

JURİ ÜYELERİ

Prof.Dr.Tahsin KILIÇOĞLU

Prof.Dr.Y.Kemal YOĞURTÇU

Doç.Dr.Yavuz ONGANER

Doç.Dr.Hasan EFEOĞLU

Doç.Dr.Muhammed YILDIRIM

Tahsin Kiliçoğlu

Y. Kemal Yoğurtçu

Yavuz Onganer

Hasan Efeoğlu

Muhammed Yıldırım

23.11.2000 tarihinde 29/330 kararla kurulan jürimiz iş bu Doktora
tezini 13.12.2000 tarihinde kabul etmiştir.

96 383

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BURSA İLİ VE İZMİR İLİ**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

GaTe TABAKALI KRİSTALİNİN BÜYÜTÜLMESİ
VE
OMİK KONTAK OPTİMİZASYONU

Cevdet COŞKUN

Yönetici: Doç. Dr. Hasan EFEOĞLU

Doktora Tezi

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DÜZENLEME MERKEZİ

ERZURUM-2000

ÖZET

Bridgman-Stockbarger metoduna dayalı, programlanabilir doğrudan katılaştırma (*Programmable Directional Freezing*) tekniğiyle büyütülen GaTe tabakalı kristali üzerinde bir dizi omik kontak çalışması yapıldı. Transmission Line Method (TLM) (*Ladder Network*) tekniği kullanılarak yapılan spesifik omik kontak direnci ölçümlerinde kontak malzemeleri olarak In, Au, Al, Ag elementleri ve Au-In alaşımı kullanıldı. Basamaklı (ladder) yapı, gölge maske (shadow mask) kullanılarak kristal üzerine transfer edildi. En düşük omik kontak direnci, In elementi için 200 °C ve 2.5 dk tavlama şartlarıyla $2.5 \pm 1.4 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ olarak belirlendi. Bu yapı üzerinde altı aya kadar yapılan yaşlanma ölçümlerinde yapının kararlılığının korunduğu görüldü. Bu çalışmada kullanılan diğer kontak malzemelerinin, 175-400 °C sıcaklık aralığında 5 dk süreyle yapılan ısıtma işlemi sonucunda doğrultucu davranış gösterdiği anlaşıldı ve yüksek kontak dirençleri sebebiyle bu yapılar üzerinde omik kontak ölçümü yapılamadı. XRD (*X-Ray Diffraction*) tekniğiyle yapılan yapısal karakterizasyon çalışmasında, metal yarıiletken arayüzeyde oluşan InGaTe₂ alaşımına ait en düşük pik değerinin, optimum proses şartları olarak belirlenen 200 °C' de 2.5 dk süreyle tavllanmış yapıda elde edildiği gözlemlendi.

SUMMARY

A systematic study on ohmic contact formation to GaTe layered crystal grown by directional freezing method based on Bridgman-Stockbarger technique has been introduced. In this study the Ladder Network (*Transmission Line Method, TLM*) technique was used for the measurement of specific contact resistance of ohmic contacts to GaTe. In, Au, Al, Ag metals and Au-In eutectic alloy were used as contact element. Ladder pattern formed directly on GaTe surface by evaporation of metals through a pre-patterned shadow mask. With a controllable thermal treatment process, the lowest ohmic contact with $2.5 \pm 1.4 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ was formed by In after annealing at 200 °C for 2.5 min. Ohmic contacts with that process remained very stable up to six months. Because the other elements used in this study showed rectification behaviour after annealing at 175-400 °C temperature range for 5 min, these samples didn't allow for measuring of ohmic contact resistance because of the high contact resistance. X-ray diffraction measurements showed that InGaTe_2 formation at GaTe:In has the lowest value for the sample annealed with optimum process.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu alışma, Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümünde gerçekleştirildi. Doktora öğrenimim boyunca, engin görüşleri ve özverili çalışmalarıyla bana destek olan ve yakın ilgisini esirgemeyen saygıdeğer tez hocam Doç. Dr. Hasan EFEOĞLU' na en içten şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım süresince engin bilgilerinden istifade ettiğim Prof. Dr. Y. Kemal YOĞURTÇU, Doç. Dr. Yavuz ONGANER ve Yrd. Doç. Dr. Bahattin ABAY' a minnettarım. Ayrıca çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arř. Gör. Tevhit KARACALI, Arř. Gör. Dr. H. Salih GÜDER ve Arř. Gör. şakir AYDOĞAN' a gönülden teşekkür ederim. SEM ve XRD ölçümlerinde bize çalışma imkanı veren Mühendislik Fakóltesi Dekan Yardımcısı Doç. Dr. İhsan EFEOĞLU' na ayrıca müteşekkirim. Bu çalışmanın gerçekleşmesine imkan sağlayan Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakóltesi yönetici ve elemanlarına da içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No:</u>
ÖZET.....	i
SUMMARY.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
1. GENEL GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	5
2.1. GaTe Tabakalı Kristali	5
2.2. Metal- Yarıiletken Kontaklar.....	13
2.2.1. Doğrultucu (<i>Schottky</i>) Kontaklar.....	13
2.2.2. Omik Kontaklar.....	15
2.2.2.1. Omik Kontak Elde Etme Yolları.....	15
2.2.2.1.1. Doğrultmayan (<i>Non-rectifying</i>) Kontak.....	16
2.2.2.1.2. Tünelleme Eklemleri.....	17
2.2.3. Omik Kontak Direnci (R_c) ve Spesifik Omik Kontak Direnci (ρ_c).....	18
2.2.3.1. Spesifik Omik Kontak Direncinin Bazı Parametrelere Bağlılığı.....	20
2.2.3.2. Spesifik Omik Kontak Direnci Ölçüm Teknikleri.....	21
2.2.3.3. TLM ile Spesifik Omik Kontak Direncinin Hesabı.....	22
2.2.3.4. Bir Omik Kontak Filmi Altında Akımın Davranışı.....	24
2.2.3.5. TLM Tekniğiyle R_f , R_e , R_c ve ρ_c ' nin Analizi.....	29
2.3. Fotolitografi Tekniğiyle Patern Transferi.....	34
2.3.1. Fotoresist Kaplama ve Patern Transferi.....	34
2.3.2. Elektrolizle Metal Kaplama.....	37
2.4. Kristal Büyütme.....	39
2.4.1. Giriş.....	39

2.4.2. İnce Tabaka Büyütme Metodları.....	39
2.4.3. Eriyikten Kristal Büyütme Metodları.....	39
2.4.4. Bridgman–Stockbarger Metodu.....	40
2.4.5. Kristal Büyütmede Karşılaşılabilen Sorunlar.....	41
2.4.6. Pota/Büyütme Ampüllerinin Özellikleri.....	42
2.4.7. Büyütme Kalitesini Etkileyen Faktörler.....	42
2.4.8. Büyütme Ampüllerinin Hazırlanması.....	43
2.5. Yapısal Karakterizasyon ve XRD Tekniği	45
2.5.1. Giriş.....	45
2.5.2. Kristal Yapıların İncelenmesi ve Difraksiyon.....	45
2.5.3. Karakteristik Radyasyon.....	46
2.5.4. X-Işını Difraksiyonu.....	46
2.5.4.1. Laue Şartları.....	46
2.5.4.2. Bragg Kanunu.....	47
2.5.5. X-Işınları Difraktometresi.....	48
3. TEST ve ÖLÇÜMLER.....	50
3.1. Gölge Maskenin Elde Edilmesi.....	50
3.1.1. Fotolitografi Tekniğiyle Gölge Maskenin Hazırlanması.....	50
3.1.2. Elektrolizle Kaplama.....	53
3.2. Omik Kontak Direncinin Ölçümü İçin Altyapının Hazırlanması.....	57
3.2.1. Kristal Büyütme Fırını.....	57
3.2.2. Mini Isıl İşlem Fırını.....	60
3.2.3. Dörtlü Prob İstasyonu.....	61
3.3. GaTe Tek Kristalinin Büyütülmesi.....	62
3.3.1. Bileşen Elementlerin Hazırlanması ve Ampülün Yüklenmesi.....	62

3.3.2. Kristal Büyütme İşlemi.....	63
3.4. GaTe Tek Kristali Üzerinde Yapılan Omik Kontak Çalışmaları.....	66
3.4.1. Giriş.....	66
3.4.2. In Tabanlı Omik Kontak Çalışması.....	68
3.4.3. In Tabanlı Omik Kontakın Yaşlanma Ölçümleri.....	70
3.4.3.1. Bir Haftalık Yaşlanma Ölçümleri.....	72
3.4.3.2. İki Haftalık Yaşlanma Ölçümleri.....	74
3.4.3.3. Bir Aylık Yaşlanma Ölçümleri.....	77
3.4.3.4. Üç Aylık Yaşlanma Ölçümleri.....	80
3.4.3.5. Altı aylık Yaşlanma Ölçümleri.....	83
3.4.4. Au, Al, Ag, Au-In Tabanlı Omik Kontak Çalışmaları.....	87
3.5. In Tabanlı Omik Kontakların XRD ile Yapısal Karakterizasyonu.....	90
3.5.1. Giriş.....	90
3.5.2. GaTe Kristalinin XRD Piklerinin Analizi.....	91
3.5.3. Tavlanmamış In:GaTe Yapısının XRD Piklerinin Analizi.....	92
3.5.4. 200 °C' de 2.5 dk' lık ısıtma işlem için XRD Piklerinin Analizi.....	94
3.5.5. 200 °C' de 7.5 dk' lık ısıtma işlem için XRD Piklerinin Analizi.....	95
3.5.6. 200 °C' de 14 dk' lık ısıtma işlem için XRD Piklerinin Analizi.....	96
3.5.7. Yapısal Karakterizasyonun Sonuç ve Yorumu.....	97
4. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	99
5. REFERANSLAR.....	102

1. GENEL GİRİŞ

Katılarla ilgili çalışmalar tarihin ilk çağlarından itibaren yapılmış olmakla birlikte, katıların atom ve moleküllerin düzgün sıralanmış dizilerden oluştuğu düşüncesi, ilk defa gazların atomik ve kinetik teorilerinin geliştirilmesi sırasında ortaya konulmuştur. Ondokuzuncu yüzyılın ilk yarısında, maddenin atomik teorisi geliştirilmeye başlanmış ve buna dayalı olarak metallerdeki elektriksel iletkenlik açıklanabilmiştir. Yirminci yüzyılın başlarında da kuantum istatistiğinin geliştirilmesi, katılarla ilgili pek çok temel problemin çözümüne katkıda bulunmuştur (Durlu, 1992).

Yirminci yüzyıla kadar katıların özellikleri genellikle atom fiziği içerisinde düşünülmekteydi. Katıhal fiziği, bu yüzyılın başlarında kristaller içindeki elektronların hareketlerinin incelenmesiyle bir anlam kazanmaya başladı. Daha önceleri kristaller üzerindeki çalışmalar, kristallerin dış görünüşleri, geometrik simetrisi ve değişen kristal sabitlerinin incelenmesinden ileri gitmiyordu. 1910' dan itibaren gelişen teknoloji ile kristallerin atomik yapıları derinlenmesine incelenmeye başlandı. 8 Haziran 1912' de Bavarian Fen Akademisi tarafından yayınlanan "*Rontgen ışınları ile interferans etkileri*" isimli makalede Laue tarafından geliştirilen atomların periyodik dizilişlerinin, X-ışını difraksiyonu ile karakterizasyonunun mümkün olduğu açıklandı. 1913 yılında X-ışınlarının difraksiyonu Bragg tarafından KCl, NaCl, KBr ve KI kristallerinin yapı tayininde ilk olarak kullanılmış ve büyük başarı sağlamıştır (Gezici, 1992).

Elektrik ve magnetik alan içinde bulunan bir iletken içindeki serbest taşıyıcıların hareketi ise, ondokuzuncu yüzyılın son çeyreğinde E. H. Hall' in çalışmaları ile bilinmektedir. İletkenlerdeki akım iletimini sağlayan yüklerin, magnetik alan ile etkileşiminin keşfinden sonra Hall olayı, iletkenlerin ve bu yüzyılın ortalarından itibaren yarıiletkenlerin elektriksel ve magnetik karakterizasyonunda temel araştırma tekniklerinden biri olmuştur (Blood and Orton, 1992).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısının başlarında yarıiletken tranzistörün ortaya çıkmasından sonraki yirmi-otuz yıl, elektronik endüstrisinde çok büyük değişikliklere yol açmıştır. Başarılan minyatürleştirme ile daha önce çok büyük hacimde gerçekleştirilen devreler

ve devre elemanları, artık binlerce kat daha küçük bir yarıiletken devre üzerine transfer edilmiştir. Bununla birlikte üretim hızı artmış, maliyet ve enerji sarfiyatı düşürülmüş, kullanım kolaylığı sağlanmıştır. Yarıiletkenlerle sağlanan minyatürizasyon şu üç faktörle sınırlanmış görünmektedir: yarıiletken malzemenin kalitesi, devre tasarım teknolojisi ve işleme donanımının yetersizlikleri (Boylestad and Nashelsky, 1994).

Yarıiletkenler üzerinde sağlanan bilgi birikimi, teknolojinin de hızla gelişmesine hizmet etmek suretiyle bilimsel bilginin üretim hızına hızla katkıda bulunmuştur. Bugün yarıiletken teknolojisinin girmediği modern bir alan bulunamaz. Artık yarıiletken üzerine yapılan çalışmalar, özellikle alternatif kristallerin üretilmesi ve karakterizasyon çalışmalarının mükemmelleştirilmesi suretiyle teknolojik gelişmeye katkıda bulunmaktadır.

Elektriksel ve yapısal karakterizasyona nispetle daha geç kalan optoelektronik çalışmalar üzerinde yürütülen projeler, son dönem katıhal çalışmalarının en çok yoğunlaştığı alan olarak görülmektedir. Özellikle laserler, dedektörler ve güneş pilleri günümüz yaygın araştırma alanlarının başında gelmektedir. Bu noktada, oda sıcaklığında 1.67 eV' luk yakın kızılötesi bölgeye düşen direk band özelliğiyle GaTe tabakalı tek kristali (1950-1960 yılları arasında çalışılıp terkedilmesine rağmen) tekrar dikkatleri üzerine çekmiş ve üzerinde optik ve elektriksel çalışmalar başlatılmıştır (Irwin et al., 1979).

Numune karakterizasyonunun yanında devre elemanı fabrikasyonu işlemlerinde de omik kontak problemlerinin en sık karşılaşılan sorunlardan biri olması, bizi GaTe' e omik kantağın optimizasyonu üzerine bir çalışmaya itmiştir. Optik karakterizasyon teknikleri (PL, Raman, Soğurma vs.) numuneye omik kontak yapımını gerektirmemekle birlikte, her tür elektriksel karakterizasyon teknikleri, en azından bir omik kantağı gerekli kılmaktadır. Omik kontak işleminde, düşük tavlama sıcaklığı ve süresi kullanmak arzu edilen durumdur. Çünkü tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça malzemenin elektriksel özelliklerinde ciddi değişimler gözlenebilmektedir (Shigetomi et al., 1998a). Ayrıca literatürde GaTe için herhangi bir omik kontak optimizasyonu çalışmasının bulunmaması da bizi bu çalışmaya iten sebeplerden biridir.

GaTe tabakalı tek kristali hakkında bir literatür araştırması ikinci bölümde verilmiştir. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan bütün tekniklere ait teorik bilgi yine bu bölümde sunulmuştur. Bu amaçla metal yarıiletken kontaklar üzerine teorik bir bilgi sağlanmıştır. Bu kısımda önce doğrultucu kontaklar daha sonra omik kontaklar hakkında bilgi verilmiş olup omik kontak elde etme yolları açıklanmıştır. Devamla, spesifik omik kontak direnci (ρ_c) tanımlanmış, ρ_c 'nin bazı parametrelere bağlılığı ve ölçümünde kullanılan tekniklerden bahsedilmiştir. *Transmission Line Method (Ladder Network)*, spesifik omik kontak direncinin ölçümünde sağladığı kolaylıklardan ötürü en çok kullanılan tekniktir (Look, 1987). Bu teknikle omik kontak direncinin nasıl hesaplandığına dair teori de bu bölüme eklenmiştir.

Kontak direnci büyük olan yapıların karakterizasyonunda çeşitli geleneksel akım-gerilim teknikleri kullanılabilir. Dörtlü nokta probu, dikey ve yatay ölçüm tekniği ve potansiyel profiling metodu bunlardan bazılarıdır. Fakat kontak direnci küçüldükçe bu tekniklerdeki ölçüm hatası artar (Brillson, 1993). Kontak direncinin küçük olduğu durumlarda *TLM* tekniğiyle spesifik omik kontak direncinin ölçülmesi için, basamaklı (ladder) yapının kristal yüzeyine transfer edilmesi gerekmektedir. Numune üzerine desen (patern) aktarmada kullanılan teknik, fotolitografi tekniğidir. Bu teknikte devre elemanı yarıiletken üzerinde doğrudan geliştirilir. Fakat fotolitografi tekniğinde, ileri teknoloji gerektiren bir laboratuvara ve kullanılacak taban kristal için proses teknolojisinin bilinmesine ihtiyaç duyulur. Uygun boyutlar için gölge maske hazırlamak hem düşük maliyetli hem de teknik açıdan kontrolü daha kolaydır. Oluşturulacak devre elemanı proses esnasında kimyasal işleme maruz kalmayacağından, gölge maske hazırlama ve kullanma araştırmacı açısından tek basamaklı prosesler için uygun bir tekniktir. Bu amaçla bir gölge maske üretim teknolojisi geliştirilmiş ve bu prosese ait deneysel prosedür üçüncü bölümde, bu tekniğe ait teorik bilgi ise ikinci bölümde verilmiştir.

GaTe tek kristali geleneksel olarak, *Czochralski* (Brebner et al., 1962), *Vapour Transport Method* (Gaz Fazından Büyütme) (Mancini et al., 1974; Girlanda et al., 1985), *Bridgman-Stockbarger* (Manfredotti et al., 1975; Gouskov et al, 1977, 1978), *Closed Tube Sublimation* (Mancini et al., 1974; Manfredotti et al, 1975), *IATRT*(iodine

assisted transport reaction technique) (Mancini et al., 1974; Wan et al., 1992, 1995, 1996), Geleneksel Bridgman (*Conventional Bridgman*) (Pal and Bose, 1996; Bose and Pal, 1997; Shigetomi et al., 1998b; Almeida et al., 1998), tekniklerinden biri kullanılarak büyütülmektedir. Bunlardan ilk dört teknik elementlerin sıvı fazından büyütülmekte ve genel olarak Doğrudan Katılaştırma (*Directional Freezing*) olarak isimlendirilmektedir (Shih et al., 1986). Bu teknikte kapalı bir kuartz tüp içinde eriyik halde bulunan elementlerin, zon sıcaklığının kontrollü değişimiyle katılma doğrultusunda kristalleşmesi sağlanır. Ampülün sabit bir konumda bırakılarak iki zonlu fırının sıcaklığının değiştirilmesiyle, ampülün fırın boyunca hareketi simüle edilmiştir. Böylece kristalleşme hareketsiz olan ampül içinde gerçekleşeceğinden muhtemel titreşimlerin asgariye indirileceği açıktır. GaTe bileşiği büyütme tekniklerinden bağımsız olarak her zaman p-tipidir. Boşluk konsantrasyonu ise 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} civarındadır (Güder, 1999). İkinci bölümde kristal büyütme sistemlerine ait genel teorik bir bilgi de sağlanmıştır. Bu çalışmada GaTe tek kristalinin büyütülmesine ilişkin deneysel bilgiler ise üçüncü bölümde sunulmaktadır. Dördüncü bölümde ise sonuç ve tartışma yer almaktadır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. GaTe Tabakalı Kristali

III. ve VI. grup elementleriyle oluşturulabilen yirmiden fazla ikili bileşik arasında sadece dört tanesi tabakalı yapıya sahiptir (GaTe, GaSe, GaS, InSe). Bu bileşikler, metal olmayan atom tabakaları arasında kalan, iki katlı metal atomlarının *sandwich* biçimde kristalleşmesi ile oluşur. Bu malzemeler yarıiletkenlik, fotoiletkenlik ve lüminesans özelliklerinden dolayı ilgi çekmektedirler. Bunların karakterizasyonunda önemli bir faktör, büyütme açısından saf kristaller elde edilmeye imkan vermesidir. Malzemenin saflığına yönelik bu talep, bir malzemenin kendi atomları ile bağlanabilecek yabancı atomların olmadığı durumda asal özelliklerinin açıklanabilmesi ve istenen elektronik özelliklere sahip bir kristal elde edebilmek için, kontrollü bir kirlilik miktarının ilave edilebilmesine imkan vermesiyle açıklanabilir. Diğer üç bileşiğe nispetle, kirlilik atomlarının GaTe kristali içindeki davranışları daha çok araştırılmaya muhtaçtır (Lieth, 1977).

III-VI yarıiletken bileşikler ailesi, son otuz yıl içerisinde üzerinde çok araştırma yapılan yeni bir gruptur. Bu bileşikler III. grup Tl, Ga, In elementleri ile VI. grup S, Se, Te elementlerinin uygun bir sıcaklık programında büyütülmesiyle elde edilir. III-VI yarıiletken bileşikleri yapıları bakımından iki ana gruba ayrılabilir:

- a) GaS, GaSe, GaTe, InS ve InSe bileşikleri $B-A-A-B$ şeklinde dört katlı tabakalı yapıda kristalleşirler. Bu çok katlı tabakalar içinde atomlar birbirlerine güçlü kovalent bağlarla bağlıdır. Bu yapıda herbir A (Ga) katyon atomu, üç B (Te) anyon atomu ve bir A (Ga) katyon atomu tarafından tetrahedral bağlarla çevrilir. Bu yapıda katyon çiftleri elektronları kompanse eder. Herbir komşu tabaka arasındaki bağ ise zayıf van der Waals tipinde olup tabakaların düzenlenişi herbir bileşik için farklılık gösterir.
- b) InTe, TlSe ve TlS bileşikleri AB_2 atomik zincirlerinden oluşan $B37$ yapısında kristalleşir. Bu zincirlerde herbir A atomu dört B atomu tarafından tetrahedral yapıda çevrilir ve A atomları zincirler arasında yerleşir. Bu ikinci grup bileşiklerin

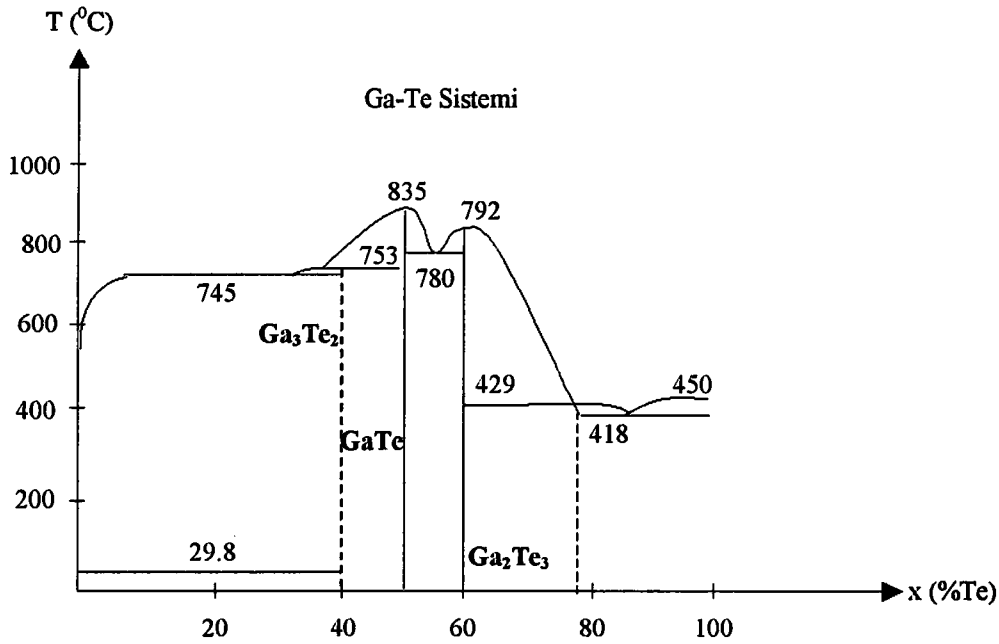
kimyasal formülü $A^+ (AB_2)^-$ şeklindedir. Yapı içindeki A atomlarının yarısı tek valanslı diğer yarısı ise üç valanslıdır (Fielding et al., 1959).

III-VI bileşikleri arasında yer alan GaS, GaSe ve GaTe yarıiletkenleri, "Ga kalkojenitleri" olarak adlandırılır. Tabakalı yapıda kristalleşen birinci grup bileşikler, mükemmel tabakalara ayrılabilir katmanlı yapıdadırlar (Manfredotti et al., 1975; Irwin et al., 1979). Bu özellikleri, onların mekanik ya da kimyasal herhangi bir işleme tabi tutulmaksızın yüksek kalitede parlak ve pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesine imkan sağlar. Bu bileşiklerde kristal yüzeyi üzerindeki doymamış bağ yoğunluğunun düşük olması, Schottky yapıların bu tür kristaller üzerinde oldukça kaliteli bir şekilde uygulanmasına izin verir (Margaritondo, 1999).

GaS ve GaSe hegzagonal yapıda kristalleşirken, C_{2v} (C2/m) uzay grubuna sahip olan GaTe, monoklinik yapıda kristalleşir ve herbir kristolografik birim hücresi, herbiri üç moleküler birimi içeren iki tabaka ve 12 molekül ihtiva etmektedir (Wan et al., 1992; Pearson, 1964). Tabakalar içi yapı Te-Ga-Ga-Te dörtlü atom zincirinden meydana gelmiştir. Tabakalar arasında Ga-Ga bağları mevcuttur (Gousskov and Gousskov, 1978a). Tabakalar arası bağlar zayıf van der Waals, tabakalar içi bağlar ise güçlü kovalenttir (Gousskov et al., 1978b; Augelli et al., 1976). GaTe kristalinin fiziksel özelliklerinden biri de yüksek derecede anizotropiye sahip olmasıdır (Grandolfo et al., 1971). Ga-Ga bağları b-eksenine (büyüme doğrultusuna) dik doğrultudadır ve hegzagonal veya rombohedral III-VI yarıiletkenlerinde gözlenmeyen fiziksel özelliklerdeki anizotropi bu bağların varlığına atfedilmektedir (Irwin et al., 1979).

Diğer III-VI yarıiletkenlerden farklı olarak "direct band-gap" özellik gösteren GaTe bu özelliğiyle foton dedektörleri ve optoelektronik devre yapımında kullanım alanına sahiptir (Irwin et al., 1979). Öte yandan band genişliği olarak InSe (1.3 eV) ile GaSe (2 eV) arasında bulunan ve bu özelliğiyle yakın IR bölgede yer alan GaTe (1.67 eV) kristalinden optoelektronik devre elemanı üretme çalışmaları devam etmektedir (Wan et al., 1995). Ayrıca GaTe kristalinin 80 K' deki yasak enerji aralığı 1.77 eV (Gousskov et al., 1978b), 2 K' deki değeri ise 1.793 eV olarak hesaplanmıştır (Wan et al., 1997). Bant aralığının sıcaklıkla değişim katsayısı $-(4.14-4.8 \times 10^{-4} \text{ eV/K})$ formülü ile verilir. GaTe kristalinin dielektrik katsayısı $\epsilon=7.3$ olarak belirlenmiştir (Camassel et al., 1980).

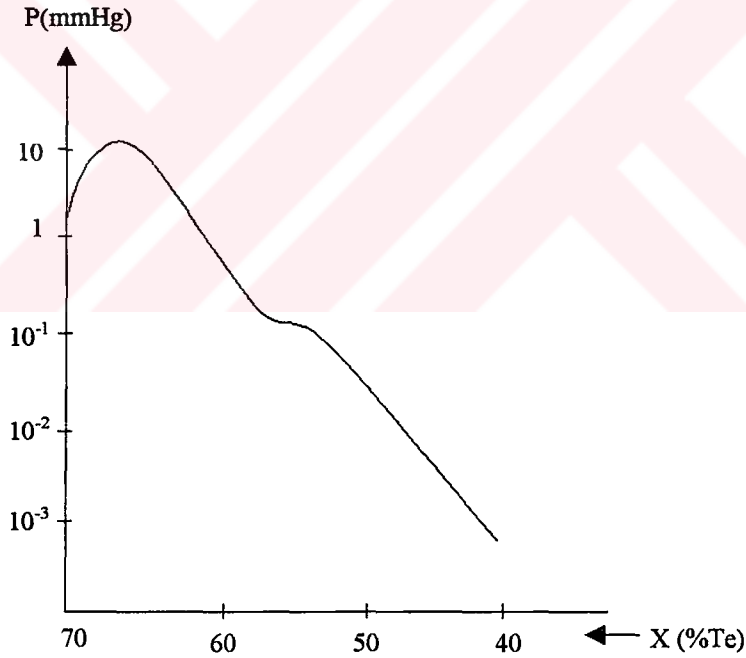
GaTe kristalinin çok keskin ($\alpha_{\max} = 16000 \text{ cm}^{-1}$) ve oldukça dar ($\Gamma = 2.5 \text{ meV}$) eksitonik soğurma verdiği gözlenmiştir (Camassel et al., 1980). GaTe kristalinin bir diğer özelliği de büyütme tekniklerinden bağımsız olarak her zaman p-tipi olarak büyümesidir. Bu özelliğinin valans bandının üzerinde, eriyikten büyütülen kristallerde 74 meV, buhar fazından büyütülenlerde ise 153 meV' de (Manfredotti et al., 1975), yerleşen hidrojenimsi akseptör merkezlerinden kaynaklandığı yapılan Hall ölçümleri ile tayin edilmiş olup, bunlar Ga boşluklarına atfedilmiştir. Ayrıca yapılan Hall ölçümlerinden, GaTe kristali için fonon enerjisi 10 meV olarak hesaplanmıştır ve 80-300 K sıcaklık aralığında, yaklaşık $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ lik boşluk konsantrasyonlu numune için çok yüksek mobilite değerleri (oda sıcaklığında $\mu_{\parallel} = 25\text{-}40 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve $\mu_{\perp} = 10\text{-}15 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ iken, 80 K civarında bu değerler $\mu_{\parallel} = 450\text{-}500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve $\mu_{\perp} = 100\text{-}110 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ye ulaşmaktadır) elde edilmiştir (Pal and Bose, 1996). Kristallerin özdirençleri ve bazı fiziksel özellikleri büyütme şartları ve tekniklerine bağlıdır. Bridgman-Stockbarger metodu ile eriyikten büyütülen kristallerin buhar fazından büyütülenlerden, iletim özellikleri açısından daha kaliteli olduğu anlaşılmıştır (Augelli et al., 1976; Manfredotti et al., 1975). GaTe kristalinin valans bandı yük taşıyıcıları için etkin kütlesi $m_h^* = 0.6 m$ olarak bulunmuştur (Manfredotti et al., 1975). Ayrıca 4 K' de yapılan zamana bağlı PL ölçümlerinden serbest ve nötral bir akseptör seviyesine bağlı eksitonik soğurmada kaynaklanan iki emisyon bandı elde edilmiştir (Shigetomi et al., 1998b).



Şekil 2.1. Ga-Te sisteminin faz diyagramı (Lieth, 1977).

GaTe 835 °C ile, diğer Ga kalkojenitleri içinde en düşük erime sıcaklığına sahip olan bileşiktir. Bu özelliğinden dolayı eriyikten büyütme teknikleri, bu kristal için en uygun ve en sık kullanılan tekniklerdir. Şekil 2.1' de Ga-Te sistemine ait faz diyagramı verilmektedir (Lieth, 1977).

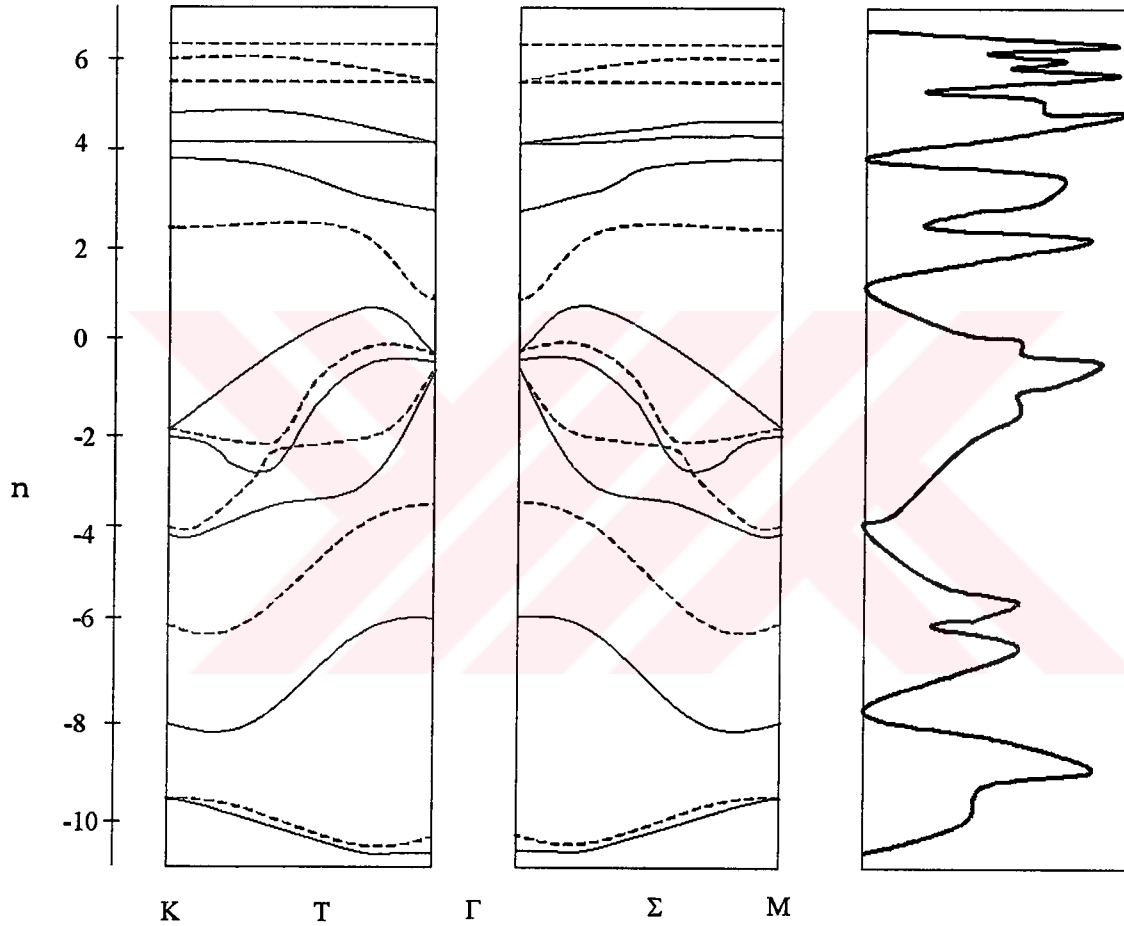
GaTe' nin basınç altındaki davranışı da ilginçtir. Oda sıcaklığında yapılan basınca bağımlı soğurma deneyleri, 2.9 GPa basınç altında kristalin band aralığının 85.7 ± 0.4 meV' luk bir azalma gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu deneylerde excitonik bağlanma enerjisinin artan basınçla azaldığı ve buna bağlı olarak da dielektrik sabitin yükseldiği ortaya konulmuştur. 6.1 GPa' a kadar yapılan deneylerde indirek band aralığının da değiştiği, indirek ve direk band aralıklarının üst üste binerek dejenere oldukları anlaşılmıştır (Pellicer et al., 1999). Ga-Te sistemi için basınç-kompozisyon eğrisi Şekil 2.2' de verilmiştir. Buradaki basınç, net buhar basıncıdır.



Şekil 2.2. Ga-Te sistemi için basınç-kompozisyon ilişkisi
(Lieth, 1977).

GaTe' nin bant yapısı Şekil 2.3' de verilmektedir (Robertson, 1979). Diğer III-VI bileşiklere nispetle daha karmaşık bir band yapısına sahip olan GaTe' nin kristal yapısının çeşitliliği hakkında da bazı bilgilere ulaşılmıştır. Monoklinik (α -GaTe) yapıya

sahip olan yarıiletkenin, hegzagonal (β -GaTe) yapıya sahip bir farklı faza sahip olduğu düşünülmektedir. Bu hegzagonal yapıya sahip faz, yarı kararlı (metastable) bir özellik gösterir ve $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında birkaç dakikalık tavlama işlemiyle monoklinik yapıya dönüşür (Semiletov and Vlasov, 1963; Manfredotti et al., 1975). GaTe için yarıma düzlemi geriye yansımali Laue metoduyla (100) olarak tayin edilmiştir (Pal et al., 1996).



Şekil 2.3. GaTe' nin iki ve üç boyutlu band yapısı (Robertson, 1979).

