



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OPTOELEKTRONİKTE KULLANILAN TEL BAĞLAMININ
GELİŞTİRİLMESİ VE GÜVENİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa TURHAN

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2024

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OPTOELEKTRONİKTE KULLANILAN TEL BAĞLAMININ
GELİŞTİRİLMESİ VE GÜVENİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa TURHAN
(21409732005)
ORCID: 0000-0001-5021-0450**

**Fizik Anabilim Dalı
Fizik Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya DOĞRUYOL
ORCID: 0000-0003-4604-4773**

HAZİRAN 2024



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Mustafa TURHAN

İmzası:

X X X X X

Sevgili eşim Selin ve biricik oğlumuz Mustafa Mete'ye ithafen,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini aktaran, enerjisi ile destekleyen, öğrenciden çok arkadaş edasıyla bana yaklaşan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya DOĞRUYOL'a, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Aslı Ayten KAYA'ya, aile ortamını yaşatan Bursa Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini gördüğüm ve ismini taşıdığım rahmetli dedem Mustafa TURHAN, babaannem Şahinde TURHAN, annem Cadet TURHAN, babam Mehmet TURHAN ve kardeşim Meltem TURHAN'a, iş hayatımda lisansüstü eğitimi içinde fırsat tanıyan, altyapısı ve olanakların kullanımına izin veren, çalışmanı olduğum ERMAKSAN firması ve genel müdürü Ahmet ÖZKAYAN'a, tez çalışmamda görüntülerin alınmasında yardımcı olan Hasan Mert BAYRAMLI'ya, ayrıca tezim boyunca bana yardımcı olan ekip arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi belirtmek isterim.

Desteğini ve sevgisini her zaman yanımda hissettiğim, canım eşim Selin ve biricik oğlumuz Mustafa Mete'ye en kıymetli duygularımı sunar, tezimi onlara ithaf ederim.

Haziran 2024

Mustafa TURHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tel Bağlamanın Tarihi	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Tezin Amacı	4
2.2 Tel Bağlama	4
2.2.1 Isıyla sıkıştırma yoluyla tel bağlama	6
2.2.2 Termosonik tel bağlama.....	6
2.2.3 Ultrasonik tel bağlama	6
2.3 Tel Bağlama Yöntemleri	7
2.3.1 Bilye bağlama yöntemi	7
2.3.1.1 Altın tel ile bilye bağlama	7
2.3.1.2 Bakır tel bilye bağlama	9
2.3.2 Kama bağlama yöntemi	9
2.3.3 Şerit bağlama yöntemi	10
2.4 Bağlamada Kullanılan Tel Çeşitleri	11
2.4.1 Altın tel	11
2.4.2 Alüminyum tel	12
2.4.3 Bakır tel.....	12
2.4.4 Gümüş tel	13
2.4.5 Altın, Gümüş, Alüminyum ve Platin şeritler	14
2.5 Metalurjik Sistemler	15
2.5.1 Altın-Altın (Au-Au) sistemi.....	15
2.5.2 Altın-Alüminyum (Au-Al) sistemi.....	15
2.5.3 Altın-Bakır (Au-Cu) sistemi	15
2.5.4 Altın-Gümüş (Au-Ag) sistemi	16
2.5.5 Alüminyum-Alüminyum (Al-Al) sistemi	16
2.5.6 Alüminyum-Gümüş (Al-Ag) sistemi	16
2.5.7 Alüminyum-Nikel (Al-Ni) sistemi.....	16
2.5.8 Bakır-Alüminyum (Cu-Al) sistemi	16
2.6 Bilye Bağlamada Kullanılan Kılcal Uç ve Çeşitleri.....	17
2.6.1 Programlanmış zeka için kılcal uç	18
2.6.2 Kurşunsuz paketler için kılcal uç	18

2.6.3 Doppler kılcal uç	18
2.6.4 UT- U tipi kılcal uç	19
2.6.5 1851 serisi kılcal uç.....	19
2.7 Tel Bağlamanın Avantajları	20
2.8 Tel Bağlamanın Dezavantajları	20
2.9 Tel Bağlamada Hata Kaynakları	20
2.10 Tel Değerlendirme Yöntemleri	21
2.10.1 Görsel inceleme.....	22
2.10.2 Tel çekme testi	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
3.1 Tel Tasarımı	25
3.2 Tel Bağlama Süreci	27
3.2.1 Tel çapı 25 µm olan altın tel bağlama çalışmaları	30
3.2.2 Tel çapı 33 µm olan altın tel bağlama çalışmaları	50
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ.....	64

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASM	: American Society for Metals
EFO	: Elektronik Alev Kapatma (Electronic Flame Off)
GmbH	: Gesellschaft Mit Beschränkter Haftung
Inc	: Incorporated
LED	: Işık Yayan Diyotlar (Light Emitting Diode)
MIL	: Askeri (Military)
PI	: Programmed Intelligence
RF	: Radyo Frekans (Radio Frequency)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)
SQ	: Solution for Quad Flat Package
STD	: Standart (Standard)
T/C	: Termokompresyon (Thermocompression)
T/S	: Termosonik (Thermosonic)
TPT	: Technical Product Trade
U/S	: Ultrasonik (Ultrasonic)

SEMBOLLER

2N	: %99
3N	: %99,9
4N	: %99,99
°C	: Santigrat derece
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Au	: Altın
Cu	: Bakır
g	: Gram
gf	: Gram kuvvet (Gram force)
kV	: Kilovolt
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
Si	: Silisyum
W	: Tungsten
Zr	: Zirkonyum
µm	: Mikrometre
Ω·m	: Ohm·meter

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tel bağlama yöntemleri.....	5
Çizelge 2.2 : Tel bağı oluşumu	5
Çizelge 2.3 : Minimum bağlanma dayanıklılığı MIL-STD-883K standardı	24
Çizelge 3.1 : 10-40 g bağlama gücü ile 0331 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	30
Çizelge 3.2 : 50-80 g bağlama gücü ile 0126 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	35
Çizelge 3.3 : 90-120 g bağlama gücü ile 0242 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	40
Çizelge 3.4 : 130-160 g bağlama gücü ile 0092 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	46
Çizelge 3.5 : 10-50 g bağlama gücü ile 0174 çipine bağlı 33 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	50
Çizelge 3.6 : 60 ve 70 g bağlama gücü ile 0226 çipine bağlı 33 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İlk tel bağlantısı (Courtesy Bell-Labs).....	2
Şekil 2.1 : Tel bağlama süreci.....	4
Şekil 2.2 : Bilye yöntemiyle tel bağlama süreci.....	9
Şekil 2.3 : Kama yöntemiyle tel bağlama.....	10
Şekil 2.4 : Şerit bağlar.....	11
Şekil 2.5 : Altın tel.....	11
Şekil 2.6 : Altın bağlama telinin (a) çökmesi, (b) kuyruk uzaması.....	12
Şekil 2.7 : (a) İnce alüminyum tellerin bağlanması, (b) kalın alüminyum tellerin bağlanması.....	12
Şekil 2.8 : (a) İnce bakır tellerin bağlanması, (b) bakır telin bilye bağı.....	13
Şekil 2.9 : Gümüş tel.....	14
Şekil 2.10 : Altın ve alüminyum şeritler.....	15
Şekil 2.11 : İki bağ arası mesafe ve bağ yüzeyi.....	17
Şekil 2.12 : Bilye bağlamada kullanılan kılcal uç parametreleri: (a) koni açısı, (b) pah açısı, (c) pah çapı, (d) yüz açısı, (e) delik çapı, (f) kılcal uç çapı.....	17
Şekil 2.13 : PI kılcal uç ve bağladığı teller.....	18
Şekil 2.14 : SQ kılcal uç.....	18
Şekil 2.15 : Doppler kılcal uç ve küresel bağlama ile oluşturulmuş teller.....	19
Şekil 2.16 : UT kılcal uç.....	19
Şekil 2.17 : 1851 serisi kılcal uç çeşidi ve uygulamalarda kullanılan şekli.....	20
Şekil 2.18 : Zayıf bağlantı teli ve telin bağlantı esnasında kırılması.....	21
Şekil 2.19 : Bağlanma yüzeyindeki oksidasyon.....	21
Şekil 2.20 : Tel çekme testi.....	22
Şekil 2.21 : Telin kanca yerinden, bilye ve kuyruk ekleminden kopması.....	22
Şekil 2.22 : Telin bilye, kuyruk ve bağlanılan cihazın parçasıyla kopması.....	23
Şekil 2.23 : Tel çekme testi işlemi.....	23
Şekil 3.1 : Tel bağlama mekanizması.....	25
Şekil 3.2 : Tel bağlanma yüzeyleri.....	25
Şekil 3.3 : Kullanılan 4N altın teli.....	26
Şekil 3.4 : Bağlantı telleri ve bağlantı yapılan yüzeyler.....	26
Şekil 3.5 : Çipe bağlanan tellerin çip üzerindeki bölgeleri.....	27
Şekil 3.6 : Tel bağlama cihazı.....	28
Şekil 3.7 : Optik mikroskop.....	28
Şekil 3.8 : Çekme testi cihazı.....	29
Şekil 3.9 : Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	29
Şekil 3.10 : 0331 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.....	31

Şekil 3.11 : 0331 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	31
Şekil 3.12 : 0331 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı: a) kopan telin b)sağlam telin bilye çaplarının SEM görüntüleri ile ölçümü.	32
Şekil 3.13 : 0331 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	32
Şekil 3.14 : 0331 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	33
Şekil 3.15 : 0331 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	33
Şekil 3.16 : 0331 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	34
Şekil 3.17 : 0331 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	34
Şekil 3.18 : 0331 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	35
Şekil 3.19 : 0126 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	36
Şekil 3.20 : 0126 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	36
Şekil 3.21 : 0126 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	37
Şekil 3.22 : 0126 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	37
Şekil 3.23 : 0126 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	38
Şekil 3.24 : 0126 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	38
Şekil 3.25 : 0126 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	39
Şekil 3.26 : 0126 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	39
Şekil 3.27 : 0242 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	40

Şekil 3.28 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	41
Şekil 3.29 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı eklem bölgesinden hatalı kopan telin üstten SEM görüntüsü.	41
Şekil 3.30 : 0242 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	42
Şekil 3.31 : 0242 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	42
Şekil 3.32 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı eklem bölgesinden telin baş kısmıyla birlikte kopmasından sonra oluşan boşluğun üstten SEM görüntüsü.	43
Şekil 3.33 : 0242 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	43
Şekil 3.34 : 0242 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	44
Şekil 3.35 : 0242 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	44
Şekil 3.36 : 0242 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	45
Şekil 3.37 : 0242 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı kopmasından sonra oluşan: a) tel boşluk çapının ölçümü, b) bilye çapının ölçümü.	45
Şekil 3.38 : 0092 çipinin birinci bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	46
Şekil 3.39 : 0092 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	47
Şekil 3.40 : 0092 çipinin ikinci bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	47
Şekil 3.41 : 0092 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	48
Şekil 3.42 : 0092 çipinin üçüncü bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	48
Şekil 3.43 : 0092 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.....	49
Şekil 3.44 : 0092 çipinin dördüncü bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama	

sonrası bilye çapları, c) ekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	49
Şekil 3.45 : 0092 ipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 m çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.	50
Şekil 3.46 : 0174 ipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi ip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) ekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	51
Şekil 3.47 : 0174 ipinin birinci bölgesine bağlı 33 m çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.	51
Şekil 3.48 : 0226 ipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi ip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) ekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	52
Şekil 3.49 : 0226 ipinin birinci bölgesine bağlı 33 m çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.	53
Şekil 3.50 : 0226 ipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi ip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) ekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.	53
Şekil 3.51 : 0226 ipinin ikinci bölgesine bağlı 33 m çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.	54
Şekil 4.1 : 25 m tel kalınlığı için 10-160 g bağlama gücünün test ortalamaları.....	55
Şekil 4.2 : 33 m tel kalınlığı için 10-70 g bağlama gücünün test ortalamaları.....	57

OPTOELEKTRONİKTE KULLANILAN TEL BAĞLAMANNIN GELİŞTİRİLMESİ VE GÜVENİLİRLİĞİ

ÖZET

Tel bağlama endüstrisi elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde ve montajında yaygın olarak kullanılan bir süreçtir. Bu endüstri yarıiletken üretimi, mikro elektronik montaj, otomotiv elektroniği, tüketici elektroniği, telekomünikasyon, sağlık sektörü, savunma ve uzay teknolojileri gibi birçok uygulama alanını kapsar. Bu kapsama alanına giren lazer diyot, LED, güneş pili, lidar gibi birçok cihaz örnek olarak verilebilir.

Güvenilirlik her alanda olduğu gibi optoelektronikte tel bağlamada da karşımıza çıkmaktadır. Bu noktada bağlanan tellerin güvenilirliğinin önemi hem prestij hem de ileriye yönelik hataların önüne geçmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Bu tezde yapılan çalışmalar tel bağlama yönteminin geliştirilmesi ve güvenilirliğinin optimizasyonu üzerinedir

Çalışmada Au tel ve Au bağlanma yüzeyi, yani Au-Au metalurjisi kullanılarak 25 ve 33 µm çapa sahip teller üzerinde bağlantılar termosonik bilye bağlama yöntemiyle tam otomatik tel bağlama cihazında gerçekleştirildi. 170 °C tabla sıcaklığı ve 22 ms bağlama süresi sabit tutulup bağlama gücü ve bağlama telinin çapı değiştirilerek, tutunma mukavemetine etkisi MIL-STD-883K metot 2011.9 standardı referans alınarak bağlanan bütün tellere tek tek tel çekme testleri uygulanıp sonuçları değerlendirildi. Detaylı optik mikroskop ve SEM görüntüleri alındı. Hata mekanizmalarının analizleri ve karşılaştırmaları yapıldı. 25 µm çapa sahip altın tel için en iyi bağlanmanın 30 ve 40 g bağlanma gücünde olduğu gözlenmiştir. Bağlanma gücünün 30 g olarak uygulandığı çalışmada çekme testi sonucunun ortalaması 11,36 gf bulunmuştur. 40 uygulanan bağlanma gücünde ise 11,53 gf çekme testi sonucu elde edilmiştir. Çekme testleri sonucunda çıkan hata nedenleri çeşitli görüntüleme teknikleriyle incelendi. Yapılan analiz ve karşılaştırmalarda en iyi bağlanmanın 30-40 g bağlanma gücünde elde edildiği gözlenmiştir. Bağlanma hatalarına çok düşük ve çok yüksek uygulanan güçlerde karşılaşılmıştır. Özellikle çok yüksek uygulanan bağlanma güçlerinde 25 µm altın tel için 80 g'dan sonra, 33 µm tel çapı içinse 50 g'dan sonra düzensizliklerin olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler : Tel bağlama, Altın tel bağlama, Termosonik, Bilye bağlama, Tel çekme testi, Tel güvenilirliği.

DEVELOPMENT AND RELIABILITY OF WIRE BONDING USED IN OPTOELECTRONICS

SUMMARY

The wire bonding industry is a process widely used in the manufacturing and assembly of electronic and optoelectronic devices. This industry covers many application areas such as semiconductor manufacturing, microelectronics assembly, automotive electronics, consumer electronics, telecommunications, healthcare, defense and space technologies. Many devices that fall within this scope, such as laser diode, LED, solar cell and lidar, can be given as examples.

Reliability is important in wire bonding in optoelectronics, as in every field. At this point, the importance of the reliability of the wires connected provides an advantage in terms of both prestige and preventing future errors. The studies carried out in this thesis are on the development of the wire bonding method and optimization of its reliability.

In the study, connections on wires with diameters of 25 and 33 μm were carried out in a fully automatic wire bonding device with the thermosonic ball bonding method, using Au wire and Au bonding surface, that is, Au-Au metallurgy. By keeping the 170 $^{\circ}\text{C}$ table temperature and 22 ms binding time constant, the binding force and the diameter of the binding wire were changed, the effect on the bonding strength was applied to all connected wires one by one, and the results were evaluated, taking the MIL-STD-883K method 2011.9 standard as reference. Detailed optical microscope and SEM images were taken. Analyzes and comparisons of error mechanisms were made. It was observed that the best bonding for gold wire with a diameter of 25 μm was at 30 and 40 g bonding strength. In the study where the bond strength was applied as 30 g, the average tensile test result was found to be 11.36 gf. At an applied bond strength of 40, a tensile test result of 11.53 gf was obtained. The causes of failure resulting from tensile tests were examined using various imaging techniques. In the analyzes and comparisons made, it was observed that the best bonding was achieved at a binding strength of 30-40 g. Bonding errors were encountered at very low and very high applied forces. It has been found that irregularities occur after 80 g for 25 μm gold wire and after 50 g for 33 μm wire diameter, especially at very high bonding strengths.

Keywords : Wire bonding, Au wire bonding, Thermosonic, Ball bonding, Wire pull test, Wire reliability.

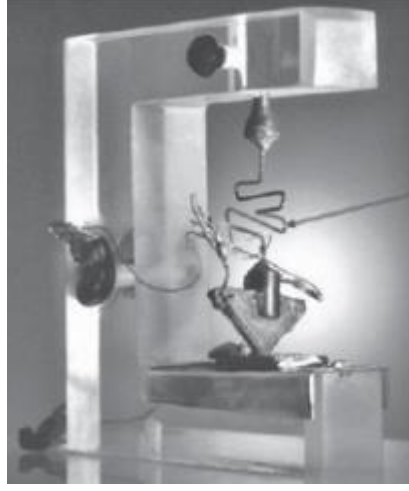
1. GİRİŞ

Günümüzde hızlı dijitalleşme ve iletişim ihtiyaçları, optoelektronik cihazlarının gelişimi ve kullanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Lazerler, yüksek çözünürlüklü görüntüleme cihazları, optik sensörler ve birçok uygulama, optoelektronik bileşenlerin gelişmiş performansına olan talebi arttırmıştır. Söz konusu cihazların içerisinde ise üzerinden akım geçmesini sağlayan bağlantı telleri bulunmaktadır. Bu tellerin sağlam ve güvenilir şekilde bağlanması son derece önemlidir. Bu bileşenlerin temelini oluşturan tel bağlama süreçleri, optoelektronik cihazların performansında belirleyici bir faktördür.

Bu tez çalışması ile, altın tel malzemesi kullanılarak uygulanacak olan termosonik tel bağlama tekniğini, bağlama parametrelerini, bağlama tellerinin mukavemetini ve güvenilirliğinin analizi sunulacaktır. İlk olarak tel bağlamanın tarihine değinilerek, temel bağlama prensiplerini anlamak için bir temel sunulacaktır. Tel bağlamada karşılaşılan zorluklar, hata kaynakları, seçilecek olan malzemelerin önemi ve güvenilirliğin esasları ele alınacaktır. Ayrıca optoelektronik cihazların gelecekteki tasarımlarında daha güvenilir bir tel bağlama sağlamak amacıyla farklı kalınlıklardaki altın tellerin en iyi bağlanma parametrelerinin belirlenmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda malzeme seçimi, süreç optimizasyonu ve güvenilirlik testleri gibi faktörlere odaklanılacak ve böylece kritik tel bağlama süreci evrimine katkıda bulunacaktır.

1.1 Tel Bağlamanın Tarihi

Tel bağlama araştırmaları ilk kez 1955-1958 tarihleri arasında Bell Laboratuvarlarında L. Anderson, H. Christensen ve P. Andreatch tarafından gerçekleştirilmiştir. Ekip ilk çalışmaları olarak kendi tel bağlama cihazlarını üretmiştir (Şekil 1.1). Bu dönemde daha basit tel bağlama yöntemleri kullanılmıştır [1-2].



Şekil 1.1 : İlk tel bağlantısı (Courtesy Bell-Labs).

1960'lı yıllarda tel bağlamayı otomatikleştirmek için ilk çalışmalar başlamıştır. İlk otomatik tel bağlama cihazları üretilip tellerin bağlanmaları sağlanmıştır. 1970'lerde tel bağlama teknolojisi önemli ölçüde gelişim gösterip, tellerin daha küçük çaplarda ve daha yüksek hassasiyetle bağlanmaları sağlanmıştır. 1980'lerde tel bağlama işlemleri yaygınlaşmış ve daha geniş alanlarda uygulamaya başlanmıştır. Süreç geliştirmeleri gerçekleştirilmiş, daha karmaşık devre ve mikroçip uygulamalarında tel bağlantı işlemleri gerçekleştirilmiştir. 1990'lı yıllardan günümüze kadar tel bağlama teknolojisi mikroelektronik endüstrisine hakim olmuştur. Bu dönemlerde daha gelişmiş bağlama makineleri ve tel malzemeleri kullanılarak, daha yüksek performans ve daha küçük boyutlu bağlantılar elde edilmiştir. Günümüzde halen yaygın olarak kullanılan tel bağlama, özellikle yarıiletken endüstrisinde sıkça tercih nedeni olmaktadır. Teknolojik son gelişmelerin paralelinde, daha yüksek bağlantı hızı, daha yüksek bağlanma hassasiyeti, daha minimize boyutlar ve daha güvenilir bağlantılar sağlanılarak, daha farklı yöntemler, ekipmanlar ve malzemelerin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [3-5].

Dünya üzerinde tel bağlama cihaz üretimine öncülük eden Palomar Technologies Inc., Hesse Mechatronics GmbH., ASM Pacific Technology, TPT Wire Bonder GmbH., Tresky Corporation, DIAS Automation GmbH., West-Bond Inc. gibi firmalar mevcuttur.

Consenic iş zekasının market araştırma raporlarına göre, küresel tel pazarı değeri 2022'de 12.730,27 milyon ABD doları olarak gerçekleşmiş. Pazarın 2030 yılına kadar 16.072,24 milyon ABD doları olması öngörülmüyor. Bu artış geçen süre içerisinde

%3,1'lik bir büyümeyi işaret ediyor.Diğer yandan tel bağlama ekipmanlarının pazar büyüklüğü 801 milyon ABD doları olarak gerçekleşmiş. 2029 yılında ise 1,5 milyar ABD doları olması, bunun da %9,7'lik bir oran artışına denk gelmesi hedeflenmiş [6-7].



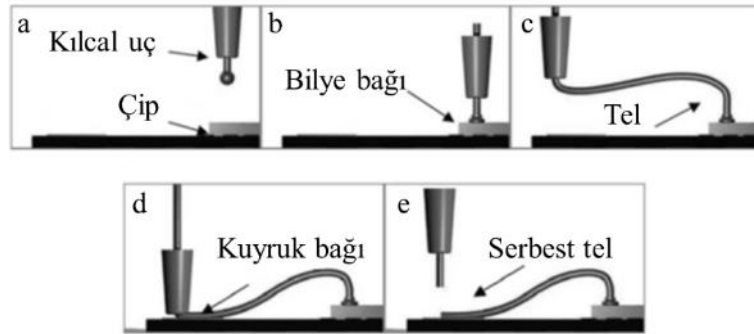
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Tezin Amacı

Yapılan çalışmalar ve tezin amacı sektörde kullanılan 25 μm ve 33 μm altın bağlama tellerinin güvenilir bir şekilde bağlanmasını sağlayarak, en iyi bağlanma gücünü elde etmektir. Ayrıca bu güvenilirlik elde edildiğinde ileriye yönelik hataların önlenmesi ve maliyet kazancı amaçlar arasındadır.

2.2 Tel Bağlama

Tel bağlama tekniği, ince bir telin ısı, basınç ve ultrasonik enerjinin kombinasyonunu kullanan bir elektrik ara bağlantı tekniğidir. İki metalik malzemenin (tel ve bağlantı yüzeyi) yakın temas haline getirildiği katı fazlı bir kaynak işlemidir. Yüzeyler yakın temasa geçtiğinde dışarıdan verilen bir enerji ile, elektron paylaşımı veya atomların karşılıklı difüzyonu meydana gelir ve tel bağının oluşması ile sonuçlanır. Kontak telleri olarak adlandırılabilir. Tel bağlama süreçleri (Şekil 2.1a-e) genellikle şu adımlardan oluşur [8-10].



