

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTODETEKTÖRLERİN GÜVENİLİRLİK
TESTLERİNİN İNCELENMESİ

AYKUT KAHRAMAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTODETEKTÖRLERİN GÜVENİLİRLİK
TESTLERİNİN İNCELENMESİ

AYKUT KAHRAMAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE
2015

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF PHOTODETECTORS'
RELIABILITY TESTS**

AYKUT KAHRAMAN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SELIM SIVRIOGLU

GEBZE
2015



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/06/2015 tarih ve 2015/36 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Aykut Kahraman'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

ÜYE

: YRD. DOÇ. DR. AHMET SINAN ÖKTEM

ÜYE

: DOÇ. DR. ALİ TANGEL

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Hızlandırılmış güvenilirlik testlerinin amacı, üretimi yapılan veya yapılacak olan yarı iletken devrelerin güvenilirleri hakkında hızlıca bilgi sahibi olmaktır. Daha sonra test sonuçları kullanılarak güvenilirlik sınırları içerisinde ortalama kullanım süreleri hesaplanır.

Bu çalışmada yarı iletken teknolojisi kullanılarak üretilen entegre devrelerin ve foto detektörlerin güvenilirlik testleri incelenmiş, uluslararası standartlara göre kategorize edilmiş ve literatürde yer alan örneklere kaynaklarıyla birlikte yer verilmiştir. İlk olarak foto detektörlerin çalışma prensibini anlama adına genel olarak yarı iletken fiziğinden ve diyottan bahsedilmiş ve ardından güvenilirlik ekseninde üretim aşamaları anlatılmıştır. Son olarak, yapılan güvenilirlik testinin sonuçları değerlendirilmiş ve istatistiksel veriler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güvenilirlik, yaşam süresi, bozulma verisi, hızlanma faktörü, Arrhenius ilişkisi, Eyring ilişkisi, voltaj- stres hızlanması.

SUMMARY

The purpose of accelerated reliability tests is to quickly acquire reliability information about manufactured integrated circuits. Then these accelerated test results are used to predict the mean time to failure at the use conditions.

In this work, the results of integrated circuit's and photodetector's reliability tests, which were manufactured by using the semiconductor technology, were investigated, classified according to the international standards, and some recent studies of reliability tests were presented with their references at the literature. At the beginning, the semiconductor physics and diode were presented to understand the operating principle of photodetectors. Then semiconductor manufacturing process faults, which are related to the integrated circuit reliability, were described. Finally, the reliability test results were explained and statistical datas were obtained.

Key Words: Reliability, lifetime, degradation data, acceleration factor, Arrhenius relationship, Eyring relationship, voltage- stress acceleration.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyen değerli aileme,

Bilgisi ile bu çalıŐmanın oluŐmasının yolunu açan danıŐmanım Prof. Dr. Selim SİVRİOğLU' na,

ÇalıŐmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini hiğbir zaman esirgemeyen TÜBİTAK bünyesindeki YİTAL' de çalışan iÇ arkadaşlarıma ve birim amirlerime

ve göstermiŐ olduğu desteklerinden dolayı sevgili eŐim H. Özge KAHRAMAN' a en içten teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve İçeriği	1
1.2. Literatür Özeti	2
2. YARI İLETKENLER	4
2.1. Bant Aralığı	4
2.2. Yarı İletkenlerin Kristal Yapısı	7
2.3. Yarı İletkenlerin Katkılanması	8
3. DİYOT	10
3.1. P- N Ekleme	10
3.2. İleri Kutuplama ve Ters Kutuplama	12
4. FOTODİYOT	14
4.1. Fotodiyotun Direnci	15
4.2. P- i- N Fotodiyot	16
5. YARI İLETKEN DEVRELERİN ÜRETİM VE TEST AŞAMALARI	18
5.1. Temiz Alan	19
5.2. Fotolitografi	22
5.3. Depolama	24
5.4. Aşındırma	27
5.4.1. Islak Aşındırma	28
5.4.2. Kuru Aşındırma	29
5.5. İyon Ekme(Katkılama)	30

5.6. Kimyasal- Mekanik Parlatma(CMP)	31
5.7. Test ve Paketleme	33
5.7.1. İlk Test Aşaması	33
5.7.2. Paketleme Sonrası Elektriksel Testler	34
5.7.3. Paketleme	35
6. GÜVENİLİRLİK TESTLERİ	39
6.1. Güvenilirlik Test Metotları	40
6.1.1. Test Eleman Gruplarının Değerlendirilmesi	40
6.1.2. Son Ürün Testleri	41
6.2. Hızlandırılmış Güvenilirlik Testi(Yaşlandırma)	46
6.3. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	50
6.3.1. Ki- Kare Dağılımı	51
7. TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	54
7.1. Yüksek Sıcaklık Raf Ömrü Testi(120°C - %50 Bağıl Nem)	54
7.2. Ki- Kare Yöntemiyle İstatistiksel Verilerin Hesaplanması	60
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

λ	: Birim zamanda oluşan bozulma
If	: Foton akımı
AC	: Alternatif akım
AF	: Hızlanma faktörü
CL	: Olasılık dağılımındaki güvenilirlik seviyesi
CMP	: Kimyasal mekanik aşındırma
CVD	: Kimyasal depolama
DC	: Doğru akım
Ex, y	: 'x' ve 'y' eksenlerindeki sapmalar
FIT	: Bir milyar cihaz saat süresinde oluşan bozulma oranı
If	: Foton akımı
LPCVD	: Düşük basınçta fiziksel depolama
MTTF	: Test edilen örnek sayısının ömür dağılımının ortalaması
NA	: Lens açıklığı
PA	: Ön yükseltici
PVD	: Fiziksel depolama
TDH	: Toplam cihaz süresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Periyodik tablo.	4
2.2: a) Atomların orbital yapısı, b) iletkenlik ve yalıtkanlık bandı.	5
2.3: Enerji bantları, a) Alüminyum(Al), b) sodyum(N), c) silikon(Si) , d) silisyum dioksit(SiO ₂).	6
2.4: a) Silikon kristal yapısı, b) 2 boyutlu kovalent bağ gösterimi.	7
2.5: a) N- tipi(Arsenik) katkılanmış silikon, b) verici enerji bandı.	8
2.6: a) P-tipi(Bor) katkılanmış silikon, b) alıcı enerji bandı, c)boşluk hareketi, d) boşluk hareketi, e) boşluk hareketi.	9
3.1: Diyotun gösterimi ve kutuplama yönleri.	10
3.2: P- N jonksiyonu ve bölgelerin potansiyel değişimleri.	11
3.3: P- N eklemlili diyot enerji diyagramı.	12
3.4: a) İleri yönde kutuplama, b) ters yönde kutuplama.	13
4.1: Optik bant.	14
4.2: P- N fotodiyot.	14
4.3: Fotodiyotun akım- gerilim grafiği.	15
4.4: Diyotun AC ve DC direnci.	16
4.5: P- i- N fotodiyot şematik gösterimi.	17
5.1: Entegre devre üretim akışı.	19
5.2: Temiz alan sınıflandırılması.	20
5.3: a) Maske camında kalan partiküllerin şekillendirmeye etkisi, b) pul üzerindeki partiküllerin iyon katkılama etkisi.	21
5.4: Genel olarak 1000 sınıfı temiz alan yapısı.	22
5.5: a) Fotorezist akıtma, b) döndürülerek kaplama.	23
5.6: Pul üzerine tasarım verilerinin yansıtılarak şekillendirilmesi.	24
5.7: a) LPCVD prosesi, b) silisyum üzerine dielektrik malzeme depolama.	25
5.8: Elektromigrasyon etkisi.	26
5.9: a) CVD prosesi, b) PVD prosesi.	26
5.10: Entegre metal depolama sistemi.	27
5.11: a) Fotorezist şekillendirme, b) polisilikon aşındırma, c) fotorezist silme.	27

5.12:	a) Islak aşındırma, b) yıkama, c) kurutma.	28
5.13:	Farklı tiplerde aşındırma yöntemleri.	29
5.14:	Kuru aşındırma.	29
5.15:	İyon implant cihazı.	30
5.16:	İyon implant ve ısı işlem sonrası difüzyon etkisi.	31
5.17:	CMP Proses kesiti.	32
5.18:	a) Prob istasyonu, b) kontak alma düzeneği.	33
5.19:	Kaynak, mercek, detektör.	34
5.20:	Merkez kayması ve gerilim çıkışları.	35
5.21:	Tel bağlanmış detektör ve kılıf.	36
5.22:	Tel bağlama sonrası çatlak oluşumu.	37
5.23:	Yalıtkan epoksi uygulaması.	38
6.1:	Küvet eğrisi.	47
6.2:	Aktivasyon enerjisi gösterimi.	48
6.3:	Hızlanma faktörü ile aktivasyon enerjisi ve sıcaklık ilişkisi.	49
7.1:	Sıcaklık ve nem kontrollü test cihazı.	55
7.2:	Test cihazının kontrol ünitesi.	56
7.3:	Kadranların optik kazançlarının ortalamaları.	57
7.4:	Kadranların karanlık akımlarının ortalamaları.	57
7.5:	Detektörlerin taban akımları.	58
7.6:	Kadranların dirençlerinin ortalamaları.	58
7.7:	GRD Dirençleri.	59
7. 8:	Farklı çevresel sıcaklıklara göre hızlanma faktörünün değişimi.	61
7.9:	FIT Değeri değişimi.	61

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Farklı malzemelerden üretilmiş fotodiyotların çalışma parametreleri.	17
5.1: Temiz oda için 209E Amerikan Standartları.	20
6.1: Test eleman grup örnekleri.	41
6.2: Güvenilirlik test standartları.	41
6.3: Son ürün güvenilirlik ömür testleri.	42
6.4: Son ürün güvenilirlik çevresel testler.	43
6.5: Son ürün güvenilirlik mekanik testler.	45
6.6: Bozulma mekanizmaları ve aktivasyon enerjileri.	49
6.7: Bozulma oranı ile ilgili terimler.	51
6.8: %60 Güvenilirlik seviyesine göre ki- kare değerleri.	52
6.9: Yüksek güvenilirlik seviyelerindeki ki- kare değerleri.	52
7.1: Test öncesi ve sonrası tüm değerlerin karşılaştırılması.	59
7.2: Test koşulları ve kullanılan sabitler.	60

1. GİRİŞ

Entegre devrelerin güvenilirlikleri, yarı iletken üreticileri için önemli bir konudur. Hızlıca değişen ve karmaşıklaşan teknolojik cihazların ve bileşenlerinin güvenilirlik testleri, müşterilerin daha iyi güvenilirlik beklentileri, hızlı üretimle birlikte çok daha önemli bir pozisyona gelmiştir. Bundan dolayı, uzun kullanım ömrü ve düşük bozulma oranı yarı iletken ürünlerden beklenen özelliklerin başında gelmektedir.

Tarihsel olarak düşünüldüğünde, yarı iletken üreticileri günlük kullanım kadar savunma sanayi için, güvenilirliği kritik öneme sahip parçalar üretmektedirler. Daha yakın zamanda ise; entegre devreler arabalarla bütünleşik hale gelmiştir ve dolayısıyla yarı iletken üreticileri rekabet gücü elde etme adına, düşük maliyetli ve yüksek güvenilirlikte ürünler üretmek zorundadırlar. Otomotiv ve askeri endüstri tarafından, güvenilirlik testlerini standart hale getirmek için, yarı iletken üreticilerinin uymak zorunda oldukları bir takım standartlar geliştirilmiştir.

Uzun süredir mühendisler, güvenilirlik hesapları için hızlandırılmış test deneylerini kullanmaktadırlar. Hızlandırılmış testlerin amacı ise; üretilen ürünün güvenilirliği ve ortalama kullanım süresi hakkında hızlıca bilgi sahibi olmaktır. Güvenilirlik testleri üzerinde geniş kapsamlı olarak ileriki bölümlerde durulacaktır.

1.1. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasının amacı; yarı iletken malzeme olarak silisyum pul üzerine üretimi yapılan dört kadranlı fotodetektörlerin, üretim aşamaları bittikten sonra kullanılacakları ortam şartlarına göre kullanım süreleri ve bozulma oranları hakkında bilgi sahibi olabilmek için, hızlandırılmış yorma testleri hakkında literatür araştırması yapmak ve standart haline getirilmiş test prosedürleri incelenerek, fotodetektörler için uygun olan testlerin deney düzeneklerinin oluşturulması ve testlerinin yapılarak sonuçlarının yorumlanmasıdır. Aynı zamanda, üretim aşamasında, güvenilirlik adına dikkat edilmesi gereken noktalar anlatılmıştır.

Tez kapsamında; kısa bir literatür özeti anlatıldıktan sonra ilk olarak yarı iletken malzemelerin özellikleri ve fotodetektörlerin temelini oluşturan diyotlar anlatılmış, daha sonra; fotodetektörlerin üretim aşamalarının üzerinde durulmuş ve

güvenilirlik testleri açıklanmıştır. Son olarak ise; yapılan yorma testi ve sonuç değerlendirme bölümü açıklanmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Güvenilirlik testleri yapılan fotodetektörler, yarı iletken teknolojisi ile Si taban üzerine üretilmiş, birbirine eş dört PİN diyottan oluşan algıyıcılardır. Literatürde, yarı iletken teknolojisi kullanılarak üretilen entegre devrelerin güvenilirlik testleri incelenmiştir.

Hızlandırılmış testler, niteliksel ve niceliksel testler olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Son derece hızlandırılmış yaşam testleri, stres bağımlı yaşam testleri ve çevresel testleri içeren niteliksel hızlandırılmış testler üzerine çalışmalar yapılmıştır [1]. İlk olarak, temel hızlandırılmış testlerin temelinde yer alan fiziksel ve pratik fikirler belirlenmiş, zaman- dönüşüm model konsepti hızlandırılmış bozulma modeli olarak tanımlanmış, sırasıyla sıcaklık, nem ve gerilim(volt) bozulma mekanizmalarına etkisi gösterilmiş ve iki veya daha fazla parametrenin etki ettiği hızlandırma testlerine ait örnekler verilmiştir. Yarı iletken cihazlardaki bozulmalarla ilgili bozulma türleri, en önemli bozulma mekanizmaları, modelleri ve bu modellere ait sabitlerin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [2]. Yarı iletken ürünün bozulma oranının belirlenmesinde, rastgele seçilen belli sayıda örneğin, yüksek sıcaklıkta çalışma ömür testine tabi tutulması ve ekstrapolasyon yöntemiyle istatistiksel olarak ortalama ömür hesabının yapılması gerçekleştirilmiştir [3]. Epoksi kullanılarak paketlenmiş yarı iletken cihazlara yönelik yüksek sıcaklık düşük nem oranı testleri yapılarak ekstrapolasyon yöntemiyle ömür verileri elde etmeye yönelik testler incelenmiştir [4]. Paketleme aşamasındaki tel bağlama sırasında oluşan yapışma hataları karakterize edilmiş ve tel bağlanan metal yapısı incelenmiş, tel bağlama sırasında oluşan yüksek stres noktalarındaki bağ zayıflıklarının ve metaldeki çöküntülerin önüne geçmek için, alüminyum metal depolama prosesi ile metal yapısının değiştirilmesi ve tel bağlama parametrelerinin değiştirilmesi işlemleri uygulanabilmektedir [5]. Çip- paket etkileşimindeki montaj ve güvenilirlik streslerinin sistematik analizi, geliştirilen yeni bir modelleme metodolojisi ile plastik gerinimi yakalamak ve elasto- plastik modeli izlemek için çok katlı- sıralı simülasyonlar kullanılmıştır. Bu sayede çatlak oluşumunun paketleme ve daha sonrasında sahada kullanım sırasında arttığı gözlenmiştir [6]. Bir başka çalışmada

entegre devre bileşenlerine hızlandırılmış sıcaklık çevrimi testleri uygulanmış ve elde edilen veriler ile gözlemlenen bozulma türlerine göre matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, entegre devrelerin kullanım koşullarına göre tahmini ömür hesaplamalarında kullanılmıştır ve ardından JEDEC standartları ile karşılaştırılmıştır [7].

Bu tez çalışmasında olduğu gibi, fotodetektörlerin güvenilirlik testleri ve analizi konulu bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Literatürdeki güvenilirlik çalışmaları üretim süreçlerini de ilgilendirdiğinden bu çalışmada benzer şekilde, ömür testleri öncesi üretim, test ve kılıflama aşamalarında güvenilirliği etkileyebilecek proses parametreleri üzerinde durulmuş ve genel olarak entegre devre elemanları, çip- paket montajı ve kullanılan yarı iletken malzemelerin yapısal olarak incelenmesi konularında yapılan güvenilirlik ve ömür testleri fotodetektörlere uyarlanmıştır.

2. YARI İLETKENLER

Yarı iletkenler, elektriksel olarak iyi iletken olan metaller(bakır, alüminyum, tungsten, vb.) ile elektriksel olarak iyi yalıtkan olan maddeler(kauçuk, plastik, kuru tahta, vb.) arasında bulunurlar. Güncel olarak en sık kullanılan yarı iletken maddeler silikon(Si) ve germanyum (Ge)' dur. Bu iki element de periyodik tablonun IVA grubunda yer almaktadırlar. Periyodik tablo Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Başka elementlerin kendi aralarında veya silikon ve germanyum ile oluşturdukları bileşikler de yarı iletkenlik özelliği göstermektedirler(SiGe, GaAs, SiC, vb.). Yarı iletkenlerin bir diğer ve en önemli özellikleri ise; elektrik iletkenlikleri yönünden kontrol edilebilir olmalarıdır. Elektriksel olarak kontrol etmek için katkılama(yarı iletkeninin istenerek ve istenen miktarda saflığının değiştirilmesi) adı verilen yöntem ve elektrik alan uygulama yöntemi kullanılmaktadır. İleriki bölümlerde ayrıca değinilecektir.

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

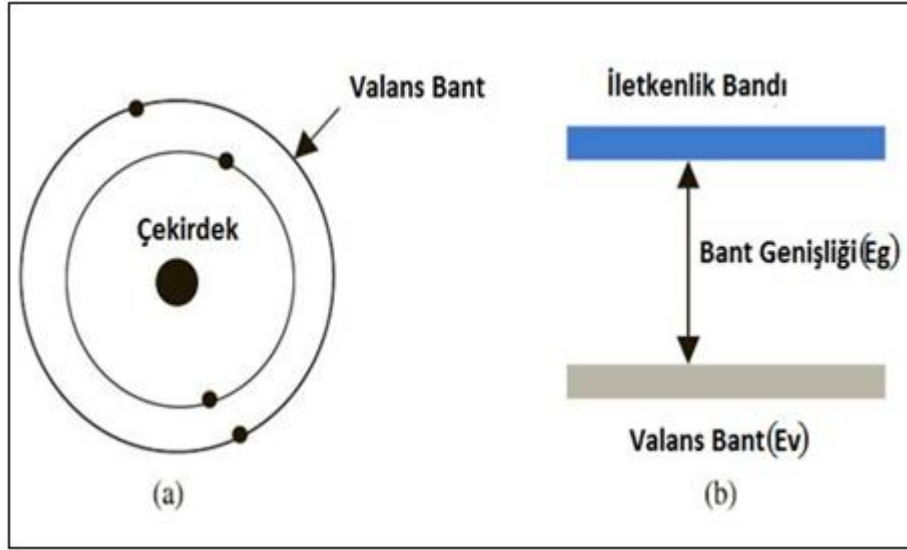
Şekil 2.1: Periyodik tablo.

2.1. Bant Aralığı

Yarı iletkenlerin iletkenler ve yalıtkanlarla arasındaki temel fark bant aralığıdır. Şekil 2.2 a)' da gösterildiği gibi bütün malzemeler atomlardan oluşurlar ve her bir atom kendi orbital yapısına sahiptir. Atomun elektron yörüngeleri kabuk olarak adlandırılmaktadır, çünkü çekirdeğin etrafındaki yörüngeler üç boyutlu olarak

bakıldığında kabuk gibi görülmektedir. Şekil 2.2 b)' de ise bu üçboyutlu kabuk şeklinin kesit görünümü bulunmaktadır. En dıştaki kabuk 'valans bandı' olarak adlandırılır ve elektrik akımını iletmez. Ancak bir elektron çekirdeğin çekiminden kurtulur ve valans bandı terk ederse serbest elektron haline gelir ve elektrik akımını iletir.

Birçok atom katı oluşturmak için birleştiğinde, Şekil 2.2 b)' de gösterildiği gibi her birinin yörüngeleri üst üste gelir ve 'bantları' oluştururlar.



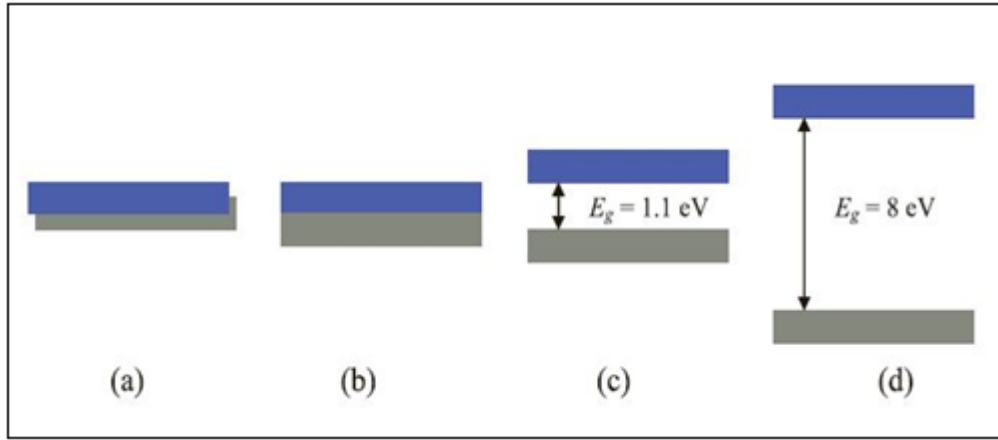
Şekil 1.2: a) Atomların orbital yapısı, b) iletkenlik ve yalıtkanlık bandı.

İletkenlik bandındaki elektronlar katıların içinde nispeten serbestçe hareket edebilirler ve katı malzemeye elektrik alan uygulandığında elektrik akımını iletirler. Valans bandındaki elektronlar serbestçe hareket edemezler ve bundan dolayı elektrik akımını iletmezler [11]. Coulomb kanununa göre elektrik yükleri arasındaki çekim kuvveti, aradaki mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalmaktadır [14]. Dolayısıyla üst kabuklarda yer alan elektronlara etki eden çekim kuvveti daha azdır. Bunun yanında elektronun yörüngesinin çapı arttıkça, potansiyel ve kinetik enerjisi toplamı da artmaktadır. Valans bandı daha az elektrik potansiyeline sahiptir ve elektronlar valans bandında kalma eğilimi gösterirler.

