

**YÜKSEK SICAKLIK ÜSTÜNİLETKENLERİNDEKİ  
ÖZGÜN JOSEPHSON EKLEMLERİNİN  
TÜNELLEME KARAKTERİSTİĞİ**

**PROJE NO: TBAG-2031 (101T052)**

**Yrd. Doç. Dr. LÜTFİ ÖZYÜZER**

**Arş. Gör. CİHAN KURTER**

**Arş. Gör. MEHMET EĞİLMEZ**

**Arş. Gör. AYLİN GÜNEL**

**Ekim 2004**

**İZMİR**

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri üzerine özgün Josephson eklemleri hazırlanarak düşük sıcaklıklarda karakterize edilmiştir. Özgün Josephson eklemlerinden oluşan mesa yapı dizileri TÜBİTAK tarafından desteklenen TBAG-2031 nolu projenin kısmı desteği ile İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümünde fotolitografi ve iyon demeti dağlama yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Düşük sıcaklıklardaki karakterizasyonu Argonne National Laboratory, Malzeme Bilimi, Amerika Birleşik Devletlerinde yapılmıştır. Katkılarından dolayı TÜBİTAK ve ABD Enerji Bakanlığına teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  kristalleri büyüten D.G. Hinks ve C. Kendziora ile tartışmalarla yol gösteren J.F. Zasadzinski ve K. E. Gray'e minnettarız. TÜBİTAK'ça sağlanan bu kısmı destek ile İYTE Fizik Bölümünde Aylin Günel (şimdi İstanbul Teknik Üniversitesinde doktora öğrencisi) ve Mehmet Eğilmez (şimdi University of Alberta, Kanada'da doktora öğrencisi) M.S. tezlerini tamamlamışlardır ve Cihan Kurter M.S. (Illinois Institute of Technology'de Doktora bursu kazandı) çalışmasını tamamlamak üzeredir.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>1. Bölüm</b>	
1.1 Giriş.....	1
<b>2. Bölüm</b>	
2.1 Bi-2212 Tek Kristalleri .....	6
2.2 Mesa Üretimi .....	8
<b>3. Bölüm</b>	
3.1 Optik Mikroskopu Sonuçları .....	11
3.2 Atomik Kuvvet Mikroskopu Ölçümleri .....	19
3.3 Nokta Kontak Tünellemesi Sonuçları .....	22
<b>4. Bölüm</b>	
4.1 Tartışma.....	38
<b>5. Bölüm</b>	
5.1 Yararlanılan Kaynaklar .....	39

## ÖZET

Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin, üstüniletkenlik mekanizmasının anlaşılması için çok büyük emek harcanmaktadır. Deneysel tekniklerde biri olan tünelleme spektroskopisi (üstüniletken-yalıtkan-normal metal (SIN) ve üstüniletken-yalıtkan-üstüniletken (SIS)), elektronların çiftlenme mekanizması hakkında önemli bilgiler verir. Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin büyük anisotropisi ve aşırı kısa koherens uzunluğu sebebiyle hala tekrarlanabilir düzlemsel tünel eklemler üretilmemiştir. Kristal yapılarının kompleks olmasına karşın, bütün yüksek sıcaklık üstüniletkenleri bazı katmanları Cu ve O dan oluşan kare örgülerden oluşur. Üstüniletkenlik bu  $\text{CuO}_2$  düzlemlerdeki kuvvetli etkileşen elektronlardan kaynaklanırken birim hücredeki diğer katmanlar pasif boşluk doldurucular veya yük depoları gibi davranır. Bu mükemmel katmanlı yapı kullanılarak,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri veya c-exseni boyunca büyütülmüş incefilmleri kullanılarak mesa yapılar üretilbilir ve bunlar özgün Josephson eklemleri olarak isimlendirilir. Bu çalışmada, fotolitografi ve Argon iyon demeti milling yöntemi ile  $10 \times 10$  mikrometre ve  $20 \times 20$  mikrometre boyutlarında  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri üzerine özgün Josephson eklemleri hazırlanmıştır. Elde edilen eklemlerin, geniş bir sıcaklık aralığında (4.2-300 K) akım-gerilim ve tünelleme iletkenliği ölçülmüştür. Bir SIN eklemin tünelleme iletkenliği durum yoğunluğu ile orantılı olduğundan, SISISI... eklemleri serisinde de bu durum yoğunluklarının birleştirilmesinden oluşur. Özgün Josephson eklemlerinin tünelleme iletkenliğide sonuçta, incelenen üstüniletkenin durum yoğunluğunun spektral özelliklerini (örneğin keskin sankiparçacık (quasiparticle) pikleri ve “dip” ve “hump”) göstermesi gerekir. Bu özellikler optimum doping yapılmış  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  örnekler için incelenmiş ve yasak enerji aralığının ve Josephson akımının dopinge bağımlılığı bulunarak SIN ve SIS ile elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Özgün Josephson eklemleri ve SIS lerin karşılaştırılması sonucunda tamamen farklı karakteristiklere sahip oldukları görülmüştür. Bu özelliklerin özgün Josephson eklemlerinde ısınma ve sankiparçacık enjekte edilmesi ile açıklanmıştır.

### Anahtar Sözcükler

Yüksek Sıcaklık Üstüniletkenler; Tünelleme Spektroskopisi; Josephson Eklemleri; Durum Yoğunluğu; Yasak Enerji Aralığı.

## ABSTRACT

There have been enormous efforts to understand the mechanism of superconductivity in high temperature superconductors. One of the experimental techniques, tunneling spectroscopy (Superconductor-Insulator-Normal metal (SIN) and SIS) gives valuable information about pairing mechanism. Because of large anisotropy and the extremely short coherence lengths of the high temperature superconductors, reproducible planar tunnel junctions are still far away from reality. Although their crystal structures are complex, all high temperature superconductors contain some crystal layers consisting of only Cu and O atoms in a square lattice. Superconductivity originates from strongly interacting electrons in these  $\text{CuO}_2$  planes while the other structural components in the unit cell serve as passive spacers or as charge reservoirs. Using these perfect layered structures with a very small lateral size, stacked series arrays of mesas can be fabricated on the surfaces of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  single crystals or epitaxially grown c-axis thin films and these are called intrinsic Josephson junctions. In this study, intrinsic Josephson junctions of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  single crystals have been prepared by photolithography and Argon ion beam milling technique. Current-voltage characteristics and tunneling conductance of the junctions have been measured over a wide temperature range (4.2 - 300 K). Since tunneling conductance of SIN junction is proportional to the density of states, series of SISISI... junctions are actually convolution of these density of states. Tunneling conductance in intrinsic Josephson junctions reflect the spectral properties of the density of states of superconductor under examination, such as quasiparticle peaks (Energy Gap), dip and hump. These properties have been investigated for optimally doped samples of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  and compared to the SIS junctions. The comparison of IJJ and SIS suggest that the markedly different characteristics of IJJ are a consequences of nonequilibrium effects and are not intrinsic quasiparticle features.

### Keywords

High Temperature Superconductivity; Tunneling Spectroscopy; Josephson Junctions; Density of States; Energy Gap

# I. BÖLÜM

## 1.1 Giriş

1911 de Hg'nin elektriksel direncinin sıvı helyum sıcaklığında aniden sıfıra düşmesinin Kammerlingh Onnes tarafından gözlenip, bu malzemenin üstüniletken özellikler gösterdiğinin anlaşılmasından sonra birçok araştırmacı daha yüksek kritik sıcaklığa sahip üstüniletkenler bulmaya yönelmiştir. 1980 lerin ortasında, bilinen en yüksek kritik sıcaklığa sahip üstüniletken olarak Nb<sub>3</sub>Ge (T<sub>c</sub>= 23 K) gösteriliyordu. Bazı teorik araştırmacılar, herhangi bir üstüniletken malzeme için ulaşılabilecek maksimum kritik sıcaklığın değerini yaklaşık 30 K olarak hesaplamışlardı, fakat deneysel sonuçlar çok daha yüksek sıcaklıklarda üstüniletken faza geçebilecek malzemelerin varlığını ispatlıyordu. 1986 da seramik bir malzeme olan La<sub>2-x</sub>Ba<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> (LBCO) bileşiğinde üstüniletkenliğin keşfiyle üstüniletkenlikte yeni bir dönem açıldı (Bednorz 1986). Kritik sıcaklığı 36 K olan bu malzemenin ortaya çıkarılmasının önemi sadece maximum kritik sıcaklığının kayda değer bir şekilde yüksek olmasından kaynaklanmıyordu, lantanyum-baryum-bakır-oksit bileşiği aynı zamanda sentezlenen ilk cuprate idi. Bakır oksit üstüniletkenleri olarak da adlandırılan bu kategorideki malzemelerin keşfinden önce bilinen tüm üstüniletkenler metaldiydi. Seramik malzemeler ise normal fazda iken yalıtkan özellikler gösterdiklerinden üstüniletken faza sahip olmalarına ihtimal verilmiyordu. 1987 yılında başka bir cuprate olan yitrium-baryum-bakır-oksit YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) bileşiği sentez edildi. 93 K de üstüniletken hale geçebilen YBCO nun kritik sıcaklığının sıvı azotun kaynama noktasından çok daha yüksek oluşu bu alanda çalışanlar için çok çarpıcı bir özellik olmuştur. Üstüniletkenler belirli bir sıcaklığın altında üstüniletkenlik özellikleri gösterdiklerinden soğutma işlemi zor bir şekilde yapılmaktadır. YBCO nun keşfi, sıvı heliuma göre daha kolay ulaşılabilen daha güvenli ve daha etkili bir soğutucu olan sıvı nitrojeni kullanılabilir kılmıştır. YBCO dan sonra bizmut türevi iki yüksek sıcaklık üstüniletkeni (YSÜ) daha türetilmiştir, bunlar: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+x</sub> (Bi-2212) ve Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (Bi-2223) ve kritik sıcaklıkları sırasıyla 93 K ve 110 K dir. Çok kısa bir zaman sonra kritik sıcaklığı 125 K e kadar uzanan Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (Tl-2223) bileşiği elde edilmiştir. İlk sentezi 1993 yılında gerçekleştirilen civa tabanlı HgBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8+x</sub> bileşiği şu anda bilinen en yüksek T<sub>c</sub> ye sahip

YSÜdür, optimum doping yapılmış halde kritik sıcaklık değeri yaklaşık 135 K dolayındadır ve bu değer yüksek basınç altında ( $3 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> = 300 000 atm) 160 K ne hatta üstüne çıkarılabilmektedir.

2001 Yılında keşfedilen MgB<sub>2</sub>'nin 39 K olan geçiş sıcaklığı üstüniletkenliğe yeni bir ivme kazandırmıştır (Nagamatsu, 2001). Üstüniletkenlik mekanizmasının klasik BCS tipi fonon destekli olduğunun bulunmasından sonra uygulama alanında tel yapma çalışmaları başlatılmıştır (Eğilmez, 2004).

YSÜlerin karmaşık mekanizması araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Daha önce sözü edildiği gibi bu malzemeler, içerdikleri elementlerin kompozisyonuna ve örgü yapılarına göre farklı özellikler kazanırlar. Oldukça kompleks bir yapıya sahip olan tüm bakır oksit üstüniletkenlerinin kristal yapısı temelde oksijen atomunun modifikasyonlarına bağlı olarak perovskite örgü yapısına (AXB<sub>3</sub>) dayanır. Perovskite yapıyı oluşturan elementlerin valans elektronları toplamı sıfır olduğundan bu bileşikler yalıtkan özelliği gösterirler, YSÜ bileşiklerinin bu özelliği göstermemelerinde oksijen atomları kritik bir rol oynar. Örneğin YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) bileşiğinin birim hücresi eksik oksijenli üç perovskite dizisinden meydana gelmiş gibi düşünülebilir, bu durum elektronik açıdan nötrlüğü kaldırarak malzemenin üstüniletken özellikler göstermesini sağlar.

Kristal örgüsünde birden fazla element içeren YSÜler çok katmanlı bir yapıya sahiptirler. Bu çok tabakalı yapı YSÜlerin anizotropik özelliklere sahip olmasına neden olur. Örneğin BSCCO için c eksenini boyunca uzanan kritik akım bakır oksit tabakalarına paralel eksenindeki kritik akıma oranla 1000 kat daha küçüktür. Yine anizotropik olduğu kabul edilen elektriksel iletkenliğin ab ekseninde, c eksenine oranla 1000 kat daha büyük olduğu söylenebilir.

YSÜlerin keşfinden önce üstüniletkenliğin doğası BCS teorisiyle çok iyi bir şekilde açıklanabiliyordu. 1986da ilk defa BCS ile özellikleri ifade edilemeyen bir malzeme sentezlenince araştırmacılar yeni teoriler ortaya atmak zorunda kalmışlardır. Henüz hiç birisi genel olarak kabul görmemesine rağmen YSÜlerin üstüniletkenlik mekanizmalarının anlaşılabilmesi için birçok deneysel teknik geliştirilmiştir; bu tekniklerin en önemlilerinden birisi SIS (üstüniletken-yalıtkan-üstüniletken) tünelleme spektroskopisidir (Ozyuzer, 2000). Bu metod sayesinde yasak enerji aralığı ( $\Delta$ ), durum yoğunluğu (DOS) ve elektronların

çiftlenme mekanizmaları gibi üstüniletkenliğe ait temel özellikler hakkında ayrıntılı bilgi elde edilebilir. Düşük sıcaklık üstüniletkenleriyle hazırlanan düzlemsel eklemlerin, SIN (üstüniletken-yalıtkan- normal metal) ve SIS tünelleme spektroskopileri, elektron-fonon etkileşmesiyle meydana gelen Cooper çiftlerinin BCS teorisiyle açıklanmasında önemli bir rol oynamıştır. Kararlı bir eklem oluşturmak düşük sıcaklık üstüniletkenlerinde daha kolay bir işlem olduğundan bu malzemeler tünelleme spektroskopisi için YSÜlere göre daha elverişlidir. YSÜlerin aşırı kısa koherens uzunluğu c eksenini boyunca tünelleme yapılmasını zorlaştırmaktadır, çünkü tünel bariyerden koherens uzunluğu kadar uzakta düzenli bir üstüniletken faza gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca birçok tabakadan meydana gelen YSÜler yüksek anizotropi göstermeleri ve kalın yalıtkan yüzeyleri sebebiyle tünelleme spektroskopisi için düşük sıcaklık üstüniletkenlerine oranla dezavantajlıdır. Bununla birlikte YSÜlerin alışılmışın dışındaki anizotropik kristal ve elektronik yapısı araştırmacılara farklı ufuklar açmıştır. Birim hücredeki c eksenini uzunluğunun a ve b eksenlerine göre 3-5 kat daha büyük olmasının yanısıra normal iletkenlik durumunda  $\rho_c / \rho_{ab}$  nin  $10^3$ - $10^5$  oranında olmasından yararlanılarak sadece YSÜlerine özgü olan ve çeşitli kristal yönelimlerine bağlı olarak bicrystal grain boundary, step edge grain boundary, biepitaxial grain boundary (Gross, 1994) eklemler oluşturulmuştur. Tüm bu eklem tiplerine ek olarak son zamanlarda özgün Josephson eklemleri elde edilmiş ve bu konudaki çalışmalar hızlandırılmıştır.