Şekil 2.1 : Tel bağlama süreci.

1. Öncelikle yarıiletken cihazın bir alt montaj elemanına yerleştirilmesi gerekir. Bu yarıiletken cihaz (çip) ve alt montaj elemanı üzerinde bağlantı yerleri olarak adlandırılan metal yüzeyler bulunur (Şekil 2.1a).
2. İnce iyi iletken özelliklere sahip bir metal tel seçilir. Bir ucu çipe, diğer ucu ise alt montaj elemanına bağlanacak şekilde tasarlanır (Şekil 2.1b).

3. Özel bir bağlama makinesi kullanılarak bağlantı işlemi gerçekleştirilir. Bu makine metal telin her iki ucu arasında bir elektrik arkı oluşturur ve bu şekilde metal telin bağlantı yüzeylerine sıkı bir şekilde bağlanması sağlanır (Şekil 2.1c-d).

4. Bağlantı tamamlandığında fazla tel kesilir (Şekil 2.1e). Bu işlemler tekrarlanır.

Yaygın olarak kullanılan iki tel bağlama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar termosonik (T/S) ve ultrasonik (U/S) tel bağlamadır. Kullanılacak olan yonteme bağlı olarak bağlama parametrelerinin farklı kombinasyonları kullanılır. Bu parametreler basınç, sıcaklık ve ultrasonik enerjidir. Bunların haricinde ultrasonik enerjiyi kullanmayan ısıyla sıkıştırma (termokompresyon) yöntemi vardır (Çizelge 2.1). Bu yöntem endüstriyel uygulamalarda yüksek bağlama sıcaklığı (300-500 °C) nedeniyle artık kullanılmamaktadır [11,12].

Çizelge 2.1 : Tel bağlama yöntemleri [13].

Tel Bağlama	Basınç	Sıcaklık [°C]	U/S enerji	Tel	Bağlanma Yüzeyi
Isıyla Sıkıştırma	Yüksek	300-500	Hayır	Au	Au, Al
Ultrasonik	Düşük	25	Evet	Au, Al	Au, Al
Termosonik	Düşük	100-200	Evet	Au, Cu	Au, Al

Termosonik (T/S), ultrasonik (U/S) ve ısıyla sıkıştırma (T/C) tel bağlama teknikleri arasında bazı farklılıklar mevcuttur. Bunların haricinde bağ oluşumu, bağlama parçaları, bağlama hızı ve kullanılan tel malzemeleri arasında da farklılıklar vardır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Tel bağı oluşumu [13].

Tel Bağı	Bağlama Yöntemi	Bağlama Parçası	Tel Malzemesi	Bağlama Yüzeyi	Hız [tel/s]
Bilye	T/C, T/S	Kılcal uç	Au, Cu	Au, Al	10
Kama	T/S, U/S	Kama uç	Au, Al	Au, Al	4

Tel bağlama düşük maliyet, tam otomatik üretim, esneklik, hassas şekilde parametre kontrolü, bağlanan telleri kolay kontrol etme ve güvenilirliği açısından en popüler elektrik ara bağlantı tekniği haline gelmiştir. Bu avantajlar sayesinde her türlü mikro ve optoelektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. Tüm uygulamaların %93'ü "bilye bağlama" yöntemiyle üretilirken, %5'i ise "kama" tekniğiyle bağlanmaktadır [14,15]. Günümüzdeki tel bağlama makineleri, yüksek esneklik ve süreç kontrolü ile karakterize hale gelmiştir. En iyi şekilde tel bağlantısı elde etmek için süreç esnasında parametre değerlerini ayarlamak mümkündür. Konuyla ilgili çalışmalar halen geliştirilmeye devam etmektedir [16-18].

2.2.1 Isıyla sıkıştırma yoluyla tel bağlama

Termokompresyon yöntemi ile tel bağlama için ısı ve kuvvet kullanılır. Süreç parametreleri zaman, sıcaklık ve bağlanma kuvvetidir. Genel olarak yüksek sıcaklık (300-500 °C) ve uzun bağlanma süresi gereklidir [19,20]. Bu yüksek sıcaklık cihazlara zarar verebilir. Ayrıca ısıyla sıkıştırma ile bağlama yöntemi kirletici maddelerin yapışmasına karşı çok hassastır. Bu yüzden bu teknoloji günümüzde tercih edilen bir yöntem olmaktan çıkmıştır [21].

2.2.2 Termosonik tel bağlama

Bir ince teli yüzeye bağlamak için ısı, U/S güç ve kuvvet kullanılarak gerçekleştirilir. Tel bağlanılacak olan yarı iletken cihaz ısıtılmış bir tablaya yerleştirilir. Çipin yüzeyi ile temas etmesi için kılcal uç tarafından kuvvet uygulanır [20]. T/S tel bağlama en yaygın kullanılan bağlama yöntemi olarak bilinmektedir. T/C ve U/S iki tekniğin kombinasyonundan oluşmakla birlikte 100 °C ile 200 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bilye bağı ve kama bağı oluşturmada tercih edilen bir yöntemdir. Tel malzemesi olarak genellikle en iyi iletken malzemeler olan altın (Au), alüminyum (Al) ve bakır (Cu) tercih edilir. Ayrıca bağlanma yüzeyi olarak da Au ve Al kullanılabilir [20,22]. Çalışmada termosonik tel bağlama yöntemi kullanılmıştır. Literatürde yapılan bazı çalışmalara örnek verilecek olursa, farklı bağlanma yüzeyleri kullanılarak bağlama gücü sabit tutulup, bağlama süresi değiştirilerek tel çekme testleri uygulanıp hata mekanizmaları araştırılmıştır. Bir başka uygulamada ise ultrasonik güç değiştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı bir çalışmada bağlama gücü 28 g, bağlama süresi 15 ms alınıp, 40-340 °C sıcaklık aralığındaki sonuçlar incelenmiştir. Au-Ag alaşımlı tel bağlamanın güvenilirliği ise yüksek ve düşük bağlanma güçlerinde araştırılmıştır.

2.2.3 Ultrasonik tel bağlama

U/S bağlama, oda sıcaklığında (25 °C) teli çip yüzeyine daha düşük bir kuvvet uygulayarak bastırarak ve ultrasonik titreşim enerjisinin kullanıldığı tel bağlama teknolojisidir [23]. Kullanılan tel malzemesi çeşitlerine bakıldığında Au ve Al teller iyi elektrik iletkenliği ve kullanılan metalurjik sistemlerde güvenli bağlantılar elde edilmesi nedeniyle en çok tercih edilen bağlama telleri olarak bilinmektedir. Fakat altın telin ısıya karşı duyduğu ihtiyaç bu teknikte kullanımını kısıtlamaktadır. Bu

bağlamda tel malzemesi olarak Al, bağlanma yüzeyi olarak Au ve Al yüzeyler çalışma alanlarında tercih edilen malzeme çeşitleridir [23].

Kullanım alanlarının dijital uygulamalar, analog uygulamalar ve yüksek güçte yarı iletken endüstrisinde yaygın olduğu görülmektedir. Ayrıca güvenilirlik ve bağ mukavemeti açısından değerlendirildiğinde termosonik tel bağlama kadar iyi sonuçlar vermediği bilinmektedir [24].

2.3 Tel Bağlama Yöntemleri

2.3.1 Bilye bağlama yöntemi

Bilye bağlama tekniğinde tel, kılcal uç adı verilen bir yapıdan geçirilerek kılcal ucun altında uzanan telin küçük bir kısmını eritmek için EFO (Electronic Flame Off) uygulanır. EFO bilye tel bağlama sürecinin ilk adımıdır ve elektronik alev kapatma olarak adlandırılır [25]. Teli ısıtmak ve eritmek için düşük enerjili bir plazma deşarjı kullanılır. Erimiş tel daha sonra yüzey geriliminin etkisi altında bilye haline getirilir. Deşarj sona erdiğinde erimiş bilye soğuyup katılaşarak FAB (Free Air Ball) oluşturmaya başlar [26]. Bu serbest hava bilyesidir. Tel malzeme ve oluşan bilye ilk bağı gerçekleştirmek için bağlanma yüzeyi üzerine bastırılır. Sonrasında kılcal uç kaldırılır ve ikinci bağı oluşturulacağı bölgeye doğru konumlandırılır. Kılcal ucun geometrik yapısına göre ikinci bağı olan kuyruk bağı şeklinde oluşturulur. Son olarak teli besleyen kelepçe kapatılır ve kılcal uç yükseltilerek telin kopması sağlanır. Bu tel bağlama yönteminde ilk bağı (bilye) çip üzerinde, ikinci bağı (kuyruk) ise alt montaj elemanı üzerinde oluşturulmaktadır. Bilye bağlamada kullanılan teknolojiler T/C ve T/S'dir [27]. Tellerin 75 µm'den küçük olduğu durumlarda bu teknik çok kullanılmaktadır. Bilye bağlama birçok entegre devrelerde ve yarı iletken paketleme işlemlerinde tercih edilen bir yöntemdir. Altın tel ya da bakır tel bu uygulama için kullanılan tel çeşitleridir. Ayrıca bilye bağını istenilen yere uygulayabilme avantajları arasında yer almaktadır [28,29].

2.3.1.1 Altın tel ile bilye bağlama

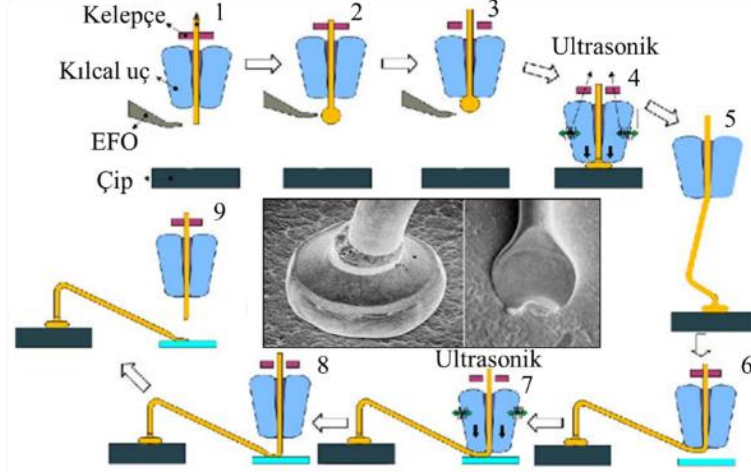
Au tel bilye bağlama yönteminde çip ya da kullanılan alt yüzey 150 °C sıcaklık ve T/S teknik gerektirmektedir. Genellikle altın bilye bağı metalurjisi, yani bağlanılacak yüzeyin altın ve alüminyum olduğu görülmektedir. Bağı yükseklikleri 150-200 µm aralığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Minimum 100 µm olarak bilinmektedir. Tel

bağlamada bağlanılacak alana bakılır ve üzerinden geçirilecek akıma göre tel sayısı belirlenir [30].

Kılcal uç adı verilen bağlama aletinin ucundaki küçük ultrasonik enerji girişleri bilye bağını oluşturmak için Au bilye ve Au yüzeye iletir. Kılcal uç yukarıya doğru hareket eder ve böylece bağlanma profili oluşturulmuş olur. Sonrasında ise kuyruk bağını oluşturmak için tekrar aşağıya inerek bağ oluşumunu gerçekleştirir [30].

Termosonik altın bilye bağlama işlemi, yarı iletken lazer paketlemede en yaygın kullanılan tel bağlama tekniği Şekil 2.2’de gösterilmiştir [31].

1. Bu teknikte, tel içi boş bir kılcal uçtan geçirilir.
2. Kılcal ucun altında uzanan telin küçük bir kısmını eritmek için EFO sistemi kullanılır.
3. Bilye oluştuktan sonra kelepçe açılır ve tel yukarı itilir.
4. Bilye, iki metal yüzey arasında ilk bilye bağını oluşturan metalizasyona neden olmak için yeterli kuvvetle çip üzerine bastırılır.
5. Daha sonra kılcal uç kaldırılır.
6. Yüzey üzerindeki ikinci bağ bölgesinin üzerine yeniden konumlandırılır.
7. Kılcal ucun dış geometrisiyle oluşturulan kuyruk şekline sahip ikinci bağ (kuyruk bağı) oluşturulur.
8. Kılcal uç yukarı kaldırılır.
9. Kelepçe kapatılır ve tel kesilir. EFO’nun bir sonraki teli bağlamaya başlaması ve yeni bir bilye oluşturması için tam bir tel uzunluğu bırakılır. Böylece tel ilerledikçe, tel döngüsü adı verilen hassas şekilde konumlandırılmış tel bağlantısı oluşturulur [32,33].



Şekil 2.2 : Bilye yöntemiyle tel bağlama süreci.

Bu teknik, 100 ila 200 °C arasında yüksek bir sıcaklık gerektirir. Üretim işlemi sırasında ısı, bağlama amacına ve malzemelere bağlı olarak ya teli besleyen ısıtılmış bir kılcal uçla ya da düzeneğin yerleştirildiği ısıtılmış bir tabla yardımıyla ya da her ikisiyle üretilir. Tipik olarak çapı 25 ila 50 μm arasında olan küçük altın tel, yüksek sıcaklıkta basınç altında kolay şekillendirilmesi, oksit oluşumuna karşı direnci, yüksek iletkenliği nedeniyle bu teknikte çoğunlukla kullanılır [34].

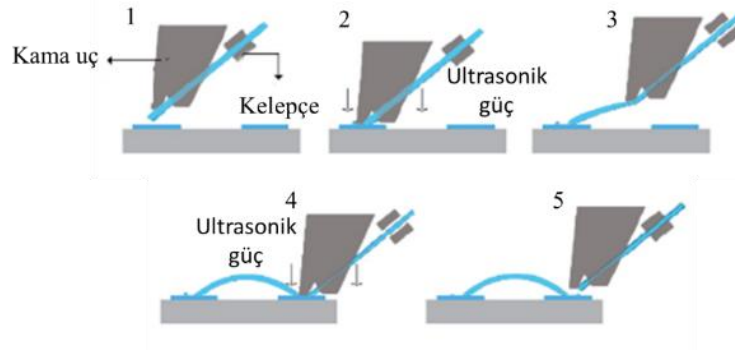
2.3.1.2 Bakır tel bilye bağlama

Genel olarak bakır (Cu) tel bağlama işlemi altın tel bağlamaya çok benzemektedir. Uygulamaya bağlı olarak tel çaplarındaki aralık 15 μm ile 50 μm arasında değişmektedir. Bakır tel bağlama, Au tele göre bazı avantajlar ve dezavantajlar sunabilir. Bunlar elektriksel ve termal iletkenlik açısından üstün ürün performansı avantajlarıdır. Dezavantajına bakıldığında ise bakırın oksitlenmesi uygulanacak cihaz için güvenilirlik açısından bir sorun oluşturabilir. Bakır tel bağlama, altın bilye bağlamadaki süreçleri izler, tek farkı bakır tel bilye oluşumu sırasında forming gaze (%95 azot, %5 hidrojen) ihtiyaç duymasıdır [35,36].

2.3.2 Kama bağlama yöntemi

Kama bağlama yönteminde bağın oluşumu kama uç adı verilen bağlanma aletinin şekline göre isimlendirilmektedir [37]. Bu teknikte tel, ucun arkasındaki delikten bağlama yüzeyine doğru belirli bir açıda beslenmektedir (Şekil 2.3). Kama bağlama yöntemi genelde Al tel yapıştırma için kullanılır. Bilye bağlama yönteminden temel farkı, Al tel oda sıcaklığında U/S bağlama tekniği ile gerçekleşirken Au ve Cu tel için ısıtılmış bir yüzey gereklidir. Kısacası, kama bağlama yönteminde tel bağlamak için

sadece U/S enerji kullanılır [38]. Kama bağlama yönteminde görev döngüsü Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



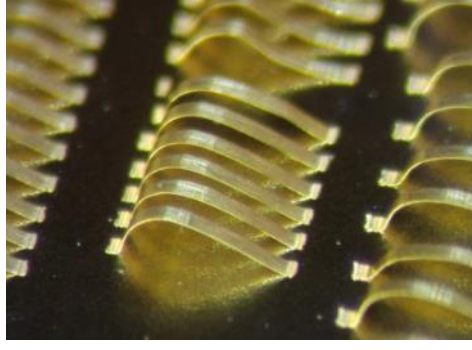
Şekil 2.3 : Kama yöntemiyle tel bağlama.

Kama bağlama yönteminde işlemler şöyle sıralanmaktadır.

1. Kelepçenin içinden uca doğru bir tel geçer.
2. Tel belirli bir kuvvetle bağlanılacak yüzeye bastırılır. Ultrasonik enerji kullanılarak kama ucu, bağlanma yüzeyine paralel olarak titreşir.
3. Tel, diğer bağlanılacak yüzeye kama ucu ile çekilir.
4. İlk bağdaki gibi kuvvet ve ultrasonik enerji ile bağlama gerçekleştirilir.
5. Uç geriye doğru çekilir, kelepçe kapatılır ve telin kopması sağlanır[39].

2.3.3 Şerit bağlama yöntemi

Elektronik güç cihazlarında yüksek akımların iletilmesi için artan talepler endüstriyi ara bağlantı çözümlerine itmiştir. Yuvarlak tel yerine şerit tel ile birbirine bağlanan yarı iletkenler, uzun süredir yüksek frekanslı elektronik uygulamalarda popülerliğini sürdürmektedir [40]. Şerit bağlama kama bağlama işleminin benzer bir türü olarak bilinmektedir (Şekil 2.4). Ayrıca bu uygulama telin kesit alanını azaltırken yüzey alanını korur ve artırır. Genelde tel bağlama makineleri şerit telleri hizalandırma ve konumlandırma için özel bağlama kafalarına sahiptir [41,42].



Şekil 2.4 : Şerit bağlar [43].

2.4 Bağlamada Kullanılan Tel Çeşitleri

2.4.1 Altın tel

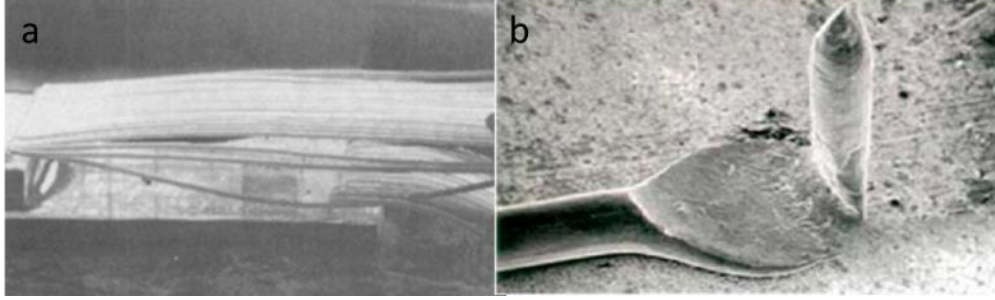
Au tel (Şekil 2.5) T/C ve T/S bağlama için yaygın olarak kullanılır [44]. Au bağlama tellerinin üretiminde, güçlü bir bağ oluşmasını sağlamak ve bağlama aletinin tıkanmasını önlemek için yüzey düzgünlüğü ve yüzey temizliği kritik konular arasında yerini almaktadır. Saf Au normalde yumuşak bir malzeme yapısına sahip olduğundan uygulamalarda kullanılabilir hale getirebilmek için içerisine Silisyum (Si) ve Bakır (Cu) gibi elementlerden belirli oranlarda eklenmesi gerekmektedir. Böyle bir tel saf tele göre daha güçlüdür. Yüksek hızlı termosonik uygulamalar için daha avantajlıdır [45]. Au teli bilye ve kama bağlama yöntemlerinin her ikisi içinde kullanılabilir. Fakat altın tel en iyi ısı ile yüzeye daha iyi bir bütünlük sağlar ve yapışır [36].



Şekil 2.5 : Altın tel [46].

Au telin saflığı ve çapı, doğal performansı üzerinde etkiye sahiptir. Saflık ne kadar yüksek olursa, elektriksel iletkenlik ve bağlanma yeteneği o kadar iyi olur, ancak elastik modül ve çekme mukavemeti o kadar düşük olur. Bu da bağlama işlemi sırasında tel döngüsü ve mukavemet için dezavantaj yaratabilir. Çökme (Şekil 2.6a) ve kuyruk uzaması (Şekil 2.6b) gibi bağlanma sorunlarına yol açar. 2N (%99), 3N

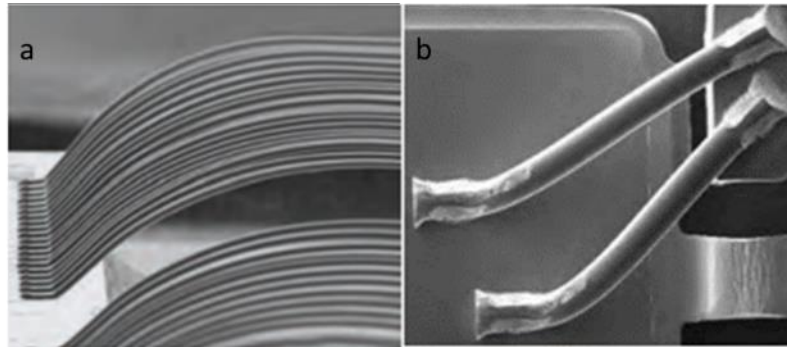
(%99,9), 4N (%99,99) vb. gibi çeşitlere sahip Au telin genel çap aralığı 15-50 µm dir. Telin oranı saflığını belirtmektedir. Tel çapı ne kadar küçük olursa döngü kontrolü o kadar zor olur [46]. Düzgün bağlantılar sağlamak için Au telin saflığını ve çapını çalışma performansı gereksinimlerine göre seçmek daha iyidir [47-49].



Şekil 2.6 : Altın bağlama telinin (a) çökmesi, (b) kuyruk uzaması [47].

2.4.2 Alüminyum tel

Saf Al ince bir tel haline getirilemeyecek kadar yumuşaktır. Bu nedenle alüminyumu kullanılabilir hale getirmek için %1 Silisyum (Si) ve %1 Magnezyum (Mg) ile alaşım olmalıdır. Alaşımli tel istenilen güvenilirliği sağladığından yüksek sıcaklıklara (300 °C ve üzeri) ve mukavemetinin bozulmasına karşı iyi bir dirence sahip olur. Al telin genelde ultrasonik tel bağlama teknolojisi ile kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca maliyetinin Au telden daha düşük olması büyük avantaj sağlamaktadır [13]. Al tel görselleri Şekil 2.7’de verilmiştir.

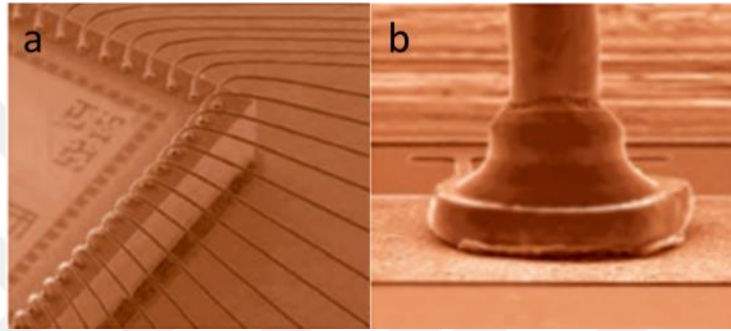


Şekil 2.7 : (a) İnce alüminyum tellerin bağlanması, (b) kalın alüminyum tellerin bağlanması [50].

