

İnönü Üniversitesi  
Temel Bilimler Fak.

Cu<sub>2</sub>O ÇOKLU KRİSTALİNİN FOTOİLETKENLİĞİ

Yüksek Lisans Tezi

İlhan Aksoy

MALATYA - 1980

Bu çalışma , Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde Prof. Dr. Fahri Domanıç in sorumluluğunda Dr. Necmi Serin tarafından yaptırılmıştır.

Tezi öneren ve çalışma boyunca heran değerli bilgileri ile bana yön veren sayın hocalarım Prof. Dr. Fahri Domanıç ,Dr. Necmi Serin'e şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

## ÖZET

$\text{Cu}_2\text{O}$  çoklu kristalinin iletkenlik özelliklerini incelemek için yapılan bu çalışmada , bugüne dek yapılan araştırmalar incelendi. Verilen kuramsal bilgilerin ışığında genellikle  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$  yapısı üzerinde duruldu.

Bilindiği gibi , genel olarak yarıiletkenlerde soğutma işlemi , iletkenliğin arttırılmasında önemlidir. Bu çalışmada , oksitlenmeden sonra iki farklı ortamda soğutma yapıldı. Elektrod olarak Au ve Cd metalleri kullanıldı. Böylece

1) Soğutma işleminde , su kullanılarak hazırlanan örnekler

a)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$

b)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$

2) Soğutma işleminde , fosforik asit çözeltisi ( $C = 0.737$  molar) kullanılarak hazırlanan örnekler

a)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$

b)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$

olmak üzere 4 örnek elde edildi. Bu örneklerin sıcaklığa bağlı olarak karanlık ve aydınlatma altındaki iletkenliği incelendi.  $\text{Cu}_2\text{O}$  çoklu kristallerinde tuzakların boşalması deneysel olarak görüldü.

## İÇİNDEKİLER

GİRİŞ .....	1
-------------	---

### BÖLÜM - I

#### YARI İLETKENLERDE İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK

1.1: SÜREKLİLİK BAÇINTILARI .....	3
1.2: FOTOİYARMA .....	5
1.3: İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK İŞLEMİ .....	7
1.3.1: Katkısız Yarıiletkenlerde İletkenlik ve Fotoiletkenlik İşlemi .....	7
1.3.2: Katkılı Yarıiletkenlerde İletkenlik ve Fotoiletkenlik İşlemi .....	12
1.4: İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK .....	13
1.4.1: Katkısız Yarıiletkenlerde İletkenlik ve Fotoiletkenlik .....	13
1.4.2: Katkılı Yarıiletkenlerde İletkenlik ve Fotoiletkenlik .....	15

### BÖLÜM - II

#### $Cu_2O$ NUN İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK ÖZELLİKLERİ

2.1: BAKIRIN OKSİTLENMESİ VE $Cu_2O$ NUN STOKİYOMETRİSİ .....	18
2.1.1: Silindirik Yüzeylerin Oksitlenmesi .....	19
2.1.2: Tabaka Yüzeylerin Oksitlenmesi .....	21
2.1.3: $Cu_2O$ nun Stokiyometrisi .....	22
2.2: $Cu_2O$ DA ELEKTRON TUZAKLAMA .....	23
2.3: $Cu_2O$ DA İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK .....	27
2.3.1: Geçici Fotoiletkenlik .....	29
2.3.2: Kararlı Durum Fotoiletkenliği .....	37
2.4: $Cu/Cu_2O$ EKLEMİNİN ÖZELLİKLERİ .....	41
2.4.1: Spektral Özellikleri .....	41
2.4.2: Engel Yüksekliği .....	41

BÖLÜM - III

DENEYLER

3.1: KULLANILAN ARAÇLAR .....	44
3.2: ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI .....	44
3.3: YAPILAN DENEYLER .....	45
3.4: DEĞERLENDİRME VE SONUÇ .....	73
3.4.1: Değerlendirme .....	73
3.4.2: Sonuç .....	74
KAYNAKLAR .....	76