Malzemelerde özdirenç ($\mu\Omega.cm$), malzemenin elektrik akımına karşı koyduğu direnç olarak adlandırılır. İyi bir iletken çok düşük özdirence ve iyi bir yalıtkan ise çok yüksek bir özdirence sahiptir. Örneğin; oda sıcaklığında alüminyumun özdirenci $2,7 \mu\Omega.cm$, sodyumun $4,7 \mu\Omega.cm$, silikonun $10^{11} \mu\Omega.cm$ ve silikon dioksitin ise $10^{18} \mu\Omega.cm$ ' den büyüktür.

Metallerin birçoğunda iletkenlik bandı ile valans bandı ya üst üste konumdadır ya da aralarında çok küçük bir boşluk bulunmaktadır ($<0,05$ eV). Bu yüzden oda sıcaklığında elektronlar için valans bandından iletkenlik bandına geçmek çok kolaydır ve iletkenlik bandında birçok elektron bulunur (300 K $\approx 0,0259$ eV). Bu durum da metallerin niye iyi bir iletken malzeme olduklarını açıklamaktadır. Yalıtkanlar için ise, iletkenlik bandı ile valans bandı arası mesafe oldukça fazladır (>8 eV) ve iletkenlik bandında birkaç elektron bulunmaktadır denilebilir.

Atom ve yarı iletken teorisinde kullanılan *elektron volt* (eV) birimi, bir elektronun bir V' luk gerilim potansiyeline karşı hareket etmesi sonucu kazandığı enerjidir. Yarı iletkenler için bant genişliği ne yalıtkanlar kadar uzak ne de iletkenler kadar yakın konumdadır ($0,7$ eV – $1,4$ eV). Örneğin; silikonun bant genişliği $1,1$ eV ve germanyumun bant genişliği ise, $0,67$ eV' dur. Saf silikon için (oda sıcaklığında) bir santimetre küpünde on trilyon elektrondan sadece bir tanesi iletkenlik bandındadır ve kalan elektronlar valans bandındadır denilir. Şekil 2.3' te bazı elementlerin enerji bantları ve bant genişlikleri gösterilmiştir.



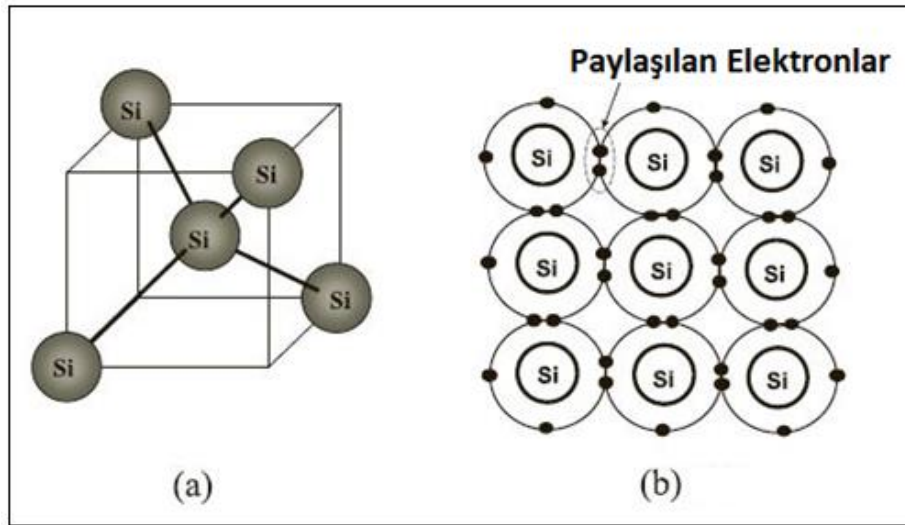
Şekil 2.3: Enerji bantları, a) alüminyum(Al), b) sodyum(N), c) silikon(Si), d) silikon dioksit(SiO₂).

Yarı iletkenlerde, sıcaklığın artması ile valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişleri olur ve direncin düşmesiyle elektrik akımı geçişi artar. Buna karşılık iletkenlerde ise; taşıyıcı elektron sayısı sıcaklık artışıyla artmaz aksine, sıcaklığın artması ile elektronların hareketinde oluşan titreşimler akım geçişini zorlaştırır. Bundan dolayı iletkenlerin direnci sıcaklıkla artar ve ısınan cihazlarda efektif verimde düşüş gözlenir. Yalıtkanların bant aralığı çok geniş olduğu için, sıcaklık artışından etkilenmezler. Mutlak sıcaklık değerinde (-273 K) tüm

malzemelerin elektronları valans bandındadır, bunun dışındaki sıcaklıklarda ise iletkenlik bandında mutlaka az da olsa yalıtkanlarda elektron bulunmaktadır. Bu durumdan dolayı pratikte mutlak yalıtkan malzeme yoktur denilir.

2.2. Yarı İletkenlerin Kristal Yapısı

Silikon ve Germanyum elementlerinin her ikisinin de son yörüngelerinde 4 tane elektron bulunmaktadır. Atomlar arasında elektronların ortak kullanılması ile *kovalent bağ* oluşmaktadır. Aynı cins atomlar kovalent bağ ile üç boyutlu, düzenli bir kristal yapı oluştururlar. Kristal yapı periyodik şekilde kendini tekrarlayan bir yapıdır. Katı cisimlerin çoğu kristal yapıdadır. Paylaşılan her elektron kendisini paylaşan komşu iki çekirdek tarafından eşit kuvvetle çekilmektedir. Silikon elementinin kristal yapısı ve kovalent bağ etkileşimi Şekil 2.4' te gösterilmiştir.

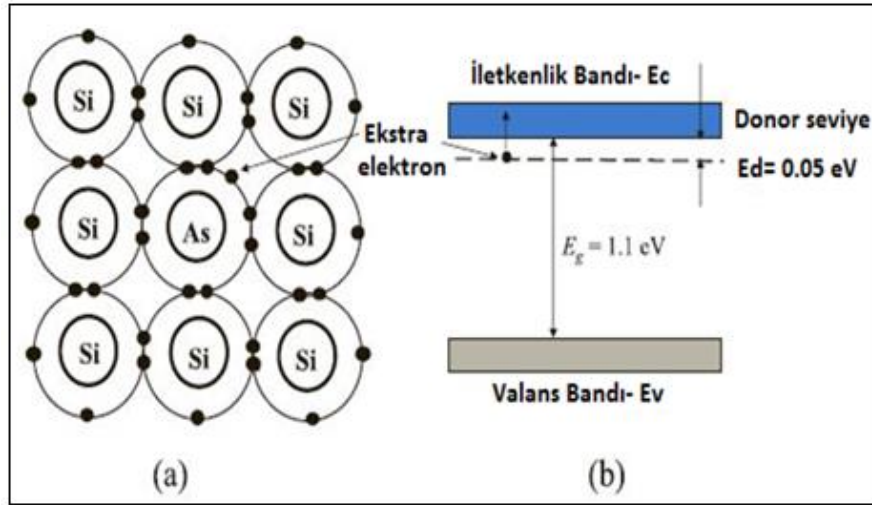


Şekil 2.4: a) Silikon kristal yapısı, b) 2 boyutlu kovalent bağ gösterimi.

Kristal yapıda ısı enerjisi olarak kovalent bağını koparan bir elektron hareketli hale gelir ve arkasında bir *delik* oluşturur. Oluşan delik pozitif yüke sahiptir ve elektronları çeker. Serbest kalan elektron ve oluşan delik *elektron- delik çifti* olarak adlandırılır. Elektron kaybeden atom ise pozitif yüklü hale gelir.

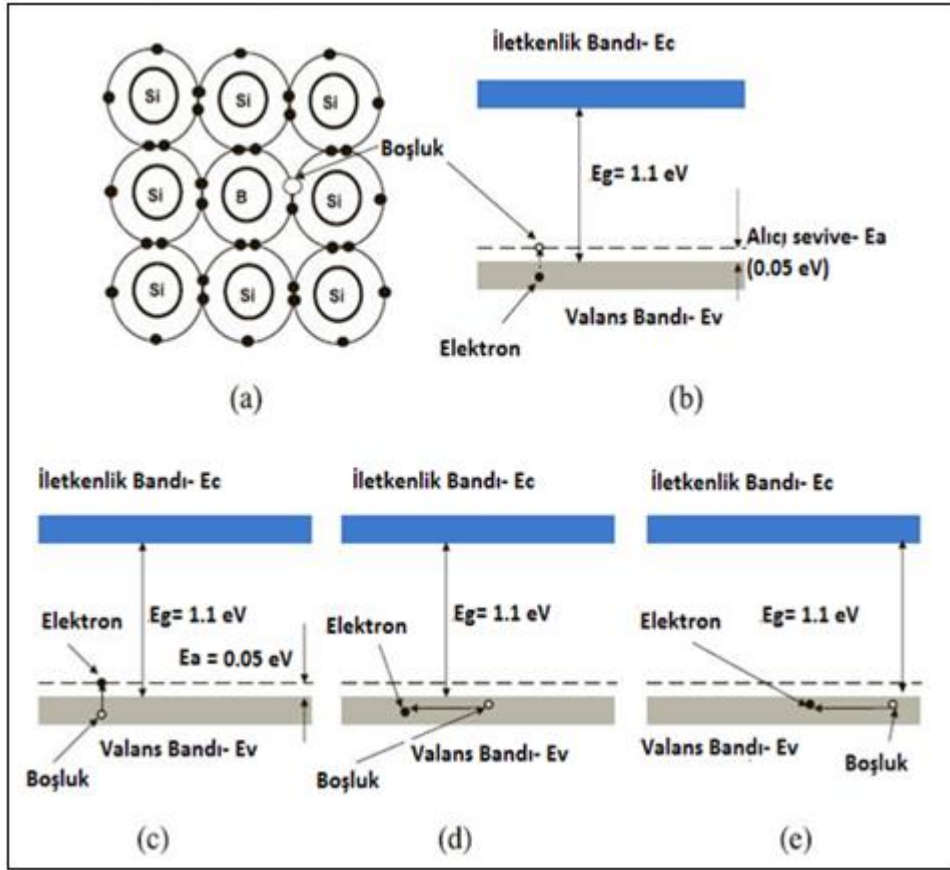
2.3. Yarı İletkenlerin Katkılanması

Saf kristal yapıları silikon gibi yarı iletkenlerin saflık dereceleri değiştirilerek iletkenlik dereceleri kontrol edilebilmektedir. İki farklı katkılama tipi bulunmaktadır. Periyodik tablonun 3A kolonunda bulunan *bor (B)* ile *p- tipi* katkılama veya periyodik tablonun 5A kolonunda bulunan *fosfor (P)*, *arsenik (As)*, *antimon (Sb)* gibi elementlerle *n- tipi* katkılama. N- tipi katkılama sonucu bir elektron açığa çıkar ve bu elementlere *donor- verici*, p-tipi katkılama sonucu ise atomlar arası bir boşluk oluşur ve bu elementlere ise *acceptor- alıcı* denir. Şekil 2.5' te gösterildiği gibi n- tipi katkılama sonucu oluşan ekstra elektron kolayca iletkenlik bandına sıçrayabilir ve serbest elektron halinde elektrik akımını iletir. Bu durum kullanılarak n- tipi katkılama miktarı artırılarak iletkenlik bandındaki serbest elektron miktarı artırılır ve yarı- iletken malzeme iletken hale getirilebilir.



Şekil 2.5: a) N- tipi (Arsenik) katkılanmış silikon, b) verici enerji bandı.

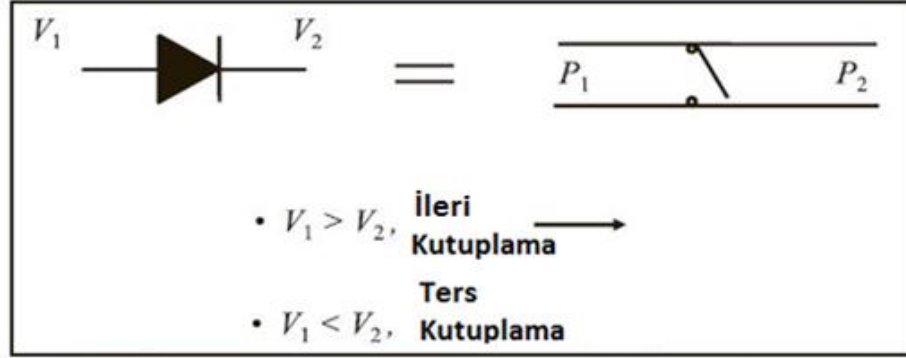
Şekil 2.6' da gösterildiği gibi silikona p- tipi (Bor, vb.) katkılama yapıldığı zaman boşluk meydana gelir ve valans bandından bir elektron sıçrayarak o boşluğu kolayca doldurur. Eğer elektrik alan uygulanırsa p- tipi katkılanmış yarı iletkene, valans bandındaki diğer elektronlar yine valans bandında oluşan boşluğu doldurarak hareket ederler ve böylece ardı ardına bir elektron hareketi meydana gelir ve bu durum da elektrik akımının iletilmesine olanak sağlar.



Şekil 2.6: a) P-tipi(Bor) katkılanmış Silikon, b) alıcı enerji bandı, c) boşluk hareketi, d) boşluk hareketi, e) boşluk hareketi.

3. DİYOT

Diyot *ileri kutuplandığı* zaman elektrik akımını bir yönde iletir ve *ters kutuplandığı* zaman ise elektrik akımının geçmesine izin vermez. Şekil 3.1’ de diyotun simgesel ve benzetimsel gösterimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Diyotun gösterimi ve kutuplama yönleri.

3.1. P- N Eklemi

P ve N tipi malzemeler bir kristal yapı içinde bir araya getirildiğinde iki bölge arasında bir P- N jonksiyonu (birleşme bölgesi) oluşur. Bu eleman yarı iletken diyot olarak bilinir ve tek yönde akım geçirir. P-N jonksiyonu diyot, fotodiyot, foton detektörü, transistör, ışık yayan diyot (LED) ve diğer yarı iletken elemanların temelini oluşturur.

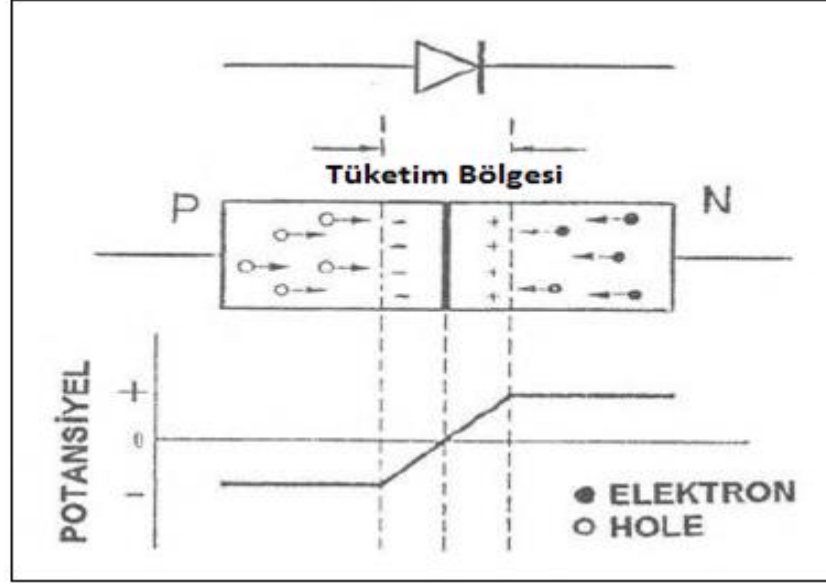
Jonksiyon oluşmadan önce N tarafında çok sayıda serbest elektron ve P tarafında ise çok sayıda delik mevcuttur.

P- N eklemi oluştuğunda;

- N tarafındaki iletkenlik bandında bulunan elektronlar pozitif yüklü P tarafına geçerken, geride pozitif yüklü donör (safsızlık) atomları bırakırlar. Bu geçişin sebebi ise, elektron yoğunluğunun çok olduğu yerden az olduğu yere doğru olan difüzyon akımıdır.
- P tarafına geçen elektronlar buradaki delikler ile birleşirler ve böylece nötr atomlar ortaya çıkar. N bölgesinde elektronun kaybeden atomlar (+) ve P bölgesinde elektron alarak deliklerini kaybeden atomlar ise (-) olurlar.

- Elektronların P tarafına difüzyonu, yine P tarafındaki azınlık elektronları tarafından itilme sonucu bir noktada durdurulur ve N elektronları eklem sol tarafında birikir [15].

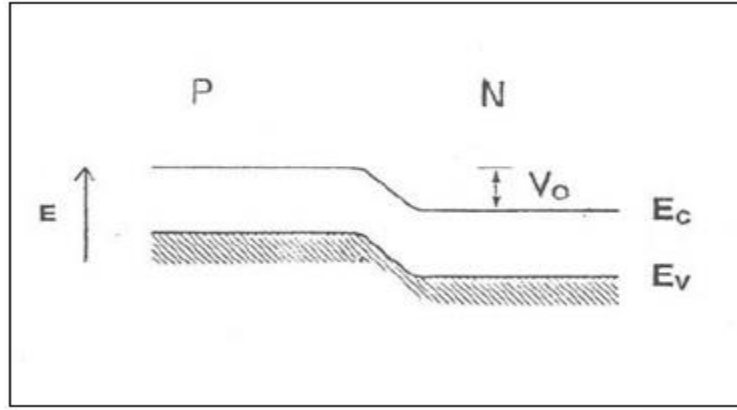
Şekil 3.2' de P- N jonksiyonu ve yarı iletkenlerdeki potansiyel değişimler gösterilmiştir.



Şekil 3.2:P- N jonksiyonu ve bölgelerin potansiyel değişimleri.

Yukarıdaki şekle göre; iki yarı iletkenin birleştiği bölgenin kalınlığı yaklaşık 1 μm ' dur. Bu bölgede atomlar nötrleştiğinden eklem bölgesi yük taşıyıcısı yönünden fakirleşmiş- *depletion* bölge olarak adlandırılır. Ayrıca *Shotky tabakası* olarak da adlandırılır ve yaklaşık olarak rezistivitesi yüksek olduğu için yalıtandır denilebilir. Eklem bölgesinin N tarafına yakınlarında çok dar bir pozitif tabaka ve P bölgesi yakınlarında ise çok dar bir negatif tabaka ortaya çıkmıştır [15].

P- N eklemine, N bölgesinden elektronlar P tarafına geçtiği için aynı zamanda N tarafından enerji geçişi de gerçekleşmiş olmaktadır. Bundan dolayı P tarafının enerji seviyesi daha yüksek görülmektedir. Bu durum Şekil 3.3' te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: P- N eklemli diyot enerji diyagramı.

3.2. İleri Kutuplama ve Ters Kutuplama

Bir voltaj kaynağının pozitif kutbu P- N diyotunun P tarafına ve negatif kutbu ise N tarafına bağlanırsa, diyot ileri kutuplanmış olacaktır. Bu durumda ise;

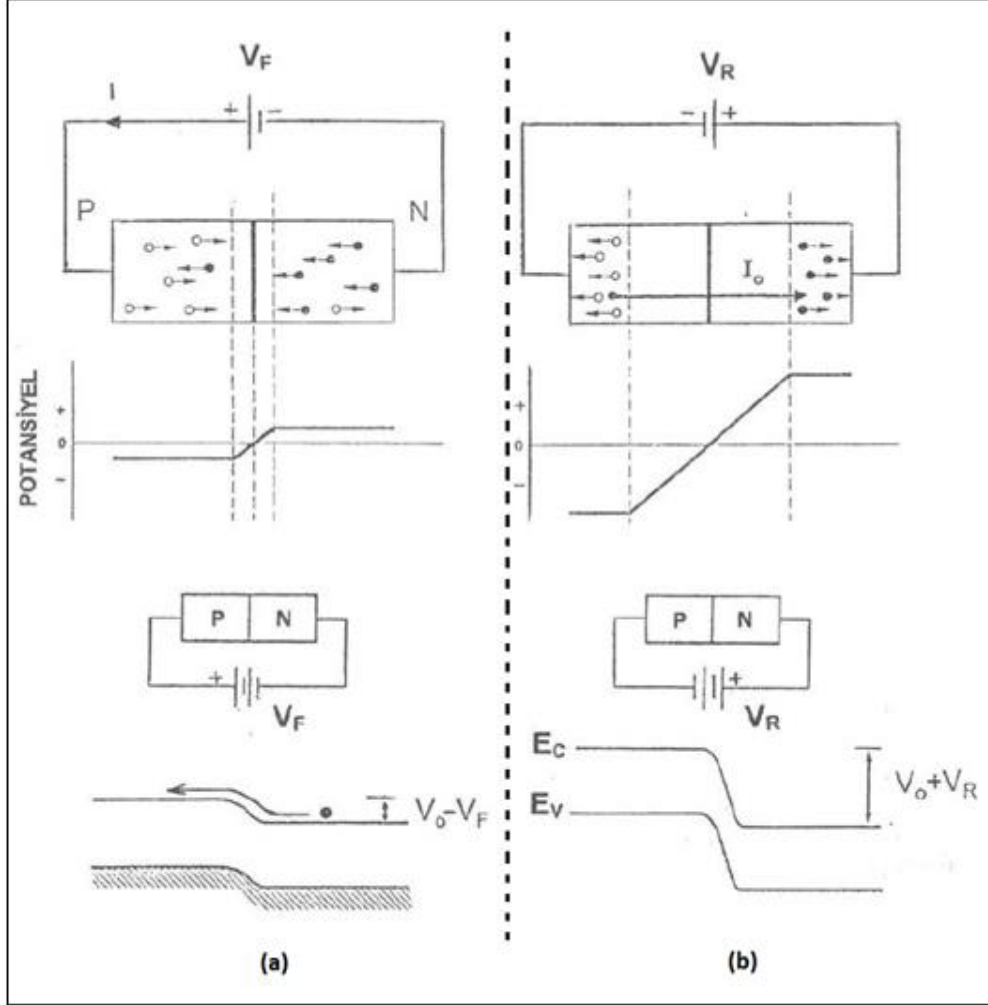
- P bölgesindeki boşluklar ve N bölgesindeki elektronlar eklemeye doğru itilirler.
- Fakirleşmiş bölge daralır.
- Diyottan akım geçmeye başlar ve fakirleşmiş bölge diyotun direnci en yüksek bölgesi olduğundan dolayı akımın oluşturduğu gerilim tamamen bu bölgeye düşer.
- Bunun sonucunda eklem bölgesinin potansiyeli uygulanan ileri kutuplama gerilimi kadar azalır ($V_0 - V_F$) ve azalan potansiyel engeli nedeni ile elektronlar engeli kolaylıkla geçerek devrede elektron akışı tamamlanmış olur [15].

Ters kutuplama ise voltaj kaynağının pozitif kutbu P- N diyotunun N tarafına ve negatif kutbu ise P tarafına bağlanmasıyla oluşur.

