

134379



T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV SİLİKON GAUGE BASINÇ
ALGILAYICISININ ARAŞTIRILMASI VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Alper TAŞKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yavuz ORAL

GEBZE

2003



Alper TAŞKIN'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..12.105..2003 tarih ve 2003/..14.. sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRI

ÜYE : Yrd.Doç.Dr. A.Yavuz ORAL
(Tez Danışmanı)



ÜYE : Prof.Dr. Ali ALKUMRU



ÜYE : Yrd.Doç.Dr. Arif ERGİN



ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..02-06-2003.. tarih ve ..2003/16.. sayılı kararı.

İmza / Mühür
Prof. Dr. Adem KILIÇ
GYTE Mühendislik ve Fen Bil.
Enstitüsü Müdürü



ÖZET

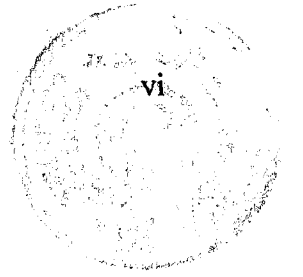
Elektronik sanayi tasarım ürünleri ve üretim yöntemleri son yıllarda büyük gelişim göstermiştir. Elektronik sanayi mikrometre boyutlarında kompleks cihazlar üretebilmek için elektronik ve mekaniğin bir kombinasyonu olan Mikroelektromekanik sistem (MEMS) teknolojisini meydana getirmiştir. Bu tezde, elektronik sanayisindeki gelişimin ürünü olan otomotiv silikon gauge basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyonu Microchip PIC18F452 microdenetleyicisi ile 25 °C de gerçekleştirilmiş ve bu işlemler anlatılmıştır.



SUMMARY

Recently, electronic industry desing products and manufacturing processes have shown significant progress. Electronic industry has produced Microelectromechanicalsystems (MEMS) technology, a combination of electronics and mechanics, to manufacture complex devices with dimensions in the scale of micrometers. In this thesis, as a result of progress in electronic industry, automotive temperature compensation of silicon gauge pressure sensor was developed with Microchip PIC18F452 microcontroller at 25 °C and the process was explained.





TEŞEKKÜR

Otomotiv silikon basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyonunun gerçekleştirilmiş olduğu bu tezde bana her türlü kolaylığı ve yardımı sağlayan değerli hocalarım sayın Doç. Dr. Vasile BESHLIU ve sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yavuz ORAL'a ayrıca bu aşamaya gelmemi sağlayan bölüm hocalarıma, tezin yapımında bana yardımcı olan arkadaşlarım Elektronik Müh. Ahmet SAYICI ve Elektronik Müh. Gökhan BEKTAŞ'a ve diğer tüm arkadaşlarıma, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.



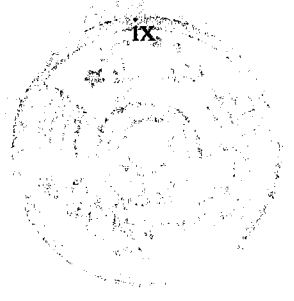
İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

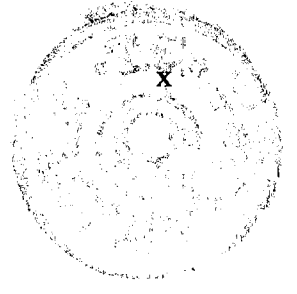
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. MİKROELEKTROMEKANİK SİSTEMLER (MEMS)	3
2.1. Mikroişleme Nedir?	3
2.2. MEMS Nedir?	3
2.3. Mikroelektronik'in Tarihsel Gelişimi	6
2.4. Tanımlamalar ve Sınıflandırmalar	7
2.4.1. Dönüştürücüler (Transducer)	9
2.4.2. Algılayıcı (Sensor)	9
2.4.3. İşletme (Actuator)	9
2.5. MEMS Uygulamaları	10
2.6. Bilinen MEMS Uygulamaları	11
2.6.1. Otomotiv Hava Yastığı Algılayıcısı	11
2.6.2. Tıbbi Basınç Algılayıcısı	14
2.6.3. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı Başlığı	15
3. MEMS ÜRETİM YÖTEMLERİ	17
3.1. Mikroişleme İçin Malzemeler	17
3.1.1. Yarıiletken Nedir?	17
3.1.2. Bant Aralığı	17
3.1.3. Kristal Yapılar	19
3.1.4. Katkılı Yarıiletkenler	20
3.1.5. İletkenlik ve Katkı Maddesi Konsantrasyonu	22
3.2. Tabaka (Wafer) Üretimi	23

3.2.1. Niçin Silikon?	23
3.2.2. Kristal Yönlendirme	25
3.3. Elektronik Malzemeler	27
3.3.1. Isıl Oksitleme ile Oksit Film Oluşturma	28
3.3.2. Silikon Nitrit ve Silikon Dioksitin Kaplanması	30
3.3.3. Polisilikon Film Kaplaması	35
3.4. Model Transferi	36
3.4.1. Litografya Yöntemi	36
3.4.2. Kalın Fotoelastik	40
3.4.3. Topografik Yükseklik Değişimleri	40
3.4.4. Çift Taraflı Litografya	41
3.5. Kitle (Bulk) Silikondan Mikroişleme	43
3.5.1. Eş Yönlü (İzotropik) Islak Aşındırma	44
3.5.2. Eş Yönsüz (İzotropik olmayan) Islak Aşındırma	45
3.5.3. Elektrokimyasal Jet ile Aşındırma	47
3.5.4. Plazma-Faz (Kuru) Aşındırma	49
3.6. Metalleştirme	50
3.7. Paketleme	50
4. OTOMOTİV SİLİKON GAUGE BASINÇ ALGILAYICISININ ARAŞTIRILMASI ve GELİŞTİRİLMESİ	52
4.1. MEMS Basınç Algılayıcısı	53
4.2. Microchip PIC18F452 Mikrodenetleyici	58
4.3. Microchip TC77 Sıcaklık Algılayıcısı	59
4.3.1. TC77 İçin Uygulama Bilgileri	60
4.4. INA128/INA129 Düşük Güçlü, Hassas Yükseltme Cihazları	60
4.4.1. INA128/INA129 İçin Uygulama Bilgileri	61
4.5. Otomotiv Silikon Gauge Basınç Algılayıcısının Sıcaklık Kompanzasyonu	63
5. SONUÇ	88
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	91

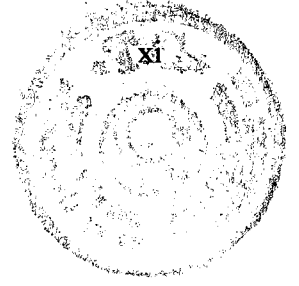
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ



3D	Üç boyutlu
A°	Angstrom (10^{-10} m)
A, O ₂₅	Basıncın 25 °C deki offset değeri
A/D	Analog/Dijital
ADC	Analog-Dijital dönüştürücü
adc0	Mikrodenetleyicinin ölçülen gerilim değerine karşılık ürettiği 0 ile 1023 arasındaki herhangi bir değer
ALU	Aritmetik mantık birimi
APCVD	Atmosferik basınçlı kimyasal buhar kaplama
As	Arsenik
B	Bor
B, M ₂₅	Basıncın 25 °C deki eğim değeri
BJT	İki kutuplu jonksiyon transistörü
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CH ₃ COOH	Asetikasit
CMOS	Tümleştirilmiş metal oksit yarıiletken
CPU	Merkezi işlem birimi
CVD	Kimyasal buhar kaplama
D/A	Dijital/Analog
DIP	İki taraflı paket
DRAM	Dinamik rastlantısal bellek
DRIE	Derin reaktif iyon aşındırma
E _c	İletkenlik bandı
EDP	Etilendiamin katekol
EEPROM	Silinip programlanabilen yalnız okunabilir bellek
E _g	Bant aralığı
E _v	Valans bandı
FETs	Alan etkili transistör
G	Kazanç
GaAs	Galyum arsenik
Ge	Germanyum



HARM	Yüksek-açı-oranlı mikroişleme
HF	Hidroflorik asit
HNA	Hidroflorik asit, Nitrik, Asetikasit karışımı
HNO ₃	Nitrik
IC	Entegre devre
ICP-RIE	İndüktif kuplajlı plazma reaktif aşındırma
JFET	Jonksiyon alan etkili transistör
KOH	Potasyum hidroksit
LPCVD	Alçak basınçlı kimyasal buhar kaplama
M_SLOPE	Eğim
MEMS	Mikroelektromekanik sistem
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken
MOEMS	Mikro-optoelektromekanik sistem
MOS	Metal oksit yarıiletken
MST	Mikrosistemler teknolojisi
M _T	Basıncın T sıcaklığındaki eğim değeri
Na	Sodyum
O _T	Basıncın T sıcaklığındaki offset değeri
P	Basınç
p ⁺ /n ⁺	Ağır bir şekilde katkılandırılmış p/n bölgesi
p ⁺⁺	Ağır bir şekilde katkılandırılmış P bölgesi
PCB	Baskılı devre kartı
PECVD	Plazma arttırımlı kimyasal buhar kaplama
PIC	Çevresel arabirim denetleyici
p-n	P-tip ve N-tip malzemelerden yapılmış jonksiyon diyodu
pressmv	Ölçülen değer
RF	Radyo frekansı
RIE	Reaktif iyon aşındırma
RMS	Etkili gerilim
Sb	Antimuan
SIO	Yalıtkan üzerindeki silikon
Si	Silikon
Si ₃ N ₄	Silikon nitrit



SiC	Silikon karbit
SiGe	Silikon germanyum
SiO ₂	Silikon dioksit
T	Sıcaklık
TC	Sıcaklık Katsayısı
TCO	Offset'in sıcaklık katsayısı
TCO ort	Offset'in sıcaklık katsayısının ortalama değeri
TCR	Sıfıra yakın sıcaklık katsayılı direnç
TCS	Duyarlılığın sıcaklık katsayısı
TCS ort	Duyarlılığın sıcaklık katsayısının ortalama değeri
TEOS	Tetraetoksi silan
TMAH	Tetrametil amonyum hidroksit
V	Gerilim
VDD	Besleme gerilimi
VOFF	Offset gerilimi
VOUTTEMP	Kompanze edilen çıkış gerilimi
VSS	Toprak gerilimi

ŞEKİLLER DİZİNİ



Sekil

- 2.1. MEMS öğelerinin şematik gösterimi
- 2.2. (a) İnsan saçının bir teli ile MEMS silikon motor ve (b) Mikroişleme ile üretilen dişli çarklar üzerinde duran mayt böceğinin bacakları 5
- 2.3. Entegre devreler için Moore'nun kanunu: geçen 30 yıl esnasında IC çipleri içinde bulunan transistör sayısının üstel artış grafiği 7
- 2.4. Hafıza (DRAM) çiplerinin boyutu ve zamanın bir fonksiyonu olan en küçük boyut özelliğinin grafiği 8
- 2.5. Mikrosistemin şematik olarak sınıflandırılması 8
- 2.6. (a) Analog Devices dan ilk hız ölçer (1990); Boyutu 1 cm^2 den azdır. (solda) ve (b) Kapasitif levhaların duyarlılığı, 60 mikron derinlikli (sağda) 12
- 2.7. Bugünlerde kullanılan hız ölçeri (solda) ve tamamen kaplanmış cihaz (sağda) 13
- 2.8. Basınç ile direnç değeri değişen basınç algılayıcısının şematik örneklemeesi 15
- 2.9. (a) Kullanıldıktan sonra atılabilen basınç algılayıcısının IV hat bağlantısı (b) Kullanıldıktan sonra atılabilen basınç algılayıcısı ve (c) Kalp içi catheter-tip algılayıcıların bir iğnenin kafası üstündeki görünümü 15
- 2.10. Hewlett-Packard ısıl mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığının yanal kesitinin görüntüsü ve mürekkep ısıtma periyodu 16
- 3.1. (a) Bir atomun yörünge yapısının örneklemeesi (b) enerji bandı 18
- 3.2. (a) Enerji bantları ve Alüminyumun bant aralığı (b) Na (c) Si (d) SiO_2 19
- 3.3. (a) Gerçek dört yüzlü silikon tekli kristal yapı ve (b) onun iki boyutlu basitleştirilmiş hali 20
- 3.4. (a) N-tipi (arsenik) katkılı silikon ve (b) Donor enerji bandı 21
- 3.5. (a) P-tipi (Bor) katkılı silikon (b) onun alıcı enerji bandı ve (c), (d), (e) boşlukların (deliklerin) hareketlerinin örneklemeesi 22
- 3.6. Silikon için katkı konsantrasyonu ve öz direnç 23
- 3.7. $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlem yönelimlerinin gösterimi 26
- 3.8. $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlemlerinin kafes yapıları 26



- 3.9. Aşındırma çukurları (a) $\langle 100 \rangle$ tabakası (b) $\langle 111 \rangle$ tabakası
örneklenmiştir 27
- 3.10. Silikon tabakanın ısıt oksitlenmesi için gereken temel fırın düzeni 29
- 3.11. (a) Isıt oksit'in tek birimi; (b) Kuvars'ın düzenli dizilimi; ve
(c) SiO_2 'in düzensiz dizisinin atomik yapıları 30
- 3.12. (a) LPCVD reaktörünün tipik projesi; (b) İki PECVD reaktör 32
- 3.13. (a) İdeal; (b) İdeal olmayan film kaplaması 34
- 3.14. Cihaz üretimde kullanılan litografyanın temel adımları 37
- 3.15. Pozitif ve negatif fotoelastiğin oluşumundan sonraki desenlerin
biçimlendirilmesi 38
- 3.16. Temel litografya maske düzeni (a) Kontak modelleme (b) Yakınlık
modelleme 39
- 3.17. Projeksiyon maske için temel litografya düzeni 39
- 3.18. Sert topografik yükseklik değişimleri, fotoelastiğin döndürülerek
kaplanması sonucunda oluşan istenilmeyen etkileri gösterilmektedir.
Fotoelastik, köşelerde incelmış ve boşluk içinde birikmiştir 41
- 3.19. Karl Süss MA-150 üretim sistemi için çift taraflı hizalama şeması; (a)
işaretlerin hizalanması ile maskenin görünümü elektronik olarak
saklanması. (b) tabakanın arka tarafının üst kısmındaki şekillerle
hizalan masında odaklamalar kullanılır. (c) tabakanın konumu
çevirme ve döndürme ile yüklenen görüntünün işaretlerinin
hizalanması ile sağlanır. Hizaya getirilen işaretlerin bilgisayar
ekranındaki görünüm örnekleri sağ tarafta gösterilmiştir 42
- 3.20. Dört farklı tipteki aşındırma sonucunda oluşan çapraz kesitli çukur
profillerinin şematik örnekleme 44
- 3.21. N-tipi epitaksiyal silikon kullanılan elektrokimyasal aşındırmanın
örneği şekilde gösterilmiştir. N-tipi silikon, pasifleşme potansiyelinin
üzerinde bir potansiyele sahip olduğundan dolayı aşınmaz. P-tipi
tabaka ise bu çözelti içerisinde aşınır. P-tipi tabaka tamamıyla
kaldırıldıktan sonra aşındırma doğrudan doğruya durur 48

3.22. CMOS üretiminin tamamlanmasından sonra TMAH içinde elektrokimyasal aşındırılma ile biçimlenen tamamıyla askıya alınmış n- tipi kristalimsi silikon adanın görüntüsü verilmiştir	49
3.23. MEMS mikroalgılayıcının paketleme işleminin şematik gösterimi	51
3.24. Geleneksel IC paketleme tipleri	51
4.1. (a) Basınca duyarlı elementler ile basınç algılayıcısının şematik gösterimi (b) Duyarlı dört elementin wheatsone köprüsü ile gösterimi	54
4.2. Kitle (bulk) mikroişleme basınç algılayıcısının üretim aşamaları	55
4.3. Silikon eritme yöntemi ile tasarlanan minyatür mutlak basınç Algılayıcısı	56
4.4. Tezde kullanılmış olan basınç algılayıcısının üstten görünümü	57
4.5. PIC18F452 nin pin diyagramı şekilde gösterilmiştir	59
4.6. Microchip ürünü olan TC77 nin pinout'u	60
4.7. Teksas cihazlar teknolojisinin bir ürünü olan INA128/INA129 ın pinout'u	61
4.8. Temel bağlantılar	62
4.9. (a) Anakartın uygulama devresi (b) baskılı devre kartı şemaları	65
4.10. Basınç ve sıcaklık algılayıcısının; (a) Uygulama devresi (b) PCB baskılı devre kartı şemaları	67
4.11. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış çıkış grafiği	68
4.12. (a) Deney düzeneği (b) Üzerinde basınç ve sıcaklık algılayıcıları bulunan kart (c) Üzerinde Microdenetleyici ve INA129 çipleri bulunan anakart	69
4.13. Basınç algılayıcısının kompanze edilmiş çıkış grafiği	73
4.14. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış ve kompanze edilmiş duyarlılığının çıkış grafiği	73
4.15. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış ve kompanze edilmiş offsetinin çıkış grafiği	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. MEMS uygulamaları	10
2.2. MEMS cihazının seçilen ticari uygulamaları	11
3.1. Silikon hakkındaki gerçekler	24
3.2. Isıl oksit filmlerin büyütülmesi ve kaplanmasının özellikleri	35
3.3. Seçilen bazı elektronik malzemelerin özellikleri	36
3.4. İnce metal filmler ve dielektrik yalıtkanların ıslak ve kuru (plazma fazı) aşındırıcıları	43
3.5. Silikonun sıvı ve gaz halindeki aşındırıcıları	46
4.1. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış çıkış değerleri	67
4.2. Basınç algılayıcısının kompanze edilmiş çıkış değerleri	72

1.GİRİŞ

Mikroalgılayıcılar ve Mikroışletmelerin uygulamalarının son yıllarda önemli ölçüde yaygınlaşması aslında mikroışleme teknolojisinin gelişmesinin bir sonucudur. Mikroışleme ve Mikroelektromekanik sistem (MEMS) teknolojileri mikrometre boyutlarında kompleks yapılar, cihazlar ve sistemler üretmek amacıyla kullanılmıştır. İlk mikroışleme teknikleri doğrudan doğruya entegre devre (IC) endüstrisinden alınmış, bugünlerde ise bir çoğu benzersiz olan MEMS mikroışleme yöntemleri geliştirilmiştir [Judy, 2001].

Mikroelektromekanik sistem (MEMS), mikro üretim teknolojisinin kullanılması vasıtasıyla adi silikon tabaka üzerinde elektronik, algılayıcı, işletme ve mekanik elementlerin bütünleşmesinden oluşmuştur. MEMS, silikon tabanlı mikroelektronik ve mikroışleme teknolojisi vasıtasıyla çip üzerinde geliştirilen çoğu ürün sınıflarında devrim yapmıştır. MEMS, mikroışletme ve mikroalgılayıcıların kontrol ve algılama kabiliyetleri ile mikroelektronik hesaplama yeteneğinin artmasıyla akıllı ürünlerin gelişimini sağlamıştır. Bu teknoloji, tasarım ve üretim uygulamaları ile aşırı derecede verimli ve farklı cihazları üretmiştir. MEMS cihazları IC teknolojisine benzer toplu üretim teknikleri kullanılarak üretilir [Huff, 2000].

MEMS yarıiletken mikroışleme basınç algılayıcılarında monolitik silikona yayılmış basınca duyarlı dirençler mevcuttur. Bu basınca duyarlı dirençler sayesinde basınç algılayıcısı, dış basıncı çıkışta elektrik sinyaline çevirir. Direnç gösteren element, ince duyarlı silikon diyaframa aittir. Silikon diyaframa basınç uygulandığında diyaframın bükülmesine neden olur ve kristal kafesi veya direnç değerlerini değiştirir. Yayılmış basınca duyarlı dirençlerin çıkış parametreleri sıcaklığa bağlıdır ve sıcaklığın yükselmesiyle duyarlılığı yani çıkış elektrik sinyalinin değiştiği gözlenmiştir [Mladenovic and Verma, 2001].

Otomotiv endüstrisi özellikle iki sebep için algılayıcı uygulamalarını tanımlamayı seçmiştir: elektronik parçalar için aşırı derecede sert çevre şartlarına uyum göstermiş ve yüksek hacim de uygulamalarının olması yeni duyarlı teknolojilerin gelişmesinde dönüm noktası olmuştur. Otomobiller için yeni sistemlerin gelişimi hükümet yasalarının bir sonucudur ve firmaların güvenlik yöntemlerini uygulamaları esnasında aralarında bir rekabet oluşturmuştur [Ristic, 1994]. Bu günlerde, üreticiler esasen güvenlik özelliklerini (Hava yastığı kontrolü, vb.) artırmak amacıyla MEMS algılayıcıları kullanmaktadırlar [Weinberg, 2002].

Bu tezde MEMS basınç algılayıcısının sıcaklık artışı ile çıkış elektrik sinyalindeki değişimlerinin kompanze edilmesi amaçlanmış ve bu doğrultuda kompanzasyonu gerçekleştirmek amacıyla Microchip PIC18F452 mikrodenetleyicisi ile beraber farklı sinyal girişlerini tekli sinyal çıkışına dönüştüren Texas instruments INA129 düşük güçlü yükseltme cihazı kullanılmıştır. Mikrodenetleyiciler, komut seti zenginliği, işlem hızı, dahili yan birimler açısından çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu, yapılacak uygulamaya en uygun, fiyat/performans oranına sahip bir dijital kontrol sistemi tasarlanması amaçlamıştır.

2. MİKROELEKTROMEKANİK SİSTEMLER (MEMS)

2.1. Mikroişleme Nedir?

Mikroişleme, mikroölçekli yapıya sahip olduğundan dolayı insan duyu organlarının algılayabileceği limitlerin altındaki elementler ve yapılardan meydana gelmiş, tasarım ve üretim araçlarının yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Mikroişleme, MEMS üretiminin temelini ve takım (alet) kutusunu oluşturmaktadır.

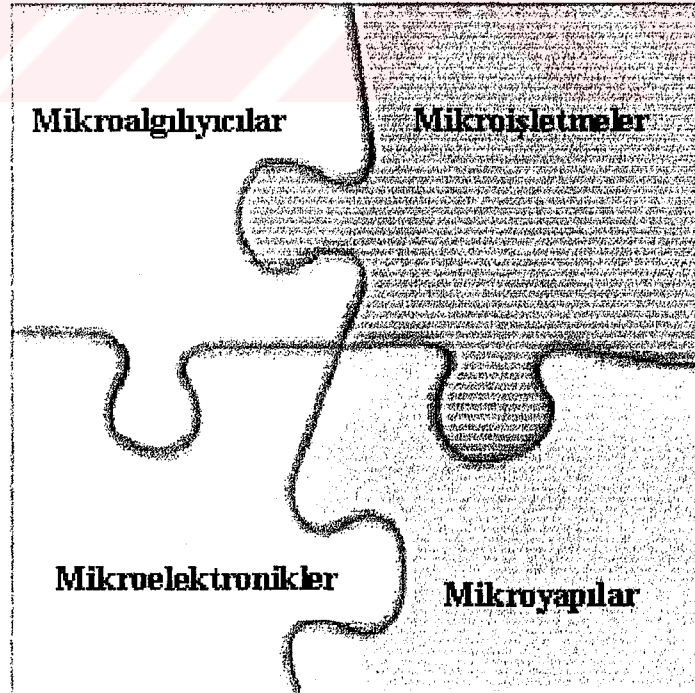
İlk mikroişleme öğelerinin meydana çıkışı yıllar öncesine dayanmaktadır. Entegre devre endüstrisi, mikroişleme teknolojisinin gelişmesi için uygun çevre şartlarının oluşmasında dolaylı olarak rol oynamıştır [Maluf, 2000]. Takip eden bölümlerde MEMS üretim ve tasarımında kullanılan çeşitli aletler hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır.

2.2. MEMS Nedir?

Mikroelektromekanik sistemler (MEMS), çok küçük boyutlarda entegre devreler meydana getirmeye yarayan işlem teknolojisi veya mekanik ve elektroniğin birleşimi olan bir sistemdir. Onlar, entegre devre (IC) gruplaştırma teknikleri kullanılarak üretilirler ve boyutları birkaç mikrometreden birkaç milimetreye kadar olabilir. Bu aletler (sistemler), kontrol, duyu, mikroölçekli işletme ve makroölçekli sonuçlar üretme yeteneğine sahiptir.

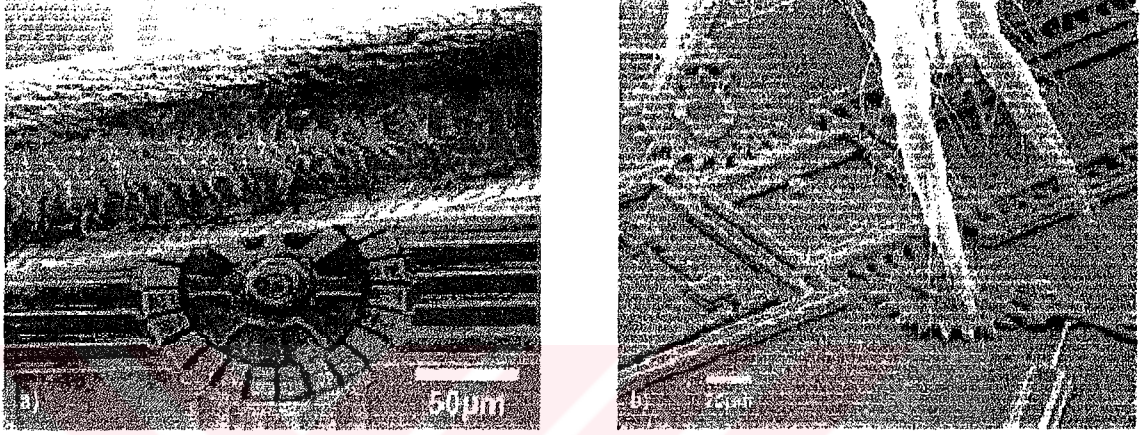
MEMS, birkaç kelimenin baş harflerinden meydana gelmiş, orjini Amerika (U.S.) olan bu kelime aynı zamanda Japonya da mikroişleme ve Avrupa da

mikrosistemler teknolojisi (MST) şeklinde adlandırılmaktadır. Terminolojiye bakmayarak, MEMS bu şekilde birleştirilmiştir. IC teknolojisi kullanılarak “Bilgisayar çipi” elektronik aletlerin üretimi esnasında, mikromekanik öğeler ve mikroişleme işleminde kullanılan diğer tabanlar silikonun karmaşık bir şekilde kullanılması ile üretilirler. Yüzey ve kitle (bulk) gibi üretim yöntemleri, mekanik ve elektromekanik parçalardan yapısal tabakalara ek olarak ekler veya yüksek-açı-oranlı mikroişleme (HARM) kadar iyi, seçici bir şekilde silikonun parçalarını kaldırır. Entegre devreler, silikonun elektriksel özelliklerinin olağan üstü başarı ile tasarlanması esnasında, MEMS ya silikonun mekaniksel özelliklerini yada onun elektriksel ve mekaniksel özelliklerini üstünlük sağlayacak şekilde kullanmıştır. Çoğu genel şekil içinde, mikromekanik yapıları içeren MEMS, mikroalgılayıcılar, mikroışletmeler ve mikroelettroniklerin tümü aynı silikon çip üstünde bütünleştirmiştir ve Şekil 2.1. de şematik olarak gösterilmiştir. Mikroalgılayıcılar, sistemin çevresindeki olayları mekanik, ısı, kimyasal veya elektromekanik bilgi ölçümlerinin değişimi ile fark eder. Mikroelettronik işlem, bu bilgi ve işaretin mikroışletmeler tarafından algılanması ve çevrede bazı değişiklikler meydana getirmesi olayını içerir.



Şekil 2.1. MEMS öğelerinin şematik gösterimi [Sio, 2002].

MEMS cihazları çok küçüktür; parçaları genellikle mikroskobik boyutlardadır. Hem dişli çarklar, manivelalar, pistonlar hem de motorlar ve hatta buhar makineleri MEMS tarafından üretilmektedir (Şekil 2.2.). MEMS, gruplaştırılmış üretim tekniği kullanan entegre devreler kadar iyi sistemler, kompleks mekanik aletler meydana getirmek ve tasarlamak için bir dizi üretim teknolojisi oluşturmuştur.



Şekil 2.2. (a) İnsan saçının bir teli ile MEMS silikon motor ve (b) Mikroişleme ile üretilen dişli çarklar üzerinde duran mayt böceğinin bacakları [Faraday Patnership, 2002].

MEMS in 1950'li yıllardaki eski görünümünden, 1990'lı yılların ortalarında MEMS parçaları pek çok ticari ürünleri meydana getirmeye başlamış ve hız ölçer uygulamalarını kapsayan, araç içindeki oturma düzenine göre yerleştirilmiş olan hava yastığı kontrolü, tıbbi uygulamalar için basınç algılayıcıları (sensor) ve mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıklarında kullanılmaya başlamıştır. Bugünlerde, MEMS cihazları bilgi depolama sistemleri içinde bulunan mikroyerbelirleyiciler içinde ve aynı zamanda projeksiyon görüntüleme içinde bulunmaktadır. Bununla birlikte, MEMS cihazları için en büyük potansiyeli; telekomünikasyon içindeki yeni uygulamalar (optik ve telsiz), biyomedikal ve metot kontrol alanındaki uygulamaları oluşturmaktadır.

2.3. Mikroelektronik'in Tarihsel Gelişimi

Mikroelektronik alanındaki gelişmeler, 1948 yılında ilk transistörün icadıyla başlamıştır. İlk transistör, iki kutuplu jonksiyon transistörünün (BJT) gelişimini izleyen 1950 li yılların içinde modası geçmiş, kullanılmayan nokta kontaklı transistördü. Elektronik devrelerin bu iki tipi tüm elektronik parçaların kalbini oluşturmaktadır. Mikroelektronik, 1958 yılında entegre devrelerin (IC) gelişimi ile bugünün bilgisayar endüstrisinin yolunu açmıştır.