2.4.3 Bakır tel

Cu tel, Au tele göre önemli maliyet avantajı sunar. Aynı zamanda benzer elektriksel özelliği nedeniyle Au telinin yerine iyi bir alternatiftir. Cu telin direnci ($1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) altınkinden ($2,44 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) daha düşük olduğu bilinmektedir [51,52].

Uygulamalarda bağ telinden kaynaklanan direncin devreyi olumsuz etkileyebileceği yer performansı olduğu için Cu telin kullanılması iyileştirme sağlayabilir. Her ne kadar Cu tel kullanımının avantajlarından bahsedilmiş olsa da dezavantajlarında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sistem için en büyük sorunlardan bir tanesi bağlanabilirliktir. Bakır telin sert yapısı alt yüzeyde çukurlaşma ve hasara neden olmaktadır. Aynı zamanda bakır oksitlenme olasılığı yüksek bir metal olduğundan kullanılabilirlik açısından tercih edilen bir malzeme türü değildir [53-56]. Şekil 2.8a’da ince bakır tellerin bağlanması, Şekil 2.8b’de ise bakır tel ile gerçekleştirilen bilye bağı gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : (a) İnce bakır tellerin bağlanması, (b) bakır telin bilye bağı [57].

2.4.4 Gümüş tel

Gümüş (Ag) bağlama telleri (Şekil 2.9) Au tellere kıyasla önemli lde maliyet tasarrufu ve hassas cihazlar için gerekli bağlama özelliklerinin mükemmelen bir kombinasyonu olarak geliştirilmiştir [58]. Elektronik pazarı sürekli maliyet baskısı altındadır. Maliyetleri azaltmak amacıyla tellerin altın dışındaki malzemelerden yapılmasına yönelik bir eğilim var. Ancak her malzeme her uygulamaya uygun değildir. Gümüş tellerdeki en büyük sorunlardan biri bağlanabilirliktir. Ticari uygulamalarda kullanılması seçenekler arasında yerini almamaktadır. Gümüş yumuşaktır ve bu yüzden alaşımlanması gerekmektedir. Fakat belirli oranlarda alaşımlanmadığında elektrik direncinde artış göstermektedir. Bu da uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Ag telin avantajlarına bakıldığında ise Cu tele göre daha az korozyona eğilimlidir ve daha düşük erime noktasına sahiptir [59,60].



Şekil 2.9 : Gümüş tel [57].

2.4.5 Altın, Gümüş, Alüminyum ve Platin şeritler

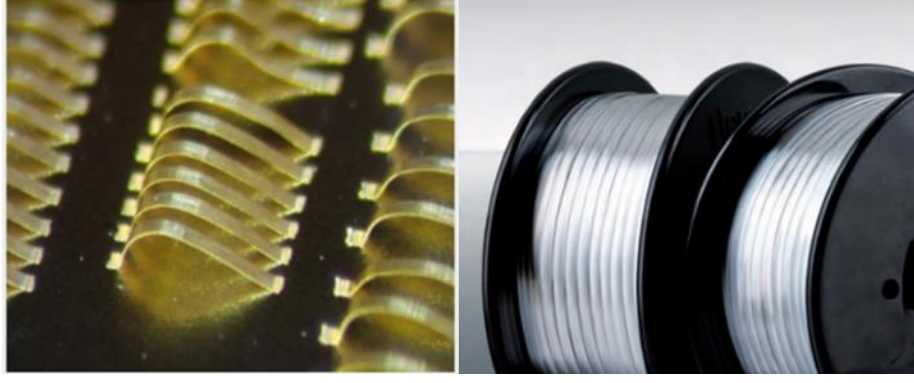
Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Platinden (Pt) oluşan değerli metal bağlama şeritleri (Şekil 2.10) yüksek frekanslı ve mikrodalga cihazlarındaki elektrik bağlantıları için kullanılır. Kontrollü yüksek saflık, boyutsal ve mekanik özellikler, döngü davranışı açısından yüksek hassasiyete sahip şeritlerin temelini oluşturur. Şerit bağlamanın avantajlarına bakıldığında, aşağıdaki ifadeler önde gelen bazı temel avantajlar olarak sıralanabilir [61].

Gelişmiş elektriksel performans; şerit bağlama, bağlantıların direncinde ve indüktansında önemli bir azalma sağlayarak, elektronik cihazların elektriksel performansının iyileşmesine yol açar. Bu, özellikle sinyal bütünlüğünün kritik olduğu yüksek frekanslı uygulamalar için çok önemlidir [62].

Daha yüksek akım taşıma kapasitesi; şerit tellerin daha geniş kesit alanı, geleneksel tel bağlamaya kıyasla daha iyi akım taşıma kapasitesi sağlar. Bu da onu güç elektroniği ve zorlu güç gereksinimleri olan uygulamalar için ideal kılar.

Geliştirilmiş termal yönetim; şerit bağlama, ısı dağıtımı için daha geniş bir yüzey alanı sağlayarak gelişmiş termal yönetim sağlar. Bu, aşırı ısınmanın önlenmesine yardımcı olduğundan ve kullanım ömrünü uzattığından, çalışma sırasında önemli miktarda ısı üreten cihazlar için çok önemlidir [63].

Güvenilirlik ve dayanıklılık; şerit bağlama, mükemmel mekanik güç ve uzun vadeli güvenilirlik sunarak bileşenler arasında sağlam ve güvenli bağlantılar sağlar. Sağlam bağ, mekanik gerilimlere ve çevre koşullarına dayanarak elektronik cihazın genel dayanıklılığına katkıda bulunur [43].



Şekil 2.10 : Altın ve alüminyum şeritler [64].

2.5 Metalurjik Sistemler

Tel bağlama sürecinde üretimin ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı bağlanma yüzeyleri kullanılabilir. Bu nedenle farklı metalurjik sistemler farklı güvenilirlik sonuçları ortaya çıkarabilir. Başlıca metalurjik sistemler şunlardır.

2.5.1 Altın-Altın (Au-Au) sistemi

Altın yüzeye bağlanan altın tel son derece güvenilirdir. Çünkü bağ, metallar arası arayüz korozyonu oluşumuna veya bağı bozan diğer koşullara tabi değildir. Kötü bağlanmış Au-Au bağının bile yüksek bağ gücü gösterebilir. Altın tel ısıyla en iyi şekilde bağlanır [65,66].

2.5.2 Altın-Alüminyum (Au-Al) sistemi

Tel bağlama sistemlerinden biri de Au-Al sistemidir. Bu bağlama sistemi kolayca Au-Al intermetalik bileşiklerin Kirkendall boşluklarının oluşumuna yol açabilir. Bu nedenle sistem çoğu zaman güvenilirlik konusunda sorun teşkil edebilir [67].

2.5.3 Altın-Bakır (Au-Cu) sistemi

Altın telin bakır yüzeye bağlanması intermetalik fazın sünekliğine neden olabilir. Bu intermetalik bileşiklerin oluşumu Kirkendall boşluklarının bir sonucu olarak daha yüksek sıcaklıklarda (200-325 °C) bağ mukavemetini azaltabilir. Bozulmalar bakırın yapısına ve bağlanma kalitesine bağlıdır. Bu sistemde iyi bir bağlanabilirlik ve güvenilirlik sağlamak için yüzey temizlikleri çok önemlidir [68].

2.5.4 Altın-Gümüş (Au-Ag) sistemi

Bağ sistemi metaller arasında bileşikler oluşturmaz ve arayüz korozyonu göstermez. Bağlanma sorunları yine kirletici maddelerden kaynaklanabilir. Termosonik Au-Ag bağlama genellikle 250 °C sıcaklıkta gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıkta bağlanma dezavantaj olarak görülür [69].

2.5.5 Alüminyum-Alüminyum (Al-Al) sistemi

Al-Al tel bağlama sistemi metaller arası boşluk oluşumuna ve korozyona eğilimli olmadığından son derece güvenilirdir. Al tel U/S olarak iyi bir şekilde birleşir. Yüksek deformasyonla T/C bağda üretilebilir [70].

2.5.6 Alüminyum-Gümüş (Al-Ag) sistemi

Gümüş bir yüzeye bağlanan Al tel, genellikle Platin (Pt) veya Paladyum (Pd) ile alaşım formunda kullanılır. Al gümüş faz diyagramı birçok intermetalik fazı içeren karmaşık bir sistemdir. Bu sistemde Kirkendall boşlukları meydana gelebilir, ancak bu genellikle mikro devrelerin çalışma aralığından daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Uygulamalarda Al-Ag bağları, interdifüzyon nedeniyle bozunma ve nem varlığında oksitlenme eğilimleri nedeniyle nadiren kullanılır [71].

2.5.7 Alüminyum-Nikel (Al-Ni) sistemi

Genellikle 75 mikrondan daha büyük teller kullanan Al-Ni sistemi Kirkendall boşluğuna ve korozyona daha az eğilimlidir. Dolayısıyla çeşitli ortamlar altında Al-Ag veya Al-Au bağlarından daha güvenilirdir. Bu sistem güç uçak türbin kanatları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır [72].

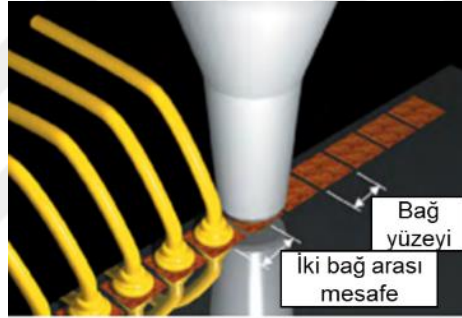
2.5.8 Bakır-Alüminyum (Cu-Al) sistemi

Bakır tel hem altın hem de alüminyum yüzeye bağlanabilir. Cu-Al sistemi Au-Al sistemindeki benzer metaller arası arızaların meydana gelme olasılığı vardır. Ancak Cu-Al bağlarındaki intermetalik büyüme Au-Al bağlarına göre daha yavaştır. Fakat bakırın oksitlenmesi nedeniyle bağ güvenilirliğini değerlendirmek önemlidir [73].

2.6 Bilye Bağlamada Kullanılan Kılcal Uç ve Çeşitleri

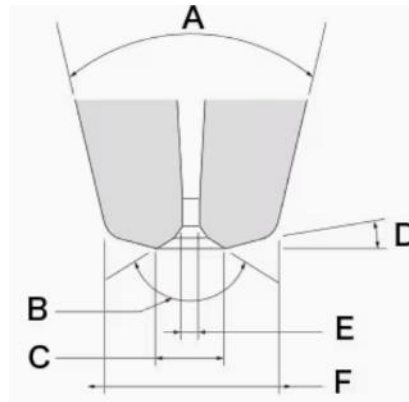
Yarıiletken ve paketleme teknolojisi gereksinimlerindeki hızlı değişimlerle birlikte daha küçük, daha ince, daha hafif ve yüksek performanslı çok işlevli elektronik ürünlere yönelik talebe yanıt olarak yeni paketleme çözümleri sunmaya devam etmektedir.

Bilye bağlama için kullanılan kılcal uç seramik, Tungsten (W) veya yakut gibi malzemelerden yapılmaktadır. Fakat en yaygın malzeme olarak yüksek oksidasyon ve aşınma direnci, kolay temizlenmesi nedeniyle alumina seramiktir. Kılcal uç seçimlerinde dikkat edilmesi gereken bazı temel özellikler vardır. Bunlar en basit ifade ile Şekil 2.11’de gösterildiği gibi iki bağ merkezi arasındaki mesafe, bağ yüzeyi açıklığı ve bağlanmış bilye çapıdır [74,75].



Şekil 2.11 : İki bağ arası mesafe ve bağ yüzeyi.

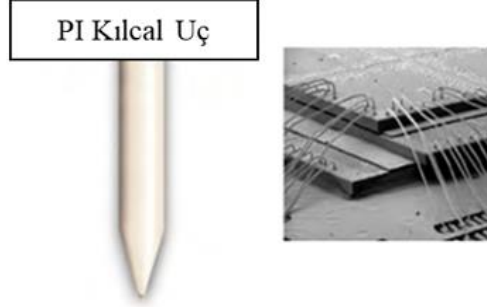
Kılcal uç seçimi tel bağlama için önem arz etmektedir. Kılcal ucun da bazı parametreleri mevcuttur. Bu parametreler şekillendirilecek olan bilye için önem arz etmektedir. Bu parametreler Şekil 2.12’de görülebilir [76-78].



Şekil 2.12 : Bilye bağlamada kullanılan kılcal uç parametreleri: (a) koni açısı, (b) pah açısı, (c) pah çapı, (d) yüz açısı, (e) delik çapı, (f) kılcal uç çapı.

2.6.1 Programlanmış zeka için kılcal uç

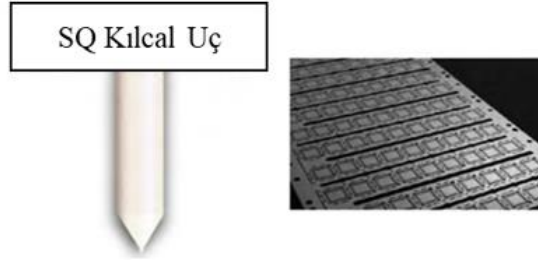
Geometrik tasarımı ile ultra ince adımlı tel bağlama gerektiren gelişmiş paketleme cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Au, Cu ve Ag alaşımli tel kullanarak PI kılcal uç (Şekil 2.13) bir bağlayıcıdan diğerine ultrasonik iletimin tekrarlanabilirliğini ve taşınabilirliğini geliştirmek amaçlı tasarlanmıştır [79].



Şekil 2.13 : PI kılcal uç ve bağlı teller [79].

2.6.2 Kurşunsuz paketler için kılcal uç

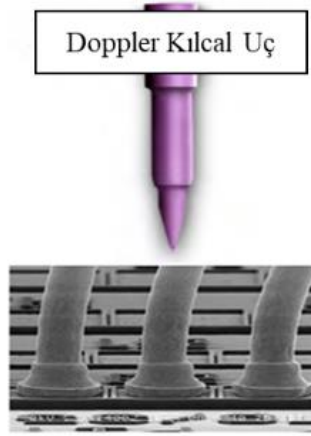
Hem Au hem de Cu tel bağlama uygulaması için kullanılan düşük maliyetli uç çeşididir. SQ kılcal uç (Şekil 2.14) daha az ultrasonik enerji girişi ile yüksek ısı sıkıştırımlı bağlama teknolojisini kullanarak tel bağı oluşturmak için QFN (kurşunsuz) paketlerinde kullanılmaktadır. Farklı güç ayarlarının uygulandığı bu kılcal uç çeşidinde tellerde daha az yer değiştirme meydana gelmektedir [79].



Şekil 2.14 : SQ kılcal uç [79].

2.6.3 Doppler kılcal uç

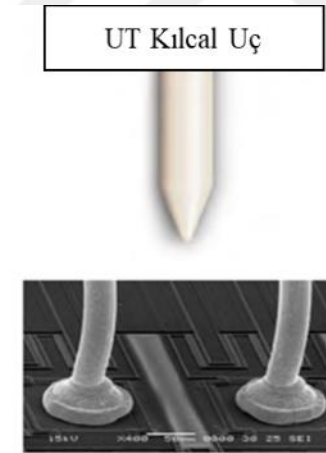
Çoklu silindirik basamaklara sahip doppler, özellikle Au veya Cu tel kullanan hassas bağlanma yüzeyi metalizasyon yapısına sahip cihazlar için bilyenin bağlanabilirliğini ve güvenilirlik performansını artırmak üzere, patentli bir kılcal uç çeşididir. Ayrıca verimli enerji aktarımı gerçekleştirir. Doppler kılcal uç (Şekil 2.15), kraterleşme veya soyulma nedeniyle bağlanma yüzeyi hasarını en aza indirir. Özellikle Au tel ve Cu tel uygulamalarında kullanılmaktadır [79].



Şekil 2.15 : Doppler kılcal uç ve küresel bağlama ile oluşturulmuş teller [79].

2.6.4 UT- U tipi kılcal uç

UT tipi kılcal uç (Şekil 2.16) altın ve bakır tel uygulaması için tasarlanmıştır. Ana tasarım özelliğine bakıldığında daha büyük uç boyutu 140 μm ve üzeri olan, ince işçilik gerektirmeyen uygulamalar için tasarlanmıştır. Standart uç tipidir. Farklı geometrisiyle bu kılcal uç tasarımı günümüzde LED (ışık yayan diyotlar) uygulamaları için ideal bir seçimdir [79].

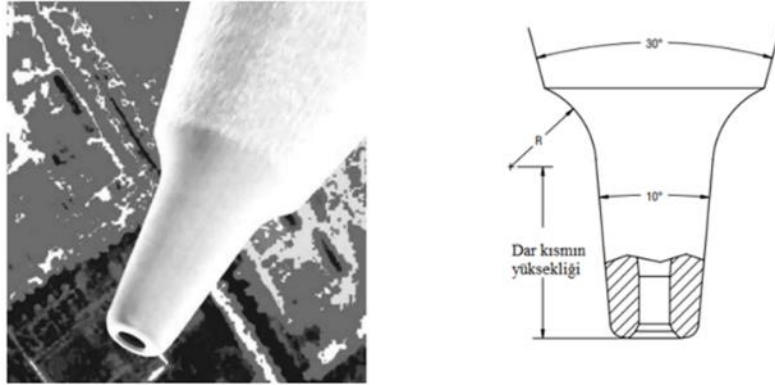


Şekil 2.16 : UT kılcal uç [79].

2.6.5 1851 serisi kılcal uç

Gaiser markasının ince aralık ve ultra ince aralıklı uygulamalar için kullanılan özel tasarımı ucudur (Şekil 2.17). Üstün ultrasonik enerji iletimi ve daha geniş bir ayar penceresi bulunmaktadır. Yüksek frekanslar için oldukça idealdir. Zirkonyum (Zr) seramik bir malzemedendir yapılmaktadır. Bu malzeme ürünün mekaniksel gücünü daha iyiye taşımaktadır. Sertliği ve aşınma direncini oldukça geliştirmektedir. Aniden

oluşan ısısal değişimlere karşı fazlasıyla dayanıklılık göstermekle birlikte korozyona karşı gösterdiği direnç oldukça iyidir [80].



Şekil 2.17 : 1851 serisi kılcal uç çeşidi ve uygulamalarda kullanılan şekli [80].

2.7 Tel Bağlamanın Avantajları

Tel bağlama küçük boyutlardaki cihazlarda kullanılabilir. Bu daha kompakt ve hafif ürünlerin tasarlanmasını sağlar [3]. Yüksek iletkenliği sayesinde kullanılan altın teller yüksek performanslı elektrik sinyallerinin iletimini destekler. Yüksek frekanslı uygulamalarda düşük parazit direnci sağlar. Bu radyo frekansı (RF) ve mikrodalga uygulamaları için avantajdır. Tel bağlama genellikle düşük maliyetli bir yöntemdir. Tel malzemeleri ekonomik olup, bağlantı ekipmanları yaygındır. Teller sağlam ve dayanıklı bağlantılar sunar. Bu cihazların titreşim, sıcaklık ve diğer ortam koşullarında stabil çalışmasını sağlar [81-83].

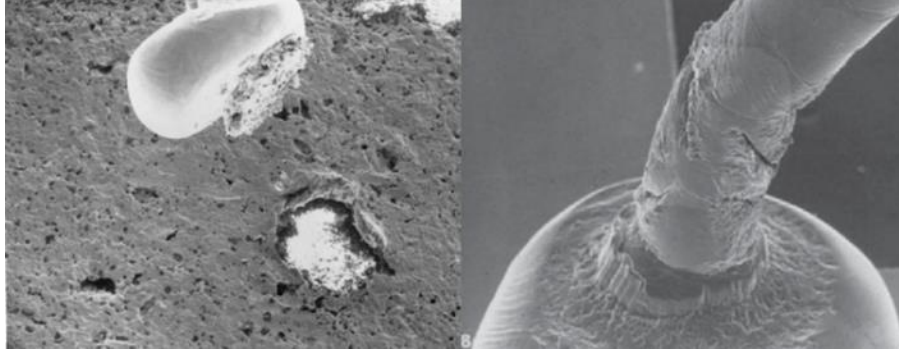
2.8 Tel Bağlamanın Dezavantajları

Tel bağlama çok yüksek veri hızları gerektiren uygulamalarda sınırlamalar getirilebilir. Yüksek frekanslarda sinyal bant genişliği ve parazit direnci nedeniyle performans kısıtlamaları yaşanabilir. Bağlantı sırasında ısı üretilebilir ve cihaz üzerinde termal etkilere neden olabilir. Bu yüksek güç uygulamalarında ve hassas uygulamalar dikkate alınması gereken bir konudur [81-83].

2.9 Tel Bağlamada Hata Kaynakları

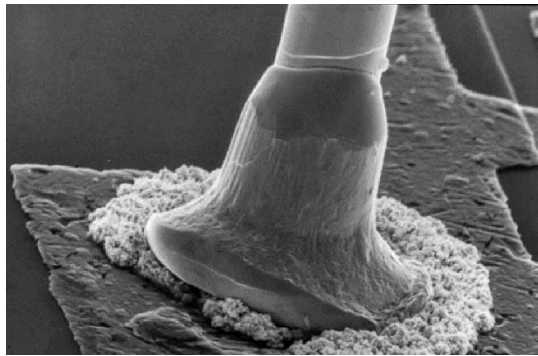
Tel bağlama yapılırken kullanılan malzemeden, ortamdan, cihazdan, kişiden ve fiziksel etmenlerden kaynaklı hatalar meydana gelebilmektedir. Kısaca bahsedecek olursak; bağlama yapılırken, telin bağlantı yüzeyine tam olarak bağlanmaması veya

yetersiz bağlanması gibi sorunlar ortaya çıkar (Şekil 2.18). Elektriksel bağlantının zayıf olmasına ve çalışmamasına neden olur. Telin bağlantı esnasında kırılması, doğru bağlantı yapılmamasına neden olabilir.



Şekil 2.18 : Zayıf bağlantı teli ve telin bağlantı esnasında kırılması [2].

Bağlantı sırasında tel ve bağlantı yüzeyi arasında istenmeyen elektrik kıvılcımları oluşabilir. Bu kıvılcımlar tel ve bağlantı yüzeyine zarar vererek güvenilirliği etkiler. Bağlantıda yüksek direnç veya kısa devre oluşması, elektriksel performansı etkiler ve cihazın doğru şekilde çalışmasını engeller. Telin yanlış bir yöne bükülmesi (Şekil 2.18), bağlantının düzgün bir şekilde gerçekleşmesini engeller. Tel bağlama esnasında oluşan ısı, cihazları ve bileşenleri etkiler. Bu termal etkiler bağlantı güvenilirliğini azaltır. Bağlanma yüzeyleri üzerinde kir, oksidasyon (Şekil 2.19) veya diğer kontaminasyonların oluşması, güçlü ve sağlam bir bağlantının oluşmasını engeller.



Şekil 2.19 : Bağlanma yüzeyindeki oksidasyon [2].

2.10 Tel Değerlendirme Yöntemleri

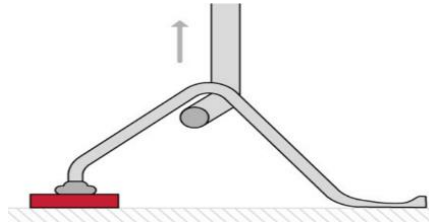
Tel bağlama değerlendirme testleri, farklı uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda yapılan işlemlerin bütünlüğünü değerlendirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır [2,9,84].

2.10.1 Görsel inceleme

Görsel inceleme tel bağı değerlendirmenin yani tel bağlama işleminin kalitesini değerlendirmek adına yapılan en etkili yöntemlerden biridir. Teldeki çatlaklar, kuyruk kısmındaki yırtılma, yanlış yerleştirilmiş teller, tel üzerinde ortalanmayan omuzlar veya küre üzerinde aşırı boyun eğme gibi kontrolde olmayan bir sürecin göstergesidir [9]. Optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu gibi cihazlarla daha detaylı incelemeler yapılabilir.