Bu durumda ise;

- P ve N' deki elektronlar diyodun uçlarına doğru çekilirler.
- Eklem bölgesi genişler.
- Eklem bölgesinin potansiyeli uygulanan ters kutuplama gerilimi kadar artar ($V_0 + V_R$) ve diyottan akım geçmez.
- Sadece boşlukların oluşturduğu çok düşük bir sürüklenme akımı ortaya çıkar ve ters akım- karanlık akım (I_0) olarak adlandırılır. Değeri yaklaşık olarak 1 mikro Amper' dir.

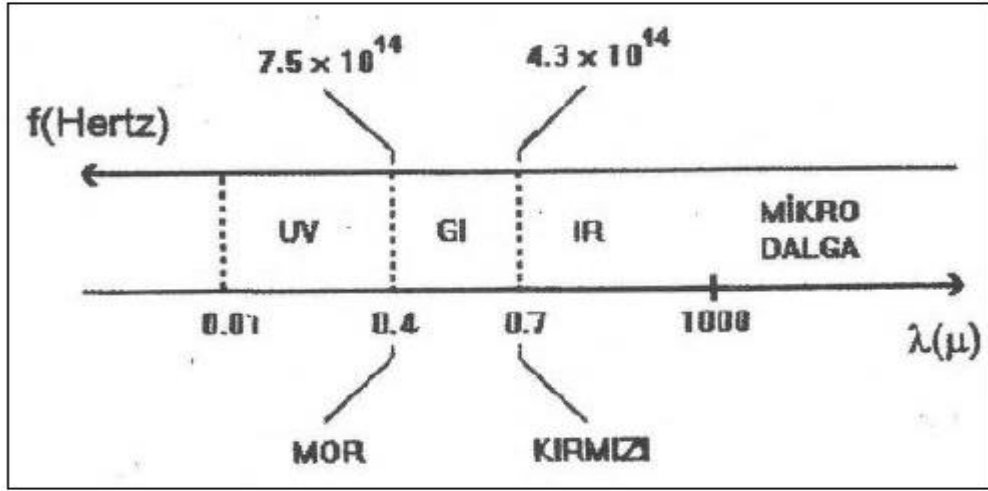
Ters akım değeri çok düşük olmasına rağmen ters kutuplama voltajı belli bir değerin üzerine çıkarıldığında birden artar ve eklem kırılmasına (breakdown) yol açar. Aşağıdaki Şekil 3.4' te ileri ve ters kutuplama görsel olarak anlatılmıştır.



Şekil 3.4: a) İleri yönde kutuplama, b) ters yönde kutuplama.

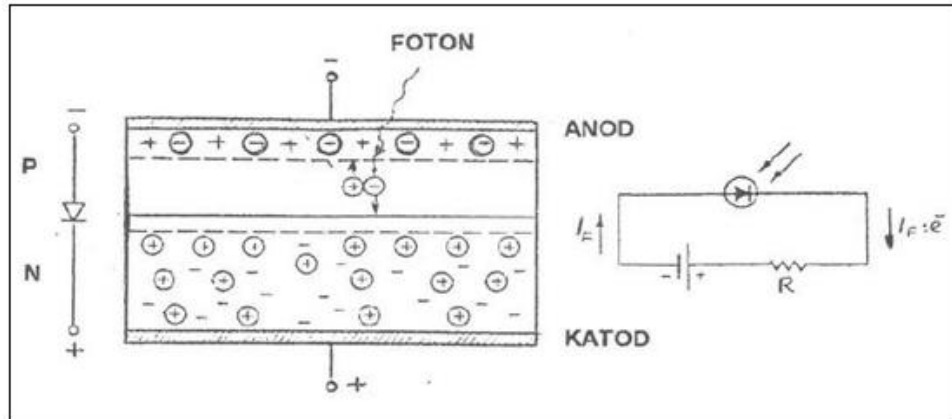
4. FOTODİYOT

Görünür ışığı, IR veya ultraviyole ışımayı algılayıp elektriksel sinyale çeviren bir dönüştürücüdür. Işıma girişi birimleri lux(görünür ışık için), Watt veya mWatt/m² olabilir. Elektriksel çıkış birimleri ise Amper veya Volt' tur [20]. Frekans ve dalga boyuna göre farklı ışımaların optik bant üzerindeki dağılımı Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



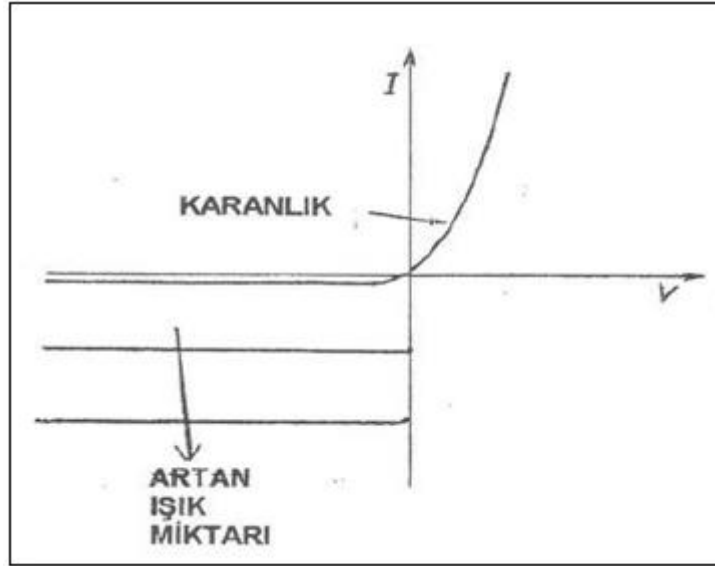
Şekil 4.1: Optik bant.

Işıma, ters kutuplanmış diyotun eklem bölgesine(fakirleşmiş bölge) düştüğünde foton ve kutuplama enerjisiyle birleşmiş olan elektron- hole çiftleri ayrılır ve zıt yönlere doğru hareket ederler. Böylece devreden akım geçmeye başlar(I_f). Şekil 4.2' de P- N fotodiyotun kesit görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.2: P- N fotodiyot.

Diyota hiç ışık düşmediği zaman(karanlık ortamda) çok az bir akım oluşmaktadır. Bu akıma karanlık akım denilir ve çevreden ısı enerjisi alan valans elektronların iletkenlik bandına çıkması sonucu oluşur. Diyota düşen ışık şiddeti arttıkça devreden geçen I_f akımı da artar. Fotodiyotun akım- gerilim karakteristiği aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Fotodiyotun akım- gerilim grafiği.

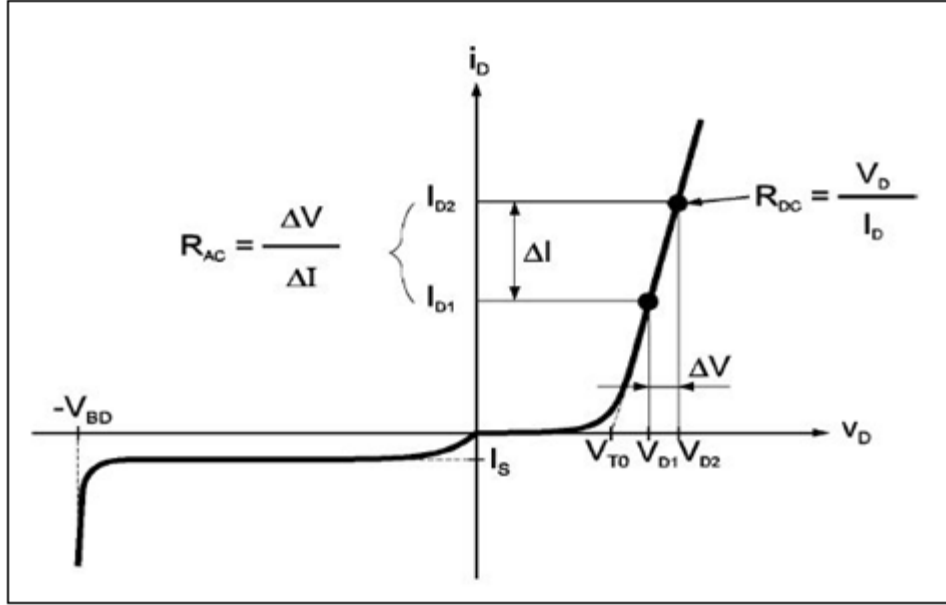
Fotonun oluşturduğu akım birimi; $I_f = \text{Coulomb/sn}$ ' dir.

$$I_f = (\text{foton sayısı/saniye}) * (e^- \text{ sayısı/foton}) * (\text{Coulomb}/e^-) \quad (4.1)$$

Foton sayısı/ saniye: Işık şiddeti, $(e^- \text{ sayısı/foton})$: Kuantum verimi olarak adlandırılır. Kuantum verimi yarı iletkeninin kristal türüne, yüzey enerji durumuna, ışının dalga boyuna bağlı bir parametredir.

4.1. Fotodiyotun Direnci

Diyotun direnci DC veya AC olarak tanımlanabilir. Çalışma noktasındaki direnç DC veya *statik direnç* olarak tanımlanır. Diyot karakteristiğinin belirli bir bölgesinde, gerilimdeki değişimin akımdaki değişmeye oranı AC veya *dinamik direnç* olarak tanımlanır. Şekil 4.4' te direnç tanımları gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Diyotun AC ve DC direnci.

4.2. P- i- N Fotodiyot

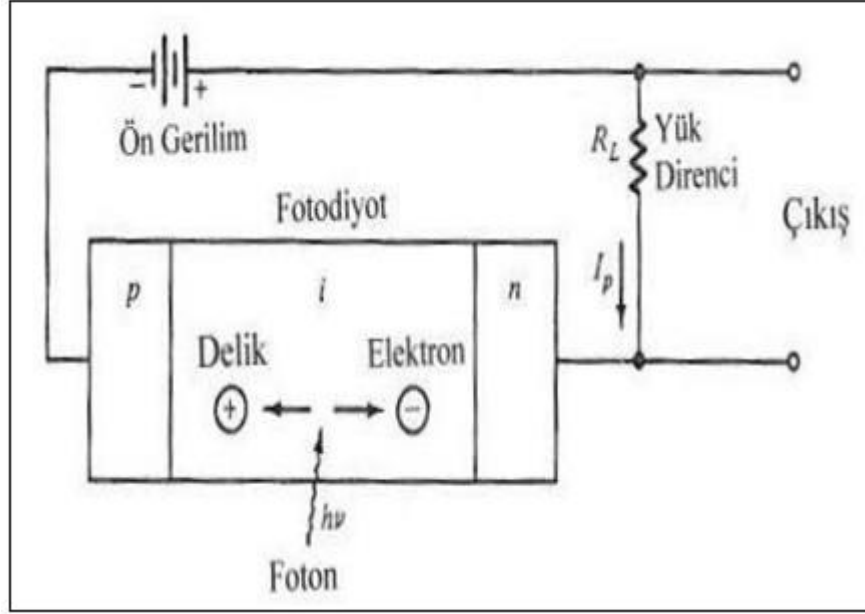
P- N yapının arasında katkılanmamış bir katman bırakılarak tüketim bölgesinin genişliği kontrollü bir şekilde genişletilebilir. I- bölgesi saf(intrinsic) anlamına gelmektedir ve diyota uygulanan ters gerilim tamamen bu bölgede görülür. Bu bölgeye düşen fotonun enerjisi ile oluşan elektron- delik çiftleri P ve N bölgelerine ulaşarak devreden akım geçmeye başlar. P- i- N yapısının P- N jonksiyonuna göre üstünlüklerini yazılacak olursa;

- Tüketim bölgesi geniş olduğu için birim zamanda daha fazla fotonun enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür.
- Tüketim bölgesinin kalınlığı kontrol edilebilir.

Fotodetektörlerin performans kriterleri ise şu şekilde sıralanabilir,

- Detektörün çalışma dalga boyunda duyarlılığı yüksek olmalı.
- Quantum verimi yüksek olmalı.
- Tepki süresi oldukça kısa olmalı(piko saniye).
- Detektör gürültüsü(sızıntı akımı) düşük olmalı.
- Güvenilirliği yüksek olmalı(uzun yıllar çalışabilmeli).

- Maliyeti düşük olmalı.



Şekil 4.5: P- i- N fotodiyot şematik gösterimi.

Tablo 4.1’ de ise farklı malzemelerle üretilen P- i- N fotodiyotların karakteristik değerleri gösterilmiştir [12].

Tablo 4.1: Farklı malzemelerle üretilmiş fotodiyotların çalışma parametreleri.

Parametre	Birim	Si	Ge	InGaAs
Dalga Boyu	nm	400-1100	800-1650	1100-1700
Cevap Verme	A/W	0.4-0.6	0.4-0.5	0.75-0.95
Karanlık Akımı	nA	1-10	50-500	0.5-2.0
Artım Süresi	ns	0.5-1	0.1-0.5	0.05-0.5
Bant Genişliği	GHz	0.3-0.7	0.5-3	1-2
Ön Gerilim	V	5	5-10	5

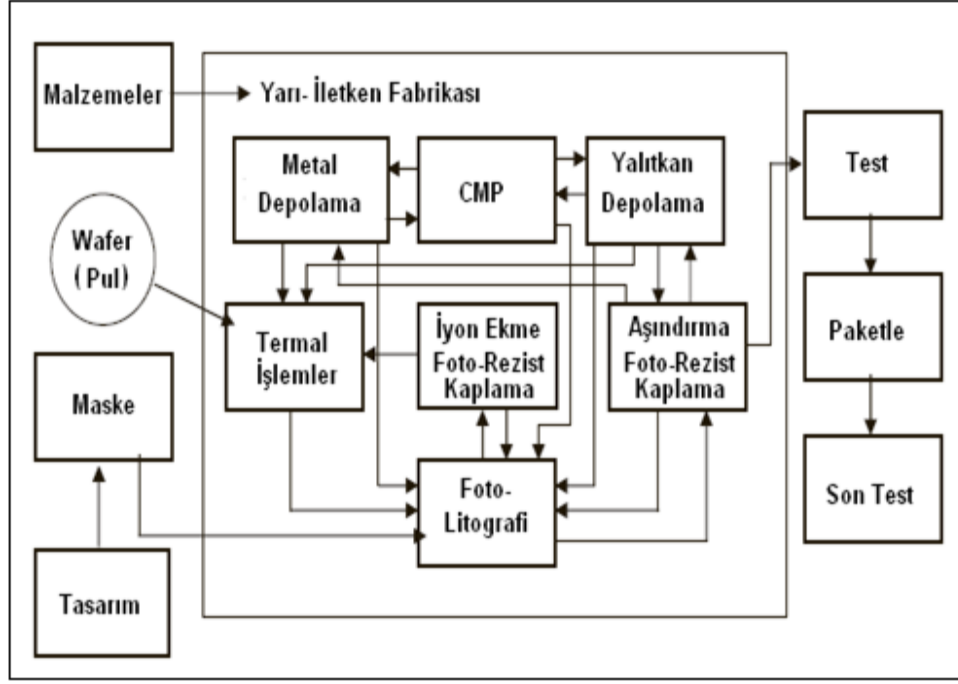
5. YARI İLETKEN DEVRELERİN ÜRETİM VE TEST AŞAMALARI

Yarı iletken devre üretimi oldukça karmaşık ve zaman bağımlı bir prosestir. Süreç, entegre devre tasarımı ile başlar. Devre tasarımı yapabilmek için tasarım yazılımlarının ve kullanılan bilgisayarların hızlı ve yeterli işlem gücüne sahip olması gerekmektedir. İstenilen elektriksel yapılar(layout) tasarımcılar tarafından oluşturulduktan sonra şekillendirme süreci için maske yapımına geçilir.

Silisyum pullar üzerinde, tasarımcılar tarafından oluşturulan hatların şekillendirilebilmesi için öncelikle, üzeri krom ve foto-rezist kaplı quartz camlar kullanılarak, elektron ışını, lazer yazıcı veya cıva lamba ile belli oranda küçültme yapılarak maskeler şekillendirilir. Şekillenen yapılardaki fotorezist, fotorezist çözücü kimyasal ile maske üzerinde uzaklaştırılır ve ardından quartz cam üzerindeki krom aşındırılarak istenilen tasarım yapıları oluşturulmuş olunur. Bir tek entegre devre üretimi için; devrenin tipine ve kullanılan üretim teknolojisine göre, ortalama 20 ile 30 arasında maske yapılması gerekmektedir.

Entegre devre üretimi için ayrıca, saflık değeri oldukça yüksek birçok kimyasal malzeme gerekmektedir. Örneğin; gaz olarak oksijen, azot, hidrojen; sıvı olarak deiyonize(iyonsuzlaştırılmış) su, sülfürik asit, nitrik asit ve hidroflorik asit; katı olarak fosfor, bor, alüminyum ve bakır sıklıkla kullanılan malzemelerdir.

Maskelerin üretimi tamamlandıktan, sarf malzemeler tedarik edildikten sonra, silisyum pullar temizlik işlemine tabi tutularak, termal proses, fotolitografi, aşındırma, iyon katkılama, ince-yalıtkan film depolama, kimyasal- mekanik parlatma(CMP), metal depolama gibi bir çok proses adımlarına tabi tutulurlar. Üretim aşamasından sonra ise, test ve paketleme sürecinde son olarak gerekli elektriksel ve mekanik testler uygulanır ve kullanıma hazır hale gelirler. Şekil 5.1' de genel olarak yarıiletken üretim akışı gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Entegre devre üretim akışı.

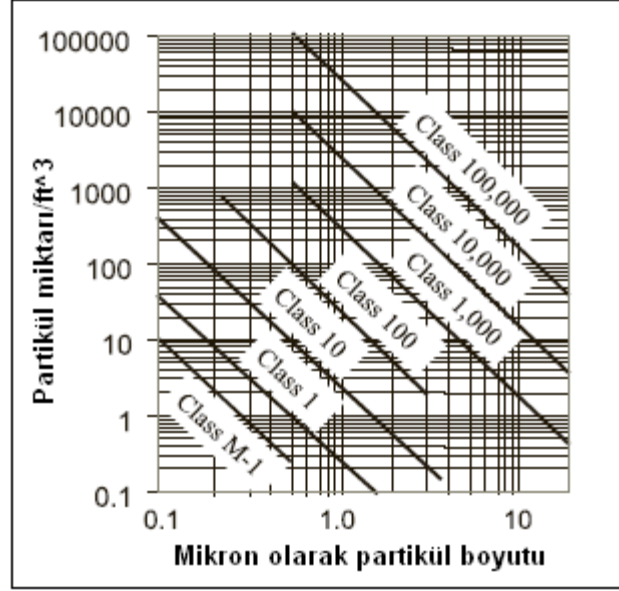
5.1. Temiz Alan

Yarı iletken malzemelerle entegre devre üretiminde ortamdaki partikül miktarı ve boyutu oldukça önem kazanmaktadır çünkü; kullanılan malzemelerin maliyeti ve üretilecek olan ürünün kazandıracığı teknolojik rekabet gücünün yanı sıra üretim sürecinin uzun ve dolayısıyla aldığı zaman düşünüldüğünde, ortamdaki partiküller sebebiyle pul yüzeyinde ve katmanlar arasında oluşan veya oluşabilecek bozukluklar istenmeyen durumların başında gelmektedir. Ortamdaki partiküller kontrol edilemezse, çalışan devre/ toplam devre oranı düşünüldüğünde istenilen verim elde edilemez ve ayrıca uzun süreler sahada kullanılması öngörülen devreler güvenilirlik adına istenilen özellikleri taşımamış olurlar.

Temiz alan sınıflandırması yapılırken, partikül boyutu küçüldükçe temizlik derecesi de artmış olacaktır. İlk temiz alan uygulamaları, hastanelerdeki ameliyat odalarındaki hava ile bulaşan bakterileri kontrol altına almak için geliştirilmiştir. Yarı iletken sektörü gelişmeye başlayınca temiz alanların kullanım alanları da artmıştır.

Temiz alan sınıflandırması, partikül miktarı ve boyutuna göre yapılır. Örneğin; 10 sınıfı temiz alan için partikül miktarı 10' dan az ve çapları ise; 0.5 μm ' den büyük; 1 sınıfı temiz alan için partikül miktarı 1' den az ve çapları 0.5 μm ' den

büyük olmalıdır. Temiz olarak nitelendirilen bir evde; çapları $0.5 \mu\text{m}$ ' den büyük, 500.000 partikül olduğu düşünülürken temiz alanın önemi daha iyi anlaşılacaktır. Şekil 5.2' de temiz alan partikül ilişkisi ve Tablo 5.1' de 209E Amerikan Standartları' na göre temiz alan ve partikül ilişkisi gösterilmiştir.

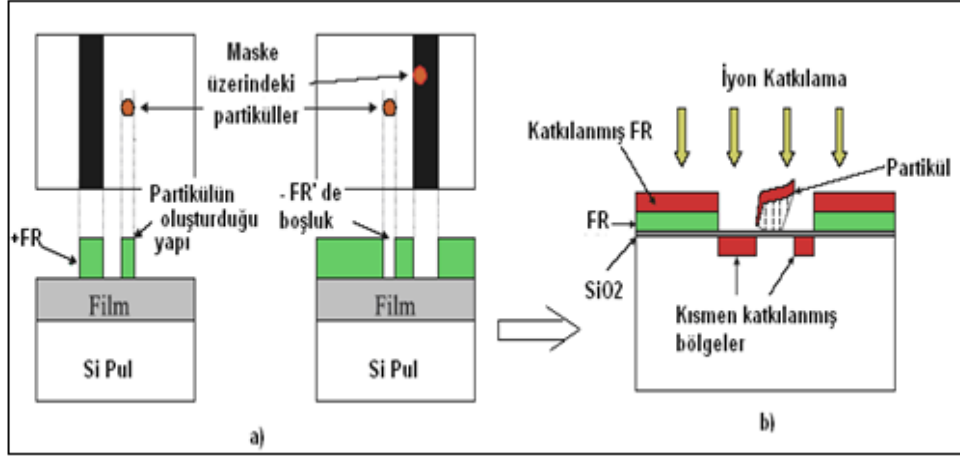


Şekil 5.2: Temiz alan sınıflandırılması.

Tablo 5.1: Temiz oda için 209E Amerikan Standartları.

Sınıf	Partikül/ft ³				
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	5 μm
M-1	9.8	2.12	0.865	0.28	
1	35	7.5	3	1	
10	350	75	30	10	
100			300	100	
1000				1000	7
10000				10000	70

Partiküllerin oluşturabileceği kirlilik sonucu genel olarak entegre devreler üzerindeki olumsuz etkisi aşağıdaki Şekil 5.3' te gösterilmiştir.