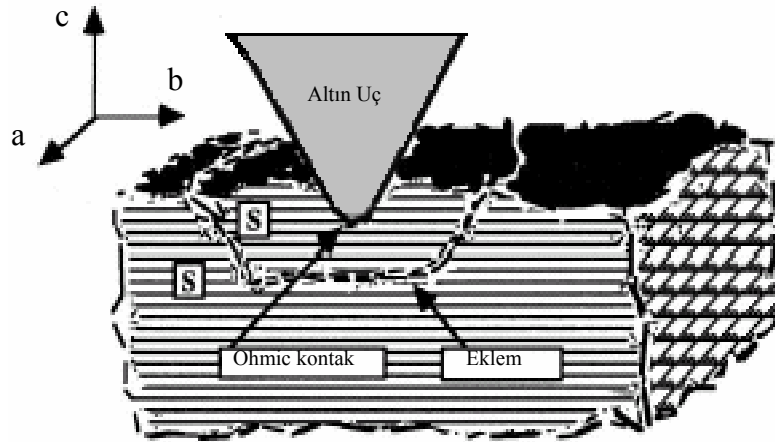
Yapısı düzlemsel tünel eklemlere dayanan Josephson eklemleri, iki üstüniletken tabakanın çok ince yalıtkan bir katman ( $10 \text{ \AA}$  dan daha ince) yardımıyla ayrılmasıyla meydana getirilebilir. Kuantum mekaniksel yaklaşımla bir üstüniletkendeki elektron çiftleri yalıtkan üzerinden geçerek diğer üstüniletken tabakaya ulaşabilir. Bu olay tünelleme olarak isimlendirilir. Sentezlenen bütün YSÜler yalıtkan, yarı iletken veya metal bir tabaka ile birbirinden ayrılmış bakır oksit üstüniletken tabakalarının oluşturduğu Josephson eklemleri dizisinden oluşur. Üstüniletkenlik esas olarak bu bakır oksit düzlemlerindeki kuvvetli etkileşen elektronlardan kaynaklanırken birim hücredeki diğer bileşenler pasif boşluk doldurucular veya yük depoları gibi rol oynarlar. YSÜlerin iki boyutlu tabakalar halindeki yapısından yararlanarak c eksenini boyunca büyütülmüş Josephson eklemi (SIS) yığınları oluşturulabilir ve bu doğal, ab eksenine dik olarak tekrarlanmış yapı özgün Josephson eklemleri olarak isimlendirilir (Kleiner, 1992; Kleiner, 1994)



YSÜler yüksek kaliteli tünelleme iletkenliği gösterebilen tekrarlanabilir düzlemsel eklemler içermemesine rağmen, bu malzemelerle yapılan deneyler üstüniletkenliğin mekanizmasını açıklamaya yardımcı olmuştur. Örneğin Bi-2212 örneklerine uygulanan SIN nokta kontak (Ozyuzer, 2000; DeWilde, 1998), SIS kırık eklem (Ozyuzer, 2000; Miyakawa 1999) ve STM/STS (Taramalı Tünelleme Mikroskopisi/Spektroskopisi) (DeWilde, 1998) tünelleme iletkenliği ölçümleri YSÜlerin teorisini açıklamak için yapılan çalışmalara ışık tutmuştur. Bu üç teknikle elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında benzer spektral özellikler elde edilebilir ve incelenen malzeme için yaklaşık aynı DOS ve  $\Delta$  değerleri bulunabilir. Bi-2212 numunelerle yapılan deneylerde gap voltajı değerlerine karşılık gelen keskin sankiparçacık (quasi particle) piklerinin yanısıra daha yüksek voltaj değerlerine karşılık gelen dip ve hump gibi özgün spektral yapılar gözlenmiştir ki bu özelliklerin YSÜler için karakteristik olduğu ve çiftlenme mekanizması ile direkt ilgili olduğu ispatlanmıştır (Zasadzinski, 2001). Üstüniletken enerji aralığının değeri optimum katkılanmış Bi-2212 için yaklaşık 35-40 meV dur ve bu değer aşırı katkılanmış (overdoped) örneklerde daha düşükken, az katkılanmış (underdoped) numunelerde daha yüksektir (Ozyuzer 1999; Miyakawa 1999).

Bu çalışmada fotolitografi ve argon iyon demeti aşındırma teknikleri kullanılarak kritik geçiş sıcaklığı 93 K olan optimum düzeyde doping yapılmış üstüniletken Bi-2212 tek kristalleri üzerine farklı maskelerle küçük boyutlu mesa yapıları üretilmiştir. Mesa yapıları özgün Josephson eklemlerinin bir seri halinde c eksenine boyunca yığılmasıyla elde edilirler. Çalışmanın diğer bir aşamasında optimum doping yapılmış ( $T_c=92$  K) ve aşırı katkılanmış ( $T_c=82$  K) Bi-2212 kristalleri kullanılarak, aynı kristal üzerinde değişik türde eklemler oluşturulmuş, bunların akım-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrileri incelenerek yorumlanmaya çalışılmıştır. Böylece; özgün Josephson eklemleri dizisinin ortaya koyduğu karakteristik özellikler tekli SIN Josephson ve tekli SIS kırık eklemlerinin oluşturduğu karakteristiklerle karşılaştırılabilmektedir. Özgün Josephson eklemlerinin kararlı eklem geometrisi sıcaklığa bağlı ölçümlere olanak sağladığından nokta kontak SIN, kırık eklem SIS ve STM/STS tekniklerine göre avantajlıdır. Üstüniletken DOS ve yasak enerji aralığı ile ilgili ayrıntılı bilgiler SIN nokta kontak ve özgün Josephson eklemleri spektroskopilerinden alınabileceği gibi SIS kırık eklemlerin nokta kontakla elde edilen karakteristiklerinden de alınabilir. Nokta kontak yönteminde altın uçla kristal yüzeyi arasındaki uzaklık ve kontak kuvveti diferansiyel

mikrometre yardımıyla ayarlanabilir. Altın ucun yüzeye temasıyla kararlı mekanik eklemler oluşturulabilir. Cleavage aşamasında zayıf bağlarından dolayı kristalden koparılması en kolay tabaklar Bi-O düzlemleri olduğundan yüzeyi düzgün bir kristal örnekle gerçekleştirilen nokta kontakta oluşturulan SIN eklemi için yalıtkan katman kristalin kendi yüzeyidir. Altın uç ile kristal yüzeyi arasındaki kuvvetin arttırılması ohmik kontak ( $\cong 1$  ohm) yaratır. Bu durum altın tip ile Bi-2212 arasında mekanik bir bağlanmanın oluşmasına neden olur ve uç, kuvvetin ekisiyle yukarı doğru kalkarken kristali kendine doğru çeker. Oluşan basınç kristal içindeki herhangi bir Bi-O çiftinin kırılmasına dolayısıyla da bir SIS kırık ekemini oluşmasına sebep olur. Şekil 1 altın uç tarafından meydana getirilen SIS kırık ekleminin şematik gösterimidir.



**Şekil 1.** SIS kırık ekleminin şematik gösterimi

Bu eklemler iki üstüniletkene ait DOS un birleşmesinden (convolution) oluştuğu için elde edilen verilerdeki spektral özellikler (pikler, dip ve humplar) SIN eklemlerde gözlenenlerden daha şiddetlidir. Ayrıca sıcaklığa bağlı ölçümlerde Fermi genişlemesi daha az etkilidir. Kırık eklemlerden alınan iletkenlik-voltaj eğrilerindeki pikler arası uzaklık  $4\Delta$  ya karşılık geldiği için bu veriden enerji aralığının değeri kolayca hesaplanabilir.

Özgün Josephson eklemleriyle yapılan çalışmalarda sanki parçacık pikleri diğer eklemlere göre daha yüksek voltajlarda gözlenir, bu da eklemler üzerinde oluşan ısınma problemini beraberinde getirir. Eklemler üzerinde meydana gelmesi olası fazla ısınma probleminin engellenebilmesi için mesa yapılarının olabildiğince küçük boyutta yapılması

gerekmektedir (Yurgens 1996). Bunun için fotolitografi tekniği kullanılmaktadır. Isınma problemini elimine edebilmek için mesa boyutunu küçültmenin yanında interkalasyon ve kısa akım pulsları tekniklerinden de yararlanılmaktadır. Daha ileriki çalışmalarda Bi-2212 tek kristal örneklerin  $HgBr_2$  ortamında interkalasyonunu gerçekleştirmek amaçlanmaktadır. Bu teknikle  $CuO_2$  düzlemleri arasında oluşan kuvvetli çiftlenmenin etkisi azaltılarak Cooper çiftlerinin tünelleme yapması engellenebilir böylelikle Josephson tünellemesinin sankiparçacık tünelleme spektrumunu perdelemesinin önüne geçilebilir.

Elde edilen mesaların boyutları çok küçük olduğundan geleneksel kontak alma yöntemleri karakterizasyon için uygun olmayabilir bunun yerine mesaların yüzeylerine bir piezo ile dokunarak kontak alınabilir; böylece geniş bir sıcaklık aralığında (10-300 K), çeşitli manyetik alan şiddetinde ve yöneliminde ölçüm yapılarak incelenen yüksek sıcaklık üstüniletken için akım-gerilim karakteristiği ile birlikte tünelleme iletkenliği de elde edilebilir. Tünelleme iletkenliğinin üstüniletkenin durum yoğunluğu ile direk orantılı olması ve elde edilen verinin enerji hassasiyetinin  $k_B T$  kadar olması sebebiyle, tünelleme spektroskopisi diğer deneysel tekniklere göre daha üstündür. Oluşturulan grafikte akım-gerilim eğrilerinin her biri ayrı bir ekleme karşılık gelir. Dolayısıyla hazırlanan mesadaki eklemlerin sayısı I-V karakteristiği kontrol edilerek ayarlanabilir. Elde edilen iletkenlik-gerilim grafiklerinde sanki parçacık pikleri  $+2\Delta$  ve  $-2\Delta$  noktalarında gözlemlenir, dolayısıyla bu pikler yardımıyla yasak enerji aralığının değeri bulunabilir.

Meydana getirilen mesalar, sıvı helyum sıcaklığında akım-gerilim grafikleri incelenerek karakterize edilmiştir ve ulaşılan sonuçlar değerlendirilerek üstüniletkenliğin mekanizmasının anlaşılması amaçlanmıştır. Josephson eklemlerinin doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiği sayesinde elektronik devre elemanlarının üretilip elektronik özelliklerinin incelenmesi bu çalışmanın ticari uygulama yönünü oluşturmaktadır.

## II. BÖLÜM

### 2. Materyal ve Method

#### 2.1. Bi-2212 Tek Kristalleri

Bu çalışmada farklı alan ve yüksekliklere sahip mesa yapıları (özgün Josephson eklemleri yığınları) üretebilmek için kritik sıcaklığı 93 K olan optimum doping yapılmış Bi-2212 tek kristalleri kullanılmıştır. Bunun yanısıra yüzen bölge (floating zone) tekniğiyle hazırlanan 85 K kritik sıcaklığına sahip aşırı katkılanmış ve 92 K kritik sıcaklığına sahip optimum düzeye yakın bir şekilde katkılanmış Bi-2212 malzemeler de kullanılarak değişik türde eklemler oluşturulmuş ve bunlardan elde edilen tünelleme spektroskopileri incelenerek fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Mesaları hazırlamak için kullanılan Bi-2212 Naval Research Laboratory (ABD) de Dr. Chris Kendziora tarafından self flux tekniği kullanılarak büyütülmüştür (Kendziora 1996). Optimum düzeyde katkılanmış olan bu malzemede faz kararlılığının sağlanması için çok düşük bir yitrium katkısı yapılmıştır.

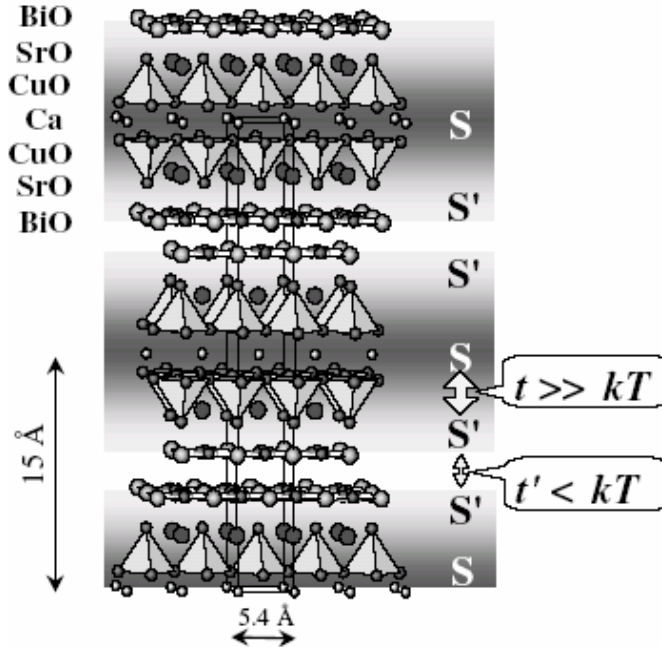
YSÜler arasında araştırmacıların en fazla ilgisini çeken malzeme Bi-2212 olmuştur. Bu malzemenin en büyük avantajı yüksek kalitede ve milimetre boyutunda tek kristal halinde büyütülmeye elverişli olmasıdır. Bunun yanısıra çok katmanlı yapısından dolayı bilinen en anizotropik elektriksel iletkenlerden birisidir. Argon veya oksijen atmosferinde tavlanarak  $\text{CuO}_2$  düzlemleri arasındaki anizotropi özelliği ve bağlanma enerjisi değiştirilebilmektedir. Ayrıca Bi-O tabakalarındaki zayıf bağlar sebebiyle, bu düzlemlerden koparıldığında (cleavage aşamasında) kimyasal olarak kararlı ve atomik olarak düzgün bir yüzey elde edilebilmektedir ki bu yüzeyin fotolitografik olarak şekillendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bi-2212 üstüniletkeni de diğer bütün YSÜler gibi bir dizi katmandan oluşmuştur; bu katmanlar

Cu-O, Bi-O, Sr-O tabakalarıdır. Bu malzemenin yapısını açıklayabilmek için 2 model geliştirilmiştir.

1. Çoklu-katman modeli (Multi-layer model)
2. Yaklaşıklık modeli (Proximity model)

Çoklu katman modeline göre  $3 \text{ \AA}$  kalınlığındaki üstüniletken  $\text{CuO}_2$  tabakaları birbirinden  $12 \text{ \AA}$  kalınlığındaki Bi-O ve Sr-O tabakalarını içeren yalıtkan bir katmanla ayrılmıştır. Josephson çiftlenmesi komşu iki  $\text{CuO}_2$  tabakası arasında gerçekleşmektedir. SISISIS... şeklindeki düzenli tekrar c eksenı boyunca tünel eklemleri dizisini oluşturmaktadır. Diğer tabakaların üstüniletkenliğe bir katkısı olmamakla beraber birim hücredeki görevleri tam olarak bilinmemektedir, bu tabakaların pasif boşluk doldurucular ya da yuk depolayıcıları olarak rol oynadığı kabul edilmektedir.

Proximity modele göre üstüniletkenliğin doğduğu kaynak olarak kabul edilen  $\text{CuO}_2$  tabakalarının yanı sıra Bi-O tabakalarının da üstüniletken özellikler gösterebileceği öne sürülmektedir. Buna göre Cu-O ve Bi-O tabakaları arasındaki güçlü Josephson çiftlenmesinin yanında komşu iki Bi-O düzlemi arasında da zayıf bir Josephson çiftlenmesinin olduğu iddia edilmektedir. **Şekil 2** de Bi-2212 yüksek sıcaklık üstüniletkeninin kristal yapısı görülmektedir.