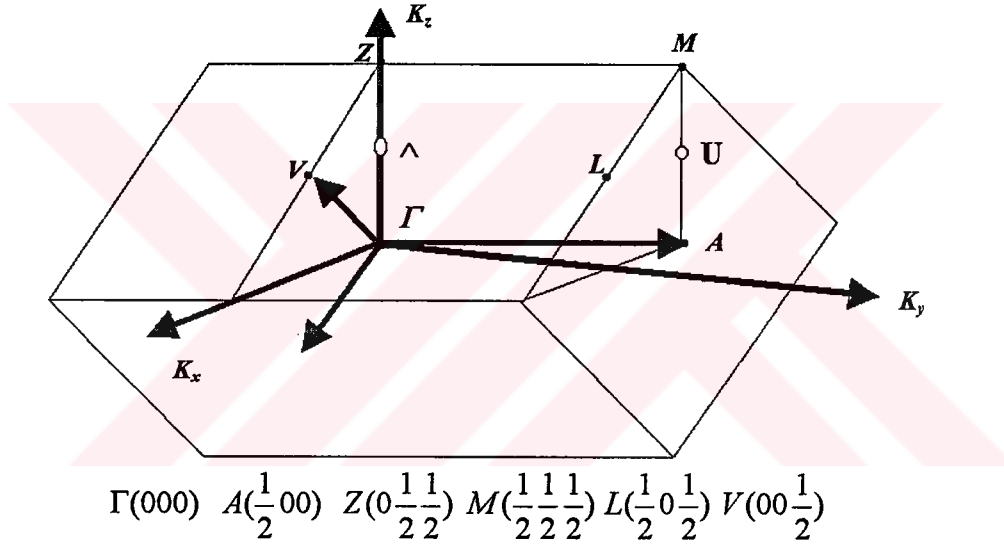
Yoğunluğu oda sıcaklığında $\rho=5.44\text{ g/cm}^3$ olan GaTe tek kristalinin Bravais örgüsü;

$$t_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -b \\ 0 \end{pmatrix} \quad t_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a \sin \gamma \\ -a \cos \gamma \\ -c \end{pmatrix} \quad t_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a \sin \gamma \\ -a \cos \gamma \\ c \end{pmatrix}$$

ile verilen öteleme vektörleriyle tanımlanır. Burada a , b ve c örgü parametreleri, γ ise eksenler arasındaki açıdır. GaTe'nin Şekil 2.4' de verilen Brillouin zon şeması şu ters örgü vektörleriyle tanımlanır (Grasso et al., 1975):

$$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{b} \begin{pmatrix} -c \cot \gamma \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{t}_2 = \frac{2\pi}{ac} \begin{pmatrix} c \operatorname{cosec} \gamma \\ 0 \\ -a \end{pmatrix} \quad \mathbf{t}_3 = \frac{2\pi}{ac} \begin{pmatrix} c \operatorname{cosec} \gamma \\ 0 \\ -a \end{pmatrix}$$

Tablo 2.1' de üç farklı araştırmacı tarafından hesaplanan, monoklinik (α -GaTe) kristal için örgü parametreleri verilmektedir.

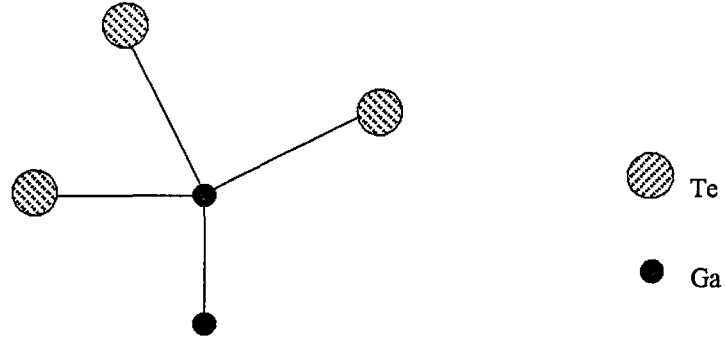


Şekil 2.4. GaTe kristalinin Brillouin zonu.

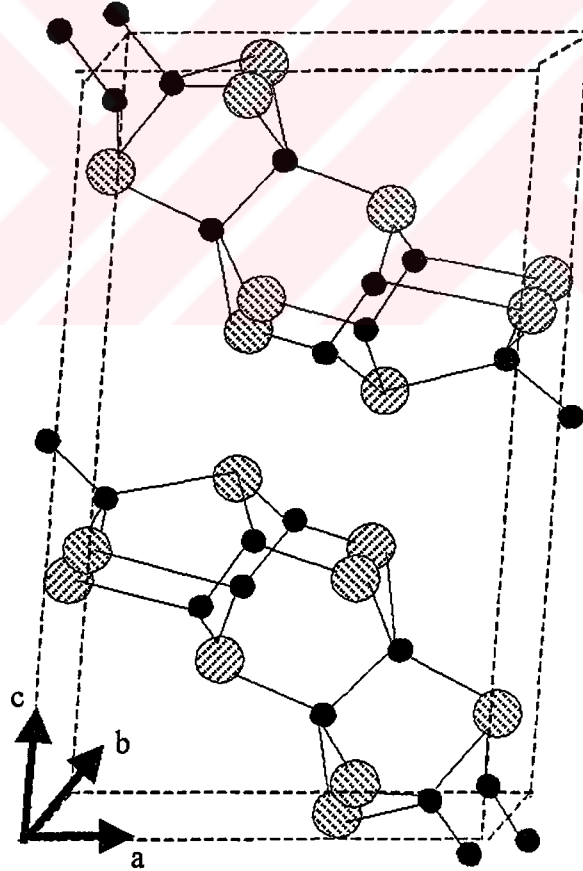
Tablo 2.1. Monoklinik α -GaTe kristalinin örgü parametreleri.

	a (Å)	b (Å)	c (Å)	γ (°)
Grasso et al., 1975	17.84	4.074	10.56	104.12
Pal and Bose, 1996	17.32	4.05	10.59	104.4
Lieth, 1977	17.37	4.074	10.44	104.12

Şekil 2.5' de α -GaTe kristalinde atomlar arası bağ yapısı Şekil 2.6' da ise GaTe tek kristalinin monoklinik kristal yapısına ait birim hücrenin yapısı verilmektedir.



Şekil 2.5. α -GaTe kristalinde atomlar arası bağ yapısı (Antonangeli et al., 1981).



Şekil 2.6. GaTe tabakalı tek kristalinin monoklinik birim hücresi (Camassel et al., 1980).

Literatürde GaTe için pek çok araştırmacı tarafından elektriksel karakterizasyon amacıyla omik kontak çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda GaTe' e genellikle omik kontak malzemesi olarak farklı tavlama şartlarında In ve Au elementleri, doğrultucu kontak için ise daha çok Al ve Ag elementleri kullanılmıştır. Bu konudaki literatür özeti Kısım 3.4.1' de sunulmuştur. Bununla birlikte bildiğimiz kadarıyla şu ana kadar, bu kristal üzerinde yürütölen herhangi bir *omik kontak optimizasyonu* çalışması bulunmamaktadır.



2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

2.1.1. Doğrultucu (*Schottky*) Kontaklar

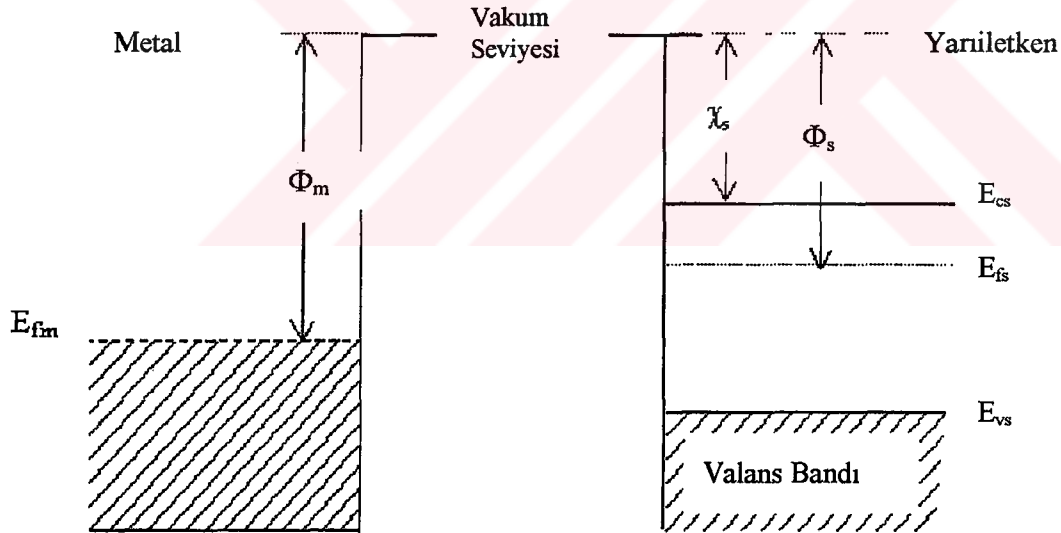
İki iletken kontak haline getirildiğinde aralarındaki yük alışverişinden sonra, yeni denge durumu meydana gelir ve her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Bu kural sadece iki iletken arasındaki kontak durumunda değil, bir iletken ve bir yarıiletken (n-ya da p-tipi) arasındaki kontak durumunda da meydana gelir. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metal arasında yapılan kontak durumunda, bu dipol tabakası kontağın her iki tarafındaki yüzey yükleri nedeniyle meydana gelir. Oluşan bu kontak, elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri nedeniyle *omik kontak* olarak adlandırılır. Şayet, kontağı oluşturan maddelerden biri metal diğeri yarıiletken ise oluşacak kontak omik ya da doğrultucu olabilir. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki geçişleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli nedeniyle zorlaşabilir. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir (Ziel, 1968).

Bu olayı açıklamak için bir metal ve bir n-tipi yarıiletken dikkate alınabilir. Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s , yarıiletkenin elektron ilgisi χ_s ve $\Phi_m > \Phi_s$ olsun. Kontakta önceki durumda, Şekil.2.7' de görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra yarıiletken yüzeyden metale elektronlar geçerken geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük mübadelesi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri eşitlenir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.8. 'de görüldüğü gibi $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar alçalmıştır. Sonuç olarak, kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $(\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır.

Bu engel yüksekliği difüzyon potansiyeli cinsinden $eV_{dif} = (\Phi_m - \Phi_s)$ şeklinde ifade edilebilir. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşılırlar. Kontakta yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, sayısı metal tarafındaki

iyonize olmuş yük yoğunluğundan çok daha az olan iyonize olmuş donörlerin neden olduğu ve bunların yarıiletken içinde hareketsiz olmalarından dolayı bunlara yüzey yükü olarak değil bir uzay yükü olarak bakmak gerekir. Kontaktaki potansiyel engelden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir. Bu tabakanın kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğu zaman kontakta eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer. Şayet yarıiletkene bir $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez. Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır.

Dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artacaktır.



Şekil 2.7. Kontaktan önce metal ve n-tipi yarıiletkene ait enerji bant diyagramları.

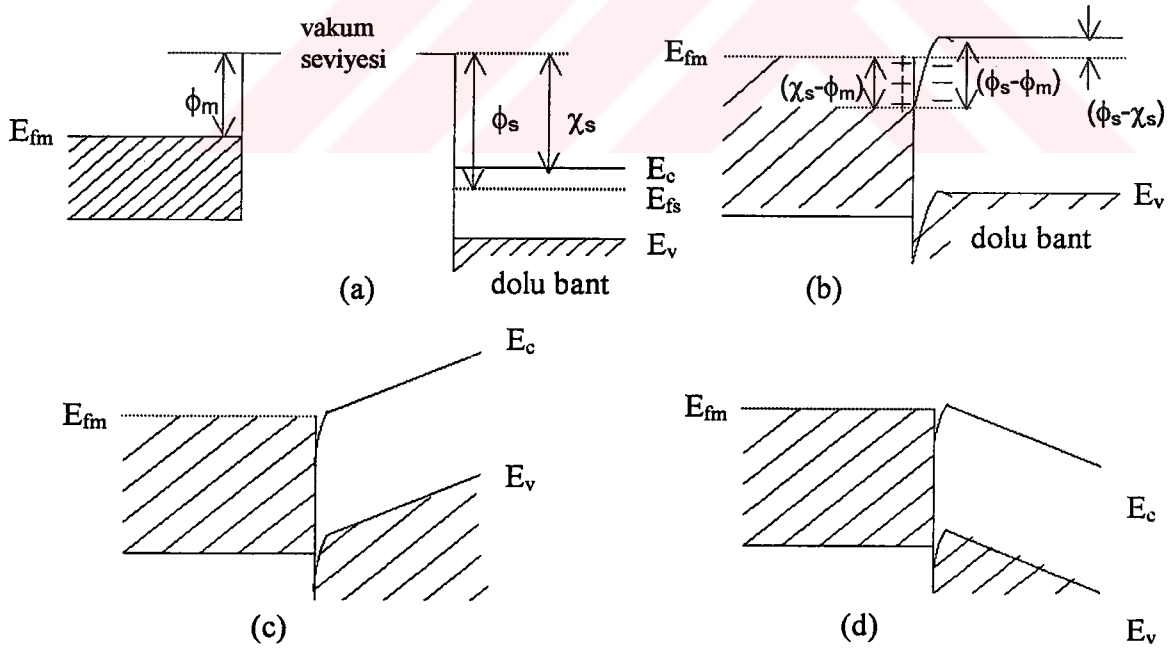
Bu durumda oluşan net akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad 2.1$$

suretiyle omik kontak oluşturmaktır ki, bu çalışmada elde edilen omik kontaklar üçüncü tarzda oluşmaktadır.

2.2.2.1.1. Omik (*Non-rectifying*) Kontak

($\Phi_m < \Phi_s$) durumunda, bir metalle bir yarıiletken kontak halinde olsunlar. Kontakta önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.9.a' da görülmektedir. Kontakta sonra termal denge durumunda, elektronlar metalden yarıiletkene doğru geride pozitif boşluklar bırakarak geçerler ve bu durumda yarıiletken yüzeyin n -tipliliği artar. Yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlar bir negatif yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride bir yüzey yükü tabakası (pozitif yük dağılımı) meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.9.b.' de görülmektedir. Şayet metal tarafına pozitif bir $+V$ gerilimi uygulanırsa bu durumda yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 2.9.c.).



Şekil 2.9. $\phi_m < \phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı.

a) kontakta önce, b) kontakta sonra, c) ters beslem altında, d) düz beslem altında.

Şayet yarıiletken tarafına pozitif bir $+V$ gerilimi uygulanırsa, elektronların karşılaşacakları engel yüksekliği yine çok küçük olacaktır ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene doğru akacaklardır (Şekil 2.9.d.).

Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde kolayca hareket edebilirler. Bu özelliğe oluşan kontaklara *omik kontaklar* denir. Omik kontakta bir $+V$ gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale negatif bir ($-V$) gerilim uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara *enjeksiyon kontakları* da denir (Ziel, 1968).

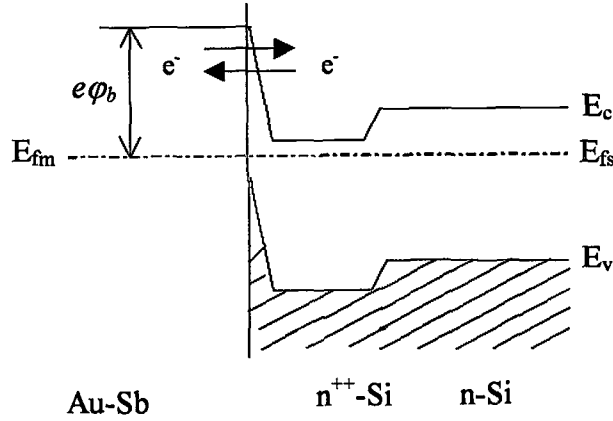
2.2.2.1.2. Tünelleme Eklemi

Omik kontak teorisine göre, iyi bir omik kontak oluşturmak için düşük bir engel yüksekliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte devre elemanı fabrikasyonunda, güvenilir omik kontak yapmak teoride olduğu kadar kolay değildir. Özellikle geniş yasak enerji aralığına sahip olan yarıiletken numuneler üzerinde omik kontak oluşumu çok büyük güçlüklerle sahiptir. Çünkü bu malzemeler üzerinde düşük engel yüksekliği oluşturmak suretiyle taşıyıcıların her iki yönde de geçiş yapabilmeleri pratik açıdan büyük güçlükler doğurur. Bu tür malzemeler için, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik gösterecek biçimde (n^{++} ya da p^{++}) katkılama suretiyle, yüksek engel yüksekliğine sahip, ancak taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapabilmesine izin verecek kadar dar potansiyel engeli oluşturmak mümkündür. Katkılama işlemi termal difüzyon, iyon ekme (ion implantasyon), ya da epitaksiyel büyütme tekniklerinden biri kullanılarak başarılabılır (Neamen, 1992).

Bir doğrultucu kontakın uzay yükü bölgesinin genişliği, yarıiletkene katkılanan kirlilik atomlarına ait konsantrasyonun karekökünün tersiyle orantılıdır.

$$w = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d}\right)\left(\phi_b - (Ec - Ef) - V - \frac{kT}{q}\right)} \quad 2.2$$

Bundan dolayı uzay yükü bölgesinin genişliği, katkı atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla azalır.



Şekil 2.9. n-Si' da tünelleme ile omik kontak oluşumu

(Neamen, 1992).

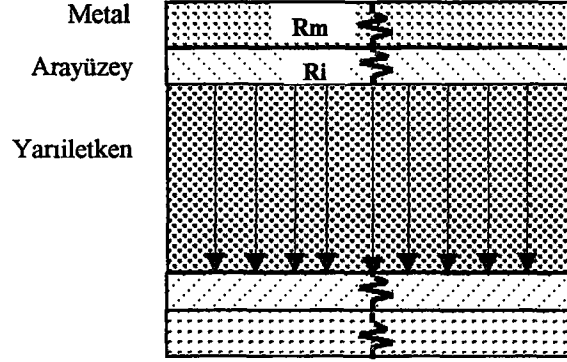
Bu durumda katkı konsantrasyonu arttıkça, potansiyel engel genişliği azalacak ve taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapma ihtimaliyeti artacaktır. Bu yüzden tünelleme ile omik kontak oluşturmada yarıiletken yüzeyin aşırı tiplilik gösterecek seviyede katkılanması gerekmektedir. Tünelleme ile omik kontak oluşumuna iyi bir örnek olarak n-Si' u örnek verebiliriz. n-Si omik kontak oluşturmak için Au-Sb ötektik (eutectic) alaşımı kullanılır. Burada termal yolla difüze edilen Sb atomları, kristal yüzeyinde n⁺ bölge oluşturarak tünellemeye imkan vermektedir (Şekil 2.9). Tünelleme her iki yönde de olacağından yapı omik özellik göstermektedir (Brillson, 1993).

Metal ile yarıiletken arasında termal difüzyonu başlatmak için ısı işlem gerekmektedir. Isıl işlem esnasında, yarıiletken malzemenin bir kısmı kontak oluşumu için harcanacağından reaksiyonun derecesi ve süresi devre elemanının davranışını etkiler. Bu yüzden düşük sıcaklık ve kısa zamanlı prosesler gerektiren yapılarda buna dikkat edilmelidir.

2.1.3. Omik Kontak Direnci (R_c) ve Spesifik Omik Kontak Direnci (ρ_c)

Kontak direnci ile spesifik kontak direnci arasındaki fark, ilk kez 1972 yılında Berger tarafından belirtildi. Buna rağmen o tarihten bu yana bu farklı iki terim üzerinde ortak

bir notasyonun geliştirilmemesi, 1983 yılında Cohen' i yeni bir terminoloji geliştirmeye itti (Ferry, 1990). Buna göre Şekil 2.10, alanı A olan tipik bir omik kontak yapısını göstermektedir. Akım bir kontakta diğerine, eşpotansiyel yüzeyler metal elektrotlara paralel olacak şekilde doğru çizgiler şeklinde akar ve herhangi bir akım kalabalıklaşması (*current crowding*) olayı gerçekleşmez.



Şekil 2.10. Omik kontak direncinin bileşenlerini gösteren kesit şema.

Kontak malzemesi metal ya da alaşımın direnci R_m , metal-yarıiletken arayüzey bölgesinin direnci R_i ile verilmektedir. R_i , metalizasyon işlemi esnasında yüzey şartlarından kuvvetle etkilenir. Çünkü yarıiletken yüzeyde bulunması muhtemel oksit ve kirlilikler ideal kontakta sapmalara sebebiyet verecektir. R_i , külçe (bulk) malzemenin kusur ve katkı konsantrasyonundan gelen katkıyı da içermektedir.

Bu yapı üzerinde akım-gerilim ölçümü yapıldığında ölçülen değer, bunların toplamı olan R_c omik kontak direncine karşılık gelecektir: Bundan dolayı omik kontak direnci;

$$R_c = R_m + R_i \quad 2.3$$

denklemlerle verilecektir. Ancak pratikte metal tabakanın direnci, arayüzey bölgesinin direncine nispetle ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan,

$$R_c \cong R_i \quad 2.4$$

yazılabilir. Spesifik omik kontak direnci ise (ρ_c), omik kontak direnci ile kontak alanının çarpımıyla verilir:

$$\rho_c = R_c \cdot A \quad 2.5$$

Bu ifade akım-gerilim karakteristiklerinin doğrusal olduğu ve kontağın üniform bir arayüze sahip olması durumunda geçerlidir. ρ_c , aynı zamanda yüzey direnci (*spreading resistance*) ve akım kalabalıklaşmasından gelen katkıları da içermektedir. Kontak alanının değeri değişirken arayüzey tabakasının direnci sabit kalacağından, yüzey direnci devre elemanı geometrisinin bir fonksiyonu olacaktır. Bundan dolayı ρ_c , kontak alanına doğrusal olmayan bir bağıllık gösterecektir (Ferry, 1990).

Yüksek öz dirençli numuneler daha yüksek omik kontak direncini tolere ederken, düşük öz dirençli numuneler için omik kontak direncinin çok küçük olması gerekmektedir. Ayrıca devre elemanının boyutları küçüldükçe kontak direncini (R_c) aynı tutmak için spesifik kontak direnci (ρ_c) azaltılmalıdır.

Spesifik kontak direnci (ρ_c), sıfır beslemde hesaplanan gerilime göre akım yoğunluğunun türevinin tersi olarak da tanımlanabilir (Neamen, 1992).

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Bigg|_{V=0} \quad (\Omega \text{cm}^2) \quad 2.6$$

İyi bir omik kontakta R_c ' nin mümkün olduğunca küçük olması istenir. Çünkü test numunesi üzerinde yapılan elektriksel ölçümlerin doğruluğunun artması için, omik kontak üzerinde oluşan gerilim düşmesinin devre elemanı üzerindeki net gerilim düşmesine nispetle daha düşük olması gerekmektedir. Böylece elektriksel karakterizasyonda ölçümler daha sıhhatli ve güvenilir olacaktır.

2.2.3.1. Spesifik Omik Kontak Direncinin Bazı Parametrelere Bağıllığı

Düşük kirlilik konsantrasyonuna sahip bir numune üzerinde gerçekleştirilen kontak için termiyonik emisyon akımı baskın olacağından, ϕ_b azaldıkça kontak direnci azalacaktır (Denklemler 2.7). Bu durumda R_c katkı konsantrasyonundan bağımsızdır. Burada A^* Richardson sabitidir.

$$R_c = \frac{\frac{kT}{q} \exp\left(\frac{e\phi_b}{kT}\right)}{A^* T^2} \quad 2.7$$

Katkı konsantrasyonu arttıkça ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$) tünelleme akımı baskın olacağından, kontak direnci üstel olarak azalır (Denklem 2.8). Burada kontak direnci, Schottky engel yüksekliğinden daha çok N_d (donor konsantrasyonu) tarafından belirlenir.

$$R_c \propto \exp\left(\frac{2\sqrt{\epsilon_s m^*} \phi_b}{\hbar \sqrt{N_d}}\right) \quad 2.8$$

Omik kontak yapıları üzerinde kontak direnci ölçümü yapabilmek için yapının tavlama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Metalizasyon ve tavlama işlemleri omik kontak direncinin değerini tayin eden en temel işlemlerdir. Buna örnek olarak GaAs' a yapılan AuGeNi kontağını verebiliriz. Bu yapı $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda yapılan tavlama işlemine rağmen doğrultucu davranış göstermektedir. Omik davranış $360 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstündeki sıcaklıklarda başlar. $420 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de oldukça yüksek omik kontak direnci gözlenmesine rağmen $440 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bu direnç değeri 10^4 kat azalmakta ve $10^{-7} \Omega\text{cm}^2$ lik bir değer olarak en düşük omik kontak direncine ulaşılmaktadır. Bundan sonra $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar değişmeyen direnç değeri $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de iki katına çıkmaktadır (Brillson, 1993).

Omik kontak alanı da omik kontak direncini etkileyen faktörlerden biridir. Omik kontak altında kalan yarıiletken kısa devre olacağından akım çizgilerinin üniformluğu bozulacaktır. Omik kontak direncinin değerinin ölçümünde, gerçek değerden sapmalara sebebiyet verdiği için dolayı, omik kontak alanının düşük tutulmasını gerektirmektedir. Bu durum kısım 2.2.3.5' de matematiksel olarak analiz edilmiştir.

2.2.3.2. Spesifik Omik Kontak Direnci Ölçüm Teknikleri

Yarıiletken tabanlı devre elemanı teknolojisinin gelişmesi büyük ölçüde düşük dirençli metal-yarıiletken kontakların başarılmasına bağlıdır. Bundan dolayı hızlı, basit ve güvenilir metodların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuş ve şu ana kadar pek çok test yapısı geliştirilmiştir. Kontak direnci büyük olduğunda çeşitli geleneksel teknikler kullanılabilir. Dörtlü nokta probu, dikey ve yatay ölçüm tekniği ve potansiyel profiling metodu bunlardan bazılarıdır. Fakat kontak direnci küçüldükçe bu tekniklerdeki ölçüm hatası artar (Brillson, 1993). Kontak direnci sadece metal-yarıiletken arasındaki

arayüzey hallerine değil aynı zamanda kontağın geometrisine ve yüzey direncine bağlıdır. Fakat ölçüm teknikleri ölçülen değerlerin hangi etkenlerden kaynaklandığını bize söylemez (Mak et al., 1989).

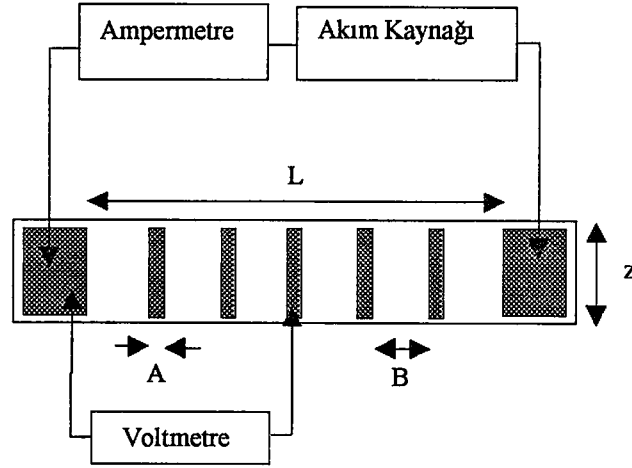
Cross Bridge Kelvin Resistor (CBKR) ve *Contact End Resistor (CER)*, *The Cox and Strack method* (Ferry, 1990; Brillson, 1993) gibi ölçüm teknikleri, hassasiyetleri fazla olmamasına rağmen keyfi kontak alanına sahip numuneler üzerinde ölçüm yapmaya izin vermektedir. *Transmission Line Method (TLM)* tekniğindeki durumun aksine, bu test yapısında akım dikey ve üniform olarak akmaktadır. Böylelikle bu geometride akım çizgilerinin düzensizlik sorunu ortadan kaldırılmıştır. *CBKR* tekniğinde ölçülen direnç doğrudan arayüze ait kontak direnci değerini vermektedir. Bu tekniklerde de R_f (ön direnç), R_e (son direnç) değerleri hesaplanabilmekle birlikte daha karmaşık (altı terminalli) bir test yapısına ihtiyaç duyması kullanışlılık açısından çok cazip değildir. Genel anlamda yukarıdaki dikey test yapıları kullanılarak yapılan omik kontak ölçümlerinde extra litografik işlemlere gerek duyulmaktadır. Bu tekniklerin temel prensibi şudur (Ferry, 1990): Yarıiletken bölgeden metale doğru tamamı kontak bölgesi üzerinden üniform biçimde geçen bir I akımı sürülür. Daha sonra üzerinde hiçbir akım akışının olmadığı kontaklardan V_c gerilim düşmesi okunur. Bu ölçüm akımın yönü ve daha sonra da akım-gerilim kontakları değiştirilerek tekrar edilir. Kontak direnci ise bu ölçümlerin ortalama değeri olarak elde edilmiş olur.

TLM tekniği, diğer dikey test yapılarına kıyasla daha çok elektriksel ölçüme gerek duymaktadır. Ayrıca bu teknikle ölçüm için numune geometrisinin çok iyi bilinmesi de gerekmektedir. Bununla birlikte *TLM* tekniği spesifik omik kontak direncinin ölçümünde en çok kullanılan tekniktir.

2.2.3.3. *TLM* ile Spesifik Omik Kontak Direncinin Hesabı

Schokley 1964' de Şekil 2.11' de gösterilen basamaklı (ladder) yapı kullanan bir ölçüm metodu teklif etti. Düşük potansiyel farkların direk ölçüm problemini ortadan kaldıran bu modelde, spesifik kontak direncinin herhangi bir kontak için sabit olduğu ve akım yoğunluğundan da bağımsız olduğu kabul edilir. Numunenin iki büyük omik kontağı arasına bilinen bir I akımını sürecektir bir sabit akım kaynağı bağlanır. Yüksek impedanslı

bir voltmetrenin problarından biri akımın verildiği kontağa diğeri ise sırayla numune üzerindeki kontaklara değdirilir. Bu da bize konum-potansiyel grafiğinin çizilmesine imkan verir (Şekil 2.12).



Şekil 2.11. Spesifik omik kontak direcini ölçmede kullanılan ladder yapı (Mak et al., 1989).

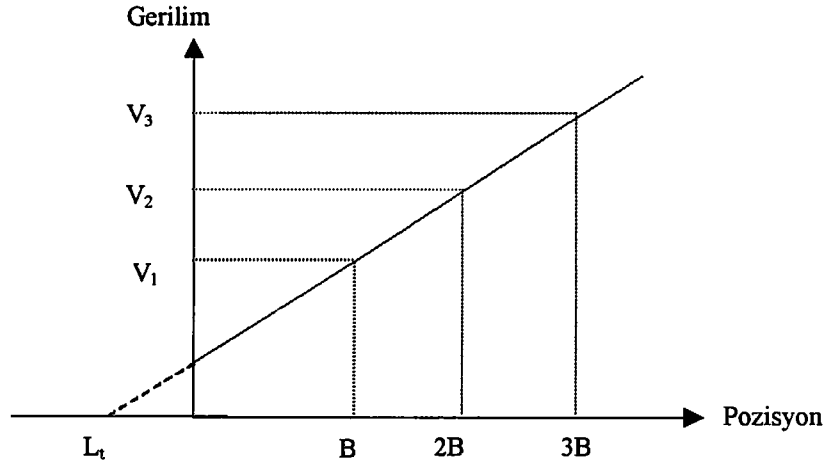
Bu grafik extrapole edilerek sıfır potansiyel fark için konum bulunur. Bu da bize L_T transfer uzunluğunu verecektir. Kontak direnci ne kadar düşük olursa L_T değeri de o kadar küçük olacaktır. Schokley ince iletken tabakalar için, spesifik kontak direncinin (ρ_c) şu ifadeyle verileceğini gösterdi (Mak et al., 1989).

$$\rho_c = L_T^2 \cdot R_S \quad 2.9$$

Burada,

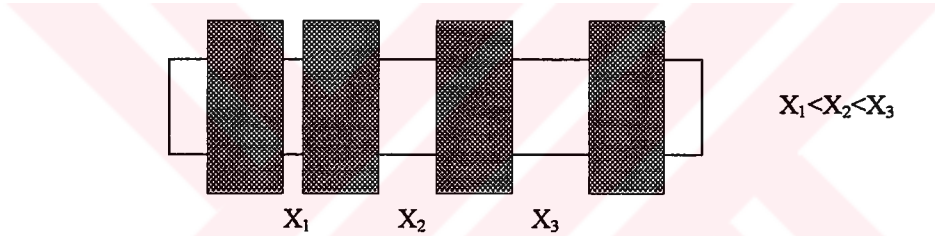
$$R_S = (V/I) \cdot z/L \quad 2.10$$

ile verilir. Görüldüğü gibi, R_c 'yi bulmak için L_T ve R_S 'nin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.11' de gösterilen yapı her ikisinin de ölçülmesine imkan verir. L_T , eğrinin x-ksenini kestiği yerden R_S ise eğimden hesaplanır. Bu yapı pek çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bununla birlikte dar kontakların genişliği L_T ile kıyaslanabilir olduğunda bu tekniğin başarılı olmadığı bilinmektedir. Çünkü potansiyel ölçülen kontakların konumu hakkında bir belirsizlik var demektir. Bu da L_T ve R_S 'yi etkiler.



Şekil 2.12. Potansiyel-Konum grafiği.

Bu ölçüm tekniğinin farklı bir varyantı da değişik aralıklı geometri kullanmaktır. Bu geometri Şekil 2.13' de görülmektedir.

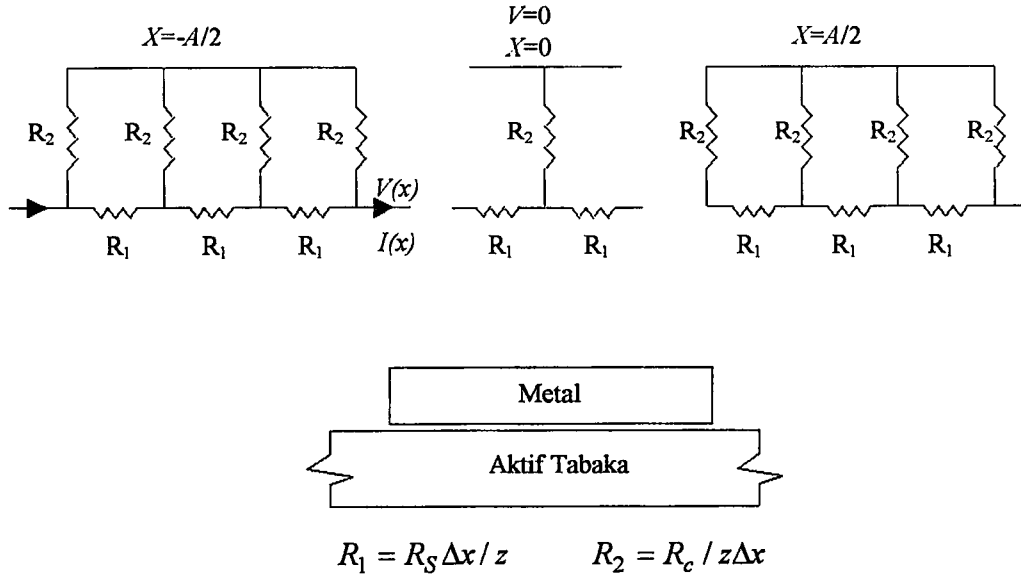


Şekil 2.13. Değişken aralıklı test yapısı.

Burada pekçok aynı boyutta geniş kontak farklı aralıklarla ayrılmıştır. Aynı şekilde buradan da potansiyel-konum eğrisi çizilip L_T bulunabilir. Açıkta ki buradaki hassasiyet ve ölçüm aralığı ilk yapıdan farklı olacaktır. Çünkü burada potansiyel dağılımını bozacak hiçbir dar kontak yoktur. Literatürde bu yapının özellikle çok düşük kontak dirençli numunelerde avantajlı olduğu ortaya çıkarılmıştır (Mak et al., 1989).

2.2.3.4. Bir Omik Kontak Filmi Altında Akımın Davranışı

Omik kontak ve onun altındaki yarıiletken, Şekil 2.14 ile temsil edilebilir. Burada metal filmin iletkenliği sonsuz kabul edilir. Akım, x' in negatif değerleri için yarıiletkenden metale, pozitif değerleri için metalden yarıiletkene doğru akacaktır. Simetriden dolayı $x=0$ ' da metal ve yarıiletken arasında akım olmayacaktır. Açıkta ki, R_c/R_S oranı yarıiletkenden metale doğru ve ters yönde geçen akımla tayin edilir.



Şekil 2.14. Dar omik kontaklar için eşdeğer devre.