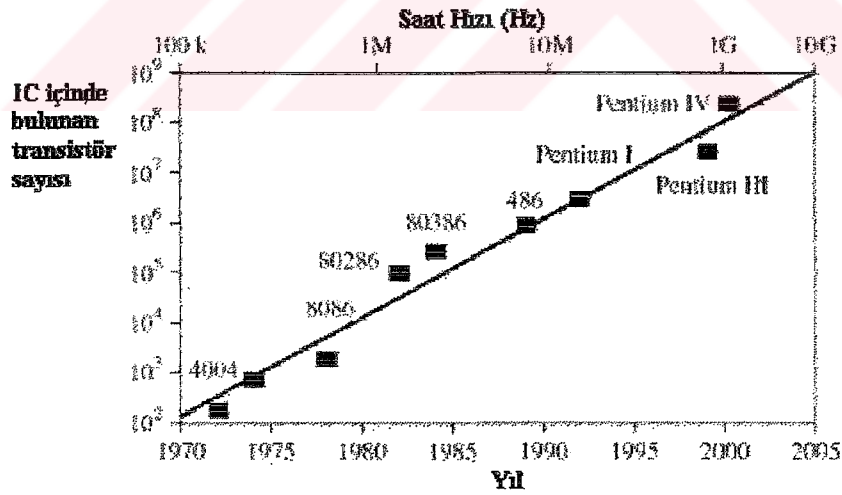
IC teknolojisi geçen 40 yıl esnasında hızlıca gelişmiştir. Silikon üretiminin sürekli gelişmesi, cihaz boyutlarının küçülmesini sağlanması ile şuanda 200 nm boyutlarında cihazlar rahatlıkla üretilebilmektedir. Moore kanununun çoğunlukla neden bahsettiğini anlamak için, tekli IC içinde bulunan transistörlerin sayısındaki artışın nasıl sağlandığını görmek lazımdır. Şekil 2.3. de gösterildiği gibi yalnızca 30 yılda entegre devre içinde bulunan transistörlerin sayısı, 1970 li yıllarda yaklaşık 100 den 2000 li yıllarda 100 milyona yükselmiştir. Bu, her 18 ayda her bir çip için gereken sayının iki katına eşittir. Şekil 2.3. deki grafik üzerinde mikroişlemci çip'lerinin sıkça rastlanan farklarının sayısını ve çip boyutlarının azalması ile saat hızındaki artışı 100 kHz den 1000 MHz ulaşması gösterilmiştir. Kişisel bilgisayarlarda yaygınca kullanılan bu tip mikroişlemcilerin yaklaşık maliyeti bugünün fiyatıyla 100 Euro civarındadır.

Bellek çipleri, transistör ve kapasitörler içerir; Bunun sonucunda dinamik rastlantısal belleklerin (DRAM) boyutu Moore'nun kanununda ki gibi zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 2.4. 'de standart bellek çipinin artışı 1970 te 1 kB dan, 2000 de 512 MB çıktığı gösterilmiştir. İlerlemedeki bu artış oranı sürdürülebilirse eğer, çipin 100 Euro ya satın alınması mümkün olabilecektir. Bir bellek çipi 2030 lı yıllarda insan beyni ile aynı kapasiteye sahip ve bu bellek çipi 2075 li yıllarda bütün dünyadaki herkesin sahip olduğu kapasite birleşimi ile aynı beyin kapasitesine sahip olabilecektir. Çiplerin gücü ve işlem hızlarındaki olağanüstü artış, bugünlerde bir bilgi devrimini ve ilk bilgisayar devrimini meydana getirmiştir.

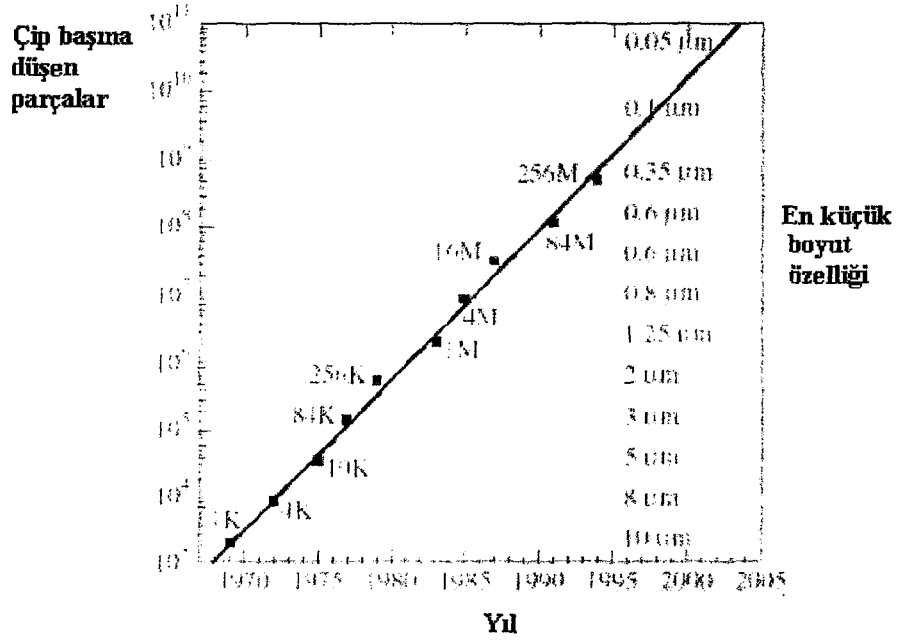
2.4. Tanımlamalar ve Sınıflandırmalar

Bu bölümde, MEMS ile ilişkili sınıflandırmalar ve bazı terminolojik tanımlamalar açıklanmıştır. Şekil 2.5. Mikrosistemler teknolojisinin (MST) sınıflandırılması şeklinde örneklenmiştir. MEMS küçük mekanik aletler ve sistemler oluşturmakta kullanılan işlem teknolojisidir ki bunun sonucu olarak MEMS, MST nin alt birimidir.

Mikro-optoelektromekanik sistemler (MOEMS) aynı zamanda MST nin alt birimidir ve MEMS ile beraber, elektronik, optik ve mekaniğin bir birleşimi olan minyatürleştirme alanında kullanılan teknolojinin uzmanlık alanı olarak şekillenmiştir ve her iki mikrosistemin tasarımı kapsamıştır. Entegre devre teknolojisinin terimleri ile onların uygulamaları arasında önemli çakışmalar vardır. MEMS ile MST arasındaki gerçek fark şudur: MEMS mekanik parçaların yarıiletken kullanılarak elde edilmesi ile ilgilidir.

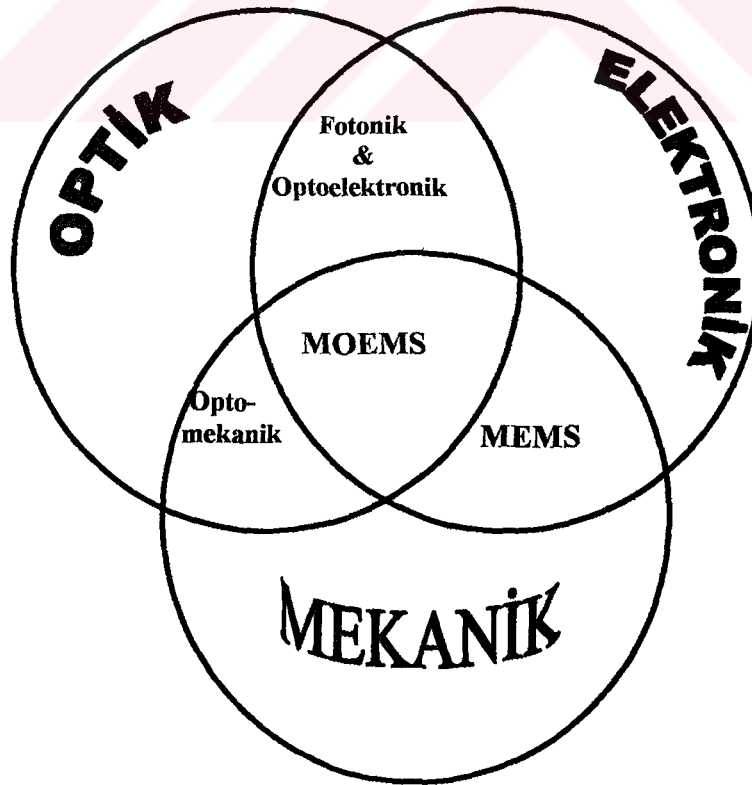


Şekil 2.3. Entegre devreler için Moore'nun kanunu: geçen 30 yıl esnasında IC çipleri içinde bulunan transistör sayısının üstel artış grafiği [Garner et al, 2001].



Şekil 2.4. Hafıza (DRAM) çiplerinin boyutu ve zamanın bir fonksiyonu olan en küçük boyut özelliğinin grafiği.

Buna karşın, örneğin silikonun üstüne bir maddenin kaplanması MEMS ile olmaz çünkü bu bir MST uygulamasıdır.



Şekil 2.5. Mikrosistemin şematik olarak sınıflandırılması.



2.4.1. Dönüştürücüler (Transducer)

Bir dönüştürücü, Sinyal veya enerjiyi bir şekilden diğer bir şekile çeviren cihazdır. Dönüştürücü terimi, sonuç olarak algılayıcılar (sensor) ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren rölelerin (actuator) her ikisini de kapsayacak şekilde kullanılabilir.

2.4.2. Algılayıcı (Sensor)

Algılayıcı, etrafını çevreleyen alandaki değişim bilgilerini ölçen ve ölçüm sonuçlarının cevabını elektrik çıkış sinyaline dönüştüren bir cihazdır. Yıllar sonra bu olaylar, enerji bilgi alanının terimleri içinde sınıflandırılmış fakat MEMS aygıtları genellikle birkaç bilgi alanında kesişmiş veya hiçbir sınıfa ait olmamıştır. Bu enerji bilgi alanlarını içeren gruplar:

- Mekanik ----- Güç, Basınç, Hız, İvme, Pozisyon
- Isı ----- Sıcaklık, Isı, Isı akışı, Termodinamik
- Kimya ----- Konsantrasyon, Bileşim, Reaksiyon oranı
- Işın yayımı ----- Elektromagnetik, Dalga şiddeti, Faz, Dalga boyu, Polarizasyon yansıma faktörü, Kırılma indisi, Sıcaklık geçirme sayısı
- Magnetik ----- Alan şiddeti, Akı şiddeti, Magnetik moment, Geçirgenlik
- Elektrik ----- Voltaj, Akım, Şarj, Direnç, Kapasite, Polarizasyon

2.4.3. İşletme (Actuator)

Elektrik sinyallerini harekete dönüştüren cihazdır. İşletme, Etrafını çevreleyen alanda bazı yararlı işlevler yapmak veya diğer mekanik aletleri kullanarak kendi kendini hareket ettirmek için güç meydana getirir.

2.5. MEMS Uygulamaları

Günümüzde, farklı uygulamalarıyla çok sayıda MEMS piyasada bulunmaktadır (Çizelge 2.1.).

Ürün teknolojisinin ortaya çıkması ile MEMS, ürün-piyasa dizilerindense teknoloji-ürün dizilerinin etrafında merkezlenmiştir. Sonuç olarak, bir MEMS cihazı, endüstriyel bir çok uygulamada kullanılabilmektedir. Örneğin; bugünlerde yaygın olarak kullanılan MEMS mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığının deliği, nükleer ayırma kullanılarak oluşturulmuştur. Çizelge 2.2. MEMS cihazının seçilen ticari uygulamaları örneklenmiştir.

Çizelge 2.1. MEMS uygulamaları.

Otomotiv	Elektronik	Tıbbi	Haberleşme	Savunma
Dahili Seyir Algılayıcıları	Disk Sürücü Kafaları	Kan Basınç Algılayıcıları	Fiber-Optik Network Öğeleri	Güdümlü Savaş Gereçleri
Klima Tesisatı Kompresör Algılayıcıları	Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı Kafaları	Kas Uyarımları & İlaç Dağıtım Sistemleri	RF Röleler, Anahtarlar ve Filtreler	Gizli İzleme
Fren Güç Algılayıcıları & Süspansiyon Kontrol Hızölçerleri	Perdeye Yansıtılabilir Televizyonlar	İmplantasyon Basınç Algılayıcıları	Projeksiyon Gösterimli Taşınabilir Haberleşme Cihazları ve Ekipmanları	Silahlı Sistemler
Yakıt Seviyesi ve Buhar Basınç Algılayıcısı	Deprem Algılayıcıları	Prostetikler	Voltaj Kontrol Osilatörleri (VCOs)	Gömülü Algılayıcılar
Hava Yastığı Algılayıcıları	Avionics Basınç Algılayıcıları	Minyatür Analitik Cihazlar	Ayırıcılar ve Birleştiriciler	Bilgi Depolama
“Akıllı” Lastikler	Kütle Bilgi Depolama Sistemleri	Kalp Atış Hızını Ayarlayan Cihaz	Ayarlanabilir Lazerler	Uçak kontrolü

Çizelge 2.2. MEMS cihazının seçilen ticari uygulamaları .

Ürün	Keşfi	Gelişimi	Maliyet Azalımı ile Uygulamanın Genişlemesi	Tamamen Ticarileşmesi
Basınç Algılayıcıları	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1990
Hız Ölçerler	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Gaz Algılayıcıları	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005
Supaplar	1980-1988	1988-1996	1996-2002	2002
Başlıklar	1972-1984	1984-1990	1990-1998	1998
Fotonikler/göstericiler	1980-1986	1986-1998	1998-2004	2004
Bio/Kimyasal Algılayıcılar	1980-1994	1994-1999	1999-2004	2004
RF Anahtarlar	1994-1998	1998-2001	2001-2006	2005
Hız (Devir) Algılayıcıları	1982-1990	1990-1996	1996-2002	2002
Mikro Röleler	1977-1982	1993-1998	1998-2006	2006

2.6. Bilinen MEMS Uygulamaları

2.6.1. Otomotiv Hava Yastığı Algılayıcısı

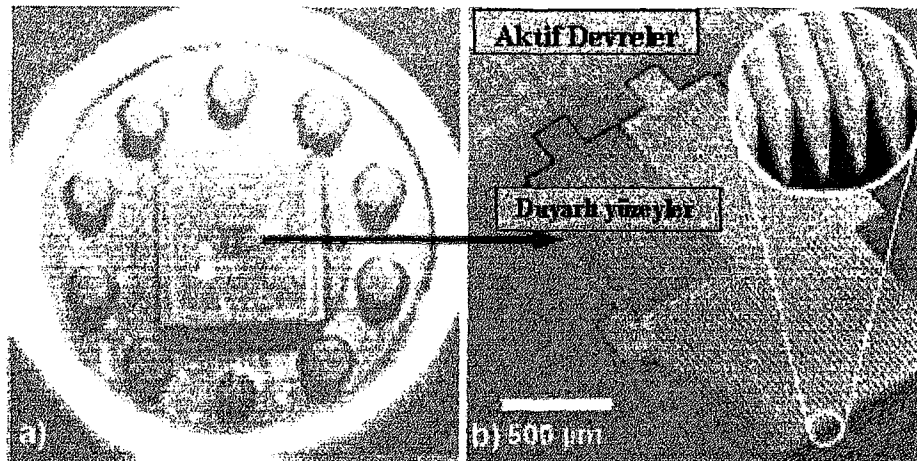
Otomotiv MEMS uygulamaları mutlak emme basınç algılayıcıları ile başlamış ve 80'li yılların ortalarında bir çok şirket tarafından geliştirilmiştir. Kullanıldıktan sonra atılabilen kan basınç algılayıcılarının ve mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığının yüksek hacimdeki mikroeletromekanik cihaz uygulamaları bu uygulamanın başta gelen rakipleridir [Monk, 2001]. Otomotiv hava yastığı algılayıcıları MEMS cihazlarının kullanıldığı ilk ticari uygulamalardan biridir. Bu tip algılayıcılar aracın kontrol sistemlerinin ölçüm parametrelerini elde ederek, sürücüyü bilgilendirmek amacıyla aracın tüm fonksiyonlarını ekranda gösterir [Jurgen, 1995]. Onlar, aracın bir nesneye çarpması ile süratle yavaşlamasını ölçen hız (ivme) ölçer veya akıllı algılayıcılar içeren tekli çip şeklinde günümüzde yaygınca kullanılmışlardır. Yavaşlama, voltaj değişimi ile algılanır. Elektronik kontrol merkezi sonradan bir tetikleme sinyali gönderir ve patlama ile hava yastığını doldurur.

İlk hava yastığı teknolojisinde, maliyeti birkaç yüz dolar ve birkaç pound ağırlık tartan nispeten kompleks geleneksel mekanik “Küre ve Boru” tip cihazlar

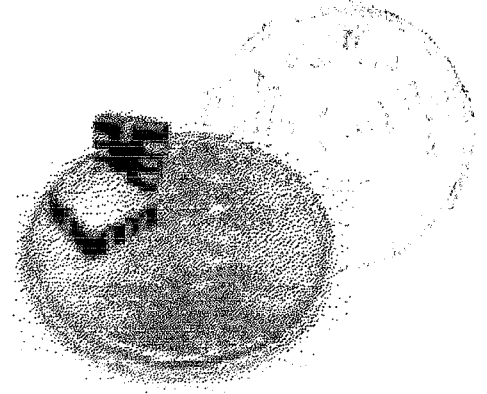
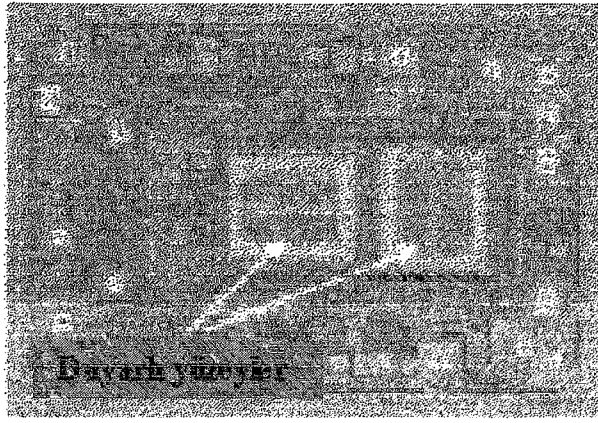
kullanılmıştır. Onlar, elektronik kısmın ayrılması ile genellikle aracın ön kısmına yerleştirilmiştir. MEMS aynı fonksiyonları gerçekleştirebilmesi, tekli silikon çip içindeki elektronik ve hız ölçerlerin bütünleşmesi ile sağlanmıştır. Sonuç olarak, bu küçük cihazlar direksiyon sütununa yerleştirilmiş ve maliyeti yalnız birkaç dolardan fazla değildir (Şekil 2.6. ve 2.7.).

Hız ölçerler, özellikle deneme kütlesi/levhası montajından meydana gelen kapasitif veya basınçla direnç değeri değişen cihazlardır. Deneme kütlesinin üstündeki hızlandırma eylemi, mikroişleme kapasitif veya basınçla direnç değeri değişen levhaların sapmasıyla duyarlı bir şekilde değişir. Levhaların duyarlılığı Şekil 2.6. da görülebilir.

Hükümet yasası, yolcu araçlarında sürücü için pasif sınırlama sistemlerini getirmiştir. Bu sınırlamalar sürücünün araç içinde güvenli bir şekilde yolculuk yapmasını amaçlamıştı ve bu doğrultuda otomobil üreticilerinin seçimleri hava yastığı veya otomatik koltuk kemeri sistemi olmuştur. Oluşan ölümcül kazalardan bir çok kişinin kurtulduğu belirtildikten sonra; müşteriler hızlıca hava yastığı sistemini benimsemişlerdir. Sonuç olarak; 1970 lerde araç yapımcıları ile zıt düşen bir uygulama 1990 larda satan bir nitelik haline gelmiştir [Frank, 1996].



Şekil 2.6. (a) Analog Devices dan ilk hız ölçer (1990); Boyutu 1 cm² den azdır. (solda) ve (b) Kapasitif levhaların duyarlılığı, 60 mikron derinlikli (sağda) [Faraday Patnership, 2002].



Şekil 2.7. Bugünlerde kullanılan hız ölçeri (solda) ve tamamen kaplanmış cihaz (sağda).

Hava yastığı algılayıcısı, mikroişleme teknolojisinin ve MEMS in başarısının temelidir. 60 milyonu aşkın cihaz satımı ile, son 10 yılı aşkın uygulaması ve aracı kullanana çevredeki zorluklarla mücadele edebilmesi için getirmiş olduğu kolaylıklar bu teknolojinin güvenilirliğini ispatlamıştır. Bu başarının örnekleri bugünün araçlarıdır. Örneğin, BMW 740i, ani frenlemede kilitlemeyi önleyici sistemler, aktif süspansiyon, donanım ve seyir kontrol sistemleri, titreşim kontrolü, yakıt algılayıcıları, gürültü azaltıcı ve emniyet kemeri sınırlaması vb. içeren yetmişi aşkın MEMS cihazlarına sahiptir. Sonuç olarak, otomotiv endüstrisinde MEMS in gelişimi ile birçok yenilik oluşmaya başlatmıştır. Hava yastığı hız ölçerlerin önde gelen bazı üreticileri Analog Devices, Motorola, SensoNor ve Nippondenso dir [Faraday Patnership, 2002].

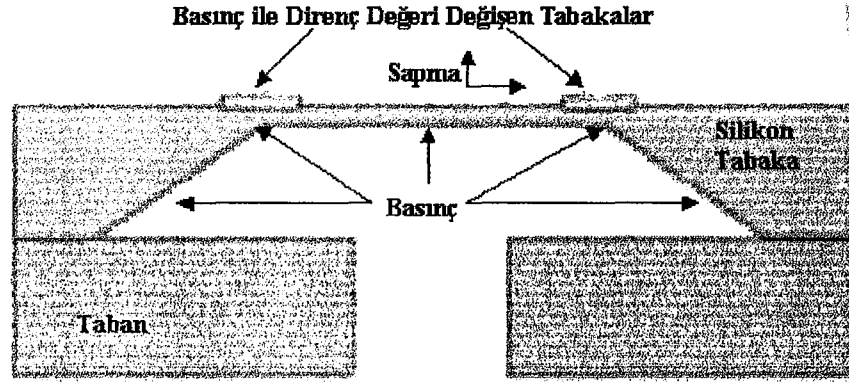
Hız ölçerlerin kullanım alanları yalnızca otomotiv uygulamaları değildir. Deprem tespiti, gerçek video oyunları ve kumanda kolları, kalp atış hızını ayarlayan cihaz, yüksek performanslı disk sürücüler ve silah sistemleri hız ölçerlerin kullandığı bir çok uygulamadan bazılarıdır.

2.6.2. Tıbbi Basınç Algılayıcısı

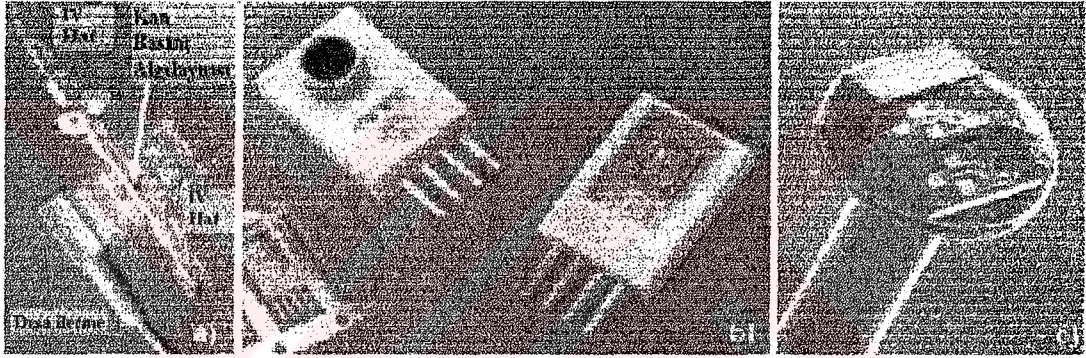
Aşırı derecede başarılı MEMS uygulamalarının diğer bir örneği hastanelerde kan basınç ölçümünde kullanılan minyatür, kullanıldıktan sonra atılabilen basınç algılayıcısıdır. Bu algılayıcılar hastanın damarı içine (IV) hat ile bağlandıktan sonra MEMS algılayıcıları bulunan ambalaj içindeki tüp vasıtasıyla sıvı, tuzlu bir torbadan geçer. Kalp atışı nedeniyle akış yolu üstünde taşınan basınç dalgaları algılayıcı tarafından algılanır ve IV çözücü vasıtasıyla monitöre bilgi olarak aktarılır. Basınç yansıması wheatsone köprüsündeki basınca duyarlı dört direncin yerleşmiş olduğu silikon diyafram tarafında algılanır. MEMS algılayıcıları, seramik taban üstüne takılı basınca duyarlı elementler içermektedir. Silikon diyaframı kapsayan wheatsone köprüsü üstündeki kalın film dirençler, basınç altında hareket ederler. Dirençler, diyaframa hareket edecek şekilde yerleştirilmiştir. Köprüye sabit akım veya voltaj uygulandığında, algılayıcının çıkış voltajıda dengesiz değişmelere neden olur. Böylece algılayıcının çıkış voltajı tam olarak basıncı yansıtır. Maliyeti 600\$ aşan ve tekrar kullanılabilmek için ayarlanan ve sterilize edilebilen ilk harici kan basınç algılayıcılarının yerine geçmiştir.

Kullandıktan sonra atılabilen algılayıcı, bir zar üretmek için aşındırılan silikon tabakayı içerir (Şekil 2.8.). Basınçla direnç değeri değişen tabakalar silikon zarın üstünde, kenarlarına yakın ve uygulanan mekanik stresi elektrik voltajına çevirme yeteneğine sahiptir. Basınç, silikon zarın sapması ile tekabül eder. Duyarlı element, plastik veya seramik üstüne monte edilmiş vaziyette ve üstü plastik bir kapsülle örtülmüştür. Şekil 2.9. da bu tip algılayıcılar gösterilmiştir. Duyarlı element ile tuz çözeltisini ayırmak için jel kullanılmıştır.

Basınç algılayıcılarının en geniş uygulaması tıbbi MEMS ve MEMS hız ölçerlerdir. Hız ölçer uygulamalarının çoğunluğunun gelişimi durmuş olmasına rağmen, MEMS hız ölçerler içeren kalp atış hızını ayarlayan cihazın tasarımı gelişme göstermiştir. Bu teknoloji, hava yastığı algılayıcısında bulunan hız ölçerlerle benzer yapıdadır.



Şekil 2.8. Basınç ile direnç değeri değişen basınç algılayıcısının şematik örnekleme [Faraday Patnership, 2002].

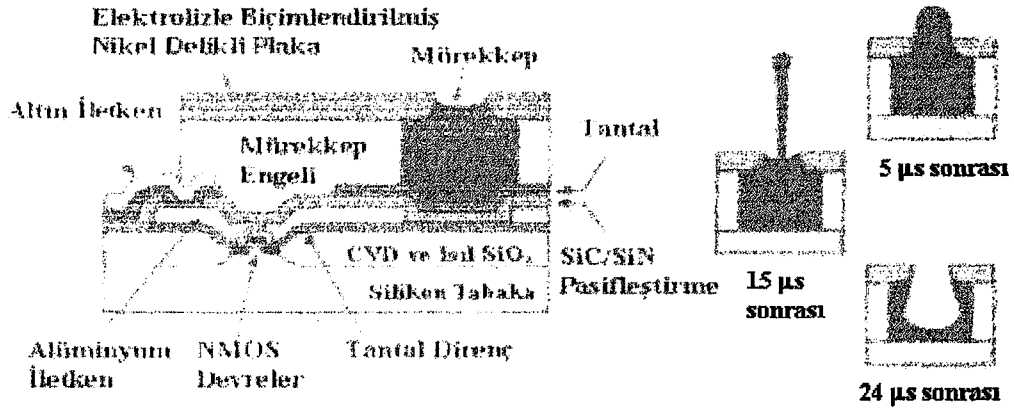


Şekil 2.9. (a) Kullanıldıktan sonra atılabilen basınç algılayıcısının IV hat bağlantısı (b) Kullanıldıktan sonra atılabilen basınç algılayıcısı ve (c) Kalp içi catheter-tip algılayıcıların bir iğnenin kafası üstündeki görünümü.

2.6.3. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı Başlığı

Otomotiv ve tıbbi basınç algılayıcılarından sonra diğer bir mükemmel MEMS uygulaması mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığıdır. MEMS ısı mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığı teknolojisi Hewlett-Packard tarafından 1979 yılında icat edilmiştir. Bu teknolojinin esasında, mürekkep buharının ısısal genleşmesi kullanılmıştır. Isıl mürekkep püskürtme esasına dayalı Hewlett-Packard yazıcı başlığı Şekil 2.10. da gösterilmiştir. Elektronik kontrol devrelerinin üstünde bulunan ince-film tantal direnç vasıtasıyla deliğin altında bulunan mürekkep ısıtılır ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$). $5\text{ }\mu\text{s}$ içinde $1,4\text{ Mpa}$ (200 psi) basınca erişildiğinde tepe şeklinde bir kabarcık oluşur ve deliğin dışına doğru mürekkep taşmaya başlar. $15\text{ }\mu\text{s}$ sonra, mürekkep damlası

delikten dışarı doğru çıkar. Isıtma süresinin $24 \mu s$ içinde, mürekkep damlasının kuyruğu ayrılır ve kabarcık deliğin içine çöker. Bu olay oyuk içindeki yüksek basıncın bir sonucudur. $50 \mu s$ den az bir süre içinde, oyuk (oda) tekrar dolar.