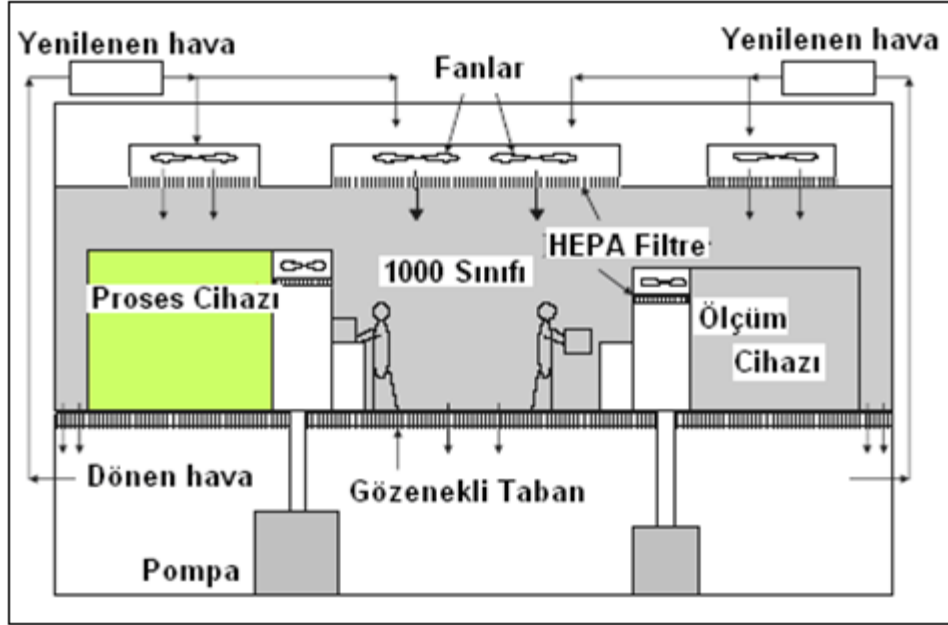
Şekil 5.3: a) Maske camında kalan partiküllerin şekillendirmeye etkisi, b) pul üzerindeki partiküllerin iyon katkılama etkisi.

Şekil 5.3 a)'da görüldüğü gibi maske camında kalan partikül, Si pul üzerine maske camı kullanılarak yapılan şekillendirme işleminde, pul üzerinde pozitif fotorezist(+FR) kullanılıyorsa, ışığın fotorezist üzerine düşmesini engelleyerek fazladan koruyucu yapı oluşmasına sebep olacaktır. Eğer negatif fotorezist(-FR) kullanılıyorsa pul üzerinde fazladan boşluk oluşmasına sebep olacaktır. Şekil 5.3 b)'de ise pul üzerinde kalan partikülün iyon katkılama işleminde maske etkisi yaparak iyon katkılanması istenen bölgeye engel olduğu görülmektedir. Bunun yanında metal hatlarda kalan partiküller hatların termal işlemler sonucu kopmasına veya iki metal hattın kısa devre olmasına sebep olabilir. Bu sebeple tüm sürecin başlangıcı ve tüm süreci etkileyebilecek şekillendirme işleminde maskelerin ve pulların en temiz alanda saklanması gerekmektedir.

Partikül boyutu kullanılan teknolojinin yarısı boyutuna veya daha küçük boyutlara kadar düşerse, tehlikeli partikül olarak adlandırılabilir. Örneğin; 11 nm çapındaki partikül 22 nm teknoloji ile entegre devre üretimi yapılan yarıiletken fabrikasında kritik bölgenin içine düşerse, cihazın çalışmasına engel olabilir.

100 mm(4 inç) pul kullanılan fabrikalarda genellikle yüksek basınçlı hava veya azot tabancaları kullanılmaktadır. Çapı 1 μm ' un üzerinde olan partiküllerle bu hava tabancalarıyla kolayca uzaklaştırılabilirler, fakat daha küçükleri kirlilik yaratmaya devam ederler. Bu şekilde büyük partiküller uzaklaştırılırken çok daha küçükleri ise pulun yüzeyine yerleşmiş olurlar. Kritik boyut bir kaç mikronun üzerinde ise küçük partiküllerin olumsuz etkisi olmaz ama devre içinde kritik boyut 1 μm ' un altına

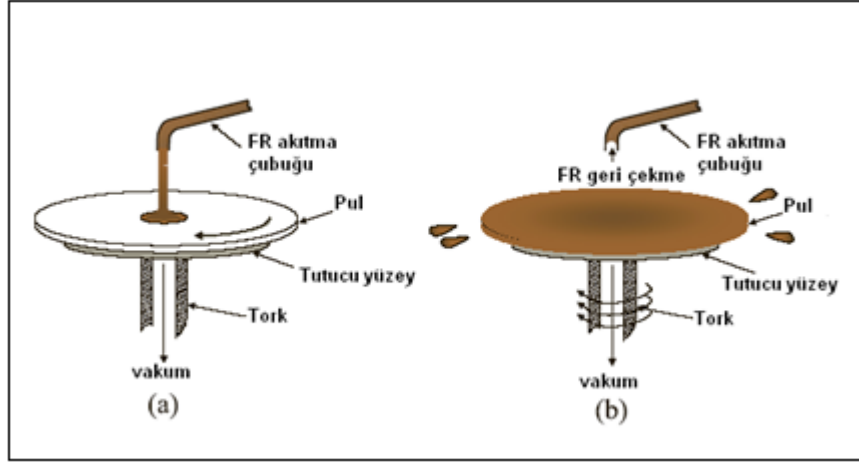
indiği zaman birçok olumsuz etki oluştururlar. Şekil 5.4' te temel olarak temiz oda yapısının kesiti verilmiştir.



Şekil 5.4: Genel olarak 1000 sınıfı temiz alan yapısı.

5.2. Fotolitografi

Her entegre devrede, tasarımcılar tarafından tasarlanan yapıların pul üzerine aktarılabilmesi için ilk olarak fotolitografi adımı uygulanır [22]. Bunun için öncelikle şekiller quartz bir maske üzerine aktarılır ve şekilleri taşıyan maske üzerinden, kullanılan şekillendirme yöntemine göre, ışık düşürülerek ve belli oranda küçültme yapılarak istenilen şekiller pul üzerine aktarılmış olunur. Şekillerin pul üzerinde oluşması için öncelikle pul yüzeyinin belli bir kalınlıkta ($\approx 1 \mu\text{m}$), ışığa duyarlı fotorezist olarak adlandırılan kimyasal ile kaplanması gerekmektedir. Bu işlem ise; pulun belli bir hızla döndürülmesi ve hızlanma, yavaşlama sürelerinin ayarlanmasıyla ve aynı zamanda pulun ortasına belli bir miktar fotorezist akıtılarak yapılmaktadır. Pulun ortasına akıtılan fotorezist, dönen pulun oluşturduğu merkez kaç kuvvetin etkisi ile pulun yüzeyine kaplanmış olur. Şekil 5.5' da pul üzeri rezist kaplama işlemi görülmektedir.



Şekil 5.5: a) Fotorezist akıtma, b) döndürülerek kaplama.

Fotorezist, yapısındaki kimyasallara bağlı olarak belli dalga boylarındaki ışıklardan etkilenmektedir. Üzerine düşürülen ışığın etkisi ile malzeme içindeki kimyasal bağlar kopuyorsa pozitif fotorezist, tam tersi olarak kimyasal bağlar sağlamlaşıyorsa negatif fotorezist olarak adlandırılır.

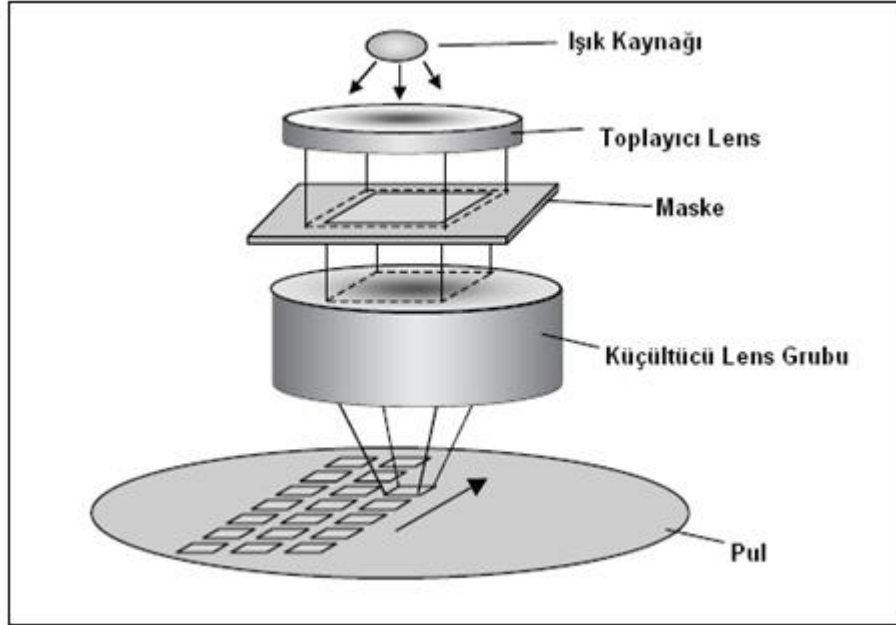
Şekillendirilmek istenen yapıların minimum boyutları fiziksel olarak;

$$\text{Çözünürlük} = k1 * \lambda / NA \quad (5.1)$$

formülüyle ilişkilidir λ ; uygulanan ışığın dalga boyu; k1: teorik olarak min. 0.25 olabilen sabit ve NA: lens açıklığıdır [23]. Bu formüle göre, çözünürlüğü düşürmek için lens açıklığının artırılması ve kullanılan ışık kaynağının dalga boyunun düşürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla ışık kaynağıyla doğrudan ilişkili fotorezist kullanmak gerekir.

Fotorezist ile pul yüzeyinin kaplanmasının ardından üretilen maske üzerine ışık düşürülerek şekillerin ayak izleri belli oranda küçültme işlemi ile pul üzerine düşürülmüş ve dolayısıyla fotorezist şekillendirilmiş olunur. Şekil 5.6' da şekillendirme işlemi gösterilmiştir. Ardından pul ısıtma işlemi tabii tutularak ışık almaya alanlardaki rezistin kimyasal bağları sağlamlaştırılır. Isıtma işlemi sonrası rezist çözücü kimyasal ile ışıklandırılan hacimler puldan uzaklaştırılır ve son olarak kalan yapılar tekrar ısıtma işlemi maruz bırakılarak ortamdaki ışığın olumsuz etkilerinden korunmuş olunur.

Fotolitografi bölümünde katmanların birbirlerine hizalanması işlemi güvenilirlik adına büyük önem arz etmektedir. Örneğin n-tipi katkı yapılan bölge ile p- tipi katkı yapılacak bölgelerin birbirlerine göre hizalamalarına dikkat edilmezse iyon ekme ve difüzyon işlemlerinin ardından istenmeyen sızıntı akımlar meydana gelebilir. Ayrıca şekillendirme cihazının odak noktasının doğru şekilde ayarlanmaması sonucu fotorezist profilinde bozulma ve dolayısıyla aşındırma prosesinde istenmeyen şekiller meydana gelecektir. Bunun sonucu olarak örneğin kontak şekillendirmede yapılan böyle bir hata direnç değerlerinde farklılık meydana getirecek veya zamanla direnç değerlerinde kaymalara sebep olacaktır. Bu sapmalar ömür testlerinde gözlemlenebilmekte ve cihaz ömrüne etkisi daha kolay anlaşılabilir.

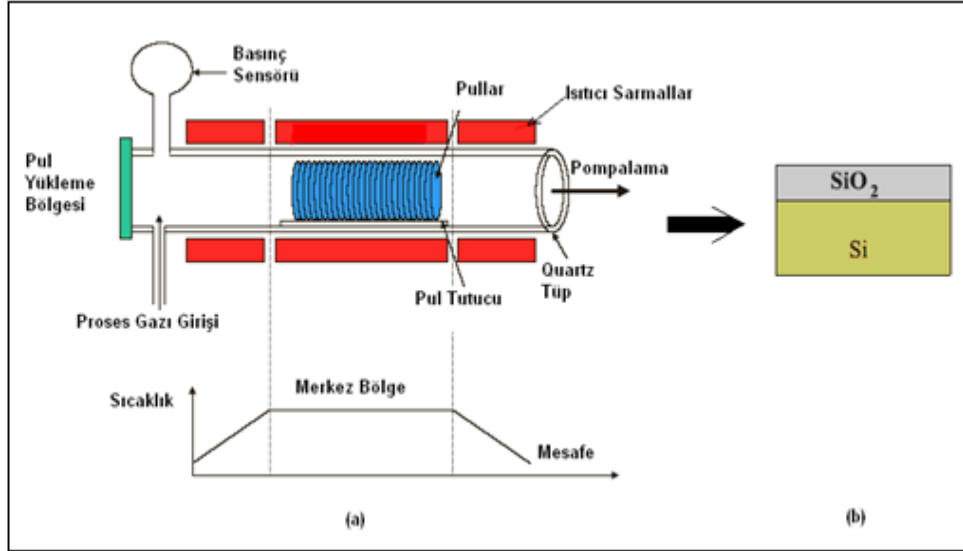


Şekil 5.6: Pul üzerine tasarım verisinin yansıtılarak şekillendirilmesi.

5.3. Depolama

Birçok farklı süreç akışında öncelikle boş silisyum pul ile üretime başlanır ve depolama ve ardından şekillendirme şeklinde devam edilir [22]. Şekillendirilen yapılar; MEMS yapılarında hareketli yapılar, transistörlerde kontak elemanları veya dielektrik katmanlar olabilir. Yapılacak işleme göre istenilen malzemenin depolanması için, kimyasal gaz buharıyla depolama(CVD), düşük basınçta kimyasal gaz buharıyla depolama(LPCVD), fiziksel olarak buhar kümesiyle depolama(PVD)

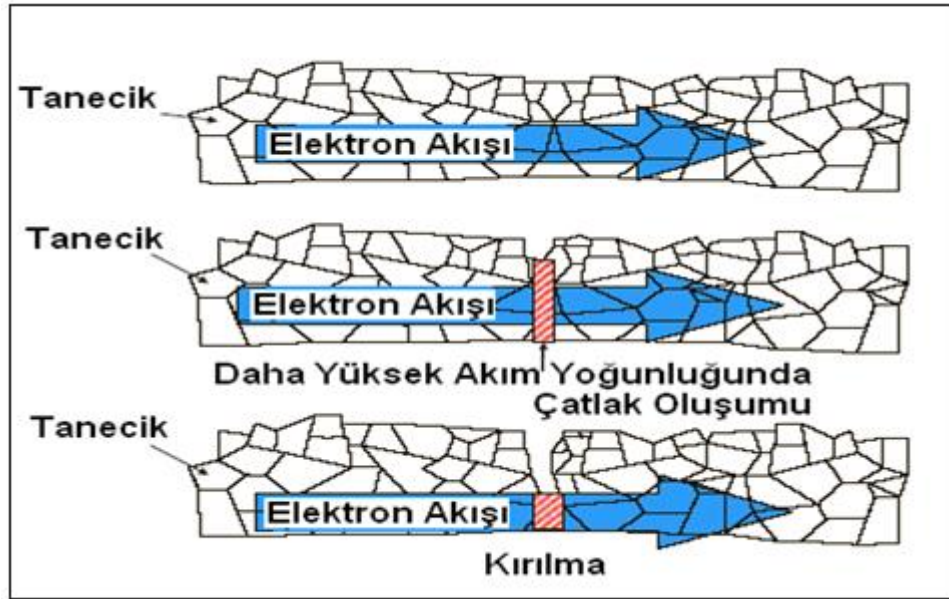
gibi yöntemler kullanılır. Şekil 5.7 a)' da LPCVD prosesi ait kesit ve b)'de silisyum pul üzerine dielektrik malzeme olan SiO₂' nin depolanmış kesiti görülmektedir.



Şekil 5.7: a) LPCVD prosesi, b) silisyum üzerine dielektrik malzeme depolama.

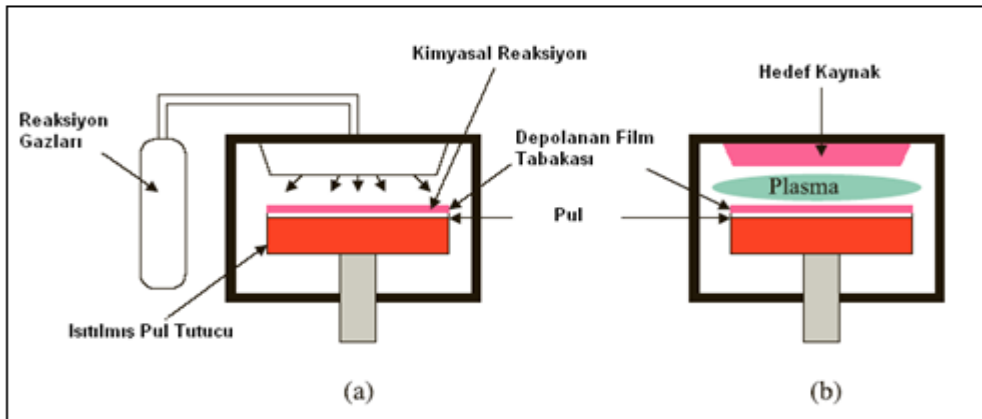
Dielektrik malzeme depolamanın yanı sıra, pul üzerinde istenilen bölgelerden elektriksel kontak alabilmek birçok farklı metal(nikel, alüminyum, altın, gümüş, krom, titanyum) depolama işlemi de yapılabilmektedir. Metal depolama işleminde, güvenilirlik açısından düşünüldüğünde; metal hatların, son ürünün kullanıldığı ortam şartlarından etkilenmemesi(ısı, nem, vb.) ve akım iletimini devam ettirmesi gerekmektedir. Bunun için korozyona dayanıklı olması, büyük metal hatlar içinde(özellikle stres birikmesi olabilecek bölgeler olan köşelerde) boşluklar bırakılması gerekmektedir. Ayrıca elektromigrasyondan etkilenmemesi için tanecik boyutları olabildiğince düzenli olmalıdır. Özellikle alüminyum birçok küçük kristal yapıların birleşmesi ile oluştuğundan dolayı, üzerinden elektrik akımı geçerken bu kristal taneciklerin sınırlarına çarparak hareket etmeye zorlanır ve bir süre sonra tabanda çatlak oluşarak hatların kopmasına neden olur. Bu durum aşağıdaki Şekil 5.8' de gösterilmiştir. Tanecik boyutu, düzeni ve etkiyen stres değeri elektromigrasyon oluşumu için başlıca önemli parametrelerdir[19]. Alüminyum-bakır alaşımı oluşturularak elektromigrasyona karşı direnç oldukça arttırılmaktadır. Elektromigrasyon oluşması durumunda metal hatlardaki iletim alanı değişiminden(azalmasından) dolayı direnç değerlerinde artış gözlemlenebilmekte ve güvenilirlik testleri ile bu süreç hızlandırıldığı için depolanan alüminyum hatların

üretilen yarı iletken cihazın güvenilirliğine olumsuz yönde etkisi kısa sürede anlaşılabilir. Şekil 5.8: Elektromigrasyonun etkisi.

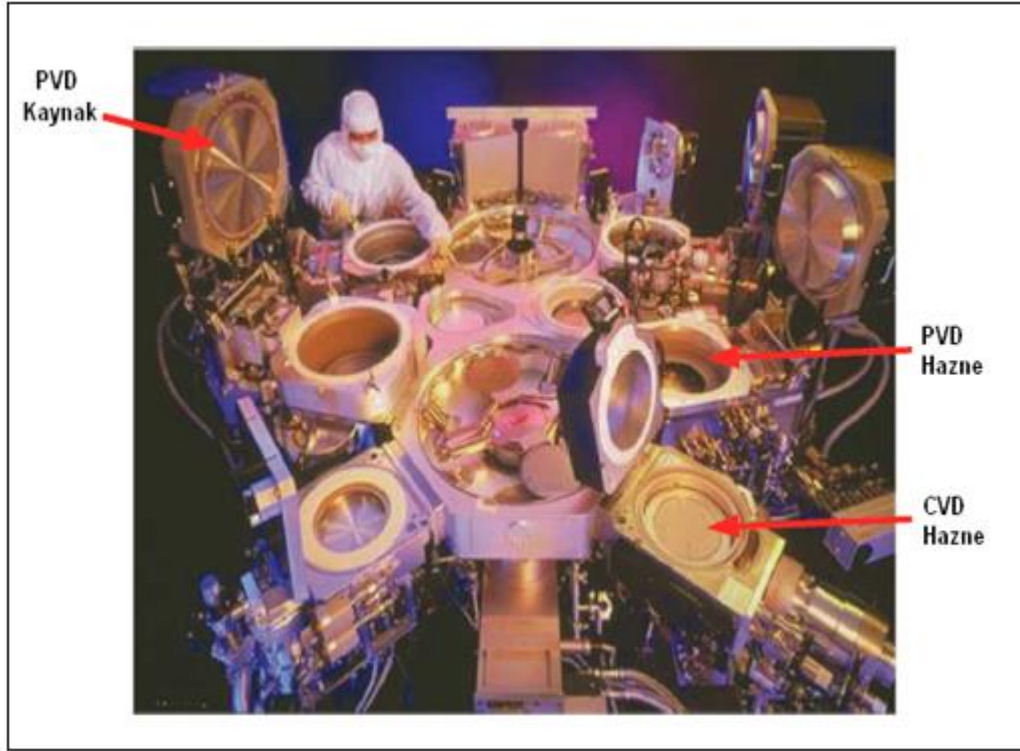


Şekil 5.8: Elektromigrasyonun etkisi.

Genellikle metaller için PVD yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde kaynak bir malzeme vardır ve yüksek enerjili iyonların bu kaynağa çarptırılması ile kaynaktan fiziksel olarak malzeme koparma ve hedef yüzeye transfer etme durumu söz konusudur. Böylelikle silisyum pul üzerinde ince bir metal film tabakası oluşturulur. Metal depolama için kullanılan CVD yöntemi ile PVD yöntemi Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Şekil 5.10' da ise entegre bir metal depolama sistemi görülmektedir.



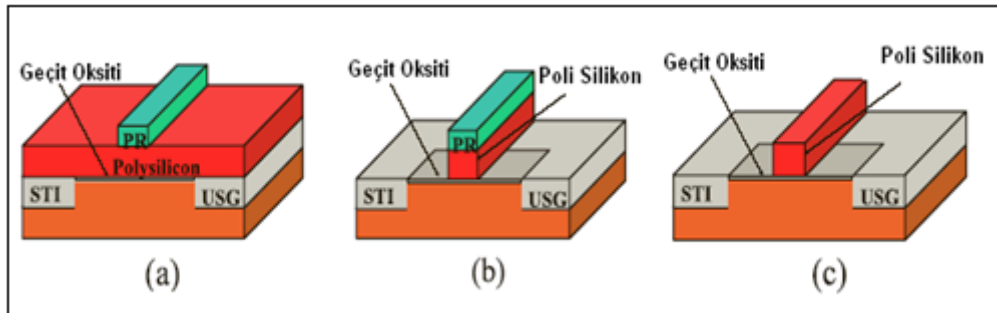
Şekil 5.9: a) CVD prosesi, b) PVD prosesi.



Şekil 5.10: Entegre metal depolama sistemi.