**Şekil 2.** Bi-2212 tek kristal yapısı

## 2.2. Mesa Üretimi

Mesa yapıları oluşturabilmek için öncelikle yaklaşık  $1 \times 1 \times 0.001 \text{ mm}^3$  boyutlu optimum doping yapılmış Bi-2212 tek kristalleri alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) altaşlar üzerine düşük viskoziteli bir epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Bi-2212 tek kristalinin mikroskopsuz bakıldığında pürüzsüz görünmesi ve a-b ekseninin alumina altaşın yüzeyine paralel olması gerekmektedir. Çünkü fotolitografi sırasında maskenin fotorezistle kaplanmış yüzeye tam olarak oturması maske üzerindeki şekillerin aynen aktarılabilmesi açısından önemlidir. Aksi takdirde maskenin oluşturduğu gölge keskin hatlar elde edilmesini önlemekte ve iyon aşındırması sonrasında kaliteli bir mesa yapısı ortaya çıkmamaktadır. Epoksi kurduktan sonra tek kristal yüzeyini atomik açıdan daha düzgün bir hale getirebilmek ve yüzey kusurlarından kurtulabilmek amacıyla bir parça yapışkan bant yüzeye tutturularak çekilir. Bu işlem sırasında tek kristaller c eksenine dik olarak bölünür (cleavage) ve birkaç tabakası banda yapışarak kopar. Böylece Bi-O tabakasındaki zayıf bağlardan dolayı bazı atomları kolaylıkla ayrılabilmiş tek kristallerin yüzeylerinde a-b eksenini boyunca atomik açıdan düzgün alanlar yaratılmış olur. Bu yüzey herhangi bir etkiye maruz kalmamış özgün bir yüzeydir. Cleavage işleminden hemen sonra Bi-2212 yüzeyi vakumda buharlaştırma tekniği kullanılarak  $200\text{-}300 \text{ \AA}$  kalınlığında altın ince filmle kaplanır. Buharlaştırıcıya (evaporator'a) konulan % 99.99 saflıktaki altın, sisteme yaklaşık 130 A akım sürülerek vakum ortamında buharlaştırılır (Şekil 3).

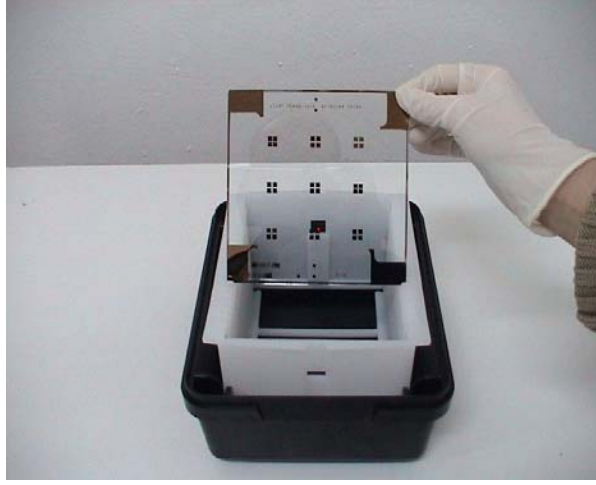


**Şekil 3.** Altın film elde etmek için kullanılan vakum buharlaştırıcı

Altın filmle kaplama yapmaktaki amaç; yüzeyi fotolitografi esnasında uygulanacak kimyasallardan (fotorezist, developer...) korumak ve maskenin yüzeye temasını daha iyi bir hale getirmektir, bunun yanında altın film, malzemenin elektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilirken kontak almayı kolaylaştırmaktadır. Vakum ortamından çıkarılan örneklere standart fotolitografi işlemi uygulanmıştır ve bunun için pozitif fotorezist (Shipley Micropozit 1813) kullanılmıştır. Örneklerin üzerlerine damlatılan pozitif fotorezistin yüzeye homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla dönmeli kaplayıcı (spin coater) kullanılmıştır. Fotorezistin ışığa duyarlı olması sebebiyle bu işlemler karanlık odada gerçekleştirilmiştir. Düzgün dağılmış fotorezist katmanıyla kaplı örnekler ilk pişirme (soft bake) için etüve yerleştirilmiştir. Soft bake ile daha homojen ve duyarlı hale gelen fotorezist elimizdeki maskelerle şekillendirilmeye çalışılmıştır. Değişik yüzey alanlarına sahip mesa yapılar oluşturabilmek için TUBITAK UEKAE tarafından hazırlanan maskeler örneklerin yüzeylerine yerleştirilerek UV ışığına tutulmuştur. Fotomaske üzerindeki şekiller, krom kaplı cam üzerine fotolitografik tekniklerle üretilmiştir. L-Edit isimli bir programla çizilen 9 ayrı boyutta şekil bir maske üzerinde hazırlanmıştır. Bunların boyutları aşağıda belirtildiği gibidir;

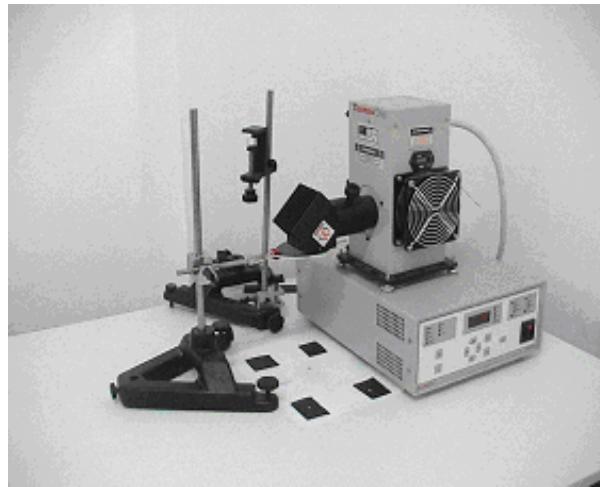
- 1)  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $10 \mu\text{m}$  aralık
- 2)  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $10 \mu\text{m}$  aralık
- 3)  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $5 \mu\text{m}$  aralık
- 4)  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $4 \mu\text{m}$  aralık
- 5)  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $5 \mu\text{m}$  aralık
- 6)  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $4 \mu\text{m}$  aralık
- 7)  $4 \times 4 \mu\text{m}^2$  kareler, kareler arasında  $4 \mu\text{m}$  aralık
- 8)  $800 \mu\text{m}$  aralıklı dört nokta kontak
- 9)  $1000 \mu\text{m}$  aralıklı dört nokta kontak

TUBITAK UEKAE de bulunan üreticinin (pattern generator) maske üzerine üretebileceği karelerin boyutu minimum  $4 \times 4 \mu\text{m}^2$  olduğundan en düşük inebileceğimiz boyut  $4 \mu\text{m}$ dir. Şekil 4 de dokuz farklı boyutlu şekil içeren maskenin fotoğrafı gösterilmiştir.



**Şekil 4.** TUBITAK UEKAE tarafından hazırlanan fotomaske

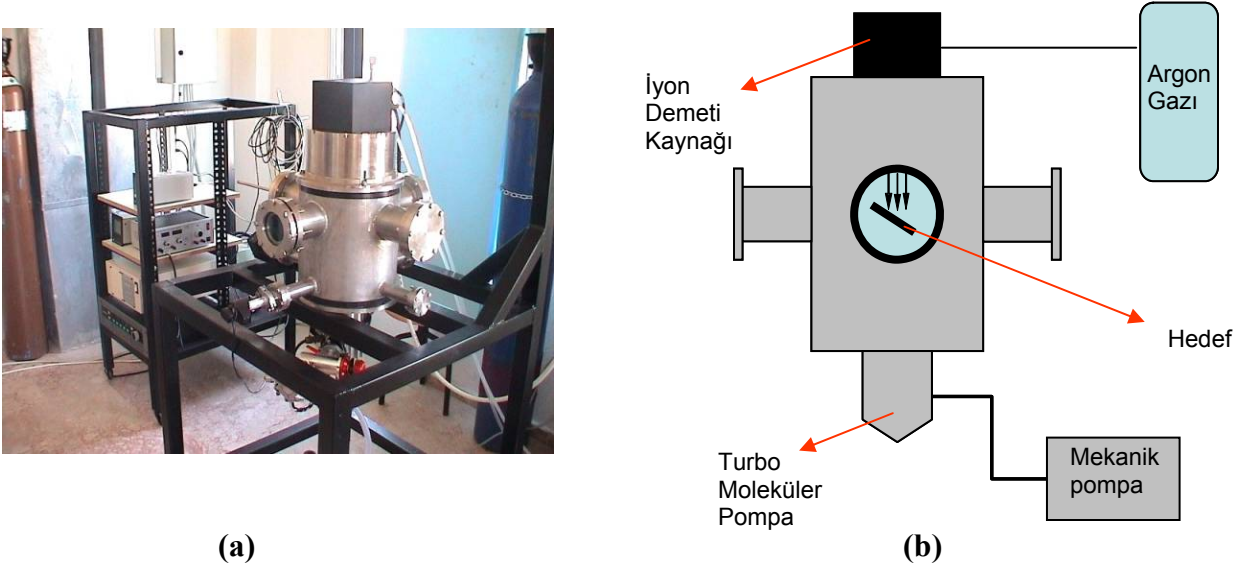
Bu aşamadan sonra örneklere banyo işlemi (developing) uygulanmış, optik mikroskop yardımıyla maskedeki desenin oluşup oluşmadığı kontrol edilerek developing suresi ayarlanmıştır (Bu süre optimum 25 saniyedir). Banyo işleminde developer olarak 0,2 Molarlık NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Kullanılan fotorezist pozitif bir fotorezist olduğu için tek kristal yüzeyindeki fotorezist katmanının ışık alan bölgeleri (maskedeki şeffaf alanlar) NaOH içinde çözülmüş böylece maskenin bir kopyası yüzey üzerinde belirmiştir. Şekil 5 de UV kaynağı ve ilgili deney düzeneği görülmektedir.



**Şekil 5.** UV ışık kaynağı ve ilgili deney düzeneği

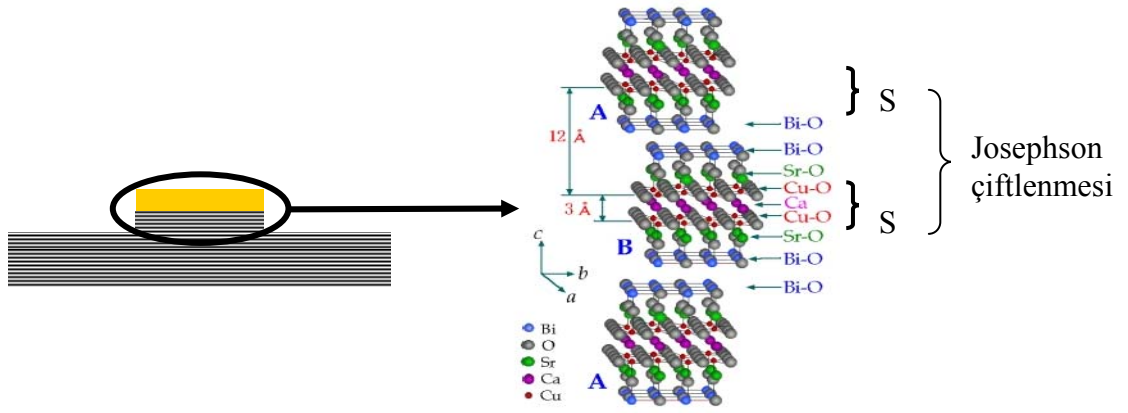


Daha sonra sert pişirme (hard bake) işlemine tabi tutulan örnekler iyon demeti sistemine, Argon iyonları yüzeyle 45 derecelik bir açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Turbomoleküler pompa tarafından pompalanan iyon demeti sistemi 12 cm çapında 1500 eV a kadar etkili argon, oksijen, azot iyonlarını isteğe bağlı olarak örnek üzerine gönderebilmektedir. Kurulan sistemin görüntüsü Şekil 6 (a) da ve sistemin basit bileşenleri Şekil 6 (b) de verilmiştir.



**Şekil 6.** İyon demeti aşındırma sistemi

Argon iyon dağlama (etching) esnasında, banyo işlemi sonrasında fotorezistten arınan yüzeyler de kaldırılarak şekillendirme işlemi tamamlanmıştır. Örnekler 700 eV da 20 watta 10 dakika (optimum işlem-iyonların enerjisi, gücü ve etch süresi malzemeye göre ayarlanabilir) argon iyonları ile etch edildikten sonra yüzeylerinde kalan fotorezist artıkları aseton banyosunda temizlenmiştir. Mesa üretimi esnasında yapılan tüm işlemler her türlü tozdan ve kirden (mikrometre altı parçacıklardan) arındırılmış bir ortamda gerçekleştirilmelidir. Aksi taktirde karakterizasyon aşamasında elde edilen grafiklerde çok fazla gürültü (noise) meydana gelir ki bu da deneyin güvenilirliği açısından bir dezavantajdır. Tüm fotolitografi ve aşındırma işlemleri tamamlandıktan sonra 300 x 300  $\mu\text{m}^2$  lik bir alada 1000 den fazla mesa yapı gözlemleyebiliriz. Şekil 7 de mesa yapının kesiti gösterilmiştir



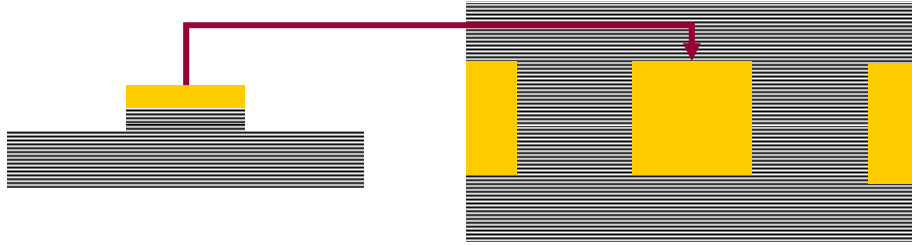
**Şekil 7.** Altın film ve birçok özgün Josephson ekleminden oluşan mesa yapının kesiti

## III. BÖLÜM

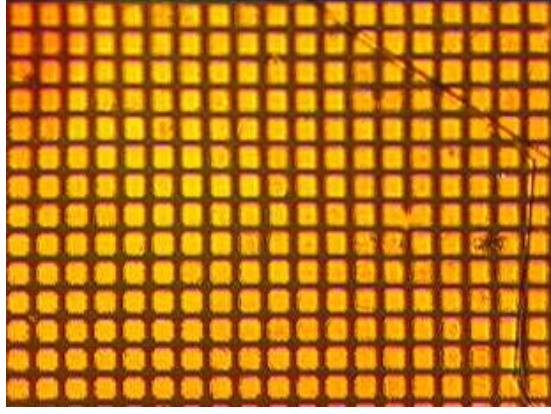
### 3. Sonuçlar

#### 3.1 Optik Mikroskopi

Hazırlanan mesaların yüzeylerini kabaca incelemek için optik mikroskop oldukça elverişlidir. Optik mikroskopi, maskelerdeki şekillerin Bi-2212 yüzeyine iyi bir şekilde transfer edilip edilemediği veya şekillendirme sonrasında mesa yüzeylerinin fotoresist artığı gibi pisliklerden tam olarak temizlenip temizlenemediği konusunda bilgi verebilir. Şekil 8 de yukarıda kesiti verilen mesa yapının kuşbakışı görüntüsü bulunmaktadır.



**Şekil 8.** Mesanın yandan ve kuşbakışı görünüşü, optik mikroskopta mesa yapısı kendisini yüzeyindeki altın film ile belli eder.