Şekil 2.10. Hewlett-Packard ısıl mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığının yanal-kesitinin görüntüsü ve mürekkep ısıtma periyodu [Maluf, 2000].

3. MEMS ÜRETİM YÖTEMLERİ

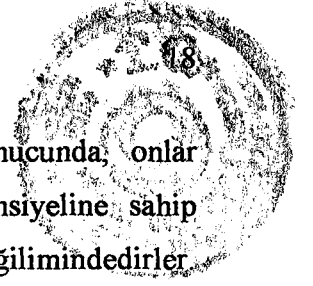
3.1. Mikroişleme İçin Malzemeler

3.1.1. Yarıiletken Nedir?

Yarıiletkenler, Metaller (Bakır, Alüminyum vb.) gibi iyi iletkenler ile silgi, plastik ve kuru odun gibi iyi yalıtkanlar arasında bir elektrik iletkenliğine sahip malzemelerdir. En çok kullanılan yarıiletken malzemeler, silikon (Si) ve germanyum (Ge) dur ve her iki element periyodik cetvelin IVA sütununda bulunurlar. Örneğin; galyum arsenik (GaAs), silikon karbit (SiC) ve silikon germanyum (SiGe) gibi bazı bileşikler yarıiletken malzemelerdir. Yarıiletkenlerin en önemli özelliklerinden biri, iletkenliğinin bazı katkı malzemeleri eklenerek kontrol edilebilir olmasıdır ve bu yöntem katkılama olarak adlandırılır.

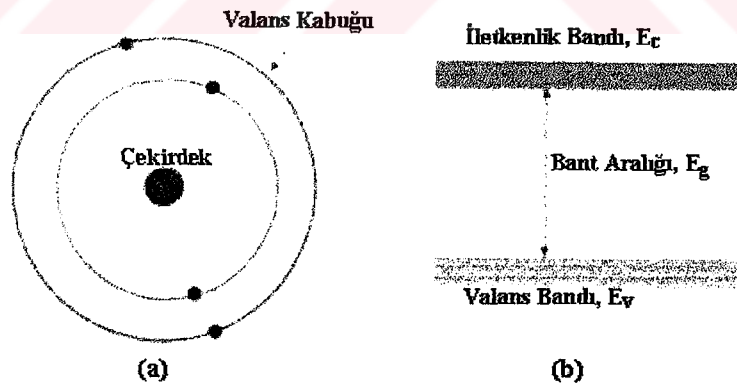
3.1.2. Bant Aralığı

Yarıiletkenler ile yalıtkanlar veya iletkenler arasındaki temel fark, bant aralığından kaynaklanır. Tüm maddeler atomlardan oluşur. Şekil 3.1. (a) da bu gösterilmiştir. Atomun elektron yörüngeleri, kabuk olarak adlandırılır. Şekil 3.1. (a) da bu kabukların kesiti görülebilir. En dıştaki kabuk valans kabuğudur. Valans kabuğu içindeki elektronlar elektrik akımı iletmezler. Elektron, valans kabuğundan ayrılıp çekirdeğin yapısından kurtulduğu zaman, serbest elektron oluşmuş olur ve elektrik akımını iletebilir. Atomların çoğu beraber bağlanarak katı maddeler oluşturdukları zaman, onların yörüngeleri üst üste çakışır ve bu şekil bant olarak adlandırılır (Şekil 3.1. (b)). İletkenlik bandındaki elektronlar, katı maddeler içinde nispeten serbest bir şekilde hareket edebilir ve katı maddeye elektrik alan uygulandığı zaman elektrik akımını iletirler. Valans bandı içindeki elektronlar,

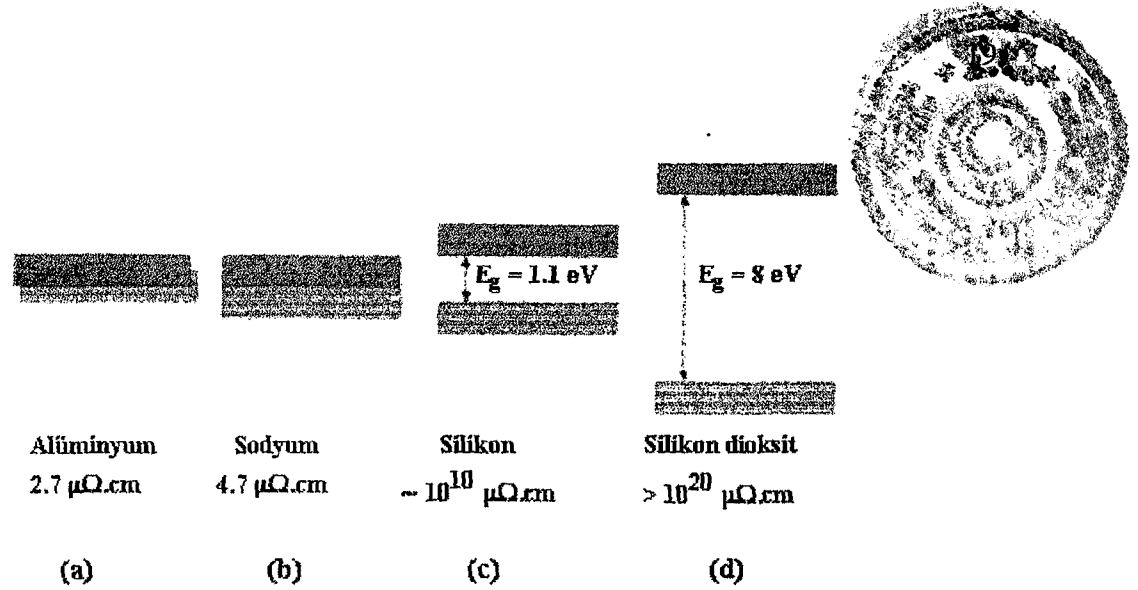


çekirdek ile bağlıdır ve serbest hareket edemezler; bunun sonucunda, onlar elektrik akımını iletmezler. Valans bant en küçük elektrik potansiyeline sahip olduğundan dolayı, elektronlar valans bant içersinde durma eğilimindedirler. Özdirenç, elektrik iletiminde malzemenin direnime kabiliyetidir. İyi bir iletken çok düşük özdirence sahiptir. İyi bir yalıtkan ise çok yüksek özdirence sahiptir. Yaygınca kullanılan özdirenç birimi mikro-ohm.cm dir. Oda sıcaklığında, alüminyumun özdirenci $2.7 \mu\Omega.cm$, sodyumun özdirenci $4.7 \mu\Omega.cm$, silikonun yaklaşık $10^{11} \mu\Omega.cm$ ve silikon dioksitin $>10^{18} \mu\Omega.cm$ dir (Şekil 3.2).

Metallerin çoğu için iletim bandı ve valans bandı üst üste çakışık veya çok küçük bant aralığına sahiptir. Böylece oda sıcaklığındaki ($300K \approx 0.0259eV$) ısı enerjisi ile elektronlar bir banttan diğer banda sıçrayabilirler. Burada bir elektron volt ($1eV$) enerji $1V$ voltaj farkı ile iki nokta arasında geçen elektronlar tarafından kazanılır. Bunun sonucunda iletim bandında çok sayıda elektron bulunduğu için, metaller daima iyi bir iletkenlerdir. Cam ve plastik gibi elektrik akımını iletmeyenler için bant aralığı geniştir ve bunun sonucunda elektronlar valans bandından iletim bandına geçemezler ve böylece iletim bandında elektrik akımı iletmek için çok az elektron bulunur [Xiao, 2001].



Şekil 3.1. (a) Bir atomun yörünge yapısının örnekleme (b) enerji bandı.

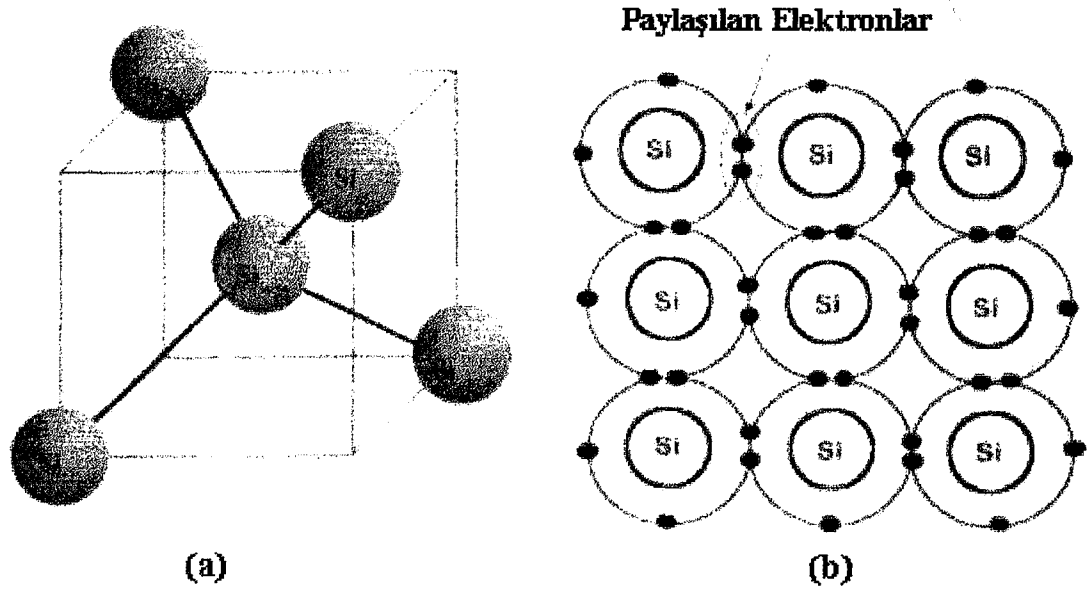


Şekil 3.2. (a) Enerji bantları ve alüminyumun bant aralığı (b) Na (c) Si (d) SiO_2

Yarıiletkenler için bant genişliği belli bir aralıktadır. Örneğin; silikonun 1.1 eV , germanyumun 0.67 eV , galyum arseniğin 1.40 eV dur. Valans bant içerisinde çok sayıda elektronun bulunmasına rağmen, bazı ısıt elektronlar da daima valans bant içerisinde bulunur ve bu elektronlar iletkenlik bandına geçmesi durumunda elektrik akımının iletilmesini sağlarlar. Silikon özü için, valans banttaki elektronların yoğunluğu, oda sıcaklığı ($300\text{K} \approx 0.0259 \text{ eV}$) iken iletim bandındaki elektronların yoğunluğu, her kübik santimetrede $1.5 \times 10^{10} (\text{cm}^{-3})$ dir. Bunun anlamı valans bandı içerisinde elektronların yoğunluğu duruyor iken 10 trilyon elektron içersinden yaklaşık 1 tanesi iletim bandındadır.

3.1.3. Kristal Yapılar

Periyodik tablonun IVA sütununda bulunan yarıiletkenlerin çoğunlukla kullanılanları, Silikon ve Germanyum, her iki atomunda en dıştaki kabuklarında 4 elektrona sahiptir. Tekli kristal yapı içerisinde, her bir atom 4 atom ile bağlı ve onların her biri, bir çift elektronu paylaşır (Şekil 3.3.). Bundan dolayı çoğu IC çipleri silikon tabakadan yapılır.



Şekil 3.3. (a) Gerçek dört yüzlü silikon tekli kristal yapı ve (b) onun iki boyutlu basitleştirilmiş hali [Xiao, 2001].

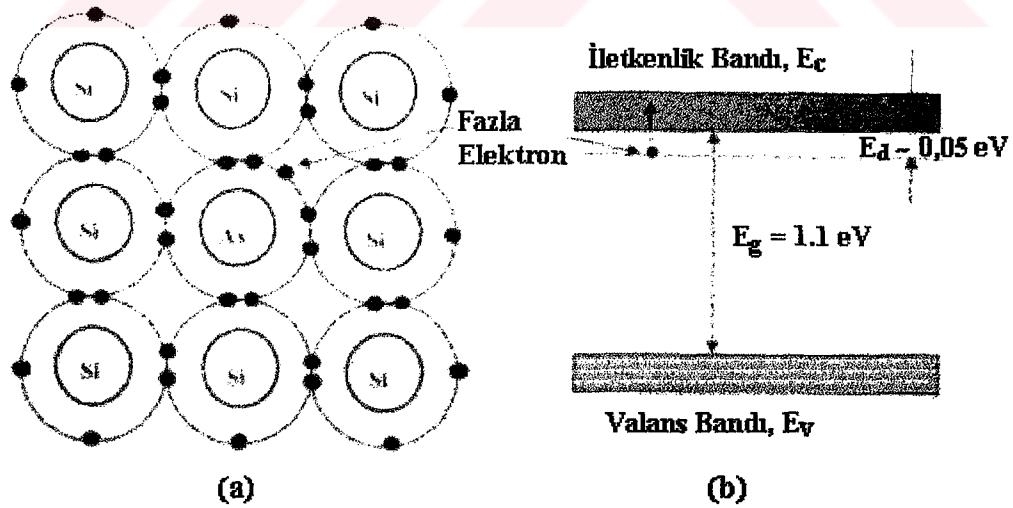
3.1.4. Katkılı Yarıiletkenler

Saf tekli kristal yarıiletken maddeye, silikon gibi katkılama malzemesi ile katkıladığımızda onun iletkenliğini geliştirmiş oluruz. İki tip katkılama vardır, P-tipi bor (B) gibi, periyodik tablonun IIIA grubundan ve n-tipi fosfor (P), arsenik (As) ve antimuan (Sb) gibi, VIA grubundan. Böylece P, As ve Sb gibi elementler yarıiletken malzemeler içerisine elektron sağlarlar, onlar “donor” olarak adlandırılır. Bor “boşluk (delik)” sağlar, diğer elektronların kendine zıplamasına izin vererek başka yerde boşluk oluşturur. Böylece o, “alıcı” olarak adlandırılır.

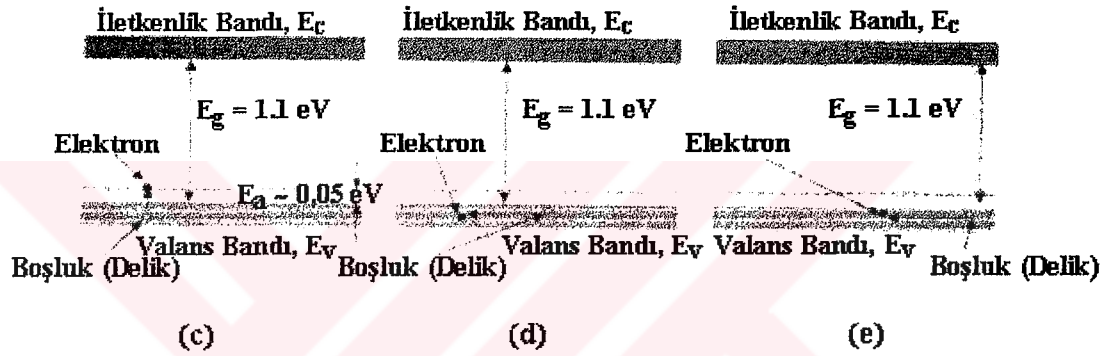
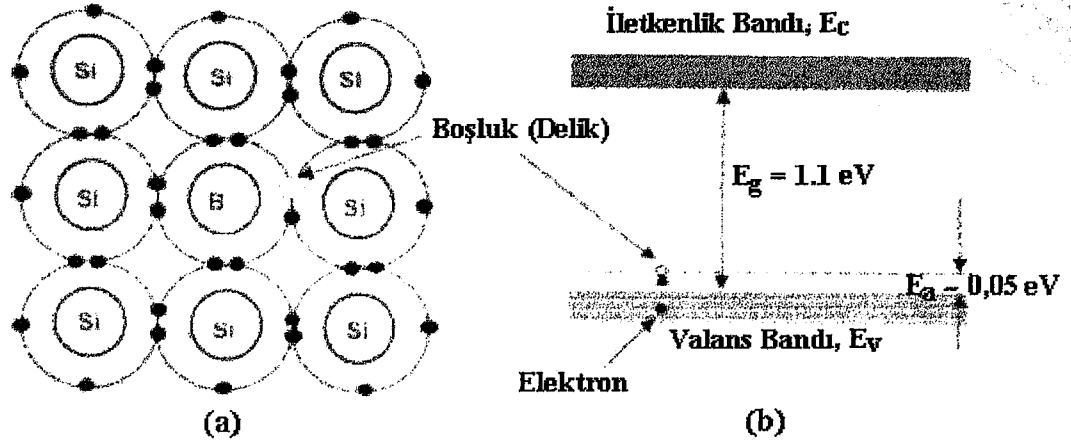
Fosfor ve arsenik en dıştaki kabuklarında 5 elektron bulundurulur. P ve As saf tekli kristal Si ve Ge içine katkılандırıldıkları zaman 1 adet fazla atom en dıştaki kabuğun solunda kalır (Şekil 3.4.). Fazla atom, kolayca iletkenlik bandına sıçrayabilir ve elektrik akımı iletmek için gereken serbest elektronu oluşturmuş olur.

Bu durumda elektrik akımı çoğunluk taşıyıcıları elektronlardır ve yarıiletken, n-tipi olarak adlandırılır. N negatif gösterir çünkü elektronlar negatif yüklüdür. P, As ve Sb gibi elementler n-tipi katkılayıcılardır. Çok sayıda n-tipi katkı atomu yarıiletken tabakaya girer, çok sayıda elektron içerdiklerinden dolayı elektrik akımı iletimini sağlarlar ve yarıiletkenin, iletkenliğinin daha iyi olmasını sağlarlar.

Şekil 3.5. saf tekli kristal silikon veya germanyum içine bor atomu katkılıdırıldığında zaman en dış kabuğun solundaki boş noktayı veya deliği gösterir. Şekil 3.5. (c) ve (e) valans bant içinde bulunan elektronların alıcı enerji bandına kolayca zıplayabildiğini ve valans bant içerisinde boşluk (delik) oluşturduğunu gösterir. Elektrik alan altında valans bant içerisinde bulunan diğer elektronlar hareketlenir ve bu elektronlar boşluklar içine girer fakat bu elektronların ayrıldığı yerlerde yeni boşluklar oluşur ve diğer bir elektronun içine girmesine izin verir. Boşlukların bu hareketi pozitif şarj hareketindeki gibi elektrik akımı taşır. Boşluklar pozitif şarj ile aynı hareket ederler. Yarıiletkenin çoğunluk taşıyıcıları delikler olduğundan p-tipi (pozitif) olarak adlandırılır. Bor, IC endüstrisinde p-tipi katkı maddesi olarak kullanılır.



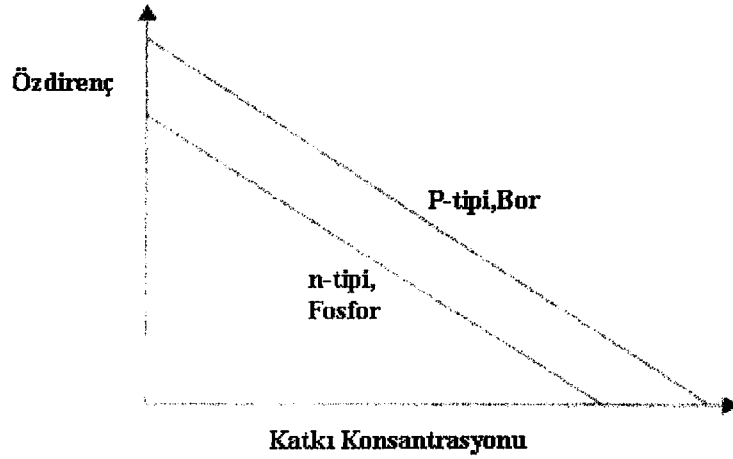
Şekil 3.4. (a) N-tipi (arsenik) katkılı silikon ve (b) Donor enerji bandı.



Şekil 3.5. (a) P-tipi (Bor) katkılı silikon (b) onun alıcı enerji bandı ve (c), (d), (e) boşlukların (deliklerin) hareketlerinin örnekleme [Xiao, 2001].

3.1.5. İletkenlik ve Katkı Maddesi Konsantrasyonu

Şekil 3.6. Silikonun öz direnci ile katkı maddesi konsantrasyonu arasındaki ilişki gösterilmiştir. En yüksek katkı konsantrasyonunda, en düşük öz direnç verilmektedir çünkü bu silikon atomunun çok katkılandırılması ile çok sayıda taşıyıcıya (elektron veya boşluk (delik), katkılamanın tipine göre değişim gösterecektir) sahip olacağını ve bu sayede elektrik akımı iletimini iyi bir şekilde sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.6. Silikon için katkı konsantrasyonu ve özdirenç.

Şekil 3.6. aynı zamanda (n-tipi) silikonun fosfor ile katkılanırılması durumunda (p-tipi) silikonun bor ile katkılanırılmasından daha düşük özdirence sahip olduğunu gösterir. Bu elektronların hareketini kayda değer kılar çünkü valans bandındaki boşlukların (deliklerin) hareketi iletkenlik bandındakilerden daha hızlıdır.

3.2. Tabaka (Wafer) Üretimi

3.2.1. Niçin Silikon?

Yarıiletken endüstrisinin ilk yıllarında transistör ve diyod gibi elektronik parçalar yapmak için çoğunlukla germanyum yarıiletken malzeme kullanılmaktaydı. Jack Kilby ilk entegre devreyi bir parça tekli kristal germanyum taban üstünde inşa etmişti fakat silikon hızlı bir şekilde germanyumun yerini almış ve 1960 dan beri IC endüstrisine hakim olmuştur.

Yer kabuğunun yaklaşık %26 sı silikondur. Silikon elde etmek için bir maden bulmaya gerek yoktur. Kuvars kum esasen silikon dioksittir ve çoğu yerde bol miktarda bulunabilir. Silikon tabakanın diğer bir avantajı ise ısıt oksitlenme yöntemi

ile silikon dioksit tabakasını kolaylıkla büyütebilmesidir. Oysa germanyum dioksit oluşturulması oldukça zordur, yüksek sıcaklıklarda kararsızdır ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve hepsinden kötüsü su ile çözülebilir. Aslında Bell laboratuvarlarında 1947 yılında, bir teknisyenin yanlışlıkla son-anotlaştırma temizlemesi yönteminde germanyum numunesinin yüzeyinden anotlaşmış germanyum oksit tabakayı uzaklaştırmak için yıkama aşamasında su kullanmıştır. Bu Bardeen ve Brattain in ilk iki kutuplu nokta kontaklı transistörü yapması için yol gösterici olmuştur. Silikon hakkındaki bilgiler Çizelge 3.1. de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Silikon hakkındaki gerçekler.

AD	SİLİKON
Sembol	Si
Atom Numarası	14
Atom Ağırlığı	28.0855
Keşfeden	Jöns Jacob Berzelius
Keşfedildiği Ülke	İsveç
Keşfedildiği Tarih	1824
Adının Kökeni	Çakıl Taşı Anlamında Latin Kökenli Silis
Tek Kristalli Silikondaki Bağ Uzunluğu	2.352 Å
Öz Kütlesi	2.33 gr/cm^3
Molekül Hacmi	12.06 cm^3
Ses Hızı	2200 m/sec
Sertlik	6.5
Elektrik Öz direnci	$100000\text{ }\mu\Omega.\text{cm}$
Yansıtma Derecesi	%28
Erime Noktası	$1414\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kaynama Noktası	$2900\text{ }^{\circ}\text{C}$
Isıl İletkenlik	$150\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$
Doğrusal Isıl Büyüme Katsayısı	$2.6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$
Islak (Yaş) Aşındırma	HNO_3 ve HF , KOH , vb.
Kuru Aşındırma	HBr , Cl_2 , NF_3 , vb.
Öncü Ham Madde CVD	SiH_4 , SiH_2Cl_2 , SiHCl_3 ve SiCl_4

Silikonu, germanyum ile karşılaştırdığımızda daha geniş bant aralığına sahip olduğunu görürüz. Bunun sonucunda, silikon daha geniş katkı maddesi ile katkılanma oranına ve daha yüksek sıcaklık etkisine izin verebilir. Silikon, aynı zamanda germanyumdan daha yüksek bozulma (atlama) voltajına sahiptir. Fosfor ve bor gibi katkı elementleri için silikon dioksit katkılama maskesi görevi görür. Böylece katkı maddelerinin çoğu silikondansa, silikon dioksit içinde daha yavaş

yayırlılar. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) transistörler için SiO_2 –Si ara yüzü, MOS için üstün nitelikte elektrik karakteristiklere sahiptir.

3.2.2. Kristal Yönlendirme

Kristal yönelimi, x, y, z eksenlerine yönelen düzlemin, kesitini gösteren miller indisi olarak tanımlanır. Şekil 3.7. $\langle 100 \rangle$ yönelim düzlemi ile $\langle 111 \rangle$ kübik kristalin yönelim düzlemi örneklenmiştir. Not edilmelidir ki $\langle 100 \rangle$ düzlemi kare şeklindedir ve $\langle 111 \rangle$ düzlemi üçgen şeklindedir.

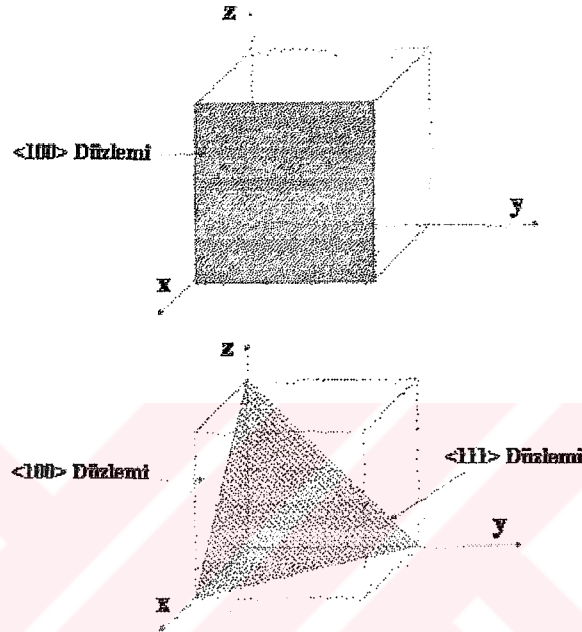
$\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlemleri IC yöntemi için kullanılan tekli kristal tabakaların en popüler olanlarıdır. $\langle 100 \rangle$ tabakası çoğunlukla MOS IC çipinin üretiminde kullanılır. $\langle 111 \rangle$ yönelim tabakaları genellikle IC çipleri ve iki kutuplu transistör üretmek için kullanılır çünkü $\langle 111 \rangle$ yüzeyi daha yüksek atom yoğunluğu nedeniyle daha dayanıklıdır ve yüksek güçteki cihazlar için daha iyi ayarlanabilir.

$\langle 100 \rangle$ kafes yapısı ve $\langle 111 \rangle$ düzlemini yönelimi Şekil 3.8. de örneklenmiştir. $\langle 100 \rangle$ tabakası kırıldığı zaman, kırık parçaların normali dik açı (90°) gösterir. Eğer $\langle 111 \rangle$ tabakası kırılırsa, kırık parçaların normalle yaptığı açı 60° dir.

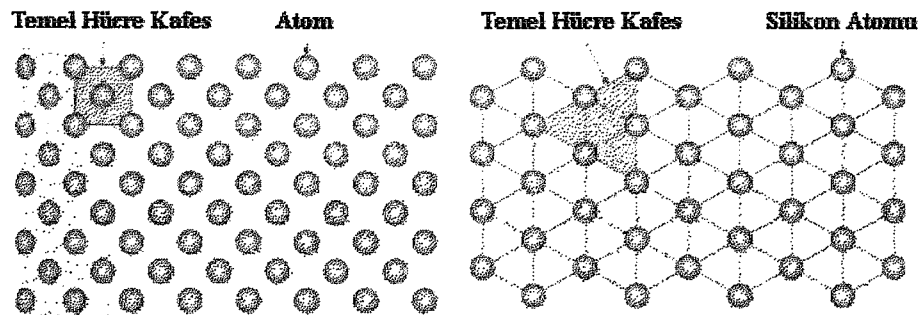
Kristal yönelimler, pek çok metot ile tespit edilebilir. Tıraşlanan yüzeyin gelişiminin görülmesi ve aşındırılmış çukurlar, ayırt edilmeyi sağlayıcı özelliklerdir. Tekli kristal silikon, ıslak aşındırılabilir. Eğer aşındırma oranı yüksek ise yüzey üzerinde kusurlar olur.

$\langle 100 \rangle$ tabakasının aşındırılması için KOH gibi çözücüler seçildiği zaman aşındırma çukuru, tersine çevrilmiş dört kenarlı piramit gibi görünür. KOH

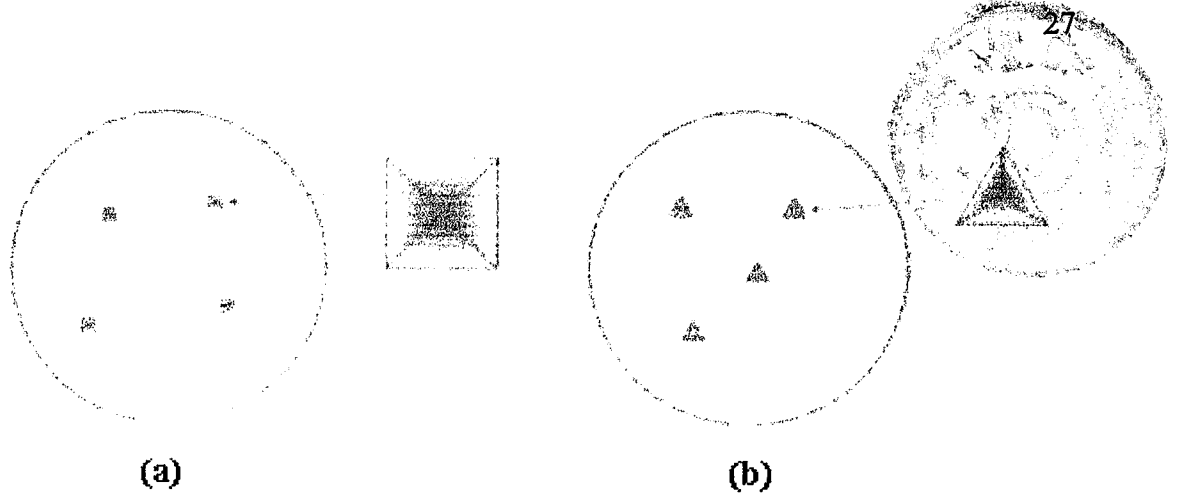
aşındırması $\langle 111 \rangle$ düzleminde çok daha hızlıdır. $\langle 111 \rangle$ tabakası için aşındırma çukuru, dört yüzlü veya 3 kenarlı ters piramittir (Şekil 3.9.)



