

**Mikrobolometre Tipi Soğutmasız Kızılötesi Dedektör
Dizinlerine Uygun Silisyum Disk Seviyesinde Vakum
Paketleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi**

Program Kodu: 1003

Ana Proje No: 115E060

Alt Proje No: 115E061

Ana Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Yunus Eren KALAY

Alt Proje Yürütücüsü:
Engin Ufuk TEMOÇİN

Araştırmacı(lar):

Dr. İsmail Erkin GÖNENLİ
Ali Şükrü ÇUBUKÇU

Danışman(lar):

Prof.Dr. Macit Özenbaş

Bursiyer(ler):

Berkin Nergis
Ayşe Duman
Emel Erdal
Oğuzhan Temel

OCAK 2019
ANKARA

Önsöz

TÜBİTAK 1003 kapsamında gerçekleştirilen “Mikrobolometre Tipi Soğutmasız Kızılötesi Dedektör Dizinlerine Uygun Silisyum Disk Seviyesinde Vakum Paketleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi” başlıklı 115E060 sayılı Ana Proje ve 115E061 sayılı Alt Proje ile soğutmasız kızılötesi dedektörler için vakum paketleme süreçlerinde kullanılabilecek, dedektör üretim süreçleriyle ve dedektörlerin üretildiği CMOS tabanlarla uyumlu bir paketleme yöntemi geliştirilmesi ve proje kapsamında üretilmiş soğutmasız kızılötesi dedektörlere disk seviyesinde uygulanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda Au-Sn alaşım sistemi özelinde geçici sıvı faz bağlama (TLP) methodu geliştirilmiştir.

Proje TÜBİTAK ARDEB 1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı, BT0501 – Mikro / Nano Elektro-Mekanik Sistemler Çağrısı altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Projenin yürütülmesi sürecinde her türlü destek ve katkıları için tüm proje çalışanlarına, TÜBİTAK ARDEB, EEEAG ve MADES personeline, ODTÜ akademik ve idari personeline, ASELSAN A.Ş. teknik ve idari personeline ve projenin mali desteği için TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür edilmektedir.

İçindekiler

Tablo ve Şekil Listeleri.....	iii
Özet	viii
Abstract.....	ix
Sonuç Raporu Ana Metni	1
1 Giriş.....	1
2 Literatür Özeti	3
2.1 Silisyum Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemleri.....	5
2.1.1 İnce Film Kaplama ile Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemi	5
2.1.2 Disk Bağlama ile Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemi	6
3 Gereç ve Yöntem.....	14
4 Bulgular	25
4.1 Silisyum Disk Seviyesinde Paketleme Malzemesinin Geliştirilmesi	25
4.1.1 Ötektik Yapıların Belirlenmesine Yönelik Teorik Çalışmalar	25
4.1.2 Şekillendirilmemiş Silisyum Disk Bağlama Deneyleri	32
4.1.3 Şekillendirilmemiş Disk Karakterizasyon Deneyleri	33
4.1.4 Silisyum disk şekillendirme çalışmaları	34
4.1.5 Şekillendirilmiş Silisyum Disk Bağlama ve Karakterizasyon Deneyleri	36
4.2 Mikrolometrelerin Oluşturulması ve Paketlenmesi.....	66
4.2.1 Mikrolometrelerin Oluşturulması	66
4.2.2 Mikrolometre Paketleme	71
4.2.3 Performans Testleri	81
5 Tartışma / Sonuç	85
Ek-1. Kaynaklar	91

Tablo ve Şekil Listeleri

Tablo 2.1 Altın Kalay malzeme sisteminde bulunabilecek fazların fiziksel özellikleri [30,31].....	12
Tablo 3.1 MIL-STD 883 nolu askeri standarda göre elektronik aygıt paketleri için He kaçak testi koşulları.....	23
Tablo 4.1 Optimizasyon çalışmalarına yönelik Au ve Sn ince film kaplama kalınlıkları.....	28
Tablo 4.2 Uygulanan He Kaçak Test Koşulları	63
Tablo 4.3 MT3825BA Bolometre diski 051 nolu sensörün Dewar içindeki test sonuçları. Test sırasında dewar içi basınç 16 mTorr olarak ölçülmüştür.	83
Şekil 2.1 Yatay elektriksel iletim hattının şematik gösterimi [7].	4
Şekil 2.2 Dikey elektriksel iletim hattının şematik gösterimi [8].	4
Şekil 2.3 Dedektör seviyesinde tek tek paketleme (a) ve silisyum disk seviyesinde paketlemenin (b) şematik gösterimleri [2].	5
Şekil 2.4 İnce film paketleme yöntemi (a) ve disk bağlama yönteminin (b) şematik çizimi [9].	5
Şekil 2.5 İnce film paketleme yönteminin süreç adımlarının şematik gösterimi [10].	6
Şekil 2.6 Altın-Silisyum ikili faz diyagramı ve ötektik faz değişim noktası [21].	8
Şekil 2.7 TLP bağlama yöntemini anlatan şematik çizim.	9
Şekil 2.8 Altın-Kalay ikili faz diyagramı ve diyagram üstünde TLP bağlama sırasında gerçekleşen kompozisyon değişiminin faz diyagramı üzerinden gösterimi [29].	10
Şekil 2.9 Farklı bağlama sıcaklığı ve sürelerinde Au-Sn malzeme sistemiyle TLP bağlamaları gerçekleştirilmiş örneklerin kesit alanı mikroskop fotoğrafları (a-e) [24].	11
Şekil 2.10 Au-Sn TLP bağlama için kullanılmış katmanların elektro kaplama ile kaplanmış halleri ve bağlama sonrasında oluşacak tahmini yapının şematik gösterimi (a) ve bağlaması gerçekleştirildikten sonra yapılan optik mikroskop kesit alanı incelemesi (b). EDS analizi, metal yapının Au/ ζ / Au olarak oluştuğunu göstermiştir [32].	12
Şekil 2.11 Au-Sn TLP bağlama yöntemi ile gerçekleştirilmiş bağın kesit alanı SEM görüntüsü ve görüntüdeki farklı fazlara ait EDS kimyasal analiz sonuçları [33].	13
Şekil 3.1 Tasarlanmış paketleme yapıları.....	14
Şekil 3.2 Ark ile ergitme ünitesi (a) ve üretilmiş ingot örneği (b) fotoğrafları.	15
Şekil 3.3 İnce film metal katmanların kaplanmasında kullanılan AJA saçtırma (a) ve Varian 3119 termal buharlaştırma (b) sistemlerinin fotoğrafları.....	16
Şekil 3.4 EVG Maske Hizalama ve UV aydınlatma cihazı (a) ve silisyum disk şekillendirme sürecinin şematik gösterimi (b).	17
Şekil 3.5 EVG 520 Disk Bağlama Cihazı.....	18
Şekil 3.6 DSC cihazı	19
Şekil 3.7 PVA TePla firmasından temin edilen SAM 301 HD model taramalı akustik mikroskop cihazı.....	20

Şekil 3.8 Nordson Dage Bond Tester cihazının (a) ve test edilecek çip ile test kafasının test öncesi fotoğrafı (b).....	21
Şekil 3.9 Silisyum disklerin kuru aşındırmasında kullanılan STS DRIE sistemi.	22
Şekil 3.10 Diyafram çökmesi ve hücre içindeki vakumun şematik gösterimi. ω_{max} maksimum çökme miktarını belirtmektedir.....	22
Şekil 3.11 He kaçak testi için örneklerin kesilerek ayrılması (a) ve test için oluşturulan düzeneklerin (b) fotoğrafları.....	24
Şekil 4.1 Saf altın ve saf kalayın birbiri içinde difüzyonu.	26
Şekil 4.2 Au-Sn faz diyagramı kullanılarak 300°C'de oluşturulmuş saf altın veya saf kalaydan başlayan difüzyon ve faz dönüşüm şeması.	27
Şekil 4.3 TiW/Sn kaplamanın kesitten (a) ve üstten çekilmiş (b) elektron mikroskopi görüntüleri.	28
Şekil 4.4 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/200nm kaplamanın kaplandığı halinin (a), DSC deneyleri sonrasının (b)-(c) elektron mikroskobu görüntüleri. Oluşan proötektik faz (c)'de gösterilmiştir. .	29
Şekil 4.5 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/250nm kaplamanın DSC deneyleri sonrasının elektron mikroskobu görüntüleri (a)-(b). Oluşan proötektik faz (b)'de gösterilmiştir.....	29
Şekil 4.6 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/300nm kaplamanın DSC deneyleri sonrasının elektron mikroskobu görüntüleri (a)-(b). Oluşan ötektik faz (b)'de yüksek büyütme olarak gösterilmiştir.	29
Şekil 4.7 Ark ile ergitme ile üretilmiş ötektik numunenin optik mikroskop görüntüsü (a) ve X-ışını kırınım deseni (b).	30
Şekil 4.8 Yekpare olarak hazırlanmış ötektik alaşımın silisyum disk üzerine kaplanması sonrası elde edilmiş DSC sinyali (a) ve yüzey görüntüleri (b).	30
Şekil 4.9 300°C ve 20 dakika süresince N ₂ ortamında Cr (a), Ti (b), TiW (c) ve Ti/Ni (d) katmanlar üzerinde Au-Sn ötektik alaşımın ısıtma sonrası elektron mikroskobu görüntüleri.....	31
Şekil 4.10. TiW (a) ve Cr (b) katman üzerinde ötektik yapılarla 10°C /dak. ısıtma ve soğuma hızlarında gerçekleştirilen DSC analizleri. Oklar ötektik ergime noktasını işaret etmektedir.	32
Şekil 4.11 Şekillendirilmemiş boş silisyum disklerin ötektik bağlama ile birleştirilmeleri (a) ve (b).	33
Şekil 4.12 Şekillendirilmemiş boş silisyum disklerden elde edilmiş kesme mukavemet sonuçları.	33
Şekil 4.13 Şekillendirilmiş silisyum disk örneği.....	34
Şekil 4.14 Boşluğun optik profilometre ölçümüyle oluşturulan üç boyutlu çizimi ve ölçüm yapılan bölgeye ait optik mikroskop fotoğrafları.	36
Şekil 4.15 Ötektik Au-Sn alaşımını kullanılarak yapılan 3 set bağlama deneyinin şematik gösterimi.	37

Şekil 4.16 Altın-kalay faz diyagramı. Mavi çizgiler: klasik TLP uygulaması, kırmızı çizgiler: Ötektikten TLP uygulaması, Siyah Çizgiler: Ötektik ve ötektikten TLP için hedeflenen kompozisyonlar.	38
Şekil 4.17 Çift taraflı Au-Sn alaşımı kaplanmış, şekillenmiş olarak ötektik paketleme yapılan numunenin kesme testi sonuçları ve aseton testi sonrası aseton geçirmeyen bölgelerde kesme numunelerinin pozisyonları.	39
Şekil 4.18 Her iki tarafına da Au-Sn alaşımı kaplanmış ve şekillenerek paketlenmiş numunede kesme testi sonucu oluşan yüzeylerin SEM ve EDS incelemeleri.	40
Şekil 4.19 Au-Sn ötektik alaşımının ısı işlem sonrası yüzeyde toparlanması (DSC'de 320°C'ye ısıtılıp 5 dakika bekleme sonrası soğutulması).	40
Şekil 4.20 Aseton testi sonrası bir tarafa alaşım diğer tarafa da altın kaplanan numunenin aseton testi sonrası görüntüsü.	41
Şekil 4.21 Bir tarafa Au-Sn ötektik alaşımı diğer tarafa ise 1150 nm altın kaplanan numunenin paketleme sonrası kesme mukavemeti sonuçları.	41
Şekil 4.22 Bir tarafa Au-Sn alaşımı diğer tarafa ise 850 nm altın kaplanan numunenin paketleme sonrası kesme mukavemeti sonuçları.	42
Şekil 4.23 Bir tarafa ötektik alaşım diğer tarafa ise 1150 nm altın kaplanan paketlenmiş diskin 6,6 MPa kesme dayancına sahip pulun SEM ve EDS analiz sonuçları.	43
Şekil 4.24 Bir tarafa ötektik alaşım diğer tarafa ise 850 nm altın kaplanan paketlenmiş diskin 3,7 MPa kesme dayancına sahip hücrenin (a) ve 8,7 MPa kesme dayancına sahip hücrenin (b) SEM ve EDS analiz sonuçları.	44
Şekil 4.25 Ötektikten TLP için hazırlanmış katmanlı Au-Sn alaşımı.	44
Şekil 4.26 Katmanlı ötektik Au-Sn alaşım kullanılarak ulaşılan TLP kompozisyonun faz diyagram üzerinde gösterimi.	45
Şekil 4.27 TLP ile paketlenen 5 MPa basınçla paketlenen numunenin paketleme sonrası optik mikroskop görüntüleri.	46
Şekil 4.28 3, 5 ve 8 MPa basınç altında paketlenmiş numunelerle gerçekleştirilmiş kesme mukavemeti test sonuçları.	47
Şekil 4.29 3 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	48
Şekil 4.30 3 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	49
Şekil 4.31 5 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	49
Şekil 4.32 5 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	50

Şekil 4.33 8 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	51
Şekil 4.34 8 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.	51
Şekil 4.35 Çift taraflı silisyum disk deneyleri için hazırlanmış ötektikten TLP Au-Sn alaşımı. ...	52
Şekil 4.36 DRIE yöntemiyle derinliği 100 µm olarak hedeflenen boşluğun optik profilometre ölçüm sonucu. (Ölçüm sonucunda boşluk derinliği 107 µm olarak bulunmuştur.).....	53
Şekil 4.37 Bağlama profilinin şematik olarak gösterimi. X-Y eksenleri sıcaklık ve zaman göstermektedir.	54
Şekil 4.38 Değişik basınçlardaki bağlama deneylerine ait kesme kuvveti mekanik test sonuçları.	55
Şekil 4.39 Bağlaması yapılan Si-Si diklerin SAM görüntüleri.	57
Şekil 4.40 DRIE ile Si disk inceltme sırasında başarısız olan ve üst Si diski tamamen aşındırılan öreneğe ait fotoğraf (a) ve DRIE aşındırmasına maruz kalan metal bağlama bölgelerinin SEM görüntüsü (b).	59
Şekil 4.41 Diyafram çökmesi için DRIE ile üst Si diski inceltilmiş örneğe ait fotoğraf (a), diyafram çökmesi gerçekleşmiş bir hücrenin optik profilometre ile oluşturulmuş üç boyutlu görüntüsü (b) ve çökme miktarının optik profilometre ile gerçekleştirilmiş ölçümü (c).	61
Şekil 4.42 Diyafram çökmesi gerçekleşen örnek (a) ve bir hafta sonra gerçekleştirilen optik profilometre ölçümü (b).	62
Şekil 4.43 Diyafram çökmesi gerçekleşen örneğin 400 °C'de 10dk'lık tavlama sonrası gerçekleştirilen optik profilometre ölçümü.	62
Şekil 4.44 6 inç Si disk üzerinde yaklaşık 250 nm girinti çıkıntılar üzerinde oluşturulmuş Au-Sn bağlama hattı (a), Au-Sn metalinin oluşturulan girinti ve çıkıntılar üzerindeki optik profilometre çizimi (b) ve bağlaması gerçekleştirilmiş 6 inç disklerin bağlama sonrası fotoğrafı (c).	65
Şekil 4.45 6" Boyutta yaklaşık 250nm girinti-çıkıntı üzerine kaplanıp bağlaması yapılan Au-Sn TLP bağlamaya ait SAM görüntüsü.	66
Şekil 4.46 Mikroskopik dedektör üretim adımlarının piksel seviyesinde gösterimi.....	67
Şekil 4.47 Üretimi tamamlanan piksel iletim kollarına ait görüntüler	68
Şekil 4.48 Şekillendirilmiş elektrot yapılarına ait görüntüler	69
Şekil 4.49 Şekillendirilmiş VO _x algılayıcı malzeme katmanına ait görüntüler.	70
Şekil 4.50 Feda katmanı aşındırılmış, havada asılı haldeki piksel yapılarına ait görüntüler.	71
Şekil 4.51 Sandviç (sol kısım) ve parmak elektrotlu (sağ kısım) direnç yapılarının model üzerinde üstten görünümü.	73
Şekil 4.52 Parmak elektrotlu direnç yapısı üzerinde akım yönü (üst kısım) ve sandviç elektrotlu direnç yapısı üzerinde akım yönünün (alt kısım) kesitten görünümü.....	73

Şekil 4.53 Kuru aşındırma sonrası şekillendirilmiş elektrot görüntüsü (a), ikincil elektron görüntüleme yoluyla yüzeyden alınan görüntü (b).	74
Şekil 4.54 Feda katmanı aşındırılmış, havada asılı haldeki sandviç elektrotlu piksel yapılarına ait görüntüler.	75
Şekil 4.55 Sandviç elektrotlu piksel yapısının algılayıcı malzeme kaplama sonrası direnç dağılımının, paketleme profili ile değişimi.	76
Şekil 4.56 CMOS diski üzerinde feda katmanı açıklığının oluşturulması ve bağ metalinin oluşturulması (a-b), kapak diski üzerinde bağ metalinin ve kapak boşluğunun oluşturulması (c-d).....	77
Şekil 4.57 Gaz Emici Ti ince film katmanın kapak boşluğuna kaplanmış halinin fotoğrafı ve mikroskop görüntüsü. Gaz emici katman mekanik maskeleme (Shadow Mask) ile kaplanması sırasında bağ metali bölgesine de bir miktar Ti kaplandığı gözlenmiştir.....	78
Şekil 4.58 Bolometre dedektör pulunun (a), kapak pulunun (b) bağlama öncesi ve birleştirilmiş pulların bağlama sonrası (c) fotoğrafları.	79
Şekil 4.59 Bağlama işlemi sonrası diskler ayrıldıktan sonra CMOS diskin üzerinde kalan katman (a), bütün olarak kapak tarafında kalan bağ metalinin görüntüsü (b).....	80
Şekil 4.60 6" bolometre diskinin dizinlerine ait direnç dağılım haritası, referans dirençler (a) ve piksel dirençleri ile standart sapma değerleri (b).....	81
Şekil 4.61 6" bolometre diskinin dizinlerine ait test görüntüsü haritası.....	82
Şekil 4.62 51 nolu sensörden dewar içinde CMOS referans kullanılarak alınmış, 2-nokta düzeltme ve ölü piksel filtreleme uygulanmış termal görüntü.	83
Şekil 4.63 51 nolu sensörden dewar içinde MEMS referans kullanılarak alınmış, 2-nokta düzeltme ve ölü piksel filtreleme uygulanmış termal görüntü.	84
Şekil 5.1 Au-Si (%3,16 ağırlık) alaşımın silisyum disk üzerine kaplanması sonrası elde edilmiş ötektik yapı (a) kırmızı kare içine alınmış bölgenin yüksek büyütme SEM fotoğrafı (b).....	85
Şekil 5.2 Cr/Au 50nm/200nm ve Cr/Au/Sn/Au 30nm/650nm/500nm/50nm katmanlı yapıların 10°C /dak. ısıtma ve soğuma hızlarında DSC analizleri. Oklar ötektik reaksiyonu işaret etmektedir.	86
Şekil 5.3 Paketleme sonrası TiW yüzeyinden kolayca ayrılan Au-Sn ötektik yapı.	87
Şekil 5.4 TLP'den ötektik olarak oluşturulmuş kesme mukavemeti güçlü (a) ve zayıf (b) paketleme örnekleri. Kırmızı oklar tane sınırları içerisinde oluşmuş IC yapıları göstermektedir.....	87
Şekil 5.5 Tutunma yüzeyinden bütün olarak kalkan bağ metali, pul üzerinde oluşan metal akması ve metalin oluşturduğu ötektik yapı (a), bağ metali ile pul arasında oluşmuş tutunmayı olumsuz etkilediği düşünülen yalıtkan özellik gösteren kalıntı katman (b).	89
Şekil 5.6 Intel firmasının (a) 90 nm ve (b) 45 nm üretim teknolojisinde kullandığı metal ve dielektrik katman yığınlarından örnek kesit görüntüleri [35].	90

Özet

Özellikle savunma sanayinde yoğun ihtiyaç duyulan soğutmasız kızılötesi dedektörlerin yurt içinde, ulusal imkânlarla özgün olarak tasarlanması, özgün üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Soğutmasız kızılötesi dedektörlerden yüksek performans elde etmedeki en önemli etkenlerden biri dedektörlerin vakum ortamında çalıştırılmasıdır. Dolayısıyla, MEMS tabanlı soğutmasız kızılötesi dedektörlerin ürüne dönüşmesindeki en son adım olan paketleme konusu daha da önem kazanmaktadır. Paketleme dedektör seviyesinde tek tek yapılabildiği gibi silisyum disk seviyesinde de yapılabilir. Yürütülen proje kapsamında soğutmasız kızılötesi dedektörler için vakum paketleme süreçlerinde kullanılacak, dedektör üretim süreçleriyle ve dedektörlerin üretildiği CMOS tabanlarla uyumlu bir paketleme yöntemi geliştirilmesi ve yöntemin yine proje kapsamında üretilmiş olan soğutmasız kızılötesi dedektörlere disk seviyesinde uygulanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda vakum paketleme yönteminin geliştirilmesi için Au-Sn ve Au-Si malzeme sistemleriyle yapılan denemeler sonucunda, Au-Sn malzeme sistemiyle geçici sıvı faz bağlama (TLP) methodunun dedektör üretim süreçleri ve dedektör performansı açısından avantajlı olduğuna karar verilerek bu yönetime yoğunlaşarak bir bağlama methodu geliştirilmiştir. Bağlama methodu geliştirme süreçleri kapsamında bağlama hatlarının metal katmanlarının kimyasal kompozisyon, kaplama yöntemleri, bağlama sıcaklığı ve basıncı altında metaller arası etkileşim bakımından TLP bağlama methoduna uygun olarak idealleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. İdealleştirme çalışmaları sırasında bağlaması yapılan örneklere yapısal incelemeler optik, akustik (SAM) ve elektron mikroskobu (SEM/TEM) ile kimyasal ve faz incelemeleri EDX ve XRD yöntemleriyle, mekanik incelemeler ise kesme dayanımı testi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan idealleştirme ve inceleme çalışmaları sonucunda, Au-Sn malzeme sistemiyle TLP methoduna uygun olarak deneme örnekleri üstünde geliştirilen bağlama yöntemi görece düşük sıcaklıkta (300-320°C) bağlamayı sağlayıp, bağlama sonrası yüksek sıcaklıklara (<500°C) dayanım imkânı ve mekanik olarak askeri standartlara uygun bir kesme dayanımı (>6 MPa) göstermektedir. Ayrıca yöntem bolometre yapılarının performansına kötü yönde etki etmemektedir. Deneme örnekleri üzerinde MIL-STD 883 standartına uygun olarak yapılan He kaçak testlerinde 1×10^{-9} atm.cc/s'den daha büyük kaçaklar tespit edilememiştir. Bağlama yöntemi, proje kapsamında üretimi gerçekleştirilen VOx tabanlı 25µm adım aralıklı 384x288 formata sahip soğutmasız dedektörlere disk seviyesinde tek sefer uygulanmıştır. Uygulama ile ilgili tüm süreç yaşanan problemlerin detayları ile birlikte ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğutmasız Kızılötesi Dedektör, Mikrobolometre, Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler, Disk Seviyesi Paketleme, Ötektik Bağlama, TLP Bağlama, Mikrosistem Teknolojileri

Abstract

It is very crucial to develop our own design and production procedures and become a manufacturer of uncooled thermal Infrared (IR) detectors used in defense industries. In this regards, one of the most important factors to reach the high performance is to run the detectors within the vacuum environment. This makes the electronic packaging a critical step to convert the MEMS-based uncooled IR detectors into real commercial products. Electronic systems may be sealed either by slicing the wafer into individual circuits (dice) and then packaging them or by packaging an integrated circuit while still part of the wafer. In this project, it is aimed to develop a wafer level packaging method, which is compatible with CMOS wafers, for microbolometer uncooled IR detectors, and to implement the packaging method to the bolometer FPA wafer which is fabricated within the scope of the project. In this manner, transient liquid phase (TLP) bonding method with Au-Sn alloy system has been chosen as the candidate bonding material system after the initial trials applied using Au-Sn and Au-Si alloy systems. It has been concluded that the TLP method is the most appropriate method for the wafer level vacuum packaging in terms of processing steps and the performance of microbolometer IR detectors. During the optimization and the development of the TLP bonding method, the metal layers have been tuned in terms of thickness and chemical composition, deposition methods, the interaction of metals under the bonding pressure and the temperature. The characterization methods such as optical, acoustic (SAM) and electron microscopy (SEM/TEM) for structural, EDX and XRD for phase and chemical analysis and shear strength test method for mechanical investigation was applied for the dummy samples. The TLP method developed through the optimization stages has enabled a wafer level bonding method which enables a bonding process at the relatively low temperature (300-320°C), a bond withstanding the relatively high temperatures (<500°C), and a bonding which has the mechanical strength compatible with the military standards (>6 MPa). The developed method does not affect the performance of the microbolometer detectors adversely. The dummy samples bonded with the method have a He leakage value lower than 1×10^{-9} atm.cc/s according to the He leak test accordingly performed to MIL-STD 883 Standard. The packaging method has been implemented just for one time for the microbolometer wafer fabricated within the scope of this project which was a VOx based uncooled microbolometer IR detector wafer with 25 μm pixel pitch and 384x288 array format. The corresponding bonding procedure has been explained in details with all the problems encountered throughout the process.

Keywords: Uncooled Infrared Detector, Microbolometer, Micro-Electro-Mechanical Systems, Wafer Level Packaging, Eutectic Bonding, TLP Bonding, Microsystem Technologies

Sonuç Raporu Ana Metni

1 Giriş

Gerçekleştirilen projenin amacı savunma sanayinde kullanılmak üzere yüzey mikroişleme teknolojisi ile geliştirilen yüksek performanslı mikrobolometre tipi soğutmasız kızılötesi dedektörler için gerekli olan vakum ortamını düşük maliyetle sağlayabilmek amacı ile silisyum disk seviyesinde etkin bir paketleme sürecinin geliştirilmesidir. Özellikle savunma sanayinde uzun yıllardır kullanılmakta olan kızılötesi dedektörler çalışma prensibi bakımından (i) soğutmalı (kuantum) dedektörler ve (ii) soğutmasız (termal) dedektörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğutmalı dedektörler çok yüksek duyarlılıklara sahip olmaları sebebiyle popülerliklerini uzun bir süre devam ettirmişlerdir. Fakat bu dedektörlerin pahalı, büyük ve ağır olması, daha ucuz ve hafif dedektör gerektiren birçok platformda kullanılmasını mümkün kılmamaktadır. Kuantum dedektörlere alternatif olarak soğutmasız kızılötesi dedektör konusundaki çalışmalar, ABD hükümetinin öncülüğünde 1983 yılında başlamıştır. Soğutmasız kızılötesi dedektörlerin soğutmalı dedektörlere göre en önemli avantajları, oda sıcaklığında çalışabilmesi ve CMOS elektronik devresi ile aynı tabanda üretilmesinden dolayı düşük maliyetli olması, hafif ve uzun ömürlü olması, az enerji harcaması ve 8-12 mikrometre gibi geniş bir spektrum aralığında çalışabilmesidir. Bu avantajlarından dolayı soğutmasız dedektörler konusunda bugüne kadar çok yoğun çalışmalar yapılmış ve kullanımı çok hızla yayılmıştır. Soğutmasız kızılötesi dedektörler halen dört ülkede (ABD, Fransa, Japonya ve İsrail) üretilmektedir. Bu dedektörler, dünyada kritik teknolojilerden sayıldığı ve askeri amaçlı kullanıldığı için, teknoloji transferi mümkün olmamakta ve bu dedektörlerin satışı, üretici firmalar/ülkeler tarafından ihraç iznine tabi tutularak kontrol altına alınmaktadır. Dolayısıyla, özellikle savunma sanayinde yoğun ihtiyaç duyulan soğutmasız kızılötesi dedektörlerin yurt içinde, ulusal imkanlarla özgün olarak tasarlanması, özgün üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve üretilmesi çok önemlidir. Soğutmasız kızılötesi dedektörleri yerli olarak üreterek yurtdışına bağımlılığı azaltmak ve Türk Silahlı Kuvvetlerinin ihtiyaçlarını karşılamak için ODTÜ'de 1999 yılından itibaren yapılan ve çeşitli destek programları ile gerçekleştirilen projelerle çok önemli gelişmeler elde edilmiş ve bunlar sonucunda ülkemiz, dünyada soğutmasız dedektörleri geliştirebilen beşinci ülke olmuştur. Devam eden bu çalışmaların, ürüne dönüşebilmesi ve dünyadaki benzer çalışmalarla rekabet edebilmesi için dedektörlerin hem düşük maliyetle hem de yüksek performans ile geliştirilmeleri gerekmektedir. Yüksek performans elde etmedeki en önemli etkenlerden biri dedektörlerin vakum ortamında çalıştırılmasıdır. Dolayısıyla, MEMS tabanlı soğutmasız kızılötesi dedektörlerin ürüne dönüşmesindeki en son adım olan paketleme konusu oldukça önem kazanmaktadır.

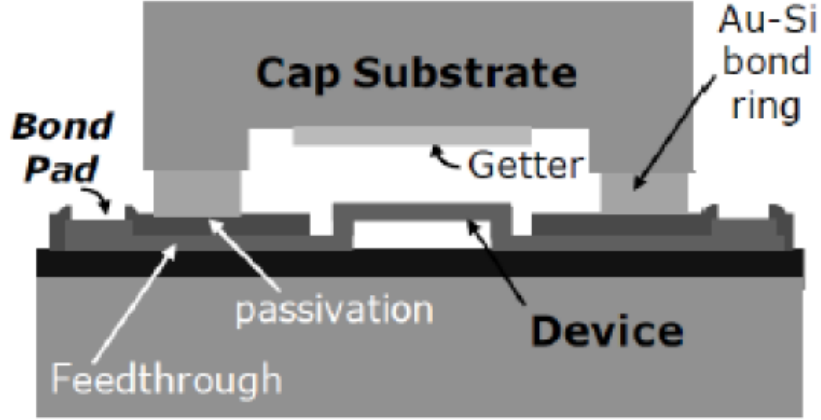
Vakum ortamında paketleme dedektör seviyesinde tek tek yapılabildiği gibi silisyum disk seviyesinde de yapılabilir. Halen dünyada yaygın olan yaklaşım, monolitik olarak CMOS okuma devresinin bulunduğu silisyum disk üzerinde üretilen dedektörlerin kesilerek ayrıştırılması ve her bir dedektör çipinin ayrı ayrı paketlere yerleştirilerek vakum ortamının bu şekilde oluşturulmasıdır. Ancak bu hem işçilik maliyetini, hem paket sarf maliyetini, hem de üretim hatalarını artırmaktadır. Ayrıca, yüksek sayılarda üretim için de önemli bir cihaz altyapı maliyeti gerektirmektedir. Bu projede gerçekleştirilen çalışmalar ile Au-Sn alaşım sistemiyle TLP metodu kullanılarak tek seferde CMOS diskteki tüm dedektörler birden vakum ortamında paketleyebilecek yöntemler araştırılmıştır.

2 Literatür Özeti

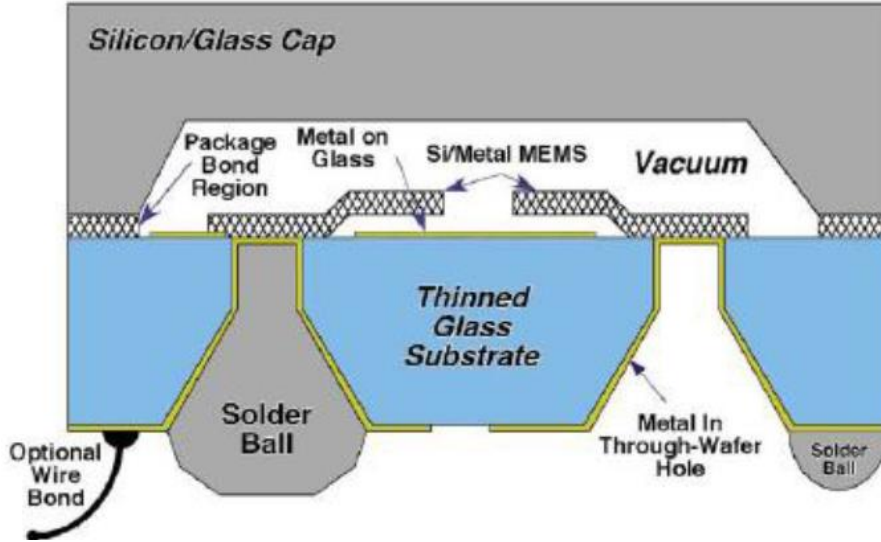
Mikroelektromekanik sistem (MEMS) araştırmaları 1960'lı yıllarda hareketli mekanik parçalar ile elektronik parçaların mikro boyutta birleştirilmesiyle başlamıştır. MEMS teknolojisi, mikron boyutlarında entegre devreleri içeren, mekanik, elektrik ve diğer birleştirici elemanlarıyla dış dünya ile fiziksel ve kimyasal etkileşime giren sistemleri ele almaktadır [1]. MEMS'ler, 1970'li yıllarda silisyum transistörlerin klmesiyle beraber ciddi anlamda gelişen, çevreyi algılayıp mekanik sistemlerin yardımıyla tepki veren akıllı sistemlere dönüşmüşlerdir. 1960'larda entegre devreleri içeren bilgisayarlar uluslararası markette yerini alırken, MEMS basınç sensörleri ancak 1980'lerde ve MEMS ivme ölçerler ancak 1990'larda seri olarak üretimi başlamıştır [2]. 1960'lı yıllardan itibaren gelişmeye başlayan MEMS teknolojisini yakalamakta ülkemizde bir geç kalınmışlık yaşanmasına karşın, özellikle 1995 yılında başlatılan çalışmalar ile MEMS teknolojisine yönelik yeni adımlar atılmaya başlanmıştır. Mürekkepli yazıcılardan hava yastıklarına, bolometrelerden jiroskoplara kadar birçok sivil ve askeri uygulamada yerini alan MEMS teknolojisinin maaliyet olarak en büyük kısmını elektronik paketleme oluşturmaktadır. Fabrikasyonu ve litografi yöntemleri entegre devre sistemleri ile aynı olmasına karşın MEMS'lerin ticaretleşmesinde yaşanan gecikmenin önemli bir sebebinin de elektronik paketlemenin zorluğundan ve maliyetinin yüksek olmasından kaynakladığını vurgulamak önemlidir [2]. Halen elektronik paketleme, MEMS teknolojisi maliyetinin %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır [2, 3].

Elektronik paketleme entegre devreler için bir takım kurallar çerçevesinde görece standart bir şekilde gerçekleştirilebilirken, MEMS aygıtlar için durum biraz daha farklılık göstermektedir. Farklı türdeki MEMS aygıtların vresiyile farklı şekilde etkileşime girmesi nedeniyle, gereksinim duydukları çalışma ortamı da farklılık göstermektedir. Dolayısıyla her MEMS aygıtı kendisine özel bir paket tasarımına ihtiyaç duyabilmektedir.

Elektronik paketlemeye MEMS aygıtları özelinde bakıldığında, elektronik paketlemenin dört önemli görevi üstlendiği görülmektedir [4-6]. Bu görevlerden ilki elektronik cihazı dış etkenlerden mekanik olarak korumaktır. Bu bağlamda uygulanacak elektronik paketin belirli mekanik kuvvetleri karşılayacak gte olması beklenir. İkinci olarak elektronik paket, cihazın çalışması için içeride gerekli ortamı (rnek olarak vakum ortamı gösterilebilir) sürekli kılar ve bu ortamın belirli bir süre içerisinde etkin kalmasını sağlar. Mikrobolometre özelinde aygıtın çalışma ortamı vakum olmalıdır ve paket kullanım süresi boyunca vakum özelliğini korumalıdır. Dolayısıyla paket sızdırmaz hermetik bir yapıda olmalıdır. nc olarak, elektriksel iletimi sağlamalıdır. Elektriksel iletim paket içinde yatay (şekil 2.1) veya dikey aktarım (şekil 2.2) yöntemleriyle sağlanabilir. Dördüncü olarak ise paketleme diğer elektronik parçalarla arayüz oluşturmalıdır [1].



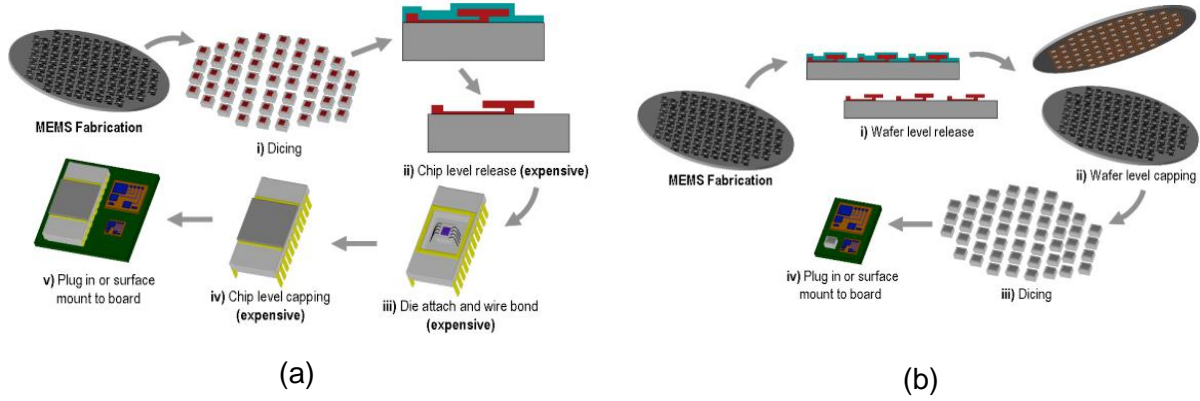
Şekil 2.1 Yatay elektriksel iletim hattının şematik gösterimi [7].



Şekil 2.2 Dikey elektriksel iletim hattının şematik gösterimi [8].

MEMS aygıtlarında elektronik paketleme iki şekilde yapılabilir; bunlar (i) dedektör seviyesinde tek tek paketleme ve (ii) silisyum disk seviyesinde paketlemedir. Dedektör seviyesinde paketleme yöntemi için disk kesilerek aygıtların birbirinden ayrılması sağlanır. Ayrılmış aygıtlar teker teker gerekli elektriksel devreler ile bir araya getirilerek paketlenir. Bu işlem disk üzerinde üretilmiş her aygıt için ayrıca tekrarlanır. Dedektör seviyesinde paketleme işlemi uzun işgücü süreleri gerektirir ve paketleme verimliliğini düşürür. Silisyum disk seviyesinde paketleme işlemi, aygıtların disk üzerindeyken ince film ile kapatma veya disk bağlama tekniklerinden uygun olanının kullanılmasıyla tek seferde aynı anda paketlerin oluşturulması işlemidir. Silisyum disk seviyesinde paketlenen MEMS'lerin dedektör seviyesinde paketlenenlere göre daha ekonomik ve verimli oldukları gözlenmiştir [2]. Şekil 2.3(a)'da dedektör seviyesinde tek tek ve Şekil 2.3(b)'de silisyum

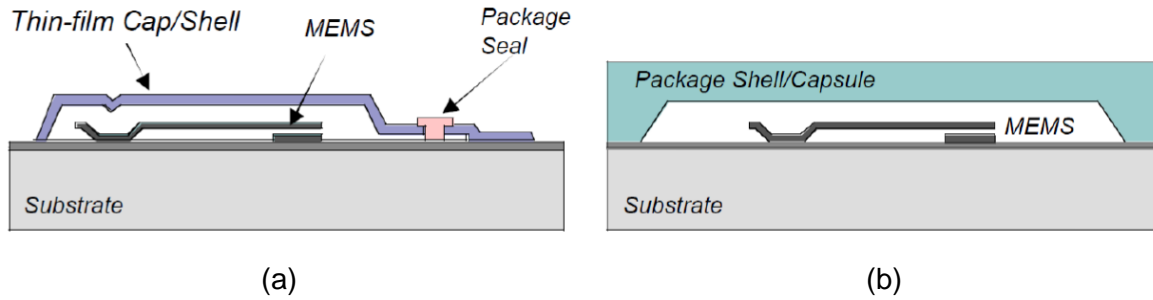
disk seviyesinde paketlemelerin şematik gösterimi verilmiştir. İki yöntem arasındaki en büyük fark, silisyum disk seviyesinde paketlemede üretim ve paketleme maliyetinin büyük ölçüde düşmesidir [2]. Silisyum disk seviyesinde paketleme için kullanılabilir yöntemlerden bazıları aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 2.3 Dedektör seviyesinde tek tek paketleme (a) ve silisyum disk seviyesinde paketlemenin (b) şematik gösterimleri [2].

2.1 Silisyum Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemleri

Silisyum disk seviyesinde paketleme iki temel yöntem ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler ince film paketleme ve disk bağlama ile paketleme yöntemleridir. İnce film paketleme yöntemi, ince filmler kullanılarak aygıtların üzerinde paket boşluğu oluşturur. Disk bağlama ile paketleme yöntemi ise paket boşluğunu oluşturmak için ikinci bir kapak diskinin aygıt diskine bağlanmasını kullanır. Her iki yönteme ait şematik çizimler Şekil 2.4'te görülebilir.

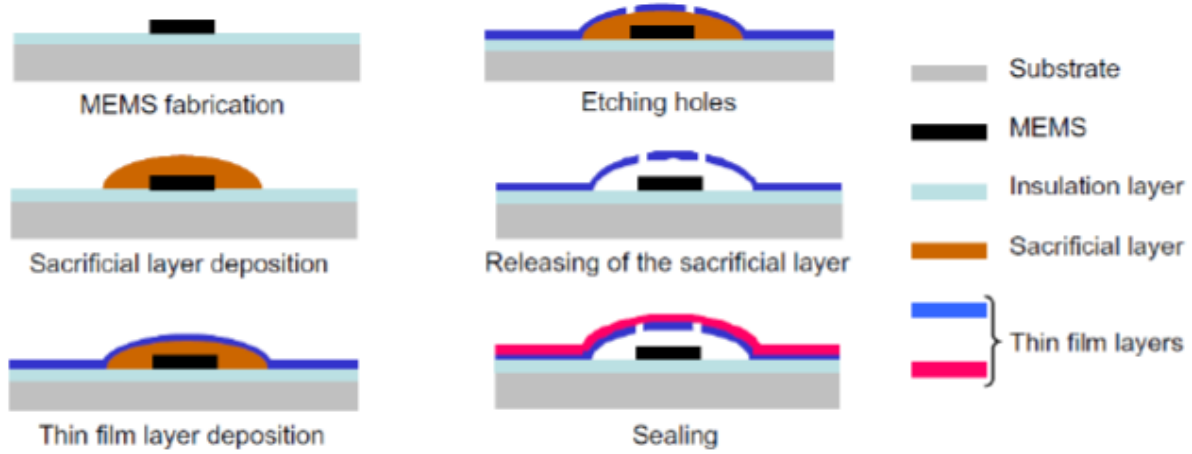


Şekil 2.4 İnce film paketleme yöntemi (a) ve disk bağlama yönteminin (b) şematik çizimi [9].