## GİRİŞ

Fotoelektrik etki , 1934 yılında ilk olarak Kikoin ve Naskov tarafından CuO üzerinde gözlenmiştir. Bu etkinin ortaya çıkarılmasıyla birlikte fotoiletkenlik konusu geniş bir araştırma sahası olmuştur. Sırasıyla , 1953 , Aigrain , Bulliard gurubu ve Moss , Pinçerle ,Woodward gurubu birbirlerinden bağımsız olarak Germanyum üzerinde; 1953 , 1954 ,Moss PbS üzerinde; 1954 , Bulliard Silisyum üzerinde; 1954 , Kurnick InSb üzerinde fotoelektrik etkiyi gözlemişlerdir ( 1 ). Fotoiletkenliği araştırılan maddeler arasında Cu<sub>2</sub>O nun önemli bir yeri vardır. Oksitlenmede Stokiyometrisi değişir. Başka bir deyimle , oksitlenme süresine bağlı olarak maddedeki Oksijen miktarı değişir ( 2 ). Kırystalleşmesi 875°C den yukarıdaki sıcaklıklarda olur. Kırystal yapısında iki tip örgü kusuru vardır. Bunlar , Frenkel kusurları; Bir atomun örgüdeki yerinden çıkıp kafes atomları arasında bir yerde kalması halindeki düzensizliktir. Schottky kusurları; Bir atomun örgüdeki yerinden çıkıp bırakarak boşluklar halindeki düzensizliktir. Genellikle p - tipi bir yarıiletkenidir. Cu<sub>2</sub>O nun yasak enerji aralığında iki tuzak seviyesi ve bir alıcı seviyesi vardır. Aydınlatma altındaki iletkenliği , 100°C den aşağı sıcaklıklar için henüz kesin kuramsal bilgiler mevcut değildir. 100°C den yukarı sıcaklıklardaki aydınlatmalarda , fotoiletkenliği sıcaklıkla çizgisel olarak artar. 100°C den aşağı sıcaklıklarda , aydınlatma ile elde edilen fazla iletkenlik eğrilerinde ; 298°K ve 373°K de fotoiletkenlik en fazla değerlerine ulaşır. Bu ise Cu<sub>2</sub>O nun tuzak seviyelerine sahip olduğunu ve bu tuzakların yukarıdaki sıcaklıklarda boşaldığını gösterir. Bu etkinin gözlenmesinden sonra Cu<sub>2</sub>O da fotohafıza etkisinin varlığı da ortaya çıkarılmıştır. Fotohafıza etkisi ileriki çalışmalarda uygulama alanı bulabilir. Örneğin , tuzaklar denetim altına alınarak fotohafıza devrelerinde kullanılabilir. Çünkü verilen bir bilginin kaydı ve silme işlemlerinin yapıldığı ışığın dalga boyu bilinmektedir. Kayıt için dalga boyu 630 nm olan ışık; Okuma , dalga boyu 840 nm olan ışıkla yapılır. Kayıt edilmiş bir bilginin silinmesi ise , ısıtma veya kızılötesi ışınlarla yapılır( 3 ) ( 4 ) ( 5 ) ( 6 ) ( 7 ) ( 8 )

Cu<sub>2</sub>O , Ziraatte ve teknikte pek çok alanda kullanılır. Bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge I ve Çizelge II de verilmiştir. Elektrikte doğ-

rultucu olarak eskiden beri kullanılmaktadır. Son yıllarda güneş pili elde etme çalışmaları arasında  $Cu_2O$  üzerinde durulmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar verimin % 1 - 2 civarında olduğunu göstermekle beraber, kuramsal olarak verimin % 12 ye kadar çıkarılabileceği hesaplanmıştır. Değişik maddelerle yapılan bağlamaları arasında en iyi netice  $Cu/Cu_2O$  ekleminden alınmaktadır ( 9 ) ( 10 ).

Molekül ağırlığı	: 143.08 gr.
Yoğunluğu	: 6.0 gr./cm <sup>3</sup>
Çözünürlüğü	: Soğuk ve sıcak suda çözünmez HCl, $NH_4OH$ da çözünür. $HNO_3$ de çok az çözünür.

Cizelge I:  $Cu_2O$  nun kimyasal özellikleri ( 11 )

Renk	: Koyu kırmızı
Erime sıcaklığı	: 1250°C
Kristal yapı	: Sekiz yüzlü kübik
Özdirenç	: $4 \times 10^3 - 16 \times 10^{13}$ cm
Hall katsayısı	: $2.1 \times 10^4 - 2.2 \times 10^7$ cc/kulon
Hareketlilik	: $480 - 1300$ cm <sup>2</sup> /volt.sn.
Taşıyıcı yoğunluğu	: $3 \times 10^{11} - 3 \times 10^{12}$ cm <sup>-2</sup>
Yasak enerji aralığı	: 2 eV
Alıcı seviyesi	: 0.3 eV
Tuzak seviyeleri	: 1.03 eV ile 1.34 eV
Yarıiletkenlik tipi	: p - tipi

Cizelge II:  $Cu_2O$  nun fiziksel özellikleri ( 3 ) ( 5 ) ( 11 ) ( 12 )

## BÖLÜM -I

## YARIİLETKENLERDE İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK

Bu bölümde farklı uyarımlar altında elektron ve deşiklerdeki değişmeler için, süreklilik bağıntıları ile fotouyarma işlemi verilmiştir. Yarıiletkenlerde, genel olarak iletkenlik ve fotoiletkenlik incelenmiştir ( 13 )( 14 )( 15 ).