5.4. Aşındırma

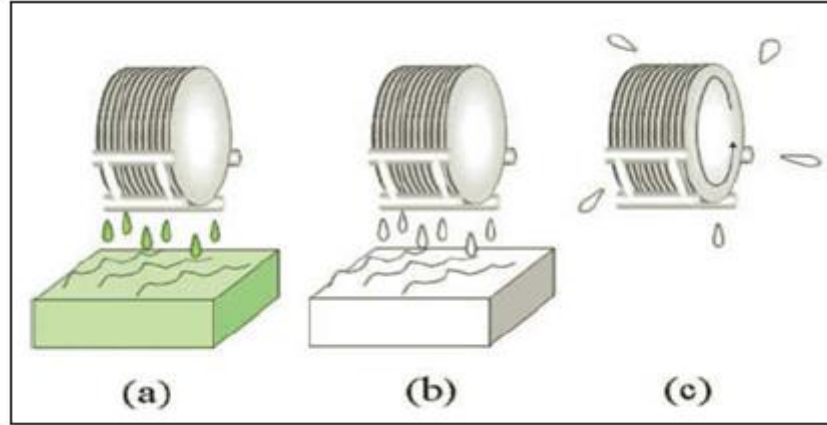
Aşındırma işlemi maske üretiminde olduğu gibi, fotorezistin dışında kalan alanların pul üzerinden uzaklaştırılması işlemidir. Şekil 5.11’ de aşındırma aşamaları gösterilmiştir. Kuru aşındırma ve ıslak aşındırma olmak üzere iki tür aşındırma işlemi mevcuttur.



Şekil 5.11: a) Fotorezist şekillendirme, b) poli-silikon aşındırma, c) fotorezist silme.

5.4.1. Islak Aşındırma

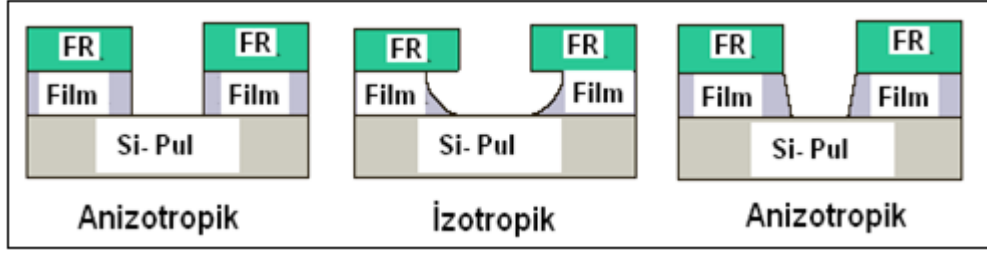
Islak aşındırma işleminde isminden de anlaşılacağı gibi aşındırma işlemi için kimyasal sıvı bir aşındırıcı malzeme kullanılır. Pul fotorezist ile kaplanıp şekillendirildikten sonra kimyasal aşındırıcının içine daldırılır. Şekil 5.12’ de ıslak aşındırma işlemi görülmektedir.



Şekil 5.12: a) Islak aşındırma, b) yıkama, c) kurutma.

Kullanılan fotorezist tipi, aşındırılacak malzemenin türü kullanılacak olan sıvı aşındırıcıyı belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanında, polisilikon, silikon dioksit, silikon nitrat ve metaller izotropik olarak aşınır yani, tüm yönlerdeki aşınma oranları aynıdır [22]. Fakat tek kristalli silisyum veya quartz gibi kristal yapıya sahip malzemelerin aşınması hem izotropik hem de anizotropik olabilmektedir. Bu iki farklı durum aşınan yapının kesit profilini etkilemektedir. Dolayısıyla yanlış seçilen aşındırma yöntemi sonucu üretilen devrede kaçak akım miktarı fazla olabilir ve istenilen performansta çalışmayabilir. Bu durum da devrenin güvenilirliğine doğrudan olumsuz yönde etki etmektedir.

Devrenin güvenilirliğine olumsuz yönde etki eden bir diğer konu ise aşındırılan boşluklarda metal veya dielektrik malzeme depolama işlemi sırasında boşluk oluşmasıdır. Bu istenmeyen bir durum olduğu için, aşındırma kesit profili azalan bir yamuk şeklinde yapılmaktadır. Şekil 5.13’te değişik aşındırma profilleri görülmektedir.

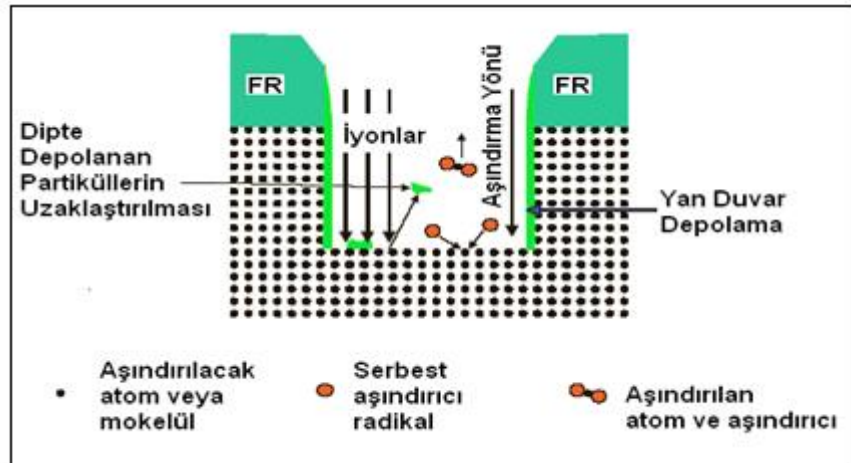


Şekil 5.13: Farklı tiplerde aşındırma yöntemleri.

5.4.2. Kuru Aşındırma

İzotropik ve anizotropik birçok kuru aşındırma yöntemi mevcuttur. Kuru aşındırma, fiziksel, kimyasal ve her ikisini de içeren yöntemlerden oluşur. Aşındırma profili yönünden proses kolaylığı ve ıslak aşındırma düşünüldüğünde; kullanılan sıvı aşındırıcıların oluşturabileceği yüzey gerilimlerin olamaması (çoğunlukla yapışma problemlerine neden olur) kuru aşındırmanın başlıca avantajlarından biridir.

Şekil 5.14' te gösterildiği gibi şekillendirme sonrası pulun üzerine, RF güç kaynağı ile plazma oluşturularak iyon bombardımanı yapılır. İyonlar pul yüzeyi ile etkileşime girdiğinde kimyasal aşındırma meydana gelir. Ayrıca, iyonlar hızlandırılarak pul yüzeyinden atom bağlarını kopararak da fiziksel aşındırma yapmış olurlar. Kuru aşındırma işleminde farklı kesit profilleri, fiziksel ve kimyasal parametreler değiştirilerek elde edilebilir.

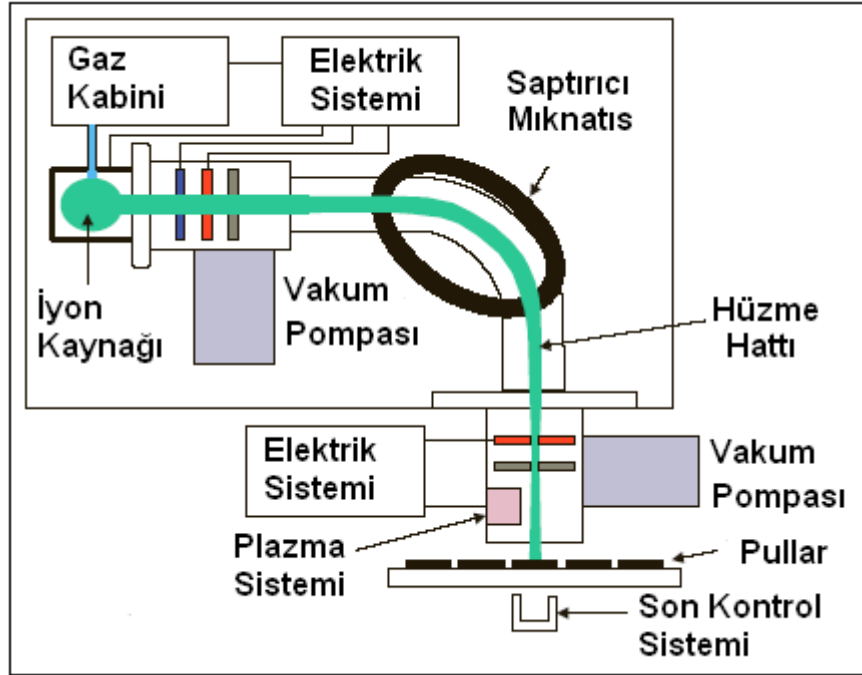


Şekil 5.14: Kuru aşındırma.

5.5. İyon Ekme(Katkılama)

Yarı iletkenlerin en önemli özelliği katkılama yapılarak iletkenlik derecelerinin değiştirilebilmesidir. Katkılama işlemi 2. bölümde anlatılmıştır, bu bölümde iyon ekme prosesinin güvenilirlik üzerindeki etkileri üzerinde durulacaktır.

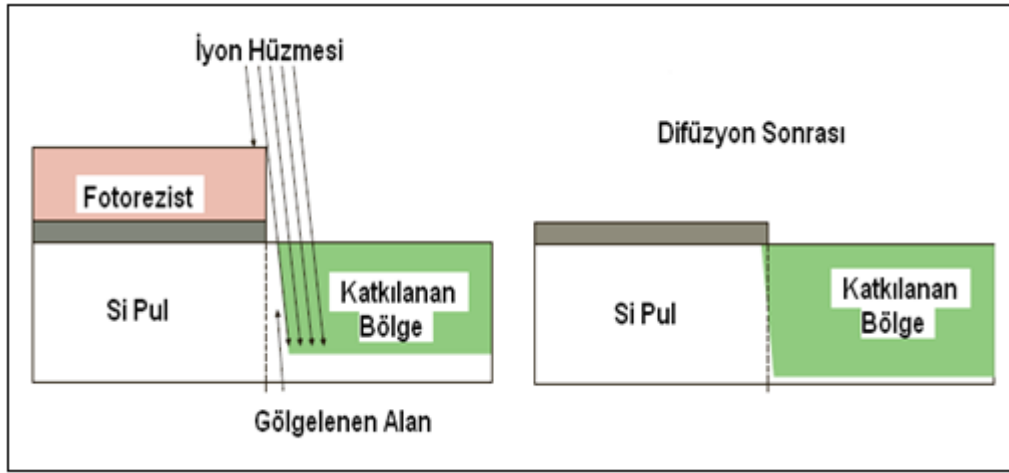
Pul üzerinde iyon implantı yapılmak istenmeyen alanlar fotorezist ile şekillendirildikten sonra katkılama işlemine tabi tutulurlar. Katkı atomları, yarı iletken pul üzerine hızlandırılıp çarpıtırma sonucu zorla ilave edilirler. Bu yöntem en fazla kullanılan iyon ekme yöntemidir. Hedef yarı iletken olarak silisyum, silisyum oksit, silisyum nitrit ve silisit, katkı olarak da bor, fosfor, arsenik, indiyum, ve antimon kullanılabilir [23]. İmplant enerjisi; 0.2 keV ile 3MeV, katkı miktarı; 10^{11} cm^{-2} ile 10^{16} cm^{-2} , ve çarpışma açısı 0 derece ile 60 derece arasında değişebilmektedir. Şekil 5.15' te iyon katkılama işlemi görsel olarak implant cihazı üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 5.15: İyon implant cihazı.

Fotodetektörlerde en önemli parametrelerden birisi iyon katkılama işlemidir. Ürün haline gelmiş detektör üzerine düşürülen belli dalga boyundaki ışığa, detektörün vereceği tepkisellik, üretilen bütün detektörlerde aynı olması isteneceği için; iyon implant işleminde, katkılama yoğunluğunun ve jonksiyon derinliğinin

kontrol edilebilir ve tekrarlanabilir olması gerekmektedir. Katkılama yoğunluğu iyon hüzmesi akımının ve katkılama süresinin kontrol edilmesiyle ve jonksiyon derinliği ise, iyon enerjisinin kontrol edilmesiyle belirlenebilir. Bu iki parametre ise implant işleminden sonra uygulanan ısıl işlem ile doğrudan ilişkilidir. Isıl işlemin amacı katkılanan atomların yarı iletken içerisinde yayılmasını sağlamaktır. Dolayısıyla ısıl işlemin sıcaklık değeri ve her proses çevriminde tekrarlanabilir olması üretilen detektörlerin güvenilirlikleri açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 5.16'da iyon implantı ve ardından uygulanan difüzyon sonucu oluşan etki görülmektedir.

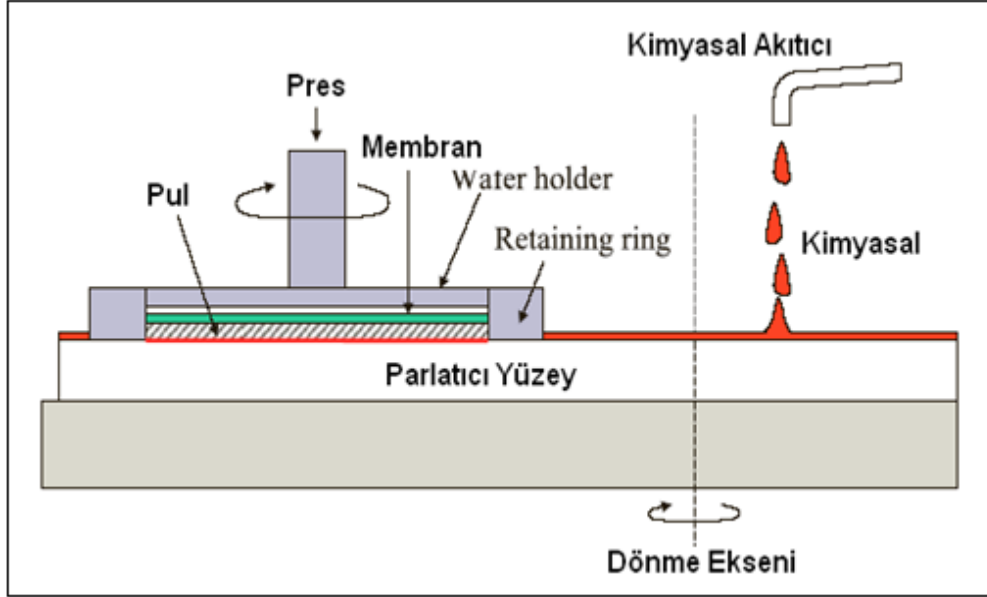


Şekil 5.16: İyon implantı ve ısıl işlem sonrası difüzyonun etkisi.

5.6. Kimyasal- Mekanik Parlatma- Aşındırma(CMP)

CMP; kimyasal reaksiyon ve mekanik aşındırmanın kombinasyonu olarak, pulların yüzeylerini daha pürüzsüz ve pul üzerindeki birden fazla farklı noktaların, pulun asal eksenine olan mesafelerini olabildiğince eşit yapmayı hedefleyen ve böylece daha sonraki proses adımları ile, istenilen katmanları doğru ve istenildiği şekilde yapmaya imkan sağlayan bir proses adıımıdır. Bu şekilde birçok katman, yüzey topografisinden kaynaklanan hizalama ve kritik boyut hatalarının(fokus derinliğini etkilediği için) minimuma indirilmesi ile üst üste oluşturulabilir. Ayrıca CMP işlemi yapılmadığı takdirde; dielektrik malzeme depolama sonrası oluşan yüzey dalgalanması- pürüzlülüğü sebebiyle metal depolama prosesinde sorunlar ortaya çıkmaktadır çünkü PVD işleminde yan duvar metal kaplama kontrol edilebilir değildir. Bu sebeple, yan duvardaki daha ince metal hatlar yüksek akım yoğunluğu oluşturur ve daha fazla elektromigrasyona sebep olur.

Şekil 5.17’de gösterildiği gibi, CMP işlemini, pul arka yüzünden cihaz tarafından tutularak, parlatma işlemi için kullanılan dönen bir yüzey üzerine kuvvet uygulanarak ve bu esnada ortama kimyasalların ilave edilmesiyle gerçekleşir. CMP kimyasalı, büyük miktarda silika ve alümina partikülleri içeren alkali- asidik bir karışım olduğu için, sadece depolamadan gelen katmanları düzleştirme işlemi yapmaz, ayrıca hata yoğunluğunu da düşürerek üretim verimini artırır.



Şekil 5.17: CMP Proses kesiti.

CMP kimyasalı büyük miktarda alkali iyonları ve büyük miktarda partiküller içerdiği için, CMP alanı diğer yarı iletken üretim alanları ile karşılaştırıldığında serbest iyon ve partikül kirliliği en fazla olan bölgelerden birisidir. Bundan dolayı prosesler arasında kirlilik geçişi olmaması için, CMP alanının ayrı tutulması gerekir. Hatta pulların taşınması ve cihazlara yüklenmesi için kullanılan taşıyıcı kasetlerin, pulların CMP alanına giriş ve çıkışlarında değiştirilmeleri yerinde olacaktır.

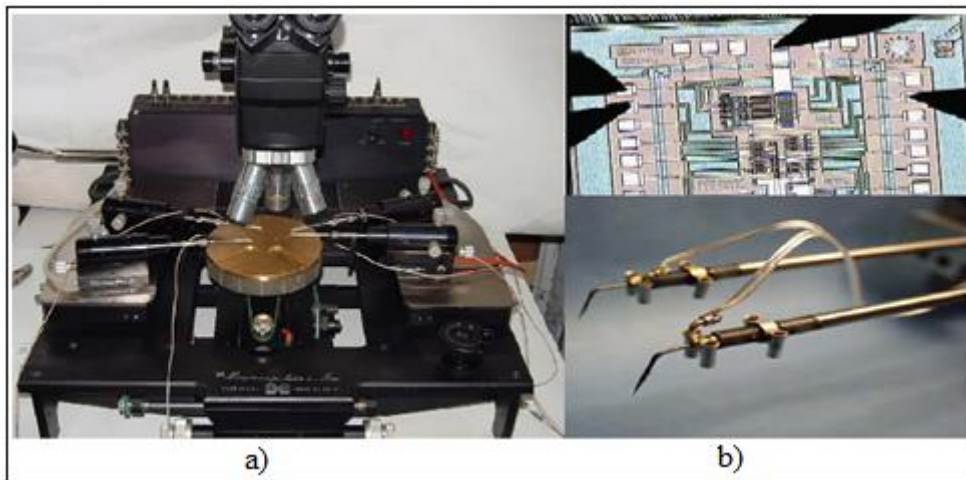
CMP işlemi sonrasında; çizikler, kalıntılar, metal korozyonu, katmanlar arası bağların kopması, dielektrik film çatlakları ve daha başka istenmeyen hataların oluşması muhtemel olduğu için, optik görüntüleme cihazı ile kontrol edilmesi, nihai ürünün güvenilirliği açısından oldukça büyük bir önem taşımaktadır.

5.7. Test ve Paketleme

Üretimi biten detektörlerin sahada kullanılabilmesi için öncelikle elektriksel ve mekanik testlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Nem, sıcaklık, darbe, yer çekimi ve eylemsizlik gibi mekanik ve kimyasal etkilerden korunmaları ve detektörler ile bütünleşmiş olacakları düzenekler arasında kolayca bağlantı kurulabilmesi için paketleme prosesine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat paketleme öncesi elektriksel testlerin yapılması gerekmektedir.

5.7.1. İlk Test Aşaması

Alt katmanlardan elektriksel kontak alabilmek için metal depolanan ve şekillendirilen fotodetektörler test ve paketleme bölümüne gelirler. Bu kısımda; henüz 100 mm çapında ve 0.5 mm kalınlığındaki dairesel pulların üzerinde oluşturulan detektörler bir arada bulunmaktadır. Paketleme işlemine geçmeden önce; dairesel yapıda ve her daire birbirinden izole dört detektörün her birinin karanlık akımları ölçülerek, hangilerinin paketleme işlemiyle yollarına devam edeceğine karar verilir. Ayrıca bu aşamada hata analize de yapılarak, üretimin herhangi bir aşamasından(açık devre, kısa devre, eşik gerilimi kayması, vb.) veya tasarımdan kaynaklanan problemlere yönelik geri besleme yapmak büyük önem arz etmektedir[8]. Şekil 5.18’de ölçüm düzeneği görülmektedir.



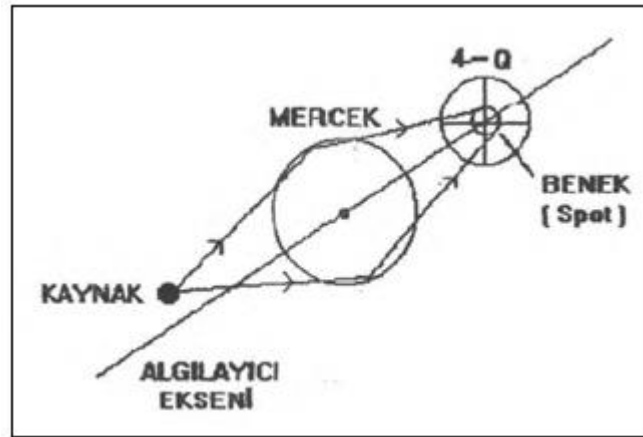
Şekil 5.18: a) Prob istasyonu, b) kontak alma düzeneği.

İlk test aşamasında, yukarıdaki şekilde görülen iğnelerle metal *pad*' ler üzerinden kontak alınarak ölçüm yapılmaktadır. Bu aşamada metal hatlara zarar vermemek gerekir. Aksi takdirde; zamanla, deformasyon oluşan bölgede korozyon, kristal hasarı veya tel bağlamada bir takım problemler(tel- metal arası yapışma problemi, tel- metal arası yetersiz bağ kuvveti problemi, vb.) meydana gelebilir.

5.7.2 Paketleme Sonrası Elektriksel Testler

Paketleme işlemleri öncesi karanlık akımları ölçülerek gerekli özellikleri taşıyan detektörler ayrı ayrı paketlenerek son ürün haline getirildikten sonra karanlık akımları, dirençleri ve optik tepkisellikleri ölçülür. Karanlık akım ve direnç konularına, fotodiyot bölümünde değinilmiştir.

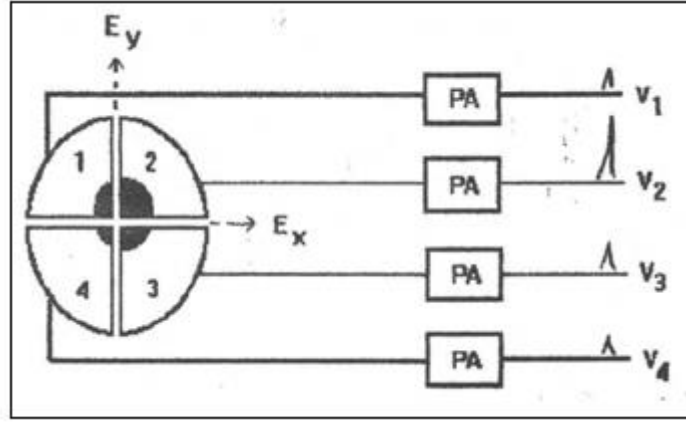
Optik tepkisellik ölçümünde; kullanılan kaynak görünür ışık veya kızıl ötesi ışığa yapan bir kaynak olabileceği gibi üzerine düşürülen lazeri detektöre yansıtan bir hedef de olabilmektedir [20]. Kaynaktan gelen ışığa bir mercekle yardımcıyla toplanır ve birbirinden izole dört çeyrek detektörden oluşan tek bir fotodetektörün üzerine yoğunlaştırılır. Böylece detektör üzerinde bir spot oluşur. Bu durum aşağıdaki Şekil 5.29' da görülmektedir.