2.1.1 İnce Film Kaplama ile Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemi

İnce film paketleme yöntemi için aygıt üzerine ilk önce feda katmanı serilir. Feda katmanının üzerine kapak katmanının oluşturacak ve destek görevi görecek ince film serilir. Bu ince film

katmanı üzerinde delikler oluşturulur ve bu delikler yardımıyla alttaki feda katmanı aşındırılarak paket boşluğu oluşturulur. İkinci bir ince film katmanıyla açılan delikleri kapatacak şekilde kaplama yapılır ve bu sayede aygıt hermetik bir paketin içinde dışarıdan yalıtılmış olur. Nikel, polysilisyum, amorf silisyum, silisyum oksit yalıtma için kullanılabilir ince film malzemeleridir. İnce film paketleme yönteminin adımlarını gösteren şematik süreç akışı Şekil 2.5'te görülebilir.



Şekil 2.5 İnce film paketleme yönteminin süreç adımlarının şematik gösterimi [10].

2.1.2 Disk Bağlama ile Disk Seviyesinde Paketleme Yöntemi

Disk bağlama ile disk seviyesinde paketleme yöntemi, aygıt diskinin üzerine ikincil bir diskin aygıt için gerekli hacim oluşturulduktan sonra çeşitli disk bağlama yöntemlerinden birinin kullanılarak bağlanmasıyla yapılmaktadır. Bu yöntem mekanik olarak dayanımı oldukça yüksek aygıtı dış etkenlerden koruyan bir paket sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem ile paket içinde gaz alıcı (*getter*) yapıların kullanılması da mümkün hale gelmektedir. Bu şekilde paket içinde oldukça düşük basınç seviyeleri elde edilebilir. Kapak pulunun bağlanması amacıyla farklı bağlama yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan önemli olanları füzyon/plazma ile aktifleştirilmiş füzyon bağlama, anodik bağlama, cam hamuru ile bağlama ve ötektik/geçici sıvı faz (TLP) bağlamadır.

Füzyon Bağlama

Füzyon bağlama yöntemi yüzey pürüzlülüğü giderilmiş, kimyasal olarak aktive edilmiş disk yüzeylerinin birleştirilmesi ile yapılır. Yüzey aktifleştirme işlemi ıslak veya kuru yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Yüzey aktifleştirme işlemi gerçekleştirilen diskler temas haline getirilir ve iki disk arasında *Van der Waals* kuvvetleriyle zayıf bir bağ oluşur. Daha sonraki yüksek sıcaklık tavlama işlemleriyle daha güçlü kovalent bağların oluşması sağlanır. Fakat tavlama sıcaklıklarının yüksek (600-1200°C) olması sebebiyle uygulama alanı kısmen kısıtlıdır ve CMOS devrelere sahip

diskler ile uyumsuzdur. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne karşı oldukça hassas bir yöntem olduğu için yatay elektriksel iletim hatlarının kullanılması daha karmaşık olabilmektedir [11].

Plazma ile Aktifleştirilmiş Füzyon Disk Bağlama

Vakum ortamında plazma kullanılarak bağlama yapılacak disklerin yüzeyleri kimyasal olarak aktifleştirilir. Bu aktifleştirme işlemi, tavlama ile oluşacak bağların daha düşük tavlama sıcaklıklarıyla oluşmalarına yardımcı olur [12,13]. Bu yöntem ile geleneksel füzyon bağlama yönteminden daha düşük sıcaklıklarla (200-400°C) bağlama yapmak mümkün olabilmektedir. Geleneksel füzyon bağlamada olduğu gibi yüzey pürüzlülüğüne hassas bir bağlama yöntemi olduğu için yatay elektriksel iletim hatlarının kullanıldığı tasarımlarda kullanımı daha zor olabilir.

Anodik Bağlama

Anodik bağlama yöntemi silisyum ve sodyum katkılı cam disklerin birbirine bağlanması için kullanılan güvenilir bir bağlama yöntemidir. Sıcaklık ve yüksek voltaj altında silisyum disk ve cam disk arasında iyon değişimi sayesinde oldukça güçlü ve hermetik bağlar elde etmek mümkündür. Bağlama sıcaklığı 250-450°C arasında ve bağlama voltajı 400-2000 V arasında kullanılabilir. Camdaki Na iyonları yüksek voltaj altında camın içine doğru hareket ederken ara yüzeyde oksijen iyonlarını bırakır. Ara yüzeydeki serbest oksijen iyonları silisyum atomlarıyla bağ yaparak SiO₂ oluştururlar. Anodik bağlama metodu yüzey düzensizliklerine hassas bir bağlama yöntemidir. Bu nedenle anodik bağlama yapılacak örneklerde yatay elektrik iletim hatlarının kullanımı uygun değildir. Ayrıca bağlama sırasında uygulanan voltaj, yöntemin CMOS devresi bulunan disklerle kullanımını imkânsız kılmaktadır.

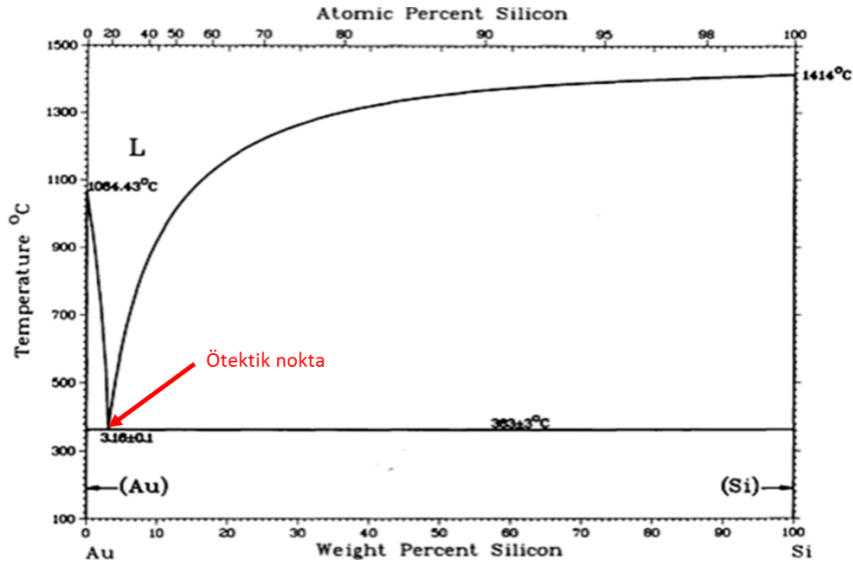
Cam Hamuru ile Bağlama

Cam hamuru ile bağlama yöntemi kullanılarak MEMS paketleme iyi bilinen olgun bir yöntemdir. Bu yöntemde iki disk arasında cam yapıcı bir katman kullanılır. Yaklaşık 425-450°C bağlama sıcaklığında cam yapıcı katman eriyik bir ara katman oluşturur ve bağlamayı sağlar. Bağlama sıcaklıkları CMOS devreler için zararlı olabilecek düzeydedir. Cam hamuru ile bağlama yöntemi görece kalın (yaklaşık 2 µm) cam hamuru katmanı sayesinde yüzey pürüzlülüklerini ve yüzeydeki girinti çıkıntılarını belli daha iyi tolere edebilir. Cam hamuru bileşiminde kurşun elementi bağlama sıcaklıklarını 550 °C altına düşürebilmek için sıklıkla kullanıldığı için bu yöntem sağlık ve çevre açısından sakıncalı bir yöntemdir ve kullanımı Avrupa Birliği tarafından kısıtlanmıştır.

Ötektik ve Geçici Sıvı Faz (TLP/SLID) Bağlama

Ötektik ve TLP (SLID) bağlama yöntemleri cam hamuru ile bağlama yöntemi gibi iki disk arasında bağlamayı sağlayan ara katmanların kullanıldığı bağlama yöntemleridir. Ötektik ve TLP bağlama

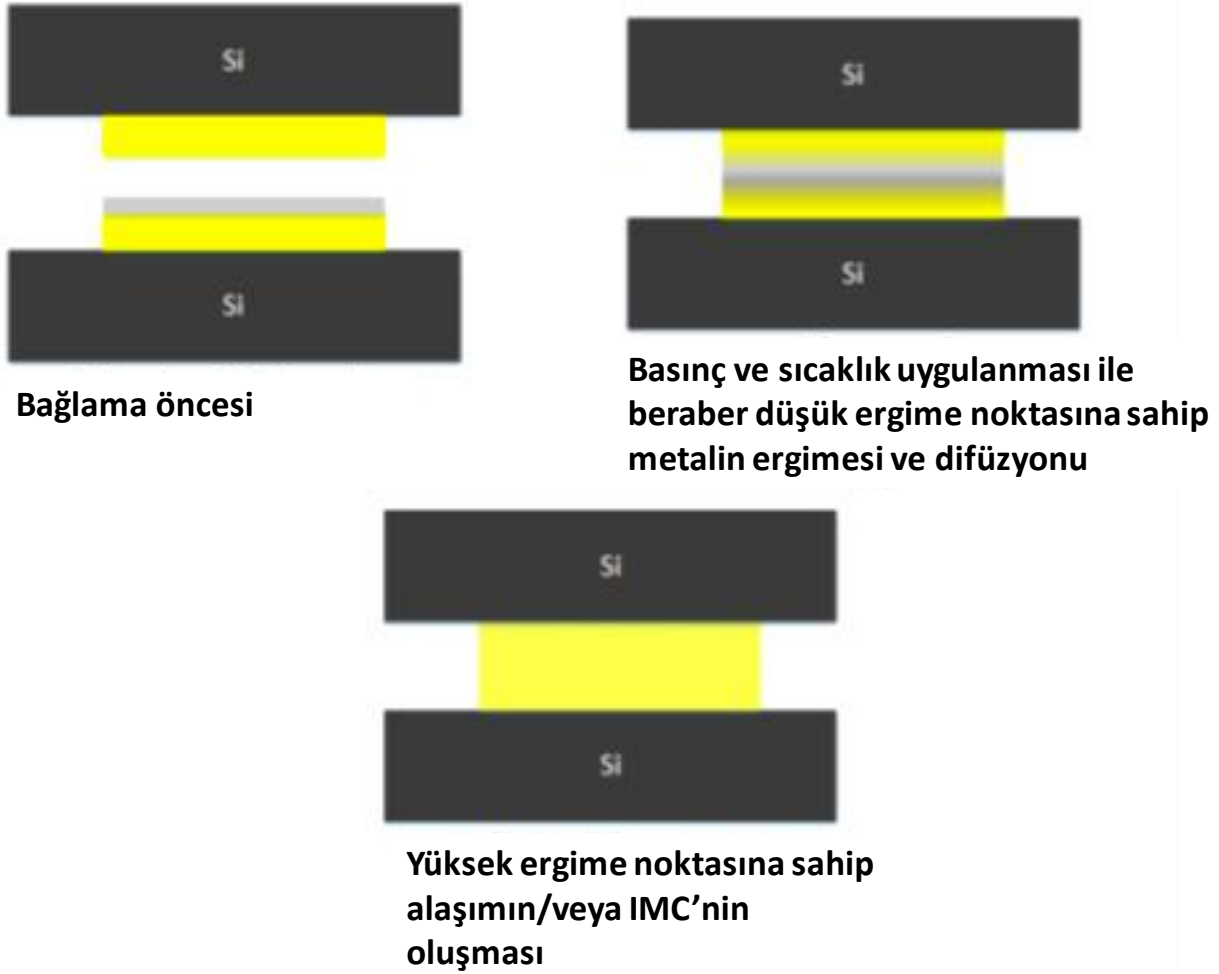
yöntemlerinin kullandığı ara katmanlar metal ve metal alaşımlarıdır. Ötektik bağlama yönteminde iki farklı malzemenin oluşturduğu ötektik alaşım ile bağlama gerçekleştirilir. Temel olarak ötektik faz değişimi olgusunu kullanır. Kullanılacak ara katman metallerinin ötektik faz değişimi olgusunu gösteriyor olmaları gerekmektedir. Bu yöntem ile diskler arasına iki farklı metal, ara katman olarak kaplanır ve sıcaklık ile metaller bir biri içine difüzyon ile yayılarak katı çözelti oluştururlar. Katı çözeltinin son kompozisyonu iki metalin ötektik kompozisyonuna denk olmalı, dolayısıyla kaplanan metal kalınlıklarının bu kompozisyonu oluşturacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Kaplanan metallerin ergime noktası yüksek iken ötektik kompozisyona ulaşan katı çözeltinin ergime noktası çok daha düşük olmaktadır. Şekil 2.6'da Au-Si malzemelerinin ikili faz diyagramı ve ötektik faz değişimi gösterdikleri kompozisyon ve sıcaklık noktası görülebilir. Faz diyagramından görüleceği üzere saf altın 1064°C'de saf silisyum ise 1414°C'de sıvı faza geçmektedir. Ağırlıkça %3.16 silisyum içeren altın-silisyum bileşimi ise 363°C'de ergimektedir. Ötektik bağlama sırasında metaller bir biri içine difüz edip ötektik kompozisyonu oluşturduğunda bağlama sıcaklığı ötektik sıcaklığın biraz üzeri bir sıcaklığa çıkartılır ve diskler arasında eriyik metal faz oluşur. Bu eriyik fazın katılaşmasıyla diskler arası bağlanma sağlanır. Ötektik bağlama ile mekanik olarak dayanımı yüksek ve hermetik bağlar oluşturulabilir. MEMS paketlemelerinde kullanılan ötektik malzeme çiftleri şu şekilde sıralanabilir: Al-Si (577°C) [14], Au-Ge (360°C) [15], Au-Sn (217°C ve 278°C – iki ötektik noktası bulunmaktadır) [16,17], Pb-Sn (182°C) [18, 19], Sn-Bi (130 °C) [10], Al-Ge (420°C) ve In-Sn (118°C).



Şekil 2.6 Altın-Silisyum ikili faz diyagramı ve ötektik faz değişim noktası [21].

Geçici sıvı faz (TLP) bağlama yöntemi, ötektik bağlama yönteminde olduğu gibi iki disk arasında metal ara katmanların kullanımıyla gerçekleştirilir. Ötektik bağlamadan farklı olarak metallerden biri düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metal bağlama sırasında

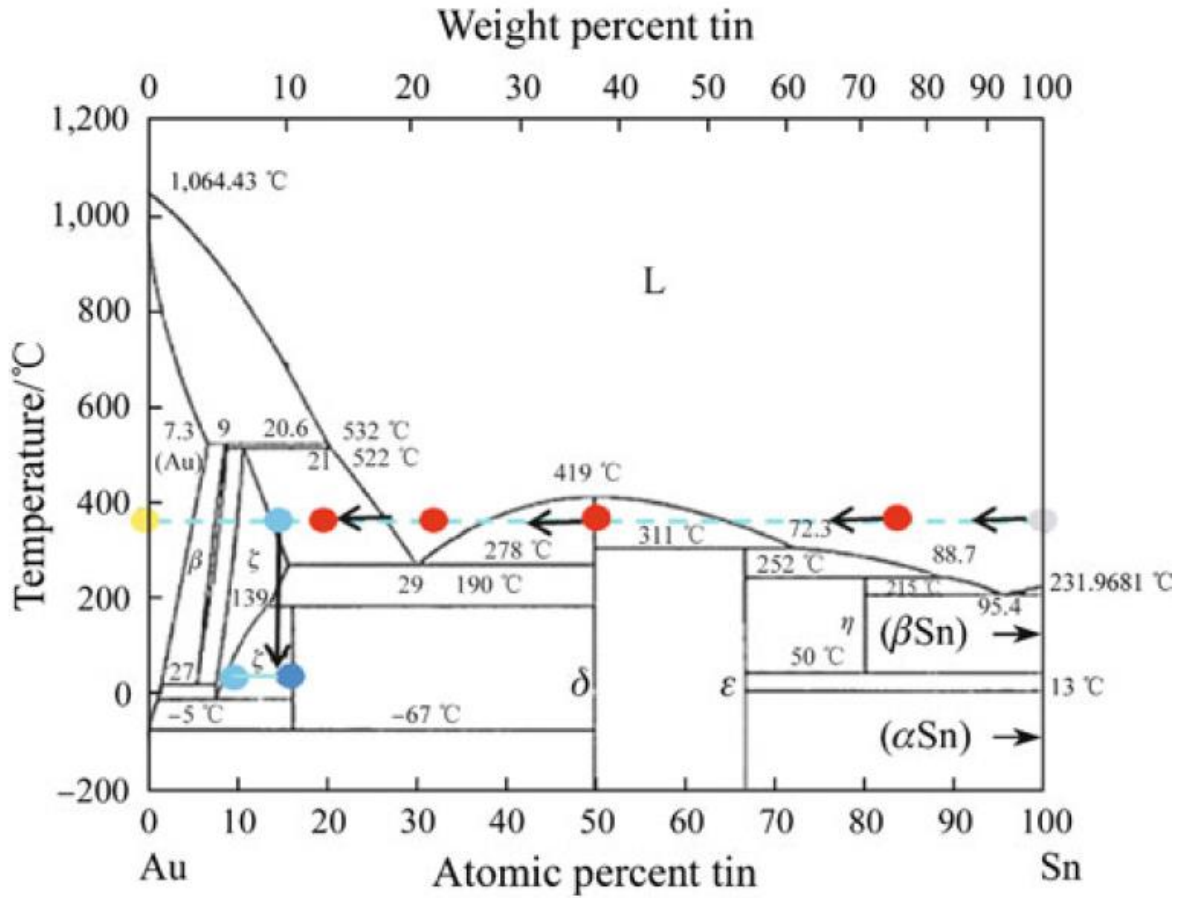
sıvı faza dönüşür ve iki metal birbiri içine difüzyon yoluyla karışır, bu karışma esnasında metal arası katı bileşikler oluştururlar [4]. Metal katmanların oranlarına göre ikili faz diyagramına uygun bir şekilde katı bir bağ oluştururlar. Oluşturulan katı bağın kompozisyonu faz diyagramında sıvı oluşturma sıcaklığı daha yüksek olacak bir kompozisyon olarak belirlenir. Böylelikle elde edilen bağın bağlama işlemi tamamlandıktan sonra yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı yüksek bir bağ olması sağlanmış olur [22, 23]. TLP bağlama yönteminin şematik anlatımı Şekil 2.7’de görülebilir.



Şekil 2.7 TLP bağlama yöntemini anlatan şematik çizim.

Nikel-kalay, altın-kalay, altın-indiyum, bakır-kalay gibi malzeme çiftleriyle TLP bağlama sağlamak mümkün olabilmektedir [24,25,26]. TLP bağlama yönteminin uygulanabileceği altın-kalay malzeme çiftine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. TLP bağlama yöntemiyle düşük sıcaklıklarda ergime noktasına sahip metaller ile bağlama işlemi düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilirken bağlama sonunda yüksek sıcaklıklara dayanımı olan bir bağ elde edilebilir.

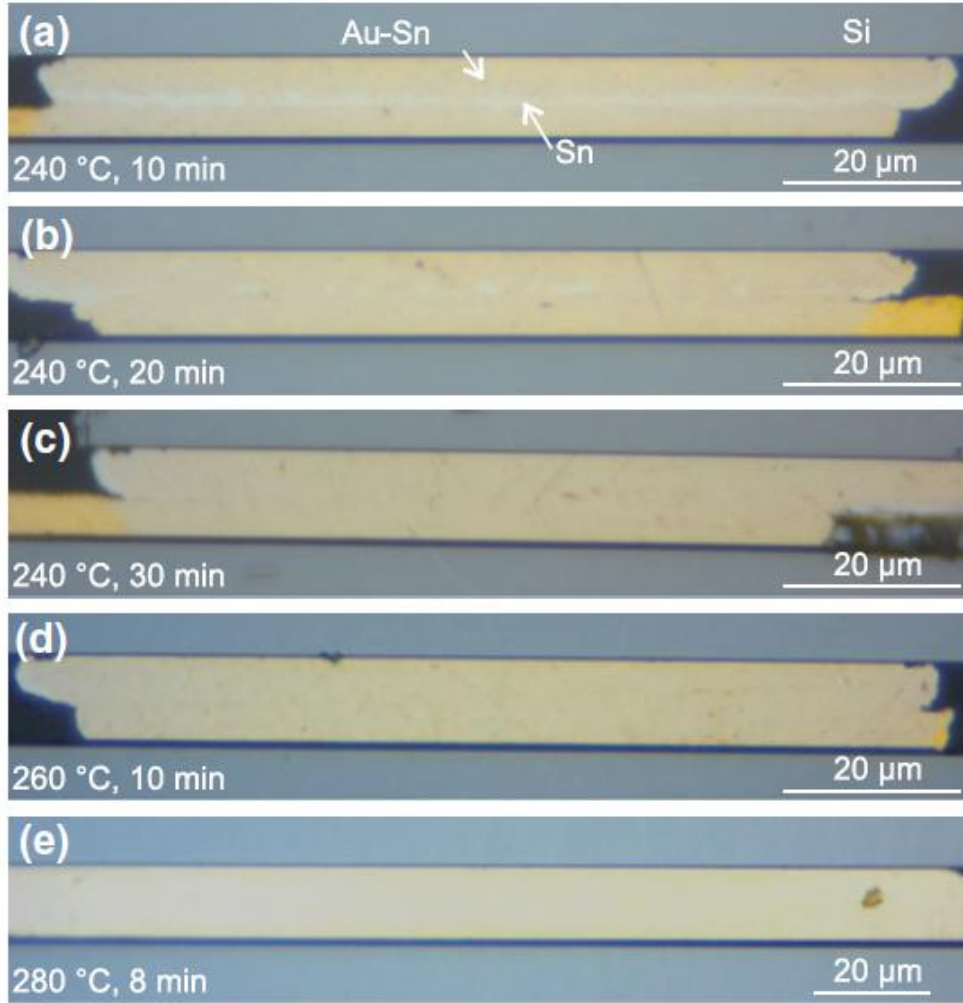
Metal katmanların oluşturulması işlemi saçtırma (sputtering), termal buharlaştırma veya elektro kaplama yöntemleriyle uygulanabilmektedir [27,28]. Elektro kaplama yöntemi ile diğer yöntemlerle elde edilmesi pratik ve ekonomik olmayan metal kalınlıklarını kaplamak mümkün olmaktadır. Saçtırma ve termal buharlaştırma yöntemleriyle mikro elektronik üretim süreçleriyle uyumlu ve tekrarlanabilir kaplamalar yapmak mümkün olmaktadır fakat bu yöntemlerle elde edilecek pratik ve ekonomik kaplama kalınlıkları daha ince olmaktadır. Literatürde TLP bağlama çalışmaları toplam metal kalınlığının 8-10 μm civarında kullanıldığı ve metal kaplama yöntemi olarak elektro kaplama yöntemlerinin uygulandığı örneklerle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8 Altın-Kalay ikili faz diyagramı ve diyagram üstünde TLP bağlama sırasında gerçekleşen kompozisyon değişiminin faz diyagramı üzerinden gösterimi [29].

TLP bağlama yönteminde sıvı faz oluşmadan metaller arası difüzyon başlamaktadır. Ergime noktası düşük metal, difüzyon mekanizması ile tamamen tükenmeden sistemin sıcaklığının ergime noktasına ulaşması gerekmektedir. Bu sebeple TLP bağlama yöntemi ısıtma hızı yüksek bağlama cihazlarına ihtiyaç duymaktadır.

Altın-kalay malzeme sistemiyle farklı bağlama sıcaklığı ve sürelerinin uygulandığı TLP bağlaması gerçekleştirilmiş örneklerin kesit alanına ait mikroskop fotoğrafları Şekil 2.9'da verilmiştir. 240 °C'de, 10dk ve 20dk bağlama sürelerinde reaksiyon süresinin yetersiz geldiği ve altın katmanlar arasında kalan artık kalay katmanı görülebilmektedir. Bu çalışmada 8µm-11µm arasında toplam metal kalınlığı kullanılmıştır. Artık kalay katmanının gözlemlendiği durumda kalay kalınlığı 2 µm olarak uygulanmıştır.



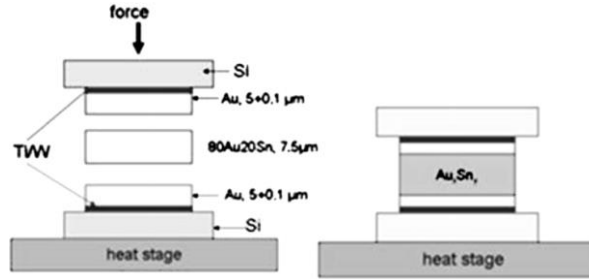
Şekil 2.9 Farklı bağlama sıcaklığı ve sürelerinde Au-Sn malzeme sistemiyle TLP bağlamaları gerçekleştirilmiş örneklerin kesit alanı mikroskop fotoğrafları (a-e) [24].

Altın kalay ikili faz diyagramından da anlaşılacağı üzere, altın kalay TLP bağlama sonunda bağ malzemesi altın zengin bir kompozisyonda (ağırlıkça %5-10 altın) altın kalay karışımı oluşturmaktadır. Altın ve kalay malzeme sisteminde oluşabilecek fazlar ve önemli fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

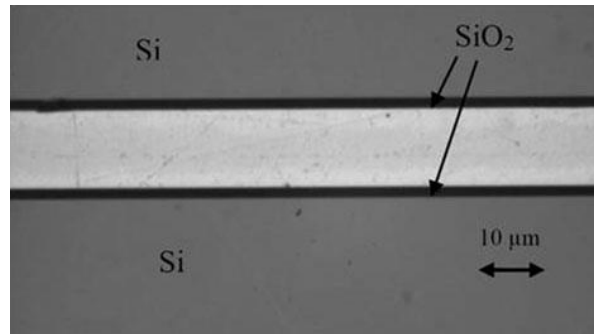
Tablo 2.1 Altın Kalay malzeme sisteminde bulunabilecek fazların fiziksel özellikleri [30,31]

Faz	Elastik Modulus (GPa)	CTE (ppm K ⁻¹)	Erime Sıcaklığı (°C)
Au	77.2	14.4	1064
Sn	41	23	232
AuSn (δ fazı)	70-101	14	419
Ötektik AuSn (δ - ζ' karışımı)	69-74	16	278
Au ₅ Sn (ζ' fazı)	62-76	18	190
AuSn _{0.18-0.10} (ζ fazı)	58	20	519
Au ₁₀ Sn (β fazı)	88	N/A	532

Şekil 2.10'da başka bir çalışmada gerçekleştirilen Au-Sn TLP bağlama konfigürasyonu ve gerçekleştirilen bağlamanın SEM görüntüsü verilmiştir. Bu bağlamada kullanılan metal kalınlıkları toplamda 17.5 μm 'dir. Bağlama 350 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bağ yapısına yapılan EDS incelemesinde altın katmanlar arasında ζ fazının oluştuğu saptanmıştır. Bu konfigürasyon ile bağlaması gerçekleştirilen örneklerin oda sıcaklığında kesme güçleri 26 MPa olarak bulunmuştur [32].



(a)

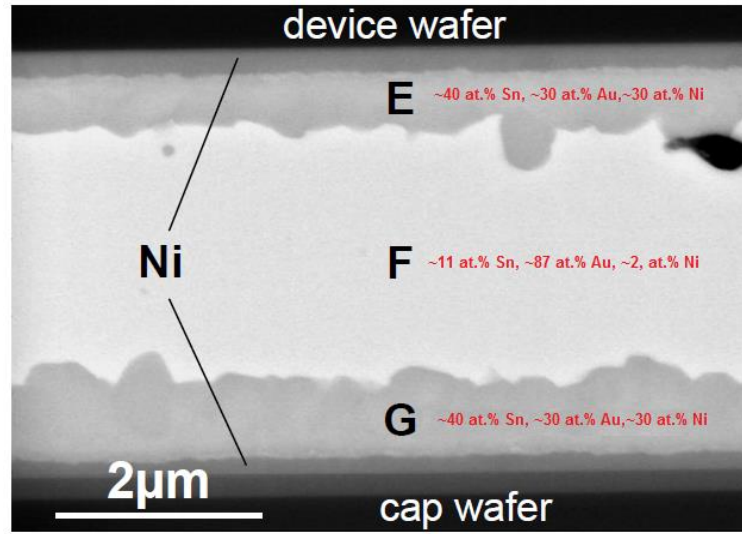


(b)

Şekil 2.10 Au-Sn TLP bağlama için kullanılmış katmanların elektro kaplama ile kaplanmış halleri ve bağlama sonrasında oluşacak tahmini yapının şematik gösterimi (a) ve bağlaması

gerçekleştirildikten sonra yapılan optik mikroskop kesit alanı incelemesi (b). EDS analizi, metal yapının Au/ ζ / Au olarak oluştuğunu göstermiştir [32].

Garnier et. al. tarafından 310 °C'de gerçekleştirilen, SiO₂ üzerine metalizasyon yaptıkları fakat metal kalınlık detaylarını vermedikleri Au-Sn TLP bağlama deneyinde ortalama kesme dayanımını 70 MPa olarak raporlamışlardır [33]. Bağlama sonrası oluşan metal alaşımın kesit alanı görüntüsü ve EDS sonuçları Şekil 2.11'de verilmiştir.



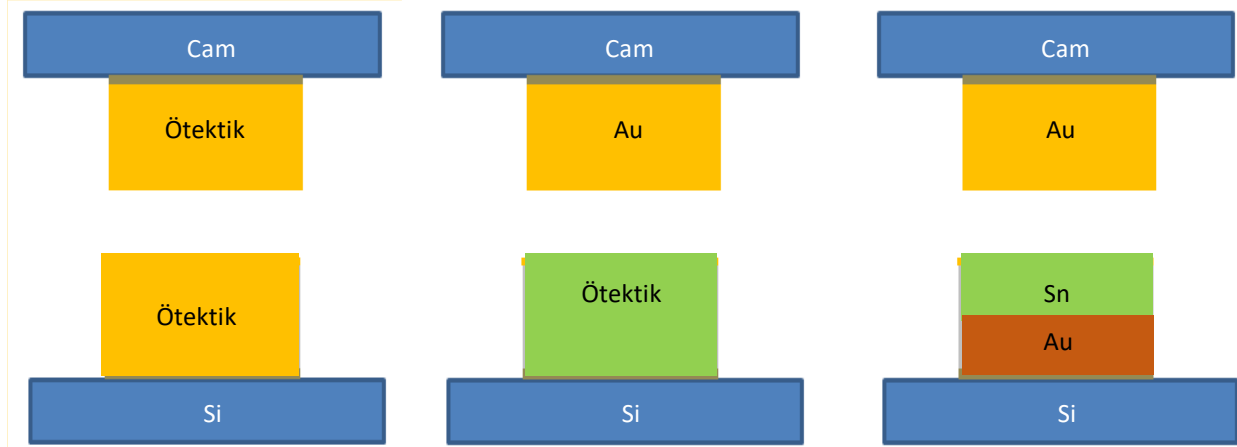
Şekil 2.11 Au-Sn TLP bağlama yöntemi ile gerçekleştirilmiş bağın kesit alanı SEM görüntüsü ve görüntüdeki farklı fazlara ait EDS kimyasal analiz sonuçları [33].

3 Gereç ve Yöntem

Proje kapsamında kullanılan gereç ve yöntemler bağlama yönteminin geliştirilmesine yönelik üretim ve karakterizasyon yöntemleri başlıkları altında sunulmuştur. Mikrobolometrelerin oluşturulmasına yönelik yöntemin detayları bulgular kısmında özetlenmiştir.

3.1 Bağlama Yönteminin Geliştirilmesi Yönelik Üretim Yöntemleri

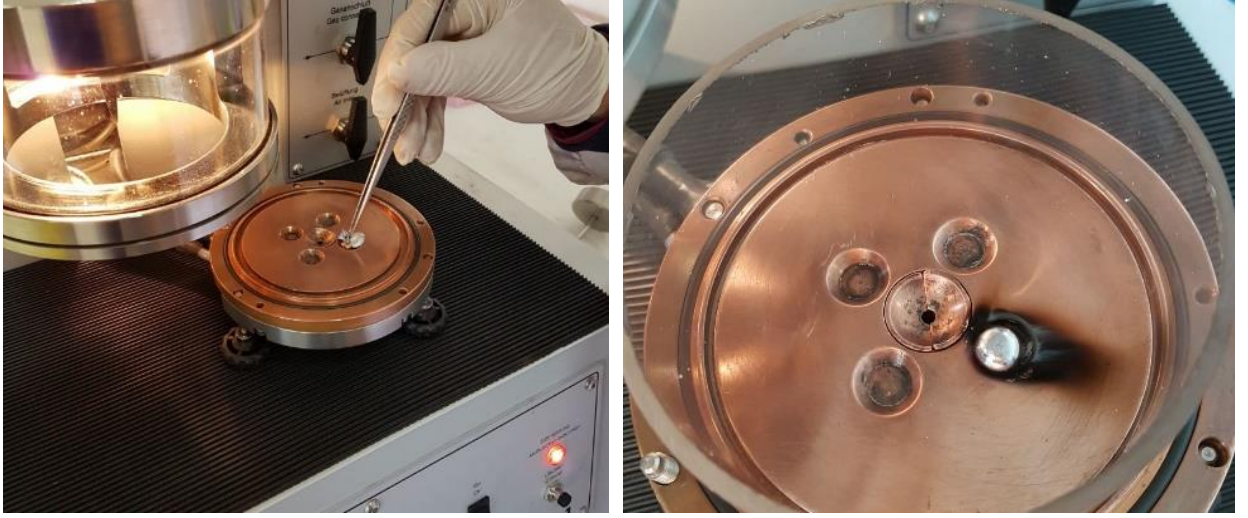
Proje kapsamında bolometre aygıtlarının vakum paketlenmesini sağlamak üzere geliştirilecek bağlama yönteminde kullanılması planlanan Au-Sn malzeme sistemini oluşturmak için ince film kaplama yöntemleri kullanılması düşünülmüştür. Au-Sn ötektik kompozisyonun oluşturmak için Au ve Sn katmanların ayrı ayrı kaplanmasının yanında ötektik kompozisyona ait alaşımın doğrudan buharlaştırılarak kaplanması da ikincil bir yöntem olarak uygulanmıştır. Au ve Sn katmanlarının ayrı ayrı kaplanmasıyla oluşturulacak ötektik yapı için hesaplanan teorik kalınlıklar temel alınarak kalınlık iyileştirme çalışması yapılmıştır. Proje kapsamında temel olarak 3 tür bağlama kombinasyonu çalışılmıştır. Bu kombinasyonlar şematik olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Birinci türde simetrik ötektik, ikinci türde yekpare olarak oluşturulmuş ötektik TLP, üçüncü türde ise katmanlı olarak oluşturulmuş ötektik TLP kompozisyonları mikrobolometre paketleme için çalışılmıştır.



Şekil 3.1 Tasarlanmış paketleme yapıları.

Yekpare ötektik alaşımların üretimi için tespit edilen kompozisyonlar yüksek saflıktaki elementler kullanılarak el değmeden ve 5 basamak hassasiyetinde tartılmışlardır. Bu elementlerden ingot alaşımlar ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Edmund Bühler marka ark ile eritme cihazıyla (Şekil 3.2) en fazla 4 gramlık ingotlar halinde üretilmişlerdir. Alaşımların yeterli homojenizasyonun sağlanması için 3 kez ters düz edilerek 99.995% saflıkta argon gazı ile

yıkanmış ortamda ergitilmiştir. İngotlar üretildikten sonra spektrometrik yöntemlerle kimyasal doğrulukları kontrol edilmiştir.



(a) (b)
Şekil 3.2 Ark ile ergitme ünitesi (a) ve üretilmiş ingot örneği (b) fotoğrafları.

Proje teklifinde 1.1-1.6 iş paketleri için yapılacak çalışmalarda belirtilen proje hedeflerine uygun olarak 400°C'den düşük sıcaklıklarda bir bağ oluşumu sağlayacak ve bağlama sonrası 400°C'den yüksek sıcaklıklarda bağ yapısını koruyacak bir malzeme sistemi ve bağlama işlemini geliştirmek üzere yapılan çalışmalar 4" Silisyum, 4" Borosilicate Cam ve 6" Silisyum pullar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pullar üzerine mikro fabrikasyon yöntemleri uygulanarak bağ metalleri ve yapılar oluşturulmuştur. İş paketleri 1.1-1.3 için yapılan çalışmalar silisyum diskler üzerine doğrudan metal katmanların (Ti/Ni/TiW/Cr/Au) saçtırma ve (Au/Sn/AuSn) termal buharlaştırma yöntemleriyle kaplanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Saçtırma ve termal buharlaştırma işlemleri için kullanılan ve ODTÜ-MEMS Merkezi'nde kurulu bulunan AJA saçtırma ve Varian 3119 termal buharlaştırma sistemleri Şekil 3.3'de görülebilir.



(a)

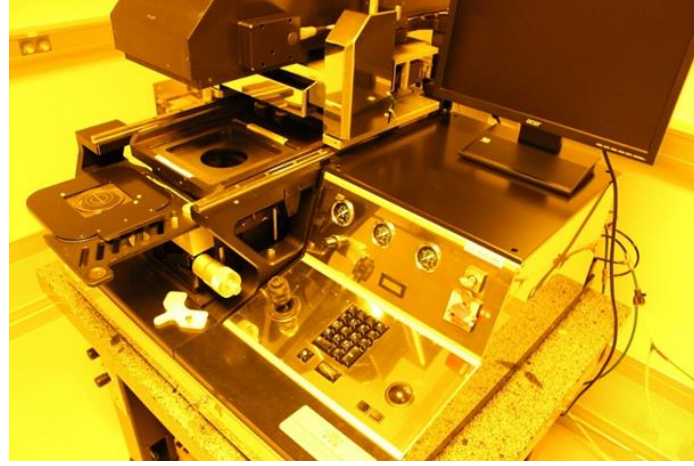


(b)

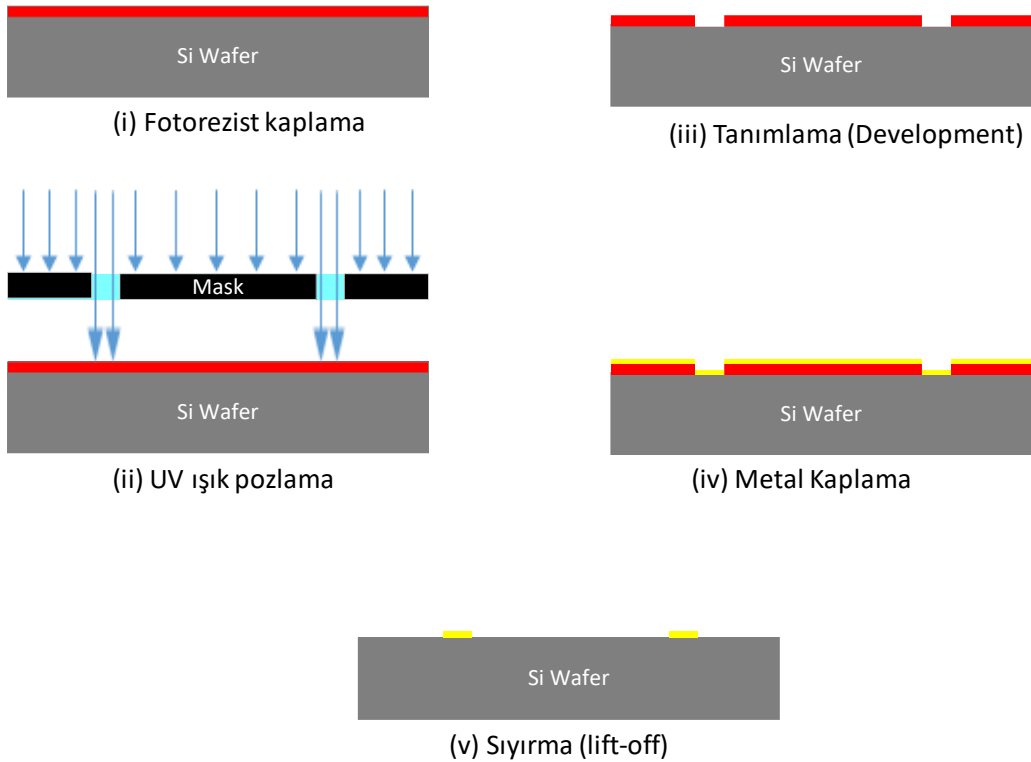
Şekil 3.3 İnce film metal katmanların kaplanmasında kullanılan AJA saçırma (a) ve Varian 3119 termal buharlaştırma (b) sistemlerinin fotoğrafları.

İş paketi 1.4 kapsamında üretimi gerçekleştirilen şekillendirilmiş silisyum ve cam diskler için UV lithografi adımları uygulanmıştır. Bu adımlar ışığa hassas fotorezist malzemenin diskler üzerine kaplanıp gerekli fırınlama işlemleri sonrası maskelenerek UV ışık ile pozlanması ve UV gören

fotorezist malzemenin uygun banyolama kimyasalı ile aşındırılması aşamalarından oluşmaktadır. Fotorezist malzemenin maske hizalama ve UV ışığa maruz bırakma işlemleri için kullanılan ODTÜ-MEMS Merkezinde kurulu EVG620 Maske Hizalama cihazının Fotoğrafı Şekil 3.4 (a)'da verilmiştir. Şekillendirilen fotorezist malzemenin üstüne yapılan metal kaplama sonrası, ultrasonik banyo kullanılarak aseton içinde sıyırma (*lift-off*) işlemiyle hedeflenen metal şekilleri elde edilmiştir. Bu fabrikasyon adımlarına ait şematik çizim Şekil 3.4 (b)'de gösterilmiştir.



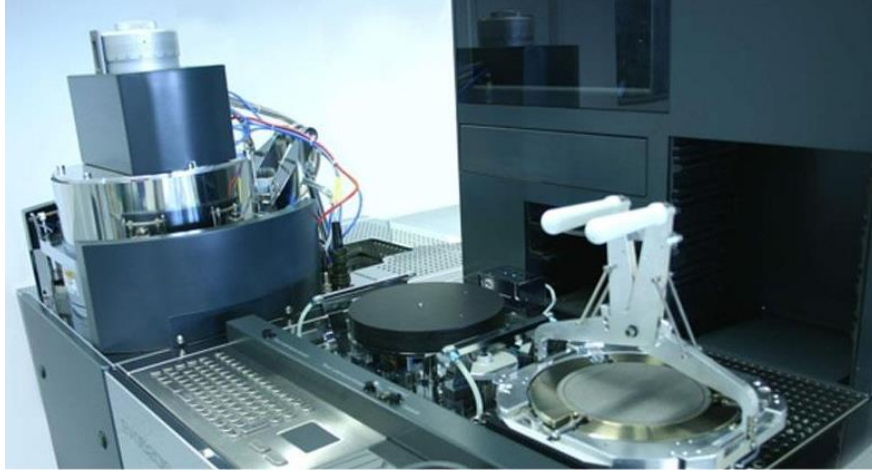
(a)



(b)

Şekil 3.4 EVG Maske Hizalama ve UV aydınlatma cihazı (a) ve silisyum disk şekillendirme sürecinin şematik gösterimi (b).