## 1.1: SÜREKLİLİK BAĞINTILARI

Yarıiletkenlerde herhangi bir uyarma ile elektronların değerlik şeridinden iletim şeridine geçmesiyle meydana gelen akıma iletkenlik akımı denir. İletkenlik uyarmanın cinsine göre isimlendirilir. Eğer elektronlar ısı verilerek uyarılıyorsa ısısal iletkenlik, foton gönderilerek uyarılıyorsa fotoiletkenlik adı verilir.

Yarıiletkenlerde, ısısal denge durumunda, kendiliğinden meydana gelme ve birleşme olayları olur. Yarıiletken dengeden herhangi bir sebepten dolayı ayrıldığında meydana gelen fazla taşıyıcıların süreklilik bağıntıları

$$-\nabla \cdot \mathbf{J}_p + g_p - \frac{p}{\tau_p} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{J}_n + g_n - \frac{n}{\tau_n} = \frac{\partial n}{\partial t}$$

ile verilir.  $\mathbf{J}_n$  ve  $\mathbf{J}_p$  uygulanan alandan dolayı akımdaki değişikliği gösterirler. Değerleri

$$\mathbf{J}_p = -D_p \nabla p + p \mu_p \vec{E} \quad (1.1.a)$$

$$\mathbf{J}_n = -D_n \nabla n - n \mu_n \vec{E}$$

bağıntıları ile verilirler. Burada,  $g_n, g_p$  elektron ve deşiklerin meydana gelme hızlarını;  $p/\tau_p$  ve  $n/\tau_n$  direk birleşmeyi;  $n$  elektron sayısını;  $p$  deşik sayısını;  $\tau_n$  elektronların yaşama süresini;  $\tau_p$  deşiklerin yaşama

süresini;  $\mu_n$ , elektronların hareketlilik sabitini;  $\mu_p$ , deşiklerin hareketlilik sabitini gösterirler.  $D_n$  ve  $D_p$  elektronların ve deşiklerin yayılma sabiti olmak üzere

$$D_n = \frac{\lambda_n \bar{v}_n}{3} = \frac{\mu_n kT}{e} \quad (1.1.b)$$

$$D_p = \frac{\lambda_p \bar{v}_p}{3} = \frac{\mu_p kT}{e}$$

bağıntıları ile verilir.  $\bar{v}_n$  ve  $\bar{v}_p$ , elektronların ve deşiklerin ortalama ısısal hızlarıdır. (1.1.b), (1.1.a) da yerine bırakılıp bu değerler (1.1) de kullanılarak

$$D_p \nabla^2 p - \mu_p \nabla \cdot (p \vec{E}) + g_p - \frac{p}{\tau_p} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$D_n \nabla^2 n + \mu_n \nabla \cdot (n \vec{E}) + g_n - \frac{n}{\tau_n} = \frac{\partial n}{\partial t}$$

bağıntıları bulunur. Ayrıca tensör çarpımından

$$\nabla \cdot (\phi \vec{A}) = A \cdot \nabla \phi + \phi \nabla \cdot \vec{A} \quad (1.2.a)$$

bağıntısı kullanılır ve

$$g_n = g_{on} + g'_n \quad (1.2.b)$$

$$g_p = g_{op} + g'_p$$

alınırsa

$$D_p \nabla^2 p - \mu_p (E \cdot \nabla p + p \nabla \cdot \vec{E}) + g'_p - \left( \frac{p}{\tau_p} - \frac{p_0}{\tau_{p0}} \right) = \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$D_n \nabla^2 n + \mu_n (E \cdot \nabla n + n \nabla \cdot \vec{E}) + g'_n - \left( \frac{n}{\tau_n} - \frac{n_0}{\tau_{n0}} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}$$

süreklilik bağıntıları bulunur.  $g'_n$  ve  $g'_p$  uyarma ile meydana gelen fazla elektron ve deşik sayılarıdır. iletkenliğe her türlü katkının var olduğu kabul.