2.10.2 Tel çekme testi

Bağ bütünlüğünü kontrol etmeye yönelik endüstri ve askeri standartları çekme testleridir. Yarıiletken cihaz ve entegre devrelerin güvenilirliği çok önemlidir ve tel bağ ara bağlantılarının kalitesini inceleme ihtiyacını doğurur. Tel bağı ara bağlantısının düşük kalitesi, yalnızca cihazın dayanıklılığı ve güvenilirliği üzerinde değil, aynı zamanda büyük bir ekonomik yönü üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Tel bağlantılarının ana kalite belirleyici faktörü mekanik mukavemetleridir. Tel bağların kalitesini kontrol etmek için birçok farklı yöntem vardır ancak en popülerleri tel çekme testidir [9,84]. Tel çekme testi, ara bağlantının mekanik gücünü belirleyen tahribatlı bir yöntemdir. Bu test sırasında, kanca telin altına yerleştirilir ve tel kopuncaya veya alt tabakadan çekilinceye kadar normal kuvvetle kaldırılır (Şekil 2.20). Arıza modları bağın durumunu gösterir [84,85].



Şekil 2.20 : Tel çekme testi.

Tel çekme testi sırasında gözlemlenebilen yedi kırılma alanı vardır. Telin, bilye ve kuyruk arasından, bilye ya da kuyruk kısmı birleşiminden koparsa (Şekil 2.21) ideal olarak bağlanmış bir tel yorumu yapılır ve bu standartlara uygundur.



Şekil 2.21 : Telin kanca yerinden, bilye ve kuyruk ekleminde kopması.

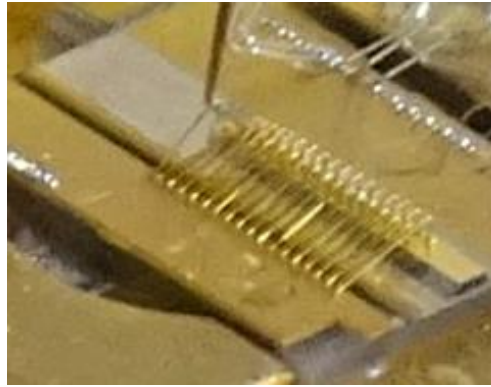
Fakat tel bilye ile birlikte ya da bilyenin bağlandığı cihazın bir parçası ile birlikte kopması istenilen bir durum değildir. Aynı yorum kuyruk kısmı içinde yapılır. Burada uygulanan gücün uygun olmadığı düşüncesine varılır. İdeal olarak tel, kancanın yerleştirildiği tel boyunca kopmalı, çekme mukavemeti telin mukavemetine yakın olmalıdır. Kısacası telin bilye ve kuyruk kısmı ile birlikte kopması (Şekil 2.22) istenilen bir durum değildir. Standarda uygun olmadığı yorumu yapılır.



Şekil 2.22 : Telin bilye, kuyruk ve bağlanılan cihazın parçasıyla kopması.

Başarısızlıkların en yaygın nedenleri, mikro çatlaklar ve bağ yapıldıktan hemen sonra telin daralması ve bunun sonucunda kuyruk kırılmasıdır. Kaldırma bağı, alt tabakanın veya telin yetersiz temizlenmesinden kaynaklanabilecek bir arızadır. En iyi durum telin ortasından koptuğu zamandır, çünkü kopma kuvveti telin kopma mukavemetine yakındır ve bu tür bir bağlantının güvenilirliği çok yüksektir [86].

Tel bağının kalitesi, tel ile yüzey pedi arasındaki bağ kuvveti ile belirlenir. Tel çekme testi (Şekil 2.23), bağ kuvvetini değerlendirmek için birincil yöntemdir. Kopma kuvveti değeri büyük ölçüde telin çapına bağlıdır [87,88].



Şekil 2.23 : Tel çekme testi işlemi.

Bu çekme testleri gerçekleştirilirken MIL-STD-883K metot 2011.9 standardı kullanılır. Standarda göre farklı çekme yöntemleri de vardır. Bu yöntemlerden telleri tek olarak çekme de bunların arasındadır. Yapılan çalışmalarda tellere tek olarak çekme testi uygulanmıştır. Standarda göre Au ve Al tel için farklı kalınlıklardaki minimum bağlanma dayanıklılığı Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Minimum bağlanma dayanıklılığı MIL-STD-883K standardı [89].

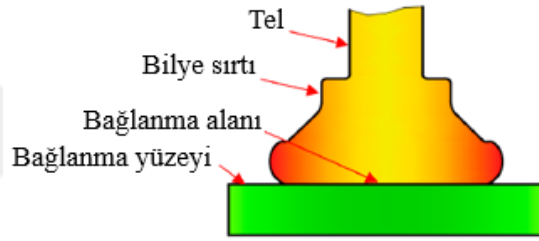
Test koşulu	Tel malzemesi ve çapı	Minimum bağ gücü (gf)
Çekme	Al.0007 inç (0,0175 mm)	1,5
	Au.0007 inç (0,0175 mm)	2,0
Çekme	Al.0010 inç (0,0254 mm)	2,5
	Au.0010 inç (0,0254 mm)	3,0
Çekme	Al.00125 inç (0,0318 mm)	3,0
	Au.00125 inç (0,0318 mm)	4,0
Çekme	Al.0013 inç (0,033 mm)	3,0
	Au.0013 inç (0,033 mm)	4,0
Çekme	Al.0015 inç (0,0381 mm)	4,0
	Au.0015 inç (0,0381 mm)	5,0
Çekme	Al.0030 inç (0,0762 mm)	12,0
	Au.0030 inç (0,0762 mm)	15,0

Çizelge 2.3'te 25 µm altın tel için belirlenen minimum dayanıklılık standardı 3 gf, 33 µm altın tel için minimum 4 gf mukavemet olarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda uygulanan tüm çekme testleri bu standart göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

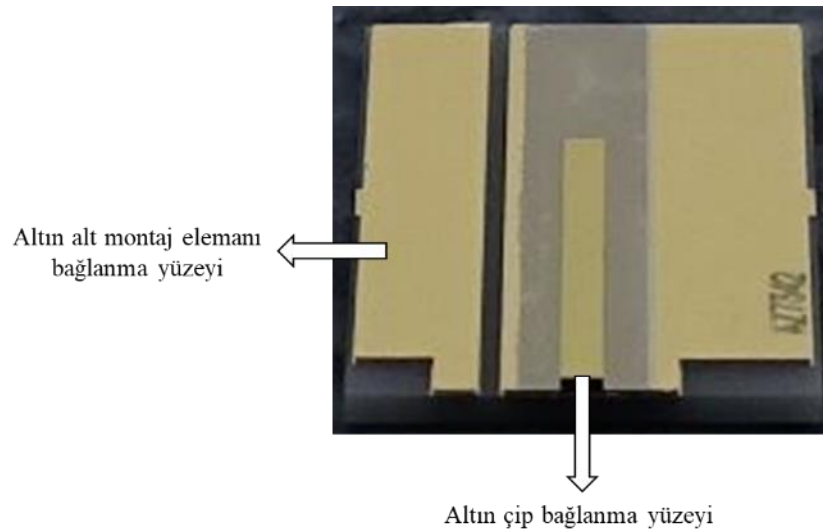
3.1 Tel Tasarımı

Tel bağlama işlemleri gerçekleştirilmeden önce en önemli aşamalarından birisi tel bağlama tasarımıdır. Tasarımda bağlanacak olan teller arasındaki mesafe, bağlama noktaları, tel uzama miktarı ve yüksekliği gibi parametreler belirlenmektedir. Tel, bilye sırtı, bağlanma alanı ve bağlanma yüzeyi Şekil 3.1’de verilmiştir.



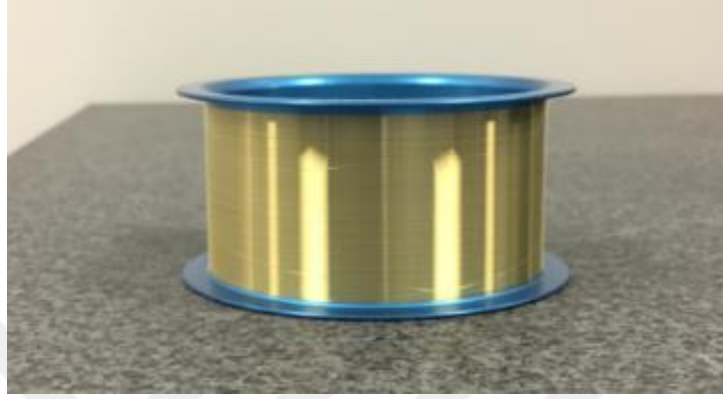
Şekil 3.1 : Tel bağlama mekanizması.

Çalışmada bağlanılacak olan yüzeylerin ikisi de altından oluşmaktadır. Bağlama tellerinin bilye olan kısımları lazer çip üzerinde, kuyruk kısmı ise lazer çip alt montaj kısmında yer almıştır. Bağlama yönü lazer çip üzerinden alt montaj elemanına doğrudur. Lazer çip alt montaj elemanının yüzeyi hepsi için standarttır ve bu malzeme altındır (Şekil 3.2).



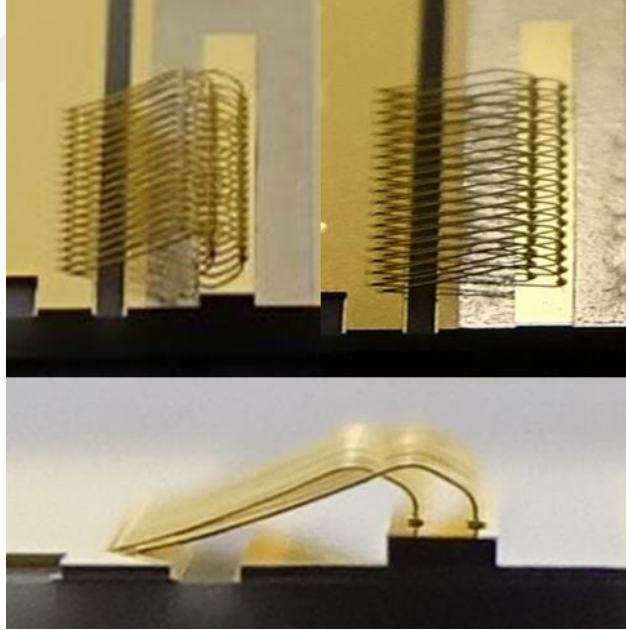
Şekil 3.2 : Tel bağlanma yüzeyleri.

Bağlanma güvenilirliğini sağlamak için Au telin saflığını ve çapını çalışma performansı gereksinimlerine göre seçmek daha iyidir. Optoelektronik cihazlarda elektriksel özellikler ön planda olduğundan, yapılan çalışmada parametreler göz önünde bulundurularak 4N tel seçilmiştir (Şekil 3.3). Ayrıca telleri bağlayacak olan uç çeşidi 1851 serisi uçlardır.



Şekil 3.3 : Kullanılan 4N altın teli.

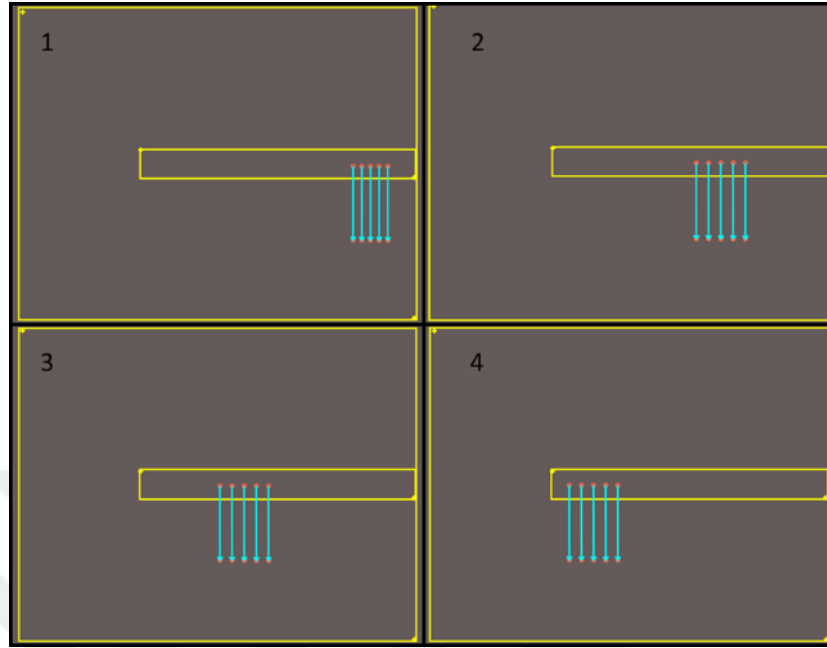
Bağlanılacak olan 4N tel altındır. Bağlamada altın-altın metalurjisi kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Bağlantı telleri ve bağlantı yapılan yüzeyler.

Bilyelerin bağlandığı lazer çipin uzunluğu 4 mm'dir. Lazer çip 1 mm'lik dört bölgeye bölünmüştür. Bağlanılan iki tel arasındaki mesafe 125 μm 'dir. Her numune için beş adet tel bağlanmıştır. Ayrıca bilye bağlantılarının olduğu çip dört bölgeye ayrılmış,

toplamda yirmi adet tel bağlanmıştır. Bölgeler arasında ise 300 µm'lik boşluklar bırakıldı. Bölgesel olarak tel tasarımları Şekil 3.5'teki gibidir.

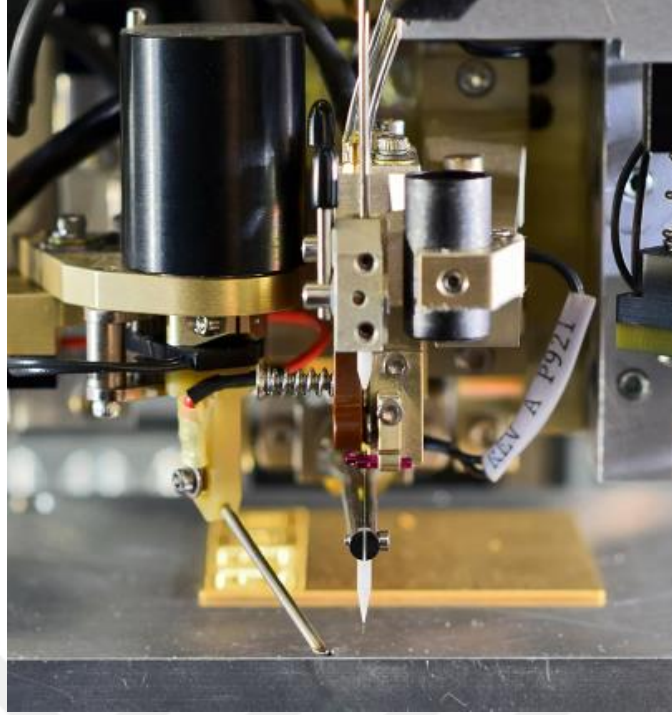


Şekil 3.5 : Çipe bağlanan tellerin çip üzerindeki bölgeleri.

3.2 Tel Bağlama Süreci

DeneySEL çalışmalarında, tel çapı ve bağlanma sıcaklığı sabit tutularak bağlanma gücü (kuvveti) değerleri değiştirilerek tel çekme mukavemetleri ölçülmüştür. Çapı 25 ve 33 µm olan teller için ayrı ayrı çalışmalar yapıldı. Çalışma yapılan her çip, bağlandığı lazer alt montaj elemanının seri numarasıyla (0331 vb.) adlandırıldı. Bağlanma sıcaklığı 170 °C olarak belirlendi. Bağlama gücü 25 µm tel için 10-160 gram (g), 33 µm çapa sahip tel içinse 10-70 g aralığında uygulanmıştır. Bu çalışma aralığının tercih edilmesi bu bağlanma kuvvetlerinden verim alınmasındandır.

Altın tellerin çiplere bağlanması bilye bağlama yöntemi ile tel bağlama cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). T/S yöntemle, tam otomatik olarak, en karmaşık tel bağlantılarını rahatlıkla gerçekleştirebilir. Ayrıca bu cihaz modern tel bağlama için çok önemli bir yere sahip olan Intelligent Interactive Graphical Interface™ (i2Gi™) yazılımını kullanır. Saniyede yüksek hassasiyetle sekiz adet tel bağlayabilmektedir.



Şekil 3.6 : Tel bağlama cihazı.

Tel bağlama işlemleri gerçekleştirilmeden önce çip üzerinde bilye bağı yapılacak yüzeylerin optik mikroskopta (Şekil 3.7) görüntüleri alındı. Görüntülerde 10x büyütme yapılmıştır.



Şekil 3.7 : Optik mikroskop.

Bağlama işlemlerinde optik mikroskopta tellerin bilye ölçüleri belirlenerek, arıza olup olmadığı kontrol edildi. İşlemler gerçekleştirildikten sonra bütün teller çekme testi cihazında (Şekil 3.8) teste maruz bırakılıp, mevcut bağlanma gücü tespiti ve analizi yapılarak değerlendirildi.



Şekil 3.8 : Çekme testi cihazı.

Koparma işlemleri gerçekleştirilen bütün tellerin önce optik mikroskopta daha sonra ise taramalı elektron mikroskobunda (SEM) (Şekil 3.9) görüntüleri alınıp, hatalı bağlanmış veya kopan teller detaylı bir şekilde analiz edildi. SEM görüntüleri 200x, 500x ve 1200x büyütmelemlerle alındı. Çözünürlük değeri yatay görüntüler için 5 kV, dikey görüntüler içinse 10 kV'dır. Çalışma aralığı 5,6 - 8,1 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9 : Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

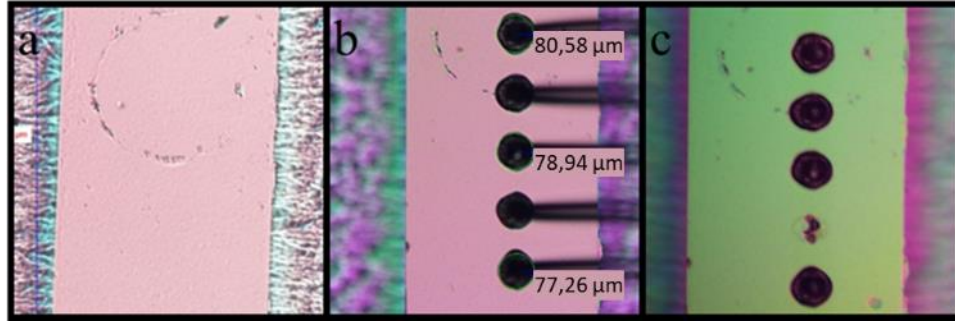
3.2.1 Tel çapı 25 µm olan altın tel bağlama çalışmaları

Numuneler üzerindeki çalışmaların ilk olanları seri numarası 0331 olan çip üzerinde gerçekleştirildi. Bunun parametre ve çekme testi sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : 10-40 g bağlama gücü ile 0331 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

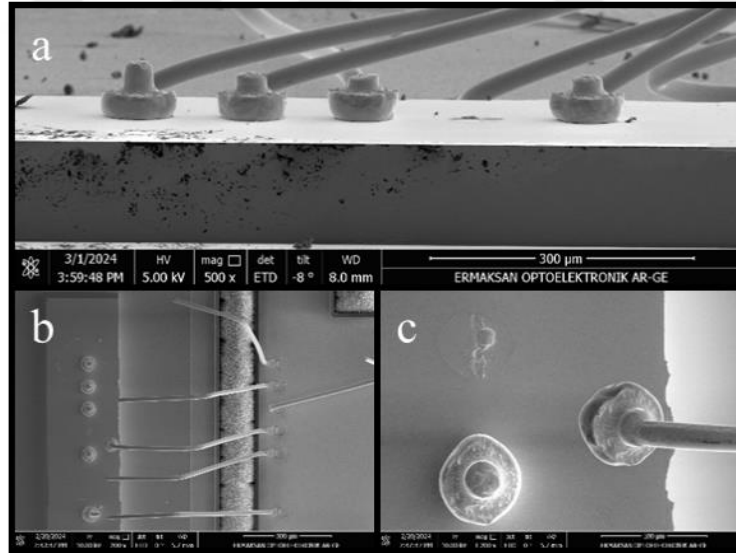
	Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama süresi (ms)	Tel çapı (µm)	Sıcaklık (°C)	Çekme testi sonucu (gf)	Test ortalaması (gf)
1.bölge	1	10	22	25	170	6,29	9,73
	2	10	22	25	170	10,74	
	3	10	22	25	170	9,17	
	4	10	22	25	170	5,73	
	5	10	22	25	170	9,29	
2.bölge	1	20	22	25	170	9,90	10,39
	2	20	22	25	170	11,38	
	3	20	22	25	170	10,82	
	4	20	22	25	170	9,21	
	5	20	22	25	170	10,64	
3.bölge	1	30	22	25	170	11,74	11,36
	2	30	22	25	170	11,25	
	3	30	22	25	170	11,65	
	4	30	22	25	170	11,35	
	5	30	22	25	170	10,83	
4.bölge	1	40	22	25	170	12,38	11,53
	2	40	22	25	170	11,13	
	3	40	22	25	170	10,96	
	4	40	22	25	170	11,35	
	5	40	22	25	170	11,83	

0331 numara ile kodlanan altın çip bağlanma yüzeyine (Şekil 3.2) 20 adet tel 4 eşit bölgeye 5'er adet olacak şekilde bağlanmıştır. Tellerin çapı 25 µm olmak üzere bağlanma süresi 22 ms ve sıcaklık değeri 170 °C olarak sabit tutularak bağlanma gücü değiştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Bağlanma gücünün 10 g olduğu birinci bölgedeki 5 adet telin bağlama öncesi çip yüzeyi, tel bağlama sonrası bilye çapları, çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyini gösteren optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 3.10'da ki gibidir.



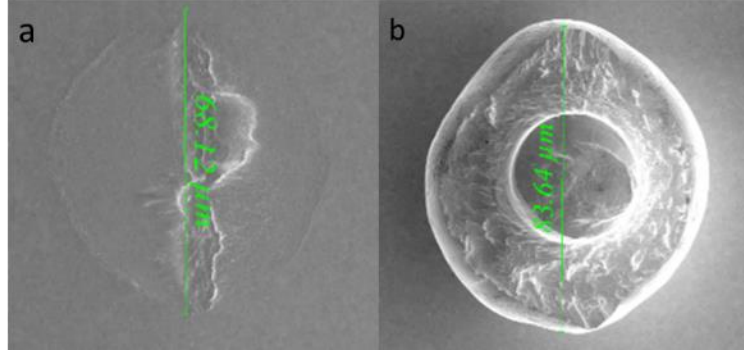
Şekil 3.10 : 0331 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlama yüzeyi.

Görüntülerde tel bağlamadan önceki yüzey, bağlama sonrasındaki tel görüntüleri, bilye yarıçap ölçümleri ve koparmadan sonraki bilyeler mevcuttur. Tellerin bağlama gücü 10 g'dır. Tel bağlamadan sonraki bilye çapları ise 80 µm civarındadır. Çekme testi sonuçlarında birinci ve dördüncü telin diğer tellere oranla daha düşük bağlandığı gözlemlendi. Dördüncü tel Şekil 3.11c'de görüldüğü gibi bilye ile birlikte kopmuştur. Bu kabul edilen bir kopma türü değildir. Çizelge 3.1'de belirtildiği gibi çekme testi sonucu 5,73 gf olarak sonuçlanmıştır. Ayrıca 8 gf değeri altında kopan teller genel ortalamaya katılmamıştır. Detaylı incelemeler taramalı elektron mikroskopunda gerçekleştirildi.