İş paketi 1.2 ve 1.5 kapsamında üretilen şekillendirilmemiş ve şekillendirilmiş örneklerin, iyileştirme çalışmasıyla belirlenen sıcaklık ve bağlama kuvveti altında vakum ortamında bağlamaları gerçekleştirilmiştir. Bağlama deneyleri için Şekil 3.5'te gösterilmiş ODTÜ-MEMS Merkezinde bulunan EVG 520 Disk Bağlama cihazı kullanılmıştır. Bağlama işlemi için şekillendirilmemiş iki disk elle kaba bir hizalama ile bağlama için hazırlanmıştır. Şekillendirilmiş örnekler için ise bağlama işlemi öncesi EVG Maske hizalama cihazı kullanılarak bağlama hizalaması yapılmıştır. Malzeme geliştirme aşamasında sıvı oluşumunu ve sıvı metalin bağ bölgesinden akma durumunu gözlemek; aseton, alkol gibi sıvılar içinde kaba kaçak testlerini gerçekleştirebilmek için Si-Cam disk birleşimi kullanılmıştır, daha sonraki bağlama iyileştirme çalışmaları için Si-Si disk birleşimi kullanılmıştır.



Şekil 3.5 EVG 520 Disk Bağlama Cihazı

3.2 Karakterizasyon Yöntemleri

İş paketleri 1.1, 1.3 ve 1.6 kapsamında gerçekleştirilen metal/alaşım yapılar ve oluşturulan bağlar çeşitli metotlarla incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Kaplanan metal kalınlıklarının kontrolü için Veeco Dektak yüzey profilometre cihazı kullanılmıştır. Ötektik kompozisyon hedeflenen örneklerin ötektik reaksiyon oluşumu ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Seiko Differential Scanning Calorimeter (DSC) cihazı (Şekil 3.6) ile tespit edilmiştir. DSC cihazı ile örnek azot atmosferi içinde kontrollü şekilde ısıtılır, ve olası ergime reaksiyonu sırasında ısı salınımı ve ısı emilim bilgisine bakılır. Sistemin belli sıcaklıklardaki ısı salınım ve emilim bilgisine göre malzeme içindeki faz değişimleri (ötektik reaksiyon gibi) hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 3.6 DSC cihazı

Malzeme kaplama sistemlerinde kaplaması yapılan, EVG 520 Bağlama cihazında tavlaması yapılan ve bağlaması gerçekleştirilen malzemelerin yapısal incelemesi için ODTÜ MEMS Merkezinde kurulu optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) , ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü ve ODTÜ Merkez Laboratuvarında kurulu SEM ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) cihazları kullanılmıştır. Yaklaşık 70-80nm kalınlığa inceltilmiş TEM örnekleri Bilkent UNAM'da kurulu FEI SEM-FIB cihazı ile hazırlanmıştır. Oluşturulan alaşımlarda bulunan fazlar ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde X-ışını kırınım (XRD) yöntemi kullanılarak saptanmıştır.

Proje kapsamında alımı gerçekleştirilen PVA TePla Taramalı Akustik Mikroskop (SAM) kullanılarak bağlaması yapılan Si-Si kombinasyonundaki disklerin bağ yapısındaki hatalar ve oluşan sıvı metalin akma durumu incelenmiştir. SAM cihazı (Şekil 3.7), akustik dalgaların malzeme ara yüzeylerinden yansıması ya da boşluklarda sönümlenmesi prensibini kullanarak malzeme içindeki hataların tahribatsız incelenmesi için olanak sunmaktadır. SAM incelemesi sırasında akustik dalgaların hareketinin iyi olması için inceleme deiyonize su içinde yapılmaktadır.

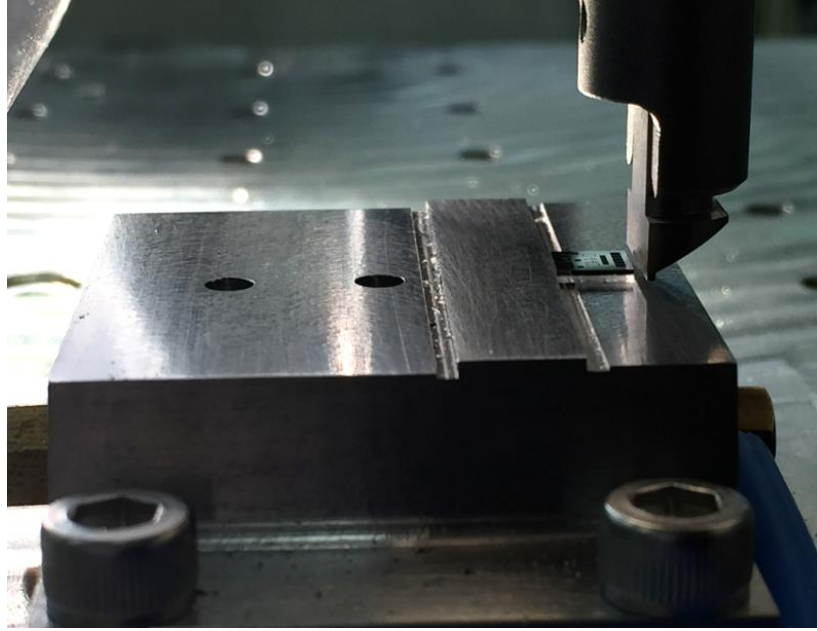


Şekil 3.7 PVA TePla firmasından temin edilen SAM 301 HD model taramalı akustik mikroskop cihazı

Bağlaması yapılan şekillendirilmemiş ve şekillendirilmiş disklerin mekanik karakterizasyonunu yapmak için diskler küçük hücelere/çiplere bölünür. Bu işlem için yarı iletken örneklerin kesimi için kullanılan özel kesme cihazı kullanılmaktadır. Bu projede ODTÜ MEMS Merkezinde bulunan Disco Dicer Cihazı disklerin kesim işlemi için kullanılmıştır. Kesim işlemi ile oluşturulan çiplerin mekanik dayanımının belirlenmesi için kesme mukavemetini ölçen Nordson Dage 4000 Bond Tester ile testler gerçekleştirilmiştir. Cihaz alt diski tutarken üst disk bir kafa yardımıyla itilirken diskler arasındaki bağı kopartır ve kopma kuvvetini belirler. Cihazın ve örneğin test öncesi fotoğrafı şekil 3.8'de verilmiştir.



(a)

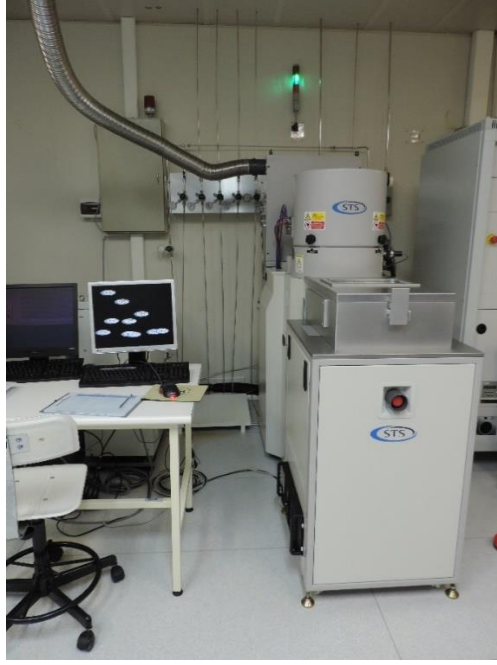


(b)

Şekil 3.8 Nordson Dage Bond Tester cihazının (a) ve test edilecek çip ile test kafasının test öncesi fotoğrafı (b).

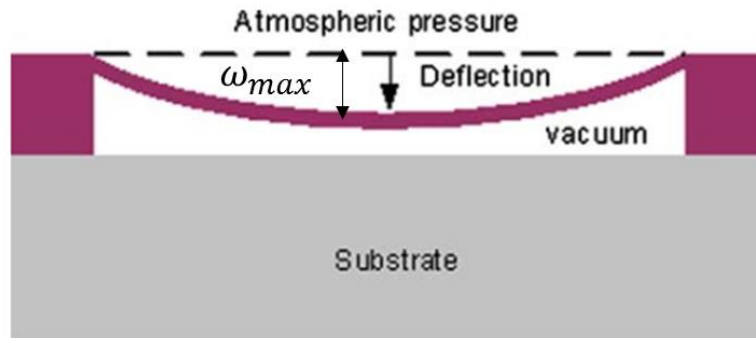
Bağlaması yapılan örneklerin sızdırmazlıklarını test etmek için proje içinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri kapak bükülme testi, diğeri ise helyum kaçak testidir. Her iki yöntemi de uygulamak için şekillendirilmiş Si diskler kullanılmıştır. Sızdırmazlık testlerinin gerçekleştirilmesi için Si disklerden bir tanesinin bağ metal hattının içinde kalacak şekilde kapak boşluğu oluşturulmuştur. Boşluğu oluşturmak için fazladan bir lithografi süreci uygulanmış

şekillendirilen bölge kuru bir aşındırma metodu olan derin reaktif iyon aşındırma (DRIE-*Deep Reactive Ion Etching*) yöntemiyle aşındırılmıştır. Aşındırma işlemi ODTÜ MEMS Merkezindeki STS DRIE cihazı (Şekil 3.9) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9 Silisyum disklerin kuru aşındırmasında kullanılan STS DRIE sistemi.

Kapak bükülme yöntemini uygulamak için kapak boşluğunun oluşturulduğu disk bağlama sonrasında inceltilecek boşluk üzerindeki Si disk in diyafram gibi olması sağlanmaktadır. Diyafram gibi davranan silisyum, paket içi ve atmosfer arasındaki basınç farkı sebebiyle içe doğru bükülme yapar (Şekil 3.10). Bükülme miktarı, malzemelerin mekanik parametreleri ve Eşitlik 3.1 kullanılarak paket içindeki basınç miktarı tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3.10 Diyafram çökmesi ve hücre içindeki vakumun şematik gösterimi. ω_{max} maksimum çökme miktarını belirtmektedir.

$$P_{total} = \frac{32}{5} \frac{Eh^3}{(1 - \nu^2)} \frac{(l^4 + w^4)}{l^4 w^4} \omega_{max}$$

Eşitlik 3.1

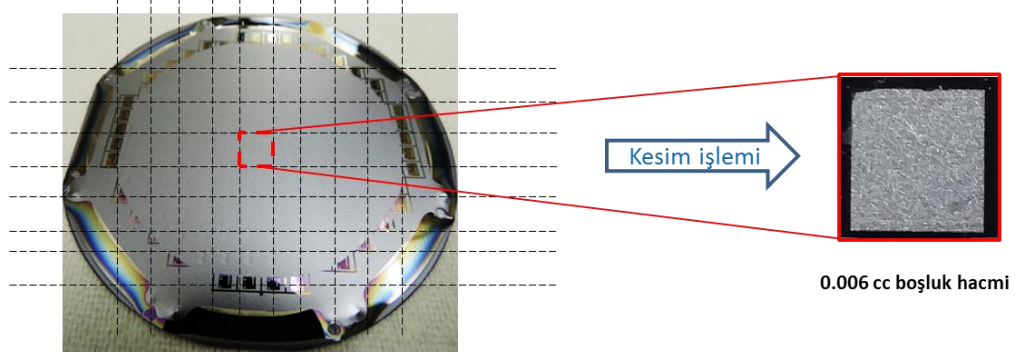
Eşitlik 3.1'de P_{total} hücre içindeki basınç miktarını, "E" diyafram malzemesinin elastik modulusunu, ν Poisson oranını, ω_{max} maksimum çökme miktarını, h diyafram kalınlığını, l diyafram uzunluğunu ve w diyafram genişliğini belirtmektedir.

Tablo 3.1 MIL-STD 883 nolu askeri standarda göre elektronik aygıt paketleri için He kaçak testi koşulları.

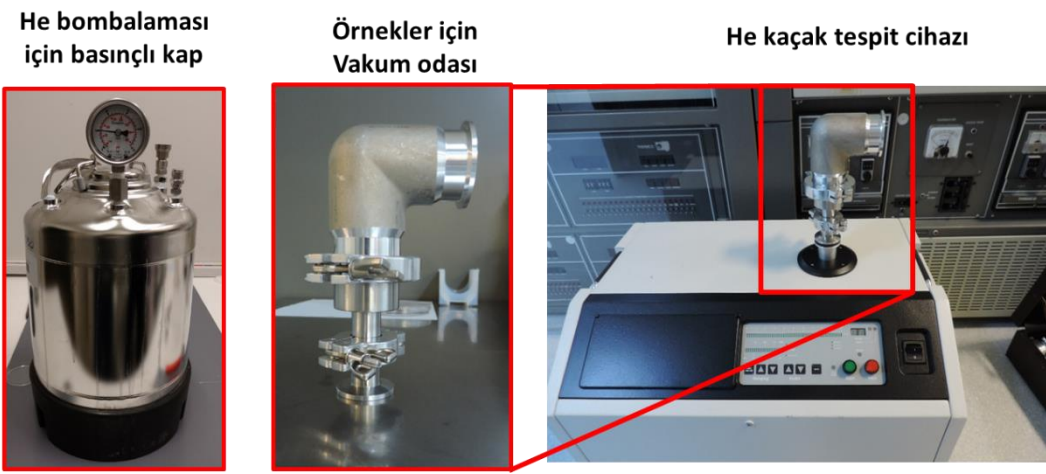
Volume of package (V) in cm ³	Bomb condition			R ₁ Reject limit (atm cc/s He)
	Psia ±2	Minimum exposure time hours (t ₁)	Maximum dwell hours (t ₂)	
<0.05	75	2	1	5 x 10 ⁻⁸
≥0.05 - <0.5	75	4	1	5 x 10 ⁻⁸
≥0.5 - <1.0	45	2	1	1 x 10 ⁻⁷
≥1.0 - <10.0	45	5	1	5 x 10 ⁻⁸
≥10.0 - <20.0	45	10	1	5 x 10 ⁻⁸

(75 Psia ≅ 5bar)

Diğer sızdırmazlık testi olan helyum kaçak testi Tablo 3.1'de verilen MIL-STD 883 ölçütlerine göre uygulanması gerekmektedir. Bu ölçütlere göre örnek belli bir helyum basıncı altında belli bir süre bekletildikten sonra, Tablo 3.1'de belirlenmiş olan süre içinde test odasına aktarılır ve test odasında helyum kaçak cihazı ile paket içinden sızan helyum miktarı ölçülür. Bu ölçüm için oluşturulmuş düzenek Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



(a) Disk seviyesindeki örneklerin kesilerek ayrılması



(b) He kaçak testi için oluşturulan test düzeneği

Şekil 3.11 He kaçak testi için örneklerin kesilerek ayrılması (a) ve test için oluşturulan düzeneklerin (b) fotoğrafları.

4 Bulgular

Proje çalışmalarında gerçekleştirilen çalışmalar silisyum disk seviyesinde paketleme malzemesinin geliştirilmesi, mikrolometrelerin oluşturulması ve performans testleri başlıkları altında sunulmuştur.

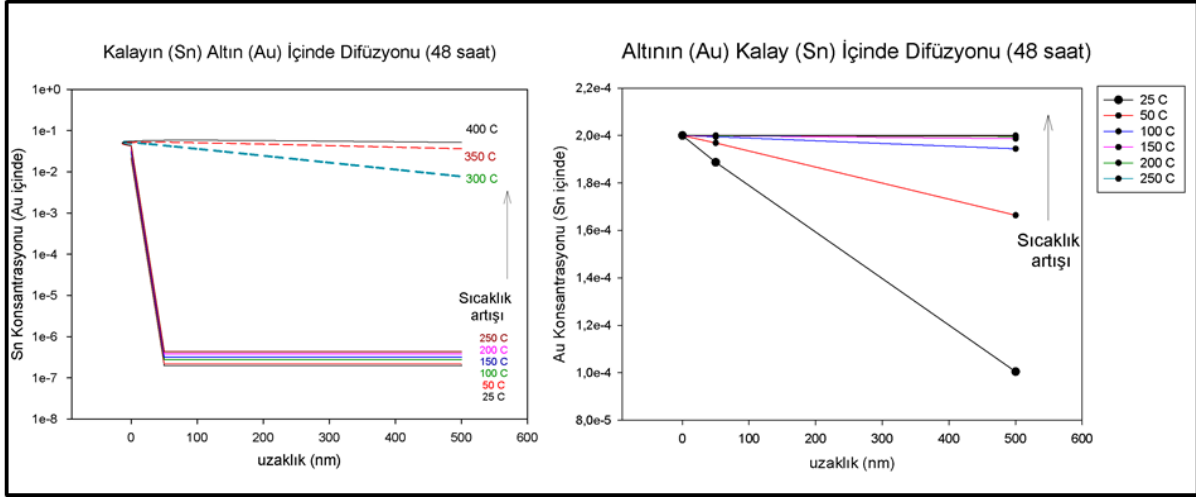
4.1 Silisyum Disk Seviyesinde Paketleme Malzemesinin Geliştirilmesi

4.1.1 Ötektik Yapıların Belirlenmesine Yönelik Teorik Çalışmalar

Gerçekleştirilen projenin ilk aşamasında dedektörle ve CMOS tabanla uyumlu olması bakımından altın-kalay (Au-Sn) ötektik paketleme tekniği ele alınarak Au-Sn ötektik yapının istenilen koşullarda elde edilme süreci detaylı olarak incelenmiştir.

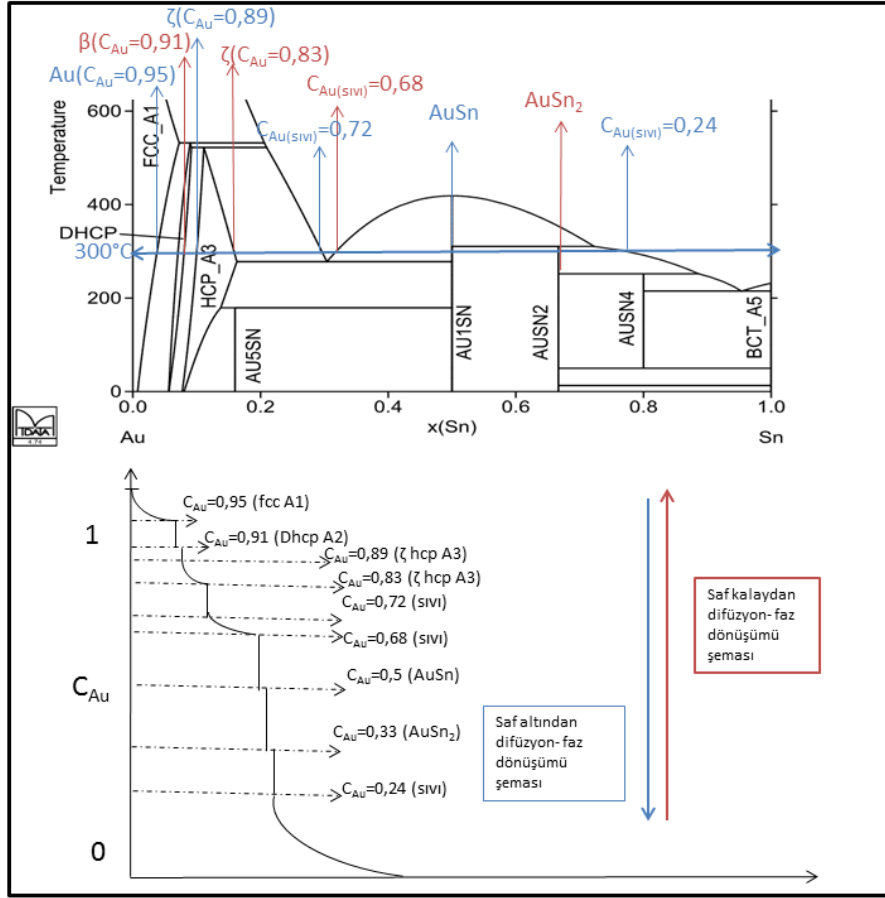
Paketleme amaçlı bağlamayı oluşturacak kaplamaların termal buharlaştırma (thermal evaporation) ve saçtırma (sputter) yöntemleri ile gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Her iki teknikte de, ince saf altın üzerine kalay kaplandığında difüzyon oda sıcaklığında dahi gerçekleşmektedir. Şematik gösterimlerde saf olarak gösterilen ince film katmanlar, bağlama işlemleri sırasında belli oranlarda birbirlerinin içersine karışmış alaşım ve/veya intermetalik yapılar (IC) oluşturabilmektedirler. Bu bağlamda ilk adım olarak saf Au (α) üzerine kaplanan saf Sn (β)'nin farklı sıcaklıklarda birbiri içindeki difüzyon davranışı teorik olarak incelenmiştir. Bağlama işleminde kullanılacak altın ve kalayın kalınlıkları 500 nm olarak seçilmiştir. Faz diyagramında altın zengin taraftan $C_0(\text{Sn})$ (altın içinde kalayın maksimum çözünürlüğü) değerleri farklı sıcaklıklar için tespit edilmiştir. Öte yandan faz diyagramı görece düşük değerdeki $C_0(\text{Au})$ (altının kalay içindeki maksimum çözünürlüğü) tespiti için yetersiz kaldığından literatürde bulunan benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak oldukça düşük bir değer olan 2×10^{-4} değeri seçilmiş ve sabit kabul edilmiştir.

Difüzyon denklemlerindeki sabitler (D_0 , Q_0) literatür verilerinden alınmış [34] ve hesaplamalar yapılmıştır. Altının ergime sıcaklığı 1064°C olduğundan üst limit olarak 400°C kullanılırken kalayın 232°C olan ergime sıcaklığı nedeniyle üst limit 250°C olarak alınmıştır. Şekil 4.1'de hesaplamalara dayalı kompozisyon uzaklık değişimleri verilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki 500 nm kalınlıktaki saf altının içinde kalay atomlarının difüzyonu oldukça zor olmaktadır. 48 saatlik süre zarfında bile 300°C 'de sadece ilk 50 nm kalınlıkta ilerleme olabilmektedir. 20 dk gibi kısa bağlama sürelerinde karışmanın saf altın tarafından gerçekleşmesi oldukça zor görünmektedir. Öte yandan saf kalay içinde çözünürlük limitine ulaşmak 50°C ve üzeri sıcaklıklarda çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Dolayısıyla esasen difüzyon mekanizmasının kalay zengin kısımdan başlaması daha olası görülmektedir.



Şekil 4.1 Saf altın ve saf kalayın birbirinde difüzyonu.

Au-Sn faz diyagramındaki değerler Şekil 4.2'de gösterildiği şekilde okunduğunda şematik olarak bir faz dönüşümü ve difüzyon grafiği elde edilebilmektedir. Kalay zengin tarafta katı difüzyonunun çok daha hızlı olmasının yanında ergimenin görülmesi difüzyon-faz dönüşümü şemasında aşağıdan yukarı bir karışmanın görülmesinin daha yüksek bir olasılık olduğunu göstermektedir. Bu durumda 300°C'de sıvı kalayın oluşumuyla beraber, kalayın %24 altını kendi içinde çözmesi beklenir. Daha sonra AuSn₂ oluşumunu AuSn oluşumu takip ederken sıvı kalayın altın içeriğinin de yükselmesi ve ötektik kompozisyona ulaşması beklenmektedir. Sıvı kalay ötektik kompozisyona ulaşırken daha önce oluşmuş olan AuSn₂ ve AuSn'nin de tekrar çözünmesi beklenir. Öte yandan çözünme, sıcaklığın düşük olması nedeniyle gerçekleşmeyebilir. Altın kaplamanın kalınlığına bağlı olarak sistemde katı altın kalması da mümkün olacaktır. Ötektik kompozisyona ulaşan ergimiş metal alaşımının soğuma ile birlikte Au₅Sn ve AuSn'den oluşan bir ötektik karışım oluşturması termodinamik olarak mümkün görünmektedir. Öte yandan yapılacak işlemlerin kinetik açıdan faz dönüşümleri ve difüzyon davranışlarında farklılıklara neden olabileceği unutulmamalıdır. Bu anlamda pratikte oluşan yapılar deneysel sonuçlarla daha iyi anlaşılacaktır.

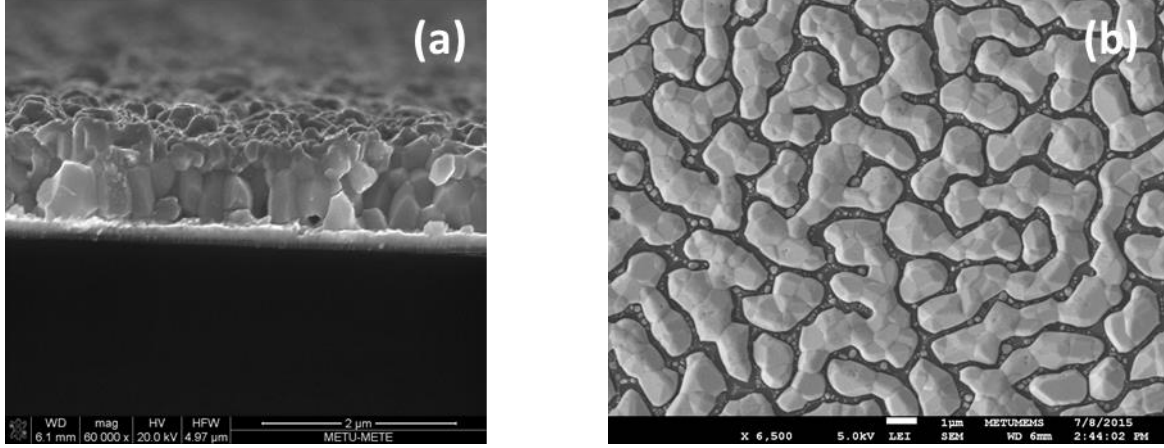


Şekil 4.2 Au-Sn faz diyagramı kullanılarak 300°C'de oluşturulmuş saf altın veya saf kalaydan başlayan difüzyon ve faz dönüşüm şeması.

Au-Sn faz diyagramına göre (Şekil 4.2) saf ötektik yapının ağırlıkça %20'lik kalay değerine denk geldiği görülmektedir. Altının özgül ağırlığı 19.30 g/cm³, kalayın ise 7.36 g/cm³ alındığında, tamamı ötektik bir yapı oluşturmak üzere saf altının saf kalay kalınlığına oranının yaklaşık olarak 1.5 olması gerektiği tespit edilmiştir. Fakat bu oran hacimsel yapılar için kolaylıkla doğrulanabilir olmasına karşın termal buharlaştırma ve saçtırma (sputter) gibi tekniklerle üretilmiş ince film kaplamalarda değişkenlik gösterebilmektedir. Au-Sn faz diyagramı esas alınarak istenilen kompozisyonların karşılık geldiği ince metal kalınlık değerleri tespit edilmiştir.

Şekil 4.3'te termal buharlaştırma ile üretilmiş TiW/Sn ince film kaplamaların kesitten ve üstten elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. 150 nm kalınlığında TiW bariyer katman olarak Si disk ile Sn arasına uygulanmıştır. Alışılmış döküm teknikleri ile hacimsel yapılarda boşluksuz olarak üretilen metaller, saçtırma ve/veya termal buharlaştırma teknikleri kullanılarak üretildiklerinde boşluklar ve gözenekler oluşmaktadır. Şekil 4.3'te bu bağlamda oluşmuş boşluklu ince film

karakterinde olan metal kaplamalar görülmektedir. Bu boşluklar sebebiyle efektif kalay hacmi beklenenden daha azdır.



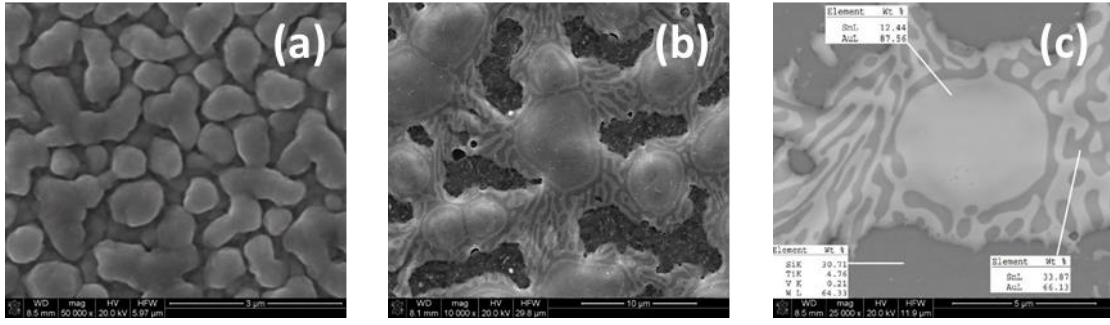
Şekil 4.3 TiW/Sn kaplamanın kesitten (a) ve üstten çekilmiş (b) elektron mikroskopi görüntüleri.

Bu bağlamda teorik olan hesaplanmış oranın bu teknikler için yenilenecek optimize edilmesi gerekmektedir. Bu iyileştirme çalışmasına yönelik olarak boş silisyum disk üzerine başlangıç kalınlıkları olarak 300 nm Au ve 200 nm Sn seçilmiş olup kalay kalınlığı 50 nm artacak şekilde örnek numuneler hazırlanmıştır. Si ve Au arasına bariyer katman olarak TiW kullanılmıştır. Hazırlanan numune kalınlıkları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

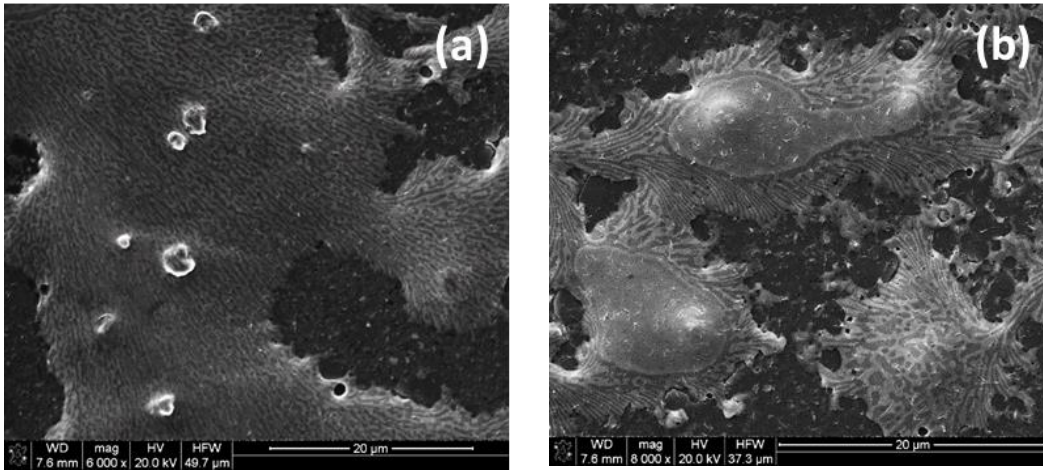
Tablo 4.1 Optimizasyon çalışmalarına yönelik Au ve Sn ince film kaplama kalınlıkları.

	Au kalınlığı (nm)	Sn kalınlığı (nm)
Deneme 1	300	200
Deneme 2	300	250
Deneme 3	300	300

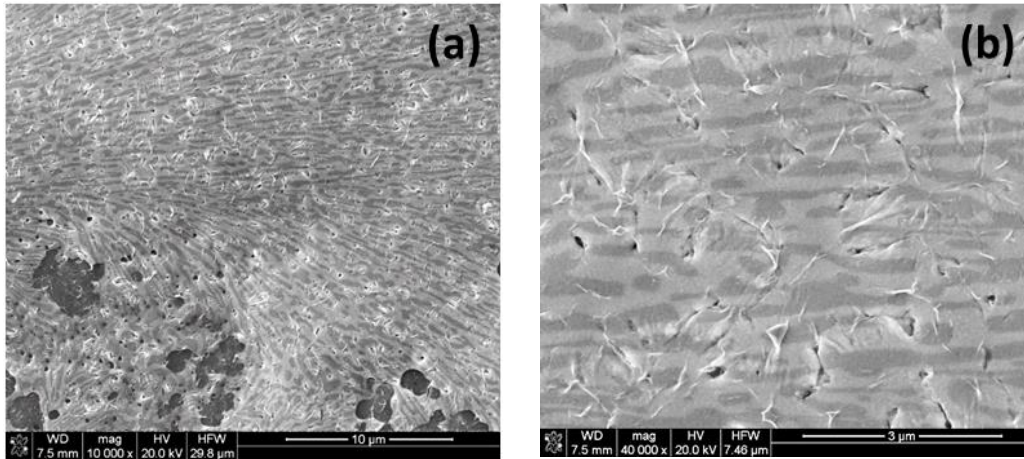
Tablo 4.1’de verilen kalınlık değerleri verilen örnekler DSC cihazı ile yaklaşık 500°C’ye kadar ısıtılarak ince film katmanların bir biri içine difüzyon etmesi ve son alaşım kompozisyonunu oluşturmaları sağlanmıştır. Deneme 1, 2 ve 3’e ait SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilmiştir. Şekillerde de görüleceği üzere proötektik faz gözlenmeyen ve tam ötektik faz oluşturan kalınlık kombinasyonunu deneme 3’teki kalınlıklar sağlamıştır.



Şekil 4.4 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/200nm kaplamanın kaplandığı halinin (a), DSC deneyleri sonrasında (b)-(c) elektron mikroskobu görüntüleri. Oluşan proötektik faz (c)'de gösterilmiştir.



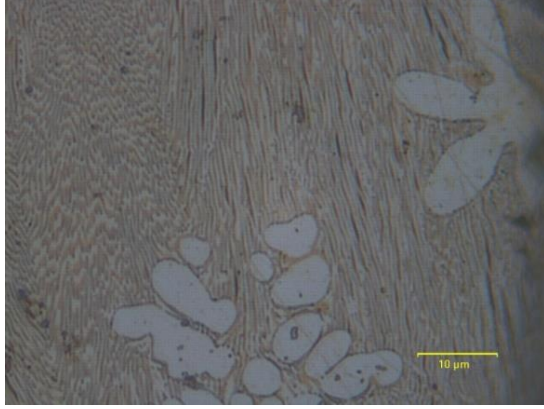
Şekil 4.5 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/250nm kaplamanın DSC deneyleri sonrasında elektron mikroskobu görüntüleri (a)-(b). Oluşan proötektik faz (b)'de gösterilmiştir.



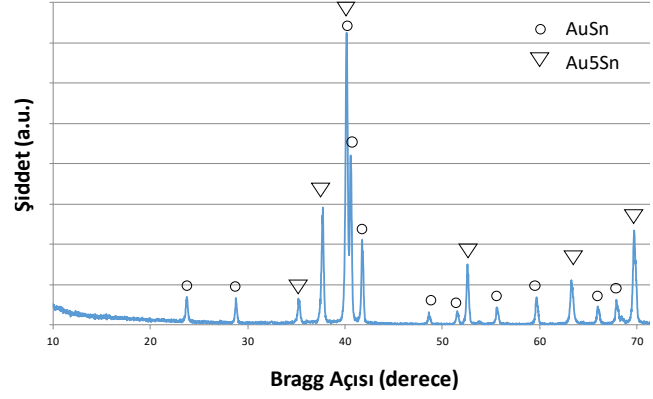
Şekil 4.6 TiW/Au/Sn 150nm/300nm/300nm kaplamanın DSC deneyleri sonrasında elektron mikroskobu görüntüleri (a)-(b). Oluşan ötektik faz (b)'de yüksek büyütme olarak gösterilmiştir.

İnce film ile alaşım oluşturma işleminin yanı sıra proje kapsamında uygulanan ötektik alaşımın ark ile ergitme yöntemi ile oluşturulup, termal buharlaştırma yöntemi ile doğrudan disk üzerine

ötektik alaşım olarak kaplamaya yönelik çalışmalar yapılmış ve ark ile ergitme yöntemi ile alaşım üretilmiştir. Üretilen alaşıma ait mikroyapı ve XRD ölçüm sonucu aşağıda görülebilir.



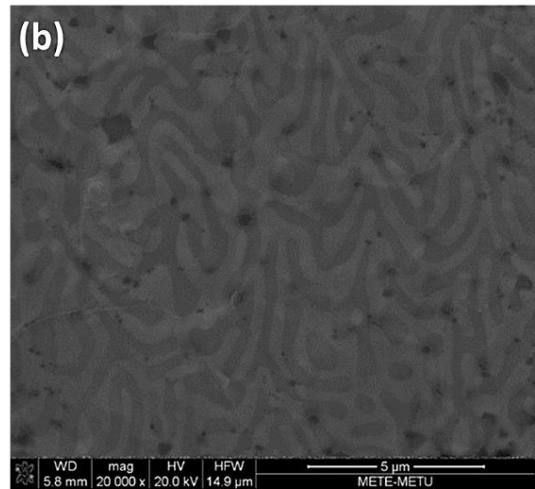
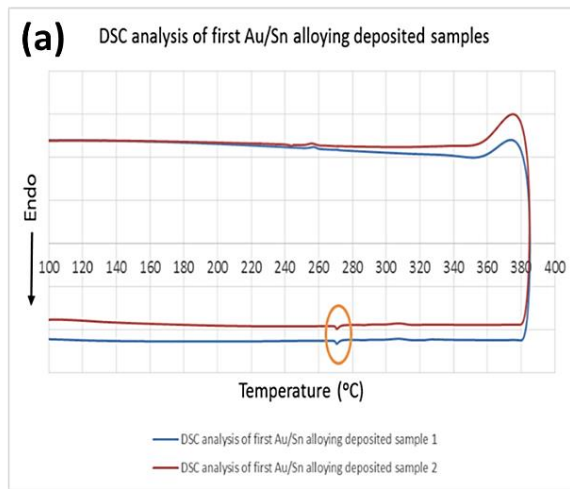
(a)



(b)

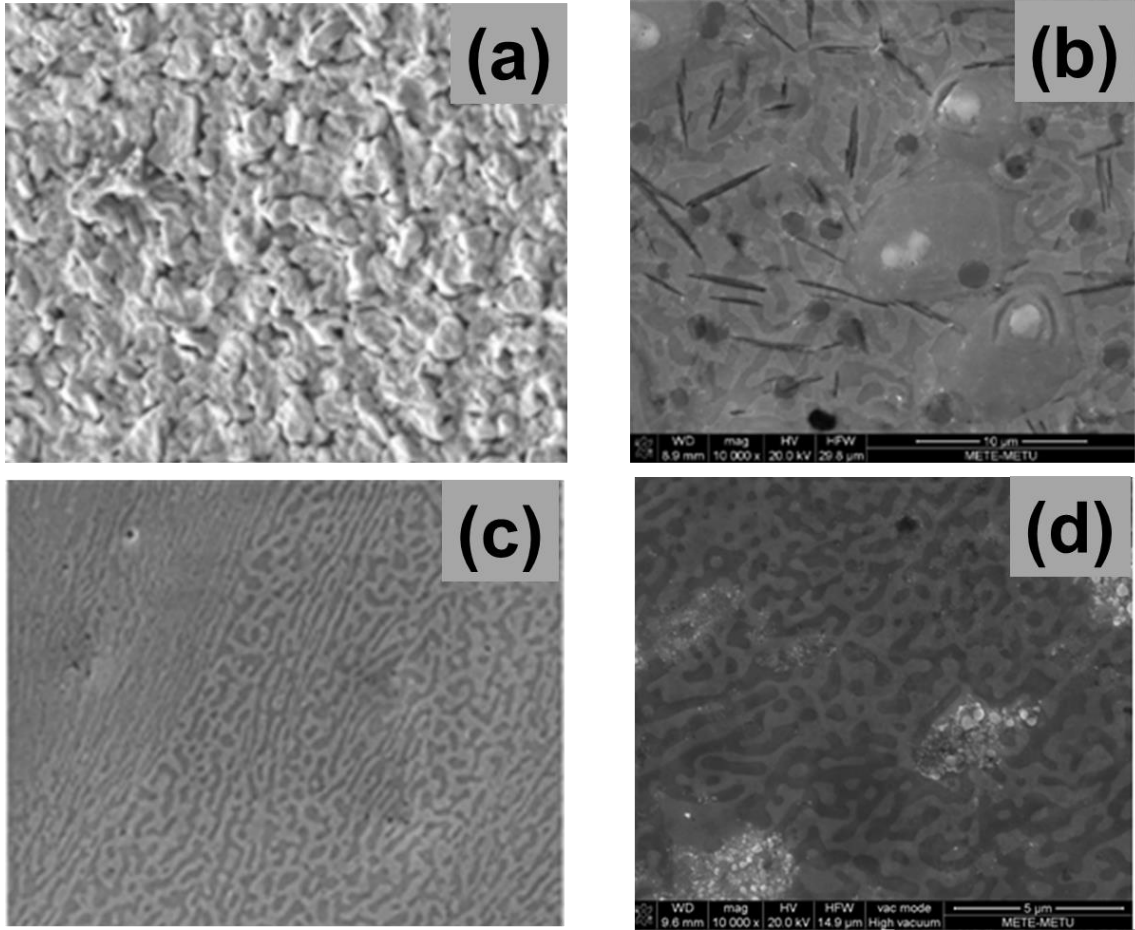
Şekil 4.7 Ark ile ergitme ile üretilmiş ötektik numunenin optik mikroskop görüntüsü (a) ve X-ışını kırınım deseni (b).

Ark ile ergitme yöntemi kullanarak üretilen Au-Sn alaşımının termal buharlaştırma yönetimiyle Si diskler üzerine ince film olarak kaplanmasından sonra DSC analizi ve SEM mikroyapı incelemesi, kaplanan yapının tamamen ötektik kompozisyonu sağlayacak şekilde ergime sağladığını göstermektedir. Kaplanan ince filmin DSC eğrisi ve DSC sonrası mikroyapı analizi Şekil 4.8'de verilmiştir.

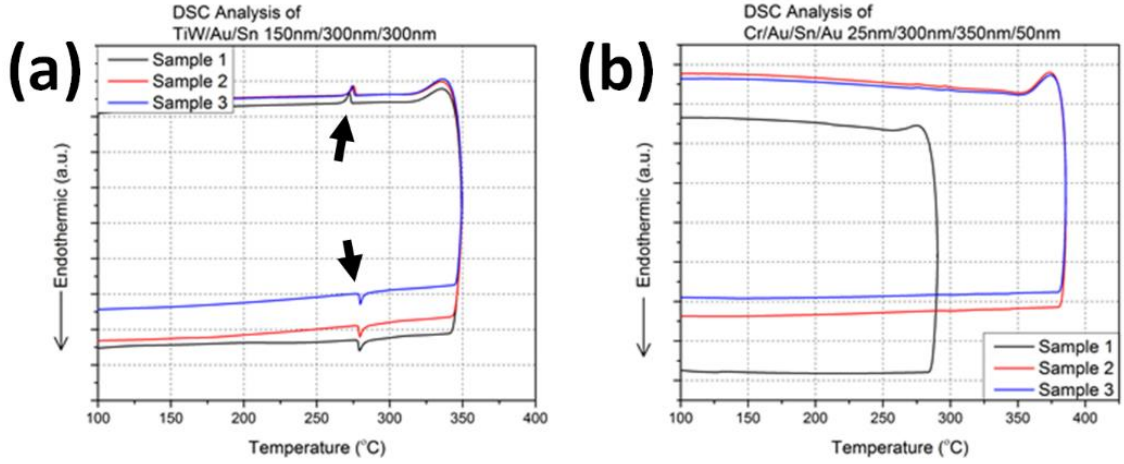


Şekil 4.8 Yekpare olarak hazırlanmış ötektik alaşımın silisyum disk üzerine kaplanması sonrası elde edilmiş DSC sinyali (a) ve yüzey görüntüleri (b).

