

T.C
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84069

GENİŞ BİR SICAKLIK ÇALIŞMA ARALIĞI
İÇİN ENTEGRE SİLİKON BASINÇ
ALGILAYICISI

Ramazan ÇOBAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Vasile BEŞLİU

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

GEBZE

1999

84069

Bu tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/07/1999 tarih ve 99/18 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(Tez Danışmanı)

: Yrd. Doç. Dr. Vasil BEŞLİU

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul KARAÇUHA

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. E. Murat ESİN

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 79/07/1999 tarih ve 99/20 sayılı kararı.

İmza/Mühür


ÖZET

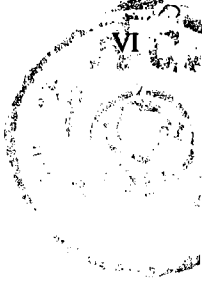
İnce bir tek kristalli zar ve daha kalın bir silikon kenardan oluşan minyatür bir katı-hal piezoresistif basınç algılayıcısı tasarlandı ve çalışma ilkeleri ve imalat teknolojisi geniş bir şekilde anlatıldı. Silikon basınç algılayıcısının sıcaklık bağımlılığının ısı kompanzasyonu için bazı elektronik devreler tasarlandı. Entegre devrelerin planar teknolojisi silikon zarlı basınç algılayıcısının imalatı için temel teknoloji olarak analiz edildi. Özel kompanze entegre devreli tek kristalli bir silikon basınç algılayıcısının mikroelektronik teknolojisi araştırıldı. -60°C - $+125^{\circ}\text{C}$ çalışma sıcaklık aralığında basınç algılayıcısının esas karakteristikleri çıkarıldı.



SUMMARY

A miniature solid-state piezoresistive pressure sensor, which consists of a thin monocrystalline silicon membrane supported by a thicker silicon rim, is designed and principles of its work and fabrication technology are widely described. Some electronic circuits for thermocompensation of the temperature dependence of the silicon pressure sensor are investigated. Planar technology of integrated circuits as the basic technology for fabricating silicon membrane pressure sensor is widely considered. The microelectronic technology of a monolithic silicon pressure sensor with p-n junction compensation integrated circuits is elaborated and proposed. The main dependence characteristics of pressure sensor in the temperature working range from $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ are presented.





TEŞEKKÜR

Herşeyden evvel, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Rektörü Prof. Dr. Ahmet AYHAN hocama bana olan teşviklerinden dolayı minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Devamlı bana maddi ve manevi destek veren Prof. Dr. Enis ÖKSÜZ'e de sonsuz şükranlarımı sunmak isterim.

Tezim süresince, tezimi hazırlamamda benden katkılarını, desteklerini ve ilgilerini esirgemeyen hocalarım Yrd. Doç.Dr. Ertuğrul KARAÇUHA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Vasile Beşliu'ya şükranlarımı ifade etmek isterim.

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ndeki meslektaşlarıma, öğrenci arkadaşlarıma ve hocalarıma bu çalışmaya olan çok kıymetli katkılarından ötürü teşekkür etmek isterim.

Son olarak da anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım. Onlar hakikaten bir ebeveyn olarak kıymeti bilinmesi gereken insanlardır. Hayatım boyunca onlara daima minnettar kalacağım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ENTEGRE KATI-HAL PİEZORESİSTİF ALGILAYICILAR.....	2
2.1. Silikon-Temelli Basınç Algılayıcıları.....	2
2.2. Piezoresistif Basınç Algılayıcılarının Genel Yapısı.....	4
2.3. Difüzyonlanmış Dirençlerde Piezoresistivite.....	5
2.3.1. Etkin Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı.....	5
2.3.2. Bir Dopink Karışım Fonksiyonu Olarak Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı.....	6
2.3.3. Bir Sıcaklık Fonksiyonu Olarak Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı.....	6
2.4. Bir Baskı Fonksiyonu Olarak Direnç Değişimi.....	7
2.5. Wheatstone Köprüsü.....	9
2.6. Bir Piezodirencin Geometrik Tasarımı.....	11
2.7. Piezoresistif Basınç Algılayıcılarının Sıcaklık Katsayısı.....	12
3. SİLİKON ENTEGRE BASINÇ ALGILAYICISININ TEMEL İMALAT İŞLEMLERİ.....	15
3.1. I.C. Teknolojisi.....	15
3.2. Silikonun Isıl Oksidasyonu.....	16
3.3. Optik Litoğrafi ve Desen Transferi.....	17
3.4. Silikon Planar Dirençlerin İmalat Yöntemleri Olarak Difüzyon ve İyon Kaplama.....	19
3.4.1. Difüzyon.....	19
3.4.2. Difüzyon Maskesi.....	20
3.4.3. İyon Kaplama.....	21
3.5. Film Metalleme.....	21

3.5.1. Spin Kaplama	21
3.5.2. Vakum Buharlaştırma.....	22
3.5.3. Spatirin.....	22
3.5.4. Kimyasal Buhar Kaplama (CVD).....	23
3.5.5. Plasma Kaplama.....	23
3.6. Kimyasal Aşındırma.....	24
3.6.1. Islak Aşındırma.....	24
3.6.2. Kuru Aşındırma.....	24
3.7. Diyaframın İşlenmesi.....	26
3.7.1. Malzemeler	27
3.7.2. Anisotropik Silikon Aşındırma.. ..	27
3.7.3. Alkalın Aşındırıcılar ve Aşındırma Maskeleri.....	28
3.8. Toplama Teknikleri ve Paketleme.....	29
3.8.1. Ayırma.....	29
3.8.2. Birleştirme.....	30
3.8.3. Bağlama.....	30
3.8.4. Paketleme.....	31
4. GENİŞ BİR SICAKLIK ÇALIŞMA ARALIĞINDA ENTEGRE SİLİKON BASINÇ ALGILAYICISI.....	33
4.1. Silikon Entegre Basınç Algılayıcısının İmalatında Teknolojik İşlemler....	33
4.2. Offset Sapmanın Sıcaklık Kompanzasyon Yöntemleri.....	37
4.2.1. Sabit Sıcaklık ile Değişken Köprü Gerilimi Altında.....	38
4.2.2. Değişken Sıcaklık ile Sabit Köprü Gerilimi Altında.....	41
4.2.3. Köprü ile Seri Bir Termistör Kullanarak Offset Isıl Sapmanın Kompanzasyonu.....	41
4.2.4. Köprü ile Paralel Bir Termistör Kullanarak Offset Isıl Sapmanın Kompanzasyonu.....	43
4.3. Duyarlılığın Sıcaklık Kompanzasyon Yöntemleri.....	46
4.4. Silikon Basınç Algılayıcısının Sıcaklık Kararlılığının Bulunması.....	48
5. SONUÇ.....	53
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- D: Diyod.
- I: Devre akımı.
- I_b : Köprü akımı.
- I_B : Taban akımı.
- I_0 : Sabit akım.
- j: Jonksiyon derinliği.
- P: Basınç.
- ΔP : Basınç değişimi.
- Q_0 : Sıfır basınçta köprü offseti.
- ΔQ : P basıncında efektif köprü offset.
- r: Yanlış eşleme direnci.
- R: Resistörlerin direnci.
- R_B : Eşdeğer köprü direnci.
- ΔR : Direnç değişimi.
- ΔR_i : Basıncıdan kaynaklanan direnç artışı.
- R_T : Termistör direnci.
- S: Duyarlılık.
- T: Sıcaklık.
- U: Gerilim.
- U_Q, V_{OUT} : P basıncında çıkış gerilimi.
- U_{off}, V_0 : Offset.
- V: Elektriksel sapmayla kompanze etme gerilimi.
- V_B : Kaynak gerilimi.
- V_C : Giriş gerilimi.
- V_b : Köprü gerilimi.
- ϵ : Duyarlılığın Sıcaklık Katsayısı (TCS).
- γ : Offsetin Sıcaklık Katsayısı (TCO):
- π_l, π_t : Sırasıyla boyuna ve enine piezoresistans katsayıları.
- σ_l, σ_t : Sırasıyla boyuna ve enine baskı.
- CVD: Kimyasal buhar kaplama.
- CMOS: Tamamlayıcı metal oksit yarıiletken.

DIP: İki taraflı paket.

EDP: Ethylene diamine pyrocatechol.

FET: Alan etkili transistör.

FS: Tam ölçek.

FSO: Tam ölçek çıkış.

IC: Entegre devre.

LPCVD: Düşük basınç kimyasal buhar kaplama.

MOSFET: Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör.

PECVD: Kimyasal buhar kaplama için gerekli enerji.

TCO: Offsetin sıcaklık katsayısı.

TCR: Direncin sıcaklık katsayısı.

TCS: Duyarlılığın sıcaklık katsayısı.

VLSI: Çok geniş ölçekli entegrasyon.

ULSI: Ultra geniş ölçekli entegrasyon.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. Bir piezoresistif basınç algılayıcısının kasit alanı.....	5
2.2. Aynı matematiksel kirlilik profil fonksiyonuna ve yüzey konsantrasyonuna fakat farklı tabaka kalınlığına sahip iki p-tipi difüzyonlanmış tabaka için sıcaklığa karşı boyuna piezoresistans katsayısı.....	7
2.3. Dört direncin temel yerleşiminin bir zar üzerinde gösterilmesi.....	9
2.4. Dört dirençli Wheatstone Köprüsü. Oklar, zar yukarı istikametde bulunduğu zaman direnç değişimlerini gösterir.....	10
2.5. Piezodinçlerin alternatif planı.....	11
2.6. Dirençlerin simetrik olarak yanlış yerleştirilmiş Wheatstone köprüsü.....	14
3.1. Bir maskeden bir levhaya yüzeyinde bir yalıtkan film ile transfer işlemi.....	19
4.1. Entegre silikon basınç algılayıcısı imalatının kesiti;.....	35
(a) başlangıç malzemesi,	
(b) kalın oksit oluşumu,	
(c) fotodirenç maske ve aşındırılmış oksit desenleme,	
(d) diyafram oluşumu,	
(e) ikinci ısıl oksitleme,	
(f) boron implantasyonu,	
(g) taban ve direnç sürülmesi,	
(h) emiter desenleme,	
(i) emiter difüzyonu,	
(j) bağlantı pencereleri desenleme,	
(k) alüminyum metalleme,	
(l) pasif desen aktarımı.	
4.2. "Gauge" gerilim basınç algılayıcısının kesiti.....	37
4.3. Bir basınç algılayıcısı için bir piezodirenç köprüsü.....	39
4.4. Farklı kollarda iki sabit direnç kullanarak offset sapmanın termal kompanzasyon köprüsü.....	39
4.5. Offset termal sapmanın kompanzasyonu için köprü ile seri bir termistör.....	43
4.6. Offset termal sapmanın kompanzasyonu için köprü ile paralel bir termistör.....	43
4.7. Termistör kullanarak basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyon devresi.....	46
4.8. Harici sabit dirençler kullanarak basınç algılayıcısının sıcaklık	

kompanzasyon devresi.....	46
4.9. Basınç algılayıcısının duyarlılığının ısı kompanzasyonu için termistörlü elektronik devre.....	48
4.10. Basınç algılayıcısının duyarlılığının ısı kompanzasyonu için transistörlü elektronik devre.....	48
4.11. Diyod kullanarak basınç algılayıcısının ısı kompanzasyon devresi.....	49
4.12. Basınca karşı çıkış gerilimi, 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.....	50
4.13. Sıcaklığa karşı çıkış gerilimi, 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.....	50
4.14. İki diyodla kompanze entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_C) bir fonksiyonu olarak duyarlılık (S), 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.....	51
4.15. İki diyodla kompanze entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_C) bir fonksiyonu olarak offsetin sıcaklık katsayısı (γ), 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.....	51
4.16. İki diyodla kompanze entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_C) bir fonksiyonu olarak duyarlılığın sıcaklık katsayısı (ϵ), 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.....	52

1. GİRİŞ

Bir algılayıcı (sensor) bizim duyularımızla bazı bağlantılar kurmayı sağlar. Doğrudan hiçbir şekilde duyularımız tarafından algılanmayan fiziksel ve kimyasal işaretler hakkında bize bilgi tedarik eder. Algılayıcı, ısı, ışık, ses, magnetizma, veya özel bir eylem gibi fiziksel ve kimyasal uyarıcılara cevap veren ve bir sonuç işareti aktaran (ölçme ve kontrol işleminde olduğu gibi) bir aygıttır. Böylece, bir algılayıcı bir giriş işaretini veya enerjisini yakalayabilir ve onu uygun bir çıkış işaretine (veya enerjisine) çevirir.

Yarıiletken algılayıcılar içerisindeki yarıiletken malzemelerin algılama işleminde esas sorumlu olduğu yarıiletken aygıtlardır. Özel bir algılayıcı için yarıiletken malzemelerin optimum olmadığı durumlarda alternatif malzemeler, algılayıcıyı oluşturmak üzere yarıiletken tabaka üzerine kaplama yapılabilir, örneğin, silikon üzerine ZnO kaplamalı yüzey-ses-dalga algılayıcısı gibi. Her iki yaklaşım da yarıiletken algılayıcılar ile mikroelektronik devreleri birleştirmeye imkan sağlar [Sze, 1994].

Yarıiletken algılayıcılar küçük hacimleri ve imalatında kullanılan teknikler bakımından diğer katı-hal algılayıcılardan ayrılır. Çoğu yarıiletken algılayıcılar entegre devreler için geliştirilen işlemlerle imal edilirler. Silikon, elektronik özellikleri mekanik özelliklerle mükemmel bir şekilde birleştirdiği için yarıiletken algılayıcılar için çoğunlukla kullanılır. Silikonun diğer üstünlükleri küçültülmüş boyutlar, seri üretim ve kolay arayüz ve hatta elektronik devrelerle kolay entegrasyondur. Silikon mekanik algılayıcıların, özellikle basınç algılayıcılarının, esas eksikliği ana karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığıdır. Geniş bir sıcaklık aralığı için çıkış işaretinin sıcaklık bağımlılığının üstesinden gelebilmek bu çalışmanın esas gayesidir.

2. ENTEGRE KATI-HAL PİEZORESİSTİF ALGILAYICILAR

2.1. Silikon-Temelli Basınç Algılayıcıları

Basınç algılayıcıları geniş bir şekilde ölçme ve kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv sanayinde basınç algılayıcıları eşzamanlı elektronik motor kontrolü için yağ, fuel ve çeşitli basınç ölçümlerinde kullanılır; proses otomasyon uygulamaları için basınç algılayıcısı anahtar gereçlerden biridir; biyomedikal sahasında solunum ve kan aktarma sistemlerindeki basıncı görüntülemekte kullanılır. Silikon-temelli basınç algılayıcıları 1970'lerden beri seri olarak üretilmektedir. Onlar ilk kütle üretim silikon-temelli algılayıcılardır. Esas itibariyle iki tür silikon-temelli basınç algılayıcısı vardır: (1) basıncı ölçecek p veya n tipi bir silikon elemanın baskı tarafından endüklenen direnç değişimini kullanan piezoresistif tip, (2) basınç değişimlerini algılayacak basınç duyarlı bir kapasitör kullanan kapasitif tip. Algılayıcı pazarı piezoresistif tip basınç algılayıcıları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu esas olarak piezoresistif algılayıcının uygulanan basınca göreceli olarak hassas olduğu ve onun analog çıkışı, çıkış empedansı düşük olmasına rağmen geniş bir basınç aralığında doğrusal olmasındandır, şöyle ki çip üzeri devreleri genellikle gerektirmez. Kapasitif algılayıcılar için basınç duyarlılığı piezoresistif basınç algılayıcılarındakinden çok daha fazladır (iki katından daha fazla olabilir). Algılayıcı cevabındaki sıcaklık etkisi önemli derecede daha azdır ve güç tüketimi çok daha azdır. Bütün bunlara rağmen kapasitif basınç algılayıcıları doğrusal değildir. Onlar ilave elektronik devreler gerektirir.

Piezoresistivite, malzemeye uygulanan mekanik baskı tarafından kütle resistivitenin etki ettiği yerdeki bir malzeme özelliğidir. Çoğu malzeme hareketlilik (mobility) veya malzemenin hacminin bir fonksiyonu olarak yük taşıyıcılarının sayısına bağlı baskı sergiler. Hacim değişikliği valans ve iletim bandları arasında enerji boşluğuna etki eder. Böylece, taşıyıcı sayıları ve resistivite değişir. Piezoresistivite etkisi böyle mekanizmalar tarafından tahmin edilenden çok daha fazla olacağı aşikardır. Bu çok-kanallı-model (many-valley models) vasıtasıyla

açıklanmaktadır. Çoğu malzeme bir dereceye kadar muhtemelen piezoresistans etkisine sahiptir, fakat bazı yarıiletkenlerde bilhassa çok daha önemlidir. Tek kristalli silikon, mekanik deformasyonu elektrik işarete çeviren mükemmel özelliğinin yanında yüksek bir piezoresistiviteye sahiptir. Söylemeye ihtiyaç duymaksızın, silikon elektronik sanayinde çok iyi bilinir. Böylece silikon, basınç, debi, ivme gibi mekanik işaretleri elektrik işaretlerine çeviren piezoresistif algılayıcıların temel malzemesi olarak yaygın bir biçimde kullanılır. Hakikaten, silikon-temelli basınç algılayıcılarının tarihi 40 yıl öncesinde silikon ve germanyumdaki piezoresistif etkinin keşfi ile başlar.