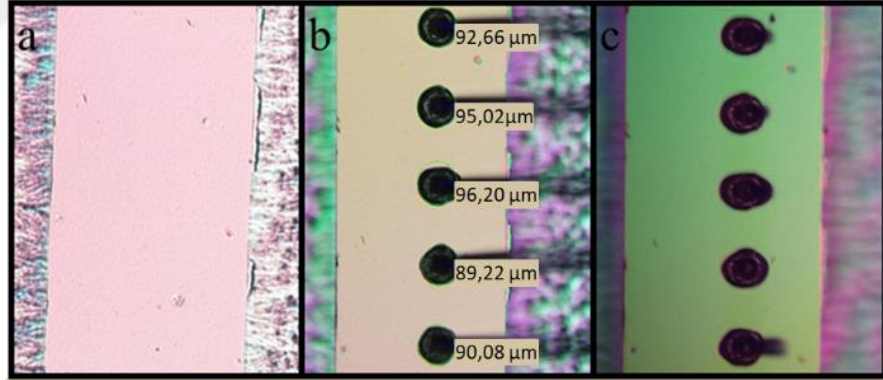
Şekil 3.11 : 0331 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

SEM ile alınan görüntülerde yatayda 500x, dikeyde 200x, detaylı görüntüde ise 1200x yakınlaştırma kullanıldı. İncelenen görüntülerde dördüncü telin sağlam bağlanamadığı gözlemlenmiştir. Tutunma yüzeyinde boşlukların meydana geldiği, bunun sonucunda da sağlam bağlama gerçekleştiremediği yapılan incelemelere bakılarak yorumlanabilir.



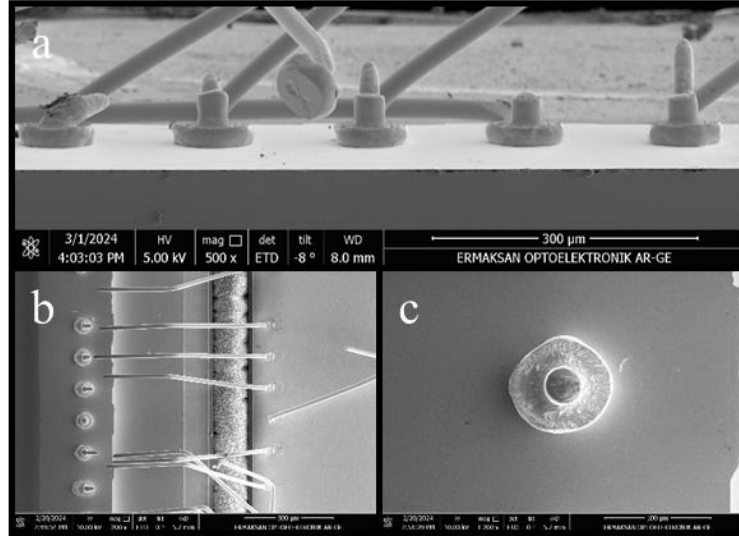
Şekil 3.12 : 0331 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı: a) kopan telin b) sağlam telin bilye çaplarının SEM görüntüleri ile ölçümü.

Hatalı bağlanan telin yüzey incelemesinde bilyenin bıraktığı izin çap ölçümü 68 µm çıkarken, aynı güçle bağlanan bir sonraki telin bilye ölçümü ise 83 µm çıkmıştır (Şekil 3.12). Bilye ile bıraktığı iz arasında yaklaşık 15 µm fark oluşmuştur. Eğer tel bağlama işlemi 10 g ile yapılırsa, bilyelerin altında boşluklar kalıp, tam anlamıyla bağlanma sağlanamaz. Bağlanan bölgedeki tellerin çekme testi ortalaması da bunu doğrulamaktadır. Aynı numune üzerindeki ikinci bölgedeki bağlama gücü 20 g olarak uygulanmıştır. Beşinci telin çekme testi sonucu diğerlerine bakarak düşük olmasına rağmen sınırlar içerisinde. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 : 0331 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

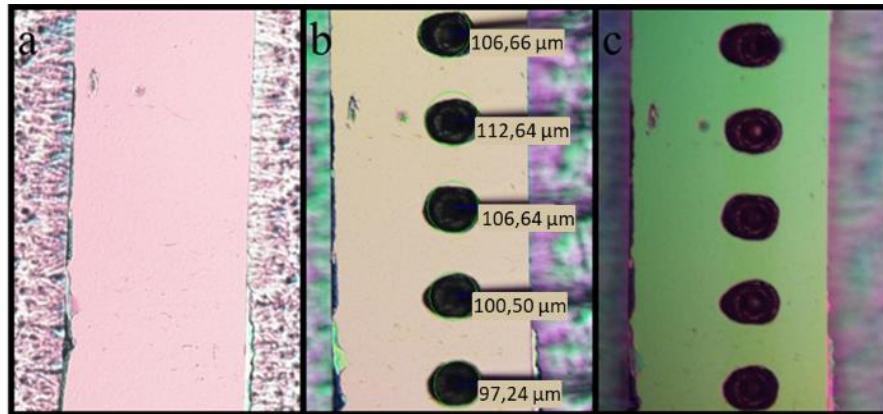
İkinci bölgedeki optik mikroskop incelemelerinde bilye çaplarının yaklaşık 90 ile 95 µm aralığında olduğu gözlenmiştir. Tel bağlama hatasıyla karşılaşılmadı. Detaylı olarak SEM incelemeleri Şekil 3.14'te verilmiştir.



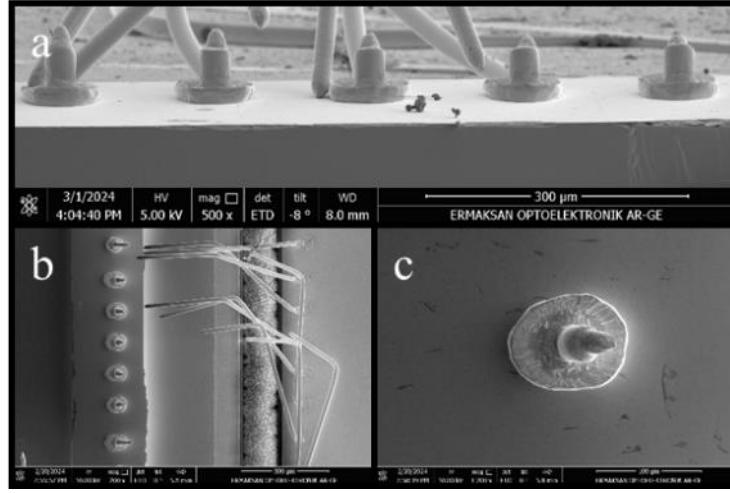
Şekil 3.14 : 0331 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

İkinci bölgedeki optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde uygulanan 20 g bağlama gücü bir önceki bölümde uygulanan dan daha yüksek olmasından dolayı bilye yüksekliklerinin azaldığı ve güç uygulamasının doğruluğu gözlemlendi. Bilyelerden birinin hatalı bağlanması bilyenin altında görülen istenmeyen boşluklardan kaynaklanmaktadır (Şekil 3.14a). Bu bölgedeki bağlanma gücünün de yeterli olmadığı da görülmektedir.

0331 çipinin üçüncü bölgesine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.15'te verilmiştir. Üçüncü bölgedeki tel bağlamada bilye çaplarının uygulanan 30 gf kuvvetle orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bilyelerin çapı yaklaşık 100-110 µm olarak ölçüldü. Çekme testi ile koparmadan sonra herhangi bir hata gözlemlenmedi (Şekil 3.16).



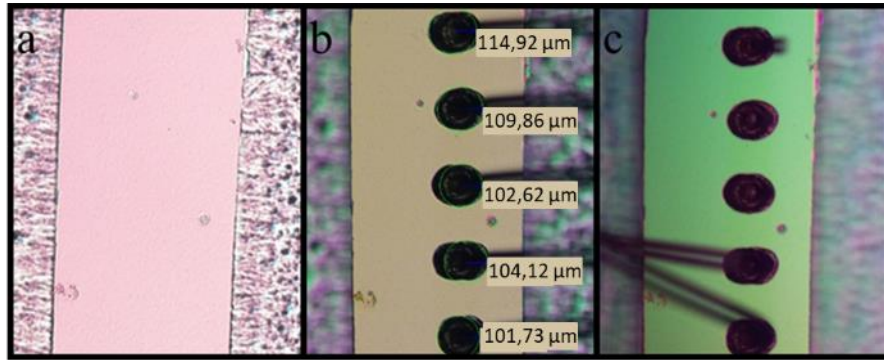
Şekil 3.15 : 0331 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.



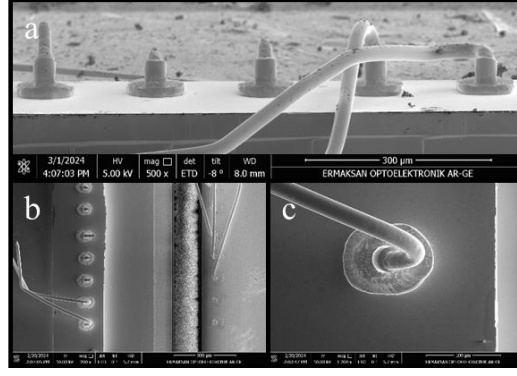
Şekil 3.16 : 0331 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

İncelenmiş olan SEM görüntülerinde üçüncü bölgede tellerin son derece düzgün bağlanmış olduğu gözlemlendi (Şekil 3.16). Bağlanan beş adet telin tel çekme testi sonucu ortalamasının 11,36 gf olduğu, bu tellerinde standartlarda istenilen gibi bağlandığı gözlemlendi. Uygulanan bağlama kuvvetinin yarı iletken çip üzerinde herhangi bir deformasyona neden olmadığı, bununla birlikte sağlam bir şekilde bağlandığı görüldü.

0331 çipinin dördüncü bölgesine ait mikroskop görüntüleri Şekil 3.17’de verilmiştir. Dördüncü bölgede uygulanan bağlama kuvveti 40 gf’dir. Bilye çapının en büyüğü 115 µm ölçüldü. Tel bağlama hatası ile karşılaşılmadı (Şekil 3.18).



Şekil 3.17 : 0331 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.



Şekil 3.18 : 0331 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 μm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

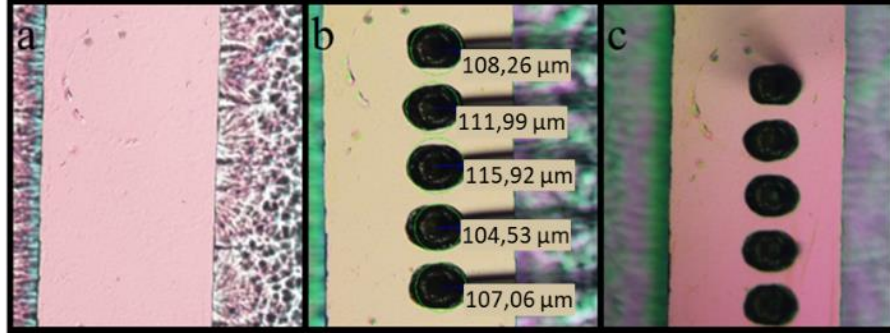
Bu bölgeye ait SEM incelemelerinde herhangi bir probleme rastlanmamıştır (Şekil 3.18). Bağlanılan tellerin doğruluğu ve güvenilirliği bu şekilde ispatlanmış oldu. Tellerin en iyi mukavemet gösterdiği bölgedir.

Diğer çip için uygulanan parametreler ve sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : 50-80 g bağlama gücü ile 0126 çipine bağlı 25 μm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

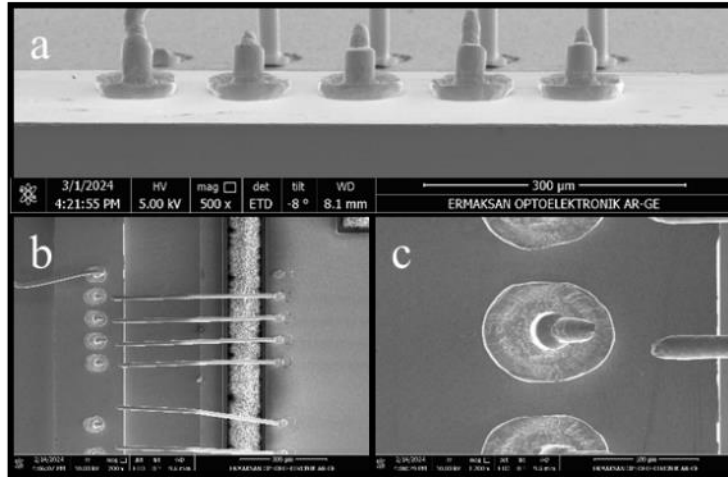
	Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama süresi (ms)	Tel çapı (μm)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Bağ gücü (gf)	Bağ gücü ortalaması (gf)
1.bölge	1	50	22	25	170	11,83	11,22
	2	50	22	25	170	10,83	
	3	50	22	25	170	10,35	
	4	50	22	25	170	11,51	
	5	50	22	25	170	11,58	
2.bölge	1	60	22	25	170	10,93	11,09
	2	60	22	25	170	11,17	
	3	60	22	25	170	10,97	
	4	60	22	25	170	11,29	
	5	60	22	25	170	11,09	
3.bölge	1	70	22	25	170	12,06	10,73
	2	70	22	25	170	10,47	
	3	70	22	25	170	9,77	
	4	70	22	25	170	10,76	
	5	70	22	25	170	10,60	
4.bölge	1	80	22	25	170	10,91	10,52
	2	80	22	25	170	10,51	
	3	80	22	25	170	10,65	
	4	80	22	25	170	10,10	
	5	80	22	25	170	10,44	

Seri numarası 0126 olan çip için uygulanan tel parametreleri ve çekme testi sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çip dört bölgeye ayrılıp, her bölge ayrı ayrı incelendi. Bu çip üzerinde yapılan çalışmalarda tel hatası gözlenmedi. İlk bölgenin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.19’da verilmiştir.



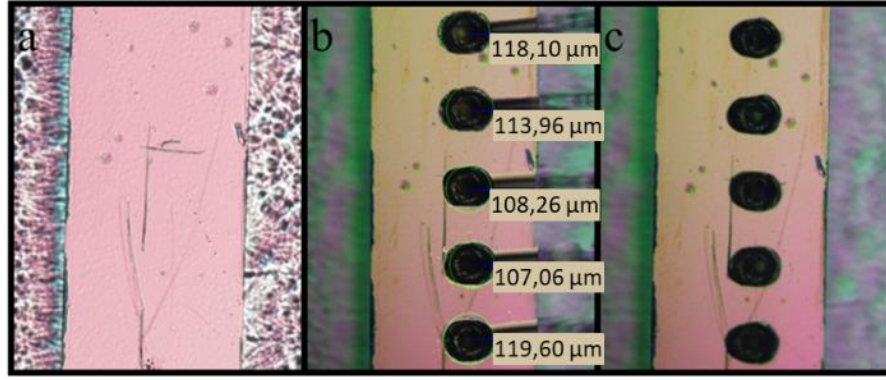
Şekil 3.19 : 0126 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

Seri numarası 0126 olan çipin birinci bölgesinde bağlama gücü olarak 50 gf bağlama kuvveti uygulandı. Mikroskopta ölçülen ortalama bilye çapı yaklaşık 105-115 µm aralığındadır. SEM görüntülerinde (Şekil 3.20) bölgedeki bağlanmada problem yaşanmadığı gözlemlendi. Çekme testi ortalaması 11,22 gf çıkmıştır.



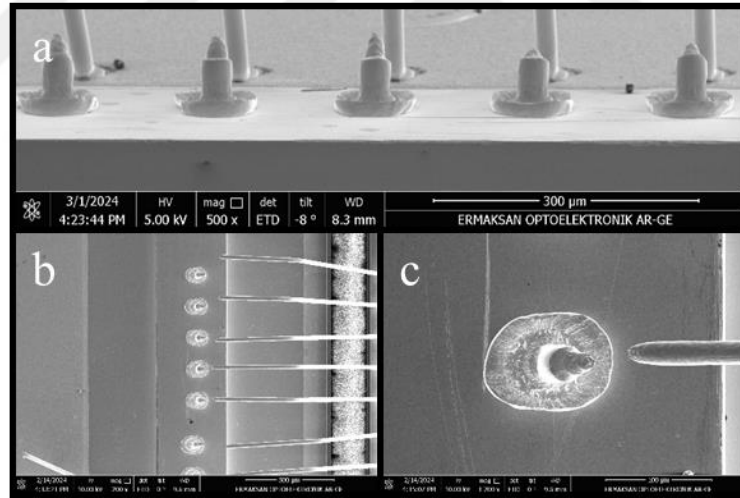
Şekil 3.20 : 0126 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

Seri numarası 0126 olan çipin ikinci bölgesinde 50 gf bağlama kuvveti uygulandı. İkinci bölgenin optik mikroskop görüntüsü ve bilye ölçüleri Şekil 3.21’de verilmiştir.



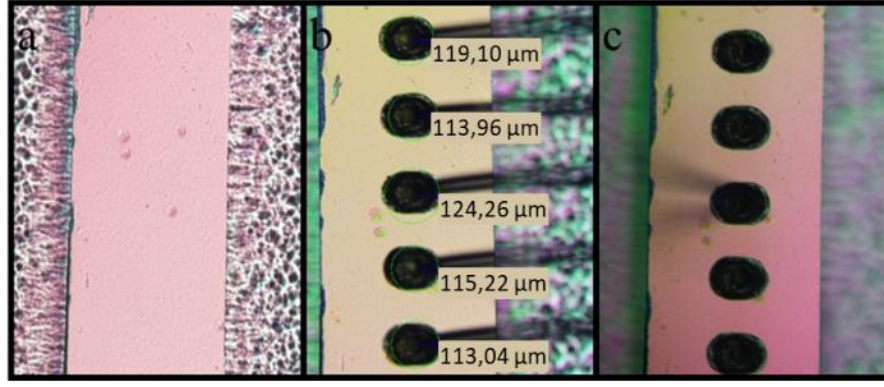
Şekil 3.21 : 0126 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri:
a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c)
çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

İkinci bölgedeki tel bağlamada da bir hataya rastlanmadı. Bilye çapları yaklaşık 105-120 µm aralığındadır (Şekil 3.21). Görüntüler detaylı olarak incelendiğinde, artırılarak uygulanan bağlama gücünün etkisi ile bilye yüksekliklerinin azalması açık bir şekilde gözlenmiştir (Şekil 3.22). Tel çekme testi sonrası ortaya çıkan tutunma kuvvetinin de bir önceki bölgeye yakın olacak şekilde 11,09 gf olduğu belirlendi.



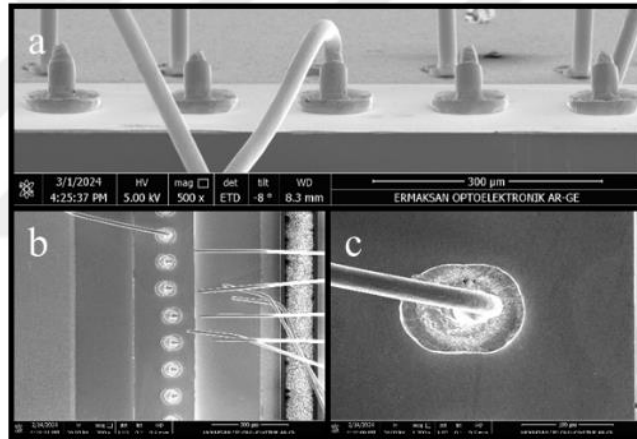
Şekil 3.22 : 0126 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri:
a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

Üçüncü bölge için optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 : 0126 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

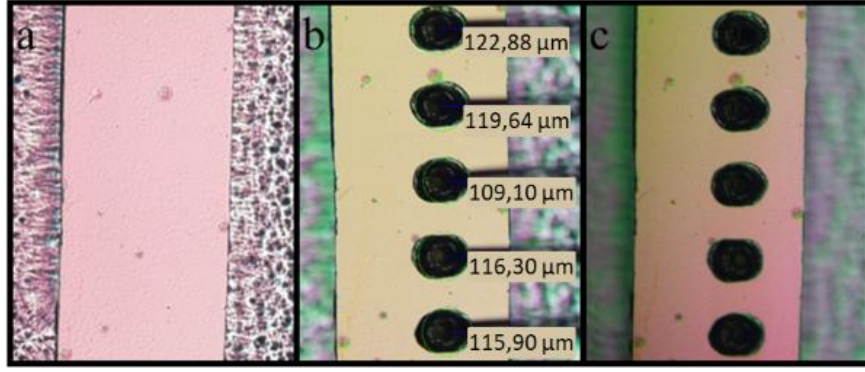
Uygulanan 70 gf bağlanma gücünde bağlantı hatasına rastlanılmamış, tel çapları yaklaşık 115-125 μm değerlerindedir. Uygulanan bağlama gücünün artmasıyla beraber bilye yüzeylerin arttığı da gözlenmiştir. Detaylı incelemeler Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24 : 0126 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 μm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

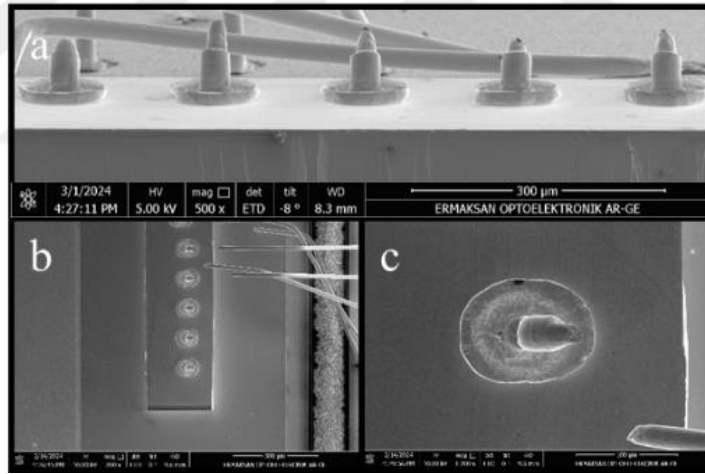
Detaylı SEM görüntüleri incelendiğinde bağlantıların düzgün olduğu belirlendi. Çekme testi sonuçlarının ortalaması 10,73 gf olarak ölçüldü.

Seri numarası 0126 olan çipin son bölgesindeki optik mikroskop incelemelerinde bilye çapları 110-120 μm aralığında ölçülmüştür. Burada da hatalı tel bağlamasıyla karşılaşılmamıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 : 0126 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

SEM görüntüleri incelendiğinde bağlamanın düzgün olarak gerçekleştiği sonucuna varıldı (Şekil 3.26). Bu bölgede gerçekleştirilen tel çekme testi ortalaması ise 10,52 gf'tir. Tüm çip için uygulanan 50, 60, 70 ve 80 gf bağlama gücü değerlerinde ortaya çıkan çekme testi sonuçları birbirine yakın olmuştur. Sonuçlar birbirine yakın olsa da 30 ve 40 gf uygulamalarındaki sonuçları yakalayamamıştır.