Genel olarak bir x koordinatı için *Ohm Karurur*;

$$R_1 \cdot I(x) = V(x) - V(x + \Delta x) = \Delta V(x)$$

$$R_2 \cdot \Delta I(x) = -V(x)$$

olmasını gerektirir. Bu eşitliklerden ve $\Delta x \rightarrow 0$ limitinden,

$$\frac{d^2 V}{dx^2} - \frac{R_S}{R_c} V = 0$$

yazılabilir. Burada R_c , kontak direnci R_s ise iletken tabaka için yüzey başına dirençtir. Bu denklem uygun sınır şartları kullanarak integre edilebilir. C ve D bir sabit olmak üzere, şöyle bir çözüm farzedelim:

$$V = C \exp\left(\frac{x}{L_T}\right) + D \exp\left(-\frac{x}{L_T}\right)$$

Burada $L_T^2 = \frac{R_c}{R_S}$ olarak tanımlanır. Eğer $V=0$ ve $\frac{dI}{dx} = 0$ ($x=0$ ' da) ise bu durumda,

$$C + D = 0 \quad C = -D$$

ve,

$$V = C \left[\exp\left(\frac{x}{L_T}\right) - \exp\left(-\frac{x}{L_T}\right) \right] = 2C \operatorname{Sinh}\left(\frac{x}{L_T}\right)$$

olacaktır. Eğer $\frac{dv}{dx}$ ($x = \frac{A}{2}$, de) sürekli ise bu durumda,

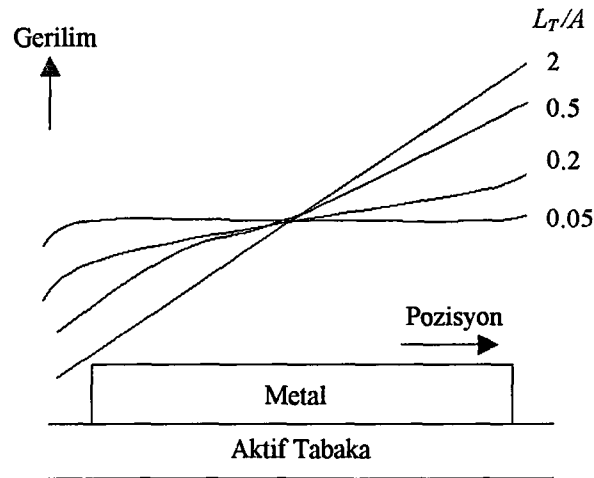
$$\left[\frac{dv}{dx} \right]_{x=A/2} = \frac{2C}{L_T} \operatorname{Cosh}\left(\frac{A}{2L_T}\right) = \frac{I_0 R_S}{Z}$$

olur. Buradan ,

$$C = \frac{I_0 R_S L_T}{2Z \operatorname{Cosh}\left(\frac{A}{L_T}\right)}$$

$$V = \frac{I_0 R_S L_T}{Z} \frac{\operatorname{Sinh}\left(\frac{x}{L_T}\right)}{\operatorname{Cosh}\left(\frac{A}{2L_T}\right)}$$

elde edilir ($-A/2 < x < A/2$ bölgesi için).



Şekil 2.15. Ladder yapıda dar kontaklar için gerilim-pozisyon grafiği.

Şekil 2.15, bu davranışı ve değişik L_T değerleri için kontakdan itibaren gerilim dağılımını gösteriyor. Kontak bölgesinde $-A/2$ 'den $A/2$ 'ye tam uzunluk boyunca potansiyel düşmesi,

$$V_0 = \frac{2I_0 R_S L_T}{Z} \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right)$$

olacaktır. Bu, kontak edilmemiş malzemenin uzunluğuna eşittir.

$$A_{eff} = 2L_T \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right)$$

İki uç durum bu denklemden elde edilebilir;

$$A \gg L_T \text{ için, } \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right) \cong 1 \text{ ve } A_{eff} = 2L_T \text{ (kısa devre durumu)}$$

$$A \ll L_T \text{ için, } \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right) \cong \frac{A}{2L_T} \text{ ve } A_{eff} \rightarrow A \text{ (açık devre durumu)}$$

Dar kontaktların bu davranışı, L_T , R_S ve gerçek nicelikler arasındaki bağıntıyı türetmek üzere kullanılabilir.

V_n , n. dar kontaktlı metalin voltajı için,

$$V_n = \frac{I_0 R_S}{Z} \left[\left(L_T + n\beta + 2(n-1)L_T \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right) + L_T \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right) \right) \right]$$

yazılabilir. Bu terimler sırasıyla geniş kontakdan doğan gerilim düşmesini, açık devre materyalinden doğan gerilim düşmesini, (n-1) tane dar kontakdan doğan gerilim düşmesini ve n. kontakdan doğan gerilim düşmesini ifade eder.

Açık devre durumunda (ki burada kontaktlar yarıiletkenin uzunluğuna eşitmiş gibi davranır), n. kontak pozisyonu şöyle alınabilir:

$$X_n = nB + (n-1)A + A/2$$

$$R_{ölçülen} = R_S \frac{B + 2L_T \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right)}{A + B}$$

$$L_{T_{ölçülen}} = \frac{A/2}{1 + (2L_T/B) \tanh(A/2L_T)} + \frac{L_T(A + B - B \tanh(A/2L_T))}{B + 2L_T \tanh(A/2L_T)}$$

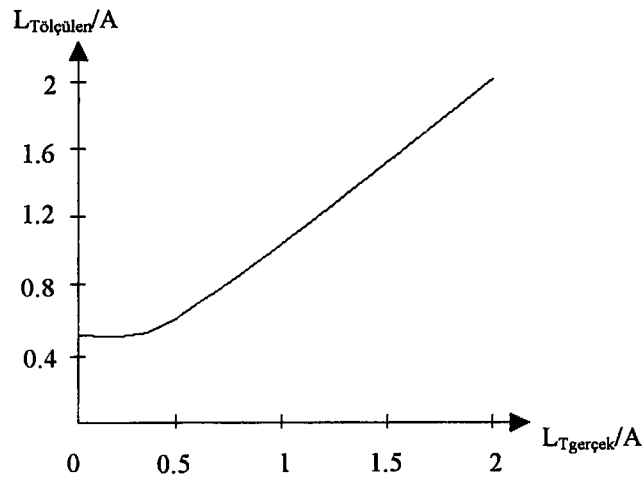
Burada L_T ve R_S bu niceliklerin gerçek değerleridir. V_n ve X_n ' in gerçek ölçülen değerlerinin eksenini kestiği yer ve eğimlerinin kıyaslanmasından sonuçlar elde edilir. Öte yandan kısa devre durumunda, dar kontaklar altındaki yarıiletkenlerin etkin uzunluğu sıfır alınır. Böylece,

$$X_n = nB$$

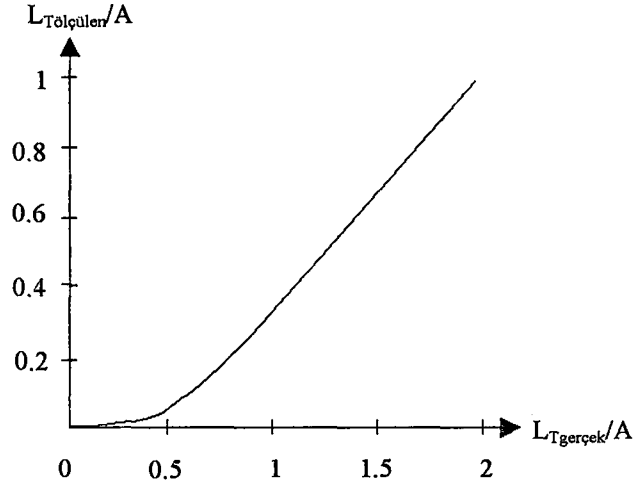
$$R_{ölçülen} = R \frac{B + 2L_T \tanh\left(\frac{A}{2L_T}\right)}{B}$$

$$L_{T_{ölçülen}} = L_T \frac{(B - B \tanh(A/2L_T))}{B + 2L_T \tanh(A/2L_T)}$$

olacaktır. Gerçek L_T değerine karşın ölçülen L_T değerinin grafiği açık ve kısa devre durumları için çizilirse şu eğriler elde edilir (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).



Şekil 2.16. Açık devre durumu için ölçülen transfer uzunluğunun gerçek transfer uzunluğuna karşı grafiği ($B=3A$).



Şekil 2.17. Kısa devre durumu için ölçülen transfer uzunluğunun gerçek transfer uzunluğuna karşı grafiği ($B=3A$).

Dar kontağın altındaki yarıiletkenin açık devre durumu, L_T/A ' nin geniş bir aralığı üzerinden iyi bir doğrudur. Aynı zamanda şu da gösterilebilir ki B ' nin her değeri için bu geçerlidir (B dar kontaklar arası mesafedir). Bununla birlikte 0.5' den daha küçük L_T/A değerleri için hata daha fazla artar ve $L_{Tölçülen} A/2$ ye gider. Nitekim açık devre durumu kontaklardan elde edilen sonuçlar çok küçük düzeltmelere ihtiyaç duyarlar ($L_T \geq 3A/2$ için, R_c %2 den daha az bir hataya sebep verir).

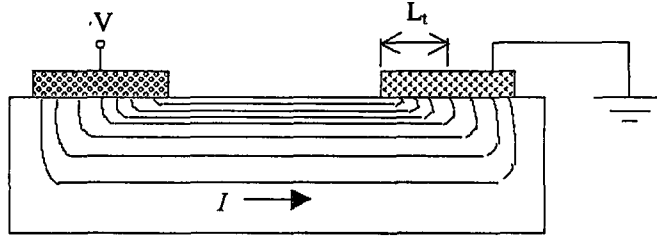
İkinci yaklaşım (kısa devre yaklaşımı) L_T ' nin gerçek değerini elde etmede iyi değildir. Hatta $L_{T/Aölçülen}$ ' nin $L_{T/Agerçek}$ ' e karşı çizilen grafiği B/A oranına sıkı bir şekilde bağlıdır. Bundan dolayı pratikte en kullanışlı ifade olarak açık devre durumu görülür. Dolayısıyla düzeltme faktörü için Şekil 2.16' nin verileri kullanılır. Bundan dolayı, hassas bir şekilde hesaplanabilen kontak direncinin minimum değeri,

$$R_c = \rho A^2 / 4t$$

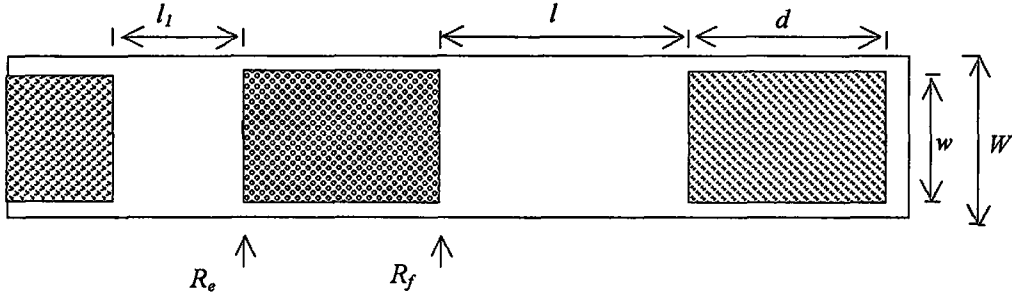
Burada ρ , yarıiletkenin öz direnci, t ise aktif tabaka kalınlığıdır.

2.2.3.5. TLM Tekniğiyle R_f , R_e , R_c ve ρ_c ' nin Analizi

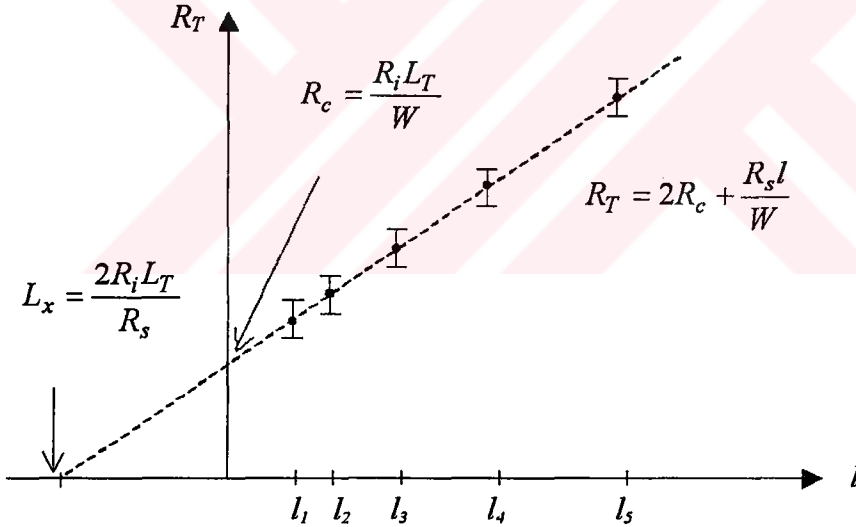
Değişken aralıklı bir düzlemsel (planar) devre elemanında, kontak şeması Şekil 2.18' de verilmektedir.



a. Akım kalabalıklaşması (*current crowding*) etkisi.



b. Ön direnç iki kontak arasındaki bölgeden, son direnç ise kontaktların en uzak kısımları arasındaki bölgeden hesaplanır.



c. Kontak direncinin hesaplanması.

Şekil 2.18. Ön (R_f), son (R_e) ve kontak dirençlerinin hesaplanması.

Metal elektrodlar civarında akım çizgileri doğrusal değildir. Her bir elektrodun iki kenarı arasındaki akım yoğunluğu farklı olduğundan kontak civarında eşpotansiyel düzlemler de paralel değildir. R_f ön kontak direnci (*front contact resistance*), iletken

tabakalar arasındaki gerilim düşmesinin, en yüksek akım yoğunluğuna sahip kontak kenarındaki toplam akıma oranı ile belirlenir.

R_e son kontak direnci (*end contact resistance*) ise, iletken tabakalar arasındaki gerilim düşmesinin en düşük akım yoğunluğuna sahip kontak kenarındaki akım yoğunluğuna oranına karşılık gelmektedir. Bu değerlerin tümü *TLM* tekniğiyle hesaplanabilir.

Şekil 2.18.b' de iki terminalli kontak direnci ölçümüne ait temel devre elemanı yapısı görülmektedir. Yarıiletken malzeme üzerine l mesafeli iki düzlemsel (planar) omik kontak yerleştirilmiştir. Bu analiz için, yarıiletken malzemenin genişliği kontak genişliğine eşit kabul edilsin ($W=w$). Omik kantağın şu üç bileşenden meydana geldiği kabul edilebilir; bir metal tabaka, iletken bir arayüzey tabakası ve külçe yarıiletken tabaka. *TLM* ile kontak direnci ölçümlerinde, kontak direnci değerinin sadece arayüzeyden kaynaklandığı kabul edilir.

Kontaklar arasına bir V gerilimi uygulandığında kontaklar arasında bir I akımı akacaktır. Kontaklar aynı düzlem üzerinde bulunduğu için, akım ortalama olarak arayüzey bölgeye karşılık gelen bir mesafe boyunca dik olarak akacak (L_T), daha sonra yatay bir doğru boyunca akmaya devam edecektir. Bu L_T mesafesine *transfer uzunluğu* denir ve bu teknikte ölçülebilir (Ferry, 1990). Bu durumda ölçülen toplam direnç,

$$R_T = \frac{R_s l}{W} + \frac{2R_i L_T}{W}$$

olacaktır. Burada R_s , iletken tabakanın yüzey direnci (Ω/alan), R_i , kontak altındaki arayüzey tabakasının yüzey direncidir. $l=0$ için toplam direnç,

$$R_T = \frac{2R_i L_T}{W}$$

olacaktır. Toplam direnç sıfır alınarak, doğrunun x eksenini kestiği yer hesaplanır:

$$L_x = -\frac{2R_i L_T}{R_s}$$

Eğer $R_i=R_s$ ise bu durumda L_x uzunluğu aşağıdaki gibi olacaktır:

$$L_x = -2L_T$$

Bu ifade çoğu durumlarda geçerli değildir. Çünkü arayüzey tabakası genellikle aşırı katkılı olduğundan $R_s \gg R_i$ olacaktır. Kontak uzunluğu d ' nin L_T transfer uzunluğundan daha büyük olduğu düşünülürse, bu durumda akımın çoğunluğu kontakın ön kenarından L_T kadar bir mesafede kontakta kısa devre olacaktır. Bu etkin kontak alanınının WL_T değil Wd olacağı anlamına gelmektedir. O halde etkin kontak direnci aşağıdaki gibi yazılabilecektir:

$$R_c = \frac{R_i L_T}{W} \quad (\Omega/\text{alan})$$

Buradan spesifik kontak direnci için ($R_i=R_s$ farzedilerek),

$$\rho_c = R_c \cdot A = R_c \cdot WL_T = R_s L_T^2 \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2)$$

yazılabilir. Spesifik omik kontak direnci, benzer kontaklar arasında akım-gerilim ölçümü yapılarak toplam direnç değeri ölçülerek hesaplanır. R_T ' nin l ye karşı grafiği bir doğru çizgidir. Bu doğrunun y eksenini kestiği yer $2R_c$ ' yi x eksenini kestiği yer ise $-2L_T^2$ yi vermektedir. Eğer kontaklar arasındaki mesafe değişkense bu durumda kontak direnci,

$$2R_c = \frac{R_2 l_1 - R_1 l_2}{l_1 - l_2}$$

denkleminde hesaplanır.

Pratikte $R_s \gg R_i$ olduğundan (AuGeNi:GaAs yapılar için, $R_i=20 \Omega/\text{alan}$ ve $R_s=400 \Omega/\text{alan}$, R_f ve R_e ' nin hesaplanmasında bazı düzeltmeler yapılmalıdır. Buna göre,

$$R_f = \frac{\sqrt{R_i \rho_c}}{w} \coth[\sqrt{R_i / \rho_c} d]$$

$$R_e = \frac{\sqrt{R_i \rho_c}}{w} \operatorname{csc} h[\sqrt{R_i / \rho_c} d]$$

$$R_f = R_e \cosh[\sqrt{R_i / \rho_c} d]$$

olacaktır. Transfer uzunluğu ise,

$$L_T = \sqrt{\rho_c / R_i}$$

ile verildiğinden son (*end*) direnç ile R_c kontak direnci arasında aşağıdaki denklem geçerli olacaktır:

$$R_c / R_e = \cosh(d / L_T)$$



2.3. Fotolitografi Tekniğiyle Patern Transferi

Modern katıhal elektroniği ve optoelektronik, yüksek verimli ileri kompleks devre elemanları üretmede büyük bir başarıya ulaşmıştır. Pek çok aktif ve pasif devre elemanı fotolitografi tekniği kullanılarak aynı yonga üzerine geliştirilebilmektedir. Kristal büyütme işlemlerinde malzemenin yan (lateral) zelliklerinin kontrollü değişimini sağlamak güç olduğundan fotolitografi tekniğine bu konuda büyük ihtiyaç duyulur. Modern katıhal devre elemanlarında (IC) aynı yonga üzerinde birim alan başına 10^6 mertebesinde devre elemanı birarada bulunmaktadır. Fotolitografi tekniği bu alanda da merkezi bir rol oynar ve yoğun ve kompleks devre üretimine izin verir. Aynı zamanda çok küçük boyutlarda yüksek performanslı devrelerin üretilmesini sağlar. İleri katıhal devrelerinin başarılılabilmesi bu alandaki gelişmelere bağlı görülmektedir. Elektronik cihazlarda ulaşılan başarıya henüz optoelektronik sistemlerde ulaşılamamakla birlikte bu teknik her iki teknolojiye de yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu teknikle bir yüzeyin yan özelliklerini değiştirmek daha önce değişik sanat dallarında kullanılmaktaydı (Singh, 1995).

2.3.1. Fotoresist Kaplama ve Patern Transferi

Yarıiletken yongayı bir imaja hassas yapmak için, “*spin coating*” işlemiyle yonga üzerine fotoresist serilir. Böylelikle yarıiletken üzerinde ışığa duyarlı bir film oluşturularak patern transferi gerçekleştirilebilir. Bu işlemin güvenirliği  kritere bağlıdır:

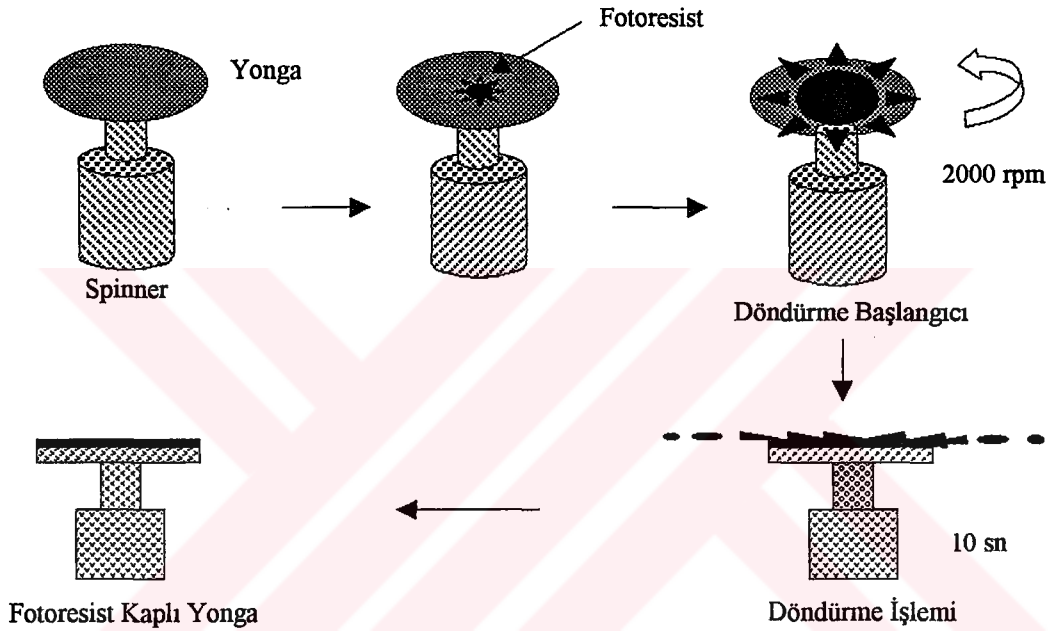
- i) Alt malzemeye iyi bir şekilde bağlanma özelliğine sahip olmalı,
- ii) Kalınlığı üniform olmalı,
- iii) Her farklı altlık malzeme için fotoresist filmin kalınlığı güvenilir bir şekilde kontrol edilebilmeli.

Fotoresist uygulamalarında, spin kaplama tekniği fotoresistin yonga üzerine homojen kalınlıkta serilmesine imkan sağlar. Bu tekniğe ait tipik proses adımları şekil 2.19’ da verilmektedir. Yarıiletken yonga bir döndürücü (*spinner*) zerinde vakumlanmak suretiyle sabitlenir. Bir miktar fotoresist yonga üzerine bırakılır ve spinner belirli bir hız (2000 rpm/10 sn) ve süreyle döndürülür. Böylece yarıiletken üzerinde ince ve homojen

bir film oluşturulur. Bu filmin kalınlığı spinnerin dönme hızına bağlıdır ve şu formülle verilir:

$$T \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad 2.11$$

Burada T kalınlık, ω ise döndürücünün açısal frekansıdır. Elde edilen filmin kalınlığı 0.7- 1 μ kalınlığındadır. Elde edilecek maksimum kalınlık fotoresistin viskozluğuyla sınırlıdır.



Şekil 2.19. Spin Coating işlemiyle fotoresist kaplamada işlem basamakları.

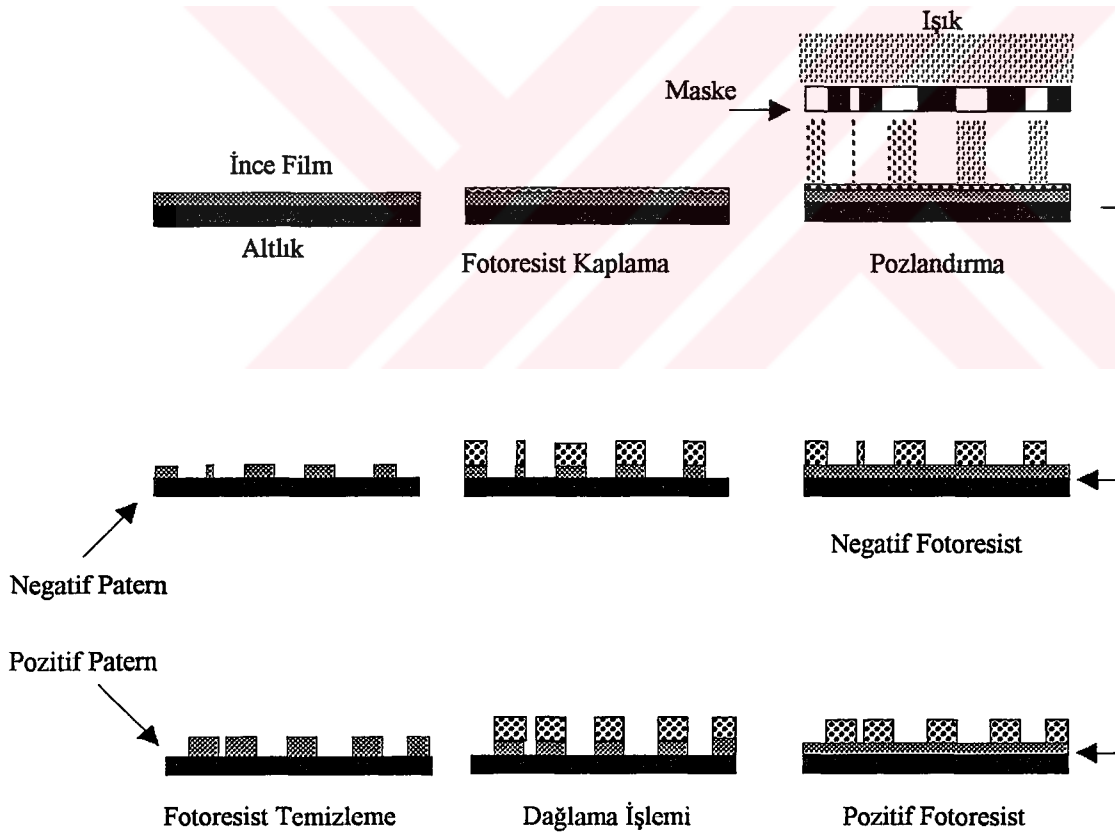
Si ve GaAs teknolojisinde, fotoresist serme işleminden önce kristal, standart temizleme işlemine tabi tutulur. Çünkü kristal üzerinde hidroksil (OH) grupları bulunacağından bunlar fotoresistin homojen bir şekilde kristal üzerine serilmesine engel olacaktır. Bu hidroksil grupları zayıf adhezyona sebep olacaktır. Serilen fotoresistin kuruması için 70 °C' de yaklaşık 5 dk. kadar bir pişirme işlemi (*softbake*) yapılır.

Pozitif fotoresist serildikten sonra bir maske aracılığıyla film pozlandırılır. Işığa maruz bırakılan bölgeler fotoresistle reaksiyona girerek çözülür, ışık görmeyen bölgelerde ise fotoresist korunur (Şekil 2.20). Böylece filmin pozitif imajı elde edilmiş olacaktır. Film

daha sonra geliştirilerek sabitlenir. Patern transfer edildikten sonra, patern altlığı ile birlikte yapı bir son pişirme (postbake) işlemine tabi tutularak mukavemeti artırılır.

Maskenin pozitif ya da negatif görüntüsünü elde etmek, kullanılan fotoresistin pozitif ya da negatif olma durumuna göre değişecektir. Ancak negatif fotoresistlerin daha başarılı sonuç verdiği bilinmektedir.

Bir fotoresist, daire biçimli kauçuk formunda polisoprene malzemeden (bir tür hidrokarbon) ve ışığa duyarlı N_3 grup radikalinden oluşmuştur. Fotoresist üzerine ışık düşürüldüğünde N_3 radikali isoprene malzemenin polimerizasyonuna sebebiyet vermek suretiyle, uzun bir hidrokarbon zinciri oluşur. Polimerize olan bölge erimeye ve çözünmeye karşı yüksek bir dirence sahipken, ışığa maruz kalmayan bölgeler kolay çözünebilme özelliği sergilemektedir.



Şekil 2.20. Bir paternin kristal üzerine transfer edilmesi.

Maske, kompleks devre paternlerinin fotoresist kaplı yonga üzerine transfer edilmesine izin verir. Bunun için önce maske paterninin geniş skalalı (100 katı veya daha büyük) bir örneği bir kağıt üzerine çizilir. Fotografik yöntemlerle başlangıç maske formatı istenilen boyutlarda bir negatif film üzerine düşürülür. Maskenin karanlık bölgeleri tamamen opak, aydınlık bölgeleri ise şeffaf olmalıdır. Maske üzerindeki patern Şekil 2.20' de gösterildiği gibi yonga üzerine düşürülebilir (Singh, 1995).

Kompleks devre imalatında, üç farklı litografi tekniği kullanılabilir;

1. Optik Litografi
2. Elektron Beam Litografi
3. X-ışınları Litografisi

Günümüzde bunlardan en sık kullanılanı optik litografidir. Bu teknikte pozlandırma işlemi optik ışınlarla yapılırken, elektron-beam litografi tekniğinde elektron şuasıyla ve X-ışınları litografi tekniğinde ise X-ışınları kullanılarak yapılmaktadır. Fakat son iki teknikte kullanılan ışınlar daha güçlü olduğundan kullanılacak fotoresistlerin özel olarak hazırlanması gerekmektedir. Özellikle X-ışınları litografi tekniğinde poz süresini azaltmak için, resistlerin X-ışını radyasyonuna çok hassas olması gerekmektedir (Ferendeci, 1991).

2.3.2. Elektrolizle Metal Kaplama

Elektroliz yardımıyla metal kaplama yapmanın uygulamada büyük bir önemi vardır. Kısaca *galvanoplasti* adı verilen bu yöntem 1837' de B. Jacobi tarafından geliştirilmiş ve o zamandan beri çeşitli şekillerde uygulama alanları bulmuştur. Ancak olayın kinetiğiyle ilgili gelişmeler o kadar hızlı olmamıştır. Bunun başlıca nedeni deneyden kaynaklanan zorluklardır. Her şeyden önce, katı bir elektrot yüzeyi tekdüze bir yapıda değildir ve dolayısıyla yüzeyin farklı kısımlarındaki kaplama hızı aynı olmamaktadır. Ayrıca elektrot yüzeyinin değişik kısımlarının etkinliği kaplama işlemi sırasında zamanla değişebilmektedir. Bu nedenlerle, elektrokaplama deneylerinde elde edilen sonuçları başka benzer deneylerle tekrarlamak ve bunlardan sayısal neticeler çıkarmak büyük güçlükler taşımaktadır. Elektrokaplama karşılaşılan zorlukların bir kısmı,

iyonların yüksüzleşmesini tekdüze bir yüzeye sahip olan bir sıvı metal (civa) üzerinde gerçekleştirerek yok edilebilmektedir. Bu çeşit deneyler, metal iyonlarının civa yüzeyinde bir alaşım (amalgam) oluşturarak büyük bir hızla indirgenebildiklerini göstermiştir. Metallerin katı yüzeylerde indirgenmesi tepkimesinin hızı iki etken tarafından belirlenir. Birinci etken, iyonun *Helmholtz* katmanındaki solvatize halinden sıyrılarak ara yüzeyin metal fazına geçmesindeki zorluk nedeniyle solvatize iyonların yüksüzleşmesinin yavaş bir şekilde oluşmasından kaynaklanır. İkinci etken, indirgenen iyonların metal kristali oluşturmakta gecikmesidir. Kristalleşme ise iki adımda olur; önce elektrot metalinin yüzeyinde iki boyutlu kristal çekirdekleri oluşur, daha sonra bu çekirdekler maddenin kristal örgüsüne uyarak büyür.

Gerçekte, çözeltiyle dengede bulunan kristal çekirdeğindeki maddenin kimyasal potansiyeli, metal fazındaki kitlesel maddenin kimyasal potansiyelinden daha büyüktür. Bu iki kimyasal potansiyelin arasındaki fark ne kadar büyükse, metali elektrolizle indirgeyebilmek için gereken potansiyel de o kadar büyük olacaktır.

Oluşan bir metal çekirdeğinin büyümesi için, elektrot metalinin yüzeyinde biriken atomların, buldukları yerden kristal örgüsünün gerektirdiği yere kadar difüze olmaları ve örgüye bağlanmaları gerekir. İyonların yüksüzleşme hızıyla belirlenen kaplama hızı (kristallerin büyüme hızı) yeni kristalleşme merkezlerinin oluşma hızından küçükse, kaplama daha yoğun, ince taneli ve dayanıklı olacaktır (Zeren, 1997).

Elektrolitik iletkenlik iyonların hareketinden kaynaklandığından dolayı bu hareketleri engelleyici bir etki, akıma karşı bir direncin doğmasına yol açar. Elektrolit çözeltilerin elektriksel iletkenliği, çözünen-çözünen etkileşmesi, çözünen-çözücü etkileşmesi, çözücü-çözücü etkileşmesi dışında, iyonlar arası etkileşmeler, iyonların çözünebilirliği, çözücünün viskozitesine bağlıdır. Sıcaklık yükseldikçe çözünen iyonların ortalama kinetik enerjileri artacak ve böylece direnç düşerken iletkenlik yükselecektir. Elektroliz boyunca elektrolit içindeki elektronötrallik korunacak ve elektrolitin her noktasından geçen iyonların sayısı ile katyonların sayısı da birbirine eşit olacaktır (Erdik ve Sarıkaya, 1989).

2.4. Kristal Büyütme

2.4.1. Giriş

Günümüzde yarıiletkenlerin teknolojik önemi dikkate alındığında, yarıiletken bileşikler üzerinde yapılan araştırmaların ilk basamağını istenilen bileşiğe ait tek kristallerin sentezlenip büyütülmesi oluşturur. *Kristal büyütme* olarak isimlendirilen bu işlem, yüksek saflıkta tek kristalin büyütülmesini amaçlar. Kristal büyütme işlemi genel olarak iki ana sınıfta toplanabilir: (a) *ince tabaka (epitaksiyel) büyütme* ve (b) *külçe (bulk) kristal büyütme*.

2.4.2. İnce Tabaka Büyütme Metodları

Epitaksiyel büyütme işlemi, gaz yada sıvı fazından istenilen kristalin *altlık (substrate)* adı verilen taban kristal üzerine biriktirilmesi ile sağlanır. Bu methodla, büyütülen kristallerin kontrollü miktarda kirlilik konsantrasyonuna sahip olması başarılabilir. Epitaksiyel kristaller özellikle elektronik devre elemanlarında ve modern elektronik cihazlarda yaygınca kullanılmaktadır (Smith, 1978). Epitaksiyel büyütme metodlarının en yaygın kullanım alanına sahip olanları;

1. Liquid Phase Epitaxy (*LPE*)
2. Vapour Phase Epitaxy (*VPE*)
3. Molecular Beam Epitaxy (*MBE*)
4. Metal Organic Chemical Vapour Deposition (*MOCVD*)

2.4.3. Eriyikten Kristal Büyütme Metodları

Külçe kristalleri büyütme için en uygun metodlar eriyikten büyütme metodlarıdır. Bu metodlarla metallerin, organik maddelerin, bileşiklerin ve yüksek erime noktalı malzemelerin büyük boyutlu kristalleri büyütülebilir. Bu metodlar, yapısal olarak mükemmel ve kontrollü kompozisyona sahip yarıiletken tek kristallerin büyütülmesine imkan sağlarlar (Lal, 1982).

Büyütme tekniğinin seçimi, buharlaşabilme veya ayrışabilme, kimyasal etkileşme ve malzemenin erime noktası gibi faktörlere dayanır. Normal katılma metodlarında,

katılma sürecinde üretilen ısı uzaklaştırılarak ilk çekirdeğin kontrollü katılması sağlanır. Isının uzaklaştırılması ile sıvı-katı arayüzeyinde yönelimli bir katılma meydana gelmesi sağlanır. Bölgesel büyütme metodlarında, külçe boyunca erimiş bölgenin hareketi sağlanır. Bölgesel eritme teknikleri, hem kristal büyütme hem de kirliliklerin uzaklaştırılması için kullanılır.

Eriyikten kristal büyütme metodları genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Lal, 1982):

a. Normal Katılma Metodları

1. Dikey Bridgman (Bridgman-Stockbarger) Metodu
2. Yatay Bridgman (Bot-Büyütme) Metodu
3. Czochralski Metodu
4. Kyropoulos Metodu
5. Verneuil Metodu

b. Bölgesel Büyütme Metodları

1. Yüzer Bölge Metodları
2. Bölgesel Eritme Metodları

2.4.4. Bridgman–Stockbarger Metodu

Yapılan literatür araştırmasında III-VI bileşikleri genellikle doğrudan katılma veya Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülmektedir. Bu metotta, sabit sıcaklık gradyentine sahip, iki veya üç zonlu dikey durumda sabit bir büyütme fırını kullanılır. Büyütülecek malzeme, genellikle başlangıç çekirdeğinin oluşması için alt ucu sivriltilmiş bir pota/büyütme ampülü içine yerleştirilir. Malzemenin özelliğine göre pota/büyütme ampülü açık veya kapalı olabilir. Fırın içinde keskin bir sıcaklık gradyenti oluşturmak için, zonları birbirinden ayıran ve sıcaklık değişimini kontrol eden bir ara kısım oluşturulur. Sıcaklık erime noktasının üzerine kadar yükseltilerek fırın içinde dikey olarak yerleştirilmiş potadaki bileşik eritilir. Bu metodta katılmayı oluşturmanın diğer bir yolu, fırın ve pota hareketsiz tutulup, fırın sıcaklığı belirli bir

hızda düşürülür. Bu metod, sabit fırın içinde hareketli pota kullanıldığında *Bridgman tekniği*, sabit fırın ve sabit pota kullanılarak sıcaklık düşürüldüğünde ise *Stockbarger tekniği* olarak adlandırılır.

Bridgman-Stockbarger tekniğinin temel avantajı; kristaller potanın şeklini alacağı için, istenilen boyutlarda silindirik külçelerin büyütülebilmesidir. Bununla birlikte, eriyik, kristal ve pota duvarlarının temasta olmaları ciddi bir bulaşma ve zorlanma (strain) kaynağıdır. Bu metodla katılaşıırken genişleyen malzemeler büyütülemezler.