edilerek çıkarılan bu bağıntılarda,  $\vec{E}$  elektrik alanı uygulanmazsa (1.3) bağıntısı

$$D_p \nabla^2 p + g'_p - \left( \frac{p}{\tau_p} - \frac{p_0}{\tau_{p0}} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$D_n \nabla^2 n + g'_n - \left( \frac{n}{\tau_n} - \frac{n_0}{\tau_{n0}} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}$$

haline gelir. Yayılma etkisi göz önüne alınmazsa (1.4) bağıntısı daha kolay indirgenir ve

$$g'_p + \frac{p_0}{\tau_{p0}} - \frac{p}{\tau_p} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$g'_n + \frac{n_0}{\tau_{n0}} - \frac{n}{\tau_n} = \frac{\partial n}{\partial t}$$

olur. (1.5) bağıntısında,  $g'_n$  ve  $g'_p$  uyarma ile meydana gelen fazla elektron ve deşikleri;  $p_0/\tau_{p0}$  ve  $n_0/\tau_{n0}$  deşik ve elektronların ısısal denge durumunda kendiliğinden meydana gelme hızlarını;  $p/\tau_p$  ve  $n/\tau_n$  deşik ve elektronların direk birleşme hızlarını gösterir.

## 1.2: FOTOUYARMA

Yarıiletken yüzeyine gönderilen ışık yığınının, bir kısmı yarıiletken tarafından yutulur, Diğer bir kısımda yüzeyden geri yansır. Yutulan ışık enerjisi serbest taşıyıcılar oluşturur. Hareket haline gelen elektronlardan bir kısmı, üzerinde taşıdığı enerjiyi başka örgü elektronlarına iletir ve onlarında serbest hale gelmesini sağlar. Bu işleme üretme işlemi denir. Hareket halindeki elektronların bir kısmında üst yüzeye yaklaşır. Eğer enerjisi büyük ise bu elektron iletme katılmak üzere dışarı çıkar. Bu işlemede kaçma işlemi denir.

Yarıiletkende,  $dx$  kalınlığında soğurulan ışık gücü  $dP(x)$  ise,  $x$  uzaklığında soğurulan toplam ışık gücü

$$P(x) = P_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.6)$$

dir.  $P_0$ ,  $x=0$  daki ışık gücü;  $\alpha$ , güç soğurma katsayısıdır.  $n(x)$  meydana gelen fotoelektronlar olmak üzere

$$n(x)dx = \frac{|dP(x)|}{hf} = \frac{\alpha P_0}{hf} \exp(-\alpha x) dx \quad (1.7)$$

bağıntısıyla verilir. Ancak oluşan bu fotoelektronların hepsi iletime katılmazlar.  $g'(x)$  iletime katılan (yani kaçan) elektronlar olmak üzere

$$g'(x) = g'_0 h(x) \quad (1.8)$$

bağıntısıyla verilir.  $g'_0$ ,  $x=0$  daki iletime katılan elektronlardır.  $h(x)$ ,  $x$  de fotoelektronları tutma yasası olarak bilinir. Kaçma derinliği  $1/\beta$  olmak üzere

$$h(x) = \exp(-\beta x) \quad (1.9)$$

ile verilir.  $g'_0$  değeri yarıiletkenler için

$$g'_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{\kappa}{E} \right)^{1/2} \right] \quad (1.10)$$

bağıntısıyla verilir.  $E$ , uyarılan elektronların enerjisi;  $\kappa$ , elektron eğilimidir. (1.10) ile (1.9) bağıntıları (1.8) de yerine konarak, iletime katılan fotoelektronların sayısı için

$$g'(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{\kappa}{E} \right)^{1/2} \right] \exp(-\beta x) \quad (1.11)$$

bağıntısı elde edilir. (1.11) den, yüksek verimli bir fotoelektrik etki elde etmenin şu özelliklere bağlı olduğu çıkarılır.

1)  $g'_0$ , üst yüzeyde büyük olmalıdır. Bu ise  $\kappa$  nin küçük olmasıyla mümkündür.

2) Fotoelektronların iletime katılma özelliği için,  $1/\beta$  büyük olmalıdır. Bu ise  $\beta$  nin çok küçük olmasıyla mümkündür. Yarıiletkenlerde  $E_g > E$  ise örgü ancak  $\hbar\omega_0$  titreşimi yapar.  $E_g < E$  ise şeritten şeride bir geçiş yapar. burada  $E_g$ , yarıiletkenlerin yasak enerji aralığıdır.

3) Fotoelektrik etkinin başlayabilmesi için, gelen fotonların enerjileri  $hf$  olmak üzere  $hf > \kappa$  olmalıdır.