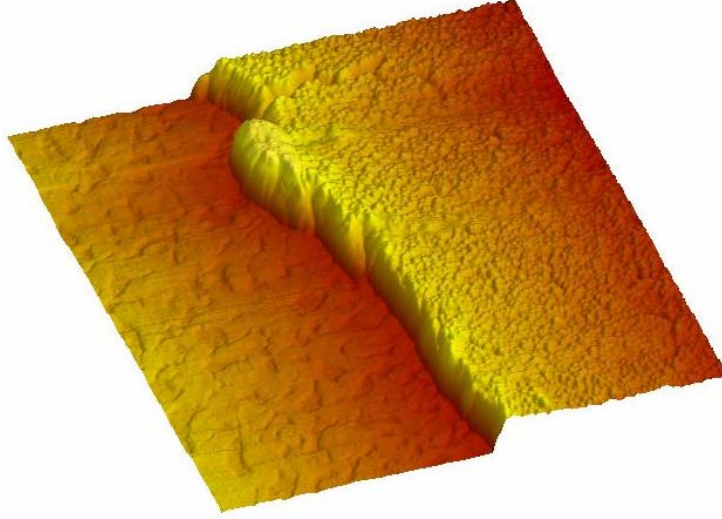
**Şekil 9.** Bi-2212 mesaların 20X büyütme optik mikroskop fotoğrafı

Şekil 9 da  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  boyutunda karelerden (kareler arasındaki boşluk  $5 \mu\text{m}$ ) oluşan maskeyle elde edilmiş mesaların optik mikroskop görüntüsü bulunmaktadır. Parlak kısımlar optik mikroskopun ışığı ile aydınlatılmış altın film yüzeyidir. Yukarıda sözü edildiği gibi optik mikroskop fotoğrafları oluşturulan mesanın kuşbakışı görüntüsüdür ve yüzey hakkında bilgi verebilir. Şekildeki fotoğrafa bakıldığında mesaların şekillerinin tam kare olmadığı gözlemlenebilir, yüzeyler AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile incelendiğinde ise elde edilen mesaların boyutlarının maske üzerindeki karelerin boyutlarına oranla daha küçük olduğu anlaşılabilir. Maskenin tek kristal yüzeyi üzerine iyi yerleştirilememesi dolayısıyla Bi-2212 yüzeyiyle maske arasındaki mesafenin çok büyük olması bu duruma meydan verebilir. Bunun yanı sıra civa lambasından yayılan UV ışığının altın yüzeyi ve maske üzerindeki krom kaplamadan yansımalar yaparak oluşturulmak istenilen karelerin boyutlarını küçültmesi de nedenlerden biri olarak sayılabilir.

### **3.2 AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu)**

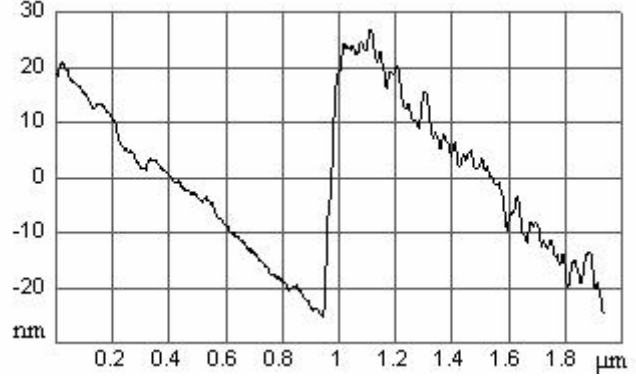
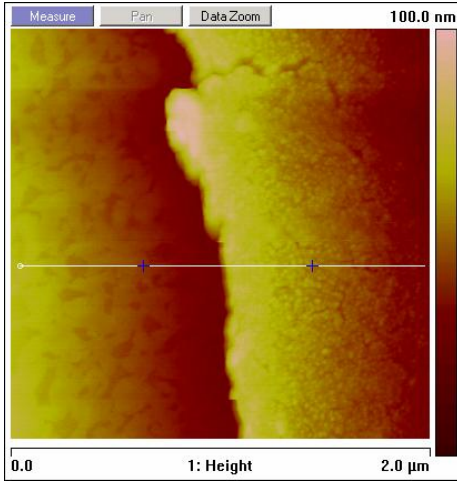
Mesaya son halini verirken uygulanan aşındırma (etch) işleminde yapılan etch miktarını ölçebilmek için İYTE Malzeme Araştırma Merkezinde bulunan SPM (Taramalı Uç Mikroskobu –AFM & STM) kullanılmıştır. Bu aygıt ile kontak modda kaplanılan altın yüksekliğine, mesa yüksekliğine dolayısıyla oluşturulan özgün Josephson eklemlerinin toplam

yüksekliğine ait bilgiler elde edilebilmiştir. Şekil 10 da optik mikroskop görüntüsü verilen örneğe ait altın filmin üç boyutlu AFM fotoğrafı verilmiştir.



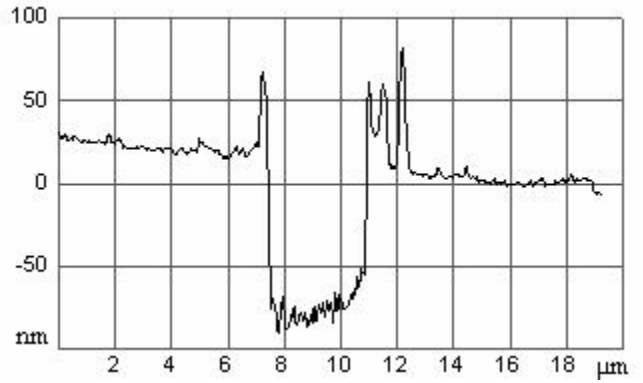
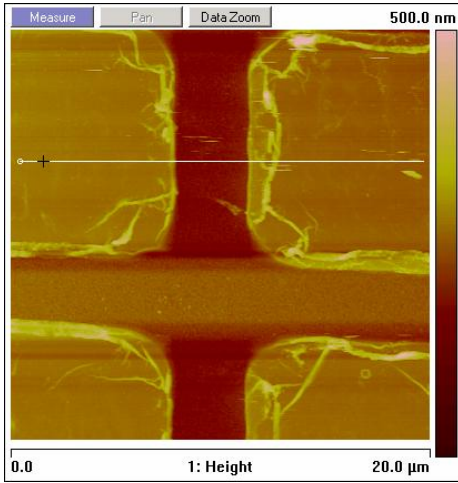
**Şekil 10.** Yüzey üzerine kaplanan altın filmin 3 boyutlu topografisi

Altın kalınlığının AFM deki yükseklik görüntüsünden yararlanarak kesit analizi yapılmıştır. Vakumda buharlaştırarak kapladığımız altının yüksekliğini bulabilmek için Bi-2212 tek kristallerinin yapıştırıldığı alumina parçalarla beraber bir parça mikroskop camı da buharlaştırıcıya konulmuştur. Dolayısıyla buharlaştırma esnasında örneklerle beraber mikroskop camı da aynı kalınlıkta altın filmle kaplanmıştır. Cam üzerindeki filme ince uçlu bir cisim yardımıyla çizik atılarak AFM tipi yüzeyi taramış böylece altın yüksekliği bulunmuştur. Şekil 11 altın filme ait kesit analizini göstermektedir.



Şekil 11. Altın filme ait kesit analizi

Şekildeki kesit analizinden görüleceği gibi Bi-2212 tek kristaller üzerine buharlaştırılan altın filmin kalınlığı yaklaşık 55 nmdir. Bu kesit grafiğindeki gürültü (noise) dikkate alınmayıp sadece cam ve altın yüzey düzlemleri dikkate alınmıştır. Şekil 12 de hazırlanan mesaların 20x20 μm<sup>2</sup> lik bir alandaki kesit analizi verilmektedir.

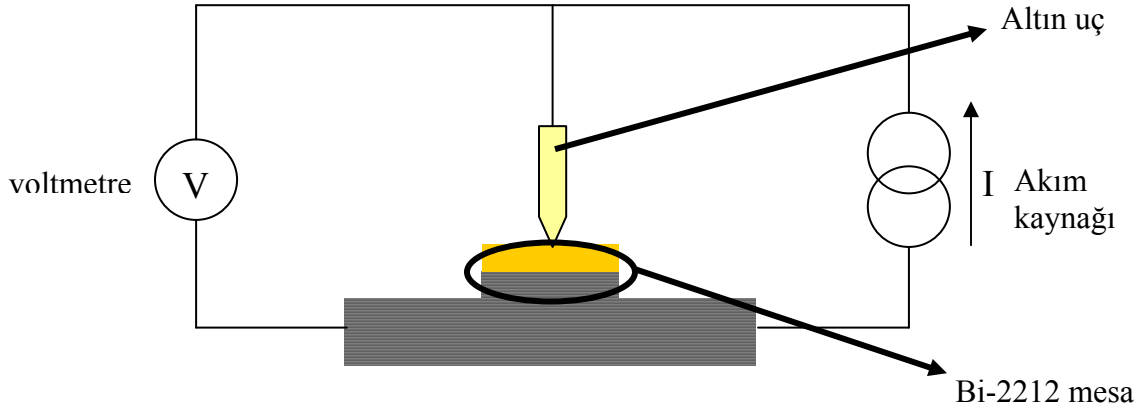


Şekil 12. 10x10, aralık 5 μm maskeyle hazırlanmış mesalar

İncelenen örnekte iki mesa merkezi arasındaki mesafenin yaklaşık 15  $\mu\text{m}$  olduğu görülmektedir. Bu da bizim kullandığımız maskenin boyutudur. AFM fotoğraflarında renk tonlaması topografik bir görüntüye karşılık gelir, şekildeki fotoğraf incelendiğinde renk farklılıkları görülebilir, buradan yüzeyin çok düzgün olmadığı dolayısıyla mesa yüksekliğinin her noktada farklı değerler alabileceği sonucuna varabiliriz. Bu sonuç etching esnasında iyonların yüzeye eşit şekilde ulaşmadığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 10 daki mesaların AFM fotoğraflarından yararlanarak yapılan kesit analizinden mesa yüksekliğinin yaklaşık 120 nm olduğunu söyleyebiliriz. Mesa yapısı, Bi-2212 tek kristalini oluşturan özgün Josephson eklemlerinin oluşturduğu yığınla bunların üzerlerine kaplanan altın filmi içeren bir yapıdır. Altın filmin ve mesanın yüksekliği kesit analizi yapılarak bulunabildiği için mesa yüksekliğinden altın kalınlığını çıkardığımızda özgün Josephson eklemleri yığınının yüksekliğini kabaca hesap edebiliriz. Bi-2212 tek kristalinin birim hücrenin boyutu belli olduğuna ve her birim hücrenin 2 SIS Josephson eklemi içerdiği bilindiğine göre hazırlanan mesa içerisindeki özgün Josephson eklemi sayısı yaklaşık olarak bulunabilir. Şekil 2 de kristal örgüsü görülen Bi-2212 tek kristalinin yapısı gözönüne alındığında tetragonal birim hücrenin a ve b eksenlerinin yaklaşık  $5.7 \text{ \AA}$  ve c ekseninin  $30.7 \text{ \AA}$  olduğunu söyleyebiliriz. Bu sonuç, üretilen mesaların toplam 35 tane birim hücre içerdiğini ve mesa yapısının 70 tane özgün Josephson ekleminden meydana geldiğini gösterir. Uygulanan etching oranı malzemenin malzemeye değişiklik göstermektedir ve ayrıca uygulanan Argon iyonlarının enerjisine ve etching süresine de bağlıdır. Yapılan deneylerde 700 eV da ve 21 W da gerçekleştirilen etching işlemi örneklere 45 derecelik açıyla 10 dakika uygulanmıştır. Etching süresini arttırmak etching oranını arttıracığından mesa yüksekliklerini dolayısıyla özgün Josephson eklemi sayısını artırır.

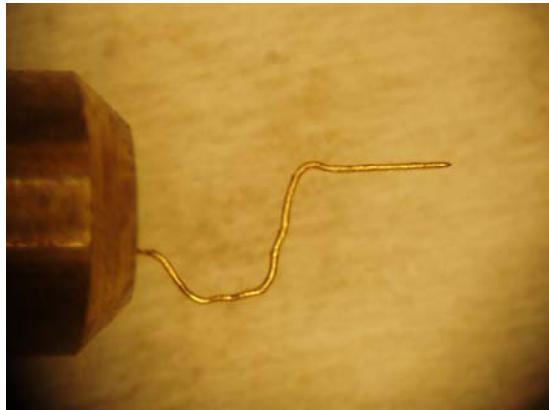
### 3.3. Nokta Kontak Tünellemesi (PCT)

Üretilen mesa alanlarının çok küçük olması yüzeylerden geleneksel şekilde kontak almayı imkansızlaştırmakla beraber elektriksel karakterizasyon için nokta kontak tünellemesi (PCT) aparatının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. PCT nin basit bir şeması Şekil 13 de verilmiştir.



**Şekil 13.** PCT için hazırlanması gereken düzenek

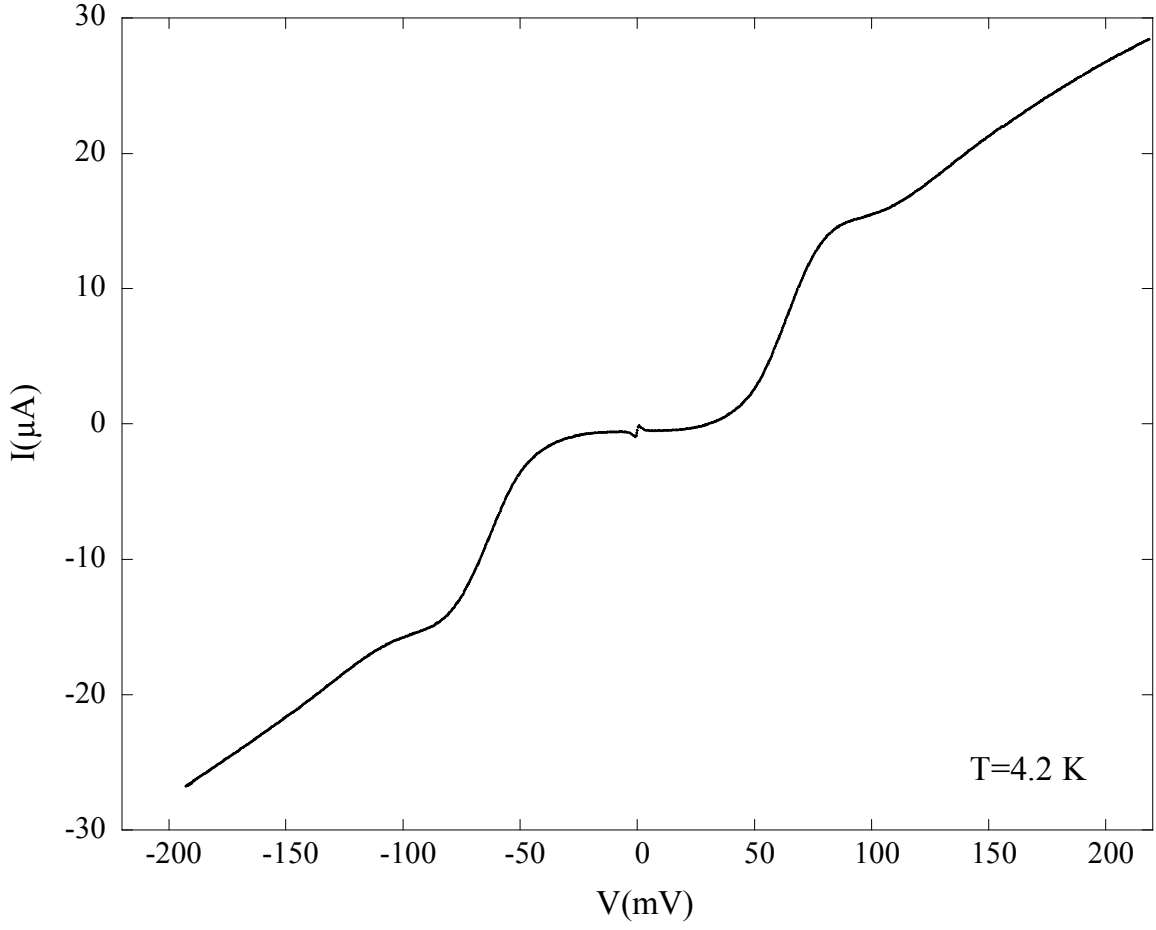
Deney sisteminin detaylı anlatımı başka yerde bulunabilir (Ozyuzer 1998). Uygulanan akımın mesa üzerinden c eksenini boyunca akabilmesi piezo elektrik silindire bağlı altın bir uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada altın uç, elektrot olarak kullanılmasının yanında aynı kristal yüzeyi üzerinde değişik tür ve geometride eklemeler oluşturulmasında da kullanılmıştır. Şekil 14 de altın uğun fotoğrafı bulunmaktadır. Piezo taramalı tünelleme mikroskopunda (STM) olduğu gibi kontrol elektroniği ile bilgisayar üzerinden kumanda edilerek altın ucu çeşitli mesaların üzerine dokundurmuş , bu kontak sayesinde incelenen örneğe ait akım-gerilim karakteristiği elde edilmiştir daha sonra bu eğrilerin türevleri alınarak tünelleme iletkenliği-gerilim grafikleri çizdirilmiştir (Ozyuzer 1998).