2.4.5. Kristal Büyütmede Karşılaşılabilen Sorunlar

İkili yada üçlü bileşik yarıiletkenlerin büyütülme tekniğinin seçiminde aşağıdaki özelliklerin bilinmesi gereklidir (Immanieh, 1986):

1. Bileşiğin ve bileşen elementlerin kimyasal reaksiyona girebilme kabiliyetleri,
2. Büyütme sıcaklığında bileşiğin ayrışma buhar basıncı,
3. Bileşiğin erime sıcaklığının büyütmede kullanılan pota malzemesine uygunluğu,
4. Bileşik kompozisyonunun stokiyometrik formdan ayrılması durumunda tek kristal fazının sürdürülebildiği stokiyometrik sınır,
5. Bilinen faz geçişlerinin var olup olmayışı .

Her kristal büyütme metodunun kullanılmasında farklı problemlerle karşılaşmak mümkündür. *Bridgman-Stockbarger* metodu ile eriyikten külçe kristal büyütme sürecinde ise genellikle aşağıdaki problemlerle karşılaşılır:

1. Bileşen elementlerin yüksek buhar basıncı sebebiyle, ampülün çatlaması ve külçe yüzeyinin oksitlenmesi,
2. Eriyiğin kristalleşme sırasında ampül duvarlarına yapışması,
3. Külçe içinde çatlaklar oluşması,
4. Külçe içinde kabarcıklar ve yüzey çekirdekleşmesi oluşması,
5. Külçenin farklı bölgelerinde farklı yapılar ve iletim tiplerinin olması.

Bu problemler, eriyikten külçe kristal büyütme tekniklerinin temel dezavantajlarıdır. Bunları yenebilmek için, teknik şartların iyi ayarlanması, pota/büyütme ampülü için uygun malzemenin seçilmesi, uygun çözeltilerle temizlenmesi ve kaplanması önemlidir.

2.4.6. Pota/Büyütme Ampüllerinin Özellikleri

Kristal büyütmede kullanılan pota/büyütme ampüllerinin istenilen verimi sağlaması için aşağıdaki özellikleri taşıması gereklidir (Immanieh, 1986):

1. Bileşen elementlerin hiçbiri ile reaksiyona girmemeli,
2. Eriyiğe bulaşma ihtimaline karşı kirlilik ve yabancı atomlar ihtiva etmemeli,
3. Yüzey kirliliklerinin ortadan kaldırılabilmesi için kolayca temizlenebilir olmalı,
4. Normal şartlar altında yüksek mukavemet ve fiziksel kararlılığa sahip olmalı,
5. Kolayca işlenebilir ve şekillendirilebilir olmalı,
6. İçindeki gazların uzaklaştırılabilmesi için gözenekli yapıda olmamalı,
7. Sıcaklık profilini etkilememesi için düşük termal iletkenliğe sahip olmalı,
8. Termal genişleme katsayısı eriyiğinkinden daha düşük olmalı,
9. Rastgele yüzey çekirdekleşmesini önlemek için düzgün iç yüzeye sahip olmalıdır .

Termal şoklara yüksek direnci, yüksek saflıkta elde edilebilmesi, kolayca şekil verilebilir ve temizlenebilir olması, pek çok bileşiğe karşı inert olması ve düşük termal genişleme katsayısına sahip olması sebepleriyle, Bridgman-Stockbarger sistemlerinde pota/büyütme ampülü olarak kullanılan en elverişli malzeme kuartzdır.

2.4.7. Büyütme Kalitesini Etkileyen Faktörler

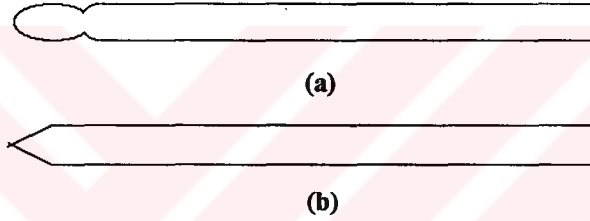
Ampül özellikleri dışında kristal büyütme kalitesini etkileyen diğer şartlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Bileşiği oluşturan başlangıç malzemelerinin saflık düzeyi,
2. Eriyiğin homojen karışıp karışmaması,
3. Ampülün fırın içindeki pozisyonu,
4. Uygulanan sıcaklık programı,
5. Büyütme fırının sıcaklık profili,
6. Fırının bulunduğu ortamın gürültü ve sarsıntısı.

2.4.8. Büyütme Ampüllerinin Hazırlanması

Kristal büyütmede kullanılacak kuartz ampülün hazırlanması için, iç çapı 12 mm olan 1m uzunluğunda kuartz boru kullanıldı. Çekirdekleşmenin başlatılabilmesi için, kuartz 25-30 cm boyunda kesildi (kesme işlemi esnasında kuartz tozlarından bir maske ile korunmak gerekmektedir). Kesilen ampüllerin temizlenmesi için, aşağıda basamakları verilen temizlik metodu kullanıldı:

1. Kesilen kuartz borunun bir ucu istenilen şekil verilerek, asetilen-oksijen hamlacı kullanılarak kapatıldı. Kapatma işleminde -eğer yapılacaksa- önce boğum yapıldı sonra çekirdekleşmenin başlayacağı uç kısım oluşturuldu. Kullanılan mümkün ampül geometrileri Şekil 2.21.a ve 2.21.b' de verilmiştir.



Şekil 2.21. (a) Boğumlu (b) Boğumsuz ampül geometrileri.

2. Hazırlanan ampül % 40'lık nitrik asit (HNO_3) içinde 3 saat kadar tutularak temizlendi. Daha sonra DI (iyonlardan arındırılmış) suyla ultrasonik olarak 15 dk kadar yıkandı.
3. Deterjanlı su içinde ampül 12 saat kadar bekletildikten sonra tekrar DI su ile 15 dk kadar ultrasonik olarak yıkandı.
4. Ampül daha sonra %40'lık HF çözeltisi içinde 10 dk kadar tutularak temizlendi.
5. Kurutulan ampül *outgassing* işlemi için *gas-free* işlem fırınına konarak $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 3 saat kadar tutuldu. Bu işlemle kuartz tüpün iç yüzeyinde adsorblanan ve içinde mevcut olan gazların dışarı çıkarılması amaçlanmaktadır.
6. Kurutulan ampül bol asetonla çalkalanarak iç çeperlerinin asetonla kaplanması sağlandı. Asetilen-oksijen hamlacında yakılan tüpün iç çeperlerinde karbon filmin oluşması sağlandı. Bu işlem daha sonra bir kez daha tekrar edildi. Bu işlemler

esnasında tüp içinde oluşabilecek karbon parçacıkları DI suyla 15 dk yıkama işlemi ile giderildi.

7. Oluşan karbon filmi uniform hale getirmek için ampül tekrar *outgassing* fırınına konarak vakum altında 1050 °C' de 1 saat kadar tavlandı. Bu karbon film kristal büyütme esnasında eriyik kristalin kuartz ile reaksiyona girip iç yüzeye yapışmasına engel olur. Bu aşamadan itibaren ampül yüklenmeye hazırdır.



2.5. Yapısal Karakterizasyon ve XRD Tekniği

2.5.1. Giriş

Tek kristaller, enerji dönüşümü alanında yaygın kullanım alanına sahiptirler (Lal, 1982). Bu amaçla katıhal elektronikçileri ve malzeme bilimciler için, malzemenin temel özelliklerinin iyi bir şekilde karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu tür uygulamalarda, kristallerin kontrollü bir biçimde büyütülmesi, kirlilik seviyelerinin ve kristal yapının açığa çıkarılmasına ihtiyaç duyulur. Kristalin saflığını ve kompozisyonunu tayin etmeye yarayan pek çok teknik geliştirilmiştir. Bir kristalin mükemmelliği pek çok teknik kullanılarak incelenebilir. Bunlar;

1. Elektron Difraksiyonu (*Electron Diffraction*)
2. Dağlama İşlemi (*Etching Method*)
3. Dekorasyon Metodu (*Decoration Method*)
4. X-ışını Difraksiyon (*XRD*)

Bu tekniklerden yapı tayini amacıyla en sık kullanılanı *XRD* tekniğidir.

2.5.2. Kristal Yapıların İncelenmesi ve Difraksiyon

Bir numunenin iç yapısının düzeni dış yüzeylerde de kendini ortaya koyabiliyorsa, bu kristalin özellikleri optik metodlarla incelenebilir. Eğer katının dış yüzeyi iç yapısı hakkında herhangi bir bilgi vermiyorsa (metallerde ve çoğu kristallerde olduğu gibi) kristal yapıyı açığa çıkarabilmek için kristal içine nüfuz edebilecek ışınlara ihtiyaç duyulur. Küçük dalgaboylarına sahip olmalarından dolayı X-ışınları, madde içine kolaylıkla nüfuz edebilme hatta belli bir kalınlığa kadar olan numunelerden geçebilme özelliğine sahiptirler. Bu tekniğin malzeme üzerinde zararsız (indestuctive) bir teknik olması ve kristalin elektriksel ve optik özelliklerini değiştirmemesinden dolayı X-ışınlarına kristal yapı tayininde sıkça başvurulmaktadır.

1912 yılında kristal yapıların X-ışınlarını kırınıma uğrattığı Von Laue tarafından ortaya konulmasıyla kristalografide yeni bir çığır açılmış, araştırmacıların kristallerin mikroyapısına ilişkin bilgi sahibi olmaları mümkün olmuştur. Kristal yapıdan geçerken

kırınımına uğrayan X-ışınlarının bir fotoğraf filmi üzerine düşürülmesiyle (yada bir dedektör tarafından algılanıp değerlendirilmesiyle) maddenin kristal yapısı açığa çıkarılır. Daha sonraları benzer mantıkla elektron ışınlarının kristal yapıdan geçerken kırınımına uğradıkları anlaşılmış olup elektron ışını difraktometreleri de geliştirilmiştir.

2.5.3. Karakteristik Radyasyon

X-ışınları görünen ışığa kıyasla çok küçük dalga boyuna sahip elektromagnetik dalgalardır. Bir vakum ortamında elektronlarla bombardıman edilen bir hedef metalden çeşitli dalgaboylarında elektromagnetik dalgalar yayınlanır. Bu dalgalardan bir kısmı beyaz radyasyon olarak açığa çıkarken, aynı hedeften çok küçük dalgaboyunda ve yüksek şiddete sahip X-ışınlarının üretimi de mümkün olur. Malzemeyi karakterize eden bu ışınlar karakteristik X-ışınları denir. Elde edilen X-ışınları özel filtrelerden geçirilerek beyaz radyasyon tutulur ve sadece yüksek enerjili karakteristik ışınların geçirilmesine izin verilerek monokromatik X-ışınları üretilir.

2.5.4. X-Işını Difraksiyonu

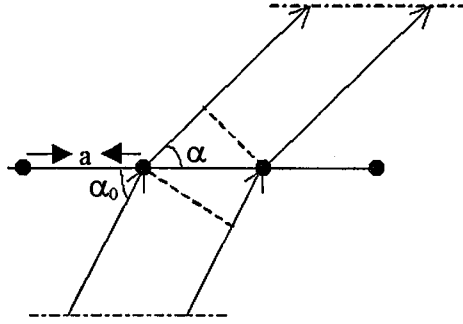
2.5.4.1. Laue Şartları

Dalgaboyu λ olan X-ışınları bir kristal yapıda aralarındaki mesafe a olan bir atomlar dizisine rastladığında her bir atom ikinci bir dalga kaynağı gibi hareket eder. Difraksiyon teorisine göre belirli yönlerde dalgalar kuvvetlenerek bir, iki ve daha yüksek mertebede kırınımına uğramış ışınlar verirler. Komşu atomlar tarafından yansıtılan ışınların katettiği yollar arasındaki fark dalgaboylarının tam katları olmalıdır. Şekil 2.22 ile bir boyutta Laue şartı açıklanabilir. Atom dizisi ile gelen ışın bir α_0 açısı, difraksiyona uğramış ışın α açısı yapıyorsa, kuvvetlendirmenin meydana gelmesi için şart aşağıdaki gibidir:

$$a(\cos\alpha - \cos\alpha_0) = n\lambda \quad 2.12$$

Burada λ , X-ışını dalgaboyu, n ise bir tam sayıdır. Yukarıdaki ilişki bir boyutta Laue şartıdır ve a eksenini etrafında, tepe yarı açısı α olan koni oluşturacak şekilde difraksiyona uğramış ışınlar bu şartı sağlar. Atomların kristal içinde üç boyutta dizildiği

gerçeğinden hareketle üç boyutta Laue şartları yukarıdakine benzer şekilde yazılabilir. x, y, z eksenleri boyunca atomlar arası mesafe a, b, c ise ve sırasıyla gelen ışının eksenlerle yaptığı açı α_0 , β_0 ve γ_0 ve difraksiyona uğramış ışının eksenlerle yaptığı açılar α , β ve γ ise Laue şartları;



Şekil 2.22. Bir boyutta Laue şartı için yansıma.

$$a(\cos\alpha - \cos\alpha_0) = n\lambda$$

$$a(\cos\beta - \cos\beta_0) = n\lambda$$

$$a(\cos\gamma - \cos\gamma_0) = n\lambda$$

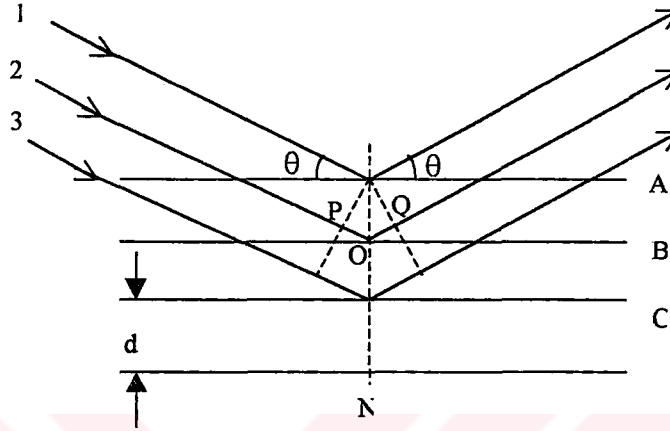
2.13

şeklinde yazılabilir. Laue şartları üç boyutta aynı anda gerçekleşirse difraksiyon meydana gelir.

2.5.4.2. Bragg Kanunu

Yukarıda açıklanan Laue şartları ve difraksiyonun kristalde ancak belirli şartlarda meydana gelmesi gerçeği Bragg tarafından (h, k, l) örgü düzlemleri dikkate alınarak daha basit bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 2.23' de (h, k, l) kristal düzlemlerine bir θ açısı ile gelen λ dalga boyulu X-ışınlarını göstermektedir. Her bir atom saçılan X-ışınları için bir kaynak ve Huygens prensibine göre yayılan dalgaların merkezi olur. Genel halde bu dalgalar, başka yerlere rastgele düştüklerinden dolayı birbirlerinin etkilerini bozacak şekilde birleşirler (Domaniç, 1982). Buna karşılık dalgaların birbirlerini kuvvetlendirecek şekilde yapıcı bir girişim yapmaları için; A, B, C gibi (h, k, l) düzlemlerinden yansıyan 1, 2 ve 3 ışınlarının katettiği yolların farkı dalga boyunun tam

katı ($n\lambda$) olması, yani yansıyan ışınların aynı fazda olması gerekir. (h, k, l) düzlemleri arasındaki mesafe $NO = d$ ise; 1 ve 2 ışınlarının katettiği yollar gözönüne alınırsa, 2. ışının fazladan katettiği yol $PO + OQ$ olacaktır. Yapıcı girişimin olması için yol farkının $n\lambda$ ' ya eşit olması gerekmektedir.



Şekil 2.23. Bragg yansıması.

Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

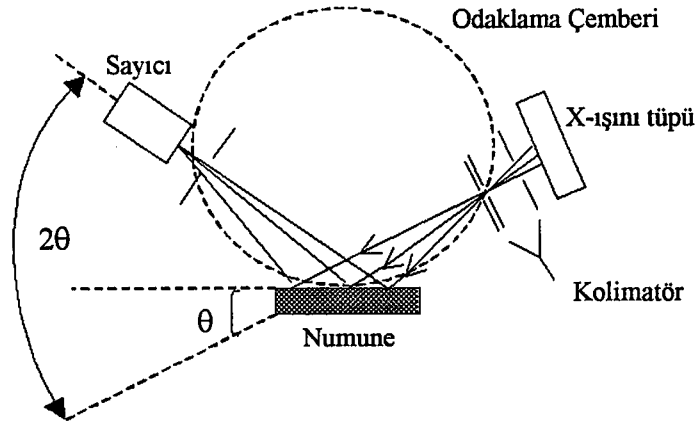
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

2.14

2.14 ifadesi *Bragg Kanunu* olarak bilinir. Burada n bir tamsayıdır.

2.5.5. X-Işınları Difraktometresi

Numune üzerine gönderilen X-ışını difraksiyonu film üzerine kaydetmek yerine, difraksiyona uğramış ışınları bir Geiger sayıcısı ile sayarak tespit etmek mümkündür. Şekil 2.24' deki prensip şemasına göre monokromatik X-ışını numuneye gönderilir. θ açısı değiştirilmek suretiyle, numune yavaş yavaş bir w açısal hızıyla döndürülür. Buna uygun olarak sayıcı da $2w$ açısal hızıyla (2θ açısını muhafaza etmek için) odaklama çemberi üzerinde döndürülür. Difraksiyona uğramış ışınların θ açıları ve şiddeti bir kaydedici (bilgisayar veya yazıcı) aracılığıyla çizdirilir. Herbir difraksiyona ait θ açıları grafikten ölçülüp $d_{(h, k, l)}$ değerleri ve bu piklerin karşılık geldiği element ya da bileşiklerin kalitatif ve kantitatif analizi belirlenebilir (Önel ve Aksoy, 1985).



Şekil 2.24. XRD sistemine ait blok şema.

3. TEST VE ÖLÇÜMLER

3.1. Gölge Maskenin Elde Edilmesi

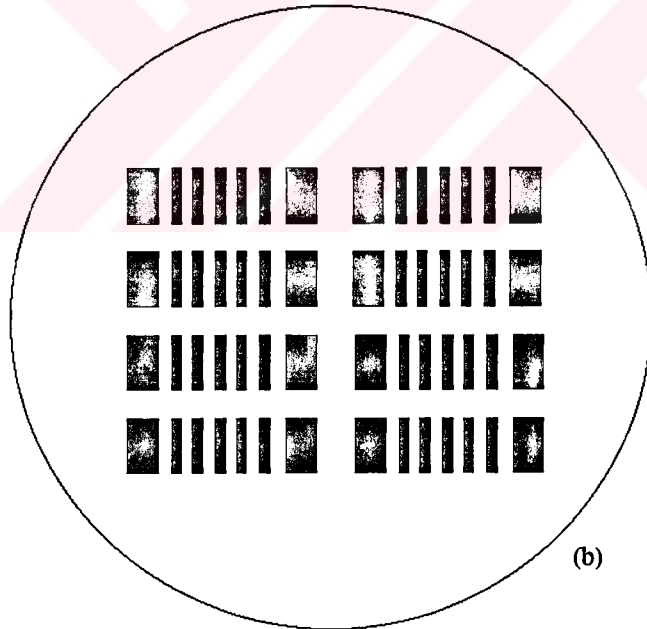
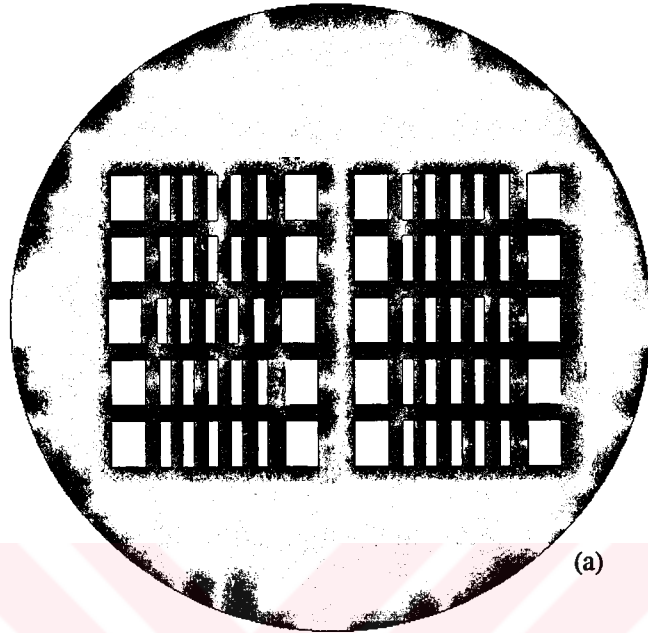
3.1.1. Fotolitografi Tekniğiyle Gölge Maskenin Hazırlanması

Katıhal Fiziğinin bazı araştırma alanlarında çok küçük boyutta devrelerin numune üzerinde ya tek basamakta fotolitografi tekniği ile oluşturulması ya da gölge maske ile doğrudan transferi ile oluşturulması gerekmektedir. Yarıiletkenlerin spesifik omik kontak dirençlerinin ölçülmesi de bu tür işlemleri gerekli kılmaktadır. Numune üzerine patern aktarmada kullanılan teknik, fotolitografi tekniğidir. Bu teknikte devre elemanı yarıiletken üzerinde doğrudan geliştirilir. Fakat fotolitografi tekniği ileri teknoloji gerektiren bir laboratuvara ihtiyaç duyar. Uygun boyutlar için gölge maske hazırlamak hem düşük maliyetli hem de teknik açıdan kontrolü daha kolaydır. Oluşturulacak devre elemanı proses esnasında kimyasal işleme maruz kalmayacağından, gölge maske hazırlama ve kullanma araştırmacı açısından tek basamaklı prosesler için uygun bir tekniktir.

Omik kontak ölçümlerinde gerekli istatistiki dalgalanmayı da vermek için numune üzerine, homojen olarak dağılmış birkaç adet paternin transfer edilmesi gerekmektedir. Böylece gerçekleştirilen ölçümlerin dağılımına bakarak gerçek değer bulunabileceği sınırlar kolayca belirlenmiş olur. Bu amaçla aynı film alanına, sekizer adet omik kontak paterni içeren iki maske formatı yerleştirildi (Şekil 3.1). Gölge maskenin elde edilmesi için şu basamaklar takip edildi:

- 1) Başlangıç maske formatı bilgisayarda bir çizim programında hazırlanarak yüksek çözünürlüğe sahip bir *LASER* yazıcı yardımıyla, A4 ebatında bir kuşe kağıda baskısı yapıldı.
- 2) A4 üzerindeki bu maske taslağı, daha önce hazırlanmış bir aydınlanma düzeneği üzerine monte edilerek görüntünün fotoğraf makinesini tam cepheden görmesi sağlandı.
- 3) Daha sonra ön yüzeyden homojen bir aydınlatma yapılırken, görüntü yüksek kalite ve hassasiyete sahip bir fotoğraf makinasıyla optimum şartlarda 1:8.5 küçültme ile görüntü negatif film üzerine düşürüldü. Böylelikle maske taslağının negatifi ve filmin

pozitif görüntüsü elde edildi (Fotoğraf çekiminde *100 ASA* lık *OR-WO* siyah beyaz film kullanıldı).



Şekil 3.1. Gölge Maske formatları: a) Negatif omik kontak ölçüm paterni,
b) Pozitif patern.

4) Elde edilen negatif film oda sıcaklığında, önceden hazırlanmış ve tekrar seyretilmemiş geliştirici (2 dk.) ve sabitleyici (4 dk.) ile banyo edilerek, görüntü açığa çıkarıldı. Geliştirme ve sabitleştirme işlemleri arasında filmin bol su ile durulanması gerekmektedir. Elde edilen negatif film yarım saat kadar temiz su içinde durulanmaya bırakıldı. Durulama suyundan çıkarıldıktan sonra DI su ile tekrar yıkanan film şeridi, kendiliğinden kurumaya bırakıldı. Filmin yeterince temiz olup-olmadığı yüzeyinden suyun çekilmesi ile anlaşılmaktadır.

5) Film üzerinde oluşturulan pozitif görüntünün aktarılacağı bakır film vakumda buharlaştırma ile daha önceden özel olarak temizlenmiş cam lameller üzerine oluşturuldu.

6) Bakır film üzerine fotoresist sıkılarak optimum süre ve devir hızına ayarlanan bir fotoresist serme ünitesinde döndürüldü. Böylece cam yüzey üzerinde ince ve homojen kalınlıkta fotoresist tabaka elde edildi. Bu filmin oda şartlarında kuruması yaklaşık 25 dk.'dır. Optimizasyon şartları ise kullanılan fotoresistin numarasına (viskozluğu belirleyen üretim kodu) göre değişmektedir.

7) Negatif film üzerindeki görüntünün 1:1 oranında fotoresist üzerine transfer edilmesi için, negatif filmin mat olan emilasyon yüzeyi ile lamel üzerindeki film kontak haline getirildi ve bu haldeyken, homojen UV ışığı altında optimum süre (3.5 dk.) pozlandırıldı. Pozlandırma süresi de fotoresiste göre değişmektedir. Bu çalışmada *Pozitif 20* fotoresisti kullanıldı.

8) Pozlandırma esnasında filmin aşırı ısınması önlenmelidir. Isınan fotoresist fazladan sertleşeceğinden, geliştiricinin çözelti ile reaksiyona girmesi zorlaşacak ve film gelişmeyecektir. Bu da prosesin tamamlanmasını engeller. Ayrıca aşırı ısınmadan ötürü fotoresist eriyerek negatif filme yapışabilir ki bu da kullanılan maske filmin ömrünü kısaltacaktır. Bu amaçla soğutucu hava maske üzerine bir fanla yönlendirilir.

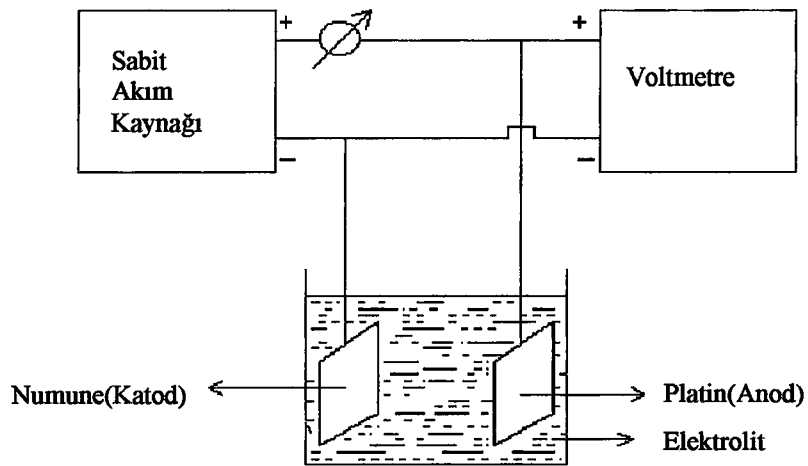
9) UV pozlandırmadan sonra, üzerinde fotoproses gerçekleştirilen film, oda şartlarındaki *NaOH* çözeltisi (7gr/l) içinde belli bir süre tutularak geliştirildi.

10) Geliştiriciden çıkarılan film DI suyla iyice durulandı.

- 11) Geliştirilen film 50-60 °C'lik bir ısıtıcıda 30 sn kadar postbake işlemiyle sertleştirilerek, bir sonraki basamaktaki kimyasal işlem için mukavemet artırıldı.
- 12) Durulanan film 40 °C' lik oldukça seyreltilmiş $FeCl_3$ çözeltisinde tutularak patern açığa çıkarıldı.
- 13) Daha sonra film asetonla yıkanarak üzerindeki fotoresist giderilir ve elektroliz işlemine başlandı.

3.1.2. Elektrolizle Kaplama

Dağlama işlemiyle patern açığa çıkarılıp fotoresist yüzeyden çözüldükten sonra elektrolizle kaplama yapıldı. Fotoproses işlemleri sonucu elde ettiğimiz filmin kalınlığı yaklaşık olarak 0.15-0.20 μm kadardır. Oysa gölge maskenin yeterli mukavemette olması için kalınlığının 15-20 μm olması gerekmektedir. Bu kalınlığı buharlaştırma ünitesinde elde etmek ekonomik açıdan uygun değildir. Elektroliz olayı bu noktada oldukça kullanışlı bir teknik olarak karşımıza çıkar. İnce Cu film üzerine elektroliz işlemiyle bakır büyötmek suretiyle gerekli kalınlığa ulaşıldı. Bakır banyosundan çıkarıldıktan sonra saf su ile iyice durulanan Cu film üzerine, yine elektrokimyasal işlemlerle ince bir Ni tabaka büyütüldü. Bakır atomlarının yarıiletkenlerde kirlenmeye sebebiyet vermesinden dolayı, yarıiletkenle temas halinde olacak gölge maskenin dış yüzeyinde Ni tabaka oluşturmak gerekli görölmektedir.



Şekil 3.2. Elektroliz ünitesi.

Elektroliz işleminde Şekil.3.2' de görüldüğü gibi numune, güç kaynağının negatif terminaline katod olarak bağlanır. Güç kaynağının pozitif terminaline ise anod olarak platin bağlanır. Elektroliz işlemi ya düşük iç dirence sahip sabit gerilim kaynağı ya da yüksek iç dirence sahip sabit akım kaynağı kullanılarak yapılmalıdır.

Akım yoğunluğunun farklı olması elektrolizle kaplama işlemini etkilemektedir. Bu nedenle güç kaynağı olarak gerilim kaynağı kullanıldığında ilk gerilim uygulamasında geçecek akım değerleri tabaka direncinin çok küçük olması nedeniyle çok büyük olmaktadır. Bu da ince bakır film üzerinde büyüyen tabakalarda düzensizliklere neden olabilmektedir. Sabit akım kaynağı kullanıldığında indirgeme işlemi için gerekli elektron yoğunluğu denetimli olarak aktarıldığı için istenmeyen etkiler en aza indirilmektedir.

Elektrolitik bakır çözeltisinin formülasyonu aşağıdaki şekildedir.

22g toz bakır sülfat ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)

5g hidroklorik asit (HCl)

100 cc DI su

Akım yoğunluğu ise $5A/dm^2$ ' den hesaplanır. Bakır kaplamada çözeltinin pH değerinin pek ehemmiyeti yoktur. Kaplamanın parlak olması için akım yoğunluğunun düşük değerden yüksek değere doğru artırılması gerektiği tecrübe edilmiştir. Bu şartlar altında, yarım saatte $30 \mu m$ kalınlıkta bir film elde edilmektedir. Elektrolizle bakır kaplama işlemine başlamadan önce geliştirilen filmin yüzeyindeki oksit tabakasının yok edilmesi gerekmektedir. Bu işlem, bakır atomlarının film yüzeyine tutunması ve kaplamanın homojen bir kalınlığa sahip olması için gereklidir. Bu amaçla, geliştirilen film iyice seyreltilmiş nitrik asit çözeltisi içinde birkaç saniye tutularak temizlenir ve daha sonra DI su ile iyice durulanarak elektroliz işlemine geçilir. Yaklaşık olarak 22 dk. süren kaplama işlemlerinde $17 \mu m$ kalınlıkta bir Cu film elde edildi. Bakır kaplama işleminde uygulanan akım $75 mA$ ' dir. Bunun üzerine nikel film büyütme amacıyla aşağıdaki elektrolitik Ni çözeltisi hazırlandı:

25g nikelamonyumsülfat ($NiNH_4(SO_4)_2 \cdot 5H_2O$)

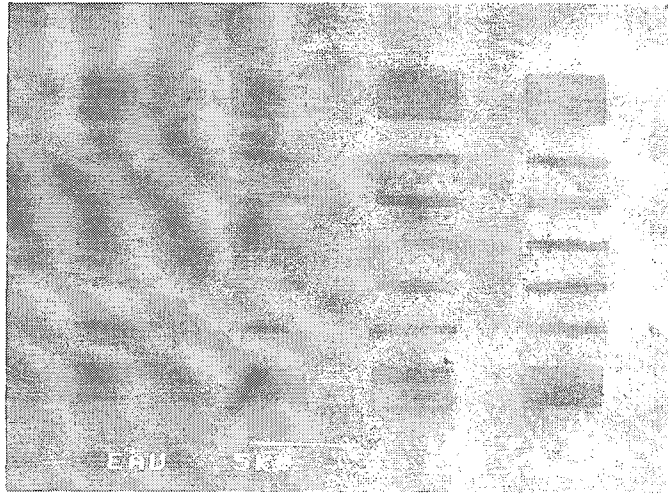
10g amonyum sülfat ($(NH_4)_2SO_4$)

3g sitrik asit ($C_6H_8O_7$)

50cc DI su

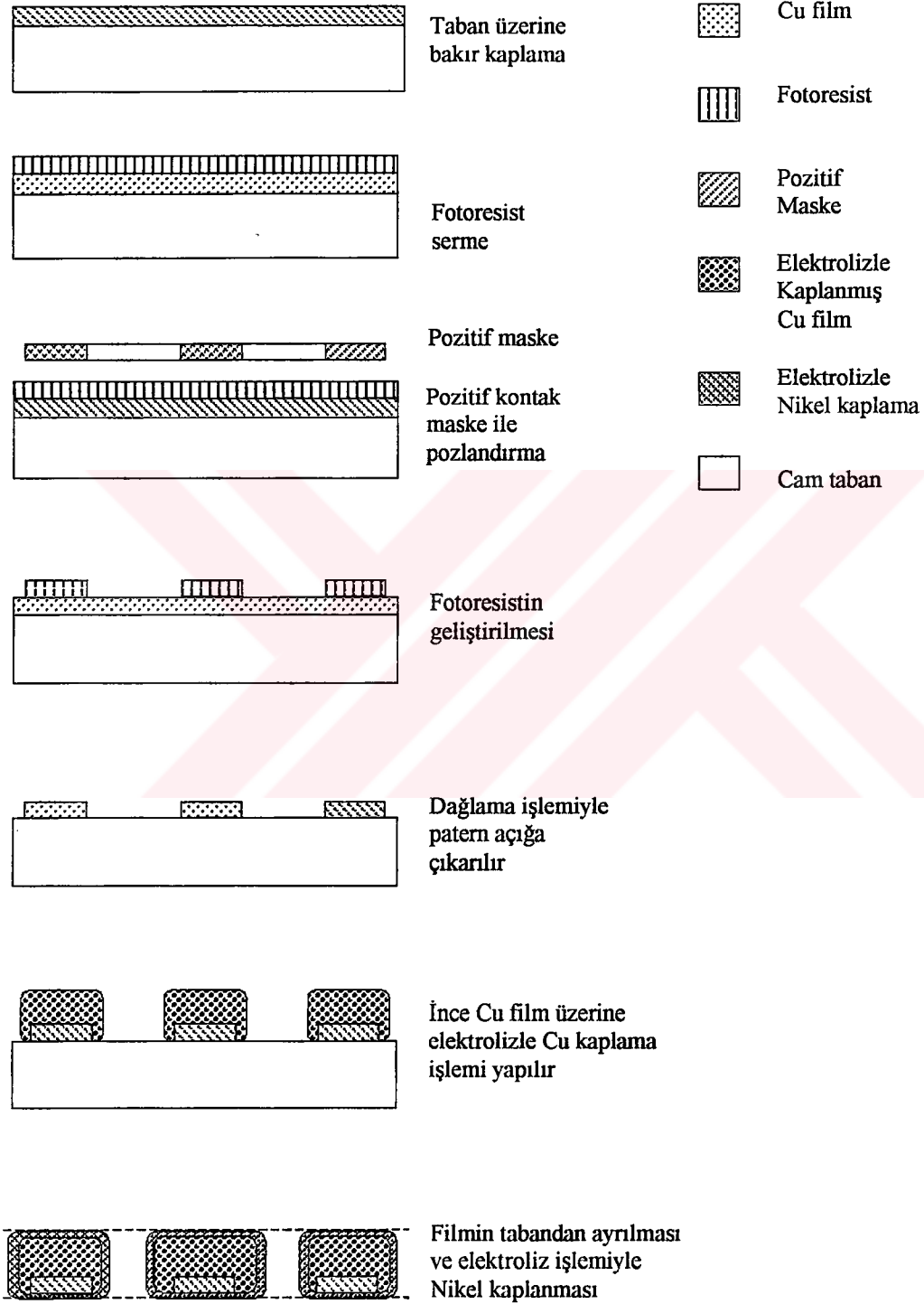
Ni kaplama işlemine başlamadan önce, cam taban üzerindeki Cu filmin camdan kurtarılması gerekmektedir. Bu filmin her iki yüzeyinin de nikelle kaplanması için gereklidir. Paterni camdan kurtarmak için jilet veya benzeri bir alet kullanıldı. Bakır çözeltisinden farklı olarak Nikel banyosunun pH' sı önemli olup bu değer 4' de sabit tutulmalıdır. Genellikle, banyonun pH' sı zamanla azalacağından çözeltiliye seyreltik NaOH eklemek suretiyle bu değer korunur. Eğer pH' yı artırmak gerekirse bu durumda da çözeltiliye sitrik asit ilave edilir. Nikel banyosunda akım yoğunluğu ise yaklaşık $1A/dm^2$ 'den hesaplanır. Gerek Cu gerekse Ni kaplamada, kaplanacak parça katod olarak bağlanır. Ayrıca, banyolar arası geçişte banyo çözeltilerinin kirlenmesine sebebiyet vermemek için Pt elektrot saf su ile durulanmalıdır.

Omik kontak ölçümüne izin veren gölge maske paternine ait SEM (Scanning Electron Microscopy) filmi Şekil 3.3' de verilmiştir. Filmden kontakların uzunluğu $692 \mu m$, genişliklerinin ise akım kontakları için $384 \mu m$, gerilim kontakları için $76 \mu m$ olarak ölçüldü.



Şekil 3.3. Omik kontak ölçüm paterninin SEM filmi.