Şekil 3.7. $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlem yönelimlerinin gösterimi.



Şekil 3.8. $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ düzlemlerinin kafes yapıları.



Şekil 3.9. Aşındırma çukurları (a) $\langle 100 \rangle$ tabakası (b) $\langle 111 \rangle$ tabakası örneklenmiştir [Xiao, 2001].

3.3. Elektronik Malzemeler

İnce filmler ve Kitle (bulk) malzemelerinin çok farklı çeşitleri IC nin üretiminde kullanılmaktadır. Kitle (bulk) malzemeleri genelde yarıiletkenlerdir. IC üretiminde en önemli yarıiletkenler silikon ve galyum arseniktir. IC üretimi için önemli dört ince-film malzeme vardır. Bunlar;

1. Isıl silikon dioksit
2. Yarıiletken (dielektrik) tabakalar
3. Çoklu kristalimsi silikon (Poli-Si)
4. Metal filmler (En önemlisi Alüminyum)

Yarıiletken (dielektrik) tabakalar, silikon nitrit (Si_3N_4) ve silikon dioksit (SiO_2 -Bazen oksit olarak adlandırılır) çözeltisi içerir. Bu yalıtkanlar, iletken tabakalar ile, yayınma (difüzyon), iyon aşılama, pasifleştirme esnasında kullanılan katkı maddelerinden, nem ve çizilmelerden cihazların yalıtılması için kullanılırlar. Poli-Si, yarıiletken metal oksit (MOS) aletlerde kapı ucu, yüksek seviyeli metalleştirme için iletken malzeme, sığ jonksiyonlar ile cihazlar için kontak malzemesi olarak kullanılır. Metal filmler, metal yarıiletken engeller içindeki (ohmik olmayan) kontaktları düzeltmede, Poli-Si tabakalarda, her ikisi de ağır bir şekilde

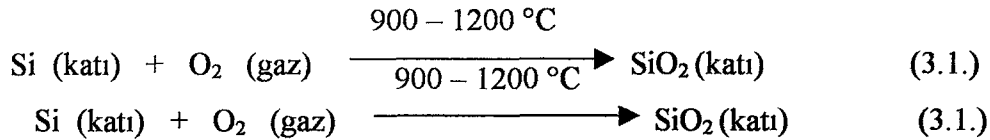


katkılandırılmış p^+/n^+ tipi bölgelerde ve düşük dirençli ohmik bağlantı şekillendirmede kullanılır.

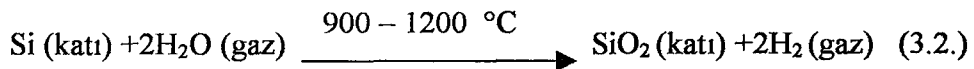
Isıl oksit, genel olarak daha iyi kalitede bir oksittir (oksit çözeltisi ile karıştırıldığında) ve alan etkili transistörler (FETs) içinde kapı oksit olarak kullanılır. Sonuç olarak, Metalik tabakalar ve yarıiletken Poli-Si kaplanması ve ısı SiO_2 büyütülmesi için yapılması gereken yöntemler açıklanmaya çalışılmıştır.

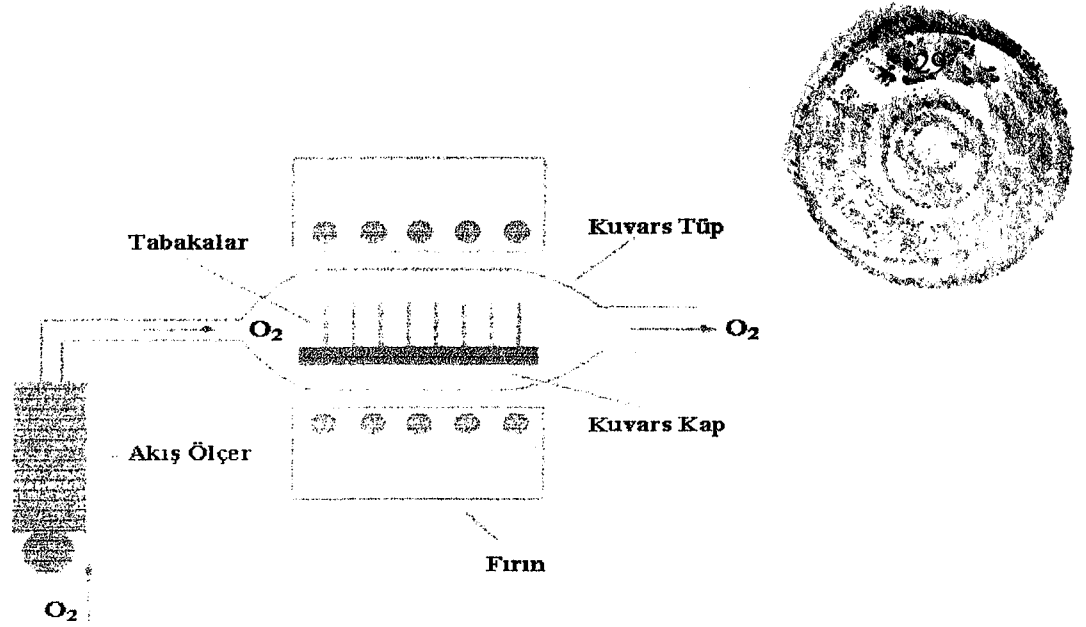
3.3.1. Isıl Oksitleme ile Oksit Film Oluşturma

Isıl oksitleme, ince film SiO_2 'in bir silikon tabakanın üstünde geliştirilmesi yöntemidir. Isıl oksitleme, Modern IC teknolojisinde ince SiO_2 tabakaların üretimi için bir anahtar yöntemdir. Temel ısı oksitleştirme cihazları Şekil 3.10. da gösterilmiştir. Bu cihazlar, direnç ısıtmalı fırın, silindirik kuvars eritme tüpü ve içerisinde düşey olarak duran silikon tabakalar içeren kuvars kap, veya saf kuru oksijen yada saf su buharı kaynağından oluşmaktadır. Filtre edilmiş hava akışının korunması için fırın tüpün sonundaki şarjın, düşey akış başlığının içinden dışarı çıkması ile sağlanmıştır. Başlık hava içerisinde bulunabilecek olan tozları azaltmak için bir filtre olarak kullanılır ki tabakaları sarar ve tabakanın yüklenmesi esnasında kirlenmeyi mümkün olduğu kadar azaltır. Su buharı veya oksijen içindeki silikonun, ısı oksitlenmesi aşağıdaki iki kimyasal reaksiyon ile tanımlayabiliriz;



ve



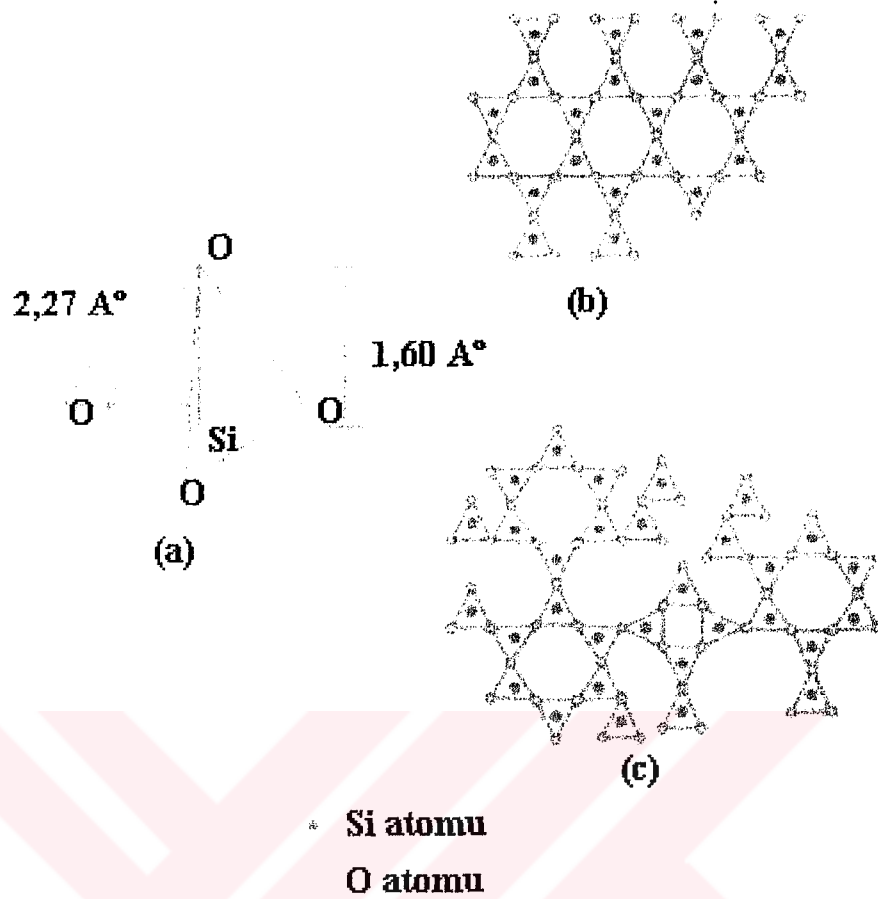


Şekil 3.10. Silikon tabakanın ısıt oksitlenmesi için gereken temel fırın düzeni [Gardner et al, 2001].

Silikon-Silikon dioksit ara yüzü, silikonun oksitlenmesi yöntemi esnasında eninedir. Oksitleme yönteminde, silikon ve SiO_2 'in moleküler ağırlıkları ve yoğunlukları kullanılır. Bunu şu şekilde açıklayabiliriz; mesela X kalınlıklı oksit'in büyütülebilmesi için, 0,44 X kalınlığında bir silikon tabakanın tüketilmesi gerekmektedir.

Isıl SiO_2 'in yapısal birimi Şekil 3.11. a da silikon atomunun dört oksijen atomu ile dört kenarından çevrelenmesi gösterilmiştir. Silikon-oksijen ve oksijen-oksijen atomları arasındaki mesafe sırası ile 1,6 ve 2,27 Å° dur. SiO_2 ve silika, ya kristalimsi yapıya (Şekil 3.11. b kuvars) yada şekilsiz yapıya (Şekil 3.11. c) sahiptir. Genellikle, kuvars 2,7 gr/cm³ yoğunluğa sahipken, şekilsiz SiO_2 2,2 gr/cm³ yoğunluğa sahiptir. Isısal oksit büyümesi genellikle doğada şekilsizdir.

Buharın (veya oksijenin) yüksek atmosfer basıncında, silikonun oksitlenmesi esnasındaki doyurucu büyüme oranının hızlandırılması ile üretilebilir ve kalın oksit tabakanın büyütülmesi esnasında sıklıkla kullanılır. Yüksek basınçta oksit büyütmenin bir avantajı; oksitlerin, makul büyütme oranlarında ve önemli düşük sıcaklıklarda büyütülebilir olmasıdır.



Şekil 3.11. (a) Isıl oksit'in tek birimi; (b) Kuvarts'ın düzenli dizilimi; ve (c) SiO₂ 'in düzensiz dizisinin atomik yapıları [Gardner et al., 2001].

3.3.2. Silikon Nitrit ve Silikon Dioksitin Kaplanması

Tabaka üstünde ince film oluşturulması esnasında yaygınca kullanılan üç kaplama yöntemi vardır. Kimyasal buhar kaplama (CVD) esaslı olan bu yöntemlerin tümü aşağıda gösterilmiştir;

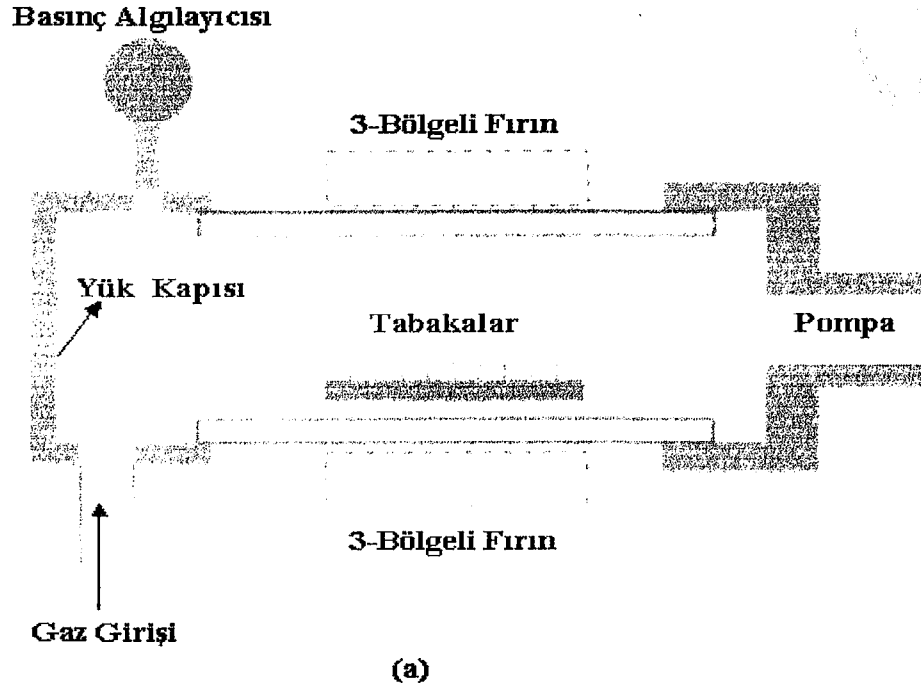
1. Atmosferik basınçlı kimyasal buhar kaplama (APCVD)
2. Alçak basınçlı kimyasal buhar kaplama (LPCVD)
3. Plazma arttırmalı kimyasal buhar kaplama (PECVD)

Son yöntem; Enerji arttırma CVD yöntemidir. Bu üç kaplama yöntemi arasında ayrılan bu son yöntem; taban sıcaklığı, kaplama oranı ve film benzerliği, morfoloji, elektriksel ve mekaniksel özellikleri, yalıtkan filmlerin kimyasal bileşimi gibi etkenlerle saptanır.

Tipik CVD sisteminin şematik diyagramı (Şekil 3.12.) de gösterilmiştir. Yalnız istisna şudur ki; farklı gazlar, gaz girişinde kullanılır. Şekil 3.12. (a) ve (b) sırasıyla LPCVD reaktörü ve PECVD reaktörü gösterir. Şekil 3.12. (a) da kuvars tüp, üç-alan fırın vasıtasıyla ısıtılır ve gaz, reaktörün sonundaki gaz girişinden girer ve pompanın sonuna zıt, çıkışa doğru pompalanır. Taban tabakaları, yarıklı kuvars kap içinde düşey olarak tutulur. Şekil 3.12. (a) da LPCVD reaktörünün gösterilen tipi; kuvars tüpün duvarı fırına bitişik olması nedeniyle sıcaktır ve bundan dolayı sıcak duvar LPCVD reaktörü olarak adlandırılmıştır. Bunun zıttı ise; soğuk duvar LPCVD reaktörüdür ki yatay yapım reaktöründe (RF) radyo frekansı ile ısıtma kullanılır. Genellikle, reaksiyon odasındaki LPCVD işlemleri için parametreler aşağıdaki gibidir;

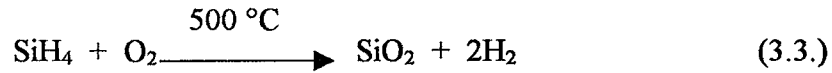
1. Basınç 0,2 ile 2,0 torr arasındadır.
2. Gaz akışı 1 ile 10 cm³ / s arasındadır.
3. Sıcaklık 300 ile 900 °C arasındadır.

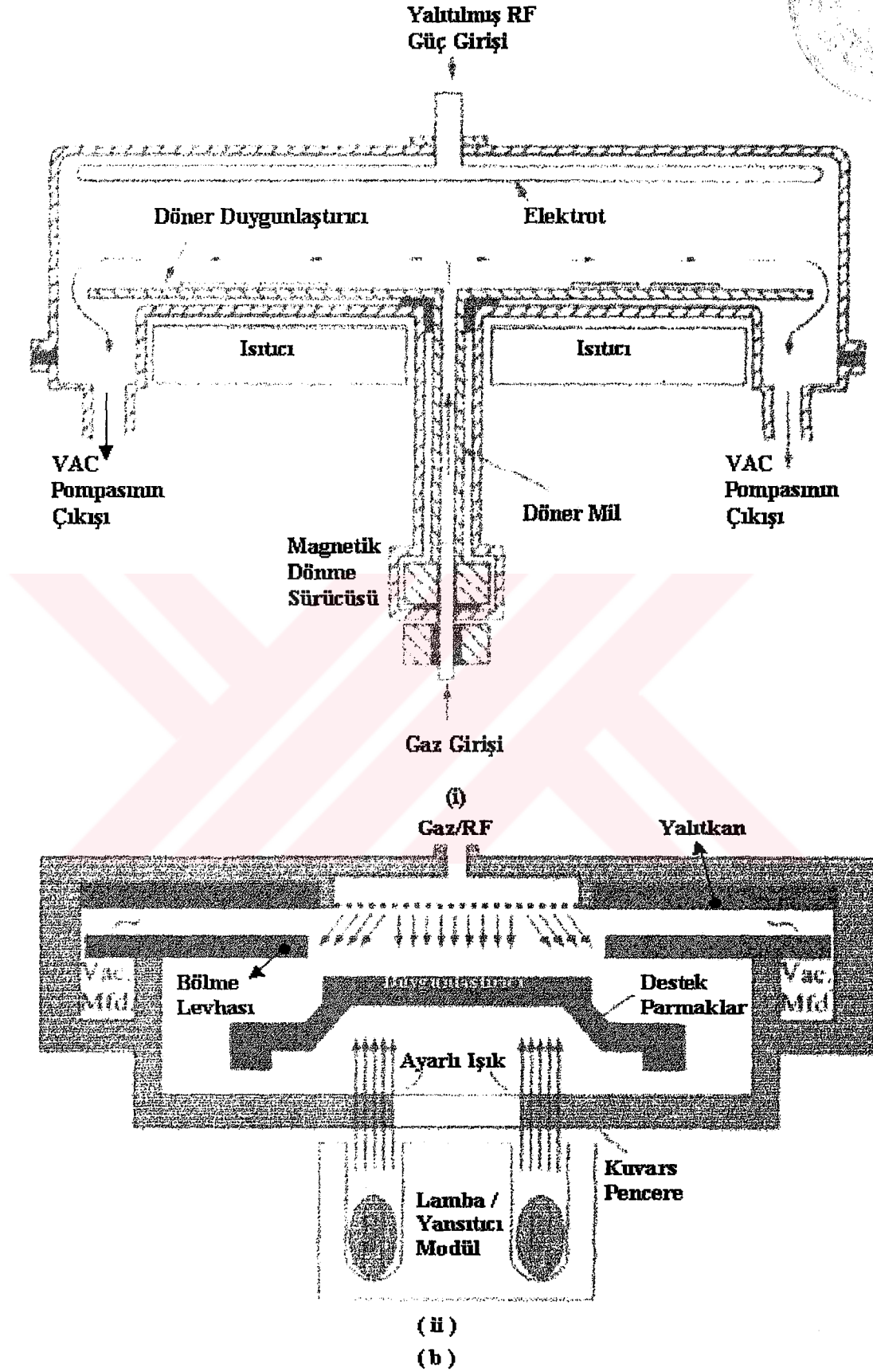
Şekil 3.12. (b) Boş, kapalı silindirik cam odayı kapsayan radyal-akış PECVD (Bir paralel plaka) gösterilmektedir. İki paralel alüminyum plaka, en alt tabaka topraklanırken en üst tabakaya RF voltajı uygulaması ile oda içine monte edilmiştir. RF voltajı, plakalar (elektrotlar) arasında bir plazma elektrik akımının boşalmasına sebep olur. Plakalar, 100 ila 400 °C arasında direnç ısıtıcılar vasıtasıyla ısıtılan, en alçak elektrot içinde yerleştirilmişlerdir. Gaz prosesi, çıkış yerinden elektrik akımı boşalması vasıtasıyla akar ki en düşük elektrotun daire çevresi boyunca yerleştirilmiştir [Gardner et al., 2001].



Şekil 3.12. (a) LPCVD reaktörünün tipik projesi; (b) İki PECVD reaktör.

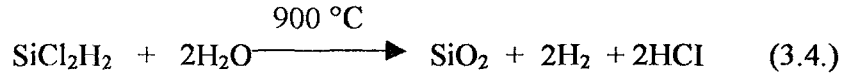
SiO_2 , Si_3N_4 ve poli-silikon çökeltme yöntemi olarak CVD kapsamlı bir şekilde kullanılmaktadır. CVD SiO_2 'in ısısal büyütmesinin yerini alamaz çünkü CVD oksit ile ısı oksit'i karşılaştırdığımızda, ısı oksit daha yüksek elektrik ve mekanik özelliklere sahiptir fakat CVD oksitleri yerine, ısı oksitler tamamlayıcı olarak kullanılır. SiO_2 , CVD'in birkaç yöntemi ile çökeltilebilir. SiO_2 , LPCVD reaktörü içinde 300 ila 500 °C arasında SiH_4 ve oksijenin reaksiyonu ile çökeltilebilir.





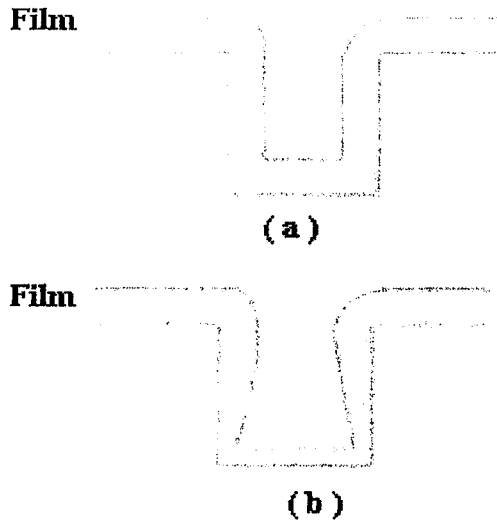
Şekil 3.12. Devamı [Gardner et al, 2001].

SiO_2 , aynı zamanda tetraetilortosilikat $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ayrışması ile LPCVD kaplanabilir. TEOS şeklinde kısaltılan bileşik, bir sıvı kaynaktan buharlaştırılır. Alternatif olarak, diklorosileyn aşağıdaki gibi kullanılabilir;



CVD ile ilişkili olan bu özellik, kademeli kaplama olarak bilinir. Kademeli kaplama yarıiletken tabaka üstündeki çeşitli kademelere kaplanan filmin yüzey topografyası ile ilişkilidir. Şekil 3.13. (a) ideal film kaplanması gösterilirken (b) ideal olmayan film kaplanması gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. de zıt ısıt oksit büyütülmesi ve farklı yöntemler vasıtasıyla farklı SiO_2 filmlerin kaplanması karşılaştırılır. Aynı şekilde Si_3N_4 , orta sıcaklık yöntemi veya düşük sıcaklık PECVD yöntemi vasıtasıyla LPCVD kaplanabilir. Daha yaygın bir işlem olan LPCVD yöntemi içinde, diklorosilan ve amonyum tepkimesi aşağıdaki gibidir;



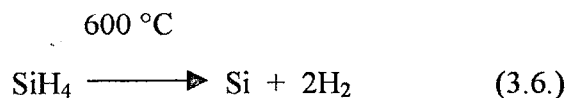
Şekil 3.13. (a) İdeal; (b) İdeal olmayan film kaplanması.

Çizelge 3.2. Isıl oksit filmlerin büyütülmesi ve kaplanmasının özellikleri.

Özellik	Bileşim	Kademeli Kapsam	Yoğunluk (g/ cm ³)	Kırılma İndeksi, n	Dielektrik Kuvveti(V/cm)
1000 °C de Isıl Büyüme	SiO ₂	-----	2.2	1.46	>10 ⁻⁵
450 °C da SiH ₄ +O ₂ ile Kaplama	SiO ₂ (H)	Uygunsuz	2.1	1.44	8 x 10 ⁻⁶
700 °C da TEOS vasıtasıyla Kaplama	SiO ₂	Uygun	2.2	1.46	10 ⁻⁵
900 °C da SiCl ₂ H ₂ + N ₂ O vasıtasıyla Kaplama	SiO ₂	Uygun	2.2	1.46	10 ⁻⁵

3.3.3. Polisilikon Film Kapanması

Polisilikon, MEMS içinde yapısal malzeme olarak sıklıkla kullanılır. Polisilikon aynı zamanda katkı seviyesine bağlı olarak, yüksek değerli direnç veya bir iletken gibi ve elektrot oluşturmak için MEMS içinde kullanılır. Düşük basınç reaktörü, Şekil 3.12. (a) da gösterildiği gibi uygulama sıcaklığı 600 ve 650 °C aralığındadır. Aşağıdaki reaksiyona göre sıcaklık etkisi ile eritilen SiH₄, polisilikon kaplamada kullanılır.



Alçak basınç uygulamaları, polisilikon kaplamak için yaygın bir şekilde kullanılır ki bu yöntemlerden biride SiH₄'ün %100'nün kullanıldığı zaman 0,2 ile 1,0 torr arasında bir basınç uygulanmasını gerektirmektedir. Polisilikon kaplanması için diğer bir yöntem ise nitrojen içinde %20-30 SiH₄'ün sulandırılmış karışımını içerir. MEMS içinde yaygınca kullanılan elektronik malzemelerin bazıları Çizelge 3.3. de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Seçilen bazı elektronik malzemelerin özellikleri.

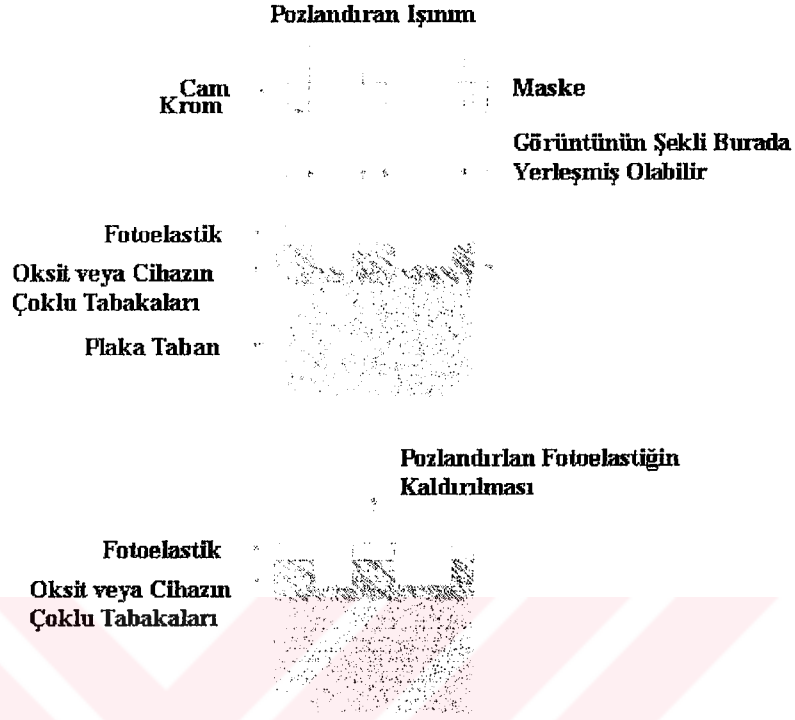
Malzeme özelliği	Si	GaAs	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al	Au	Ti
Yoğunluk (kg/m ³)	2330	5316	1544	3440	2699	19320	4508
Erime Noktası (°C)	1410	1510	1880	1900	660	1064	1660
Elektrik İletkenliği (10 ⁻³ W ⁻¹ cm ⁻¹)	4 x 10 ⁻⁵	10 ⁻¹¹	---	---	377	488	26
Isıl İletkenlik (W/m/K)	168	47	6.5-11	19	236	319	22
Dielektrik Sabiti	11.7	12	4.3-4.5	7.5	---	---	---
Young'ın modülü	190	---	380	380	70	78	40
Gerilme Kuvveti	6.9	---	14	14	50	200	480

3.4. Model Transferi

3.4.1. Litografya Yöntemi

Litografya, ışığa duyarlılığı olan, fotoelastik (fotoresist) olarak adlandırılan ince bir tabaka ile üst yüzeyi kaplanan malzemenin, üstüne yerleştirilen bir maske yardımı ile geometrik modellerin çıkarılması yöntemine denir.

Şekil 3.14'te devre parçalarının üretiminde kullanılan, litografya yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. İlk adım, tabakanın üst yüzeyinin fotoelastik ile (püskürtülerek veya döndürülerek) kaplanmasıdır. Bu işlemlerden sonra kaplanan yüzeyin üstüne bir maske yerleştirilir. İkinci adımda, maske pozlandırılır. Maskenin belirli bölgelerinde bulunan ışık geçirmeyen malzeme vasıtasıyla fotoelastiğin bu bölgeleri pozlanmaz. Maskenin üzerinde bulunan ışık geçirmeyen bölgeler, üretilecek cihazın tipine göre değişebilir. Devreyi ışık geçirmeyen malzeme şekillendirir. Işınım, fotoelastiğin çözünürlüğünü değiştirmede kullanılır.