Au-Sn alaşımlar ile Si disk arasında tutunma katmanı olarak kullanılacak metal katmanının seğimi için 4 farklı malzeme denenmiştir. Bunlar Cr, Ti, TiW ve Ti/Ni katmanlardır. Şekil 4.9'da bu katmanların uzerinde 300°C ve 20 dakika suresince N₂ ortamında tavlanan otektik Au-Sn alaşımlarının SEM gurutueleri verilmiştir. SEM karakterizasyonu sonuğlarına gure Cr katmanın alaşımın sıvı oluşturmasına engel olduğu, Ti katmanın istenilmeyen intermetalik yapıları oluşturduğu, TiW ve Ti/Ni katmanlarının ise sıvı oluşturma konusunda alaşıma etki etmediği gozlenmiştir. Şekil 4.10'da bu sonuçları destekler şekilde, DSC analizinin otektik yapının gozlemlenmediği Cr katman için bir ergime reaksiyonu vermezken otektik yapının gozlemlendiği TiW katman için ergime reaksiyonunu otektik noktada ağık olarak verdiği gorumektedir.



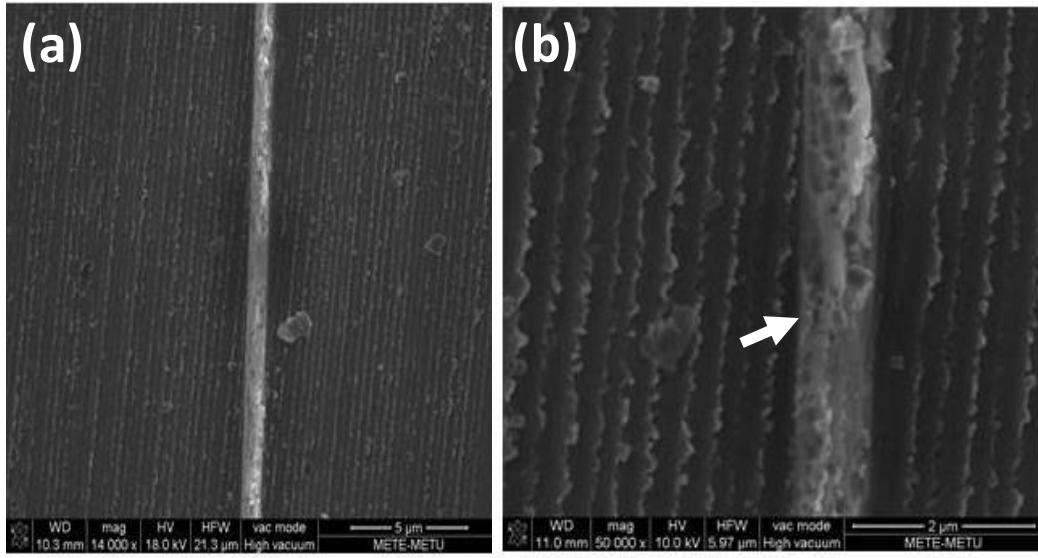
Şekil 4.9 300°C ve 20 dakika suresince N₂ ortamında Cr (a), Ti (b), TiW (c) ve Ti/Ni (d) katmanlar uzerinde Au-Sn otektik alaşımın ısıl işlem sonrası elektron mikroskobu gurutueleri.



Şekil 4.10. TiW (a) ve Cr (b) katman üzerinde ötektik yapılarla 10°C /dak. ısıtma ve soğuma hızlarında gerçekleştirilen DSC analizleri. Oklar ötektik ergime noktasını işaret etmektedir.

4.1.2 Şekillendirilmemiş Silisyum Disk Bağlama Deneyleri

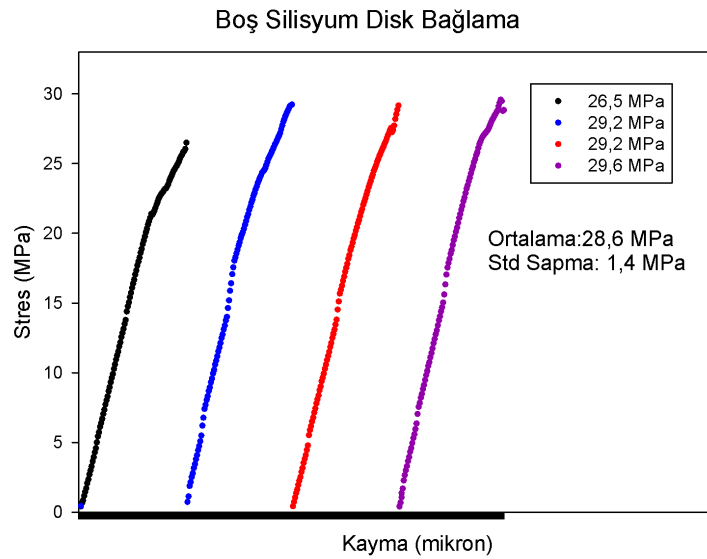
Proje önerisinde belirtildiği üzere, boş, yani herhangi bir şekillendirilme yapılmamış, silisyum disklerin ötektik olarak bağlanarak karakterize edilmesine yönelik çeşitli denemeler yapılmıştır. Fakat ilk denemelerden sonra, şekillendirme yapılmış örneklerle karakterizasyon çalışması yapılmasının daha verimli olacağına karar verilerek bu çalışmalara ara verilmiştir. Önceki kısımda sunulduğu üzere, boş silisyum diskler ötektik yapının içyapı olarak tespitine yönelik işe yarar sonuçlar verirken, mekanik olarak incelenmesinin şekillendirilmiş olanlara kıyasla daha az faydalı olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise, şekillendirilmemiş disklerin mekanik sonuçlarında prosesten kaynaklı hataların herhangi bir yansıması olmayışıdır. Şekil 4.11 (a) ve (b)'de boş silisyum disklerin ötektik kaplama ile (Cr/Au/Sn/Au 50nm/50nm/500nm/50nm Cr/Au 50nm/800nm) birleşme sonrası görüntüleri verilmiştir. Okla işaretlenen bölge bağlanmış ötektik alaşımdır. Bağlama iki silisyum disk arasına uygulanmıştır.



Şekil 4.11 Şekillendirilmemiş boş silisyum disklerin ötektik bağlama ile birleştirilmeleri (a) ve (b).

4.1.3 Şekillendirilmemiş Disk Karakterizasyon Deneyleri

Bağlanmış silisyum disklerden 5x5 mm'lik numuneler kesilerek Şekil 3.8'de gösterilen cihaz yardımı ile kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Örnek deney sonuçları (Cr/Au/Sn/Au 50nm/50nm/500nm/50nm Cr/Au 50nm/800nm) özelinde Şekil 4.12'de verilmiştir. Ti/Ni/Au-Sn 20nm/50nm/340 nm Ti/Ni/Au 20nm/50nm/1150 nm için 34.3 MPa ve Ti/Ni/Au-Sn 20nm/50nm/340 nm Ti/Ni/Au 20nm/50nm/850 nm için ise 35.5 MPa kesme mukavemeti tespit edilmiştir. Bu deneyler şekillendirilmemiş boş silisyum disklerden elde edildiği için standard sapma değeri çok az şekillendirme parametrelerinden etkilenmemiş yüksek değerler bulunmuştur. Deney sonrası numuneler parçalandığı için mikroskop altında analiz edilememişlerdir.

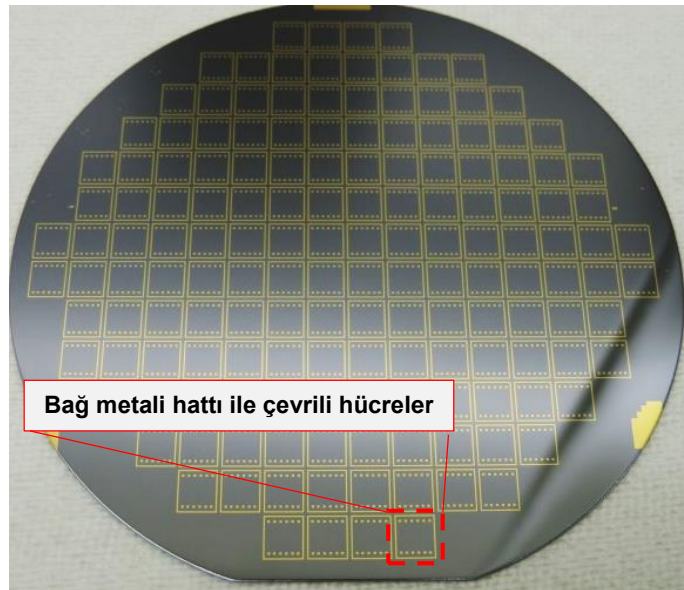


Şekil 4.12 Şekillendirilmemiş boş silisyum disklerden elde edilmiş kesme mukavemet sonuçları.

4.1.4 Silisyum disk şekillendirme çalışmaları

Bir önceki bölümde anlatılan deneylerde boş (şekillendirilmemiş) silisyum diskler kullanılmıştır. Ancak disk seviyesinde paketlemede bağlamanın ne kadar etkin olacağını anlamak için CMOS pulu ile uyumlu bağ metali hattı oluşturacak şekilde uygulanması daha net sonuçlar verecektir. Bu açıdan bağlama metal alaşımının diskin tamamına kaplanması yerine, şekillendirilerek bir bağ metali hattı oluşturulan örnekler ile bağlama deneyleri devam ettirilmiştir. Bağlama noktaları dışındaki alanlarda silikonun inceltilmesi ile her bir hücre içinde MEMS elemanına yetecek bir hacim oluşturularak da ikincil bir şekillendirme yapılabilmektedir. Bağlamanın şekillendirilmiş bağlama katmanları içeren diskler arasında (Si/Si veya Si/Cam) yapılması hermetikliğin ölçülebilmesini sağlamanın yanında kesme dayancının daha gerçekçi ölçümü açısından da önemlidir. Disklerin yukarıda anlatıldığı anlamda şekillendirilmesinde Bölüm 3'te anlatılan fotolitografi yöntemi kullanılmaktadır.

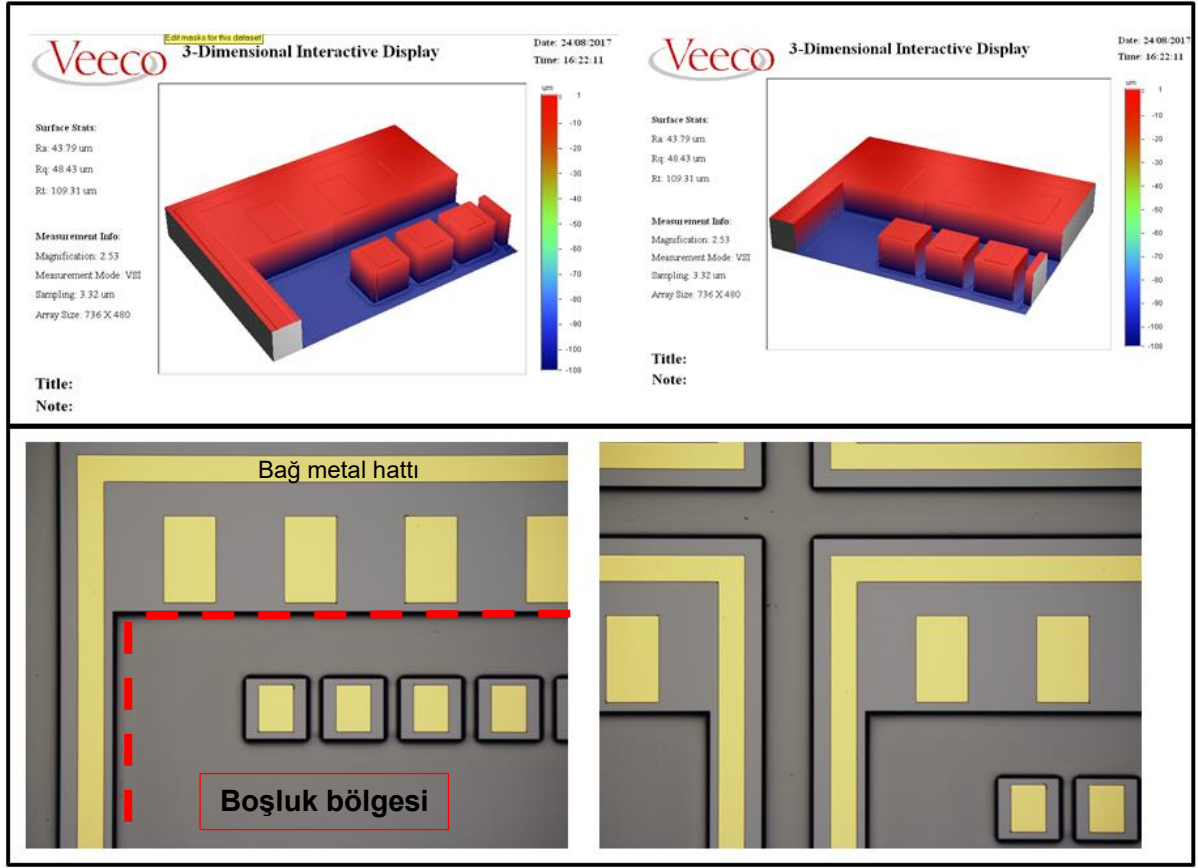
Deneme deneylerinde daha ekonomik olması açısından 4" çaplı diskler kullanılmıştır. Şekillendirmenin ilk aşaması disk üzerindeki nemin alınmasını amaçlayan dehidrasyon işlemidir. Üretim aşamasındaki tüm işlemler gibi bu işlem de temiz alanda yapılmaktadır. 110°C'de 10 dakika bekletilen disk daha sonra SPR 220-3 fotorezist ile kaplanmaktadır. Kaplama işlemi 1500 rpm hızla dönen disk üzerinde 30 sn spin kaplama ile gerçekleştirildikten sonra EVG620 mask aligner kullanılarak maske hizalaması yapılmaktadır. Hizalamanın cm^2 'ye 13mW UV yoğunluğunda ışığa maruz bırakılan disk 1dk MF319 kodlu kimyasal developer ile banyolamaya tabi tutulur ve saf su ile yıkanır. Bu işlem sonrası PR (fotorezist) üstünde metal kaplama boşlukları oluşturulmuştur. Şekillendirilmiş silisyum disk örneği Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Şekillendirilmiş silisyum disk örneği.

Fotolitografi sonrası metal kaplama çalışmalarına geçilmiştir. Proje kapsamında Au ve tutucu katmanları (Au, Ti, TiW, Cr) AJA saçtırma sistemi kullanılarak, Sn ve koruyucu Au ise Varian termal buharlaşma sistemi kullanılarak kaplama gerçekleştirilmiştir. İnce film metal kaplama sonrası, metal katmanın altında kalan fotorezisti kaldırmak üzere aseton kullanılarak sıyırma (*lift-off*) işlemi uygulanmıştır. Böylece maskelenmiş bölgeler dışında kalan kaplamalar ayrılarak metal kaplama şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler ve sızdırmazlık açısından bu aşamada, yani şekillenmiş metal kaplama ile paketleme yapılarak, hem sızdırmazlık (aseton testi) hem de paketleme etkinliği ölçülebilmektedir.

İkinci bir şekillendirme ise boşluk oluşturmak amacıyla yapılmaktadır. Si pul üzerinde yaklaşık 100 mikrometre derinliğinde kapak boşlukları oluşturulması amacıyla birinci litografiyle aynı parametreler kullanılarak ikinci bir litografi işlemi yapılmaktadır. Bu kez kaplama yerine aşındırma yapılarak derin kapak boşlukları oluşturulmaktadır. Oyuk oluşturmak amacıyla derin reaktif iyon aşındırma (*DRIE*) teknolojisi kullanılmaktadır. Daha sonra metal kaplamayı koruyan PR aceton ve/veya PR skaldırma kimyasalı ile kaldırılarak şekillendirme işlemi sonlandırılmaktadır. Bu işlemler sonrasında oluşan oyuklu (*cavity*) desen sayesinde yapılacak paketleme sonrasında vakum tutma (*hermeticity*), zamana bağlı sızdırmazlık performansı test edilebilecektir. Mekanik özellikler açısından bir önceki şekillendirmeden farklı sonuçlar beklenmemektedir. Kapak boşluğu oluşturulan bir pulun profilometre ile oluşturulmuş çizimi ve boşluğa ait optik mikroskop fotoğrafları Şekil 4.14'te görülebilir.

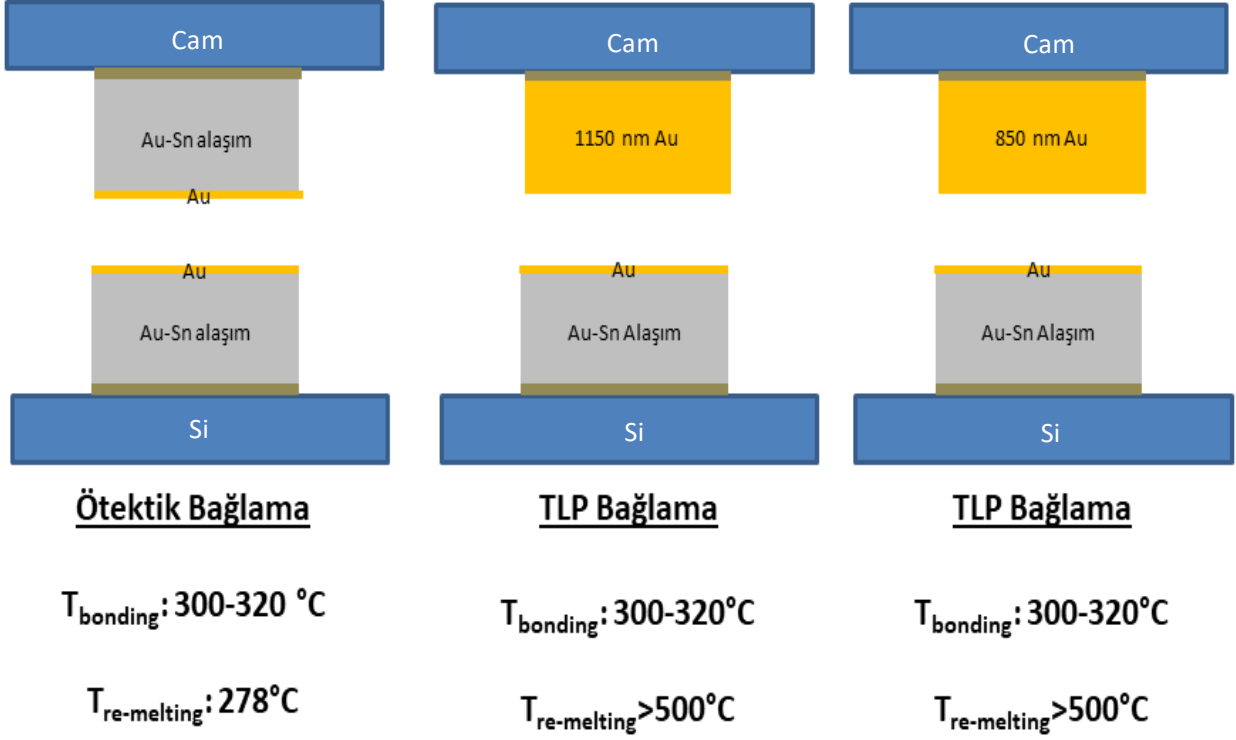


Şekil 4.14 Boşluğun optik profilometre ölçümüyle oluşturulan üç boyutlu çizimi ve ölçüm yapılan bölgeye ait optik mikroskop fotoğrafları.

4.1.5 Şekillendirilmiş Silisyum Disk Bağlama ve Karakterizasyon Deneyleri

Şekillendirilmiş silisyum disk bağlama deneylerinde 2 temel yaklaşım uygulanmıştır. İlkinde Au-Sn ötektik alaşımı yekpare olarak, ikinci yaklaşımda ise gerçekleştirilen teorik çalışmalar göz önünde bulundurularak ötektik kompozisyonu sağlayacak şekilde Au ve Sn iki ayrı katmanlı olarak kullanılmıştır. Her iki yaklaşıma ait bağlama deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

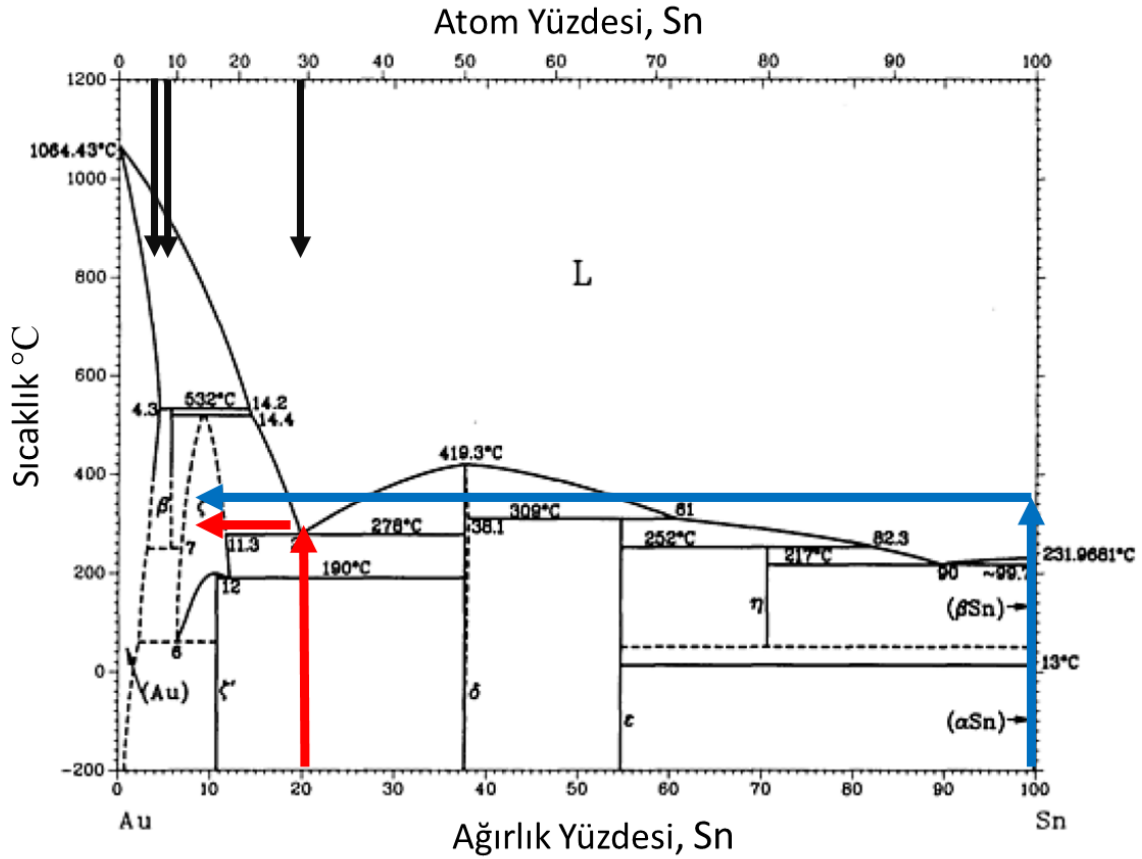
Yekpare Ötektik Bağlama



Şekil 4.15 Ötektik Au-Sn alaşımı kullanılarak yapılan 3 set bağlama deneyinin şematik gösterimi.

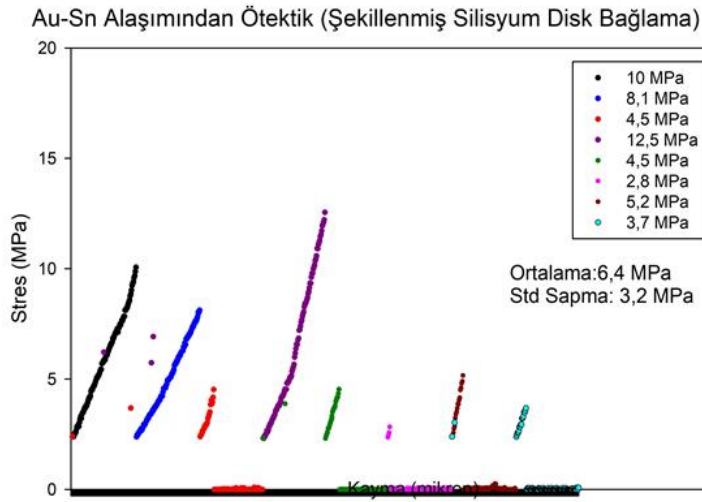
Yekpare ötektik bağlama denemeleri için Şekil 4.15'te şematik olarak gösterildiği gibi numunelerin bir setinde her iki taraf 340 nm kalınlıktaki alaşımla kaplanmış ve üzerine oksitlenmeyi önlemek amacıyla 10 nm kalınlığında altın kaplanmıştır. Diğer iki set numunede ise bir tarafta alaşım kaplanırken diğer tarafta 850 nm ve 1150 nm kalınlıklarında altın kaplamalar yapılmıştır. Paketleme sonucu elde edilecek alaşımların ergime noktalarının ötektik için 278 °C, TLP'ler için 500 °C üstünde olması beklenmektedir.

Şekil 4.15'te gösterilen 3 farklı tasarımla ulaşılmak istenilen kompozisyonlar Au-Sn faz diyagramı üzerinde Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Faz diyagram üzerinde mavi çizgi literatürde kullanılan klasik TLP uygulaması, kırmızı olan bu proje için geliştirdiğimiz ötektik TLP uygulamasını göstermektedir. Siyah çizgiler ise Şekil 4.15'te tasarlanan bağlama kalınlıklarına istinaden ulaşılması planlanan kompozisyonları işaret etmektedir.



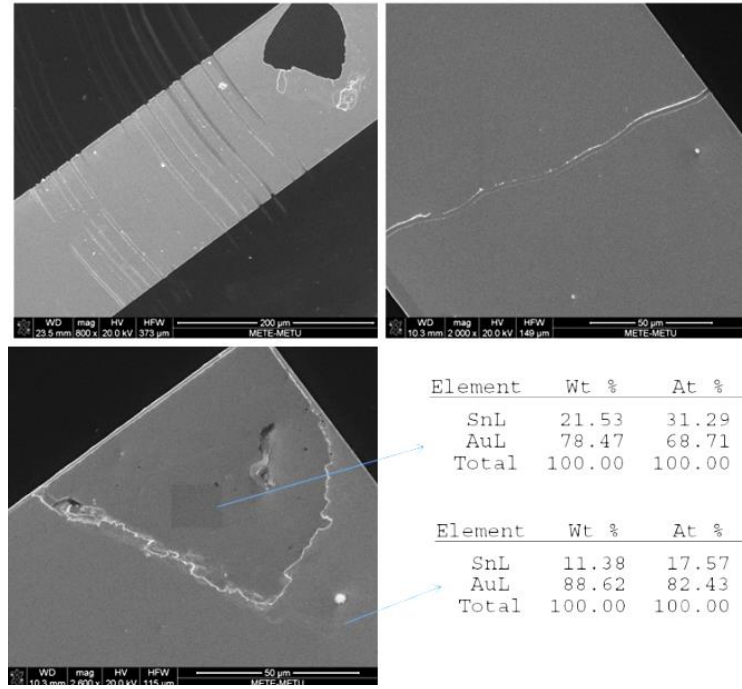
Şekil 4.16 Altın-kalay faz diyagramı. Mavi çizgiler: klasik TLP uygulaması, kırmızı çizgiler: Ötektikten TLP uygulaması, Siyah Çizgiler: Ötektik ve ötektikten TLP için hedeflenen kompozisyonlar.

Şekillenmiş olarak yapılan bağlama deneylerinde bağlama hatlarından taşma miktarı ve hermetikliğin gözlemlenmesi için bir tarafı cam bir tarafı silisyum diskler kullanılmaktadır. Paketleme sonrası kaba sızdırmayı test edebilmek üzere numuneler asetonda bekletilmiş daha sonra kesme testi uygulanmıştır. Bu numunelerde kesme mukavemetinin ölçülmesinin ardından kırık yüzeylerin silisyum disk kısımları incelenerek SEM ve EDS analizleri de yapılmıştır. Ötektik alaşım kullanılarak yapılan paketlemelerden her iki tarafta ötektik alaşım kaplanan numune için aseton testinde disklerin büyük bir bölümünde (%80'den fazla) asetonun içeri doğru ilerlediği görülmüştür. Bu nedenle aseton geçirmemiş olan bölgeden görece kısıtlı sayıda numune için kesme testi yapılmıştır. Numunelerin disk üzerindeki yerleri ve aseton testi sonrası görüntü Şekil 4.17'de kesme testi sonuçlarının yanında verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki etkin bir paketleme yapılamamıştır. Boş silisyum paketleme ile ulaşılan değerlerin çok altında kesme mukavemet değerleri gözlenmiştir.

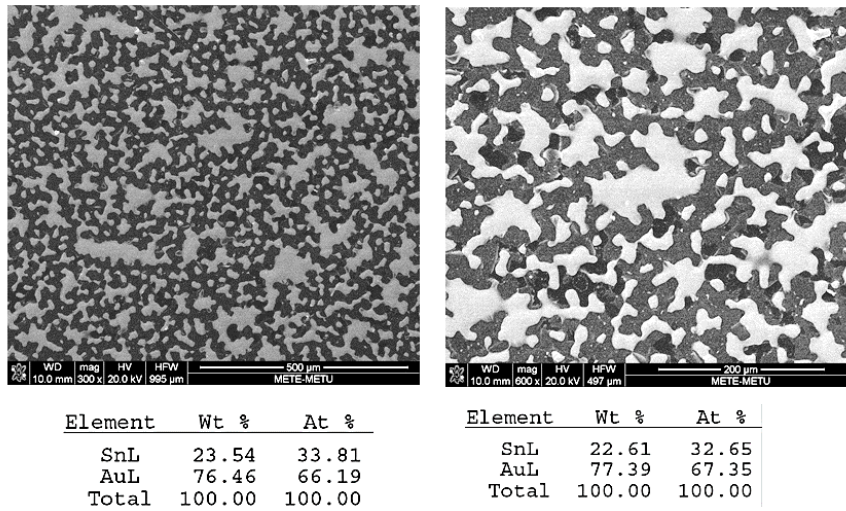


Şekil 4.17 Çift taraflı Au-Sn alaşımı kaplanmış, şekillenmiş olarak ötektik paketleme yapılan numunenin kesme testi sonuçları ve aseton testi sonrası aseton geçirmeyen bölgelerde kesme numunelerinin pozisyonları.

Kesme testi yapılan numunelerden 10 MPa kesme mukavemetine sahip 1 numaralı numunede SEM ve EDS analizleri Şekil 4.18'de görülmektedir. %21 Sn içeren ötektik faz sadece küçük bir alanda tespit edilmiş diğer bölgelerde ise EDS analizleri altın zengin (%10-14 Sn) sonuç vermiştir. Bu durum ζ fazına denk gelen yerlerden ayrılma ihtimalini düşündürmektedir. Ötektik kısmın daha çok cam yüzeyde kaldığı düşünülmektedir fakat SEM ile camın kompozisyon analizi yapmak için incelenmesi mümkün olmamıştır. Bu inceleme bağlama sırasında ısıtılırken birbirinden küçük bir aralıkla ayrılan yüzeylerde eriyik alaşımın toparlanmış olabileceğini akla getirmiştir. Bunun kontrol edilmesi için sadece 320 nm Au-Sn alaşımı ve 10 nm Au kaplanmış silisyum disk DSC ile 320 °C'ye ısıtılıp 5 dakika bekletildikten sonra soğutulmuştur. Şekil 4.19'da SEM görüntülerinde de görüldüğü üzere alaşım erime ile birlikte yüzeyde toparlanarak lokalize olmuştur. Bu durum hem sıvı faz miktarının artırılması hem de basınç parametresinin optimize edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

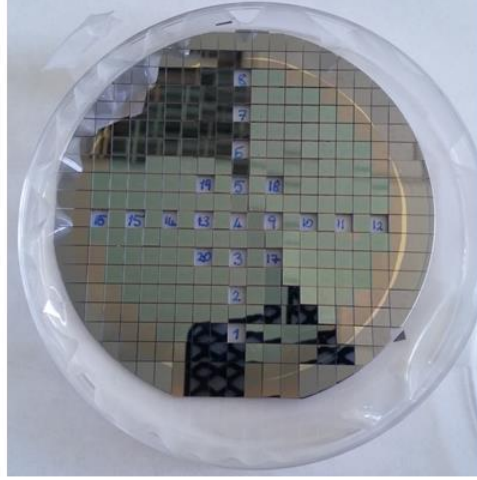


Şekil 4.18 Her iki tarafına da Au-Sn alaşımı kaplanmış ve şekillendirilerek paketlenmiş numunedeki kesme testi sonucu oluşan yüzeylerin SEM ve EDS incelemeleri.

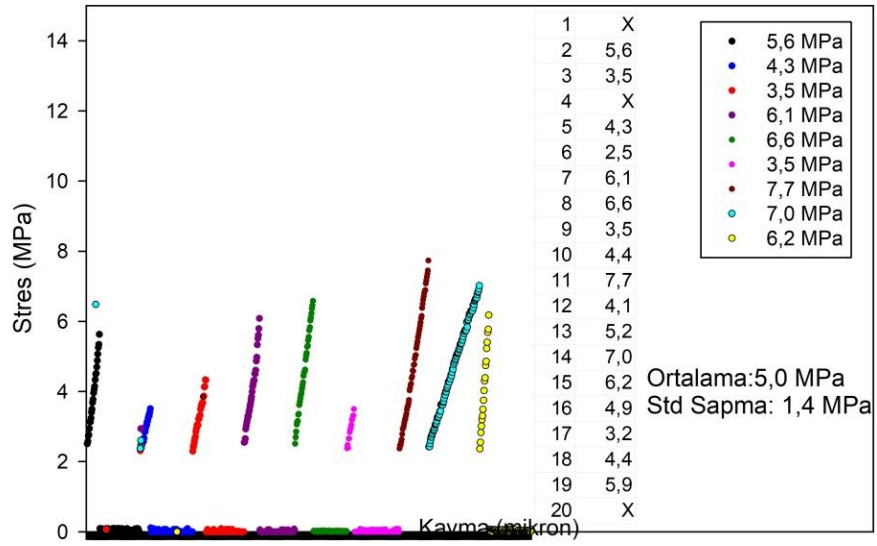


Şekil 4.19 Au-Sn ötektik alaşımının ısı işlem sonrası yüzeyde toparlanması (DSC'de 320°C'ye ısıtılıp 5 dakika bekleme sonrası soğutulması).

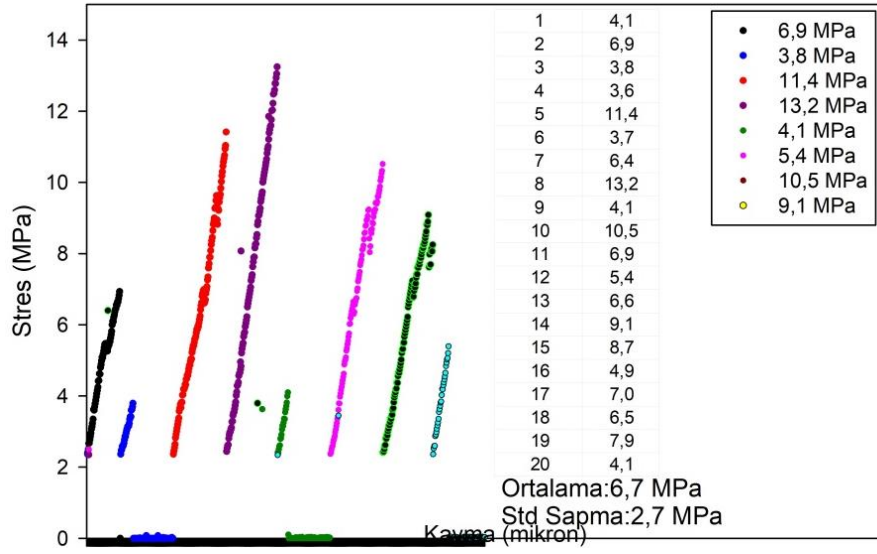
Ötektik alaşım kullanılarak farklı altın kalınlıklarında kaplamalarla TLP yönteminin denendiği numunelerin aseton testlerinde numunelerin asetonu fazla geçirmediği gözlemlenmiştir. Her iki altın kalınlığı için de kesme mukavemeti testleri 20 farklı numune ile Şekil 4.20'deki sistematığe uygun olarak yapılmıştır. Test sonuçları, örnek grafiklerin yanında tüm sonuçları içeren tablo ve ortalama, standart sapma değerleri ile birlikte Şekil 4.21 ve 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.20 Aseton testi sonrası bir tarafa alaşım diğer tarafa da altın kaplanan numunenin aseton testi sonrası görüntüsü.



Şekil 4.21 Bir tarafa Au-Sn ötektik alaşımı diğer tarafa ise 1150 nm altın kaplanan numunenin paketlenme sonrası kesme mukavemeti sonuçları.



Şekil 4.22 Bir tarafa Au-Sn alaşımı diğer tarafa ise 850 nm altın kaplanan numunenin paketleme sonrası kesme mukavemeti sonuçları.

Sonuçlar göstermektedir ki şekillenmiş diskler her ne kadar aseton testinde umut verici görünse de söz konusu olumlu sonuçlar maske etrafındaki görece geniş çerçevenin bağlanmasının bir sonucu da olabileceğinden yeterli değildir. Aseton testleri hermetik yapıyı gözlemlene noktasında kaba fikir verse de, ölçümler ideal seviyeden oldukça uzaktadır. Hermetikliğin etkin olarak gözlenebilmesi ancak cihaz uygulamalarında ve/veya kapak boşluk açılan numunelerde gerçek değerlerini verecektir.

1150 ve 850 nm altın kaplanan numunelerin SEM ve EDS analizleri farklı mukavemet değerlerine sahip numuneler için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.23'te 1150 nm kalınlıkta altın kaplama ile paketlenen numunenin 6,6 MPa mukavemete sahip numunenin kesme yüzeyi görülmektedir. Ötektikten farklı olarak gözenekli bir kırılma yüzeyine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözeneklerin eriyik malzemenin dağıldığı bölgeler olabileceği düşünülmektedir. Kompozisyonun %3,9-7,4 Sn arasında değiştiği gözlenmiştir. Bu değişimin sebepleri kaplama sırasında difüzyonla oluşan kaplama kalınlıklarında farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar, kimyasal olarak homojen bir yapının oluşmasının iyi bir bağlama için önemli unsurlardan biri olduğunu göstermektedir.

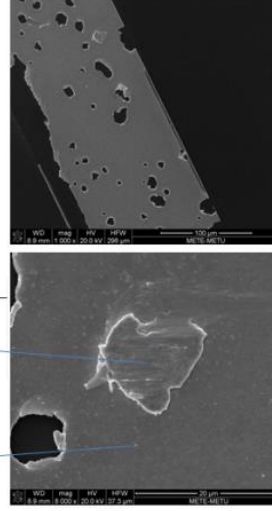
Element	Wt %	At %
SnL	3.93	6.36
AuL	96.07	93.64
Total	100.00	100.00

Element	Wt %	At %
SnL	4.95	7.96
AuL	95.05	92.04
Total	100.00	100.00

Element	Wt %	At %
SnL	7.40	11.72
AuL	92.60	88.28
Total	100.00	100.00

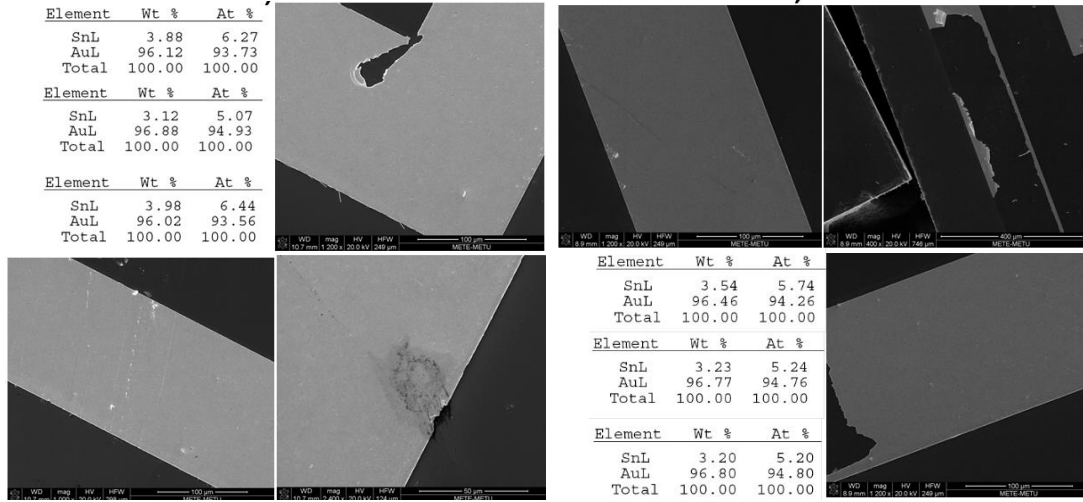
Element	Wt %	At %
SnL	3.58	5.81
AuL	96.42	94.19
Total	100.00	100.00

Element	Wt %	At %
SnL	5.15	8.26
AuL	94.85	91.74
Total	100.00	100.00



Şekil 4.23 Bir tarafa ötektik alaşım diğer tarafa ise 1150 nm altın kaplanan paketlenmiş diskin 6,6 MPa kesme dayanıcına sahip pulun SEM ve EDS analiz sonuçları.

Şekil 4.24'te ise 850 nm altın kaplanarak paketlenmiş numunenin kesme mukavemetine göre iki farklı pulu incelenmiştir. 3,7 MPa mukavemete sahip numunenin oldukça düz bir yüzeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kompozisyonun planlanana göre daha düşük kaldığı görülmüştür (% 3,20-3,54 Sn). Bunun sebebinin yapının katman oluşturması olabileceği düşünülmektedir. Öte yandan, kopmanın %4 Sn'den daha düşük kompozisyonda gerçekleşmesinin de β fazının varlığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Daha yüksek mukavemete sahip numunede yer yer tutunmanın daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

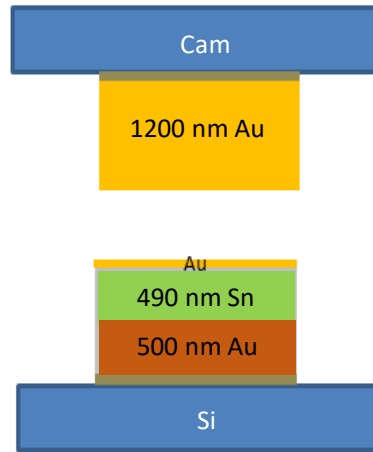


(a)

(b)

Şekil 4.24 Bir tarafa ötektik alaşım diğer tarafa ise 850 nm altın kaplanan paketlenmiş diskin 3.7 MPa kesme dayancına sahip hücrenin (a) ve 8,7 MPa kesme dayancına sahip hücrenin (b) SEM ve EDS analiz sonuçları.