Bazı pratik avantajlar aşağıda listelenmiştir:

- Yarıiletkenlerin ölçüm faktörü matallerinkinden çok daha büyüktür;
- Silikon çok dayanıklı bir malzemedir;
- "Gauge" ve zarın birleştirilmesi iki elemanı birlikte bağlama ihtiyacını ortadan kaldırır ki bu da histerizis ve sürtünmeyi yok eder;
- Gerilme mükemmel bir şekilde zardan gauge' a iletilir;
- Dirençler baskının en büyük olduğu eğilme ve bükülmede elemanın yüzeyinde sınırlanır;
- Eğer Wheatstone köprüsü kullanılırsa kısmen faydalı olacak iyi bir direnç eşlemesi başarılabılır;
- Algılayıcı boyutlarının küçültülmesinde teknik çok uygundur;
- Kütle imalat mevcut entegre devre teknolojilerinden faydalanabilir;
- İşaret kuvvetlendiricisi ve sıcaklık kompanzatorü gibi elektronik devreler algılayıcı yongası üzerine ilave edilebilir.

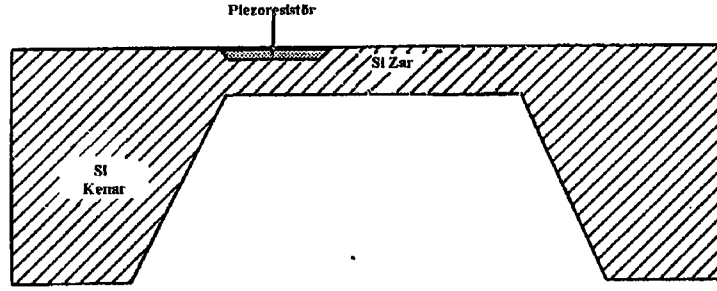
Dopink karışımı ve sıcaklık bağımlılığı algılayıcı tasarımında çok önemlidir. Yukarıda bahsi geçen özellikler öncelikle homojen bir dopink konsantrasyonlu kütle malzeme için tarif edilecektir. Difüzyon dirençler için içine girdiğinde durum çok daha karışık olur çünkü piezoresistans katsayıları ve onların sıcaklık davranışları dopink konsantrasyonuna bağlıdır [Göpel, et al, 1994].

2.2. Piezoresistif Basınç Algılayıcılarının Genel Yapısı

Özel bir algılayıcı yapmak için, ölçülecek büyüklük uygulandığı zaman içerisinde mekanik baskının olduğu yapıyı tasarlamak zorundayız. Direnç değişimi mekanik baskı ile orantılı olduğu için tercihen baskı, ölçülecek büyüklük ile orantılı olmalıdır. İki ana sınıf piezoresistif algılayıcı vardır: zar- tipi yapıda (tipik olarak basınç ve debi için) ve dirsek-kiriş tipi yapıda (tipik olarak ivme için) olanlarıdır.

En genel haliyle, bir piezoresistif zar-tipi algılayıcı, ince bir tek kristalli silikon zardan oluşur ve daha kalın bir silikon kenar onu destekler. Zarın üzerine, tipik olarak kenarlara yakın piezodirençler entegre edilir. Zar, belirlenmiş bir bölge üzerinde kütle silikon gerekli kalınlığa erişilinceye kadar aşındırılarak imal edilir. Şekil 2.1, bir piezoresistif basınç algılayıcısının kesit alanını göstermektedir. Bir basınç farkı cihazın her iki tarafına uygulandığı zaman zar aşağı veya yukarı istikamette direnç üzerinde çekme veya sıkışma endükleyerek burulur. Bu baskı tarafından sebep olunan direnç değişimi kolayca ölçülebilir.

Tarihi olarak ilk önce tek kristal-silikon zarlı algılayıcılar geliştirildi. Tek kristalli silikon çok küçük sürtünme ve histerizis nedeniyle çok kuvvetlidir (Young modülü 10^{11} Pa). Zarların isotropik ve anisotropik aşındırma ile imalatı da çok kolaydır. Yüzey aşındırmanın icadıyla çok kristalli zarlar da tasarlanmaktadır ki içerisinde dirençler difüzyonlanmaktadır (yayılmaktadır). Mekanik özellikleri bir derece kalitesiz ise de hassas ince zar kalınlık kontrolü ve küçük algılayıcı boyutu gerçekleştirilebilir. Sonuç olarak, çok kristalli piezodirençler diğer malzemelerin üzerine kaplanabilir ve desenlenebilir. Bu yapı bilhassa yüksek sıcaklık uygulamaları için faydalıdır çünkü yukarıda bahsi geçen algılayıcılarda sadece elektrik yalıtımı için kullanılan p-n jonksiyonlar yüksek sıcaklıklarda büyük kaçak akım verecektir. Netice itibarıyla bu kaçak akımlar elektriki olarak yalıtılmamış çok kristalli piezodirençlerde mevcut değildir.



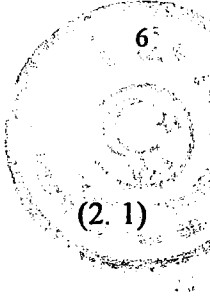
Şekil 2.1. Bir piezoresistif basınç algılayıcısının kasisit alanı.

2.3. Difüzyonlanmış Dirençlerde Piezoresistivite

2.3.1. Etkin Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı

Algılayıcı uygulamaları için yarıiletkenlerin önemli bir üstünlüğü şudur: baskının en büyük olduğu burulma ve eğilme altında akım, elemanın yüzeyi ile sınırlandırılabilir diye çok ince tabakalar standart mikroelektronik teknoloji vasıtasıyla imal edilebilir. Dahası piezodirençlerin geometrisi kolayca tariflenebilir. Eğer dopink elemanları ters dopink konsantrasyonlu bir silikon tabakasına yerleştirilirse ve sonra difüzyonlanırsa 0.5-3 μm 'lik bir piezoresistif tabaka elde edilir. Bu bölümde difüzyon tabakalar silikon tabaka kalınlığına kıyasla ince olduğu varsayılacak şöyle ki, tabakadaki baskılar derinlikten bağımsız olarak ele alınabilir.

Piezoresistans katsayıları artan kirlilik konsantrasyonu ile azalır. Difüzyon veya implantasyon dirençlerde kirlilik konsantrasyonu, derinliğin artmasıyla düşer böylece piezoresistans katsayıları yükselen bir profil gösterir. Eğer derinliğin (z) bir fonksiyonu olarak baskının olmadığı kirlilik profili bilinirse piezoresistans profili $\pi(z)$ belirlenebilir. Her bir piezoresistans katsayısı için ortalama bir π değeri, verilmiş dopink profili için aynı elektromekanik davranışı gösterecek etkin bir katsayı olarak tariflenebilir. Açık olarak ifade edilirse, ortalama katsayıya daha yüksek bir katkı akım akışının daha yüksek olduğu tabakalara verilmek zorundadır. Böylece yerel katsayı $\pi(z)$ 'te iletkenlik $\sigma(z)$ tarafından önem kazandırılır ki yine dopink profilinin bir fonksiyonudur [Göpel, et al, 1994]:



$$\bar{\pi} = \frac{\int_0^j \pi(z) \sigma(z) dz}{\int_0^j \sigma(z) dz}$$

burada j jonksiyon derinliğidir. Akım dağılımının uygulanan baskı ile büyük miktarda değişmediği varsayılmaktadır. Dirençlerin daha derin tabakaları daha az dopinklenmesine ve böylece daha yüksek bir piezoresistivite sergilemesine rağmen onların katkıları bu daha yüksek resistivite ile sınırlanır ve böylece daha az akım akışı olur.

Gösterilen piezoresistivite profilinin baskı profili ile çarpılması aşıkardır eğer baskı profili daha önce varsayıldığı gibi sabit değilse ve eğer direnç derinliği baskı altındaki tabaka kalınlığı ile kıyaslandığında ihmal edilebilirse. Kullanılan çok ince silikon zarlar veya dirsek kirişler için piezoresistif algılayıcılarda bu etki ihmal edilebilir.

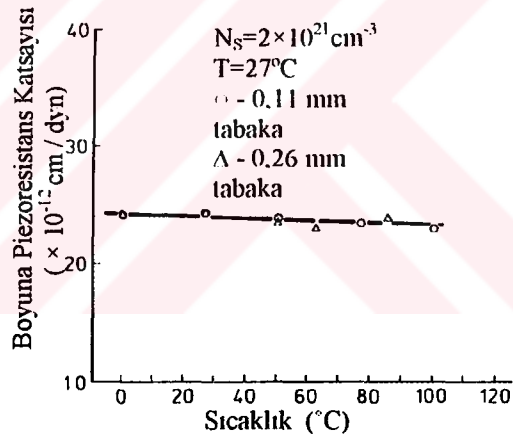
2.3.2. Bir Dopink Karışım Fonksiyonu Olarak Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı

Verilmiş bir kaplama işlemi için kaplayıcı dağılım fonksiyonunun şekli toplam difüzyon kaplayıcılarının miktarı ve difüzyon derinliği, oldukça farklı olsa bile, önemli bir şekilde değişmez. Bu gözleme dayanarak , verilmiş bir kirlilik dağılım fonksiyonunun matematik şekli için Denklem (2.1)' de tariflenen piezoresistans katsayıları sadece kirliliklerin yüzey karışımına bağlıdır, jonksiyon derinliğine değil. Böylece piezoresistans katsayısı sadece yüzey karışımının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir [Göpel, et al, 1994].

2.3.3. Bir Sıcaklık Fonksiyonu Olarak Difüzyonlu Piezoresistans Katsayısı

Kütle malzeme için piezoresistans katsayılarının sıcaklık katsayıları artan dopink karışımı ile düşer. Difüzyon dirençlerin piezoresistanslarının ortalama sıcaklık bağımlılığını hesaplamak amacıyla yine derinliğin bir fonksiyonu olarak

kirlilik profili üzerine entegrasyonu gereklidir. Böylece bağıl olarak yüksek bir yüzey konsantrasyonu gerekli olarak çok düşük bir sıcaklık bağımlılığı ile sonuçlanmaz çünkü daha derin ve dolayısıyla daha düşük dopink tabakaları daha yüksek bir sıcaklık katsayısı sergiler. Bu sebepten sığ olarak yerleştirilmiş çok keskin bir dopink konsantrasyon düşümlü dirençler eşit tabaka resistanslı derin olarak difüzyonlanmış dirençlerden daha az sıcaklık bağımlılığına erişebilir. Eşit konsantrasyon profilli dirençlerin sıcaklık davranışlarını sadece yüzey konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ifade etmek mümkündür. Şekil 2.2 aynı yüzey konsantrasyonlu fakat farklı derinlikli iki difüzyonlanmış p-tipi direncin sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Kütle malzeme için olduğu gibi difüzyonlanmış piezoresistans katsayısının yükselen sıcaklıkla düştüğü görülmektedir. Numunelerin yüzey konsantrasyonlarının çok yüksek ($2 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) olduğu farkedilebilir, şöyle ki sıcaklık katsayısı çok düşük Şekil 2.2 'den tahmin edildiği gibi yaklaşık $-0.05 \text{ \% } ^\circ\text{C}^{-1}$ olduğu görülebilir.



Şekil 2.2. Aynı matematiksel kirlilik profil fonksiyonuna ve yüzey konsantrasyonuna fakat farklı tabaka kalınlığına sahip iki p-tipi difüzyonlanmış tabaka için sıcaklığa karşı boyuna piezoresistans katsayısı.

2.4. Bir Baskı Fonksiyonu Olarak Direnç Değişimi

Yıllardır bir katının elektrik direnci (R) onun gerilmesinin bir fonksiyonu olarak bilinmektedir. Bu olay bilimsel bakış açısından farklı iletim mekanizmalarının anlaşılması veya çeşitli elektronik yapıların icadına katkıda bulunmak için

kullanılmaktadır. "Strain-gauge"larda, basınç dönüştürücülerinde ve "load cell"lerde uygulama bulmaktadır [Ciureanu, et al, 1992].

Resistans değişimi zarın veya dirsek-kiriş baskısının bir fonksiyonu olarak hesap edilebilir. Resistans değişimine boyuna (σ_1) ve enine (σ_t) baskıların akım akışına bağlı olarak bir katkısının olduğu Denklem 2.2'de gösterilmiştir. Dirençler üzerindeki mekanik baskıyı sabit farzederek toplam resistans değişimi ΔR

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_1 \pi_1 + \sigma_t \pi_t \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada π_1 ve π_t sırayla boyuna ve enine piezoresistans katsayılarıdır. Dikkat edilmesi gerekir ki boyut değişimleri (2.2) denkleminde hesaba katılmamaktadır [Göpel, et al, 1994].

Zar veya kiriş oriyantasyonu onun anisotropik imalatıyla belirlenir. Silikon levhanın (wafer) yüzeyi genellikle bir $\langle 100 \rangle$ düzlemidir ve aşındırılmış yapıların kenarları $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlemlerinin kesişimidir ve böylece (100) yönündedir. Böylece silikon kristale bağlı olarak piezodirençlerin oriyantasyonu da (110)'dır. (110) yönündeki boyuna piezoresistans katsayısı $\pi_1 = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$ ve uygun enine piezoresistans katsayısı $\pi_t = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$ 'dır. P-tipi dirençler için, π_{44} diğer iki katsayıdan daha önemlidir. (2.2) denklemini böylece p-tipi dirençler için

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2}(\sigma_1 - \sigma_t). \quad (2.3)$$

basitleştirilebilir. n-tipi dirençler için, π_{44} ihmal edilebilir, ve

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2}(\sigma_1 + \sigma_t). \quad (2.4)$$

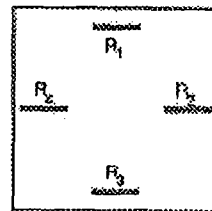
denklemini elde edilebilir [Göpel, et al, 1994].

Dikkat edilmesi gerekir ki (2.3) ve (2.4) denklemleri direnç boyutları zar veya kiriş hacmi ile mukayese edildiğinde küçükse veya sadece düzgün dağılmış baskı alanı içinde geçerlidir. Küçük algılayıcılar için baskılar, dirençler üzerinde değişecektir ve entegralini almak gerekmektedir.

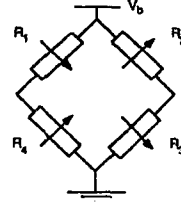
Piezoresistans katsayılarının değerlerini gözönünde bulundurarak denklem (2.3) ve (2.4)'den (110) kristal oriyantasyonu için onun p-tipinde olandan n-tipinde olanın iki veya üçkez daha yüksek basınç duyarlılığına sahip olduğu kolayca hesap edilebilir. Düşük dopink konsantrasyonu ve oda sıcaklığı için boyuna piezoresistans katsayıları sırayla $72 \cdot 10^{-11}$ ve $31 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, enine piezoresistan katsayıları sırayla $-66 \cdot 10^{-11}$ ve $18 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ 'dir. Böylece, $\langle 100 \rangle$ düzleminde en büyük boyuna piezoresistans katsayısı n-tipi için p-tipi için olandan daha büyük olmasına rağmen p-tipi dirençler tercih edilir çünkü onların katsayıları (110) yönünde en büyüktür oysa ki n-tipi katsayılar o yönde en küçük değere sahiptir.

2.5. Wheatstone Köprüsü

Genelde piezoresistif mikroalgılayıcı için tek bir piezodirenç kullanılmaz dört tane kullanılır (Şekil 2.3). İki direnç akım eksenleri yönündeki baskıyı algılasın diye ve ikisi de akım akışına dik baskıyı algılasın diye yerleştirilir. Bundan dolayı, ilk iki piezodirencin direnç değişimi daima diğer ikisinin zıt istikametinde olacaktır. Mesela, zar-tipi algılayıcılar için iki adet piezodirenç zarın kenarlarının karşısına paralel ve diğer ikisi de diğer kenarlara dik yerleştirilir. Zar yukarı yönde, zar yüzeyinin kenarları üzerinde gerilmeye sebep olarak, burulduğunda paralel dirençler yanal baskı altındadır ve dirençler düşme gösterir oysa ki dikey dirençler boyuna baskı altındadır ve yükselme gösterir. Şayet dirençler zar veya giriş üzerindeki baskı bölgesine göre doğru olarak yerleştirilmiş ise, dört direncin değişiminin mutlak değeri eşit yapılabilir. Dirençler Şekil 2.4'de gösterildiği gibi bir Wheatstone köprüsüne bağlanabilir. Eşit olarak yerleştirilmiş dirençler, uygulanan basınç altında, köprünün sağ ve sol çıkış noktaları ters işaretli sıfır-basınç gerilimlerinden ayrılсын diye köprünün karşılıklı kollarını teşkil eder.



Şekil 2.3. Dört direncin temel yerleşiminin bir zar üzerinde gösterilmesi.



Şekil 2.4. Dört dirençli Wheatstone Köprüsü. Oklar, zar yukarı istikametde burulduğu zaman direnç değişimlerini gösterir.

Wheatstone köprüsü konfigürasyonunun bazı belirgin faydaları vardır. Direnç değişimini bir gerilim işaretine çevirir. Direnç değişimleri (ΔR) tamamıyla aynı fakat işaretleri farklı olduğu varsayılan ideal olarak dengeli bir köprünün çıkış gerilim değişimi (ΔV), bir zar üzerinde diferansiyel basınç değişimi (ΔP)' ye cevap olarak

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} V_b \quad (2.5)$$

denklemleri ile verilir. Burada R sıfır-gerilim direnci, V_b köprünün kaynak gerilimidir. Basınç hassasiyeti (S) uygulanan diferansiyel basınç başına çıkış geriliminin değişimi olarak ifade edilebilir ($mV V^{-1} bar^{-1}$ olarak ifade edilir) [Göpel, et al, 1994]:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} \cdot \frac{1}{V_b} = \frac{\Delta R}{\Delta P} \cdot \frac{1}{R} \quad (2.6)$$

Burada Wheatstone köprüsünün önemli bir üstünlüğü ortaya çıkıyor: bir dereceye kadar çıkış gerilimi piezodirençlerin mutlak değerlerine bağlıdır fakat bağlı direnç değişimi ve köprü gerilimi ile belirlenecek görünmektedir.