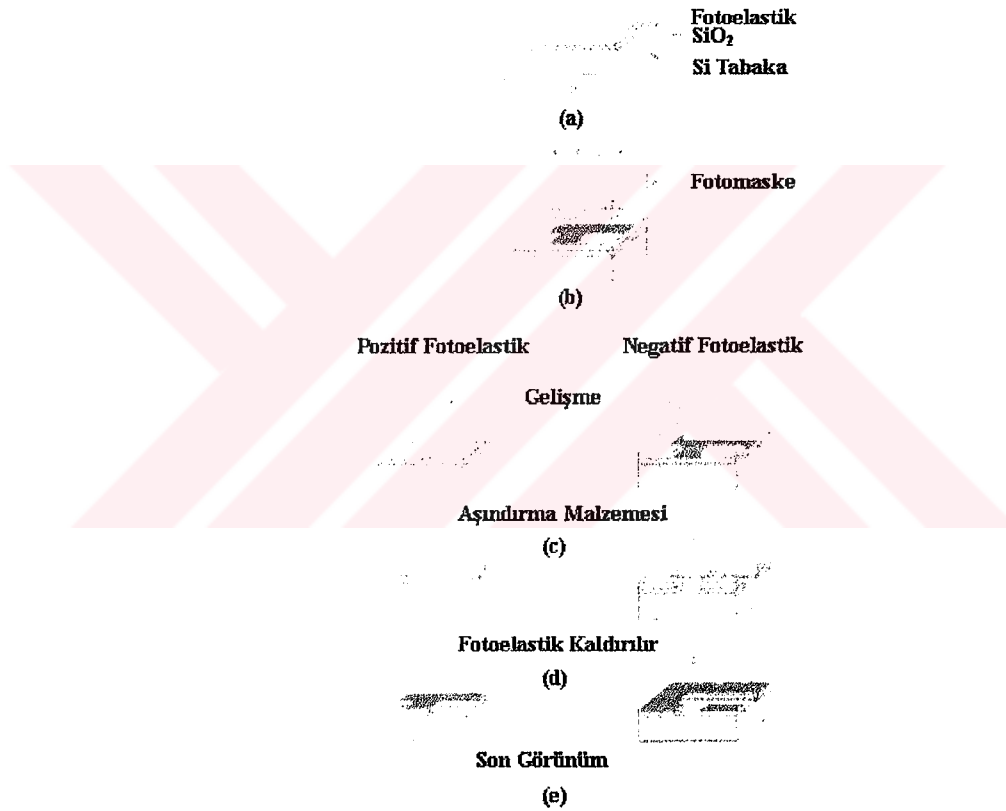
Şekil 3.14. Cihaz üretmede kullanılan litografyanın temel adımları.

Model transfer yöntemi, litografyada kullanılan araçların, ışın yayımına maruz bırakılmaları ile başlar. Litografya, birbirini izleyen üç adımın sıralı bir şekilde yapılması ile başarılabılır;

- 1- Işığa duyarlı emülsiyon tabaka olan fotoelastik uygulanır.
- 2- Fotoelastiğin üstüne yerleştirilen maske deseninin, fotoelastiğin üstüne aktarılması için optikle pozlandırılır.
- 3- Fotoelastiğin ışığa maruz kalan bölgeleri, sulu taşıyıcı bir çözelti içine daldırılarak çözülür ve gizli görüntü, görünür hale gelir.

Maske, şeffaf bir cam tabakanın üstüne ışık geçirmeyen krom bir tabakanın modellenmesini içerir. Model montaj planı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanılarak üretilir ve istenilen modelde maske yapmak için kolaylık sağlayan ince krom tabakaya aktarılır. Mikro üretim yönteminin tasarlanması birkaç litografya uygulamasını içermektedir.

Pozitif fotoelastik (fotoresist), organik reçine maddesi içeren bir hassaslaştırıcıdır. Pozitif fotoelastik (fotoresist), genellikle $0,5\ \mu\text{m}$ ile $10\ \mu\text{m}$ arasında bir kalınlıktadır ve tabaka üstüne döndürülerek kaplanır. Fotoelastiklerin özel tipleri $100\ \mu\text{m}$ kalınlığa kadar kaplanabilir fakat geniş kalınlık, $25\ \mu\text{m}$ altındaki boyutlarda, yüz hatlarının sıralanması ve pozlandırma esnasında önemli zorluklar çıkarır. Hassaslaştırıcı, taşıyıcı çözücü içine daldırılması esnasında, pozlanmayan fotoelastiğin çözünmesini engeller. 200 ile $450\ \text{nm}$ mesafesi içinde, mavi ultraviyole ışıkla pozlandırmada hassaslaştırıcı bozulur ve pozlandırılan bölgeler hemen taşıyıcı çözücü içinde çözülür (Şekil 3.15.).

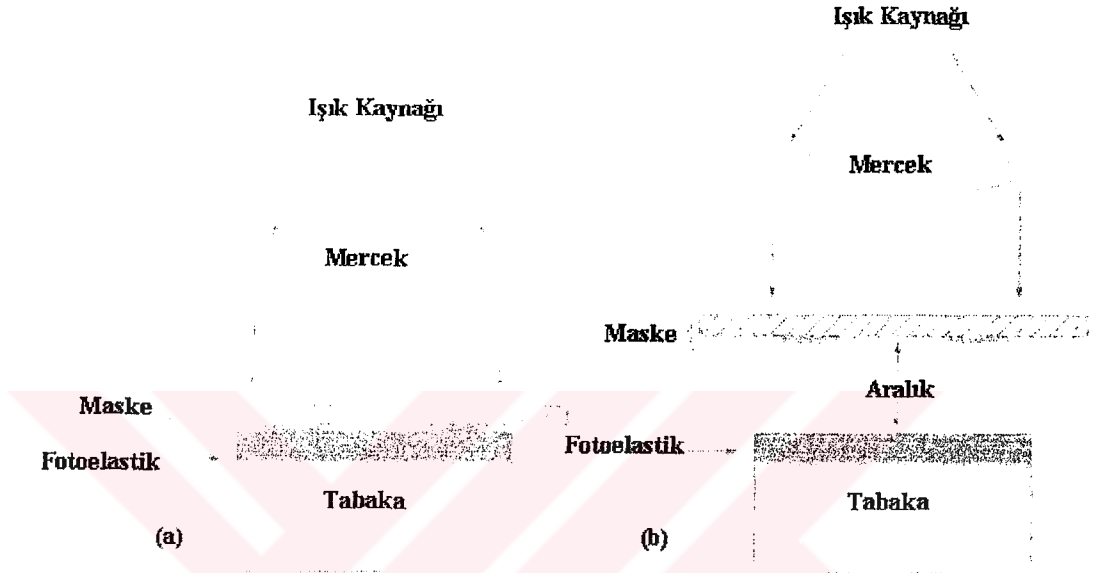


Şekil 3.15. Pozitif ve negatif fotoelastiğin oluşumundan sonraki desenlerin biçimlendirilmesi.

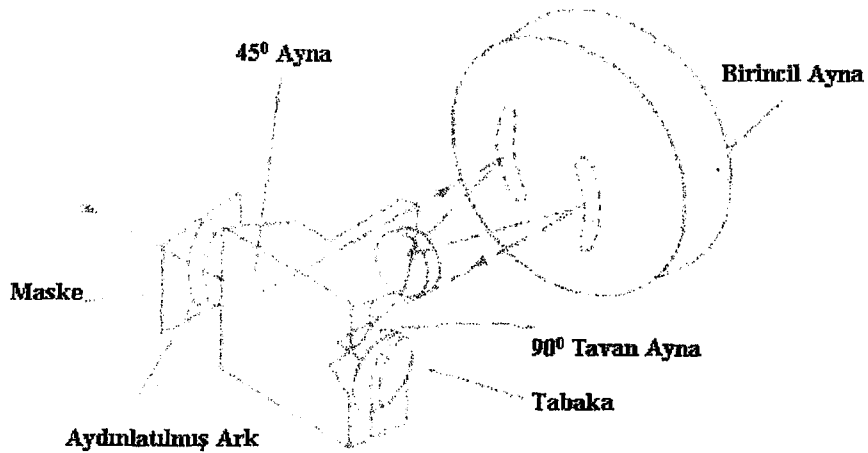
Optik plazma, üç farklı yöntemden biri ile tanımlanabilir; kontak (temas), yakınlık ve projeksiyon. Kontak litografyada, maske tabakaya temas eder. Bu normal olarak maskenin ömrünü kısaltır. Maske ve tabakanın üst yüzeyin de tortu katmanı kalması istenmez. Yakınlık yönteminde maske, fotoelastik yüzeyin $25-50\ \mu\text{m}$ mesafede yakınlştırılır (Şekil 3.16.). Projeksiyon litografya ise kompleks optikler

32

içinden tabakanın üstüne desenin aktarılması işlemidir. Projeksiyon modellemede pozlandırma araçları, maskeden birkaç cm uzaklıkta bulunan fotoelastik ile kaplı tabakanın üst yüzeyine maske üzerindeki modellerin aktarılması yönteminde kullanılır (Şekil 3.17.). Projeksiyon modellemede çözünürlüğü artırmak, maskenin küçük bir kısmının zamanında pozlandırılması ile mümkündür.



Şekil 3.16. Temel litografya maske düzeni (a) Kontak modelleme (b) Yakınlık modelleme .



Şekil 3.17. Projeksiyon maske için temel litografya düzeni.

Tabaka üstündeki maskenin görüntüsü yaklaşık olarak 1 mm genişliğindeki yarıktan sırasıyla transfer edilerek dar ışık yayını biçimlendirilir.

3.4.2. Kalın Fotoelastik

Kalın fotoelastik modelleme, normal olarak derin yapıların aşındırılması için koruyucu maske tabakası gibi kullanılır fakat bazı durumlarda, metal mikro yapıların elektriksel kaplanması için bir şablondur. Kalın fotoelastik ile tabanın kaplanması ya çoklu döndürerek kaplama yöntemleri ile (toplam 10 μm kadar) yada daha düşük hızlarda (100 μm kadar) yapışkan fotoelastik eriyiğinin özel bir şekilde eğilmesi ile gerçekleştirilir. Kalınlık denetiminin devam ettirilmesi ve aynı çapraz tabakaların fotoelastiklerinin kalınlıklarının artışı çeşitli zorluklar oluşturur.

5 μm den daha kalın fotoelastiğin pozlandırılmasında, pozlandırma araçlarının odak derinliklerinin sınırlı olması nedeniyle çoğu kez erimenin boyutlarının en aza indirilmesi ile fotoelastik içindeki farklı düzlemlerde farklı modeller görüntülenebilir. Ana sonuç, pozlandırılan bölgedeki fotoelastik profilinin eğimidir. Ana hatlarıyla, maksimum açı oranı yaklaşık olarak üçtür, diğer bir deyişle, yapılabilir en küçük boyut özelliği, fotoelastiğin kalınlığının üçte birinden daha geniştir. Bu sınırlama, kullanılan özel pozlandırma yöntemlerinin üstesinden gelebilir fakat üretim çevresinde onların değeri şüpheli kalır.

3.4.3. Topografik Yükseklik Değişimleri

Tabaka yüzeyinin topografik değişimleri olan boşluklar ve çukurlar MEMS de çok yaygındır ve fotoelastiğin görüntüsü ve döndürülmesi gibi pozlandırma zorluklarının her ikisi'ninde üstesinden gelir. 10 μm daha derin boşluklar için, (Şekil 3.18.) boşluk içindeki birikinti ve dışbükey köşelerde fotoelastiğin incilmesi nedeniyle birbirinin aynı olan şekilleri oluşturmak sıkıcı bir iştir. Kalın tabakalar da (>5 μm) fotoelastiği püskürtme yerine kaplama yöntemi kullanılabilir.

10 μm den fazla yükseklik değişimleri ile yüzeyin üstüne model pozlandırılması aynı zamanda odak derinliğinin sınırlı olması nedeniyle zor bir iştir. Kontak ve yakınlık araçları bu iş için uygun değildir fakat çözünme kayıpları önemli değilse kullanılabilirler. Yükseklik seviyelerinin sayısı üçten azdır. Bu yükseklik seviyelerinin her birinde ayarlanmış aynı odak ile pozlandırma yapılmasında projeksiyon litografya araçları kullanılabilir. Doğal olarak, bu pahalı bir yöntemdir çünkü pozlandırma ve maske sayısı, yükseklik seviyelerinin sayısı ile doğrusal bir şekilde atar.

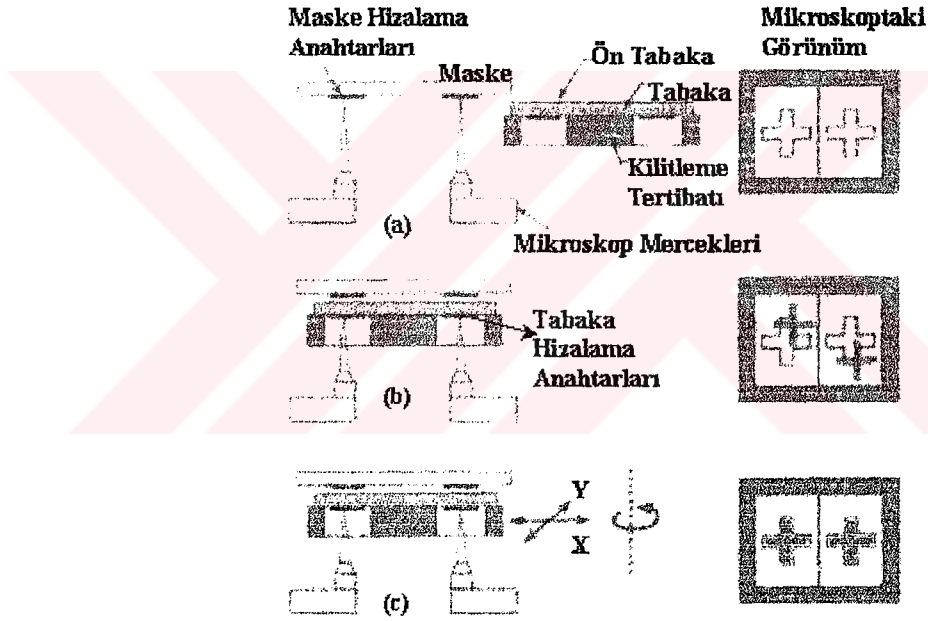


Şekil 3.18. Sert topografik yükseklik değişimleri, fotoelastiğin döndürülerek kaplanması sonucunda oluşan istenilmeyen etkileri gösterilmektedir. Fotoelastik, köşelerde incelmış ve boşluk içinde birikmiştir [Maluf , 2000].

3.4.4. Çift Taraflı Litografya

Tabakanın her iki tarafının litografya modellemesinde, yüksek doğruluk derecesi ile birbirine aynı açıyla hizalanması gerekmektedir. Örneğin, Basınç algılayıcısının üretiminde, tabakanın ön tarafındaki basınca duyarlı elementlerle, tabakanın arka tarafında yer alan boşluğun (deliğin) kenarları aynı hizaya gelmelidir. Nispi hizalama hataları, basınca duyarlı direnç köprüünün duyarlılığının basınca göre değişimi 5 μm den daha büyüktür ve istenilmeyen ikinci sıra etkileri oluşturur. Ön ve arka tarafın hizalanmasında farklı yöntemlerle ticari araçlar dahil edilerek bilinen çift taraflı litografya elde edilebilir.

Karl Süss GmbH, Münih-Almanya ve Electronic Visions Company of Schording, Avusturya bu iki şirket pozlandırma ve çift taraflı litografya için gereken malzemeleri üretirler. Karl Süss MA-150 üretim modu sisteminin çalışmasında, tabakanın arka tarafının üst kısmının çapraz işaretlenmesi ile maskenin üstündeki çapraz işaretlemenin hizalanması için patenli bir proje kullanılmıştır. İlk önce, mekaniksel olarak sıkıştırılmış maskenin üst yüzeyine işaretlemenin hizalanması çift merceğin ayarlanması ile olur ve görüntü elektroniksel olarak saklanabilir. Mikroskop mercekları kullanarak elektroniksel olarak yüklenen görüntü, tabakanın arka tarafına aktarılır. Bu hizalanarak aktarımdan sonra, yakınlık ve kontak üslubu kullanılarak tabakanın ön tarafında bulunan maskenin pozlandırılması ile işlem tamamlanır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Karl Süss MA-150 üretim sistemi için çift taraflı hizalama şeması; (a) işaretlerin hizalanması ile maskenin görünümü elektroniksel olarak saklanması. (b) tabakanın arka tarafının üst kısmındaki şekillerle hizalanmasında odaklamalar kullanılır. (c) tabakanın konumu çevirme ve döndürme ile yüklenen görüntünün işaretlerinin hizalanması ile sağlanır. Hizaya getirilen işaretlerin bilgisayar ekranındaki görünüm örnekleri sağ tarafta gösterilmiştir [Maluf, 2000].

3.5. Kitle (Bulk) Silikondan Mikroişleme

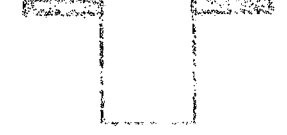
Kitle (bulk) mikroişleme, bilinen silikon mikroişleme teknolojilerinin en çok kullanılan yöntemidir. Bu yöntem, 1960'ların ilk zamanlarında meydana çıkmış ve mikroyapıların üretiminde o zamandan beri kullanılmaktadır. Kitle (bulk) mikroişleme, büyük miktardaki ticari cihazların; hemen hemen tüm basınç algılayıcıları, silikon supaplar ve silikon hızlanma algılayıcılarının % 90'nın üretiminde kullanılmaktadır [Gardner et al, 2001]. Kitle (bulk) mikroişleme terimi, tekli kristal silikon tabakanın seçici bir şekilde aşındırılması ile oluşan bulk içerisinde mikroyapıların gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan tekniklerin genel adıdır [varadan et al, 2001]. Kitle (bulk) mikroişlemenin amacı; tabakadan silikonun önemli bir miktarının seçici bir şekilde azaltılmasıdır. Bu bazen yapıların "altını kesmek" de kullanılır ki tabakanın bir kenarı üzerindeki zarda; çukurlar, delikler veya diğer yapıları oluşturmada fiziksel olarak taşıma gerektirir [Kovacs et al, 1998]. Çizelge 3.4. ince metal filmler ve dielektrik yalıtkanlar için yaygınca kullanılan ıslak ve kuru (plazma fazı) aşındırma yöntemlerinin listesi gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. İnce metal filmler ve dielektrik yalıtkanların ıslak ve kuru (plazma fazı) aşındırıcıları.

	Islak Aşındırıcılar (sulu çözeltiler)	Aşındırma Oranı (nm/min)	Kuru Aşındırma Gazları (Plazma fazı)	Aşındırma oranı (nm/min)
Silikon dioksit	HF	20-2,000	$\text{CHF}_3 + \text{O}_2$	50-150
	$\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ (tamponlu HF)	100-500	$\text{CHF}_3 + \text{CF}_4$	250-500
Silikon nitrit	H_3PO_4	5	SF_6	150-200
Alüminyum	$\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$	660	$\text{Cl}_2 + \text{SiCl}_4$	100-150
	HF	5	$\text{CHCl}_3 + \text{BCl}_3$	200-600
Altın	KI	40		
Titan	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2$	880	SF_6	100-150
Tungsten	H_2O_2	20-100	SF_6	100-150
	$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{KOH}:\text{KH}_2\text{PO}_4$	34		
Krom	$\text{Ce}(\text{NH}_4)(\text{NO}_3)_6:\text{HCl}_4$ HCl	2	Cl_2	5
Organik tabakalar	$\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$	>1,000	O_2	35-3,500
	CH_3COCH_3 (aseton)	>4,000		

Bu teknoloji çok çeşitli uygulamalarla yapılabilir fakat bu uygulamaların en önemlisi aşındırma (etching) dır. Aşındırma (dağlama) için çeşitli yöntemler vardır. En önemli nitelikteki aşındırma (dağlama) yöntemleri ıslak kimyasal aşındırma ve kuru kimyasal aşındırmadır. MEMS üretimi için aşındırma yöntemleri, entegre devre teknolojisi için uygulanan geleneksel aşındırma yöntemlerinden ayrılır. İnce filmlerin aşındırılması, kitle (bulk) silikon aşındırmadan nispeten daha kolaydır.

Eş yönlü (izotropik) aşındırıcılar, silikonu tüm yönleri aynı biçimde aşındırır ve yanal kesit şekillerinin yuvarlak oluşu bunun sunucudur. Zıttı ise; Eş yönsüz (izotropik olmayan) aşındırıcılardır, tercih edilen yönde aşındırma gerçekleştirir ve iyi bilinen düz yüzeyler üzerinde çukur ve boşlukların oluşturulması bunun sonucudur. Bu, tabakanın yüzeyine dik olmayabilir. Aşındırma ortamı (ıslak veya kuru), uygun yöntemin seçiminde önemli bir rol oynar. Sulu çözeltiler içindeki ıslak aşındırıcılar, genellikle 20 ila 25 tabakanın benzer bir biçimde aşındırılabilmesi için düşük maliyetli grup üretiminde avantaj sağlar veya eş yönlü yada eş yönsüz olabilirler. Kuru plazma aşındırma; düşük basınç da tepken gazlarının kullanımını içerir (Şekil 3.20).

	Islak Aşındırma	Plazma (Kuru) Aşındırma
Eş Yönlü Aşındırma		
Eş Yönsüz Aşındırma		

Şekil 3.20. Dört farklı tipteki aşındırma sonucunda oluşan çapraz kesitli çukur profillerinin şematik örnekleme.

3.5.1. Eş Yönlü (İzotropik) Islak Aşındırma

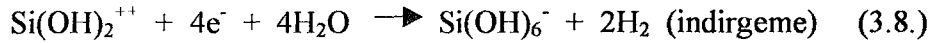
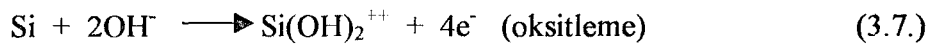
En yaygın olan eş yönlü (izotropik) ıslak aşındırma (dağlama) “HNA” dır ve aynı zamanda, entegre devre teknolojisinin ilk zamanların da polisilikonun aşındırılması için kullanılması nedeniyle “Poli-aşındırma” olarak da bilinir. HNA,

asetikasit (CH_3COOH), nitrik (HNO_3) ve hidroflorik asitin (HF) bir karışımıdır (Çizelge 3.5.). Nitrik asit, hidroflorik asit vasıtasıyla kaldırılan silikону oksitler. Silikonun aşınma oranı, karışım içinde bulunan asit oranına bağlı olarak 1 ila 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ arasında değişebilir. Ayrıca karıştırma, aşındırma oranını 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ yükseltebilir. Aşındırma derinliğini ve yüzey benzerliğini kontrol etmek zor bir iştir.

3.5.2. Eş Yönsüz (İzotropik olmayan) Islak Aşındırma

Eş yönsüz ıslak aşındırma da; Alkali metallerin hidroksitleri (Örneğin; NaOH , KOH , CsOH ... vb.), basit ve dörtlü amonyum hidroksitler (Örneğin; NH_4OH , $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$), ve su içinde pirekatekol ile etilendiaminin oluşturduğu karışımı içerir (Çizelge 3.5).

Alkali metal hidroksitlerin en çok kullanılanı potasyum hidroksittir (KOH). KOH in $\{111\}$ düzlemlerini aşındırma oranı, $\{100\}$ düzlemlerini aşındırma oranından 100 kez daha yavaştır. Bu özellik alışıla gelen V-biçimli yivler ve çukurlar yapmak için kullanılmaktadır ki $\{111\}$ kristalimsi düzlemler vasıtasıyla kesin bir şekilde tanımlanabilir. İndirgeme adımı ile takip eden silikonun oksitlenmesini içeren kapsamlı reaksiyon aşağıdaki gibidir;



$\{111\}$ kristalimsi düzlemleri ayırmanın kaynağı hakkında az fikir uyuşması vardır. Bazıları $\{111\}$ düzlemleri boyunca tamamıyla literatüre bağlı kalmak koşulu ile daha düşük bağ yoğunluğuna ve bundan dolayı daha düşük elektron konsantrasyonunun eş yönsüzlüğü oluşturduğuna, diğerleri ise $\{111\}$ düzlemlerinin hızlıca oksitlenmesi ve ince oksit bir tabaka ile aşındırma esnasında korunduğuna inanmaktadırlar.

KOH ve alkali aşındırıcılar aynı zaman da ağır katkılı p-tipi (p^{++}) silikonu ayırır. KOH çözeltisi içindeki silikonun aşınma oranı, KOH in konsantrasyonuna ve sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık 0,5 ila 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ dir. Fakat $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ üstünde bir katkı konsantrasyonu ile p^{++} silikon içindeki 500 faktörü ile düşer. İnanılır ki eş yönsüz aşındırma, ağır p-tipi katkılama esnasında, silikonun oksitlenmesin de kritik elektronları kimyasal reaksiyondan mahrum bırakır.

Silikon nitrit, KOH içinde aşındırılmaya karşı mükemmel bir maske malzemesidir. Silikon dioksit, 10 nm/min de aşınır ve çok az aşınmalar için maske malzemesi olarak kullanılır. Fotoelastik, alkali çözücüler içinde kolaylıkla aşınır ve aşındırmalarda silikonun maskelenmesi için uygun değildir.

Çizelge 3.5. Silikonun sıvı ve gaz halindeki aşındırıcıları.

	HF: HNO ₃ : CH ₃ COOH	KOH	EDP	(CH ₃) ₄ NOH (TMAH)	SF ₆	SF ₆ /C ₄ F ₈ (DRIE)
Aşındırma Tipi	Islak	Islak	Islak	Islak	Plazma (Kuru)	Plazma (Kuru)
Tipik Formül	250 ml HF, 500 ml HNO ₃ , 800 ml CH ₃ COOH	40 ile 50 wt%	750 ml Etilendiamin, 120 g pirekatekol, 100 ml su	20 ile 25 wt%		
Eş Yönsüz	Hayır	Evet	Evet	Evet	Çeşitli	Evet
Sıcaklık	25 °C	70- 90 °C	115 °C	90 °C	0-100°C	20-80 °C
Aşındırma Oranı ($\mu\text{m}/\text{min}$)	1 ile 20	0.5 ile 2	0.75	0.5 ile 1.5	0.1 - 0.5	1 ile 3
{111}/{100} Seçicilik	Hiçbiri	100:1	35:1	50:1	Hiçbiri	Hiçbiri
Nitrit Aşındırma (nm/min)	Düşük	<1	0.1	<0.1	200	200
SiO ₂ Aşındırma (nm/min)	10-30	10	0.2	<0.1	10	10
p^{++} Aşındırmayı Durdurmak	Hayır	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır

Alkali hidroksitler, yüksek düzeyde aşındırıcılardır; alüminyum bağ koruyucuları, KOH ile maruz kalmaları durumun da hızlıca bozulurlar ki bu istenilmeyen bir durumdur. Önemli olan, CMOS malzemelerinin üretimin de bu tip aşındırıcıların kullanılması pek istenilmez veya alıcı tabakaların önceden alkali hidroksitler ile aşındırılmalarında bile, CMOS elektronik devrelerinin işletilmesin de zarar veren sodyum ve potasyum iyonlarının bulaşmasından endişe edilir.

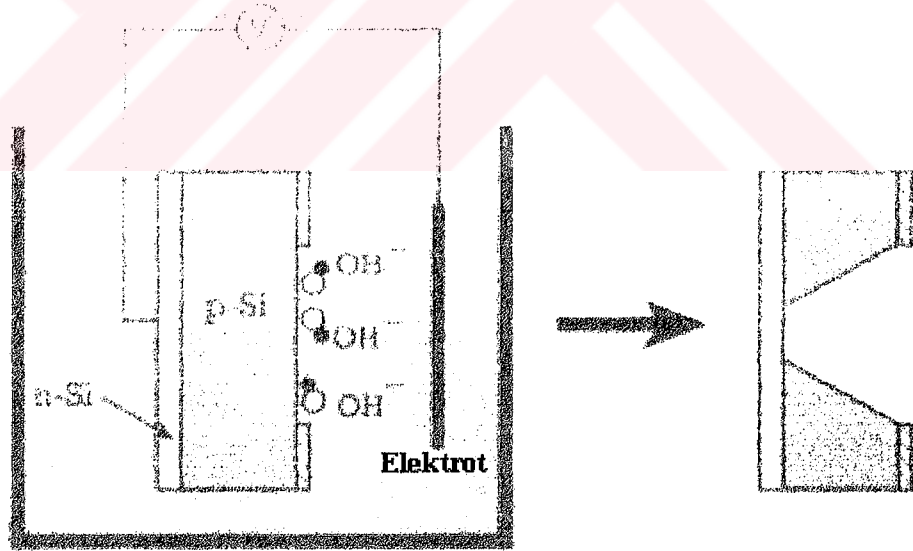
Amonyum hidroksitlerin sınıflandırılmasında, tetrametil amonyum hidroksit ((TMAH) $((CH_3)_4NOH)$), KOH e benzer özellikler sergiler. ((TMAH) $((CH_3)_4NOH)$), {111} kristalimsi düzlemlerini {100} düzlemlerinden 30 ile 50 kez daha yavaş aşındırır. Aşındırma oranı, ağır bir şekilde p-katkılandırılmış silikon ($1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) içindeki 40 faktörü ile düşer. TMAH ın bir dezavantajı, aşındırılan oyukların altın da ara sıra istenilmeyen piramit biçimindeki küçük tepeliklerin oluşmasıdır. Her iki silikon dioksit ve silikon nitrit, TMAH içinde neredeyse aşınmadan kalır ve bundan dolayı maske tabakası olarak kullanılabilir. TMAH içinde aşındırılmadan önce negatif silikon dioksit tabakasının hidroflorik asit (HF) içerisinde kaldırılması gerekir çünkü sadece birkaç nanometre kalınlığındaki bir tabaka silikon yüzeyini aşındırma işleminden yeterli bir şekilde korur. TMAH normalde alüminyum aşındırır, fakat çözelti içerisinde çözünmeyen silikon tozu içeren özel bir formülle alüminyumun aşındırılma oranı azaltılır. Bu özellik, alüminyum bağ koruyucularının maskelemeyen CMOS devrelerinin üretiminin tamamlanmasından sonra silikonun aşındırılması için yararlıdır.