Şekil 5.19: Kaynak, mercekle ve detektör.

Merceğin toplayarak spot halinde detektörün üzerine yansıttığı kaynak eksenine ile detektör aynı ekseninde ise; spot tam olarak detektörün merkezinde olacaktır ve spot alanları her bir izole detektörde eşit olacağı için aydınlanma da eşit miktarda olacaktır. Eğer merkezler arasında sapma varsa, aydınlanma alanları farklı olacaktır.

için üretilen gerilimler de farklılık gösterecektir. Bu durum Şekil 5.20' de gösterilmiştir.



Şekil 5.20: Merkez kayması ve gerilim çıkışları.

PA; ön yükseltici demektir ve her kadrant çıkışı ön yükseltici kullanılarak yükseltilir. Ex ve Ey sırasıyla kaynağın detektör eksenine göre x ve y eksenlerindeki sapmasını ifade etmektedir ve detektörün toplam ürettiği gerilime 'T' denilirse, Ex ve Ey;

$$E_x = [(V_1 + V_4) - (V_2 + V_3)] / T \quad (5.2)$$

$$E_y = [(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)] / T \quad (5.3)$$

şeklinde hesaplanır. Güvenilirlik testleri için, yorma testleri öncesi ve sonrası optik tepkisellik testinde, spot eksenini ile detektörlerin merkez eksenlerinin çakışmasına büyük ölçüde önem verilmiştir ve ayrıca ölçüm düzeneğinde kullanılan kaynak 1.06 μm dalga boyunda lazer olduğu için, çevreden gelen optik gürültüyü izole etmeye yönelik, kızıl ötesi dışındaki dalga boylarını filtreleyen optik filtre de kullanılarak ölçümlerin gerçeğe yakın olması amaçlanmıştır.

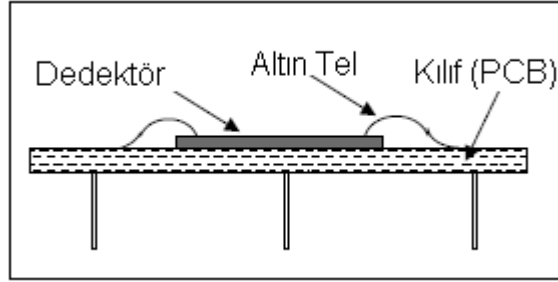
5.7.3. Paketleme

İlk test aşamasından sonra, kesme cihazı ile her bir detektör pul üzerinden ayrılarak paketlemeye hazır hale getirilir. Detektörlerin birbirlerinden ayrılma

aşaması, kesme ve kırma olarak iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Öncelikle 500 µm kalınlığındaki pulun ortalama 340 µm' u belli hatlar boyunca kesilir ve ardından her bir detektör arasında kalan 160 µm' luk kalınlık, kırma işlemi ile detektörler ayrılmış olur. Bu her iki işlemde de güvenilirlik açısından dikkat edilmesi gereken en önemli konu; oluşturulan yapısal hatların zarar görmemesi ve kristal yapıda hasar oluşmamasına dikkat etmektir.

Kesme ve kırma işleminden sonra detektörler, elektriksel ölçüm kolaylığı açısından ve montaj edilecekleri düzeneğe uyumlu kılıflara, elektriksel olarak iletken özellikli, gümüş partikülleri içeren bir yapıştırıcı ile yapıştırılırlar. Bu yapıştırma işleminde kullanılan aparatlar, detektörün aktif bölgesi(foton enerjisini elektriksel enerjiye dönüştüren bölge) ve/ veya metal hatlar ile temas halinde ise; yüzeyde ve yapılarda herhangi bir hasar oluşmamasına dikkat edilmelidir.

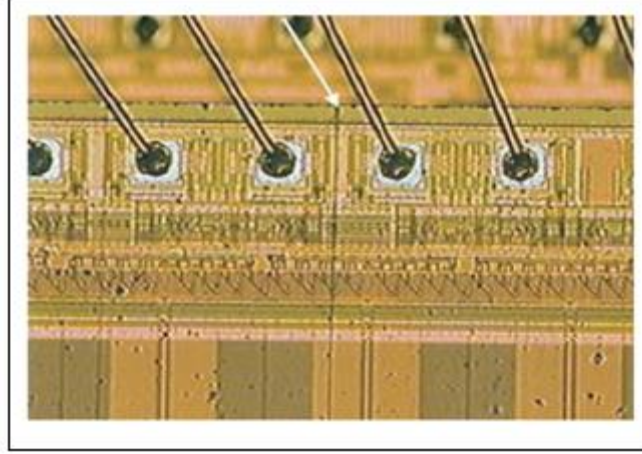
Yapıştırma işleminden sonra; kesme işlemi öncesi ölçüm alınan metal pad' ler ile kullanılan kılıf arasında elektriksel bağlantı elemanı olarak 25µm çapında altın teller kullanılır. Tel bağlama cihazı kullanılarak, altın tel ile detektördeki alüminyum pad' ler ve kullanılan kılıftaki altın yüzey arasında bağ oluşturularak iki metal yüzey birbirine bağlanmış olur. Şekil 5.21' de tel bağlama işlemi sonrası detektör ve kılıf gösterilmiştir.



Şekil 5.21: Tel bağlanmış detektör ve kılıf.

Metaller arasında bağ oluşturma işlemi için etkin birçok parametre vardır. En önemlileri; sıcaklık, basma kuvveti ve titreşimdir. Öncelikle kılıf ve üzerine yapıştırılan detektör, cihaz üzerindeki tablanın ısısı ile set edilen sıcaklığa getirilir ve ardından altın telin detektör üzerindeki bir pad' e belli bir kuvvet ile bastırılarak ve aynı zamanda titreşim uygulanarak yapışması sağlanır. Daha sonra bu işlem, telin diğer ucu kullanılarak kılıf tarafında da tekrarlanır. Uygulanan basma kuvvetinin şiddeti, tel bağlama cihazında kullanılan ucun taban alanı göz önünde

bulundurularak, gerekli ve yeterli sınırlar içinde olmalıdır. Fazla uygulanan basma kuvveti kristal yapısından dolayı silisyum tabanlı yarı iletkenlerde çatlak meydana getirebilir veya zaman içerisinde çatlak oluşma riskini arttırır denilebilir. Bu durum Şekil 5.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.22: Tel bağlama sonrası çatlak oluşumu.

Detektör içinde her bir pad’ de ve her bir ayrı detektörde tel bağlamı işlemi gerçekleştirilirken, tablanın sıcaklığı, uygulanan yapıştırma kuvveti ve yansılınım değeri tekrarlanabilir olmalıdır. Aksi takdirde, yeterli bağ kuvveti oluşmayan altın tel- alüminyum veya altın tel- altın geçişlerinde bağ kuvvetinde zamanla zayıflama ve direnç değerlerinde değişkenlik oluşacak veya sahadaki kullanım yerine göre sisteme etki edebilecek kütleli kuvvetlerin etkisi ile kopma meydana gelecektir.

Tel bağlama işleminden sonra kullanılan telin ve oluşturulan bağ kuvvetinin testi için her sıralı tel bağlama işleminden önce ilk test aşamasında elenen detektörler üzerinden tel koparma testleri yapılmaktadır. Kullanılan altın telin üretim özelliklerine göre, maksimum 15 gr’ lık yüke dayanabildiği ve standartlar gereği kullanılan telin ve bağ kuvvetinin min. 3 gr’ lık yüke dayanabilmesinin istendiği bilinmektedir ve tel koparma testleri sonucunda elde edilen değerlerin bu aralıklarda olması gerekmektedir. Bunun için de, tel bağlama işlemindeki telin oluşturduğu eğrisel şekle kadar tüm parametrelerin istenilen tolerans aralıklarında ve tekrarlanabilir olmaları büyük önem kazanmaktadır.

Paketleme sürecinde son olarak, kılıf ile detektör arası(aktif alan hariç) elektriksel yalıtkan epoksi kullanılarak kapatılır ve bu sayede kılıftaki metal yüzeylerde zamanla nemin etkisi ile korozyon oluşması engellenmiş olunur. Bu son

6. GÜVENİLİRLİK TESTLERİ

Tarih boyunca yarı iletken üreticileri için güvenilirlik konusu büyük bir öneme sahip olagelmıştır. Üretim sürecinin uzun olması ve maliyetin yüksek olması gibi faktörlerin yanı sıra, üretilen ürünlerin kullanım alanları da düşünüldüğünde, güvenilirlik testlerinin yapılması kaçınılmazdır. Bu konuda; araçlarda kullanılan yarı iletken ivme ve yük sensörlerinin güvenilirlik testlerinin yapılmaması veya fotodetektörlerin askeri alanlardaki uygulamaları düşünüldüğünde; kullanım öncesi, testlerinin ihmal edilmiş olmasının başta insan hayatı ve ülkelerin geleceği adına ne gibi sonuçlar doğurabileceği daha iyi anlaşılacaktır.

Uzun yıllar kullanılması planlanan ürünlerin, hizmet yıllarına kıyasla, kısa bir süre içinde güvenilirlik testleri yapılabilmektedir. Örneğin; on beş yıl çalışması düşünülen bir haberleşme uydusunun tüm bileşenlerinin güvenilirlik testleri sadece sekiz ay sürmektedir [1]. Hem otomotiv sektörü, hem de askeri alanlardaki uygulamalar için, bir takım güvenilirlik test prosedürleri oluşturulmuştur [9]. Bu test prosedürlerinin temelini oluşturan ve güvenilirlik fiziğinin de başlıca konusu olan stres ve sıcaklık bağımlı bozulmalar, hızlandırılmış- yaşlandırma testleri ile ölçülebilmektedir [23].

Yaşlandırma testlerine başlamadan önce aşağıda belirtilen değerlendirmeler dikkate alınmalıdır.

- Cihazın kullanılacağı uygulama türleri nelerdir?
- Cihaza etki edecek olan kullanım koşulları ve çevresel şartlar nelerdir?
- Ne tür bozulma modları ve mekanizmaları olabilir ve uygun olan ne tür hızlandırma testleri uygulanabilir?
- Cihaz için literatürdeki güvenilirlik seviyesi nedir?
- Cihazın ne kadar hizmette olması bekleniyor?

Hızlandırılmış yaşam testleri aşağıda verilmiştir;

- Sıcaklık
- Sıcaklık ve nem
- Gerilim(Volt)

- Sıcaklık değişimi
- Akım(Amper)

6.1. Güvenilirlik Test Metotları

Güvenilirlik test metotları; test eleman gruplarının değerlendirilmesini(her biri ayrı bir bozulma mekanizması için oluşturulur) ve ürün değerlendirilmesini içermektedir. Bu şekilde ürünlerde kapsamlı olarak değerlendirilmiş olur.

6.1.1 Test Eleman Gruplarının Değerlendirilmesi

Test eleman gruplarının değerlendirilmesi ile temel bozulma mekanizmalarının ortaya çıkartılması hedeflenmektedir. Bu metot ile test grupları özellikle değerlendirme ve her bir bozulma kaynağının analiz edilmesi için üretilmektedir [5]. Hedeflenen sonuca bağlı olarak pul üzerinde test yapılabileceği gibi paketlenmiş kırılmık bazında da test seti oluşturabilmek mümkündür.

Bu yöntemin dört ana hedefi vardır;

- Yeni bir teknolojinin veya ürünün tasarım onay testleri sırasında, güvenilirliğe etkisi olabilecek bozulma mekanizmalarının elenme yönteminin bulunması.
- Ürün değerlendirme aşamasında bulunan kusurların bozulma mekanizmaları üzerindeki etkilerinin netleştirilmesi.
- Film kalınlığı, film formu ve kirlilik gibi izleme kontrol süreci parametreleri için her bir süreç ve tasarım kuralı için bozulma oranlarının bulunması.
- Test grup elementlerinin her bir blok fonksiyonunun geliştirilmesi ve ürünün güvenilirlik süresinin tahmin edilmesine olanak sağlanmasını içermektedir.

Test eleman gruplarının değerlendirilmesi ile tam olarak doğru ve gerekli veri elde etme amaçlanmıştır. Tablo 6.1' de test eleman gruplarına örnekler verilmiştir.

Tablo 6.1: Test eleman grup örnekleri.

TEG Yapısı	Hedef Değerlendirme	Süreç Tasarım Parametreleri	Stres	Değerlendirme Metodu	Değerlendirme Parametreleri
Çok Katmanlı Metal Depolama	Stres	Metal depolama malzemesi		Yüksek sıcaklık sabit akım testi	Direnç değişimi
	Taşınım	Metal depolama genişliği	Sıcaklık	Yüksek sıcaklık raf ömrü testi	Bozulma oranı ve zamanı
	Elektromigrasyon	Metal depolama boşluğu	Akım yoğunluğu	Sıcaklık çevrim testi	Aktivasyon enerjisi
	Açık kontak	Delik çapı	Sıcaklık eğimi	Gerilim altında yüksek sıcaklık testi	Akım yoğunluğu bağımlılığı
	Katmanlar arası bozulma gerilimi	Kontakt çapı	Gerilim	Gerilim altında yüksek nem testi	Açık devre
		Boşluk şekli	Mekanik stres	Basınçlı sıcaklık testi	Kısa devre
		Katmanlar arası yalıtkan film	Sıcaklık ve nem		
		Pasivasyon			
		Paketleme reçinesi			

6.1.2 Son Ürün Testleri

Bu tür testler nihai ürün üzerinde, ürünün kullanılacağı ortam şartlarına göre yapılmaktadır. Son ürün testleriyle ilgili birçok ülke ve bağımsız komiteler tarafından standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar Tablo 6.2’ de gösterilmektedir ve son ürün testlerine(ömür testleri, çevresel testler ve mekanik testler) ait örneklere de, sonraki tablolarda yer verilmiştir.

Tablo 6.2: Güvenilirlik test standartları.

Kurum	Standartlar
JEITA	ED-4701/001,100,200,300,400,500
MIL	STD-202,883
IEC	60749,60068-1,60068-2
JEDEC	22,78
JIS	C 00XX
CECC	90000,901

Tablo 6.3: Son ürün güvenilirlik ömür testleri.

Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar			
			EIAJ ED-4701	MIL-STD-883	IEC 60749	JESD22
Ömür Testleri	Yüksek sıcaklıkta çalışma ömür testi	Cihaza uzatılmış bir süre	101	1005,8	23. Bölüm	A108-B
		zarfında elektriksel ve termal gerilim uygulanır (akım, gerilim,ısı)				
		Normal test şartları:				
		Ta= 125 C				
		Maks. Çalışma voltajında				
	Yüksek sıcaklık, yüksek nem oranı testi	Elektriksel ve termal stresin yanında yüksek oranda nem uygulanır.	102	-	5.Bölüm	A101-B
		Normal test şartları:				
		Ta= 85 C, RH= 85%				
Maks. Çalışma voltajında						
Yüksek sıcaklık raf ömrü testi	Cihaza uzatılmış bir süre	201	1008.2	6.Bölüm	A103-C	
	zarfında yüksek sıcaklık uygulanır.					
	Normal test şartları:					
	Ta= T(raf) maks.					


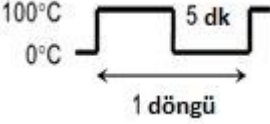

Tablo 6.3: Devam.

Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar			
			EIAJ ED-4701	MIL-STD-883	IEC 60749	JESD22
Ömür Testleri	Düşük sıcaklık raf ömrü testi	Cihaza uzatılmış bir süre	202	-	-	-
		zarfında düşük sıcaklık uygulanır.				
		Normal test şartları:				
		Ta= T(raf) min.				
	Yüksek sıcaklık yüksek nem oranı raf ömrü testi	Cihaza uzatılmış bir süre	103	-	-	-
		zarfında yüksek sıcaklık ve yüksek nem oranı uygulanır.				
		Normal test şartları:				
		Ta=60 C, RH=90%				

Tablo 6.4: Son ürün güvenilirlik çevresel testler.

Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar			
			EIAJ ED-4701	MIL-STD-883	IEC 60749	JESD22
Çevresel Termal Testler	Lehim ısı direnci testi	Lehimleme sırasında ısı direncinin ölçülmesi.	105	STD-750-2031	20. Bölüm	B 106-C/A112-A
		Normal test şartları:				
		Lehim banyosu sıcaklığı=260 C ± 5 C				
		Daldırma süresi= 10 ± 1 sn.				
		Cihaz gövdesinin dalmış parçadan uzaklığı= 1.5 ± 0.8 mm				

Tablo 6.4: Devam.

Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar			
			EIAJ ED- 4701	MIL- STD- 883	IEC 60749	JESD22
Çevresel Termal Testler	Sıcaklık Döngüsü Testi	Düşük ve yüksek sıcaklıktaki dirençler	105	1010.7	25. Bölüm	A104-B
		hesaplanır.				
		Normal test şartları: 				
Termal Şok Testi	Ani sıcaklık değişimlerdeki direnci	ölçülür.	307	1011.9	11. Bölüm	A106-B
		Normal test şartları:				
						
Yüksek sıcaklık yüksek nem oranı testi	Yüksek sıcaklık ve yüksek nem	oranındaki direnç değerlendirilir.	203	1004.7	-	A100-B
		Normal test şartları:				
						

Tablo 6.5: Son ürün güvenilirlik mekanik testler.

Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar													
			EIAJ ED- 4701	MIL- STD- 883	IEC 6074 9	JES D22										
Mekanik Testler	Titreşim Testi	Taşınma ve kullanma sırasında oluşan titreşime karşı direnci hesaplanır.	403	2007. 2	12. Bölü m	B10 3-B										
		Normalde değişken frekanslı titreşim etki ederken test aşamasında hem değişken hemde sabit frekanslı titreşim uygulanır.														
		Normal test şartları:														
		Sabit frekanslı titreşim: 60 ± 20 Hz, 200 m/sn ² üç doğrultuda, 96 ± 8H her doğrultuda.														
		Değişken frekanslı titreşim: 100-2000Hz 200 m/sn ² üç doğrultuda, herdoğrunltu için 4 döngü ve her döngü için 4 dk.														
		Mekanik Şok Testi					Taşıma ve kullanma sırasındaki şok etkisinin değerlendirilmesi.	404	2002. 3	10. Bölü m	B10 4-C					
							Normal test şartları:									
							Cihaz yapısına bağlıdır. Epoksi ile kaplanmış cihazlar için şok ivmelenmesi 15,000 m/sn ² dört yönde de üçer defa uygulanır.									
							Sabit İvmelenme Testi					Sabit ivmelenme için direnç değerlendirilmesi.	405	2001. 2	36. Bölü m	-
												Cihaz yapısına bağlıdır. Epoksi ile kaplanmış cihazlar için ivmelenme 200,000 m/sn ² 6 yönde her biri için 1 dk uygulanır.				
	Sızdırmazlık Testi	Kapağın hava sızdırmazlığının ölçülmesi.	503	1014	8. Bölü m	A10 9-A										
		Büyük sızıntıları belirlemek için hava baloncuklarına bakılır. Bu test metalik ve seramik paketler için uygundur.														
	Atmosfer Testi	Atmosfer ortamındaki korozyona karşı direncinin ölçülmesi.	204	1009	13. Bölü m	A10 7-B										
		Normal test şartları: 35 C, %5 çözelti, 24 saat														

Tablo 6.5: Devam.

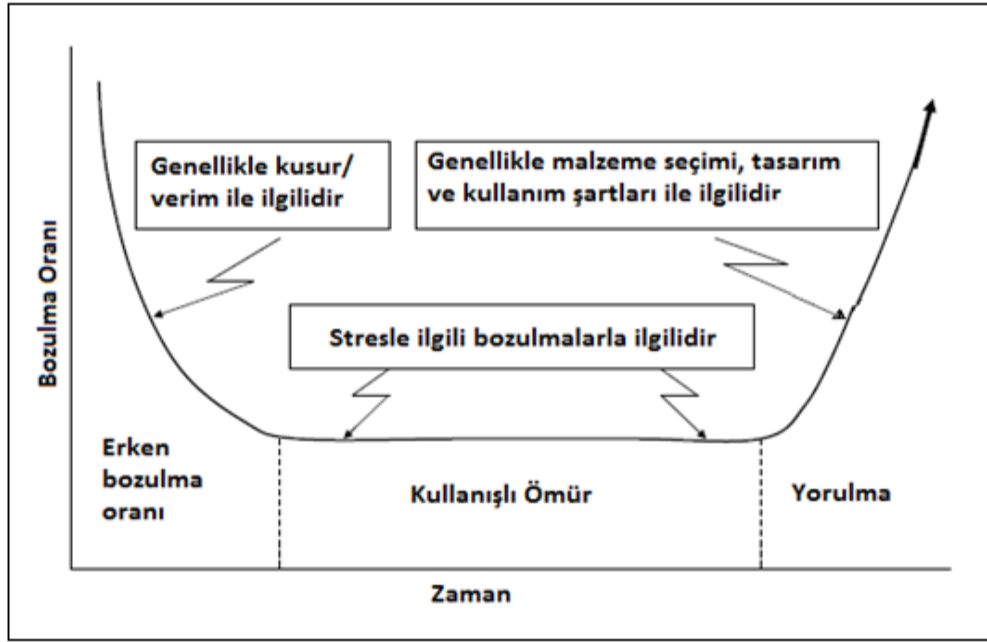
Tip	Test	Tanımlama ve Test Şartları	Standartlar			
			EIAJ ED-4701	MIL-STD-883	IEC 60749	JESD22
Mekanik Testler	Lehimlenebilirlik	Lehimlenebilirliğin değerlendirilmesi	303	2003	21. Bölüm	B102-D
		Normal test şartları:				
		Lehim banyosu sıcaklığı=245 C				
		daldırma süresi= 5 sn.				

6.2. Hızlandırılmış Güvenilirlik Testi(Yaşlandırma)

Yarı iletkenlerin güvenilirliği çevresel faktörlere oldukça bağlıdır. Tüm çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda, olumsuz etkisi en fazla olan termal streştir[10]. Fotodetektörlerin çalışma prensibi düşünüldüğünde; detektöre ulaşan foton enerjisinin bir kısmı ile elektron- hole çiftleri oluşarak elektriksel enerji üretilirken(örneğin: silikon için 1.1eV), kalan enerji ısıya dönüşecektir. Ayrıca detektör ile bütünleşik sistemden ve çevreden gelen artı ısıl yükler de olacaktır. Detektördeki bu ısı artışı; dedektörün ve sistemin tasarımına, elektriksel çalışma şartlarına, etrafındaki laminer veya türbülanslı hava akışına bağlı kompleks bir fonksiyondur.

Isı ve nem gibi deneysel değerlerin seviyelerini arttırmak, kimyasal bozulma gibi bozulma mekanizmalarında katalizör görevi görerek sürelerini kısaltabilmektedir.

Yaşlandırma testi; kusurların ortadan kaldırılması, içsel bozulma oranının azaltılması ve öngörülen kullanım süresince yorulma olmadığının tespiti için yapılmaktadır. Şekil 6.1’ de gösterildiği gibi, birbirinden farklı bu üç durum, ‘*küvet eğrisi*’ adı verilen tek bir eğri üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Kuvvet eğrisi.

Erken bozulma bölgesinin şekildeki eğri şeklinde oluşmasında en etkili parametre, malzeme içindeki yapısal kusurlar ve/ veya üretimden kaynaklanan kirliliklerdir. Dolayısıyla üretim ve paketleme aşamalarında çok iyi kontrol edilmiş detektörlerde çok az sayıya erken bozulma meydana gelecektir. Ayrıca verim (bir pul üzerindeki çalışan detektör sayısı/ bir pul üzerindeki toplam detektör sayısı) ile ters orantılıdır. Eğer malzemede yapısal kusur yok ise, eğri keskin bir düşüş yaparak kullanım ömrü boyunca oluşabilecek bozulma oranı çizgisine oturur.

Kullanışlı ömür bölgesi detektörler için, yaşam sınırlayıcı faktörler devreye girene kadar, zaman birimi olarak yıllara uzanan bir zaman diliminde oldukça uzun olmaktadır. Bu sınırlayıcı faktörlere örnek olarak; oksit yorulması- bozulması, metallerde meydana gelen elektromigrasyon olayı verilebilir.

Detektörler yeterince uzun süre kullanılırsa, kullanılan yarı iletken malzemelerin dayanma kuvvetleri çok iyi olsa bile, en sonunda malzemede yorulma meydana gelecektir. Şekildeki son bölge bu yorulmayı göstermektedir.

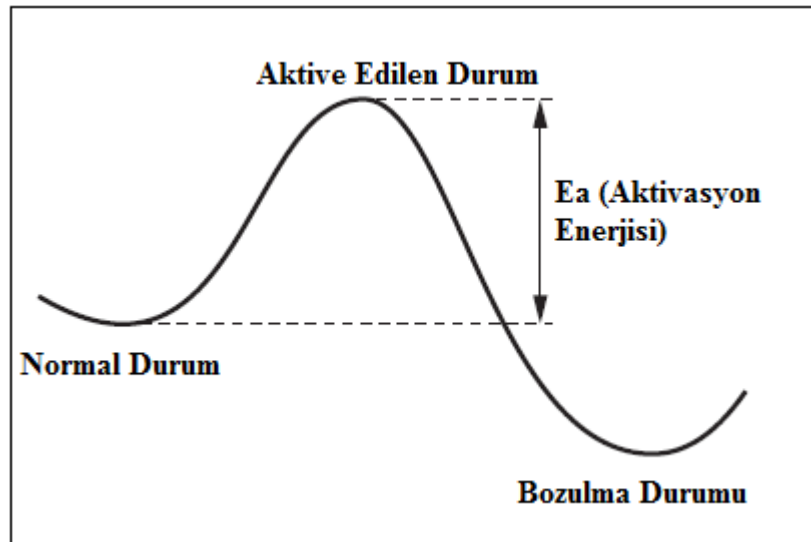
Hızlandırılmış yaşlandırma testinde fotodetektörlerin bozulması, fiziksel ve kimyasal reaksiyonların sonucu olarak, genellikle kimyasal kinetik fiziğiyle açıklanmaktadır. Kimya kinetiği ise; sıcaklık bağımlı bozulmalarla ilgili temel kimyasal reaksiyon modelidir. Temel kimyasal reaksiyon modeli, yarı iletkenler ile üretilmiş ürünlerin yaşlandırma testlerinde kullanılan *Arrhenius Model* ile ilişkilidir.

Arrhenius modellemesi; 1800'lerde Svante Arrhenius tarafından deneysel gözlemleri sonucu oluşturulmuştur.

$$AF = A * \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_t}\right)\right) \quad (6.1)$$

- AF: Hızlanma faktörü;
- A: Sabit(malzeme karakteristiğine bağlı);
- E_a : Aktivasyon enerjisi(eV)-kimyasal reaksiyonun meydana gelebilmesi için minimum enerji;
- k: Boltzmann sabiti($8.617 \cdot 10^{-5}$ [eV/K]);
- $T_{k,t}$: Kullanım sıcaklığı ve test sıcaklığı (Kelvin).

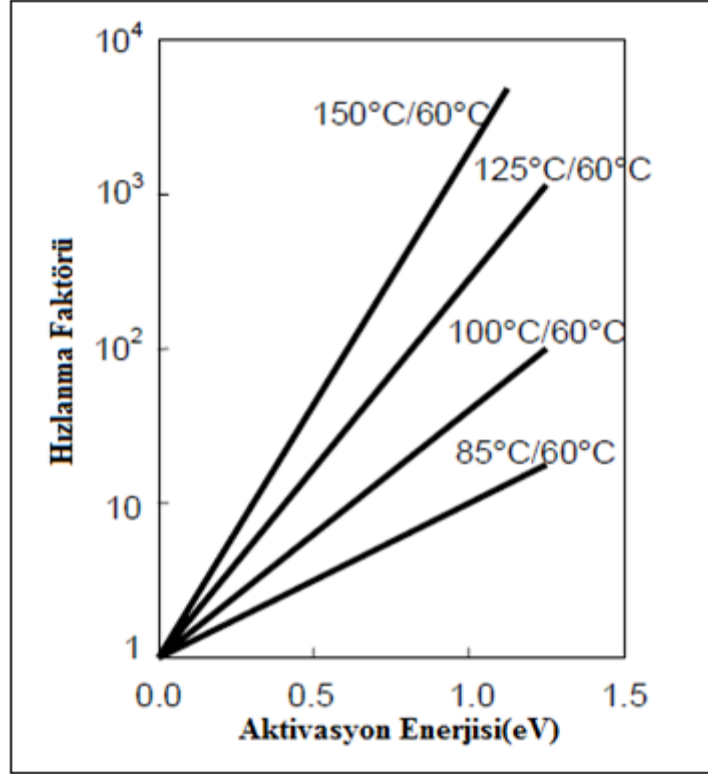
Formüle göre; hızlanma faktörünü etkileyen değişkenlerin aktivasyon enerjisi ile sıcaklık olduğu açıktır. Şekil 6.2' de aktivasyon enerjisi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Aktivasyon enerjisi gösterimi.

Meeker ve Hahn; 1985 yılında, 50 °C' de kullanılan, yapıştırıcı özellikteki ve elektriksel iletken bir malzeme keşfetmişler ve yaşlandırma testi için 120 °C' nin yeterli olacağı ve aktivasyon enerjisinin 0,4eV ile 0,6eV arasında değişeceği

varsayılmıştır. Bu verilere göre hızlanma faktörü; $AF(120\text{ }^{\circ}\text{C})= 12,9, 24,5, 46,4$ değerleri çıkmaktadır. Şekil 6.3' te, hızlanma faktörünün farklı sıcaklık ve aktivasyon enerjilerindeki değişimi görsel olarak da görülmektedir.



Şekil 6.3: Hızlanma faktörü ile aktivasyon enerjisi ve sıcaklık ilişkisi.

Aktivasyon enerjisi bozulma mekanizmalarına göre farklılık göstermektedir. Aşağıdaki Tablo 5.5' de tipik olarak karşılaşılan bozulma mekanizmaları ve bu bozulma türlerine göre deneysel olarak elde edilmiş aktivasyon enerjileri verilmiştir.

Tablo 6.6: Bozulma mekanizmaları ve aktivasyon enerjileri.

Bozulma Tipi	Bozulma Mekanizması	Aktivasyon Enerjisi
Metal Bağlantıda Bozulma	Al metal elektromigrasyon	0,4- 1,2
	Al metalin stres sonucu taşınım	0,5- 1,4
	Au- Al alaşım büyümesi	0,85- 1,1
	Bakır metal elektromigrasyon	0,8- 1,0
	Al korozyon oluşumu	0,6- 1,2
Oksit Film Geriliminde Düşme	Yalıtkan filmde akım sızıntısı oluşumu	0,3- 0,9

Arrhenius modeline ek olarak, hızlandırılmış yaşlandırma testlerinde, sıcaklığın yanı sıra mekanik stres, gerilim ve nemin etkisini de test etmek için *Eyring Model* kullanılmaktadır.

Eyring yaklaşımına göre;

$$R(\text{temp}) = \gamma_0 * A(\text{temp}) * \exp\left(-\frac{E_a}{k_B * \text{temp}K}\right) \quad (6.2)$$

- $A(\text{temp})$ = Sıcaklık fonksiyonu ($A(\text{temp})= (\text{temp}K)^m$);
- Not: m değeri literatürde 0 ile 1 arasında değişmektedir.
- γ_0 ve E_a : Sabitler.

Eyring modellemesi ile Arrhenius modellemesi arasındaki ilişki;

$$AF_{Ey} = \left(\frac{\text{temp}K}{\text{temp}_{uK}}\right)^m * AF_{Arr} \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Eyring modellemesine örnek olarak; solid- state elektronik cihazda metal depolama sonrası, bozulma testi verilebilir. Aktivasyon enerjisinin 1.2eV civarında olduğu varsayılmaktadır. Cihazın kullanım sıcaklığının 90 °C olduğu bilinmektedir. Eyring hızlandırılmış yorma testi için sıcaklık 160 °C ve $m=1$ olarak alınmıştır. Buna göre;

$AF_{Ey} = \left(\frac{160+273,15}{90+273,15}\right)^1 * 491 = 586$ çıkmaktadır. Bu sonuca göre; sabit aktivasyon enerjisi değerinde Eyring modellemesinin Arrhenius modellemesine göre %19 daha fazla çıktığı görülmektedir.

6.3. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yarı iletken teknolojisinde, entegre devrelerin bozulma oranları hesaplanırken bir çok farklı yöntem kullanılabilmektedir. Test sonuçlarından elde edilen verilere göre, test edilen devrelerin bozulma sayıları genellikle çok az sayıda veya sıfır

olmaktadır. Bu gibi durumlarda başarısızlık oranı, belirli bir güvenilirlik seviyesine göre tahmin edilmektedir. Hangi bozulma olasılık dağılımının kullanılacağı, bozulma mekanizmalarına bakılarak uygun olanın seçilmesi ile ilgilidir [2]. Test sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili terimlerin açıklamaları Tablo 6.6' da verilmiştir.

Tablo 6.7: Bozulma oranı ile ilgili terimler.

Terimler	Açıklamalar
Bozulma Oranı(λ)	Bir birim zaman dilimindeki bozulma
Zamanla Oluşan Bozulma(FIT)	Bir milyar cihaz saat süresinde oluşan bozulma oranı
Toplam Cihaz Saat(TDH)	Test edilen örnek sayısı ile test süresinin çarpımıdır
Ortalama Bozulma Süresi(MTTF)	Test edilen örnek sayısının ömür dağılımının ortalaması
Güvenilirlik Seviyesi(CL)	Kullanılan olasılık dağılımından seçilen güvenilirlik seviyesi
Hızlanma Faktörü(AF)	Test koşullarına etki eden parametrelerin ve aktivasyon enerjisinin fonksiyonu

6.3.1 Ki- Kare Dağılımı

Belirli bir cihazın gerçek bozulma oranına yakınsamak için, bu cihazın sınırlı bir örneğinin test edilmesi sonucu gözlemlenen bozulma oranı arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel bir modeldir. Genellikle Ki- kare dağılımı; elektronik bileşenler test edilirken, gözlemlenen bozulmalar nispeten küçük miktarlarda ise, bozulma oranlarını hesaplamak için en doğru model kabul edilmektedir. Ki- kare dağılımıyla formüller aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \sum_{i=1}^{\beta} \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^k TDH * AF_{ij}} \right) * \frac{M * 10^9}{\sum_{i=1}^{\beta} x_i} \quad (6.4)$$

- β = Ayrık bozulma mekanizmaları sayısı;
- k = Birleştirilen ömür testleri sayısı;
- x_i = Bozulma mekanizmasına göre bozulma sayısı.

$$M = X_{(x,\infty)}^2 / 2 \quad (6.5)$$

$$X=(1-CL) \quad (6.6)$$

$$\alpha = 2*(r+1) \quad (6.7)$$

- r= Bozulan örnek sayısı,
- α =Serbestlik derecesi.

Ki- kare dağılımında, %60 güvenilirlik seviyesine ve serbestlik derecesine göre ki- kare değeri, aşağıdaki Tablo 6.8’ deki değerler kullanılmalıdır. Daha üst seviyedeki güvenilirlik derecelerinde işlem yapılmak istendiğinde ise; Tablo 6.9’ da yer alan kat sayılar ile ki- kare değeri çarpılarak işlem yapılabilir.

Tablo 6.8: %60 Güvenilirlik seviyesine göre ki-kare değerleri.

Serbestlik Dereceleri	α	2	4	6	8	10
Ki- kare Değerleri	X^2	1.83	4.04	6.21	8.35	10.5

Tablo 6.9: Yüksek güvenilirlik seviyelerindeki ki- kare değerleri.

Toplam Bozulma Sayıları	Bozulma Oranı Çarpan Faktörleri			
	60%	90%	95%	99%
0	1	2.52	3.27	5.03
1	1	1.93	2.35	3.29
2	1	1.71	2.03	2.71
3	1	1.60	1.86	2.41
4	1	1.52	1.74	2.21
5	1	1.47	1.67	2.08
6	1	1.44	1.61	1.98
7	1	1.40	1.57	1.90
8	1	1.38	1.53	1.84

Diyot, transistör ve otomotiv sektörüyle ilgili birçok sensör üretimi yapan *DIODES* firmasına ait yarı iletken güvenilirlik el kitabında yer alan, 400 adet PNP tipi transistörün 1008 saat boyunca maruz kaldığı yüksek sıcaklık güvenilirlik testi sonucunda bozulma oranı hesaplanması anlatılmaktadır[17]. Buna göre;

- Bozulan eleman sayısı= 0

- TDH= 400*1008= 403.200
- Test sıcaklığı= 150 °C= 423 Kelvin
- Kullanım sıcaklığı= 55 °C= 328 Kelvin
- Ea= 0.9eV
- AF=1262,318
- Eşdeğer Cihaz Saati= TDH*AF= 403.200*1262,31= 508.966.617,6
- Serbestlik derecesi= 2*(0+1)= 2
- $X^2 = 1,83$
- FR= 1,83/(2*508966617,6)= 1,8*10⁻⁶
- $\lambda = FR*10^9= 1,8$ FIT
- MTTF=(1/FIT)*10⁹= 5,55*10⁸ saat (%60 Güvenilirlik seviyesinde)
- MTTF=(1/FIT)*10⁹= 1,70*10⁸ saat (%95 Güvenilirlik seviyesinde)

Diğer bir örnekte ise; 600 adet test örneği, 150 °C’ de 3000 saat güvenilirlik testine maruz bırakıldığı varsayılmaktadır. 2000 Saat geçtikten sonra fotorezist bozulmasından dolayı 1 adet örneğin ve 3000 saat sonunda da oksit bozulmasından dolayı bir adet daha örneğin bozulduğu varsayılınsın. Cihaz içi sıcaklığının, kullanım sıcaklığından ve test sıcaklığından 20 °C fazla olduğu düşünülmektedir [3].

- Ea(fotorezist)= 0,7eV;
- Ea(oksit)= 0,3eV;
- Çalışma sıcaklığı= 55 °C;
- AF(fotorezist)= 148,2;
- AF(oksit)= 8,52;
- %95 Güvenilirlik seviyesine ve serbestlik derecesinin 6 olmasına göre(r= 2);
- $X^2 = 12,6$;
- TDH= 600*1000+ 599*1000+ 598*1000= 1,797*10⁶ saat;
- $\lambda = ((1/1,797*10^6*148,2)+ (1/1,797*10^6*8,52))*(12,6*10^9/(2*2))=$
- 218 FIT
- MTTF=(1/FIT)*10⁹= 4,59*10⁶ saat (% 95 Güvenilirlik seviyesinde)
- MTTF=(1/FIT)*10⁹= 9,35*10⁶ saat (% 60 Güvenilirlik seviyesinde)

7. Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

Bu bölümde, TÜBİTAK BİLGEM Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında(YİTAL), fotodetektörlerin ömürlerinin hesaplanabilmesi için, yapılan yüksek sıcaklık raf ömrü testi(YSRÖT) sonucunda elde edilen grafikler ve istatistiksel veriler paylaşılmıştır. 50 Adet fotodetektör; üretim sonrası testleri uygulandıktan sonra, 100 mm çapındaki pullar üzerinden kesme ve kırma işlemleri ile tek tek ayrılarak, dokunmuş cam yünü(fiber) ve epoksi karışımı ile üretilen ve üzerinde istenilen tasarım verilerine göre iletken hatlar bulunan kompozit bir malzemeye(kılıf), elektriksel iletkenlik özellikli gümüş epoksi yardımı ile yapıştırılmıştır. Bu işlemlerin ardından, kılıf ve fotodetektörlerin metal hatları arasında 25 um çapındaki altın tel kullanılarak elektriksel iletkenlik sağlanmıştır. Kullanılan altın tellerin fotodetektör üzerindeki alüminyum metal hat ve kılıf üzerindeki altın hatlar arasındaki bağlar en az 3 gr' lık yüke dayanabilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı tel bağlama işlemi öncesinde örnek detektörlerde tel koparma denemeleri yapılmış ve ortalama tel kopma kuvvetlerinin 3 gr' dan fazla olduğu kaydedilmiştir. Bu işlem ile yüksek sıcaklıkta uzun süreli yorma testine tabi tutulacak olan fotodetektörlerin, tel bağlama işlemi sonrası oluşturulan bağ kuvvetlerinin termal stres altında yorulma sonucu veya malzemelerin genleşme katsayılarının farklı olması neticesinde zayıflamasıyla direnç değişimi gibi nedenlerden dolayı çalışmamasının önüne geçilmek istenmesidir. Son olarak kılıf ile fotodetektör arasındaki boşluklar yalıtkan epoksi kullanılarak doldurularak, sahada kullanım öncesi depolama durumuyla aynı hale getirilmiştir ve yorma testi öncesi elektriksel testleri yapılmıştır.

7.1 Yüksek Sıcaklık Raf Ömrü Testi(120 °C - %50 Bağlı Nem)

Yüksek sıcaklık raf ömrü testinin amacı, mikro elektronik cihazlara yüksek sıcaklıkta termal stres uygulanarak, rafta bekleme koşullarının cihaz üzerindeki etkisini belirlemektir. Standartlara göre bu test, istenilen test sıcaklık değerini sürdürebilme özelliğine sahip, sıcaklık kontrollü haznesi olan bir test cihazında yapılmalıdır. Test cihazının içine yerleştirilen her bir test örneğinin, hedeflenen test sıcaklığına ulaşmasının ardından test süresi başlatılmalıdır. Yaşlandırma testi yapılan

cihazların ömürleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için elektriksel testleri 96 saat içinde gerçekleştirilmelidir.

Test edilen 50 adet fotodetektör sabit 120 °C sıcaklıkta ve %50 bağıl nemde, 290 saat boyunca yüksek sıcaklık raf ömrü testine tabi tutulmuştur. *Vötsch Industrietechnik* firmasına ait test cihazı ortalama 1,43 m³ dış ve 0,12 m³ iç hacme sahip, 285 kg ağırlığında, -40 °C ile +180 °C arasındaki istenilen test sıcaklık koşullarını sağlamaktadır. Şekil 7.1’ de kullanılan sıcaklık ve nem kontrol cihazı ve Şekil 7.2’ de kontrol ünitesi gösterilmiştir.



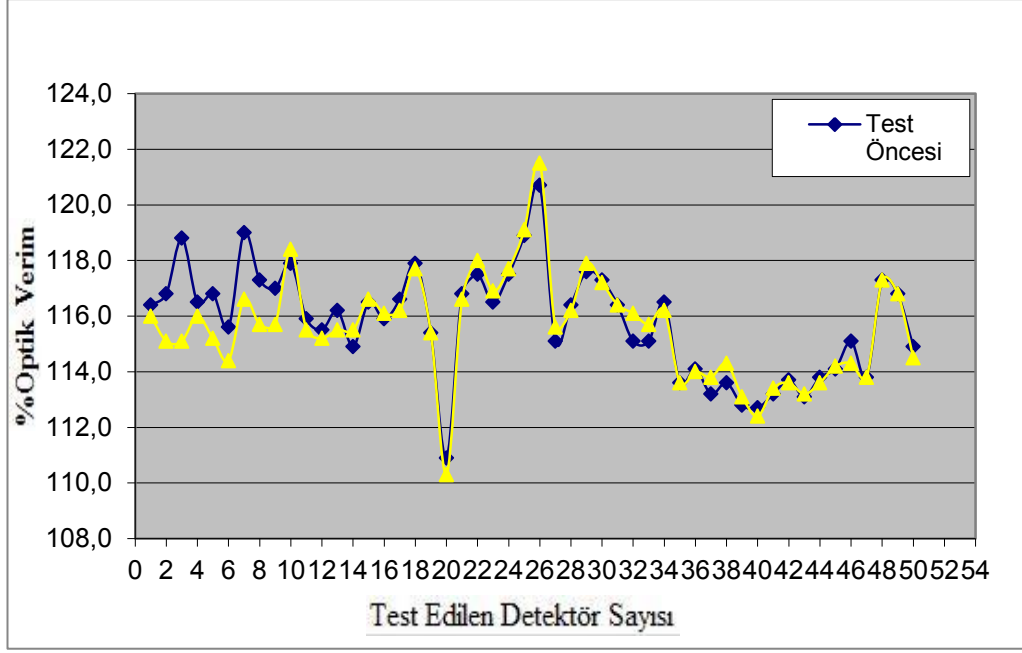
Şekil 7.1: Sıcaklık ve nem kontrollü test cihazı.



Şekil 7.2: Test cihazının kontrol ünitesi.

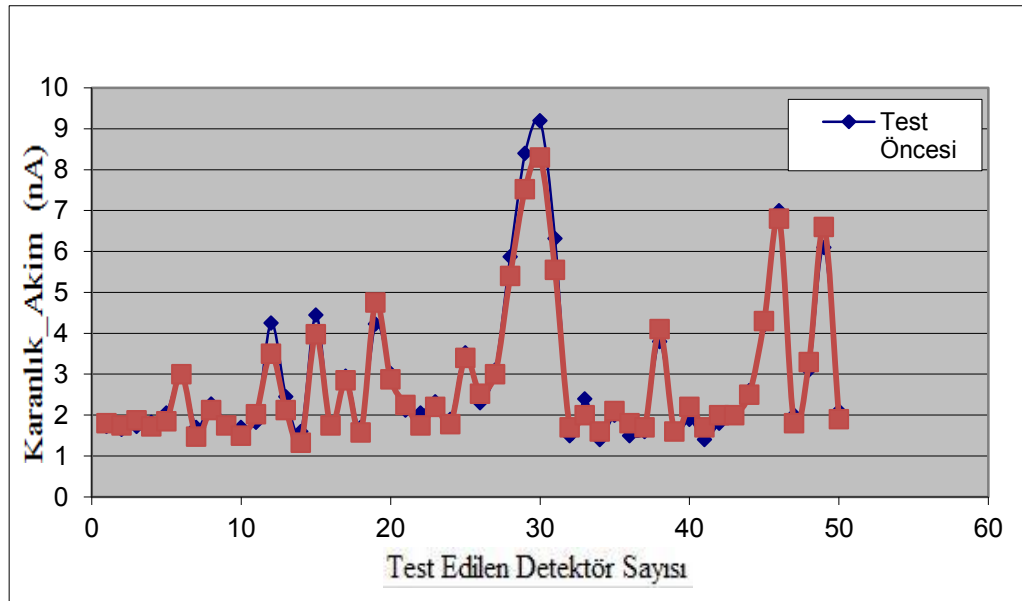
Yaşlandırma testi yapılan bu fotodetektörlerin kullanım koşulları düşünüldüğünde, gerilim(Volt) altındaki kullanım sürelerinin dakikalar mertebesinde olduğu anlaşılacaktır. Bu nedenle test aşaması planlanırken, bozulma faktörü olarak gerilim sonucunda oluşabilecek bozulma mekanizmaları için yorulma testleri tasarlanmamıştır. Bunun yanında etki eden tek parametre sıcaklık olduğu için, hızlanma faktörü hesaplamada *Arrhenius Model* kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekillerde, yaşlandırma test öncesi ve sonrasına ait karanlık akım, direnç ve optik ölçüm sonuçlarının kıyaslanması ile maksimum, minimum ve standart sapma değerleri verilmiştir. Optik ölçüm verileri; yaşlandırma testine tabi tutulan detektörlerin optik kazançlarının, ticari bir fotodetektörün optik kazancına oranlanması ile elde edilmiştir.



Şekil 7.3: Kadranların optik kazançlarının ortalamaları.

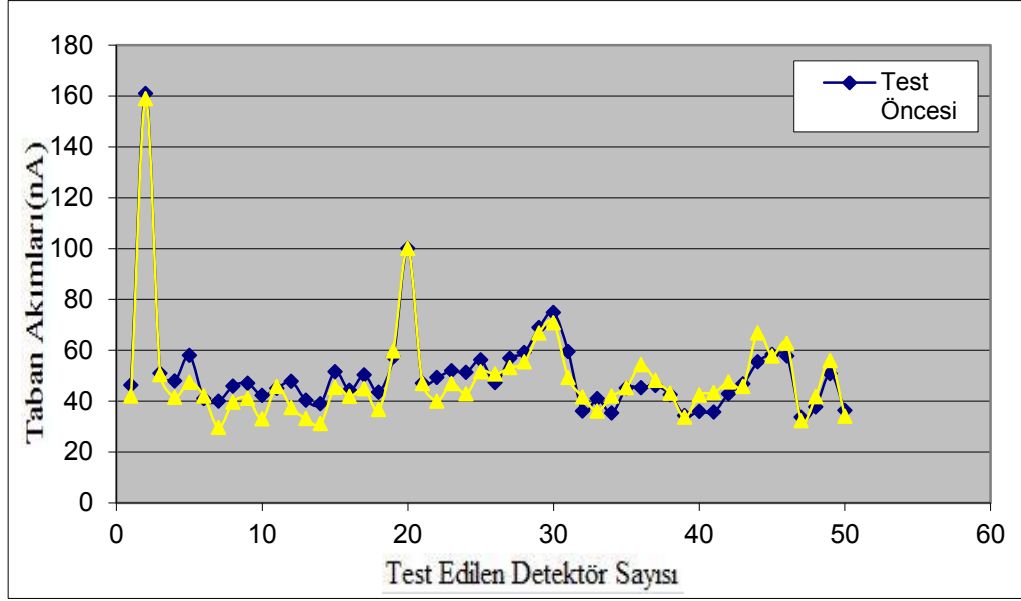
Şekil 7.3' e göre optik kazanç ortalamaları test öncesi %110 ile %121 arasında değişim gösteren fotodetektörlerin test sonrası optik ölçüm değerlerinin 6 detektör haricinde birebir aynı olduğu görülmektedir. Farklı olan detektörlerde ise maksimum %4' lük bir düşüş gözlenmiştir ve buna rağmen yaşlandırma testine maruz tutulmamış ticari bir detektöre göre %15 daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.



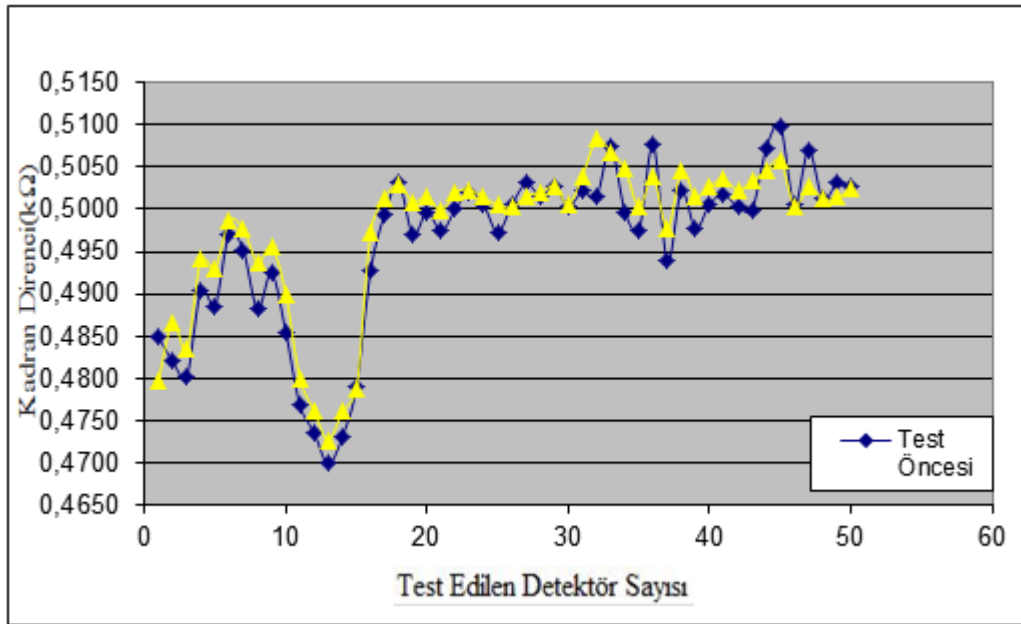
Şekil 7.4: Kadranların karanlık akımlarının ortalamaları.

Silisyum tabanlı fotodetektörlerin karanlık akımlarının maksimum 10nA olması istenmektedir. Şekil 7.4' e göre, yaşlandırma testi öncesi ve sonrası

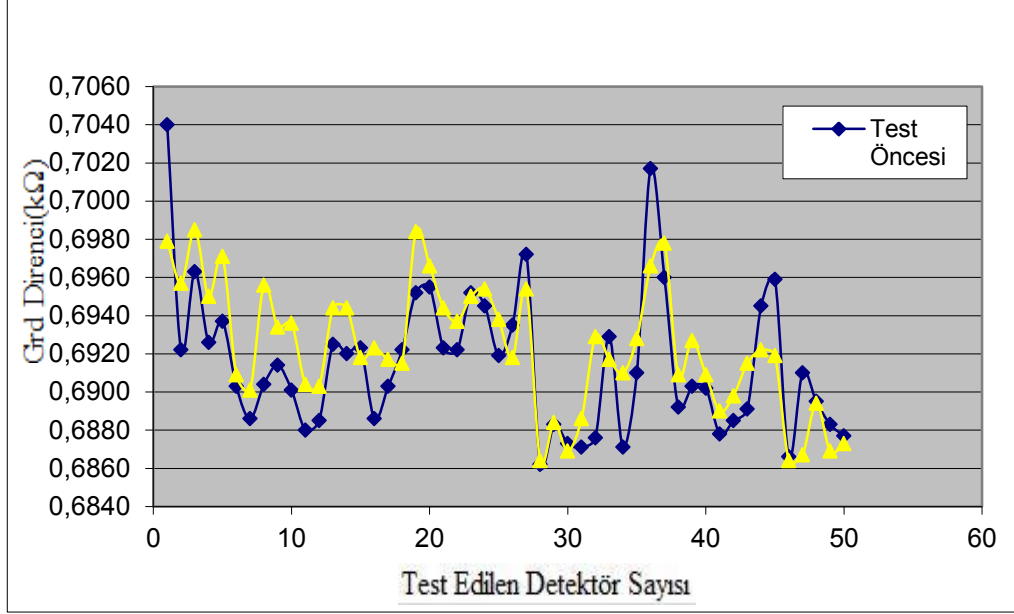
detektörlerin karanlık akım değerlerinin maksimum 0.3nA arttığı anlaşılmaktadır ve tüm detektörlerin karanlık akım değerlerinin 10nA' in altında olduğu görülmektedir.



Şekil 7.5: Detektörlerin taban akımları.



Şekil 7.6: Kadranların dirençlerinin ortalamaları.



Şekil 7.7: GRD Dirençleri.

Tablo 7.1: Test öncesi ve sonrası tüm değerlerin karşılaştırılması.

	Taban Akımı %	Karanlık Akım %	Optik Kazanç %	Kadran Direnci %	GRD Direnci %
Min.	-25,8	-17,6	-3,1	-1,0	-0,9
Ort.	-3,3	-1,1	-0,2	0,3	0,1
Maks.	21,4	21,4	0,9	1,4	0,8
Std. Sapma	12,3	10,1	0,7	0,5	0,3

Bu grafiklere göre test öncesi ve sonrası ölçüm değerlerinin birbirine yakın olmaları detektörlerde bozulma olmadığını göstermektedir ve ayrıca; taban akımlarının test sonrası ortalama %3,3 ve kadranların ortalamalarının test sonrası ortalama %4,2 azaldığı; optik kazançlarının ortalama %0,2 azaldığı; kadranların ortalama direnç verilerinin ortalama %0,3 arttığı görülmektedir. Karanlık akımın zaman içerisinde azalması, detektörlerin optik tepkisellik kazanımlarını arttırma eğilimde bir etki yapmaktadır fakat bu duruma zıt olarak; direnç değerlerindeki artış olumsuz yönde etki etmektedir.

7.2 Ki- Kare Yöntemiyle İstatistiksel Verilerin Hesaplanması

Testleri yapılan foto detektörlerin, hızlanma faktörleri Arrhenius denklemi kullanılarak hesaplanmıştır ve %60 ve %90 güvenilirlik seviyelerine göre FIT değerleri ve ortalama bozulma süreleri çıkartılmıştır. Test koşulları ve kullanılan gerekli parametreler Tablo 7.2’ de, detektörlerin coğrafi olarak farklı ortam sıcaklıklarına göre yaşlanma süre değişimleri Şekil 7.8’ de ve ayrıca örnek sayısının artması ile bozulma sayısının değişmediği varsayıldığında, %90 güvenilirlik seviyesine göre test edilen detektör sayısı ile FIT değerinin değişimi Şekil 7.9’ da gösterilmiştir.

Tablo 7.2: Test koşulları ve kullanılan sabitler.

Açıklama	Simge	Değer	Birim
Aktivasyon Enerjisi	Ea	0,6	eV
Raf Sıcaklığı	Tk	293	K
Test Sıcaklığı	Tt	393	K
Boltzmann Sabiti	K	8,617*10e-5	eV/K
Test Süresi	Ts	290	Saat
Test Edilen Fotodetektör Sayısı	TFDs	50	Adet
Bozulan Fotodetektör Sayısı	BFDs	0	Adet
Sabit	A	1	-

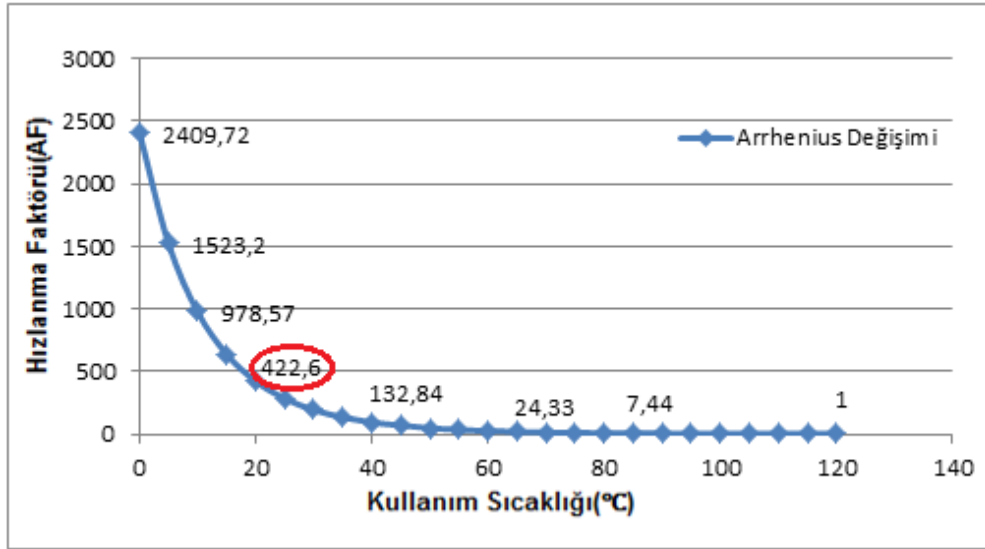
TDH= 50*290= 14500 cihaz- saat;

$$AF = A * \exp\left(\frac{Ea}{k} \left(\frac{1}{Tk} - \frac{1}{Tt}\right)\right) \quad (7.1)$$

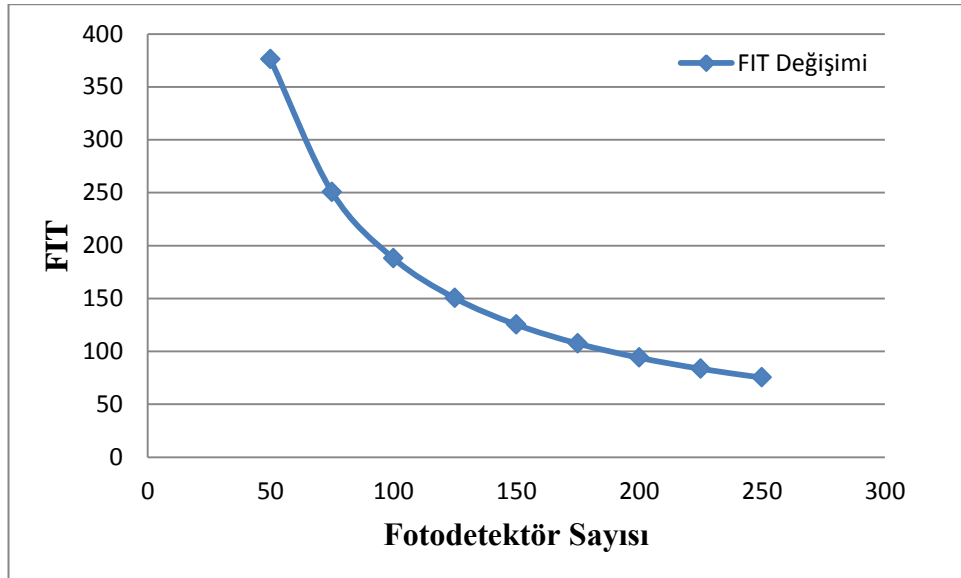
$$\lambda = \sum_{i=1}^{\beta} \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^k TDH * AF_{ij}} \right) * \frac{M * 10^9}{\sum_{i=1}^{\beta} x_i} \quad (7.2)$$

- AF= 422,6;
- Serbestlik derecesi= 2*(0+1)= 2;
- %90 Güvenilirlik için $X^2 = 1,83*2,52=4,61$;

- %60 Güvenilirlik için $X^2 = 1,83$;
- Bozulma oranı($FR_{\%90}$)= $4,61/(2*14500*422,6) = 3,76*1,0e-7$;
- Bozulma oranı($FR_{\%60}$)= $1,83/(2*14500*422,6) = 1,49*1,0e-7$;
- $\lambda_{\%90} = FR*1,0e9 = 376$ FIT;
- $\lambda_{\%60} = FR*1,0e9 = 146$ FIT;
- $MTTF_{\%90} = (1/FIT)*1,0e9 = 2,65*1,0e6$ saat;
- $MTTF_{\%60} = (1/FIT)*1,0e9 = 6,71*1,0e6$ saat.



Şekil 7.8: Farklı çevresel sıcaklıklara göre hızlanma faktörünün değişimi.



Şekil 7.9: FIT Değeri değişimi.

8. Sonuçlar ve neriler

Bu yapılan çalışma neticesinde fotodetektörlerin yüksek sıcaklık raf ömrü testlerinin yapılması ve istatistiksel olarak ömürlerinin hesaplanması gerçeklenmiştir. YSRÖ testi sonrasında fotodetektörlerde bozulma olup olmadığını anlamak için yaşlandırma testi öncesi ve sonrası bir takım elektriksel testler yapılmıştır ve karřılařtırılmalđ grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafiklere göre YSRÖ testi öncesi ve sonrası yapılan elektriksel testlerin örtüştüğü ve bozulma olmadığı anlaşılmaktadır. Buna göre bozulan fotodetektör sayısının sıfır alınması ile ki- kare yöntemiyle FIT değerleri elde edilmiştir. Test edilen fotodetektör sayısının arttırılması ile test süresince bozulma olmadığı varsayımıyla, hesaplanan FIT değerinin daha düşük çıkacağı anlaşılmaktadır.

Güvenilirlik test standartları incelendiğinde fotodetektörlerin, gerek üretici ile alıcı arasındaki transfer işlemi aşamasında gerekse depolanan ortam koşullarına göre, yüksek sıcaklıkta çalışma ömür testi, yüksek sıcaklık yüksek nem oranı testi, düşük sıcaklık raf ömrü testi, yüksek sıcaklık yüksek nem oranı raf ömrü testi, titreşim testi, mekanik şok testi, sabit ivmelenme testi, atmosfer testi ve radyasyon testi gibi testlerin de yapılabilereği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte fotodetektörlerin üretim maliyeti ve süresi düşünöldüğünde, her bir üretim grubundan belli miktarda fotodetektörün tüm bu testlere tabi tutulması oldukça maliyetli bir işlemdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle, tasarım verileri kullanılarak fotodetektörlerin güvenilirlik testlerinin gerçeklenmesi konusu ileriki zamanlarda hem test süresini hem de maliyeti azaltmak için araştırılıp hayata geçirilmeye açık bir konudur.

KAYNAKLAR

- [1] Luis A. E., William Q., (2006), “A Review of Accelerated Test Models”
Statistical Science, 21(4), 552-577.
- [2] Blish R., Durrant N., (2000), “Semiconductor Device Reliability Failure Models”, International SEMATECH Reliability Technology Advisory Board,#00053955A-XFR, New York, USA, 31 May.
- [3] Web 1, (2008), http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/quality/rel/calculation_of_semiconductor_failure_rates.pdf, (Erişim Tarihi: 08/03/2015).
- [4] Peck D. S., (1986), “Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation”
24th International Reliability Physics Symposium, 44–50, Allentown, USA, 1- 3 April.
- [5] Web 2, (2014), <http://toshiba.semicon-storage.com/us/design-support/reliability/device/testing.html>, (Erişim Tarihi: 21/05/2015).
- [6] Rao S., Lin L., Xu X., Deng B., Borges R., (2014), “Effects of various assembly and reliability stresses on chip to package interaction”, Reliability Physics Symposium, 2014 IEEE International, 2F.3.1- 2F.3.6, Waikoloa, HI, 1- 5 June.
- [7] Huitink D., Enamul K., Rangaraj S., Lucero A. (2014), “Acceleration of chip - Package failures in temperature cycling”, Reliability Physics Symposium, 2014 IEEE International, 2F.4.1- 2F.4.4, Waikoloa, HI, 1- 5 June.
- [8] Web 3, (2014), http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/mnkunmaz_77bfdad1eaf6e41964fcf9837f8acd9b.pdf, (Erişim Tarihi: 21/05/2015).
- [9] Web 4, (2004), http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/168932147Analog_June_PL.pdf, (Erişim Tarihi: 21/05/2015)
- [10] W. Nelson, (2004), “Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis”, 1st Edition, Wiley & Sons Inc.
- [11] Xiao H., (2012), “Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology”
2nd Edition, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- [12] Web 5, (2010), http://mf1.dpu.edu.tr/~altuncu/fiber/Bolum%206_sunum.pdf, (Erişim Tarihi: 01/05/2015).
- [13] Web 6, (2010), <http://www.renesas.com>, (Erişim Tarihi: 16/03/2015).
- [14] Web 7, (2007), <http://www.yildiz.edu.tr/~fbakan/>, (Erişim Tarihi: 01/05/2015).
- [15] Özek F., (2000), “Katı Hal Elektronik”, No: 52, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları.

- [16] Kmietowicz Z. W., Yannoulis Y. (1988), “Statistical tables for economic, business, and social studies”, 2nd Edition, Longman Scientific & Technical.
- [17] Web 8, (2004), <http://www.diodes.com/pdfs/handbook.pdf>, (Erişim Tarihi: 26/05/2015).
- [18] Web 9, (2014), <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-311.pdf>, (Erişim Tarihi: 26/05/2015).
- [19] Sukharev V., Zschech E., Nix William D., (2007), “A model for electromigration-induced degradation mechanisms in dual-inlaid copper interconnects: Effect of microstructure”, Journal of Applied Physics, 102, 053505-1.
- [20] Özek F., (1995), “Optoelektronik”, No: 29, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye işletmesi Yayınları.
- [21] Koch T., Richliug W., Whitlock J., Hall D., (1986), “A Bond Failure Mechanism”, 24th International Reliability Physics Symposium, 55–60, Allentown, USA, 1- 3 April.
- [22] Acar C., Schkel A., (2009), “MEMS Vibratory Gyroscopes Structurel Approaches to Improve Robustness”, 1st Edition, Springer.
- [23] Nishi Y., Doering R., (2007), ‘Handbook of semiconductor manufacturing technology’, 2nd Edition, Taylor & Francis Group.

ÖZGEÇMİŞ

Aykut KAHRAMAN 1989 yılında AYDIN’ da doğdu. 2007 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi (SAÜ) Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi(GTÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2012 yılından buyana TÜBİTAK bünyesindeki Yarı İletken Laboratuvarı’nda araştırmacı olarak çalışmaktadır.