**Şekil 14.** Nokta kontak yapmak için kullanılan altın uç

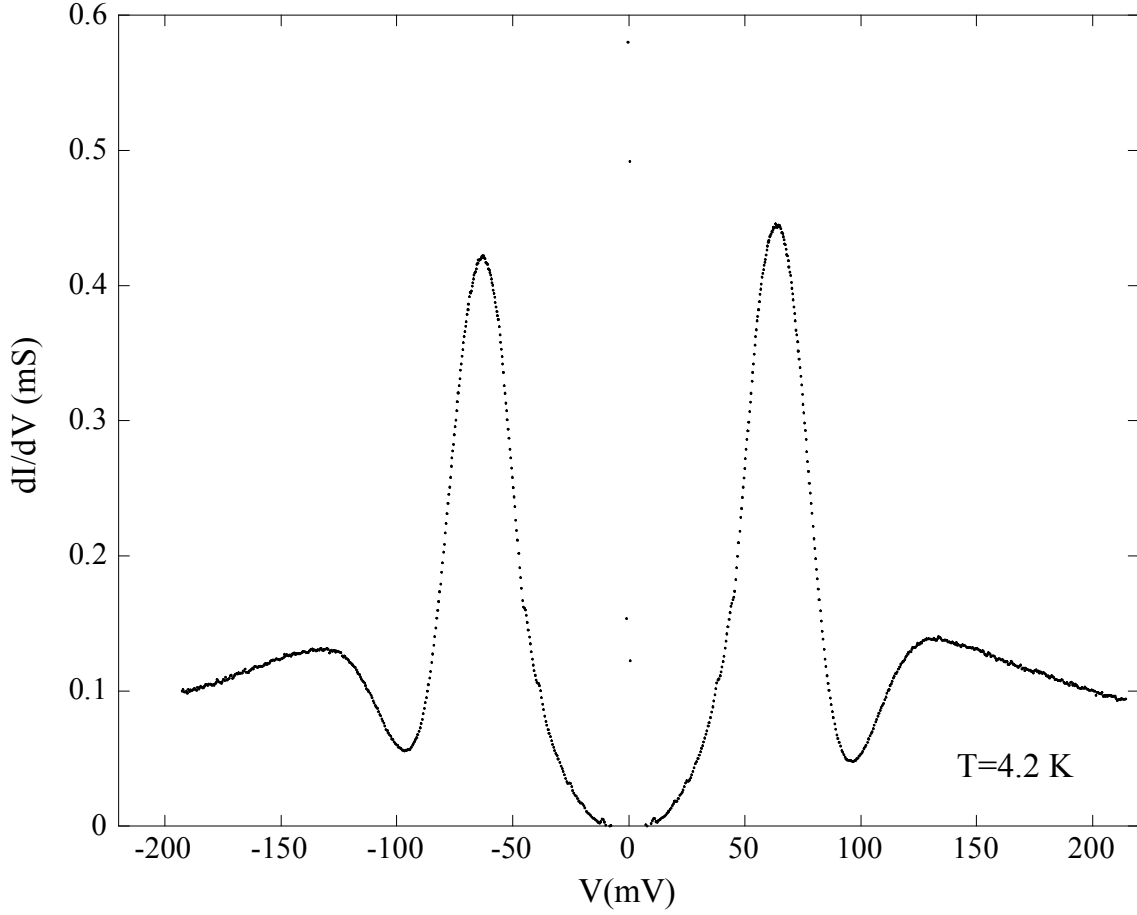


SIS kırık eklemi oluşturmak için bilinen en iyi yol PCT tekniğini kullanmaktır. Altın uç Bi-O/Sr-O yalıtkan tabakaya temas ettirildiğinde oluşan ilk eklem tekli SIN Josephson eklemidir. Bu eklem kullanılarak elde edilen iletkenlik-voltaj grafiklerinden, yasak enerji aralığı direk olarak bulunabilir. Çünkü sanki parçacık pikleri voltaj eksenini  $+\Delta/e$  ve  $-\Delta/e$  değerlerinde keserler. Altın tipin kristal yüzeyine yaptığı basınç arttırıldığında oluşan ohmic kontakdan dolayı meydana gelen mekanik bağlanma kristal içindeki kırılmayla kendini gösterir. Bu aşamada mikro seviyede bir parça Bi-2212nin, kristalin bütününden ayrılarak altın uca yapışması, kopan parça ile kristal arasında SIS kırık eklem oluşmasına neden olur. Tekli SIS ve SIN Josephson eklemelerine ait karakteristikler karşılaştırıldığında, SIS kırık eklemının I-V grafiğinden elde edilen ve  $2\Delta$  değerine karşılık gelen sankiparçacık pikleri SIN ekleminden alınan ve  $\Delta$  değerinde gözlenen piklerle uyumlu sonuçlar verir. SIS kırık eklemine ait iletkenlik-gerilim karakteristiklerinde simetrik dip ve zayıf hump yapılarının yanısıra sıfır voltaj değerinde karşımıza çıkan Josephson akımının varlığı gözlenebilir. Josephson akımının şiddeti eklem direncinin büyüklüğüyle ters orantılıdır. Şekil 15 ve Şekil 16 de sırasıyla PCT düzeneğinin altın ucu ile oluşturulmuş bir SIS kırık ekleminden elde edilen akım-gerilim (I-V) ve iletkenlik-gerilim ( $dI/dV-V$ ) karakteristiklerini göstermektedir. Kullanılan üstüniletken optimum doping yapılmış Bi-2212 tek kristalidir ve deney 4.2 Kde yapılmıştır.  $dI/dV-V$  eğisindeki pikler arası uzaklık  $4\Delta$  ya karşılık geldiğinden yasak enerji aralığının değeri yaklaşık olarak 30 meV olarak hesaplanabilir. SIS spektroskopileri ile yapılan diğer çalışmalarda bu değer 30-40 meV olarak belirtilmiştir. Anlaşılacağı gibi 30 meV değeri optimum katkılanmış Bi-2212 üstüniletkeni için tespit edilen değer alt sınır, elde edilen  $\Delta$  nın bu denli küçük olmasının nedeni faz kararlılığını sağlamak için yapılan yitrium katkısının kristal içinde safsızlık oluşturmasıdır.



**Şekil 15** Bi-2212 tek kristalinde elde edilen SIS eklemının Akım gerilim karakteristigi

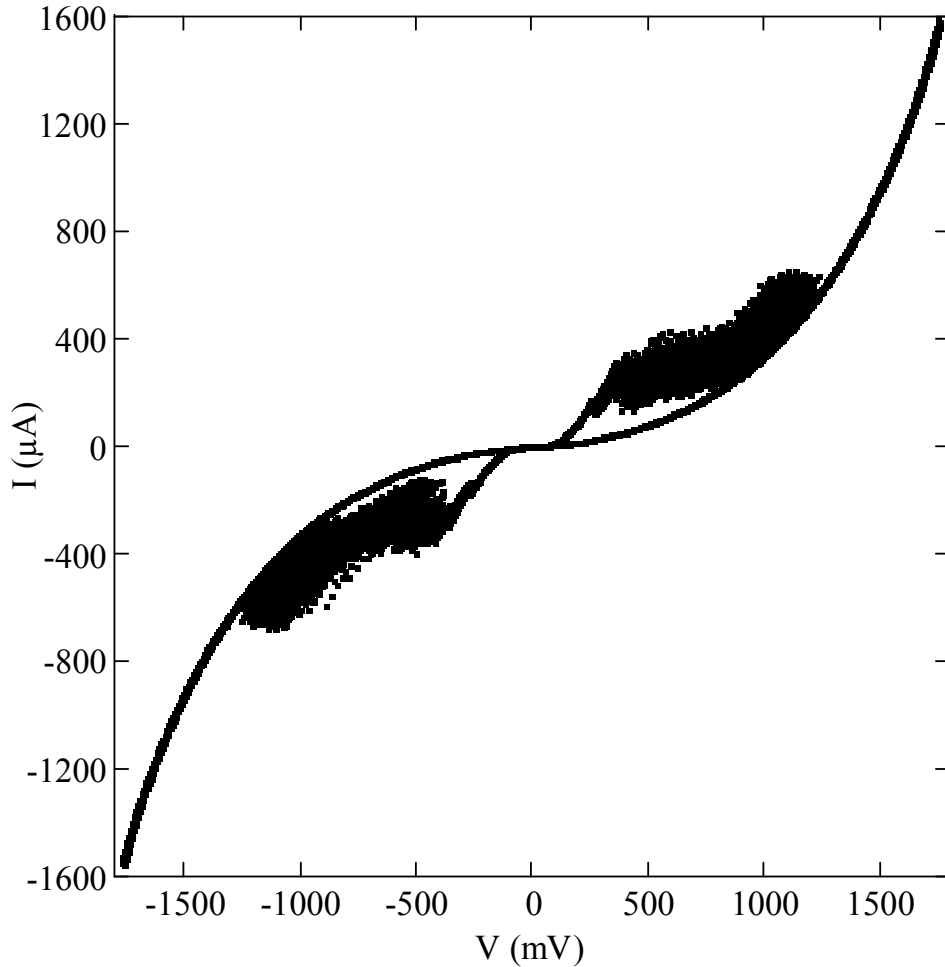
Elde edilen SIS spektroskopisi için maksimum güç kaybı  $6\mu\text{W}$ dır ki bunun verdiği ısı sıvı helyum içerisinde kolayca dağıtılabilir dolayısıyla eklemdeki yerel ısınma önlenebilecek bir düzeye getirilebilir.



**Şekil 16.** Bi-2212'nin tünelleme iletkenliği-gerilim karakteristikleri

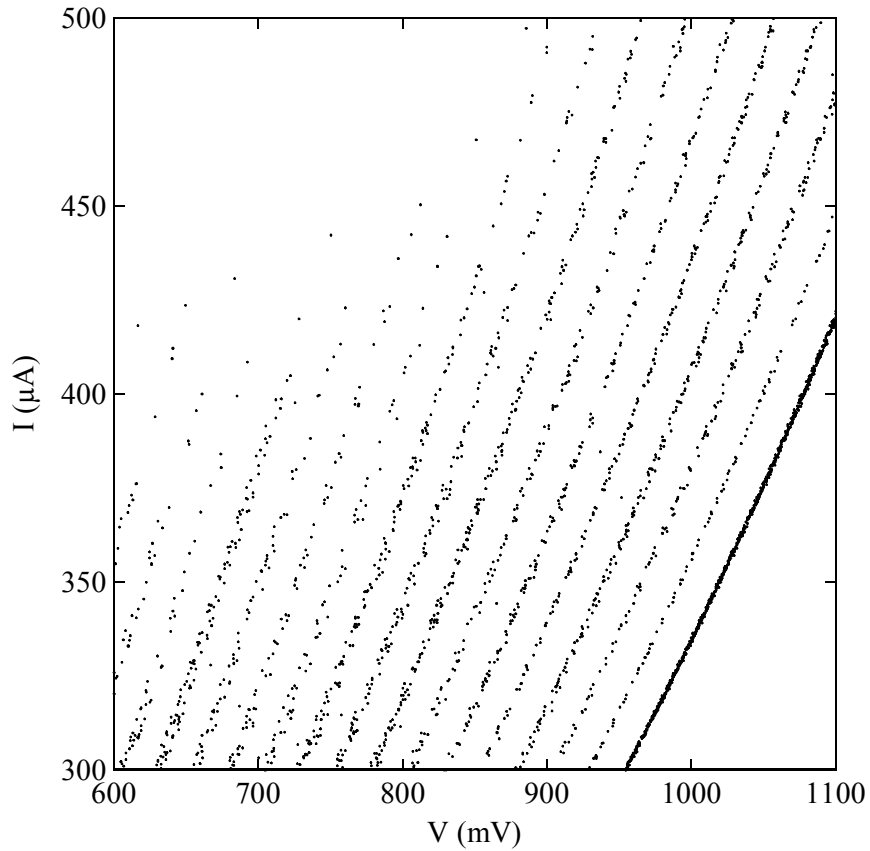
Bi-2212 üstüniletkeni de diğer bütün YSÜler gibi düşük termal iletkenliğe sahip olduğu için özgün Josephson eklemeleriyle yapılan deneylerde mesa üzerinde oluşan yerel ısınma büyük bir problemdir. Örnek sıvı helyuma batırılmış olsa bile mesa yapısı çok fazla sayıda SIS Josephson eklemi içerdiği için sıcaklık çok yüksek değerlere ulaşır. Yerel ısınma probleminden kurtulmak için DC akım-gerilim karakteristiği ölçmek yerine darbeleri bir akım sağlayıcı ile anlık sinyal gönderip ölçüm yapılabilir (Anagawa 2003). Son zamanlarda bu konuyla ilgili olarak, mesalar üzerine ince film termal çiftler buharlaştırarak yerel sıcaklık ölçümleri yapılmış, mesaların gerçek sıcaklığı bulunarak veriler bu yöntemle değerlendirilmiştir (Yurgens, 2003). Daha önce bahsedildiği gibi bu problemi engellemenin bir başka yolu da

hazırlanan mesa boyutlarını mümkün olduğunca küçültmektir. Şu an elimizdeki fotolitografik imkanlarla maskeden tek kristal yüzeyine transfer edilebilen şekillerde (karelerde)  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  alt sınırına kadar inilerek düzgün mesalar elde edilebilmektedir. Şekil 17 da  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  mesa yapıya ait I-V karakteristiği bulunmaktadır. Mesanın hazırlanmasında kullanılan Bi-2212 tek kristali yine optimum doping edilmiş olup deneyler 4.2 K de yapılmıştır (Kurter 2004). Grafikteki eğriler alınırken farklı sankiparçacık kolları elde edebilmek için bias voltajı pozitif ve negatif olarak sürekli bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan bu ölçüm mesa yüksekliğinden bağımsızdır.

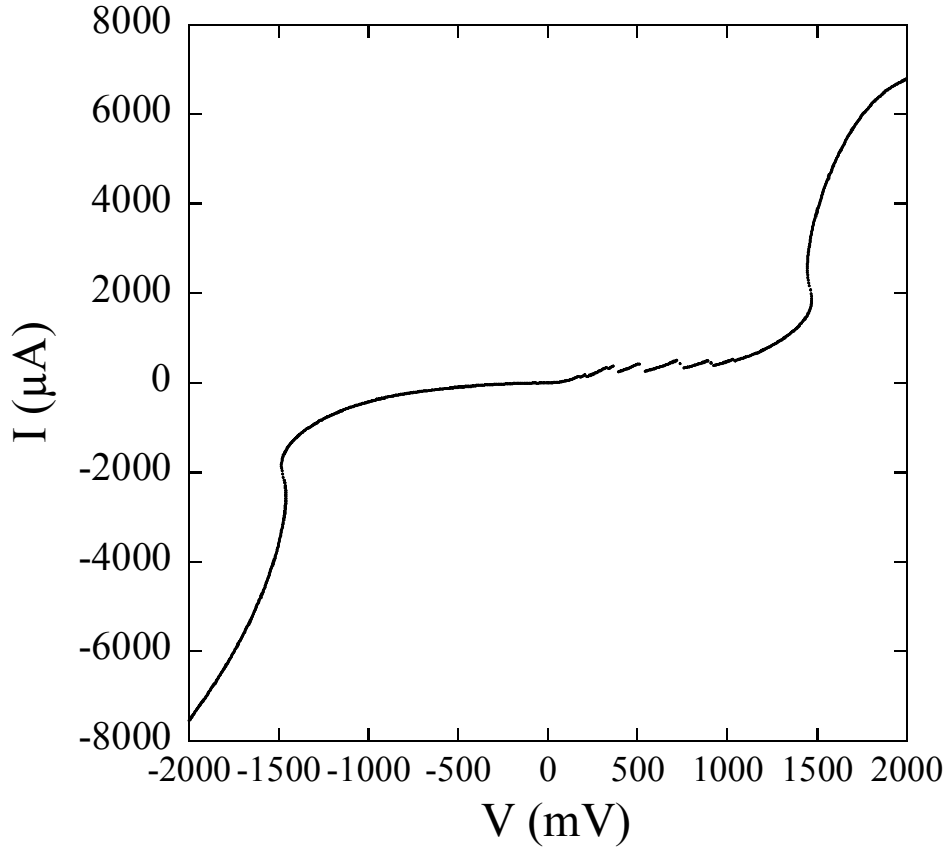


Şekil 17  $10 \times 10$  mikrometrelik Bi-2212 mesanın 4.2 K de I-V karakteristiği

Şekil 17 dikkatli incelendiğinde I-V eğrilerinde Josephson akımının bulunmadığı görülebilir, SIS kırık eklem ait grafiklerde gözlenebilen bu akımın, grafikte yer almaması altın tiple Bi-2212 arasındaki direncin mesanın direncine oranla hayli büyük olduğunun kanıtıdır. Bu verilere dayanarak ilk eklemün SIN Josephson eklemi olduğunu söyleyebiliriz. Grafiğe göre I-V grafiğinde 26 sanki parçacık kolu vardır ve herbir kol mesa yapıdaki ayrı bir özgün Josephson eklemine karşılık geldiğinden hazırlanan mesa içerisinde 26 tane SIS eklemi vardır. Bulunan bu değer AFM ile yapılan incelemelerde elde edilen özgün Josephson eklemi sayısı ile uygunluk göstermemektedir. Bunun nedeni mesaya uygulanan yüksek voltaj değerlerinin eklemelerde oluşturduğu yerel ısınmadır. Problemin; eklemelerdeki yerel sıcaklığının, Bi-2212



**Şekil 18.** 4.2 K de elde edilen  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  mesa yapıya ait I-V karakteristiği ait sanki parçacık piklerinin yüksek çözünürlükte gösterimi

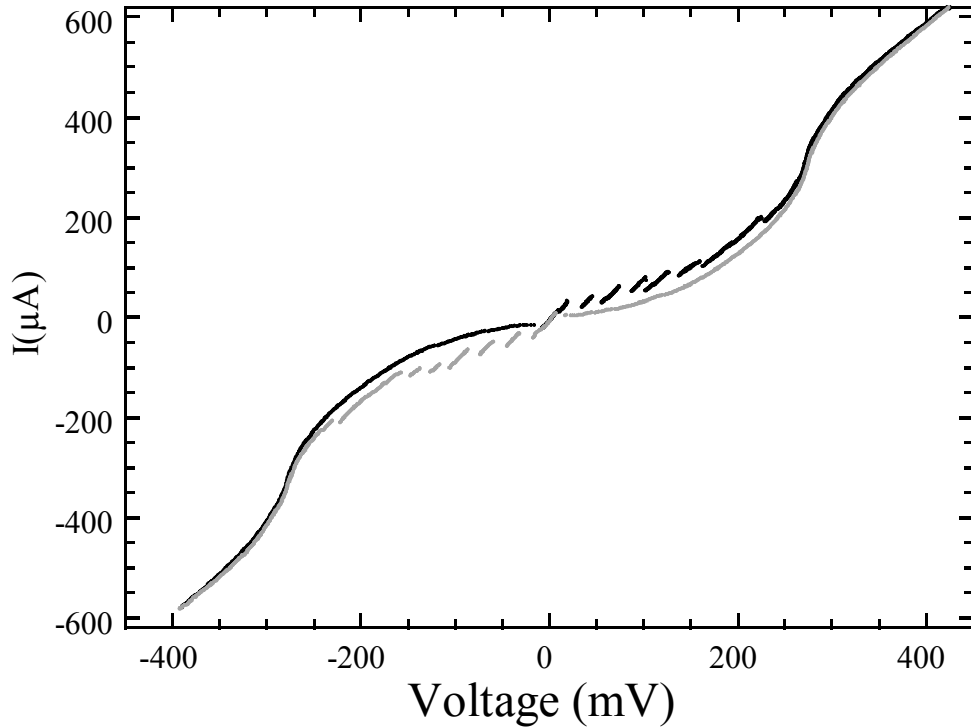


**Şekil 19** Şekil 18 de verilen eğrinin yüksek besleme voltajlarıyla akımın değişimini gösterir.

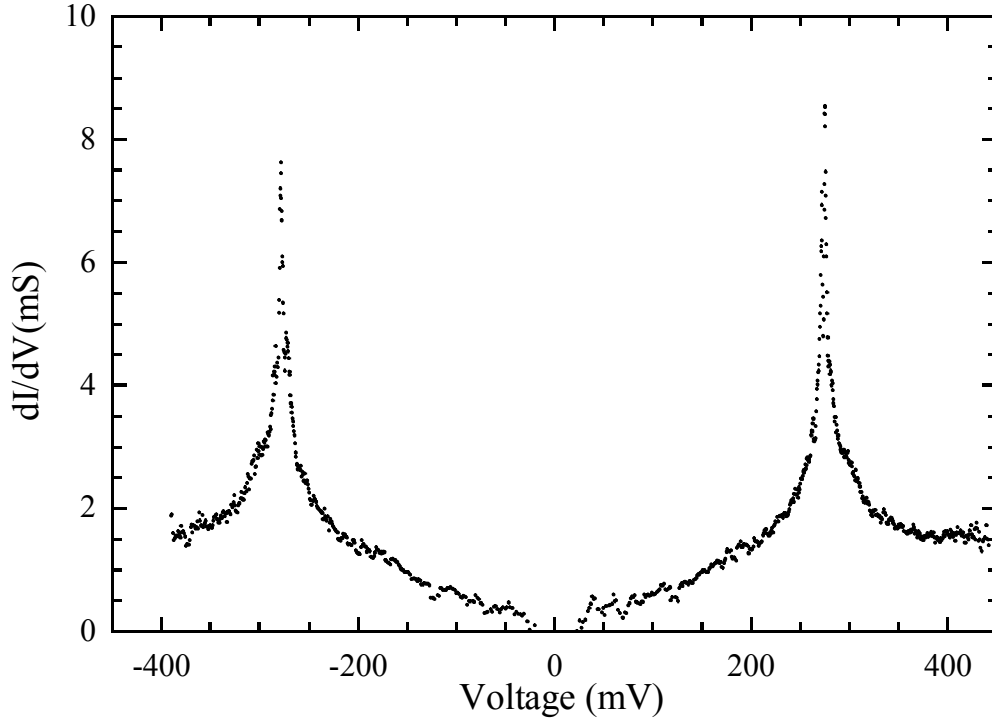
üstüniletkeninin kritik sıcaklığından daha yüksek bir değerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Kurter 2005). Şekil 19 daki grafik yine aynı mesaya ait I-V karakteristiğini genişletilmiş bir voltaj ekseninde göstermektedir. Grafik incelendiğinde eğrinin backbending özelliği gösterdiği gözlemlenebilir. Bu özellik aşırı ısınma etkisinin ya da nonequilibrium varlığının bir göstergesidir. Backbending gözlenen noktada toplam kaybedilen güç yaklaşık 2.4 mW dır, eklem yüzeyi  $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$  olduğundan yüzey başına düşen güç kaybı 2.4 kW/cm<sup>2</sup> dir. Şekil 16 daki akım-gerilim karakteristiklerinde kırık eklem karakteristiğinde karşılaştığımız dip ve hump yapılarla karşılaşmıyoruz. Çukur ve tümsek üstüniletken fazda gözlemleyebileceğimiz yapılardır, grafikten Bi-2212 nin yüksek voltaj değerleri için normal faza geçtiğini söyleyebiliriz.

Şekil 18 de sanki parçacık kolları ayrıntılı bir şekilde görülebilmektedir. Eğer herhangi bir yerel ısınma problemi ya da nonequilibrium etkisi yoksa kollar arasındaki ayırım gerçekte 60-80 meV ( $2\Delta$ ) civarında olmalıdır. Oysaki grafikten elde edilen verilere dayanarak bu değer 25 meV olduğunu bulabiliriz. Gözlenen yasak enerji aralığının, tekli SIN ve SIS Josephson eklemleriyle yapılan deneylerden alınan gerçek değerinin yarısından bile küçük bir değer elde edilmesinin sebebi sanki parçacık enjeksiyonudur, bu durum nonequilibrium ve eklemlerin yerel ısınmalarının sonucudur.

Şekil 20 yine PCT tekniğiyle ölçülmüş aşırı doping yapılmış Bi-2212 ye ( $T_c=82$  K) ait özgün Josephson eklemlerine ait I-V karakteristiklerini göstermektedir. Grafikten mesa içindeki 7 ayrı özgün Josephson kolu gözlenebilir ve hem pozitif hem de negatif bir şekilde uygulanan gerilimden dolayı histerik bir davranıştan bahsedilebilir.



**Şekil 20** Aşırı doping yapılmış Bi-2212 kristaline ait (Şekil 20) I-V karakteristiği

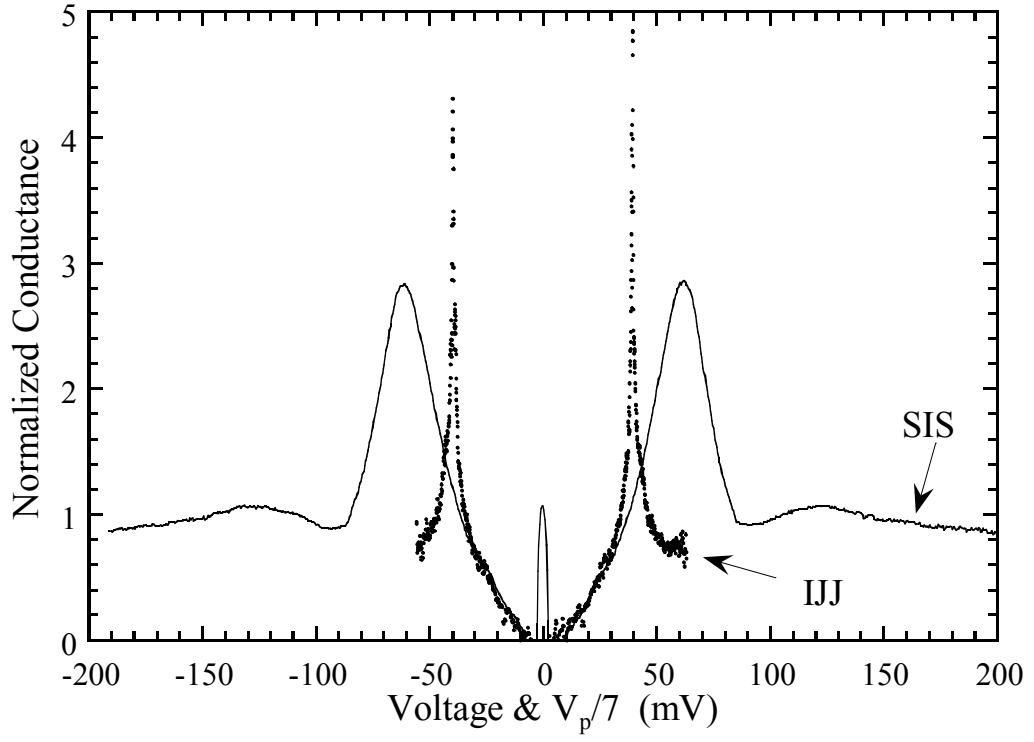


**Şekil 21** Aşırı doping yapılmış Bi-2212 kristaline ait (Şekil 20)  $dI/dV$  karakteristiği

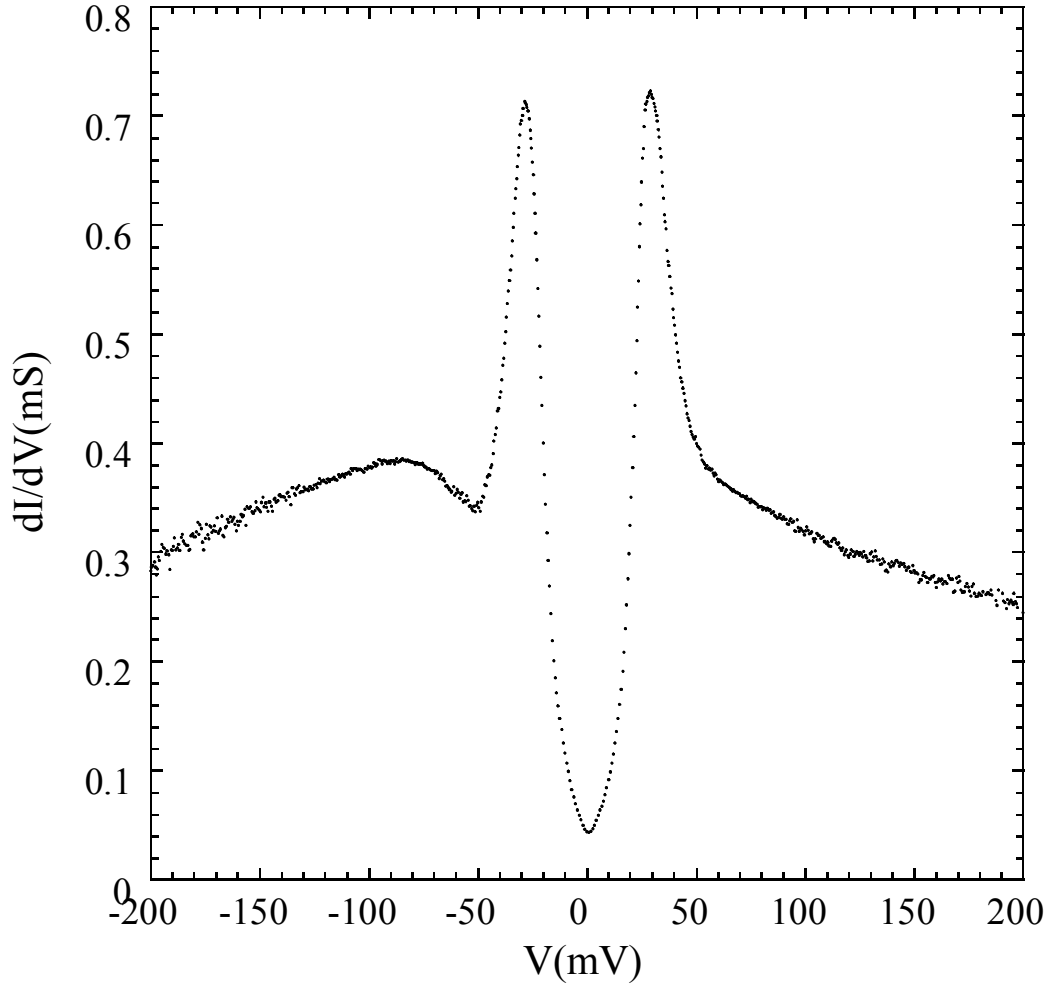
I-V karakteristiğindeki kolların sayısı direk mesa içindeki özgül Josephson eklemelerinin sayısını ( $n$ ) vereceğinden, dinamik iletkenlik piki  $n\Delta_{JJ}$  değerine karşılık gelir. Burada  $\Delta_{JJ}$  değeri özgül Josephson eklemelerinden elde edilen enerji aralığının değeridir ve bu değer daha önce sözü edildiği gibi tekli SIN ve SIS eklemelerinin spektroskopilerinden elde edilen  $\Delta$  değerinden çok daha küçüktür. Şekil 21 deki tünelleme iletkenliği-gerilim eğrilerine bakıldığında voltaj eksenini  $+274$  mV ve  $-274$  mV da kesen iletkenlik piklerinin çok dar olduğu görülebilir.