3.5.3. Elektrokimyasal Jet ile Aşındırma

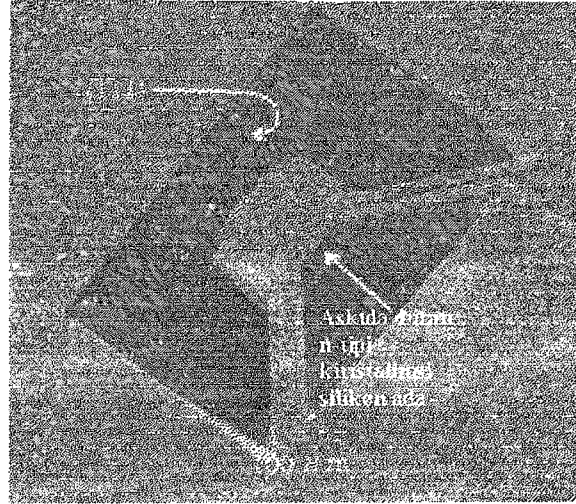
Eş yönsüz (izotropik olmayan) ıslak aşındırıcıların aşındırma oranları ($>0,5 \mu\text{m}/\text{min.}$) diğerlerine göre daha büyüktür fakat aşındırma derinliklerinin kontrol edilmesinde ve benzer biçimlerin oluşturulmasında zorluklar yaşanır. Kitle (bulk) mikroişleme basınç algılayıcıları gibi bazı uygulamalarında sürekli aşındırma kullanımında başarılması çok zor olan $0,2 \mu\text{m}$ den daha iyi bir benzerlikte ve boyut kalınlığının kontrolü ile ince silikon bir zar ($5 \text{ ila } 20 \mu\text{m}$) talep edilir. Kalınlık kontrolü yerine dışarıdan uygulanan elektrik potansiyeli ile aşındırma reaksiyonu

modüle edilir ve epitaksiyal tabakanın büyütülmesi bunun tam bir şekilde kullanılması ile sağlanır. Bu yöntem, çoğunlukla “Elektrokimyasal jet ile aşındırma” olarak adlandırılır. Bir p-tipi tabaka üzerinde n-tipi epitaksiyal tabakanın büyütülmesi ile bir p-n birleşme diyotu şekillenir ki sadece p-tipi tarafın elektrik voltajı n-tipi taraftan yüksek ise elektrik iletimine izin verir; aksi taktirde, elektrik akımı akmaz ve diyot “Ters ön gerilim” olur. P-N diyotu ters ön gerilimde iken bir potansiyel uygulandığında n-tipi epitaksiyal tabaka onun pasifleşme potansiyelinin üstünde olduğundan elektrik akışı olmayacağından dolayı aşınma olmaz. P-tipi tabaka elektrik akışına izin verir ve böylece aşınır. P-tipi tabaka tamamen kaldırılır kaldırılmaz aşındırma reaksiyonu birleşme noktasında durur ve n-tipi silikon tabaka tam kalınlığında kalır (Şekil 3.21.).

CMOS tabakalarının üretimi tamamlandıktan sonra orijinal kimyasal aşındırma ile ön işlemden geçirilmesinde pozlandırılan alüminyum bağ koruyucularının aşındırılmasını engellemek için erimiş silikon çözeltisi ile KOH in yerine TMAH kullanılmıştır (Şekil 3.22.).



Şekil 3.21. N-tipi epitaksiyal silikon kullanılan elektrokimyasal aşındırmanın örneği şekilde gösterilmiştir. N-tipi silikon, pasifleşme potansiyelinin üzerinde bir potansiyele sahip olduğundan dolayı aşınmaz. P-tipi tabaka ise bu çözelti içerisinde aşınır. P-tipi tabaka tamamıyla kaldırıldıktan sonra aşındırma doğrudan doğruya durur.



Şekil 3.22. CMOS üretiminin tamamlanmasından sonra TMAH içinde elektro-kimyasal aşındırılma ile biçimlenen tamamıyla askıya alınmış n-tipi kristalimsi silikon adanın görüntüsü verilmiştir.

3.5.4. Plazma-Faz (Kuru) Aşındırma

Plazma-faz (veya kuru) aşındırma (dağlama) yarıiletken endüstrisi içinde temelde önemli bir yöntemdir. Yüksek frekanslı elektromagnetik alan içinde uyarılan enerjik elektronların gaz molekülleri ile çarpışması sonucunda reaktif nötr türler ve iyonlar şekillenir. Elektronlar, nötrler ve iyonların karışımı plazma olarak adlandırılır ve katılar, sıvılar veya gazların farklı maddelerinin bir fazından meydana gelir. Plazma faz uygulamaları nötr türler ve iyonların yoğunluğunu artırır ki kimyasal reaksiyona katılabilir. Plazma-faz (veya kuru) aşındırma, kaplanır yada aşındırılır (dağlanır) ve böylece reaksiyon oranını hızlandırabilir. Plazma-faz aşındırmanın temel ilkeleri; iyonlar (SF_x^+ , vb.) ve reaktif nötr elementler (Cl, F, vb.) kimyasal bir şekilde üretimini içerir ki hedefteki tabakaya uygulanan elektrik veya magnetik alanın etkisi altında bu işlem hızlandırılır. Reaktif türler (Nötrler ve iyonlar) RF alanı vasıtasıyla uyarılan enerjik elektronları içeren bir bulut ile tepken gaz (SF_6 , CF_4 , Cl_2 , $CClF_3$ ve NF_3) içindeki moleküllerin çarpışması sonucunda şekillenir. Aşındırma işlemi tamamen kimyasal olarak yapıldığı zaman, silikon ile nötr elementlerin kendiliğinden gerçekleşen reaksiyonu vasıtasıyla güçlendirilir ve ondan konuşma dilinde “Plazma aşındırma” olarak bahsedilir fakat silikon yüzeyinin iyonlarla bombardımanında kimyasal aşındırma önemli bir rol oynarsa eğer, o zaman bu yöntemden reaktif iyon aşındırma (RIE) olarak bahsedilir. Asimetrik elektronlar ve

küçük hücre (oda) basınçları (<5 Pa) RIE uygulamalarını bir özelliğidir. İndüktif kuplajlı plazma reaktif aşındırma (ICP-RIE), harici RF magnetik alanının uygulanması ile reaktif iyonlara ve elektron bulutuna ilaveten uyarım sağlar. ICP, daha yüksek aşındırma oranı ile sonuçlanan iyonlar ve nötr elementlerin yoğunluğunu artırır.

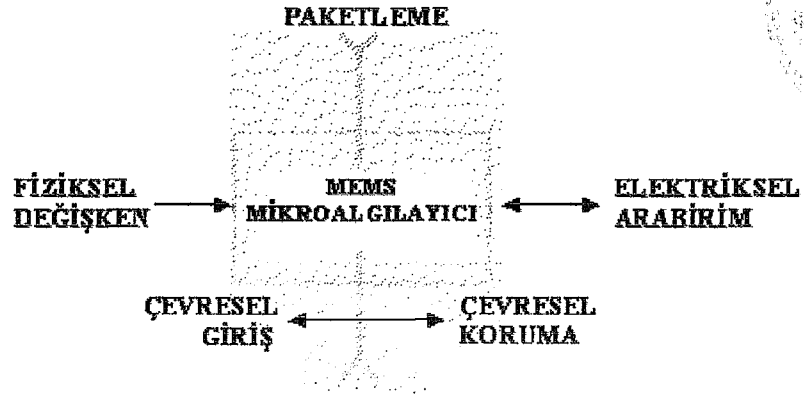
3.6. Metalleştirme

Metalleştirme, metal-yarıiletken kontaklar, ohmik kontak ve ara bağlantıları için kullanılan metal filmlerin oluşturulmasıdır [Sze, 1985]. Entegre devrenin veya cihazın yarıiletken üretim adımlarının tümünün tamamlanmasından sonra entegre devreye ve cihaza harici bağlantılar için metalik bağlantılar kullanılmıştır. Aynı zamanda bağlantılar, P-N birleşme diyodunun P ve N bölgeleri gibi ohmik kontak yapılmalıdır. Ohmik kontak, kontak boyunca her iki yönde akımın kolay akmasına izin verecek bir şekilde çok düşük direnç değerine sahip olmalıdır [Kano, 1998].

3.7. Paketleme

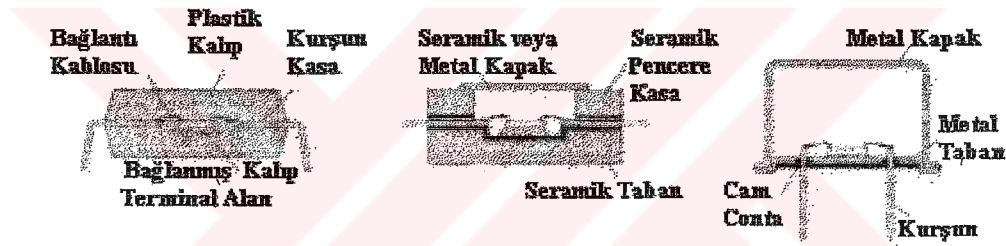
Paketleme, MEMS cihazlarını çevreden gelebilecek bozucu etkilere karşı korumayı gerektirir (Şekil 3.23.). Bu amaçla;

- Çevre şartlarına dayanımı artırır ve koruma sağlar.
- Fiziksel alanlara bağlantılar (Fiber optik vb.) ve çevresel için izin verir.
- Cihazın içinden ve dışından oluşabilecek elektriksel girişim etkilerini minimize eder.
- Dışarıdan yüklenmelerde stresi minimize eder.



Şekil 3.23. MEMS mikroalgılayıcının paketlenme işleminin şematik gösterimi [Elwenspoek and Wiegerink, 2001].

Algılayıcılar için yaygınca kullanılan paketlenmeler genellikle plastik, seramik, metal kapak içeren geleneksel yarıiletken paketlenme tekniklerini içerir (Şekil 3.24.).



(a) Plastik kalıplanmış paketlenme (b) Seramik pencere paketlenme (c) Metal kapak paketlenme

Şekil 3.24. Geleneksel IC paketlenme tipleri.

4. OTOMOTİV SİLİKON GAUGE BASINÇ ALGILAYICISININ ARAŞTIRILMASI ve GELİŞTİRİLMESİ

Geçmişte basınç algılayıcılarını kompanze ve kalibre etmek için çeşitli donanım teknikleri kullanılmıştır. Potansiyometreler, dirençler veya lazer ayarlamalı kalın film devreler algılayıcı seviyelerinin kompanze edilmesinde birincil devreler olmuştur. Biraz daha pahalı olan vericiler (transmitters) ve dönüştürücüler (transducers) çözünürlük ve doğrusallık gibi önemli parametrelerin düzeltilmesi için ikincil elektronik donanım olarak kullanılmıştır. Programlanabilir karma işaret denetleyicilerin kullanışlı ve fazla bir maliyet içermemeleri nedeniyle yeni kompanzasyon tekniklerinin başında yer almıştır. Offset, offset TC ve doğrusallık gibi birkaç parametre dijital bir şekilde kompanze edilebilmiştir. Yeni denetleyiciler, çoklu analog giriş kanallarına, A/D dönüştürücüler, D/A dönüştürücüler gibi gerekli tüm donanıma sahiptir ve basınç algılayıcılarının çeşitli parametrelerini ayarlayabilirler.

Mikrodenetleyici, çip üstünde merkezi işlem birimini içeren kendiliğinden bir bilgisayardır ve değişmeyen program hafızası, depolanan bir bilgi için rastgele erişim belleği ve çeşitli giriş-çıkış yeteneklerine sahiptir. Mikrodenetleyiciler aynı zamanda özel yazılım uygulamalarıyla iç hareketli kontrol sistemleri tam bir şekilde birleştirilmiştir. İç hareketli kontrol çözümü binlerce ürün içinde birleştirilmiş ve tüm dünya pazarlarında sergilenmiştir. Mikrodenetleyici uygulamalarının birkaçı:

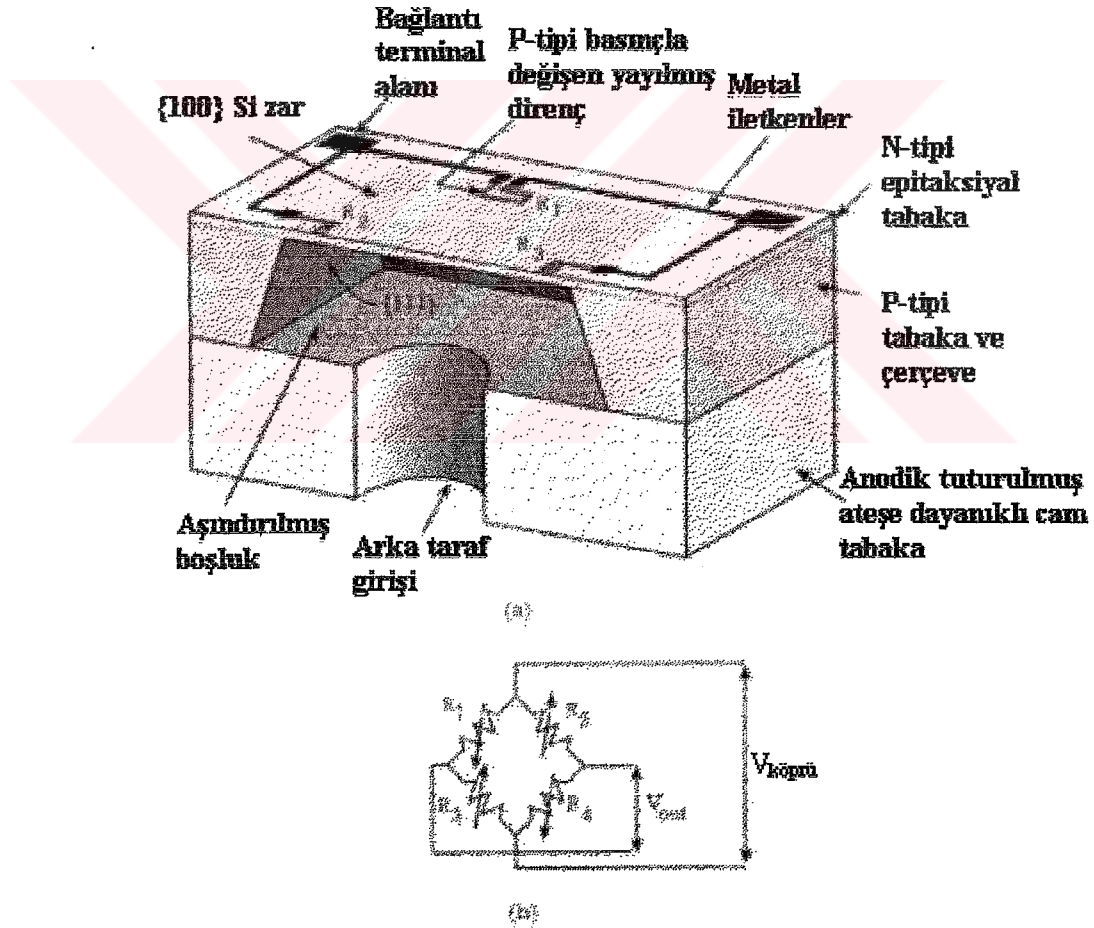
- Otomotiv hava yastığı sistemleri
- Uzaktan kumanda cihazları
- Mekanizmalar
- Taşınabilir bilgisayarlar
- Cep telefonları
- Motor kontrolleri
- Güvenlik sistemlerin de kullanılmıştır [Peatman, 2002].

Bu tezde basınç algılayıcısının 0 kg/cm² basınçtan 0,5 kg/cm² basınca kadar çeşitli sıcaklık aralıklarında kompanzasyonu sağlamak amacıyla Mirochip PIC18F452 nin (Programlanabilir karma işaret denetleyicisi) kullanıldığı devre tasarlanmış, kompanzasyon işlemini gerçekleştiren program PIC18F452 ye yüklenmiştir.

4.1. MEMS Basınç Algılayıcısı

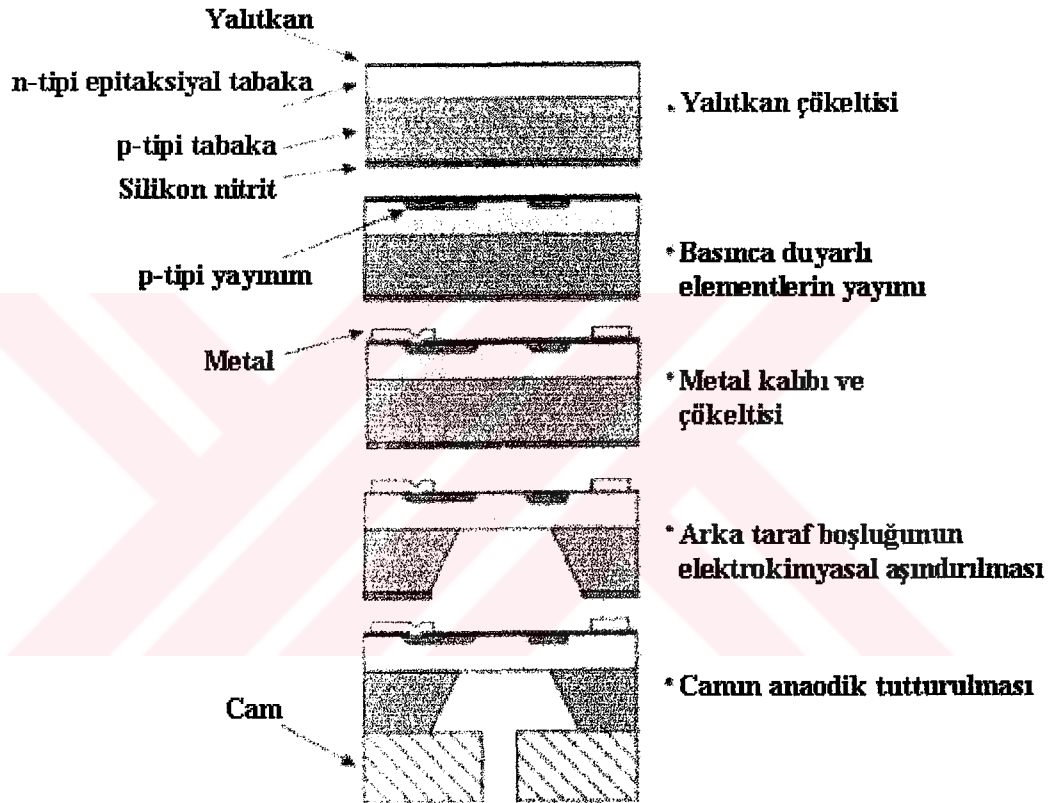
Basınç algılayıcılarının yüksek hacimdeki ilk üretimi 1974 yılında santa clara ulusal yarıiletken anonim şirketi, Kaliforniya’da başlamıştır. Basınç duyarlılığının geniş bir pazara yayılımı ile tahminen 45 milyon silikon mikroişleme basınç algılayıcısı 1988 yılında üretilmiştir. Neredeyse tüm birimlerinde kitle (bulk) mikroişleme tekniği kullanılmıştır. Emme mutlak basıncı ve kullandıktan sonra atıla bilen kan basıncına duyarlı algılayıcılar bu tekniğin en geniş iki uygulaması olarak verilebilir. Büyük bir çoğunluk ince film silikon diyafram içinde basıncı cevaplayan ve stresleri bulan direnç değeri basınçla değişen duyarlı elementler kullanılmıştır. Çok az dizaynda ince diyaframının elektrik yer değiştirmeye duyarlı kapasitif metotlar kullanılmıştır. Direnç değeri basınçla değişen basınç algılayıcısının temel yapısı ince bir kristalimsi silikon zar içinde stresi ölçmek için tasarlanmış wheatsone köprüsü içindeki dört duyarlı elementi içermiştir (Şekil 4.1.). Stresler, algılayıcının ön ve arka tarafının karşısında farklı basınç uygulamalarıyla doğrudan doğruya zarın yönünü değiştirmesinin bir sonucudur. Farklı basınç uygulamalarıyla zarın yön değiştirmesi genellikle 1 µm den azdır. Basınç uygulanan tam kadranında çıkış köprüsünün uyarımı için gereken köprü besleme voltajı birkaç milivoltur. Çıkış, uygulanan giriş basıncına duyarlı olduğu bilinir. Zarın geometrik boyutları ve kalınlığı duyarlılığı etkiler ve sonuç olarak, algılayıcının basınç oranını verir. Cihazlar, duyarlılığı geliştirme, merkezi yönetim gibi kompleks zar yapısı içeren (10 kPa dan düşük) alçak basınçlar için sınıflandırılmıştır.

Diyaframın kenar merkezinde meydana gelen yüksek stres noktalarında dağıtık olarak yerleştirilmiş bulunan dört adet basınca duyarlı dirençlerin pozisyonu $\{100\}$ düzleminde tabanın üzerinde tasarlanmıştır. Zar ile bağlı direncin azalması sonucunda iki element; zarın kenarına paralel ekseninde yerleşmiştir. Diğer iki direnç ise basınç yükü ile artan direnç nedeniyle kenara dik bir şekilde yerleştirilmiştir. Diğer proje, hem de kesim stres ölçümünün tasarlanması mümkün olmaktadır, fakat esas amaç, uygulanan basınca maksimum cevap vermek için yüksek stres konsantrasyon bölgesi içindeki dirençlerin pozisyonlarının olduğu gibi kalmasıdır. Whetstone köprüsü içindeki dengesizlikler sıcaklık nedeniyle. Sonuçta çıkışta okunan sıfırı dengelenebilir bu istenmeyen bir durumdur. İşte bu tezin amacı, sıcaklık nedeniyle olan dengesizliklerin giderilmesi olmuştur.



Şekil 4.1. (a) Basınca duyarlı elementler ile basınç algılayıcısının şematik gösterimi (b) Duyarlı dört elementin wheatstone köprüsü ile gösterimi [Maluf 2000].

Sığ yayılımlar yüzey şarjına endekslidir ki çıkış sinyali içinde uzun süreli yönelimlere neden olabilir. Tipik basınç algılayıcısının üretim süreci (yolu) ince zarın tam şekillendirmesinde kullanılan elektrokimyasal aşındırmayla, entegre devre (IC) endüstrisi ile standart adımlarla çoğunlukla üretilir. N-tipi Si epitaksiyal tabakanın, P-tipi tabaka {100} üstünde geliştirilmesidir (büyütülmesidir). İnce, stres-serbest tercihen, izolasyon katmanı tabakanın ön tarafı üstüne çökeltilir veya büyütülür ve koruyucu silikon nitrit film arka tarafın üstüne çökeltilir (Şekil 4.2.).

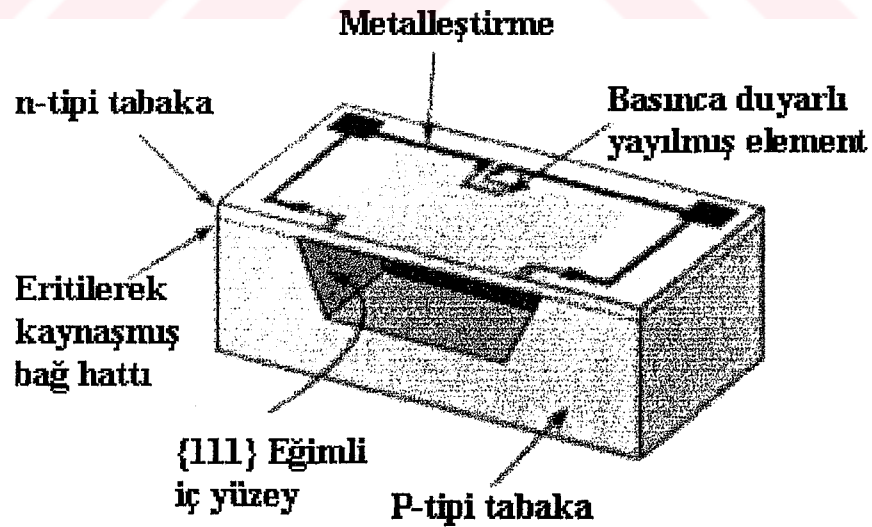


Şekil 4.2. Kitle (bulk) mikroişleme basınç algılayıcısının üretim aşamaları.

Basınca duyarlı dirençler, bor iyonlarının aşılması ve takibinde yüksek sıcaklık uygulanması esnasında silikonun sınırlı bölgelerinde p-tipi yayınımların oluşmasıyla oluşturulmuştur. Ön tarafın üstündeki yalıtım tabakasının aşındırılması basınca duyarlı dirençlerin altında kalan bağlantının açılmasını sağlar. Metal tabaka, tipik alüminyum, kaplama-püskürtmeden sonra koruyucu tabaka ve elektriksel iletkenler içinde şekillendirilmiştir. Kare açıklık şekillendirilmiş ve arka tarafın üstünden silikon nitrit aşındırılmıştır. Çift taraflı litografya yardımı ile karenin arka tarafı, ön taraf üstündeki duyarlı elementler ile tam bir şekilde hizaya getirilmiştir. Bu noktada

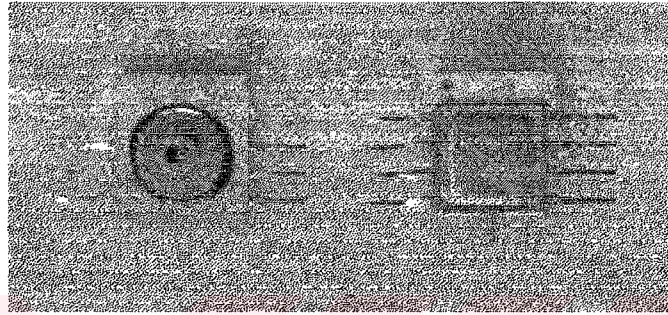
elektriksel bağlantılar p-tipi tabaka ve n-tipi epitaksiyal tabakadan yapılmış ve silikon, KOH ile arka tarafa, elektrokimyasal aşınma uygulanmıştır. Doğal bir şekilde ön taraf, aşındırma esasında korunmalıdır. P-tipi silikon tamamen kaldırılır kaldırılmaz aşındırma durdurulur ve n-tipi tabaka aşındırılır. Tam yoğunluk ile zarın oluşturulması yöntemleri epitaksiyal tabaka tarafından tanımlanmıştır. Ateşe dayanıklı cam tabaka ile arka taraftaki boşluk anodik tutturma vasıtasıyla ön taraf üstündeki basıncı ölçebilen mutlak basınç algılayıcısı tasarlanmıştır. Cam tabaka içindeki çukurların tam delinmesi ile gaz giriş çıkışı sağlanmıştır.

1980'lerde silikon eritme yönteminin gelişmesi, kitle (bulk) mikroişleme basınç algılayıcılarının dizaynında çok yararlı olmuştur. Algılayıcı çerçeve, {111} düzleminin dışa doğru eğimi kalıp boyutlarının lüzumsuz derecede artışının bir sonucudur. Silikon erime yöntemi, içe eğilim {111} duvar ile referans boşluğun aşındırılmasından sonra zarın oluşturulmasına izin verir. Sonuç olarak, aşırı derecede küçük basınç algılayıcıları yapılabilir. Örneğin, Lucas Nova algılayıcısı, Fremont, Kaliforniya 400µm genişlik, 800 µm uzunluk ve 150 µm kalınlıkta algılayıcı üretilmiş ve catheter başlığın içine yerleştirilmiştir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Silikon eritme yöntemi ile tasarlanan minyatür mutlak basınç algılayıcısı.

Silikon eritme yöntemi ile basınç algılayıcısının yapımı; kullanılan tabakanın alt kısmındaki boşluğun aşındırılması ile başlar. İkinci üst tabakanın silikon eritme bağlantısı kapsül şeklinde ve boşluk contası gibidir. Yoğunluğa uygun zardan bağ tabakasının alt ve üst kısmının inceltilmesi için elektrokimyasal aşındırma ve standart cilalama kullanılmıştır. Metal bağlantılar kadar iyi basınca duyarlı dirençler tanımlanan yöntem adımları ile kitle (bulk) mikroişleme basınç algılayıcılarındaki standart üretim adımlarına benzerdir. Bu aşamalar daha önce anlatılmıştır.



Şekil 4.4. Tezde kullanılmış olan basınç algılayıcısının üstten görünümü.

Kaynak hatalarını doğrulanması ve kalibrasyon, mutlak basınç algılayıcıları için gereklidir. Çoğu tipik otomobil, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda sıcaklık artış oranı -40 tan 125 °C iken doğruluk %1 den daha iyidir. İlk emir hataları sıfır sapma içerir (çıkışa basınç uygulanmamaktadır) duyarlılık veya süre ayarsızdır (giriş basıncı ile çıkış sinyali arasındaki dönüştürme faktörü) ve sıcaklık çıkış sinyaline bağlıdır. İkinci emir etkiler bazı birinci emir hata terimlerinin sıcaklık katsayıları kadar iyi çıkış cevaplaması içindeki doğrusal olmama durumlarını içerir. Karşılama ve doğrulama teknikleri elbette bulunan yöne doğru aletin ve yöntemlerin tasarlanması koşuluna bağlıdır. Örneğin şekilde lazer ayarlamalı direnç ile sıfıra yakın sıcaklık katsayılı direnç (TCR) birinci hataları doğrulamada kullanılmıştır. Fakat basınca duyarlı dirençlerin ortalama konsantrasyonu $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ veya $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ üzerindedir. Sofistike elektronik devrelerinde katkı konsantrasyon oranları ortamın üstünde olması gerekir ki wheatsone köprüsü sıcaklığı devamlı izleyebilsin.