Fotolitografi ve elektroliz işlemlerinde takip edilen işlem basamakları Şekil 3.4' de verilmektedir.



Şekil 3.4. Fotolitografi ve elektrolizle kaplama işlem basamakları.

3.2. Omik Kontak Direncinin Ölçümü İçin Altyapının Hazırlanması

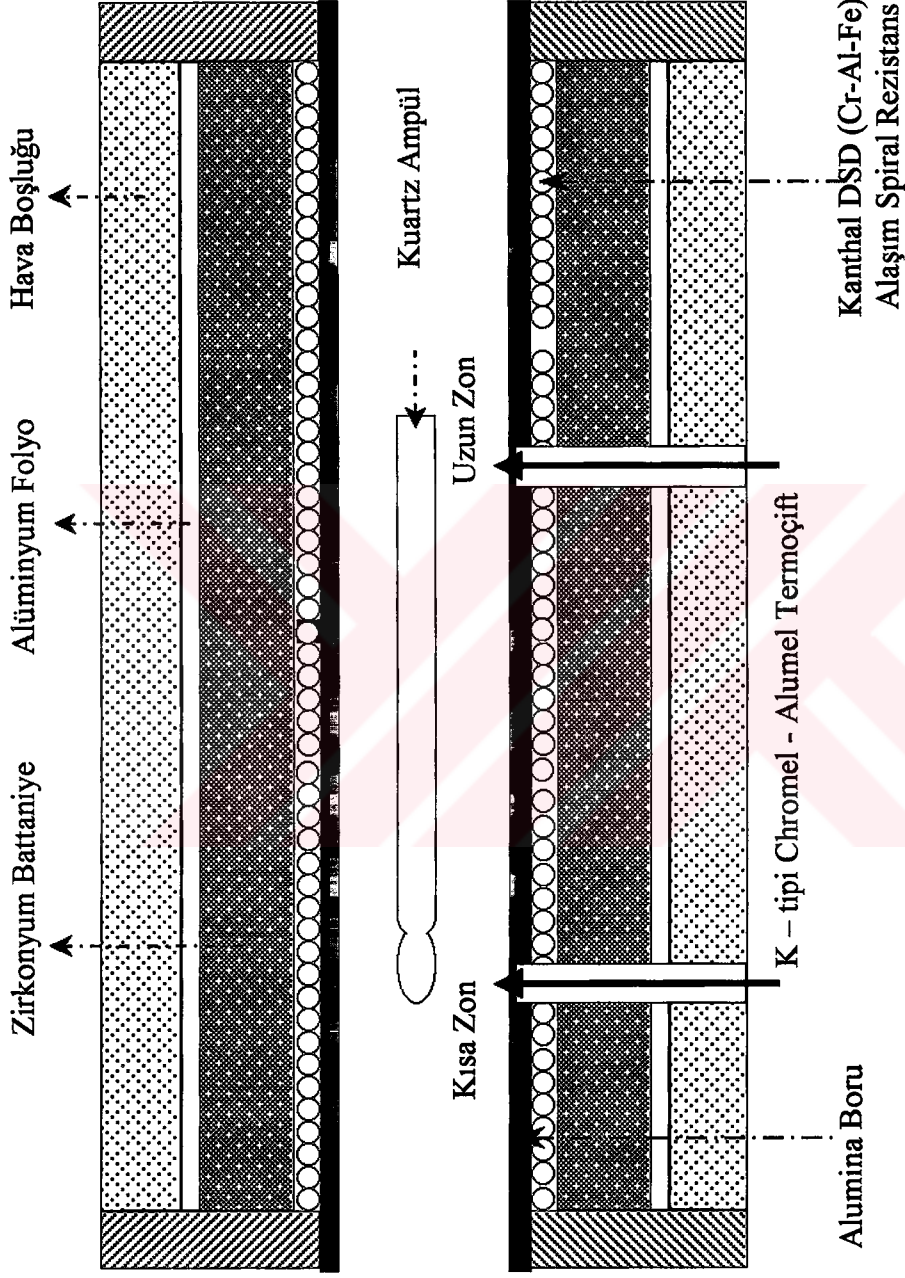
Gölge maskenin üretimini müteakip, GaTe tek kristali üzerinde omik kontak çalışmalarının gerçekleştirilmesi için bir dizi çalışma gerçekleştirildi. Bunlar, yeniden dizayn edilmiş *kristal büyütme fırını* (Şekil 3.5 ve 3.6), ısı işlemlerde kullanılmak üzere bir *mini fırın* ve üzerinde omik kontak çalışması yapılmasına izin veren bir dörtlü *prob istasyonu*'dur. İmalatı tarafımızdan gerçekleştiren kristal büyütme fırınının sıcaklık kalibrasyonu için, test ölçümleri yapılarak bir sıcaklık profili çıkarılmıştır. Böylelikle ampülün fırın içindeki pozisyonu büyütme işlemi için belirlenmiştir.

3.2.1. Kristal Büyütme Fırını

Kristal büyütme fırını programlanabilir doğrudan katılaştırmayla (*directional freezing*) kristal büyütme için imkân verecek iki bölge olarak dizayn edildi. Bu metodla kristal büyütme işleminde fırının iki farklı sıcaklık bölgesine sahip olması gerekmektedir. Kristal büyütme fırınına ait blok şema Şekil 3.5' de verilmiştir (Gürbulak, 1992; Abay, 1994).

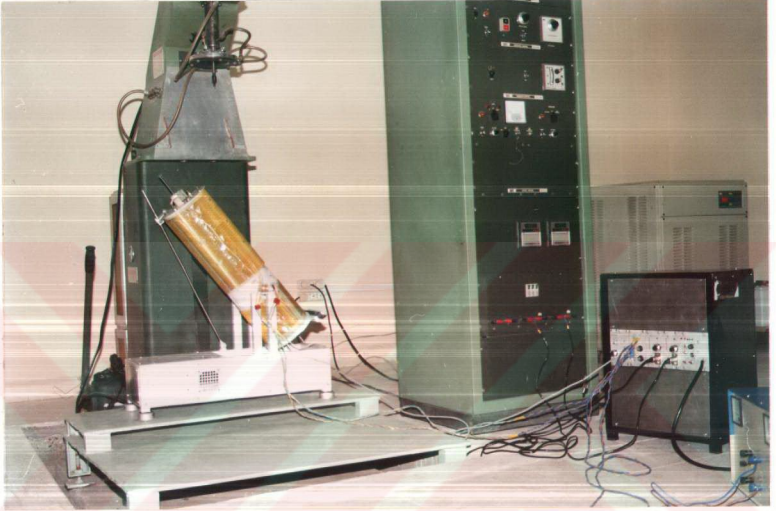
Kristal büyütme fırını 65 cm uzunluğunda ve 6 cm çapında alumina boru kullanılarak imal edildi. Alumina borunun bir tarafına diğerine nispetle daha uzun ısıtıcı kantel tel, şerit halinde sarılarak iki zonlu yapı elde edildi. Isıtıcı tellerin birbirine değerek kısa devre yapmasını önlemek amacıyla 00 numaralı seramik boncuklar kullanıldı. Ayrıca her iki zona ait sıcaklığı ölçmek amacıyla zon merkezlerine termočiftler yerleştirildi. Alumina borunun ve ısıtıcı telin etrafı zirkonyum battaniye ile sarılarak termal izolasyon sağlandı. Kristalin erime sıcaklığında çalkalama işleminin gerçekleştirilmesi için küçük bir motor kullanılarak fırının yatay ve dikey pozisyonları arasındaki hareketi sağlandı. Zonlara uygulanan güçlerin maksimum değeri elektronik olarak kontrol edildi.

Fırına ait sıcaklık profili, birkaç farklı sıcaklık için çıkarılarak ampülün yerleştirileceği pozisyon belirlendi. Şekil 3.7, kristal büyütme fırınına ait sıcaklık profilini vermektedir. Şekle göre, 33 cm uzunluklu ampülün iki zon arasında oluşan rampa bölgesine yerleştirildi.

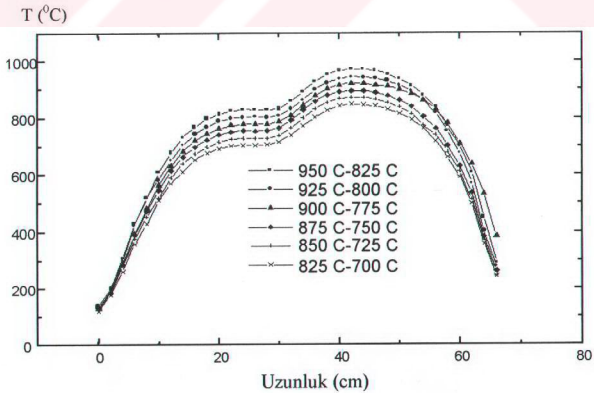


Şekil 3.5. İki zonlu kristal büyütme fırınının kesit diyagramı (Gürbulak 1992; Abay, 1994).

Kristal büyüme fırınının ve elektronik kontrol ünitesinin fotoğrafı Şekil 3.6' da verilmektedir. Şeklin solunda kristal büyüme fırını, ortada *RKC* sıcaklık kontrol üniteleri, sağında ise elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



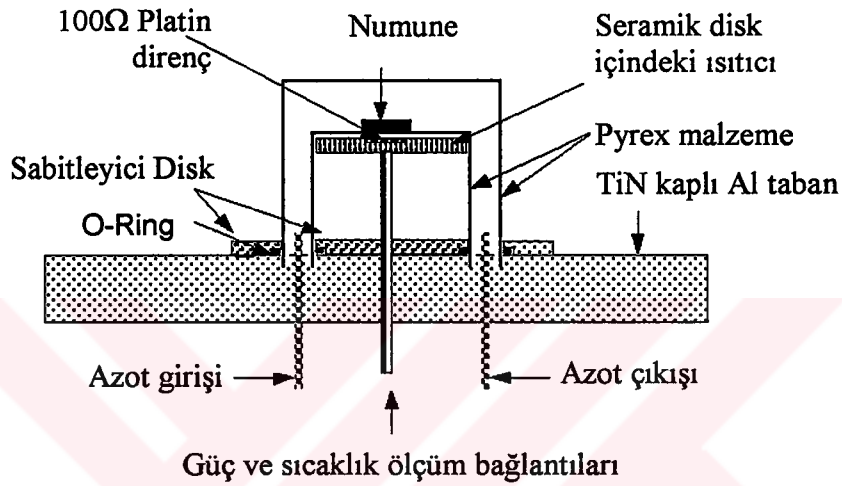
Şekil 3.6. Kristal büyüme fırını ve elektronik kontrol ünitesinin fotoğrafı.



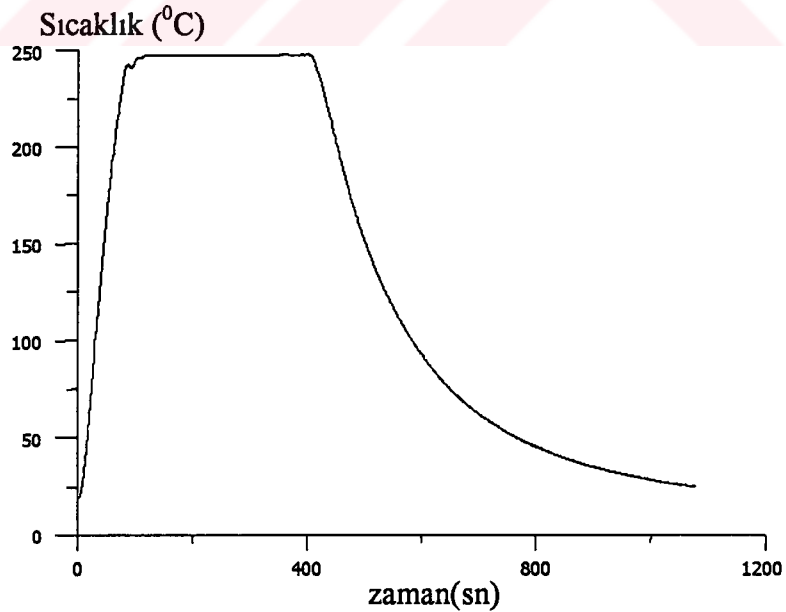
Şekil 3.7. Kristal büyüme fırınına ait sıcaklık profili.

3.2.2. Mini Isıl İşlem Fırını

QuickBasic 4.5 yazılımında hazırlanan bir bilgisayar programı tarafından kontrol edilen minyatür fırın 50-450 °C arasında 0-15 dk süreyle tavlama işlemine izin vermektedir. Sıcaklık kontrolü sayısal PID (P:0.5, I:0.175, D:4.0) ile yapılan mini fırında tavlama işlemi azot gazı akışı altında yapılmaktadır. Mini tavlama fırınına ait blok şema Şekil 3.8' de verilmektedir.



Şekil 3.8. Minyatür termal işlem fırınının blok şeması (Efeoğlu et al., 2000).

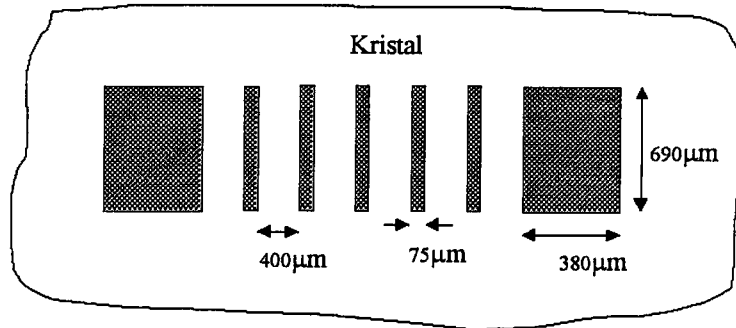


Şekil 3.9. Minyatür fırında 1.5 dk'lık ısıtma işlemi, 5 dk ve 250 °C' de tavlama işlemi ve müteakip soğuma işleminde numune sıcaklığının değişimi.

Mini fırın set sıcaklığına yüksek bir hızla ulaşarak, kullanıcı tarafından daha önce girilen set parametrelerine göre tavlama işlemini gerçekleştirip otomatik soğutmaya geçmektedir. Böylece her tavlama işleminde numuneyi değiştirmek için fırın atmosfere açılır ve yeniden çalıştırılır. Tavlama fırınının 250 °C ve 5 dk'lık bir proses için kaydettiği numune sıcaklığının zamanla değişimi örnek olarak Şekil 3.9' da verilmiştir.

3.2.3. Dörtlü Prob İstasyonu

Yarıiletkenlere yapılan omik kontakların spesifik omik kontak dirençlerinin hesaplanması için bir dizi akım gerilim ölçümü gerekmektedir. Daha önce geliştirilen gölge maske kullanılarak *Edwards Pumb (Model E01)* buharlaştırma ünitesinde, omik kontak ölçüm paterni kristal üzerinde oluşturulur. Kristal üzerine transfer edilen bu desen üzerinde omik kontak direnci ölçümünün yapılabilmesi için hassas prob-sistemi gerekmektedir. Örnek bir paternin boyutları Şekil 3.10' da verilmiştir. Gerilim kontaklarının genişliğinin 75 μm olduğu dikkate alındığında geliştirilecek olan probun bu alana hassas bir şekilde yönlendirilmesi gerekmektedir. Kendi teknik imkanlarımız kullanılarak yapılan problemlerle bu desen üzerinde akım-gerilim ölçümü başarı ile gerçekleştirildi. Problemler dikey ve yatay yönde birkaç mikron hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Bu amaçla ikisi akım ikisi de gerilim probu olarak kullanılmak üzere 4 adet prob istasyonu yapılmıştır. Ölçümlerdeki muhtemel gürültüyü azaltmak amacıyla sistem bağımsız bir toprak hattı ile topraklanmıştır.



Şekil 3.10. Eşit aralıklı omik kontak ölçüm paterni.

3.3. GaTe Tek Kristalinin Büyütülmesi

GaTe tek kristali geleneksel olarak, *Bridgman-Stockbarger*, *Conventional Bridgman*, *Closed Tube Sublimation*, *Czochralski*, *IATRT* (iodine assisted transport reaction technique), *Vapour Transport Method* (Gaz Fazından Büyütme), tekniklerinden biri kullanılarak büyütülmektedir. Bunlardan ilk dört teknik elementlerin sıvı fazından büyütülmekte ve genel olarak Doğrudan Katılaştırma (*Directional Freezing*) olarak isimlendirilmektedir. GaTe tek kristalinin sentezlenmesi amacıyla bu çalışmada kullanılan metod, *Bridgman-Stockbarger* tekniğinin kendi laboratuvar şartlarımız içerisinde özel olarak tasarlanmış ve modifiye edilmiş bir şeklidir (Shih et al., 1986). Bu teknikte kapalı bir kuartz tüp içinde eriyik halde bulunan elementlerin, zon sıcaklığının kontrollü değişimiyle büyüme doğrultusunda kristalleşmesi sağlanır. Ampülün sabit bir konumda bırakılarak iki zonlu fırının sıcaklığının değiştirilmesiyle, ampülün fırın boyunca hareketi simüle edildi. Böylece kristalleşme, hareketsiz olan ampül içinde gerçekleşeceğinden muhtemel titreşimlerin asgariye indirileceği de açıktır. Kristal büyütme sistemi yarı-otomatik olarak çalışmakta ve fırını kontrol eden elektronik kartlar fırından bağımsız ayrı bir modülde tutularak, mümkün titreşimler bertaraf edildi.

3.3.1. Bileşen Elementlerin Hazırlanması ve Ampülün Yüklenmesi

Kısım 2.4.8' de verilen prosedüre uygun olarak hazırlanan ampülün yüklenmesi için şu işlemler takip edilir:

1. Başlangıç malzemeleri olarak 6N saflıkta Ga ve 5N8 saflıkta Te elementleri kullanıldı. Bileşiğin toplam ağırlığı (W_{Top}), ampül boyutları ve bileşen elementlerin buhar basınçları dikkate alınarak 30 g olacak şekilde belirlendi. Ga elementinin ağırlığı W_{Ga} ve atom ağırlığı da A_{Ga} olmak üzere, bileşen elementlerin miktarları

$$W_{Te} = \frac{W_{Ga}}{A_{Ga}} \times A_{Te}, \quad W_{Ga} = \frac{W_{Te}}{A_{Te}} \times A_{Ga} \quad 3.1$$

ve yüzde ağırlıkları da,

$$\%Te = \frac{W_{Te}}{W_{Top}} \times 100, \quad \%Ga = \frac{W_{Ga}}{W_{Top}} \times 100 \quad 3.2$$

ifadeleriyle belirlendi (Ga ve Te elementlerinin mol ağırlıkları; Galyum: 69.735 gr/mol, Telleryum: 127.6 gr/mol).

2. Denklem 3.1 ve 3.2' den faydalanarak, 30 gr' lık bir yükleme için 10.599 gr Ga, 19.398 gr Te elementi, külçelerinden (metal kirlenmesine sebebiyet vermemek için temiz bir kesici ile) kesilerek kabaca tartıldı.
3. Kesme işlemi sırasında meydana gelebilecek bulaşmaların ve yüzeydeki oksit tabakasının uzaklaştırılması için Ga elementi 2-3 dakika süreyle %40 oranında seyreltilmiş HNO_3 içerisinde bekletildi.
4. Organik temizleme (aseton-methanol) ile yüzeydeki asit uzaklaştırıldı.
5. Daha sonra, Ga ve Te ultrasonik banyoda DI su ile yıkandı.
6. Malzemelerin son tartımları *GEC AVERY* marka sayısal terazi kullanılarak (virgülden sonra en az üçüncü anlamlı rakama kadar dikkat edilerek yapılmalıdır), 0.1 mg hassasiyetle yapıldı ve ampüle yüklenmeye hazır hale getirildi.
7. Yükleme esnasında önce erime sıcaklığı düşük olanların (Ga) ve küçük parçaların konmasına dikkat edildi. Bu ampülün diğer ucu kapatılırken hafif ve küçük olan parçaların vakumlanma riskini bertaraf etmek için önemlidir.
8. Önceden temizlenip hazır bulundurulan bir ucu kapatılmış kuartz boru (4-5 mm çapında ve 2-4 cm boyunda) yüklü ampülün açık olan ucundan içeri sokulur ve daha sonra ampül vakum pompasına bağlandı (*Leybold-Heraeus Leybovac PT 150/4 model turbomoleküler vakum sistemi kullanıldı*). Basınç $\sim 10^{-6}$ mbar değerine düşünceye kadar vakumlama yapıldı. Vakum altındayken asetilen-oksijen hamlacıyla ampülün açık olan ucu uygun yerden kapatılarak büyütme işlemine hazır hale getirildi.

3.3.2. Kristal Büyütme İşlemi

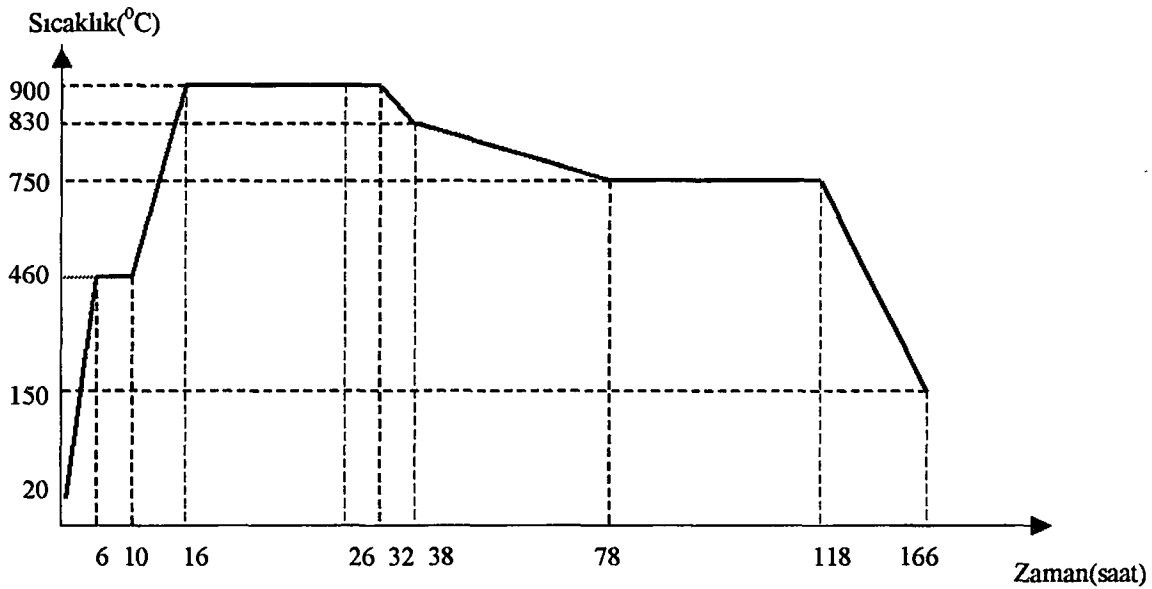
Hazırlanan yüklü ampül, kristal büyütme fırınında daha önce belirlenen pozisyona yerleştirilerek kristal büyütme işlemine başlanır. Bu çalışmada ön reaksiyon ve tek kristal büyütme işlemi tek adımda yapıldı. Büyütme işlemi için, Tablo 3.1' deki bir haftalık sıcaklık programı uygulandı. Tablodan da görüldüğü gibi 30 gr' lık bir yükleme

için büyütme işlemi yaklaşık bir hafta (166 saat) sürmektedir. Bu büyütme programı için kısa ve uzun zona ait sıcaklık programları sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de verilmiştir. Son basamaktan sonra fırın kapatılarak 15 saat kendiliğinden soğumaya bırakıldı.

Kısa Zonun Sıcaklığı (°C)	Zaman (saat)	Açıklama	Uzun Zonun Sıcaklığı (°C)	Zaman (saat)	Açıklama
20-460	6	Isıtma	20-460	6	Isıtma
460	4	Bekleme	460	4	Bekleme
460-900	6	Isıtma	460-900	6	Isıtma
900	10	Çalkalama*	900	10	Çalkalama*
900	6	Dinlenme	900	6	Dinlenme
900-830	6	Soğuma	900	6	Bekleme
830-750	40	Soğuma	900	40	Bekleme
750	40	Bekleme	900-825	40	Soğuma
750-150	48	Soğuma	825-150	48	Soğuma

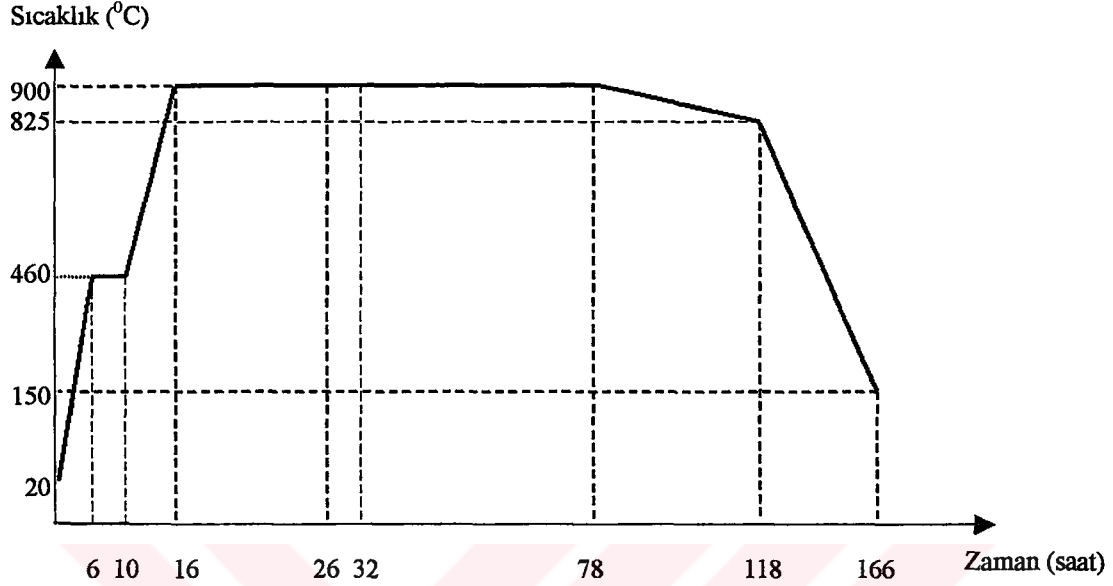
*Çalkalama işleminden sonra fırın dik vaziyette tutulmuştur.

Tablo 3.1. GaTe tek kristalinin büyütülmesine ait sıcaklık programı.



Şekil 3.11. Kısa zona ait sıcaklık programı.

Kristal büyüme fırınının zon sıcaklıkları, *Chromel-Alumel* termocuifti vasıtasıyla *RKC Rex P200 Dijital Programlanabilir Sıcaklık Kontrol Üniteleri* tarafından, ± 0.5 °C hassasiyetle kontrol edilmektedir.



Şekil 3.12. Uzun zona ait sıcaklık programı.

Büyütme işlemi sonunda fırından çıkarılan ampülün uygun bir kesici yardımıyla kesilerek külçe kristalin, herhangi bir zor veya deformasyona uğramaması sağlanmaktadır. Kristalin kontamine olmasından kaçınmak için külçenin çok temiz bir ortamda muhafaza edilmesi de, bu kristal üzerinde yapılacak incelemelerin doğruluğu açısından gereklidir. Ayrıca, Ga ve Te elemental olarak düşük toksik özelliğe sahip olmasına karşın GaTe bileşiği, göz, deri ve sindirim rahatsızlıklarına sebebiyet verebilecek ölçüde zehirlidir.

GaTe tek kristali tabakalı yapısından dolayı yarıma kolaylığı sağlar. Düşük bir oksitlenme hızına sahip olduğu tecrübe edilen kristal, herhangi bir kimyasal ya da fiziksel parlatma veya dağlama (*etching*) işlemine gerek duyulmaksızın karakterizasyon numunesi olarak kullanılabilir. Ancak tabakalı yapıya sahip olması kimyasal temizlik açısından dezavantaj olarak görülmektedir. Çünkü temizleme prosesi esnasında kimyasalın tabakalar arasında nüfuz ederek kristalin elektriksel ve optik özelliklerini değiştirmesi mümkündür.

3.4 . GaTe Tek Kristali Üzerinde Yapılan Omik Kontak Çalışmaları

3.4.1. Giriş

Elektriksel karakterizasyon için devre elemanı fabrikasyonu işlemlerinde, omik kontak problemleriyle sıkça karşılaşılması bizi GaTe' e omik kantağın optimizasyonu üzerine bir çalışmaya itmiştir. Elektriksel karakterizasyon teknikleri, en azından bir omik kantağı gerekli kılmaktadır.

Literatürde GaTe için pek çok araştırmacı tarafından elektriksel karakterizasyon amacıyla omik kontak işlemleri yapılmış olmakla birlikte herhangi bir *omik kontak optimizasyonu* çalışması bulunmamaktadır.

5N saflıkta Ga ve Te elementlerinin Bridgman tekniğiyle sentezlenmesiyle elde edilen GaTe külçenin büyüme doğrultusuna hemen hemen paralel olan bir yarıma (cleave) düzlemi tespit edilmiş ve buradan alınan bir tabaka üzerinde omik kontak yapımı gerçekleştirilmiştir (Shigetomi et al., 1998a). 10^{-3} torr basınçta In buharlaştırılarak yapılan numune $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 14 dk tavlama işlemine tabi tutulmuş ve omik bir yapı elde edilmiştir. Buharlaştırma vakumda yapılmış ve herhangi bir atıl (inert) atmosfer kullanılmamıştır. Doğrultucu kontak için ise Al elementi kullanılmıştır.

GaTe tek kristaline doğrultucu kontak çalışması, 1996 yılında Bose grubu tarafından yürütülmüş (Bose et al., 1997) ve bu kapsamda Al, Ag, Au elementlerinin kristal üzerinde oluşturduğu Schottky engel yüksekliği, C-V ölçümlerinden hesaplanmıştır. Sonuçta Al, Ag ve Au için ϕ_B değeri sırasıyla, 0.75, 0.63 ve 0.485 eV olarak bulunmuştur. Ayrıca Hall ölçümlerinden, farklı yarıma düzlemleri için farklı (yaklaşık 10 kat) mobilite ve resistivite değerleri elde edilmiş ve buradan da bu kristalin yüksek anizotropiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada, tavlama işlemi Ar gazı altında $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ve 4 dk.süreyle yapılmış, elde edilen yapıların omik davranış gösterdiği rapor edilmiştir.

Bridgman tekniği ile büyütülen GaTe tek kristali üzerinde *double injection* etkisinin incelendiği çalışmada *foil paper* ile yarılan numunelerin kalınlığının 55-100 μm ,

yüzeyinin ise yaklaşık 1 cm² olduğu belirtilmiştir (Blasi et al., 1978). Hall ölçümü yapmak için bu kristaller üzerinde yapılan omik kontaklar, In elementi buharlaştırılarak elde edilmiş olup, tavlama prosesi çok kısa tutulmuştur. Omik yapının özellikle düşük gerilimlerde iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca I-V ölçümlerinden, numunelerin kalınlığı arttıkça akımın doyuma ulaşmasında bir gecikme gözlenmiştir.

GaTe ve GaSe' e In-Ga ötektik (*eutectic*) alaşımından kontak yapılmışsa da yapının iyi bir omik davranış göstermediği rapor edilmiştir (Gouskov et al., 1978b). Aynı gurubun yine aynı yıl içerisinde yayınlanan bir başka çalışmasında (Gouskov and Gouskov, 1978a), In kontaklar oluşturulduktan sonra, azot atmosferinde 250 °C' de 30 dk. süreyle tavlanaarak omik yapı elde edilmiştir. 1979 yılında, GaTe üzerinde özdirencin anizotropiliğini ortaya koydukları çalışmalarında da aynı proses parametrelerini kullanmışlardır (Gouskov and Gouskov., 1979).

GaTe üzerine Au elementi buharlaştırılarak yapılan nokta kontak çalışmasında elde edilen yapının omik olduğu iddia edilmiştir (Mancini et al., 1974). Metalizasyon işleminin vakumda yapıldığı çalışmada, omik kontak proses şartları açıklanmamıştır

Schottky kontak için Al elementinin kullanıldığı bir başka çalışmada, omik kontak için In elementi kaplanan numunenin, Ar atmosferinde 200 °C' de 5 dk. süreyle tavlama işlemine tabi tutulduğunu belirtilmektedir (Pal and Bose, 1996). Bu çalışmada külçe kristal elde edildikten sonra, kristalin monoklinik faza geçmesini sağlamak amacıyla 100-120 °C arasında kısa süreli bir tavlama (*postbaking*) işlemi yapıldığı bildirilmektedir.

Bir başka çalışmada, vakumda yapılan Au kontakların iyi omik olduğu açıklanmış fakat proses şartları bildirilmemiştir (Manfredotti et al., 1975). Ayrıca bu çalışmada da, Semiletov (1963) 'un bir çalışmasına atıf yapılarak GaTe külçenin monoklinik yapıya geçmesi için 100 °C civarında bir tavlama (*postbake*) işlemi yapılması gerektiği belirtilmiştir (Semiletov and Vlasov, 1963).

GaTe kristali üzerine çeşitli elementler (Au, Al, In, Ag) kaplanarak, X-ışını fotoelektron spektroskopisi tekniğiyle ara bölgenin karakteristiğinin incelendiği

çalışmada, Au ve In kaplamaların kristal yapıyla herhangi bir kimyasal reaksiyona girmedığı ve grainlerin oluşmadığı ortaya koyulmuştur (Almeida et al., 1998). Al kaplamanın, metalik Ga atomlarıyla bir yer değiştirme reaksiyonuna girdiği, Ag kaplamanın ise pik şekillerinde herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı belirtilmiştir. Bütün bu sonuçlar, çok küçük kalınlıkta ($<6 \text{ \AA}$) kaplamalar için geçerli olup kalınlık arttıkça grainlerin oluştuğu ve kimyasal reaksiyonların başladığı (difüzyon ya da outdifüzyon) belirtilmektedir.

Bahsedilen bütün bu çalışmalarda, kaplamadan önce kristal yüzeyi üzerinde mekanik ya da kimyasal herhangi bir parlatma veya dağlama (*etching*) işlemi yapılmamıştır.

3.4.2. In Tabanlı Omik Kontak Çalışması

Literatür incelemeleri dikkate alınarak ilk aşamada GaTe kristaline In omik kontak çalışması yapıldı. 6N saflıkta In elementi seyreltik (%10) HCl ile kimyasal olarak temizlendikten sonra, *Edward Pumps (Model E01)* difüzyon pompası kullanılarak, $\sim 10^{-5}$ mbar vakumda buharlaştırma yapıldı. Ladder yapı, kristal yüzeyine gölge maske kullanılarak transfer edildi. Metalizasyon işleminden hemen sonra numuneler minyatür ısıtma işlemi fırınında (Efeoğlu et al., 2000) termal difüzyonu sağlamak için tavlama işlemine tabi tutuldu. Tavlama işlemi azot atmosferinde yapıldı. Azot kaynağından gelebilecek rutubet ve oksijeninin numuneye zarar vermesine engel olmak amacıyla, azot gazı CaCl_2 ihtiva eden bir kolondan geçirildi.

Omik kontak optimizasyon çalışması, her bir element için tavlama sıcaklığının ve tavlama süresinin belirli adımlarla değiştirilmesiyle yapıldı. GaTe' e In omik kontak optimizasyonunda tavlama sıcaklığı $175 \text{ }^\circ\text{C}$ ' den $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye $25 \text{ }^\circ\text{C}$ adımlarla artırılırken, tavlama süresi de 2.5 dk' dan 14 dk' ya kadar 2.5 dk' lık adımlarla artırılmıştır. Tavlama işlemine tabi tutulan numune üzerinde derhal omik kontak ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde sabit akım kaynağı olarak *Keithley* sabit akım kaynağı ve voltmetresi kullanılmıştır. Bütün ölçümlerde numune üzerine sürülen akım $\pm 200 \text{ }\mu\text{A}$ ' dir.

Büyütülen külçe GaTe tabakalı kristali üzerinde yürütülen omik kontak ölçümlerinde gerekli istatistiki dalgalanmayı da vermek için numune üzerine, homojen olarak

dağılmış birkaç adet paternin transfer edilmesi gerekmektedir. Büyütülen külçenin homojen olmama (*non-homogen bulk*) ihtimalini bertaraf etmek için bu gereklidir. Böylece gerçekleştirilen ölçümlerin dağılımına bakarak manalı değerlerin bulunabileceği sınırlar kolayca belirlenmiş olur. Bu amaçla her numune üzerine üç veya dört adet ölçüm paterni transfer edilerek elde edilen ölçümler hata sınırı içinde belirtildi.

Bu şartlar altında, In esaslı omik kontak için, proses günü alınan ölçüler Tablo 3.2' de, bu değerlere ait grafikler ise Şekil 3.13' de verilmektedir. Şekle göre minimum spesifik kontak direnci, 200 °C' de 2.5 dk' lık ısıtma işlemi sonucunda $2.46 \pm 1.38 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ olarak elde edilmiştir.