Şekil 22 de daha önce Şekil 21 de incelenen kristalin SIN ve SIS karakteristikleri sunulmuştur. Ana şekilde SIS eklemine ve özgül Josephson eklemelerine ait iletkenlik-gerilim eğrileri karşılaştırılırken Şekil 23 de SIN eklemine ait tünelleme iletkenliği-gerilim karakteristiği gösterilmiştir.





**Şekil 22.** Daha önce Şekil 16 ve 21 de gösterilen SIS ve IJJ eklemlerinin aynı eksen üzerinde gösterimi.

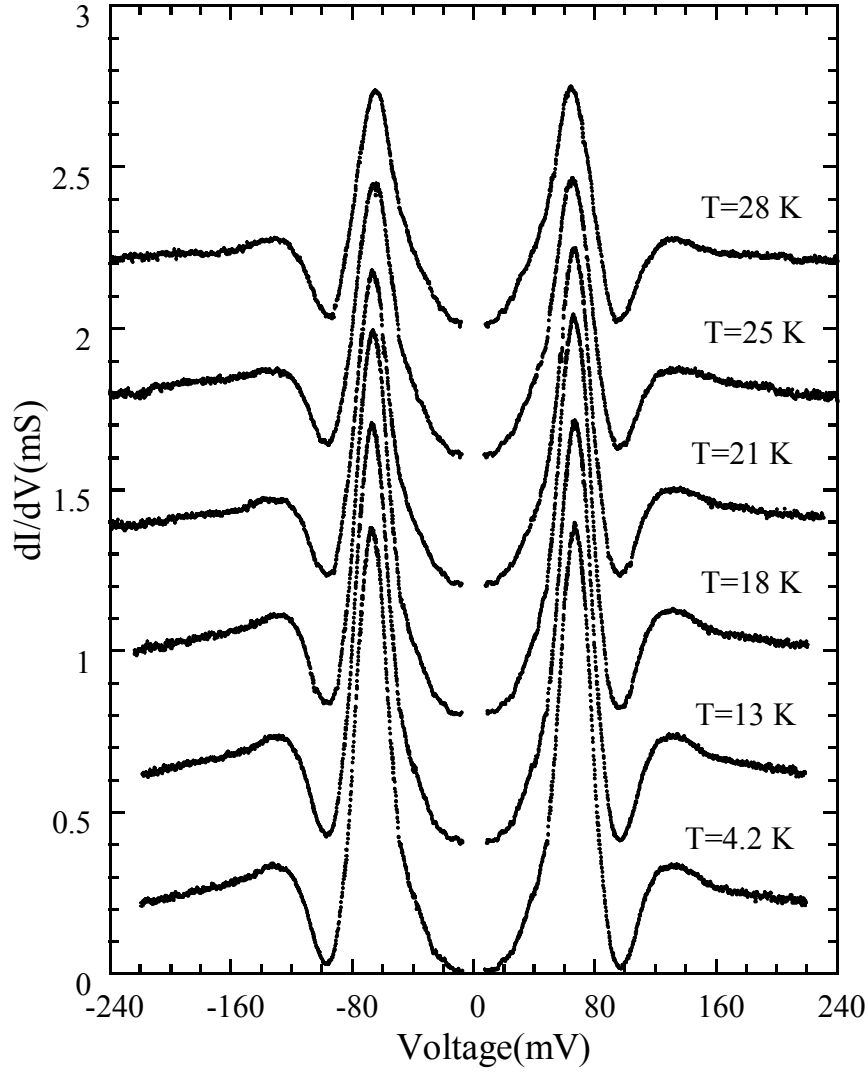


Şekil 23 SIN eklemının tünelleme iletkenliği voltaj karakteristiği.

Şekilden anlaşılacağı üzere özgül Josephson eklemeleri için çizilen eğride voltaj değerleri 7 ile bölünmüştür (Daha önce elde edilen I-V grafiğinde 7 kol gözlenmişti). SIS eklemine ait tunelleme iletkenliği pikleri +62mV ve -62 mV noktalarına karşılık gelir ve sonuç daha önce yapılan deneylerden elde edilen veillerle gayet uyumludur. Sıfır voltaj değerinde gözlenen Josephson akımı piki ulaşılan yasak enerji aralığının üstüniletkenlik kökenli olduğunun işaretçisidir. Şekildeki iki iletkenlik-gerilim grafiğine bakıldığında ilk göze çarpan farklılık piklerin voltaj eksenlerini kestiği yerler ve eğrilerin şekilleridir. Özgül Josephson eklemelerinin karakteristikleri incelendiğinde grafiğin +39mV ve -39mV değerlerinde keskin pikler verdiği görülebilir. Bu değer  $2\Delta_{IJ}$  ya eşit olduğuna göre elde edilen yasak enerji aralığı ( $\Delta_{IJ}$ ) gerçek değerinin çok altındadır.  $\Delta_{IJ}/\Delta$  oranı yaklaşık 0.65 bulunur ki bu değer Owen-Scalapino teorisinde belirlenen 0.6 değerine çok yakındır (Owen 1972). Bu teoriye beklenenden küçük enerji aralığı; aşırı sankiparçacık enjeksiyonunun sebep olduğu nonequilibrium elektron dağılımının sonucudur (Gray 1978).

Şekildeki bir diğer çarpıcı farklılık; artan bias voltajı değerleriyle beraber SIS eklemesinde görülüp özgül Josephson eklemelerinde gözlenemeyen çukur ve tümsek yapılarıdır. Bu karakteristik yapılar üstüniletken faza özgüdür ve normal fazlarda gözlenemez. Yüksek voltajlarda fazla ısınma ve sankiparçacık enjeksiyonu etkisiyle üstüniletken özelliklerini yitiren özgül Josephson eklemeleri bu karakteristikleri gösteremez.

Şekil 24 optimuma yakın ( $T_c=92$  K) katkılı Bi-2212 üstüniletkeniyle elde edilmiş bir SIS kırık eklemesinin tunelleme spektrumunun sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Sıcaklık 4.2 K den 28 K ne çıkarılırken enerji aralığının önemli miktarda değişmediği görülmektedir.

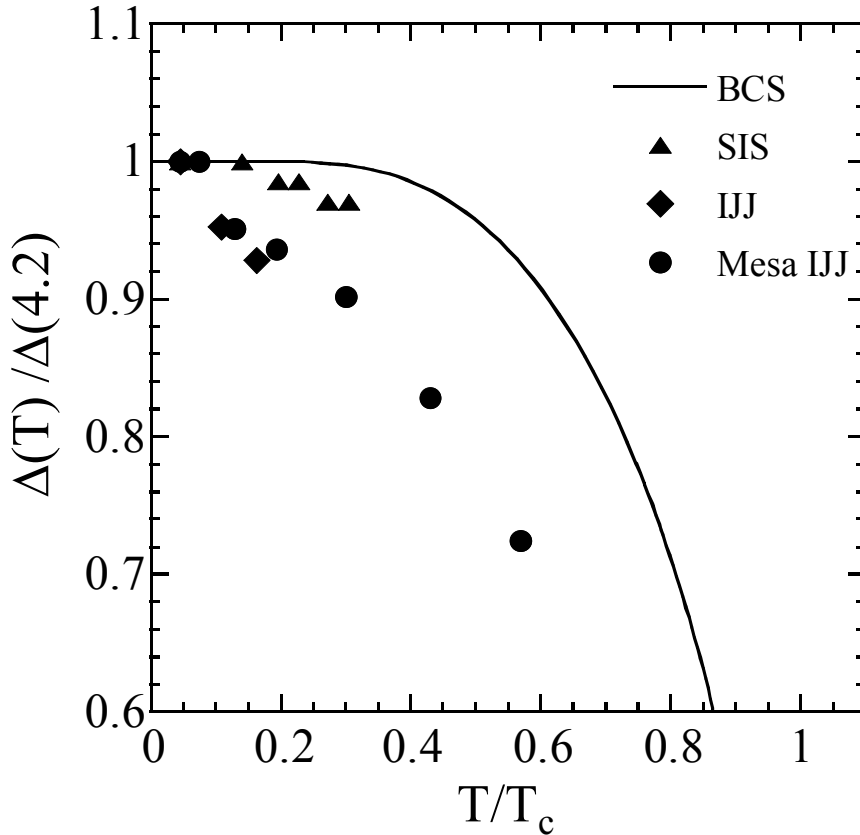


**Şekil 24.** SIS kırık eklemine ait tünelleme iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı

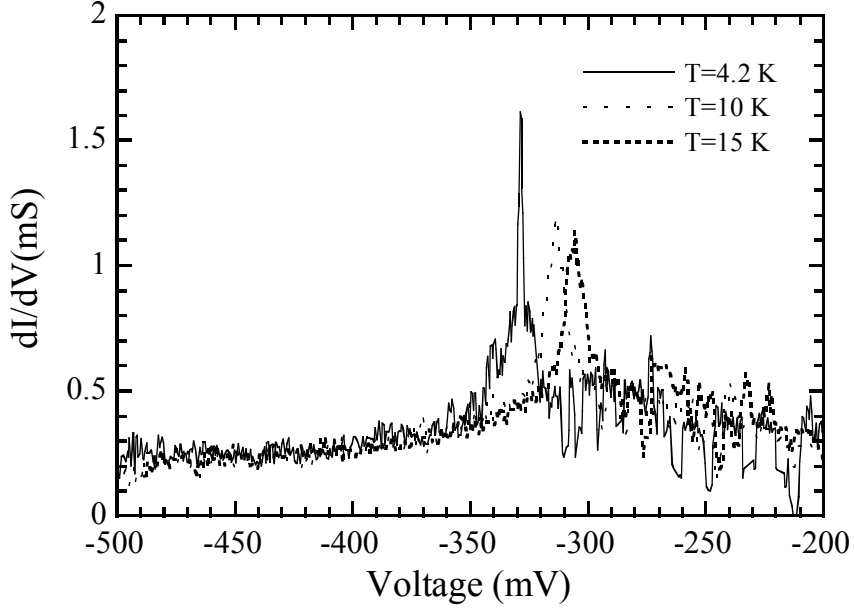
Grafikte netliği sağlamak amacıyla sıfır voltaj değerinde karşımıza çıkan Josephson akımına ait pikler silinmiştir. Düşük sıcaklık üstün iletkenleriyle ya da başka bir deyişle s-wave üstüniletkenlerle yapılan çalışmalarda elde edilen  $\Delta$  nın büyüklüğünün sıcaklıkla değişimi; hem deneysel olarak hem de teorik olarak iyi bir şekilde açıklanmıştır.  $\Delta(T)$  nin değeri  $T \cong T_c/4$  olana

kadar sabittir, sıcaklığın değeri  $T_c$  ye çok yaklaştığında enerji aralığının değeri de sıfıra yaklaşmaya başlar.

YSÜ'lerin üstüniletkenlik karakteristiklerinin sıcaklığa bağımlılığı değişik özellikler sergiler. Örneğin sadece YSÜlere özgü,  $T_c$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ortaya çıkan sankiboşluk (pseudogap) varlığı ARPES, özgün ısı'ın yüzeysel direnci, NMR gibi deneysel tekniklerle ispat edilmiştir (Ozyuzer 2002). Şekil 24 daki iletkenlik-gerilim grafiğinden  $2\Delta$  değerinin 67 meV a karşılık geldiği kolayca görülebilir. Tüm sıcaklıklara ait eğriler güçlü dip yapıları sergiler ve tünelleme pikleri sıcaklıkla beraber değişkenlik gösterir bununla birlikte piklerin voltaj ekseninde kestiği noktalar pek değişmez. Bu sonuç BCS teorisinde kabul edilen sabit değerli yasak enerji aralığı düşüncesini doğrular. Şekil 25 de çeşitli eklemlere ait enerji aralıklarının sıcaklığa bağımlılığıyla BCS teorisinin tahmin ettiği enerji aralığı-sıcaklık ilişkisi karşılaştırılmıştır.



**Şekil 25.** Farklı eklem tipleri için normalize edilmiş enerji aralığı-normalize edilmiş sıcaklık eğrisini verir.



**Şekil 26** Özgün Josephson eklemlerine ait tunelleme iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı.

Şekil 26 incelendiğinde özgün Bi-2212 eklemlere ait enerji aralığının artan sıcaklıkla BCS in tahmin ettiği kadar hızlı bir şekilde düştüğü görülebilir. Ana şekilden aynı özellikteki Bi-2212 üstüniletkenine ait özgün Josephson eklemlerinin tunelleme iletkenliğinin sıcaklıkla nasıl değiştiği hakkında bilgi alınabilir. Bias voltajın yönü pozitiften negatife doğrudur ve eklemlere karşılık gelen Josephson kolları histerik bir davranış gösterir. Artan sıcaklıkla beraber iletkenlik piklerine karşılık gelen voltaj değerleri azalır. Küçük şekilden de özgün Josephson eklemlerinin (şekilde  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  boyutlu mesa ile ölçüm yapılmıştır) tunelleme iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı hakkında bilgi elde edilebilir. Özgün Josephson eklemleriyle yapılan deneylerde ister PCT kullanılsın ister mesa yapı oluşturulsun, iletkenlik piklerinin artan sıcaklıkla beraber hızlı bir şekilde küçüldüğü gözlemlenir (Ozyuzer, 2004). Bu sonuç BCS teorisiyle çelişmektedir, buna dayanarak özgün Josephson eklemlerinin iletkenlik piklerinden yararlanarak sankiparçacık enerji aralığı için doğru değere ulaşamayacağımızı söyleyebiliriz.