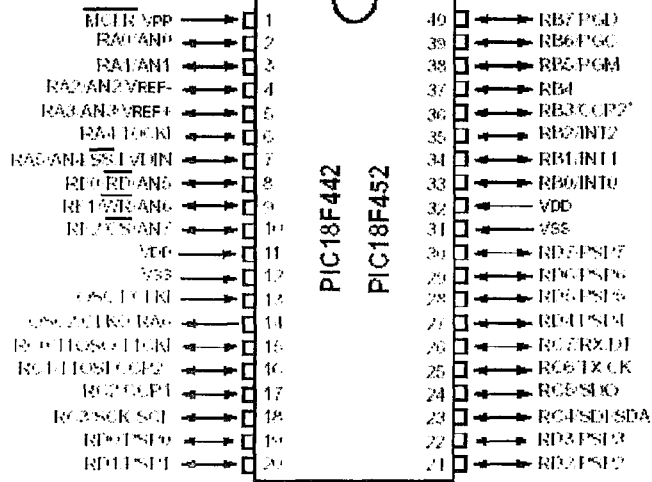
4.2. Microchip PIC18F452 Mikrodenetleyici

PIC, ingilizce Peripheral Interface Controller (Çevresel arabirim denetleyici) kelimelerinin baş harflerinin birleşmesinden meydana gelmiş giriş-çıkış işlemcisidir. İlk olarak 1994 yılında 16-bitlik ve 32-bitlik işlemcilerin giriş ve çıkışlarını denetlemek ve yükü azaltmak amacıyla ucuz ve hızlı bir çözüme ihtiyaç duyulduğu için geliştirilmiştir. Bu tezde microchip üretimi olan PIC18F452 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu denetleyicinin kullanılmasının nedenlerini sıralayacak olursak; Fiyatının ucuz olması, 10-bitlik mikrodenetleyici olması, bellek ve veri için ayrı yerleşik bus'ların kullanılması, lojik uygulamalarının hızlı olması ve flash program hafızasına sahip olması gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Bu özelliklerin en önemlilerinden biri flash programlamanın pic içinde yer almış olmasıdır.

PIC18F452 içinde bulunan flash program hafızasına, program belleğine, programlama esnasında, programlayıcı cihaz yardımıyla erişilebileceği gibi programın kendisiyle, çalışma esnasında da okuma-yazma yapmak mümkündür. Böylece programdan arta kalan bölgeyi veri kaydı-okunması için kullanılabilir. Mikrodenetleyicilerin flash program belleğine sahip olması sayesinde defalarca ve hızlı bir şekilde programlanabilirler. Bunların yanında 256x8 byte'lı EEPROM'u vardır. Bu belleğe erişim yavaş olsa da mikrodenetleyicinin içinde kullanıldığı cihazın kapatıldığı sırada kaybolmaması istenen verilerin kaydının tutulması için kullanılabilir.

PIC mikrodenetleyicilerin iç yapısı CPU bölgesinin kalbi olan ALU (aritmetik mantık birimi) dur. ALU, çalışan adında bir yazmacı içerir. PIC, diğer mikroişlemcilerden, aritmetik ve mantık uygulamaları için bir tek ana yazmaca sahip oluşuyla farklıdır.

DIP

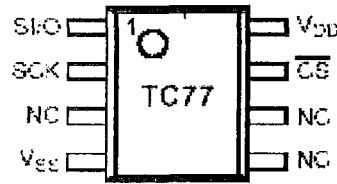


Şekil 4.5. PIC18F452 nin pin diyagramı şekilde gösterilmiştir.

PIC18F452'nin 33 adet I/O portu vardır. Bunlar 6 adet PORTA'da, 8 adet PORTB'de, 8 adet PORTC'de, 8 adet PORTD'de ve 3 adet de PORTE'de olmak üzere ayrılmıştır. Her bir port ayrı ayrı giriş veya çıkış olarak yazılımla programlanabilir. Projede kullanılan mikrodeneleyici devrenin fiziksel olarak gerçekleştirilmesinde kolaylık sağlaması için DIP kılıf içinde seçilmiştir. Microchip 18F452 in DIP pinout'u şekil 4.5.de gösterilmiştir. Kullanılan microdenteleyici hakkında daha geniş bilgi www.microchip.com internet adresinden elde edilebilir.

4.3. Microchip TC77 Sıcaklık Algılayıcısı

TC77, 12-bit artı işaretli Analog-Dijital dönüştürücü (ADC), 30 KHz dahili titreşim dönüşümü ve seri giriş/çıkışa sahip bant aralığı içeren bir sıcaklık algılayıcısıdır (Şekil 4.6.). Bu cihazlar üç hatlı seri arabirim özelliğine sahiptir ve bunun sonucunda mikrodeneleyicilerin ve işlemcilerin çoğu ile kolaylıkla haberleşebilmektedir. Kapatma modu, güce duyarlı uygulamalar için besleme akımını düşürmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Microchip ürünü olan TC77 nin pinout'u .

4.3.1. TC77 İçin Uygulama Bilgileri

TC77 sıcaklık ölçmek için herhangi bir ek parça gerektirmez. Fakat, VDD ve VSS (Toprak) pinleri arasına 0,1 ile 1 μ F aralığında yüksek frekanslı seramik kuplaj kondansatörünün konulması tavsiye edilmiştir.

TC77, IC kılıfına yerleştirilmiş bir diyotun voltaj kontrolü vasıtasıyla sıcaklığı ölçer. Kılıf ile baskılı devre kartı (PCB) arasında TC77 nin IC pinleri vasıtasıyla düşük dirençli bir ısı yol oluşturmuştur. Sonuç olarak; TC77, PCB kartının sıcaklığını etkili bir şekilde kontrol edebilir. Isıl yol ile çevre hava sıcaklığı arasında bir ısı yalıtımı yoktur. Böylece, çevre hava sıcaklığı TC77 vasıtasıyla çok az etkilerde bile sıcaklığı ölçme kapasitesine sahiptir.

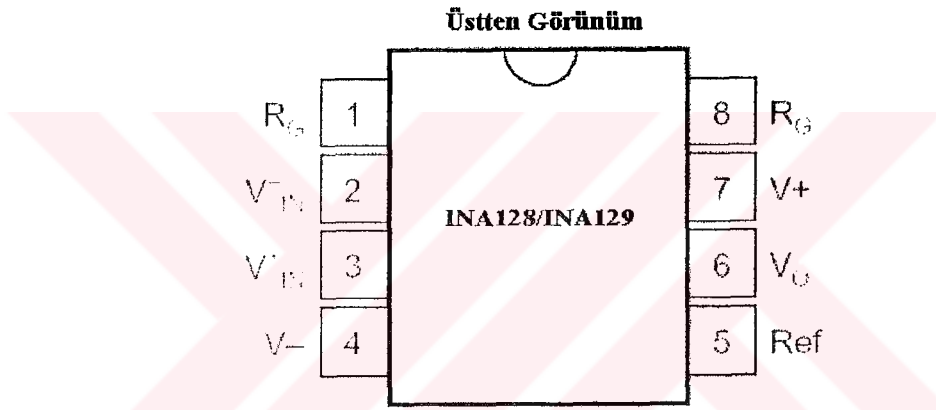
TC77, haberleşme hatlarına ağır bir şekilde yüklenilmesi durumunda otomatik ısıtma hata potansiyeli oluşabilir. Tipik olarak, otomatik ısıtma hatası TC77 nin düşük akım tüketimi ile ilişkili olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Sonuç olarak, sıcaklığın iyi bir şekilde ölçülebilmesi için haberleşme hatlarına yüklenen çıkış sinyalleri çok düşük olmalıdır.

4.4. INA128/INA129 Düşük Güçlü, Hassas Yükseltme Cihazları

INA128/INA129 düşük güçlü mükemmel doğruluk sağlayan yükselteç cihazlarıdır (Şekil 4.7.). Onlar, çok yönlü 3-op amp tasarımı ve küçük boyutları ile çok geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Giriş akımından geri besleme devresinin düzenlenmesi yüksek kazançlarda bile ($G=100$ de 200 KHz) geniş bir bant aralığı

sağlamıştır. Yerleştirilen harici tek direnç sayesinde kazanç; 1 den 10.000 kadar ayarlanabilir.

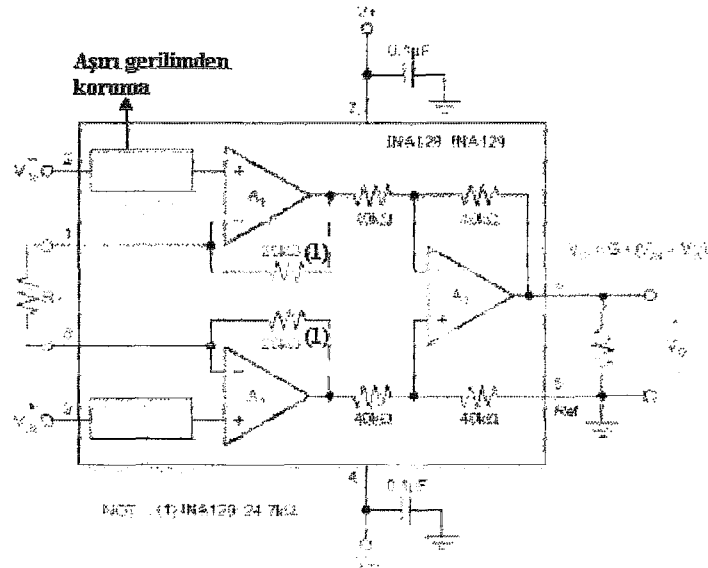
INA128/INA129 yüksek yaygın mod zayıflatma bandı ($G \geq 100$ de 120 dB) ve (0,5 mV/ °C) yönelimi ile çok düşük (50 mV) offset voltajının ayarlanmasını içermektedir. Onlar, $\pm 2,25$ V kadar düşük güç kaynakları ile çalışır ve pille çalışan sistemler için cevap akımı sadece 700 mA dir. INA128/INA129, -40 °C ile +85 °C aralığında uygulama sıcaklığı, SO-8 yüzey montajlı paketi ve DIP paketi, 8-pin plastik paket içinde üretilmiştir.



Şekil 4.7. Teksas cihazlar teknolojisinin bir ürünü olan INA128/INA129 ın pinout'u.

4.4.1. INA128/INA129 İçin Uygulama Bilgileri

Şekil 4.8. de INA128/INA129 un uygulaması için gereken basit bağlantılar gösterilmiştir. Güç kaynaklarının yüksek empedansını ve gürültüsünü önlemek amacıyla kuplaj kapasiteleri cihazın pinlerine eklenmiş ve bu şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Temel bağlantılar.

Çıkış, normalde toprak ile bağlı olan çıkış referans terminaline gönderir. Bu yaygın modda zayıflamayı sağlamak için düşük empedansla bağlanmıştır.

Kazancın ayarlanması aşağıdaki gibidir;

Kazancı ayarlama esnasında 1 ile 8 pinleri arasında harici R_G direnci bağlanmıştır.

INA128

$$G = 1 + 50k\Omega / R_G \quad (4.1.)$$

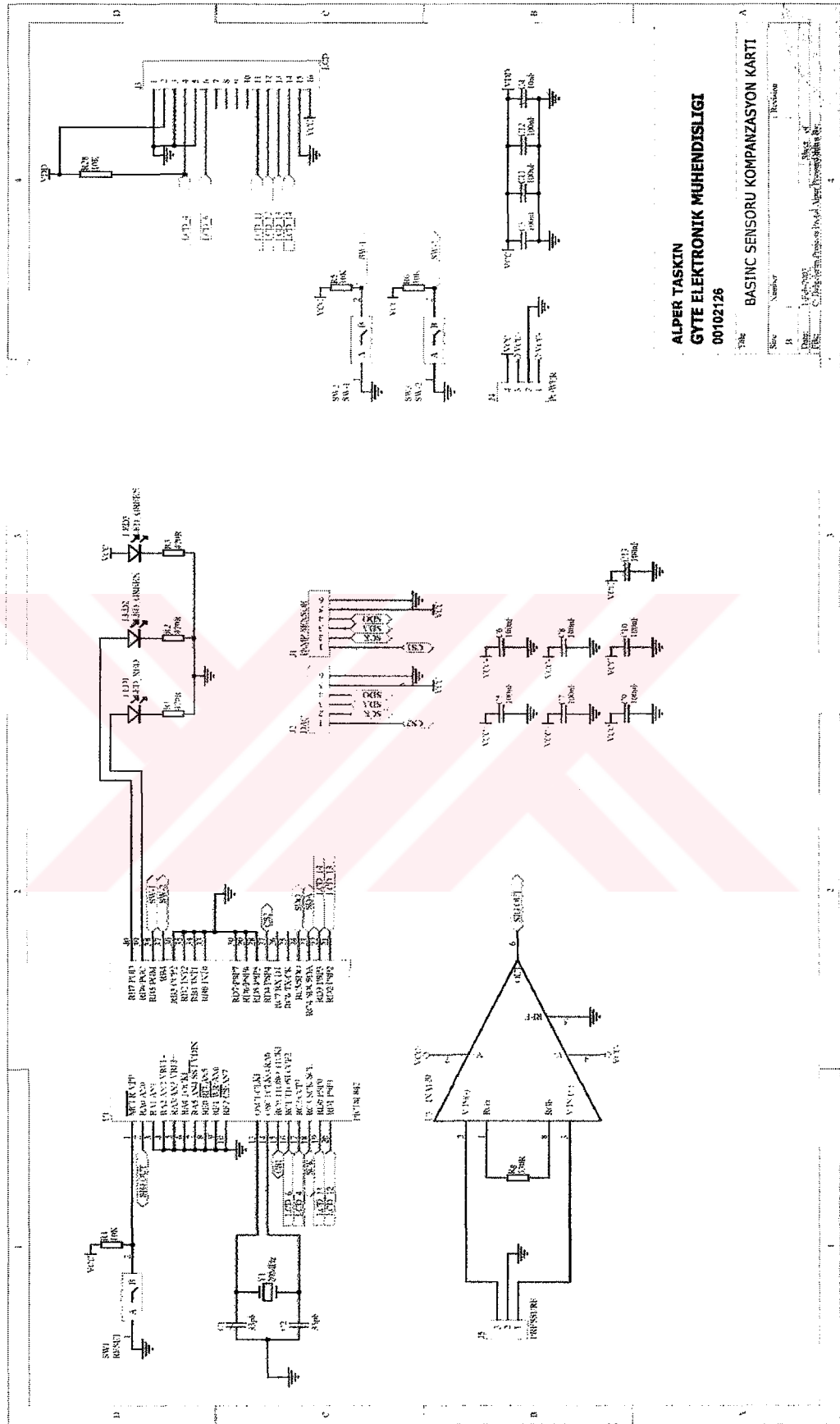
INA129

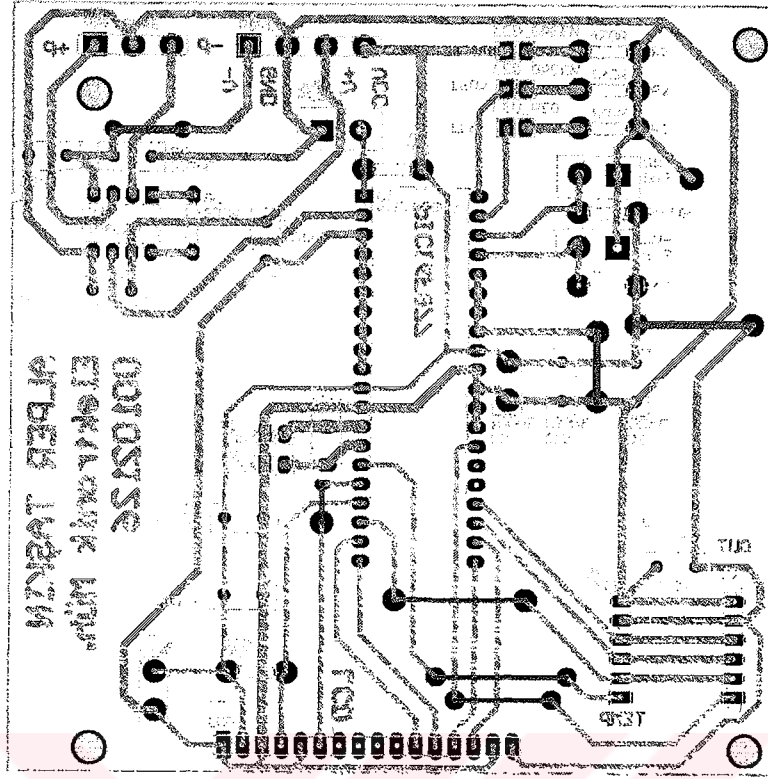
$$G = 1 + 49,4k\Omega / R_G \quad (4.2.)$$

Denklem 4.1. deki 50 kΩ terimi (denklem 4.2. deki 49,4 kΩ) A1 ve A2 dahili geri besleme dirençlerinin toplanmasından meydana gelmiştir. Bunlar çip üstündeki metal film dirençlerin mutlak doğruluk değerleri ile ayarlanmıştır. Harici direncin sıcaklık katsayısı da kazancı etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Ürün hakkında daha geniş bilgi isteniliyorsa eğer www.ti.com internet adresinden elde edilebilir.

4.5. Otomotiv Silikon Gauge Basınç Algılayıcısının Sıcaklık Kompanzasyonu

Otomotiv silikon gauge basınç algılayıcısının sıcaklık kompanzasyonu için microdenetleyici (microchip, PIC18F452) kartı tasarlanmıştır (Şekil 4.9.). Kartın tasarım aşamasına değinecek olursak; bakır plaka üzerine tasarım şablonun aktarılması ile kart oluşturulmuştur. Bu esnada, bakır plakanın yüzeyi ince toz deterjan ile pamuk yardımıyla temizlenmiş ve üzerinde herhangi bir yağ, toz katmanının olmamasına dikkat edilmiştir. Kartın kurumasının tamamlanmasından sonra kartın yüzeyine pozitif 20 püskürtülerek yayılmıştır. Pozitif 20 ışığa duyarlı bir maddedir onun için ışıktan mümkün olduğunca korunmalıdır. Kartın üstüne pozitif 20 maddesi püskürtüldükten sonra 24 saat beklenmiş ve bu sürenin sonunda protel tasarım programı kullanılarak çizilmiş devrenin lazer yazıcıdan aydinger üzerine çıktısı alınan PCB si bakır plakanın pozitif 20 püskürtülen tarafına yerleştirilmiştir. Bu işlem esnasında bakır plaka ile devre baskısının aktarılmış olduğu aydinger arasında herhangi bir hava boşluğunun olmamasına dikkat edilmiş ve bu hava boşluğunun oluşmasını engellemek için kart ve aydinger üzerine cam levha konularak sıkıca bastırılmak suretiyle tutulmuştur. Cam levha üzeri 300 wattlık ultraviyole lamba ile pozlandırılmıştır. Pozlandırılma süresi pozitif 20 nin kalınlığına göre takriben 3 ile 3,5 dakika arasındadır. Pozlandırma işleminin tamamlanmasından sonra bozulan pozitif 20 katmanının kaldırılması için kostik ile banyolanmış ve aydinger üzerindeki çizili yollar karta aktarılmış olduğu banyolamanın sonunda görülmüştür. Kart kostik içinden çıkarıldıktan sonra tekrardan bu sefer asit içine atılarak ışık alan bölgeler de bulunan bakır kısmın kaldırılması sağlanmıştır. En son işlem olarak baskı devresi asetonla silinerek temizlenmiş, kart matkapla delinmiş, elektronik elemanlar dikkatli şekilde monte edilerek lehimlenmiştir.



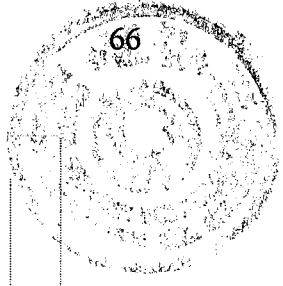
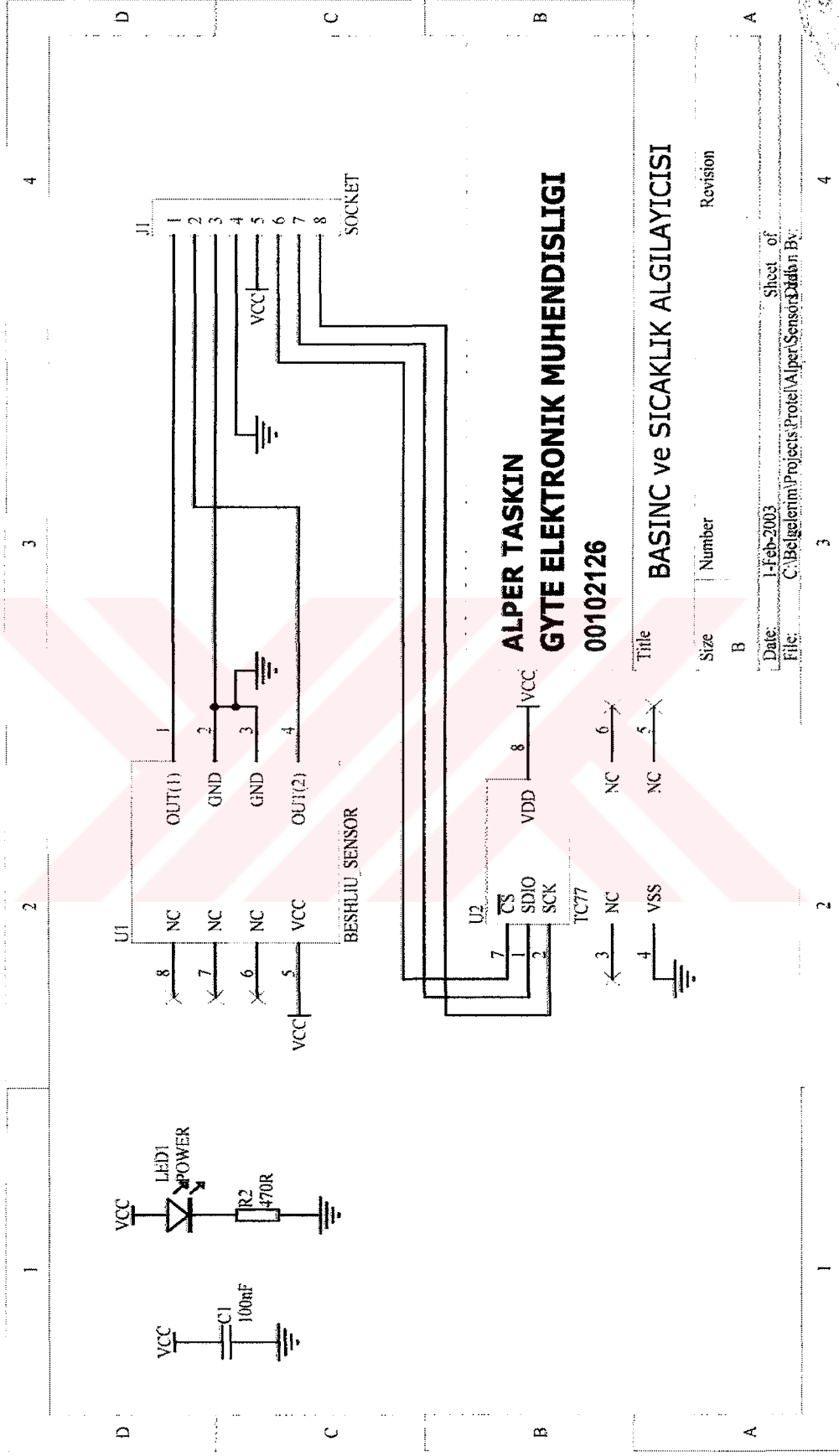


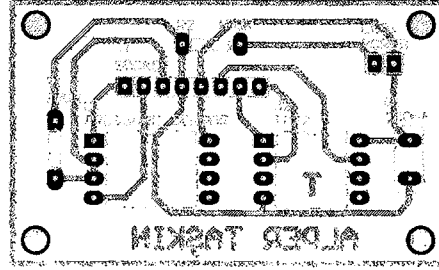
(b)

Şekil 4.9. Anakartın (a) uygulama devresi (b) baskılı devre kartı şemaları.

Kompanzasyon işlemini gerçekleştirecek olan PIC18F452 8-bitlik Flash hafıza ile 10-bitlik dahili ADC (analog-dijital çevirici) sahip bir mikrodnetleyicidir. PIC18F452 nin ADC girişleri tek uçlu ve 8 ADC girişine sahiptir. Fakat bu tezde kullanılan basınç algılayıcısının çıkışı farklı (çift) uçlu ve analog bir çıkışa sahiptir.

Biz bu basınç algılayıcısının çıkış değerlerini inceleyebilmek amacıyla, algılayıcının çıkışını mikrodnetleyicinin ADC uçlarından birine (Basınç algılayıcısının farklı uçlu çıkışlarını tek uçlu çıkış sinyaline dönüştürüp) tek uçlu sinyal olarak girilmiştir. Bu işlemi gerçekleştirmek için TL084 op-amp çipi kullanılmış fakat yapılan ölçümler sonucunda bu çipin yeteri kadar doğrusal bir çıkış vermediği saptanmıştır. Yapılan detaylı araştırmalardan sonra texas instruments INA129 yükselteç çipi alınmış ve ölçüler sonucunda çıkışının yeteri kadar doğrusal olması nedeniyle bu çipin mikrodnetleyici ile beraber kullanılmasına karar verilmiştir. INA129 basınç algılayıcısının farklı uçlu çıkış sinyallerini yaklaşık 23,78 gibi bir sayı ile çarparak mikrodnetleyicinin kullanımına uygun (tek uçlu) dönüştürmüştür. Çarpım katsayısı (23,78) INA129 un 1 ile 8 pinleri arasına eklenen harici 2,2 k Ω luk direnç ile belirlenmiştir.





(b)

Şekil 4.10. Basınç ve sıcaklık algılayıcısının; (a) Uygulama devresi (b) PCB baskılı devre kartı şemaları.

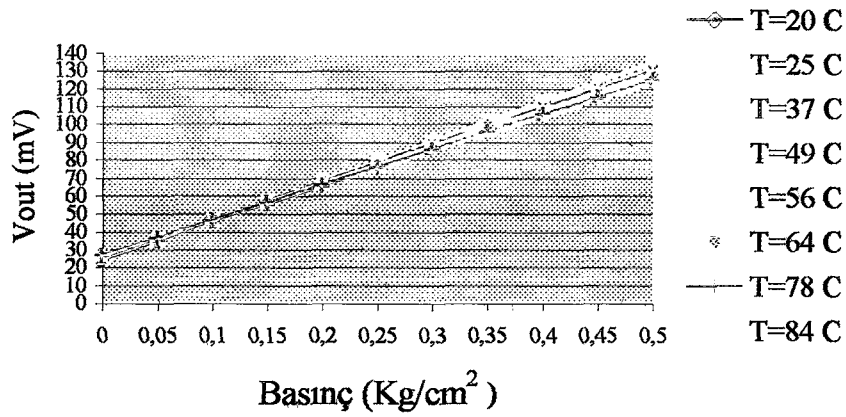
Ortamın sıcaklığını ölçmek için 12-bitlik TC77 çipi kullanılmıştır. Bu esnada basınç algılayıcısı ve TC77 sıcaklık algılayıcısının aynı kart üzerinde olması gerekli olduğundan dolayı yukarıda anlatılan yöntemlerle ikinci bir kart yapılmıştır (Şekil 4.10.). Basınç algılayıcısından ve TC77 sıcaklık algılayıcısından alınan bilgiler mikrodenetleyicide işlenerek 16 karakter x 2 satır sıvı kristalli display de çıkış gerilim değerleri mV olarak, basınç değeri kg/cm^2 olarak ve sıcaklık değeri $^{\circ}\text{C}$ olarak gösterilmiş ve çeşitli sıcaklıklardaki çıkış değerleri ölçülmüştür (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış çıkış değerleri.

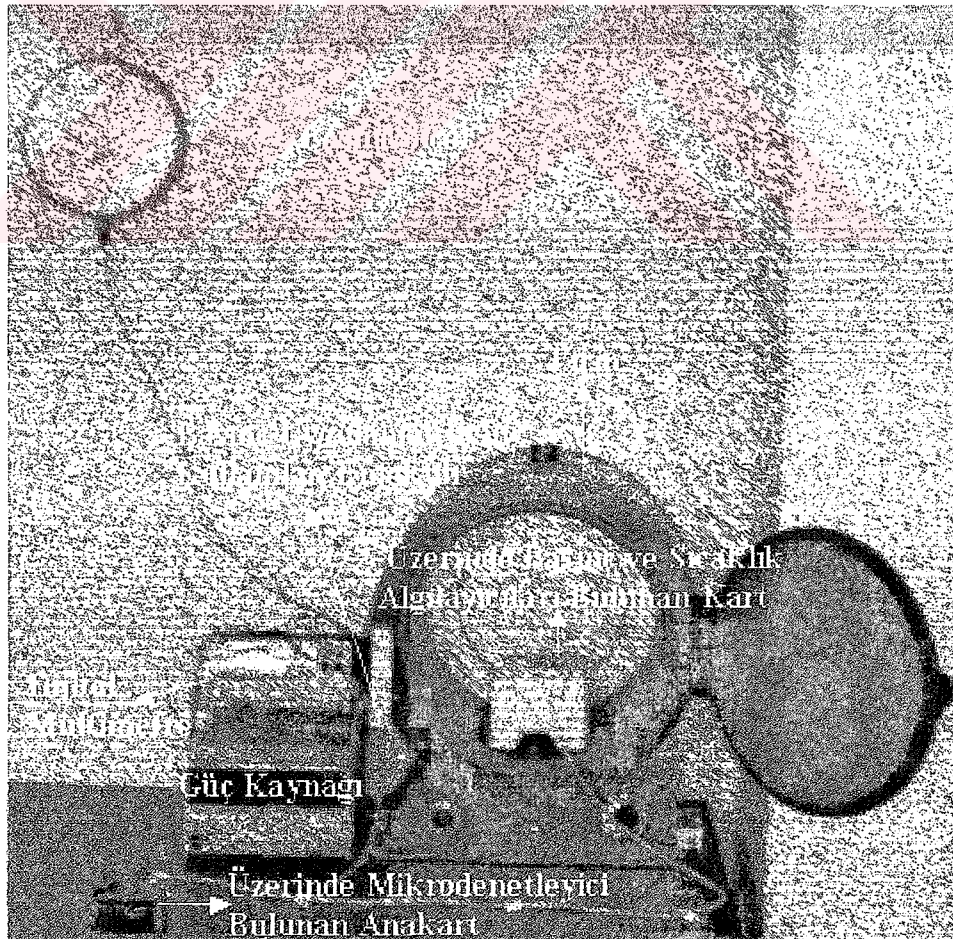
Basınç (kg/cm^2)	T=20 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 25 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 37 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 49 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 56 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 64 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)	T= 78 $^{\circ}\text{C}$ Vout (mV)
0	23,83	24,03	24,85	25,68	25,88	26,09	26,29
0,05	35,13	35,33	35,74	36,15	36,15	36,15	36,15
0,1	46,22	46,22	46,63	46,63	46,63	46,43	46,22
0,15	57,31	57,52	57,31	57,16	59,90	56,49	56,03
0,2	68,61	68,56	68,20	67,59	67,18	66,56	65,94
0,25	80,12	79,71	78,89	78,27	77,65	77,04	75,80
0,3	91,21	90,80	89,78	88,75	87,93	87,10	85,62
0,35	102,31	101,90	100,25	98,82	98,2	96,97	95,32
0,4	113,61	112,99	111,35	109,29	108,27	107,03	105,18
0,45	124,7	123,88	121,62	119,57	118,33	116,89	114,84
0,5	136	134,77	132,30	129,84	128,4	126,76	124,50

Çizelgeden de görüldüğü gibi basınç algılayıcısının çıkış değeri sıcaklıkla değişim göstermiş ve bu değişim sıcaklığın artışı ile offsetin arttığı bunun yanında duyarlılığın azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.11.). Bu tezin esas amacı sıcaklık

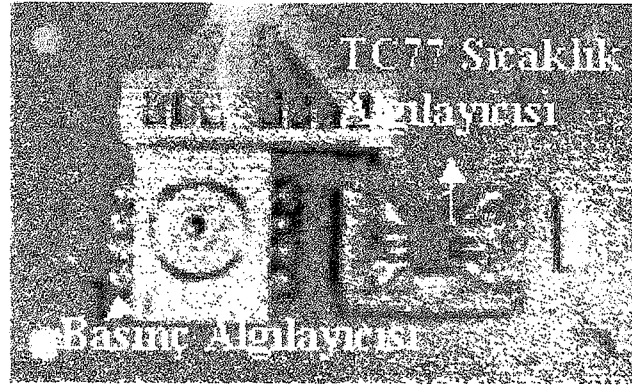
kompanzasyonu olduğunu daha öncede belirtmiştik ve bu doğrultuda $T=25^{\circ}\text{C}$ de çıkış değerlerinin herhangi bir sıcaklık değerinde de aynı olması amaçlanmıştır.



Şekil 4.11. Basınç algılayıcısının kompanze olmamış çıkış grafiği



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.12. (a) Deney düzeneği (b) Üzerinde basınç ve sıcaklık algılayıcıları bulunan kart (c) Üzerinde Microdenetleyici ve INA129 çipleri bulunan anakart.

Sıcaklık kompanzasyon denklemleri;

Basınç algılayıcısının farklı uçlu çıkışlarını, tek uçlu çıkışa çevirmek için kullanılan INA129 yükselteç çipi basınç algılayıcısının çıkışını yaklaşık 23,78 gibi bir sayı ile çarpmış ve mikrodnetleyicinin ADC ucuna girmiştik. Microdenetleyici

girilen bu değeri 0 ile 1023 arasında bir sayı olarak ekranda göstermiştir. Bu aşamada, gösterilen çıkış değerlerinin basınç algılayıcısının çıkış değeri ile yakın bir değer olması amacıyla aşağıdaki denklem uygulanmıştır.

$$\text{Pressmv} = ((\text{adc0} \times 4.998)/1023)/23.7804878 \quad (4.3.)$$

Hesaplanan bu değer sıcaklık kompanzasyon denkleminde sıcaklıkla beraber kullanılarak basınç hesaplanmış ve bu bulunan basınç değeri istenilen doğru denkleminde yerine konularak $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ de kompanzasyon gerçekleştirmek için microdenetleyici programlanmıştır.

$$P = (B \cdot (1 + \text{TCS} \cdot (T - 25)) \cdot \text{pressmv}) + (A \cdot (1 + \text{TCO} \cdot (T - 25))) \quad (4.4.)$$

$$\text{VOUTTEMP} = (\text{M_SLOPE} \cdot P) + \text{VOFF} \quad (4.5.)$$

Şekil 4.12. de görüleceği $\text{Vout}/\text{Basınç}$ değerleri doğrusaldır. Bu düşünceyle doğru denklemleri $y=mx+n$ fomülü ile hesaplanmıştır.

$$V = 0,22148 \cdot P + 24.03\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V = 0,21449 \cdot P + 24.85\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=37\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V = 0,20832 \cdot P + 25.68\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=49\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V = 0,20504 \cdot P + 25.88\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V = 0,20134 \cdot P + 26.09\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=64\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V = 0,19642 \cdot P + 26.29\text{e-}03 \quad \dots\dots\dots T=78\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Bu denklemlerden P (Basınç) değerini çekecek olursak;

$$P = 4.515080368 \cdot V - 0.1084973813 \quad \dots T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 4.653327129 \cdot V - 0.1156351792 \quad \dots T=37\text{ }^{\circ}\text{C}$$

T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI
TEKNOLOJİ VE YATAY GEÇİŞ BAKANLIĞI
MİLLÎ EĞİTİM AKADEMİSİ
MİLLÎ EĞİTİM AKADEMİSİ
MİLLÎ EĞİTİM AKADEMİSİ

$$P = 4.80030722 * V - 0.1232718894 \dots T = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 4.877097152 * V - 0.1262192743 \dots T = 56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 4.966722956 * V - 0.1295818019 \dots T = 64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 5.091131249 * V - 0.1338458405 \dots T = 78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Basınç değerin doğru bir şekilde hesaplanması gerektiğinden dolayı basınç denklemlerinden TCO ve TCS katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$TCS = (M_T - M_{25}) / (VDD * (T - 25)) \quad (4.6.)$$

$$TCS1 = (4.653327129 - 4.515080368) / (5 * (37 - 25)) \dots Tcs1 = 2.304112684e-03$$

$$TCS2 = (4.80030722 - 4.515080368) / (5 * (49 - 25)) \dots Tcs2 = 2.376890434e-03$$

$$TCS3 = (4.877097152 - 4.515080368) / (5 * (56 - 25)) \dots Tcs3 = 2.335592154e-03$$

$$TCS4 = (4.966722956 - 4.515080368) / (5 * (64 - 25)) \dots Tcs4 = 2.316115836e-03$$

$$TCS5 = (5.091131249 - 4.515080368) / (5 * (78 - 25)) \dots Tcs5 = 2.17377691 e-03$$

$$TCS_{ort.} = (TCS1 + TCS2 + TCS3 + TCS4 + TCS5) / 5 \quad (4.7.)$$

$$TCS = 2.301297604e-03 \text{ (mV/V/ } ^\circ\text{C)}$$

$$TCO = (O_T - O_{25}) / (VDD * (T - 25)) \quad (4.8.)$$

$$TCO1 = (0.1156351792 - 0.1084973813) / (5 * (37 - 25)) \dots TCO1 = 1.189632983e-04$$

$$TCO2 = (0.1232718894 - 0.1084973813) / (5 * (49 - 25)) \dots TCO2 = 1.231209008e-04$$

$$TCO3 = (0.1262192743 - 0.1084973813) / (5 * (56 - 25)) \dots TCO3 = 1.143347935e-04$$

$$TCO4 = (0.1295818019 - 0.1084973813) / (5 * (64 - 25)) \dots TCO4 = 1.081252338e-04$$

$$TCO5 = (0.1338458405 - 0.1084973813) / (5 * (78 - 25)) \dots TCO5 = 9.565456302 e-05$$

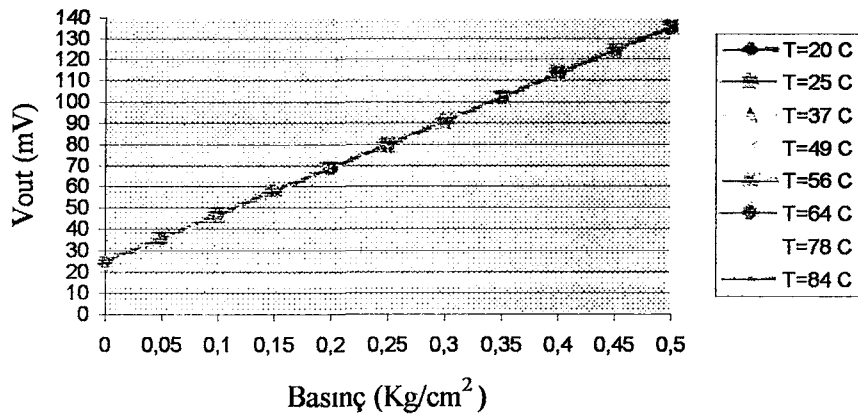
$$TCO_{ort.} = (TCO1 + TCO2 + TCO3 + TCO4 + TCO5) / 5 \quad (4.9.)$$

$$TCO_{ort.} = 1.120397579e-04 \text{ (mV/V/ } ^\circ\text{C)}$$

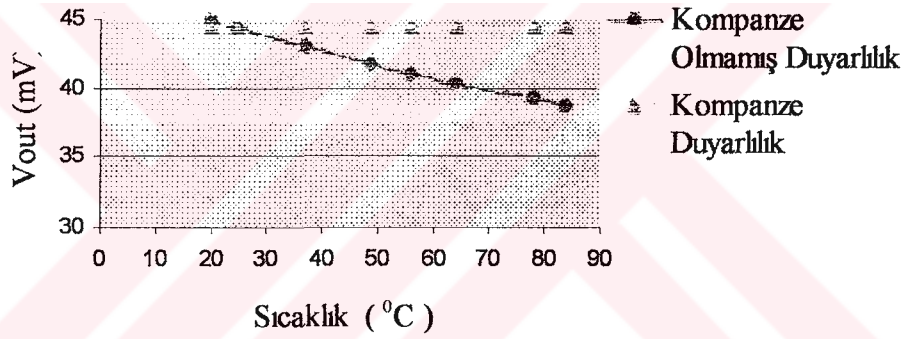
$$A = -0.1084973813$$

$$B = 4.515080368$$

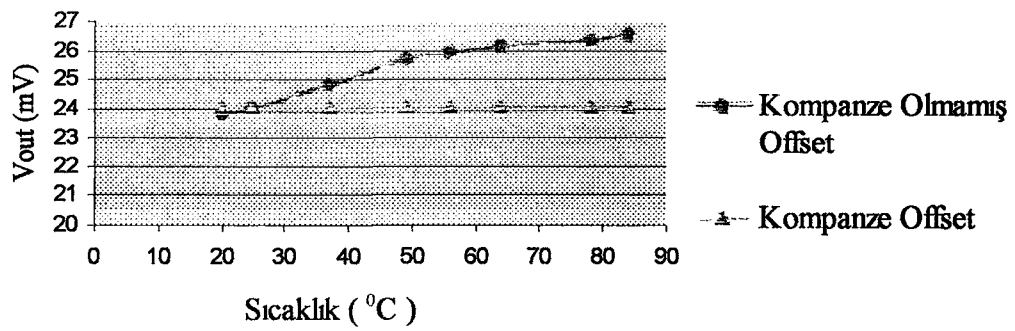
A ve B değeri T=25 °C deki değelerdir.



Şekil 4.13. Basınç algılayıcısının kompanse edilmiş çıkış grafiği.



Şekil 4.14. Basınç algılayıcısının kompanse olmamış ve kompanse edilmiş duyarlılığının çıkış grafiği.



Şekil 4.15. Basınç algılayıcısının kompanse olmamış ve kompanse edilmiş offsetinin çıkış grafiği.

Hesaplanan yeni değerler ve formüller microdenetleyiciye programlayıcı vasıtasıyla aktarılmıştır. Kompanzasyonu gerçekleştiren program:

```
#include "C:\Belgelerim\Projects\Pic\Aalper\alper\Alper-C\Alper-
18F452\Pressure.h"
#include <math.h>
#include "lcd_pbp.c"
#include <input.c>
#define CS PIN_C0
#define SCK PIN_C3
#define SDI PIN_C4
#define LED1 PIN_B7
#define LED2 PIN_B6
#define _TCO 0x00
#define _TCS 0x01
#define _A 0x02
#define _B 0x03
#define _VOFF 0x04
#define _SLOPE 0x07
boolean compensata_mode=true;
boolean display_raw_data=false;
boolean display_constants=false;
int32 roundtemp;
float gecici;
float get_float_232;
// averaging variables -----
float avg1,avg2,avg3,avg4;
int avgcount=0;
// calculation coefficients -----
int16 temperature;
int16 adc0,adc1,value;
float centig,pressmv;
float TCO=3.590142943e-03;
float TCS=2.301297604e-03;
```

```

float A=-0.1084973813;
float B=4.515080368;
float VOFF=24.03e-03;
float M_SLOPE=0.22148;
float P,VOUTTEMP;
// -----
// serial port variables
int  recv[5];
char rec;
int  recv_count=0;
boolean receiving=false;
boolean yuvarlamali=false;
// get float from rs-232-----
float get_float() {
    char s[20];
    float f;
    get_string(s,20);
    f=atof(s);
    return(f);
}
WRITE_FLOAT_EEPROM(long int n, float data) {
    int i;
    for (i = 0; i < 4; i++)
        write_eeprom(i + n, *(&data + i) );
}
float READ_FLOAT_EEPROM(long int n) {
    int i;
    float data;
    for (i = 0; i < 4; i++)
        *(&data + i) = read_eeprom(i + n);
    return(data);
}
// SERIAL PORT -----
#int_RDA

```

```

read_serial() {
    // 0xff - byte_id - float_byte0(low) - float_byte1 - float_byte2 - float_byte3
    rec=getch();
    if ((receiving==false) && (recv_count==0) && (rec==0xff))
    {
        receiving=true;
        printf("#RECEIVE");
    }
    else
    if ((receiving==true))
    {
        get_float_232=get_float();
        receiving=false;
        output_low(LED1);
        output_low(LED2);
        switch(rec)
        {
            case _TCO :
            {
                WRITE_FLOAT_EPROM(0, get_float_232);
                TCO =get_float_232;
                printf(lcd_putc, "\fTCO=\n%2.9f", TCO);
                printf("TCO=%2.9f\n", TCO);
                delay_ms(4000);
                break;
            }
            case _TCS :
            {
                WRITE_FLOAT_EPROM(4, get_float_232);
                TCS =get_float_232;
                printf(lcd_putc, "\fTCS=\n%3.8f", TCS);
                printf("TCS=%3.8f\n", TCS);
                delay_ms(4000);
                break;
            }
        }
    }
}

```

```
}  
case _A :  
{  
    WRITE_FLOAT_EEPROM(8, get_float_232);  
    A =get_float_232;  
    printf(lcd_putc, "\fA=\n%3.8f",A);  
    printf("A=%3.8f\n",A);  
    delay_ms(4000);  
    break;  
}  
case _B :  
{  
    WRITE_FLOAT_EEPROM(12, get_float_232);  
    B =get_float_232;  
    printf(lcd_putc, "\fB=\n%4.8f",B);  
    printf("B=%4.8f\n",B);  
    delay_ms(4000);  
    break;  
}  
case _VOFF :  
{  
    WRITE_FLOAT_EEPROM(16, get_float_232);  
    VOFF =get_float_232;  
    printf(lcd_putc, "\fVOFF=\n%4.8f",VOFF);  
    printf("VOFF=%4.8f\n",VOFF);  
    delay_ms(4000);  
    break;  
}  
case _SLOPE :  
{  
    WRITE_FLOAT_EEPROM(28, get_float_232);  
    M_SLOPE =get_float_232;  
    printf(lcd_putc, "\fTCK=\n%4.8f",M_SLOPE);  
    printf("TCK=%4.8f\n",M_SLOPE);
```

```

        delay_ms(4000);
        break;
    }
}

}

// READ TEMPERATURE --(TC77)-----
void read_temperature()
{
    output_low(CS);
    //bit12
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,12); break;
        case 1 : bit_set(temperature,12); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
    //bit11
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,11); break;
        case 1 : bit_set(temperature,11); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
    //bit10
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,10); break;
        case 1 : bit_set(temperature,10); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);

```

```
//bit9
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,9); break;
        case 1 : bit_set(temperature,9); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
//bit8
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,8); break;
        case 1 : bit_set(temperature,8); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
//bit7
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,7); break;
        case 1 : bit_set(temperature,7); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
//bit6
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,6); break;
        case 1 : bit_set(temperature,6); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
//bit5
    output_high(SCK);
```

```
switch (input(SDI)) {
    case 0 : bit_clear(temperature,5); break;
    case 1 : bit_set(temperature,5); break; }
delay_ms(10);
output_low(SCK);
delay_ms(5);
//bit4
output_high(SCK);
switch (input(SDI)) {
    case 0 : bit_clear(temperature,4); break;
    case 1 : bit_set(temperature,4); break; }
delay_ms(10);
output_low(SCK);
delay_ms(5);
//bit3
output_high(SCK);
switch (input(SDI)) {
    case 0 : bit_clear(temperature,3); break;
    case 1 : bit_set(temperature,3); break; }
delay_ms(10);
output_low(SCK);
delay_ms(5);
//bit2
output_high(SCK);
switch (input(SDI)) {
    case 0 : bit_clear(temperature,2); break;
    case 1 : bit_set(temperature,2); break; }
delay_ms(10);
output_low(SCK);
delay_ms(5);
//bit1
output_high(SCK);
switch (input(SDI)) {
    case 0 : bit_clear(temperature,1); break;
```

```

        case 1 : bit_set(temperature,1); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
//bit0
    output_high(SCK);
    switch (input(SDI)) {
        case 0 : bit_clear(temperature,0); break;
        case 1 : bit_set(temperature,0); break; }
    delay_ms(10);
    output_low(SCK);
    delay_ms(5);
}

// Y U V A R L A M A -----
float yuvarla_10(float yuvarlanacak)
{
    roundtemp=(int32)floor(yuvarlanacak*10);
    return((float)roundtemp/10);
}
float yuvarla_100(float yuvarlanacak)
{
    roundtemp=(int32)floor(yuvarlanacak*100);
    return((float)roundtemp/100);
}
float yuvarla_1000(float yuvarlanacak)
{
    roundtemp=(int32)floor(yuvarlanacak*1000);
    return((float)roundtemp/1000);
}
float yuvarla_100000(float yuvarlanacak)
{
    roundtemp=(int32)floor(yuvarlanacak*100000);
    return((float)roundtemp/100000);
}

```

```
// M A I N -----
void main() {
    setup_adc_ports(RA0_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(FALSE);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(global);
    SET_TRIS_A( 0xFF );
    SET_TRIS_C( 0x90 );
    SET_TRIS_B( 0xCF );
    output_high(CS);
    output_low(SCK);
    delay_ms(500);
    lcd_init();
    delay_ms(6);
    printf(lcd_putc," ALPER TASKIN\n");
    printf(lcd_putc,"00102126 MART'03");
    delay_ms(2000);
    if ( !input(PIN_B5) & !input(PIN_B4))
    {
        printf(lcd_putc,"\fFirmware Version\n");
        printf(lcd_putc,"v1.1 , PIC18F452");
        delay_ms(2000);
    }
    else
    if ( !input(PIN_B5) & input(PIN_B4))
    {
        printf(lcd_putc,"\fDISPLAY RAW\n");
```

```

printf(lcd_putc, "(ADC) DATA");
display_raw_data=true;
delay_ms(2000);
}
else
if ( input(PIN_B5) & !input(PIN_B4))
{
printf(lcd_putc, "\fUSING EEPROM\n");
printf(lcd_putc, "PARAMETERS");
TCO=READ_FLOAT_EEPROM(0);
TCS=READ_FLOAT_EEPROM(4);
A=READ_FLOAT_EEPROM(8);
B=READ_FLOAT_EEPROM(12);
VOFF=READ_FLOAT_EEPROM(16);
M_SLOPE=READ_FLOAT_EEPROM(28);
delay_ms(2000);
}
if (yuvarlamali)
{
printf("\fROUNDING ACTIVE");
}
else
{
printf("\fNO ROUNDING");
}
set_adc_channel( 0 );
// loop -----
loop:
// ustteki buton basili
if ( !input(PIN_B5) && input(PIN_B4))
{
if (!compansate_mode)
{
compansate_mode=true;

```

```

    printf(lcd_putc, "\fCOMPANSATE MODE\n");
    delay_ms(1200);
}
else
{
    compensata_mode=false;
    printf(lcd_putc, "\fMEASUREMENT MODE\n");
    delay_ms(1200);
}
}

// iki buton beraber basili
if ( !input(PIN_B4) && !input(PIN_B5))
{
    printf(lcd_putc, "\fTCO=\n%3.8f", TCO);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
    printf(lcd_putc, "\fTCS=\n%3.8f", TCS);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
    printf(lcd_putc, "\fA=\n%3.8f", A);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
    printf(lcd_putc, "\fB=\n%3.8f", B);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
    printf(lcd_putc, "\fVOFF=\n%3.7f", VOFF);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
    printf(lcd_putc, "\fSLOPE=\n%3.8f", M_SLOPE);
    delay_ms(2500);
    if ( input(PIN_B4) ) goto no_constant_display;
}

// alttaki buton basili
if ( !input(PIN_B4) && input(PIN_B5))

```

```
{
    if (!yuvarlamali)
    {
        yuvarlamali=true;
        printf(lcd_putc, "\fSENSOR-2\n");
        delay_ms(1200);
        TCO=5.256964184e-03;
        TCS=1.855396667e-03;
        A=-0.07923353504;
        B=4.384811015;
        VOFF=18.07e-03;
        M_SLOPE=0.22806;
    }
    else
    {
        yuvarlamali=false;
        printf(lcd_putc, "\fSENSOR\n");
        printf(lcd_putc, "COMPENSATION");
        delay_ms(1200);
        TCO=3.590142943e-03;
        TCS=2.301297604e-03;
        A=-0.1084973813;
        B=4.515080368;
        VOFF=24.03e-03;
        M_SLOPE=0.22148;
    }
}

no_constant_display:
temperature=0;
centig=0;
adc0 = read_ADC();
delay_ms(20);
read_temperature();
centig=temperature*0.0625;
```

```

centig=yuvarla_10(centig);
pressmv=((adc0*4.998)/1023)/23.7804878;
if (!compansate_mode)
{
    // measurement mode
    avgcount++;
    switch (avgcount)
    {
        case 1: avg1=pressmv;
        case 2: avg2=pressmv;
        case 3: avg3=pressmv;
        case 4: avg4=pressmv;
    }
    if (avgcount==4)
    {
        output_high(LED2);
        delay_ms(20);
        output_low(LED2);
        delay_ms(10);
        avgcount=0;

        pressmv=(avg1+avg2+avg3+avg4)/4;
        if (yuvarlamali)
            pressmv=yuvarla_100000(pressmv);
        P=(B*(1+TCS*(centig-25))*pressmv)+(A*(1+TCO*(centig-25)));
        if (P<0) P=0;
        P=yuvarla_100(P);
        if (!display_raw_data)
            printf(lcd_putc, "\fT=%2.1f P=%1.2f\n", centig, P);
        else
            printf(lcd_putc, "\fT=%2.1f adc=%lu\n", centig, adc0);
            printf(lcd_putc, "V=%3.2f", pressmv*1000);
            printf("+V*%3.2f", pressmv);
            delay_ms(20);
            printf("+T*%2.1f", centig);

```

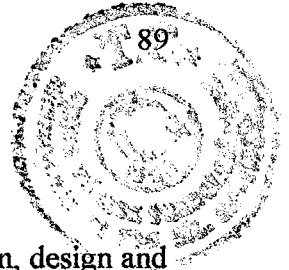
```

        delay_ms(20);
        printf("+P*%1.2f",P);
        delay_ms(20);
    }
}
else
{
    // compensation mode
    output_high(LED1);
    delay_ms(20);
    output_low(LED1);
    delay_ms(10);
    if (yuvarlamali)
        pressmv=yuvarla_100000(pressmv);
    P=(B*(1+TCS*(centig-25))*pressmv)+(A*(1+TCO*(centig-25)));
    if (P<0) P=0;
    P=yuvarla_100(P);
    VOUTTEMP=(M_SLOPE*P)+VOFF;
    printf(lcd_putc,"\fVo=%3.2f T=%2.1f\n",pressmv*1000,centig);
    printf(lcd_putc,"V=%3.2f P=%1.2f\n",VOUTTEMP*1000,P);
    printf("+O*%3.2f",VOUTTEMP);
    delay_ms(20);
    printf("+T*%2.1f",centig);
    delay_ms(20);
    printf("+V*%3.2f",pressmv);
    delay_ms(20);
}
delay_ms(150);
output_high(CS);
goto loop;
}

```

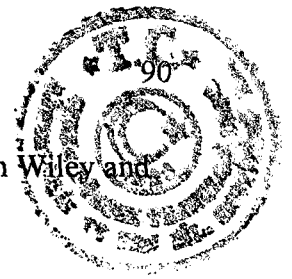
5. SONUÇ

Düşük maliyet ve yüksek hacimde üretim yetenekleri, uygulama esnekliği ve zor çevre koşullarına direnme gibi unsurlar otomotiv basınç algılayıcısının tasarlanmasında rol oynayan çeşitli etkenler; algılayıcı element, işaret işleme, kalibrasyon, kompanzasyon ve paketlenme işlemlerini tüm yönleri ile etkilemiştir. Bu amaç doğrultusunda otomotiv basınç algılayıcısının üretim yöntemleri ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir. Bu tezin esas amacı olan basınç algılayıcısının Microchip PIC18F452 mikrodenetleyicisi vasıtasıyla 25 °C sıcaklık kompanzasyonu gerçekleştirilmiş ve yapılan işlemler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



KAYNAKLAR

1. Judy, Jack W.: "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications", Institute of Physics Publishing, Los Angeles, 1115, 2001.
2. Huff, Michael A.: "MEMS Manufacturing", The MEMS Exchange Reston, Virginia 20191, 2000.
3. Mladenovic, Dragan and Verma, Rajan: "Bringing MEMS Pressure Sensors to Market—FAST", Motorola, Tempe, 2001.
4. Ristic, Ljubisa: "Sensor Technology and Devices", Artech House, Boston, 377, 1994.
5. Weinberg, Harvey: "MEMS Sensors Are Driving the Automotive Industry", Analog Devices, Cambridge, 2002.
6. Maluf, Nadim: "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", Artech House, Boston, 51-71, 2000.
7. Sio, Wannok: "Microelectromechanical System", 4, 2002.
8. "An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)", PRIME Faraday Partnership, 1-14, 2002.
9. Gardner, Julian W. et al.: "Microsensor, MEMS, Smart Devices", John Wiley and sons, USA, 17-21, 2001.
10. Monk, David J.: "MEMS Physical Sensors for Automotive Applications", Motorola, Tempe, 2001.
11. Jurgen, Ronald K.: "Automotive Electronics Handbook", McGraw-Hill, USA, 2.3, 1995.
12. Frank, Randy: "Understanding Smart Sensors" Motorola, Artec House, Boston, 225-238, 1996.
13. Xio, Hang: "Introducing to Semiconductor Manufacturing Technology", Prentice Hall, Ohio, 53-98, 2001.
14. Varadan, Vijay K. Et al.: "www.wileyvch.de/vch/journals/2081/books/2081_rel_title_varadan.pdf", 5, 2001.
15. Kovacs, Gregory T. A. Et al.: "Bulk Micromachining of Silicon", IEEE, 1536, 1998.
16. Sze, S. M.: "Semicondutor Devices Physics and Technology", John Wiley and sons, USA, 443, 2002.



17. Sze, S. M.: "Semicondutor Devices Physics and Technology", John Wiley and sons, USA, 1985.
18. Kano, Kanaan: "Semicondutor Devices", Prentice Hall, 175, 1998.
19. Elwenspoek, Miko and Wiegering, Remco: "Mechanical Microsensors", springer-
rverlag, Berlin, 259-260, 2001.
20. Peatman, John B.: "Embedded Design With the PIC18F452 Microcontroller",
Prentice Hall, 2, 2002.





ÖZGEÇMİŞ

Alper TAŞKIN 1978 de İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini sırasıyla Tüpraş ilköğretim okulu ve Tüpraş 50.yıl lisesi okullarında izmit'te tamamladı. 1996 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh. bölümünü kazandı ve 2000 yılında mezun oldu. 2000 yılında G.Y.T.E. yüksek lisans sınavına katıldı ve sınavda başarılı oldu. G.Y.T.E. yabancı diller bölümünde hazırlık okudu. Halen G.Y.T.E. Elektronik Müh. bölümü yüksek lisans öğrencisidir.