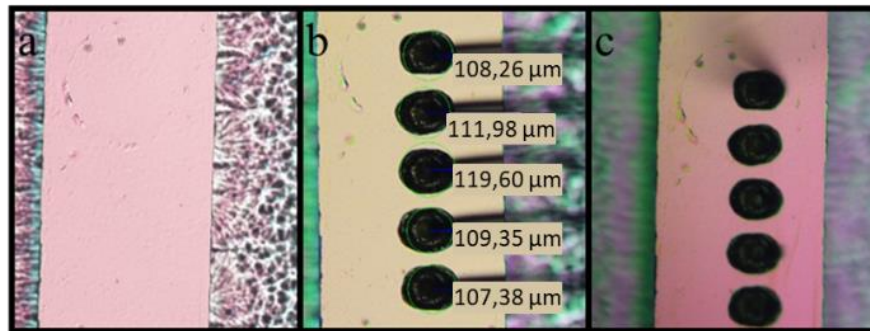
Şekil 3.26 : 0126 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

Seri numarası 0242 olan çipe uygulanan 90, 100, 110 ve 120 gf bağlama kuvveti ve çekme testi sonuçları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : 90-120 g bağlama gücü ile 0242 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

	Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama süresi (ms)	Tel çapı (µm)	Sıcaklık (°C)	Bağ gücü (gf)	Bağ gücü ortalaması (gf)
1.bölge	1	90	22	25	170	6,35	11,43
	2	90	22	25	170	11,55	
	3	90	22	25	170	11,46	
	4	90	22	25	170	11,43	
	5	90	22	25	170	11,28	
2.bölge	1	100	22	25	170	10,38	10,84
	2	100	22	25	170	11,08	
	3	100	22	25	170	11,84	
	4	100	22	25	170	9,95	
	5	100	22	25	170	10,98	
3.bölge	1	110	22	25	170	11,53	11,23
	2	110	22	25	170	11,23	
	3	110	22	25	170	11,80	
	4	110	22	25	170	11,10	
	5	110	22	25	170	10,52	
4.bölge	1	120	22	25	170	5,07	10,97
	2	120	22	25	170	10,77	
	3	120	22	25	170	11,73	
	4	120	22	25	170	11,27	
	5	120	22	25	170	10,12	

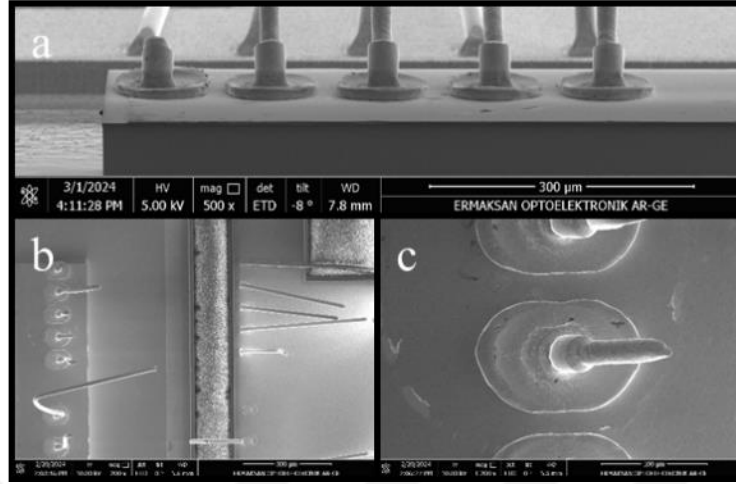
Çizelge 3.3'te verilen birinci bölümde 90 gf bağlanma gücü uygulandı. Elde edilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27 : 0242 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

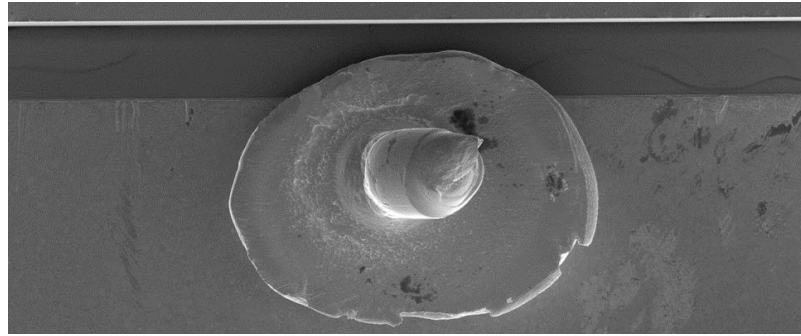
Koparma testi sonuçlarına göre birinci telin gücü 6,35 gf çıkmıştır. Bu tel haricindeki diğer tellerin test ortalaması ise 11,43 gf olarak bulunmuştur. Şekil 3.28'de detaylı SEM incelemelerinde görüldüğü gibi birinci tel testi sonucunun düşük çıkmasının

sebebi buradaki telin bilye ile olan başlangıç eklem bölgesinden kırılıp kopmasıdır (Şekil 3.28a'da en soldaki).



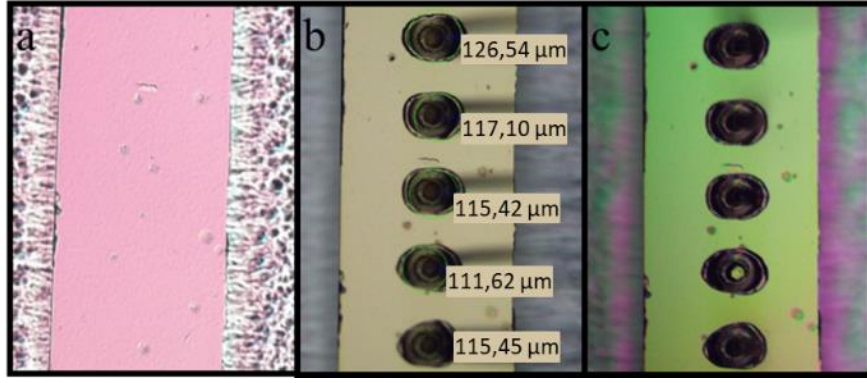
Şekil 3.28 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

Hatalı olan tel detaylı olarak incelendiğinde kırılma noktası net olarak görülmektedir (Şekil 3.29). Bu yüzden tel çekme testi sonucu düşük elde edilmiştir. Telin bu şekilde kopmasının sebebi olarak kendisinde veya yüzeyinde meydana gelen hasarlar olarak değerlendirildi.



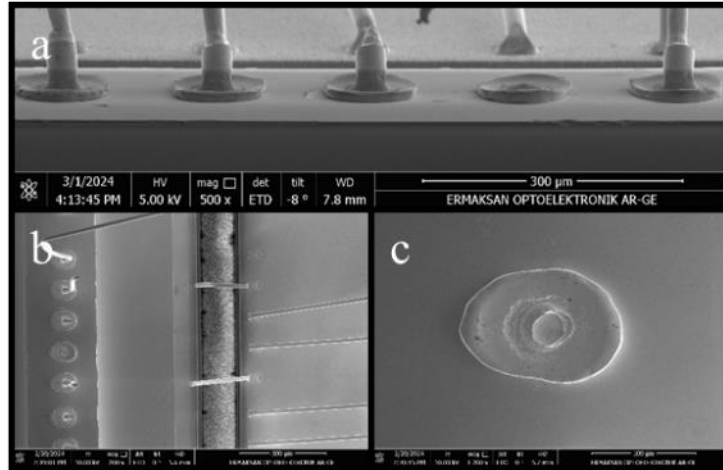
Şekil 3.29 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı eklem bölgesinden hatalı kopan telin üstten SEM görüntüsü.

Lazer çipin ikinci bölgesindeki bağlama gücü 100 g olarak uygulanmıştır. Mikroskop kontrollerinde (Şekil 3.30) dördüncü tel bağlantısının uygun şekilde bağlanmadığı için istenilen test sonucu elde edilememiştir.



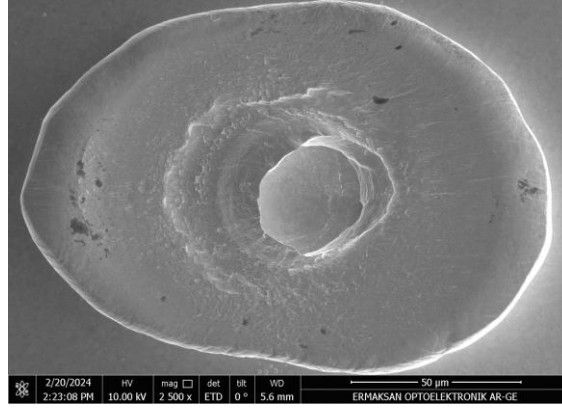
Şekil 3.30 : 0242 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

Burada çıkan tel çekme testi sonucu 9,95 gf'dir. Optik mikroskop görüntüsünde de dördüncü telin orta kısmının bilyenin omuz kısmıyla birlikte koptuğu ve boşluk olduğu gözlemlendi (Şekil 3.31). Buradaki hatanın nedeni, tel bağlama sırasında oluşturulan EFO'nun uygun olmadığıdır. Hatalı bağlanan tel SEM altında incelendiğinde hata mekanizmasının doğrudan ortaya çıktığını görebiliriz. Burada Şekil 3.31a'da görüldüğü gibi tel bilyenin omuz kısmıyla birlikte kopmuştur. Şekil 3.31c'de ise bağlama sırasında EFO, bilye oluştururken boşluk meydana geldiği dolayısıyla bunun da bağlanan tele etki ettiği değerlendirildi.



Şekil 3.31 : 0242 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

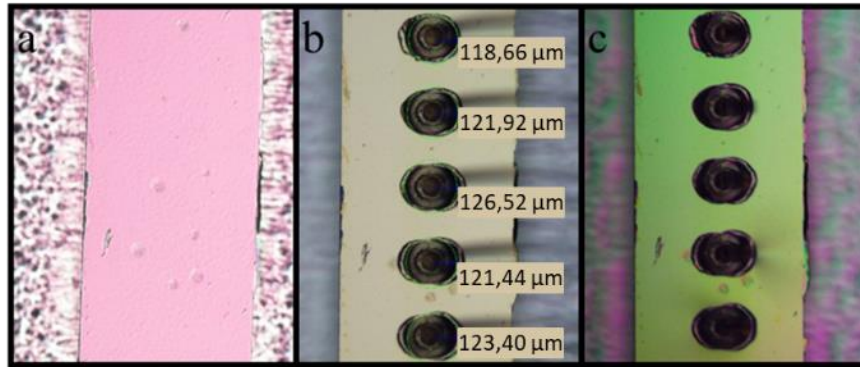
Hatalı bağlanan telin 2500x büyütmeyle alınan SEM görüntüsü Şekil 3.32'de incelenmiştir.



Şekil 3.32 : 0242 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı eklem bölgesinden telin baş kısmıyla birlikte kopmasından sonra oluşan boşluğun üstten SEM görüntüsü.

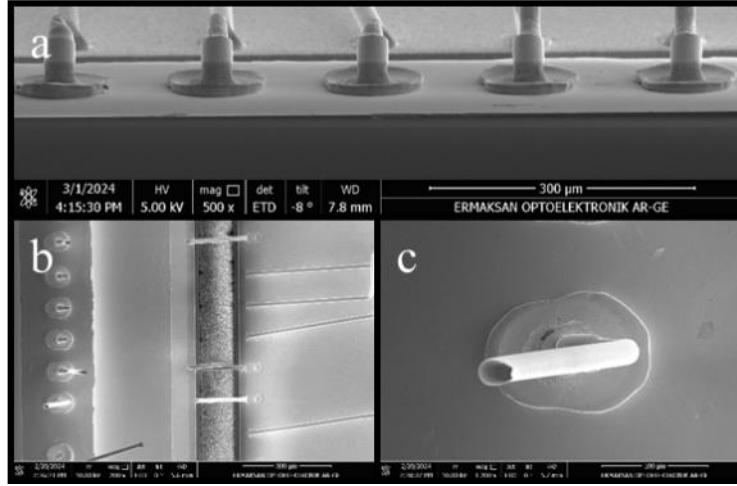
Şekil 3.32’de görüldüğü gibi telin hatalı kopmasından dolayı boşluğun hiç de azımsanmayacak düzeyde olduğu, bundan dolayı çekme testi sonucunun da istenilen seviyeye ulaşamadığı tespit edilmiştir.

Üçüncü bölgedeki teller optik mikroskop ile incelendiğinde herhangi bir bağlama hatası gözlenmemiştir. Bağlama gücü 110 g olduğunda ortalama bilye çapları yaklaşık 120, 130 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.33). Bu numunedeki hatasız bağlanan tek bölüm olarak değerlendirilse de bilye omuz yüksekliklerinin düşük olmasından dolayı güvenilirlik açısından sorun teşkil etmektedir.



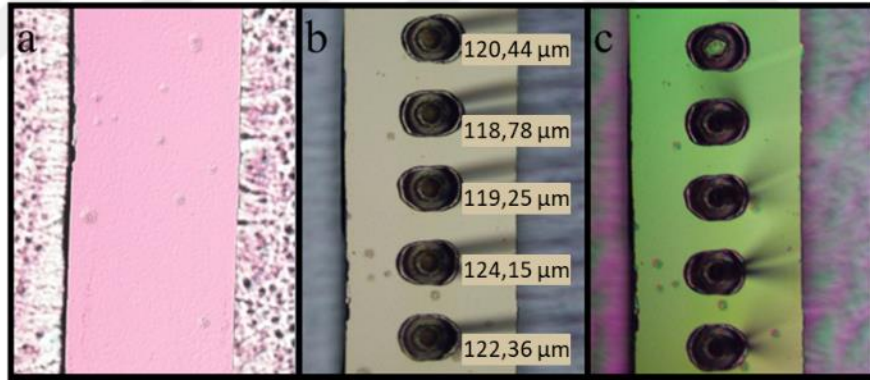
Şekil 3.33 : 0242 çipinin üçüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

0242 çipinin üçüncü bölgesi SEM görüntülerinden (Şekil 3.34) anlaşılacağı üzere tellerin son derece düzgün bağlandığı fakat omuz yüksekliklerinin düşük olduğu, çekme testi sonuçlarının ortalaması da 11,23 gf olarak gözlemlendi.



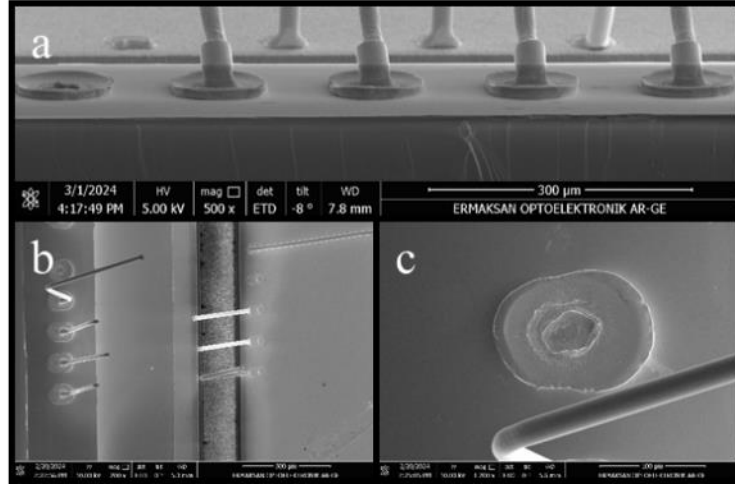
Şekil 3.34 : 0242 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

0242 çipinin dördüncü bölgesi optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.35’te verilmiştir. Çipin dördüncü bölümündeki 120 g ile bağlanılan teller incelendiğinde ikinci bölümdekine benzer bir hata ile karşılaşıldı. Buradaki hata mekanizmasının da aynı nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Birinci telde oluşan boşluk optik mikroskop ile net bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.35).



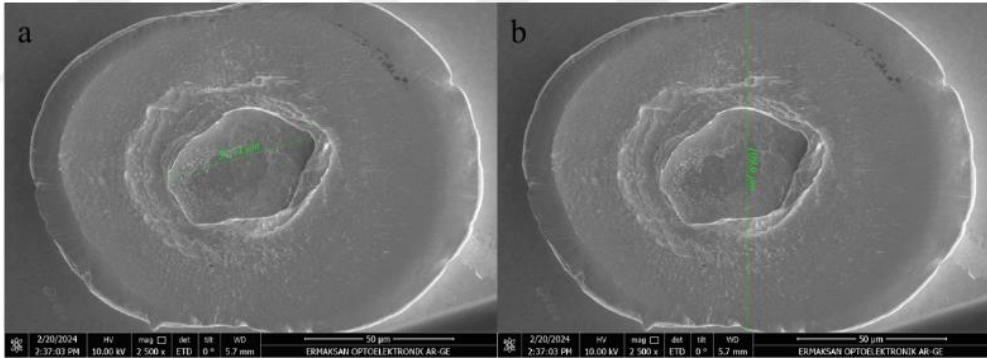
Şekil 3.35 : 0242 çipinin dördüncü bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

Şekil 3.36a’da görüldüğü gibi birinci teldeki hata net olarak belli olmaktadır. Tel bilyenin omuz kısmından kopmuştur ve bilyedeki boşluklar gözükmemektedir. Çekme testi sonucu ise 5,07 gf gibi çok küçük bir değer bulundu. Bu sonuç kötü bağlanmayı doğrular nitelikte bir değerdir. Ayrıca, bölgede 120 g bağlama gücü kullanılmıştır. bağlama gücü arttıkça bilye omuz yüksekliklerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.36 : 0242 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

Telin omuz kısmından kopmasının ardından oluşan boşluğun SEM ile görüntüsü (Şekil 3.37) ve ölçümü alındı. Oluşan boşluğun en uzun kısmı 51 µm olarak ölçüldü. Bu ölçüm neredeyse bilyenin dikeydeki ölçümünün hemen hemen yarısına denk gelmektedir.



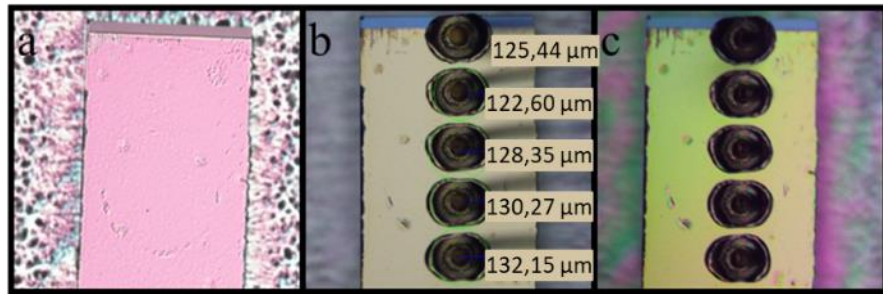
Şekil 3.37 : 0242 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı kopmasından sonra oluşan: a) tel boşluk çapının ölçümü, b) bilye çapının ölçümü.

Seri numarası 0092 olan çipe sırasıyla 130, 140, 150 ve 160 gf bağlama kuvvetleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : 130-160 g bağlama gücü ile 0092 çipine bağlı 25 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

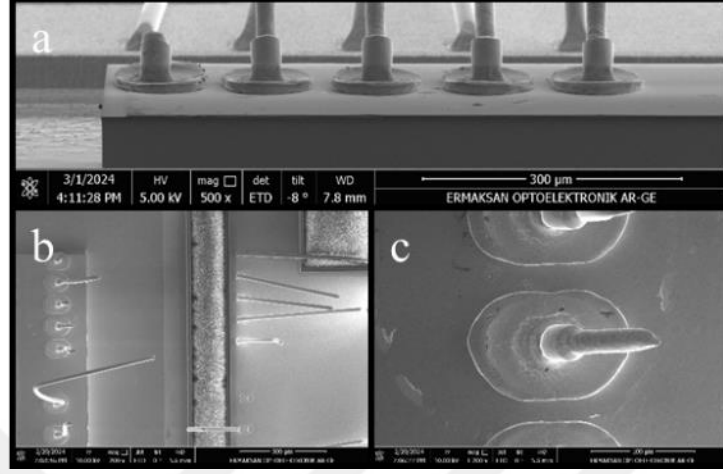
	Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama süresi (ms)	Tel çapı (µm)	Sıcaklık (°C)	Bağ gücü (gf)	Bağ gücü ortalaması (gf)
1.bölge	1	130	22	25	170	12,24	11,69
	2	130	22	25	170	11,45	
	3	130	22	25	170	11,09	
	4	130	22	25	170	11,84	
	5	130	22	25	170	11,85	
2.bölge	1	140	22	25	170	11,85	11,14
	2	140	22	25	170	10,88	
	3	140	22	25	170	11,94	
	4	140	22	25	170	11,37	
	5	140	22	25	170	9,66	
3.bölge	1	150	22	25	170	11,99	11,42
	2	150	22	25	170	11,17	
	3	150	22	25	170	11,04	
	4	150	22	25	170	11,61	
	5	150	22	25	170	11,30	
4.bölge	1	160	22	25	170	8,45	10,49
	2	160	22	25	170	11,16	
	3	160	22	25	170	11,65	
	4	160	22	25	170	9,90	
	5	160	22	25	170	11,31	

Çizelge 3.4’te belirtilen parametre ve sonuçların birinci bölgedeki optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.38’de verilmiştir. Tel kalınlığı 25 µm olan uygulamanın son çipinin ilk bölgesindeki bağlama tellerinde hata ile karşılaşılmamıştır. Tam tersine tel bağlantılarının gayet düzgün olduğu saptandı. Burada bağlama kuvveti 130 g olarak uygulandı. Bilye çapları yaklaşık 122-132 µm aralığındadır.



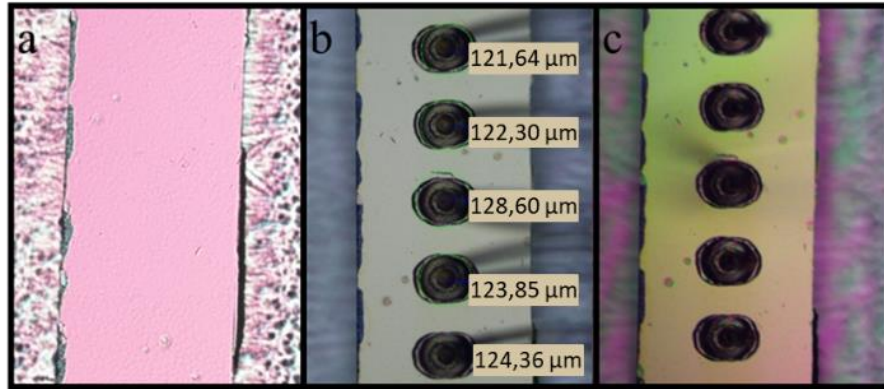
Şekil 3.38 : 0092 çipinin birinci bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

SEM görüntüleri de ortaya çıkan çekme testi sonuçlarını doğrular niteliktedir (Şekil 3.39). Çekme testinde beş adet telin ortalaması 11,69 gf olarak elde edildi. Bu sonuç şimdiye kadar yapılan çalışmalar arasında ulaşılan en iyi bağlanmaya sahip değeridir.



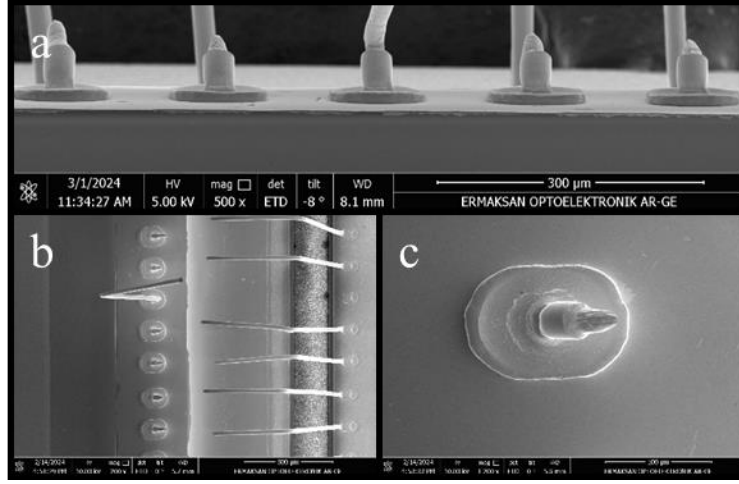
Şekil 3.39 : 0092 çipinin birinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

0092 çipin ikinci bölgesindeki optik mikroskop incelemelerinde bağlama hatasına rastlanmadı (Şekil 3.40). Uygulanan bağlama kuvveti 140 g'dır. Tel çekme testi ortalaması 11,14 gf olarak sonuçlandı.