Katmanlı Ötektik Bağlama

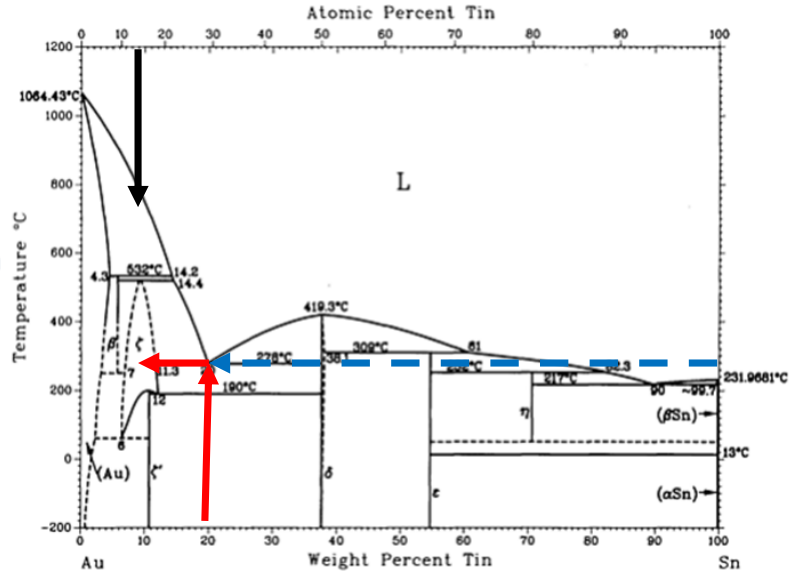


TLP Bağlama

$T_{\text{bonding}}: 300-320^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{re-melting}} > 500^{\circ}\text{C}$

Şekil 4.25 Ötektikten TLP için hazırlanmış katmanlı Au-Sn alaşımı.



Şekil 4.26 Katmanlı ötektik Au-Sn alaşım kullanılarak ulaşılan TLP kompozisyonunun faz diyagramı üzerinde gösterimi.

Katmanlı yapılar için diğerlerine kıyasla daha iyi sonuç veren ötektikten TLP kompozisyonu denenmiştir. Şekil 4.25'te gösterilen yapı ile 4.26'daki kompozisyon hedeflenmiştir. Bu yapıda ilk olarak katmanlı yapı ergiyerek ötektik kompozisyonu oluşturmakta sonrasında cam üstüne kaplanmış Au etkisiyle TLP oluşturmaktadır. Bu deney setinde boş silisyum disk denemesi yapılmamış onun yerine öncelikle cam-Si ikililerinden oluşan şekillendirilmiş disklerde bağlama optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Basınç parametresinin değiştirildiği 3 farklı set üretim yapılmıştır. Optimize edilen yöntemin, biri şekillendirilmiş ve boşluk açılmış olmak üzere şekillendirilmiş iki silisyum diskin birbirine bağlanmasında kullanılması düşünülmüştür. Böylelikle gerçek cihaz üzerinde yapılacak denemelere bir adım daha yaklaşılmaya planlanmıştır. Basınç için ise öncelikle 3MPa değeri seçilmiş ve yapılan bağlamadaki taşma miktarına (*squeeze-out*) göre basıncın azaltılıp artırılması uygun bulunmuştur. Yapılan deneylerde herhangi bir taşmaya rastlanmadığı için basınç gittikçe artırılmış ve önce 5 MPa daha sonra da cihazın üst limitine yakın olan 8 MPa basınç uygulanmıştır. "Tartışma ve Sonuç" kısmında belirtilen sebepler nedeniyle TLP ile üretim için Si disk üzerine 20 nm Ti/ 50 nm Ni bağlayıcı kullanılmıştır.

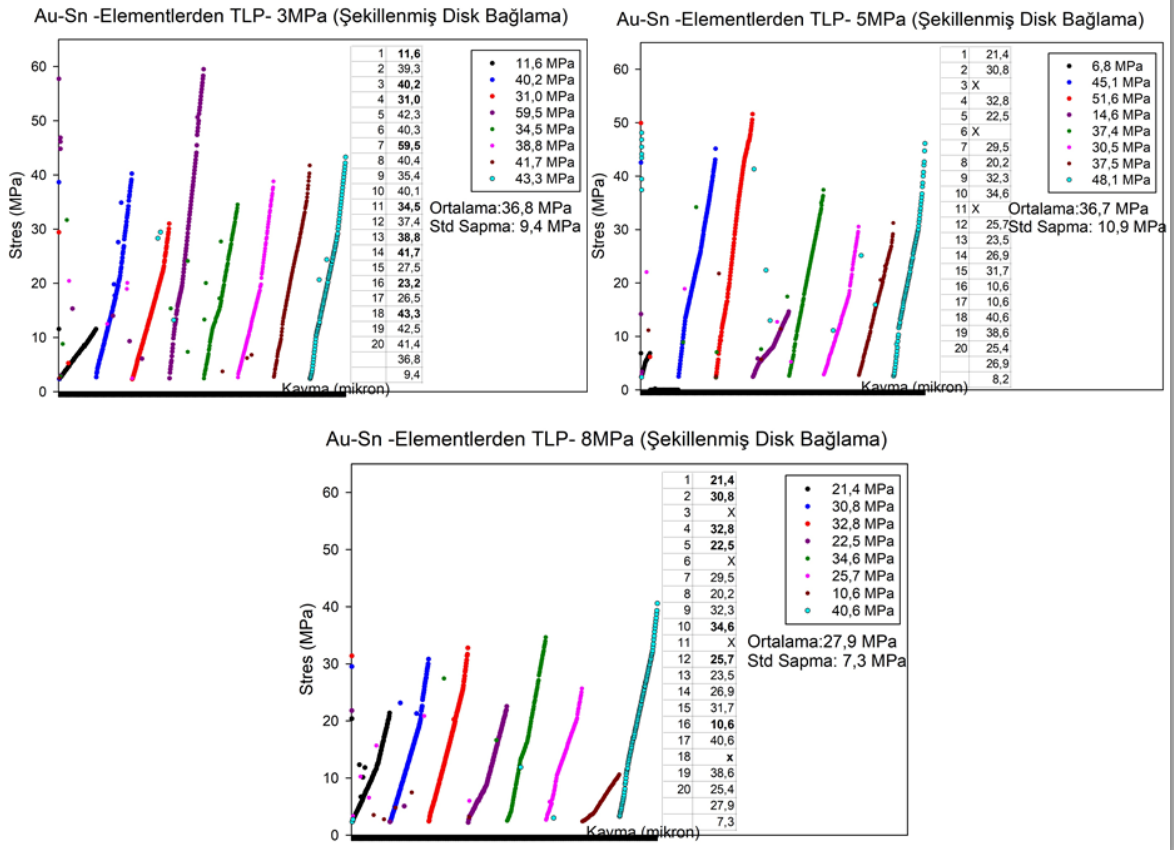
Metalizasyon olarak da bilinen metal kaplama sonrasında paketleme işlemi için cihaza yerleştirilen çift önce birbirinden ayrı tutularak 320°C'ye ısıtılıp orada 5 dakika ergimenin ve karışmanın tam olarak gerçekleşmesi beklenmiştir. Daha sonra ise iki disk birbirine temas ettirilerek basınç giderek artırılıp her bir deneme için 3 MPa, 5MPa ve 8 MPa değerlerine çıkarılmıştır. Daha önce 20 dakika olan bağlama süresi 30 dakikaya, daha önce 40°C/dk olan

soğutma hızı ise önce katılaştırmanın gerçekleştiği 320°C den 200°C'ye 2°C/dk daha sonra ise 200°C'den 30°C'ye 5°C/dk hızla soğutulmuştur.

Numuneler aseton testinde herhangi bir sızdırma sergilememiştir. Öte yandan paketleme sonrası optik mikroskopta çekilen görüntüler bağlama bantlarında reaksiyon olduğunu göstermektedir. Şekil 4.27'de 5 MPa basınçla paketlenen numunenin farklı bölgelerdeki optik görüntüleri sunulmuştur. Kesme testleri daha önce Şekil 4.20'de gösterilen fotoğrafa uygun olarak her bir numunede 20 farklı yerden pul alınarak yapılmıştır. Kolay karşılaştırılabilmesi açısından farklı basınç değerlerinde hazırlanmış üç sonuç tek bir şekilde test sonuçları, örnek grafiklerin yanında tüm sonuçları içeren tablo ve ortalama, standart sapma değerleri ile birlikte Şekil 4.28'de verilmiştir. Tabloda "X" ile gösterilen sonuçlar deneysel hataları ifade etmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek basınç değeri olan 8 MPa bu set için en kötü sonucu verirken diğer iki değer birbirine oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Bu durumun temel sebebinin hiçbir numunede herhangi bir taşma olmaması gösterilebilir. Sıvı miktarı bağlama için yeterli olmasına karşın sızacak kadar fazla sıvı bulunmadığı anlaşılmaktadır. Öte yandan elde edilen sonuçlar proje boyunca ulaşılan en iyi değerler olarak olumlu değerlendirilmektedir.



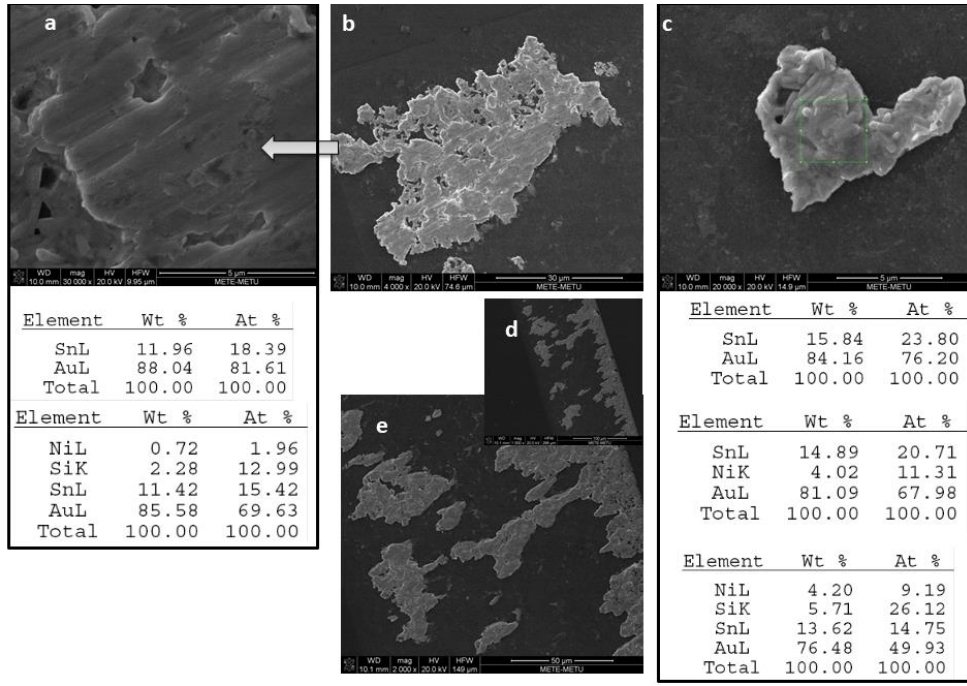
Şekil 4.27 TLP ile paketlenen 5 MPa basınçla paketlenen numunenin paketleme sonrası optik mikroskop görüntüleri.



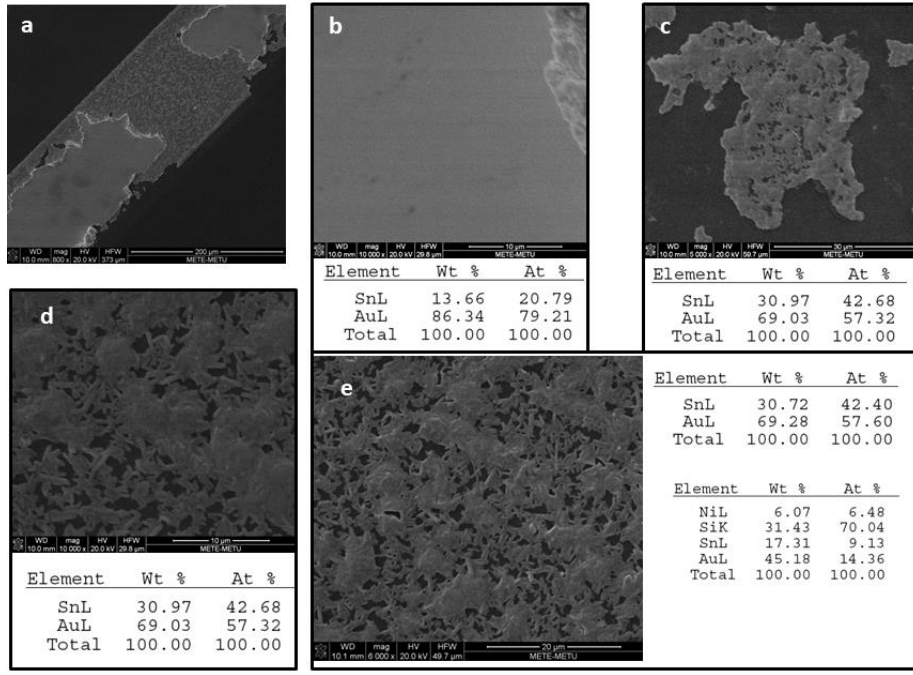
Şekil 4.28 3, 5 ve 8 MPa basınç altında paketlenmiş numunelerle gerçekleştirilmiş kesme mukavemeti test sonuçları.

Kesme numunelerinin SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Her bir basınçtaki numune için bir düşük bir de yüksek mukavemette pulun analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçları Şekil 4.29 – 4.34 arasında gösterilmektedir. Katmanlar oldukça ince olduğundan silisyum alt tabakadan gelen sonuçların etkisini ortadan kaldırmak amacıyla sonuçlar öncelikli olarak Sn-Au oranlarına yönelik EDS değerleri şeklinde değerlendirilmiştir. Ancak çok yüksek Sn değerleri 50 nm kalınlıkta kaplanan Ni elementinin de etkin olarak sisteme dahil olabileceğini düşündürmüştü ve ilk incelemeler bu açıdan Sn-Au-Ni üçlüsünün oluşturduğu bir yapı olarak incelemeler devam etmiştir. Öte yandan Şekil 4.33 ve 4.34 incelendiğinde 20 nm kalınlıkta kaplanan titanyumun 50 nm kalınlıktaki nikel kaplamadan daha yüksek bir oranda bulunduğu bunun da farklı gözeneklilikte kaplanmış olmalarının bir sonucu olabileceği düşünülmüştü. Şekiller incelendiğinde Şekil 4.30-4.31-4.32-4.34'ün benzer bir mikroyapı sergilediği görülmektedir. Bir tümsek şeklinde yapı ve etrafında oluşmuş çubuk şeklinde bir faz hem yüksek hem de düşük mukavemete sahip numunelerde gözlenmesine karşın bu faz miktarının yüksek mukavemete sahip numunelerde daha fazla olduğu ve daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir.

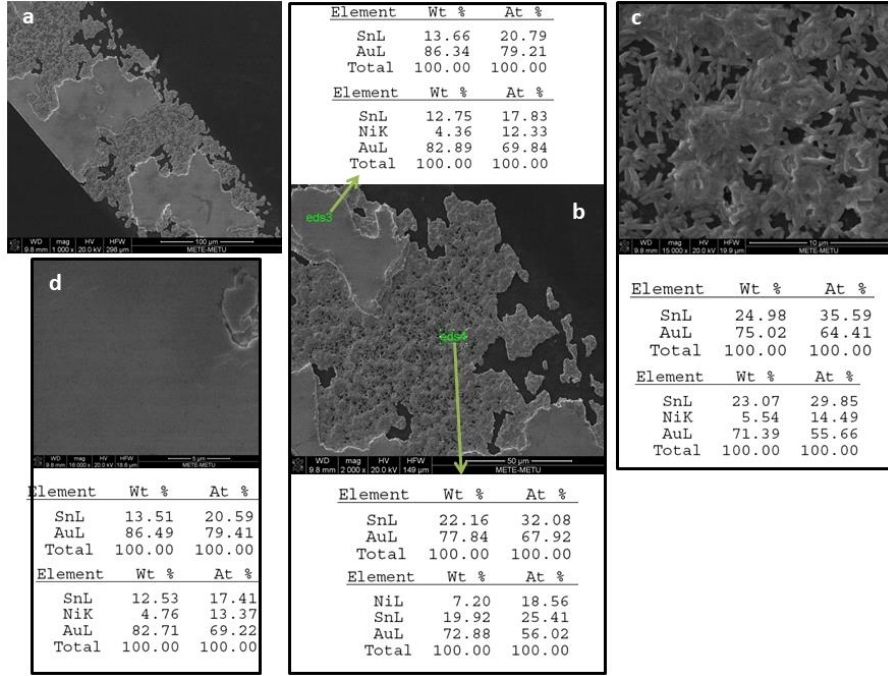
Şekil 4.29 (a) incelendiğinde kalay miktarının ötektik kompozisyondan düşük olduğu görülmektedir. Diğer numunelerde gözlenen çubuk şeklinde fazın tam olarak oluşmadığı da görülmektedir. Ancak Şekil 4.30'da kalay miktarının iç katmanlarda (4.30-c-d-e) altınla kıyaslandığında %30 gibi bir değerde düz yüzey olan 4.30 (b) şeklinde ise %14 kadar düşük olduğu görülmektedir. Bu durum sıvı fazda homojen bir difüzyon gerçekleşmeden katılaşmanın oluştuğunu göstermektedir. Şekil 4.32'de yüksek mukavemetli numunedeki kırılma yüzeylerinin neredeyse silisyum yüzeyden ayrılma şeklinde olduğu görülmektedir. Burada çubuk şekilli faz hemen hemen tek başına görülebilmektedir. Ancak bu analizde titanyum elementi göz önünde bulundurulmadığı hatırlatılmalıdır.



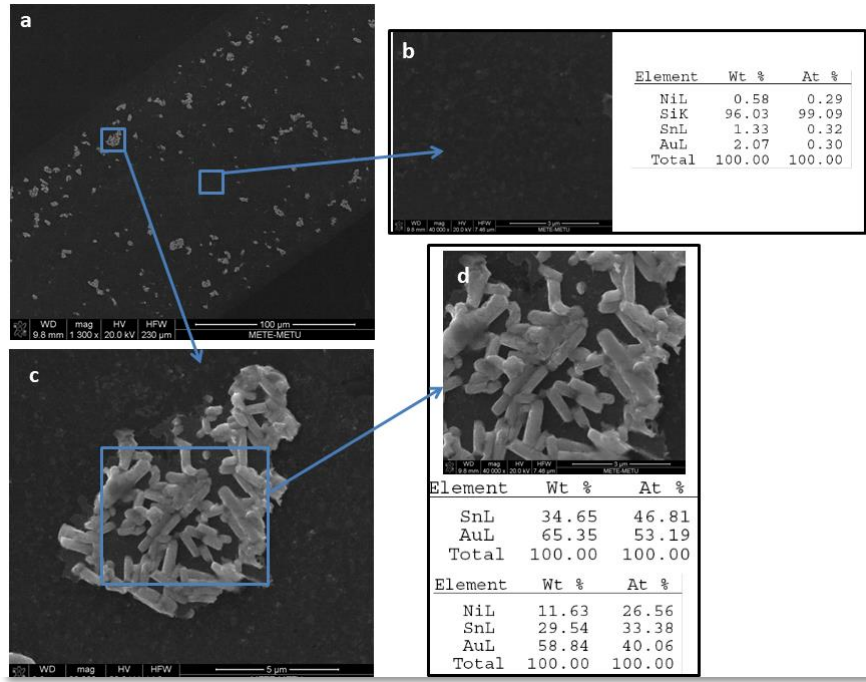
Şekil 4.29 3 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.



Şekil 4.30 3 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.

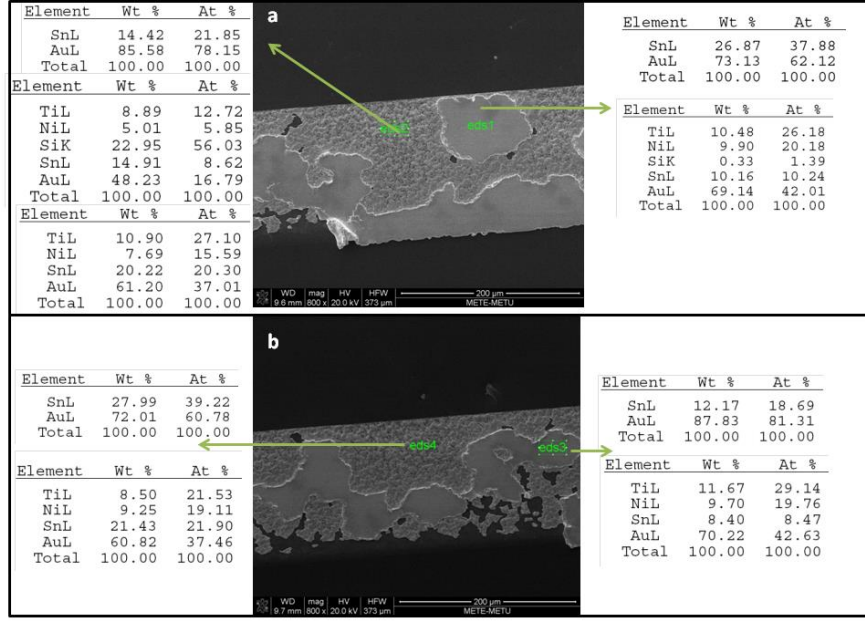


Şekil 4.31 5 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.

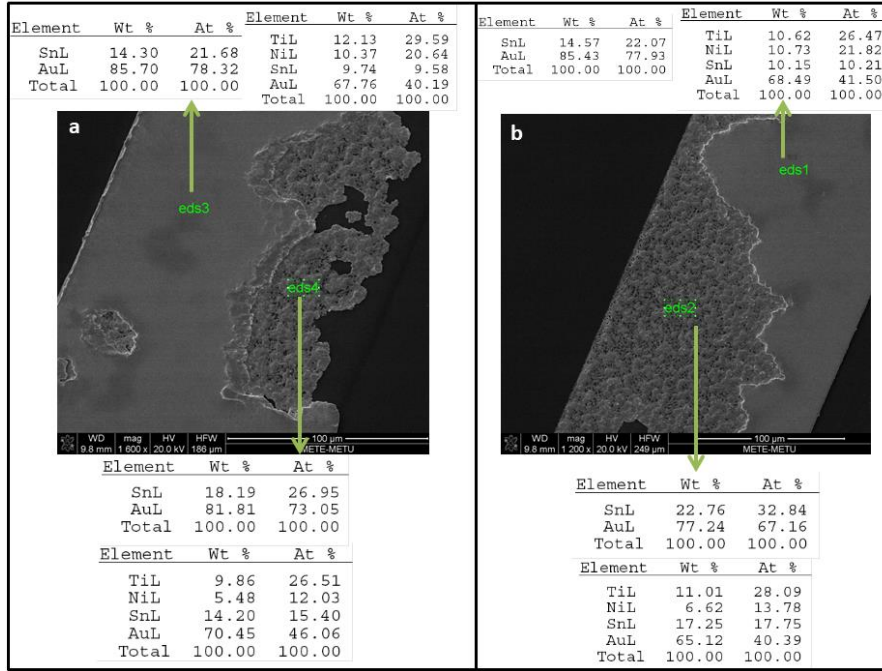


Şekil 4.32 5 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.

Titanyumun kompozisyona etkisinin dahil edildiği iki örnek Şekil 4.33 ve 4.34'de gösterilmiştir. Öte yandan hatırlanmalıdır ki titanyum her iki (cam ve silisyum) yüzeye de aynı kalınlıkta kaplandığı için en üst yüzeyden alınan EDS analizinde daha çok titanyum çıkmasının sebebi üst ve alttaki titanyumların ikisinden de data gelmesinin bir sonucudur. Bu durum Şekil 4.33'de işin içine en altta kalan silisyumu kattığımızda daha net bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 4.33'de en kalın tabakadan alınan EDS içinde bile % 0.33'lük bir silisyum oranı gelmekte öte yandan orta yüzeyden yapılan analiz % 22'ye varan bir silisyum miktarı ile toplam kaplamanın altından da data geldiğini göstermektedir. Tüm bu sonuçlar hem kesit alanda bir elementel haritanın çıkarılabilmesi hem de oluşan fazların anlaşılabilmesi bununla birlikte hermetikliğin bir derece daha etkin belirlenebilmesine ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

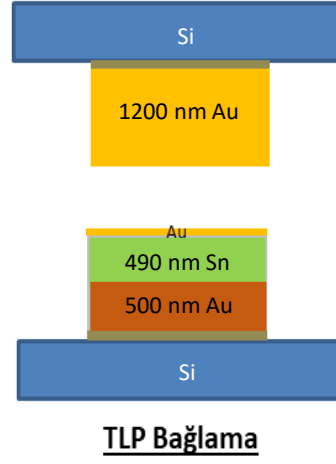


Şekil 4.33 8 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin düşük kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.



Şekil 4.34 8 MPa basınçla üretilen TLP paketlemelerin yüksek kesme mukavemetine sahip pul için kesme yüzeyi analizi.

Çift Taraflı Silisyum Disk Deneyleri

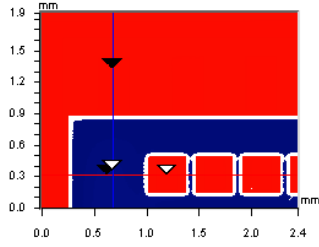


$$T_{\text{bonding}}: 300-320^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{re-melting}} > 500^{\circ}\text{C}$$

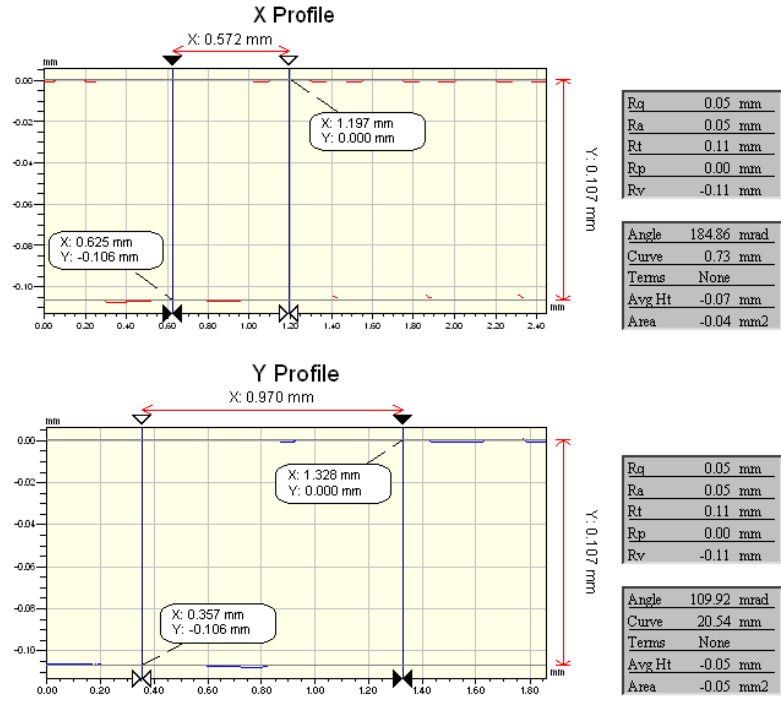
Şekil 4.35 Çift taraflı silisyum disk deneyleri için hazırlanmış ötektikten TLP Au-Sn alaşımı.

Buraya kadar gerçekleştirilen çalışmalarda bağlama deneyleri bir tarafı cam diğeri tarafı silisyum diskler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi ise cam tarafından bağlama sonrası görsel analizlerin gerçekleştirilmesidir. Gerçek bolometre cihazlarında, çift taraflı silisyum disk ve cihazın yerleştirilebilmesine olanak sağlayan boşluk yapısının oluşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda, iki silisyum diske şekillendirme yapılarak bunlardan birine boşluk açılmıştır. Boşluklar bir kuru aşındırma yöntemi olan DRIE yöntemiyle C_4F_8 ve SF_6 gazları kullanılarak oluşturulmuştur. Aşındırma sırasında maskeleme için ışık dirençli polimer kullanılmıştır. İşlem sonrasında oksijen plazma ve aseton temizliği ile polimer temizlenmiştir. Boşluk derinliği yaklaşık 100 μm olacak şekilde aşındırmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.36'da oluşturulan boşluğun optik profilometre ile alınmış derinlik ölçümü verilmiştir. Ölçüm sonucunda derinlik 107 μm olarak ölçülmüştür.



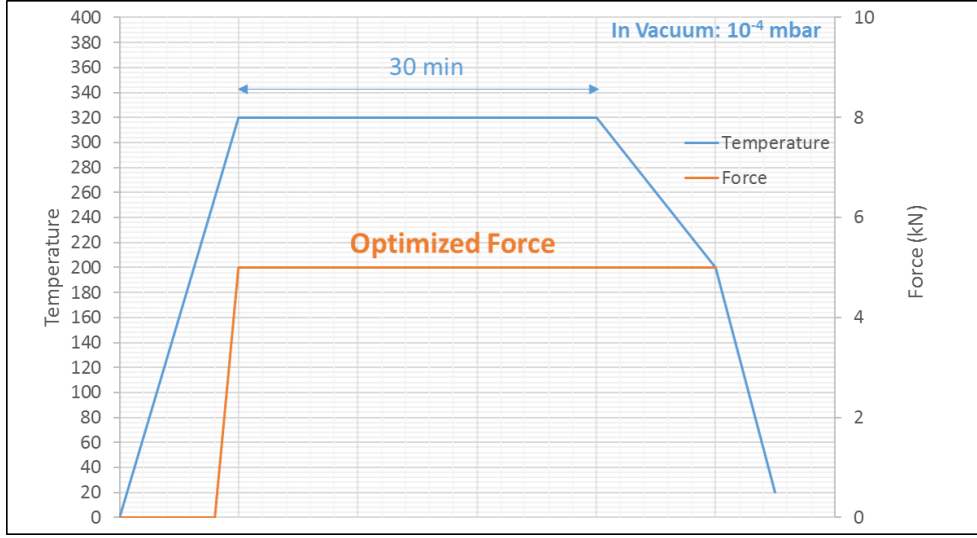
X	0.68	-	-	mm
Y	0.31	-	-	mm
Ht	-106.35	-	-	um
Dist	-	-	-	mm
Angle	-	-	-	°

Title:



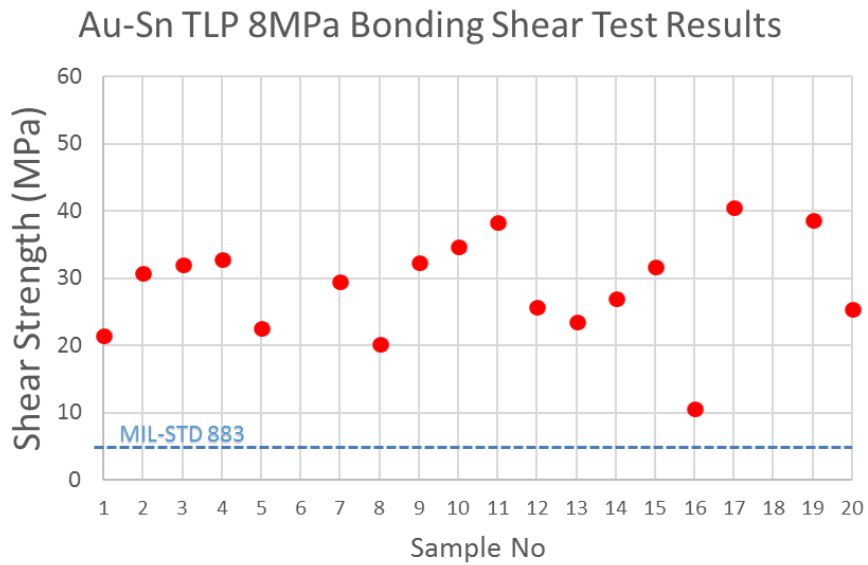
Şekil 4.36 DRIE yöntemiyle derinliği 100 µm olarak hedeflenen boşluğun optik profilometre ölçüm sonucu. (Ölçüm sonucunda boşluk derinliği 107 µm olarak bulunmuştur.)

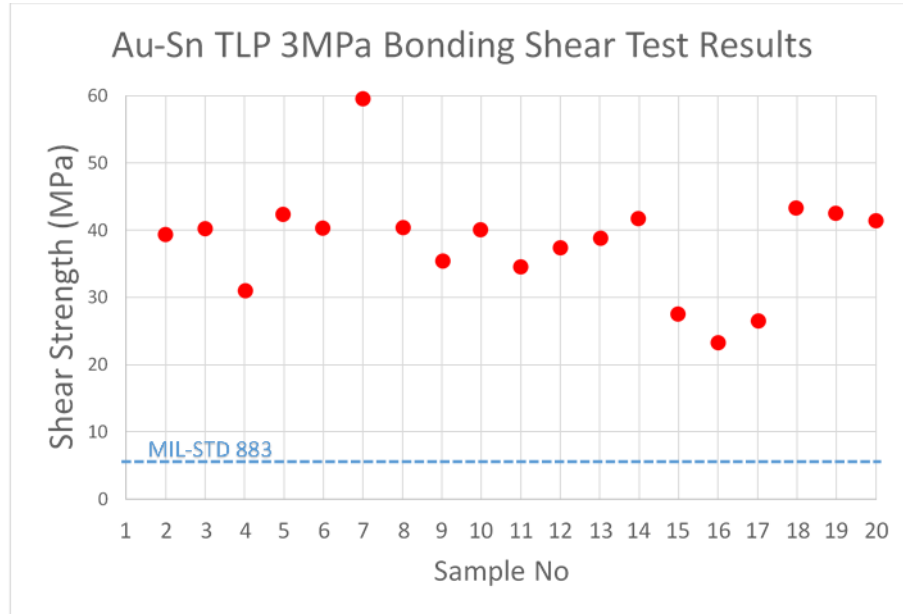
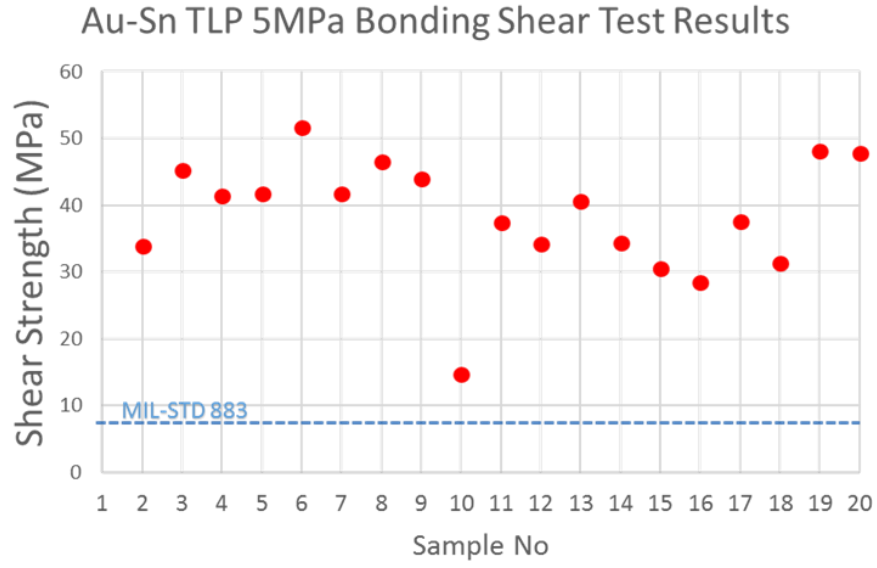
Oluşturulan çift taraflı Si diskler, gerçekleştirilen tüm çalışmalarda en iyi sonucu vermiş olan Şekil 4.35'teki katmanlı yapı bariyer katmanı Ti/Ni olacak şekilde belirtilen kalınlıklarda uygulanmıştır. Çift taraflı silisyum disklerin bağlama işleminin optimizasyonu için gerçekleştirilen çalışmalar sonucu 4.37'de grafik olarak gösterilen sıcaklık-basınç profili en ideal yöntem olarak tespit edilerek uygulamaya alınmıştır.



Şekil 4.37 Bağlama profilinin şematik olarak gösterimi. X-Y eksenleri sıcaklık ve zaman göstermektedir.

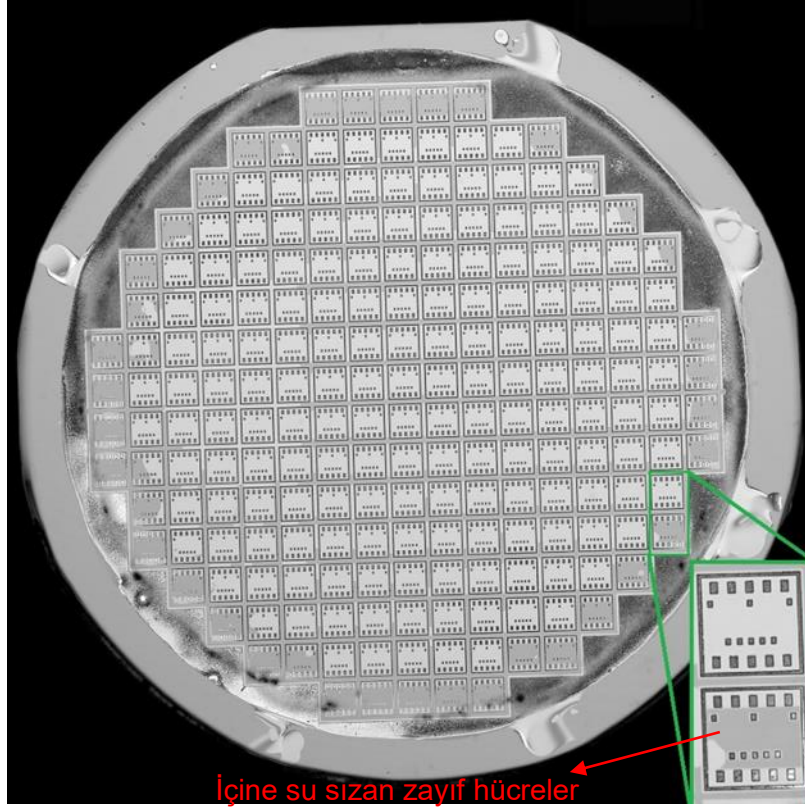
Farklı bağlama basıncıyla gerçekleştirilen Si-Si bağlama deneylerinin mekanik test sonuçları Şekil 4.38'de verilmiştir. Bu mekanik testlerin sonuçları göstermektedir ki 3 farklı bağlama basıncı da benzer ortalama kesme mukavemetine sahiptir. Bağlama basınçları arasında farklı bölgelerden alınan örneklerde kesme mukavemetindeki sapma en az 3 MPa bağlama basıncı ile üretilmiş örnekte görülmüştür. Dolayısıyla 3 MPa bağlama basıncı sonraki deneylerde optimum basınç olarak belirlenmiştir. Bütün bağlama basınçlarıyla askeri standartları sağlayan bir mukavemet değeri elde edilmiştir. Uluslararası askeri standart olan MIL-STD 883'ün istediği en az dayanım değeri (yaklaşık 6 MPa) Şekil 4.38'de mavi çizgi ile belirtilmiştir.



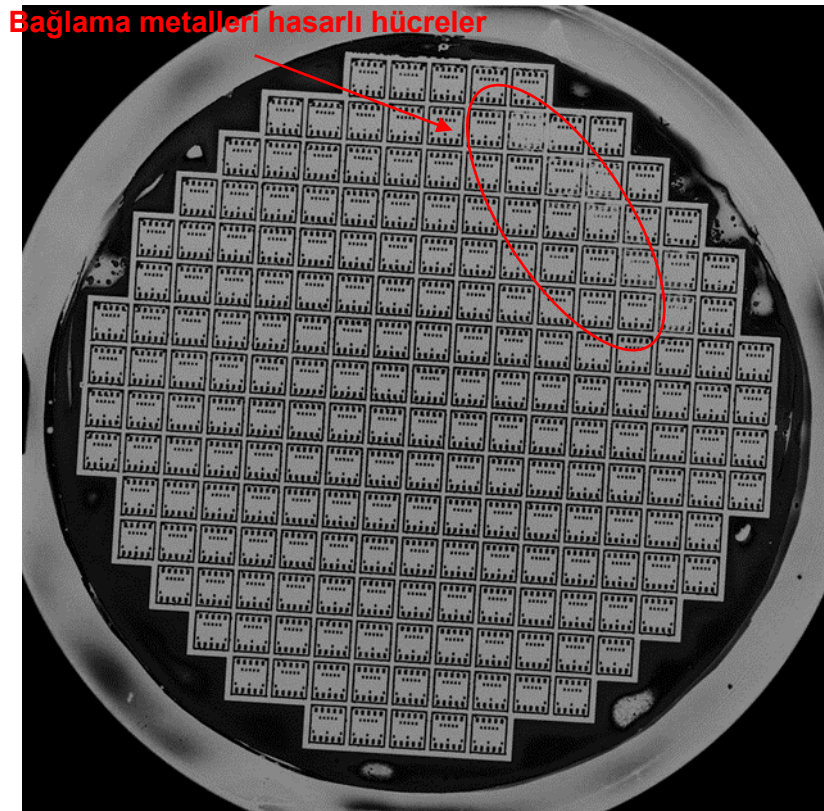


Şekil 4.38 Değişik basınçlardaki bağlama deneylerine ait kesme kuvveti mekanik test sonuçları.

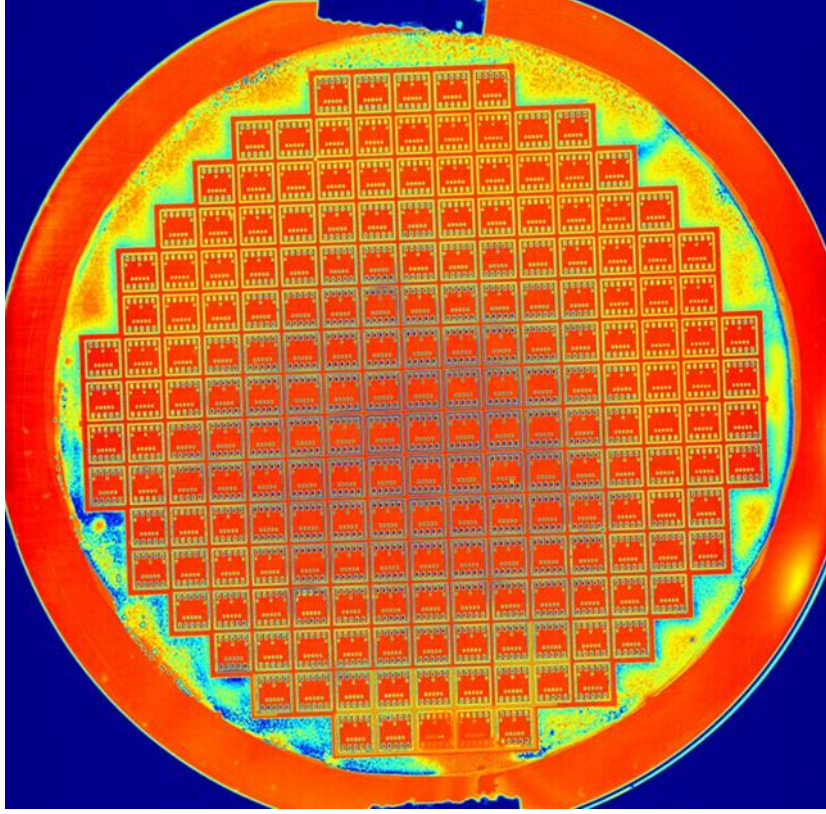
Taramalı akustik mikroskop (SAM) cihazıyla Si-Si disk kullanarak yapılan bağlamaların bağlanan diskelere zarar vermeden incelenmesi ve testleri gerçekleştirilen örneklerin daha sonraki aşamalarda kullanılması mümkün olmuştur. Yukarıdaki bağlama parametreleriyle bağlaması yapılan Si disklerin SAM görüntüleri verilmiştir.



