ve Lee, J.G.**, (2005). Process Optimization of Developer Soluble Organic BARC and its Characteristics in CMOS Devices, Proc. SPIE 5753, Advances in Resist Technology and Processing XXI, p-690, San Jose, USA.
- [36] **Eakin, R., Detweiler, S., Stagaman, G. ve Tesauro, M.**, (1997). Process effects resulting from an increased B.A.R.C. thickness, Proc. SPIE 3049, Advances in Resist Technology and Processing XIV, p-397-408, San Jose, USA.
- [37] **Wilson, C., Dammel, R.A. ve Reiser, A.**, (1997). Photoresist Materials: A Historical Perspective, Proc. SPIE 3050, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XI, p-38, San Jose, USA.
- [38] **Team(2008), M.**, Lithography: Theory and Application of Photoresists, Developers, Solvents and Etchants.
- [39] **King, M.**, (1980). The characteristics of Optical Lithography, Kodak Microelectronics Seminar.
- [40] **H.Dill, F. ve S.Hauge, P.**, (1975). Characterization of positive photoresist, IEEE Transactions on Electron Devices ED-22, No.7.
- [41] **H.Dill, F.**, (1975). Optical Lithography, IEEE Transactions on Electron Devices ED-22, No.7.
- [42] **Matthews, J.C.**, (1985), Hardening of Photoresist, US Patent, No: 4,548,688 dated 22.10.1985.
- [43] **Matthews, J.C. ve J.L. Willmott, J.**, (1984). Stabilization of Single Layer and Multilayer Resist Patterns to Aluminum Etching Environments, Proc. SPIE 0470, Optical Microlithography III: Technology for the Next Decade, p-194, Santa Clara, USA.
- [44] **Matthews, J., Ury, M., Birch, A. ve Lashman, M.**, (1983). Microlithography Techniques Using a Microwave Powered Deep UV Source, Proc. SPIE 0394, Optical Microlithography II: Technology for the 1980s, Santa Clara, USA.
- [45] **E.B.Vazsonyi, S.Holly ve Z.Vertesy**, (1986). Characterization of UV Hardening Process, *Microelectronic Engineering* **5**, 341–347.

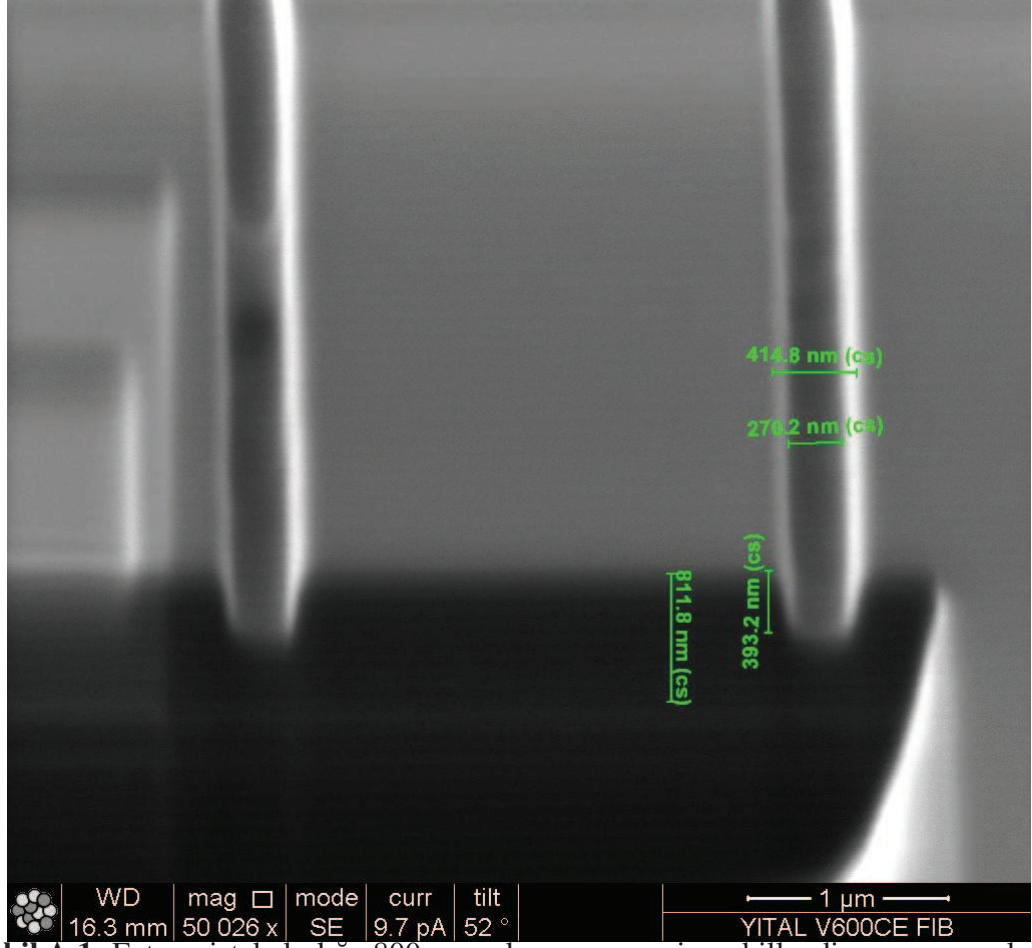
- [46] **Lansford, J.**, (2002), Method for Controlling Photoresist Baking Processes, US Patent, No: 6,362,116 B1 dated 26.03.2002.
- [47] **Douglas, M.**, (1991). Design and Analysis of Experiments, John Willey and Sons Inc.

EKLER

EK A.1 : Fotorezist kalınlığı 800 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü

EK A.2 : Fotorezist kalınlığı 600 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü

EK A.1



Şekil A.1: Fotorezist kalınlığı 800 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü

EK A.2



Şekil A.2: Fotorezist kalınlığı 600 nm olan numunenin şekillendirme sonrası kesit görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:Zeliha Özdoğan

Doğum Yeri ve Tarihi:ÇANAKKALE / 07.10.1984

Adres: Cevizli Mah. Tugay Yolu Cad. Fatma Çavuş Sok. No:12 Daire:8 Maltepe / İstanbul

E-Posta:zelihay@gmail.com

Lisans:2002-2008 / Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Y. Lisans:2011 – Devam / İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Programı

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Mart 2008 - Aralık 2010 Teklas Kauçuk A.Ş. / Kalite Güvence Müh.

Aralık 2010- Devam Tübitak-UEKAE / Araştırmacı