Sabit bir köprü akımı I_b uygulanırsa basınç duyarlılığı, birim basınç ve köprü akımı başına diferansiyel çıkış gerilimindeki değişim olarak tarif edilir ($mV mA^{-1} bar^{-1}$ olarak birimlendirilir).

$$S = \frac{\Delta V}{I_b} \cdot \frac{1}{\Delta P} = \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (2.7)$$

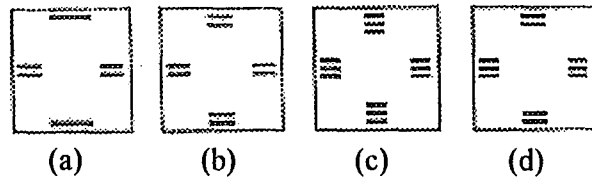
İdeal durumda, her bir yarı-köprünün ve böylece de tam-köprünün toplam direnci basınçtan bağımsızdır çünkü direnç değişimlerinden biri diğerini yok eder. Bundan başka belirli sıcaklık etkilerindeki genel-kip (common mode effect) etkileri diferansiyel köprü çıkışında hissedilmez. Hakikaten, bir sıcaklık artışı köprü çıkışı sıfır kalsın diye bütün piezoresistansların dirençlerini dengeli bir biçimde yükseltir.

Bunun sadece mükemmel bir şekilde dengelenmiş bir köprü için olduğu özellikle belirtilmelidir. Yine ilginçtir ki sabit bir köprü geriliminde toplam akım sıcaklıkla veya daha pratik ölçüm için sabit köprü akımında tam köprü gerilimi, algılayıcının daha ileri sıcaklık etkilerinin telafi edilmesi için, değişecektir.

2.6. Bir Piezodirençin Geometrik Tasarımı

Bu bölümde piezodirençlerin boyutları veya onların ince silikon zar veya kiriş üzerindeki durumları incelenecektir. İnceleme piezorezistif zar algılayıcılar üzerinde yoğunlaşmaktadır, fakat çoğu sonuçlar kriş algılayıcılar içinde geçerlidir. Piezodirençlerin boyutları ve durumları en büyük basınç duyarlılığı ve beklenen yeniden üretilebilirlik gibi diğer önemli ihtiyaçlar arasındaki uzlaşmayı temin edecek biçimde seçilecektir.

Kare zarlı çoğu algılayıcılar, zarın dört kenarına yerleştirilmiş dört piezodirenç sahiptir (Şekil 2.5). İlk tasarım kuralı, dirençleri zar kenarlarının merkezine mümkün olduğunca yakın yerleştirmektir çünkü orası baskının en büyük olduğu yerdir. Bu düşünceden hareketle baskı, zarın merkezine doğru köşelere doğru olandan daha hızlı bir şekilde düşer çünkü düşey dirençler paralel dirençlerden daha az basınç duyarlılığına sahiptir. Wheatstone köprüsünün simetrisini muhafaza etmek için paralel dirençler eşit duyarlılık elde edilinceye kadar belirli bir duyarlılık kaybını yükselterek kenardan uzaklaştırılmalıdır. Çok küçük zarlar için duyarlılık kaybı önemli olabilir. Bu durumda düşey dirençleri iki kısma ayırmak önerilebilir (Şekil 2.5.a). Her iki düşey ve paralel dirençler iki veya üç parçadan oluştuğunda tasarım seçenekleri mümkündür (Şekil 2.5.b,c,d).



Şekil 2.5. Piezodirençlerin alternatif planı.

İkinci bir tasarım şekli, dirençler ve kenarlar arasındaki enaz müsaade edilebilir mesafedir. Bu değişken uygulamada zarın yeniden üretilebilirliği ile

sınırlandırılır. Ticari olarak üç inçlik silikon tabakalar imalatçı tarafından garantilenen belirli bir kalınlık yeniden üretilebilirliğine sahiptir ($\pm 8 \mu\text{m}$). Bütün zarlar ve kirişler tam olarak aynı kalınlığa kadar arka taraftan aşındırılır. Bununla birlikte, levha kalınlık değişmelerinden dolayı aşındırılmış çukurlar bazı levhalar için diğerlerinden daha derin olacaktır ve çukurların $\langle 111 \rangle$ eğimiyle oluşturulan piramid yapı, aşındırma derinliğine bağlı olarak daha fazla veya daha az kapalı olacaktır. $\langle 111 \rangle$ eğimleri $\langle 100 \rangle$ yüzeyi ile $54,74^\circ$ lik bir açı oluşturur. Böylece, zarların kenarlarındaki değişim levhaların kalınlıklarının değişimlerinin iki katı ($\tan 54,74^\circ$)⁻¹ olur. Daha da ilerisi, silikon kristal uyumuna bağlı olarak aşındırma maskesinin dizilme hataları da hesaba katılmalıdır. Bu iki faktör onu, zar kenarı ve yüzey kenarlı piezodirençler arasında nominal mesafeyi tasarlamak için gerekli kılar, özellikle zar kenarına paralel yerleştirilen piezodirençler için.

2.7. Piezoresistif Basınç Algılayıcılarının Sıcaklık Katsayısı

Tipik bir piezoresistif basınç algılayıcısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Yonga seçilebilir şekilde daha kalın bir levhadan aşındırılmış ince bir silikon diyaframdan oluşmaktadır. Bir veya daha fazla direnç diferansiyel olarak uygulanmış basınca cevaben esnek diyafram içine difüzyonlanır. Sapma ile birleşmiş baskı dirençlerdeki taşıyıcı hareketliliğini onların basınç duyarlılığını yükselterek değiştirir.

Bir $\langle 100 \rangle$ silikon diyafram üzerine $\langle 110 \rangle$ yönünde dizilmiş p- tipi dirençlerin kullanımı daha yüksek basınç duyarlılığı ve standart levha işleme ile daha büyük uyumluluk sağladığı görülmektedir. Böyle dirençler normal olarak kendisinin sıcaklık katsayılarını yoketsin (dirençlerin eşlendiği dereceye kadar) diye bir tam köprü içerisinde düzenlenir. Diyafram kenarlarına dik olduğu gibi paralel olarak dizilmiş dirençler kullanılarak, yine de, farklı dirençler, uygulanmış basınca aksi yönde cevap olarak tam basınç duyarlılığı vererek yapılabilir.

Sıcaklık katsayısı duyarlılığı piezoresistif algılayıcılar için esas ilgi odağıdır çünkü piezoresistans etkisi kalıtsal olarak sıcaklık bağımlıdır. Bu nedenle, bu tip algılayıcı çoğu zaman aktif ve pasif sıcaklık kompanzasyon devresi gerektirir. Etkiler sırayla offset sıcaklık katsayısı (TCO) ve duyarlılık sıcaklık katsayısı (TCS) ile tariflenir.

TCO'yu azaltmak için Wheatstone köprüsünün etkili olduğu gösterildi çünkü sıcaklık değişimleri sadece genel-kip etkilerine sonuçlanmaktadır, en azından direnç değişimleri simetrik oldukça. Bu dört direncin eşit değere sahip olduğu, ofsetin sıfır olduğu ideal durumda geçerlidir. Gerçekte, Wheatstone köprüsünün karşılıklı kollarındaki dirençlerin eşit fakat bir r değeriyle kollara dokunmadaki dirençlerden farklı olduğu sıkça bulunur çünkü onların planı hafifçe farklıdır (zar veya kirış kenarlarına paralel ve dikey). Bu durumda da dirençlerin sıcaklık katsayıları eşit oldukça TCO teorik olarak sıfırdır (Şekil 2.6). Hakikaten, bu konfigürasyon için, köprüye uygulanmış gerilim başına (V_b) offset (V_0) [Göpel, et al, 1994],

$$O = \frac{V_0}{V_b} = \frac{r}{2R + r} \quad (2.8)$$

'dir. Sıcaklık bağımlılığı kolayca hesaplanabilir:

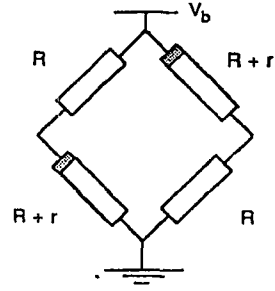
$$\frac{\partial O}{\partial T} = \frac{2(r'R - rR')}{(2R + r)^2} \quad (2.9)$$

Burada değişken üzerindeki nokta işareti sıcaklığa göre türevi göstermektedir. Şimdi, eğer dirençler eşit sıcaklık katsayılarına sahipse,

$$\frac{r'}{r} = \frac{R'}{R} \quad (2.10)$$

ve (2.9) denklemi sıfır olur, offset yanlış eşleme (r) ne olursa olsun sıcaklık değişmelerine duyarlıdır.

Piezoresistans katsayılarının sıcaklık katsayısı TCO da önemli bir rol oynadığı sonucu çıkarılır. Piezoresistif algılayıcıların offseti için ve böylece de TCO için çok daha önemlisi ön-baskı şartı ve onun sıcaklık bağımlılığıdır. Bu harici baskı veya basınç uygulanmadığı zaman dirençler üzerindeki kalan baskıya işaret eder. Baskının kaynağı tipik olarak dirençler üzerindeki pasifleştirme tabakaları ve paketleme baskısıdır. Her ikisi de kullanılan malzemeye bağlı olarak sıcaklığa çok bağımlı olabilir. Sadece dikkatle hazırlanmış tasarımlar ve baskı-serbest paketleme konfigürasyonlarının yapılmasıyla TCO azaltılabilir [Akbar, M. and Shanbatt, M, 1992].



Şekil 2.6. Dirençlerin simetrik olarak yanlış yerleştirilmiş Wheatstone köprüsü.

TCS için, diğer taraftan, piezoresistans katsayılarının sıcaklık bağımlılığı büyük bir etkiye sahiptir. Yine de, basit bir kompanzasyon tekniği sabit bir gerilim yerine sabit bir akım Wheatstone köprüsüne uygulandığı zaman mevcuttur, köprü üzerindeki gerilim dirençlerin pozitif sıcaklık katsayısına bağlı olarak sıcaklıktaki artışla yükselir. Bu etki basınç duyarlılığını artırır ve böylece piezoresistans katsayılarının negatif sıcaklık katsayısından dolayı duyarlılık kaybını telafi eder. Sabit gerilimde, bu dahili negatif geri-besleme oluşmaz.

3. SİLİKON ENTEGRE BASINÇ ALGILAYICISININ TEMEL İMALAT İŞLEMLERİ

3.1. I.C. Teknolojisi

Çok geniş ölçek entegre yongalar (VLSI) için standart entegre devre (I.C.) ve son zamanlarda gelişen microaşındırma teknikleri yeni algılayıcıları imal etmek için çok önemlidir. Sebepler şunlardır:

1. I.C. üretimi için fotolitoğrafik aşındırma, kaplama, metalleme, ve toplama teknikleri yarıiletken algılayıcılar için sadece önemli değil aynı zamanda bütün ince film, kalın film, kimyasal ve biyolojik algılayıcıların yapısının imalatı için de temeldir.

2. Çoğu algılayıcı, örneğin basınç, sıcaklık, magnetik, debi ve çoğu diğer algılayıcılar, I.C. elemanını kullanır.

3. Algılayıcı çıkışının işaret işlemcisi elektronik devreler olacaktır. Eğilim algılayıcı üzerine yongaların birleştirilmesine ve tek bir ünite içine paketlemeye doğrudur.

4. Epeyce hassas mikroişleme teknikleri yeni algılayıcıları (a) daha iyi güvenilirlik (b) yüksek karlı kütle üretimi, böylece farkedilebilir ölçüde maliyeti düşürme, ve (c) daha iyi performans, yüksek duyarlılık, eşdağılımlılık, kararlılık ve işlem kolaylığıyla mümkün kılar. Çünkü çeşitli fiziksel değişkenlere duyarlı algılayıcılar genelde yapı olarak farklıdır, algılayıcıların değişik türlerini imal etmek için tek bir teknoloji yoktur. Keza, mikroalgılayıcı teknolojisinin iki ana sınıflandırması vardır:

1. Kütle (bulk)-mikroişleme algılayıcılar esas olarak bağıl olarak bir kalın levhanın tam işlenmesiyle yapılır.

2. Yüzey-mikroişleme algılayıcılar esas olarak üst üste istiflenmiş ince filmler tarafından inşa edilir. Her iki teknoloji de VLSI teknolojisindeki malzeme ve işlemleri kullanır.

İnceltilmiş yarıiletken (Si or GaAs) levhalarla başlayan film oluşumu şu adımlardan müteşekkildir: (1) epitaksiyel tabaka, (2) oksit film, (3) polisilikon ve dielektrik filmler, (4) metalizasyon filmler. Film oluşumundan sonra bir litoğrafi işlemi, maskeler içerisine depolanmış deseni film yüzeyine aktarmak için kullanılır ve sonra desen aktarma oluşumu işlemini tamamlamak gayesiyle istenmeyen film veya tabaka parçalarını uzaklaştırmak için aşındırılır. Ardından levha (wafer), yabancı madde dopingi için sık sık difüzyon veya iyon implantasyonu geçirir. Bu döngü setdeki maskelerin sayısına bağlı olarak çok kere tekrarlanır. Bir I.C., zincirleme olarak yarıiletken levha üzerindeki maskelerden deseni dopinkleyici (dopant) yabancı madde atomlarının ve kaplanmış filmlerin denetimli miktarını girerek seviye seviye aktarmakla yapılır. Bitmiş bir levha yüzlerce veya binlerce değişen şekil ve hacimde özdeş IC (veya kalıp) içerir. Bu yongalar bir lazerle veya elmas kesiciyle aygıt birimlerine ayrılır.

IC ve mikroalgılayıcı için kullanılan en genel tek kristalli yarıiletken silikon (Si) veya galyum arsenit (GaAs)'dir. Silikon için başlangıç malzemesi SiO_2 (kum veya kuvarz). O bir fırın içerisinde karbonun çeşitli şekilleriyle metalurjik-silikon haline getirilir. Sonra oda sıcaklığında 32°C kaynama sıcaklığına sahip bir sıvı olan SiHCl_3 (trichlorosilane)'ü oluşturmak için HCl ile kimyasal işleme tabi tutulur. Kısmi damıtmayla saflaştırılan SiHCl_3 , H_2 ile 10^{-9} aralığında yabancı maddeli elektronik silikon (EGS) haline sokulur. Polikristal EGS sonra ya (1) Czochralski tekniği ya da (2) yüzer bölge tekniğiyle arzulanan şekilde tek kristalli külçeler haline getirilir [Göpel, et al, 1989].

Külçe, külçe boyunca düz bölgeler ile kristal düzenini ve iletkenlik tipini belirlemek için arzulanan çapa kadar bilenir. Külçe, elmas bir kesiciyle levhalar (wafer) halinde dilimlenir. Yüzeyi hazırlamak için inceltme ve üst üste dizme işleminden sonra levhalar IC imalat işleminin başlangıç malzemesi olur.

3.2. Silikonun Isıl Oksidasyonu

Si levhaların oksidasyonu genellikle IC imalatının başlangıç işlemidir ve o:

- Kristal yüzeyin pasifleştirilmesi,

- Difüzyon ve iyon implantasyon maskeleri,
- Entegre MOS kapasitörler için dielektrik olarak iş yapar.

Havaya maruz kalan silikon yüzeyler 20 Å-50 Å kalınlığında bir oksit oluşturacaktır. Daha kalın oksitler ısı olarak kuru oksijen veya bir su buharı içerisinde konulabilir. İşlem sıcaklığını ve oksitlenme zamanını azaltmak gayesiyle yüksek basınç oksidasyonu (30 MPa'ye kadar) kullanılmaktadır [Göpel, et al, 1989].

3.3. Optik Litoğrafi ve Desen Transferi

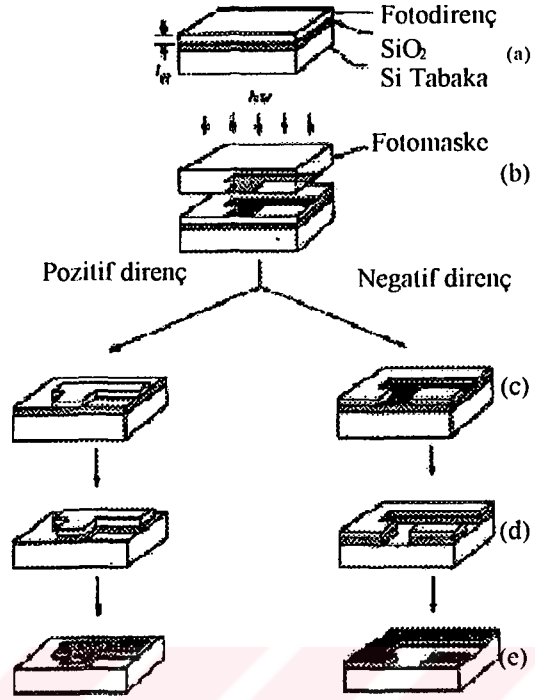
Litoğrafi, bir tasarımın geometrik şekillerinin desenlerini altta kalan filmler veya tabakaları aşındırma işlemi içerisinde aktaran radyasyon duyarlı bir malzemeye transfer etme tekniğidir. Kullanılan radyasyona bağlı olarak fotolitoğrafi, X-ışın litoğrafi, E-ışın litoğrafi, ve iyon ışın litoğrafi olabilir. Litoğrafide kullanılan temel teknikler: (1) maske ve desen imalatı ve (2) deseni maskeden levhaya (wafer) transfer'dir.