(a)



(b)

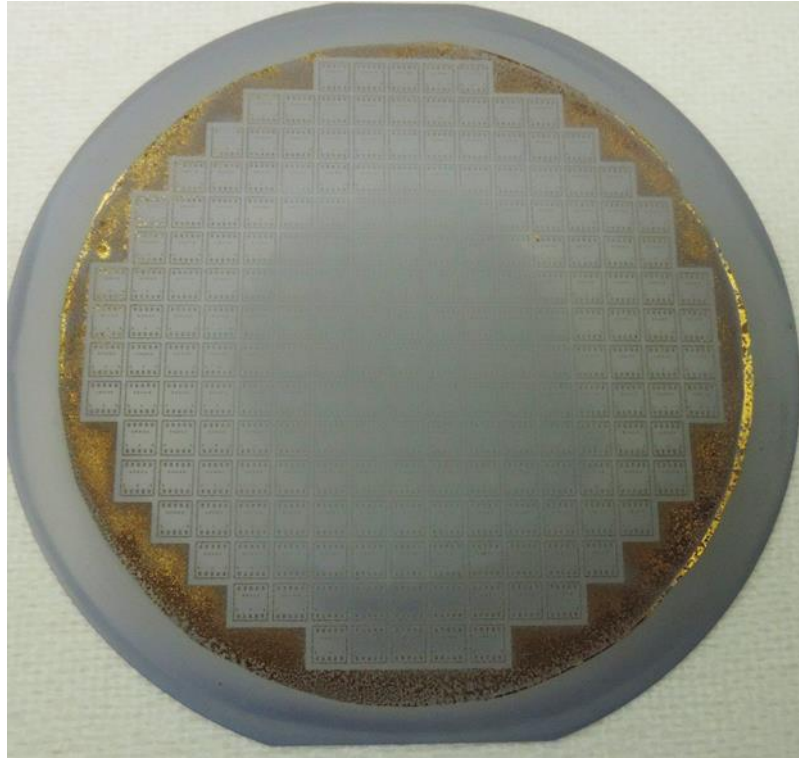


(c)

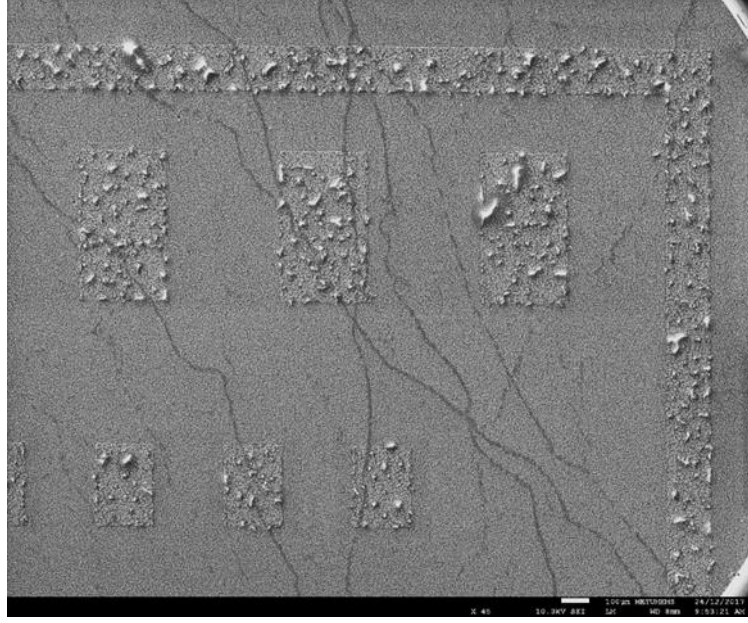
Şekil 4.39 Bağlaması yapılan Si-Si diklerin SAM görüntüleri.

SAM incelemesi daha iyi bir akustik iletim sağlayan suya örneklerin tamamen daldırılmasıyla yapılmaktadır. Şekil 4.39(a)'da görüldüğü üzere bağlama deneyi sonrası bağların zayıf olduğu Si disklerde suyun iki disk arasına sızdığı ve bağlama halkalarında hasar bulunan bazı hücrelerde hücre içine sızdığı gözlemlenebilmiştir. Bu hasarlı hücreler diskin en dışına yakın hücrelerdir. Bu hücrelerin zayıf olması metal kaplama işlemlerinin disk kenarlarına doğru daha kötü gerçekleştiği bilindiği için beklenen bir durumdur. Ayrıca kenar hücreler üretim sırasında da daha fazla fiziksel zarar görebilmektedir. Şekil 4.39(b)'de ise bağlama halkası hasarlı hücreler net bir şekilde gözlenebilmektedir. Şekil 4.39(c)'de renk tayflı görüntü hücreler arasındaki bağlama kalitesinin değişimini net bir şekilde göstermektedir. Görüntüdeki mavi renk akustik dalga'nın daha az yansımaya uğrayarak geçtiği yerleri göstermektedir. Bu örnekte, merkezdeki hücrelerin bağlama metalinin mavi renkte olduğu ve kenar hücrelere göre daha sıkı bir bağ oluşturduğu görülmektedir. Bu hücreler arası değişim. Bağlam cihazının kuvvet uygulamadaki merkezden kenarlara doğru düzensizliğinden ve yine kaplama işleminin merkezden kenara doğru daha kötü gerçekleşmesinden kaynaklanıyor olabilir.

Si-Si diskler ile yapılan bağlama deneylerinde Si disklerden birine DRIE cihazı kullanılarak yaklaşık 100 µm derinliğe sahip boşluklar oluşturulmaktadır. Bu boşlukların amacı bağlama işlemi yapıldığında her bir paketlenmiş birimin içinde yüksek hacimde bir vakum ortamı oluşturmaktır. Bağlama işleminin başarısı bu vakum ortamının kalıcılığı ile ölçülmektedir. Dolayısıyla bağlama yöntemi sızdırmaz bir yapıda olmalıdır. Bu sızdırmazlığı test etme yöntemlerinden biri bağlama işlemin yapıldıktan sonra 100 µm'lik boşluğun oluşturulduğu diskin diyafram inceliğine (yaklaşık 100 µm) inceltilmesidir. Diyafram inceliğine kadar inceltilen bölgeler eğer vakum ortamını muhafaza edebiliyor durumdaysa, diyafram yapısında çökme meydana gelmekte ve bu çökmeyi muhafaza edebilmektedir. Diyafram çökmesini gözlemleyebilmek için hazırlanan örnekler DRIE aşındırma cihazıyla aşındırılmıştır. Aşındırma işlemlerinde 100 µm son disk kalınlığı hedeflenmiştir. Fakat ilk birkaç örnekte aşındırma yeteri hassasiyette ve kontrollü gerçekleştirilemediği için Si diski tamamen aşındırılmasıyla sonuçlanmıştır. Başarısız aşındırmalara maruz kalan örneklere ait fotoğraflar Şekil 4.40'da verilmiştir.



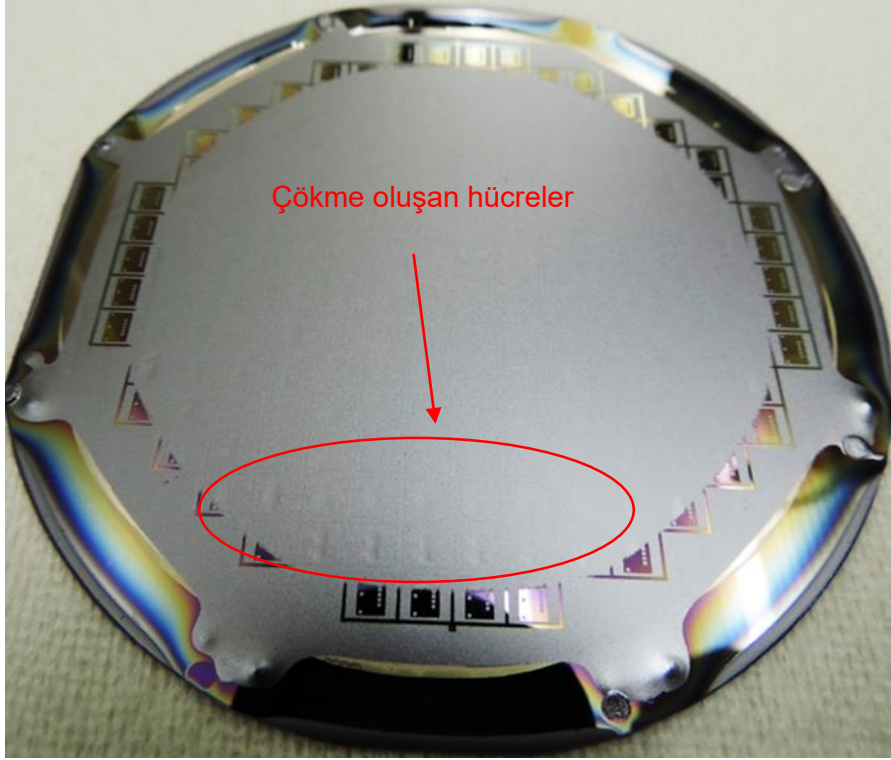
(a)



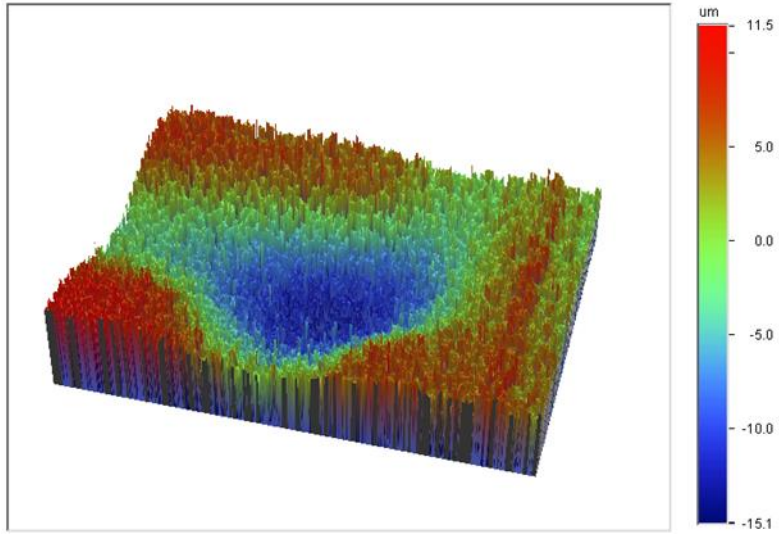
(b)

Şekil 4.40 DRIE ile Si disk inceltme sırasında başarısız olan ve üst Si diskini tamamen aşındırılan örneğe ait fotoğraf (a) ve DRIE aşındırmasına maruz kalan metal bağlama bölgelerinin SEM görüntüsü (b).

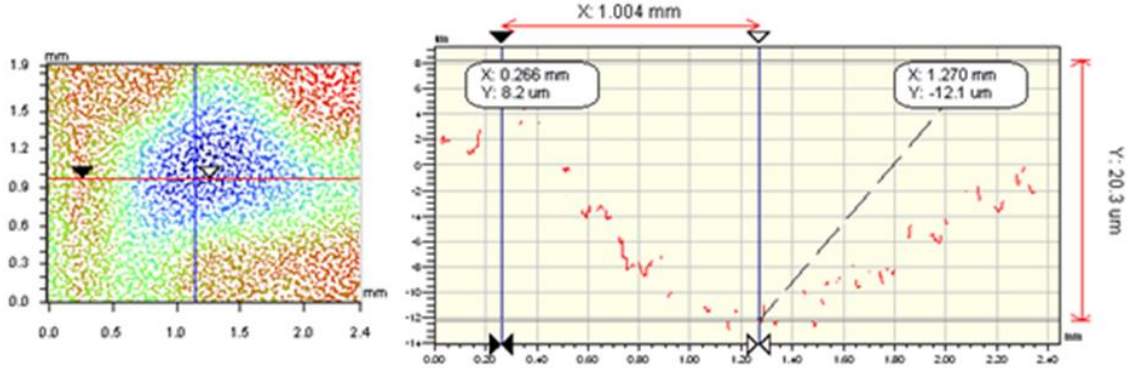
Daha sonraki Si inceltme çalışmasında Si disk başarılı bir şekilde diyafram kalınlıklarına inceltilmiştir. Si diskin boşluk oluşturulmuş bölgelerinde aşındırma sonrasında diyafram kalınlığına ulaşılmıştır. Fakat DRIE sisteminin aşındırma hızı örnek üzerinde dıştan içe doğru farklı hızlarda gerçekleştiği için en dıştaki bazı hücrelerin diyaframını tamamen aşınmıştır, merkezdeki hücreler ise tam olarak diyafram inceliğine erişememiştir. Dolayısıyla basınç farkından oluşan diyafram çökmesi sadece bazı en dış ve merkez arasında bazı hücrelerde gözlemlenmiştir. Çökme gerçekleşen bölgelerin çökme miktarını belirleyebilmek için optik profilometre cihazıyla ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlere göre yaklaşık 20 µm'lik bir diyafram çökmesi gözlemlenmiştir. Diyafram aşındırması gerçekleştirilmiş örneğe ait fotoğraf, optik profilometre ölçümü sonrası çökme bölgesinin üç boyutlu görüntüsü ve çökmenin gerçekleştiği bölgeye ait optik profilometre ölçümü Şekil 4.41'de sırasıyla verilmiştir.



(a)



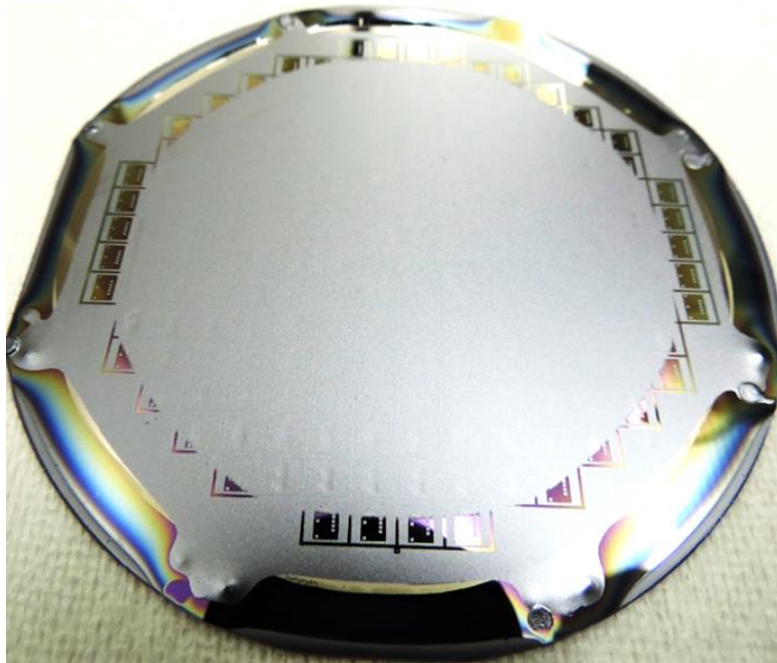
(b)

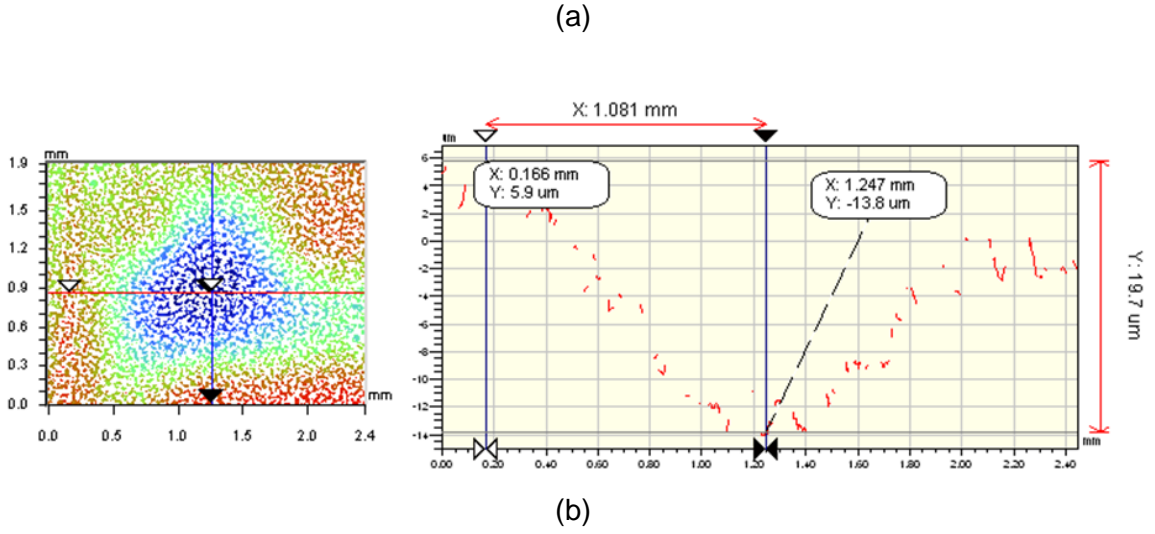


(c)

Şekil 4.41 Diyafram çökmesi için DRIE ile üst Si diski inceltilmiş örneğe ait fotoğraf (a), diyafram çökmesi gerçekleşmiş bir hücrenin optik profilometre ile oluşturulmuş üç boyutlu görüntüsü (b) ve çökme miktarının optik profilometre ile gerçekleştirilmiş ölçümü (c).

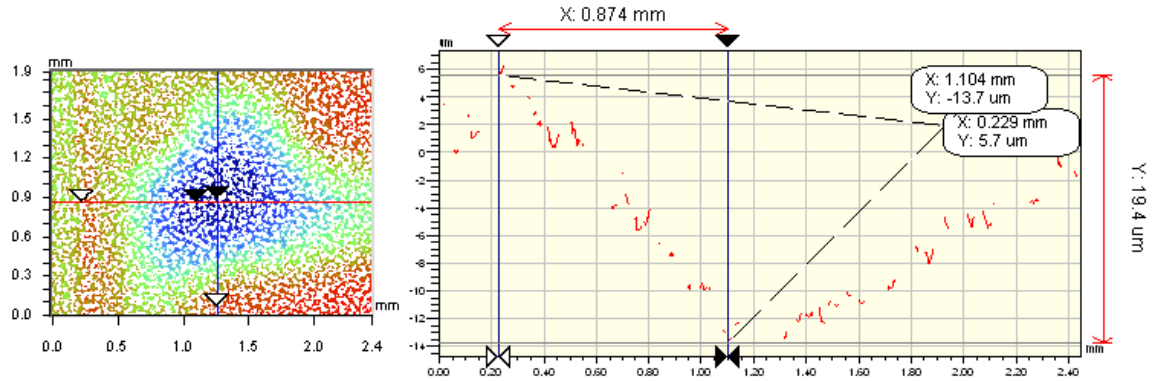
Bağlama işlemi yapıldıktan sonra oluşan bağın hermetik olup olmadığını anlamak için Şekil 4.41(a)'da inceltilmesi gerçekleştirilen örneğin incelenmesi bir hafta sonra tekrarlanmıştır. Sızdırmazlık sağlayamayan bağların geçen süre içinde hücreler içindeki vakumun kaybolmasına neden olması ve çökme gerçekleşen diyaframların tekrar normal durumuna gelmesi beklenmektedir. Bir hafta sonra yapılan gözleme ait fotoğraf ve ölçümlere ait görüntüler Şekil 4.42'de verilmiştir. Bir hafta sonra yapılan gözlem ve ölçümlerde diyaframda oluşan çökmelerin kaybolmadığı gözlenmiş ve çökme miktarlarının benzer seviyede kaldığı ölçülmüştür. Bu durum hücreler içindeki vakumun kaybolmadığını dolayısıyla oluşturulan bağların hermetik bir yapıda olduğunu göstermektedir.





Şekil 4.42 Diyafram çökmesi gerçekleşen örnek (a) ve bir hafta sonra gerçekleştirilen optik profilometre ölçümü (b).

Aygıtlı diskler uygulandığı durumda diskler üzerinde oluşturulan bağlar, aygıtın vakum seviyesini daha da iyileştirmek için “getter” aktiveleştirme aşamasından geçirilmiştir. Bu işlem aygıt diskinin 400 °C’de en fazla 10 dk’lık tavlamaya maruz kalmasıyla gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla bu işlem sonrası hermetikliğin değişimini gözlemleyebilmek için diyafram çökmesi bir hafta sonrasında kaybolmayan örnek için 400 °C’de 10dk’lık bir tavlama işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrası örnek tekrar gözlenmiş ve diyafram çökmelerinin kaybolmadığı görülmüştür. Yapılan optik profilometre ölçümü sonucunda tavlama öncesi çökme miktarı ile benzer miktarda bir çökme seviyesi ölçülmüştür. Tavlama sonrası optik profilometre ölçümü Şekil 4.43’te görülebilir.



Şekil 4.43 Diyafram çökmesi gerçekleşen örneğin 400 °C’de 10dk’lık tavlama sonrası gerçekleştirilen optik profilometre ölçümü.

Eşitlik 3.1 ve Şekil 3.10’deki ω_{max} değeri diyafram çökmesi gerçekleşen örnek için kullanılırsa paket içindeki basınç değeri kabaca tahmin edilebilmektedir. DRIE inceltmesi sonucu yaklaşık 100 μm ’lik bir Si diyafram kalınlığı elde edildiği düşünüldüğünde ve yaklaşık 20 μm ’lik maksimum

çökmeye sahip hücrenin içindeki basınç yukarıdaki eşitliğe göre 0.1 mbar olarak hesaplanmaktadır.

Hücrelerin sızdırmazlık testi için kullanılacak diğer yöntem 3. bölümün sonunda anlatıldığı gibi He kaçak testidir. Bu test için Tablo 3.1'de verilen MIL-STD-883 standardı 1014.9 no'lu metodun koşullarına uygun olarak He kaçak testi yapılacak örnekler bütün diskten kesilerek ayrılmıştır (Şekil 3.11(a)). Bu örneklerin içinde oluşturulan boşlukların hacmi yaklaşık olarak 0.006 cc olarak hesaplanmıştır. Bu hacimdeki örnekler için Tablo 3.1'deki yeşil ile işaretlenmiş test koşulları ve kaçak limitleri geçerlidir. Fakat He bombalama süresi arttıkça ölçülebilir kaçak seviyesi iyileştiği için He bombalama süresi artırılarak örnekler bir gece boyunca 16 saat basınçlı He ortamında bekletilmiştir. Test için Tablo 4.2'de verilen koşullar ve Şekil 3.11(b)'de verilen test düzeneği kullanılmıştır.

Tablo 4.2 Uygulanan He Kaçak Test Koşulları

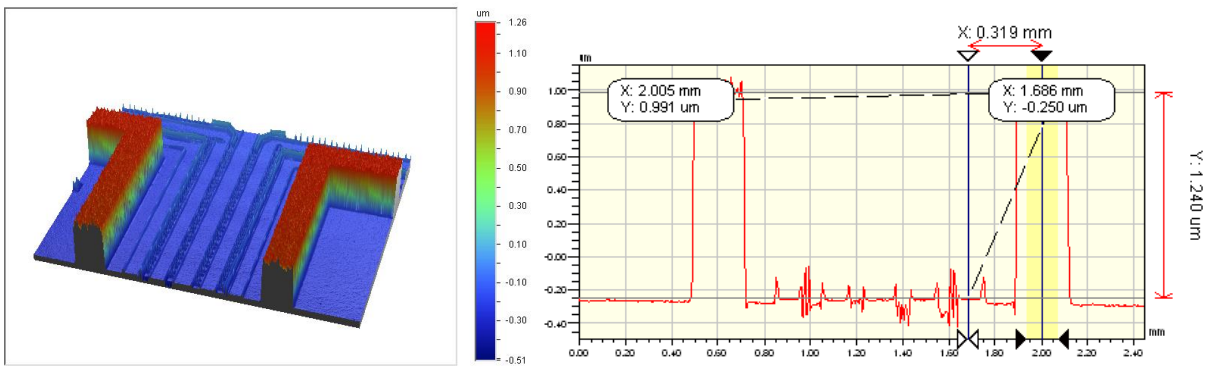
He Bombalama Basıncı:	5 bar
Bombalama Süresi:	16 saat
Bekleme Süresi:	1-5 dakika
Paket Hacmi:	0,006 cc

Test işlemi sonrası cihazın arka plan ölçüm seviyesinden daha yüksek bir kaçak miktarı okunamamıştır. Bu durumda paket içindeki kaçak miktarının cihazın arka plan okuma seviyesi olan $0.9-0.1 \times 10^{-9}$ atm.cc/s'den düşük olduğu düşünülmektedir. İkinci bir test için örnekler ASELSAN bünyesinde bulunan He kaçak test cihazı ile test edilmiş ve 1×10^{-9} atm.cc/s mertebesinde daha yüksek kaçak tespit edilememiştir.

4" Si-Si diskslerin karakterizasyonu gerçekleştirildikten sonra, aynı bağ yapısını 6" diskler üzerinde oluşturmak ve girinti çıkıntı olduğu durumlardaki performansını gözlemleyebilmek için 6 inç diskler üzerinde aynı bağ yapıları oluşturulmuş ve bağlama gerçekleştirilmiştir. Girinti çıkıntılar üzerinde oluşturulan bağ metali hattı ve bağlanması yapılmış disklerin fotoğrafı Şekil 4.44'te görülebilir. Bağlanma sonrası alınan SAM görüntüsü Şekil 4.45'te verilmiştir.



(a)

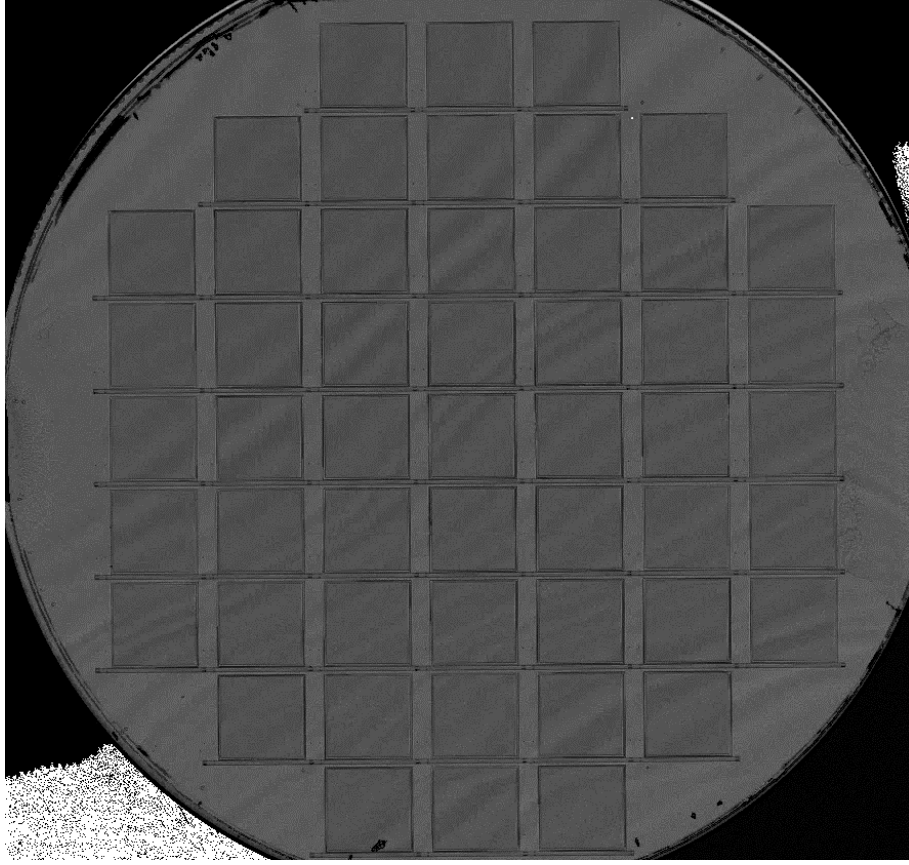


(b)



(c)

Şekil 4.44 6 inç Si disk üzerinde yaklaşık 250 nm girinti çıkıntılar üzerinde oluşturulmuş Au-Sn bağlama hattı (a), Au-Sn metalinin oluşturulan girinti ve çıkıntılar üzerindeki optic profilometre çizimi (b) ve bağlaması gerçekleştirilmiş 6 inç disklerin bağlama sonrası fotoğrafı (c).



Şekil 4.45 6" Boyutta yaklaşık 250nm girinti-çıkıntı üzerine kaplanıp bağlaması yapılan Au-Sn TLP bağlamaya ait SAM görüntüsü.

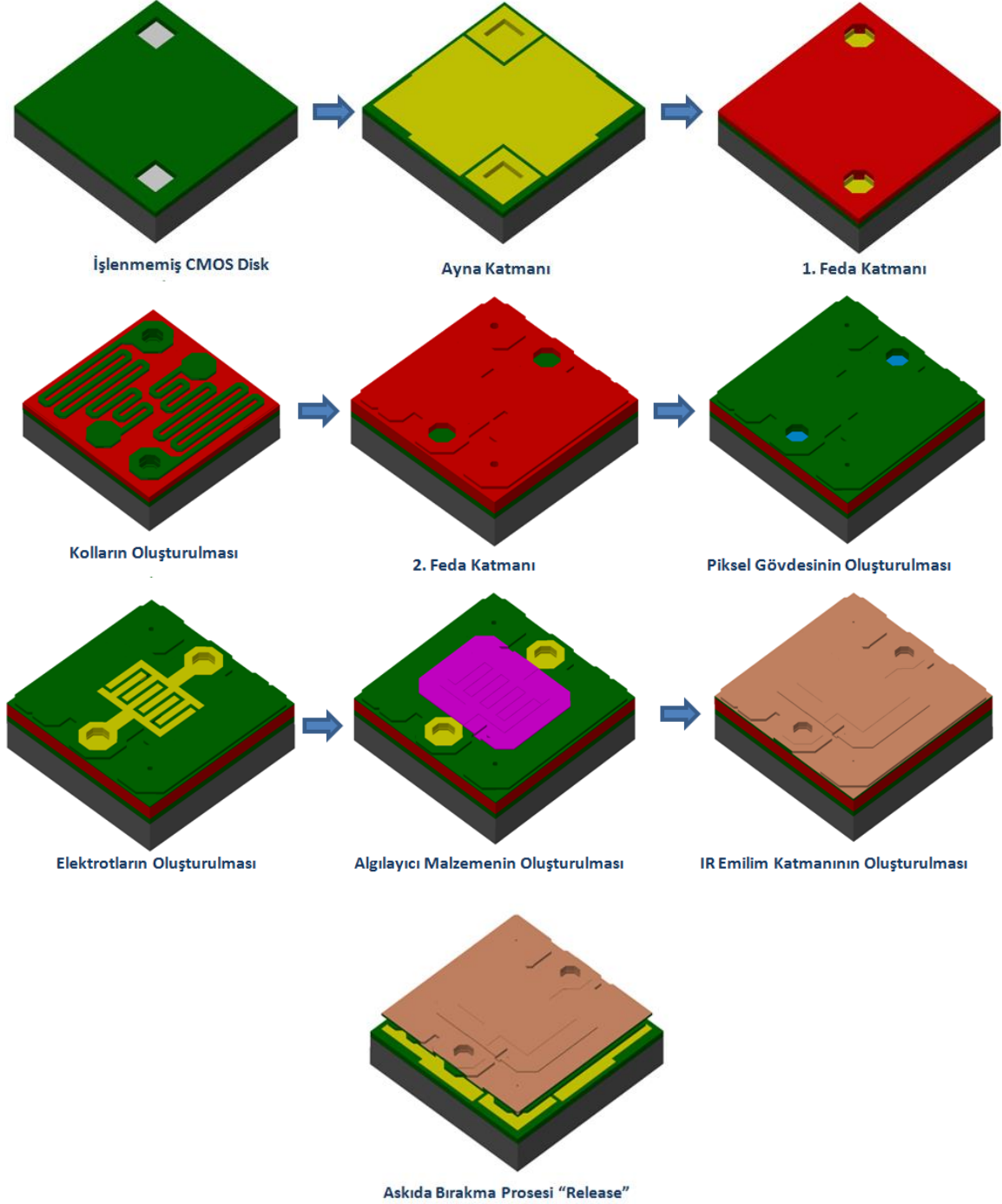
4.2 Mikrobolometrelerin Oluşturulması ve Paketlenmesi

4.2.1 Mikrobolometrelerin Oluşturulması

Projenin bu iş paketi kapsamında, MEMS yüzey mikro-işleme süreçleri ile CMOS okuma devresi diskleri üzerinde dedektör dizinlerinin üretim prosesleri geliştirilecek ve prototip üretimleri gerçekleştirilecektir. Bu süreç, detayları'de paylaşılan adımlara bölünmüştür.

- 1) Piksel ayna katmanının geliştirilmesi
- 2) 1. Feda katmanının geliştirilmesi
- 3) Piksel kollarının geliştirilmesi
- 4) 2. Feda katmanının geliştirilmesi
- 5) Piksel gövdesinin alt katmanı ve elektrot yapısının geliştirilmesi
- 6) Algılayıcı malzeme ile piksel üzerinde direnç yapısının oluşturulması
- 7) Piksel gövdesi üst katmanın oluşturulması
- 8) Kızılötesi emilim katmanının geliştirilmesi
- 9) Piksellerin havada asılı bırakılması (i.e. feda katmanının aşındırılması – "Release")

İlk beş adımın detayları 1. gelişme raporu içerisinde; son dört adımın detayları ise 2. gelişme raporu içerisinde sunulmuştur.

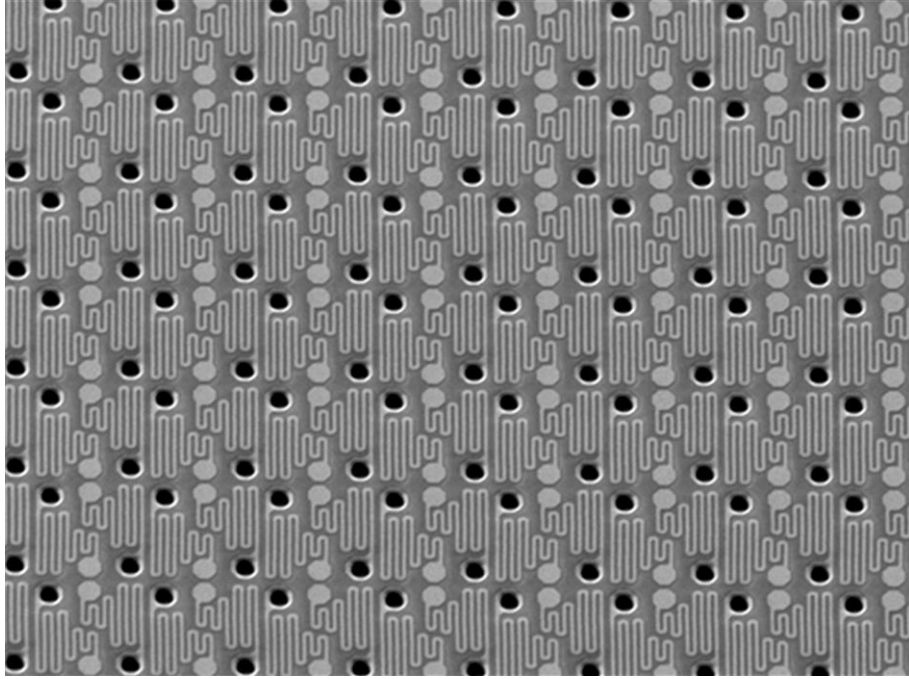


Şekil 4.46 Mikrobolometre dedektör üretim adımlarının piksel seviyesinde gösterimi

Bu proje kapsamında kapak pulu ile birleştirilmek üzere CMOS disk üzerine 25 μm piksel adımına ve 384x288 dizin formatına sahip, VO_x aktif malzemeli bolometre diski üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir ana adım altında kaplama, litografi, pozlama, banyolama, pişirme, aşındırma ve inceleme

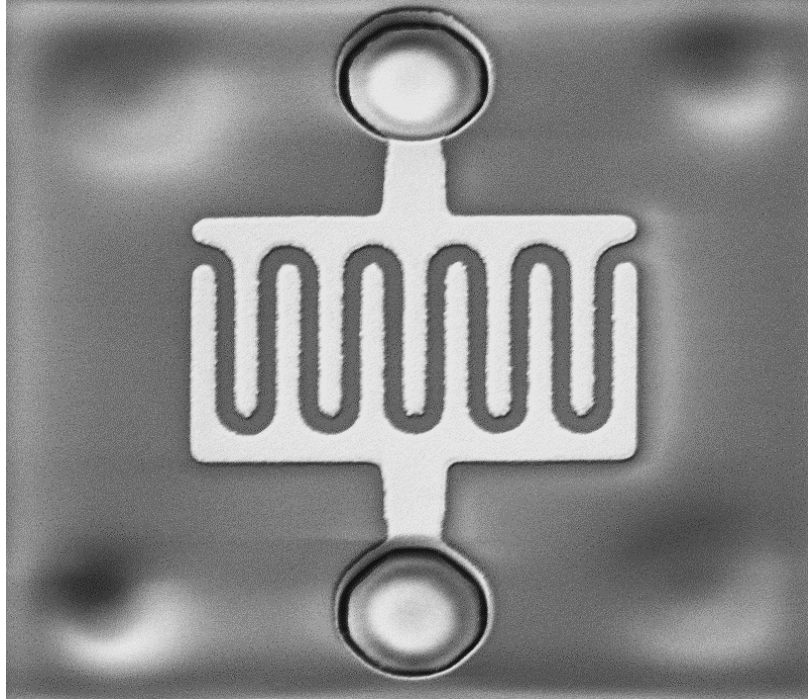
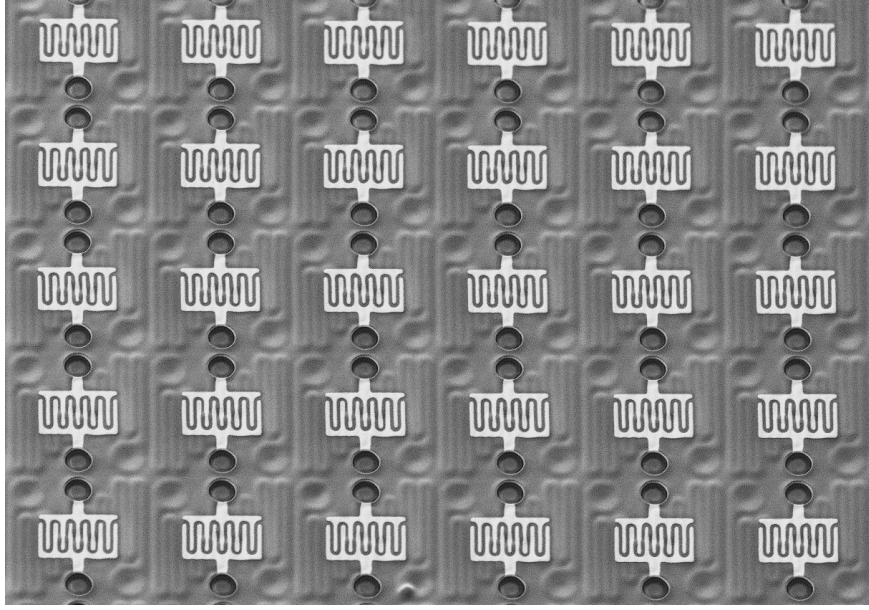
gibi birçok alt süreç yer almaktadır. Bolometre üretim sürecinde lithografi aşamaları için maske hizalayıcı yerine ASML Stepper cihazı UV pozlama için kullanılmıştır. Ayna katmanı, dedektör üretim sürecinde oluşturulan ilk katmandır. Bu katmanın temel görevi, dedektör pikselinin oluşturduğu çeyrek dalga boyu rezonatör yapısını iletken bir yüzeye sonlandırmak ve bu sayede piksel üzerinde maksimum kızılötesi emilimi sağlamaktır.

Asılı köprü yapısını taşıyacak olan kollar, ayna katmanı üzerine 1. feda katmanı serilmesi ve şekillendirilmesi sonrasında oluşturulmaktadır. Asılı köprü yapısını taşıyacak olan kollar, ayna katmanı üzerine 1. feda katmanı serilmesi ve şekillendirilmesi sonrasında oluşturulmaktadır. Üretimi tamamlanan piksel iletim kollarına ait görüntüler 4.47’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.47 Üretimi tamamlanan piksel iletim kollarına ait görüntüler

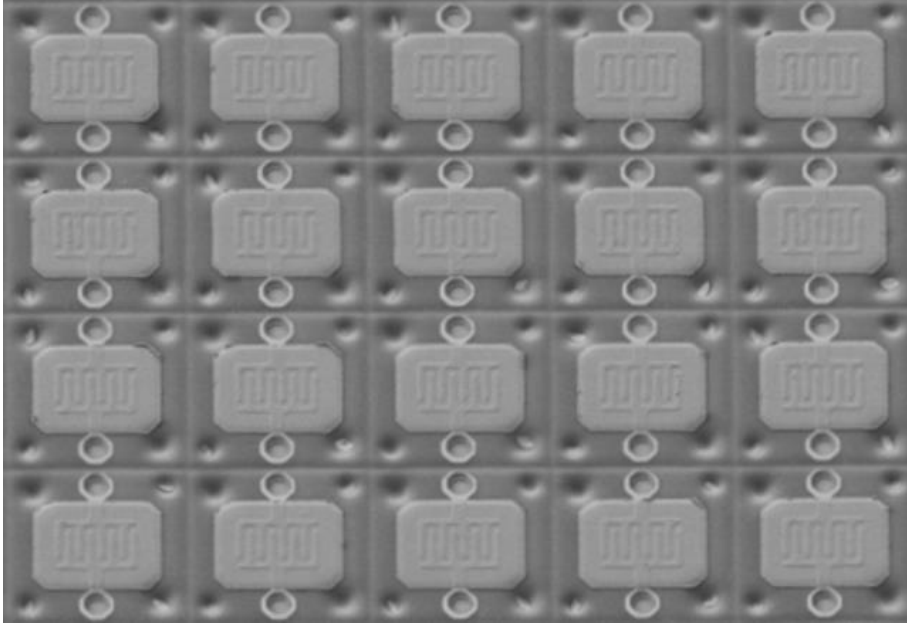
Piksel iletim kollarının üretiminin tamamlanması sonrasında, ikinci feda katmanı serilmekte ve şekillendirilmektedir. İkinci feda katmanı üzerine, ilk olarak piksel gövdesi alt katmanı serilmekte ve şekillendirilmektedir. Piksel gövdesi alt katmanının hazırlanması sonrasında da elektrotları oluşturmak üzere metal kaplanmaktadır. Serilen metal katmanın, elektrotları oluşturmak üzere şekillendirilmesi sonrasında ait görüntüler 4.48’de paylaşılmıştır.