## IV. BÖLÜM

### 4.1 Tartışma

Optimum ve aşırı dozda oksijen dopingi yapılmış  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri üzerine tünelleme spektroskopisi çalışmaları yapılmıştır. Nokta kontak yöntemi ile üstüniletken-yalıtkan-normal metal (SIN) ve SIS kırma eklemleri ile birlikte özgün Josephson eklemlerinde nanoboyuttaki kristallerden elde edilmişlerdir. Bunlara ek olarak  $10 \times 10$  mikrometre boyutlarında mesa yapı dizileri fotolitografi ve iyon demeti dağlama yöntemi ile üretilerek, 4.2 K den başlayarak oda sıcaklığına kadar karakterize edilmiştir. Aynı kristalden elde edilen dört farklı eklem tipinin sankiparçacık pikleri, çukur ve tümsek yapıları karşılaştırılmıştır. Sonuçların yüzey spektroskopileri ile karşılaştırılmasında çukur ve tümsek yapılarının bulunmadığı görülmüştür. Özgün Josephson eklemlerinden elde edilen enerji aralığının tek eklem geometrilerinde elde edilenlerde çok daha küçük olduğu bulunmuştur. Özgün Josephson eklemlerinin, özgün sanki parçacık özellikleri göstermeyip yerel ısınma ve dengede olmama durumu gösterdiği bulunmuştur. Bu özellik onların terahertz radyasyon kaynağı ve SQUID olarak uygulamalarında dezavantaj sağladığından, ısınmayı engelleyecek yeni tekniklerin geliştirilmesi gerekmektedir.

## V. BÖLÜM

### 5.1 Yararlanılan Kaynaklar

Anagawa, K., Yamada, Y., Shibauchi, T., Suzuki, M., 60 ns time scale short pulse interlayer tunneling spectroscopy for  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Appl. Phys. Lett.* **83**, 2381 (2003).

Bardeen, J., Cooper, L. N. and Schrieffer, J. R. Microscopic Theory of Superconductivity *Phys. Rev.* **106**, 162 (1957).

Bednorz, J. G. and Muller, K. A. Possible High  $T_c$  Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986).

Campuzano J.C. et al., Electronic Spectra and Their Relation to the  $(\pi, \pi)$  Collective Mode in High-  $T_c$  Superconductors, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3709 (1999).

DeWilde, Y., Miyakawa, N., Guptasarma, P., Iavarone, M., Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Romano, P., Hinks, D.G., Kendziora, C., Crabtree G. W. and Gray, K. E., Unusual Strong-Coupling Effects in the Tunneling Spectroscopy of Optimally Doped and Overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Phys. Rev. Lett.* **80**, 153 (1998).

Doh, Y.-J., Lee, H.-J., Chang, H.-S., Progressive evolution of tunneling characteristics of *in situ* fabricated intrinsic Josephson junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  single crystals, *Phys. Rev. B* **61**, 3620 (2000).

Egilmez, M., Gunel, A., Okur, S., Tanoglu M., Ozyuzer, L., Electrical and microstructural properties of  $\text{MgB}_2/\text{Mg}$  composites, *Key Engineering Materials* **264**, 1197 (2004).

Gray, K.E., Willemsen H.W., Inhomogeneous State of Superconductors by intense Tunnel injection of quasiparticles, *J. Low Temp. Phys.* **31**, 911 (1978)

Gross, R., “Interfaces in High-Tc Superconducting Systems”. Shinde Subhash L., Rudman David A (ed.) Springer Verlag (1994).

Hudson, E. W., Pan, S. H., Gupta, A.K., Ng, K.-W., Davis, J.C., Atomic-Scale Quasi-Particle Scattering Resonances in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Science* **285**, 88 (1999).

Kendziora, C., Kelley, R. J., Skelton, E., Onellion, M., Advances in single-crystal  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  superconductors, *Physica C* **257**, 74 (1996).



Kleiner, R., Steinmeyer, F., Kunkel, G., Muller, P., Intrinsic Josephson effects in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  single crystals, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2394 (1992).

Kleiner, R., Muller, P., Intrinsic Josephson effects in high- $T_c$  superconductors, *Phys. Rev. B* **49**, 1327 (1994).

Kurter, C., Ozyuzer, L., Fabrication of Array of Mesas on Superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Single Crystals, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, to be published June 2005.

Miyakawa, N., Zasadzinski, J.F., Ozyuzer, L., Guptasarma, P., Hinks, D. G., Kendziora, C., Gray, K. E, Predominantly Superconducting Origin of Large Energy Gaps in Underdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  from Tunneling Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1018 (1999).

Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranka, T., Zenitani, Y., Akimitsu, J., Superconductivity at 39K in  $\text{MgB}_2$ , *Nature* **410**, 63 (2001).

Owen, C.S., Scalapino, D.J., Superconducting State under the Influence of External Dynamic Pair Breaking, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 1559 (1972).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F. and Gray, K. E. Point Contact Tunneling Apparatus with Temperature and Magnetic Field Control, *Cryogenics* **38**, pp. 911-915 (1998).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Miyakawa, N., Tunneling Spectra and Superconducting Gap in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  and  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+d}$ , *Int. J. Mod. Phys. B* **29-31**, 3721 (1999).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Kendziora, C., Gray, K. E. Quasiparticle and Josephson Tunneling of Overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Single Crystals, *Phys. Rev. B* **61**, 3629 (2000).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Kendziora, C., Miyakawa, N., Absence of Pseudogap in Heavily Overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  from Tunneling Spectroscopy of Break Junctions, *Europhysics Letters* **58**, 589 (2002).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Hinks, D. G., Miyakawa, N., Probing the Phase Diagram of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  with Tunneling Spectroscopy, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity* **13**, 893 (2003).

Ozyuzer, L., Kurter, C., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Hinks, D. G., Miyakawa, N., Single Junction and Intrinsic Josephson Junction Tunneling Spectroscopies of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *cond-mat/0410184* (2004).

Pan, S. H., O'Neal, J. P., Badzey, R. L., Chamon, C., Ding, H., Engelbrecht, J. R., Wang, Z., Eisaki, H., Uchida, S., Gupta, A. K., Ng, K.-W., Hudson, E. W., Lang, K. M., Davis, J. C., Microscopic electronic inhomogeneity in the high-Tc superconductor  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Nature* **413**, 282 (2001).

Ponomarev, Y.G., Khi, C.S., Uk, K.K., Sudakova, M.V., Tchesnokov, S.N., Lorenz, M.A., Hein, M.A., Muller, G., Piel, H., Aminov, B.A., Krapf, A., Kraak, W., Quasiparticle tunneling in the c-direction in stacks of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  S-I-S junctions and the symmetry of the superconducting order parameter, *Physica C* **315**, 85 (1999).

Renner, Ch., Revaz, B., Genoud, J.-Y., Kadowaki, K., Fisher, O., Pseudogap Precursor of the Superconducting Gap in Under- and Overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Phys. Rev. Lett.* **80**, 149 (1998).

Schlenga, K., Kleiner, R., Hechtfisher, G., Möble, M., Schmitt, S., Müller, Paul, Tunneling spectroscopy with intrinsic Josephson junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  and  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ , *Phys. Rev. B* **57**, 14518 (1998).

Tanabe, K., Hidaka, Y., Karimoto, S., Suzuki, M., Observation of both pair and quasiparticle tunneling in intrinsic junction stacks fabricated on  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  single crystals, *Phys. Rev. B* **53**, 9348 (1996).

Ustinov, A. V., Doderer, T., Huebener, R. P., Pedersen, N. F., Mayer, B., Oboznov, V. A., Dynamics of sine-Gordon solitons in the annular Josephson junction, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1815 (1992).

Yurgens, A., Winkler, D., Zavaritsky, N.V., Claeson, T., Strong temperature dependence of the c-axis gap parameter of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  intrinsic Josephson junctions, *Phys. Rev. B* **53**, R8887 (1996).

Yurgens, A., Winkler, D., Claeson, T., Yang, G., Parker, I.F.G., Gough, C.E.,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  intrinsic Josephson junctions in a magnetic field, *Phys. Rev. B* **59**, 7196 (1999).

Yurgens, A., Winkler, D., Claeson, T., Hwang, S. J., Choy, J. H., "Pseudogap features of intrinsic tunneling in (HgBr<sub>2</sub>)-Bi2212 single crystals," *Int. J. Mod. Phys. B* **13**, 3758 (1999).

Yurgens, A., Winkler, D., Cleason, T., Hwang, S.-J., Choy, J.-H., Pseudogap features of intrinsic tunneling in Bi2212 single crystals, *Physica C* **362**, 286 (2001).

Yurgens, A., Winkler, D., Claeson, T., Ono, S. Ando, Y., Reply to the Comment on 'Intrinsic tunneling spectra of  $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x)\text{CuO}_6$ ': Auxiliary information, *cond-mat/0309131* (2003).

White P.J. et al., Rapid suppression of the superconducting gap in overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  *Phys. Rev. B* **54**, R15669 (1996).

Wolf, E. L., Principles of Electron Tunneling Spectroscopy, Oxford University Press, New York, 1985

Zasadzinski, J. F., Ozyuzer, L., Miyakawa, N., Gray, K. E., Hinks, D. G., Kendziora, C., Correlation of tunneling Spectra in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  with the Resonance Spin Excitation, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 067005 (2001).

1- Proje No : TBAG-2031

2- İlgili Araştırma Grubu : TBAG

3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri :

1 Eylül 2001-1 Eylül 2004

4- Projenin Adı :

**YÜKSEK SICAKLIK ÜSTÜNİLETKENLERİNDEKİ ÖZGÜN JOSEPHSON**

**EKLEMLERİNİN TÜNELLEME KARAKTERİSTİĞİ**

5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar :

Lütfi Özyüzer (yürütücü), Cihan Kurter (Araştırmacı), Mehmet Eğilmez (Araştırmacı)  
Aylin Günel (Araştırmacı)

6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi :

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü,  
Fizik Bölümü, 35430 Urla, İzmir

7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi :

Argonne National Laboratory, Malzeme Bilimi Bölümü  
Argonne IL USA

8- Özet (Abstract) :

### **ÖZET**

Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin, üstüniletkenlik mekanizmasının anlaşılması için çok büyük emek harcanmaktadır. Deneysel tekniklerde biri olan tünelleme spektroskopisi (üstüniletken-yalıtkan-normal metal (SIN) ve üstüniletken-yalıtkan-üstüniletken (SIS)), elektronların çiftlenme mekanizması hakkında önemli bilgiler verir. Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin büyük anisotropisi ve aşırı kısa koherens uzunluğu sebebiyle hala tekrarlanabilir düzlemsel tünel eklemeler üretilmemiştir. Kristal yapılarının kompleks olmasına karşın, bütün yüksek sıcaklık üstüniletkenleri bazı katmanları Cu ve O dan oluşan kare örgülerden oluşur. Üstüniletkenlik bu CuO<sub>2</sub> düzlemlerdeki kuvvetli etkileşen elektronlardan kaynaklanırken birim hücredeki diğer katmanlar pasif boşluk doldurucular

veya yük depoları gibi davranır. Bu mükemmel katmanlı yapı kullanılarak,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri veya c-exseni boyunca büyütülmüş incefilmleri kullanılarak mesa yapılar üretilebilir ve bunlar özgül Josephson eklemleri olarak isimlendirilir. Bu çalışmada, fotolitografi ve Argon iyon demeti milling yöntemi ile 10x10 mikrometre ve 20x20 mikrometre boyutlarında  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  tek kristalleri üzerine özgül Josephson eklemleri hazırlanmıştır. Elde edilen eklemlerin, geniş bir sıcaklık aralığında (4.2-300 K) akım-gerilim ve tünelleme iletkenliği ölçülmüştür. Bir SIN eklemin tünelleme iletkenliği durum yoğunluğu ile orantılı olduğundan, SISISI... eklemleri serisinde de bu durum yoğunluklarının birleştirilmesinden oluşur. Özgül Josephson eklemlerinin tünelleme iletkenliğide sonuçta, incelenen üstüniletkenin durum yoğunluğunun spektral özelliklerini (örneğin keskin sankiparçacık (quasiparticle) pikleri ve “dip” ve “hump”) göstermesi gerekir. Bu özellikler optimum doping yapılmış  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  örnekler için incelenmiş ve yasak enerji aralığının ve Josephson akımının dopinge bağımlılığı bulunarak SIN ve SIS ile elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Özgül Josephson eklemleri ve SIS lerin karşılaştırılması sonucunda tamamen farklı karakteristiklere sahip oldukları görülmüştür. Bu özelliklerin özgül Josephson eklemlerinde ısınma ve sankiparçacık enjekte edilmesi ile açıklanmıştır.

### ABSTRACT

There have been enormous efforts to understand the mechanism of superconductivity in high temperature superconductors. One of the experimental techniques, tunneling spectroscopy (Superconductor-Insulator-Normal metal (SIN) and SIS) gives valuable information about pairing mechanism. Because of large anisotropy and the extremely short coherence lengths of the high temperature superconductors, reproducible planar tunnel junctions are still far away from reality. Although their crystal structures are complex, all high temperature superconductors contain some crystal layers consisting of only Cu and O atoms in a square lattice. Superconductivity originates from strongly interacting electrons in these  $\text{CuO}_2$  planes while the other structural components in the unit cell serve as passive spacers or as charge reservoirs. Using these perfect layered structures with a very small lateral size, stacked series

arrays of mesas can be fabricated on the surfaces of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  single crystals or epitaxially grown c-axis thin films and these are called intrinsic Josephson junctions. In this study, intrinsic Josephson junctions of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  single crystals have been prepared by photolithography and Argon ion beam milling technique. Current-voltage characteristics and tunneling conductance of the junctions have been measured over a wide temperature range (4.2 - 300 K). Since tunneling conductance of SIN junction is proportional to the density of states, series of SISISI... junctions are actually convolution of these density of states. Tunneling conductance in intrinsic Josephson junctions reflect the spectral properties of the density of states of superconductor under examination, such as quasiparticle peaks (Energy Gap), dip and hump. These properties have been investigated for optimally doped samples of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  and compared to the SIS junctions. The comparison of IJJ and SIS suggest that the markedly different characteristics of IJJ are a consequences of nonequilibrium effects and are not intrinsic quasiparticle features.

9- Anahtar Kelimeler :

Yüksek Sıcaklık Üstüniletkenler; Tünelleme Spektroskopisi; Josephson Eklemleri; Durum Yoğunluğu; Yasak Enerji Aralığı. High Temperature Superconductivity; Tunneling Spectroscopy; Josephson Junctions; Density of States; Energy Gap

10- Projede Yapılan Çalışmaların Sonuçları ile İlgili Yayınlar (makale, tebliğ) :

Kurter, C., Ozyuzer, L., Fabrication of Array of Mesas on Superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  Single Crystals, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **7**, 407 (2005).

Egilmez, M., Gunel, A., Okur, S., Tanoglu, M., Ozyuzer, L., Electrical and microstructural properties of  $\text{MgB}_2/\text{Mg}$  composites, *Key Engineering Materials* **264**, 1197 (2004).

Ozyuzer, L., Kurter, C., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Hinks, D. G., Miyakawa, N., Single Junction and Intrinsic Josephson Junction Tunneling Spectroscopies of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *cond-mat/0410184* (2004).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Hinks, D. G., Miyakawa, N., Probing the Phase Diagram of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  with Tunneling Spectroscopy, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity* **13**, 893 (2003).

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Kendziora, C., Miyakawa, N., Absence of Pseudogap in Heavily Overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  from Tunneling Spectroscopy of Break Junctions, *Europhysics Letters* **58**, 589 (2002).

Gunel, A. "Electrical and Structural Characterization of Metallic Superconductor MgB<sub>2</sub>", M.S. Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2003)

Eğilmez, M. "Microstructural, Electrical and Mechanical Properties of MgB<sub>2</sub>/Mg Metal Matrix Composites" M.S. Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2004)

11- Proje Sonuçlarının Gizlilik Durumu :

Gizli

Gizli Değil