IC ve mikroalgılayıcı imalatı için litoğrafik tehzizatın esas çoğunluğunu ultraviyoleet ışın kullanan optik tehzizatlar oluşturur. Sadece diğer fotolitoğrafik işlemlerin bir temelini oluşturan fotolitoğrafi ve desen aktarma işlemi ele alınacaktır. Şekil 3.1, IC desenlerinin bir maskeden yüzeyinde oluşturulmuş bir yalıtma tabakasına (Si üzerinde ısı olarak oluşturulmuş 0,1-1 µm kalınlığında SiO₂) sahip bir yarıiletken levhaya aktarma adımlarını göstermektedir. Levha (wafer) tipik olarak sarı ışık ile aydınlatılmış temiz bir odaya yerleştirilir çünkü fotodirençler 0,5 µm'den daha büyük dalga boylarına karşı duyarlı değildir. Levha vakum iğ üzerinde tutulur ve 1 cm³ lük sıvı direnç levhanın merkezine uygulanır. Sonra levha sabit bir hıza kadar hızlandırılır ve 30 saniye bekletilir. Döndürme hızı, düzgün yayılmış yaklaşık 1-0,5 µm kalınlığında bir film vermek için dakikada genellikle 1000 ile 10000 arasındadır. Döndürme faslı bittikten sonra, fotodirençten çözücüyü (solvent) uzaklaştırmak ve direnç yapıştırıcısı levhaya eklemek için levha bir ön kurutmaya (tipik olarak 80-100°C) verilir. Levha bir optik litoğrafik sistem içerisinde maskeye göre düzenlenir ve direnç Şekil 3.1.b'de gösterildiği gibi UV ışımına maruz bırakılır.

Fotodirenç negatif ve pozitif olarak sınıflandırılabilir. Pozitif direnç için bir maskenin temiz bölgesi maruz bırakılır ve çözülebilir olur ve gelişim işlemi süresince atılır. Böylece pozitif direnç üzerine oluşturulmuş desen, maske üzerindeki ile aynıdır. Negatif direnç için aksi doğrudur. Negatif direnç üzerindeki desen, maske deseninin tersidir.

Pozitif fotodirenç ele alınacaktır. Maruz direnç banyoda çözülür (Şekil 3.1.c'nin sol tarafında). Fotodirenç banyosu, banyo çözültisi levhaya püskürtülerek yapılır. Levha durulanır ve kurutulur. Banyodan sonra son fırın işlemi (100-180°C) direncin tabakaya olan yapışkanlığını artırmak için gerekebilir. Levha, maruz yalıtkan tabakayı aşındıran fakat dirence hiçbirşey yapmayan bir çevreye konular (tampon hidroflorik asit tipik bir SiO_2 çözücüsüdür), Şekil 3.1.d'de gösterildiği gibi. Netice olarak, maskenin mat görüntüsüyle aynı bir yalıtkan görüntü bırakarak (Şekil 3.1.e'nin sol tarafı) direnç yol yol yapılır (çözücü veya plazma oksidasyonu kullanarak). Negatif fotodirenç için, açıklanan işlemler uygulanabilir, fakat maruz kalmayan bölgelerin atılması hariç. Sonuç yalıtım görüntüsü (Şekil 3.1'in sağ tarafı) maskenin üzerindeki mat görüntünün tersidir.

Yalıtım görüntüsü alt işlemler için bir maske olarak kullanılabilir. Örneğin, bir iyon implantasyonu maruz yarıiletken bölgeyi dopinklemek için kullanılabilir fakat yalıtıcının kapladığı alanı değil. Tüm devre kuyruktaki sonraki maske önceki desene eklenerek ve litoğrafik transfer işlemi tekrarlanarak imal edilir. Tipik olarak, bir IC imalatı için 5-10 ayrı maske ve litoğrafik transfer adımı gerekir.



Şekil 3.1. Bir maskeden bir levhaya yüzeyinde bir yalıtkan film ile transfer işlemi.

3.4. Silikon Planar Dirençlerin İmalat Yöntemleri Olarak Difüzyon ve İyon Kaplama

Planar IC işlemi için en önemli ihtiyaç levhanın seçilmiş bölgelerine dopinklayıcı yabancı madde atomlarının kontrollü büyüklüklerini girebilme yeteneğidir. Difüzyon ve iyon implantasyon bu işlevi sağlayacak iki anahtar işlemdir. Onlar seçilebilir olarak yarıiletken tabakayı ya n-tipi ya da p-tipi bölge üretmek için dopinklemekte kullanılır. Seçicilik, içerisine yabancı maddelerin girildiği levhaların üst yüzeyi üzerindeki bir maskeyle sağlanır [Sze, 1985].

3.4.1. Difüzyon

Yabancı maddelerin difüzyonu tipik olarak yarıiletken levhaları yüksek bir sıcaklık fırını içerisine yerleştirerek ve içerisinden arzulanan dopinkleyici içeren

tesirsiz bir taşıyıcı gazı geçirerek yapılır. Genellikle sıcaklık silikon için 800 ve 1000°C arasında değişir.

Silikondaki difüzyon için, boron en popüler p-tipi dopinkleyicidir oysa ki n-tipi için arsenik ve fosfordur. Bu dopinkleyiciler katı kaynakları (BN boron için, As_2O_3 arsenik için, ve P_2O_5 fosfor için), sıvı kaynakları (BBr_3 , $AsCl_3$, ve $POCl_3$), ve gaz kaynakları (B_2H_6 , AsH_3 , and PH_3) içine alan çeşitli yollardan girilir. Genellikle kaynak malzeme yarıiletken yüzeyine tesirsiz bir taşıyıcı gazla (N_2) taşınır ve sonra yüzeye oturtulur. Katı bir kaynağın kimyasal reaksiyonuna bir örnek $2P_2O_5 + 5Si \rightarrow 4P + 5SiO_2$ (3.1)

olarak verilebilir. Bu reaksiyonda, bir oksit tabakası silikon yüzey üzerine oluşturulur.

Difüzyonda iki ana safha vardır; kaplama ve sürme. İlk adım olan kaplama önkaplama olarak da bilinir. Kaplama safhası süresince yabancı madde atomları bir buhar kaynağından yarıiletken yüzey üzerine taşınır ve bir yarıiletken levhaya difüzyonlanır. Buhar kaynağı yüzey konsantrasyonunu sabit bir seviyede bütün bir difüzyon safhası süresince tutar.

İkinci adım sürme, difüzyon, reoksidasyondur. Kaplamadan sonra levha bir difüzyon fırını içerisinde genellikle daha yüksek bir sıcaklıkta ısıtılır. Levha içerisinde arzulanan bir derinliği elde etmek için dopinkleyici atomlar tesirsiz taşıyıcı gazlar tarafından tekrar rahatsız edilir [Göpel, et al, 1989].

3.4.2. Difüzyon Maskesi

Seçimli difüzyon, dopinkleyiciye karşı etkilenmez ve difüzyon için gerekli yüksek sıcaklığa dayanabilen bir maskeye ihtiyaç duyar. Silikon için uygun bir maske kolayca elde edilen SiO_2 'dir. Ek olarak, o yüksek sıcaklığa dayanabilir ve fotolitoğrafi teknikleri kullanılarak kolayca desenlenebilir ve olağan silikon dopinkleyici için difüzyon katsayısı silikondakinden birkaç derece daha düşüktür. Oksit maskeleme önemlidir çünkü bu günün mevcut entegre devre teknolojisinin

temelidir. Eğer biz oksit içerisinde pencereler aşındırırsak ve geriye kalanı maske olarak kullanırsak, p-n jonksiyon oluşturmak için seçimli bölgelerdeki bir silikon tabaka içerisinde dopinkleyici yabancı maddeleri birleştirebiliriz.

3.4.3. İyon Kaplama

İyon kaplama, esas malzemenin yüzeyinin hemen altına yabancı madde tabakasının girilmesi için bir tekniktir, bu durumda silikon, enerjisi bir veya yüzlerce keV olan iyon ışınıyla bombarduman edilir. İyon kaplamanın faydaları arasında: (1) silikon içerisinde girilen yabancı maddelerin sayısı üzerinde tam denetleme sağlar, (2) düşük bir sıcaklık işlemidir, (3) yabancı madde tabakaları tamamen yüzeyin altına girilebilir, (4) çok sayıda maske malzemesi seçeneği vardır, örneğin fotodirençler, oksitler, nitritler, ve gelen iyonlarla çarpışabilen herhangi bir malzeme, (5) kaplanmış jonksiyonlar maske kenarına kendiliğinden iliştilirilebilir. Bu yararlar karmaşık ve pahalı makineler gerektirir, jonksiyonlar otomatik olarak pasifleştirilemez ve kristal kafes hataları oluşur [Göpel, et al, 1989].

3.5. Film Metalleme

Filmler yarıiletken mikroalgılayıcılarda lüzumlu malzemelerdir. Yüzey-mikroaşındırmalı algılayıcılar ard arda 0,1-5 μm kalınlığında ince katı filmlerin kaplanması ve desenlenmesiyle yapılırken daha geniş kütle-mikroaşındırmalı algılayıcılar pasifleştirme, metalleme ve dielektrik fonksiyonlar için ince filmleri kullanır. Mikroalgılayıcı teknolojisinde kullanılan en genel kaplama tekniklerinden bazıları: spin kaplama (döndürme), vakum buharlaştırma, spatirin, kimyasal buharlaştırma ve plasma kaplamadır.

3.5.1. Spin Kaplama

Bu işlemde ince film malzeme, uçucu bir sıvı çözücünün içerisindeydir. Çözülmemiş malzeme numune üzerine dökülür ve numune yüksek hızda döndürülür. Sıvı yayılırken, tipik olarak 0,1-50 μm aralığında katı malzemeden geriye düzgün dağılmış ince bir film tabaka bırakarak uçucu çözücü buharlaşır. Dönen filmler daha

az yoğundur ve kimyasal saldırıya diğer yollardan kaplanmış malzemeden daha fazla alıngandır.

3.5.2. Vakum Buharlaştırma

Vakum buharlaştırma en yaygın olarak kullanılan kaplama işlemidir. İletken metal, direnç ve dielektrik filmler kaplanabilir. İşlem genellikle yüksek vakumlu bir kaptaki sonuçlandırılır, tipik olarak $1,3 \times 10^{-2}$ - $1,3 \times 10^{-5}$ Pa.

Buharlaştırılacak tabaka (örneğin silikon) ve kaynak malzeme (Al, Au, Cr) kabın içerisine tespit edilir. Sisteme uygun bir basınca kadar basınç verilir ve kaynak malzeme buharlaşmaya kadar ısıtılır. Tabaka da sıksık film yapışkanlığını artırmak için ısıtılır.

Kaynak malzemenin buharlaşma basıncı kaptakini geçtiği zaman malzeme hızla buharlaşır. Yüksek bir vakum altında, buharlaşan atomların veya moleküllerin ortalama serbestlik yolu, kaynak ile tabaka arasındaki mesafeden daha büyüktür. Bütün yönlerde saçılan buharlaşmış atomlar daha düşük sıcaklıktaki yüzeylerde çarpışarak ve düzgün yayılmış ince bir film oluşturarak yoğunlaşır.

Isıtma filamanı genellikle yüksek bir erime noktasına ve düşük buharlaşma basıncına sahip dayanıklı bir metalden, örneğin tungsten veya molibden, yapılır. R.F ısıtma potası yaygın olarak kullanılır; kaynak malzemeyi buharlaştırmak için daha yüksek enerji gerektiğinde elektron ışın bombardmanı kullanılır.

Vakum buharlaştırma, çoğu tek elementli iletkenleri, dirençleri ve dielektrikleri kaplamakta kullanılır. Keza, alaşım kaplamayı denetlemek zordur çünkü her bir kısım, verilmiş bir sıcaklıkta farklı bir buharlaşma oranına sahiptir.

3.5.3. Spatirin

Bu teknik vakum buharlaştırmanın çoğu meselelerinin üstesinden gelir. Spatirin sistemi bir vakum odasından, arzulanan filmin bir spatirin hedefinden ve bir yüksek gerilim veya RF güç kaynağından oluşur. Odayı 10^{-6} - 10^{-8} Torr'a kadar

boşalttıktan sonra Ar veya He gibi tesirsiz bir gaz odaya verilir. Gazın bir plazması ateşlenir. Plazmanın enerjik iyonları hedefi bombarduman eder. Çarpışan iyonların kinetik enerjisi hedef atomların bazılarını yüzeyden kopartmaya yeterlidir. Bu atomlar numune üzerine yerleşir ve ince bir film oluşturur. Spatirin tekniğiyle elde edilmiş filmler buharlaşmayla elde edilmiş filmlerden daha iyi kaplamaya ve eşdağılımlılığa sahiptir. Plazmaya ilave magnetik alan adım kaplamasını artırır. Yüksek enerjili plazma buharlaşmanın sıcaklık sınırlamasını ortadan kaldırır. Peryodik tablodaki çoğu malzemelere organik ve inorganik karışımlardaki gibi kolaylıkla spatirin tekniği uygulanabilir. Dayanıklı malzemelerde kolaylıkla bu teknik kullanılabilir.

3.5.4. Kimyasal Buhar Kaplama (CVD)

CVD'de bir veya birkaç gaz şeklindeki tür ısı yoluyla kısımlarından koparılır. Onlar tabaka üzerinde çarpıştıklarında bu kısımlardan bazıları netice itibarıyla ince film oluşturarak tabaka yüzeyinde atomlar toplanır. Polikristal silikon, silikon, nitrit, silikon dioksit, ve dayanıklı metaller dahil çoğu malzemeler düşük basınçta ısı yoluyla CVD (veya LPCVD) ile kaplanabilir. LPCVD filmler, çoğu denetlenebilir mekanik karakteristiklere cevap veren mevcut en yüksek kaliteli filmlerdir [Göpel, et al, 1989]. Buharlaşma veya spatirin yoluyla elde edilen filmlere benzemeksizin, CVD filmler yüzey üzerinde uygun olarak kaplanabilir. Filmlerin baskısı genel olarak kaplama şartlarının sıkı kontroluyla ve alt tavlama ile denetlenebilir. Epitaksiyel filmler kütle kristaller ile aynı karakteristiklere sahip olduğu için bu filmler geniş çaplı olarak basınç algılayıcıları için diyafram imalatında kullanılır.

3.5.5. Plasma Kaplama

Plasma uyarmalı reaksiyonlar genel olarak mikroalgılayıcı malzemelerinin kaplanması için kullanılır. Gaz türü karışımların reaktif türlere ayrılması bir plazmanın varlığıyla endüklenir. Böyle bir işlem plazma artırılmış CVD veya PECVD olarak bilinir. PECVD filmler termal CVD filmlerden daha yüksek bir oranda kaplanır ve daha düşük kaplama sıcaklığı gerektirir, böylece düşük erime noktalı

tabakalara müsaade eder, PECVD filmler çoğunlukla kaliteli bir düşük sıcaklık filminin yeterli olduğu metaller arası dielektrik tabakalar için kullanılır.

3.6. Kimyasal Aşındırma

Aşındırma geniş olarak (1) inçeltme işleminde oluşan yüzey hasarını düzeltmek, (2) bir önceki veya diğer işlemdeki kirleri yoketmek için yüzeyin temizlenmesi, (3) desenleri çizmek ve yalıtım malzemelerinde pencereler açmak ve (4) mikroaşındırmadaki gibi 3-boyutlu yapılar imal etmek için kullanılır.

Aşındırılacak malzemeler, (1) silikon, galyum-arsenid yarıiletken, (2) metal iletkenler ve (3) yalıtkanlar içermelidir.

3.6.1. Islak Aşındırma

Islak aşındırma için mekanizma üç gerekli adımı ihtiva eder: (1) reaktant, reaksiyon işlem yüzeyine aktarılır (difüzyon ile), (2) yüzeyde kimyasal reaksiyon oluşur ve (3) yüzeydeki ürünler uzağa taşınır (difüzyon ile). Hem uyarma ve hem de aşındırıcı çözeltinin sıcaklığı aşındırma oranını etkileyecektir.

Mikroelektronik devre yapımında kullanılan çoğu dielektrik ve metaller yapı olarak ya cam türü ya da polikristaldir. Onlar büyük derecelere sahip değildir, çünkü ıslak kimyasallarla aşındırma genellikle yapı olarak isotropiktir, aşındırıcı kabaca aşınmış derinliğe eşit bir miktarla maske tabakasının altından yayılır. Çoğu durumlarda, direnç-film arayüzündeki, ıslak kimyasalların kıl kadar ince bir hareketiyle birleşen baskılar bu noktada daha geniş oyuklara sebebiyet verebilir ve hatta direncin kalkmasına ve yırtılmasına sebep olabilir. Film ve yarıiletken arasındaki baskıdan dolayı geniş oyuklar da oluşabilir.

3.6.2. Kuru Aşındırma

Kuru aşındırma çeşitli yollardan olabilir:

(1) Fiziki aşındırma:

- Spatirin aşındırma,
- İyon işleme

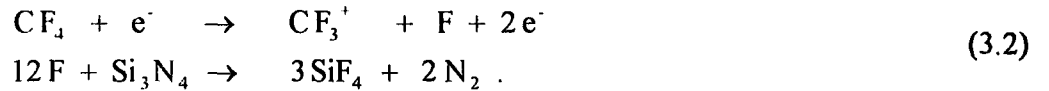
(2) Fiziksel ve kimyasal aşındırma:

- Reaktif plazma aşındırma,
- Reaktif iyon aşındırma,
- Reaktif iyon-ışın aşındırma

Bir plazma tamamen veya kısmen iyonların, elektronların, ve nötr atomların iyonlanmış gaz karışımıdır. Bir plazma, yeterli büyüklükte elektrik alanı gazın bozulmasına sebep olan ve iyonlaşan bir gaza uygulandığı zaman üretilir. Plazma, negatif bir elektrottan yayılan alan gibi bazı vasıtalarla serbest kalan elektronlar tarafından başlatılır.

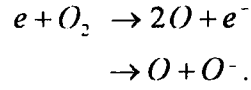
Reaktif plazma aşındırma işlemi beş adımda yürütülür: (1) İşlem, plazmada aşındırıcı türleri üretmekle başlar. (2) Reaktant yüzeye durgun bir gaz tabakası içerisinden aktarılır. (3) Reaktant yüzeyde emilir. (3) Bu, uçucu karışımı oluşturmak için kimyasal reaksiyonu (iyon bombardmanı gibi fiziksel etkilerle beraber) takip eder. (5) Bu karışımlar yüzeyden dışarıya verilir, kütle gazın içerisine difüzyonlanır ve vakum sistemiyle dışarıya pompalanır.

Bir örnek aşağıdaki denklemde gösterilmiştir ki orada tesirsiz CF_4 gazı elektronla enerjilenir ve Si_3N_4 tabakaları çözecek aktif florin türlerin içerisinde ayrışırlar.



Florinin serbest kökleri Si_3N_4 'yi aşındıracak asıl aktif köklerdir. O, Si_3N_4 'ü her ikisi de kararlı ve uçucu bir ürün olan N_2 ve SiF_4 'e dönüştürür.

Fotodirenç sıklık direnç kaplı levhaları bir oksijen plazma içerisine yerleştirerek uzaklaştırılır. Buna sıklık plazma devri denilir. Enerjik türlerin çoğu bu plazma içerisnde üretilir. Bu türlerden, belkide çoğu üstünlük aşağıdaki denklem ile oluşturulur:



(3.3)

40-50°C'ye kadar düşük sıcaklıklar direncin bu serbest köklerle oksidasyonuna (yanmasına) sebep olmak için kafidir. Reaksiyon ürünleri çoğunlukla su, karbonmonoksit ve karbondioksitten oluşur.

IC teknolojisindeki desen çiziminde dikkate alınabilir önemin tek değişkeni bir aşındırma işleminin seçiciliğidir. Seçicilik aşındırılacak malzeme ile maske malzemesi arasındaki aşınma oranıyla ifade edilir.

Si üzerindeki SiO₂'nin plazma aşındırma seçiciliğini artırmak amacıyla hidrojen gazı CF₄ plazmaya eklenir. O yardımcı reaksiyonla sonuçlanır:



böylece florin konsantrasyonunun sisteme pompalanması sonuçlanır. Bu yaklaşım kullanılarak, SiO₂ için aşındırma oranları kullanılarak: 35 oranında bir Silikon elde edilir. Buradaki ek yarar bu plazmanın oksijensiz olmasıdır öyle ki fotodirençler bağıl olarak onun tarafından saldırıya uğramazlar.

3.7. Diyaframın İşlenmesi

Kütle-mikroaşındırmada algılayıcılar, geniş bir tek kristalli tabaka aşındırılarak şekillendirilir. Anisotropik aşındırma teknikleri yüksek-çözünürlüklü bir aşındırma ve sıkı boyut denetimi sağlar [Kloek, et al, 1989]. Sık sık kütle-mikroişlemeli algılayıcılar iki taraflı işlemeyi, bir tarafı ölçülen değişkenlere maruz, cihaz tarafı temiz bir pakete ekli kendi kendine yalıtımlı bir yapı oluşturur. İki taraflı yapı mikroelektronik cihazların çevresindeki işlemlere çok dayanıklıdır. Diyafram basınç algılayıcıları ve dirsek-kiriş piezoresistif ivme algılayıcıları gibi basit cihazlar ticari olarak bu teknikle imal edilirler. Kütle-mikroişleme teknikleri 20 yıldır kullanılmaktadır ve hala en gözde algılayıcı imalat teknolojisidir.

3.7.1. Malzemeler

Tek kristalli tabakalar mekanik kısımlar için ve dielektrik tabakalar yapısal destekler için kullanılır. En genel tabakalar silikon ve biçimlenmemiş camdır.

Tek kristalli silikon, katı-hal mikromekanik algılayıcılar için en genel olarak kullanılan malzemedir. Yüksek saflıktaki silikon tek kristal tabakalar gözönünde bulundurulabilir derecede yarıiletken üretiminde düşük maliyetlidir. Onun yüksek saflığı ve kristal yapısı nedeniyle silikonun mekanik özellikleri iyi denetlenir, yeniden üretilebilir algılayıcı karakteristikleri verir. Mekanik olarak silikon çelikden daha fazla bir kuvvete sahiptir, fakat o oldukça gevrek, kolay kırılır. Silikonun elektriksel özellikleri çeşitli algılayıcı tasarımı için elverişli olan radyasyon, magnetik alan, sıcaklık ve basınca duyarlıdır. Piezoresistif özelliği mekanik algılayıcılar için en geniş olarak kullanılan mekanizmadır. Silikon hassas olarak, algılayıcının şeklini belirlemek için seçilebilir bir şekilde kristal düzlemlere saldıran anisotropik aşındırıcılarla işlenir.

Biçimlenmemiş cam tabakalar, kapanmış cihazlar oluşturmak için diğer tabakalara bağlanır. Biçimlenmemiş cam yabancı maddelerle dopinklenmiş SiO_2 karışımıdır. Sodyumla zenginleştirilmiş tabakalar anodik bağlamanın yüksek kuvvetinden dolayı genellikle kütle-mikroişlemede kullanılır. Değişken karışımı, mekanik özellikli ve erime noktalı camlar mevcuttur. Düşük basınçlar sağlamak için bağlı tabakaların termal açılım katsayılarını işleyecek bir termal açılım katsayılı cam örnekleri seçmek arzu edilir. Anodik olarak bağlı 7740 Pyrex cam silikonun termal açılımını işler ve kütle-mikroişlemede en çok kullanılan tabaka odur. Dopinglenmiş camalar düşük erime noktalarına sahiptir, böylece örnekteki daha yüksek sıcaklık işlemini engeller.

3.7.2. Anisotropik Silikon Aşındırma

Kristal silikonun içinde seçilebilir bir şekildeki aşındırma yeteneği hassas 3-boyutlu yapı oluşturmada kuvvetli bir tekniktir. Kristal silikonun çoğu anisotropik aşındırıcıları sıvı fazlı kimyasal tepkime temellidir. Genel olarak, silikonun

aşındırılması $\langle 111 \rangle$ yönlerinde en yavaştır, ve $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 110 \rangle$ yönlerinde en hızlıdır. Seçilirlik arzulan yönün aşındırma oranlarının arzulanmayan yönüne oranı olarak tariflenir. Daha yüksek seçicilik daha iyi bitmiş geometriyi tarif eder. Bazı silikon aşındırıcılar boron ile uyarılmış bazı bölgelerde bitmiş yapıları tarif etmede esneklik ekleyerek azalmış bir aşındırma oranı gösterir. Daha ileri giderek, kütle-silikon içindeki bir p-n jonksiyonun bir tarafına harici bir elektrik gerilimi uygulanması jonksiyona dik yöndeki (elektrokimyasal aşındırma) aşındırma oranına etki yapmak için kullanılabilir. Sonuç olarak silikon aşındırıcılardan çoğu silikon oksit veya silikon nitrit üzerinde çok düşük aşındırma oranlarına sahiptir, arzulan geometriyi tarif etmek için kafese uygun maskeleme filmleri oluşturur.

3.7.3. Alkalin Aşındırıcılar ve Aşındırma Maskeleri

Farklı alkalin çözeltiler, kimyasal karışımlara ve sıcaklığa bağlı olarak farklı aşındırma karakteristikleri ve seçicilikler gösterir. Genel olarak kullanılan alkalin aşındırıcı etilen diamin $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$, prokatekol $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$, ve su (EDP olarak bilinir) karışımıdır. Pirizin ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$)'in küçük bir miktarı aşındırma oranını ve seçiciliği yükseltmek için ilave edilebilir. Karışım arzulan farklı etkiler elde etmek için değişebilir.

EDP'nin sınırlı bir faydası film maskelemede kullanılan bazı malzemeler ile onun yüksek aşındırma seçiciliğidir. Örneğin, S-tipi EDP termal olarak oluşturulmuş SiO_2 'i aşırı yavaş olarak aşındırır, 115°C 'de $55\text{\AA}/\text{h}$ gibi, 10000 gibi bir fazlalıkla SiO_2 üzerinden (100)Si aşındırma seçilirliği gibi bir sonuç verir. Silikon nitrit hiçbir zaman ölçülebilir aşındırma oranı vermez. Au, Ag, Cr, Cu gibi bazı metaller de EDP'ye dirençlidir. Böylece $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 'den daha yüksek boronla dopinklenmiş bir seçim için onu EDP için daha etkin bir aşındırma-durdurma yapan büyük bir esneklik vardır [Kloeck, et al, 1989].

Bir diğer gözde aşındırıcı potasyum hidroksidin sulu bir çözeltisidir, karışım oranı %10 dan %50 ye kadardır. Seçiciliği artırmak için sıksık alkol ilave edilir. KOH aşındırıcının değeri 500 kadar yüksek {111} kristal düzlemlerinin üzerinde {110} seçiciliği değerindedir. Böylece, KOH çoğu zaman (110) silikon levhalar içinde derin çukurlar aşındırmak için kullanılır. Maalesef, SiO_2 üzerindeki seçicilik

çeşitli karışımlarda 500 den daha azdır, ki o uzun aşındırma boyunca maskeleme için yeterli değildir. İlave olarak, KOH aşınma boron uyarımlı bölgelerdeki gibi kolayca durmaz. Herşeye rağmen silikon nitrit hala etkilidir ve KOH aşındırıcılar için bile film maskelemede etkilidir. Zamanlı-aşındırma uygulamalarında, aşındırılmış (100) çukurunun alt yüzeyi eğer KOH karışımı %30'un altındaysa kaba olmaya meyillidir.

Aşındırmanın önemli bir özelliği metallerdeki etkinliğidir. Yukarıda bahsedilen çoğu aşındırıcılar bağlantı tabakalarına saldıracaktır ve böylece onlar özel pasifleştirme ve yalıtım teknikleri isteyecektir. Bilhassa, iki aşındırıcı metalleri rahatsız etmez. EDP altın kaplamaya saldırmaz fakat alüminyuma saldırır. Son zamanlardaki yeni bir aşındırıcı çeşidi tetrametelamonyum hidroksit'un aliminyumu rahatsız etmediği bulunmuştur.

3.8. Toplama Teknikleri ve Paketleme

Mikroelektronik devre veya mikroalgılayıcı imalatındaki son safha devreyi levha şeklinden dış etkilere dayanıklı olması için bir pakette çevirecek işlemler dizisidir ve dış dünyaya elektrik bağlantısı sağlar. IC'lerin ve mikroalgılayıcıların toplanması ve paketlenmesi ayırma, birleştirme, bağlama, paketleme safhalarını içerir [Schilling, et al, 1997].

3.8.1. Ayırma

Bir IC'nin veya mikroalgılayıcının küpler halinde ayrılması kazıma ve kırma ile yapılır. Caddeleri kazıma, oksijen ve metalsiz, levha üzerinde sağlanır. Bu caddeler kırmayı kolaylaştırmak için kristoloğrafik bölme düzlemleri boyunca düzenlenir. Düzenleme levha üzerindeki asıl oriyantasyona paralel olarak başlangıç fotolitoğrafik desenin düzenlenmesiyle başarılır. Kazıma darbeli bir lazer ışınla, elmas uçlu bir aletle veya elmas bir kesiciyle yapılabilir.

Kazıma işleminden sonra kırma işlemi, kazınmış taraf aşağıda olacak şekilde, yumuşak, esnek bir desteğin üzerine yerleştirilir, levha ince plastik bir örtüyle kaplanır ve basınç altında üzerinden bir silindir geçirilerek tamamlanır. Bazı

durumlarda otomatik levha kırma makinesi kullanılır. Kural olarak çoğu durumlarda kazıma işleminden önce levhaların 400 µm kalınlığa kadar inceltilmesi gerekir.

3.8.2. Birleştirme

Küp cihazları paketlere birleştirme tabaka ve paket arasında termal ve elektriksel bağlantılar sağlar. Eğer elektriki bağlantı gerekli değilse cam veya termal olarak iletken epoksi kullanılabilir. Şayet elektrik bağlantısı gerekiyorsa gümüş veya altınla doldurulmuş epoksi veya metal alaşım kullanılabilir.

Genel bağlantılar altın-silikon, altın-kalay, alüminyum-germanyum gibi alaşımları kullanır. Karışım bir metal paket üzerinde kaplama olabilir, kalın film mürekkebi seramik bir paket üzerinde, küpün arka tarafına kaplama olabilir veya ince bir alaşım küp ile paket arasına yerleştirilmiş önoluşum olabilir.

Epoksi bağlama gözde bir bağlama tekniği olmaktadır, bilhassa, yaklaşık 300°C'lik sıcaklığa müsait olmayan cihazlar için. Epoksi karışımı doldurulmamış şekilde mevcuttur. Isıl iletim fakat elektriki yalıtım olarak epoksiler alüminyum veya benzeri yüksek ısıl iletkenlik gücünü ihtiva ederler. Elektrik olarak iletken epoksiler ya altın ya da gümüş içerir. Epoksi daima otomatik sistemle hazırlanır. Epoksi bağlamanın zararı genellikle ısıl baskı yapıyorken dışarıya gaz sızdırmasıdır. Böylece güvenilirlik ve ömür üzerindeki ters etkileri ile kirlilik sızdırmaz pakete girer.

3.8.3. Bağlama

Telle bağlama IC veya mikroalgılayıcı için önemli bir bağlantı adımıdır. O küp şeklinde ayırma ve küpleri birleştirme işleminden sonra icra edilir. Telle bağlama altın tel ile (%99,999 saf altın ve çapı 12-30 µm) ısıl sıkıştırma, ultrasonik veya termosonik teknikler yoluyla, alüminyum tel ile (%99 Al, %1 Si) ultrasonik tekniği ile yapılır.

Isıl sıkıştırma ile tel bağlama, yonga üzerinde tel ile bağlama yolu arasında kaynak oluşturmak için bir sıcaklık ve basınç kullanma tekniğidir. Tırnak tutucu ve kama bağlama kullanılır.

En iyi sonuçlar altın-altın bağlarla elde edilir, altın-alüminyum bağlar güvenilir değildir. Şapka mevcudiyetinde, metaller arası bir karışım oluşturmak için altın ve alüminyum tepkime yapabilirler. Bu karışımlardan biri mor renktedir, ve sıksık mor bela (purple plague) olarak bahsedilir [Göpel, et al, 1989]. Mor karışım bağıl olarak iyi bir iletken, fakat onun varlığı genellikle gevrek ve zayıf iletken bir karışımla desteklenir. Bu karışımları içeren bağlar ısıl döngüden sonra zayıflayabilir. Mor beladan (purple plague) ısıl sıkıştırma ile bağlama işleminin sıcaklığının sınırlandırılmasıyla kurtulabilir.

Isıl sıkıştırma darbe bağlama alanının düşük bir sıcaklıkta muhafazası arzulandığında kullanılır. Tabaka 150°C'de sabit tutulur ve bağlama tipi bağlama işlemi boyunca 450°C'ye kadar darbelenir.

Ultrasonik bağlama bir düşük sıcaklık işlemidir. Gerekli ısı tel ile sargı alanı arasındaki sürtünmeden üretilir. Düşük oranlı silikon (%1 gibi) ile alüminyum bu tip bağlantı için en gözde teldir, fakat bazı başarılar altın ile elde edilebilir. Ultrasonik bağlar güvenlidir fakat ısıl sıkıştırma bağları kadar kuvvetli değildir.

Termosonik bağlama ısıl sıkıştırma ve ultrasonik bağlamanın bir birleşimidir. Bağlama bölgesi 150°C'de tutulur ve ultrasonik enerji bağ oluşturmak için ilave edilir. Termosonik bağlamanın olacağı sıcaklık, Au-Al metaller arası oluşum için eşik sıcaklığının altında olmalıdır ve epoksi küp bağları hasara uğratmamalıdır.

3.8.4. Paketleme

IC veya mikroalgılayıcılar için paket seçimi küp büyüklüğüne, bağlama yollarının sayısına, güç tüketimine, umulan çevreye bağlıdır. Genelde, metal paketler ısı aktarımı için üstündür, fakat seramik veya plastik paketlerden daha pahalıdır. Ticari uygulamalar için, sızdırmaz bir kapamanın gerekli olmadığı yerlerde, enjeksiyon dökümlü plastik paket, genellikle iki hatlı yapılar, gözdedir.

Metal veya seramik paketde, IC küpü (die) başlığa tutturulur ve başlıkları terminallere birleştirme tel ile yapılır. İyi bir temizleme işleminden ve yüzeyden nemi yoketmek için fırına verme işinden sonra paketler hareketsiz bir atmosfer içine kapatılır. Kaynak işlemi hızlıdır ve sızdırmazlık olarak yüksek bir kapama elde edilmiş paketle sonuçlanır.

Çift hatlı paket (DIP) esas olarak düşük maliyet ve kolay toplama için geliştirildi. O, 8 ila 40 ve daha fazla çıkış ucuna sahip olabilir. Başlıklar 2.5 mm merkezli iki sıra halinde düzenlenebilir, ve baskılı devre kartları üzerindeki otomatik baskılara dayanacak kadar kuvvetlidir. Seramik ve plastik DIP paket mevcuttur.



4. GENİŞ BİR SICAKLIK ÇALIŞMA ARALIĞINDA ENTEGRE SİLİKON BASINÇ ALGILAYICISI

4.1. Silikon Entegre Basınç Algılayıcısının İmalatında Teknolojik İşlemler

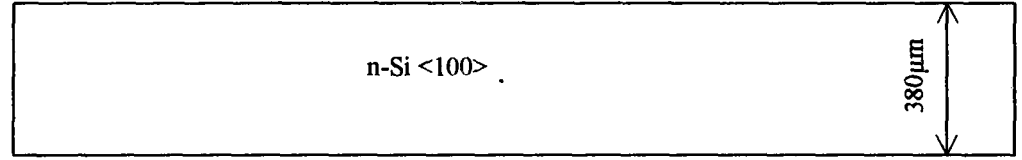
Devre imalat zinciri ile algılayıcı işlemini birleştirmede, algılayıcı performansının çok iyi bir şekilde optimize edilmesi önemlidir. İdeal olarak, algılayıcı imalatı için gerekli ilave imalat adımları, devre işleminin bozulmadan bırakılması için imalat sürecinin başında ya da sonunda girilmelidir. Bu çalışmada anlatılan yapı hemen hemen bu duruma yakındır, sadece işlemin başında bipolar devre imalat silsilesinde bazı küçük değişiklikler gerektirir.

Entegre silikon basınç algılayıcısının imalatı, $\langle 100 \rangle$ oriyantasyonlu, n-tipi bir hafif uyarılmış ($\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) başlangıç malzemesi kullanmakla başlar (Şekil 4.1.a). İlk adım işlemin başında 30-50 μm kalınlığında bir zar oluşturmaktır. Bunun için, kalın ısıl bir oksit tabaka bir KOH aşındırma maskesi olarak hizmet görmesi için oluşturulur (Şekil 4.1.b) ve sonra oksitin arka tarafında pencereler açılır (Şekil 4.1.c). Ardından kütle silikonun tipik bir anisotropik ıslak ve derin aşındırması SiO_2 'in koruyucu tabaka olarak kullanılmasıyla icra edilir (Şekil 4.1.d).

İkinci adım direnç ve taban oluşturmaktır. Bunun için, zar aşındırma için kullanılan oksit uzaklaştırılır ve levha (wafer) 0,35-0,40 μm kalınlığında düzgün dağılmış bir oksit tabaka oluşturmak için bir oksidasyon ocağının yakınına yerleştirilir (Şekil 4.1.e). Sonra levhanın üst tarafında pencereler desenlemek için bir fotodirenç kullanılır. Boron iyonları (10^{13} cm^{-2}), Şekil 4.1.f ve Şekil 4.1.g'de gösterildiği gibi, direnç ve taban oluşturmak için implantasyonlanır. Başka bir litoğrafik işlem emiter bölgesinden oksiti atar (Şekil 4.1.h).

Üçüncü adım bir transistör yapısı içinde diyod için emiter bölgesi oluşturmaktır. n^+ -tabakalar 1025 $^{\circ}\text{C}$ 'de fosfor difüzyonuyla icra edilir (Şekil 4.1.i).

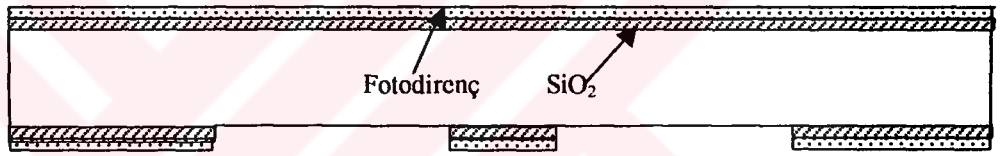
Sonraki adım metallemedir. Bağlantı pencereleri belirlenir ve emiter difüzyonundan sonra silikon dioksit içerisinde aşındırılır (Şekil 4.1.j) ve alüminyum gibi bir metal tabaka kaplanır ve desenlenir (Şekil 4.1.k).



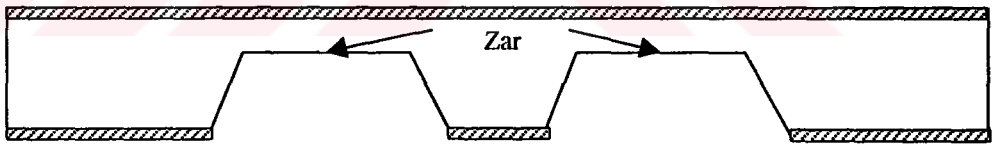
(a)



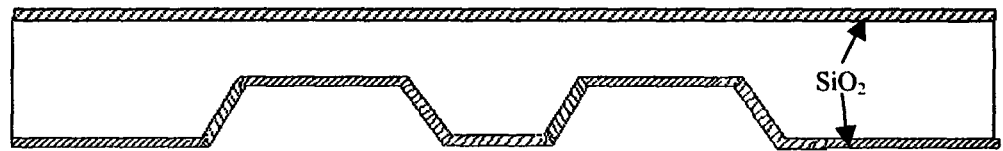
(b)



(c)

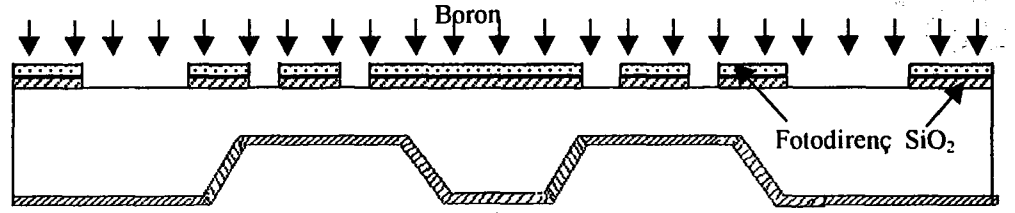


(d)

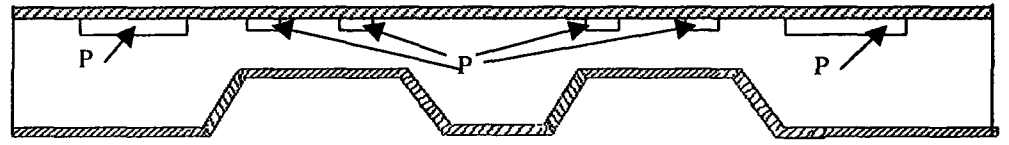


(e)

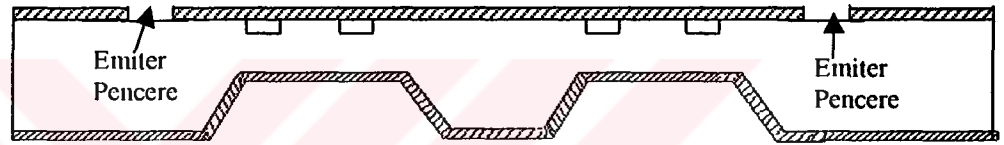
(Şekil 4.1 Devam)



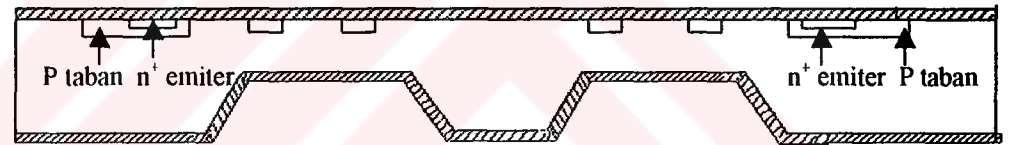
(f)



(g)



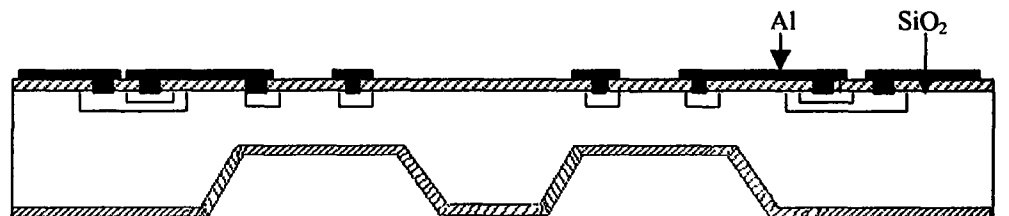
(h)



(i)

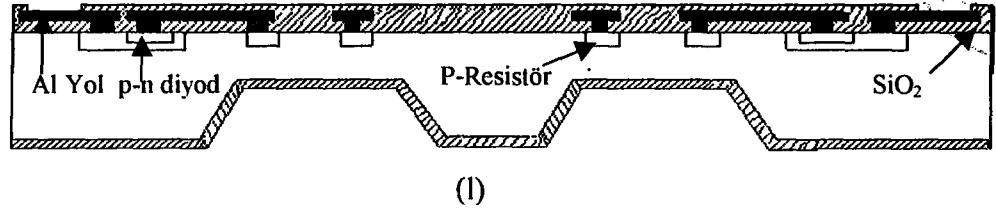


(j)



(k)

(Şekil 4.1. Devam,)



Şekil 4.1. Entegre silikon basınç algılayıcısı imalatının kesiti; (a) başlangıç malzemesi, (b) kalın oksit oluşumu, (c) fotodirenç maske ve aşındırılmış oksit desenleme, (d) Diyafraim oluşumu, (e) ikinci ısıl oksitleme, (f) boron implantasyonu, (g) taban ve direnç sürülmesi, (h) emiter desenleme, (i) emiter difüzyonu, (j) bağlantı pencereleri desenleme, (k) alüminyum metalleme, (l) pasif desen aktarımı.

Levha işleminin son adımı pasifleştirmedir (Şekil 4.1.l). Bir fosfor uyarımlı oksit, alüminyum desenlemeden sonra bütün levha üzerine kaplanır ve alüminyum yollara pencereler açılır.

Mikroalgılayıcı imalatının son safhası algılayıcıyı levha halinden çeşitli dış etkilere dayanıklı olması için ve dış dünya ile elektriki bağlantı sağlanması için paket haline dönüştürme işlemleri dizisidir. Mikroalgılayıcının toplama ve paketleme işlemi ayırma, birleştirme, bağlama, ve paketlemeyi içerir.

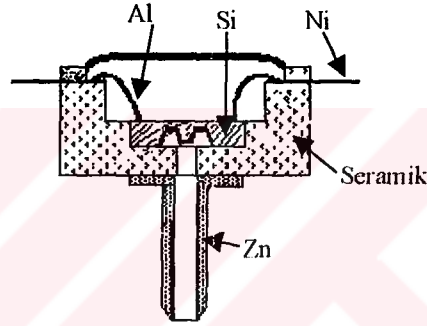
Mikroalgılayıcı ayırma, kazıma ve kırma teknikleriyle küpler haline getirilir. Kazıma darbeli lazer ışınla veya elmas kesiciyle yapılır. Kazımadan sonra kırma işlemi kazınmış taraf aşağıda kalacak şekilde yumuşak esnek bir desteğin üzerine yerleştirilerek, levha ince bir plastik örtüyle kaplanarak, basınç altında levha üzerinden silindir geçirilerek yapılır.

Küplerin birleştirilmesi tamamlanır. Küp şeklindeki cihazların pakete iliştirilmesi küp tabakalar ile paket arasında ısıl ve sızdırmaz bağlantılar sağlar. Küpler orta kuvvette epoksiler kullanılarak bağlanmaktadır. Makul kalitede bağlar bu teknik kullanılarak 200°C'ye kadar düşük bir sıcaklıkta yapılır.

Tel bağlama, mikroalgılayıcılar için önemli bir bağlantı adımıdır. O ayırma ve birleştirme işleminden sonra yapılır. Tel bağlama için ultrasonik teknik kullanılmıştır. Ultrasonik teknik bir düşük sıcaklık işlemidir. Gerekli ısı tel ile

bağlama bölgesi arasındaki sürtünmeden üretilir. Bu bağlamada alüminyum-silikon tel (%1 Si) kullanılmıştır.

Algılayıcı imalatının son adımları paketlenme ve karakteristiklerin ölçümüdür. Mikroalgılayıcı için paket seçimi küp hacmine, bağlama yollarının sayısına, güç tüketimine ve çevre şartlarına bağlıdır. Bu çalışmada 8-terminalli seramik paket kullanılmıştır. Temizleme işlemi ve yüzeydeki nemin kurutulmasını müteakiben, paket etkisiz bir atmosfer içinde başlıklara Kovar şapkasını kaynak ederek kapatılır. Kaynak yapma işlemi hızlıdır ve yüksek kazançlı sızdırmaz bir paket elde edilir. Bu çalışmada hazırlanan bir "gauge" basınç algılayıcısının kesit alanı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. "Gauge" silikon basınç algılayıcısının kesiti.

4.2. Offset Sapmanın Sıcaklık Kompanzasyon Yöntemleri

Basınç algılayıcılarının piezodirençleri zar üzerine yüksek enerjili iyon implantasyonu veya difüzyon dopingiyle imal edilir. Onların dopink konsantrasyonuna, sıcaklığa ve basınca karşı doğrusal olmadıkları bilinmektedir. Köprü offset gerilimi, verilmiş bir sıcaklıkta köprü kaynak gerilimiyle doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Bu, piezodirençlerin elektrik non-lineeritesiyle açıklanabilir. Dört piezodirenç bir köprüyü teşkil ettiği zaman, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi, köprü offseti ($P=0$) aşağıdaki gibi olabilir [Sun, et al, 1997];

$$U_{off} = V_B \frac{Q_0}{K} \quad (4.1)$$

burada V_B köprüye uygulanan gerilimdir.

$$\begin{aligned} Q_0 &= R_1 R_3 - R_2 R_4 \\ K &= (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Eğer piezodirençler uygulanan gerilimle değişmezse Q_0 sabit olacak ve köprü offset gerilimi köprü gerilimi ile orantılı olacaktır. Şüphesiz ki, bu doğrusal dirençler için bir sonuçtur. Offset çıkış gerilimi U_{off} , verilmiş bir V_0 köprü gerilimi için, örneğin 6 V, uygun bir direnç köprüünün belirli bir koluna paralel bağlanarak sıfıra ayarlanabilir. Şimdi, köprü gerilimi V_B , V_0 'dan az veya fazla olursa offset çıkışı daha fazla sıfıra eşit kalmayacak ve işaret değiştirecektir. $U_{off} - V_B$ eğrisi $V_B=V_0$ noktasında negatiften pozitive geçecektir.

$$U_{off} = 0 \quad \text{but} \quad \left. \frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} \right|_{V_B=V_0} \neq 0 \quad (4.3)$$

Bu olay offsetin elektrik sapması olarak adlandırılır. Bu diferansiyel terim kol direncin non-lineeritesinden yükselir. Offset termal kaymanın sıcaklık katsayısı TCO [Kim, et al, 1983],

$$TCO = \frac{1}{U_0} \frac{\partial U_{off}}{\partial T} \quad (4.4)$$

iyi bir algılayıcı için $(1-2) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ FS kadar düşük olmalıdır.

İlaveten, köprü koluyla paralel sabit bir R_B direnci ve seri bir R_C direnci kullanarak offset termal sapmanın en aza indirilmesi için bir standart metod vardır (Şekil 4.4).

$$R_C = R_2 - R_3 \quad \text{and} \quad R_B = \frac{R_1 R_4}{R_1 - R_4} \quad (4.5)$$

olduğunda offset termal sapma yokedilebilir [Lee, et al, 1982].

Köprü çıkışı üzerindeki teoriden hareketle, offset termal sapma elektriki sapma kullanılarak yokedilebilir.

4.2.1. Sabit Sıcaklık ile Değişken Köprü Gerilimi Altında

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi, bir basınç algılayıcısı için köprü çıkış gerilimi U

$$U = V_B \frac{Q}{K} \quad (4.6)$$

burada

$$Q = (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4) = Q_0 + \Delta Q \quad (4.7)$$

$$K = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4) \neq \text{constant} \quad (4.8)$$

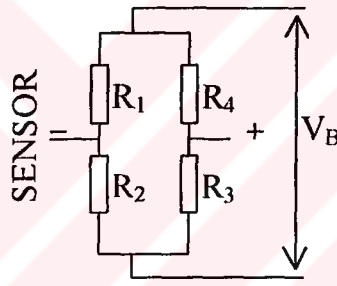
$$Q_0 = R_1 R_3 - R_2 R_4$$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + R_2 R_4 \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &= \frac{2\Delta R_i}{R_i} (R_1 R_3 + R_2 R_4) \quad (i = 1-4) \end{aligned} \quad (4.9)$$

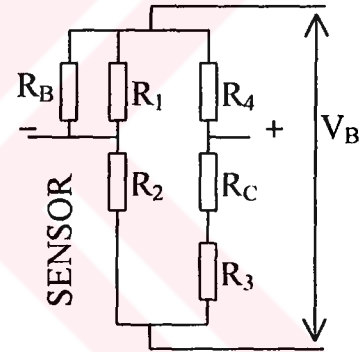
Q_0 sıfır basınçta köprü offseti olarak adlandırılır. ΔQ , P basınçında efektif köprü offsetidir.

$$\therefore \frac{\Delta R_i}{R_i} = kP \quad \therefore \Delta Q = 2kP(R_1 R_3 + R_2 R_4) \quad (4.10)$$

burada P zar üzerindeki basınç ve k oranı sabitidir. ΔR_i basınçtan kaynaklanan direnç artışıdır.



Şekil 4.3. Bir basınç algılayıcısı için bir piezodirenç köprüsü.



Şekil 4.4. Farklı kollarda iki sabit direnç kullanarak offset termal sapma kompanzasyon köprüsü.

(4.7) ifadesi (4.6)'da yerine konulursa

$$U = V_B \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{\Delta Q}{K} \right) = U_{off} + U_{sig} \quad (4.11)$$

burada

$$U_{off} = V_B \frac{Q_0}{K} \quad (4.12)$$

$P=0$ basınçta offset çıkışıdır.

$$U_{sig} = V_B \frac{\Delta Q}{K} \quad (4.13)$$

P basınçıyla orantılı efektif çıkış işaretidir. (4.6) ifadesinin diferansiyelini köprü gerilimi V_B 'ye göre alarak, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{\partial U}{\partial V_B} = \frac{Q}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial Q}{\partial V_B} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial(Q_0 + \Delta Q)}{\partial V_B} \quad (4.14)$$

$P=0$, o halde $\Delta Q=0$ and $U_{sig}=0$, böylece

$$\frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} = \frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} \quad (4.15)$$

R_i Taylor serisine V_0 civarında açılabilir. Birinci dereceden yaklaşım için,

$$\begin{aligned} R_i &= R_i^0 [1 + a_i (V_B - V_0)] \quad a_i > 0 \text{ or } < 0 \\ R_i R_j &= R_j^0 R_i^0 [1 + (a_i + a_j)(V_B - V_0) + a_i a_j (V_B - V_0)^2] \quad (i, j = 1, 3 \text{ or } 2, 4) \\ \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} &= \frac{\partial(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{\partial V_B} \\ &\approx (a_1 + a_3) R_1^0 R_3^0 - (a_2 + a_4) R_2^0 R_4^0 = A \end{aligned} \quad (4.16)$$

burada $(V_B - V_0)^2$ terimi V_B 'nin V_0 civarındaki değeri için ihmal edilebilir.

A, deney sonuçlarından $(\partial U_{off} / \partial V_B)$ elde edilebilir, köprü geriliminden bağımsız olarak. A'yı (4.15) ifadesine koyarak basitleştirilebilir,

$$\frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} = \frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \quad (4.17)$$

Kol dirençlerini ayarlayarak, köprü belirli bir köprü geriliminde (V_0) dengeli yapılır: $Q_0=0$ ve $U_{off}=0$ fakat

$$\frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} \Big|_{V_0} = \frac{V_B}{K} A \neq 0 \quad (4.18)$$

Bu diferansiyel terim elektriki sapma (electric drift) olarak adlandırılır. (4.19) ifadesi entegre edilerek,

$$U_{off} = \int_{V_0}^{V_B} \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dV_B \quad (4.19)$$

eşitliği elde edilir. U_{off} ard arda entegral almakla elde edilir. Bütün bu sonuçlar yarıiletken cihazlardaki difüzyon dirençlerin doğrusal olmamasından kaynaklanır.

4.2.2. Değişken Sıcaklık ile Sabit Köprü Gerilimi Altında

Sıcaklığa bağlı olarak (4.12) ifadesinin türevi alınırsa,

$$\frac{\partial U_{off}}{\partial T} = \frac{V_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial T} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_0}{\partial T} &= \frac{\partial(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{\partial T} \\ &= (\alpha_1 + \alpha_3) R_1^0 R_3^0 - (\alpha_2 + \alpha_4) R_2^0 R_4^0 \\ &\quad + 2\alpha_1 \alpha_3 R_1^0 R_3^0 T - 2\alpha_2 \alpha_4 R_2^0 R_4^0 T \\ &\approx (\alpha_1 + \alpha_3) R_1^0 R_3^0 - (\alpha_2 + \alpha_4) R_2^0 R_4^0 \\ &= \Lambda \end{aligned} \quad (4.21)$$

burada $R_i = R_i^0 (1 + \alpha_i T)$ ($i = 1, 4$) ve α_i dirençlerin sıcaklık katsayılarıdır. R_i^0 referans sıcaklık 0°C 'de piezodirencin değeridir. Son iki terim ihmal edilebilir çünkü $\alpha_i \alpha_j$ çok küçüktür ve $|T| \ll 1/\alpha$. Λ sıcaklıktan bağımsızdır. Λ işareti offset termal sapmayı belirlemektedir:

$$\frac{\partial U_{off}}{\partial T} = \frac{V_B}{K} \Lambda \quad (4.22)$$

$$\Lambda = \frac{K}{V_B} \frac{\partial U_{off}}{\partial T} \quad (4.23)$$

böylece Λ deney sonuçlarından ($\partial U_{off} / \partial T$) belirlenebilir

4.2.3. Köprü ile Seri Bir Termistör Kullanarak Offset Isıl Sapmanın Kompanzasyonu

Şekil 4.5'de gösterildiği gibi, $V_B = V/\eta$ ve

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{R_B + R_0 + R_T^0 (1 + \beta T)}{R_B}, \quad \frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \\ \frac{d\eta}{dT} &\approx \frac{d}{dT} \left(\frac{R_0}{R_B} \right) + \frac{R_T^0}{R_B} \beta = -R_0 \left[\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)(R_1^0 + R_2^0)}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{(\alpha_3 + \alpha_4)(R_3^0 + R_4^0)}{(R_3 + R_4)^2} \right] \\ &\quad + R_T^0 \left[\frac{\beta}{R_1 + R_2} + \frac{\beta}{R_3 + R_4} \right] \end{aligned} \quad (4.24)$$

burada R_B eşdeğer köprü direncidir. Sağ taraftaki ilk terim ihmal edilebilir çünkü $|\beta| \approx 0.05 \gg \alpha \approx 0.08$. O halde, $d\eta/dT = \beta R_T^0 / R_B$. (4.12) ifadesinden aşağıdaki denklem elde edilebilir,

$$U_{off} = \frac{V_B Q_0}{K} = \frac{V Q_0}{K \eta} \quad (4.25)$$

V'ye bağılı olarak (4.25) ifadesinin türevi alınırsa aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$\begin{aligned} dU_{off} &= \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial T} \right)_V dT \quad (4.26) \\ &= \left(\frac{Q_0}{K \eta} + \frac{V}{K \eta} \frac{\partial Q_0}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} + \frac{V}{K \eta} \frac{\partial Q_0}{\partial T} \right)_V dT \\ &= \left(\frac{Q_0}{K \eta} + \frac{V}{K \eta} \frac{\partial Q_0}{\partial V} \right)_T dV + \left[\left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{d\eta}{dT} \right) + \left(\frac{V}{K \eta} \frac{\partial Q_0}{\partial T} \right) \right]_V dT \\ &= \left(\frac{Q_0}{K \eta} + \frac{V}{K \eta} \frac{\partial Q_0}{\partial V} \right)_T dV + \left[\left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{\beta R_T^0}{R_B} \right) + \left(\frac{V}{K \eta} \Lambda \right) \right]_V dT \\ &= \left(\frac{Q_0}{K \eta} + \frac{V}{K \eta} A' \right)_T dV + \left[\left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V} \right) \times \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{\beta R_T^0}{R_B} \right) + \left(\frac{V}{K \eta} \Lambda \right) \right]_V dT \end{aligned}$$

burada $A' = \partial Q_0 / \partial V$ ve $\Lambda = \partial Q_0 / \partial T$.

$Q_0 = 0$ veya küçük olduğu zaman, yukarıdaki ifade basitleştirilebilir:

$$dU_{off} = \frac{V}{K \eta} A' dV + \left[\frac{V}{K} A' \left(-\frac{V}{\eta^2} \frac{\beta R_T^0}{R_B} \right) + \frac{V}{K \eta} \Lambda \right] dT \quad (4.27)$$

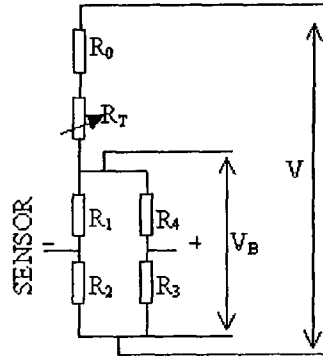
burada

$$A' = \frac{\partial Q_0}{\partial V} = \frac{K \eta}{V} \frac{\partial U_{off}}{\partial V} \Bigg|_{U_{off}=0} \quad (4.28)$$

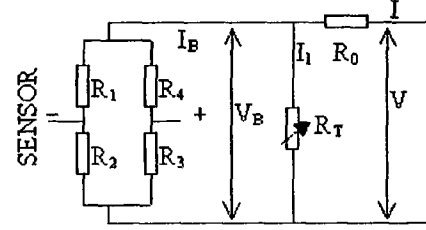
Böylece, eğer

$$\eta R_B = R_0 + R_T^0 (1 + \beta T) + R_B = \frac{A'}{\Lambda} V \beta R_T^0 \quad (4.29)$$

o halde $\partial U_{off} / \partial T = 0$. Bu demektir ki offset termal sapma (Λ) elektriksel sapma (A') ile kompanse edilebilir. β işareti kompanzasyon öncesi deneylerle belirlenecek olan A' / Λ 'ya bağlıdır. $A' / \Lambda < 0$ olduğu zaman $\beta < 0$ ve negatif sıcaklık katsayılı bir termistöt (PTC) seçilmesi gerekir.



Şekil 4.5. Offset termal sapmanın kompanzasyonu için köprü ile seri bir termistör.



Şekil 4.6. Offset termal sapmanın kompanzasyonu için köprü ile paralel bir termistör.

(4.29) denkleminde, elektriksel sapmayla kompanze edilen uygulanmış gerilim V :

$$V = \frac{R_0 + R_T^0(1 + \beta T) + R_B \frac{\Lambda}{A'}}{\beta R_T^0} \quad (4.30)$$

Offset çıkış U_{off} (4.26) ifadesinin ard arda integralinin alınmasıyla elde edilecektir:

$$U_{off} = \int_{V_0}^V \left(\frac{Q_0}{K\eta} + \frac{V}{K\eta} A' \right) dV \quad (4.31)$$

burada integralin alt sınırı V_0 U_{off} 'un sıfır olduğu uygulanmış belirli bir gerilimdir ve üst sınır V termal sapmanın elektriksel sapmayla kompanze edildiği uygulanmış gerilimdir .

4.2.4. Köprü ile Paralel Bir Termistör Kullanarak Offset Isıl Sapmanın Kompanzasyonu

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, offset çıkış gerilimi

$$U_{off} = I_B \frac{Q_0}{K} \quad (4.32)$$

burada Q_0 öncekiyle aynı fakat

$$I = I_B + I_1, \quad K = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (4.33)$$

(4.32) ifadesinin türevi

$$\begin{aligned}
dU_{off} &= \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial I} \right)_T dI + \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial T} \right)_V dT \\
&= \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{I_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial I_B} \right)_T dI + \left(\frac{\partial U_{off}}{\partial I_B} \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial T} \right)_V dT \\
&= \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{I_B R_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} \right) dI + \left[\left(\frac{Q_0}{K} + \frac{I_B R_B}{K} \frac{\partial Q_0}{\partial V_B} \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT \\
&= \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dI + \left[\left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT
\end{aligned} \tag{4.34}$$

burada $\Lambda = \partial Q_0 / \partial T$, $A = \partial Q_0 / \partial V_B = \eta \partial Q_0 / \partial V$, $\eta = V / V_B$, ve R_B eşdeğer köprü direnci. $Q_0 = 0$ veya küçük ise,

$$dU_{off} = \left(\frac{V_B}{K} A \right)_T dI + \left[\left(\frac{V_B}{K} A \right) \frac{dI_B}{dT} + \frac{I_B}{K} \Lambda \right] dT \tag{4.35}$$

$I = I_B + I_1 = \text{const}$ ve $I_1 = V_B / R_T^0 (1 + \beta T)$ olduğunda,

$$\left(\frac{dI_B}{dT} \right) = - \frac{dI_1}{dT} = \frac{V_B}{R_T^0} \frac{\beta}{(1 + \beta T)^2} \approx \frac{V_B \beta}{R_T^0} \tag{4.36}$$

Offset termal kaymayı dU_{off} / dT kompanze etmek için, $(dI_B/dT)_I$ ifadesini (4.35) ifadesinde yerine koyarak

$$\frac{V_B \beta}{R_T^0} \left(\frac{V_B}{K} A \right) + \frac{I_B}{K} \Lambda = 0 \quad \therefore \beta = - \frac{\Lambda I_B R_T^0}{A V_B^2} = \frac{\Lambda R_T^0}{A R_B V_B} \tag{4.37}$$

eşitliği elde edilir ve

$$V_B = - \frac{\Lambda R_B^0}{A \beta R_B}, \quad V = \eta V_B = - \frac{\eta \Lambda R_T^0}{A \beta R_B} \tag{4.38}$$

Böylece, seçilmiş termistörün işareti Λ/A 'nın işaretinin tersidir. Sabit bir sıcaklıkta (4.34) denkleminin integrali

$$\begin{aligned}
U_{off} &= \int \left(\frac{Q_0}{K} + \frac{V_B}{K} A \right) dI \\
&= \int_{V_0}^V \left[\frac{Q_0}{K(R_0 + R_B')} + \frac{V}{K\eta(R_0 + R_B')} \right] dV
\end{aligned} \tag{4.39}$$

burada R_B' , termistör kolu dahil, eşdeğer köprü direncidir [Sun, et al, 1997].

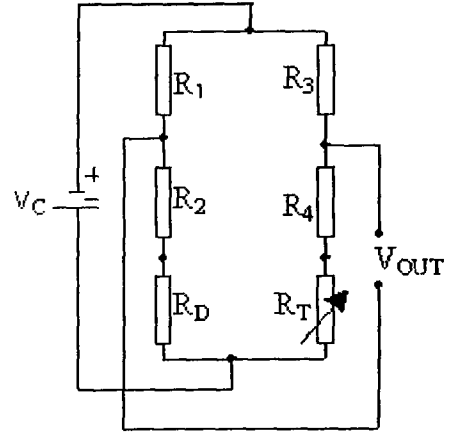
Entegre piezoalgılayıcının sıcaklık hatalarını telafi etmek için, simetrik köprü devresi kullanılır. Böyle bir devrede sıcaklık offset sapma bu devreye bağlanan

direncin sıcaklık katsayısının (TCR) mutlak değeriyle değil onların halihazır dağılımlarıyla belirlenir. Uygulamada tek bir kristal üzerinde bile TCR'nin dağılımı %10'na erişir ve hatta geçer. Bu, köprü devresinin kompanzasyon etkinliği ile sonuçlanır ve ilave adımların yapılmasını gerekli kılar. Pasif ve aktif termokompanzasyon devreleri belirlenebilir.

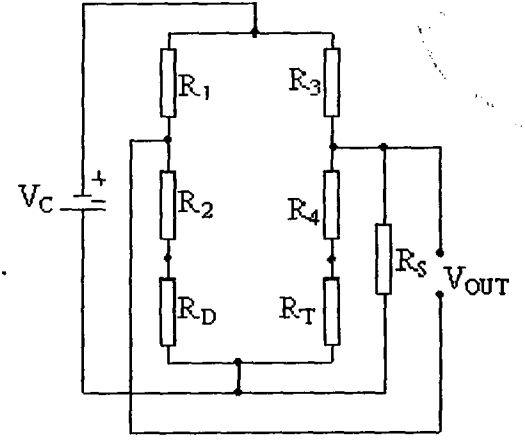
Bu çalışmada pasif termokompanzasyon metodları kullanılmıştır ve ilgili teorik araştırmalar pasif elemanların (direnc, termistör) köprü kolları için TCR'nin değerine gerekli düzeltme sağlayan Wheatstone köprüsünün kollarına dahil edilmesini varsaymaktadır.

Termistör devre tabanlı offset sapma kompanzatorleri bilinmektedir. Şekil 4.7'de bu kullanılan R_T termistörlü offset sapmanın sıcaklık kompanzasyonunun elektrik devresidir. Nominal sabit R_D ve R_T dirençleri seçilerek kompanzasyon devresinin gerekli TCR değeri ve aynı zamanda köprü dengesi sağlanır. Buna rağmen belirli sıcaklık şartlarının oluşturulması için piezodirençlerin yanına termistör yerleştirilmelidir. Minyatür entegre piezoalgılayıcılar için böyle bir şey mümkün değildir. Yarıiletken piezoalgılayıcıların yapısında termistör imal etmek, örneğin, entegre devre teknolojisini kullanmak önemli derecede karışık teknoloji gerektirmektedir.

Bu çalışmada offset sapmanın sıcaklık kompanzasyonunun bir metodu olarak köprü kollarıyla doğrudan seri veya paralel bağlı harici sabit dirençler kullanılmıştır. İki kompanzasyon direnci R_T ve R_S 'in bağlantısı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Yarıiletken algılayıcıda bir açık açılı Wheatstone köprüsü kullanılır. Algılayıcı sıcaklık offset sapmasının kompanzasyonu için harici R_T ve R_S dirençlerini kullanmakla -30 - $+100^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında $0,01/^\circ\text{C}$ 'lik kompanzasyon başarılıdır.



Şekil 4.7. Termistör kullanarak basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyon devresi.



Şekil 4.8. Harici sabit dirençler kullanarak basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyon devresi.

4.3. Duyarlılığın Sıcaklık Kompanzasyon Yöntemleri

Köprü devresinin duyarlılığının sıcaklık bağımlılığını azaltılmak için Wheatstone köprüsünün girişine veya çıkışına kompanzasyon devresinin diagonal olarak bağlanması etkili olabilir. Kompanzasyon devresine dahil edilen elemanlara bağlı olarak tüm kompanzasyon devresi pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır. Pasif kompanzasyon devreleri termistörlerin veya diyodların köprü devresinin girişine veya çıkışına bağlanması temeline dayanır. Bu çalışmada kullanılan kompanzasyon devresi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Verilen durumda kompanzator köprüünün girişine kaynakla seri olacak şekilde bağlanır. R_1 ve R_2 dirençleri R_T termistörüyle seri-paralel bağlanır ve onlar direncin sıcaklık katsayısının gerekli değerinin seçilmesine imkan sağlar. Kompanzasyon devresinin performansı şu formül ile gösterilir,

$$V_{OUT} = V_B \times S \times P \quad (4.40)$$

burada V_B köprünün kaynak gerilimidir, S algılayıcının duyarlılığı, P basınçtır. P basıncını sıcaklıktan bağımsız düşünerek T sıcaklığının değişimlerine bağlı olarak sabit V_{OUT} aşağıdaki gibi olacaktır [Marco, et al, 1993],

$$\frac{dV_B}{dT} \frac{1}{V_B} = -\frac{dS}{dT} \frac{1}{S} = -\epsilon \quad (4.41)$$

Böylece piezoalgılayıcının duyarlılığının sıcaklık kompanzasyonu başarılabilir, kaynak gerilimi V_B bir sıcaklık katsayı ile orantılı olarak değiştiğinde büyüklükte

aynı fakat işaretde farklı duyarlılık sıcaklık katsayısı (TCS) elde edilecektir. Başka bir ifadeyle silikon piezodirenç temelli entegre piezoalgılayıcıda, ki onun TCS'si genellikle negatif değere sahiptir, V_B gerilimi düşen duyarlılığa (S) oranla sıcaklığın artmasıyla yükselecektir. Sebebi Şekil 4.10'daki R_T termistörünün TCR'nin sıfırdan küçük ($TCR < 0$) herhangi bir değere sahip olması gerekir. Bir veya iki ilave dirençli termistör devreli kompanzatorler duyarlılığın sıcaklık sapmasını 10-15 defa daha küçük yapar ve hatta bazı durumlarda TCS'nin başlangıç değeri $\varepsilon \approx \%0,22 / ^\circ C$ ile -30 to $+100^\circ C$ sıcaklık aralığında 18 defa azaltır. Kompanzasyonun hassasiyetini artırmak maksadıyla termistör ve üç sabit R_1, R_2, R_3 dirençleri kullanıldı (Şekil 4.9). Bu durumda TCS'nin başlangıç değeri 20 katdan daha fazla azaltıldı ve TCS için $\%0,01 / ^\circ C$ 'den daha az bir değer elde edildi.