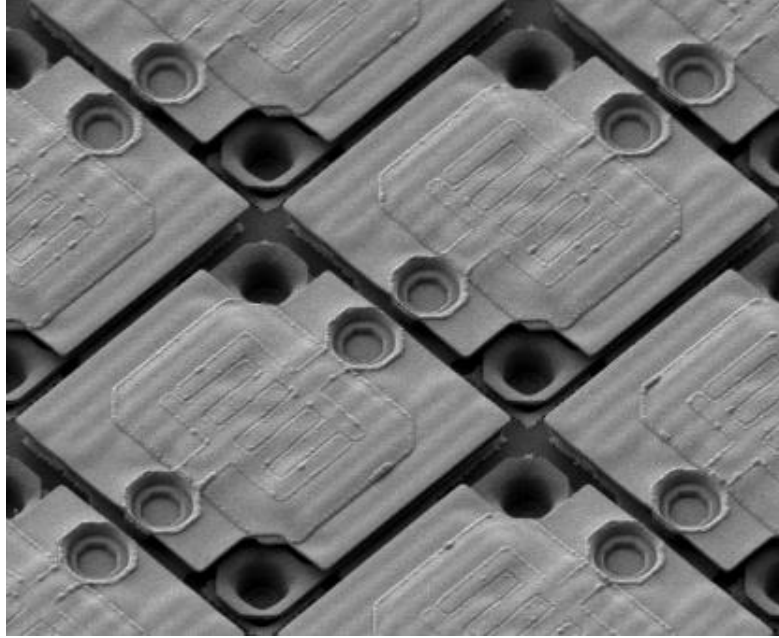
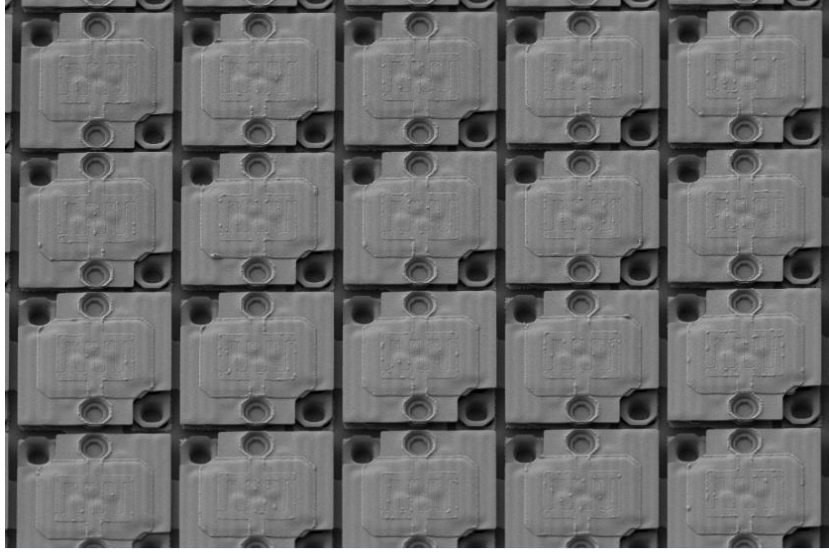
Şekil 4.48 Şekillendirilmiş elektrot yapılarına ait görüntüler

Elektrotların üzerine ise algılayıcı malzeme olarak seçilen VO_x , daha önce geliştirilmiş olan özel kaplama parametreleri ile kaplanmakta ve *lift-off* metodu ile şekillendirilmektedir. Serilen VO_x katmanın şekillendirilmesi sonrasına ait görüntüler Şekil 4.49'da paylaşılmıştır. Takip eden adımlarda ise VO_x katmanı korumak ve ısı olarak yalıtım amacıyla piksel gövdesi üst katmanı serilmektedir. Piksel gövdesi üst katmanı üzerine de soğurucu özellikte, kızılötesi emilim katmanı serilmektedir. Ardından da, her iki katman, piksellerin gövdelerini oluşturacak şekilde aşındırılmaktadır.

Piksel gövdeleri de oluşturulduktan sonra, pul seviyesi paketleme için piksel dizinlerinin üretimindeki son aşama piksellerin altındaki feda katmanının aşındırılarak piksellerin sadece kol yapıları üstünde serbest durmalarını kapsamaktadır. Böylece, pul üzerindeki tüm dedektör prototiplerinin piksel yapıları asılı hale gelmektedir. Feda katmanı aşındırılmış, üretimi tamamlanmış piksel yapılarına ait görüntüler 4.50'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.49 Şekillendirilmiş VO_x algılayıcı malzeme katmanına ait görüntüler.



Şekil 4.50 Feda katmanı aşındırılmış, havada asılı haldeki piksel yapılarına ait görüntüler.

4.2.2 Mikrobolometre Paketleme

Boş silisyum ve şekillendirilmiş silisyum pullar üzerinde geliştirilen bağlama yönteminin bolometre aygıtlarının pul seviyesi paketleme işlemi için kullanılması hedeflenmiştir. Geliştirilen bağlama yöntemini kullanarak bolometre pulunun kapak pulu ile birleştirme işlemi için bolometre pulu üzerine bağlama metalinin kaplanması ve şekillendirilmesi gerekmektedir. Bolometre üretim süreçleri 8" pul boyutunda gerçekleştirilmiş ve pikselleri havada asılı bırakma adımına kadar tüm süreçleri tamamlanmış bolometre pulu üzerinde aşağıda sıralanan adımlar uygulanmıştır.

1. Feda katmanın şekillendirilerek bağlama metalinin açıklığı lithografisi
2. Feda katmanı kuru aşındırması
3. Bağlama metalinin kaplanması için metal açıklığı lithografisi

4. Bağlama metalinin kaplanması ve sıyırma tekniğiyle şekillendirilmesi
5. 8" Bolometre pulunun disk kesme makinası ile 6" boyuta düşürülmesi
6. Feda katmanının oksijen plazma ile kaldırılması ve piksellerin havada asılı bırakılması
7. Bolometre dizinlerinin pul seviyesinde elektriksel testinin gerçekleştirilmesi.
8. Bolometre pulu ve kapak pulunun bağlama işlemi için hizalanması ve bağlama işleminin gerçekleştirilmesi

Bolometre pulu ile birleştirilecek kapak pulu için çift tarafı parlatılmış optik geçirgenliği yüksek 6" boyutunda silisyum pul kullanılmıştır. Bu pul üzerinde aşağıda sıralanan işlemler uygulanmıştır. Kapak puluna Ti gaz emici katman kaplama çalışmaları yürütülmüş fakat gaz emici Ti kaplamanın bağlama sürecine zarar vereceği anlaşıldığı için bolometre pulu için hazırlanan kapak puluna uygulanmamıştır.

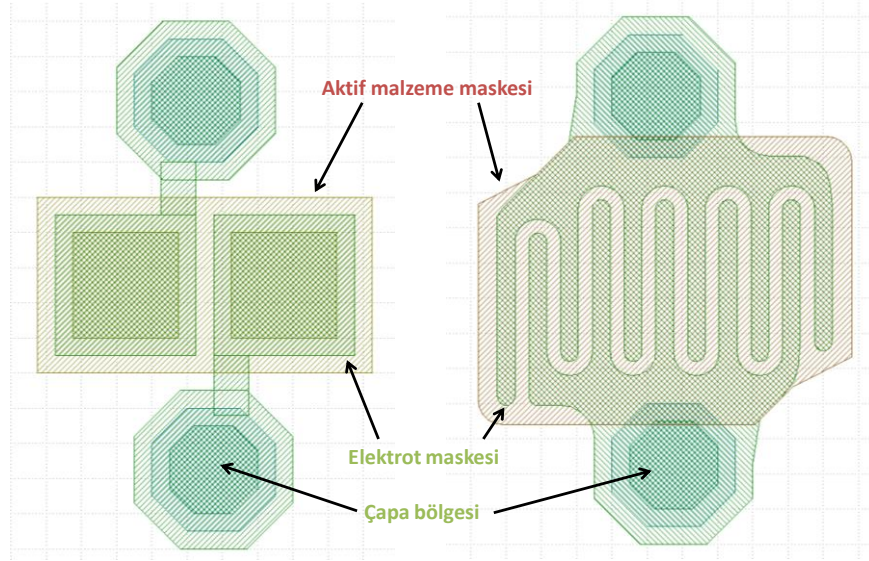
1. Pul yüzeyine PECVD ile SiN kaplama
2. Pul arkasına hizalama işaretlerinin konulması
3. Bağlama metali açıklığı lithografisi
4. Bağlama metalinin kaplanması ve sıyırma tekniği ile şekillendirilmesi
5. Kapak boşluğunun oluşturulması için lithografi
6. Kapak boşluğu oluşturmak için SiN'in ıslak aşındırma ve silisyumun derin kuru aşındırma ile aşındırılması
7. Kapak Pulu boşluğu içine gaz emici ince film kaplanması
8. Kapak pulu ve bolometre pulunun bağlama işlemi için hizalanması ve bağlama işleminin gerçekleştirilmesi
9. Bağlama işlemi gerçekleştirildikten sonra dedektörlerin ayrılması için kesme işlemi özel pul kesiciyle gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Paketleme işleminin sağlıklı yürütülebilmesi için hizalama işaretlerinin tasarımı ve yerleşiminde iyileştirme gerekliliği duyulmuş ve bu kapsamda, ilgili maske setlerinde yenileme yapılarak, hizalama işaretleri paketleme adımına uygun hale getirilmiştir.

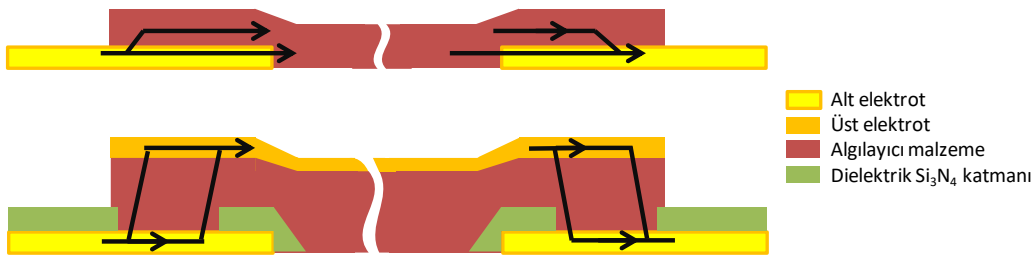
Pul seviyesi paketleme sonrasında, çip seviyesine ayrıştırılacak olan dedektör prototipleri test edilirken, test sonuçlarının olumlu olabilmesi için piksellerin vakum ortamında bulunması tek başına yeterli olmayacaktır. Sürecin önemli gereksinimlerinden bir tanesi de, piksel üzerindeki kızılötesi algılamayı sağlayan aktif malzemenin, paketleme işlemi sırasında tabii tutulacağı sıcaklık profilinden zarar görmemesidir. Örneğin, VO_x algılayıcı malzeme ile oluşturulan yapının direnç değerinde büyük bir sapma olursa, malzemenin bolometrik özellikleri olumsuz

etkilenmemiş bile olsa, yapının direnç değeri okuma devresinin destekleyebileceği aralığın dışına çıkabilecek ve dolayısıyla, dedektörler test edilemeyebilecektir.

Bu amaçla, VO_x algılayıcı malzeme katmanı, pul seviyesi paketleme sıcaklık profiline maruz bırakılmıştır. Sıcaklığa maruz kalan katmanın direnç değeri ortalamasının üç katından fazla artış göstermiştir. Dolayısıyla, belirtilen direnç yapısının paketleme süreci için uygun olmadığına kanaat getirilmiş ve daha derinlemesine bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.51 Sandviç (sol kısım) ve parmak elektrotlu (sağ kısım) direnç yapılarının model üzerinde üstten görünümü.



Şekil 4.52 Parmak elektrotlu direnç yapısı üzerindeki akım yönü (üst kısım) ve sandviç elektrotlu direnç yapısı üzerindeki akım yönünün (alt kısım) kesitten görünümü.

Uygun olmadığına karar verilen iç içe geçmiş parmak elektrotlar arasında oluşturulan direnç yapısına alternatif olarak, sandviç elektrotlar arasında oluşturulacak direnç yapıları denenmiştir. Önerilen yeni yapı, önceki yöntemle üretilen yapıya göre farklılıklar içermektedir. Parmak elektrotlu direnç yapılarında elektrik akımı düzlemsel (piksel gövdesine paralel) olarak akarken, sandviç elektrotlu direnç yapılarında dik eksende (piksel gövdesine dik) akmaktadır. Bu elektriksel

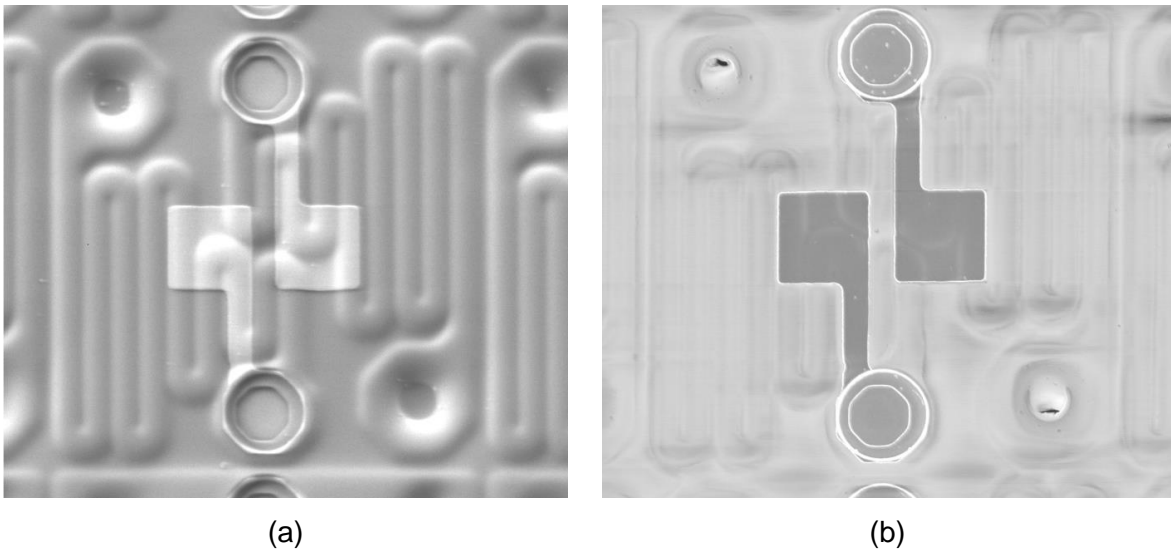
farklılık vasıtasıyla, oluşturulacak olan direnç yapılarının sıcaklığa daha dayanıklı olabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de her iki elektrot tipi arasındaki farklılıklar görsel olarak sunulmuştur.

Sandviç ve parmak elektrotlu direnç içeren piksellere ait üretim sürecinde,

- elektrot yapısının oluşturulmasına kadar olan adımlar (§4.2.1, 1 – 4. Adım) ve
- piksel gövdesi üst katmanın kaplanması ve sonraki adımlar (§4.2.1, 7 – 9. Adım)

birbiri ile aynıdır. Dolayısıyla, sandviç elektrotlu direnç içeren piksellere ait üretim adımları için elektrot oluşturma ve algılayıcı malzeme ile piksel yapısının oluşturulması süreçlerinde değişiklik yapılması ihtiyacı doğmuştur. Proje takviminin sonlarına doğru piksel yapısında ortaya çıkan bu değişiklik, ciddi bir gecikmeye sebep olmuştur.

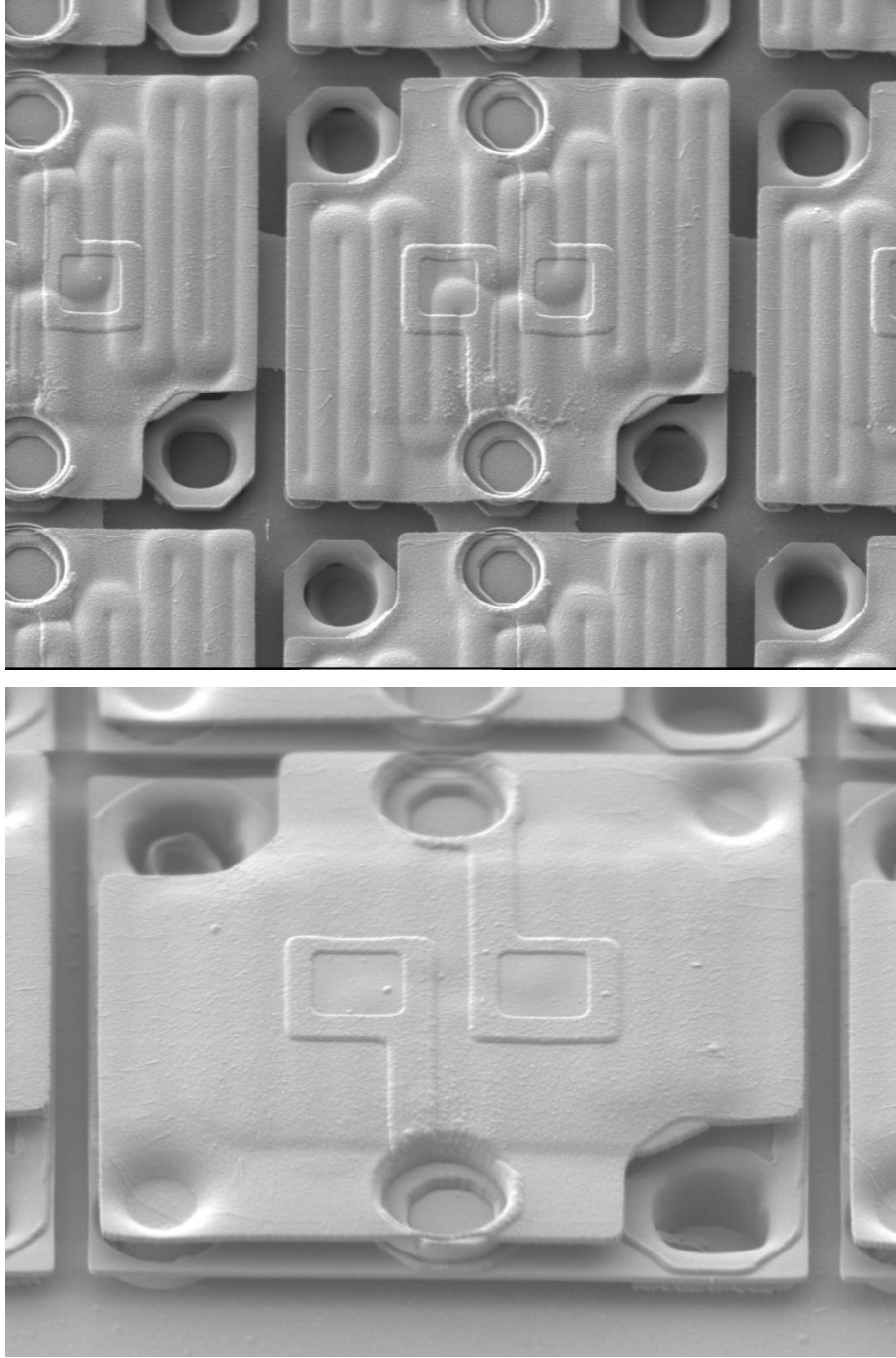
Piksel gövdesinin alt katmanı üzerine, sandviç elektrot metali kaplandıktan sonra metalin şekillendirilmesi sırasında piksel topolojisinin getirmiş olduğu sorunlar sebebi ile bazı elektrotlarda kopukluk olduğu gözlenmiştir. Bir adet okuma devresi diskinin kaybedildiği bu tecrübe sonrasında, alt katmanlardan gelen topoloji de göz önünde bulundurularak elektrot seriminde revizyona gidilmiştir. Ek olarak, elektrot metalinin şekillendirilmesi aşamasındaki riskleri azaltmak için ıslak aşındırma yerine, kuru aşındırma sürecine geçiş sağlanmış ve yüksek iletkenlikte güncel bir metal yığını ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Üretimi tamamlanmış sandviç elektrot yapısı Şekil 4.53(a)'da sunulmaktadır. Sonuçları Şekil 4.53(b)'de paylaşılan, SEM fotoğrafları yeni aşındırma sürecinin istenilen yüzey temizliği ile beraber tamamlandığı gösterilmektedir.



Şekil 4.53 Kuru aşındırma sonrası şekillendirilmiş elektrot görüntüsü (a), ikincil elektron görüntüleme yoluyla yüzeyden alınan görüntü (b).

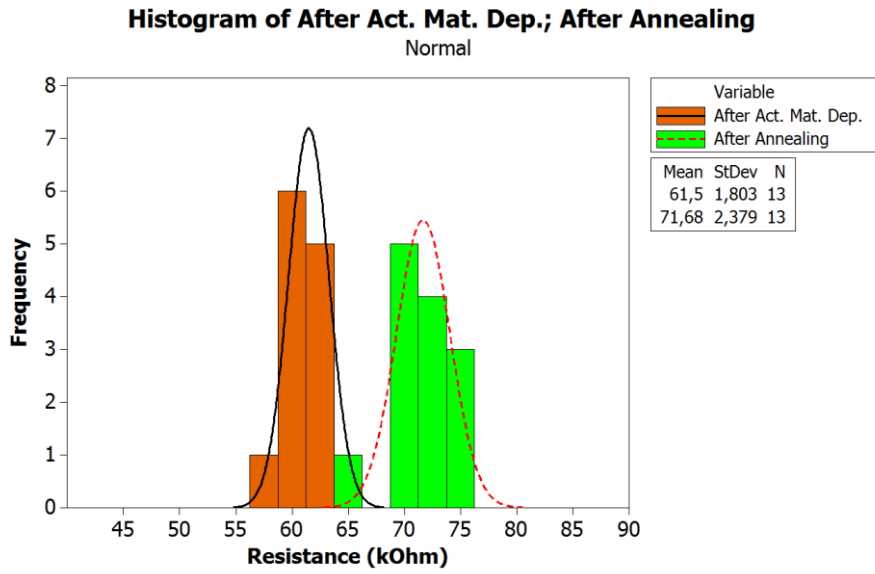
Elektrotların üzerine ise algılayıcı malzeme olarak seçilen VO_x , yeni yapı ile hedeflenen direnç değerlerine ulaşabilmek için daha kalın kaplanarak, yine *lift-off* metodu ile şekillendirilmiştir. Takip

eden adımlar ise parmak elektrotlu direnç içeren pikseller ile aynı şekilde uygulanmıştır. Feda katmanı aşındırılmış, üretimi tamamlanmış piksel yapılarına ait görüntüler Şekil 4.54'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.54 Feda katmanı aşındırılmış, havada asılı haldeki sandviç elektrotlu piksel yapılarına ait görüntüler.

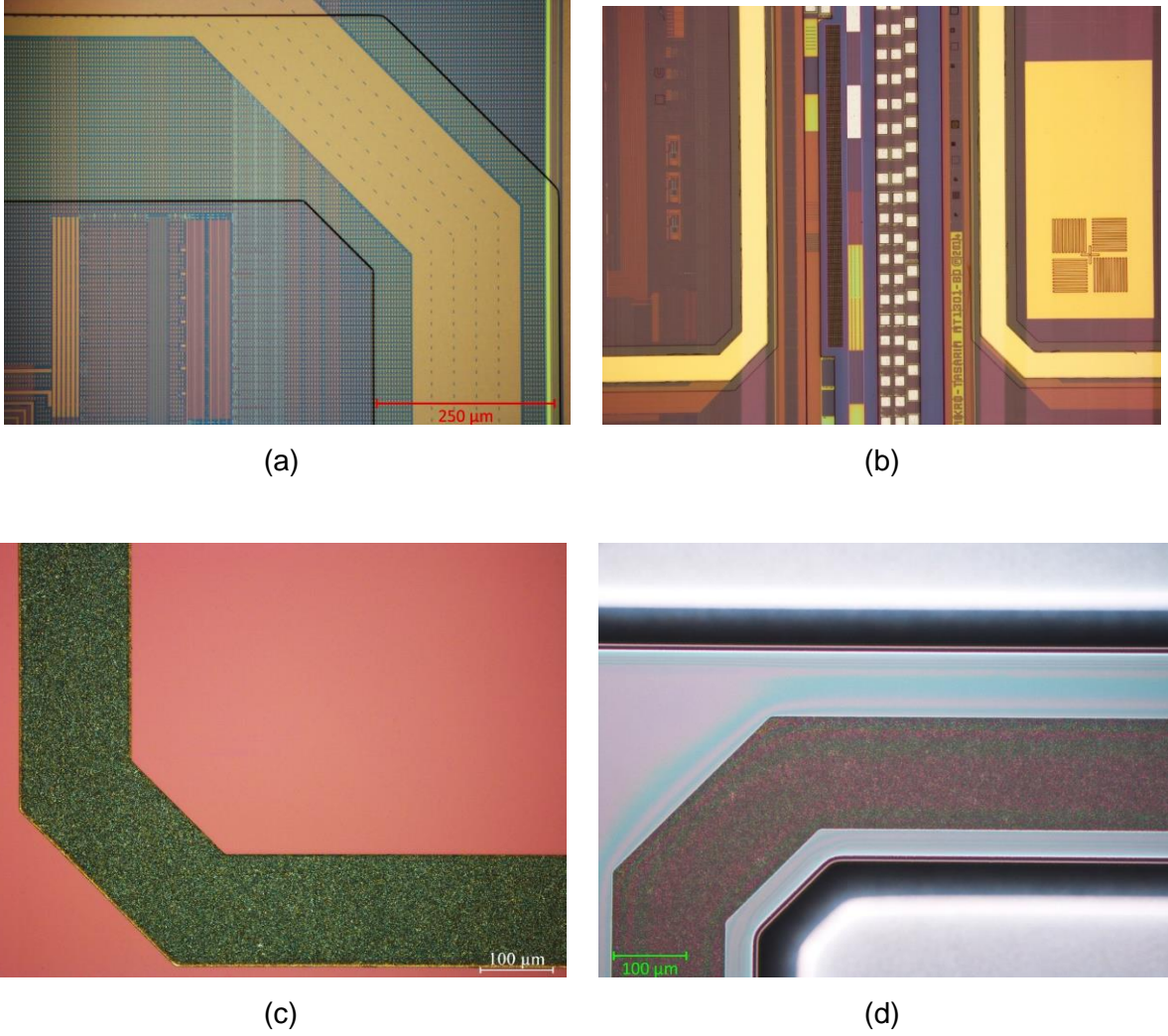
Sandviç elektrotlu yapıların, pul seviyesi paketleme sıcaklık profiline olan dayanımını test edebilmek için 13 adet test pikseli yapısından direnç ölçümü yapılmıştır. İlk ölçüm algılayıcı malzeme kaplanması ve şekillendirilmesi sonrasında alınmış olup, ikinci ölçüm örneklerin ilgili sıcaklığa maruz bırakılması sonrası alınmıştır. Şekil 4.55 içerisinde sunulan sonuçlar incelendiğinde, ortalama direnç değerinin 61.5 kΩ'dan 71.7 kΩ'a çıktığı ve σ/μ (standart sapma / ortalama) değerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmektedir. Parmak elektrotlu yapıların direnç değeri ortalamasının üç kattan fazla değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, sandviç elektrotlu yapılarda görülen yaklaşık %15'lik değişim kabul edilebilir görünmektedir. Ek olarak, sıcaklık profili sonrası ulaşılan direnç değerleri, okuma devrelerinin destekleyebileceği aralığın da içinde kalmaktadır.



Şekil 4.55 Sandviç elektrotlu piksel yapısının algılayıcı malzeme kaplama sonrası direnç dağılımının, paketleme profili ile değişimi.

Elde edilen sonuçlar ışığında, diğer iki okuma devresinin sandviç elektrotlu direnç içeren piksel yapıları ile üretilmesine karar verilmiştir. Riski azaltmak adına üretim süreci her bir okuma devresine sıra ile uygulanmıştır. Okuma devrelerinden bir tanesi, ayna katmanının ıslak aşındırma yoluyla şekillendirilmesi sırasında kaybedilmiştir. Bu durum, ayna katmanı altında bulunan ve okuma devresi üreticisi tarafından kaplanan alüminyum katmanının, ayna katmanı metalinin şekillendirilmesi sırasında aşındırılması sonucu oluşmuştur. En son okuma devresi üretimi, ek sarf malzeme kalmadığı için titizlikle yürütülmüş ve dedektör dizinlerinin üretimi başarı ile tamamlanmıştır. Malzeme ve zaman kısıtlamasından ötürü pul seviyesi paketleme işlemi, dedektör dizinlerini barındıran okuma devreleri üzerinde sadece bir kere denenebilmiştir.

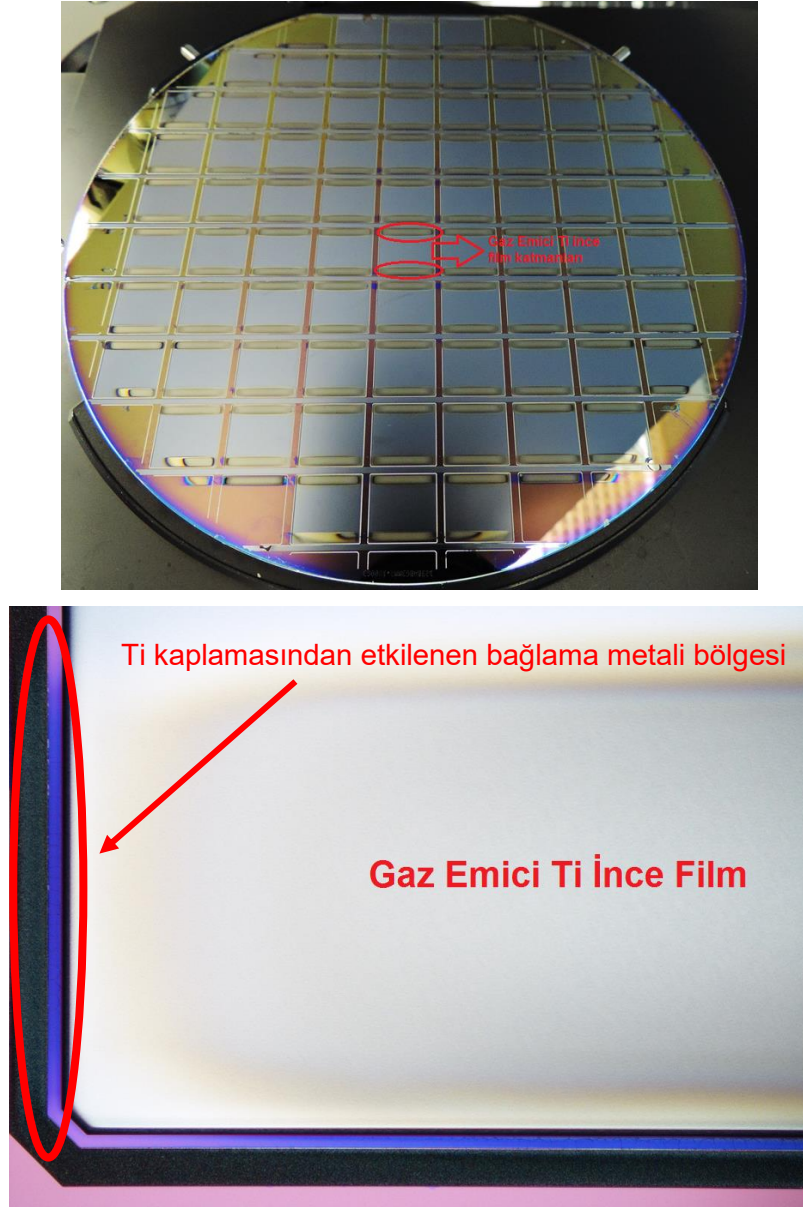
Yukarıda bahsedildiği gibi sadece 1 adet CMOS disk üzerinde deneme yapmak üzere CMOS disk bu bölümün başında sıralanan bağlama işlemi için CMOS üzerine uygulanan adımlardan geçirilmiştir. Bu bağlamda CMOS disk üzerinde oluşturulan feda katmanı açıklığı ve bu açıklığın içine yerleştirilen Au bağlama metalinin mikroskop görüntüsü sırasıyla Şekil 4.56 (a) ve (b)'de verilmiştir. CMOS disk bağlama metali oluşturulduktan sonra disk kesici ile 8" boyuttan 6" boyuta kesilmiştir. CMOS disk birleştirilecek kapak puluna uygulanan işlemler doğrultusunda kapak puluna bağlama metali ve kapak boşluğu oluşturma işlemleri uygulanmıştır. Bu adımlar sonrasında kapak puluna ait mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.56 (c) ve (d)'de verilmiştir.



Şekil 4.56 CMOS disk üzerinde feda katmanı açıklığının oluşturulması ve bağ metalinin oluşturulması (a-b), kapak disk üzerinde bağ metalinin ve kapak boşluğunun oluşturulması (c-d).

Kapak pulu boşluğuna kaplanacak ince film gaz emici katman için mekanik maskeleymeyle Ti ince film kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ti ince film kalınlığı 1 µm olarak saçtırma sistemiyle

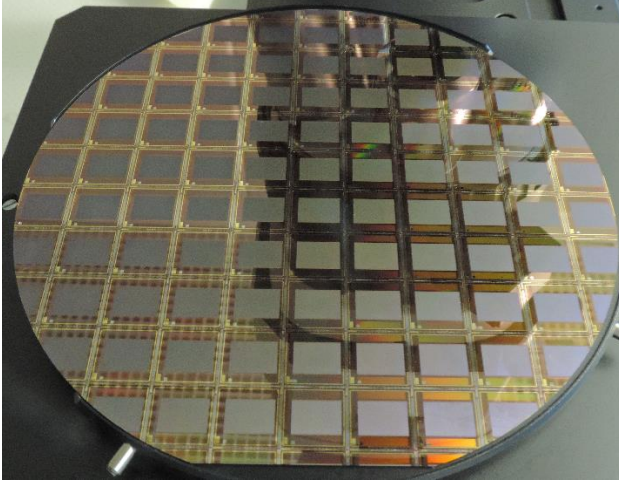
kaplanmıştır. Yapılan kaplama sonucunda mekanik maskelemenin (*Shadow Mask*) istenen sonucu vermediği, Ti filmin bağ metali üzerine gölgeleme yaptığı gözlenmiştir. Kapak pulu üzerine yapılan Ti gaz emici katman kaplamasının fotoğrafı ve bağ metali üzerine kaplanmasının görüldüğü mikroskop fotoğrafı 4.57’de gösterilmiştir. CMOS disk için kullanılmak üzere başka bir kapak pulu işlenmiştir. Bu kapak pulu üzerine Ti gaz emici katman kaplaması yapılmamıştır.



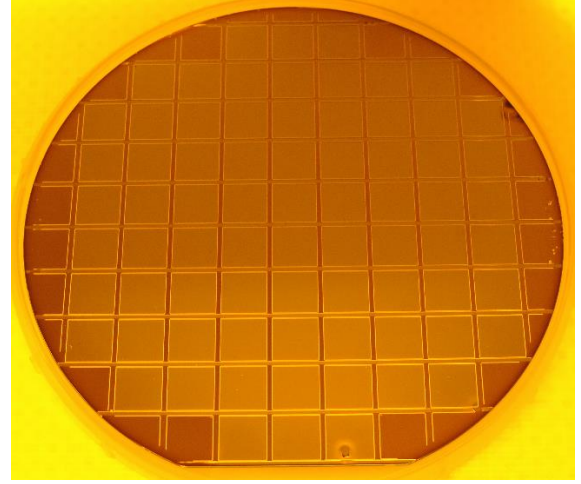
Şekil 4.57 Gaz Emici Ti ince film katmanının kapak boşluğuna kaplanmış halinin fotoğrafı ve mikroskop görüntüsü. Gaz emici katman mekanik maskeleme (*Shadow Mask*) ile kaplanması sırasında bağ metali bölgesine de bir miktar Ti kaplandığı gözlenmiştir.

CMOS disk 6” boyutta kesildikten sonra disk seviyesinde oksijen plazma ortamında feda katmanları aşındırılarak bolometre dizinlerinin pikselleri havada asılı halde bırakılmıştır. Kapak

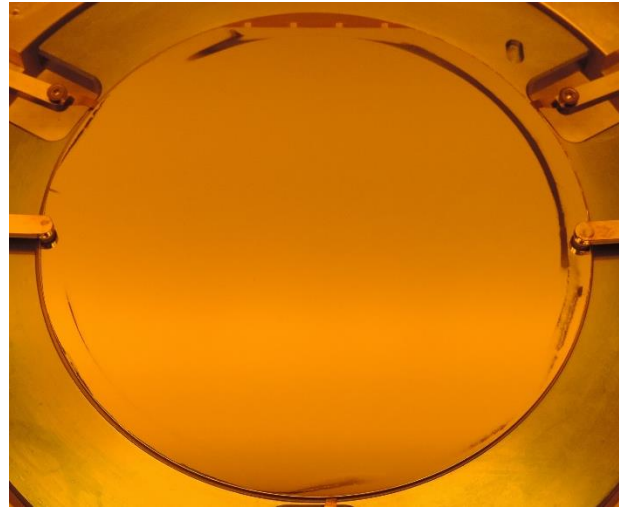
pulu oluşturulduktan sonra, iki disk disk hizlama cihazında bağlama işlemi için hizalanmış ve bağlama cihazında 4.1 nolu bölüm'de geliştirilme adımları anlatılan bağlama yöntemiyle birleştirilmiştir. Pulların birleştirilmeden önceki fotoğrafları ve birleştirme işleminden sonraki fotoğrafı Şekil 4.58'de verilmiştir.



(a)



(b)

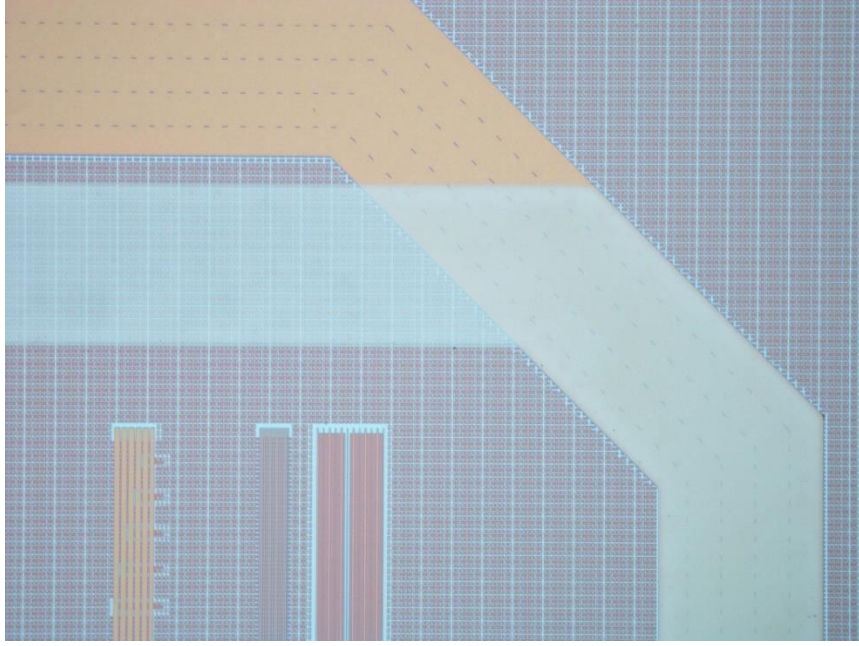


(c)

Şekil 4.58 Bolometre dedektör pulunun (a), kapak pulunun (b) bağlama öncesi ve birleştirilmiş pulların bağlama sonrası (c) fotoğrafları.

ASELSAN'da kurulu olan yansımaya önleyici katman kaplama cihazı üretim hattına kaydırıldığı için birleştirilen disk üzerine yansımaya önleyici katman kaplaması için ASELSAN'da DLC CVD kaplama (*diamond like coating*) yapılması öngörülmüştür. Kaplamanın etkisini daha net anlayabilmek için bağlaması yapılan disklerin sadece yarısına bu katmanın serilmesi kararlaştırılmıştır. Diskler yarısı kesilmek üzere kesme işlemi için hazırlandığı sırada bir birinden beklenmedik bir şekilde

ayrılmıştır. Ayrılan disklerde görülmüştür ki bağ metalı komple disk üzerinden sıyrılmıştır. Ayrılan disklere ait optik mikroskop fotoğrafları Şekil 4.59'da verilmiştir.



(a)

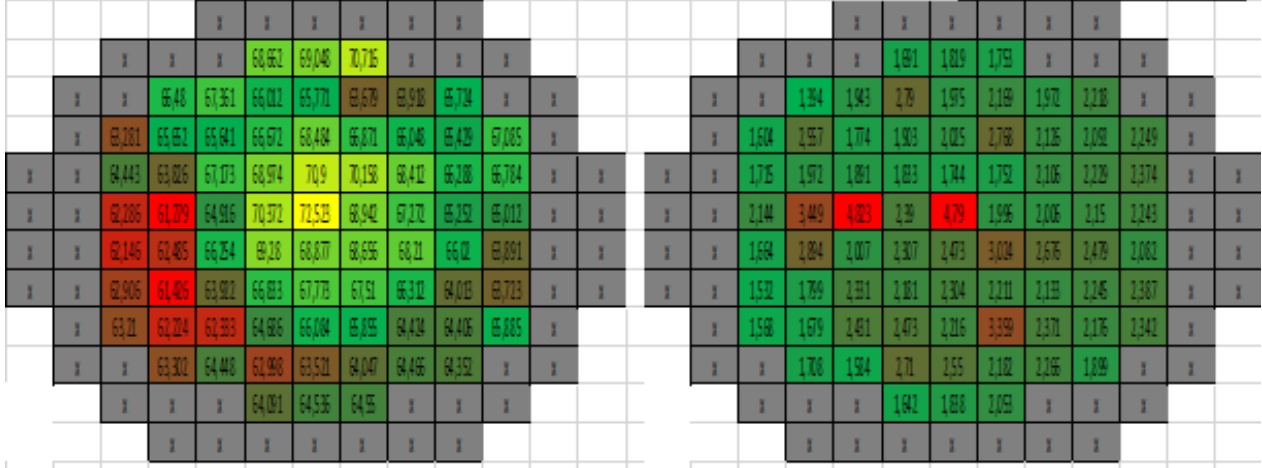


(b)

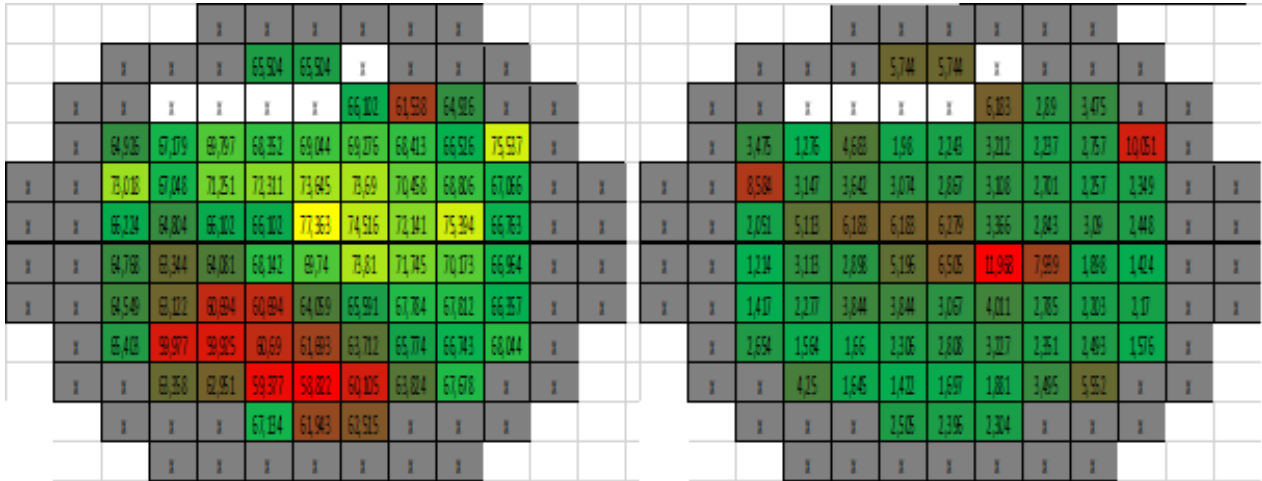
Şekil 4.59 Bağlama işlemi sonrası diskler ayrıldıktan sonra CMOS diskin üzerinde kalan katman (a), bütün olarak kapak tarafında kalan bağ metalinin görüntüsü (b).