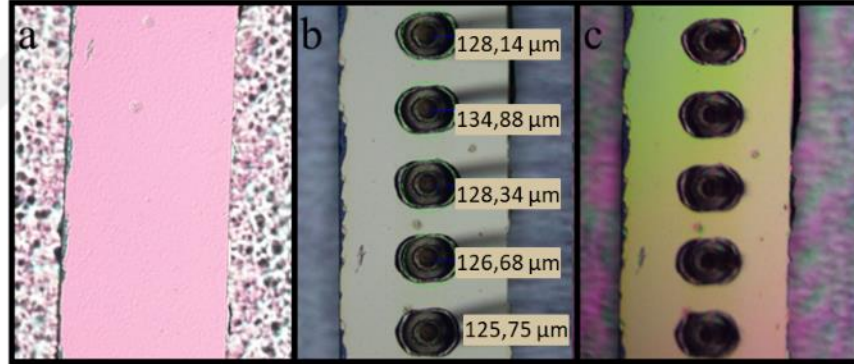
Şekil 3.40 : 0092 çipinin ikinci bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

Detaylı SEM görüntüleri incelendiğinde tellerin düzgün bir şekilde bağlandığı, çekme testinde ise doğru şekilde koptuğu gözlemlendi (Şekil 3.41).



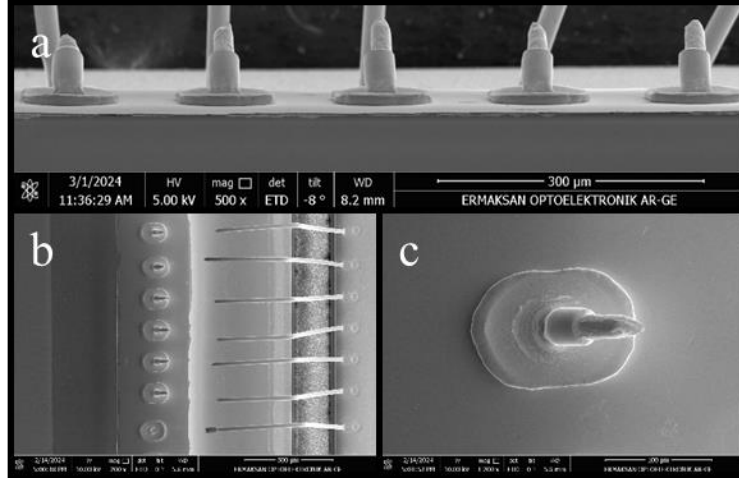
Şekil 3.41 : 0092 çipinin ikinci bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

0092 çipinin üçüncü bölgesindeki teller optik mikroskop altında incelendiğinde tellerin düzgün bir şekilde bağlandığı, bağlama sonrasında tel çekme testinde ise tellerin istenilen gibi koptuğu gözlemlendi (Şekil 3.42). Bu bölgedeki bağlama gücü 150 g'dır. Tel çekme testinin ortalaması da 11,42 gf bulundu.



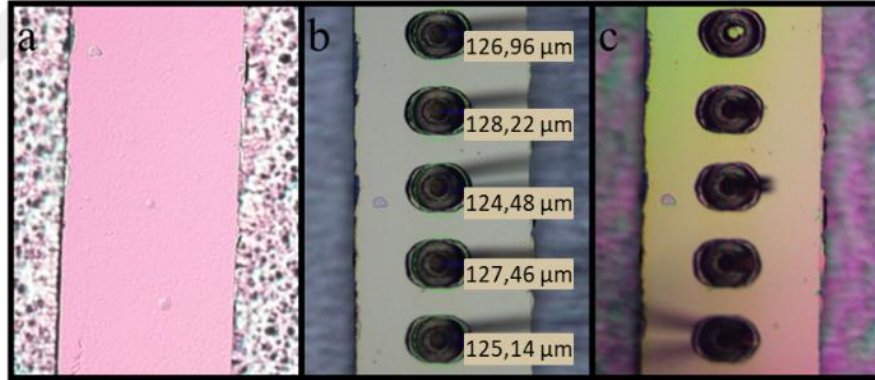
Şekil 3.42 : 0092 çipinin üçüncü bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

0092 çipinin üçüncü bölgesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde tel hatasının olmadığı, tel yüzeylerinin de düzgün biçimde olduğu ve tel çekme testi sonuçlarında uygun yerlerden koptuğu gözlemlendi (Şekil 3.43).



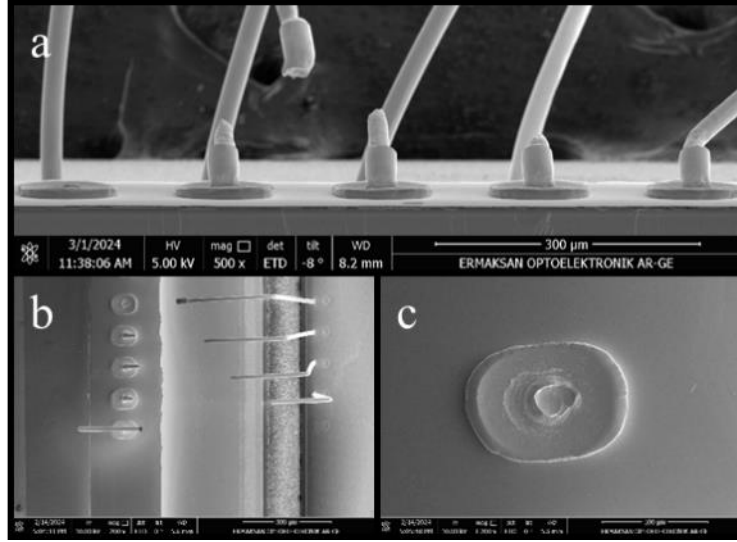
Şekil 3.43 : 0092 çipinin üçüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

0092 çipinin son bölgesinde 160 g bağlama gücü kullanılarak 25 µm'lik tel bağlama çalışmalarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.44'teki gibidir. Bu bölgedeki bağlama gücünün çok yüksek olmasından dolayı birinci telde hatalı bağlanma meydana gelmiştir. Çekme testi ortalaması 10,49 gf bulundu. Hatalı telin çekme testi sonucundaki oluşan boşluk açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.44c).



Şekil 3.44 : 0092 çipinin dördüncü bölgesi için için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere birinci tel bilyenin omzu ile birlikte koptuğu gözlemlendi (Şekil 3.45). Sonrasında ise çip üzerinde oluşan boşluk ile karşılaşıldı. Buradaki hatanın kaynağı bağlama gücünün çok yüksek olmasıdır. Bağlama gücünün düşük olması nasıl ki tel bağlamada hatalara neden oluyorsa, yüksek güçte aynı şekilde hatalara neden olmaktadır.



Şekil 3.45 : 0092 çipinin dördüncü bölgesine bağlı 25 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

3.2.2 Tel çapı 33 µm olan altın tel bağlama çalışmaları

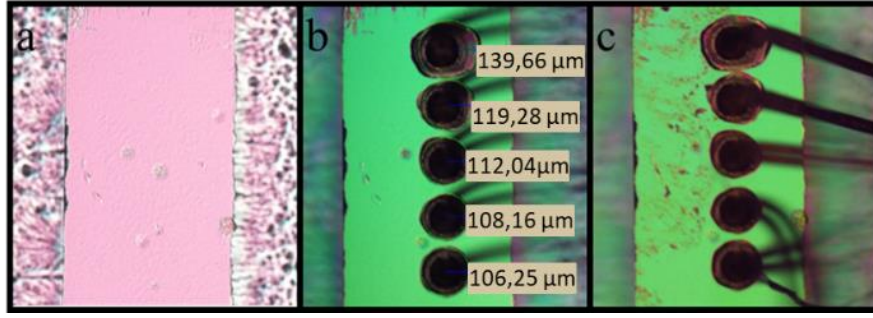
Tel çapı 33 µm olan tel için çalışmaları 10-70 g bağlama gücü, 22 ms bağlama süresi ve 170 °C’de gerçekleştirildi. Çalışma parametreleri ve çekme testi sonuçları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : 10-50 g bağlama gücü ile 0174 çipine bağlı 33 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama süresi (ms)	Tel çapı (µm)	Sıcaklık (°C)	Bağ gücü (gf)	
1.bölge	1	50	25	170	15,33	
	2	40	25	170	15,20	
	3	30	22	25	170	15,39
	4	20	22	25	170	14,70
	5	10	22	25	170	11,20

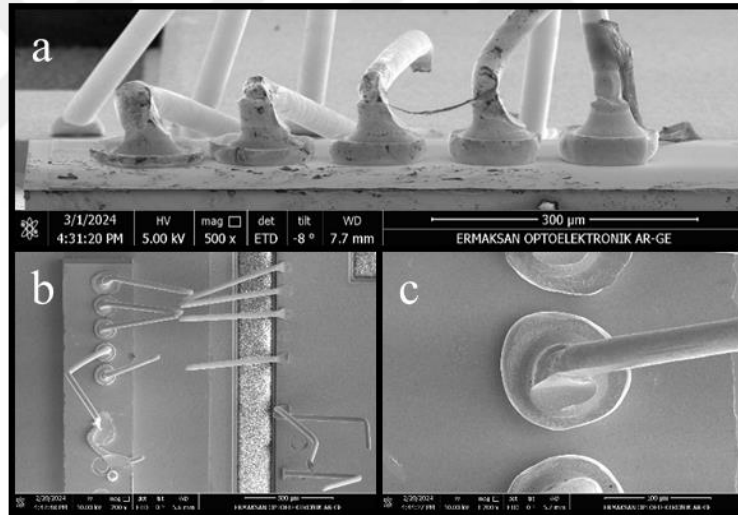
Bu bölümdeki her bir tel için farklı tel bağlama gücü uygulanmıştır. Bunun yapılmasının sebebi tek tel uygulamasında elde edilecek sonuçların gözlenmesidir.

Optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.46’da gösterilmiştir. Bu çip için yapılan çalışmalarda diğerlerinden farklı olarak her bir tel için farklı bağlama gücü uygulandı. Bağlama gücü sırasıyla birinci tel için 50 g olarak başlayıp, beşinci tele gelindiğinde 10 g bağlama gücüne düşüldü. Optik mikroskop incelemelerinden de anlaşılacağı gibi tel bağlama gücü azaldıkça bilye çapının da azaldığı görülmektedir (Şekil 3.46).



Şekil 3.46 : 0174 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

SEM görüntülerindeki gibi bağlama gücünün azalması bilye çapının da azalmasına neden olmuştur (Şekil 3.47). Yani parametre değerlerinde girilen bağlama gücünün önemi burada ortaya çıkmaktadır. Gücün yüksek değerlerde girilmesi tel bağlama sırasında oluşan bilyenin, bağlama yüzeyine o kadar çok bastırılması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.47 : 0174 çipinin birinci bölgesine bağlı 33 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

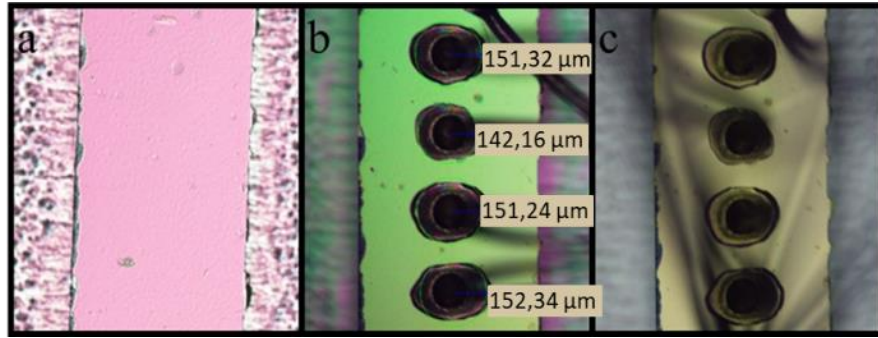
Burada uygulanan bağlama güçlerinde elde edilen çekme testi sonuçları; birinci tel için 50 g bağlama gücü uygulanıp, 15,33 gf dayanıklılık elde edildi. İkinci tel için 40 g bağlama gücüne karşılık 15,20 gf, üçüncü ve en fazla dayanıklılık sonucu veren tel olan 30 g bağlama gücüne 15,39 gf mukavemet elde edilmiştir. Dördüncü ve beşinci tel için 20 ve 10 g olarak uygulanan bağlama gücüne 14,7 ve 15,2 gf çekme testi sonucu elde edildi.

Diğer iki uygulama bölgesi olan 60 ve 70 g bağlanma güçleri ve çekme testi sonuçları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : 60 ve 70 g bağlama gücü ile 0226 çipine bağlı 33 µm çaplı tellerin çekme testi sonucunda elde edilen bağ gücü değerleri.

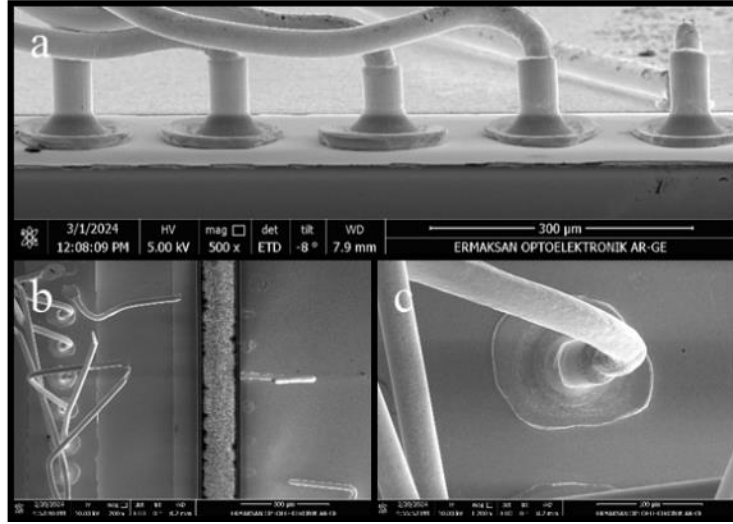
	Tel numarası	Bağlama gücü (g)	Bağlama Süresi (ms)	Tel çapı (µm)	Sıcaklık (°C)	Bağ gücü (gf)	Bağ gücü Ortalaması (gf)
1.bölge	1	60	22	25	170	12,40	14,60
	2	60	22	25	170	15,90	
	3	60	22	25	170	14,70	
	4	60	22	25	170	13,40	
	5	60	22	25	170	16,90	
2.bölge	1	70	22	25	170	-	15,50
	2	70	22	25	170	15,90	
	3	70	22	25	170	15,40	
	4	70	22	25	170	14,70	
	5	70	22	25	170	16,00	

Bu çipin bir ve ikinci bölgelerinde tel bağlama gerçekleştirilmedi. Dördüncü bölgenin birinci teli için de bağlama yapılamadı. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.48'de verilmiştir. Çip kodu 0226 olan yapılan çalışmalarda tel çapı 33 µm olarak uygulandı. Burada tel kalınlığı artırılarak farklı kalınlıklardaki tellerin bağlanabilirliği incelendi. Bu bölgede 60 g bağlanma gücü kullanıldı. Bilye çaplarının 25 µm tele göre çok daha büyük olup yaklaşık 142-150 µm aralığında olduğu görüldü.



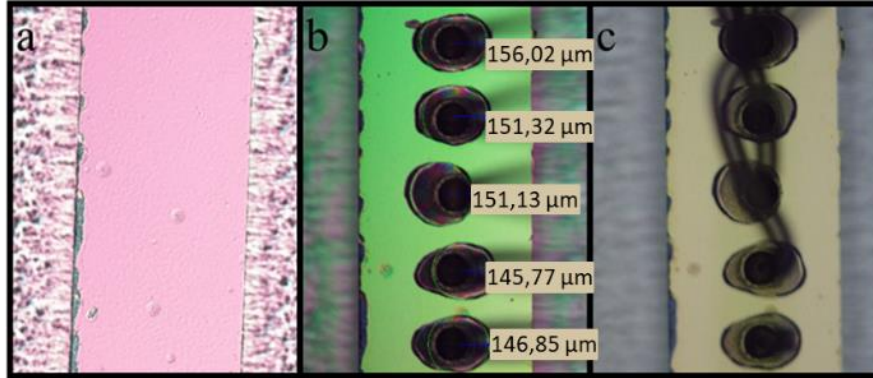
Şekil 3.48 : 0226 çipinin birinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlanma yüzeyi.

0226 çipinin birinci bölgesi için SEM görüntüleri Şekil 3.49'da verilmiştir. Bölgedeki incelemelerde tel hatası ile karşılaşılmadı. Çekme testlerinin ortalaması ise 14,66 gf olarak değerlendirildi. Uygulanan kuvvette bilye omuzlarının çok yüksek olduğu gözlemlendi. Ayrıca tel çapının artmasından dolayı bilye çaplarında orantılı olarak arttığı görüldü. Ortalama çapların neredeyse hepsinin 150 µm üzerinde olduğu ölçüldü.



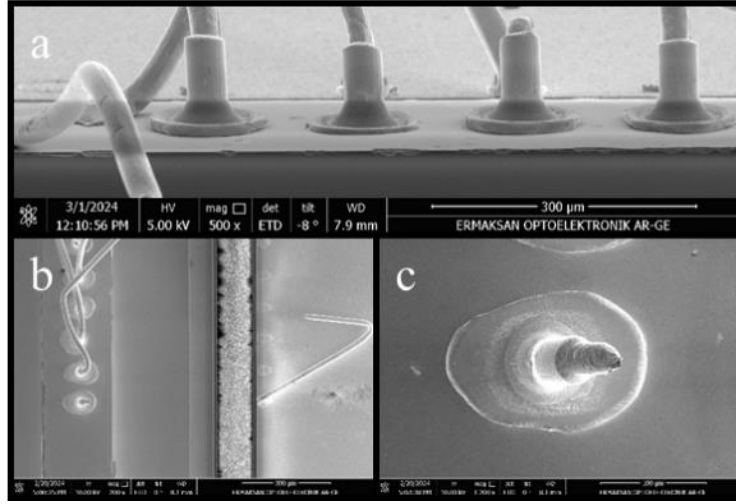
Şekil 3.49 : 0226 çipinin birinci bölgesine bağlı 33 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri: a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

0226 çipinin birinci bölgesinde tel gücünün 70 g olduğu çalışmalar için optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.50’de verilmiştir. Bu bölgede uygulanan bağlama kuvveti ise 70 g’dır. Optik mikroskop incelemesinde bilye çaplarının yüzeyinin yine 150 µm üzerinde olduğu gözlemlendi. Bağlama gücünün artmasından dolayı tel, oluşan bilyeler üzerinde simetrik olarak durmamıştır. Bu olay bu bağlama gücünde olmasa bile, daha sonraki yüksek bağlama güçlerinde hataya neden olmuştur ve 33 µm bağlama telinin daha yüksek bağlama gücü çalışmaları bu noktada sonlandırılmıştır.



Şekil 3.50 : 0226 çipinin ikinci bölgesi için optik mikroskop yüzey ve tel görüntüleri: a) tel bağlama öncesi çip yüzeyi, b) tel bağlama sonrası bilye çapları, c) çekme testi sonrası bilyeler ve bağlama yüzeyi.

Şekil 3.51’de SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere dört adet tel bağlandı. Bölgedeki çekme testi ortalaması ise 15,5 gf olarak bulundu. Tel omuzlarının yükseklik olarak çok fazla olduğu yani tele uygulanan gücün artık maksimum noktasına geldiği anlaşıldı.

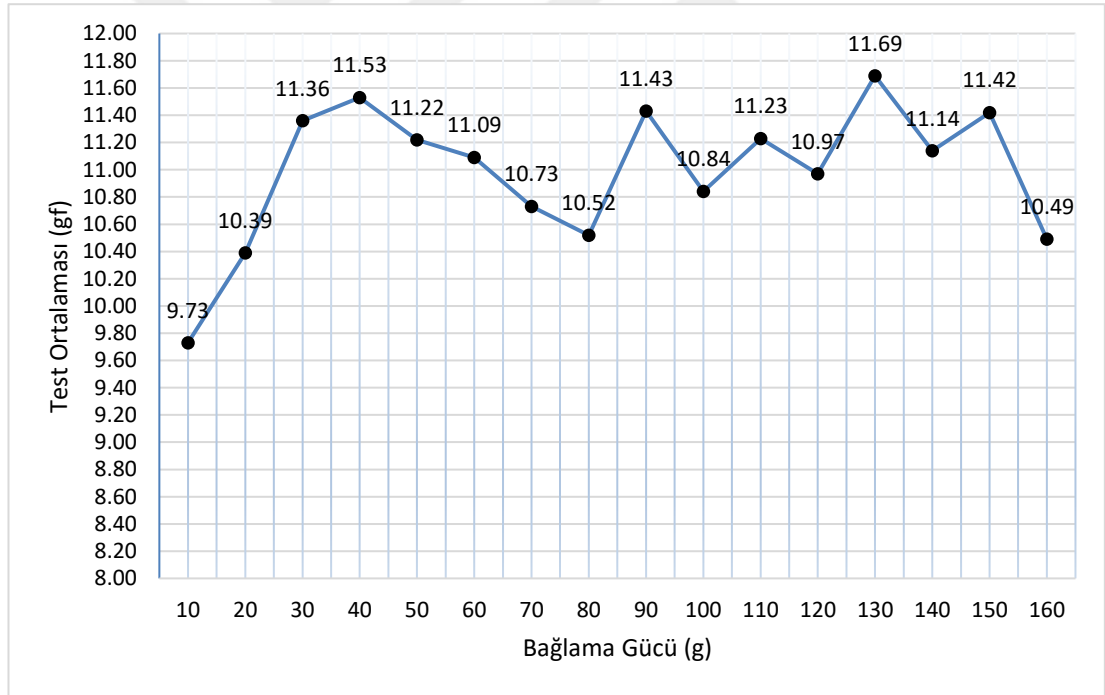


Şekil 3.51 : 0226 çipinin ikinci bölgesine bağlı 33 µm çaplı tellerin SEM görüntüleri:
a) bölgenin yatay, b) bölgenin dikey, c) detaylı tel görüntüsü.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada 25 ve 33 µm tel kalınlığı için tellerin tutunma mukavemeti detaylı olarak analiz edilip güvenilirliği sunulmuştur. Bağlanılan tüm tellerin MIL-STD-883K metot 2011.9 standardına uygun olduğu gözlemlendi. Her ne kadar standarda uygun bağlanmış olsa da bazı bölgelerde tel bağlama hataları meydana gelmiştir. Bu hataları en aza indirmek ve tutunma kuvvetini en iyi seviyeye çıkarıp güvenilirliği artırmak amacıyla çalışmalar gerçekleştirilip sonuçlandırıldı.

Kalınlığı 25 µm olan tel için bağlama aralığı 10-160 g olarak belirlendi. Çıkan sonuçların ortalaması Şekil 4.1’de verilmiştir.



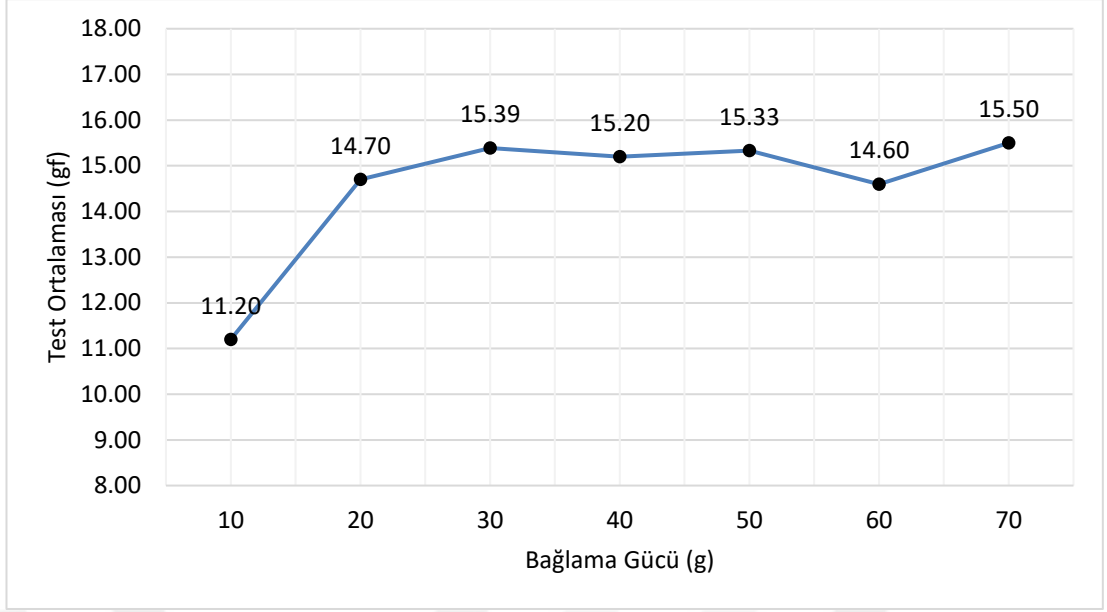
Şekil 4.1 : 25 µm tel kalınlığı için 10-160 g bağlama gücünün test ortalamaları

10 g uygulanan bağlama kuvvetinde birinci tel için 6,29 gf dördüncü tel için 5,73 gf çekme testi sonucu elde edildi. Hatalı kopan ve bölgedeki diğer teller incelendiğinde bağlanma kuvvetinin düşük olduğu, gözlemlendi. Tüm çalışmalar için en iyi bağlanmaların elde edildiği 0331 kodlu numunenin üçüncü bölgesinin test ortalaması 11,36 gf bulunmuş, dördüncü bölge içinse 11,53 gf değer elde edilmiştir. Üçüncü bölgede uygulanan bağlama kuvveti 30 g’dır. Dördüncü bölgede ise 40 g’dır. Kodu

0136 olan çip için uygulanan tüm bağlama kuvvetlerinde başarı yakalandığı, ortalama çekme testi sonuçlarının yaklaşık 11 gf olduğu gözlemlendi. Kodu 0242 olan çipin birinci ve dördüncü bölgelerinde tel hatalarıyla karşılaşmış olsa da çekme testi sonuçlarının yine yaklaşık 11 gf olduğu görüldü. 25 µm altın tel uygulamasının son 0092 kodlu çipinde ise çekme testi sonuçlarının en yüksek olduğu bölge gibi görülsede ilk bağlama telinin hatalı olduğu gözlemlendi. Bu bölgenin çekme testi ortalaması hatalı tel haricinde 11,69 gf'tir. Bu çip için çekme testi sonuçlarının 11 gf üzerinde olduğu görülse de bazı bağlantıların tutunma mukavemetinin düşük olduğu gözlemlendi. Bunun sebebi ise yüksek olarak uygulanan bağlama kuvvetidir. Kısaca 10 g bağlama kuvvetinden 40 g'a kadar olan bölgede artış görülmüş, bu bölgeden sonra 80 g bağlama kuvvetine kadar azalışla karşılaşmıştır. Artık 80 g'dan sonra düzensiz bağlanmalar başlamış ve anlamsız sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak değerlendirildiğinde 25 µm Au tel uygulamasının bağlama kuvveti artırıldığında yüzeye bağlanan bilyenin büyüdüğü yani temas yüzeyinin arttığı gözlemlendi. Bu durumun bağlanma mukavemetini artırdığı izlendi. Fakat çok yüksek bağlama kuvvetlerinde bilye ve omuz yüksekliğinin iyice azaldığı SEM görüntülerinde tespit edildi. Bu davranış kullanılacak olan yarıiletken cihazda hata yaratabileceği ve bilye altında fazla kuvvetten dolayı oluşan boşlukların tel hatalarına sebebiyet verebileceği görüldü. SEM görüntüleri ve çekme testi sonuçlarına göre 30-40 g bağlanma kuvveti aralığındaki teller en iyi bağlanma mukavemetine sahiptir.

Tel kalınlığı 33 µm olan çalışmalarda 10-70 g bağlama gücü aralığı uygulandı. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : 33 µm tel kalınlığı için 10-70 g bağlama gücünün test ortalamaları

33 µm telin 50 g bağlanma gücüne kadar düzgün bir şekilde bağlandığı, 60 g'dan sonra ise düzensiz bağlanmaların olduğu görüldü. 70 g bağlama gücünden sonra ise tel bağlama işlemleri gerçekleştirilememiştir. Bağlama gücünün çekme testi sonuçlarına etkisi SEM görüntüleri ile de incelenmiş ve desteklenmiştir. Bağlama gücü artırıldığında bilye ve omuz yüksekliğinin azaldığı, tutunma mukavemetinin arttığı gözlemlendi. Fakat belli bir bağlanma gücünden sonra bilye kalınlıklarının bağlanma yüzeyi olan çip ile neredeyse sıfır noktasına kadar geldiği gözlemlendi. Bağlanma mukavemeti güçlü olsa bile bir süre sonra ya da çipin çalışması esnasında hataların meydana gelmesi muhtemeldir. Bağlanılan tellere istinaden en verimli bağlamanın yine 30-40 g aralığında olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak yapılan çalışmalarda Au-Au metalurjisi kullanılarak 25 µm ve 33 µm tel en iyi bağlanma verimliliği 30-40 g bağlama parametresi kullanıldığında elde edildiği bulunmuştur.

Günümüzde kullanılan optoelektronik cihazlara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla kullanılacak olan tellerinde önemi bir o kadar artmıştır. Bağlanılan yüzey çeşitliliği ve piyasaya yeni giren kaplamalı teller üzerinde de aynı çalışmalar gerçekleştirilerek uygun bağlanma parametreleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Olson, D. L., Dixon, R. D., & Liby, A. L.** (Eds.). (2012). *Welding: theory and practice*. Elsevier.
- [2] **Harman, G.** (2010). *Wire Bonding in Microelectronics 3 Edition by George Harman: Wire Bonding in Microelectronics*. Digital Designs.
- [3] **Schneider-Ramelow, M., & Ehrhardt, C.** (2016). The reliability of wire bonding using Ag and Al. *Microelectronics Reliability*, 63, 336-341.
- [4] **Rosli, M. S. A. M., Rusdi, M. S., Hassan, M. H., Seman, S. A. H. A., Jamaludin, N., & Rahman, O. A.** (2023). Optimization of Wire-bonding Process Parameters for Gold Wire and Aluminium Substrate using Response Surface Method. *International Journal of Nanoelectronics and Materials (IJNeAM)*, 16(December), 405-422.
- [5] **Azahar, A. Z., Bakar, M. A., Jalar, A., & Ani, F. C.** (2023). Effect of Die Deflection during Au Wire Bonding Process on Bonding Quality in Overhang Semiconductor Package. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-10.
- [6] **Url-1** <<https://www.consegicbusinessintelligence.com/wire-bonder-equipment-market>>, erişim tarihi 03.04.2024
- [7] **Url-2** <<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-wire-bonder-equipment-market/72738/>>, erişim tarihi 03.04.2024
- [8] **Harman, G.** (1997). *Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes, Reliability and Yield*, 2nd Edition, McGraw- Hill, New York.
- [9] **Wang, C., & Sun, R.** (2009). The quality test of wire bonding. *Modern Applied Science*, 3(12), 50-56.
- [10] **May, G. S., & Sze, S. M.** (2004). *Fundamentals of semiconductor fabrication. (No Title)*.
- [11] **Adamczewska, J.** (1980). *Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej: praca zbiorowa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [12] **Rymaszewski, E. J., & Tummala, R. R.** (Eds.). (1989). *Microelectronics Packaging Handbook*. Van Nostrand Reinhold.
- [13] **Lai, Z., & Liu, J.** (2015). The nordic electronics packaging guideline. *Microelectron. Int*, 17.
- [14] **Url-3** <https://rsc.aux.eng.ufl.edu/_files/documents/3201.pdf>, erişim tarihi 04.04.2024
- [15] **Tummala, R. R., Rymaszewski, E. J., Klopfenstein, A. G.** (1997). *Microelectronics Packaging Handbook, (2nd edition, Part 2, pp.129-283) CH*, New York.

- [16] **Lanin, V. L., & Petuhov, I. B.** (2023). Modeling and Control of the Parameters of Ultrasonic Transducer for Connecting Wire Outputs.
- [17] **An, B., Zhou, H., Cao, J., Ming, P., Persic, J., Yao, J., & Chang, A.** (2023). A Review of Silver Wire Bonding Techniques. *Micromachines*, 14(11), 2129.
- [18] **Ting, W., Zongjie, H., Haiyang, X., & Yuefei, W.** (2023, August). Research of Super Fine Gold Wire Bonding. In *2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)* (pp. 1-4). IEEE.
- [19] **Tsau, C. H., Schmidt, M. A., & Spearing, S. M.** (1999). Characterization of low temperature, wafer-level gold-gold thermocompression bonds. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 605, 171.
- [20] **Pan, J., & Fraud, P.** (2004). Wire bonding challenges in optoelectronics packaging. *Proceedings of the 1st SME Annual Manufacturing Technology Summit: Dearborn, MI*.
- [21] **Lall, P., & Pecht, M.** (2018). Interconnections and Connectors. In *Handbook of Electronic Package Design* (pp. 239-291). CRC Press.
- [22] **Hund, T., & Plunkett, P.** (1985). Improving thermosonic gold ball bond reliability. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 8(4), 446-456.
- [23] **Rodwell, R., & Worrall, D. A.** (1985). Quality control in ultrasonic wire bonding. *Microelectronics International*, 2(3), 67-72.
- [24] **Feng, W., Meng, Q., Xie, Y., & Meng, Q.** (2009, March). Online quality evaluation of ultrasonic wire bonding using input electrical signal of piezoelectric transducer. In *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering* (Vol. 5, pp. 462-466). IEEE.
- [25] **Hang, C. J., Wang, C. Q., Tian, Y. H., Mayer, M., & Zhou, Y.** (2008). Microstructural study of copper free air balls in thermosonic wire bonding. *Microelectronic Engineering*, 85(8), 1815-1819.
- [26] **Singh, G.** (2021). *Effect of Heating on Bonding Characteristics for Copper Wire Bond Technology* (Doctoral dissertation, University of Malaya (Malaysia)).
- [27] **Landers, T. L.** (1994). Electronics manufacturing processes. (*No Title*).
- [28] **TERADA, S., & SUZUKI, K.** (2023). Au Wire Bonding Applicability in Integrated Circuits for Space Applications. *Journal of Evolving Space Activities*, 1, 86.
- [29] **Breach, C. D., & Wulff, F. W.** (2010). A brief review of selected aspects of the materials science of ball bonding. *Microelectronics Reliability*, 50(1), 1-20.
- [30] **Url-3** <<https://amtechmicro.com/technologies/wire-bonding/>>, erişim tarihi 04.04.2024
- [31] **Junhui, L., Xiaolong, Z., Linggang, L., Luhua, D., & Lei, H.** (2012). Effects of ultrasonic power and time on bonding strength and interfacial atomic

- diffusion during thermosonic flip–chip bonding. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2(3), 521-526.
- [32] **Zhang, G. G., Ang, X. F., Chen, Z., Wong, C. C., & Wei, J.** (2007). Critical temperatures in thermocompression gold stud bonding. *Journal of Applied Physics*, 102(6).
- [33] **Pecht, M., & Lall, P.** (1993). Mechanics of wirebond interconnects. In *Thermal Stress and Strain in Microelectronics Packaging* (pp. 729-802). Boston, MA: Springer US.
- [34] **Koeninger, V., Uchida, H. H., & Fromm, E.** (1995). Degradation of gold-aluminium ball bonds by aging and contamination. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 18(4), 835-841.
- [35] **Deley, M., & Levine, L.** (2004, July). The emergence of high volume copper ball bonding. In *IEEE/CPMT/SEMI 29th International Electronics Manufacturing Technology Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37585)* (pp. 186-190). IEEE.
- [36] **Gan, C. L., & Hashim, U.** (2015). Evolutions of bonding wires used in semiconductor electronics: perspective over 25 years. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 4412-4424.
- [37] **Long, Y., Twiefel, J., & Wallaschek, J.** (2017). A review on the mechanisms of ultrasonic wedge-wedge bonding. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 241-258.
- [38] **Krzanowski, J. E., & Murdeshwar, N.** (1990). Deformation and bonding processes in aluminum ultrasonic wire wedge bonding. *Journal of electronic materials*, 19, 919-928.
- [39] **Ji, H., Li, M., Wang, C., Guan, J., & Bang, H. S.** (2007). Evolution of the bond interface during ultrasonic Al–Si wire wedge bonding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3), 202-206.
- [40] **Qin, I. W., Reid, P., Werner, R. E., & Doerr, D.** (2002, July). Automatic wedge bonding with ribbon wire for high frequency applications. In *Proc. Semicon West* (pp. 97-104).
- [41] **Marenco, N., Kontek, M., Reinert, W., Lingner, J., & Poech, M. H.** (2013, September). Copper ribbon bonding for power electronics applications. In *2013 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [42] **Chen, C. H., & Chuang, T. H.** (2022). Optimization of Ag-alloy ribbon bonding—An approach to reliable interconnection for high power IC packaging. *Microelectronics Reliability*, 137, 114786.
- [43] **Url-4** <<https://www.fsbondtec.at/anwendungen/ribbon/?lang=en>>, erişim tarihi 05.04.2024
- [44] **Zhao, Z., Mo, D., Wu, J., Jiang, M., Zhang, J., & Xu, L.** (2017, October). Progress in ultrasonic bonding wire process and quality evaluation of bonding point. In *AOPC 2017: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications* (Vol. 10462, pp. 1312-1323). SPIE.

- [45] **Breach, C. D.** (2010). What is the future of bonding wire? Will copper entirely replace gold?. *Gold bulletin*, 43(3), 150-168.
- [46] **Url-5** <https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/bonding_wires/gold_bw/gold_bw_page.html>, erişim tarihi 07.04.2024
- [47] **Cao, J., & Wu, W. X.** (2017). Research and development prospect of ag alloy bonding wire in microelectronic packaging. *Precious Met*, 38, 7-11.
- [48] **Li, X. W., Cai, J. L., Chen, L., & Lin, J. T.** (2019). Analysis and comparison of performance of bonding wire in LED packaging. *China Light Light*, 49, 18-22.
- [49] **Papadopoulos, C., Villiger, T., Steiner, S., Prinz, J., Morabito, C., Cammarata, M., ... & Krinke, J.** (2020). Gold wire bond study for automotive application. *Microelectronics Reliability*, 114, 113899.
- [50] **Url-6** <https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/bonding_wires/alu_thin_wire/alu_thin_wire_page.html>, erişim tarihi 07.04.2024
- [51] **Kurtz, J.** (1984). Copper wire ball bonding. In *Proceedings of the 34th Electronic Component Conference* (pp. 1-6).
- [52] **Url-7** <<https://amkor.com/technology/interconnect/>>, erişim tarihi 08.04.2024
- [53] **Boettcher, T., Rother, M., Liedtke, S., Ullrich, M., Bollmann, M., Pinkernelle, A., ... & Klengel, R.** (2010, December). On the intermetallic corrosion of Cu-Al wire bonds. In *2010 12th Electronics Packaging Technology Conference* (pp. 585-590). IEEE.
- [54] **Zhou, H., Chang, A., Fan, J., Cao, J., An, B., Xia, J., ... & Zhang, Y.** (2023). Copper wire bonding: A review. *Micromachines*, 14(8), 1612.
- [55] **Yang, B., Motz, C., Grosinger, W., & Dehm, G.** (2010). Cyclic loading behavior of micro-sized polycrystalline copper wires. *Procedia Engineering*, 2(1), 925-930.
- [56] **Yang, B., Motz, C., Grosinger, W., & Dehm, G.** (2009). Stress-controlled fatigue behaviour of micro-sized polycrystalline copper wires. *Materials Science and Engineering: A*, 515(1-2), 71-78.
- [57] **Url-7** <https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/bonding_wires_documents/Brochure_Bonding_Wire.pdf>, erişim tarihi 09.04.2024
- [58] **Anderson, O. L., Christensen, H., & Andreatch, P.** (1957). Technique for connecting electrical leads to semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 28(8), 923-923.
- [59] **Lu, C.** (2013, October). Review on silver wire bonding. In *2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)* (pp. 226-229). IEEE.
- [60] **Manoharan, S., Patel, C., & McCluskey, P.** (2017, August). Advancements in silver wire bonding. In *International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition* (Vol. 58097, p. V001T05A004). American Society of Mechanical Engineers.

- [61] **Marengo, N., Kontek, M., Reinert, W., Lingner, J., & Poech, M. H.** (2013, September). Copper ribbon bonding for power electronics applications. In *2013 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [62] **Wei, C. C., Fan, C. T., Chiang, T. H., Chiu, M. K., & Ru, S. P.** (2009, October). A comparison study of high-frequency performance between ball bonding and ribbon bonding. In *2009 4th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference* (pp. 685-688). IEEE.
- [63] **Luechinger, C., Chen, R., Fu, J., Poncelet, B., Valentin, O., Walker, T. J., & Xu, T.** (2017). Aluminum–copper ribbon interconnects for power devices. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(9), 1567-1577.
- [64] **Url-8** < https://www.heraeus.com/media/media/het/media_het/products_4/alu_thick_wire/alubond_pdfs/Flyer_Aluminium_Bonding_Ribbon_for_Power_Electronics.pdf>, erişim tarihi 10.04.2024
- [65] **James, H.** (1980). Resolution of the gold wire grain growth failure mechanism in plastic encapsulated microelectronic devices. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 3(3), 370-374.
- [66] **Endicott, D. W., HK, J., & Nobel, F.** (1981). Effects of Gold-Plating Additives on Semiconductor Wire Bonding.
- [67] **Plunkett, P. V., & Dalporto, J. F.** (1982). *Low-temperature void formation in gold-aluminum contacts* (No. SAND-81-2642C; CONF-820521-2). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA).
- [68] **Pitt, V., & Needes, C.** (1982). Thermosonic gold wire bonding to copper conductors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 5(4), 435-440.
- [69] **Horowitz, S. J., JJ, F., & RM, R.** (1979). Recent developments in gold conductor bonding performance and failure mechanisms.
- [70] **Baker, J. D., Nation, B. J., Achari, A., & Waite, G. C.** (1981). On the Adhesion of Palladium Silver Conductors Under Heavy Aluminum Wire Bonds. *Int. J. Hybrid Microelectronics*, 155-160.
- [71] **Thompson, R., Cropper, D., & Whitaker, B.** (1981). Bondability problems associated with the Ti-Pt-Au metallization of hybrid microwave thin film circuits. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 4(4), 439-445.
- [72] **Fan, C., Abys, J. A., & Blair, A.** (1999). Gold and aluminum wire bonding to palladium surface finishes. *Circuit World*, 25(3), 23-27.
- [73] **Pitt, V. A., CRS, N., & RW, J.** (1981). Ultrasonic aluminum wire bonding to copper conductors.
- [74] **Goh, K. S., & Zhong, Z. W.** (2007). Two capillary solutions for ultra-fine-pitch wire bonding and insulated wire bonding. *Microelectronic engineering*, 84(2), 362-367.

- [75] **Zhong, Z. W., & Goh, K. S.** (2006). Investigation of ultrasonic vibrations of wire-bonding capillaries. *Microelectronics Journal*, 37(2), 107-113.
- [76] **Qian, Q., Luk, T., & Irving, S.** (2008, April). Wire bonding capillary profile and bonding process parameter optimization simulation. In *EuroSimE 2008-International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems* (pp. 1-7). IEEE.
- [77] **Hu, C. M., Guo, N. Q., Yu, J. D., & Ling, S. F.** (1998, December). The vibration characteristics of capillary in wire bonder. In *Proceedings of 2nd Electronics Packaging Technology Conference (Cat. No. 98EX235)* (pp. 202-205). IEEE.
- [78] **Gao, J., Kelly, R., Yang, Z., & Chen, X.** (2008, July). An investigation of capillary vibration during wire bonding process. In *2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging* (pp. 1-6). IEEE.
- [79] **Url-8** <<https://www.smallprecisiontools.com/en/products-solutions/semiconductor-tools-overview/bonding-capillaries-overview/?oid=108&lang=en>>, erişim tarihi 15.04.2024
- [80] **Url-9** <https://eurointech.ru/products/TPT/2016_Gaiser_Coorstek_-_Catalog.pdf>, erişim tarihi 09.15.2023
- [81] **He, T.** (2004). Situation and development trend of equipment for wire bonding. *Electronic Products Marufa-cturing*, 117(10), 12-14.
- [82] **Lizak, T., & Kociubiński, A.** (2015, September). Reliability tests of ultrasonic and thermosonic wire bonds. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015* (Vol. 9662, pp. 1214-1222). SPIE.
- [83] **Charles, H. K.** (2017). Advanced wire bonding technology: materials, methods, and testing. *Materials for Advanced Packaging*, 131-198.
- [84] **Lau, J.** (Ed.). (2012). *Thermal stress and strain in microelectronics packaging*. Springer Science & Business Media.
- [85] **Harman, G. G.** (1991). *Reliability and yield problems of wire bonding in microelectronics: the application of materials and interface science*. na.
- [86] **Maluf, N., & Williams, K.** (2004). *An introduction to microelectromechanical systems engineering*. Artech House.
- [87] **Chen, J.** (2002). Real-time ultrasonic testing of quality of wire bonding. *Insight*, 44(7), 443-445.
- [88] **Lin, T. Y., Leong, W. S., Chua, K. H., Oh, R., Miao, Y., Pan, J. S., & Chai, J. W.** (2002). The impact of copper contamination on the quality of the second wire bonding process using X-ray photoelectron spectroscopy method. *Microelectronics reliability*, 42(3), 375-380.
- [89] **Strength, B.** (1989). MIL-STD-883E Method 2011.7. *US Military*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa TURHAN

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Balıkesir Üniversitesi, Fizik
- **Yüksek Lisans** : 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Fizik

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Optik Sistemler Mühendisi/ERMAKSAN, 2016 -

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- TURHAN, M. ve DOĞRUYOL, Z. (2024). Optoelektronikte Altın Tel (Çap: 25 µm) Bağlamanın Geliştirilmesi ve Güvenilirliği, 7. Uluslararası Tarım, Çevre ve Sağlık Kongresi - ICAEH, (s. 229). Bursa, Türkiye : 30 Mayıs - 1 Haziran.

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- TEYDEB 1501: 915 nm Dalgaboylu Yüksek Güçlü Lazer Diyotun Geliştirilmesi
- TEYDEB 1501: 800 mm² x 800 mm² den Büyük Üretim Alanına Sahip Otomatik Toz Sirkülasyon Sistemli Eklemeli 4 Lazerli Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi
- 50W Fiber Bağlı Yarıiletken Lazer Diyot Geliştirilmesi
- 100W Fiber Bağlı Yarıiletken Lazer Diyot Geliştirilmesi
- 808 nm Yüksek Güçlü Lazer Diyot Stack Modül Geliştirilmesi (G-Stack)
- 808 nm Yüksek Güçlü Lazer Diyot Stack Modül Geliştirilmesi (Z-Shaped)