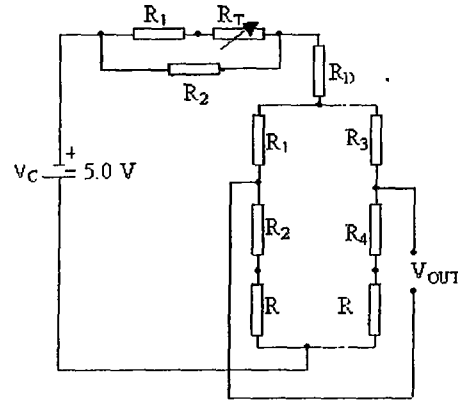
Termistörlü kompanzasyon devrelerinin eksi tarafları:

- (a) Termistör ve piezodirenç üzerinde eşit etki sağlamadaki zorluğu; büyük boyutundan dolayı onları piezodirence yakın yerleştirmek oldukça güçtür.
- (b) Yarıiletken termistörün sıcaklık bağımlılığının doğrusal olmayışı ve geçici kararsızlığı.
- (c) TCR'nin sıfırdan küçük ($TCR < 0$) değeri entegre devreye dahil etmedeki zorluk.
- (d) Termistör devresinin ayar edilmesindeki zorluk.

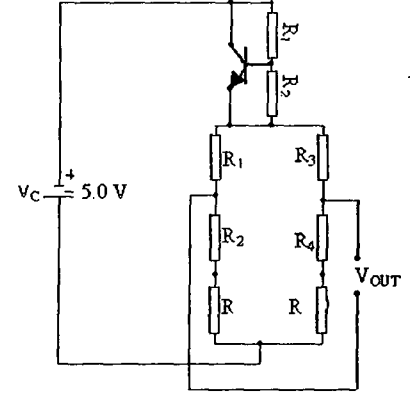
Bütün bunların yanısıra, başlangıç çıkış işaretini muhafaza etmek için güç kaynağının değerini artırmak gerekir. Köprünün kaynak tarafına dahil edilen diyodlu devreler kullanılmıştır. Bu yöntem sonraki paragrafta teferruatlı bir şekilde izah edilecektir. Sıcaklık duyarlılığının artırılmasının esas faydası tek bir kristal içerisinde kompanzasyon diyodlarının köprü devresi ile birlikte üretilmesinin mümkün olduğudur.

Diyod devresi piezodirençlerle beraber aynı duyarlılık elemanı üzerinde imal edilen transistör ile yer değiştirilebilir (Şekil 4.10). Termokompanzasyon için gerekli seviye sabit R_1 ve R_2 dirençlerinin değerlerinin seçimiyle elde edilebilir. $R_1 = R_2(n-1)$ oranını sağlayan bu devre transistöre seri bağlanarak eşit yapılır. Yine de bu durumda, n kompanzasyonun hassasiyetindeki sınırları yok edecek, diyod devresi için tipik değere sahiptir. R_1 ve R_2 dirençleri ince veya kalın film üzerine yapılabilir ve lazer ışınıyla ayarlanır. Araştırma süresince piezodirencin TCS büyüklüğü

kompanzasyondan önce yaklaşık $0,2 / ^\circ\text{C}$ idi fakat kompanzasyondan sonra $0,01/^\circ\text{C}$ olmuştur ve pratik olarak sıfır sapmayla tarif edilen genel sıcaklık hatalarına etki etmez. Burada tarif edilen duyarlılık kompanzasyon yöntemi bulunan bütün yöntemlerden en hassasıdır ve en kapsamlısıdır.



Şekil 4.9. Basınç algılayıcısının duyarlılığının ısıl kompanzasyonu için termistörlü elektronik devre.



Şekil 4.10. Basınç algılayıcısının duyarlılığının ısıl kompanzasyonu için transistörlü elektronik devre.

4.4. Silikon Basınç Algılayıcısının Sıcaklık Kararlılığının Bulunması

Piezoalgılayıcının duyarlılığının sıcaklık bağımlılığını azaltmak için diyodlu pasif termal kompanzasyon yöntemi kullanıldı. Entegre piezoalgılayıcının güç devresinde bir ile beş arasında değişen sayıda diyod kullanılmıştır. Elektrik devreleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu çeşit kompanzasyon yöntemi yükselen sıcaklıkla diyod üzerindeki gerilimin yükselmesi prensibine dayanmaktadır. Deney araştırmalarıyla silikon aygıtlar için $-250^\circ\text{C} \dots +130^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda bu bağımlılığın lineer olduğu bulunmuştur. Diyod üzerindeki V_D geriliminin yükselmesi aşağıdaki ifadeyle sunulabilir,

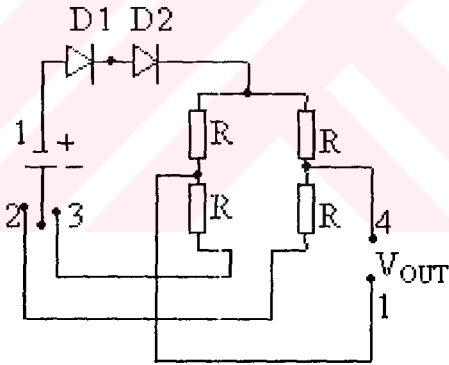
$$V_D = V_{D0} + r_D I + \lambda(T - T_0) \quad (4.41)$$

burada silikon diyod için $V_{D0} = 0,65 \text{ V}$, r_D diyodun diferansiyel direnci, λ r_D direncinin sıcaklık katsayısı, I diyod akımıdır. Silikon aygıtların λ değeri yaklaşık $1,8\text{-}3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

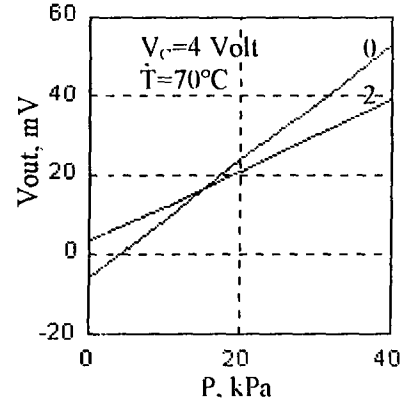
Şekil 4.12'de entegre basınç algılayıcısının basınca karşı çıkış gerilimi görülmektedir. Sıcaklığa göre çıkış gerilimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekil 4.14, 4.15, 4.16'da kompanzasyon diyodlu bir devre için sırayla duyarlılık (S), offset

sıcaklık katsayısı (γ) ve duyarlılık sıcaklık katsayısı (ϵ) gösterilmiştir. Hem hesaplar ve hem de deneyler S , γ ve ϵ 'nin hem kaynak gerilimine ve hem kaynak devresine bağlanan diyod sayısına bağlı olduğunu kanıtlamıştır. Kaynak geriliminin yükselmesiyle γ ve ϵ düşerken S artmaktadır. Sabit gerilim kaynağı için güç kaynağındaki diyodların sayısının artmasıyla γ ve ϵ artarken S düşmektedir. Ölçüm sonuçlarından güç devresinde sabit sayıdaki diyod için ϵ 'nin sıfır olduğu bir kaynak gerilimi bulunabilir. Güç devresinde iki diyodu olan çoğu piezoalgılayıcılar için bu gerilim 2,9 ile 3,1 V arasındadır, üç diyodlu için 4,2 ile 4,5 V, dört diyodlu için 5,6 ile 6,0 V arasındadır.

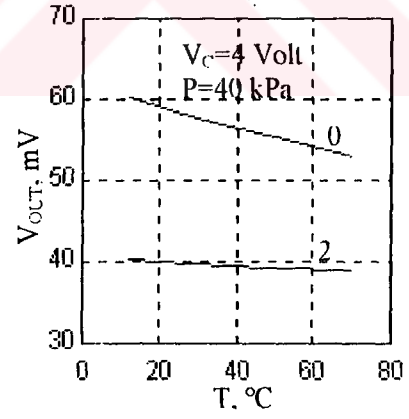
İlave olarak bu duyarlılığın ısı kompanzasyon yönteminde sabit direncin diyodla seri bağlanması 0-70°C sıcaklık aralığında ϵ 'nin değerini $\% -0,2 / ^\circ\text{C}$ 'den $\% \pm 0,02 / ^\circ\text{C}$ 'ye hatta daha düşük bir değere getirir. Bazı başlangıç araştırmaları hem çalışma sıcaklık aralığının ve hem de basınç aralığının genişletilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir.



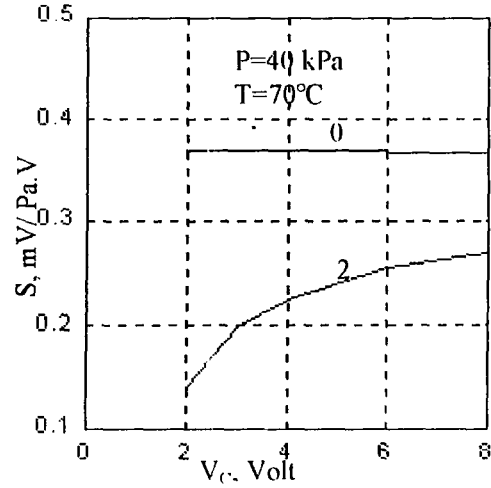
Şekil 4.11. Diyod kullanarak basınç algılayıcısının ısı kompanzasyon devresi.



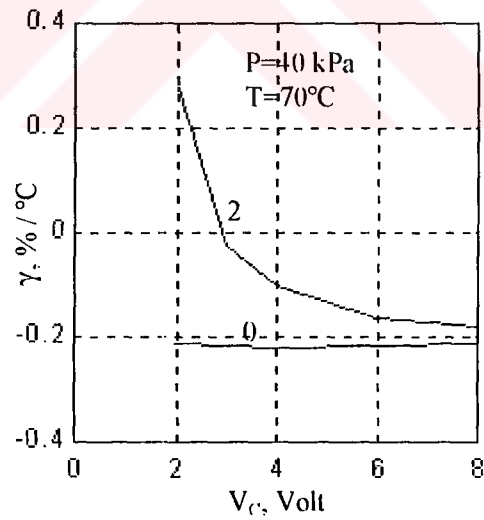
Şekil 4.12. Basınca karşı çıkış gerilimi, 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.



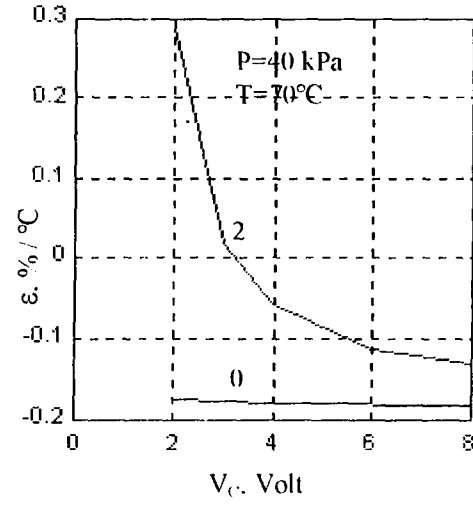
Şekil 4.13. Sıcaklığa karşı çıkış gerilimi, 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.



Şekil 4.14. İki diyodla kompanse entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_c) bir fonksiyonu olarak duyarlılık (S). 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.



Şekil 4.15. İki diyodla kompanse entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_c) bir fonksiyonu olarak offsetin sıcaklık katsayısı (γ), 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.



Şekil 4.16. İki diyodla kompanze entegre basınç algılayıcısı için kaynak geriliminin (V_c) bir fonksiyonu olarak duyarlılığın sıcaklık katsayısı (ϵ), 0-kompanzasyonsuz, 2-iki diyodla kompanzasyonlu.

5. SONUÇ

Bu çalışmada entegre silikon basınç algılayıcıları ve onların sıcaklık kararlılıkları araştırıldı. Silikon mekanik basınç algılayıcılarının elektronik özellikleriyle mükemmel mekanik özelliklerini birleştirdikleri gösterildi. Silikonun diğer üstünlükleri küçülmüş boyut ve kütlesi, elektronik devreler ve mikroişlemcilerle kolay birleşmeleridir. Piezoresistif basınç algılayıcılarının tasarım teknikleri sunuldu. Temel olarak bir piezoresistif algılayıcı mikroişleme ve entegre devre teknolojisini kullanan silikon zarın kenarlarına difüzyonlanmış dört adet piezodirençten oluşmaktadır. Mikroalgılayıcıların mekanik ve diğer yapı özellikleri ve entegre devre teknolojisi kapsamlı bir şekilde araştırıldı.

Piezoresistans katsayısının sıcaklık duyarlılığından yola çıkarak hazırlanan algılayıcının esas odak noktası sıcaklık etkisi olmuştur. Wheatstone köprüsünün basınç algılayıcılarının offset sıcaklık katsayısını düşürmesi ilkesinden hareketle çeşitli kompanzasyon devreleri geliştirildi. Duyarlılığın sıcaklık katsayısının güç kaynağı devresindeki gerilim artışıyla kompanse edilmesi için piezodirençlerin tasarımı yapılmıştır.

Çıkış işaretinin sıcaklık bağımlılığını ısı kompanzasyon devreleri kullanarak yoketmek mümkündür. Bu çalışmada harici termistör ve sabit dirençlerin algılayıcı offset sıcaklık kararlılığı üzerindeki etkisi teorik ve deney ile incelendi. Piezoalgılayıcının duyarlılığının sıcaklık bağımlılığını indirmek için diyodlu pasif ısı kompanzasyon teknikleri kullanıldı. Güç kaynağı devresinde birden beşe kadar olan sayıda diyod kullanıldı. Ölçümler duyarlılığın (S), offset sıcaklık katsayısının (γ), duyarlılık sıcaklık katsayısının (ϵ) hem kaynak gerilimine ve hem de kaynağa diagonal olarak bağlanan diyod sayısına bağlı olduğunu ispatlamıştır. Piezoalgılayıcıların sıcaklık bağımlılığı iki diyod kullanarak 2,9 V-3,1 V arasında, üç diyod kullanılarak 4,2 V-4,5 V arasında, dört diyod kullanarak 5,6 V-6,0 V arasında bulunmuştur. -60°C - $+125^{\circ}\text{C}$ sıcaklık çalışma aralığında $\%0,02 / ^{\circ}\text{C}$ 'den daha az bir duyarlılık sıcaklık katsayısına (ϵ) sahip bir entegre silikon piezoresistif basınç algılayıcısı imal edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Akbar, M. and Shanbatt, M., Temperature compensation of piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A*, 33 (1992) 155-162.
- [2] Ciureanu, P., Middelhoek, S., *Thin Film Resistive Sensors*, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1992.
- [3] Göpel, W., Hesse, J., Zemel, J.N., *Sensors-A Comprehensive Survey-Volume 7*, New York: VCH Weinheim, 1994.
- [4] Göpel, W., Hesse, J., Zemel, J.N., *Sensors-A Comprehensive Survey-Volume 1*, New York: VCH Weinheim, 1989.
- [5] Kim, S., Wise, K.D., Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers-*IEEE Transactions on Electron Devices*, ED 30 (1983) 802-810.
- [6] Kloeck, B., Collins, S.D., Study of electrochemical etch-stop for high-precision thickness control of silicon membranes-*IEEE Transactions on Electron Devices* Volume 36, No 4, 1989.
- [7] Lee, K., Wise, K.D., A simulation program for solid-state pressure sensors-*IEEE Transactions on Electron Devices*, ED 29 (1982) 34-41.
- [8] Marco, S., Samitier, J., Analysis of nonlinearity in high sensitivity piezoresistive pressure sensors-*Sensors and Actuators A* 37-38 (1993) 790-795.
- [9] Schilling, F., Langheinrich, W., Simulation of thermally induced package effects with regard to piezoresistive sensors-*Sensors and Actuators A* 60 (1997) 37-39.
- [10] Sze, S. M., *Semiconductor Sensors*, New York: John Wiley, 1994.
- [11] Sze, S.M., *Semiconductor Devices-Physics and Technology*, New York, 1985.
- [12] Sun, Y., Sun, X., Electric drift of the bridge offset for pressure sensors and its utilization-*Sensors and Actuators A* 58 (1997) 249-256.

ÖZGEÇMİŞ

Ramazan ÇOBAN, 1973 yılında Tarsus'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Tarsus'da tamamladı. 1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Askerlik hizmetini tamamladıktan sonra özel bir haberleşme şirketinde şantiye şefi olarak çalıştı. 1996 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans sınavını kazandı ve bir yıl İngilizce eğitimi aldı. Aynı yıl araştırma görevlisi olarak atandı. Halen araştırma görevliliği görevini yürütmektedir.