4.2.3 Performans Testleri

6" boyutunda pikselleri havada asılı bırakıldıktan sonra probe istasyonunda test edilmiş bolometre diski üzerinde bolometre dizinlerine ait direnç dağılımı 59 kohm ile 77 kohm arasında ölçülmüştür. Tüm disk üzerindeki dizinlerin direnç haritası ve standart sapma değerleri Şekil 4.60'da görülebilir.



(a)

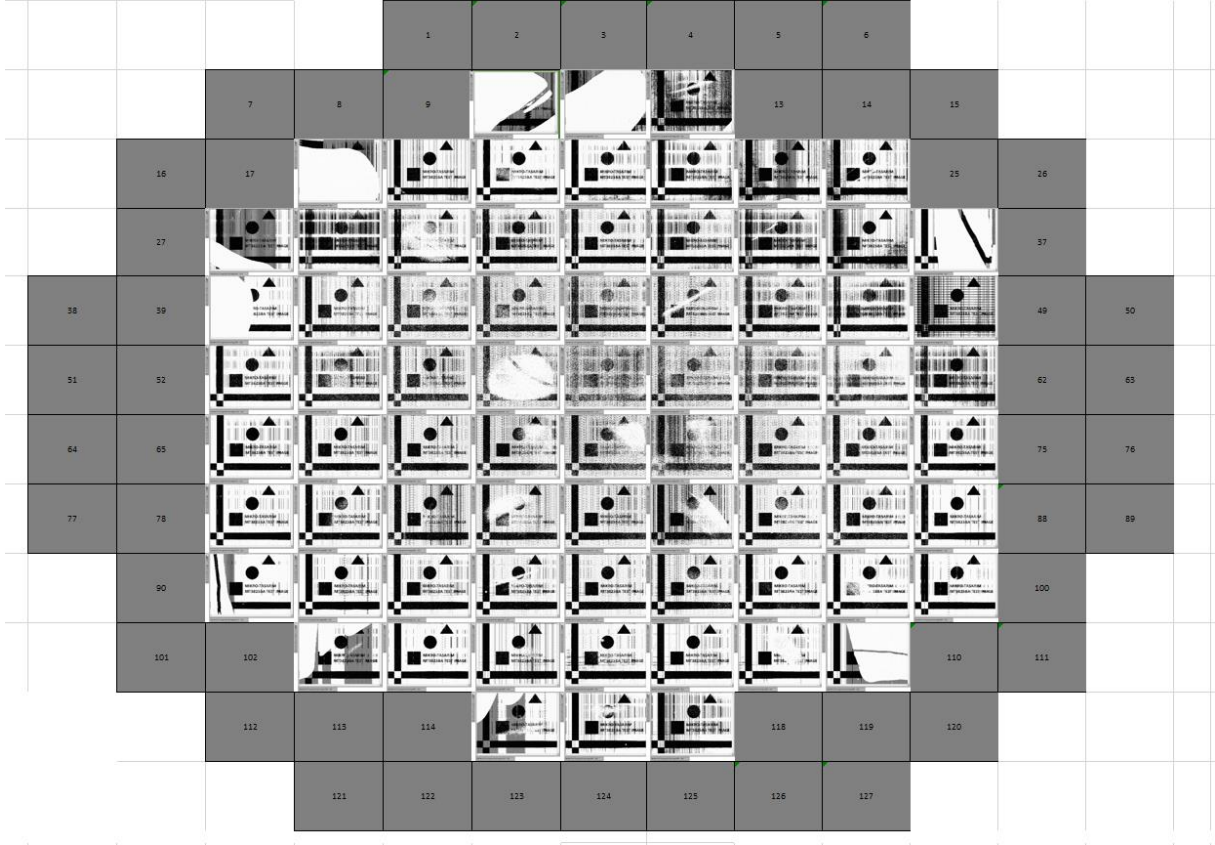


(b)

Şekil 4.60 6" bolometre diskinin dizinlerine ait direnç dağılım haritası, referans dirençler (a) ve piksel dirençleri ile standart sapma değerleri (b).

Bolometre dizinlerinin ROIC devresi ile iyi bir performansta çalışması için direnç değerlerinin okuma devresine uygun bir aralıkta olması gerekmektedir. Bu değer 60-90 kohm arasında idealdir. Dizinin direnç haritasında görüldüğü üzere çoğu bolometre dizinine ait ortalama direnç değerleri bu aralığın içinde bulunmaktadır. Ayrıca standart sapma haritasından da görülebileceği üzere çoğu dizinin pikselleri arasındaki direnç değişimi kabul edilebilir aralık olan 0-5 kohm aralığında kaldığı görülmüştür.

MEMS referanslarıyla alınmış görüntü haritası aşağıda Şekil 4.61'de görülebilir. Bu görüntü, bir termal görüntü olmayıp, sadece piksellere elektriksel bağlantı alınabildiğini ve okuma devresi ile piksel beslemelerinin programlanabildiğini teyit etme amaçlı olarak elde edilmiş bir test görüntüsüdür. Bu test görüntülerinden, bağlama işlemi sonrası okuma devrelerinde ve piksel elektriksel bağlantılarında genel anlamda bir fonksiyonel bozukluk olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.61 6'' bolometre diskinin dizinlerine ait test görüntüsü haritası

Bağlanan disklerin kesilerek bolometre dizinlerinin ayrılmasından önce diskler arasındaki bağın ayrılması nedeniyle bu örneklere herhangi bir test uygulanamamıştır. Fakat 8'' boyuttan 6'' boyuta kesilen bolometre diskinin 8'' bölgesinde kalan bolometre dizinlerinin temizlenip, piksellerinin havada bırakılması işleminden sonra özel bir vakumlu test kabı olan vakum dewarında test edilmesi mümkün olmuştur. Vakum dewarında yapılan testler sonucunda bu bolometre disk üzerindeki 51 nolu dizinden termal görüntü elde edilebilmiştir. Bolometre dizininden elde edilen NEDT değeri 62 mK olarak hesaplanmıştır. Bu değer bolometrenin algılama hassasiyetinin bir göstergesidir. Kabaca Dedektörün algılayabileceği sıcaklık farklılığına tekabül etmektedir. 62 mK değeri oldukça hassas bir bolometre dizininin üretildiğini göstermektedir. Bunun yanında ölü piksel sayısı fazla olmakla beraber, proses adımlarının iyileştirilmesiyle iyileşebilecek bir parametredir. Bu dizine ait karakterizasyon sonuçları Tablo 4.3'te, dizinden elde edilen ve

CMOS referanslarının kullanıldığı termal görüntü Şekil 4.62'de, MEMS referanslarının kullanıldığı termal görüntü ise Şekil 4.63'te verilmiştir.

Tablo 4.3 MT3825BA Bolometre diski 051 nolu sensörün Dewar içindeki test sonuçları. Test sırasında dewar içi basınç 16 mTorr olarak ölçülmüştür.

Sensör No:	NETD [mK]	Ölü Piksel [%]	Tepkisellik [V/W]	Gürültü [ADC Count]
051	62	13.11	65278	5.38



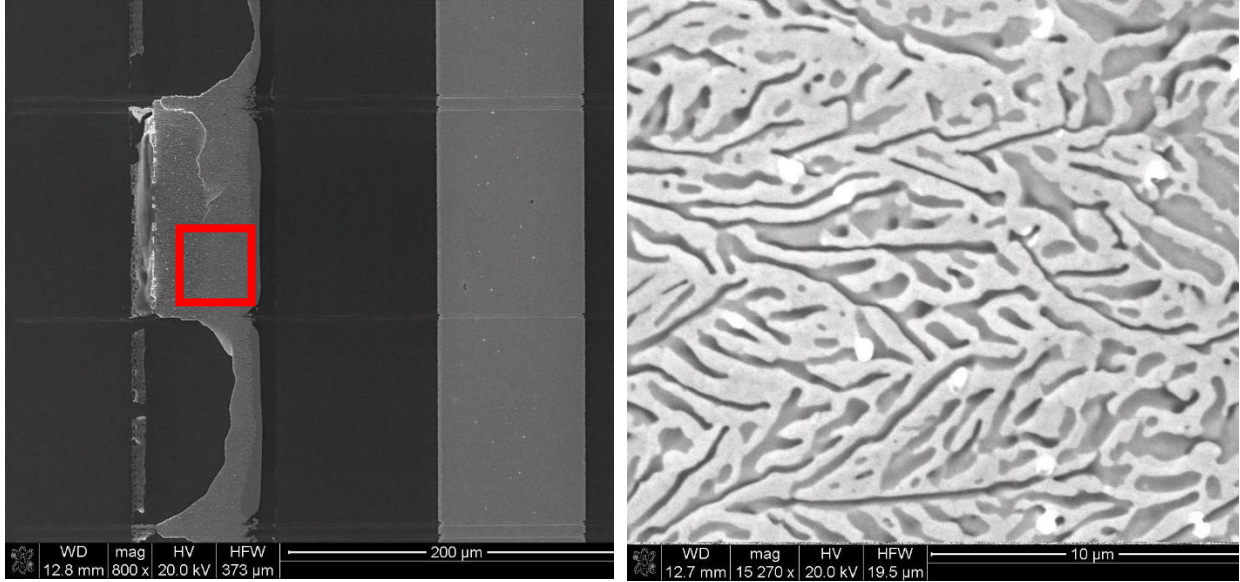
Şekil 4.62 51 nolu sensörden dewar içinde CMOS referans kullanılarak alınmış, 2-nokta düzeltme ve ölü piksel filtreleme uygulanmış termal görüntü.



Şekil 4.63 51 nolu sensörden dewar içinde MEMS referans kullanılarak alınmış, 2-nokta düzeltme ve ölü piksel filtreleme uygulanmış termal görüntü.

5 Tartışma / Sonuç

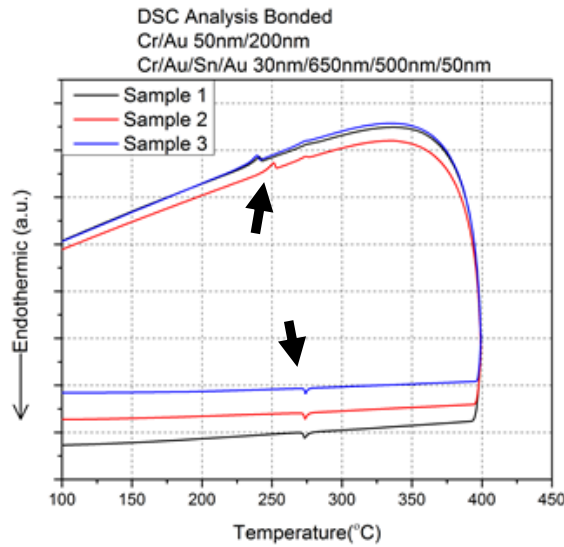
Proje teklifinde silisyum disk seviyesinde tek bir seferde Au-Sn veya Au-Si ötektik yapı ile elektronik paketlenme yapılması hedeflenmiştir. Bulgular kısmında belirtildiği üzere, proje çalışmaları Au-Sn sistemi üzerine gerçekleştirilmiş olmasına karşın Au-Si sistemi için de çalışmalar gerçekleştirilmiş ve ötektik yapı ile bağlama elde edilmiştir. Fakat Au-Si sistemi için ötektik oluşturma noktasının yüksek olması (363°C) CMOS disk içeren yapılar için riskli olmaktadır. Ayrıca, gaz emici malzemenin aktive olması için de bağlama sıcaklığının 400°C veya tercihen daha yüksek olması gerekmektedir. Projede çalışılan mikrolometreler için aktivasyon sıcaklığı 400°C'ye yakındır. Bu sıcaklıklar faz diyagramı nedeniyle TLP yapı oluşturamayan Au-Si sistemi için oldukça yüksektir. Bu bağlamda Au-Si ötektik yapı oluşturulup boş silisyum disklerle bağlama yapılmasına karşın projedeki asıl çaba Au-Sn sistemi özelinde gösterilmiştir.



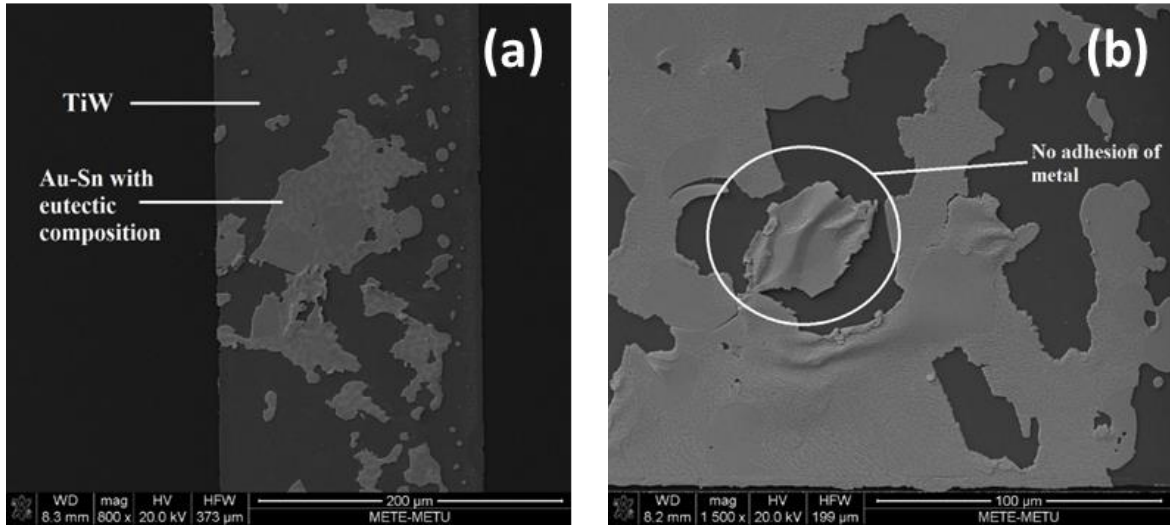
Şekil 5.1 Au-Si (%3,16 ağırlık) alaşımın silisyum disk üzerine kaplanması sonrası elde edilmiş ötektik yapı (a) kırmızı kare içine alınmış bölgenin yüksek büyütme SEM fotoğrafı (b).

Au-Sn alaşımı özelinde birçok bağlayıcı katman malzemesi çalışılmıştır. Bu malzemeler saf Cr, saf Ti, TiW ve Ti/Ni katmanlardır. Bu malzemelerden saf Ti, Au-Sn alaşımı ile tepkimeye girerek istenmeyen intermetalik yapılar oluşturmuştur (Şekil 4.9). Saf Cr katmanı ise Au-Sn alaşımının ötektik olarak ergimesini engellemiş ve yapıya difüz olarak üçlü bir sistem oluşturmuştur (Şekil 4.9). Bu etkiyi azaltmak üzere Au-Sn kalınlığı iki katına çıkarılarak Cr/Au 50nm/200nm ve Cr/Au/Sn/Au 30nm/650nm/500nm/50nm katmanlı yapı hazırlanmıştır. En dıştaki 50 nm'lik Au katman kalayın oksidasyonunu engellemek üzere koruyucu tabaka olarak uygunlanmıştır. Bu koşullarda hazırlanan katmanlar Şekil 5.2'de gösterildiği üzere DSC içerisinde ötektik ergime

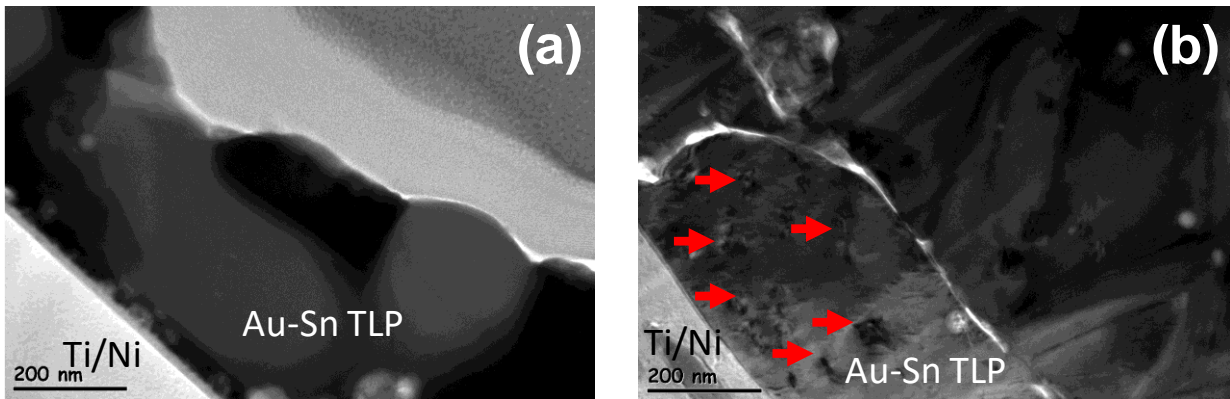
sinyali vermiştir. Bu bağlamda, katmanların kalın uygulanması ile Cr tabakanın Au-Sn yapının tamamına difüz olarak ötektik oluşmasını engellemeye yönelik problem çözülmüştür. Fakat bu yöntem istenilmeyen bir şekilde Au-Sn kalınlığını iki katına çıkarmıştır. Au-Sn ötektik kalınlığının iki katına artması kimyasal kompozisyonun hedeflenen kompozisyonda sabit kalması için diğer disk üzerindeki Au katmanının kalınlığının da iki katına çıkmasını gerektirmektedir. Bu durum üretim süreçleri açısından pratik olmaktan çıkmakta ve tercih edilmeyen bir yöntem olmaktadır. Uygulanan bağlayıcı katmanlardan TiW üzerine kaplanan Au-Sn alaşımı ile tepkimeye girmeyerek sistemin ötektik ergimesini sağlamıştır. Bu deneyler sonucu ötektik ergime tespit edilmesine karşın, sıvı Au-Sn yapının TiW katmanı üzerine zayıf yapıştığı görülmüştür. Farklı katman şekilleri (simetrik gibi) ve atmosfer ortamları denenmesine karşın, ötektik yapı çok kolay şekilde TiW yüzeyden sıyrılarak kalkmaktadır. Şekil 5.3, TiW/Au/Sn/Au 150nm/300nm/350nm/50nm özelinde yaşanan problemi göstermektedir. Elektron mikroskobu fotoğraflarından da net olarak görüldüğü üzere, bazı bölgelerden Au-Sn katman cımbızla bile ayrılabilir. Bu noktada TiW, yapı içine çok az difüz olduğundan Au-Sn ötektik oluşumuna olumsuz bir katkısı olmamasına karşın, büyük ihtimalle aynı sebepten iyi bir bağlama sağlayamamaktadır. Uygulanan Ti/Ni katman ise Şekil 4.9'da gösterildiği üzere başarılı bir bağlama oluşturmuş ve projenin ilerleyen safhalarında Si disk üzerine 20 nm Ti/ 50 nm Ni bağlayıcı kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Cr/Au 50nm/200nm ve Cr/Au/Sn/Au 30nm/650nm/500nm/50nm katmanlı yapıların 10°C /dak. ısıtma ve soğuma hızlarında DSC analizleri. Oklar ötektik reaksiyonu işaret etmektedir.



Şekil 5.3 Paketleme sonrası TiW yüzeyinden kolayca ayrılan Au-Sn ötektik yapı.



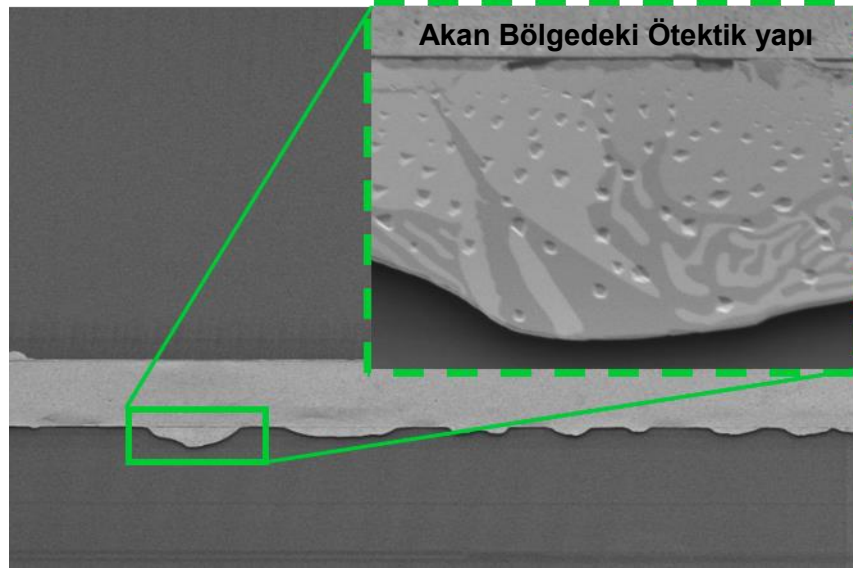
Şekil 5.4 TLP'den ötektik olarak oluşturulmuş kesme mukavemeti güçlü (a) ve zayıf (b) paketleme örnekleri. Kırmızı oklar tane sınırları içerisinde oluşmuş IC yapıları göstermektedir.

Şekil 5.4 Ti/Ni bağlayıcı katman üzerinde TLP'den ötektik olarak oluşturulmuş iki farklı örneğin TEM fotoğraflarını göstermektedir. Bu örneklerde (a)'daki 40 MPa basınç altında kırılırken (b)'deki yaklaşık 20 MPa'da kırılmıştır. Görüntüler incelendiğinde hem zayıf hem de güçlü olan numunelerde herhangi bir ötektik yapının bağlama sonrası kalmadığı ve TLP bağlamanın başarılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. Fakat zayıf kesme dayancısı gösteren numunenin tane sınırları içerisinde ikincil bir fazın olduğu farkedilmiştir (Şekil 5.4(b)). Oluşan bu IC fazın basınç altında stres artırıcı bir etki yapıp kesme dayancısını düşürdüğü düşünülmektedir. TEM görüntülerindeki zayıf örnek Şekil 4.20'de gösterilen 16 numaralı (disk kenarına yakın) konumdan alınan örnek iken, güçlü örnek Şekil 4.20'de gösterilen 6 numaralı (disk merkezine yakın) konumdan alınan

örnektir. Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, genel olarak disk kenarına yakın konumdaki paketlemelerin daha zayıf olduğu saptanmıştır. Bunun muhtemel sebebinin paketleme sırasında yaşanan ısı ve basıncın homojen olarak dağılmaması olabileceği düşünülmektedir. Homojen olmayan ısı dağılımı TLP oluşumunu etkileyerek IC fazlarının oluşmasına yol açmış olabileceği düşünülmektedir. Disk kenarına yakın örneklerde gerek kaplama sistemlerindeki disk kenarına doğru gerçekleşen ideal olmayan kaplama kalınlıkları ve bağlama cihazının örnek kenarına doğru uyguladığı kuvvetin ideal olmamasından mekanik ve sızdırmazlık (Şekil 4.39b) özelliklerinin zayıf olması beklenmektedir.

Gerçekleştirilen paketleme çalışmalarında hem katmanlı hem de yekpare Au-Sn ötektik yapı başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat gerçek mikrobolometre uygulamasına geçtiğimizde elimizde tek bir CMOS disk kaldığı için riski azaltmak adına, farklı uygulamalar için ODTÜ MEMS Merkezi tarafından da çalışılmış olan katmanlı yapı tercih edilmiştir. Proje kapsamında gerçekleştirilen yekpare ötektik ve katmanlı Au-Sn ötektik yapıdan TLP oluşturulması literatürde yeni bir yaklaşımdır.

Bolometre diski kapak diski ile birleştirilmesi sonrası kesme işlemi için hazırlanma aşamasında beklenmeyen bir şekilde ayrılmıştır. Bağlanmış disklerin bu aşamada ayrılmış olması bağlama sürecinin CMOS disk üzerine uygulanmasında farklı bir durumun olduğu göstermektedir. Bölüm 4.2.2 Şekil 4.59'da da gösterildiği üzere pul üzerinde kaynağı bu aşamada tanımlanamayan bir katman gözükmemektedir. Bu katman optik mikroskop görüntülerinde şeffaf bir yapıya sahipken Şekil 5.5'te SEM görüntüsünde görüldüğü üzere yalıtkan karakteristiği göstermiş koyu renkli bir görüntü oluşturmuştur. Şekil 5.5(a) SEM görüntülerinde bağ metalinin sıvı ötektik malzemeyi oluşturduğu ve bir miktar akma yaptığı görülebilmektedir. Bağ metalinin bütün olarak yüzeylerden kalkmış olması kopmanın pul genelinde bağ malzemesi yerine pul yüzeylerine temas bölgelerden gerçekleşmiş olması, bağ oluşumunun beklendiği gibi olduğunu fakat beklenmeyen bir tutunma problemi yaşandığını gösteriyor. Bu görüntülerden tahmin edildiği üzere bağlama metalinin disk yüzeylerine tutunmasını sağlamak amacıyla kaplanan Ti/Ni metalinin CMOS yüzeyi ile beklenmedik şekilde etkileşmesi sonucu bağ metalinin tutunma karakteristiği olumsuz yönde etkilenmiştir.



(a)

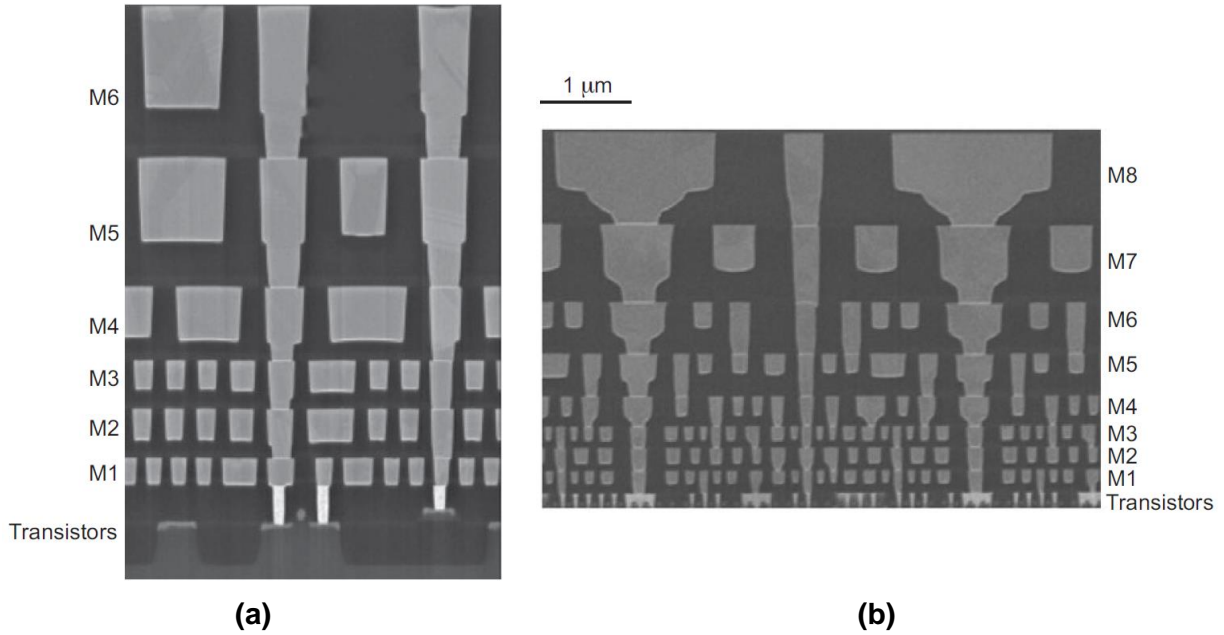


(b)

Şekil 5.5 Tutunma yüzeyinden bütün olarak kalkan bağ metal, pul üzerinde oluşan metal akması ve metalin oluşturduğu ötektik yapı (a), bağ metal ile pul arasında oluşmuş tutunmayı olumsuz etkilediği düşünülen yalıtkan özellik gösteren kalıntı katman (b).

Bağlama sıcaklığı, Bölüm 4.2.2 Şekil 4.55'te bilgileri verilen ve tavlama (400 °C'de) yapılan örneklerin tavlama sıcaklığından 80 °C daha düşüktür. Üretimi gerçekleştirilen ve Bölüm 4.2.3'te üretim sonrası direnç değerleri verilen bolometre dizinlerinin bağlama işlemi sonrası maruz kaldıkları ısı Bölüm 4.2.2 Şekil 4.55 ile birlikte düşünüldüğünde bu dizinlerin direnç değerlerinin bağlama sonrası hala fonksiyonel olacak düzeyde kalacağı mümkün görülmektedir.

Projenin önceki dönemlerinde, yapısal olarak şekillendirilmiş silisyum diskler ile bağlama denemeleri gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Ancak, bu deneylerde kullanılan silisyum disklerde, transistörleri oluşturan katkılanmış eklem yapıları ile transistörler arasındaki bağlantıları sağlayan metal katmanlar bulunmamaktadır. Bir okuma devresi diskinde ise, transistörlerin bulunduğu katkılanmış kuyu yapılarının üzerinde 4 – 5 kat metal ile bu metal katmanlar arasında izolasyonu ve yüzeydeki pasivasyonu sağlayabilmek için kullanılan dielektrik katmanlar bulunmaktadır. Silisyum yüzeyindeki katman yığını örnekleyebilmek için 5.6'da Intel firmasının 90 nm ve 45 nm CMOS üretim teknolojisinde kullandığı metal ve dielektrik katman yığınlarından kesit görüntüleri sunulmuştur. Benzer bir yığın, okuma devresi diskleri üzerinde de bulunmaktadır ve silisyum yüzey üzerindeki yaklaşık 10 katmanlık bir yığının, pul seviyesi paketleme işleminde getireceği termal stres etkilerinin de göz ardı edilemeyeceği değerlendirilmektedir. Geliştirilen bağlama metodunun CMOS disk yüzeylerine entegrasyonunun beklenmedik zorluklar içerdiği ve bundan sonraki çalışmalarda entegrasyonun sağlanabilmesi konusuna önem verilmesi gerektiği görülmüştür.



Şekil 5.6 Intel firmasının (a) 90 nm ve (b) 45 nm üretim teknolojisinde kullandığı metal ve dielektrik katman yığınlarından örnek kesit görüntüleri [35].

Ek-1. Kaynaklar

- [1] Welch W.C., 2008 Vacuum and Hermetic Packaging of MEMS Using Solder, PhD Thesis, The University of Michigan.
- [2] Mitchell J. S., 2008 Low Temperature Wafer Level Vacuum Packaging Usin Au-Si Eutectic Bondin and Localized Heating, PhD Thesis, The University of Michigan.
- [3] Liu H., Wang K. Aasmundtveit K.E. ve Hoivik N., Intermetallic Compound Formation Mechanisms for Cu-Sn Solid-Liquid Interdiffusion Bonding, Journal of Electronic Materials, Vol. 14, No. 9.
- [4] Lapadatu A., Simonsen T. I., Kittilsland G., Stark B., Hoivik N., Dalsrud V. ve Salomonsen G., 2010 "Cu-Sn Wafer Level Bonding for Vacuum Encapsulation of Microbolometers Focal Plane Arrays, ECS Trans., Vol. 33, Issue 4.
- [5] Van De Wiel H.J., Vardoy A-S.B., Hayes G., Fischer H.R., Lapadatu A. ve Taklo M.M.V., 2012, Characterization of hermetic wafer-level Cu-Sn SLID bonding, ESTC,.
- [6] Marauska S., Claus M., Lisec T. ve Wagner B., Low temperature transient liquid phase bonding of Au/Sn and Cu/Sn electroplated material systems for MEMS wafer-level packaging, Microsystem Technologies, Vol. 19, Issue 8, 2012.
- [7] Mitchell J. S. and Najafi K., 2009 "A Detailed Study of Yield and Reliability for Vacuum Packages Fabricated in a Wafer Level Au-Si Eutectic Bonding Process," in Proc. Transducers 2009, pp. 841-844,
- [8] Chae J., Giachino J. M., and Najafi K., 2008 "Fabrication and Characterization of a Wafer Level MEMS Vacuum Package with Vertical Feedthroughs," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 17, pp.193-200.
- [9] Lee S., Mitchell J. S., Welch W., Lee S., and Najafi K., 2010. "Wafer Level Vacuum/Hermetic Packaging Technologies for MEMS," in Proc. SPIE, Vol. 7592, 759205.
- [10] Savornin B., Baillin X., Blanquet E., Nuta I., Patrice D. S., Nicolas P., Charvet P. L., and Pornin J. L., 2012 "New Method to Evaluate Materials Outgassing used in MEMS Thin Film Packaging Technology," Microelectronic Engineering, Vol. 107, pp. 97-100.
- [11] Ko W . H., Suminto J. T., and Yeh G. J., 1985 "Bonding Techniques for Microsensors," Elsevier.
- [12] Dragoi V., Mittendorger G., Thanner C., and Lindner P., 2008 "Wafer Level Plasma Activated Wafer Bonding: A New Technology for MEMS Fabrication," Microsystem Technologies, Vol. 14, pp. 509-515.
- [13] Takagi M. and Maeda R., 2005 "Aligned Room Temperature Bonding of Silicon Wafers in Vacuum by Argon Beam Surface Activation," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, pp. 290-295.
- [14] Cheng Y., Hsu W., Najafi K., Nguyen C. T. ve Lin L., 2002 Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon-to-glass bonding, J. Microelectromech Syst, Vol. 11,.
- [15] Ma Z., Zhou G. L., Morkoc H., Allen L. H. ve Hsieh K. C., 1994, Solid-state reaction-mediated low-temperature bonding of GaAs and InP wafers to Si substrates, Appl. Phys. Lett., Vol. 64,.

- [16] Djurfors B. ve Ivey D. G., 2001, Pulsed electrodeposition of the eutectic Au/Sn solder for optoelectronic packaging, *J Electron Mater*, Vol. 30.
- [17] Lee J.-H., Ko Y.-C., Choi B.-S., Kim J.-M. ve Jeon D. Y., 2002, Bonding of silicon scanning mirror having vertical comb fingers, *J Micromech Microengineering*, Vol. 12.
- [18] Baggerman A. F. J. ve Schwarzbach D., 1998, Solder-jetted eutectic PbSn bumps for flip-chip, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B: Advanced Packaging*, Vol. 21,
- [19] Tilmans H. A. C., Peer V., Myriam D.J. ve Beyne E., 2000, Indent reflow sealing (IRS) technique -a method for the fabrication of sealed cavities for MEMS devices, *J Microelectromech Syst*, Vol. 9.
- [20] Stark B. H. ve Najafi K., 2004, "A mold and transfer technique for lead-free fluxless soldering and application to wafer-level low-temperature thin-film packages," in *17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS): Maastricht MEMS 2004 Technical Digest*,.
- [21] ASM, *ASM Handbook*, 1992 Volume 03 - Alloy Phase Diagrams.
- [22] Flötgen C., Corn K., van de Wiel H. J., Hayes G. R. ve Dragoi V. , 2012, Cu-Sn Transient Liquid Phase Wafer Bonding: Process Parameters Influence on Bonded Interface Quality, *ECS Transactions*, Vol. 50.
- [23] Bosco N. S. ve Zok F. W., 2004, Critical interlayer thickness for transient liquid phase bonding in the Cu–Sn system, *Acta Materialia*, Vol 52,.
- [24] Marauska S., Claus M., Lisec T., and Wagner B., 2013 "Low Temperature Transient Liquid Phase Bonding of Au/sn and Cu/Sn Electroplated Material Systems for Mems Wafer-Level Packaging." *Microsystem Technologies : Micro and Nanosystems Information Storage and Processing Systems*. 19.8: 1119-1130.
- [25] Welch W.C, Najafi K.. 2008 "Gold-indium Transient Liquid Phase (TLP) wafer bonding for MEMS vacuum packaging". 806-809.
- [26] Welch W.C, Najafi K.. 2007 "Nickel-Tin Transient Liquid Phase (TLP) Wafer Bonding for MEMS Vacuum Packaging". 1327-1328,
- [27] Theunis F., Lisec T., Reinert W., Bielen J., Yang D., Jonghl M.D. ve P. V. E. Krusemann, 2007, A Novel and Efficient Packaging Technology For RF-MEMS Devices, *ECTC*,.
- [28] Chromik R. R., Wang D-N., Shugar A., Limata L., Notis M. R., ve Vinci R. P., *Mechanical Properties of Intermetallic Compounds in the Au–Sn System*, *J. Mater. Res.*, Vol. 20, No. 8, 2005.
- [29] Xu H., Suni T., Vuorinen V., Li J., Heikkinen H., Monnoyer P., and Paulasto-Kröckel M. 2013 "Wafer-level SLID bonding for MEMS encapsulation". *Advances in Manufacturing*. 1 (3): 226-235.
- [30] Hoivik N., Aasmundtveit K., 2012 Wafer-level solid–liquid interdiffusion bonding. In *Handbook of Wafer Bonding*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, pp. 181–214.
- [31] Ghosh G., 2004, "Elastic properties, hardness, and indentation fracture toughness of intermetallics relevant to electronic packaging". *J. Mater. Res.*, 19, 1439–1454.

[32] Tollefsen, A., Løvvik O. M., and Aasmundtveit K., 2012 "Au-Sn SLID Bonding--Properties and Possibilities". Metallurgical and Materials Transactions B. 43 (2): 397-405.

[33] Garnier, A., Lagoutte E., Baillin X., Gillot C., and Sillon N., 2011 "Gold-tin bonding for 200mm wafer level hermetic MEMS packaging". 1610-1615.

[34] Yamada T., Miura K., Kajihara M., Kurokawa N., Sakamoto K., 2005, "Kinetics of reactive diffusion between Au and Sn during annealing at solid-state temperatures", Materials Science and Engineering A, 390: 118-126.

[35] Weste, N. H. E., Harris, D. M. 2011. Sayfa 212. CMOS VLSI Design, A Circuits and Systems Perspective (4. Basım). ABD: Addison-Wesley (Pearson).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. YUNUS EREN KALAY
Proje No:	115E060
Proje Başlığı:	Mikrobolometre Tipi Soğutmasız Kızılötesi Dedektör Dizinlerine Uygun Silisyum Disk Seviyesinde Vakum Paketleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi
Proje Türü:	1003 - Öncelikli Alanlar (2. Aşama)
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	AHMET MACİT ÖZENBAŞ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2016 - 01/12/2018
Onaylanan Bütçe:	2070140.0
Harcanan Bütçe:	1324081.6
Öz:	<p>Özellikle savunma sanayinde yoğun ihtiyaç duyulan soğutmasız kızılötesi dedektörlerin yurt içinde, ulusal imkânlarla özgün olarak tasarlanması, özgün üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Soğutmasız kızılötesi dedektörlerden yüksek performans elde etmedeki en önemli etkenlerden biri dedektörlerin vakum ortamında çalıştırılmasıdır. Dolayısıyla, MEMS tabanlı soğutmasız kızılötesi dedektörlerin ürüne dönüşmesindeki en son adım olan paketleme konusu daha da önem kazanmaktadır. Paketleme dedektör seviyesinde tek tek yapılabildiği gibi silisyum disk seviyesinde de yapılabilir. Yürütülen proje kapsamında soğutmasız kızılötesi dedektörler için vakum paketleme süreçlerinde kullanılacak, dedektör üretim süreçleriyle ve dedektörlerin ürettiği CMOS tabanlarla uyumlu bir paketleme yöntemi geliştirilmesi ve yöntemin yine proje kapsamında üretilmiş olan soğutmasız kızılötesi dedektörlere disk seviyesinde uygulanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda vakum paketleme yönteminin geliştirilmesi için Au-Sn ve Au-Si malzeme sistemleriyle yapılan denemeler sonucunda, Au-Sn malzeme sistemiyle geçici sıvı faz bağlama (TLP) methodunun dedektör üretim süreçleri ve dedektör performansı açısından avantajlı olduğuna karar verilerek bu yöneme yoğunlaşarak bir bağlama methodu geliştirilmiştir. Bağlama methodu geliştirme süreçleri kapsamında bağlama hatlarının metal katmanlarının kimyasal kompozisyon, kaplama yöntemleri, bağlama sıcaklığı ve basıncı altında metaller arası etkileşim bakımından TLP bağlama methoduna uygun olarak idealleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. İdealleştirme çalışmaları sırasında bağlaması yapılan örnekler yapısal incelemeler optik, akustik (SAM) ve elektron mikroskobu (SEM/TEM) ile kimyasal ve faz incelemeleri EDX ve XRD yöntemleriyle, mekanik incelemeler ise kesme dayanımı testi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan idealleştirme ve inceleme çalışmaları sonucunda, Au-Sn malzeme sistemiyle TLP metoduna uygun olarak deneme örnekleri üstünde geliştirilen bağlama yöntemi görece düşük sıcaklıkta (300-320°C) bağlamayı sağlayıp, bağlama sonrası yüksek sıcaklıklara (500°C'den fazla) dayanım imkânı ve mekanik olarak askeri standartlara uygun bir kesme dayanımı (6 MPa'dan fazla) göstermektedir. Ayrıca yöntem bolometre yapılarının performansına kötü yönde etki etmemektedir. Deneme örnekleri üzerinde MIL-STD 883 standartına uygun olarak yapılan He kaçak testlerinde 1x10⁻⁹ atm.cc/s'den daha büyük kaçaklar tespit edilememiştir. Bağlama yöntemi, proje kapsamında üretilen VOx tabanlı 25µm adım aralıklı 384x288 formata sahip soğutmasız dedektörlere disk seviyesinde tek sefer uygulanmıştır. Uygulama ile ilgili tüm süreç yaşanan problemlerin detayları ile birlikte ayrıntılı olarak anlatılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Soğutmasız Kızılötesi Dedektör, Mikrobolometre, MEMS, Disk Seviyesi Paketleme, Ötektik, TLP
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır