GAAS TABANLI YARI İLETKEN AYGITLAR İÇİN DÜŞÜK DİRENÇLİ OHMİK KONTAK YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ

Koray KESER

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Koray KESER'in GAAS TABANLI YARI İLETKEN AYGITLAR İÇİN DÜŞÜK DİRENÇLİ OHMİK KONTAK YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışması 16/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**Unvan Adı Soyadı**	**İmza**
Üye	: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI	
Üye	: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN	
Üye	: Doç. Dr. Tahir ÇOLAKOĞLU	

Prof. Dr. Murat TANIŞLI
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

16/01/2023

DANIŞMAN ONAYI

Danışmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans öğrencisi Koray KESER, GAAS TABANLI YARI İLETKEN AYGITLAR İÇİN DÜŞÜK DİRENÇLİ OHMİK KONTAK YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

ÖZET

GAAS TABANLI YARI İLETKEN AYGITLAR İÇİN DÜŞÜK DİRENÇLİ OHMİK KONTAK YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ

Koray KESER

Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Ohmik kontaklar GaAs tabanlı yarı iletken aygıtların performansını etkileyen önemli bir bileşendir. Düşük dirençli ohmik kontaklar, aygıttan alınan verimi arttırarak, aygıtın kullanım ömrünün uzamasını sağlar. Üretilen bu kontakların direnç değerlerinin uygun metodla ölçülüp, termal yaşlandırması yapılarak, kontağın termal dayanıklılığının belirlenmesi; uygulanan metalizasyon yapısının geliştirilmesini sağlar.

Bu tez çalışmasında, epitaksiyel olarak büyütülmüş p-tipi katkılı GaAs örneklerine elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile Ti/Pt/Au kaplanırken, n-tipi GaAs örneklerine AuGe/Ni/Au kaplaması yapıldı. Kontak yapılarının dirençleri TLM metoduyla ölçülerek, kontaklar yüksek sıcaklık fırınında termal yaşlandırmaya tabii tutuldu. P- ve n-tipi kontak için düşük spesifik kontak özdirenci değerleri 10^{-6} Ω.cm² mertebesinde elde edildi. Metalizasyon şemalarının test edilip geliştirilebilmesi için gerekli olan kontak yaşlandırması sonunda, p-tipi kontağın n-tipi kontaktan daha erken bozunduğu görüldü. Yapılan SEM ve EDS analizlerinde p-kontakta oksitlenmelerin oluştuğu, metallerin p-GaAs katmanına difüzyonla inerek yüksek dirençli fazlar oluşturduğu tespit edildi. N-kontakta ise metal-yarı iletken arayüzeyinde meydana gelen fazların akım iletimini olumsuz etkilediği sonucu çıkarıldı.150 saat boyunca yapılan termal test ile belirlenen bozunma kriterine ulaşılmadığı için yaşlandırma adımlarına devam edilmesi gerekli görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Yarı iletken aygıtlar, GaAs, Ohmik kontak, Özdirenç, Yaşlandırma

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF LOW RESISTANCE OHMIC CONTACT STRUCTURES FOR GAAS BASED SEMICONDUCTOR DEVICES

Koray KESER

Department of Physics
Programme in Solid State Physics
Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa KULAKCI

Ohmic contacts are an important component that affects the performance of GaAs-based semiconductor devices. Formation of low resistance contacts increase both the efficiency and longevity of the device. Determining the thermal stability as well as degradation of the contacts by measuring the resistance values with an appropriate method is viable for the development of the reliable and efficient metallization structures.

In this thesis, using e-beam evaporation technique, Ti/Pt/Au and AuGe/Ni/Au were evaporated as an Ohmic contact structures for p- and n-type GaAs samples, recpectively. Contact resistances of both fresh (un-aged) and thermally aged samples were measured using TLM method. Low specific contact resistivity values in the range of 10^{-6} $\Omega.cm^2$ were obtained both for the p- and n-type contacts. The contacts were subjected to thermal aging in a high temperature furnace. Thermal aging studies revealed that, for the chosen contact structures, n-type contacts have much higher tolerance to the thermal aging compared to the p-type contact structures. From SEM and EDS measurements, oxidation and formation of high resistive phases due to metal diffusion to the p-GaAs layer were observed in the p-contacts. We came up with a conclusion that, different phases formations at the metal-semiconductor interface of the n-contacts has an adverse effect on the current conduction. However, we could get an efficient contacts having lowest contact resistance as well as with much enhanced aging tolerances. Moreover, using comparative aging tests we have observed that 150 hours of annealing at chosen aging temperature could not satisfy the contact degradation criteria.

Keywords: Semiconductor devices, GaAs, Ohmic contact, Resistivity, Aging

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez aşamalarında bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli danışmanım Doç. Dr. Mustafa Kulakcı'ya çok teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarımı yaptığım ERMAKSAN Optoelektronik Ar-Ge Merkezi Yarı İletken Aygıtlar Geliştirme Müdürlüğü'nde, yaptıkları değerli katkılarından dolayı, başta Dr. Alev Kızılbulut olmak üzere, mesai arkadaşlarım Dr. Barış Bulut'a, Alper Yanılmaz'a, Evren Kınık'a ve Hasan Mert Bayramlı'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarımın bir kısmını gerçekleştirdiğim Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda, bana desteğini esirgemeyen başta Onur Şenel olmak üzere, beraber çalıştığım tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca alt yapı ve laboratuvar imkânlarından yararlandığım, ERMAKSAN A. Ş.' ye tüm desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında beni yalnız bırakmayan ve destekleyen babam Ayhan Keser ve annem Ayten Keser'e sonsuz şükranlarımı gönderiyorum.

Bu tezi, bu sene ilköğretim birinci sınıfa başlayacak olan sevgili kızım Aylin Keser'e ithaf ediyorum.

Koray KESER

16/01/2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı"yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Koray KESER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI I

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI II

DANIŞMAN ONAYI III

ÖZET IV

ABSTRACT V

TEŞEKKÜR VI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ VII

İÇİNDEKİLER VIII

TABLOLAR DİZİNİ X

ŞEKİLLER DİZİNİ XI

GÖRSELLER DİZİNİ XV

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ XVII

1. GİRİŞ 1

2. METAL-YARI İLETKEN KONTAKLAR 3

2.1. Metal- Yarı İletken Kontaklar Teorisi 3

2.2. Metal-Yarı İletken Kontak Direnci Ölçüm Metodları 8

2.3. Metal-Yarı İletken Kontaklarda Yaşlandırma 15

3. DENEYSEL YÖNTEMLER 19

3.1. Litografi Süreçleri 20

3.1.1. Fotolitografi ve örnek hazırlama süreci 23

3.1.2. Alttaş aşındırma süreci 24

3.1.3. Pasivizasyon süreci 24

3.1.4. Dielektrik aşındırma süreci 25

3.1.5. Metalizasyon süreci 26

3.1.6. Hızlı ısıl işlem (tavlama) süreci 27

3.2. Direnç Ölçümü 30

3.3. Kontak Yaşlandırma 36

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 39

4.1. P-Kontak Yaşlandırma Sonuçları 39

4.2. N-Kontak Yaşlandırma Sonuçları 53

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 68

KAYNAKÇA 71

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Bazı özdirenç (ρc) ölçüm metodlarının karşılaştırılması (Berger, 1972) 11
Tablo 3.1. Ardışık olarak yapılan adımlardaki ısıl işlem parametreleri..... 28
Tablo 4.1. P-GaAs örneğine ait yüzey direnci ölçüm sisteminden elde edilen veriler. 39
Tablo 4.2. Tavlanmamış haldeki p-GaAs örneklerine ait değerler. 40
Tablo 4.3. Tavlanmış haldeki p-GaAs örneklerinin ölçüm sonuçları. 40
Tablo 4.4. İlk 50 saat yaşlandırma sonunda p-kontaklardan elde edilen ölçüm sonuçları 43
Tablo 4.5. 100 saatlik yaşlandırma sonrası p-kontak için hesaplanan ölçüm değerleri 44
Tablo 4.6. 150 saatlik yaşlandırma sonrası hesaplanan kontak parametrik değerleri. 45
Tablo 4.7. Tavlama öncesi-sonrası ve farklı termal yaşlandırma sürelerinde elde edilen ölçüm sonuçlarının ortalamaları..... 46
Tablo 4.8. Yaşlandırmadan önceki ve sonraki EDS spektrumu sonuçlarının karşılaştırılması 50
Tablo 4.9. Tavlanmış n-GaAs örneklerine ait ölçümler..... 54
Tablo 4.10. 50 saatlik yaşlandırma sonunda n-tipi kontağın hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri..... 55
Tablo 4.11. 100 saatlik yaşlandırma sonunda hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri. 56
Tablo 4.12. 150 saatlik yaşlandırma sonunda hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri. 58
Tablo 4.13. Yaşlandırma öncesi ve sonrası adımlarda ortalamaları alınmış ölçüm sonuçları. 59
Tablo 4.14. Metalizasyon üzerinde farklı noktalardan alınan yaşlandırmadan önceki ve sonraki EDS analizinden elde edilen elementlerin kütlesel ve atomik değişim yüzdelikleri. 62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Metal-yarıiletken kontaklarda enerji bant diyagramlarının farklı şekilde hizalanmaları görülmektedir. a) Biriktirme veya akümülasyon, b)nötral, c)tüketim veya deplesyon kontak tipi. Yukarıdaki ve aşağıdaki parçalar enerji band diyagramlarının sırasıyla kontaktan önceki ve sonraki halini göstermektedir (Schroder D. , 2006). 4

Şekil 2.2. Metal ile n-tipi yarı iletkenin (a) kontaktan önceki (b) kontaktan sonraki ideal enerji bant diyagramı ($\Phi m<\Phi s$ durumunda) (H. Çetin, 2012). 5

Şekil 2.3. N-tipi yarı iletkende artan katkılama oranlarına bağlı olarak tüketim tipi ohmik kontaklarda oluşan akım iletim mekanizmaları. Elektronlar siyah yuvarlaklarla gösterilmiştir, oklar da elektronların hareket yönünü göstermektedir. 7

Şekil 2.4. Dikey test yapısında dağılan akım a)'da; düzlemsel test yapısı b)'de gösterilmiştir (d kontağın çapı, t yarı iletkenin kalınlığı, LT transfer uzunluğu) (Sheremet, 2014). 9

Şekil 2.5. Dört kontak yöntemiyle özdirenç ölçümünün prensibi (Sheremet, 2014). 9

Şekil 2.6. CBKR ölçüm şemasının yukardan görünüşü (Slimane Oussalah, 2005). 10

Şekil 2.7. Yarıiletken mesa yapısı, akımın yarı iletken üzerinde kenarlara yayılmadan metal kontaklar arasında ilerlemesine imkan tanır (M. Khani, 2012). 11

Şekil 2.8. TLM modelinde mesa yapısında bulunan dirençlerin birbiriyle seri bağlı olduğu görülmektedir. 12

Şekil 2.9. Kontak direnci ölçümünden elde edilen grafikte x ekseni kontaklar arasındaki mesafeyi gösterirken, y ekseni kontak direncini gösterir (M. Khani, 2012). 14

Şekil 2.10. Akım yoğunluğu sarıyla gösterilen yerlerde en fazla, koyu renkli olan yerlerde en azdır (Marinkovic, 2013). 14

Şekil 2.11. InGaAsP/InP DH LED'lerinin sıcaklık bağımlı bozunma oranları. Doğrusal çizgi en küçük kareler metoduyla hesaplanan sonuçları göstermektedir (S. Yamakoshi M. A., 1979), (S. Yamakoshi M. A., 1981). 18

Şekil 3.1. Büyütmeyle başlayıp fabrikasyon, yaşlandırma ve ölçümle biten deneysel süreçler. 19
Şekil 3.2. P-kontak çalışması yapılan epi-katman yapısı 19
Şekil 3.3. Ardışık iki TLM deseni için litografi süreçlerini gösteren akış şeması. Fotolitografiyle başlayan mesa deseni aktarma 1 numarayla, GaAs aşındırma 2 numarayla, yüzeyde kalan fotorezisti temizleme 3 numarayla, pasivasyon kaplama 4 numarayla, kontak kapısı açmak için oluşturulan maske 5 numarayla, pasivasyon aşındırma sonrası oluşan yapı 6 numarayla, yüzeydeki fotorezisti kaldırma 7 numarayla, metal kaplama için oluşturulan maske 8 numarayla, metal kaplanmış örnek yüzeyi 9 numarayla, direnç ölçümleri için kullanılacak TLM yapısının son hali 10 numarayla gösterilmiştir. 20
Şekil 3.4. ERMAKSAN A.Ş' de kontak ölçümü için KLayout programında tasarlanan dikdörtgensel ve dairesel TLM desenleri 21
Şekil 3.5. Alttaş olarak tüm yüzeyi ve birim detayını gösteren maske süreci. A: Mesa maske tasarımı ve TLM desenlerinin aktarılacağı bölgeler, B: Metal kapısı açma maskesi ve TLM desenleri, C: Metal kontak kaplama maskesi 22
Şekil 3.6. Litografi süreçlerinde maskesiz hizalama yapmayı sağlayan litografi cihazı 23
Şekil 3.7. Aşındırma derinliğini gösteren profilometre ekran görüntüsü 24
Şekil 3.8. A: Koyu renkli bölgeleri fotorezist kaplı alttaş yüzeyi, B: Koyu renkli bölgeleri aşındırılmış GaAs yüzeyi (skala bar 100 mikron), C: Si_3N_4 kaplanmış alltaş yüzeyi, D: Fotorezist kaplı metal kapısı aşındırma maskesinin 20X ile çekilmiş optik mikroskop görüntüsü 25
Şekil 3.9. Dairesel TLM desenlerinden alınan aşındırma derinliği profilinde 100 nm aşındırma yapıldığı görülmektedir. 26
Şekil 3.10. Elektron demet buharlaştırma sisteminin haznesinde bulunan, değişik açılarda durabilen ve gezegensel dönüş yapabilen örnek tutucu (solda) ve malzemenin buharlaştığı pota (sağda) görülmektedir. 27
Şekil 3.11. K-tipi ısılçift ile sıcaklık ölçümü yapan hızlı ısıl işlemci. 28

Şekil 3.12. Sıcaklığın süreye göre değişimini gösteren tavlamanın sıcaklık- zaman profilinde yatay eksen saniye cinsinden geçen süreyi, dikey eksen de beyaz çizgi için santigrat cinsinden ölçülen sıcaklığı göstermektedir. 29
Şekil 3.13. E: Si_3N_4 aşındırma sonrası, örneğin 10X büyütme ile optik mikroskopla alınmış görüntüsü, F: Koyu renkli bölgeleri fotorezist kaplı örneğin develop sonrası 5X' te alınan görüntüsü, G: Metal kaplandıktan sonra lift-off edilen örneğin optik mikroskop görüntüsü, H: Fabrikasyon adımları tamamlanmış örneğin mikroskop görüntüsü (skala bar: 100 μm). 29
Şekil 3.14. Litografi süreçleri tamamlanmış p-GaAs üzerinde bulunan bir ohmik kontak örneğine ait TLM desenlerinin SEM görüntüsü solda, alttaş üzerindeki tüm TLM desenlerinin fotoğraf görüntüsü sağda yer almaktadır. 30
Şekil 3.15. 4-telle yapılan ölçümde akımın ve voltajın direnci ölçülen aygıta (DUT) nasıl bağlandığını gösteren şema (Ref: Cirris.com). 32
Şekil 3.16. 2 telle ve 4 telle aynı örnekten alınan ölçüm sonuçlarını gösteren grafik. 33
Şekil 3.17. Alltaş üzerinde ohmik kontak örneklerinin numaralarıyla birlikte bulundukları konumları görülmektedir. 36
Şekil 4.1. Epitaksiyel olarak büyüttürülmüş p-katkılı GaAs üzerinden alınan yüzey direnç ölçüm değerlerini gösteren eşyüzey eğrilerinin haritalandırılmış üstten görünüşü solda, yandan görünüşü sağdadır. 39
Şekil 4.2. Tavlanmış p-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar doğrunun üzerinde veya doğrunun çok yakınında bulunmaktadır. Akım kontaklar arasında yarı iletkenin yüzey direncinden başka bir dirençle karşılaşmadığı için grafik doğrusal ve farklı noktalarda tutarlıdır..... 41
Şekil 4.3. Tavlamadan önceki ve tavlamadan sonraki I-V ölçüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. 42
Şekil 4.4. P-kontağın yaşlandırmadan önceki ve yaşlandırma sırasında çizdirilen akım-voltaj eğrileri. Kontak yaşlandıkça I-V eğrisinin eğiminin azaldığı ve Voltaj eksenine yaklaştığı görülmektedir. 44

Şekil 4.5. A: Tavlanan 1.16 kodlu TLM ohmik kontak görüntüsü (10x), B: 50 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü, C: 100 saat yaşlandırılmış 1.16 TLM kodlu örneğe ait yüzey görüntüsü, D: 150 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü (skala bar: 100 μm). 45

Şekil 4.6. Tavlanmış p-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar bir doğru üzerindeyken, yaşlandırmaya devam edildikçe noktaları birleştiren kesikli çizgilerin doğrusallıktan uzaklaştığı ve dağınık hale geldiği görülmektedir. 47

Şekil 4.7. 2DEG' nin oluşumunu gösteren bant diyagramı. Ec iletim bandını, EF fermi seviyesini, EV değerlik bandını göstermektedir. AlGaAs'ın iletim bandında bulunan elektronlar GaAs'a geçerek pozitif hale gelmektedir (Greuter, 2009). 52

Şekil 4.8. Tavlanmamış (solda) ve tavlanmış (sağda) n-kontaklara ait I-V grafikleri. 53

Şekil 4.9. Tavlanmamış n-tipi kontakta ölçülen direncin voltaja bağlı değişimi. 54

Şekil 4.10. Tavlanmış n-GaAs örnek için kontak direnci-mesafe grafiği. 55

Şekil 4.11. N-kontağa ait akım-voltaj grafiği. Tavlamadan sonra ohmik özellik en fazla iken, termal işlem uygulandıkça ohmik özellik azalmaktadır. 56

Şekil 4.12. A: Tavlanan 1.18 kodlu TLM örneğinin ohmik kontak görüntüsü (10x), B: 50 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü, C: 100 saat yaşlandırılmış 1.18 TLM kodlu örneğe ait yüzey görüntüsü, D: 150 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü (skala bar: 100μm). 57

Şekil 4.13. Tavlanmış n-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar bir doğru üzerindeyken, yaşlandırmaya devam edildikçe noktaları birleştiren çizginin doğrusallıktan uzaklaştığı görülmektedir. Noktaların doğrusallıktan uzaklaşması p-kontaktakine göre daha azdır. 58

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Sağda dokunuş istasyonu ve solda ölçüm yapılan akım kaynağıyla ölçüm yapılan program arayüzü görülmektedir. 31
Görsel 3.2. Yaşlandırılmış p-GaAs örneğinden ölçüm alınırken dokunuş istasyonunun kamerasından alınan ekran görüntüsü..... 34
Görsel 3.3. 400 °C'de 90 saniye tavlanmış n-kontağa ait direnç-mesafe grafiği..... 35
Görsel 3.4. 420 °C'de 60 saniye tavlanmış p-kontağa ait direnç-mesafe grafiği..... 35
Görsel 3.5. Dört bölüme ayrılmış GaAs yaşlandırma örnekleri..... 37
Görsel 3.6. Yaşlandırmadan önce A'da 3 numaralı n-kontak örneği, B'de 2 numaralı p-kontak örneği görülmektedir. 38
Görsel 4.1. Yaşlandırmadan önce, tavlanmış p-GaAs örneğinin yüzeyinden EDS ölçümü yapılan noktalar. 48
Görsel 4.2. 150 saat yaşlandırılmış p-GaAs örneğinin EDS'le incelenen bölgeleri. 48
Görsel 4.3. Yaşlandırılmamış dikdörtgensel metal kontağın üzerinden alınan EDS sonuçlarında Au pikinin en fazla olduğu görülüyor. 49
Görsel 4.4. TLM üzerinde bulunan spot 2 noktasına ait EDS sonuçları. 49
Görsel 4.5. Yaşlandırmadan önce, tavlanmış haldeki örneğin kesitten görüntüsü A'da, 150 saat yaşlandırılmış örneğin kesitten görüntüsü B'de gösterilmektedir. A'da metal katmanlaryla p+ GaAs büyütme katmanı ayırt edilebilmektedir. B'de ise metal katmanları ayırt edilememekle birlikte, bazı metallerin p+GaAs katmanına difüz ettiği görülmektedir. 51
Görsel 4.6. Tavlanmış n-GaAs örneğinin yaşlandırmadan önceki SEM görüntüsü ve analizi yapılan EDS noktaları. 60
Görsel 4.7. 150 saat yaşlandırılmış n-kontağa ait SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan noktalar. 60
Görsel 4.8. Tavlanmış n- kontak örneğinin metalizasyon üzerindeki spot 2 noktasından alınan EDS spektrumu 61
Görsel 4.9. 150 saat yaşlandırılmış n-kontağa ait EDS spektrumu. 61
Görsel 4.10. 150 saat yaşlandırmadan sonra n-kontağa ait EDS spektrumu 61
Görsel 4.11. N-kontak örneğinin tavlanmadan önce kesitten görüntüsü. Metal kaplamalar ayrı ayrı seçilebilmektedir. Ölçülen metal kalınlıklarının

kaplama yaparken girilen değerlerle yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. 64
Görsel 4.12. N-kontağa ait tavlanmış örneğin yaşlandırmadan önceki SEM görüntüsü. TLM deseni ikiye kesildikten sonra kesitte Ni, AuGe ile Au arasında belirgin olarak görülmektedir. 65
Görsel 4.13. 150 saatlik n-kontak yaşlandırmasından sonra metal-yarı iletken arayüzeyinde bozulmaların ve farklı fazların oluştuğu bölgeler görülmektedir. 65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

LED	:	Işık yayan diyot
LASER	:	Uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu
PV	:	Fotovoltaik
HEMT	:	Yüksek elektron hareketlilikli transistör
MOSFET	:	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
MESFET	:	Metal yarı iletken alan etkili transistör
GaAs	:	Galyum arsenik
AlGaAs	:	Alüminyum galyum arsenik
InGaAsP	:	İndiyum galyum arsenik fosfat
InP	:	İndiyum fosfat
Si	:	Silikon
AuGe	:	Altın germanyum
Ni	:	Nikel
Au	:	Altın
Ti	:	Titanyum
Pt	:	Platinyum
Ge	:	Germanyum
Pd	:	Paladyum
W	:	Tungsten
Ta	:	Tantalyum
Mo	:	Molibdenyum
P	:	Fosfor
Cr	:	Krom
Al	:	Alüminyum
AuSn	:	Altın kalay
AlN	:	Alüminyum nitrat
UV	:	Mor ötesi
DWDM	:	Yoğun dalgaboyu bölmeli çoğullama
VLSI	:	Çok büyük çapta tümleşme
SBD	:	Schottky bariyer diyodu
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu

MOCVD	:	Metal organik kimyasal buhar biriktirme
RTP	:	Hızlı ısıl işleme
EDS	:	Enerji dağılımlı spektroskopi
TLM	:	Transfer uzunluğu metodu
ρ_C	:	Özdirenç
μm	:	Mikrometre
E_a	:	Aktivasyon enerjisi
Φ_m	:	Metal iş fonksiyonu
Φ_s	:	Yarı iletkenin iş fonksiyonu
χ_s	:	Yarı iletkenin elektron ilgisi
ΦB_n	:	Schottky bariyer yüksekliği
E_F	:	Fermi enerji seviyesi
E_C	:	İletim bandı
E_V	:	Değerlik bandı

1. GİRİŞ

Günümüzde, gelişen teknolojiyle beraber yarı iletken aygıtların hayatımızdaki yeri gün geçtikçe artmaktadır. LED, LASER, PV güneş hücreleri, fotodetektörler gibi optoelektronik aygıtlarla; HEMT, MOSFET, MESFET gibi elektronik aygıtlar buna örnek olarak verilebilir. Tüm bu aygıtların uzun süre çalışabilir durumda olmasını sağlamak için, aygıtı oluşturan bileşenlerin fabrikasyon aşamalarının başarılı bir şekilde tamamlanarak ömür testlerinin yapılmış olması gerekir.

Ohmik kontaklar da yarı iletken aygıtların dış dünyayla bağlantısını oluşturan, üzerinden akımın geçmesiyle aygıtın en etkili şekilde çalışmasını sağlayan önemli bir bileşendir. Ohmik kontak yapısı ne kadar düşük dirençli olursa üretilen aygıtın çalışma süresi de o kadar uzun olur ve aygıttan alınan verim de artar. Bu tür kontakların yeniden üretilebilirliği, aygıt maliyetini güçlü bir şekilde etkilerken, kontağın bütünlüğü aygıtı etkileyen önemli bir faktördür (A. M. Andrews, 1972). GaAs aygıtlara yapılan ohmik kontakların kalitesi, böyle bir aygıtın performansını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesidir (Macksey, 1976).

Lazerler, güneş pilleri, LED ve Gunn diyotlar gibi hem ayrık hem tek parça aygıtlar için istenilen kontak özdirenci 10^{-1} ila 10^{-5} $\Omega.cm^2$ aralığındadır. Bununla birlikte, GaAs MESFET'in ve tümleşik devrelerin gelişmesiyle birlikte hem ohmik kontaklar hem de Schottky kontaklar için çok sıkı gereksinimler belirdi. Ohmik kontaklar için genellikle spesifik kontak özdirenci için $5x10^{-6}$ $\Omega.cm^2$ gerekliyken Schottky engel yüksekliği toleransı $\pm$ 0,01 V olmaktadır (J. M. Woodall, 1981).

Aygıt üretim aşamasında veya çalışırken yüksek termal dayanıklılık iyi bir ohmik kontak için en önemli gereksinimdir. Genellikle, ohmik kontak sıcaklığı, aygıtın fabrikasyon sürecinde ve paketlemede 300-400 °C arasında bir değere kadar yükselir. Bazı kendinden hizalı (self-aligned), 800-850 °C'de implant aktivasyonuna gereksinim duyan aygıtlar için ohmik kontak oluşumu yüksek sıcaklık tavlamasıyla mümkün olur. Yüksek-sıcaklıkta çalışan GaAs tabanlı aygıtlar için ohmik kontağın yaklaşık 400 °C'de uzun dönem-dayanıklılığına bakılır (Piotrowska, 1983).

Ohmik kontakların bozulması yarı iletken aygıtlarda alışılmadık bir durum değildir ve belirli koşullar altında transistörler, doğrultucular ve diğer bileşenlerde yüksek akım yoğunluklarında ve yüksek sıcaklıklarda gözlemlenmiştir. Lazer diyotlarda çip ile ısı emici arasındaki kontağın termal direnci bazen zamanla artar (Ettenberg, 1980).

GaAs tabanlı aygıtlar için düşük dirençli ohmik kontak yapılarının geliştirilmesi için bir tane kontak reçetesinin sürece uygulanıp termal yaşlandırması yapıldıktan sonra başka bir reçetenin de aynı metodla değerlendirilip kıyaslaması yapılarak uygun kontak yapıları geliştirilebilir. Bu tez çalışmasında, ERMAKSAN A.Ş.'de üretilen GaAs tabanlı yarı iletken aygıtlardan yüksek güçlü lazer diyotlar için en sık kullanılan p-tipi GaAs yapılarında Ti/Pt/Au reçetesi, n-tipi GaAs yapılarında AuGe/Ni/Au reçetesi kullanılarak termal yaşlandırması yapıldı.

İkinci bölümde metal-yarı iletken eklemlerin fiziksel temelleri, kontak direnci ölçüm metodları ve kontakların termal yaşlandırmalarıyla ilgili teorik bilgiler verildi. Üçüncü bölümde ohmik kontak yapılarının nasıl üretildiği, direnç değerlerinin nasıl ölçüldüğü ve termal yaşlandırmalarının nasıl yapıldığı anlatıldı. Dördüncü bölümde, yaşlandırma adımlarında ölçülen direnç değerlerinden elde edilen I-V grafikleri ile optik mikroskop görüntüleri değerlendirilerek tartışıldı. Direnç ölçümünden hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerlerinin yaşlandırmayla birlikte nasıl ve neden değiştiği anlatıldı. EDS analizinden elde edilen spektrumlar karşılaştırılarak değişimleri gösterildi. Yüzeyden ve kesitten alınan SEM görüntüleri yorumlanarak metalizasyonda ve epi-katmanda meydana gelen değişimlerin nedenleri araştırıldı.

2. METAL-YARI İLETKEN KONTAKLAR

2.1. Metal- Yarı İletken Kontaklar Teorisi

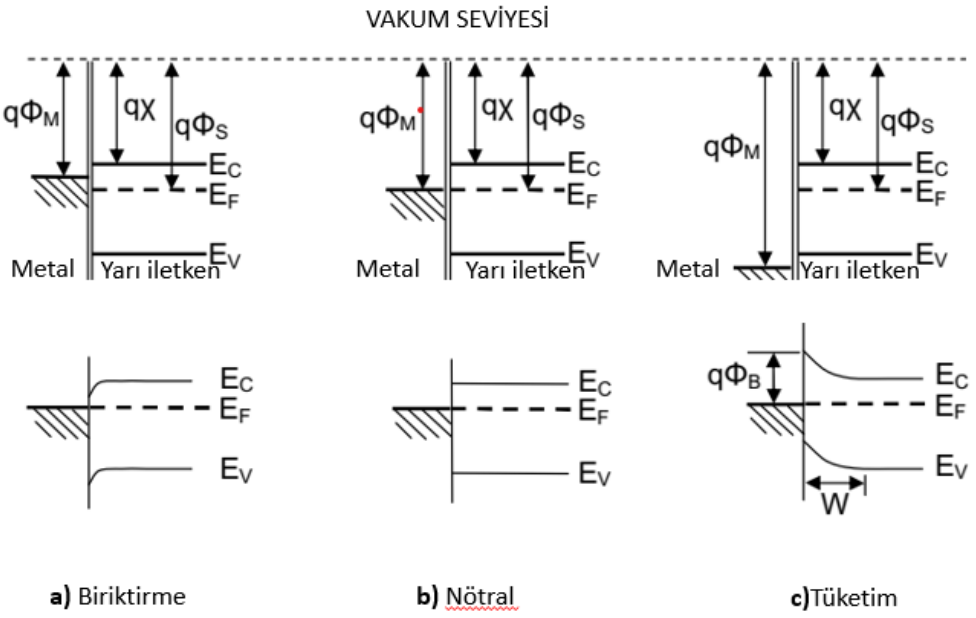
İlk metal-yarı iletken kontak 1874 yılında Braun tarafından keşfedildi ve 100 yılı aşkın süredir bu kontaklar doğrultucu ve fotodetektör olarak kullanılmaktadır. Pratik bakış açısından, ohmik kontak, cihaz performansını önemli derecede bozmayan bir kontaktır. Diğer bir deyişle, kontak gerekli akım yoğunluğunu aktif bölge genelindeki düşmeye kıyasla yeterince küçük bir voltaj düşüşüyle sağlayabiliyorsa, genellikle kabul edilebilirdir (Rideout V. , 1975).

Ohmik ve Schottky kontaklar çoğu elektronik aygıtın tamamlayıcı elemanlarıdır. Her iki kontak türünün de temeli bitişik metal-yarı iletken kontaklara dayanmasına rağmen, özellikleri yine de çok farklıdır. Ohmik kontaklar metal-yarı iletken eklemde her iki yönde de aynı kolaylıkta yük geçişine izin verir ve mümkün olan en düşük kontak direncine sahip olmalıdır. Bu, özellikle akım yoğunluğunun 10^4 A cm^{-2} olduğu yarıiletken lazerlerde önemlidir. Schottky diyotları ise akım akışına tek yönlü olarak izin verir. Bir Schottky diyotu, engel yüksekliği ile karakterize edilir. Bu, eklemden geçen akımı etkiler ve önemli bir dizayn parametresidir (W.O. Barnard, 1996).

Metal-yarı iletken kontak yapıları p-n eklemindekine benzer I-V karakteristiğine sahiptir ve William Schottky tarafından keşfedildikten sonra Schottky Bariyer Diyotu (SBD) olarak anılmaya başlamıştır. SBD çoğunluk taşıyıcı bir aygıttır. Bu aygıtlarda akım, metal/n-tipi yarı iletken eklemdeki elektronların hareketinden; metal/p-tipi yarı iletken eklemdeki deşiklerin hareketinden kaynaklanır. P-n eklemi ise azınlık taşıyıcıların aktif olduğu bir aygıttır. N-tipi bölgedeki deşiklerin hareketiyle oluşan akım, p-tipi bölgedeki elektronların hareketiyle oluşur (Saxena A. K., 1985).

Bir metal, yarı iletkenle birleştiğinde, elektriksel yükler, termal denge kurulup her iki malzemede de fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar kontağın bir tarafından diğer tarafına doğru sürüklenirler. İdeal bir ohmik kontak, Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi, n-tipi bir yarı iletkenle bir metalin yüzey durumları olmaksızın akümülasyon, nötral ve tüketim olarak üç farklı şekilde sınıflandırılabilir (Marinkovic, 2013).

Metal –yarı iletken kontaklar yarı iletkenin tipine göre ve metalin iş fonksiyonunun büyüklüğüne göre iki grupta incelenebilir.

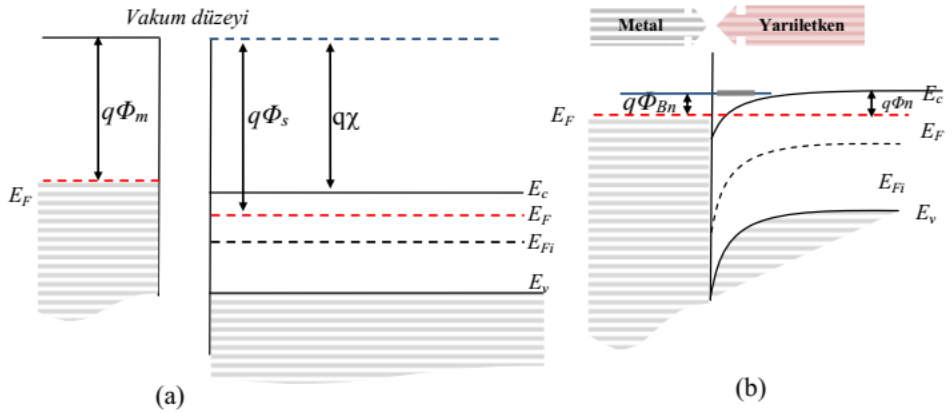


Şekil 2.1. *Metal-yarıiletken kontaklarda enerji bant diyagramlarının farklı şekilde hizalanmaları görülmektedir. a) Biriktirme veya akümülasyon, b)nötral, c)tüketim veya deplesyon kontak tipi. Yukarıdaki ve aşağıdaki parçalar enerji band diyagramlarının sırasıyla kontaktan önceki ve sonraki halini göstermektedir (Schroder D. , 2006).*

İlk grupta, n-tipi yarı iletken için, yarı iletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük ($\phi_s > \phi_m$, ohmik kontak), ya da yarı iletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük ($\phi_m > \phi_s$, doğrultucu kontak) olma durumu; ikinci grupta p-tipi yarı iletken için, yarı iletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük ($\phi_s < \phi_m$, ohmik kontak), ya da yarı iletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük ($\phi_s > \phi_m$, doğrultucu kontak) olma durumu söz konusudur (H. Çetin, 2012).

Bir metalle n-tipi yarı iletkenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Burada; χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir ve iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkını göstermektedir. ϕ_m ve ϕ_s sırayla, metalin ve yarı iletkenin iş fonksiyonlarıdır, metalin ve yarı iletkenin Fermi enerji seviyeleri ile vakum seviyeleri arasındaki enerji farkı ile tanımlanır. ϕ_m, metale özgü bir parametre olmasına rağmen, ϕ_s yarı iletkenin üretim parametrelerine bağlı olarak değişir. Metal ile n-tipi yarı iletken aracısız kontak yapıldığında metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan elektronlar yarı iletkenden metal içindeki daha düşük enerji hallerine geçerler. Bu geçiş sonucunda yarı iletkenin kontağa yakın bölgesindeki serbest

elektron konsantrasyonu azaldığından yarı iletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasında doğru kayar, metal tarafındaki yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı metalin Fermi seviyesi nispeten değişmeden kalır. Yarı iletkende iletkenlik bandındaki elektronların metale geçişiyle, iletkenlik bandının tabanı ile yarı iletkenin Fermi seviyesi arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile artar. Termal dengeye ulaşıldığında yani yarı iletkenin ve metalin Fermi enerji seviyeleri birbirine eşit olduğunda yük geçişi durur. Bu durumda yarı iletkenin iletkenlik ve değerlik bant kenarları yukarı doğru, (ϕ_m-ϕ_s) kadar bükülür. Yarı iletkenden metale geçen iletkenlik bandı elektronları geride iyonize olmuş verici atomlarını (pozitif yüklü) bırakırken, kendileri metalin kontağa yakın bölgesinde bir negatif yüzey yükü bölgesi oluştururlar. Metal-yarı iletken kontakta meydana gelen bu yeni yük dağılımından dolayı bir potansiyel engeli (ΦB_n) ve yarı iletkenden metale doğru bir elektrik alanı oluşur (Rhoderick, 1988), (Sze, 1981).



Şekil 2.2. *Metal ile n-tipi yarı iletkenin (a) kontaktan önceki (b) kontaktan sonraki ideal enerji bant diyagramı (Φm<Φs durumunda) (H. Çetin, 2012).*

ΦB_n metal-yarı iletken kontağın Shottky bariyer yüksekliğidir ve yarı iletkene geçmeye çalışan metaldeki elektronların karşılaştığı potansiyel engelidir. Schottky engeli olarak bilinen bu engel, ideal durumda n-tipi bir yarı iletken için;

$$q\Phi B_n = q(\phi_m - \chi_s) \qquad (2.1)$$

ile verilir.

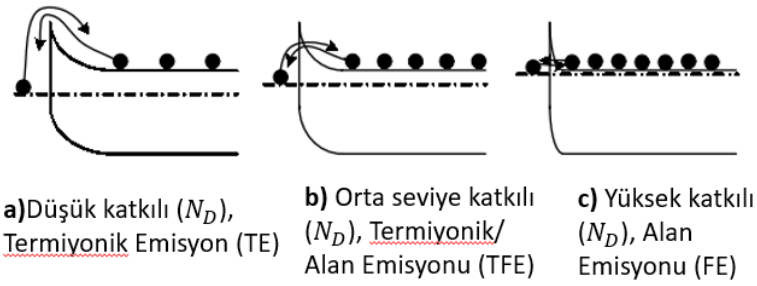
Schottky modeline göre metalin iş fonksiyonunun engel yüksekliğinde belirgin bir etkisi vardır. Bununla beraber, deneysel sonuçlar göstermiştir ki metalin iş fonksiyonunun metal-yarı iletken eklemin engel yüksekliği üzerinde etkisi bazen yoktur. (Schroder D. ,

2006). Metal-yarı iletken eklemin geliştirilmiş elektriksel kontak modeli yarı iletkenin yüzey durumlarıyla bağdaştırılarak kurulabilir (Tung, 2001). Bu modele göre tüm yarı iletken malzemeler iki gruba ayrılabilir: Kovalent ve iyonik yarı iletkenler.

Periyoduk tablonun IV. grubunda bulunan Si, Ge gibi yarı iletken elementlerle GaAs gibi III-V grubu yarı iletken bileşikler yüksek kovalent özelliktedir (Rideout V. , 1975). Deneysel çalışmalar göstermiştir ki böyle kovalent özellikteki malzemelerin engel yüksekliği genellikle iş fonksiyonundan bağımsızdır. Si, Ge ve GaAs gibi kovalent bağlı yarı iletkenler bant boşluğunda yüksek yoğunlukta yüzey durumlarına sahiptir ve engel yüksekliği bu yarı iletkenlerde yüzey durumlarından dolayı sabitlenmiştir (Mead, 1966), (S.M., 1981).

Bariyer yüksekliklerinin metal iş fonksiyonundan nispeten bağımsız olmasına neden olan mekanizmalar ne olursa olsun, birikim tipi bir kontak tasarlamak zordur. Bariyer yüksekliği mühendisliği pratik olmadığı için, ohmik kontakları üretmenin başka yollarına bakılmalıdır. Ohmik kontaklar sıklıkla yüksek birleşme oranlarına sahip bölgeler olarak tanımlanır. Bu, yüksek derecede hasarlı bölgelerin iyi ohmik kontaklar olması gerektiği anlamına gelir. Bu tür üretim yöntemleri pratik değildir, çünkü hasar genellikle bir yarı iletken aygıtta istenecek en son şeydir. Hasar kaynaklı ohmik kontaklar da tekrar üretilemez. Bu, yarı iletken katkılama yoğunluğunu ohmik kontakları tasarlamada tek alternatif olarak bırakır (A. Kroger, 1956). Bariyer yüksekliği katkılama yoğunluğundan görece bağımsızdır fakat bariyer genişliği katkılama oranına bağlıdır (Schroder D. , 2006). Şekil 2.3' te bariyer genişliğinin katkılama oranına bağlı olarak değiştiğini gösteren şemalar ve buna bağlı olarak gelişen akım iletim mekanizmaları verilmiştir.

Düşük katkılı yarı iletkenler için akım, termiyonik emisyona (TE) bağlı olarak Şekil 2.3(a)' daki gibi termal olarak uyarılmış halde bariyeri geçer. (S.M., 1981). Orta seviye katkılamada termiyonik alan emisyonu (TFE) baskın olur ve termal olarak uyarılmış taşıyıcılar bariyer yüksekliği yeteri kadar daralınca Şekil 2.3(b)' deki gibi tünellemeye başlar (Stratton, 1966), (Rideout C. C., 1969).



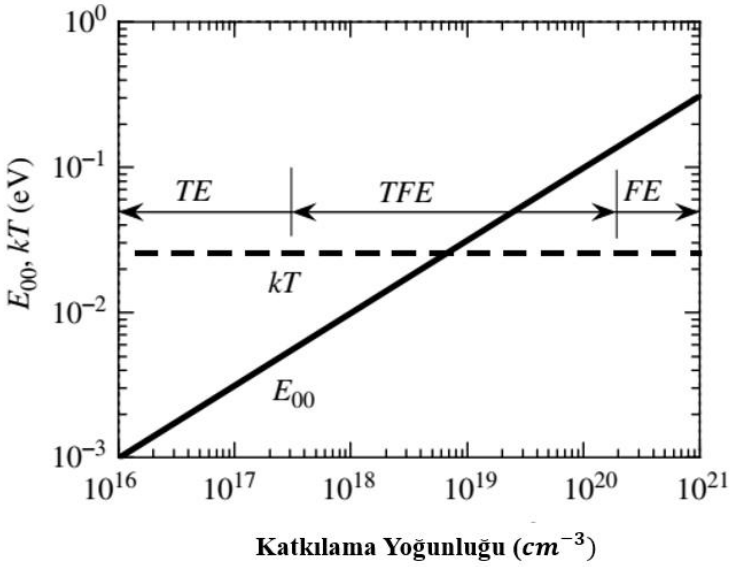
Şekil 2.3. *N-tipi yarı iletkende artan katkılama oranlarına bağlı olarak tüketim tipi ohmik kontaklarda oluşan akım iletim mekanizmaları. Elektronlar siyah yuvarlaklarla gösterilmiştir, oklar da elektronların hareket yönünü göstermektedir.*

Yüksek katkı seviyelerinde ise bariyer genişliği yeterince dardır ve iletim bandının yakınında elektronlar doğrudan tünelleme yaparlar (FE). Bu üç farklı rejim de karakteristik enerji E_{00} gözönünde bulundurularak birbirinden farklılaşır (Stratton, 1966). E_{00} akım iletiminde tünelleme katkısını ölçen karakteristik enerji olarak tanımlanır.

$$E_{00} = \frac{q\,h}{4\,\pi}\sqrt{\frac{N}{\varepsilon_s\,\varepsilon_0\,m^*_{tun}}} = 1.86 \times 10^{-11}\sqrt{\frac{N\ cm^{-3}}{\varepsilon_s\,(m^*_{tun}/m)}}\ [eV] \qquad (2.2)$$

Burada; N katkılama yoğunluğu, m^*_{tun} tünelleme etkin kütlesi, m serbest elektron kütlesi, ε_s yarı iletkenin dielektrik sabiti, ε_0 vakumun elektriksel geçirgenliği, h Planck sabiti ve q elektron yüküdür. Aşağıda yer alan kT denklemi için, k Boltzmann sabiti, T sıcaklıktır.

Temel olarak, kT, bir sistemin termodinamik entropisini k kadar arttırmak için gereken ısı miktarıdır. Şekil 2.4' te E_{00} ile kT termal enerjisinin karşılaştırması yapılarak termiyonik emisyonun $kT >> E_{00}$ için; termiyonik-alan emisyonun $kT \approx E_{00}$ için; alan emisyonun ise $kT << E_{00}$ için baskın olduğu gösterilmektedir. Kolaylık için, sınırlama noktaları şeçilerek: $E_{00} \leq 0.5$ kT için TE, $0.5\ kT < E_{00} < 5$ kT için TFE ve $E_{00} \geq 5$ kT için FE olduğu görülmektedir. Burda yaklaşık olarak TE mekanizması $N \leq 3 \times 10^{17} cm^{-3}$ katkılama yoğunluğuna, TFE mekanizması $3 \times 10^{17} < N < 2 \times 10^{20}\ cm^{-3}$ katkılama yoğunluğuna ve FE mekanizması $N \geq 2 \times 10^{20}\ cm^{-3}$ katkılama yoğunluğuna karşılık gelir (Liu, 1990).



Şekil 2.4. *Si için E_{00} ve kT'nin katkılama yoğunluğuna bağlı fonksiyonu (m∗tun/m = 0.3. T = 300 K) (Schroder D. , 2006).*

Ohmik kontakları oluşturma için, aktif tabakaya daha yakın olan aygıt tarafında, genellikle metal ve yarı iletken arasında etkileşimsiz arayüzü olan bir Schottky tipi (alaşımsız) elektrot ve aktif tabakadan daha uzak olan aygıtın diğer tarafında alaşım tipi bir elektrot kullanılır. Schottky tipi ve alaşım tipi ohmik kontaklarda kontak direnci aşağıda sırasıyla verilen parametrelere bağlıdır (Epperlein, 2013).

$$Rc, Sch \propto \exp\{\varphi b/\sqrt{N}\} \quad (2.3)$$

$$Rc, alaşım \propto \exp\{\varphi b/k_B T\} \quad (2.4)$$

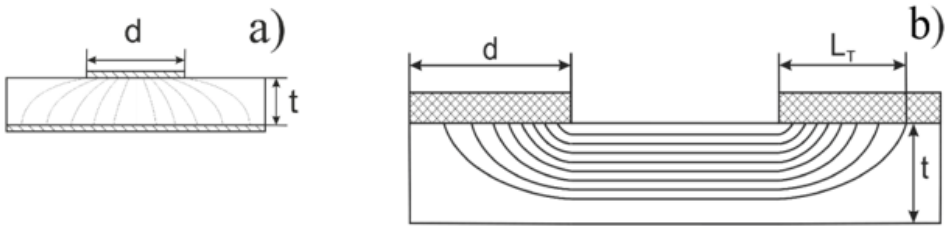
Burda φb bariyer yüksekliği, N katkılama yoğunluğu, k_B Boltzmann sabitidir. Bu denklemlerden, aygıtta bulunan p-tipi kontakların yüksek katkılamayla ohmik özelliği kazanırken, n-tipi kontakların sıcaklıkla (tavlamayla) ohmik yapılabildiği sonucu çıkarılabilir.

2.2. Metal-Yarı İletken Kontak Direnci Ölçüm Metodları

Metal-yarı iletken kontak direnci ölçümlerinde farklı geometriler için farklı ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Dikey ve yatay geometrik ölçüm yapıları literatürde en çok karşılaşılan yapılardandır.

Dikey ölçüm yapısında, akım yayılmasının etkisi Şekil 2.4' te gösterildiği gibi düzlemsel bir yapıya göre daha azdır. Bu nedenle, dikey yapıları ölçmekte kullanılan

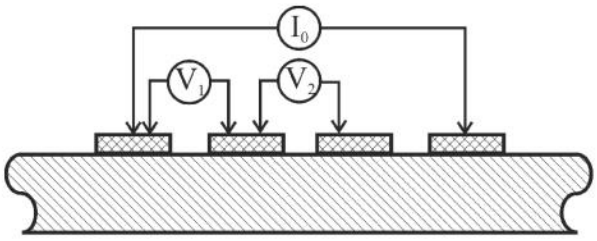
metodların arasında en sık kullanılanı Cox-Strack metodu olmuştur (Schroder D. , 2006). Bununla birlikte, bu yöntem epitaksiyel filmlerdeki kontak yapıları üzerinde uygulanamaz (Sheremet, 2014).



Şekil 2.4. *Dikey test yapısında dağılan akım a)'da; düzlemsel test yapısı b)'de gösterilmiştir (d kontağın çapı, t yarı iletkenin kalınlığı, L_T transfer uzunluğu) (Sheremet, 2014).*

Spesifik kontak özdirencini incelemek için düzlemsel bir yapının uygulanması, bir test yapısı oluşturmak istendiğinde daha az sayıda işlem gerektirdiği için tercih edilir. Ancak düzlemsel bir test yapısı kullanılırken, kontağın kenarından başlayan ve transfer uzunluğu Lt ile karakterize edilebilen akım yayılımının 2,17 kat (e sayısı kadar) azalması dikkate alınmalıdır (H. Murrmann, 1969).

Bir diğer metod dört kontak metodudur. Dört kontak metodunda ölçüm, Şekil 2.5' te gösterildiği gibi birbirine eşit mesafede olan 4 farklı kontağa voltaj uygulanarak gerçekleştirilir. Bu metod, transfer uzunluğu kontak alanından çok daha büyükse kullanılabilir. Burada gerekli şart L>> r>> t (L kontak uzunluğu, t yarı iletken filmin kalınlığı, r kontaklar arası boşluk) olmasıdır (Sheremet, 2014).



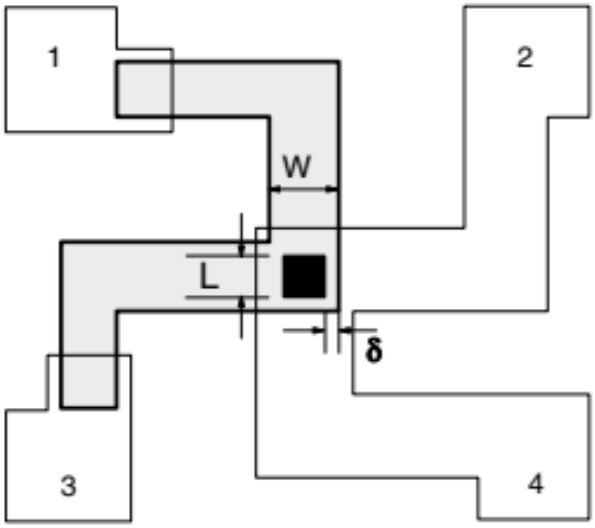
Şekil 2.5. *Dört kontak yöntemiyle özdirenç ölçümünün prensibi (Sheremet, 2014).*

Bu yöntemin dezavantajı, gerekli koşul olan L>> r durumunun kontaklar arasında büyük boşluklara neden olarak kontak özdirencinin belli oranlarda yanlış hesaplanmasına neden olmasıdır. Test yapısının kolay olması nedeniyle geniş transfer uzunluklarında kullanılır (H. Murrmann, 1969).

Bu yöntemle spesifik kontak özdirencini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır;

$$\rho_c = \pi\, r^2 \left\{ \frac{V_1}{I_0} - \left(\frac{V_2}{I_0}\right) \frac{\ln\left[\left(\frac{3L}{2r}\right) - \frac{1}{2}\right]}{2\ln 2} \right\} \quad \text{(A.S. Holland, 2000)} \qquad (2.5)$$

Bu metodların dışında ölçüm şeması Şekil 2.6' da gösterilmiş olan CBKR (Cross Bridge Kelvin Resistor) test yapıları VLSI (Very Large Scale Integration) teknolojisinde metal-yarı iletken kontakları karakterize etmek için kullanılır (Slimane Oussalah, 2005).



Şekil 2.6. *CBKR ölçüm şemasının yukardan görünüşü (Slimane Oussalah, 2005).*

CBKR'de I_{14} akımı 1-4 kontak alanları arasına uygulanırken, V_{23} voltajı 2-3 kontak alanları arasından ölçülür. Yüksek empadans voltmetre $V_{23} = V_2 - V_3$ ölçmek için kullanılır. 2 ve 3 arasında çok küçük bir akım oluşur. R_c ve ρ_c şu şekilde verilir:

$$R_c = V_{23}/I_{14} \qquad (2.6)$$

$$\rho_c = R_c\, A_c \qquad (2.7)$$

Bu denklemlerde; A_c: kontak alanı, R_c veya R_K Kelvin direncidir.

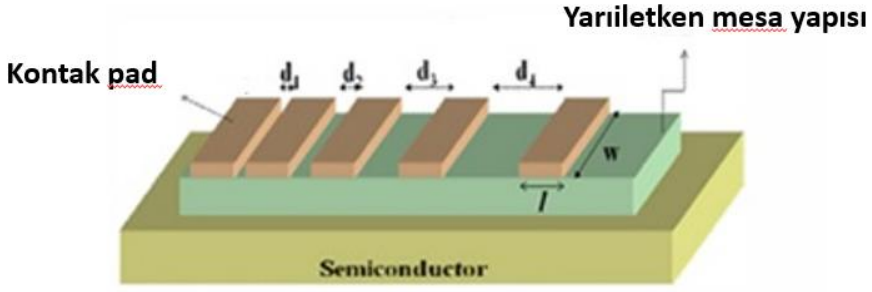
İkiz kontak, ekstrapolasyon, diferansiyel ve arayüz problama teknikleri önceden kullanılmış diğer metodlardır. Bunların arasında günümüzde en yaygın olarak kullanılanı TLM tekniğidir.

Tablo 2.1. *Bazı özdirenç (ρc) ölçüm metodlarının karşılaştırılması (Berger, 1972)*

	İkiz Kontak	Ekstrapolasyon	Diferansiyel	TLM	Arayüz Problama
Doğrusallık Kontrolü	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet
Hata $\|\Delta l\|$ eff (μm)	5	5	0,2	0,4	0,6
Homojenlik Kontrolü	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Evet
AC örnek/ AC Aygıt	$\geq 10^4$	$\geq 10^4$	$\geq 10^4$	≥1	≥1

"Transfer Length Method" veya "Transmission Line Model" olarak adlandırılan TLM metodu ise ilk kez Schokley tarafından UHF (Ultra High Frequency) transistörler üretilirken taban (base) dirençlerinin yanal (lateral) olarak ölçülmesinde ve ohmik kontak özdirenç hesaplanmasında kullanılmıştır (Reeves & Harrison, 1982). TLM desenleri, epitaksiyel büyütmelerin kontak dirençlerini aynı düzlemde belirlemeye olanak tanır. Bunun yanında ölçüm hatasının düşüklüğü, I-V karakteristiğinin doğrusallığı, küçük test yapılarına izin vermesi (mikrometre mertebesinde) nedeniyle tercih edilmiştir.

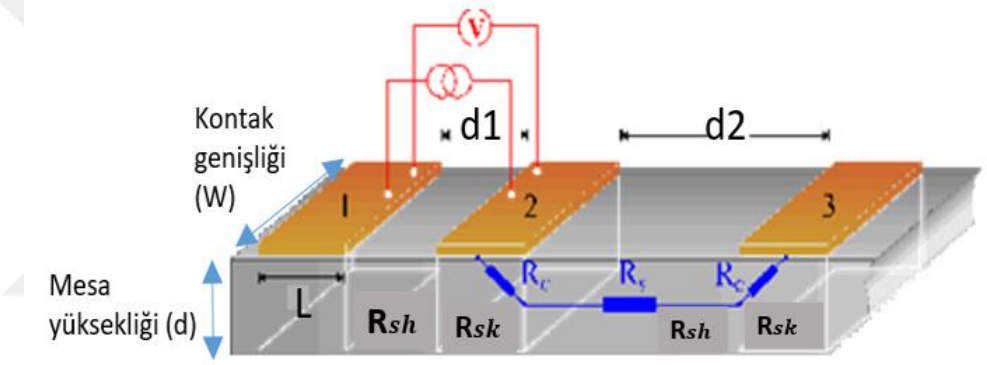
Schokley, düz (planar) ohmik kontakların özdirencini hesaplamak için uygun bir metod üzerinde çalıştı. Aynı zamanda aralarındaki mesafenin Şekil 2.7' deki gibi "d" kadar olan herhangi iki kontak (W uzunluğunda ve l genişliğinde) arasındaki toplam direncin (R_T) hesaplanmasını ve "d" nin fonksiyonu olarak çizdirilebileceğini öngören bir deney önerdi (Reeves & Harrison, 1982). R_T ile "d" arasındaki denklem, R_T=0 iken transfer uzunluğunu (L_T) bularak kontak özdirencinin hesaplanabilmesini sağladı.



Şekil 2.7. *Yarıiletken mesa yapısı, akımın yarı iletken üzerinde kenarlara yayılmadan metal kontaklar arasında ilerlemesine imkan tanır (M. Khani, 2012).*

Aralarındaki uzaklığın değiştiği özdeş kontak bölgeleri (pad) ardışık sırayla ölçülerek direnç-uzaklık grafiğine kaydedilir. Bu yöntemdeki ön kabul, kontak bölgelerinin arasındaki yüzey direncinin ölçeklenebilir olduğudur. Değişen uzaklıklar, kristalin (GaAs) yüzey direnci (R_{sh}, sheet resistance) ile çarpılarak özdeş kontak dirençlerine eklenir. Bu sayede doğrusal uzaklık-direnç grafiği elde edilmesi beklenir. Doğru denkleminden extrapolasyon ile uzaklığın sıfır olduğu noktadaki direnç bulunabilir. Fiziksel olarak kontak bölgelerinin kısa devre durumunu modelleyen bu değerin ikiye bölünmesiyle kontak alanının direnci bulunur.

Şekil 2.8' de iki kontak pad arasında görülen R_{sh}, yarıiletkenin kontak alanı dışındaki "sheet resistance" değerini ifade eder. L_T ise transfer uzunluğu (transfer length) anlamındadır. W (genişlik), Şekil 2.7' de gösterildiği gibi kontağın uzun kenarıdır.



Şekil 2.8. *TLM modelinde mesa yapısında bulunan dirençlerin birbiriyle seri bağlı olduğu görülmektedir.*

$$R_T = R_{semi} + 2R_c \tag{2.8}$$

Burada R_T toplam direnci, R_{semi} yarıiletkenin direncini, R_c kontağın direncini ifade eder. Şekil 2.8' teki R_{sk} ise metal –yarı iletken kontak bölgesinin altındaki bölgenin yüzey direncidir. Aşağıdaki denklemlerde R_{sh}'nin R_{sk}'ye eşit olduğu kabul edilmiştir.

Spesifik kontak özdirenci rho, denklem (2.9) ile hesaplanır;

$$\rho = R.A(\Omega cm^2) \tag{2.9}$$

Aynı zamanda, direnç aşağıdaki formülle bulunmaktadır;

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \tag{2.10}$$

Şekil 2.8' deki d kalınlığındaki, L uzunluğundaki ve W genişliğindeki yarı iletkenin direncini bulmak için denklem (2.10)' da değerler yerine koyulursa;

$$R = \frac{\rho\ l}{A} = \rho\ \frac{L}{A}\ = \rho\ \frac{L}{W\,t} = \frac{\rho}{t}\ \frac{L}{W} \tag{2.11}$$

$\frac{\rho}{t}$ ifadesinin birimi ohm olmalıdır. Bu yüzden bu kesir "sheet resistance" (R_{sh}) olarak adlandırılır ve birimi Ω/□'dir. Yarı iletkenin yüzey direnci anlamındadır.

Sonuç olarak;

$$R_{semi} = R_{sh}\ \frac{L}{W} \tag{2.12}$$

R ölçülen direncin ohm (Ω) cinsinden değeridir. A ise alanı ifade eder.

$$A = \ L_T\ .W \tag{2.13}$$

Rc'yi yani kontak direncini bulmak için (2.9)'daki R formülü kullanılırsa;

$$R_c\ = \frac{\rho}{A} = \frac{\rho_c}{WL_T} \tag{2.14}$$

$$R_T = R_{semi} + 2R_c \tag{2.15}$$

$$R_T\ = R_{sh}\ \frac{L}{W} + 2\ \frac{\rho_c}{L_T W} \tag{2.16}$$

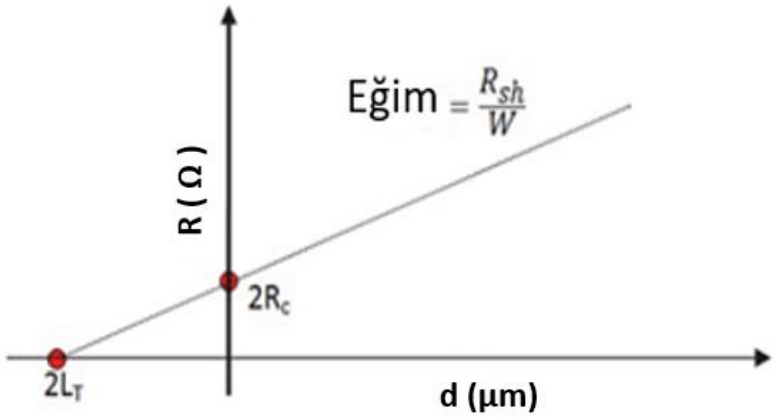
Bu denklemde L_T'nin yerine $L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{Sh}}}$ ($W >> L_T$) (Schroder D. L., 1984) ifadesi koyulursa,

$$R_T = R_{sh}\ \frac{d}{W} + 2\ \frac{R_{sh}\ L_T}{W} \tag{2.17}$$

$$R_T\ = \frac{R_{sh}}{W}\ (d + 2L_T) \tag{2.18}$$

eşitliği elde edilmiş olur. Şekil 2.9' da bu eşitlik grafik üzerinde gösterilmiştir.

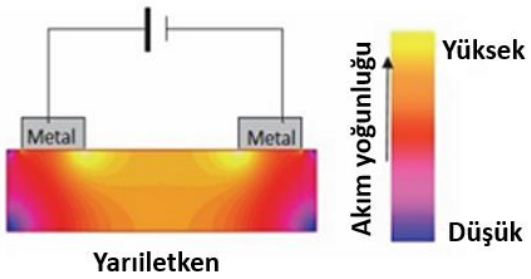
$$d=0\ \Rightarrow R_T = 2L_T\ \frac{R_{sh}}{W} \tag{2.19}$$



Şekil 2.9. *Kontak direnci ölçümünden elde edilen grafikte x ekseni kontaklar arasındaki mesafeyi gösterirken, y ekseni kontak direncini gösterir (M. Khani, 2012).*

Yarı iletkenin yüzey direnci ve transfer uzunluğu hesaplandıktan sonra, spesifik kontak özdirenci şu formüle göre hesaplanır:

$$\rho_c = R_{sh} \times L_T^2 \quad (\Omega.cm^2) \tag{2.20}$$



Şekil 2.10. *Akım yoğunluğu sarıyla gösterilen yerlerde en fazla, koyu renkli olan yerlerde en azdır (Marinkovic, 2013).*

Akım, yarı iletkenden metale geçerken tüm pad uzunluğu boyunca homojen olarak dağılmaz, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ulaştığı ilk uçtan dağılmaya başlar. Buna akım yoğunlaşması (current crowding) denir. Direncin geometri bağımlı olması nedeniyle, bu düzeltme faktörü hesaba katılmalıdır. Bu dağılma mesafesi, transfer uzunluğu (Lt) olarak adlandırılır. Lt, akıma üssel olarak bağlı bir fonksiyondur.

Spesifik kontak özdirenci (ρ_c) önemlidir. Kontak direncini pad geometrisinden (genişlik) bağımsız hale getirip normalize ettiği için, reçete karşılaştırılmasına olanak sağlar. Diğer türlü katkı oranı, uyumsuz metal seçimleri, yanlış tavlama profili gibi etmenler gözden kaçar.

Böylelikle farklı tasarımlar ve prosesler arasında karşılaştırma yapılabilir (Transistör, LED, telekom lazerler, güç lazerleri vs).

2.3. Metal-Yarı İletken Kontaklarda Yaşlandırma

Elektronik/optoelektronik aygıtların uzun dönem çalışabilir olmasını sağlamak ve sürekli iyileştirmek için, aygıtın güvenilirliğini hakkında çıkarımda bulunmak gerekir. Düzgün tasarlanmış bir aygıtın bozunma karakteristikleri incelenecek olduğunda, normal çalışma koşulları altında orijinal karakteristiklerden herhangi bir önemli sapmayı tespit etmek için geçecek süre olağanüstü uzun olabilir. Nispeten makul bir süre içinde bozunma özelliklerini elde etmek için bazı yöntemler kullanılmalıdır. Elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan en baskın güvenilirlik tahmin yöntemi, cihazların yüksek sıcaklıkta test edilmesini içerir. Bu hızlandırılmış test, normal çalışma koşullarında meydana gelmesi çok daha uzun sürecek olan aynı bozunma mekanizmalarını kısa bir süre içinde oluşturur (Jame Eun, 1993).

Kontak bozunma mekanizmaları, ohmik kontağın yüksek akım yoğunluğunda, yüksek sıcaklıkta ve yüksek elektrik alanında çalışmasına göre 3 ana gruba ayrılır:

1. Metal-yarı iletken arasında oluşan difüzyondan kaynaklanan bozunma.
2. Elektron göçünden (electromigration) dolayı oluşan metalizasyonun kısa veya açık devre durumu.
3. Elektrik alandan etkilenen elektrot malzemesinin geçişinden dolayı oluşan elektrotlar arası kısa devre durumu.

Son iki durum da termal bozunmaya yol açabilir. Metal üzerindeki bölgesel sıcak noktalar (hot local spot) tarafından oluşturulan boşluklar elektron göçünü ve termal direnci arttırır. Eğer aygıt, örneğin lazer için sabit güç vermek için ayarlanmışsa akım artarak ve elektron göçü hızlanarak bu proses kendiliğinden yenilenerek tazelenir. Sonuç açık devre durumu veya lazerin bozunmasıdır (Leicester, 1995).

Normal çalışma koşulları altında, alaşımsız ohmik kontaklar, inert arayüz nedeniyle oldukça kararlıdır. Bununla birlikte, >200 °C ve >30 kA/cm ² 'lik zor çalışma koşullarında, arayüzde grup-III elementlerinin bir tüketim tabakası oluşturması nedeniyle bozunma gelişebilir. Bu, tüketim tabakasının yüksek elektrik direncine yol açan grup-III elementlerinin dışarı doğru difüzyonundan kaynaklanır. Metal/grup-V elementli alaşım tabakasının daha yüksek direnci nedeniyle, daha düşük dirençli metal/grup-III

elementleriyle sivri uçlara sahip bir alaşım oluşumu meydana gelebilir ve bu da nihayetinde aktif tabakanın zarar görmesine neden olabilir (Fukuda, 1999).

III-V grubu bileşik yarı iletkenlere yapılan iyi bir ohmik kontağın spesifik kontak direncinin 10^{-6} Ω.cm²' mertebesinde olması ve 400 °C' de minimum 100 saat boyunca önemli bir değişiklik göstermemesi gerekir. Keskin arayüze sahip sığ kontaklar 400 °C' de elde edilebilmelidir. Altın alaşımlarında görülen sivrilme (spiking) bu sıcaklığa maruz kalındığında küçük kontak karakteristiğini kötüye götürmektedir (Leicester, 1995). Isıya dayanıklı kontakların neredeyse tamamının çok düşük ρc değerine sahip olduğu ve yaklaşık 400 °C' de kararlı olduğu açıkça görülebilir. Bu sıcaklık, tel bağlama ve paketleme işlemi ile uyumludur. Kontak malzemesi, yarı iletkenin ve lehimin özellikleriyle iyi örtüşmelidir ki stres fazlalığı minumuma insin. Elektrot metali ile yarı iletkenin alaşım reaksiyonundan kaynaklanan elektrot bozunması, alaşım tipi elektrotlara sahip lazerlerde gözlenir. Lazer çipi ile ısı alıcı/paket gövdesi arasındaki bağlantı kısmında, yapıştırma için düşük erime noktalı lehim kullanılıyorsa, çalışma sırasında lehim metalinin ve ısı alıcının elektrot/metalizasyon metalinin boşluk oluşumu ve alaşım reaksiyonu meydana gelir. BH (Burried Heterostructure, gömülü heteroyapı) tipi lazerlerde, BH arayüzündeki kusur yoğunluğundaki artış, bozunma sırasında meydana gelir ve mevcut sistemlerde bu tür lazerlerin ömrünü sınırlar. Ek olarak, lazer çipi ile ısı alıcı/paket gövdesi arasındaki termal genleşme katsayısındaki farktan veya bir alaşım reaksiyonundan kaynaklanan mekanik stres, DWDM sistemlerinde önemli bir konudur (Fukuda, 1999). Yaşlandırma çalışmaları, lehim ve elektrotlar arasındaki arayüzde interdifüzyon ve intermetalik oluşumunu göstermektedir. In ve Sn gibi yumuşak lehim, Sn'nin Au'ya tanecik sınırı (grain boundary) difüzyonunu ve Au'nun Sn'ye gövde (bulk) difüzyonuna neden olur. Tipik olarak tanecik difüzyonu daha hızlı ilerler. Difüzyondan sonra intermetalikler oluşur. Genellikle Au zengin Au-Sn, Au-Si veya Au-Ge gibi sert lehimler belirgin şekilde daha kararlıdır ve difüzyonu yavaşlatır (Leicester, 1995).

Örnek olarak, aktif tabakaya nüfuz eden ve orada yoğunlaşan elektrotlardan (Au gibi) metal atomlarının difüzyonu nedeniyle çökeltilerin oluşumu Şekil 2.11'de, InGaAsP/InP DH (çift heteroyapı) LED'lerinin yüksek sıcaklıkta hızlandırılmış testinden elde edilen bir Arrhenius grafiğini göstermektedir. Diyagramda, λ_p ve β, bir sabit akım çalışma testinde LED'ler için sırasıyla en yüksek emisyon dalgaboyunu ve bozunma oranını temsil eder.

Bozunma oranı β, aşağıdaki denklemle gösterilir;

$$P = P_0 \exp(-\beta t) \tag{2.20}$$

Burda; P, optiksel çıkış gücü ve P_0 başlangıçtaki optiksel güçtür. Bozunma oranı ortamın (veya eklemin) sıcaklığına (T) bağlıdır ve şu şekilde verilir:

$$\beta = \beta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \tag{2.21}$$

Bu denklemde; β_0 sabit, E_a derece derece bozunmanın (gradual degradation) aktivasyon enerjisi ve k Boltzmann sabitidir.

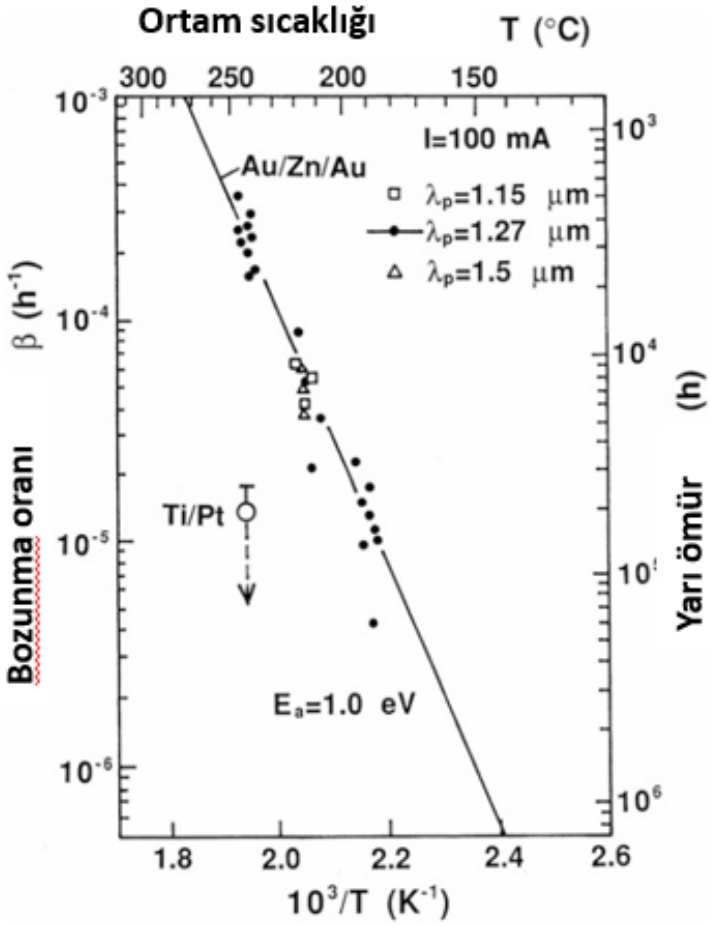
Şekil 2.11'deki doğrusal çizgilerle birleştirilmiş olan veri kümeleri p-elektrodunda Au/Zn/Au alaşımlı yapıya sahip LED'den elde edilmiştir. Şekilde ayrıca Ti/Pt/Au alaşımsız elektrodunu bulunduran LED'den de bir veri noktası gösterilmiştir. Bu sonuçlar özetlenecek olursa;

a) Bozunma mekanizması aktif bölgenin (dörtlü bileşik kristal yapısında-quaternary) dalgaboyundan bağımsızdır.

b) Aktivasyon enerjisi 1.0 eV'dir ve bu değer AlGaAs DH LED'deki 0.5-0.7 eV değerinden yüksektir.

c) Alaşımsız yapıdaki Ti/Pt/Au elektrotları (güçlü bariyer özelliğine sahip) kullanıldığında, aygıtın ömrü alaşımlı yapıdaki kontakların kullanıldığı zamandakinden 10 kat daha uzundur.

InGaAsP/InP DH LED'ler gibi derin seviyedeki kusurlardaki artışa ve/veya dislokasyon döngülerinin oluşumuna bağlı derece derece bozunmanın neredeyse hiç olmadığı optik cihazlarda, bozunmayı yöneten baskın faktörlerden biri p-elektrottan gelen metalik atomların oluşturduğu difüzyon olabilir. Bu durumda, metal atomlarının aktif bölgeye doğru difüzyonu ile uzun çalışma süresi boyunca bozunmanın gerçekleşmesi ve aktif bölgede ışınımsal olmayan birleşmede kademeli bir artışa neden olması beklenir. Bu bozunma modunu ortadan kaldırmak için, temel olarak uygun bir bariyer metali ile alaşımsız ohmik kontak kullanılmalıdır. Ti/Pt/Au'nun optik aygıtlarda p-kontak için en iyi elektrot malzemesi olduğu düşünülmektedir (Ueda, 2013).

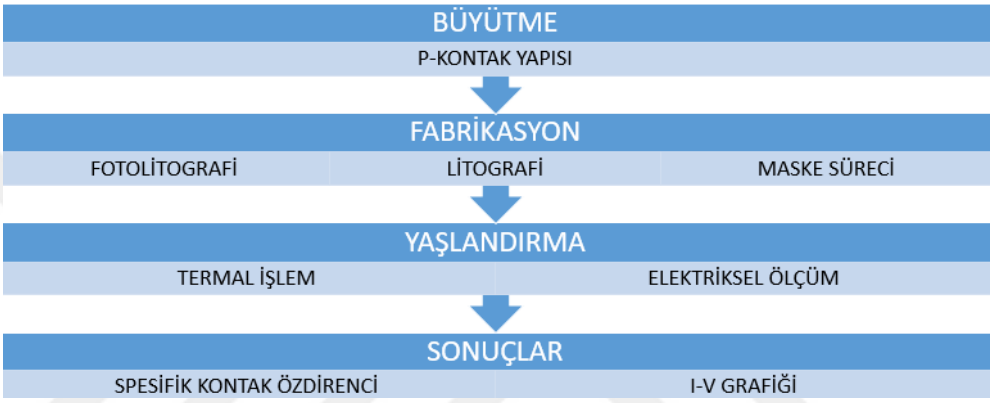


Şekil 2.11. *InGaAsP/InP DH LED'lerinin sıcaklık bağımlı bozunma oranları. Doğrusal çizgi en küçük kareler metoduyla hesaplanan sonuçları göstermektedir (S. Yamakoshi M. A., 1979), (S. Yamakoshi M. A., 1981).*

Yukarıdaki sonuçlar, bozunma mekanizmasının, p-elektrottan gelen Au atomlarının, ışınımsal olmayan birleşme veya taşıyıcı fazlalığı nedeniyle aygıtın çalışma enasında aktif katmana difüze olduğu ve burada yoğunlaştığı bir süreç olarak düşünülebileceğini söylemektedir (S. Yamakoshi M. A., 1981), (A.K. Chin, 1982).

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

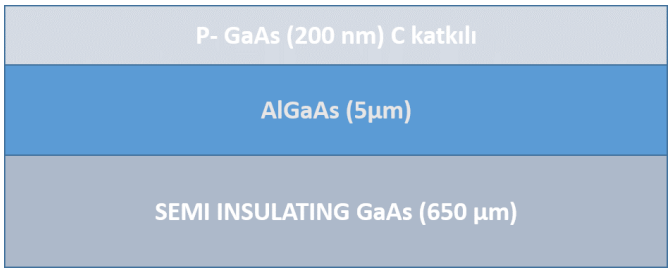
GaAs alltaş üzerinde oluşturulacak çok sayıdaki ohmik kontak yapıları, birbirini takip eden litografik işlemlerden geçti. MOCVD (metal organik kimyasal buhar kaplama) reaktörü ile büyütülmüş p-kontak yapısı kullanıldı. 100 sınıf temizodada (sarıoda) fotolitografi süreçlerinden fotorezist serimi, maske basımı, alttaş soğutma, alttaş ısıtma, desen çıkarma yapılırken; 1000 sınıf temizodada alttaş aşındırma, pasivasyon kaplama, pasivasyon aşındırma, metal kaplama, tavlama işlemleri gerçekleştirildi. Deneysel çalışmaların genel hatları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. *Büyütmeyle başlayıp fabrikasyon, yaşlandırma ve ölçümle biten deneysel süreçler.*

MOCVD'de büyütülmüş p-GaAs alltaş yapısının yüzey direnci, otomatik yüzey direnci ölçen sistemde ölçülerek haritalandırması yapıldı. Sonuçlar ve Tartışma bölümünde haritalandırma sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir.

200 nm kalınlığında, $5x10^{19}$ cm^{-3} C katkılı p-GaAs üzerine litografi adımları uygulanmaya başlandı. Fabrikasyonu yapılacak alttaşın büyütme yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir.

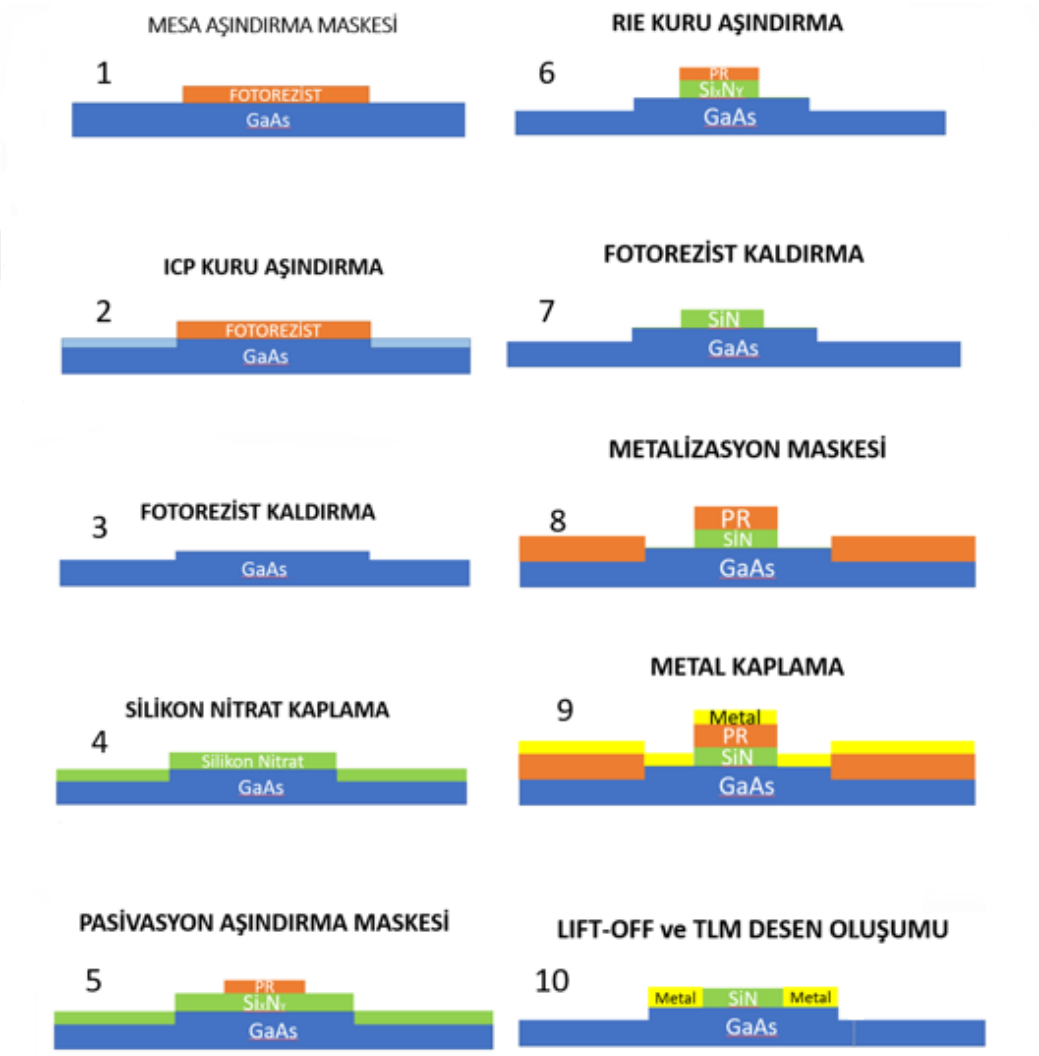


Şekil 3.2. *P-kontak çalışması yapılan epi-katman yapısı*

N-kontak çalışması ise 10^{18} cm^{-3} Si katkılı 650 mikrometre kalınlığındaki GaAs üzerine yapıldı.

3.1. Litografi Süreçleri

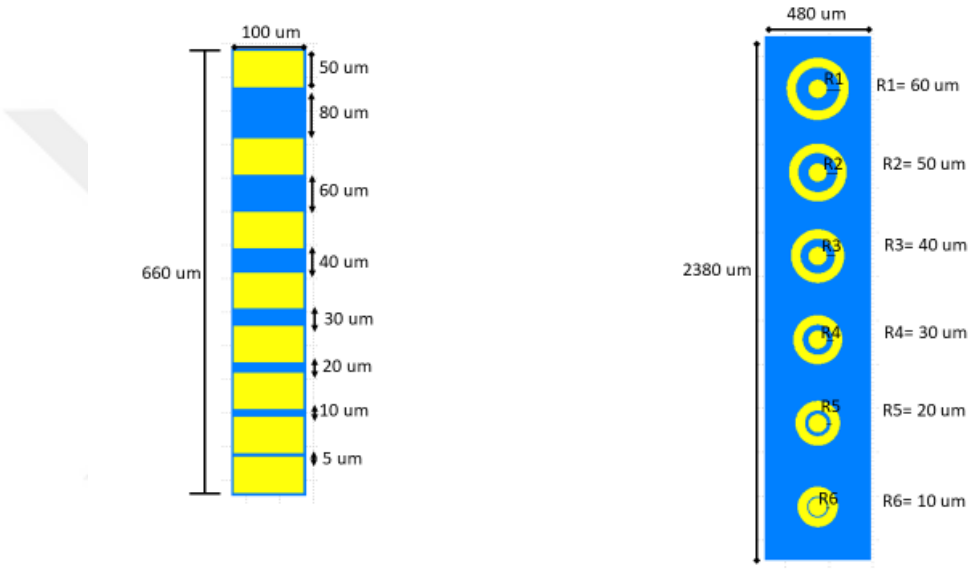
Fotolitografiyle başlayıp ısıl işlemle biten fabrikasyon adımlarını litografi süreci olarak tanımlayabiliriz. Bu adımları özetleyen süreç akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. *Ardışık iki TLM deseni için litografi süreçlerini gösteren akış şeması. Fotolitografiyle başlayan mesa deseni aktarma 1 numarayla, GaAs aşındırma 2 numarayla, yüzeyde kalan fotorezisti temizleme 3 numarayla, pasivasyon kaplama 4 numarayla, kontak kapısı açmak için oluşturulan maske 5 numarayla, pasivasyon aşındırma sonrası oluşan yapı 6 numarayla, yüzeydeki fotorezisti kaldırma 7 numarayla, metal kaplama için oluşturulan maske 8 numarayla, metal kaplanmış örnek yüzeyi 9 numarayla, direnç ölçümleri için kullanılacak TLM yapısının son hali 10 numarayla gösterilmiştir.*

Bu fabrikasyon adımlarının gerçekleştirilebilmesi için L-edit ve KLayout maske çizim programları kullanılarak maske tasarımları yapıldı. Hazırlanan tasarımlar maskesiz litografi cihazına doğrudan yüklenip GaAs alttaş üzerine desenler aktarıldı. Aynı maske tasarımları hem p-kontak hem n-kontak için uygulandı.

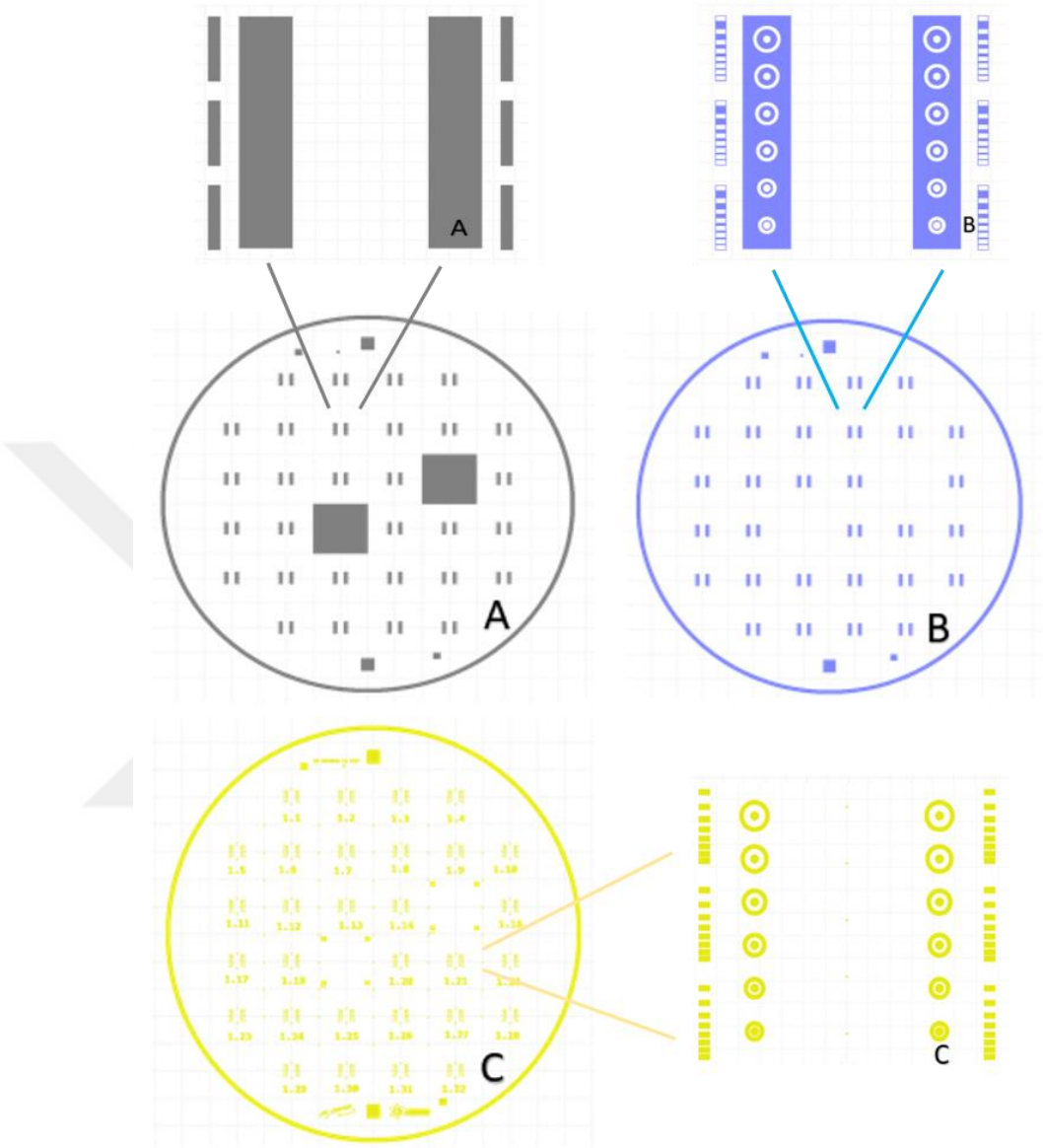
Bu çalışmada kullanılan maske tasarımında Şekil 3.4' teki gibi dairesel TLM (CTLM) ve dikdörtgensel TLM (RTLM) desenlerinin yanı sıra özdirenç ölçümleri için Van der Pauw (4 nokta) geometrisini içeren desenler de bulunmaktadır.



Şekil 3.4. *ERMAKSAN A.Ş' de kontak ölçümü için KLayout programında tasarlanan dikdörtgensel ve dairesel TLM desenleri*

Maskesiz litografi sistemi kullanılarak yapılan desen aktarma sürecinde; Şekil 3.5'te görüldüğü gibi ilk olarak mesa yapısı, ardından metal kapısı ve son olarak kontak kaplama maskesi kullanıldı. Hizalama işaretleyicileri; hizalamanın hatasız olması için en uzak 2 nokta üzerinde konumlandırıldı. Her 6 tane TLM deseninin bulunduğu ohmik kontak yapıları 1.1' den başlayarak 1.32'ye kadar farklı sayılarla numaralandırıldı. Kontak direncinin RTLM'lerle ölçülemeyecek kadar küçük çıkması ve dolayısıyla yanlış ölçüm sonuçları elde edebilme ihtimali düşünülerek RTLM'nin yanısıra CTLM desenleri de oluşturuldu. CTLM'ler 10^{-7} Ω.cm²' den düşük spesifik kontak özdirencine sahip kontaklarda daha doğru sonuçlar veren bir ölçüm geometrisidir. Sonuçlar kısmında yer alan direnç ölçüm değerlerinden anlaşılacağı üzere CTLM' lere direnç ölçümü alınırken

gerek duyulmadı. CTLM desenlerinin oluşturulma nedenlerinden biri de farklı geometriye sahip kontak yapılarında termal yaşlandırmanın etkisini görmektir.



Şekil 3.5. *Alttaş olarak tüm yüzeyi ve birim detayını gösteren maske süreci. A: Mesa maske tasarımı ve TLM desenlerinin aktarılacağı bölgeler, B: Metal kapısı açma maskesi ve TLM desenleri, C: Metal kontak kaplama maskesi*

Metalizasyonun yapılacağı, üzerinde TLM desenlerini bulunduran 1 µm yüksekliğinde Şekil 3.5-A'da gösterilen yapıların oluşturulması için mesa maskesi tasarlandı. Metal kaplama yapılabilmesi için silikon nitrat (Si_3N_4) kaplı bazı bölgelerin aşındırılması gerekmektedir. Böylelikle daha sonra kaplanacak metalin GaAs alttaş ile teması sağlanarak metal-yarı iletken eklemi elde edilmiş olur. Kontak kaplama maskesi ise sadece aşındırılmış bölgelerin metal kaplanması için tasarlanan maskedir. Kalan diğer

yerlerdeki metaller altta bulunan fotoreziste metal kaldırma (lift-off) tekniği uygulanarak kaldırıldı.

3.1.1. Fotolitografi ve örnek hazırlama süreci

UV dalga boyuna (360nm) sahip ışığı kullanarak fotorezist serilmiş alttaş üzerine maske hizalayıcı yardımıyla desenler aktarılarak üzerinde ölçüm alabileceğimiz kontak yapıları elde edildi.

Örnek, optik mikroskopta yüzey haritalandırması yapılarak görüntüsü alındı. 3 inç'lik örnek ultrasonik banyoda 50 °C'de önce 5 dakika asetonda, sonra 5 dakika izopropil alkolde bekletilerek temizlik yapıldı (kaba temizlik). Aynı işlem bir kez daha temiz kaplar kullanılarak yapıldı (ince temizlik). Fotorezistin alttaş yüzeyine daha iyi yapışmasını sağlamak için HMDS (Hexamethyldisilazane) kimyasalı buhar kaplama (vapor primer) cihazı yardımıyla alttaş üzerine kaplandı. Soğuk tablada oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Döner kaplayıcı cihazı (spin coater) ile AZ5214E fotorezisti serildi. Sıcak tablada 110 °C'de 55 saniye bekletildi. Soğuk tablada oda sıcaklığına kadar soğuması sağlandı. Şekil 3.6' da görülen maskesiz litografi makinesiyle mesa desenleri aktarıldı.

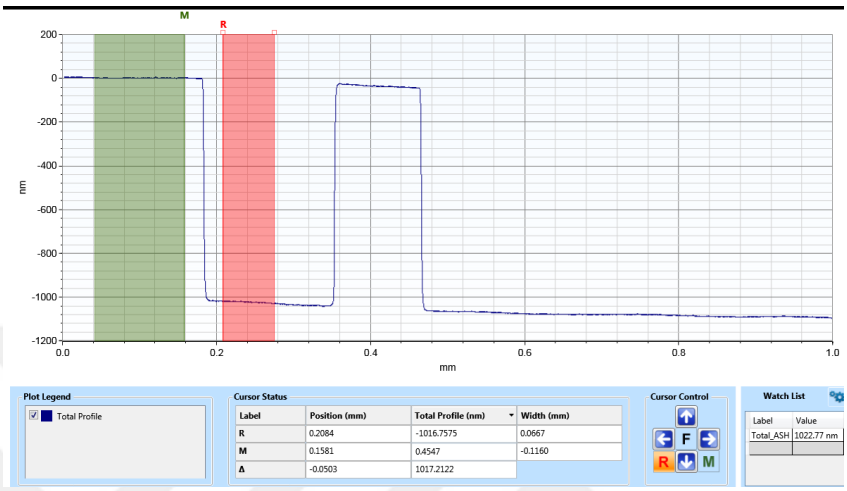


Şekil 3.6. *Litografi süreçlerinde maskesiz hizalama yapmayı sağlayan litografi cihazı*

Maskeleme sonrası alttaş yüzeyi develop edildi. Optik mikroskopta yüzey görüntüleri incelenerek kaydedildi.

3.1.2. Alttaş aşındırma süreci

ICP sistemiyle (Inductively Coupled Plasma) alttaş yüzeyi yaklaşık 1 mikron aşındırıldı. Aşındırma sonrası profilometre ile aşındırma derinliği ölçüldü. Şekil 3.7'de profilometre ekran görüntüsü yer almaktadır.



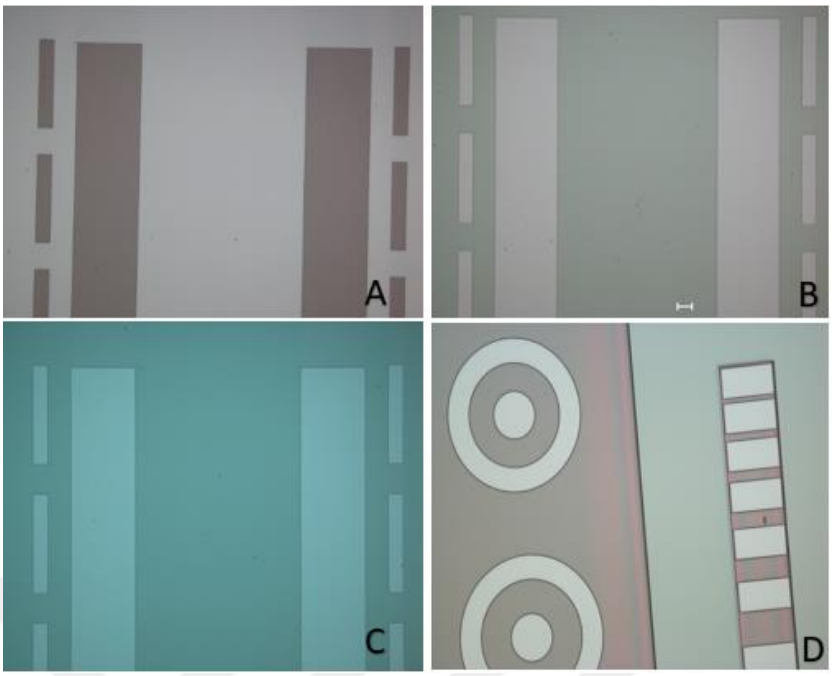
Şekil 3.7. *Aşındırma derinliğini gösteren profilometre ekran görüntüsü*

Aşındırma sonrası alttaş aseton ve izopropil alkol ile temizlendi. Alttaşın farklı bölgelerinden optik mikroskopla görüntü alındı.

3.1.3. Pasivizasyon süreci

Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) ile 100 nm Si_3N_4 kaplandı. Bunun amacı kontaklar arası GaAs yüzeyinin sıcaklıktan dolayı bozulmasını engellemek ve yüzeyin elektriksel izalosyonunu sağlamaktır.

Kaplama sonrası alttaş, optik mikroskopta haritalandırıldı. Buhar kaplama cihazı (vapor primer) kullanarak HMDS kaplaması yapıldı. Soğuk tablada oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Döner kaplayıcı cihazı (spin coater) ile AZ5214E fotorezisti serildi. Sıcak tablada 110 °C'de 55 saniye bekletildi. Soğuk tablada oda sıcaklığına kadar soğuması sağlandı. Maskesiz litografi cihazı ile metal kapısı aşındırma maskesi Şekil 3.8-A'da görüldüğü gibi basıldı. Maskeleme sonrası alttaş yüzeyi Şekil 3.8-B'de, elle develop edildikten sonraki mikroskop görüntüleri yer almaktadır.

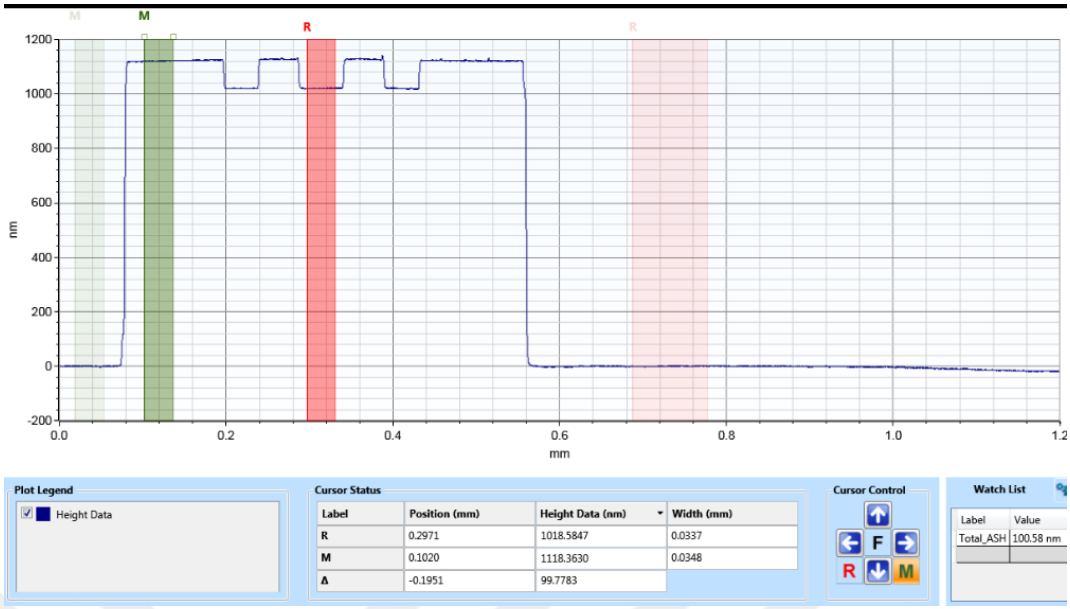


Şekil 3.8. *A: Koyu renkli bölgeleri fotorezist kaplı alttaş yüzeyi, B: Koyu renkli bölgeleri aşındırılmış GaAs yüzeyi (skala bar 100 mikron), C: Si_3N_4 kaplanmış alltaş yüzeyi, D: Fotorezist kaplı metal kapısı aşındırma maskesinin 20X ile çekilmiş optik mikroskop görüntüsü*

3.1.4. Dielektrik aşındırma süreci

Metal kaplanacak yerlerin üzerini açmak için RIE (Reactive Ion Etching) cihazı ile Si_3 N_4 aşındırması yapıldı. Profilometre ile aşındırma kalınlığı ölçüldü. Aşındırma derinliği Şekil 3.9'da görülmektedir.

Aşındırma sonrası alttaş asetonla temizlendi. İlerdeki süreçlerde, ohmik kontak üretim aşamalarında herhangi bir aksaklık olup olmadığından emin olmak için her litografi süreci sonunda alttaşın farklı bölgelerinden optik mikroskopla görüntüler alındı. GaAs aşındırmadan başlayarak dielektrik aşındırmaya olan süreçte alınan mikroskop görüntüleri Şekil 3.8'de yer almaktadır.



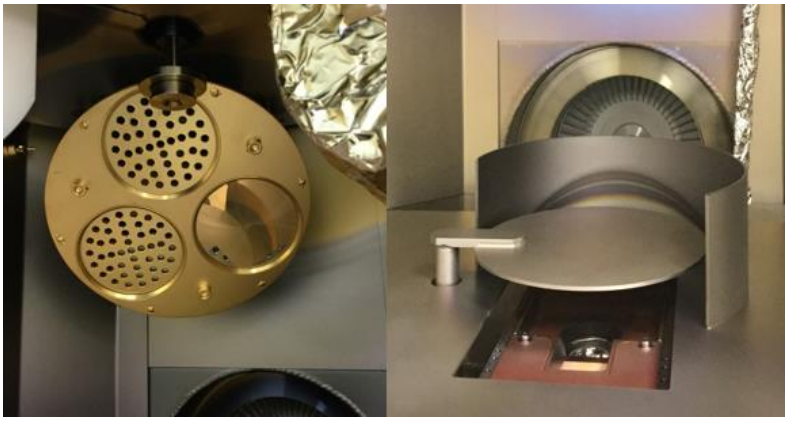
Şekil 3.9. *Dairesel TLM desenlerinden alınan aşındırma derinliği profilinde 100 nm aşındırma yapıldığı görülmektedir.*

3.1.5. Metalizasyon süreci

Alttaş, aseton ve izopropil alkolle temizlendi. Buhar kaplama cihazı kullanarak HMDS kaplaması yapıldı. Alttaşın oda sıcaklığına gelmesi beklendi. Ters görüntü (Image Reversal) işlemi yapıldı. Bu işlem kısaca özetlenecek olursa:

Alttaş 120 °C'de 10 dakika bekletildi. Oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Spin coater cihazı ile 4000 rpm'de 1 dakika TI35E fotorezisti serildi. 95 °C'de 2 dakika sıcak tablada bekletildi (soft-bake). Fotorezist kaplı alttaşa maskesiz litografi makinesi ile metal kaplama maskesi 140 mJ/cm² UV dozda uygulandı (exposure). Oda sıcaklığında alttaş 10 dakika bekletildi (delay time). Bekleme süresinden sonra 115 °C'de 2 dakika sıcak tablada tutuldu (reversal bake). Maskesiz olarak alttaş 540 mJ'da maske hizalama cihazında UV ışığa maruz bırakıldı. AZ 726MIF developer kullanılarak fotorezist kaplı desenler açığa çıkarıldı.

Metal kaplanacak yerlerin oksitten temizlenmesi için alttaş HCl: H_2O (1:20) çözeltisinde 20 saniye bekletildi. Şekil 3.11'de iç haznesi görülen elektron demeti buharlaştırma sisteminde, 0,3 A°/s kaplama oranıyla 20 nm titanyum, 40 nm platinyum, 200 nm altın kaplanarak p-kontak yapısı oluşturuldu. Kaplama sonrası, desenlenmiş metalleri açığa çıkarmak için metal kaldırma (lift-off) işlemi uygulandı. Önce asetonda 50 °C'de, sonra yüzey temizliğini sağlamak için DMSO çözeltisinde 80 °C'de bekletildi. Optik mikroskopta görüntüler alındı.



Şekil 3.10. *Elektron demet buharlaştırma sisteminin haznesinde bulunan, değişik açılarda durabilen ve gezegensel dönüş yapabilen örnek tutucu (solda) ve malzemenin buharlaştığı pota (sağda) görülmektedir.*

Profilometre ile metalizasyon kalınlığı ölçüldü. Kaplama kalınlığının 260 nm olduğu görüldü.

3.1.6. Hızlı ısıl işlem (tavlama) süreci

Optimum tavlama süresini belirlemek için her kontak (p ve n) için ayrı parametrik çalışmalar yapıldı. Numuneler 350, 375, 400 ve 420 °C'de 4 farklı sıcaklık değerinde 30, 60, 90, 120, 150, 180 ve 300 saniye olarak 7 farklı süre boyunca bırakılarak tavlandı. Direnç değerleri, yüzey durumları, alaşımlı/alaşımsız olmaları bakımından değerlendirilip makul bir sıcaklık-süre değeri belirlenmesi amaçlandı. P-kontak sıcaklık değişimine daha az duyarlıyken, n-kontak görüntülerinde sıcaklık arttıkça kontak morfolojisinde difüzyona işaret eden bozulmaların meydana geldiği görüldü. Lazer prosesinde p ve n-kontak aynı anda tavlandığından dolayı ikisi için de optimum değerin 400 °C ve 60 saniye olduğu yapılan çalışmalarla belirlendi. Tavlama çalışmalarında hem azot, hem de forming gaz (H_2-N_2: 5%-95%) kullanıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda, forming gazın kontak direncinin düşürülmesinde daha etkili olduğu görüldü.

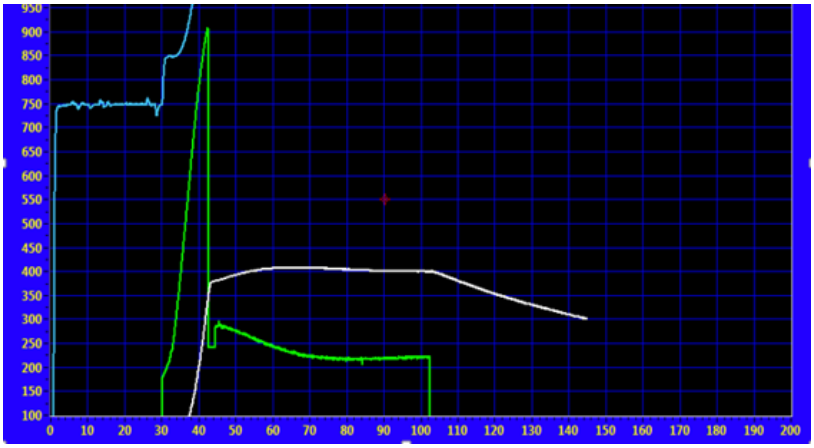


Şekil 3.11. *K-tipi ısılçift ile sıcaklık ölçümü yapan hızlı ısıl işlemci.*

Ohmik kontak oluşumu için alttaş Şekil 3.11'de görülen hızlı ısıl işlemcide (RTP) 400 °C'de 60 saniye forming gaz altında tavlandı. Tavlama profili Şekil 3.12'de görülmektedir. Tavlamaya ait ısıl işlem parametreleri de Tablo 3.1.'de yer almaktadır.

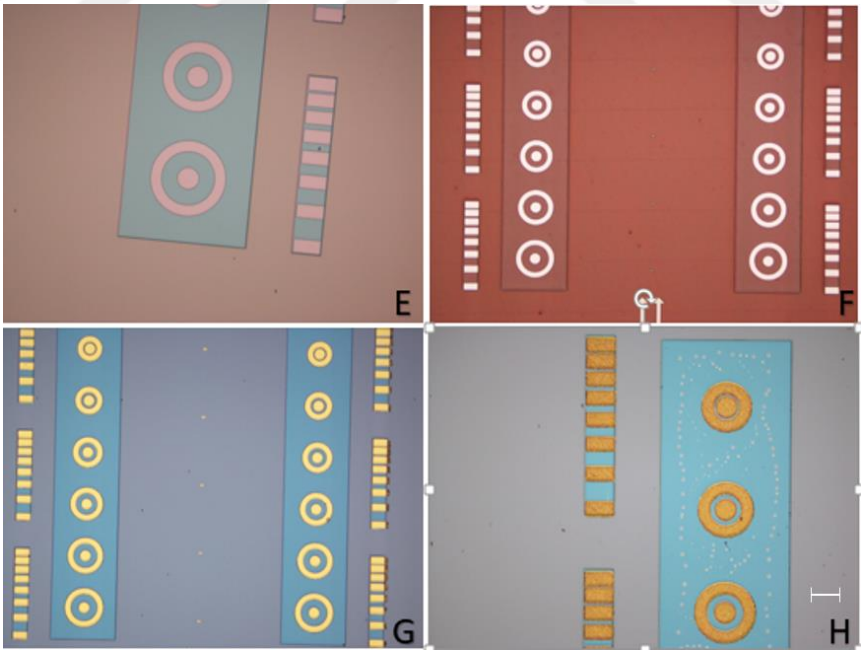
Tablo 3.1. *Ardışık olarak yapılan adımlardaki ısıl işlem parametreleri*

Adım	İşlem	Kontrol sıcaklığı (°C)	Çıkış oranı/ adım süresi (s)	REM/Yoğunluk	Kontrol Aygıtı	Forming gaz akışı (sccm)
1	Temizlik	25	30	0.00	Trey TC	7.0
2	Isıtma	400	40	60.0	Trey TC	8.0
3	Sabit tutma	400	60	24.0	Trey TC	8.0
4	Soğuma	300	100	0.00	Trey TC	8.0
5	Bitirme	300	60	0.00	Trey TC	7.0



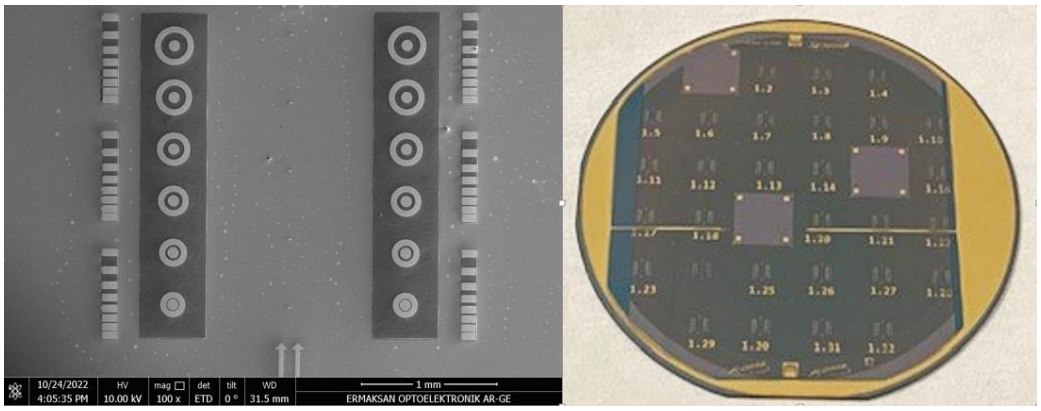
Şekil 3.12. *Sıcaklığın süreye göre değişimini gösteren tavlamanın sıcaklık- zaman profilinde yatay eksen saniye cinsinden geçen süreyi, dikey eksen de beyaz çizgi için santigrat cinsinden ölçülen sıcaklığı göstermektedir.*

Si_3N_4 aşındırmasından tavlamaya kadar olan litografi süreçlerinde yüzeyde meydana gelen değişimler Şekil 3.13'te görülmektedir. Metal kaplama aşamasından sonra tavlanan ohmik kontak yapılarının renginde koyulaşma ve difüzyona işaret eden noktacıklanmalar meydan geldiği görüldü. Si_3N_4 kaplı bölgelerde ise küçük beyaz yuvarlakların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.13. *E: Si_3N_4 aşındırma sonrası, örneğin 10X büyütme ile optik mikroskopla alınmış görüntüsü, F: Koyu renkli bölgeleri fotorezist kaplı örneğin develop sonrası 5X' te alınan görüntüsü, G: Metal kaplandıktan sonra lift-off edilen örneğin optik mikroskop görüntüsü, H: Fabrikasyon adımları tamamlanmış örneğin mikroskop görüntüsü (skala bar: 100 µm).*

Litografi aşamaları bittikten sonra, p-GaAs yüzeyinden alınan TLM desenleri ve ohmik kontak yapıları Şekil 3.14' te görüldüğü gibidir.



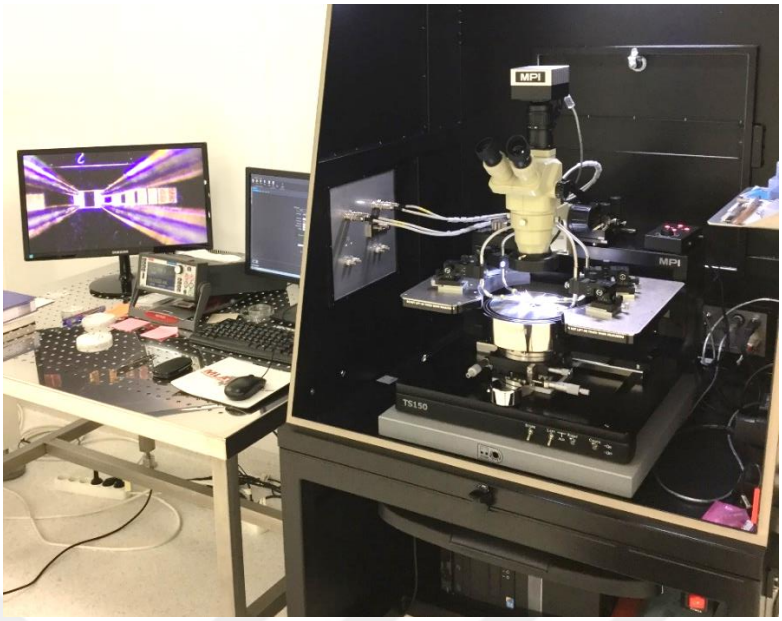
Şekil 3.14. *Litografi süreçleri tamamlanmış p-GaAs üzerinde bulunan bir ohmik kontak örneğine ait TLM desenlerinin SEM görüntüsü solda, alttaş üzerindeki tüm TLM desenlerinin fotoğraf görüntüsü sağda yer almaktadır.*

P-GaAs yapısına ait SEM yüzey görüntülerinde alltaş yüzeyine beyaz noktaların dağıldığı görülmektedir. Önceki litografi adımlarında mikroskopla incelenen yüzeylerde böyle bir durumla karşılaşılmamış olup, Si_3N_4 kaplı yüzeylerde de gözlenen benzer bir oluşumun ısıl işlem sonrası oluştuğu düşünülmektedir.

3.2. Direnç Ölçümü

Metal kaplama yapıldıktan hemen sonra (as-deposited) ve tavlamadan sonra (as-annealed) kontaklardan ölçüm alındı. Dirençler; x, y ve z ekseninde hareket edebilen, Görsel 3.1'de görülen dokunuş istasyonu ve akım kaynağı yardımıyla elektriksel olarak, yüzey durumları optik mikroskop yardımıyla görsel olarak ve alaşımlı/alaşımsız olma durumları ise tavlama koşullarına karşı özdirenç değişim grafiklerinden belirlenmeye çalışıldı.

Dokunuş istasyonunda, ölçüm yapılırken örneğin hareket etmemesi için vakum sistemi bulunmaktadır. Üç boyutlu görüntü elde edebilme imkanına sahip kamerasıyla uçların örnek yüzeyine hassas bir şekilde dokundurulması sağlandı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirildi.



Görsel 3.1. *Sağda dokunuş istasyonu ve solda ölçüm yapılan akım kaynağıyla ölçüm yapılan program arayüzü görülmektedir.*

Kontaklar I-V grafiklerinin doğrusal olup olmamalarına göre Schottky ya da Ohmik olarak sınıflandırılmıştır. I-V grafikleri üssel olan Schottky kontaklarda, gerilim-akım ilişkisi doğrusal olmadığından dinamik bir dirençten bahsedilmelidir. Schottky kontakların kendi aralarında iyileşme açısından değerlendirilebilmeleri için karakteristik bir ölçüt arandı ve eşik değerleri kullanıldı.

I-V grafiğinden eşik değeri belirlenebilmesi için kullanıla gelen metodların nümerik hesap veya program gerektirmesi ve gürültünün temizlenmesi sürecinin algoritma bağımlı olması nedeniyle eşik kıyası uygulanmadı. Bunun yerine, Schottky kontakların direnç değerleri, belirlenmiş bir akıma göre normalize edilerek kıyaslamaya tabii tutuldu.

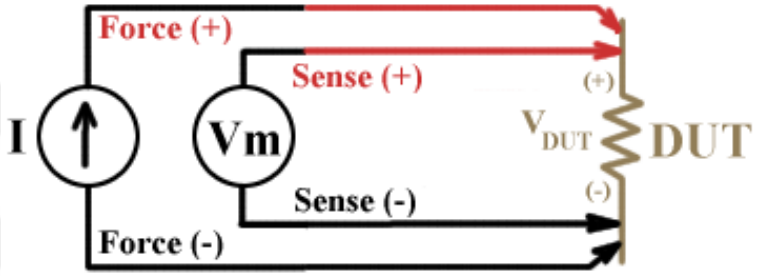
Schottky numuneler için referans akımı 10 mA seçildi ve numunelerin dirençleri bu akım referans alınarak hesaplatıldı. Tüm numuneler, I-V grafiklerinin çizdirilebilmesi için 200 adımlı ± 50 mA sweep ile sürüldü. Ohmik kontaklar ise doğrusal I-V grafikleri nedeniyle hemen hemen akım değerinden bağımsız bir dirence sahiptirler. Bu nedenle ohmik kontaklar için ayrıca 10 mA bias ölçümü alınmadı.

Şebeke frekansının ölçümü etkilememesi için, adım ölçüm zamanı 20 ms'nin (50 Hz) tam katı seçildi. İstatistiki güvenilirlik için numunelerden 100 ölçüm alınıp ortalamaları kaydedildi.

Yarı iletken lazer diyotlarda p-kontak dirençleri 15-250 ohm mertebelerinde seyreder, 2 ohm/m civarındaki kablo direnci, numune direncine küsurat olarak eklenir ve

nihai spesifik kontak özdirencinin hesaplanmasında ihmal edilebilir. N-kontaklarda yapılan direnç ölçümlerinde ise 25-90 mohm mertebelerinde değerler elde edilmiştir. Benzer şekilde, numune direnci ölçülen toplam dirence küsurat olarak eklenir.

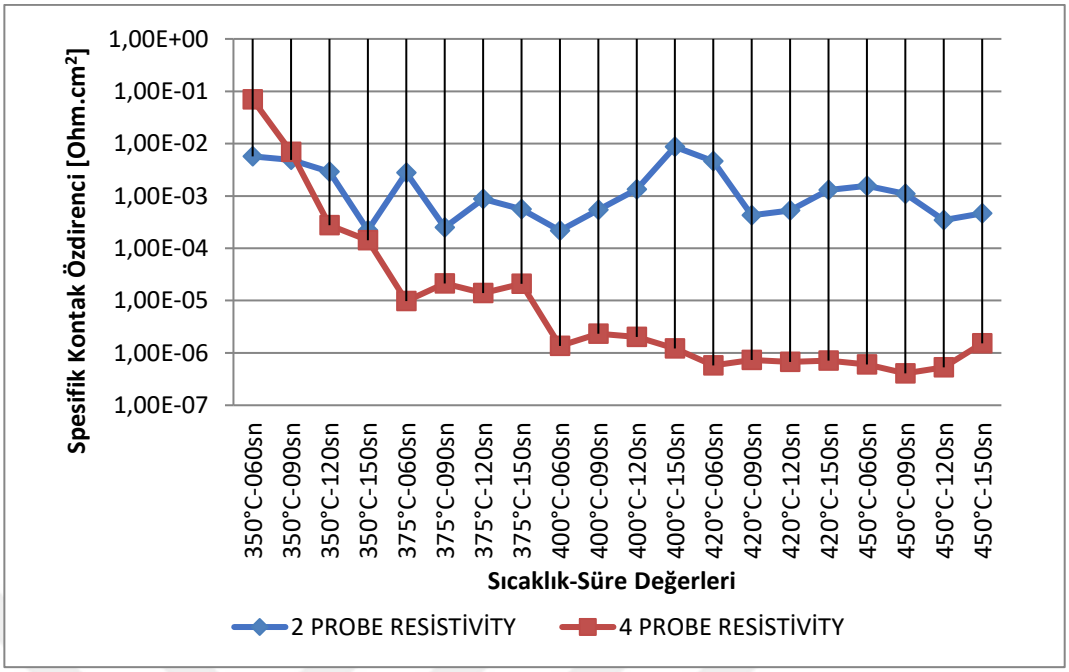
Tel dirençlerinin numune direncini etkilememesi için tüm ölçümler 4-tel (4 wire sense) ölçüm yöntemiyle alınmıştır. İki tel akım uygulamak için (force high ve force low), diğer ikisi de voltaj (sense high ve sense low) ölçümü için kullanıldı. 2-telle yapılan ölçümlerle 4-telle yapılan ölçümler birbirinden farklılıklar göstermektedir. 4-telle yapılan ölçümlerde uçların ve tellerin direncinin ölçüme etkisi çıkarıldığından daha doğru kontak direnci sonuçları elde edilmiştir. Ölçüm şeması Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. *4-telle yapılan ölçümde akımın ve voltajın direnci ölçülen aygıta (DUT) nasıl bağlandığını gösteren şema (Ref: Cirris.com).*

Ölçümler alınırken Şekil 3.15'te Force (+) ve Sense (+) uçları bir TLM desenine dokunuyorken, Force (-) ve Sense (-) uçları ardışık diğer TLM desenine dokunmaktadır. (+) ve (-) uçlar arasında gösterilen direnç, kontak dirençleriyle yarı iletkenin direncinin toplamıdır (Bkz. Bölüm 2.2).

Şekil 3.16' da aynı n-GaAs numunelerinin farklı sıcaklık ve süre değerlerinde RTP ile tavlandıktan sonra 2-tel ve 4-tel yöntemiyle ölçümünden çıkan sonuçlar yer almaktadır. 4-tel yöntemiyle alınan ölçümlerdeki direnç değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

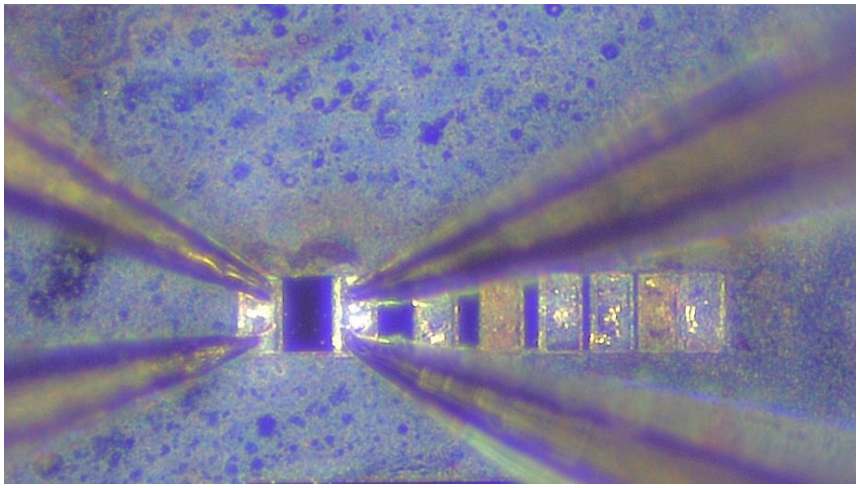


Şekil 3.16. *2 telle ve 4 telle aynı örnekten alınan ölçüm sonuçlarını gösteren grafik.*

Ölçüme etki eden diğer bir husus ise termal emf'dir. Farklı metallerin birbirleriyle olan temasında gözüken bu etki (Seebeck-Peltier) gerilim düşümüne neden olur. Termal emf'nin yönünün sabit olduğu kabul edilerek, numune üzerinden geçen akımın yönü değiştirilerek ölçüm tekrarlanır ve farktan yararlanılarak termal gürültü temizlenir.

İğnelerin fiziksel durumu ölçüm sonucuna hatta grafiğin genel görünümüne etki eder. Kirlilik hem görsel olarak numune yüzeyini bozar hem de akım geçişini zorlaştırır. Uçları yıpranıp törpülenen iğneler ise temasın etkinliğini azaltıp yüksek direnç ölçülmesine neden olur. Düzgün olmayan iğne uçları numuneye zarar vererek ölçümü güvenilmez hale getirebilir. İğneler düzenli olarak kuru hava ve IPA (izopropil alkol) ile temizlendi. Yıpranan iğneler ise yenileriyle değiştirildi. Tüm ölçümler 7µm'lik tungsten iğnelerle yapıldı. Tungsten iğnelerle TLM desenleri üzerinde ölçüm yapılırken alınan ekran görüntüsü Görsel 3.2' de verilmiştir.

Her ölçüm adımında, her ohmik kontak yapısının bir TLM deseninden ölçüm alınarak kaydedildi. Bu, hem homojenliğin bilinebilmesi hem de istatistiki güvenilirlik için gereklidir. Ölçüm sonuçlarının deftere kaydedilmesi, önceki ve sonraki numunelerle kıyaslanarak mantıksız sonuçların (hasarlı numune, iğne baskısı, vakumsuz ölçüm vb.) farkedilmesi için iyi bir yöntem olarak kullanıldı.

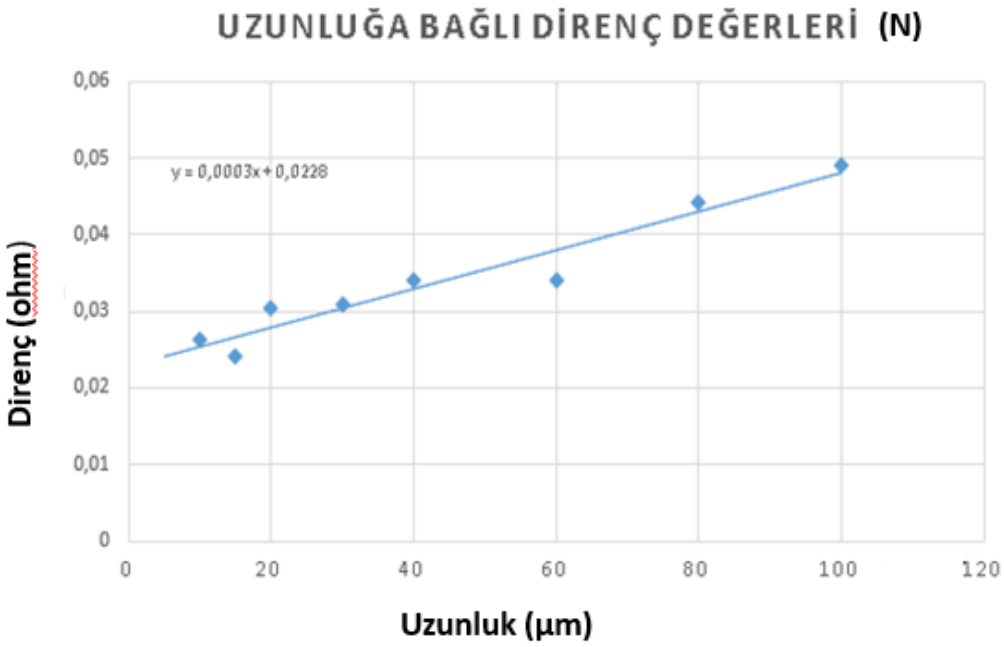


Görsel 3.2. *Yaşlandırılmış p-GaAs örneğinden ölçüm alınırken dokunuş istasyonunun kamerasından alınan ekran görüntüsü.*

Kristal direncinin ölçeklenebilir olması kontağın alaşımlı mı alaşımsız mı olduğu hakkında da fikir verir. Lazer yapısında aktif bölgeye yakınlığından dolayı alaşımsız olması istenen p-kontak grafiğinin doğrusal olması beklenirken, alaşımlı kurgulanan n-kontak grafiğinin belli bir trendi takip etmesi yeterlidir. P- ve n-kontak grafiklerinin determinasyon katsayıları (R^2) bu tahmin ile uyumludur.

Dokunuş istasyonuyla mesafeye bağlı olarak ölçülen direnç değerleri kaydedildi. Bölüm 2.2'de anlatılan hesaplama yöntemiyle spesifik kontak özdirenci değerleri hesaplandı. Direnç ölçümleri, ohmik kontak yapıları tavlanmadan önce, tavlanmadan sonra ve her 50 saatlik yaşlandırma adımı sonrasında yapıldı. Ölçüm güvenilirliğini arttırmak için farklı TLM'lerden de ölçüm alınarak, en az 5 farklı ölçüm değeri kullanılarak ortalamaları alındı.

Lazer diyot üretim aşamalarında en son n-tipi kontaklar oluşturulduktan sonra tavlama yapılmaktadır. Böylelikle, hem p-tipi hem de n-tipi kontaklar aynı anda tavlanmış olmaktadır. Tavlama için her iki kontak tipi için de aynı sıcaklık değeri seçilmesinin bir diğer nedeni de budur.



Görsel 3.3. *400 °C'de 90 saniye tavlanmış n-kontağa ait direnç-mesafe grafiği*

Akım yarı iletkenden metale geçerken, n-kontak alaşımlı yapıya sahip olduğu için çoğu zaman doğrusal bir yol izlemez. Transfer uzunluğu (L_t) metal-yarı iletken eklemde oluşan alaşımlara göre uzayıp kısalabildiği için Görsel 3.3' teki grafikteki gibi direnç değeri mesafeye göre lineer özellik göstermez. Görsel 3.4' te ise p-kontak çalışmasına ait grafik verilmiştir. P-kontakta alaşım söz konusu olmadığı için grafik doğrusaldır.

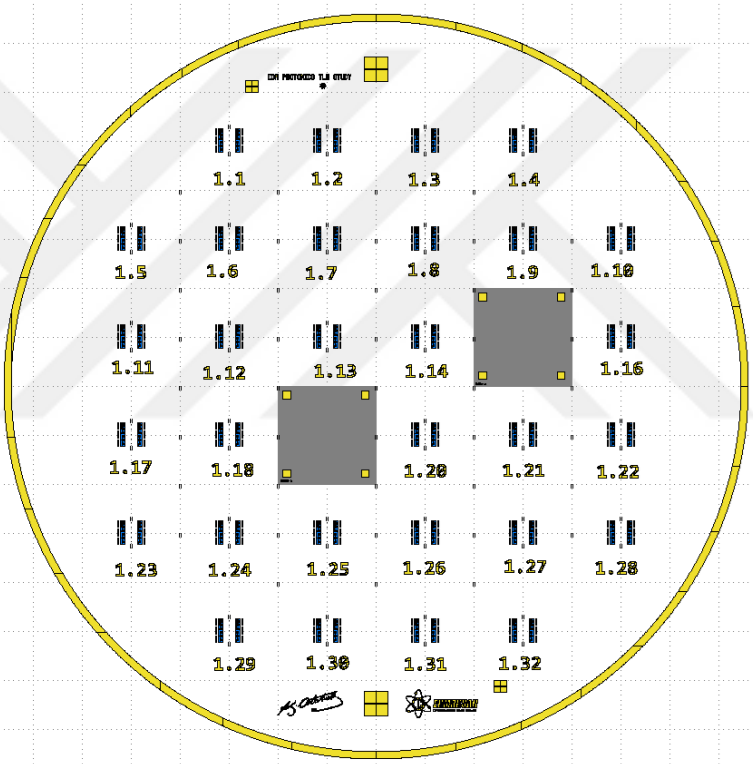


Görsel 3.4. *420 °C'de 60 saniye tavlanmış p-kontağa ait direnç-mesafe grafiği*

3.3. Kontak Yaşlandırma

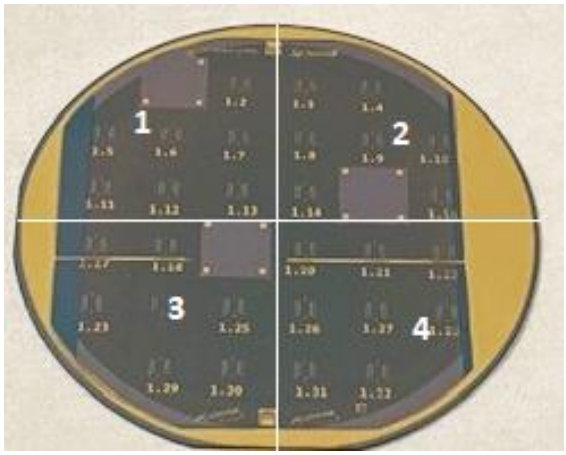
Üretilen ohmik kontak yapılarının termal stabilitesini ve zamana bağlı olarak metal katmanların sıcaklıkla değişimini görmek için belli aralıklarda ısıl işlem uygulandı. Fırınlama işlemi Eskişehir Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoboyut Araştırma Laboratuvarları'nda bulunan kül fırın kullanılarak yapıldı.

Örnekler ısıl işleme tabii tutulmadan önce, ohmik kontak üretim aşamalarının sonuncusu olan tavlamadan sonra kontak dirençleri ölçüldü. Örneklerin her birinin yüzey görüntüsü alınarak akım-voltaj eğrisi (I-V) çizdirildi. Yaşlandırmadan önce, alttaştaki örneklerin yerleri numaralarıyla birlikte Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. *Alltaş üzerinde ohmik kontak örneklerinin numaralarıyla birlikte bulundukları konumları görülmektedir.*

P ve n-kontak çalışmaları için aynı TLM desenleri elde edildi. Her iki çalışmada da alttaş, gerekli olduğu takdirde farklı sıcaklıklarda da yaşlandırma yapabilmek için Görsel 3.5' te görüldüğü gibi 4 eşit parçaya elmas uç yardımıyla kesildi. Yaşlandırma sürecini hızlandırmak için, alttaş ve kontak yapısını bozmadan çıkılabilecek en yüksek sıcaklık değeri olan 400 °C ile başlandı. Bunun bir diğer nedeni de lazer çipin paketleme aşamasında, termal fırında azot altında 400 °C'de 30 dakika kadar bekletilmesidir.



Görsel 3.5. *Dört bölüme ayrılmış GaAs yaşlandırma örnekleri*

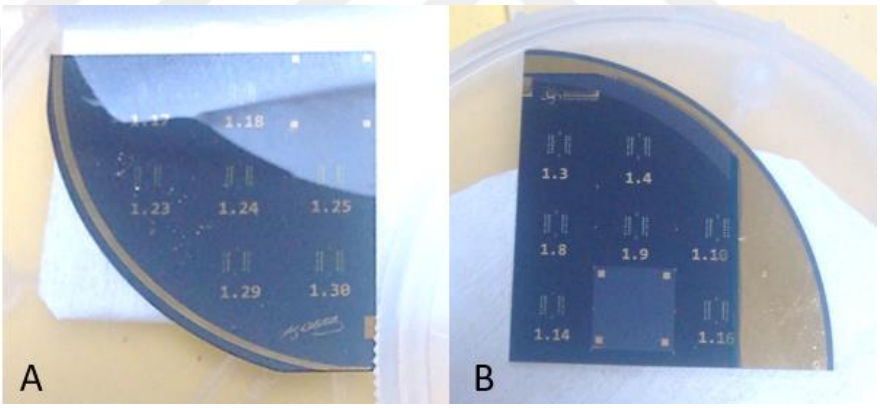
P-kontak, GaAs tabanlı aygıtların çalışmasında hayati bir öneme sahiptir. Örneğin, bir lazer çipin paketleme aşamasından sonra çalışırken ısıyı en hızlı şekilde iletmesi beklenir. Bunun için yarı iletken lazer diyot p-tarafı altta kalacak şekilde alt taşıyıcıya (submount) bağlanır. Gövde bağlaması (die bonding) diye de bilinen bu işlemde AuSn alaşımı çipi AlN alt taşıyıcıya lehimleme için kullanılır. Alt taşıyıcı da hem elektriği hem ısıyı iyi ileten lehim malzemesiyle bakır ısı emiciye (heatsink) bağlanır. Metal kaplamadan beklenen, Bölüm 2.3' te anlatıldığı gibi, reçetede en üst katmanda bulunan altının ve bondlama sonrası lazer çalışırken oluşabilecek kalaylı bir bileşiğin içe yani lazer ışığının çıktığı aktif bölgeye difüzyonunu engellemektir. Bunun için çoğu zaman, mevcut katmanların üzerine aynı veya farklı reçeteyle bir metalizasyon daha yapılır. Bir lazer çipin ortalama ömrünün 10.000 saat olduğu varsayılırsa p-kontak yaşlandırmasının önemi daha iyi anlaşılabilir. Bu önemine rağmen, geçmişte p-GaAs ohmik kontak yaşlandırmasıyla ilgili yapılan çalışmaların sayısı oldukça azdır.

Literatürde, farklı çalışmalar için farklı bir kriter belirlenmiş. Bazı çalışmalarda kontak özdirencindeki 2 katlık artış bozunma kriteri olarak belirlenmişken (Jame Eun, 1993), bazılarında % 15'lik bir artıştan bahsedilmiştir (Saravanan, 2007). Bu tez çalışmasında ise yaşlandırma süresini yeterince uzun tutmak için 10 katlık artış kriter olarak belirlenerek yaşlandırma çalışmaları yapıldı.

N-GaAs üzerine yapılan kontak alaşımlı yapıda olduğu için ohmik özelliği sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Literatürdeki yaşlandırma çalışmaları daha çok n-GaAs üzerine yoğunlaşmıştır.

Yarı iletken lazer diyot üretiminde aygıtın termal direncinin azaltılması için alttaş mekanik ve kimyasal cilalama makinasıyla 110 μm'ye kadar inceltilir. Cilalama yapılarak da kontak kaplanacak yüzeyin temiz ve pürüzsüz olması sağlanır. N-tipi metalizasyon reçetesinin üzerine bağ metali (bond metal) olarak bilinen yaklaşık 2 μm kalınlığında altın kaplaması da tel bağlamanın daha sağlam olmasını sağlar. Böylelikle, lazer diyot paketindeki tel bağlama (wire bonding) iletken ve düzgün bir yüzeye yapılmış olur. Bölüm 2.3' te anlatıldığı gibi metalizasyon ne kadar güvenilir olursa, tel bağlamanın da daha iyi kalitede olacağı kesindir. Bu, doğrudan lazer diyotun ömrüne etki eden bir faktördür.

Sıcaklık yaşlandırması 50 saatlik adımlarla yapıldı. Termal fırın 400 °C' ye çıkarıldıktan sonra içerisine azot gazı verildi. Görsel 3.6'da görülen p ve n-kontak metalizasyonu kaplı örnekler aynı anda silikon alttaş üzerinde fırına konuldu, süre bitiminde tekrar aynı anda fırından çıkarıldı. Her 50 saat sonrasında örneklerin yüzeyleri incelendi, kontak dirençleri ölçüldü ve I-V grafikleri karakterize edildi. Toplamda 150 saat yaşlandırma süresine ulaşıldı.



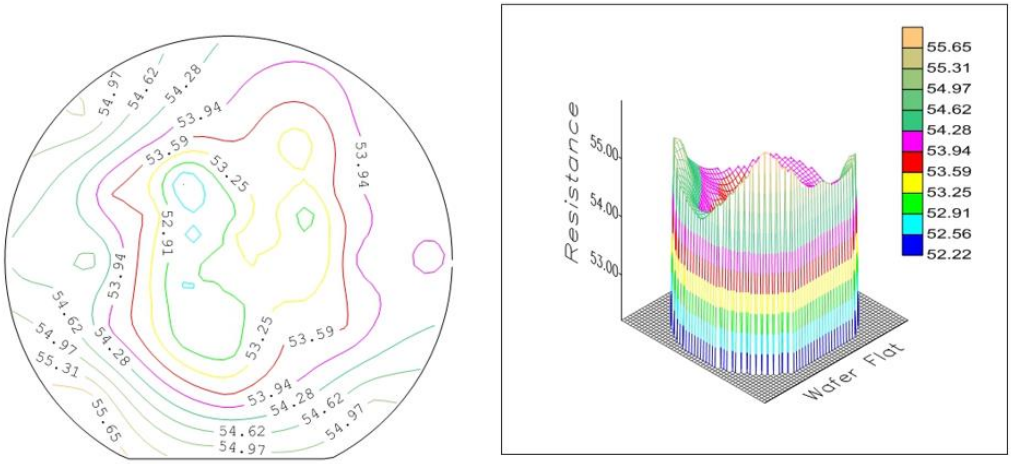
Görsel 3.6. *Yaşlandırmadan önce A'da 3 numaralı n-kontak örneği, B'de 2 numaralı p-kontak örneği görülmektedir.*

Özdirencin artmasının kontağın bozunması anlamına geldiği önceden yapılan çalışmalardan bilinmektedir. Direnç değerlerinden hesaplanarak elde edilen spesifik kontak özdirenç değerleri Sonuçlar ve Tartışma bölümünde değerlendirildi.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. P-Kontak Yaşlandırma Sonuçları

Ohmik kontakların üretimine başlamadan önce, büyütülmüş p katkılı GaAs alttaş yüzeyi, yüzey direncini otomatik olarak ölçen sistemde, R_{sh} (yüzey direnci) değerleri ölçülerek, Şekil 4.1' de görüldüğü gibi haritalandırıldı.



Şekil 4.1. *Epitaksiyel olarak büyüttürülmüş p-katkılı GaAs üzerinden alınan yüzey direnç ölçüm değerlerini gösteren eşyüzey eğrilerinin haritalandırılmış üstten görünüşü solda, yandan görünüşü sağdadır.*

Haritalandırma sonucunda Tablo 4.1' de yer alan eşyüzey eğrilerinden elde edilen veriler, deneysel yöntemle hesaplanacak olan değerlerle karşılaştırılacağı için önemlidir.

Tablo 4.1. *P-GaAs örneğine ait yüzey direnci ölçüm sisteminden elde edilen veriler.*

İstatistiksel Özet	
Test noktası sayısı:	55
Ortalama değer:	53,44 Ω/□
Maximum değer:	55,94 Ω/□
Minimum değer:	52,17 Ω/□
Örnek yayılımı (%):	7,05
Standart sapma değeri:	0,78
Alttaş homojenlik değeri (%):	1,45

Sistemin ölçtüğü değerlerde, p-tipi ohmik kontak çalışması yapılacak 3" GaAs alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyüttürülmüş p-tipi GaAs numunelerinin homojenlik düzeyi farkının % 1,45 olduğu görüldü. Bu nedenle, kontak yaşlandırma çalışması yapılacak TLM desenleri özdeş olarak kabul edildi.

Dokunuş istasyonu kullanılarak direnç ölçümleri alınıp, spesifik kontak özdirençleri hesaplandı. Tablo 4.2' de tavlanmadan önceki kontak direnci değerleri gösterilmektedir:

Tablo 4.2. *Tavlanmamış haldeki p-GaAs örneklerine ait değerler.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (μm)	ρ (10^{-5} Ω cm²)
1.3-TLM1	3,21	40,78	7,89	2,54
1.4-TLM1	3,38	40,89	8,27	2,79
1.8-TLM1	3,19	41,34	7,73	2,47
1.9-TLM1	3,31	40,58	8,2	2,73
1.10-TLM1	3,36	41,32	8,13	2,73
1.16-TLM1	1,99	43,05	4,62	2,65
Ortalama	**3,07**	**41,32**	**7,47**	**2,65**

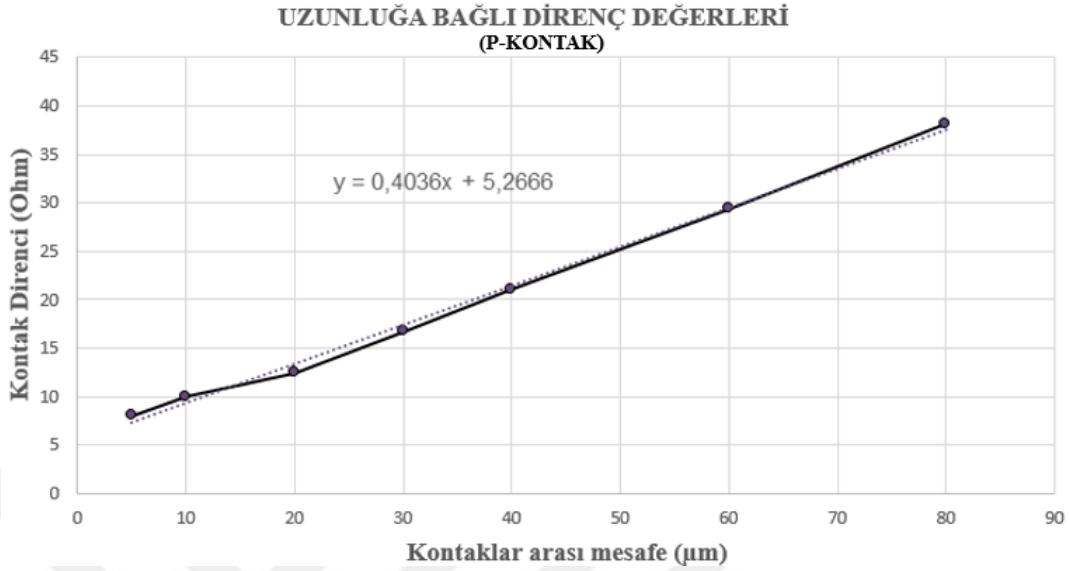
Yaşlandırmadan önce alınan karakterizasyon sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 4.3' te görüldüğü üzere, tavlanmamış haldeki p-kontak, ohmik özellik göstermiştir. Bunun nedeni yüksek katkılama seviyesinde (10^{19}/cm³) olmasından kaynaklıdır. Tavlama sıcaklığını ve süresini optimize etmek için yapılan parametrik çalışmalarda p-tipi alaşımsız (Schottky tipi) kontakta, katkılamanın kontak özdirencinde etkisinin tavlamanın etkisinden daha fazla olduğu görüldü. Kontak yapısının stabil olması ve tüketim bölgesi genişliğini biraz daha düşürmek için 400 °C' de 60 saniye tavlama yapıldı. Tavlanmış haldeki örneklerin ölçüm sonuçları Tablo 4.3' teki gibidir:

Tablo 4.3. *Tavlanmış haldeki p-GaAs örneklerinin ölçüm sonuçları.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (μm)	ρ (10^{-6} Ω cm²)
1.3-TLM1	1,87	42,95	4,37	8,22
1.4-TLM1	1,97	43,22	4,57	9,05
1.8-TLM1	1,67	44,11	3,79	6,35
1.9-TLM1	1,84	43,28	4,26	7,85
1.10-TLM1	1,96	43,37	4,52	8,89
1.16-TLM1	1,99	43,05	4,62	9,22
Ortalama	**1,88**	**43,3**	**4,35**	**8,26**

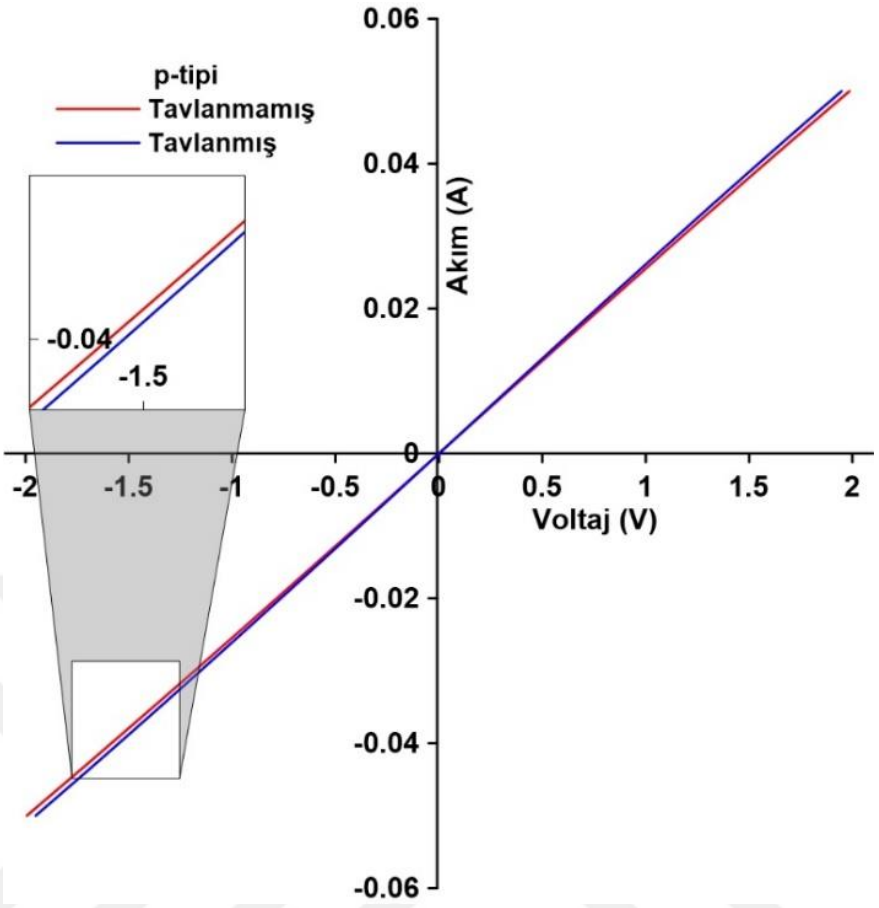
Tavlamadan sonra spesifik kontak özdirenci, transfer uzunluğu, kontak direnci değerlerinde bir azalma görülürken yarı iletkenin yüzey direncinde bir artış söz konusudur. Yaşlandırmanın öncesinde, kontak direncinin kontaklar arası mesafeyle olan

değişim grafiği çizdirildi. Yaşlandırma sonunda çizdirilecek grafikle karşılaştırılacak olan bu grafik Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2. *Tavlanmış p-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar doğrunun üzerinde veya doğrunun çok yakınında bulunmaktadır. Akım kontaklar arasında yarı iletkenin yüzey direncinden başka bir dirençle karşılaşmadığı için grafik doğrusal ve farklı noktalarda tutarlıdır.*

Tavlamadan sonra I-V karakteristiği dokunuş istasyonunda ölçülerek ohmik özelliği incelendi. Tavlamadan önceki ve sonraki grafik Şekil 4.3' te birlikte gösterilmektedir.



Şekil 4.3. *Tavlamadan önceki ve tavlamadan sonraki I-V ölçüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.*

Tavlama sonunda, spesifik kontak özdirencinde bir azalmadan söz edilebilir. Tavlamadan sonraki spesifik kontak özdirenci ölçüm değerlerinin ortalaması, tavlanmamış olan değerlerin ortalamasına bölündüğünde özdirenç değerinin 3,2 kat ($2{,}65x10^{-5}/8{,}26x10^{-6}$) azaldığı görülmektedir. Böylelikle, yaşlandırma adımları öncesinde referans olarak kullanılabilecek bir değer elde edilmiş oldu. Metalizasyon üzerinde difüzyona işaret eden yüzey değişimleri Şekil 4.5-A'da görülebilmektedir. Si_3N_4 üzerinde ise dairesel kusurlar oluşmaya başladı. Bunun nedeninin alttaştan difüzyonla gelen Ga ve As atomlarının yüzeye kadar çıkmaları ve oksitli bileşikler yapmalarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

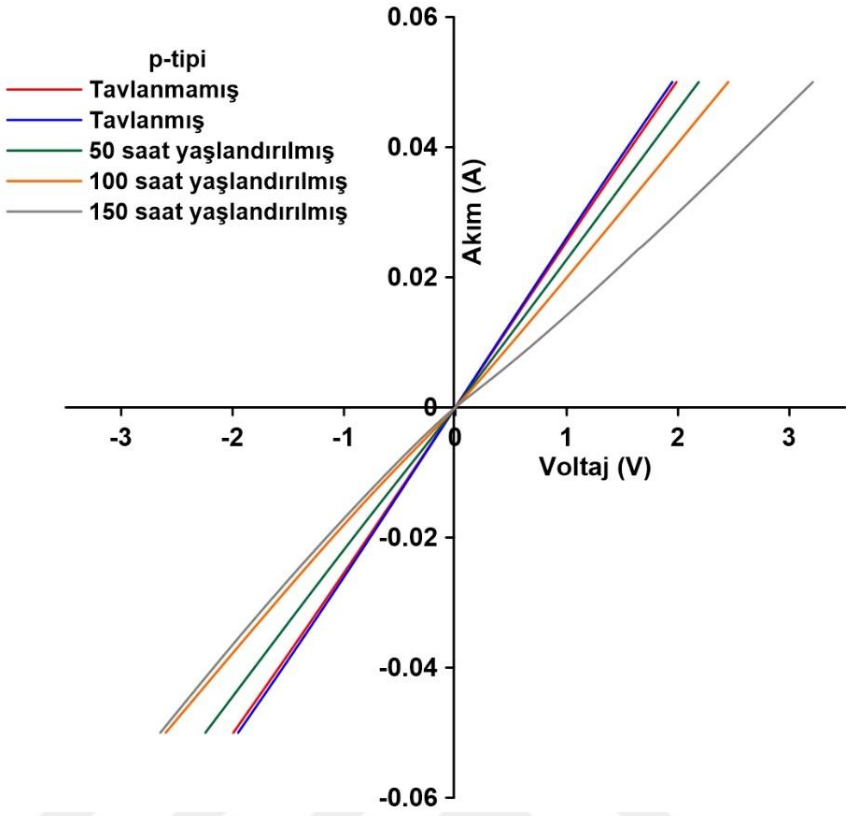
Yaşlandırmaya 50 saatlik süreyle başlandı. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'teki gibidir:

Tablo 4.4. *İlk 50 saat yaşlandırma sonunda p-kontaklardan elde edilen ölçüm sonuçları*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (μm)	ρ (10^{-5} Ω cm²)
1.3-TLM1	3,63	42,21	8,61	3,13
1.3-TLM2	3,59	52,18	6,89	2,47
1.4-TLM2	3,48	60,82	5,73	2,02
1.8-TLM2	3,48	55,02	6,33	2,2
1.9-TLM1	2,69	52	5,17	1,39
1.9-TLM2	3,99	54,85	7,28	2,9
1.10-TLM2	3,64	53,17	6,85	2,49
1.16-TLM2	3,97	51,4	7,72	3,06
Ortalama	**3,55**	**52,70**	**6,82**	**2,45**

Tablo 4.4' teki ilk 50 saatlik yaşlandırma sonundaki değerlerle, Tablo 4.3'teki değerler karşılaştırıldığında, (24,5/8,26) spesifik kontak özdirencindeki artışın 3 kat olduğu görülmektedir. Bozunma eşik değeri olan $7,52x10^{-5}$ Ω cm² değerine ulaşılmadığı için ısıl işleme devam edildi. Yaşlandırılmış örneğin akım-voltaj eğrisiyle, tavlanmış örneğin I-V eğrisi karşılaştırıldığında Şekil 4.4' teki grafikte görüldüğü gibi doğrunun voltaj eksenine yaklaşarak direncinin arttığı gözlemlenmektedir.

P-kontaklar 50 saat daha yaşlandırılarak 100 saatin sonunda direnç ölçümleri alındı. Bu aşamada, kontağın yüzey morfolojisinin biraz daha bozulduğu, Tablo 4.5' te görüldüğü gibi direncinin daha da arttığı gözlemlendi. Metalizasyon olan yerlerde, Şekil 4.5-C'deki dairesel TLM'lerde daha net görülen difüzyonla alt katmanlardan geldiği düşünülen metallerin neden olduğu karanlık ve aydınlık adacıklara benzeyen yapılar meydana geldi. Si_3N_4 kaplı yüzeylerde oluşan dairesel kusurların büyüyerek sayıca arttığı görüldü.

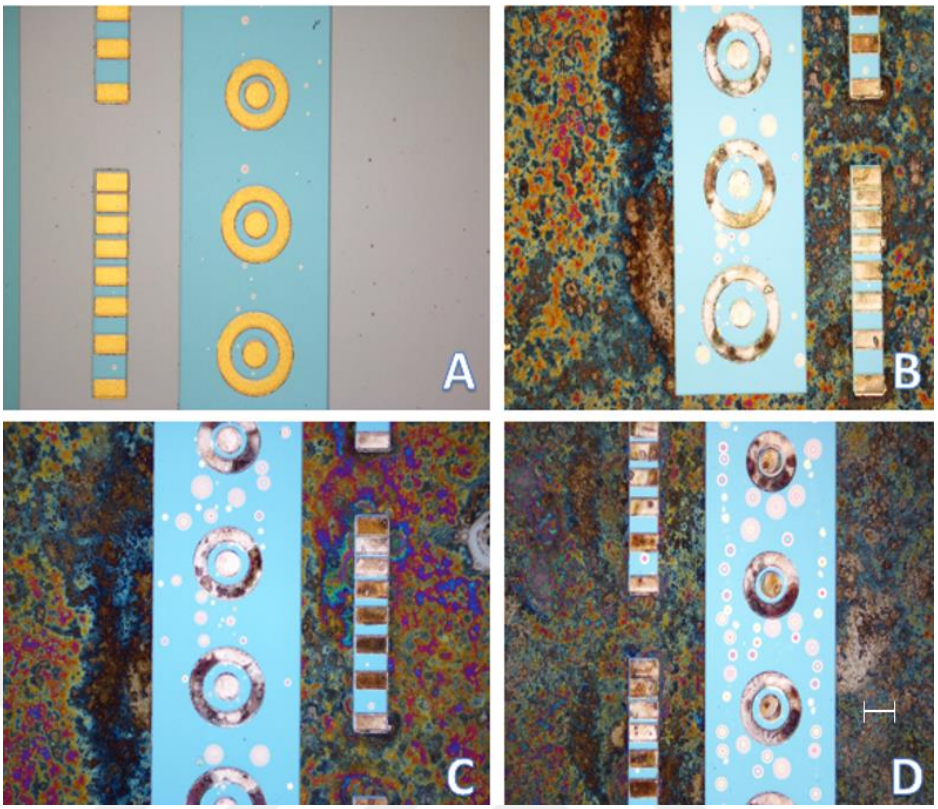


Şekil 4.4. *P-kontağın yaşlandırmadan önceki ve yaşlandırma sırasında çizdirilen akım-voltaj eğrileri. Kontak yaşlandıkça I-V eğrisinin eğiminin azaldığı ve Voltaj eksenine yaklaştığı görülmektedir.*

Spesifik kontak özdirenci değeri yaklaşık 2 katına çıktı (4,78/ 2,45). Fakat, Şekil 4.5'teki grafiklerde kontakların hala ohmik olduğu gözlendi ve bozunma kriteri olarak belirlenen değere ulaşmadığı görüldü. Toplam bozunma oranı p-kontak için 5,78 kat (47,8/ 8,26) olarak hesaplandı.

Tablo 4.5. *100 saatlik yaşlandırma sonrası p-kontak için hesaplanan ölçüm değerleri*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (μm)	ρ (10^{-5} Ω cm²)
1.3-TLM3	5,6	52,27	10,72	6,01
1.4-TLM3	5,09	53,78	9,47	4,82
1.8-TLM3	4,4	57,92	7,6	3,34
1.9-TLM3	5,64	56,72	9,955	5,6
1.14-TLM3	4,6	50,68	9,07	4,17
Ortalama	**5,06**	**54,27**	**9,36**	**4,78**



Şekil 4.5. *A: Tavlanan 1.16 kodlu TLM ohmik kontak görüntüsü (10x), B: 50 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü, C: 100 saat yaşlandırılmış 1.16 TLM kodlu örneğe ait yüzey görüntüsü, D: 150 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü (skala bar: 100 µm).*

Örnekler 50 saat daha yaşlandırılarak toplamda 150 saat ısıl yaşlandırmaya ulaşıldı ve bu yaşlandırma sonucu elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 4.6'daki gibidir.

Tablo 4.6. *150 saatlik yaşlandırma sonrası hesaplanan kontak parametrik değerleri.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-4} Ω cm²)
1.3-TLM4	9,04	42,37	21,34	1,93
1.4-TLM1	8,64	35,61	24,26	2,09
1.4-TLM5	6,75	89,54	7,54	0,5
1.8-TLM1	15,1	11,82	127,71	19,2
1.9-TLM4	8,02	47,4	16,93	1,35
1.10-TLM4	18,2	19,49	93,85	17,1
1.14-TLM3	-	-	-	-
1.16-TLM4	8,54	51,16	16,7	1,42
1.10-TLM5	13,2	55,1	23,95	3,16
Ortalama	**10,93**	**44,06**	**41,53**	**5,84**

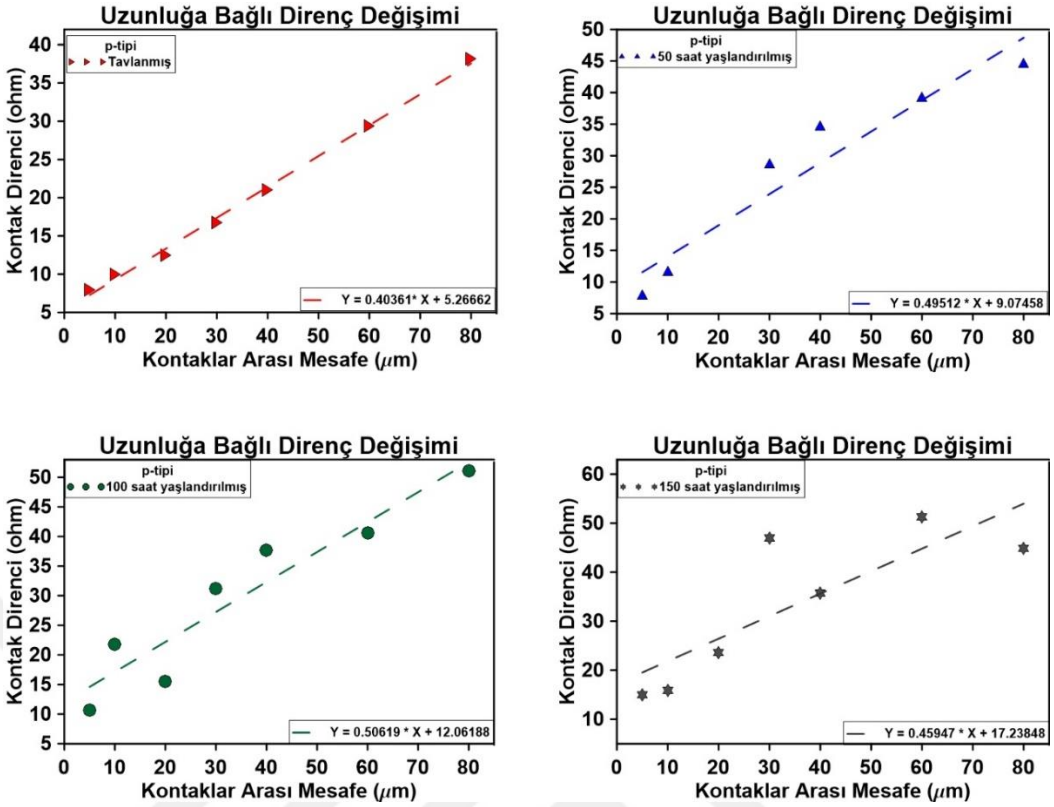
Bu sonuçlarda, spesifik kontak özdirenci değerinin belirlenen bozunma kriterine (7,5 x 10^{-5} Ω cm²) ulaştığı ve bu değeri aştığı görüldü. Şekil 4.5' te görüldüğü gibi kontağın yüzey morfolojisinin daha da kötüleşerek adacıkların sayısının arttığı, Şekil 4.4'te ise I-V grafiklerinin hala doğrusal olduğu ve kontağın ohmik özelliğini sürdürdüğü gözlemlendi. Tablo 4.7 incelendiğinde spesifik kontak direncinin hızlı bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir. 100 saatten sonra bozunma hızı çok daha artmıştır. Transfer uzunluğu da benzer şekilde hızlı bir yükselişe geçmiştir. Yarı iletkenin yüzey direncinde azalış meydana gelirken, kontak direncinde önceki adıma göre iki katlık bir artış yaşanmıştır.

Tablo 4.7. *Tavlama öncesi-sonrası ve farklı termal yaşlandırma sürelerinde elde edilen ölçüm sonuçlarının ortalamaları*

	Rc (Ω)	Rs (Ω /□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ω cm²)
Tavlanmamış	3,07	41,32	7,47	20,65
Tavlanmış	1,88	43,3	4,35	8,26
50 saat	3,55	52,7	6,82	20,4575
100 saat	5,06	54,27	9,36	40,78
150 saat	10,93	44,06	41,53	500,84

Yaşlandırma sonunda yapılan direnç ölçümlerinde yüksek ve birbirinden çok farklı değerler elde edildi. Şekil 4.6 incelendiğinde yaşlandırılmış örneklerden alınan direnç ölçümlerinin aralarındaki mesafeye oranla lineer artmadığı, dağınıklaştığı görülmektedir. Bunun nedeninin kontak direnci (Rc) değerinin artışından ve akımın kontaklar arasında yol alırken yüksek dirençlerle karşılaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Görsel 4.4'deki EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) spektrumuna bakıldığında meydana gelen pikler direnç değeri artışıyla ilgili fikir vermektedir. Spektrumda oksijen ve kolay oksitlenebilen alüminyum pikinin oluşmaya başladığı görülmektedir. Yüzeyde veya iç bölgelerde oluşabilecek oksijen içeren bileşiklerin akım iletimini olumsuz etkilediği de bilinmektedir. Şekil 4.6'da gözlenen direnç değerlerinin artan mesafeyle değişimi; tavlama aşamasında doğrusalken, örnekler yaşlandırıldıkça doğrusallıktan uzaklaşarak direncin arttığı gözlemlenmiştir.

P-tipi ohmik kontaklar alaşımsız, katkılamayla ohmik hale getirilen kontak yapısındadırlar. Bu nedenle, karbon katkılı p-GaAs ile metalizasyon ekleminde, katkılamanın etkisi azaldığında, kontağın ohmik özelliğini kaybedeceğini söylemek yanlış olmaz.

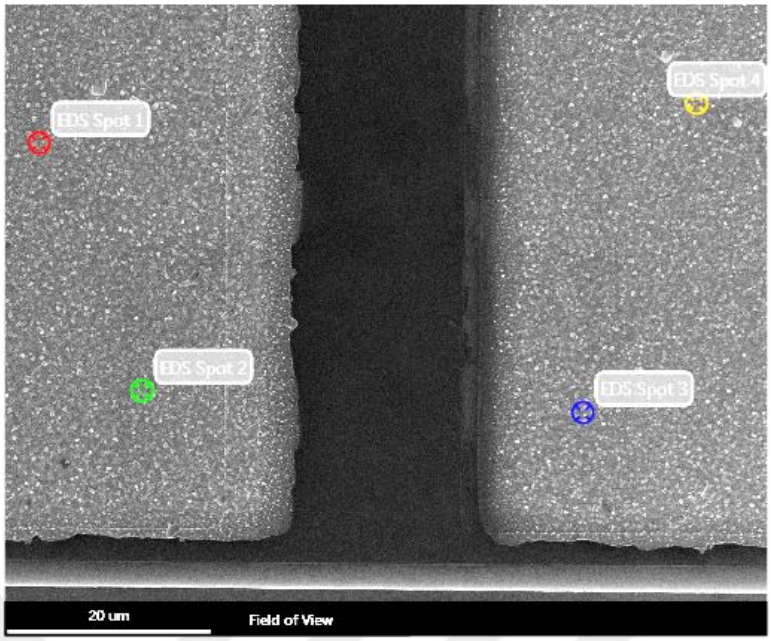


Şekil 4.6. *Tavlanmış p-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar bir doğru üzerindeyken, yaşlandırmaya devam edildikçe noktaları birleştiren kesikli çizgilerin doğrusallıktan uzaklaştığı ve dağınık hale geldiği görülmektedir.*

Daha önce yapılan çalışmalarda, elektriksel özelliklerde gözlenen bozunmalar, karşılık gelen yapısal değişikliklerle ilişkilendirilmiştir. Özellikle, ısıl işlemden sonra Schottky bariyer yüksekliğindeki belirgin bir artışın, arayüzeydeki bir oksit tabakasının sonucu olduğu tahmin edilmektedir (A.K.Kulkarni, 1985).

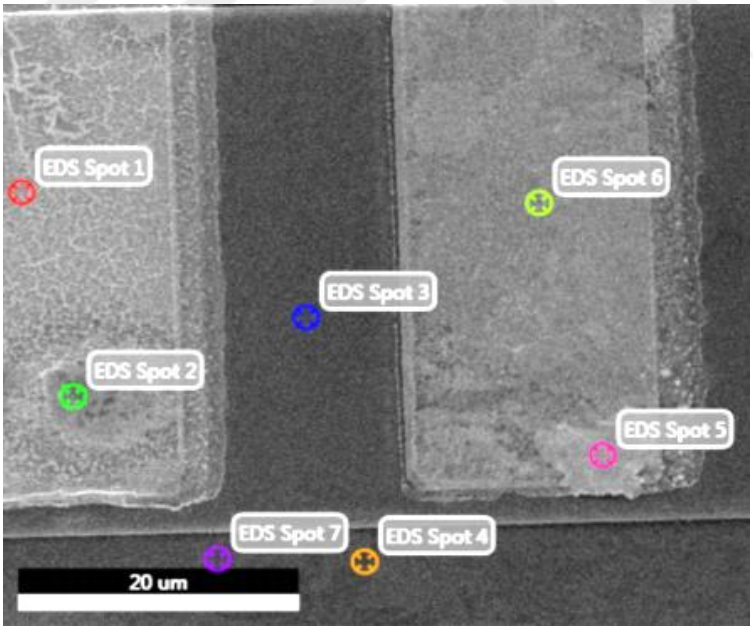
Yaşlandırmadan sonra örnek yüzeyinde ne gibi değişiklikler olduğunu daha iyi anlamak için yaşlandırmadan önceki EDS spektrumları da incelenerek her iki spektrum sonuçları karşılaştırıldı (Bkz Tablo 4.7). Yaşlandırmadan önce, tavlanmış örneğin EDS analizi yapılan noktaları Görsel 4.1' de verilmiştir (her noktanın spektrumu için Bkz Ek-1).

Görsel 4.4' teki EDS spektrumu sonuçlarına göre, spot 2'nin elementel analizine bakıldığında, oksitin atomik yüzdesinin % 50' ye yakın olduğu görülmektedir. Benzer durum spot 5 ve spot 6 sonuçları için de geçerlidir. Burdan yola çıkarak, deneysel çalışmayla elde edilen sonuçların, önceki çalışmalardan elde edilen teorik bilgiyle desteklendiği söylenebilir.



Görsel 4.1. *Yaşlandırmadan önce, tavlanmış p-GaAs örneğinin yüzeyinden EDS ölçümü yapılan noktalar.*

Metalizasyonun olduğu, yaşlandırılmamış örneğin spot 1 noktasından elde edilen spektrum Görsel 4.3' te verilmiştir.

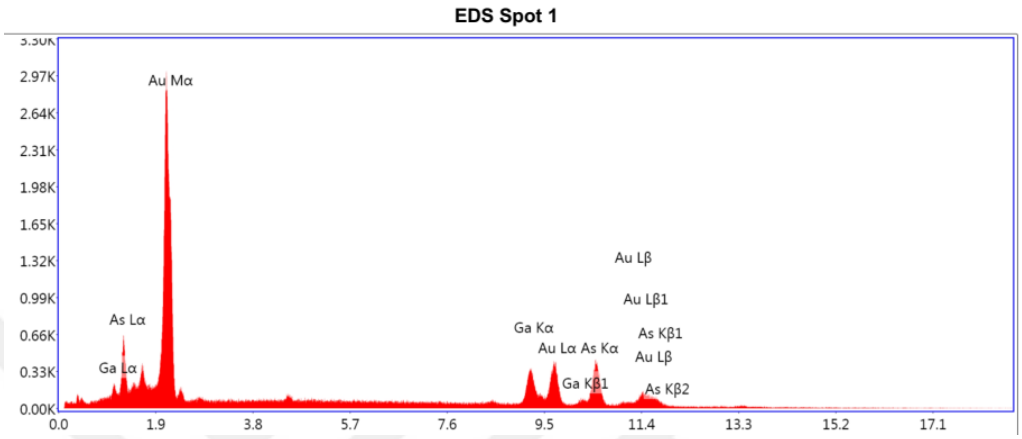


Görsel 4.2. *150 saat yaşlandırılmış p-GaAs örneğinin EDS ile incelenen bölgeleri.*

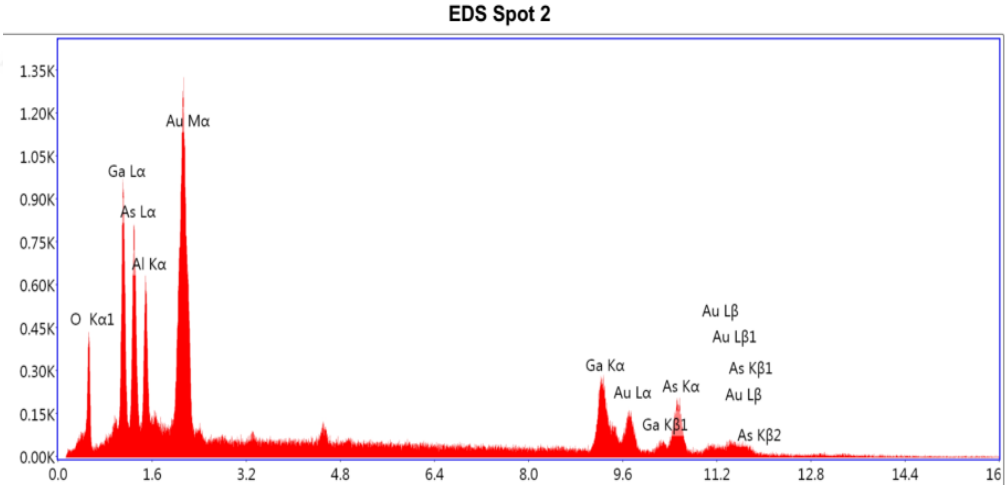
Örnek uzun bir süre boyunca, göreceli olarak yüksek sıcaklığa (400 °C) maruz bırakıldığında metalizasyon üzerinde "adaların" oluşmaya başladığı metalin yüzeysel bozunmasından görsel olarak tespit edilebilir. Bu "adaların" spesifik kontak

özdirencindeki artışın ana bileşeni olduğu tahmin edilmektedir (Jame Eun, 1993). Görsel 4.2' de, 150 saat yaşlandırmadan sonra metal kontağın üzerinde oluşan "ada"dan alınan spot 2 noktasına ait EDS spektrumu Görsel 4.4' te verilmiştir.

150 saat yaşlandırılmış p-GaAs örneğinden alınan spot 2, 5, 1 ve 6'ya ait spektrumların benzer karakteristik özellik taşıdığı görülmüştür (Bkz. Ek-2).



Görsel 4.3. *Yaşlandırılmamış dikdörtgensel metal kontağın üzerinden alınan EDS sonuçlarında Au pikinin en fazla olduğu görülüyor.*



Görsel 4.4. *TLM üzerinde bulunan spot 2 noktasına ait EDS sonuçları.*

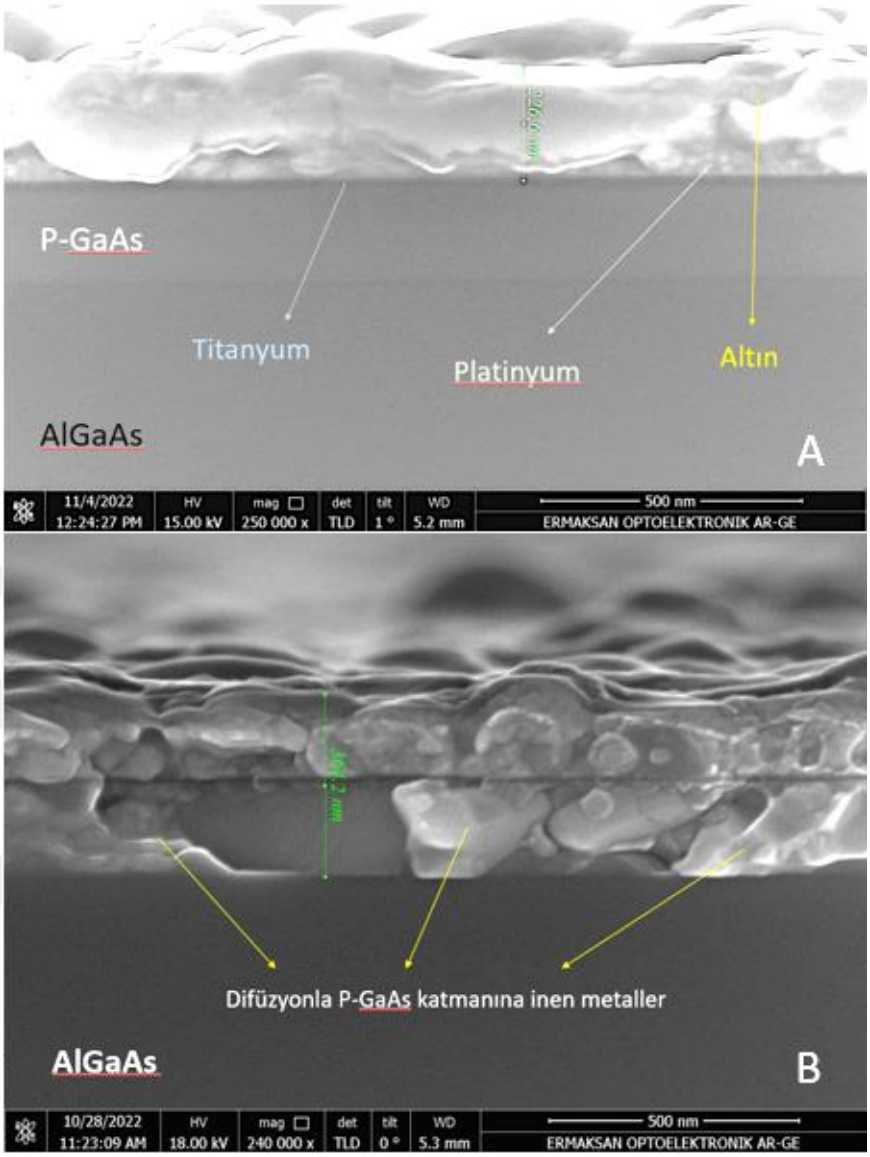
Yaşlandırılmış örnekteki spot 2'ye ait spektrumla yaşlandırmadan önceki spot 1'e ait spektrumu karşılaştırdığımızda, Tablo 4.8' de metalizasyon üzerinde Au'nun önemli oranda azalırken Ga' nın dış-difüzyonundan dolayı arttığı, As'nin iç-difüzyondan dolayı azaldığı ve O ve Al piklerinin oluştuğu görülmektedir. Metalizasyon yüzeyinde veya metal-yarı iletken arayüzeyinde oluşan oksitli bileşikler/alaşımlar akım iletim mekanizmasıyla ilgili bize fikir vermektedir. Yaşlandırmadan önce kontak, düşük

spesifik kontak özdirencine sahipken, yaşlandırmadan sonra özdirencinin artması EDS spektrumundan çıkan sonuçlarla ilişkilendirilebilir. Metal- yarı iletken arayüzeyinde ve metal katmanlarda ne gibi değişiklikler olduğunu anlamak için örnek kesitten incelenerek yaşlandırmadan önceki ve sonraki SEM görüntüleri karşılaştırıldı (Bkz. Görsel 4.5).

Tablo 4.8. *Yaşlandırmadan önceki ve sonraki EDS spektrumu sonuçlarının karşılaştırılması*

Elementler	**Yaş. Önce Spot 1**		**Yaş. Sonra Spot 2**	
	Kütlesel %	Atomik %	Kütlesel %	Atomik %
AuL	54.34	30.63	32.98	7.85
AsK	30.49	45.20	21.73	13.59
GaK	15.17	24.16	19.02	12.78
O K	-	-	16.89	49.48
AlK	-	-	9.38	16.29

Kontakların yüksek sıcaklıklardaki özgün yaşlanma davranışı, GaAs'a yüksek dirençli ve düşük dirençli kontaklar oluşturan farklı fazları içeren arayüzeyde karmaşık etkileşimlerin meydana geldiğini göstermektedir. Elektriksel stres ile yaşlanma davranışı göstermiştir ki GaAs'ın akım akışı nedeniyle kontakların lokalize olarak kendiliğinden ısınması (Joule heating), ρ_c'deki gözlemlenen bozunmadan sorumludur (Saxena A. N., 1991). Görsel 4.5' te görüldüğü gibi, yaşlandırmadan önce ayırt edilebilen farklı metal kaplamalar, yaşlandırmadan sonra iç içe geçerek farklı alaşım fazları oluşturmuştur. Metalizasyonda sıcaklığın etkisiyle, metallerin akımın aktığı yer olan yüksek p-katkılı katmana difüz edip yüksek dirençli fazlar oluşturarak, kontak direncini arttırdığı söylenebilir.

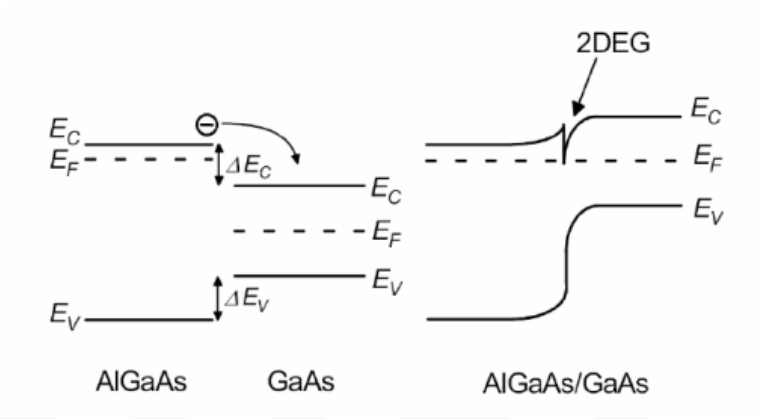


Görsel 4.5. *Yaşlandırmadan önce, tavlanmış haldeki örneğin kesitten görüntüsü A'da, 150 saat yaşlandırılmış örneğin kesitten görüntüsü B'de gösterilmektedir. A'da metal katmanlaryla p+ GaAs büyütme katmanı ayırt edilebilmektedir. B'de ise metal katmanları ayırt edilememekle birlikte, bazı metallerin p+GaAs katmanına difüz ettiği görülmektedir.*

Görsel 4.5 dikkatlice incelendiğinde yaşlandırmadan önce yaklaşık 230 nm olarak ölçülen metalizasyon kalınlığının yaşlandırmadan sonra, 200 nm kalınlığındaki p-GaAs tabakası da dikkate alındığında 160 nm'ye indiği görülmektedir. Yaklaşık 70 nm kalınlık azalmıştır. Bu durum, metal kaplamaların p-GaAs katmanına difüzyonuyla açıklanabilir.

Kontak yapısında AlGaAs tabakasının olmasının nedeni akımın alttaş içinde dikey yayılmasını engelleyerek, yatay düzlemde ilerlemesine olanak tanımasıdır. Bu da iki boyutlu elektron gazıyla (2DEG, Two Dimensional Electron Gas) mümkün olur. İki boyutlu elektron gazı, farklı bant aralıklarına sahip iki yarı iletken malzemenin ara

yüzeyinde oluşur. GaAs/AlGaAs heteroyapılarında görülen bu durumda, Fermi seviyesini eşitlemek için elektronlar yüksek bant aralıklı malzemeden (AlGaAs) düşük bant aralıklı malzemeye (GaAs) doğru geçer ve sonuç olarak Şekil 4.7' de görüldüğü gibi bant bükülür (Zumbühl, 2008). AlGaAs tarafında pozitif yükler kaldığı için iletim bandının eğriliği pozitiftir. İletim bandının bükülmesi, kesikli durumların (discrete state) oluştuğu üçgen kuantum kuyuya benzetilebilir. Eğer bu durumlar Fermi enerji seviyesinden daha düşük enerjidelerse, elektron fazlalığı oluşur (Greuter, 2009).



Şekil 4.7. *2DEG' nin oluşumunu gösteren bant diyagramı. E_c iletim bandını, E_F fermi seviyesini, E_V değerlik bandını göstermektedir. AlGaAs'ın iletim bandında bulunan elektronlar GaAs'a geçerek pozitif hale gelmektedir (Greuter, 2009).*

2DEG'den kaynaklanan yüksek elektron yoğunluğu, bölgeye metallerin difüz etmesiyle bozulmuştur. Bant yapısının bozularak elektron konsantrasyonunda oluşan bu azalışın, gözlemlenen bozunmanın nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir.

Görsel 4.5' te metallerin AlGaAs tabakasına difüz etmediği görülmektedir. Bunun nedeninin metal difüzyonunun sadece yüksek karbon katkılı ($5x10^{19}$ cm^{-3}) p-GaAs katmanı üzerinde daha etkili olmasından olduğu tahmin edilmektedir. Bir diğer nedeni de yüksek katkılı GaAs tabakasıyla AlGaAs'ın bant aralığı enerjisinin farklı olması olabilir.

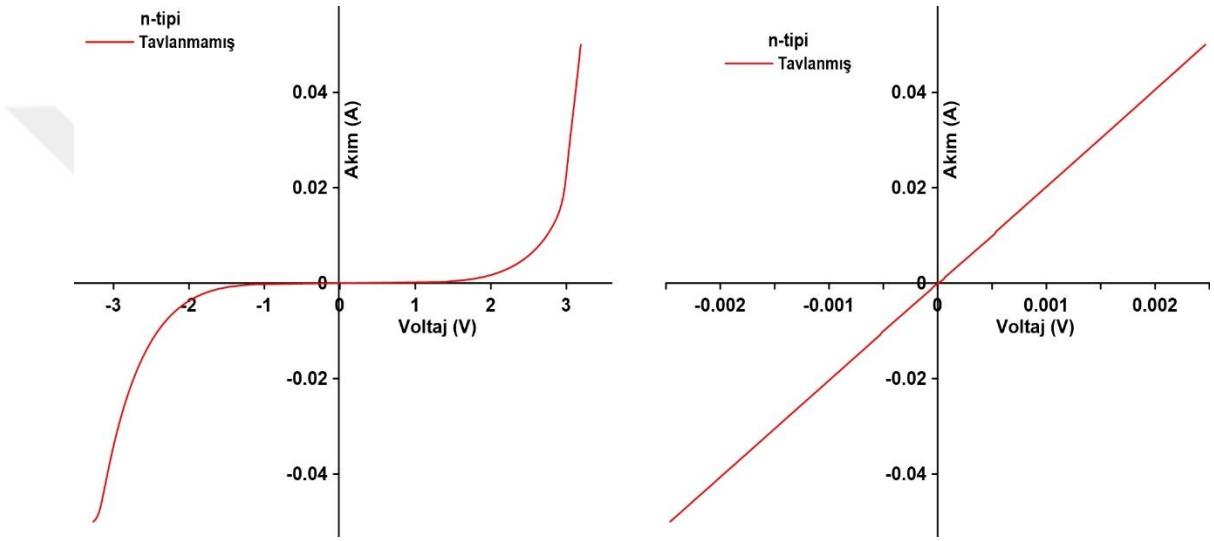
P-kontakta görülen bozunmanın önüne geçebilmek veya yaşlanmayı geciktirebilmek için bariyer katmanı olan platinyumun kalınlığı arttırılabilir. Bariyer katmanı alternatifi olarak da bazı kaynaklarda görüldüğü gibi palladyum (Pd) metali kullanılabilir (W. Y. Han and Y. Lu, 1993). Sıcaklığa dayanıklı (refractory) tungsten (W), tantalyum (Ta), molibdenyum (Mo) gibi metaller seçilerek farklı metalizasyon şemaları oluşturulabilir.

P-GaAs'a yapılan kontaklar çok dikkat çekmemiştir fakat son gelişmeler, kontak özdirencinde 10^{-7} Ω.cm²'nin altına inildiğini göstermiştir. RTP tekniği ile üretilen

Au/Zn/Au ve Pd/Zn/Pd kontak şemaları (alaşımlı kontaklar) bu gruba girer. Düşük dirençli spesifik kontak direnci elde edebilmek için NiInW ve Pd/Sb (Mn) metalizasyonları kullanılarak yapılan çalışmalarda, kontaklar 400 °C'ye sırasıyla 30 ve 20 saatten fazla bozunmadan kalabilmiştir (Leicester, 1995), (P.E. Hallali, 1991).

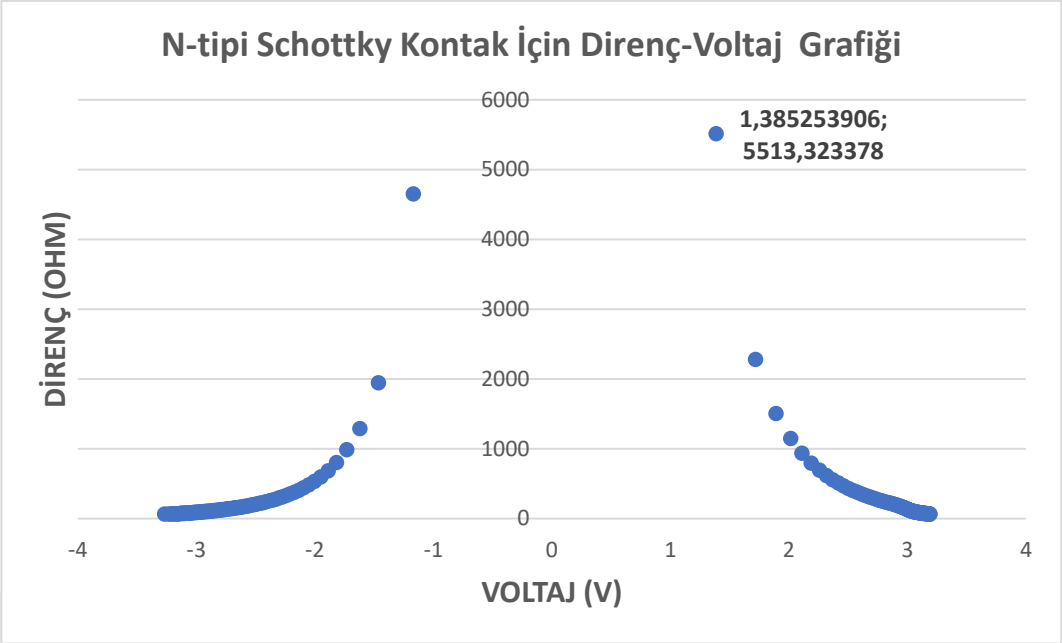
4.2. N-Kontak Yaşlandırma Sonuçları

Yaşlandırmadan önceki ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 4.8'de tavlanmamış örneğin Schottky, tavlanmış örneğin Ohmik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. *Tavlanmamış (solda) ve tavlanmış (sağda) n-kontaklara ait I-V grafikleri.*

Tavlamadan önce sabit akım uygulanarak yapılan ölçümlerde kontaklardan çok az akım geçtiği için kontak özdirenci hesaplamaları yapılamadı. Şekil 4.9' da yer alan grafiğe bakıldığında 1,38 voltta, 0,251 mA'de direnç değerinin 5513,3 Ohm'la en fazla olduğu görülmektedir. Ölçümün başladığındaki ve bittiğindeki kontak direnç değerleri ise sırasıyla 65 ohm ve 63 ohm'dur.



Şekil 4.9. *Tavlanmamış n-tipi kontakta ölçülen direncin voltaja bağlı değişimi.*

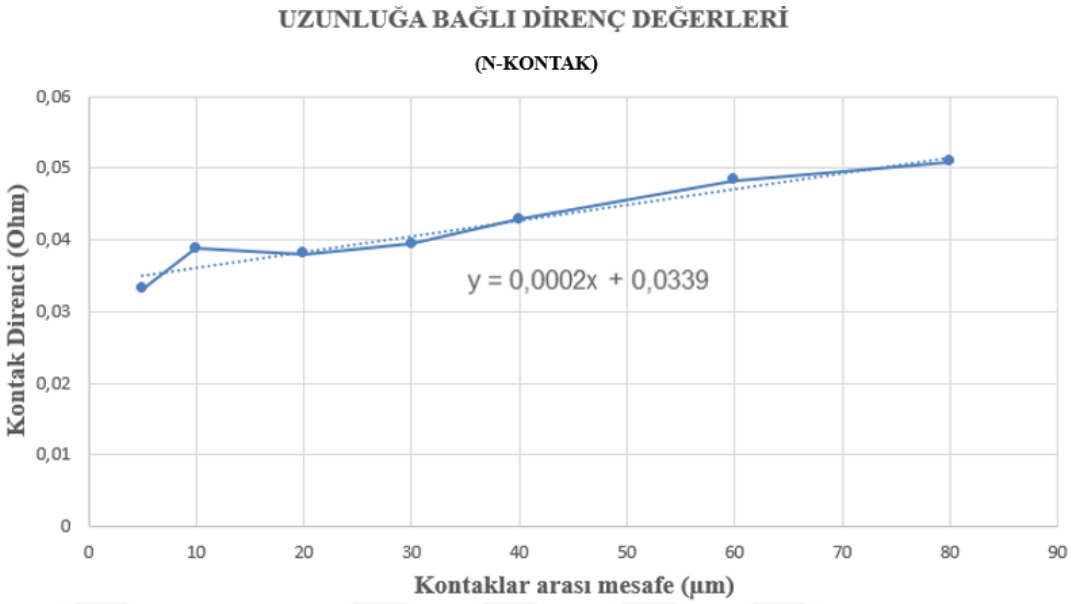
Optik mikroskopla tavlanmamış n-kontağa ait örneklerden, daha sonra yaşlandırılmış örnekler ile karşılaştırmak için yüzey görüntüleri alındı.

Forming gaz altında, Schottky kontağı ohmik yapmak için 400 °C' de 60 saniye tavlama yapıldı. Tavlama sonrasında oluşan değerler Tablo 4.9' daki gibidir:

Tablo 4.9. *Tavlanmış n-GaAs örneklerine ait ölçümler.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ωcm²)
1.17-TLM1	0,0156	0,0224	69,746	1,09
1.18-TLM1	0,0143	0,0281	50,742	0,725
1.23-TLM1	0,0188	0,0214	87,612	1,64
1.24-TLM1	0,0165	0,0234	70,506	1,16
1.25-TLM1	-	-	-	-
1.29-TLM1	0,0196	0,0215	90,779	1,78
1.30-TLM1	0,0186	0,032	58,189	1,08
Ortalama	**0,0172**	**0,024**	**71,262**	**1,25**

Tavlanmış örnek için kontak direnci-mesafe grafiği çizdirildi. Burdaki amaç, yaşlandırmadan sonra da çizilecek olan grafikle karşılaştırılarak direncin mesafeyle olan artışını ve hesaplanan değerlerdeki değişimleri incelemektir. Tavlanmış n-tipi kontaklardan ölçülen direnç değerleri Şekil 4.10' daki gibidir.



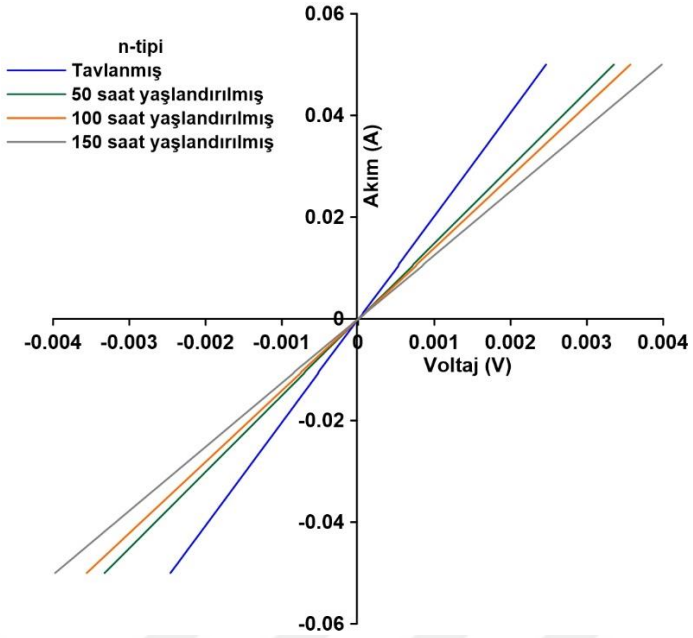
Şekil 4.10. *Tavlanmış n-GaAs örnek için kontak direnci-mesafe grafiği.*

Tavlamadan sonra örnekler yaşlandırmaya hazır hale geldi. P-kontaktaki gibi, ilk olarak 50 saatlik yaşlandırma yapıldı. Yüzey görüntüleri incelendiğinde Şekil 4.12-B' de görüldüğü gibi örnek üzerinde metalizasyonun renk değiştirerek metallerin difüzyonundan kaynaklandığı düşünülen değişimler meydana geldi. Si_3N_4 kaplı yüzeylerde ise alttan difüzyonla gelen As'den ve Ga'dan kaynaklandığı düşünülen noktasal kusurların oluştuğu gözlendi. 50 saatlik termal yaşlandırma sonunda oluşan değerler Tablo 4.10' daki gibidir:

Tablo 4.10. *50 saatlik yaşlandırma sonunda n-tipi kontağın hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ω cm²)
1.17-TLM2	0,0291	0,018	160,49	4,68
1.18-TLM2	0,0222	0,035	62,57	1,39
1.23-TLM2	0,024	0,032	74,79	1,79
1.24-TLM2	0,026	0,017	151,28	3,90
1.25-TLM2	0,022	0,036	61,65	1,37
1.29-TLM2	0,026	0,024	107,33	2,80
1.30-TLM2	0,025	0,020	122,87	3,15
Ortalama	**0,024**	**0,026**	**105,85**	**2,73**

Tavlamayla ohmik özellik kazanan n-kontakta yaşlandırma adımları devam ettikçe direnç değerlerinin arttığı sonucu Şekil 4.11'deki grafiklerden çıkarılabilir.



Şekil 4.11. *N-kontağa ait akım-voltaj grafiği. Tavlamadan sonra ohmik özellik en fazla iken, termal işlem uygulandıkça ohmik özellik azalmaktadır.*

Tablo 4.10' daki tavlanmış örneklerin sonuçlarıyla Tablo 4.11'deki değerler kıyaslandığında ρ_c değerinin 2,18 (2,73/1,25) katlık bir artış gösterdiği görüldü. Bozunma kriteri olan 1.25×10^{-5} Ω cm² (10 katlık artış) değerine ulaşılmadığı için yaşlandırma adımlarına devam edildi.

Toplam 100 saatlik yaşlandırma sonrasında hesaplanan ρ_c değerleri Tablo 4.11' de gösterildiği gibidir:

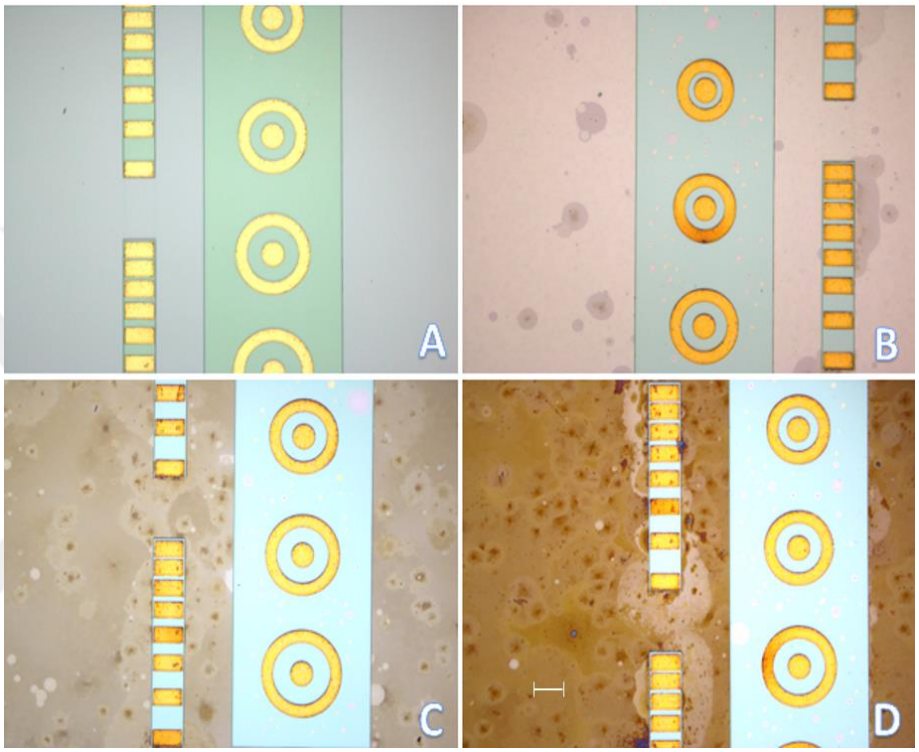
Tablo 4.11. *100 saatlik yaşlandırma sonunda hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ω cm²)
1.17-TLM3	0,024	0,026	94,46	2,35
1.18-TLM3	0,023	0,031	75,26	1,77
1.23-TLM3	0,023	0,033	68,11	1,56
1.24-TLM3	0,022	0,036	60,92	1,36
1.25-TLM3	0,025	0,027	91,9	2,36
1.29-TLM3	0,027	0,016	163,96	4,56
1.30-TLM3	0,027	0,017	157,44	4,26
Ortalama	**0,024**	**0,026**	**101,72**	**2,60**

100 saatlik termal yaşlandırma sonunda spesifik kontak özdirenci değerlerinde az da olsa bir azalma görülmektedir. Fakat, örneklerin yüzey morfolojisi incelendiğinde

bozunmaların artarak devam ettiği görülmektedir (Bkz Şekil 4.12-C). P-kontakla karşılaştırıldığında yüzeyin daha iyi durumda olduğu gözlendi.

N-kontak için 100 saat sonunda hesaplanan değerler 50 saatlik yaşlandırma sonuçlarıyla karşılaştırıldığında hemen hemen aynıdır. Bu aşamada n-kontak için toplam bozunma oranı 2.08 (2,6/ 1,25) kattır. Lt değerlerinin ortalamasında azalma görülürken Rc ve Rs değerlerinin ortalamaları aynı kalmıştır.



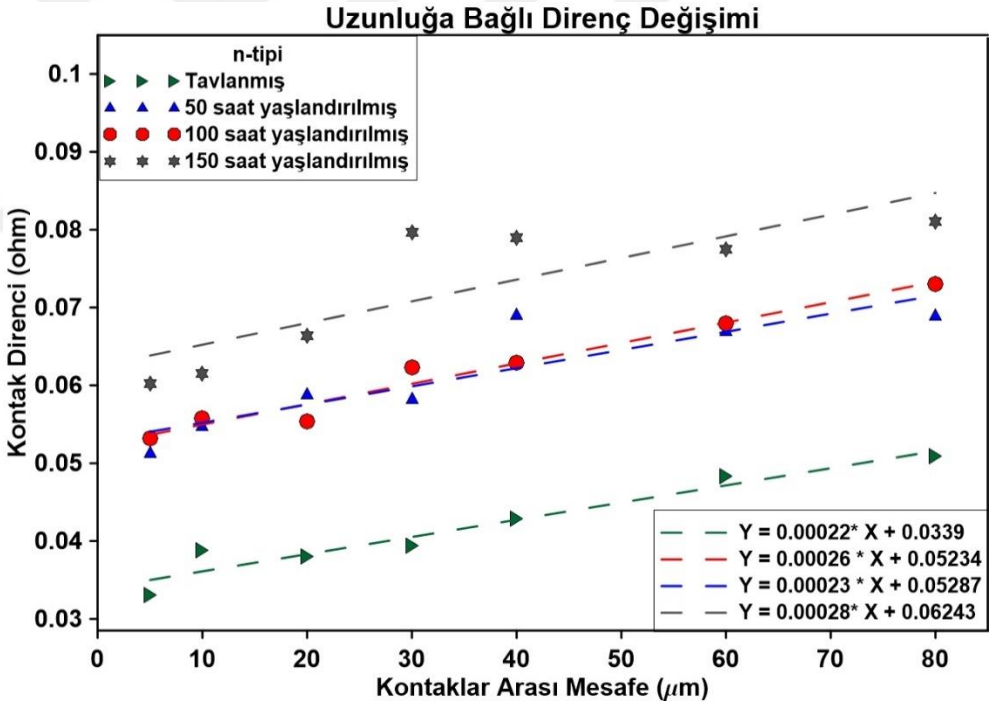
Şekil 4.12. *A: Tavlanan 1.18 kodlu TLM örneğinin ohmik kontak görüntüsü (10x), B: 50 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü, C: 100 saat yaşlandırılmış 1.18 TLM kodlu örneğe ait yüzey görüntüsü, D: 150 saatlik yaşlandırma sonundaki kontağın yüzey görüntüsü (skala bar: 100µm).*

P-kontakla paralel olarak yapılan yaşlandırma çalışmalarında 50 saat daha termal yaşlandırma yapılarak 150 saatlik yaşlandırma tamamlandı. Sonuçlar, Tablo 4.12' de gösterildiği gibidir. 150 saat yaşlandırma sonunda yapılan değerlendirmede kontak direnci, yüzey direnci ve transfer uzunluğu artmaya devam etmiştir. GaAs yüzeyinin renginin koyulaşması yüzeyin oksitlenmesi olarak yorumlanabilir. Metalizasyon üzerindeki bozulmalar p-kontaktaki kadar belli olmamakla birlikte, bozunmanın daha yavaş olduğu görülmektedir.

Tablo 4.12. *150 saatlik yaşlandırma sonunda hesaplanan spesifik kontak özdirenci değerleri.*

TLM	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ωcm^2)
1.17-TLM4	0,03	0,02	126,1	3,93
1.18-TLM4	0,03	0,02	145,3	4,41
1.23-TLM4	0,02	0,035	83,39	2,45
1.24-TLM4	0,03	0,019	163,4	5,21
1.25-TLM4	0,03	0,02	128,7	3,96
1.29-TLM4	0,03	0,02	107,9	3,33
1.30-TLM4	0,02	0,04	57,3	1,49
Ortalama	**0,027**	**0,024**	**116,01**	**3,54**

150 saatlik yaşlandırma sonunda ρ_c' deki toplam artış oranı 2,83 (3.54/ 1.25)'tür. Bu değer, bozunma kriterinden çok daha azdır. Örneklerin yüzeyleri incelendiğinde Şekil 4.12-D'de morfolojinin bozulduğu, yüzeyin pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



Şekil 4.13. *Tavlanmış n-kontağa ait mesafe-direnç grafiğinde gösterilen noktalar bir doğru üzerindeyken, yaşlandırmaya devam edildikçe noktaları birleştiren çizginin doğrusallıktan uzaklaştığı görülmektedir. Noktaların doğrusallıktan uzaklaşması p-kontaktakine göre daha azdır.*

Şekil 4.13'te yaşlandırmaya bağlı olarak gelişen direnç değerlerindeki artış gösterilmiştir. Grafiklerin eğimleri alınarak y-eksenini kestiği noktanın değerinin, yani direncinin (2Rc) arttığı görülür. 150 saat yaşlanan örneğin direncinin en fazla olduğu görülmektedir.

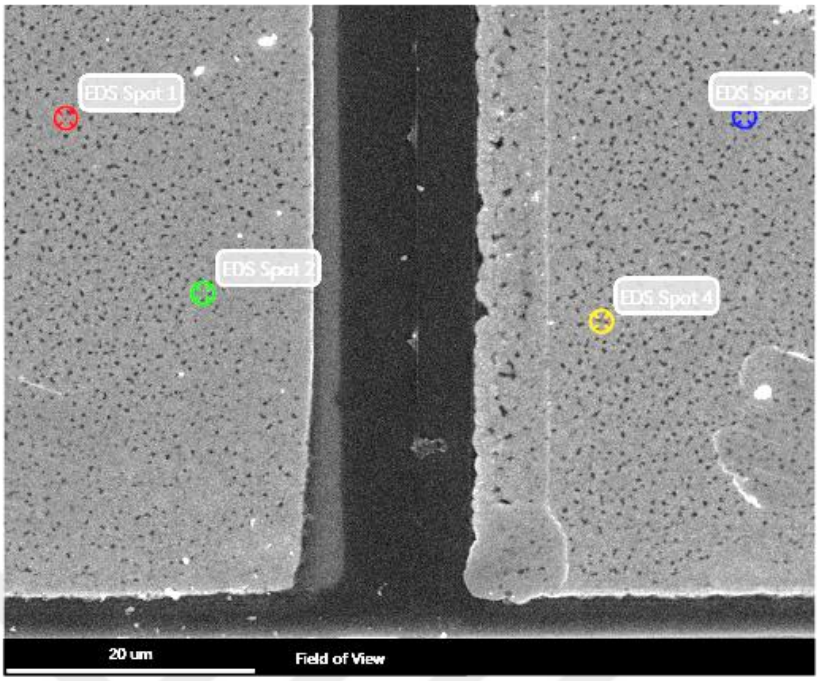
Tablo 4.13' te tavlama adımı sonrasında ve yaşlandırma adımları yapıldıkça alınan direnç ölçümlerinin sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 4.13. *Yaşlandırma öncesi ve sonrası adımlarda ortalamaları alınmış ölçüm sonuçları.*

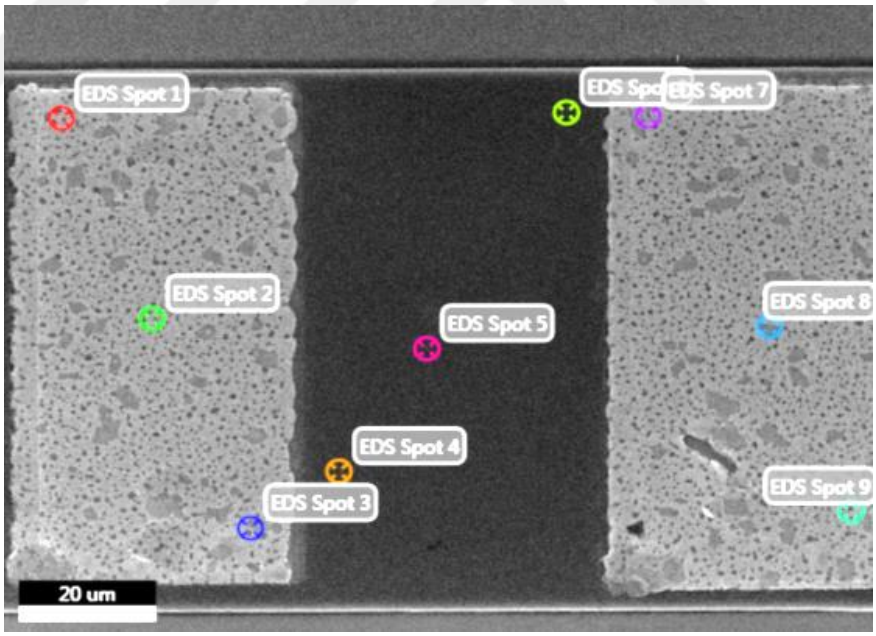
	Rc (Ω)	Rs (Ω/□)	Lt (µm)	ρ (10^{-6} Ω cm²)
Tavlanmamış	-	-	-	-
Tavlanmış	0,0172	0,024	71,262	1,25
50 saat	0,024	0,026	105,85	2,73
100 saat	0,024	0,026	101,72	2,60
150 saat	0,027	0,024	116,01	3,54

Kontak direnci (Rc), artış gösterirken, transfer uzunluğunun (Lt) da arttığı fakat yarı iletken yüzey direncinin (Rs) değişmediği gözlenmiştir. Spesifik kontak özdirenciyle (ρ_c) yüzey direnci (Rs) doğru orantılı olduğu için (ρ_c=Rs. Lt²) yüzey direncinin artmaması spesifik kontak özdirencinin artmamasına neden oldu. Bu durumda, bozunmadaki direnç artışının transfer uzunluğundan (Lt) ileri geldiği söyleyenebilir. Lt'deki ve Rc'deki bu artışların nedenlerini anlamak için yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış n-kontak örneklerinin yüzeyinden ve kesitinden SEM görüntüleri alınarak, metalizasyon üzerindeki farklı noktalardan alınan EDS spektrumları karşılaştırıldı. P-kontakta meydana gelen bozunmaya neden olduğu düşünülen faktörler, EDS spektrum sonuçlarıyla desteklenmişti. N-kontakta bozunma daha az olduğu için, yaşlandırmadan önceki ve yaşlandırmadan sonraki EDS spektrumlarının benzer olması beklenmektedir.

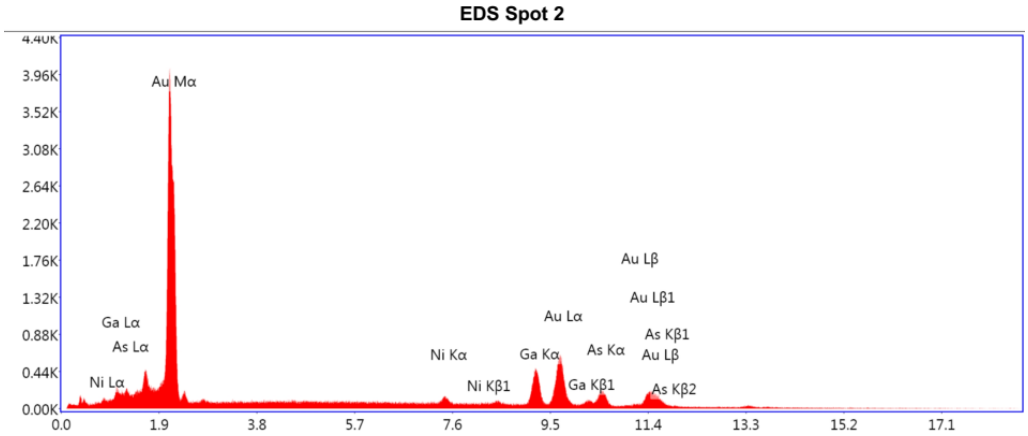
N kontak alaşımlı bir yapıya sahiptir ve hızlı ısıl işlem uygulanarak ohmik hale getirilmiştir. Termal yaşlandırma uygulandıkça, metalizasyondaki Au, Ge, Ni elementleriyle, alttaştan gelen Ga ve As elementlerinin difüzyonla yer değiştirerek farklı alaşım fazlarını oluşturabilecekleri düşünülebilir. Görsel 4.6'da, tavlanmış örneğin yüzeyinde görülen küçük siyah noktacıkların termal yaşlanmayla birlikte Görsel 4.7'de görüldüğü gibi bazılarının yüzeyce genişlediği görülmektedir. Yaşlanma sonrası yüzeyde oluşan bu farklılaşmaların o bölgelerde oluşan yüksek veya düşük dirençli alaşım fazlarından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. EDS spektrumlarında yer alan bilgilere dayanarak yorumlar ve tahminler yapılmıştır. Bu bölgelerde meydana gelen değişimlerle ilgili XPS (X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi) ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskopisi) kullanılarak daha doğru ve detaylı bilgiler edinilebilir.



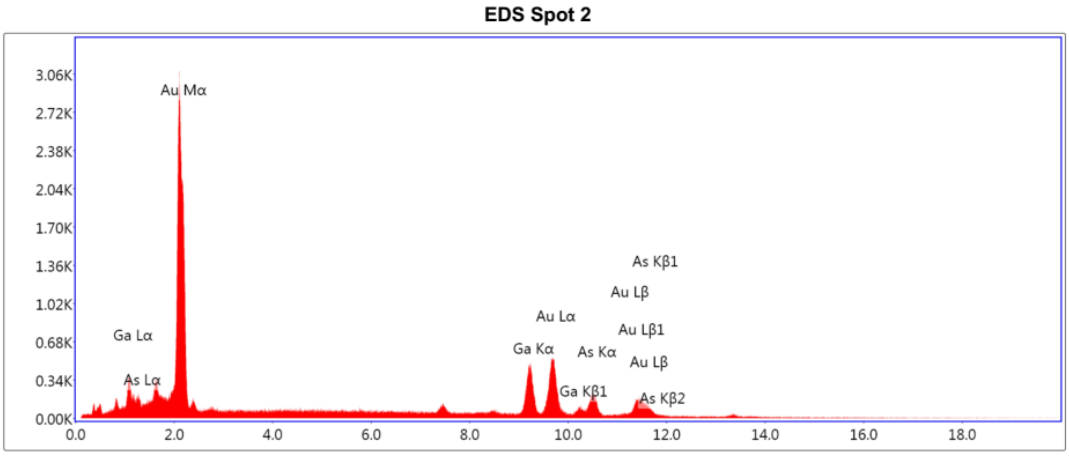
Görsel 4.6. *Tavlanmış n-GaAs örneğinin yaşlandırmadan önceki SEM görüntüsü ve analizi yapılan EDS noktaları.*



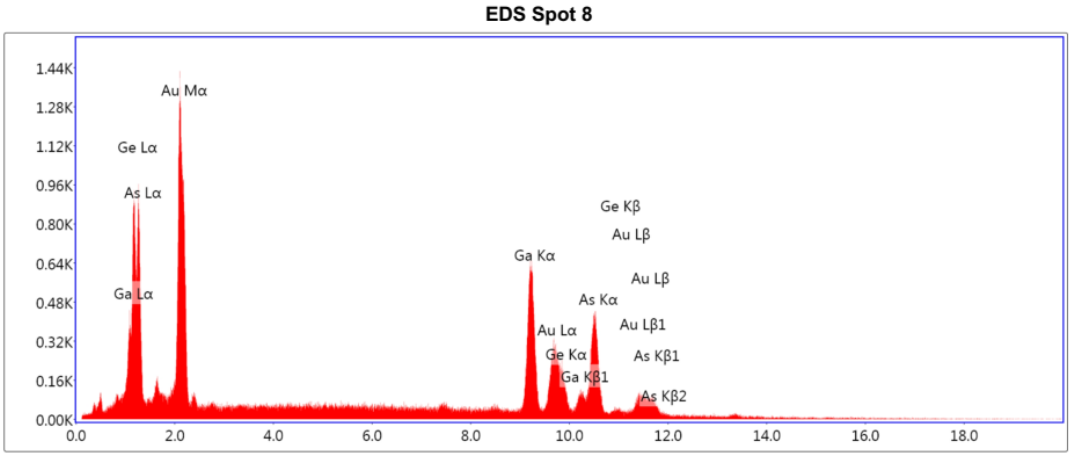
Görsel 4.7. *150 saat yaşlandırılmış n-kontağa ait SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan noktalar.*



Görsel 4.8. *Tavlanmış n- kontak örneğinin metalizasyon üzerindeki spot 2 noktasından alınan EDS spektrumu*



Görsel 4.9. *150 saat yaşlandırılmış n-kontağa ait EDS spektrumu.*



Görsel 4.10. *150 saat yaşlandırmadan sonra n-kontağa ait EDS spektrumu*

Görsel 4.6'da görülen tavlanmış haldeki örneğin spot 2 noktasından alınan spektrumu Görsel 4.8'deki gibidir. Bu EDS spektrumuyla spot 1, 3 ve 4 'ten alınan EDS spektrumlarının aynı olduğu görülmüştür (Bkz Ek-3).

Görsel 4.7'de yaşlandırma sonunda metalizasyon üzerinde gözenekli yapıların oluştuğu görülmektedir. Açık renkli bölgelere ait EDS sonuçları Görsel 4.9'da, koyu renkli bölgelere ait EDS sonuçları ise Görsel 4.10'da yer almaktadır.

Görsel 4.9'da görülen spot 2'den alınan sonuçlar açık renkli bölgeye aittir. Yaşlandırmadan önceki EDS spektrumuyla (Bkz. Görsel 4.8), yaşlandırmadan sonraki EDS spektrumu (Bkz. Görsel 4.9) karşılaştırıldığında benzer oldukları görülmektedir. (Bkz Ek-4). Bu bölgelerin sıcaklıkla yaşlandırmada bozunmadığı söylenebilir.

Görsel 4.10'da görülen EDS analiz sonuçlarıyla yaşlandırmadan önce alınan EDS analiz sonuçları (Bkz. Görsel 4.8 ve Görsel 4.10) karşılaştırılırsa bazı farklılıkların olduğu görülür. Koyu renkli gözenekli bölgelerde ne gibi değişikliklerin olduğunu anlamak ve yaşlandırmadan önceki ve sonraki EDS sonuçlarını karşılaştırmak için EDS spektrumunda yer alan elementlerin belirtilen noktalardaki kütlesel ve atomik yüzdelikleri Tablo 4.14'te özetlendi:

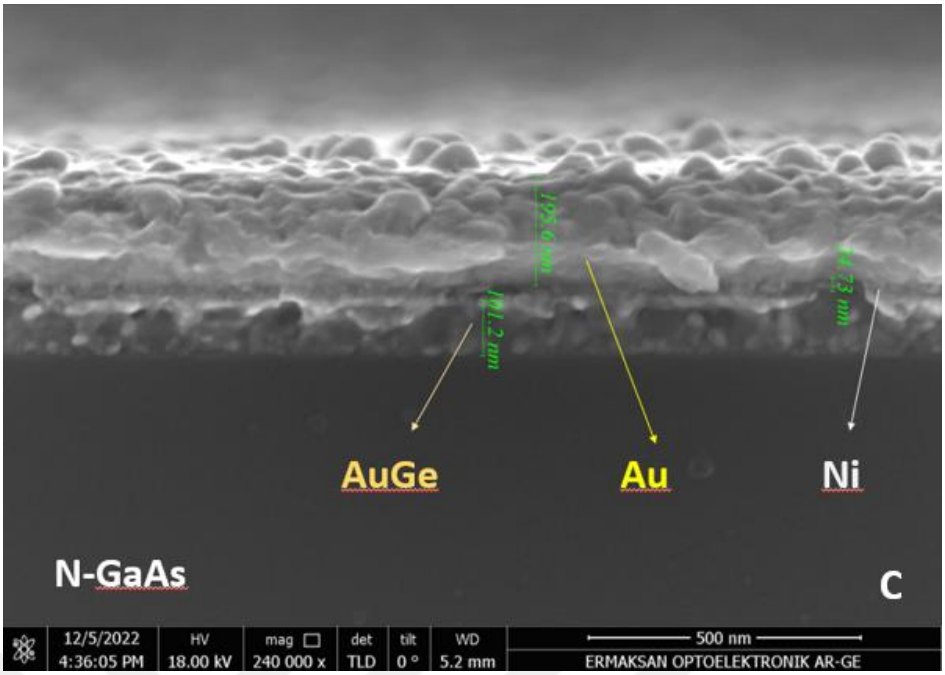
Tablo 4.14. *Metalizasyon üzerinde farklı noktalardan alınan yaşlandırmadan önceki ve sonraki EDS analizinden elde edilen elementlerin kütlesel ve atomik değişim yüzdelikleri.*

Elementler	**Yaş. Önce Spot 2**		**Yaş. Sonra Spot 2**		**Yaş. Sonra Spot 8**	
	Kütlesel %	Atomik %	Küt. %	At. %	Küt. %	At. %
AuL	70.13	45.69	68.46	44.19	34.21	16.08
AsK	11.60	19.87	13.51	22.92	32.19	39.77
GaK	15.89	29.25	18.04	32.89	24.72	32.82
NiK	2.38	5.19	-	-	-	-
GeK	-	-	-	-	8.88	11.33

Tablo 4.14 incelendiğinde, yaşlandırmadan önceki kütlesel değerlere göre, yaşlandırmadan sonra spot 2 için Au'da % 2'lik düşüş olurken As'de % 2' lik artış ve Ga'da % 3'lük artış olduğu görülür. Spot 8 için ise Au'da % 36'lık bir azalma olurken, As'de % 21'lik bir artış ve Ga'da % 9'luk bir artış söz konusudur. Ni yüzdelik oranının

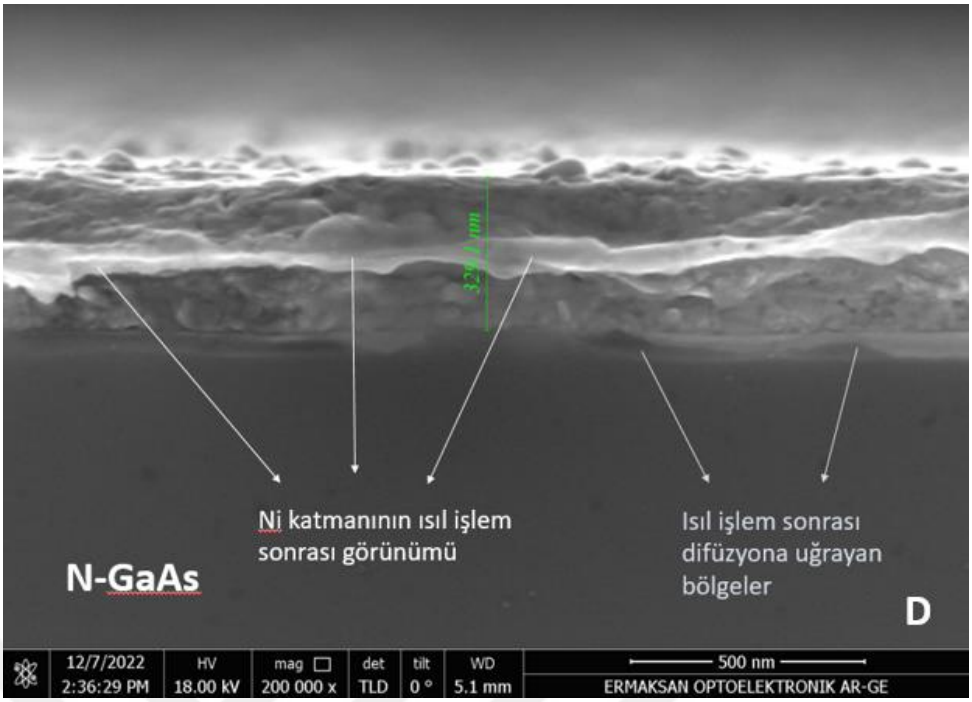
yaşlandırmayla birlikte tamamen kaybolduğu görülmektedir. Kontak yüzey morfolojisini iyileştiren ve Ge'nin GaAs'ı katkılamasını artıran Ni miktarının azalmış olması kontak yapısını ve spesifik kontak özdirenci değerini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Bunun yanısıra, spot 8'de % 8'lik Ge'nin oluştuğu görülmektedir. Amfoterik katkılayıcı olan Ge'nin dışarı difüzyonuyla GaAs'ı katkılamasında bir azalma olmuş olabilir. P-kontakta yaşlandırmadan sonra görülen oksijen piki n-kontak yaşlandırmasında görülmemiştir. Direncin p-kontağa göre çok artmamasının nedenlerinden biri bu olabilir. Her ne kadar n-tipi örneklerde GaAs yüzeyinin oksitlenmiş olduğu görünse de (Bkz. Şekil 4.11-D) n-tipi metalizasyonun üzerinde oluşan oksitli bir bileşikten söz edemeyiz. Ayrıca, p-tipi örneklerde görülen adacıklanmalar n-tipi örneklerde oluşmamıştır.

Elementsel analize dayanarak spot 2'deki gibi açık renkteki bölgelerin kontak direncini önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir. Altının difüzyonla iç kısımlara, Ga'nın ve As'nin dışarıya doğru difüz ettiği tahmin edilen spot 8'deki gibi koyu renki gözenekli yapıdaki bölgelerin kontak direncini arttırmış olabileceği düşünülebilir. Fakat, tek başına bu faktörün akım iletim mekanizmasını etkileyerek kontak direncini arttırdığını söylemek zordur. Direnç artışındaki nedenleri bulmak için doğru ve yeterli bir bilgiye ihtiyaç vardır. Bu nedenle, metalizasyon katmanlarında ne gibi değişikliklerin olduğunu anlamak için yaşlandırılmış n-kontak örneği Görsel 4.12'de görüldüğü gibi TLM deseninin ortasından kesilerek SEM'de kesitten incelendi. Yaşlandırmadan önce metal katmanları Görsel 4.11'de ayırt edilebilirken, yaşlandırmadan sonra Görsel 4.13'te metallerin iç içe geçerek farklı alaşımlar oluşturabileceği bölgeler görülmektedir. Yaşlandırma sonunda metal-yarı iletken arayüzeyinde bozulmaların meydana geldiği, bariyer görevi gören Ni katmanının nerdeyse tamamının tükendiği göze çarpmaktadır. Au ile Ga'nın 400 °C ve üstü yüksek sıcaklıklarda AuGa fazını oluşturduğu bilinmektedir. Ni ile As de NiAs fazını oluşturmaktadır. NiAs, AuGa'ya göre daha düşük dirence sahiptir. Metal-yarı iletken arayüzeyinde NiAs yapısındaki bölgelerin sayısının artması kontak direncini düşürürken, AuGa yapısındaki bölgelerin sayısının artmasının kontak direncini arttırdığı literatürde yapılmış olan çalışmalardan elde edilen bilgilerdir (Murakami M. , 2002). Yaşlandırma sonunda, kontak yapısında Ni'nin azalarak bariyer görevini göremediği, Au'nun Ga ile faz oluşturmasına neden olduğu düşünülebilir.

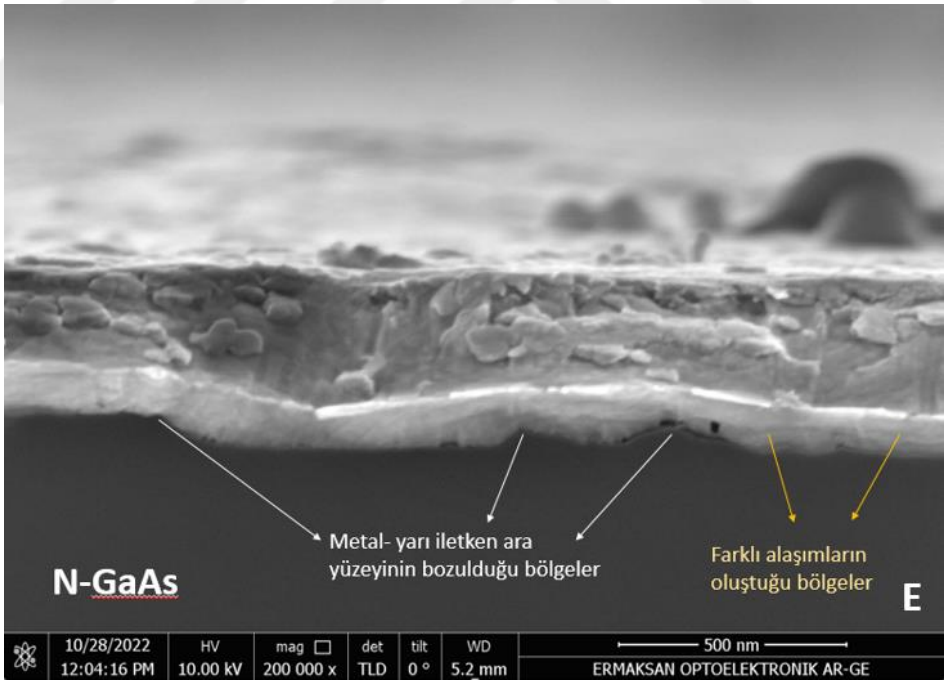


Görsel 4.11. *N-kontak örneğinin tavlanmadan önce kesitten görüntüsü. Metal kaplamalar ayrı ayrı seçilebilmektedir. Ölçülen metal kalınlıklarının kaplama yaparken girilen değerlerle yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür.*

N-GaAs ohmik kontaklar için en yaygın sistem AuGe/Ni olup, gerekli düşük kontak direncini (0,1-0,5 Ohm-mm) sağlamak için 400 °C'yi aşan sıcaklıklarda GaAs içinde alaşımlar oluşturması sağlanır. Daha sonra iletimi sağlamak için alaşımlı kontakların üzerine kalın bir Au tabakası biriktirilir. Drenaj ve kaynak kontaklarında kullanılan bu yapının yüksek sıcaklıklarda (>150 °C) bozunduğu gösterilmiştir. Bozunma, Ga'nın üst Au katmanına dışarı-difüzyonunun ve Au'nun GaAs içine difüzyonunun kontak direncinde bir artışa neden olmasının sonucudur. Ohmik kontakta kullanılan Ni katmanı Au ve Ga için difüzyon bariyeri olarak tasarlanmıştır (Kayali, 1999). Tavlamadan sonra metal-yarı iletken arayüzeyinde oluşan fazlardan NiAs(Ge) taneciklerinin sayısı arttıkça kontak direnci azalmaktadır (Murakami M. , 2002) . AuGe/Ni/Au reçetesinde GaAs'dan aşırı Ga difüzyonu, kontak arayüzeyindeki Ga boşluklarını arttırarak Ge katkılamanın etkisini azaltabilir. Ayrıca, aşırı As difüzyonu da yıkıcı olabilir (Piercy, 1987). Düşük ρ_c değerleri, Ge' nin metal katmanı üzerinden GaAs alttaşa daha etkin difüzyonuyla ilişkilendirilmiştir (Nancy E. Lumpkin, 1996). Bu referanslar gözönünde bulundurularak, n-kontak yaşlandırma çalışmasından elde edilen bulguların kontak bozunma mekanizmasında açıklayıcı bir rol üstlendiği söylenebilir.



Görsel 4.12. *N-kontağa ait tavlanmış örneğin yaşlandırmadan önceki SEM görüntüsü. TLM deseni ikiye kesildikten sonra kesitte Ni, AuGe ile Au arasında belirgin olarak görülmektedir.*



Görsel 4.13. *150 saatlik n-kontak yaşlandırmasından sonra metal-yarı iletken arayüzeyinde bozulmaların ve farklı fazların oluştuğu bölgeler görülmektedir.*

Spesifik kontak özdirencindeki artışın nedeninin metal-yarı iletken kontak arayüzey morfolojisinin ideallikten uzak olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Fermi enerji seviyesi sabitleme pozisyonunun doğrudan arayüzey yakınındaki fazla As miktarıyla

ilişkili olduğu bulunmuştur: As bakımından çok zengin GaAs, bant ortasına yakın sabitleme ve dolayısıyla n-GaAs için düşük bir bariyer yüksekliği ile sonuçlanır. As bakımından daha az zengin koşullar, değerlik bandına daha yakın sabitleme ve dolayısıyla n-GaAs için yüksek bir bariyer yüksekliği ile sonuçlanır. Bu gözlem, düşük ve yüksek bariyer yüksekliğine sahip farklı metallerin arayüzeye yakın stokiyometrisi karşılaştırılarak ve tavlamaya bağlı olarak arayüzeye yakın stokiyometride meydana gelen değişim incelenerek yapılmıştır (Eicke R. Weber, 1991). Alaşımlı kontak yapısı, n-GaAs termal yaşlanmaya maruz kaldıkça oluşan fazların As bakımından zayıflayarak bariyer yüksekliğini arttırdığı düşünülebilir.

Alaşımlı kontaklar zayıf termal dayanıklılık gösterirler çünkü tavlama süresince uçucu (volatile) grup-V bileşenleri (As, P) dışarı kolayca difüz olur ve altın gövde yapısına girer. Ti, Pt ve Au ile sıralı şekilde kaplanan alaşımlı olmayan ohmik kontaklarda alaşımlı kontakta görülen eksiklikler görülmez. Titanyum yapışkan ve bariyer katmanıyken platinyum, altının aşağı katmanlara inmesini engeller (G.Stareev, 1993). Yaşlandırma sonrasında, p-kontaktaki bariyer katmanının işlevselliğini kaybederek, n-kontaktan daha erken bozunduğu görüldü.

Cr, Ag, Pt, Ta ve Ti gibi diğer metaller, değişen derecelerde başarı ile bariyer malzemeleri olarak kullanılmıştır (JF, 1985). Ohmik kontak bozunmasıyla ilişkili aktivasyon enerjisi 0,5 eV ile 1,8 eV arasında değişir. Bu aktivasyon enerjisi, düşük çalışma sıcaklıklarında (<100 °C) makul bir kontak ömrü sağlayabilir, ancak yüksek sıcaklıklarda hızlı bozunmaya işaret eder (Irvin JC., 1985).

AuGe/Ni reçetesine alternatif olarak sıcaklığa daha dayanıklı W, Ti ve Mo gibi metalleri kullanarak oluşturulan, yüksek sıcaklık metalizasyonlarında 700 °C'ye kadar stabilite sağlanmıştır ve böylece bariyer oluşturularak Ga ve As için difüzyon önlenmiştir. Au/Cr/Au/Ge metalizasyon şeması 390 °C'de 128 saat termal dayanıklılık göstermiştir (Leicester, 1995).

N-kontaklar için kullanılmış başka bir reçete Pd/Ge/Au reçetesidir. Akım-sıcaklık yaşlandırmasını konu alan bu çalışmada (Kazior, 1990), Ni/AuGe/Ni/Au reçetesine göre Pd/Ge/Au reçetesinin daha kararlı olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada ise (A. Callegari, 1985), 410 °C'de 57 saat boyunca Ni/AuGe/Ni reçetesinin (5 nm Ni/ 100 nm AuGe/30 nm Ni/100 nm) forming gaz altında tavlanarak bozunmadan kalabildiği anlatılmıştır.

N-GaAs'a yapılan Ni/Al/Ti/Mo/Ge/In kontak sistemi 400 °C'de 250 saat sonra spesifik kontak özdirenci iki katına çıkarak belirlenen bozunma kriterine ulaşmıştır. 425 ve 450 °C için de belirlenen bozunma süreleri sırasıyla 100 saatte ve 100 saatin hemen altında oluşmuştur. Arrhenius eşitliği kullanılarak belirlenen MTBF (Mean Time Before Failure, bozunmadan önceki ortalama ömür) 288 °C için 28000 saat olmuştur (Jame Eun, 1993). Bu referanstan yola çıkarak oda sıcaklığında soğutularak çalışan ve bu metal kontak şemasına sahip GaAs tabanlı yarı iletken bir aygıtta kontak ömrünün 28000 saatten çok daha uzun olacağı söylenebilir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yarı iletken bir aygıtın çalışması esnasında tüm bileşenlerinin sıcaklığa karşı dayanıklı yapıda olması beklenir. Yüksek sıcaklıkta çalışan yarı iletken bir aygıtta termal enerjinin yarattığı etkiden dolayı atomik göçler ohmik kontağın ömrünü kısaltırken, düşük sıcaklıkta çalışan bir aygıtta ohmik kontağın ömrü daha uzun olur. Yarı iletken aygıtta ohmik kontak mühendisliği iyi yapılarak, düşük dirençli ohmik kontak yapıları elde edilmesiyle aygıtta ısı olarak açığa çıkan enerji azaltılarak, hem aygıtın verimliliği hem de uzun-dönem çalışabilir olması sağlanır. Bu tezde, ERMAKSAN A.Ş.'de üretilen yarı iletken lazer diyotlarda kullanılan ohmik kontak yapılarının termal dayanıklılığı hakkında bilgi edinmek, düşük dirençli ohmik kontak yapıları elde edilmesi ile kontak direncinin, aygıtın toplam direncine olan katkısının en aza indirilmesi amaçlandı.

Metal –yarı iletken kontaklar bölümünde yer alan ohmik kontak oluşturma ve ölçüm yöntemleri, büyütülen epi-katman ve GaAs alltaş üzerine başarılı bir şekilde uygulanarak p-kontak ve n-kontak ohmik yapıları oluşturulmuştur. Direnç ölçümleri sonucunda, spesifik kontak özdirenci değerlerinin literatür ile uyumlu düşük özdirenç değerleri elde edilmiştir ($\sim 10^{-6}$ $\Omega.cm^2$). Epi-katmanlar üzerine özdeş kabul edilebilecek çok sayıda TLM desenleri elde edilerek, her bir TLM deseninden yalnızca bir ölçüm almak kaydıyla, istatistiki güvenilirlik için en az 5 farklı direnç ölçümü yapılıp ortalamaları alınmıştır. Sonuç olarak, GaAs tabanlı yarı iletken aygıtların uzun ömürlü olması ve yüksek verimde çalışması için gerekli olan düşük spesifik kontak özdirenci, n-tipi epi katmanların p-tipi epi-katmanlara göre daha düşük olduğu hesaplanmıştır.

Uygulanan metalizasyon reçetesinin termal dayanıklılığının belirlenebilmesi için yapılan yaşlandırma çalışmalarında beklenilenin aksine p-kontak yapısı n-kontak yapısından daha erken bozunma kriterine ulaştığı görülmüştür. Tavlanmış p-kontak örneklerinde, metal tabakaları arasında herhangi bir difüzyon olmamakla birlikte, yaşlandırma sonunda metalizasyon-p+GaAs tabakası arayüzeyinde, GaAs tabakasına doğru metallerin nüfuz ettiği belirlenmiştir. Bu katmandaki metallerin difüzyonu sonucunda hem metal kontak-p+GaAs arayüzeyinin bozulması hem de GaAs/AlGaAs arayüzeyinde oluşan iki boyutlu elektron bulutunun dağılması ile akım iletim mekanizmasının olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bu yorumumuzu desteklemek adına, elde edilen EDS spektrumları ve SEM görüntüleri değerlendirildiğinde, p-kontaktaki bozunmanın nedenlerinin yüzeyde ve metal-yarı iletken ekleminde oluşan oksitlenmeler ile p-GaAs tabakasında meydana gelen metalik difüzyonların olduğu açıkça

gösterilmiştir. Ek olarak, Ti/Pt/Au reçetesini kullanarak p-GaAs ohmik kontak yapılarının yaşlandırmasına ait literatürde yok denecek kadar az çalışma yapılmış olması, bu tez kapsamında sunulan detaylı karakterizasyon sonuçları ile p-tipi ohmik kontak yaşlandırması hakkında literatüre katkı sağlayacak sonuçlar, bu tez aracılığıyla aktarılmıştır.

N-kontak yaşlandırmasında sıcaklığın etkisiyle metallerin zamanla difüzyonla yer değiştirerek alttaştan gelen Ga ve As atomlarıyla yüksek dirençli alaşım fazları oluşturduğu tahmin edilmektedir. SEM görüntülerinde yer alan metal- yarı iletken arayüzeyinde ve metal katmanlarında meydan gelen değişiklik bu alaşımlarla ilişkilendirildi. Metal- yarı iletken arayüzeyinin bozulması, elektron transferini etkileyerek kontak direncinin artmasına ve kontağın bozunmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır.

SEM görüntüleri ve EDS analizleri yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış örneklerden alınmıştır. 50, 100 saat ara yaşlandırma adımlarında SEM görüntülerinin ve EDS analizlerinin alınmamasının nedeni yaşlandırma öncesindeki hiç bozunmamış ve yaşlandırma sonundaki bozunmuş yapıdaki kontağın incelenerek karşılaştırma yapılmak istenmesidir. 50 ve 100 saatlik ara yaşlandırma adımlarında da analizler yapılıp kontak görüntülerin alınmış olması, kontak yapısında zamanla meydana gelen değişimleri daha anlaşılabilir ve karşılaştırılabilir yapar. Gelecekte yapılması düşünülen çalışmalarda bu ara adımlarda da SEM görüntüleri alınıp EDS analizleri yapılacaktır.

Sonuç olarak, uydularda kullanılan GaAs tabanlı güneş pilleri, LED, yüksek güçlü lazerler, sıcaklık sensörleri gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan optoelektronik ve HEMT gibi elektronik aygıtların geliştirilmesinde ve termal yaşlandırılmasında, bu tezde yer alan bilgiler faydalı olacaktır.

Bu tez çalışması sonucunda uzun ömürlü GaAs tabanlı aygıtlar için yapılması önerilen çalışmalar;

1. Litaretürdeki çalışmalar ile bu tez çalışmasındaki p-GaAs kontak metalizasyonu ele alındığında, kontak direncinin yeterince düşük elde edilmesine rağmen termal dayanıklılığı artırmak için metalizasyon reçetesinde geliştirmelerin gerekli olduğu sonucuna varıldı. Burada yapılacak olan çalışma, difüzyon bariyeri olarak kullanılan Pt katmanının kalınlığının arttırılarak Au'nun difüzyonla birlikte alttaş içine girmesinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

2. Bu tezdeki p-kontak çalışması farklı p-GaAs katkılama yoğunlukları ve farklı p-GaAs kalınlıkları denenerek tekrarlanacaktır.

3. N-GaAs kontak metalizasyonu literatüre uyumlu olarak düşük dirençli olarak üretildi. 150 saatlik yaşlandırma sonuçlarına göre, spesifik kontak direncindeki artış oranı önceden yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Fakat, termal dayanıklılığını görmek ve bozunma kriterine ulaşması için yaşlandırma adımlarına devam edilmesi gerekmektedir. Yaşlandırma sonucuna göre metalizasyon şeması değişikliğine gidilebilir. Alternatif reçete olarak Pd/Ge/Au reçetesi uygulanarak termal yaşlandırması yapılacaktır.

Ohmik kontağın ömrü GaAs tabanlı yarı iletken aygıtın ömründen daha uzun olmalıdır. Bu amaçla, bu tez çalışmasına benzer şekilde iki farklı sıcaklıkta daha (300 °C ve 350 °C) yaşlandırma yapılıp Arrhenius eşitliğinden faydalanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi (Ea) yardımıyla yarı iletken aygıtın gerçek çalışma sıcaklığındaki ohmik kontağın (p ve n) ömürleri hesaplanacaktır.

KAYNAKÇA

A. Callegari, E. P. (1985). Uniform and Thermally stable AuGeNi ohmic contacts to GaAs. *Appl. Phys. Lett. 46*, 1141.

A. Hoppe, D. K. (2010). Scaling limits of organic thin film transistors. *Organic Electronics*, 626-631.

A. Kroger, G. D. (1956, July). Nature of Ohmic Metal-Semiconductor Contacts. *Phys. Rev.* , s. 103, 279.

A. M. Andrews, N. H. (1972). *Solid-St. Electron 15*, 601.

A.K. Chin, C. Z. (1982). *Appl. Phys. Lett*, s. 41,555.

A.K.Kulkarni, B. (1985, Ocak 4). Degradations in the electrical and structural characteristics of Schottky diodes and ohmic contacts to GaAs due to thermal aging. *Thin Solid Films*, s. 1-8.

A.S. Holland, G. R. (2000). New challenges to the modelling and electrical characterization of ohmic contacts for ULSI devices. *Microelectronics Reliability*, s. 40(6), p. 965-971.

Berger, H. (1972). Contact Resistance and Contact Resistivity.

Cohen, S. S. (1982). Cohen, S.S. Contact Resistance and Methods for Its Determination. *MRS Online Proceedings Library 18*, s. 361–379.

Eicke R. Weber, J. W. (1991). *Structure and Reliability of Metal Contacts to GaAs.* Berkeley: University of California.

Epperlein, P. W. (2013). *Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics.* John Wiley & Sons.

Ettenberg, M. &. (1980). The reliability of (AlGa)As CW laser diodes, . *IEEE Journal of Quantum Electronics, 16*, s. 186-196.

Fukuda, M. (1999). *Reliability Testing of Semiconductor Optical Devices* .

G.Stareev, H. K. (1993). A controllable mechanism of forming extremely low-resistance nonalloyed ohmic contacts to group III-V compound semiconductors. *Journal of Applied Physics 74*, 7344.

Greuter, L. (2009). *Fabrication and characterization of ohmic contacts.*

H. Çetin, B. B. (2012). *Metal/Yarıiletken ve Metal/Arayüzey Tabakası/Yarıiletken Eklemlerin Karakteristik Parametrelerinin Araştırılması.* Kayseri: Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi.

H. Murrmann, D. W. (1969). Current crowding on metal contacts to planar devices . *IEEE Trans. Electron. Dev. 16(12)*, s. 1022-1024.

Irvin JC., D. J. (1985). Reliability of GaAs FETs GaAs FET Principles and Technology, ch. Chap. 6. Mass . *Artech House*, p.348–400.

J. M. Woodall, J. L. (1981). GaAs metallization: Some problems and trends. *Journal of Vacuum Science Technology, Vol 19, No:3*, 794-798.

Jame Eun, J. A. (1993). *High Temperature Ohmic Contact Technology to N-Type GaAs.* Purdue University.

JF, B. (1985). Reliability of the structure Au/Cr/Au-Ge/Ni/ GaAs in low noise dual gate GaAs FET. *Microelec Reliab*, 25:411–24.

Kayali, S. (1999). *Reliability of Compound Semiconductor Devices for Space Application.* Pasedana, USA: California Institute of Technology.

Kazior, T. H. (1990). Pd-Ge-Au Ohmic Contacts to GaAs: Reliability and Failure Analysis. *MRS Proceedings*, 181, 313.

Leicester, D. H. (1995, April). Failure mechanisms of high-temperature semiconductor lasers. *SPIE In Laser Diodes and Applications* , s. Vol. 2382, 30-41.

Liu, K. N. (1990, June). On the Calculation of Specific Contact Resistivity on (100) Si. *IEEE Trans. Electron Dev.*, s. 1535–1537.

M. Khani, S. S. (2012). Transmission Line Model (TLM) Method Study of Nanostructural AuGeNi/n-GaAs Ohmic Contact Layer for Different Substrate Deposition Temperature. *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012).* Tehran: Department of Physics, University of Tarbiat Moallem.

Macksey, H. M. (1976). Gallium Arsenide and Related Compounds. *Inst. of Physics Conf. Series 33b*, 254.

Marinkovic, M. (2013). Contact resistance effects in thin film solar cells and thin film transistors. *Doctor of Philosophy in Electrical Engineering*.

Mead, C. (1966). Metal-semiconductor Surface Barriers. *Solid-State Electron*, 1023-1032.

Metrological aspects of researching the specific contact resistivity of ohmic contacts by using the four-contact method, . (2014). *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, s. V. 17, N 4. P. 394-397.

Murakami, M. (2002). Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors. *Science and Technology of Advanced Materials 3(1)*, pp. 1–27.

Nancy E. Lumpkin, G. R. (1996). Investigation of low and high resistance Ni-Ge-Au ohmic contacts to n+ GaAs using electron microbeam ans surface analytical techniques. *Journal of Materials Research, Vol 11, No:5*, 1244-1254.

P.E. Hallali, M. M. (1991). Thermally stable ohmic contacts to p-type GaAs. IX. NiInW and NiIn(Mn)W contact metals. *Journal of Applied Physics 70*, s. 7443-7448.

Piercy, R. B. (1987). An İmproved Au-Ge-Ni Ohmic contact to N-type GaAs. *Solid-State Electronics Vol.30, No. 7*, pp. 729-737.

Piotrowska, A. (1983). Ohmic contacts to GaAs: Fundamentals and practice.

Reeves, G., & Harrison, H. (1982). *Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurements.*

Rhoderick, E. W. (1988). Metal Semiconductor Contacts. Oxford: Clarendon Pres.

Rideout, C. C. (1969, Feb). "Normalized Thermionic-Field (TF) Emission in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers. *Solid-State Electron*, s. 89-105.

Rideout, V. (1975). A review of the theory and technologyof ohmic contacts to group III-V compound semiconductors. *Solid State Electronics*, 541-550.

S. Yamakoshi, M. A. (1979, December). *IEDM Tech. Dig.*, s. 122.

S. Yamakoshi, M. A. (1981). *IEEE* , s. QE-17, 167 .

S.M., S. (1981). Metal-Semiconductor Contacts. S. Sze içinde, *Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed* (s. 255–258). New York: Wiley.

Saravanan, G. S. (2007). Reliability studies of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to MESFETs by accelerated thermal aging tests. *2007 International Workshop on Physics of Semiconductor Devices*, (s. pp. 462-465).

Saxena, A. K. (1985). Metal Semiconductor Contacts: Ohmic and Rectifying. *IETE Journal of Education*, 3-14.

Saxena, A. N. (1991). *Reliability of Schottky and Ohmic Metallization in GaAs.* New York: Dayton Uni OH.

Schroder, D. (2006). *Semiconductor Materials and Devices Characterization.* . N.Y. : Wiley.

Schroder, D. L. (1984). Contact Resistance: Its Measurement and Relative Importance to Power Loss in a Solar Cell. *IEEE Trans. Electron Devices, ED-31*, pp. 647-653.

Sheremet, V. (2014). Metrological aspects of researching the specific contact resistivity of ohmic contacts by using the four-contact method. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, s. V. 17, N 4. P. 394-397.

Slimane Oussalah, B. D. (2005). A comparative study of different contact resistance test structures dedicated to the power process technology. *Solid-State Electronics 49*, 1617–1622.

Stratton, F. P. (1966, July). Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. *Solid-State Electron*, s. 695–707.

Sze, S. (1981). S. Sze içinde, *Physics of Semiconductor Devices, 2nd. Ed.* (s. pp.254-311). Willey Interscience Publication.

T. C. Shen, G. B. (1992). Recent developments in ohmic contacts for III–V compound semiconductors. *Journal of Vacuum Science & Technology* , s. B 10, 2113 .

Tung, R. (2001). Recent Advances in Schottky Barrier Concepts. *Materials Science and Engineering*, 1-138.

Ueda, O. (2013). *Reliability and Degradation of III-V Optical Devices Focusing on Gradual Degradation.* Springer.

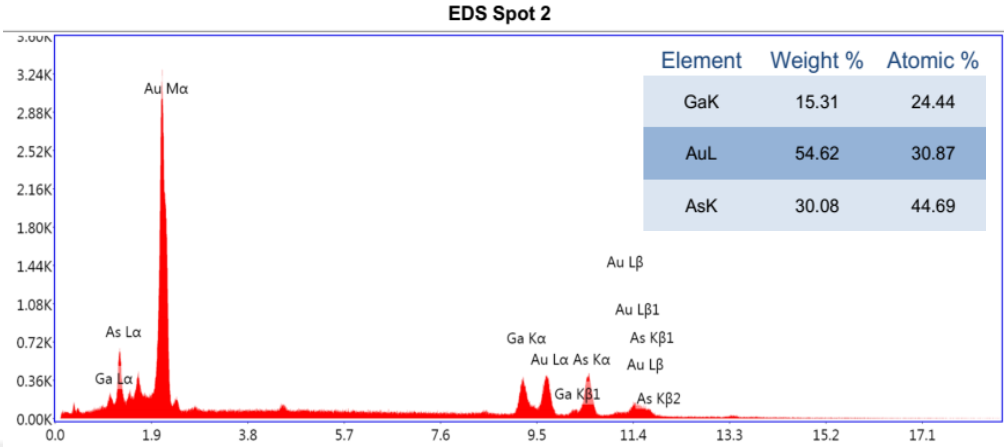
W. Y. Han and Y. Lu, H. S. (1993). Shallow ohmic contact to both n- and p-GaAs. *Journal of Applied Physics 74*, 754.

W.O. Barnard, G. F. (1996). Metal Contacts to Gallium Arsenide. *Journal of Electronic Materials*, 1695-1702.

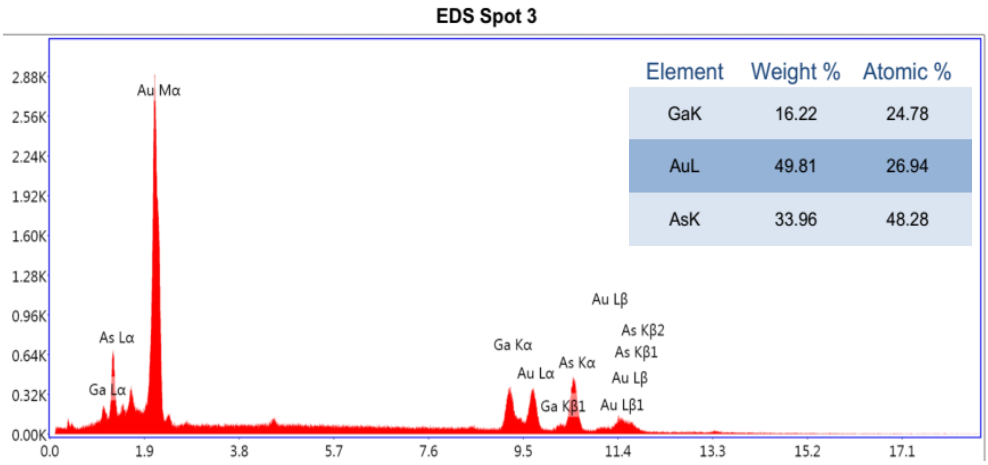
Zumbühl, D. (2008). Introduction to Mesoscopic Physics and Quantum dots. *Lecture at the Institute of Physics.* içinde University of Basel HS.

EKLER

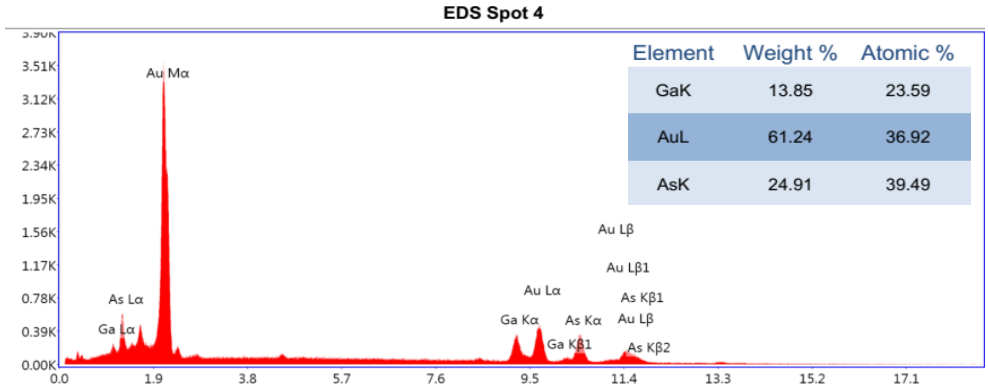
EK-1. 400 °C'de 60 s Tavlanmış P-Kontak Örneğinin EDS Sonuçları



Görsel E.1.1. *Tavlanmış P-Kontak Örneğinin Spot 2 EDS Sonuçları*

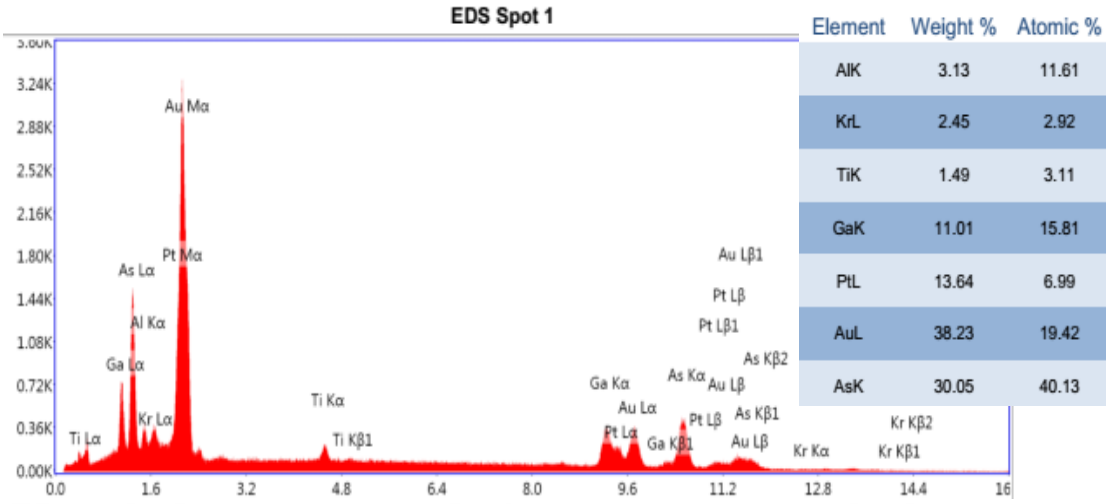


Görsel.E.1.2. *Tavlanmış P-Kontak Örneğinin Spot 3 EDS Sonuçları*



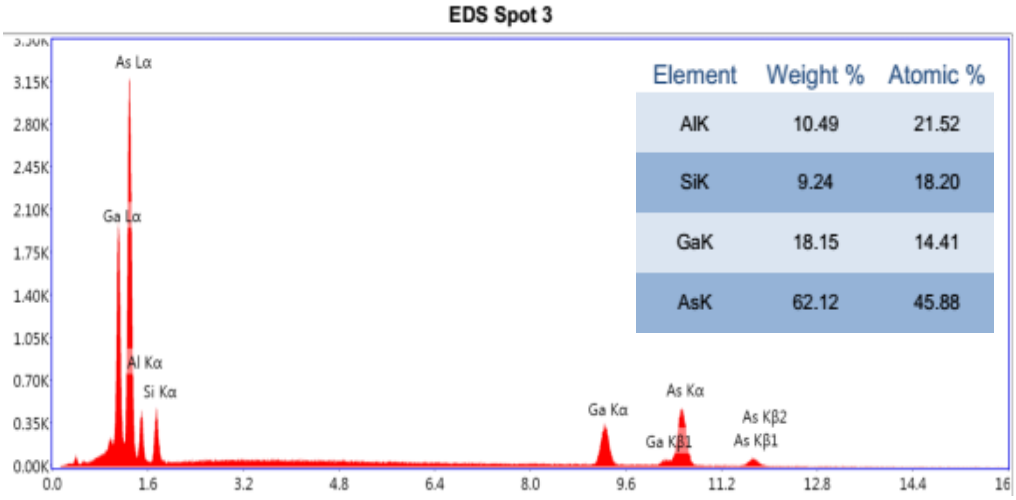
Görsel.E.1.3. *Tavlanmış P-Kontak Örneğinin Spot 4 EDS Sonuçları*

EK-2. 400 °C'de 150 Saat Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin EDS Sonuçları



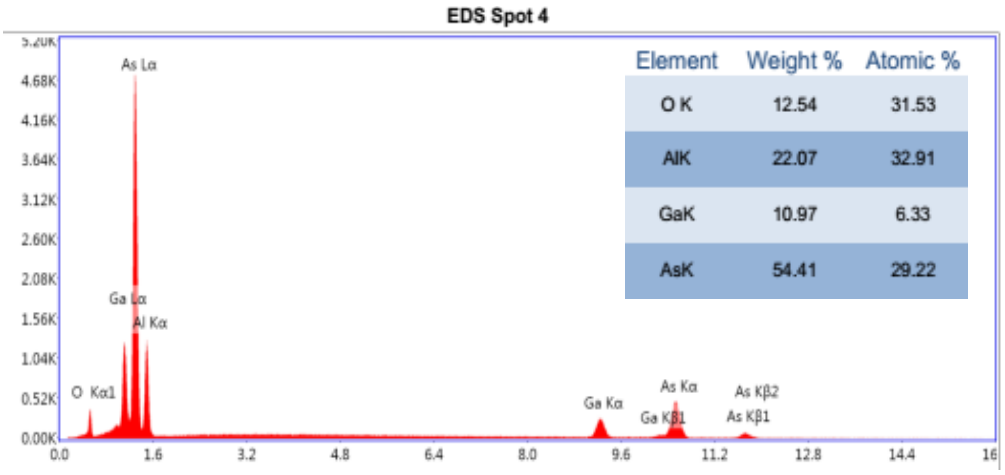
Element	Weight %	Atomic %
AlK	3.13	11.61
KrL	2.45	2.92
TiK	1.49	3.11
GaK	11.01	15.81
PtL	13.64	6.99
AuL	38.23	19.42
AsK	30.05	40.13

Görsel.E.2.1. *Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin Spot 1 Sonuçları*



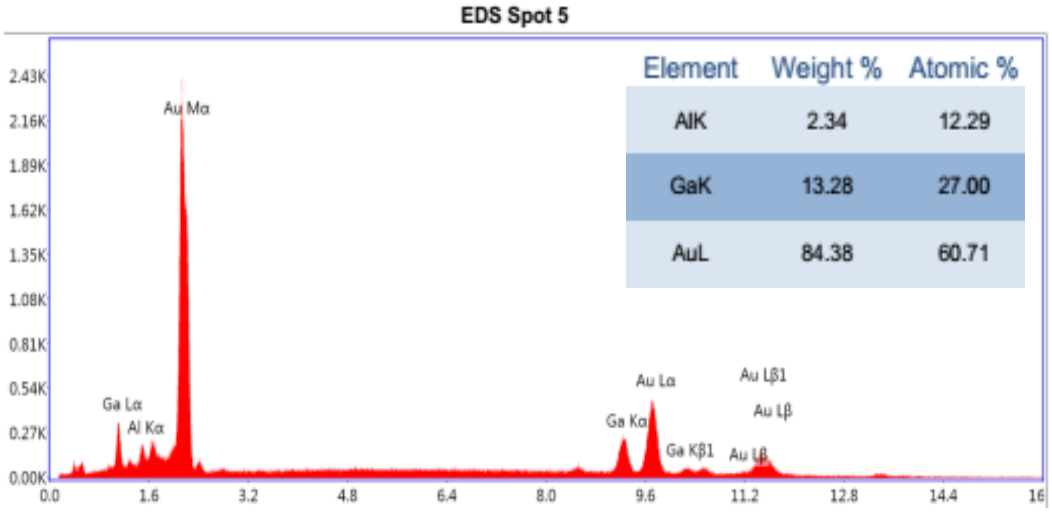
Element	Weight %	Atomic %
AlK	10.49	21.52
SiK	9.24	18.20
GaK	18.15	14.41
AsK	62.12	45.88

Görsel.E.2.2. *Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin Spot 3 Sonuçları*

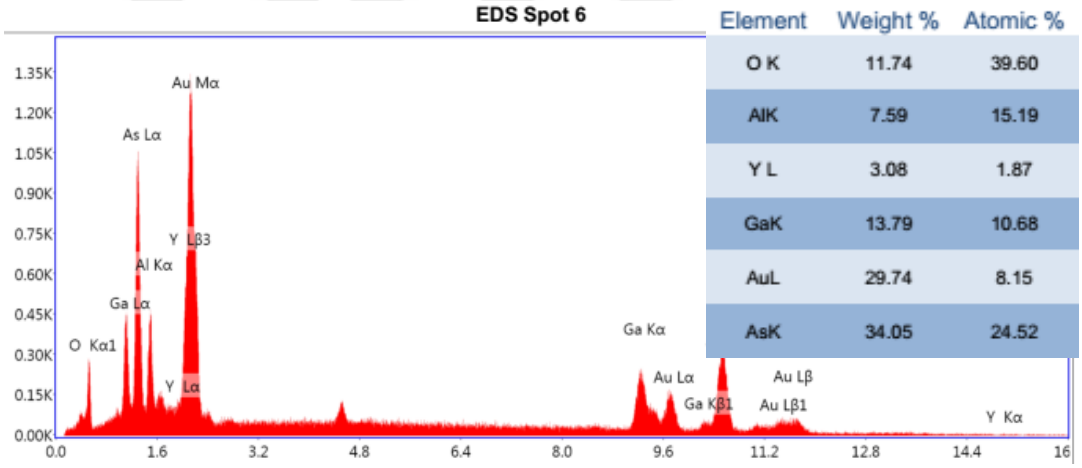


Element	Weight %	Atomic %
O K	12.54	31.53
AlK	22.07	32.91
GaK	10.97	6.33
AsK	54.41	29.22

Görsel.E.2.3. *Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin Spot 4 Sonuçları*

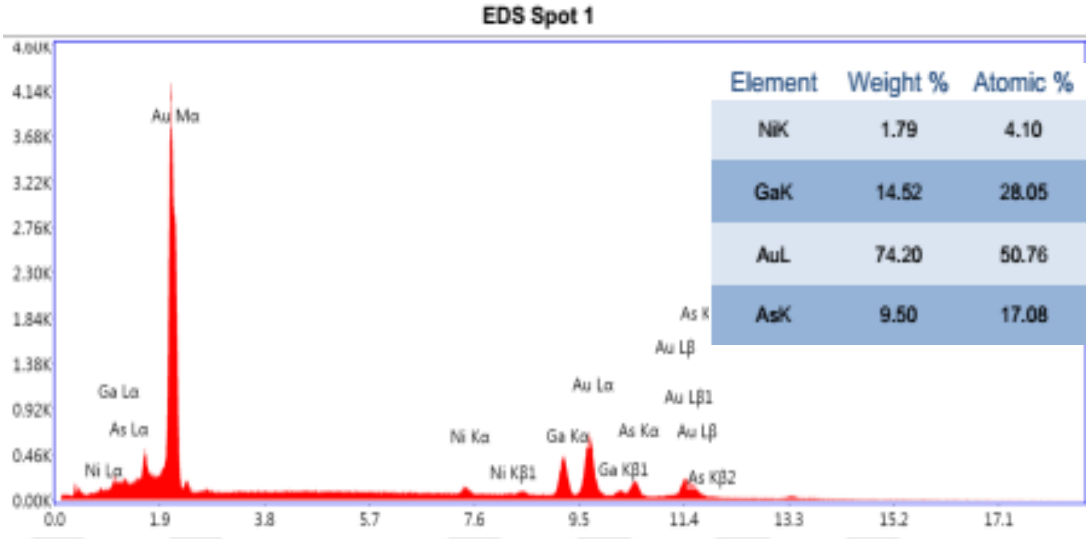


Görsel.E.2.4. *Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin Spot 5 Sonuçları*

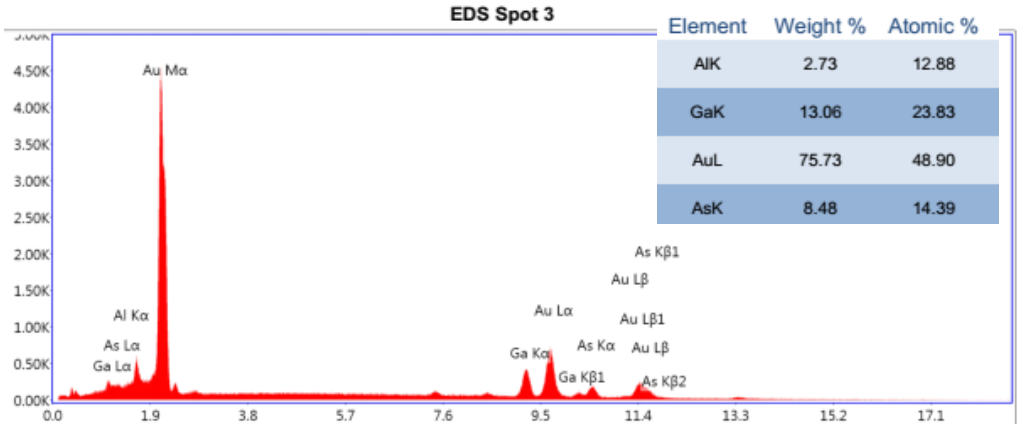


Görsel.E.2.5. *Yaşlandırılmış P-Kontak Örneğinin Spot 6 Sonuçları*

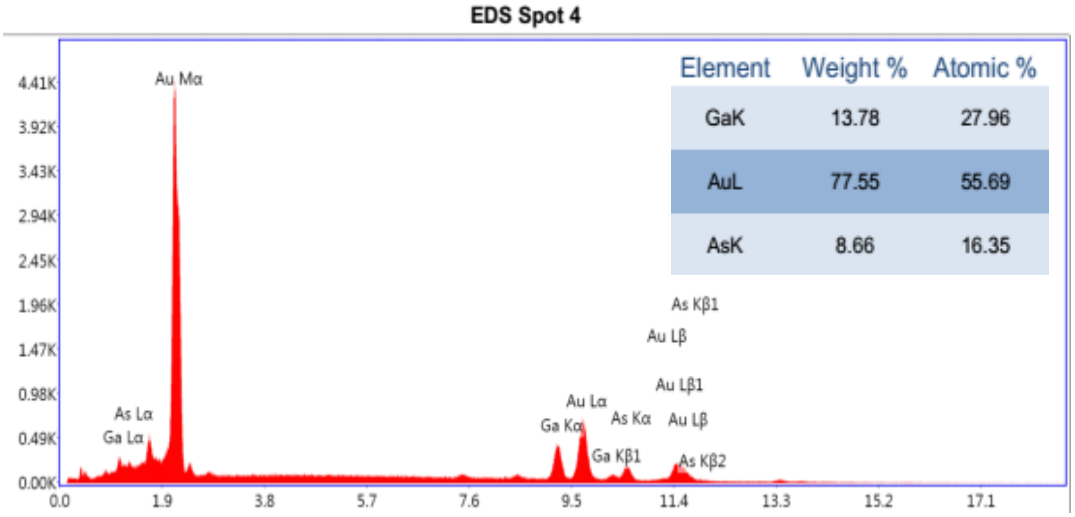
EK-3. 400 °C'de 60 s Tavlanmış N-kontak Örneğinin EDS Sonuçları



Görsel.E.3.1. *Tavlanmış N-Kontak Örneğinin Spot 1 Sonuçları*

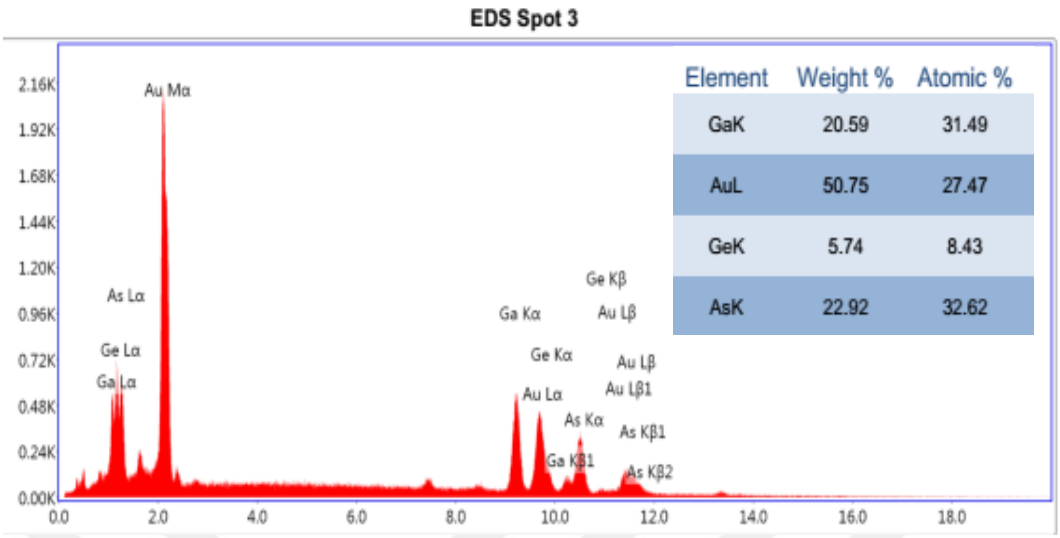


Görsel.E.3.2. *Tavlanmış N-Kontak Örneğinin Spot 3 Sonuçları*

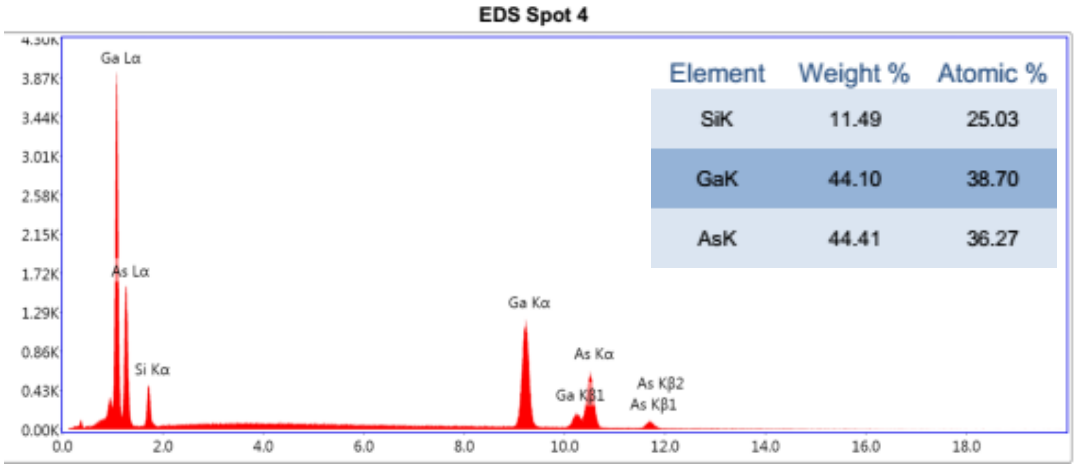


Görsel.E.3.3. *Tavlanmış N-Kontak Örneğinin Spot 4 Sonuçları*

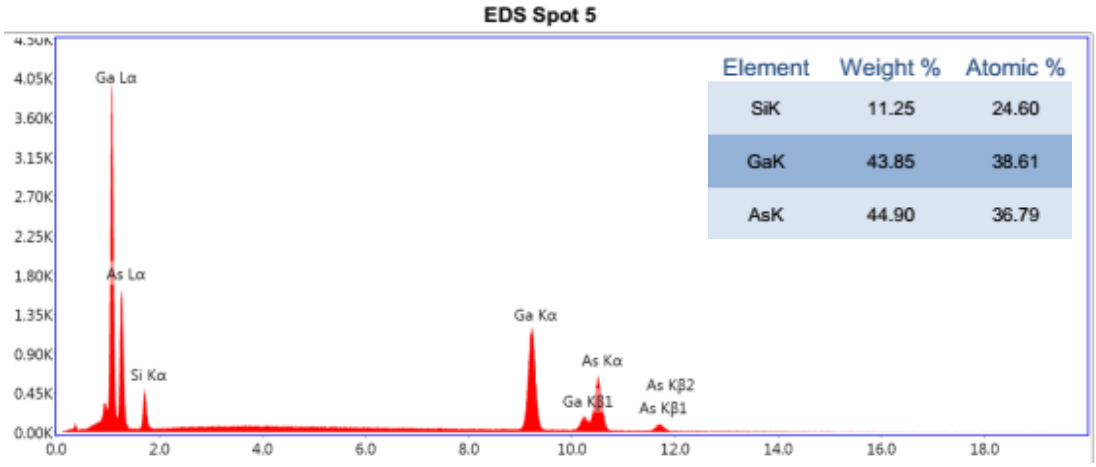
EK-4.150 Saat Yaşlandırılmış N-kontak Örneğinin EDS Sonuçları



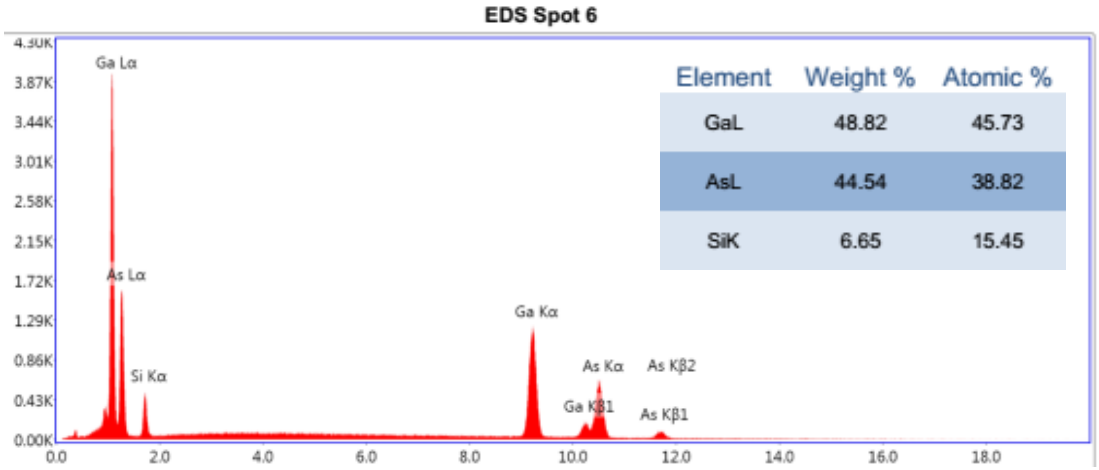
Görsel.E.4.1. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 3 Sonuçları*



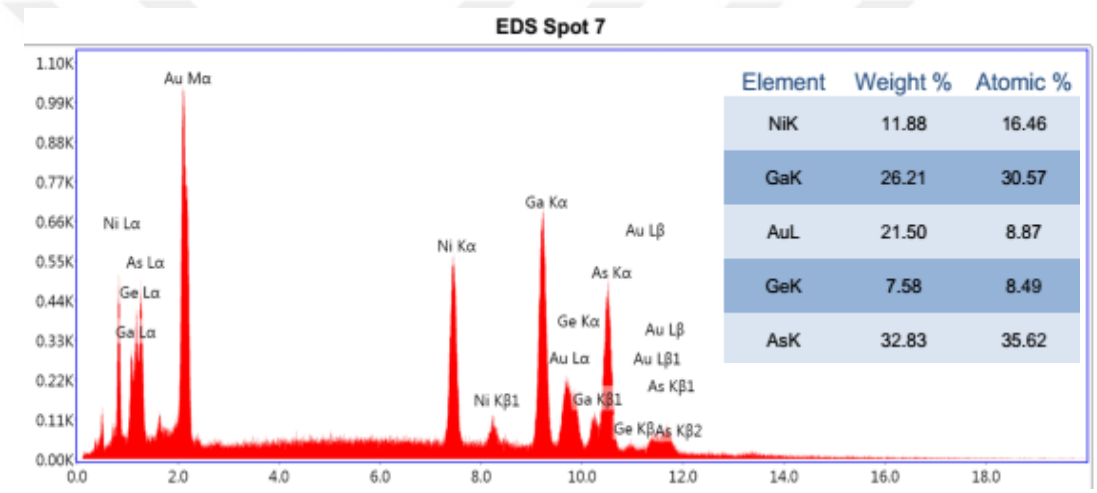
Görsel.E.4.2. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 4 Sonuçları*



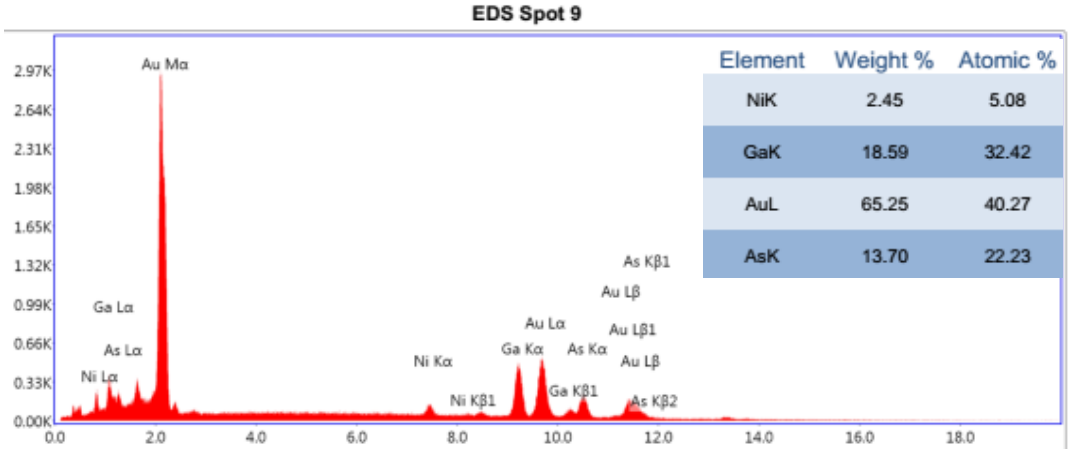
Görsel.E.4.3. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 5 Sonuçları*



Görsel.E.4.4. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 6 Sonuçları*



Görsel.E.4.5. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 7 Sonuçları*



Görsel.E.4.6. *Yaşlandırılmış N-Kontak Örneğinin Spot 9 Sonuçları*

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO : 0000-0003-3828-4574
Adı Soyadı :Koray Keser
Yabancı Dil :İngilizce

Eğitim ve Meslek Geçmişi

- Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü
- ERMAKSAN Optoelektronik Ar-Ge Merkezi, Yarı İletken Aygıtlar Geliştirme Müdürlüğü, İnce Film Kaplama Sistemleri Mühendisi

Proje Deneyimi

- Prototip LED Çip Geliştirmesi
- 915nm Dalgaboylu Yüksek Güçlü Lazer Diyotun Geliştirilmesi

Üye Olunan Kuruluşlar

- TMMOB Fizik Mühendisleri Odası