Omik kontak işlemlerinde, düşük sıcaklık ve kısa süreli proses arzu edilen durumdur. Çünkü tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça, kristalin elektriksel ve optik özelliklerinin malzemenin tabii bir davranışı olarak değiştiği bilinmektedir. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak 1 MHz' de yapılan C-V ölçümlerinden, derin kusur seviyelerinin konsantrasyonunun artan sıcaklıkla arttığı rapor edilmiştir. 2 MHz' de yapılan DLTS ölçümleri de tavlama sıcaklığına (200 – 400 °C) bağlı olarak yapılmış ve akseptör bandının 0.8 eV üzerinde yerleşmiş derin kusur konsantrasyonunun artan sıcaklıkla arttığı görülmüştür (tavlanmamış numune için –1 pF değerine sahip olan DLTS sinyalinin 200 °C' de tavlanmış numune için –5 pF değerine, 400 °C' de tavlanmış numune için ise –8 pF değerine sahip olduğu görülmüştür) (Shigetomi et al., 1998a). Bu sebeple, Tablo 3.1' deki bilgilere göre GaTe' e In esaslı omik kontak işlemi için, 200 °C' de 2.5 dk' lık ısıtma işlemi optimum proses şartları olarak verilebilir.

Tablo 3.2' den açıkça görüldüğü üzere 175 °C' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direncinde bir iyileşme göze çarpmakla birlikte ciddi bir değişim gözlenmemiştir (Bütün değerler $10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ civarındadır). 200 °C' de yapılan tavlama işleminde omik kontak direnci tavlama süresinin artırılması ile artmış yani omik yapı kötüleşmiştir. 225 °C için tavlama süresi düşürüldükçe omik yapı kötüleşmiş ve 2.5 dk' da, $1.11 \pm 0.01 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ ile en yüksek omik kontak direncine ulaşılmıştır. 250 °C' de yapılan tavlama yorumlanabilir bir davranış gözlemlenememiştir. Bu tavlama sıcaklığında omik kontak direnci 2.5, 7.5 ve 14 dk' lık tavlama sürelerinde daha düşük değerlere sahip olmuştur.

Kısım 2.2.3.1' de *GaAs: AuGeNi* omik yapısının da bu tür bir davranış sergilediğinden bahsetmiştik.

Tablo 3.2. Farklı tavlama sıcaklıkları için In spesifik omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimini veren değerler.

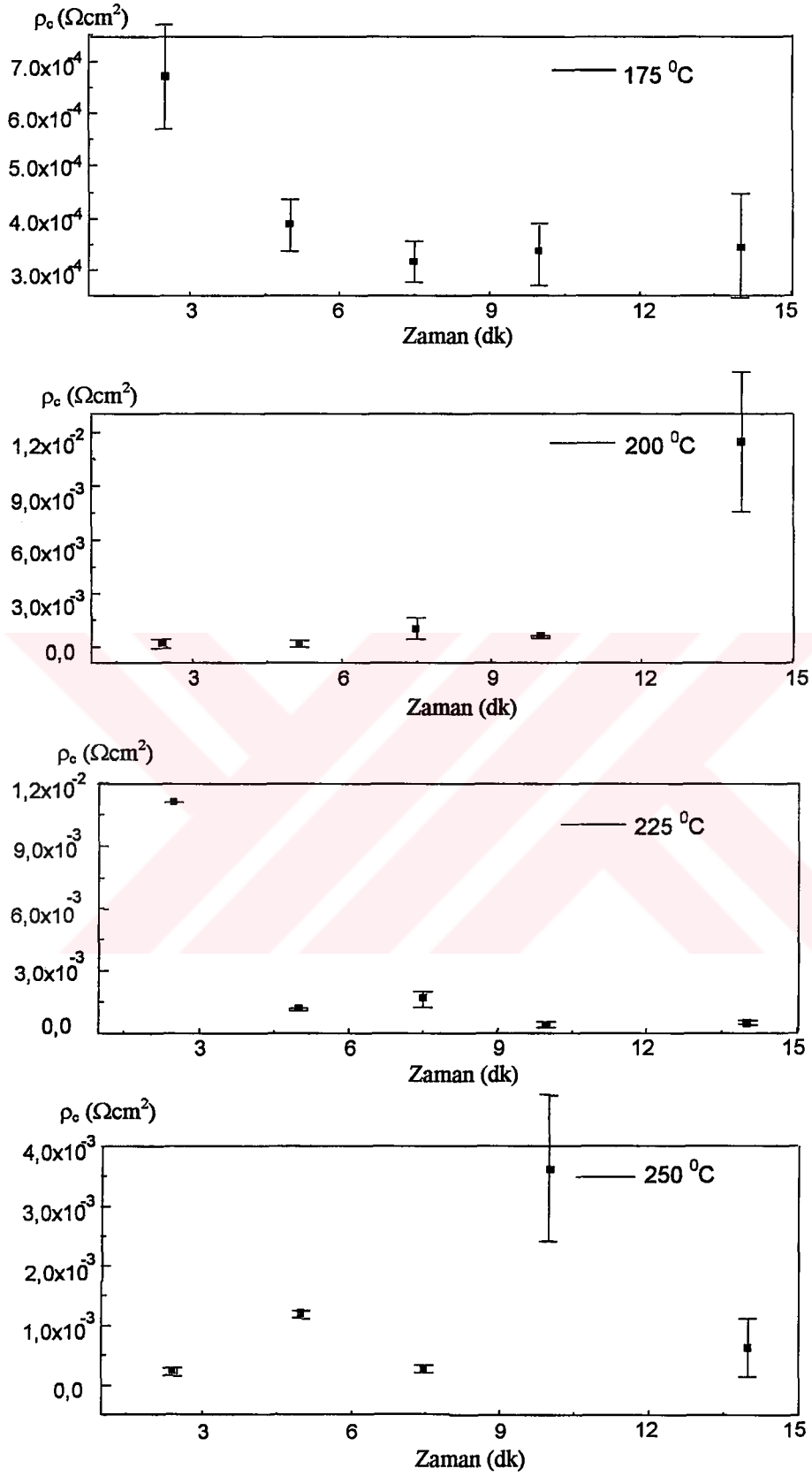
Tavlama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	(6.69±0.95)E-4	(3.86±0.48)E-4	(3.17±0.37)E-4	(3.30±E.60)E-4	(3.46±1.01)E-4
200	(2.46±1.38)E-5	(9.57±0.29)E-5	(1.01±0.58)E-3	(5.80±0.74)E-4	(1.15±0.39)E-4
225	(1.11±0.01)E-2	(1.12±0.05)E-3	(1.61±0.37)E-3	(3.84±1.48)E-4	(4.08±0.82)E-4
250	(2.31±0.69)E-4	(1.20±0.05)E-3	(2.76±0.34)E-4	(3.63±1.22)E-3	(6.25±4.89)E-4

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

3.4.3. In Tabanlı Omik Kontakın Yaşlanma Ölçümleri

Metal-yarıiletken kontakın kararlılığı gerek karakterizasyonda gerekse devre elemanı fabrikasyonunda çok büyük öneme sahiptir. Bu amaçla altı aylık periyot boyunca yaşlanma ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar, elde edilen yapıların bu periyot içerisinde ciddi bir bozulmaya uğramadığını, özellikle de en iyi proses olarak belirlenen 200°C ve 2.5 dk' lık tavlama şartlarına sahip numunenin, bu periyot içinde yine en kararlı yapı olduğunu ortaya koymuştur. GaTe:In yapısı üzerinde aşağıdaki periyotlar üzerinden yaşlanma ölçümü gerçekleştirildi:

1. Bir haftalık,
2. 15 günlük,
3. 1 aylık,
4. 3 aylık,
5. 6 aylık.



Şekil 3.13. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi.

3.4.3.1. Bir Haftalık Yaşlanma Ölçümleri

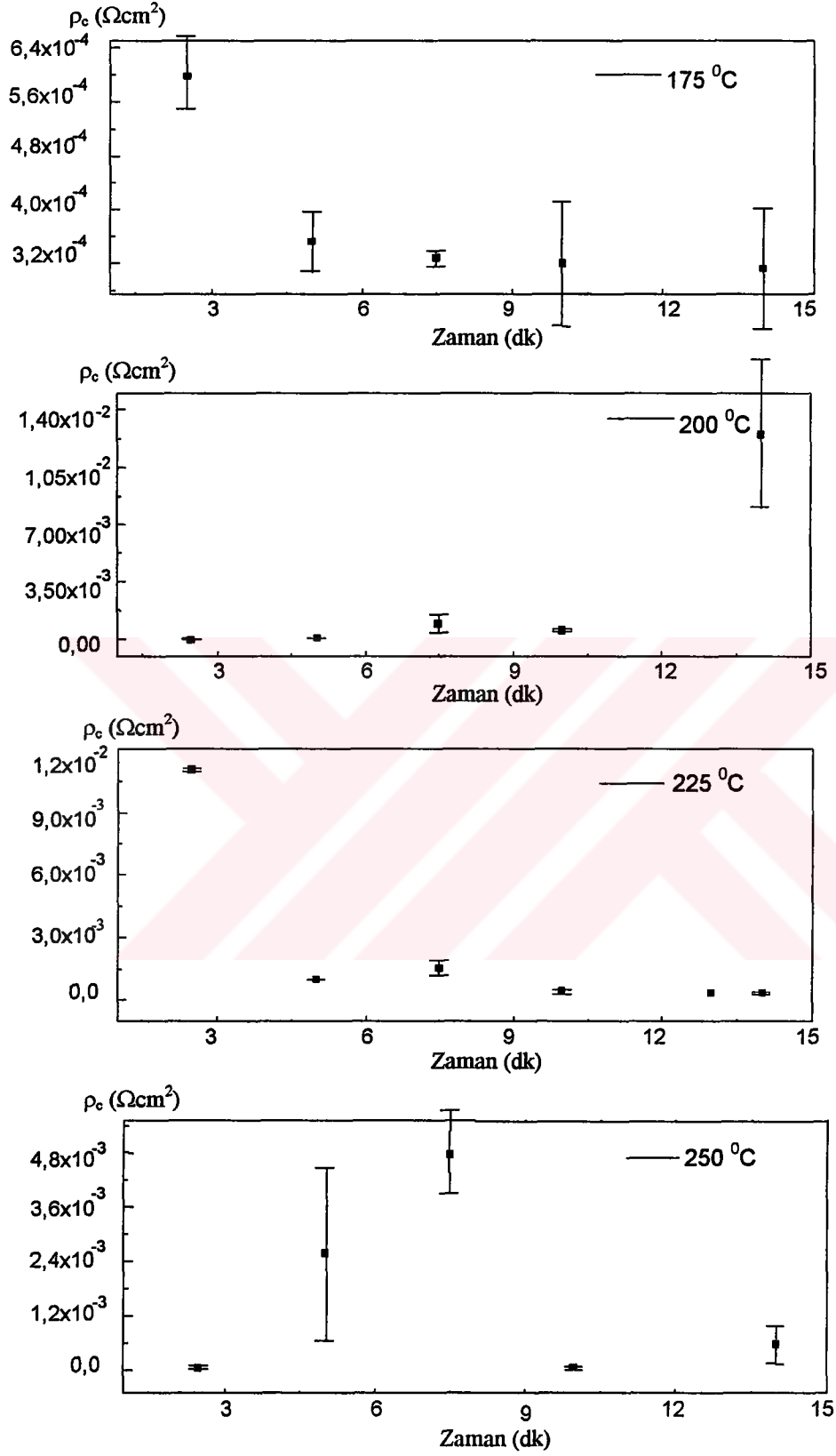
Hazırlanan numuneler, yaşlanma ölçümleri için saklandı. Numunelerin herhangi bir strese ve kirlenmeye maruz kalmaması için gereken itina gösterildi. Proses gününden bir hafta sonra yapılan ölçümlere ait ρ_c değerleri Tablo 3.3' de, grafiksel gösterim ise Şekil 3.14' de verilmektedir.

Tablo 3.3. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimini veren değerler (bir haftalık yaşlanma ölçümleri).

Tavlama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	$(6.04 \pm 0.54) \times 10^{-4}$	$(3.51 \pm 0.46) \times 10^{-4}$	$(3.26 \pm 0.12) \times 10^{-4}$	$(3.19 \pm 0.92) \times 10^{-4}$	$(3.12 \pm 0.89) \times 10^{-4}$
200	$(1.75 \pm 1.21) \times 10^{-5}$	$(6.54 \pm 0.20) \times 10^{-5}$	$(9.54 \pm 5.46) \times 10^{-4}$	$(5.48 \pm 0.65) \times 10^{-4}$	$(1.25 \pm 0.45) \times 10^{-2}$
225	$(1.10 \pm 0.01) \times 10^{-2}$	$(1.00 \pm 0.01) \times 10^{-3}$	$(1.55 \pm 0.34) \times 10^{-3}$	$(4.00 \pm 1.03) \times 10^{-4}$	$(3.42 \pm 0.78) \times 10^{-4}$
250	$(7.16 \pm 4.62) \times 10^{-5}$	$(2.56 \pm 1.91) \times 10^{-3}$	$(4.82 \pm 0.92) \times 10^{-3}$	$(5.59 \pm 4.15) \times 10^{-4}$	$(4.99 \pm 3.33) \times 10^{-5}$

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

Tablo 3.3' den görüldüğü üzere bir haftalık yaşlanma ölçümleri için; 175°C ' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direnci değerleri proses günü alınan değerlerle paralellik arz etmektedir. Bir hafta sonra yapılan ölçümlerde de, bu sıcaklık değeri için artan tavlama sıcaklığıyla omik kontak direncinde bir iyileşme göze çarpmakla birlikte kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. 200°C ' de yapılan tavlama işleminde omik kontak direnci tavlama süresinin artırılması ile artmış, omik yapı kötüleşerek proses günü alınan değerlerle uyum göstermiştir. Optimim proses olarak belirlenen 200°C ve 2.5 dk' lık omik yapı, aradan bir hafta geçmesine rağmen $1.75 \pm 1.21 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ ile yine en düşük omik kontak direnci değerini üretmiştir. 225°C için, tavlama süresi düşürüldükçe omik yapı yine kötüleşmeye başlamış ve 2.5 dk' da, $1.10 \pm 0.01 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}^2$ ile en yüksek omik kontak direncine ulaşılmıştır. 250°C ' de yapılan tavlama, omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi ilk günkü karakterini hemen hemen korumuştur. Sonuçta GaTe:In omik yapısı üzerinde bir hafta sonra elde edilen omik kontak değerleriyle, proses günü elde edilen değerler büyük bir paralellik göstermektedir.



Şekil 3.14. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (bir haftalık yaşlanma ölçümleri).

3.4.3.2. İki Haftalık Yaşlanma Ölçümleri

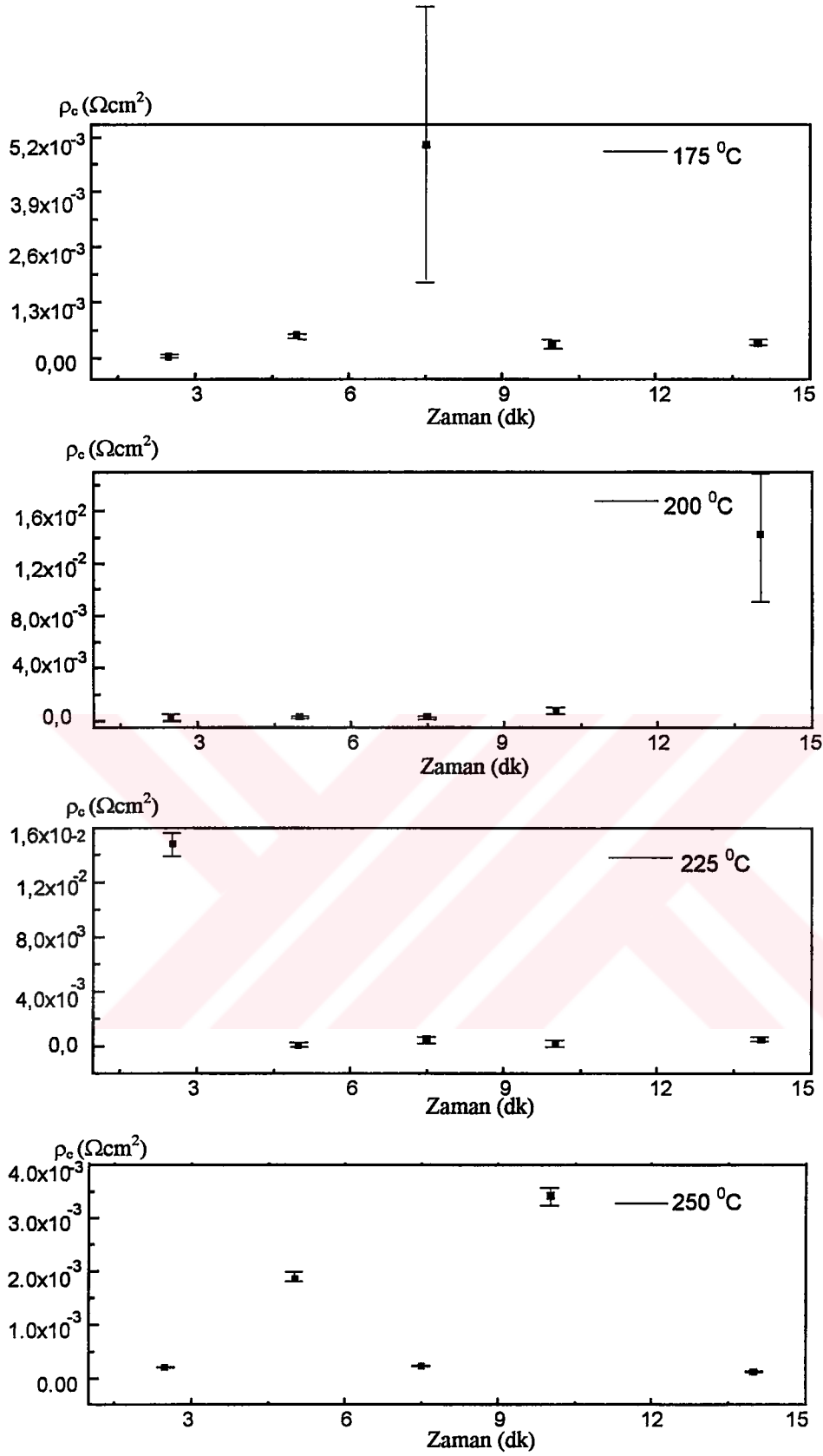
GaTe:In omik yapısı üzerinde yaşlanma ölçümlerinin ikinci adımı onbeş gün sonra gerçekleştirildi. Aynı numuneler üzerinde gerçekleştirilen iki haftalık yaşlanma ölçümlerine ait sayısal değerler Tablo 3.4' de verilmektedir.

Tablo 3.4. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimini veren değerler (iki haftalık yaşlanma ölçümleri).

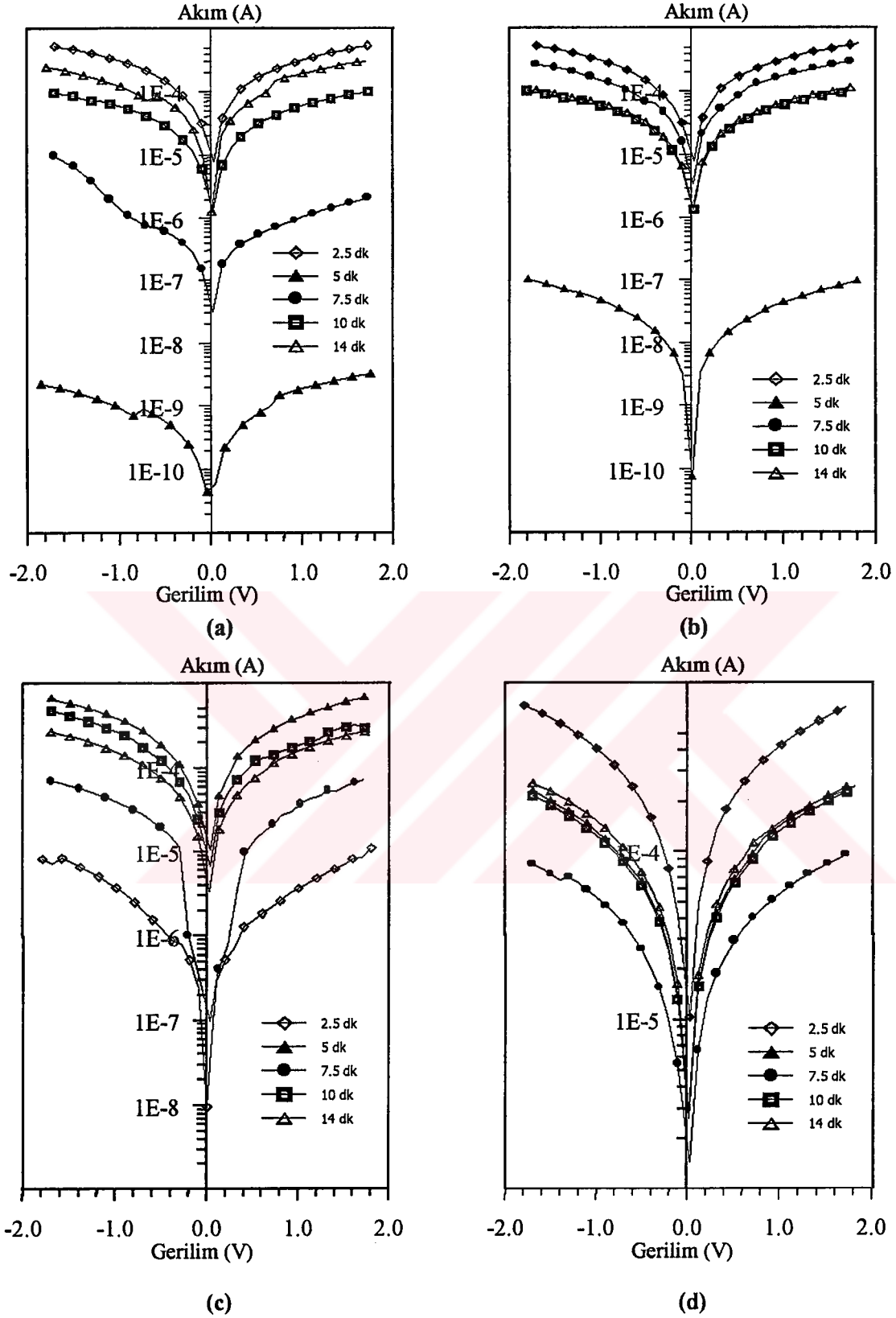
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	(1.23±0.72)E-5	(5.08±0.63)E-4	(5.04±3.28)E-3	(2.26±0.05)E-4	(3.69±0.72)E-4
200	(2.40±1.46)E-5	(3.41±0.40)E-4	(2.45±1.11)E-4	(5.60±0.35)E-4	(1.40±0.49)E-2
225	(1.48±0.08)E-2	2.04 E-6	(4.92±2.22)E-4	(2.62±0.46)E-4	(6.11±1.64)E-4
250	(2.19±0.46)E-4	(1.89±1.48)E-3	(2.25±0.43)E-4	(3.41±1.17)E-3	(1.28±0.57)E-4

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

Şekil 3.15' den görüldüğü üzere iki haftalık yaşlanma ölçümleri için; 175 °C' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direnci değerlerinin, proses günü alınan değerlerden farklılaşmaya başladığı gözlenmektedir. Daha önceki ölçümlerde göze çarpan, artan tavlama süresiyle omik kontak direncindeki iyileşme eğilimi iki hafta sonra kaybolmuştur. 200 °C' de yapılan tavlama işleminde omik kontak direnci (tıpkı daha önceki ölçümlerde olduğu gibi) iki haftalık yaşlanma ölçümlerinde de tavlama süresinin artırılması ile artmakta, omik yapı kötüleşerek proses günü alınan değerlerle gösterdiği uyumu korumaktadır. Daha önce optimim proses olarak belirlenen 200 °C ve 2.5 dk' lık omik yapı, aradan geçen iki haftalık süreye rağmen $2.40\pm 1.46 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ ile düşük omik kontak direnci değerini korumaya devam etmiştir. 225 °C için, tavlama süresi yükseldikçe omik yapı, iyileşme eğilimini sürdürmüştür. 250 °C' de yapılan tavlama, omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi daha önceki davranışını sürdürmektedir. Sonuçta GaTe:In omik yapısı üzerinde iki hafta sonra gerçekleştirilen ölçümlerden, 175 °C dışındaki tüm sıcaklıklarda kayda değer bir değişim gözlenmemektedir. İki haftalık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri Şekil 3.16' da görülmektedir.



Şekil 3.15. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (iki haftalık yaşlanma ölçümleri).



Şekil 3.16. İki haftalık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri.

(a) 175 °C (b) 200 °C (c) 225 °C (d) 250 °C

3.4.3.3. Bir Aylık Yaşlanma Ölçümleri

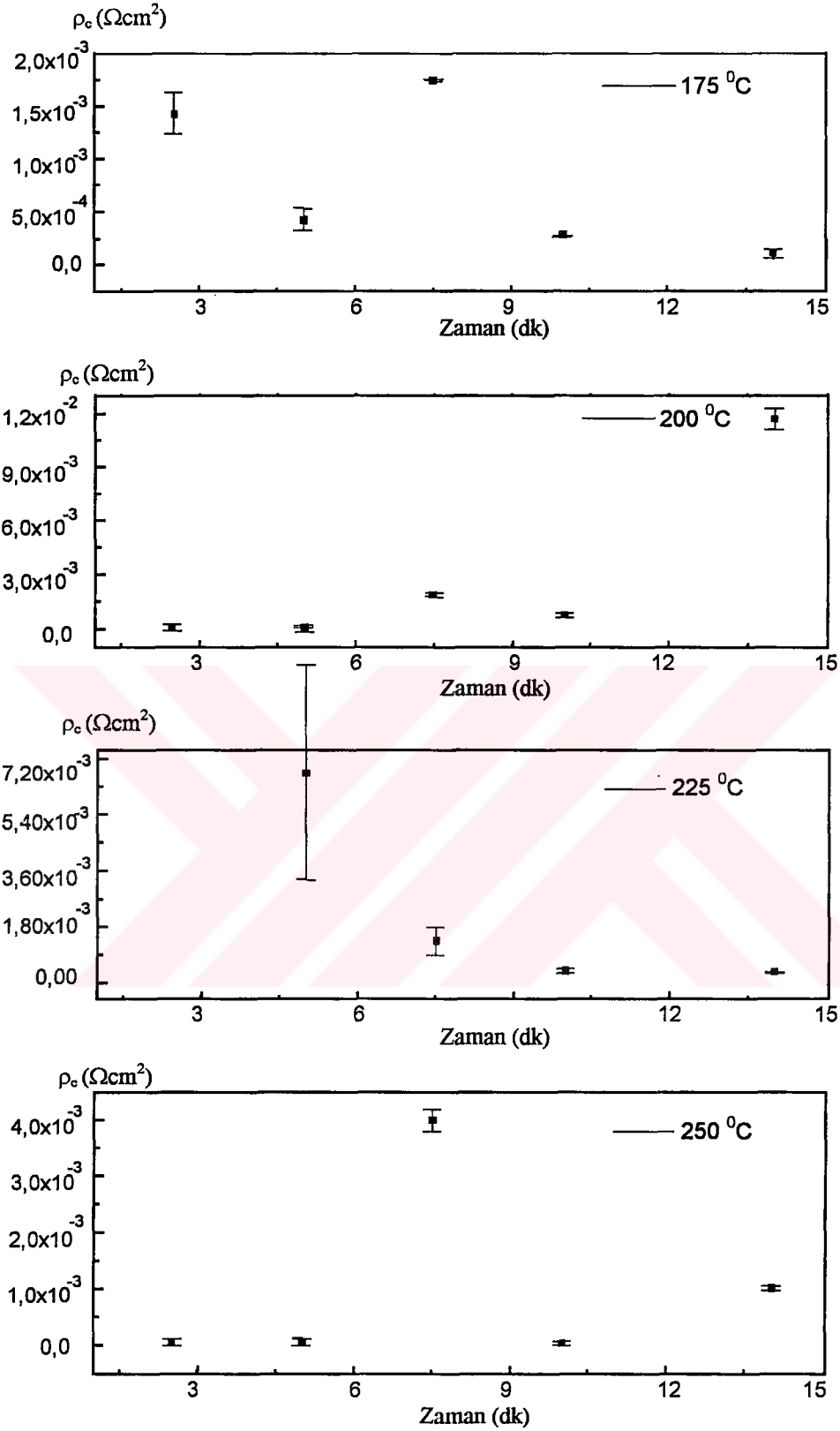
GaTe:In omik yapısı üzerinde yaşlanma ölçümlerinin üçüncü adımını bir aylık ölçümler oluşturmaktadır. Bu ölçümlere ait spesifik omik kontak direnci değerleri Tablo 3.5' de verilmektedir.

Tablo 3.5. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimini veren değerler (bir aylık yaşlanma ölçümleri).

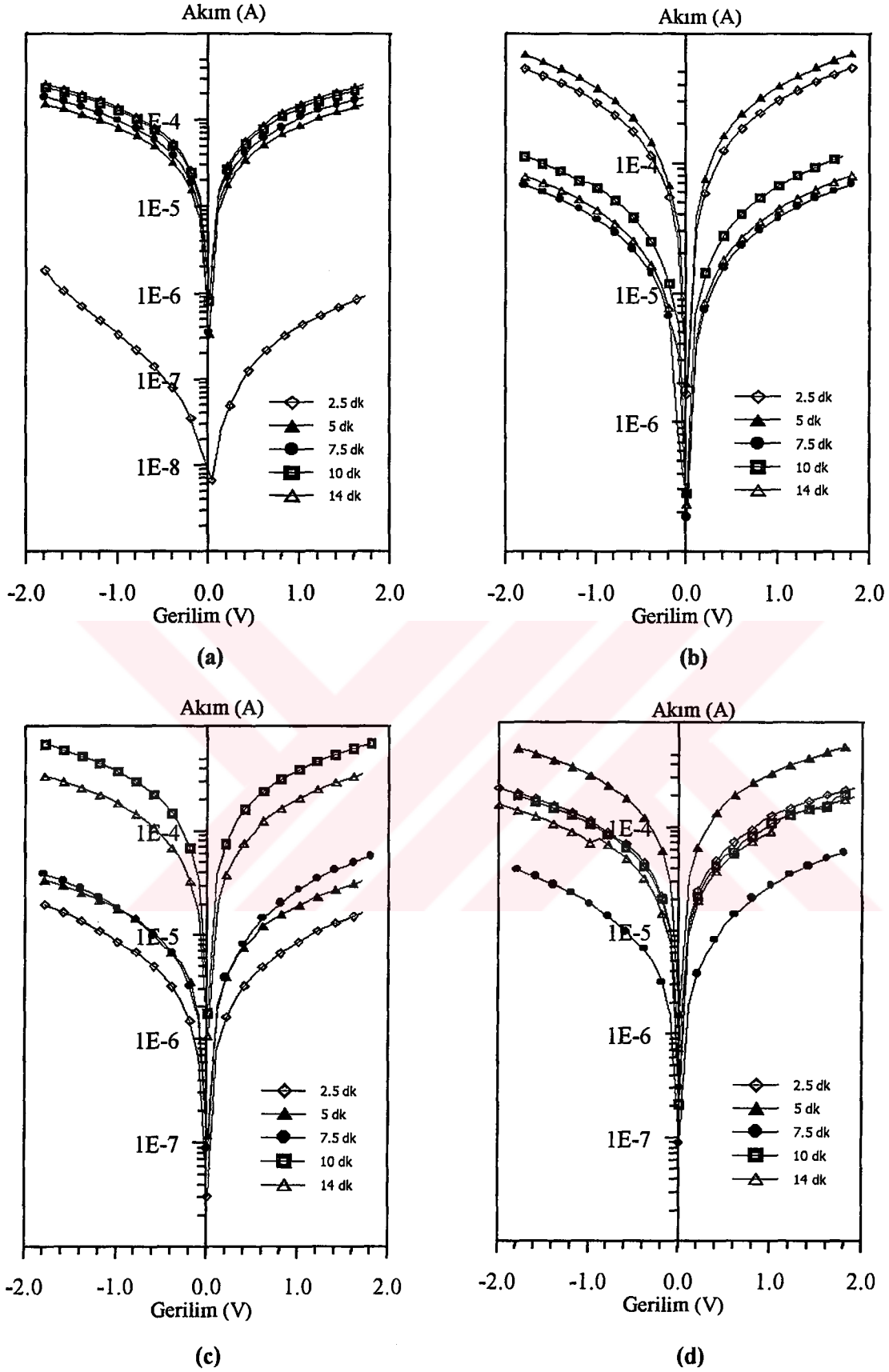
Tavlama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	$(1.44 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	$(4.33 \pm 1.04) \times 10^{-4}$	1.76×10^{-3}	$(2.76 \pm 0.06) \times 10^{-4}$	$(1.08 \pm 0.57) \times 10^{-4}$
200	$(2.01 \pm 1.35) \times 10^{-5}$	$(9.25 \pm 1.28) \times 10^{-5}$	$(1.90 \pm 1.18) \times 10^{-3}$	$(6.71 \pm 1.59) \times 10^{-4}$	$(1.17 \pm 0.64) \times 10^{-2}$
225	Ölçü alınmadı	$(6.77 \pm 3.44) \times 10^{-3}$	$(1.35 \pm 0.45) \times 10^{-3}$	$(3.16 \pm 0.76) \times 10^{-4}$	$(3.50 \pm 0.22) \times 10^{-4}$
250	$(6.05 \pm 2.29) \times 10^{-5}$	$(1.05 \pm 0.11) \times 10^{-4}$	$(4.00 \pm 1.30) \times 10^{-3}$	3.69×10^{-6}	$(1.02 \pm 0.73) \times 10^{-3}$

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

Bir aylık yaşlanma ölçümleri için, spesifik omik kontak direnci değerlerinin tavlama parametrelerine bağlı değişimi Şekil 3.17' de verilmektedir. 175°C ' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direnci değerlerinin, proses günü alınan değerlerden farklılaşma eğilimi devam etmektedir. 200°C ' de yapılan tavlama işleminde omik kontak direnci bir aylık yaşlanma ölçümlerinde de tavlama süresinin artırılması ile artmakta, omik yapı kötüleşerek proses günü ve sonrasında (bir ve iki haftalık ölçümlerde) alınan değerlerle gösterdiği uyumu korumaktadır. 200°C ve 2.5 dk' lık optimum yapı, aradan geçen bir aylık süre içinde $2.01 \pm 1.35 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ omik kontak direnci değeriyle daha önceki düşük değerini muhafaza etmektedir. 225°C için, 2.5 dk için omik kontak ölçümü alınmadı. Buna karşılık 5 dk' dan itibaren tavlama süresi yükseldikçe omik yapının iyileşme eğilimi sürmüştür. 250°C ' de omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi daha önceki davranışını sürdürmeye devam ederek kararlılığını korumaktadır. Sonuçta GaTe:In omik yapısı üzerinde bir ay sonra gerçekleştirilen ölçümler, iki haftalık ölçümlerde gözlemlenen davranışı devam ettirmektedir. Bir aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri Şekil 3.18' de verilmektedir.



Şekil 3.17. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (bir aylık yaşlanma ölçümleri).



Şekil 3.18. Bir aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri.

(a) 175 °C (b) 200 °C (c) 225 °C (d) 250 °C

3.4.3.4. Üç Aylık Yaşlanma Ölçümleri

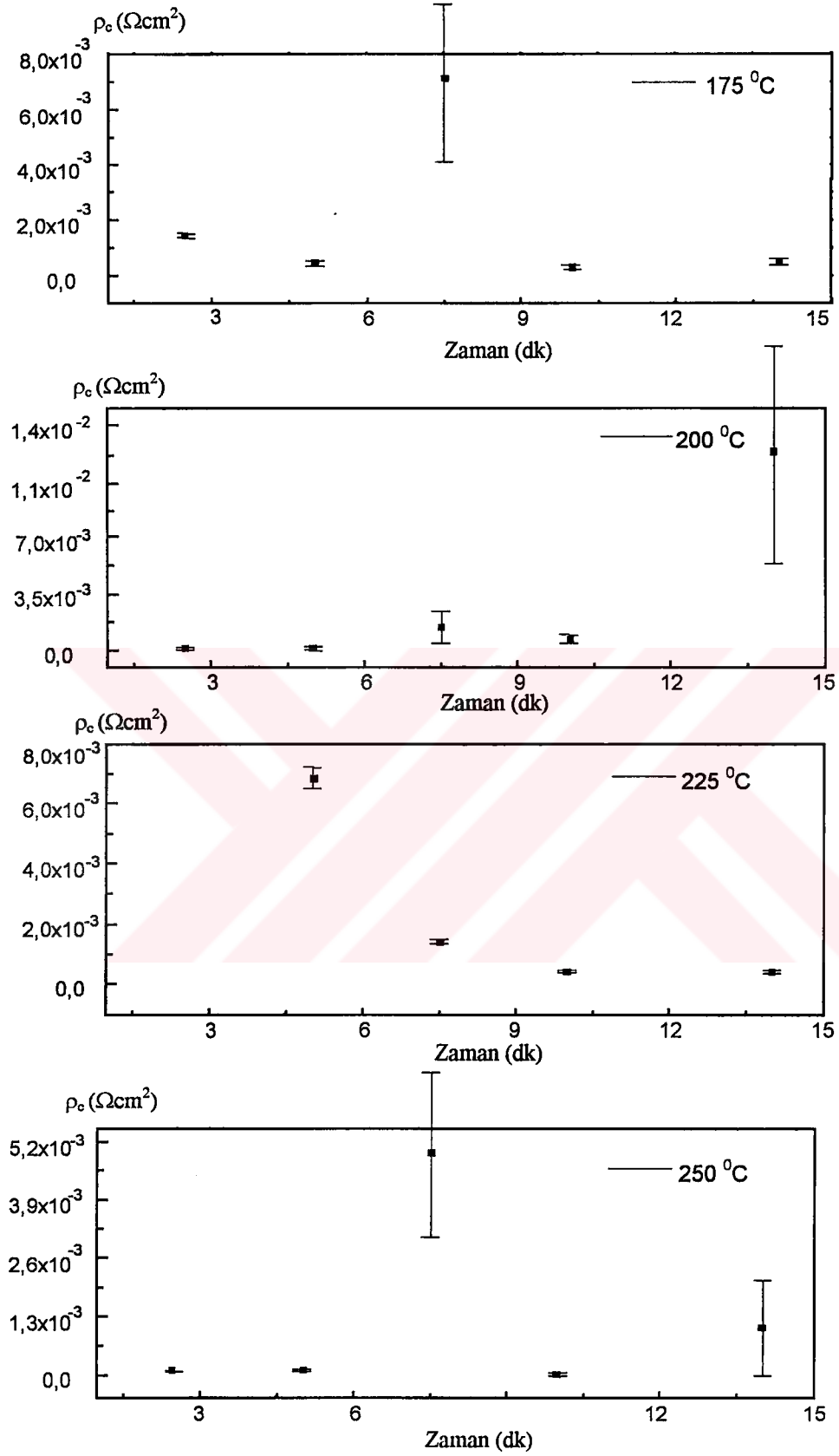
GaTe:In metal-yarıiletken yapısının imalatı üzerinden üç ay geçtikten sonra yapılan ölçümlerden elde edilen ρ_c değerleri Tablo 3.6' da, bu değerlere ait grafiksel gösterim ise Şekil 3.19' da verilmektedir.

Tablo 3.6. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (üç aylık yaşlanma ölçümleri).

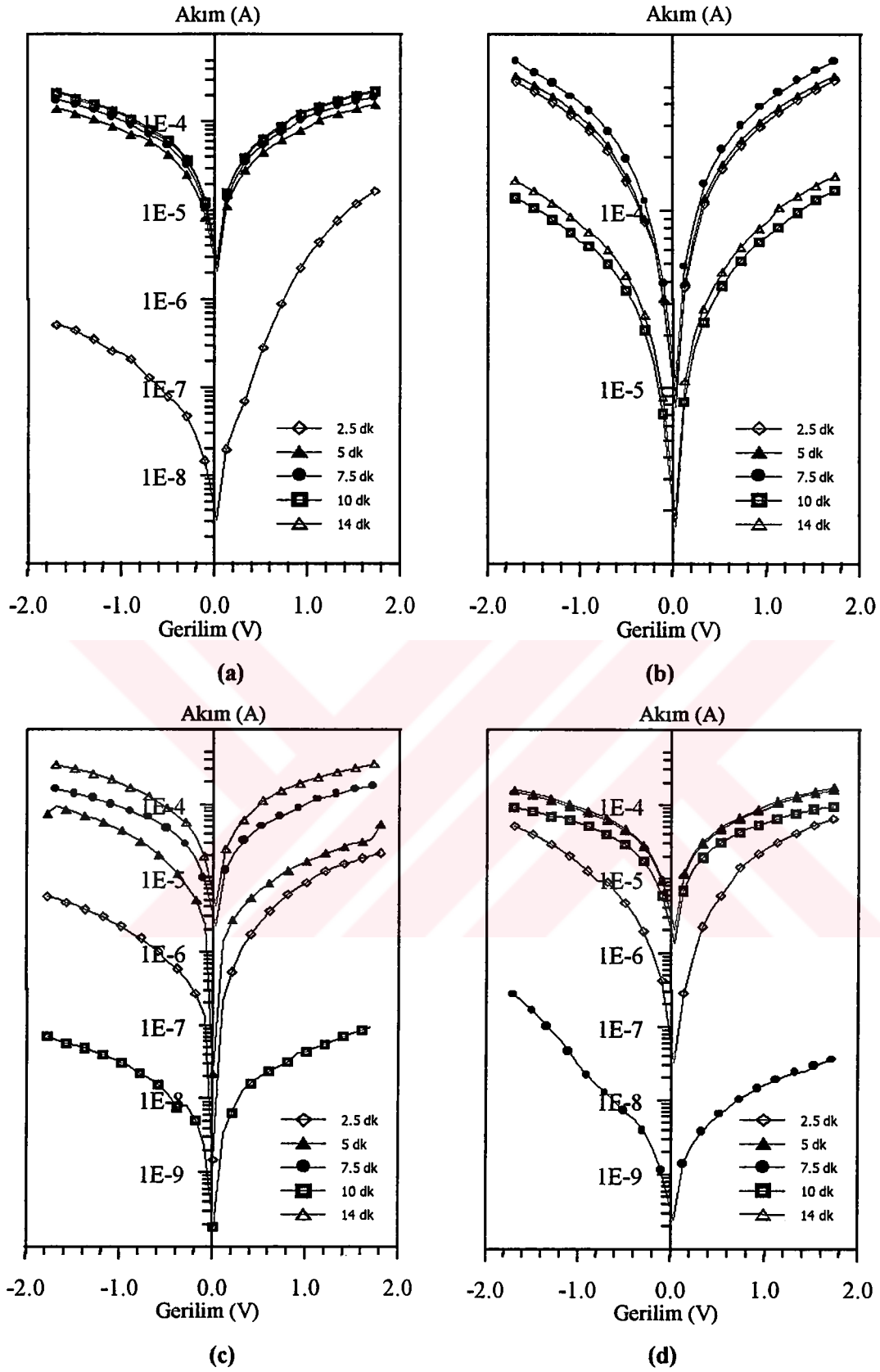
Tavlama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	(1.42±0.10)E-3	(4.61±1.06)E-4	(7.16±3.07)E-3	(3.02±0.05)E-4	(5.29±0.16)E-4
200	(6.03±2.56)E-5	(1.15±0.17)E-4	(1.46±1.02)E-3	(7.40±2.45)E-4	(1.21±0.67)E-2
225	Ölçü alınmadı	(6.89±3.43)E-3	(1.43±0.47)E-3	(3.96±0.94)E-4	(3.94±0.29)E-4
250	(9.97±0.42)E-5	(1.23±0.18)E-4	(4.94±1.85)E-3	(2.72±2.22)E-6	(1.06±0.76)E-3

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

Üç aylık yaşlanma ölçümleri için; 175 $^{\circ}\text{C}$ ' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direnci değerlerinin, proses günü alınan değerlerden farklılaşma eğilimi devam etmektedir. Öyle ki, proses günü ve ondan bir hafta sonra alınan ölçümlerde bu tavlama sıcaklığı için omik kontak dirençleri artan tavlama süresiyle iyileşmekteydi. Üç aylık ölçümlerdeki eğilim ters bir durumu ortaya koymaktadır. Yani 175 $^{\circ}\text{C}$ ' de omik kontak direnci tavlama süresine bağlı olarak artış göstermektedir. 200 $^{\circ}\text{C}$ ' de yapılan tavlama işleminde omik kontak direnci üç aylık yaşlanma ölçümlerinde de tavlama süresinin artırılması ile artmaya devam etmektedir. 200 $^{\circ}\text{C}$ ve 2.5 dk' lık optimum yapı, aradan geçen üç aylık süre içinde $6.03\pm 2.56 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ omik kontak direnci değeriyle daha önceki düşük değerini muhafaza etmektedir. 225 $^{\circ}\text{C}$ için, üç aylık yaşlanma ölçümlerinde de 2.5 dk. için omik kontak ölçümü alınmadı. Buna karşılık, üç ay sonra da tavlama süresi yükseldikçe omik yapının iyileşme eğilimi devam etmiştir. 250 $^{\circ}\text{C}$ ' de omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi daha önceki davranışını sürdürmeye devam ederek kararlılığını korumaktadır. Bir aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri Şekil 3.20' de verilmektedir.



Şekil 3.19. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (üç aylık yaşlanma ölçümleri).



Şekil 3.20. Üç aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri.

(a) 175 °C (b) 200 °C (c) 225 °C (d) 250 °C

3.4.1.5. Altı Aylık Yaşlanma Ölçümleri

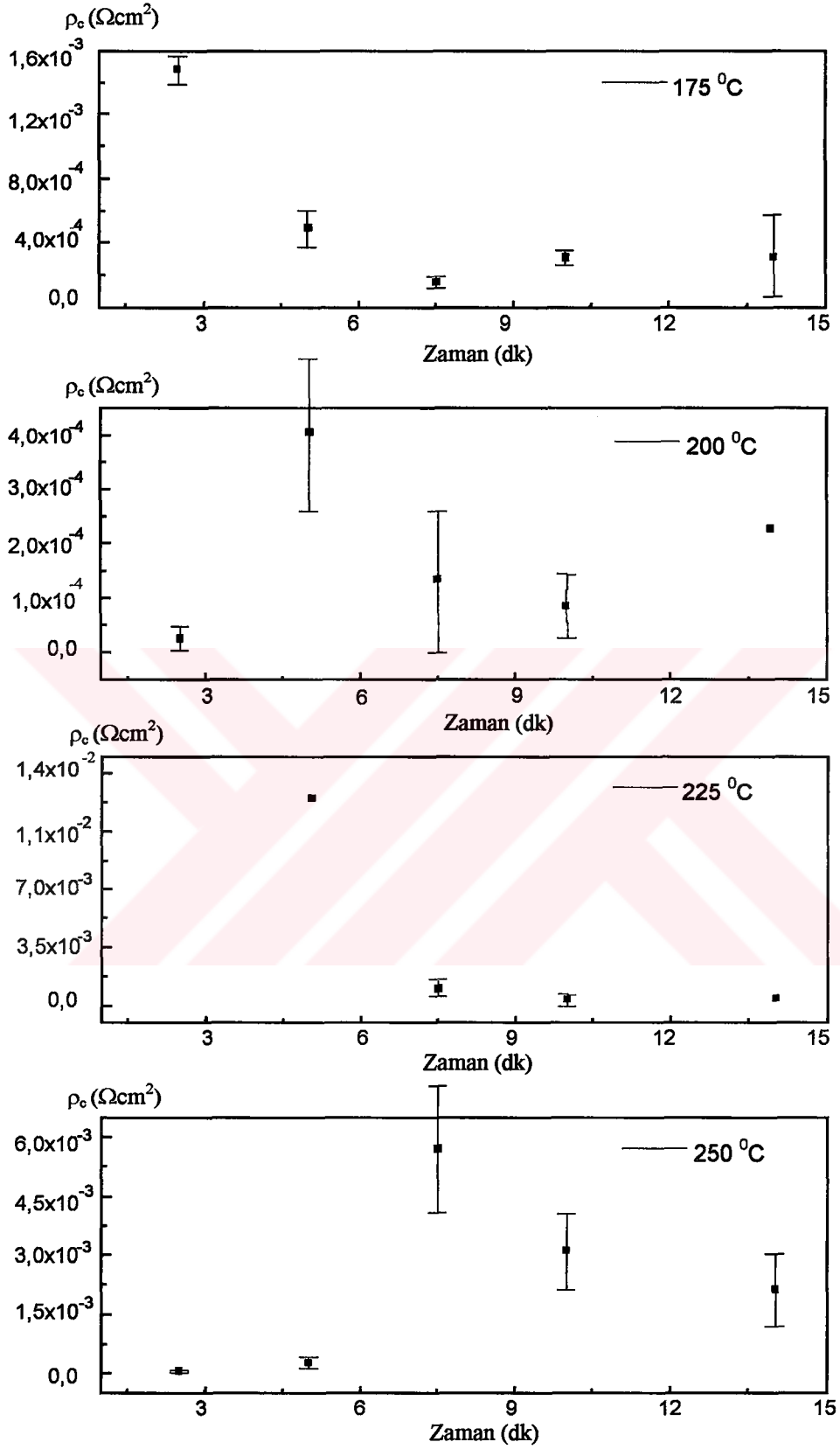
GaTe:In metal-yarıiletken yapısı üzerinde yapılan yaşlanma ölçümlerinden sonuncusu proses gününden altı ay sonra yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen ρ_c değerleri Tablo 3.7' de, bu değerlere ait grafiksel gösterim ise Şekil 3.21' de verilmektedir.

Tablo 3.7. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (altı aylık yaşlanma ölçümleri).

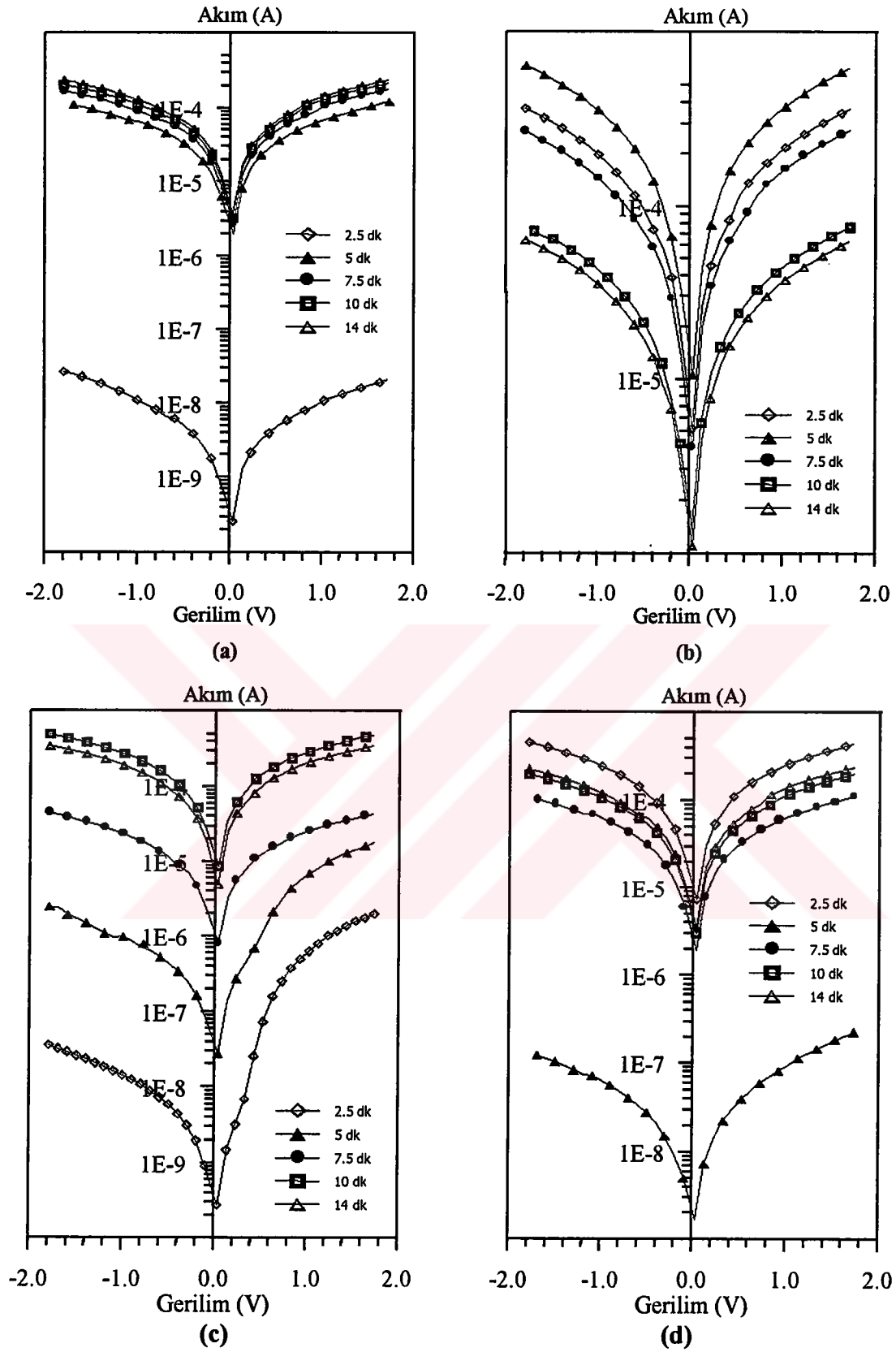
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (dk)				
	2.5	5	7.5	10	14
175	(1.48±0.09)E-3	(4.89±1.13)E-4	(1.59±0.35)E-4	(3.17±0.45)E-4	(3.22±2.56)E-4
200	(2.66±2.22)E-5	(4.02±1.42)E-4	(1.30±0.57)E-4	(8.59±0.58)E-5	2.28 E-4
225	Ölçü alınamadı	1.27 E-2	(1.07±0.46)E-3	(3.59±3.50)E-4	(4.67±0.20)E-4
250	(7.70±1.49)E-5	(2.97±1.48)E-4	(5.71±1.61)E-3	(3.09±0.98)E-3	(2.12±0.92)E-3

(Tablo içinde verilen büyüklüklerdeki \pm değerler, bu niceliklerin maksimum değişim aralığını göstermektedir ve bütün değerler Ωcm^2 birimindedir).

Altı aylık yaşlanma ölçümleri için; 175 °C' de yapılan tavlama süresine bağlı omik kontak direnci değerlerinin, proses günü alınan değerlerden farklılaşma eğilimine devam ederek kararsızlığını sürdürmektedir. Daha önceki ölçümlerden farklı olarak, omik kontak direnci tavlama süresine bağlı olarak iyileşmektedir. 200 °C' de yapılan tavlama işleminde, omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimin daha önceki kararlılığını yitirmeye başladığı göze çarpmaktadır. Buna karşılık 200 °C ve 2.5 dk olarak belirlenen optimum ısı işleme tabi tutulan numunenin, aradan geçen altı aylık süre içinde $2.66\pm 2.22 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ değeriyle daha önceki düşük değerini muhafaza ettiği görülmektedir. Altı aylık yaşlanma ölçümlerinde de 225 °C ve 2.5 dk için omik kontak ölçümü alınamadı. Buna karşılık, artan tavlama süreleri için omik yapının iyileşmesi sürmektedir. 250 °C' de omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı olarak değişimi proses gününden itibaren gösterdiği davranışını sürdürerek kararlılığını muhafaza etmektedir. Altı aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V karakteristikleri Şekil 3.22' de verilmektedir.



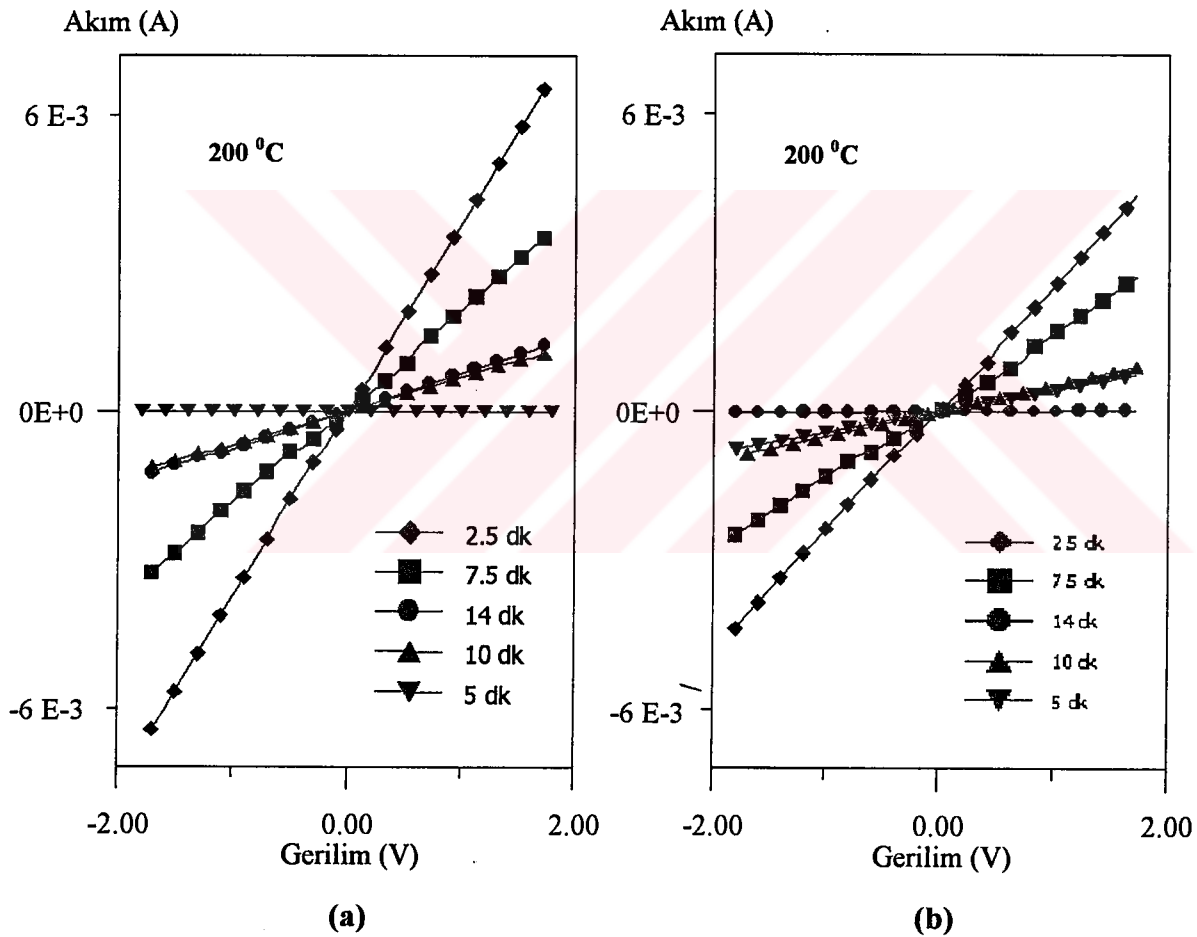
Şekil 3.21. Farklı tavlama sıcaklıkları için In omik kontak direncinin tavlama süresine bağlı değişimi (altı aylık yaşlanma ölçümleri).



Şekil 3.22. Altı aylık yaşlanma ölçümlerine ait I-V grafikleri.

(a) 175 °C (b) 200 °C (c) 225 °C (d) 250 °C

Altı aya kadar yapılan yaşlanma ölçümleri göstermektedir ki, GaTe:In metal-yarıiletken omik yapısı bu süre içerisinde kararlılığını büyük ölçüde korumaktadır. Özellikle en düşük omik kontak direncini üreten, 200 °C ve 2.5 dk'lık optimum proses, altı ay boyunca son derece kararlıdır. Bu proses için, omik kontak direnci $10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ mertebesinde sabit kalmıştır. Şekil 3.23' de GaTe:In yapısının üretimini müteakip alınan I-V karakteristiği ile altı ay sonra alınan I-V karakteristikleri lineer olarak çizilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere GaTe:In yapısının davranışı tamamen omik bir karakter sergilemekte ve 200 °C ve 2.5 dk'lık optimum prosesle üretilen numune en iyi omik davranışı göstermektedir.



Şekil 3.23. GaTe:In yapısının I-V karakteristiği.

(a) Proses günü (b) Altı ay sonra

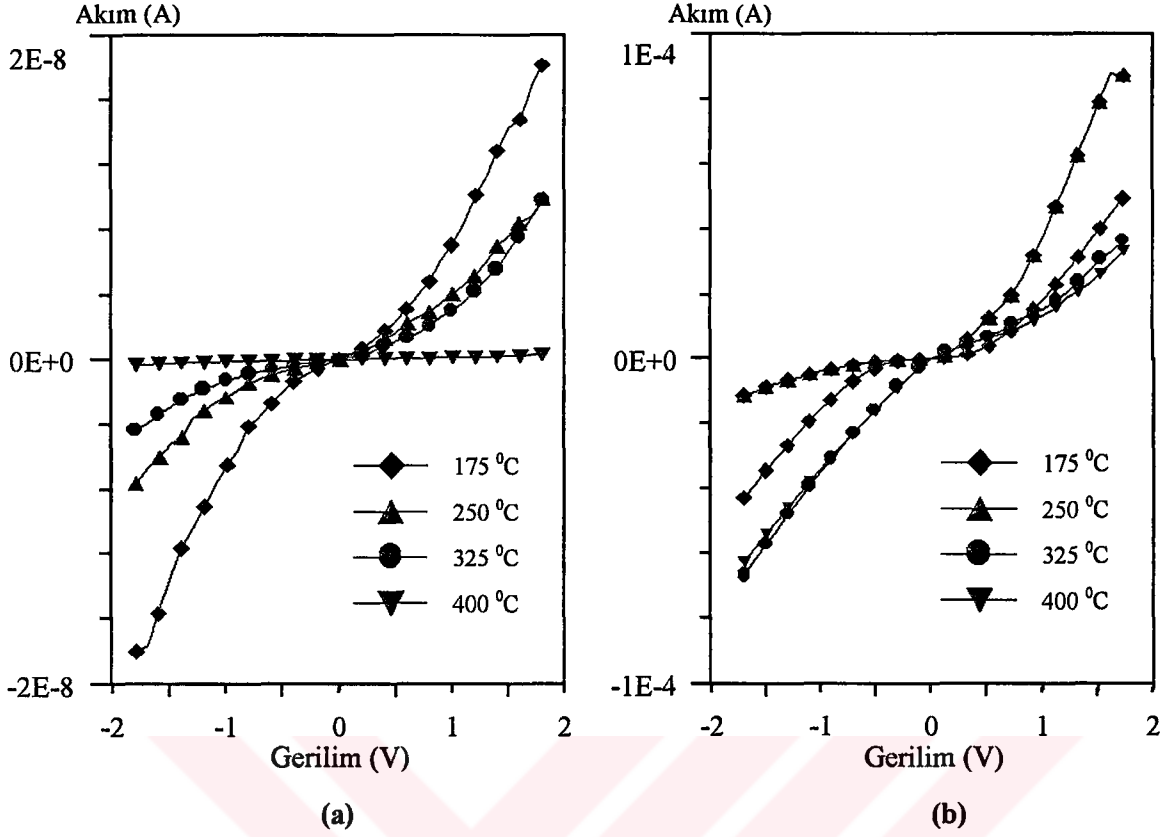
3.4.4. Au, Al, Ag, Au-In Tabanlı Omik Kontak Çalışmaları

GaTe' e omik kontağın optimizasyonunu başarabilmek amacıyla In elementinden başka Au, Ag, Al elementleri ve Au-In alaşımı kullanılarak, oldukça geniş bir sıcaklık aralığı üzerinden (175 °C - 400 °C) tavlama işlemi gerçekleştirilmiş ve *Keithley 610C* elektrometresi ile akım-gerilim karakteristikleri elde edilmiştir.

Kısım 2.2.2.1' de omik kontak yapı elde etmenin başlıca iki yolu olduğunu söylemiş, bunlardan birinin Schottky engel yüksekliği düşük bir yapı oluşturmak suretiyle başarılabilirliğini diğerinin ise elektronların tünelleme yapabilmesine imkan verecek kalınlıkta bir engel oluşturarak sağlanabileceğini göstermiştik. GaTe' e Au, Al, Ag kontağının Schottky engel yüksekliklerini araştırılmış ve bunlardan en düşük engel yüksekliğine sahip yapının $\phi_b=0.485$ eV değeriyle Au kontak olduğunu ileri sürülmüştür (Bose and Pal, 1997). Bu bilgiler ışığında GaTe' e Au kontağın muhtemelen omik bir karakter kazandırması beklenmektedir. Ancak yapılan çalışmalar böyle olmadığını, Au elementinin kontak malzemesi olarak kullanılması durumunda elde edilen yapının doğrultucu karakter gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Farklı tavlama sıcaklıkları için, GaTe:Au kontağın I-V karakteristiği Şekil 3.24.a' da verilmiştir. Bu yapının, hem düz hem de ters beslem durumlarında, çok düşük akımın (yaklaşık 10^{-8} A) geçmesine izin verdiği grafikten görülmektedir. Düz ve ters beslem durumları için geçen akım hemen hemen simetrik görünse bile bunun bir yapının omik karakter göstermesi için yeterli olmadığı bilinmektedir. Çünkü bir kontağın omik karaktere sahip olması için tanımı gereği omik kontak direncinin minimum olması gerekmektedir. GaTe' e Au kontak üzerinde spesifik omik kontak direnci çalışması, yüksek kontak direnci sebebiyle yapılamadı.

6N Ag ile yapılan kontak çalışmasında elde edilen I-V karakteristiği Şekil 3.24.b' de verilmektedir. Ag elementinin Au ve Al elementlerine nispetle daha yüksek akımların (10^{-4} A civarı) geçmesine izin verdiği halde GaTe:Ag yapısı da yüksek kontak direncinden dolayı spesifik omik kontak direnci ölçümlerine izin vermedi (Ag için $\phi_b=0.63$ eV) (Bose and Pal, 1997).

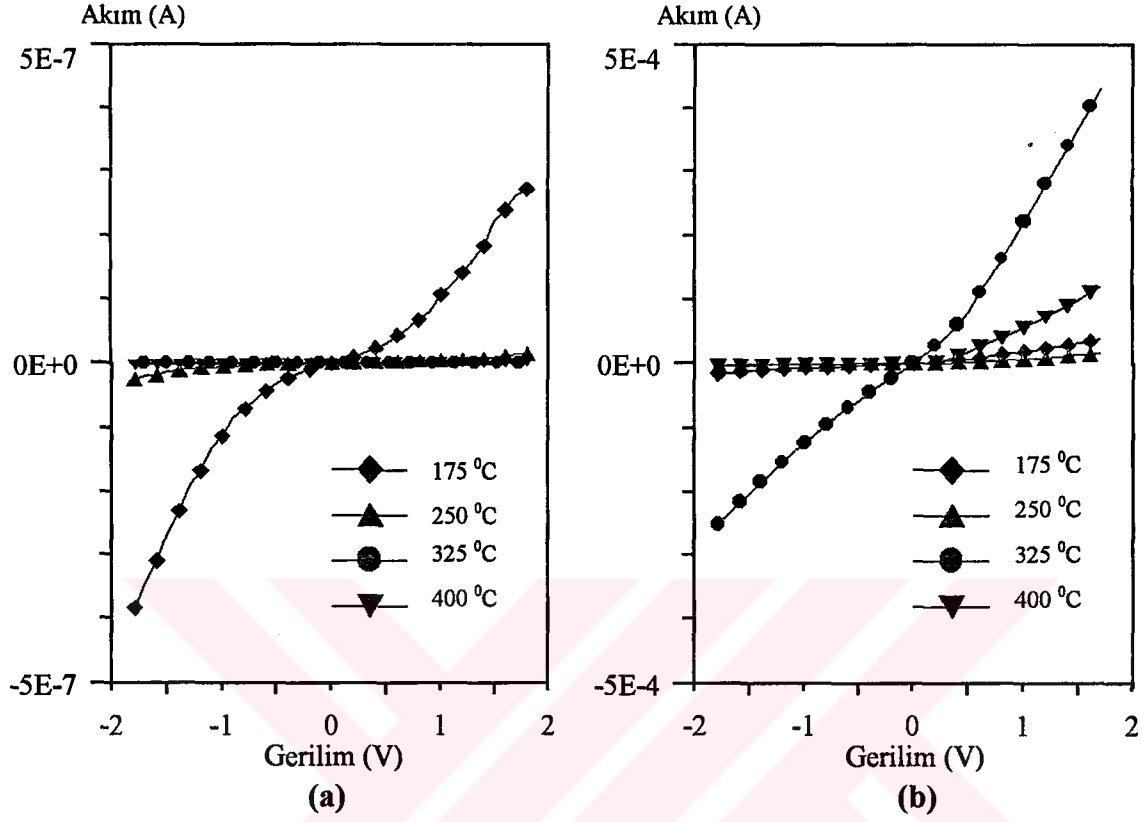


Şekil 3.24. (a) Au (b) Ag Tabanlı Omik Konağın Farklı Sıcaklıklar için I-V Karakteristiği (Tavlama süresi 5 dk' dır).

GaTe' e Al konağın Schottky engel yüksekliği 0.75 eV olarak bilinmektedir (Bose and Pal, 1997). 6N Al ile yapılan kontak çalışmasında elde edilen I-V karakteristiği Şekil 3.25.a' da verilmektedir. Al elementinin Au elementine nispetle daha yüksek akımların (10^{-6} A civarı) geçmesine izin verdiği halde bu yapı da yüksek kontak direncinden dolayı spesifik omik kontak direnci ölçümlerine izin vermedi.

Faz diyagramında Au-In eutectic alaşımının oluşum sıcaklığı 550°C ve mol oranları %38 In, %62 Au olarak verilir (Branders, 1983). Bu alaşımı elde etmek için önce In ve Au hazırlanarak seyreltik HCl ile temizleme işlemi yapıldı. Temizlenen elementler vakum altında daha önce hazırlanan bir tüp içinde 550°C ' de yarım saat kadar ısıtılarak Au-In ötektik (eutectic) alaşımı elde edildi. Bu alaşım kullanılarak elde edilen yapı üzerinde spesifik omik kontak çalışması yapılamadı. Bu durumun, Au atomlarının metal-yarıiletken eklemin arayüzey bölgesine lokalize olarak yapının omik olmasına

izin vermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. GaTe: Au-In kontak için I-V karakteristiği Şekil 3.25.b' de verilmektedir.



Şekil 3.25. (a) Al (b) Au-In Tabanlı Omik Kontakın Farklı Sıcaklıklar için I-V Karakteristiği (Tavlama süresi 5 dk' dır).

3.5. In Tabanlı Omik Kontakların XRD ile Yapısal Karakterizasyonu

3.5.1. Giriş

Omik kontak oluşumunda metalin bir kısmı termal difüzyon yoluyla yarıiletken içerisinde harcanır. Böylece metal-yarıiletken kontak bölgesinde bir alaşımın oluşması beklenmektedir. Bu maksatla GaTe:In omik kontakın arayüzeyinde oluşması beklenen InGaTe₂ bileşiği XRD tekniği ile araştırıldı. Aşağıdaki yapılar üzerinde XRD ölçümleri yapıldı:

1. Üzerinde herhangi bir metalizasyon ve ısıl işlem yapılmamış GaTe,
2. Tavlanmamış GaTe:In yapısı,
3. 200 °C' de 2.5 dk' lık ısıl işleme tabi tutulmuş GaTe:In yapısı,
4. 200 °C' de 7.5 dk' lık ısıl işleme tabi tutulmuş GaTe:In yapısı,
5. 200 °C' de 14 dk' lık ısıl işleme tabi tutulmuş GaTe:In yapısı,

Ölçümlerde kullanılan *RIGAKU* (D-Max 2000) sistemine ait set parametreleri şunlardır:

X-ışını kaynağı: Cu- K Alfa 1 / 30 kV / 30 mA.

Dalgaboyu: 1.54 Å.

Gonyo: RINT2000 Wide angle gonyometer.

İraksama aralığı (Divergence slit): 1 deg.

Saçılma aralığı (Scattering slit): 1 deg.

Geçirme aralığı (Receiving slit): 0.6 mm.

Sayıcı: Sintilasyon sayacı (Scintillation counter).

Tarama modu: Sürekli.

Tarama Hızı: 2 deg./ min.

Tarama adımı: 0.1 deg. /min.

Tarama eksen: 2θ / θ

Tarama aralığı: 20 – 80 deg.

Dönme Hızı: 30 rpm.

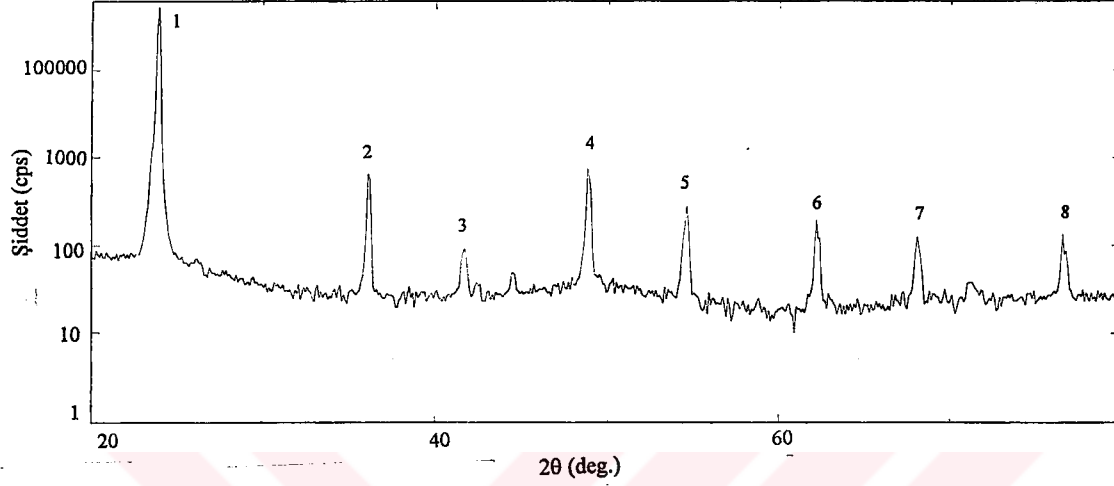
Numune Tutucu: Standart Numune Tutucusu.

Filtre: Kullanılmadı.

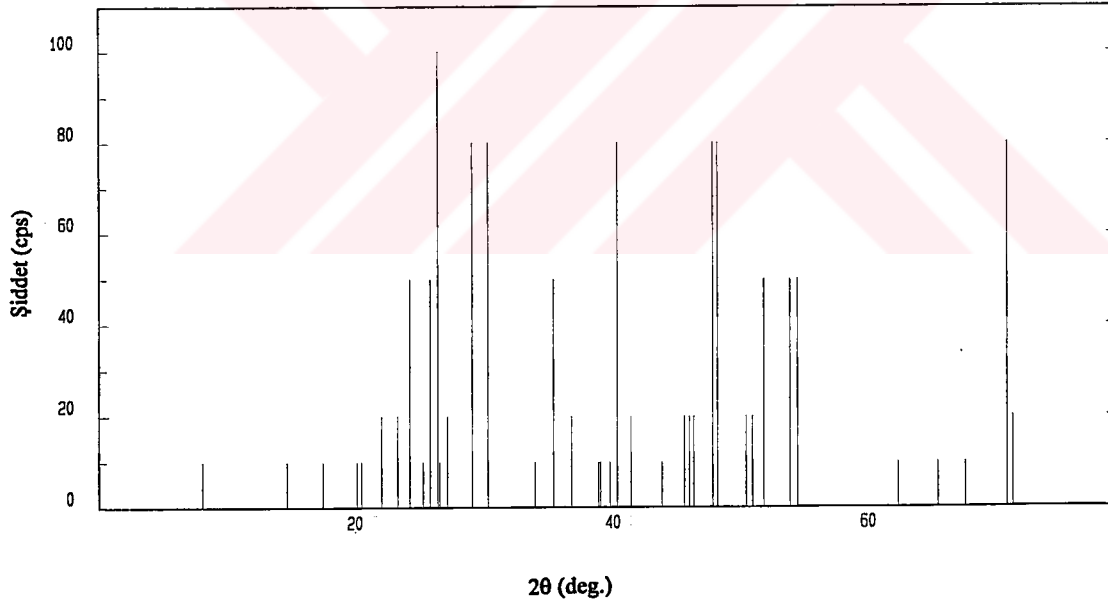
Monokromatör: Otomatik.

3.5.2. GaTe Kristalinin XRD Piklerinin Analizi

Hiçbir metalizasyon ve tavlama işlemine maruz kalmamış GaTe kristali üzerinde yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen pikler Şekil 3.26' da bu piklere ait şiddet ve açı değerleri Tablo 3.8' de görülmektedir.



Şekil 3.26. GaTe kristalinin XRD pikleri.



Şekil 3.27. GaTe bileşiğinin yansıma verdiği açılar (King, 1996).

Tablo 3.8' de 2θ ile gösterilen değerler, ilgili bileşikten kaynaklanan yansıma açılarını vermektedir. d , yansıma düzlemleri arasındaki uzaklıktır. Şiddet ise saniye başına sayma (cps) biriminde verilmektedir.

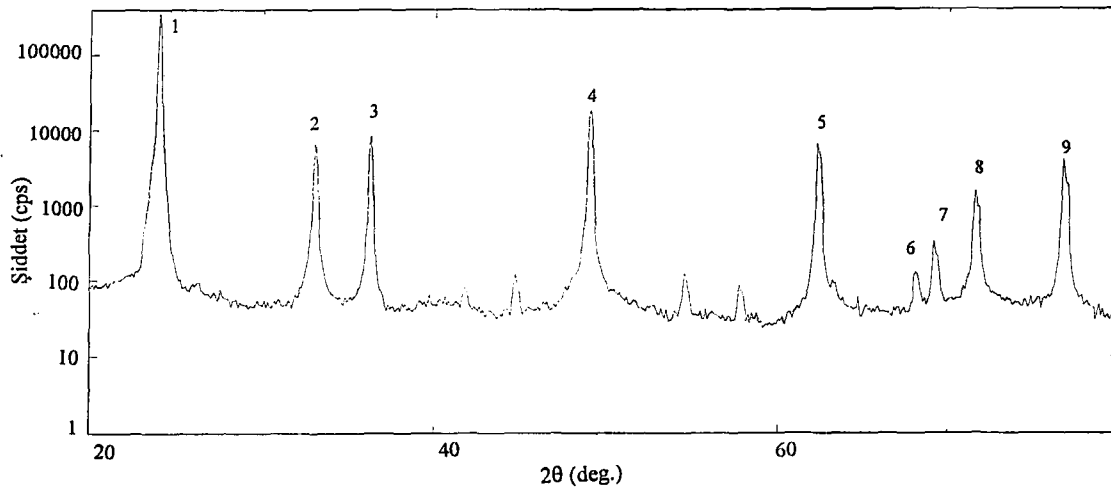
Tablo 3.8. GaTe için XRD piklerinin kimliği.

Pik No:	2 θ (deg.)	d(Å)	Şiddet (cps)	Bileşik
1	23.9	3.72	51650	GaTe
2	36.1	2.48	656	GaTe
3	41.7	2.16	91	GaTe
4	48.8	1.86	748	GaTe
5	54.6	1.67	281	GaTe
6	62.2	1.49	195	GaTe
7	68.1	1.37	126	GaTe
8	76.6	1.24	135	GaTe

Bütün piklerin GaTe tek kristalinin kendi yansıma düzlemlerinden kaynaklandığı sistem tarafından verilmiştir. Ayrıca sistem kütüphanesinden alınan GaTe bileşiğine ait yansıma açıları Şekil 3.27' de verilmektedir (King, 1996). Bu piklere ilişkin yansıma açıları tespit edildikten sonra, GaTe:In yapısının karakterizasyonunda In elementinin katkısıyla elde edilen pikler (InTe, InGaTe₂) daha güvenilir bir şekilde incelenebilecektir.

3.5.3. Tavlanmamış GaTe:In Yapısının XRD Piklerinin Analizi

Tavlama işlemine maruz kalmamış GaTe:In yapısı üzerinde yapılan XRD ölçümlerinden elde edilen pikler Şekil 3.28' de bu piklere ait şiddet ve açı değerleri Tablo 3.9' da görülmektedir.

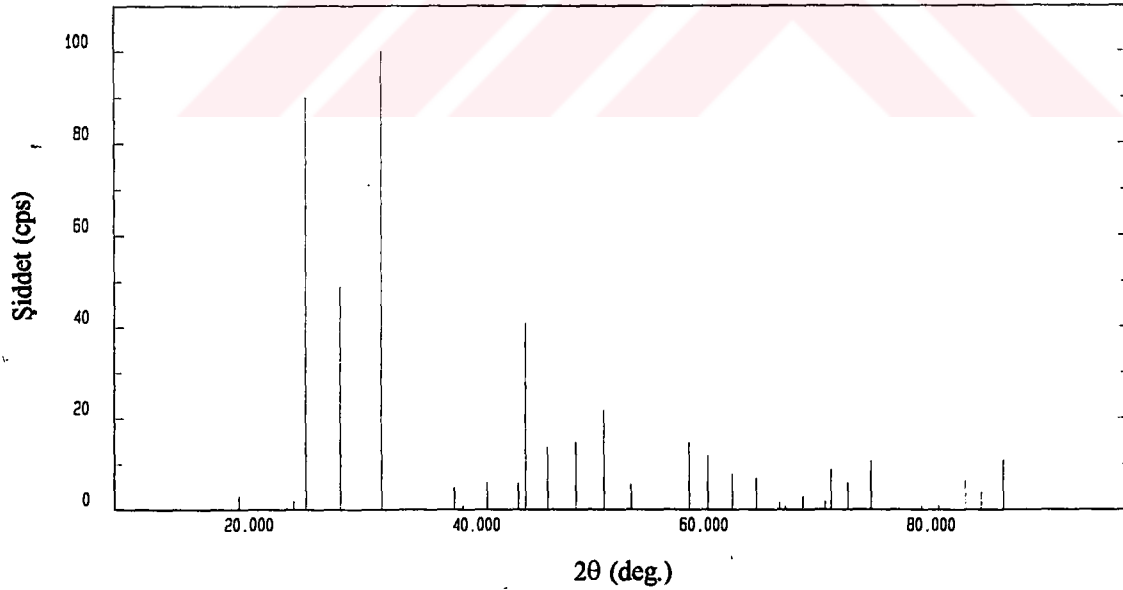


Şekil 3.28. Tavlanmamış GaTe:In yapısının XRD pikleri.

Tablo 3.9. Tavlanmamış GaTe:In yapısı için XRD piklerinin kimliği.

Pik No:	2 θ (deg.)	d(Å)	Şiddet (cps)	Bileşik
1	23.9	3.70	363474	GaTe
2	33.1	2.70	6454	InGaTe ₂
3	36.1	2.47	8508	GaTe
4	48.8	1.85	18600	GaTe
5	62.2	1.48	6565	GaTe
6	68.1	1.37	129	GaTe
7	69.2	1.35	327	GaTe
8	71.6	1.31	1530	InTe
9	76.6	1.24	4024	GaTe

Tavlanmamış GaTe:In yapısında, saf GaTe kristalinin yapısal karakterizasyonunda gözlenmeyen InTe ve InGaTe₂ bileşikleri yansıma vermiştir. Kaplama işleminden sonra bir tavlama işlemi yapılmamakla birlikte In atomlarının yapıya difüze olarak alaşım oluşturdukları görülmektedir. Isıtıcıdan hedefe yönelen In atomlarının yarıiletken yüzeyi ısıtarak, omik yapının oluşması için gerekli olan termal difüzyon sağlanmış olacaktır.

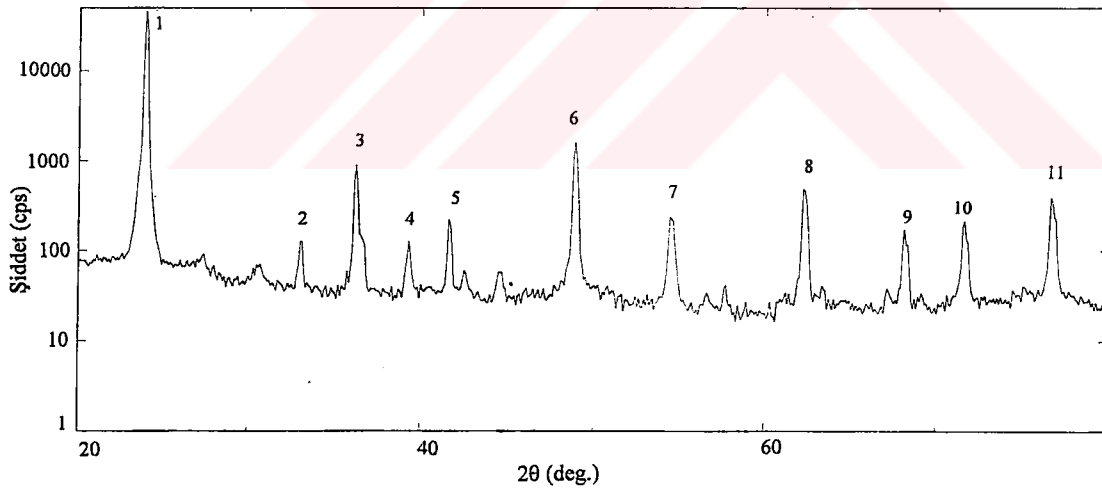
Şekil 3.29. InGaTe₂ bileşiğinin yansıma verdiği açılar (King, 1996).

İki numaralı pikin InGaTe_2 bileşiğine, sekiz numaralı pikin ise InTe bileşiğine ait olduğu, ölçüm sisteminin kütüphanesinden elde edilmiştir. Şekil 3.29' da, InGaTe_2 bileşiğinin yansıma verdiği açılar görülmektedir (King, 1996). Şekilden, InGaTe_2 bileşiğinin en kuvvetli yansıma verdiği açının $2\theta = 33.1$ dereceye karşılık geldiği görülmektedir. Bu bilgi ışığında Şekil 3.28' de görülen iki numaralı pikin InGaTe_2 bileşiğine atfedildi.

3.5.4. 200°C ' de 2.5 dk' lık tavlama için XRD Piklerinin Analizi

200°C ' de 2.5 dk süreyle tavlanan GaTe:In yapısına ait XRD pikleri, Şekil 3.30' da, bu piklerin kimlik bilgileri ise Tablo 3.10' da verilmektedir.

Tablodan, InGaTe_2 bileşiğine ait pik şiddetinde bir azalma olduğu göze çarpmaktadır. GaTe düzlemlerinden yansıyan X-ışını şiddetlerindeki değişimin ise, kristal külçenin homojen olmamasından ve numunenin tutucuya bağlanma pozisyonundan kaynaklanan sistematik bir hatadır. Ayrıca GaTe:In yapısının tavllanmasıyla InTe bileşiğinin oluşma ihtimaliyetinin arttığı da görülmektedir.



Şekil 3.30. 200°C ' de 2.5 dk tavlanan GaTe:In yapısının XRD pikleri.

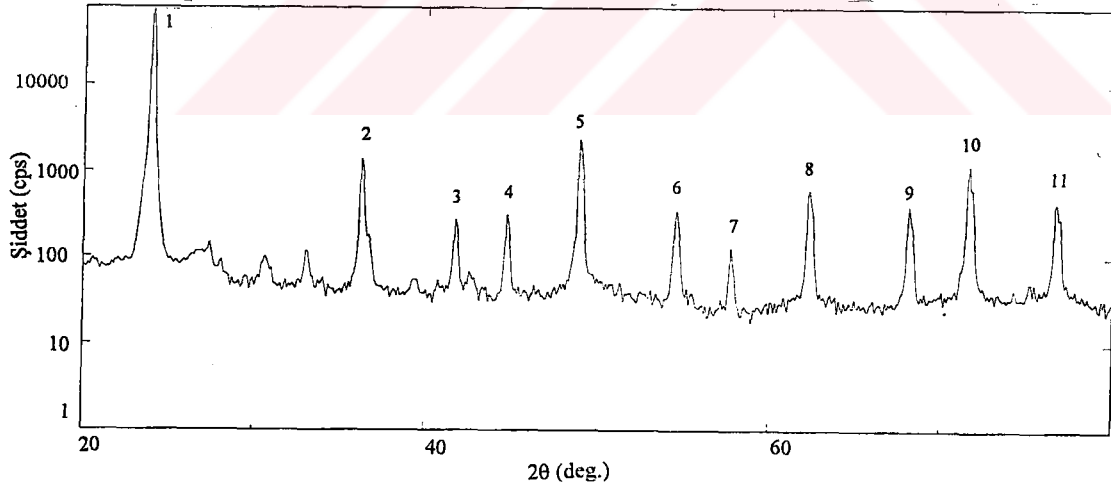
Ancak buradaki pik şiddetlerini veren değerlerin, diğer ölçümlerden elde edilen değerlerle mukayese edilebilmesi için nispi büyüklüklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü her farklı ölçümde aynı bileşik düzlemlerinden alınan yansımalar yukarıda sözü edilen belirsizliklerden dolayı değişmektedir.

Tablo 3.10. 200 °C' de 2.5 dk süreyle tavllanmış GaTe:In yapısı için XRD piklerinin kimliği.

Pik No:	2θ(deg.)	d(Å)	Şiddet (cps)	Bileşik
1	23.9	3.72	45859	GaTe
2	33.1	2.70	124	InGaTe ₂
3	36.1	2.47	901	GaTe
4	39.3	2.29	126	InTe
5	41.6	2.16	222	InTe
6	48.8	1.86	1596	GaTe
7	54.5	1.68	224	InTe
8	62.2	1.48	468	GaTe
9	68.1	1.37	173	GaTe
10	71.6	1.31	215	InTe
11	76.7	1.24	350	GaTe

Bu belirsizlikleri bertaraf etmek için InGaTe₂ bileşiğinin farklı tavlama parametreleri için verdiği pik şiddetlerinin en doğru analizi, bu değerleri bütün ölçümlerde 2θ = 23.9' da en güçlü yansıma veren pik şiddetine oranlayarak vermektir.

3.5.5. 200 °C' de 7.5 dk' lık tavlama için XRD Piklerinin Analizi



Şekil 3.31. 200 °C' de 7.5 dk tavlanan GaTe:In yapısının XRD pikleri.

200 °C' de 7.5 dk süreyle tavlanan GaTe:In yapısına ait XRD pikleri Şekil 3.31' de, bu piklerin kimlik bilgileri ise Tablo 3.11' de verilmektedir. Tavlama süresinin artmasıyla

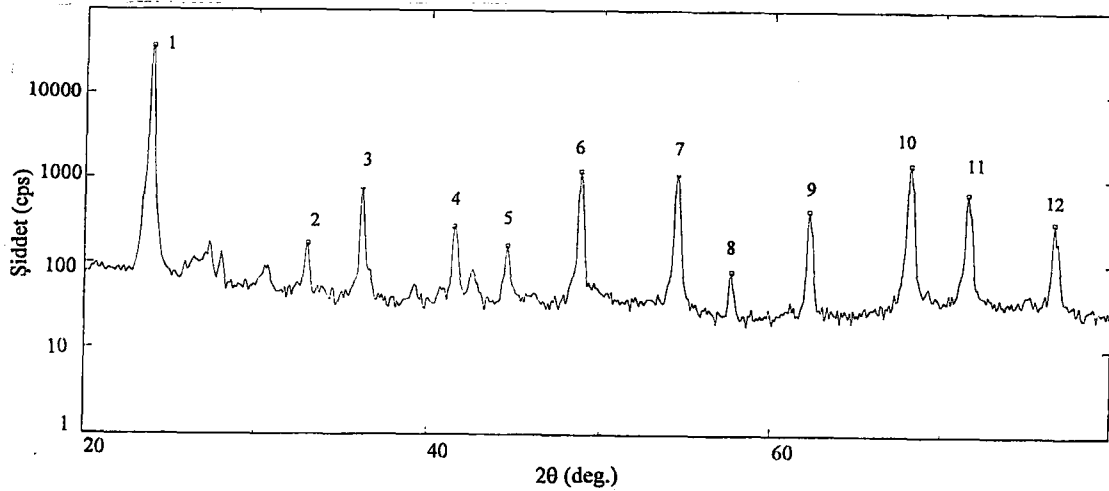
InTe alaşımı daha güçlü yansımalar verirken, InGaTe₂ bileşiğinden gelen piklerde nispi bir artış elde edilmiştir.

Tablo 3.11. 200 °C' de 7.5 dk süreyle tavllanmış GaTe:In yapısı için XRD piklerinin kimliği.

Pik No:	2θ(deg.)	d(Å)	Şiddet (cps)	Bileşik
1	23.9	3.70	74754	GaTe
2	36.1	2.47	1410	InGaTe ₂
3	41.6	2.16	273	InTe
4	44.7	2.02	315	InTe
5	48.9	1.86	2380	GaTe
6	54.5	1.68	347	InTe
7	57.7	1.59	130	InTe
8	62.2	1.48	623	GaTe
9	68.1	1.39	399	GaTe
10	71.6	1.31	1216	InTe
11	76.7	1.24	408	GaTe

3.5.6. 200 °C' de 14 dk' lık tavlama için XRD Piklerinin Analizi

200 °C' de 14 dk süreyle tavlanan GaTe:In yapısına ait XRD pikleri, Şekil 3.32' de, bu piklerin kimlik bilgileri ise Tablo 3.12' de verilmektedir. Tavlama süresinin bu değeri için InGaTe₂ bileşiğinin yansıma şiddetindeki nispi artış devam etmiştir.



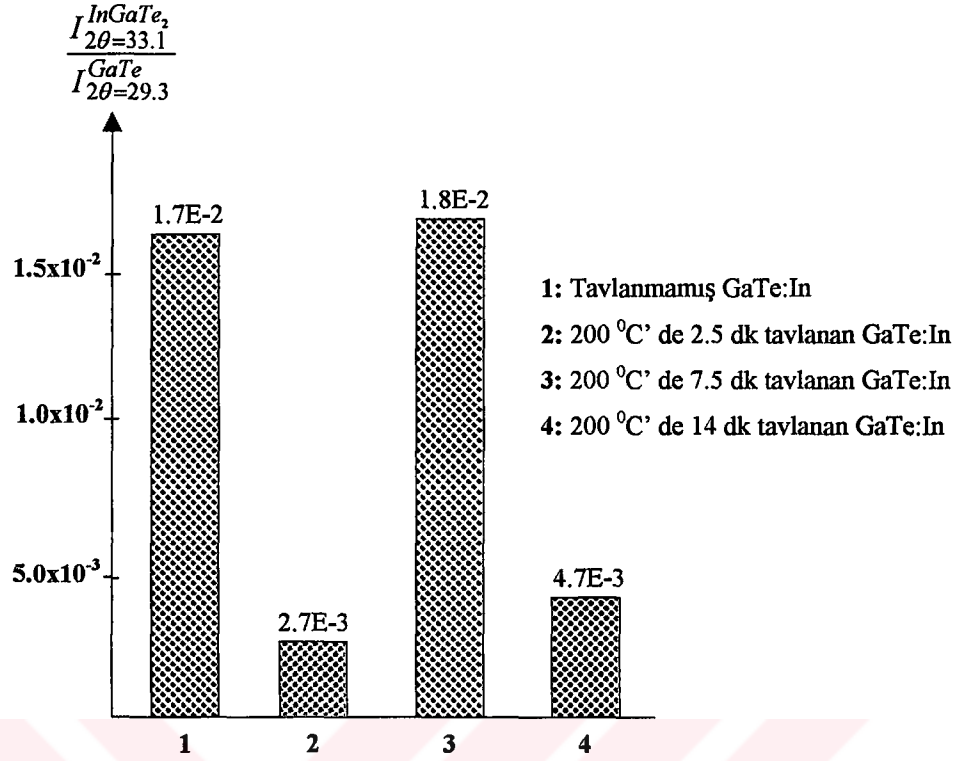
Şekil 3.32. 200 °C' de 14 dk tavlanan GaTe:In yapısının XRD pikleri.

Tablo 3.12. 200 °C' de 14 dk süreyle tavllanmış GaTe:In yapısı için XRD piklerinin kimliği.

Pik No:	2θ(deg.)	d(Å)	Şiddet (cps)	Bileşik
1	23.9	3.72	35990	GaTe
2	33.1	2.71	170	InGaTe ₂
3	36.1	2.48	779	GaTe
4	41.6	2.17	268	InTe
5	44.6	2.03	162	InTe
6	48.8	1.86	1222	GaTe
7	54.5	1.68	1147	InTe
9	62.2	1.49	426	GaTe
10	68.1	1.37	1528	GaTe
11	71.6	1.31	690	InTe
12	76.7	1.24	316	GaTe

3.5.7. Yapısal Karakterizasyonun Sonucu ve Yorumu

Metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşması beklenen InGaTe₂ bileşiğinin oluşma kesri farklı tavlama şartlarına sahip numuneler üzerinde incelendi. InGaTe₂ alaşımı, metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan ve yapının omik bir karakter kazanmasından sorumlu bir yarıiletken bileşiktir. Şekil 3.33' de üzerinde XRD ölçümleri gerçekleştirilen yapılardan elde edilen nispi InGaTe₂ şiddetleri verilmektedir. Burada nispi şiddetten kasıt, 2θ = 33.1 derecede yansıma veren 2 numaralı InGaTe₂ pik şiddetlerinin, 2θ = 29.3 derecede yansıma veren 1 numaralı GaTe pik şiddetine oranıdır. Şekilden görüldüğü gibi, InGaTe₂ alaşımının en küçük oluşma miktarı, 200 °C' de 2.5 dk' lık tavlama işlemi sonucunda elde edilmektedir. Bu tavlama parametreleri, omik kontak optimizasyonu çalışmasında optimum proses şartları olarak tespit edilmişti. GaTe:In omik kontağı için, In film kalınlığının 6 Å' den daha küçük olduğu durumlarda In atomlarının yapı içinde çözünmediği bilinmektedir (Almeida et al., 1998). Kaplama filminin kalınlığı arttıkça, In atomları yapı içinde çözülmeye başlayarak InGaTe₂ alaşımını oluşturacaktır. Bu çalışmada In film kalınlığı 1500-2000 Å arasındadır. Böylece metal-yarıiletken arayüzeyinde bu tavlama parametreleri sonucunda oldukça ince bir InGaTe₂ alaşım tabakası oluşmakta ve bu da yük taşıyıcılarının her iki yönde de rahatça hareket edebilmelerine imkan vermektedir.



Şekil 3.33. Tavlanmamış ve 200 °C' de farklı sürelerde tavlanan GaTe:In numuneleri için InGaTe₂ alaşımının oluşma oranları.

GaTe:In yapısının farklı tavlama parametreleri için de omik bir davranış göstermesine karşın, en düşük omik kontak direncine sahip yapının 200 °C ve 2.5 dk' lık ısıl işlem sonucunda elde edilmesi, arayüzeyde oluşan filmin daha düşük bir kalınlığa sahip olmasıyla açıklanabilir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

III-VI yarıiletken bileşikleri arasında yeralan GaTe, mükemmel tabakalara ayrılabilir katmanlı yapıda kristalleşmektedir (Manfredotti et al., 1975; Irwin et al., 1979). Tabakalar arası bağlar zayıf van der Waals, tabakalar içi bağlar ise güçlü kovalenttir (Augelli et al., 1976; Gousskov et al., 1978b). Bu özellikleri, onların mekanik ya da kimyasal herhangi bir işleme tabi tutulmaksızın yüksek kalitede parlak ve pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesine imkan sağlar. C_{2v} (C_2/m) uzay grubuna sahip olan ve monoklinik yapıda kristalleşen GaTe kristalinin fiziksel özelliklerinden biri de yüksek derecede anizotropiye sahip olmasıdır (Grandolfo et al., 1971). Diğer III-VI yarıiletkenlerden farklı olarak “direct band-gap” özellik gösteren GaTe bu özelliğiyle foton dedektörleri ve optoelektronik devre yapımında kullanım alanına sahiptir (Irwin et al., 1979). Öte yandan band genişliği olarak InSe (1.3 eV) ile GaSe (2 eV) arasında bulunan ve bu özelliğiyle yakın IR bölgede yeralan GaTe (1.67 eV) kristalinden “solar-cell” yapma çalışmaları devam etmektedir. GaTe yarıiletken bileşiği büyütme tekniklerinden bağımsız olarak her zaman p-tipi özellik göstermektedir. Boşluk konsantrasyonu ise 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} civarındadır (Güder, 1999).

Elektriksel karakterizasyon için devre elemanı fabrikasyonu işlemlerinde omik kontak problemleriyle sıkça karşılaşılması, bizi GaTe’ e omik kontakın optimizasyonu üzerine bir çalışmaya itmiştir. Elektriksel karakterizasyon teknikleri, en azından bir omik kontak gereklidir. Bu kristal üzerinde pek çok araştırmacı tarafından elektriksel karakterizasyon amacıyla omik kontak çalışmaları yapılmış olmakla birlikte, bir omik kontak optimizasyon çalışması literatürde bulunmamaktadır.

6N saflıkta Ga ve Te elementleri kullanılarak, Bridgman-Stockbarger tekniğine dayalı programlanabilir doğrudan katılaştırma tekniğiyle büyütülen, GaTe tabakalı tek kristali üzerinde bir dizi omik kontak çalışması yapıldı. Kristal büyütme işlemi ve omik kontak ölçümü için gerekli altyapı, kendi laboratuvar imkanlarımız dahilinde gerçekleştirildi. Transmission Line Method (*Ladder Network*) tekniği kullanılarak yapılan spesifik omik kontak direnci ölçümlerinde kontak malzemeleri olarak In, Au, Al, Ag elementleri ve Au-In alaşımı (%38 In- %62 Au) kullanıldı. Ladder yapı, gölge maske (*shadow mask*)

kullanılarak kristal üzerine transfer edildi. Bu amaçla elektrokimyasal ve fotolitografik teknikler kullanılarak bir gölge maske teknolojisi geliştirildi.

GaTe tabakalı yarıiletken bileşiği üzerinde yürütülen omik kontak çalışmalarında, In esaslı omik kontak için tavlama sıcaklığı 175 °C - 250 °C arasında 25 °C' lik adımlarla, tavlama süresi de 2.5 dk-14 dk arasında 2.5 dk' lık adımlarla değiştirilirken diğer kontak malzemeleri için tavlama işlemi daha geniş bir sıcaklık aralığı üzerinden (175 °C – 400 °C) yapıldı. En düşük spesifik omik kontak direnci, In elementi için 200 °C ve 2.5 dk tavlama şartlarıyla $2.5 \pm 1.4 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ olarak belirlendi. Diğer kontak malzemeleri yüksek kontak direnci sebebiyle omik kontak direnci ölçümlerine izin vermezken, bu elementlerden metal-GaTe yapıya bir tek In elementinin omik karakter kazandırdığı anlaşıldı. Omik kontak işleminde, düşük tavlama sıcaklığı ve süresi kullanmak arzu edilen durumdur. Çünkü tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça malzemenin elektriksel özelliklerinde ciddi değişimler gözlenebilmektedir (Shigetomi et al., 1998a). Bundan dolayı GaTe:In omik kontak yapısı için 200 °C ve 2.5 dk' lık tavlama işlemi optimum proses şartları olarak kabul edildi.

Metal-yarıiletken kantağın kararlılığı gerek karakterizasyonda gerekse devre elemanı fabrikasyonunda çok büyük öneme sahiptir. Bu amaçla altı aya kadar yaşlanma ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar, elde edilen yapıların bu periyot içerisinde ciddi bir bozulmaya uğramadığını, özellikle de en iyi proses olarak elde edilen 200 °C ve 2.5 dk' lık tavlama şartlarına sahip numunenin, bu periyot içinde yine en kararlı yapı olduğunu ortaya koymuştur.

Farklı tavlama şartları kullanılarak hazırlanan GaTe:In omik kontakları için XRD tekniğiyle yapılan yapısal karakterizasyon çalışmasında, metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşması beklenen InGaTe₂ alaşımına ait en düşük pik değerinin, optimum proses şartları olarak belirlenen 200 °C' de 2.5 dk süreyle tavllanmış yapıda elde edildiği gözlemlendi.

Numune karakterizasyonunda, büyütülen külçe kristalin homojen olmaması (*non-homogen bulk*) ölçüm hata payının artmasına neden olmaktadır. Bu amaçla tek kristal büyütmede, daha homojen ve tekrarlanabilir külçe kristaller elde etme yönünde daha

sistematik bir çalışma yapılmalıdır. Omik kontak oluşturmada başka elementlerin de test edilmesi gerekmektedir. Bu elementlerden bazılarının (Ni, Cr, Ni-Cr (%80- %20), Mo, Ti, Co, Er) termal buharlaştırma ile metalizasyonu mümkün olmadığından, cıçlama (*sputtering*) yöntemi kullanılmalıdır. Ayrıca GaTe'e In omik kontağın, kolay deforme olması sebebiyle farklı In alaşımları kullanmak suretiyle metalizasyonun fiziksel mukavemeti artırılmalıdır. GaTe tabakalı kristali üzerinde yürütülecek farklı omik kontak çalışmalarında kontak bölgesinin yapısal karakterizasyonunda kullanılan XRD ölçümleri daha etkin bir şekilde kullanılmalıdır.



5. REFERANSLAR

Abay, B., 1994, TlInSe_2 ve TlGaSe_2 (Ternary) Yarıiletken Bileşiklerinin Büyütülmesi ve Bazı Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).

Almeida, J., Berger, J. and Margaritondo, G., 1998, J. Appl. Phys, 84, 1990.

Antonangeli, F., Balzarotti, A., Doni, E., Girlanda, R., Grasso, V. and Piacentini, M., 1981, Physica B, 105, 59.

Augelli, V., Manfredotti, C., Murri, R., Piccolo, R., Rizzo, A. and Vasaneli, L., 1976, Solid State Commun., 21, 575.

Blasi, C. D., Galassini, S., Manfredotti, C., Micocci, G. and Tepore, A., 1978, Lettere Al Nuovo Cimento, 23, 395.

Blood, P. and Orton, J. W., 1992, The Electrical Characterization of Semiconductors, Academic Press Ltd., London.

Bose, D. N. and Pal, S., 1997, Phil. Mag. B., 75, 311.

Boylestad, R. and Nashelsky, L., 1994, Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, M.E.B. Yayınevi, Ankara.

Branders, E. A., 1983, Smithells Metals Reference Book, Butterworth & Co Ltd., England, 11, 77.

Brebner, J. L., Fischer, G. and Mooser, E., 1962, J. Phys. Chem. Solids, 23, 1417.

Brillson, L. J., 1993, Contacts To Semiconductors, Noyes Publications, New Jersey.

Camassel, J., Merle, P. and Mathieu, H., 1980, Phys. Stat. Sol. (b), 99, 309.

Domaniç, F., 1982, Modern Üniversite Fiziği, Çağlayan Yayıncılık, İstanbul.

Durlu, T. N., 1992, *Katıhal Fiziğine Giriş*, Ankara Ün., Ankara.

Efeoğlu, H., Coşkun, C., Karacalı, T., Aydoğan, Ş., Yoğurtçu, Y. K., 2000, *Proceeding of National Instruments Conference on Measurement and Automation, NIWeek 2000.*

Erdik, E. ve Sarıkaya, Y., 1989, *Temel Üniversite Kimyası*, Hacettepe TAŞ Yayıncılık, Ankara.

Ferendeci, A. M., 1991, *Physical Foundations of Solid State and Electron Devices*, McGraw-Hill Inc., New York.

Ferry, D. K., 1990, *Gallium Arsenide Techonology*, Howard W. Sams & Company, Vol: 2, USA.

Fielding, P., Fischer, G. and Mooser, E., 1959, *J. Chem. Solids*, 8, 434.

Gezci, S., 1992, *Katıhal Fiziği*, İ.T.Ü., İstanbul.

Girlanda, R., Grasso, V. and Mondio, G., 1985, *Solid State Commun.*, 57, 253.

Gousskov, L., Gousskov, A. and Girault, B., Lemos, V., May, W. and Sampaio, H., 1977, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 39, 65.

Gousskov, L., Gousskov, A., 1978a, *Solid State Communications*, 28, 99.

Gousskov, L., Gousskov, A. and Girault, B., 1978b, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 47, 195.

Gousskov, L., Gousskov, A., 1979, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 51, K213.

Grandolfo, M., Gratton, E., Anfosso, F. S. and Vecchia, P., 1971, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 48, 720.

Grasso, V., Mondio, G., Pirrone, M. A., and Saitta, G., 1975, *J. Phys. C*, 8, 80.

- Güder, H. S.**, 1999, GaTe, GaTe:Er ve GaTe:Cu Yarıiletkenlerinin Büyütülmesi, Elektriksel ve Optik Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış).
- Gürbulak, B.**, 1992, Üçlü (Ternary) CuInSe₂ Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum (Yayınlanmamış)
- Immanieh, M.**, 1986, CuInSe₂ : Growth, Electrical Properties and Fabrications of Indium Diffused Homojunctions, MSc Thesis (Unpublished), Salford Un., England.
- Irwin, J. C.**, Clayman B. P. and Mead D. G., 1979, Phys. Rev. B, 19, 2099.
- King, M.**, 1996, International Centre for Diffraction Data-Alphabetical Index, U.S.A.
- Lal, K.**, 1982, Synthesis, Crystal Growth and Characterization, North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Lieth, R. M. A.**, 1977, Preparation and Crystal Growth of Materials with Layered Structures, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Look, D. C.**, 1987, IEEE-488 Electron Device Letters, 4, 162.
- Mak, L. K.**, Rogers, C. M. and Northop, D. C., 1989, J. Phys. E: Sci. Instrum., 22, 317.
- Mancini, A. M.**, Manfredotti, C. and Rizzo, A., 1974, J. Crys. Growth, 21, 187.
- Manfredotti, C.**, Murri, R., Rizzo, A., Vasanelli, L., and Micocci, G., 1975, Phys. Stat. Sol. (a), 29, 475.
- Margaritondo, G.**, 1999, Rep. Prog. Phys., 62, 765.
- Neamen, D. A.**, 1992, Semiconductors Physics and Devices, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.

- Önel, K.** ve Aksoy, T., 1985, Malzeme Bilgisi, Dokuz Eylül Ün. Müh. Fak. Yayınları, İzmir.
- Pal, S.** and Bose, D. N., 1996, Solid State Commun., 97, 725.
- Pearson, W. B.**, 1964, Acta Cryst., 17,1.
- Pellicer-Porres, J.**, Manjon, F. J., Segura, A. and Munoz, V., 1999, Phys. Rev. B, 60, 8871.
- Robertson, J.**, 1979, J. Phys. C: Solid State Phys., 12, 4777.
- Semiletov, S. A.** and Vlasov, V. A., 1963, Sov. Phys. Cryst., 8, 704.
- Shigetomi, S.**, Ikari, T. and Nakashima, H., 1998a, Jpn. J. Appl. Phys., 37, 3282.
- Shigetomi, S.**, Ikari, T. and Nishimura, H., 1998b, J. Luminescence, 78, 117.
- Shih, I.**, Champness C. H. and Shahidi A. V., 1986, Solar Cells, 16, 27.
- Singh, J.**, 1995, Semiconductor Optoelectronics, McGraw-Hill International Editions, New york.
- Smith, R. A.**, 1978, Semiconductors, Cambridge University Press, Second Edition, London.
- Taylor, R. A.** and Ryan, J. F., 1987, J. Phys. C: Solid State Phys., 20, 6175.
- Wan, J. Z.**, Brebner, J. L., Leonelli, R., Zhao, G. and Graham, J. T., 1992, Phys. Rev. B, 48, 5197.
- Wan, J. Z.**, Brebner, J. L. and Leonelli, R., 1995, Phys. Rev. B, 52, 16561.
- Wan, J. Z.**, Brebner, J. L. and Leonelli, R., 1996, Phys. Rev. B, 53, 15413.
- Wan, J. Z.**, Pollak, F. H., Brebner, J. L. and Leonelli, R., 1997, Solid State Commun., 102, 17.

Zeren, M. A., 1997, Elektrokimya, Birsen Yayınları, İstanbul.

Ziel, A., 1968, Solid State Physical Electronics, Prentice-Hall International Inc.,
Minnesota.