### 1.3: İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK İŞLEMİ

Yarıiletkenlerde, normal durumlarda, oda sıcaklığında kırystal yapının kovalent bağları devamlı olarak çözüülür ve elektronlar serbest hale geçerler. Bu olaya elektron-deşik çiftlerinin meydana gelmesi denir. Bu olayın terside olabilir. Bu durumda elektronlar daha olmayan bağlar tarafından tutulurki bunada elektron-deşik çiftlerinin birleşmesi denir. Hem meydana gelme hemde birleşme rasgele olaylardır ve her zaman meydana gelir. Üç çeşit yeniden birleşme vardır.

- 1) Direk birleşme
- 2) Birleşim merkezleri ile birleşme
- 3) Elektron tuzaklaması

#### 1.3.1: Katkısız Yarıiletkende İletkenlik ve Fotoiletkenlik İşlemi

Katkısız yarıiletkende ısısal denge durumunda  $p \cdot n = n_i^2 = \text{sabit}$  dir. Yukarıda sözü edilen üç yeniden birleşme merkezinin işleyişi şöyle verilir.

1) Direk Birleşme: Katkısız yarıiletkende denge durumundan ayrılan elektronların sayısı  $\Delta n$ , deşiklerin sayısı  $\Delta p$  olmak üzere

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \rho \left[ p_0 n_0 - (p_0 + \Delta n)(n_0 + \Delta n) \right] \approx -\rho (p_0 + n_0) \Delta n \quad (1.12)$$

bağıntısıyla verilir. Burada  $\rho$ , yük yoğunluğudur. (1.12) de

$$\rho (p_0 + n_0) = 1/\tau \quad (1.12.a)$$

bağıntısı kullanılarak

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} \quad (1.13)$$

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau) \quad (1.14)$$

elde edilir. Benzer olarak

$$\Delta p = \Delta p_0 \exp(-t/\tau) \quad (1.15)$$

olduğu gösterilebilir.  $\tau$ , fazla taşıyıcıların yaşama süresi

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{hacim}}} + \frac{1}{\tau_{\text{üst yüz}}} \quad (1.16)$$

dür.

Fotouyarmada,  $p = n$  olduğundan  $g'_n = g'_p$  dir. Süreklilik bağıntısı

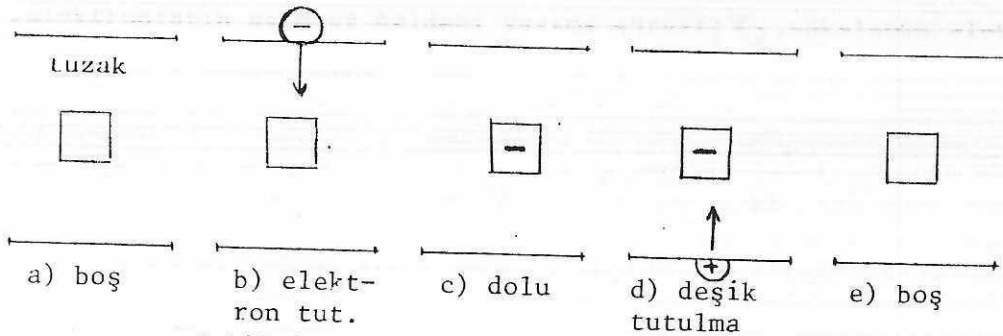
$$\frac{n_0}{\tau_{no}} - \rho n^2 + g' = \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (1.17)$$

ile verilir. Burada alıcı ve verici katkıları hesaba katılmamıştır. Eğer  $\Delta p \ll n_0$  ve  $n \gg n_0$  ise  $\Delta n$  yarıçizgisel davranır. Kendiliğinden meydana gelme küçük ise ( $n_0/\tau_{no} \approx 0$ ) kararlı durumda, (1.17) bağıntısı

$$-\rho n^2 + g' = 0 \quad \text{ve} \quad n = (g'/\rho)^{1/2} \quad (1.18)$$

olur. Akım ışık yoğunluğunun karekökü olarak değişmektedir. (1.18) bağıntısına  $n = n_0 + \Delta n$  bırakılarak (1.17) bağıntısına dönülebilir.

2) Birleşim Merkezleri İle Birleşme: Yasak enerji aralığında bir birleşim merkezi tarafından elektron ve deşiklerin tutulması Şekil.1.1 deki gibidir.



Şekil.1.1: Elektron ve deşiklerin tutulması

bir tuzak merkezi tarafından tutulan elektronların davranışları ise, Şekil.1.2 de verilmiştir. Burada  $E_t$  tuzak derinliğidir. Bu davranışları açıklayan bağıntılar

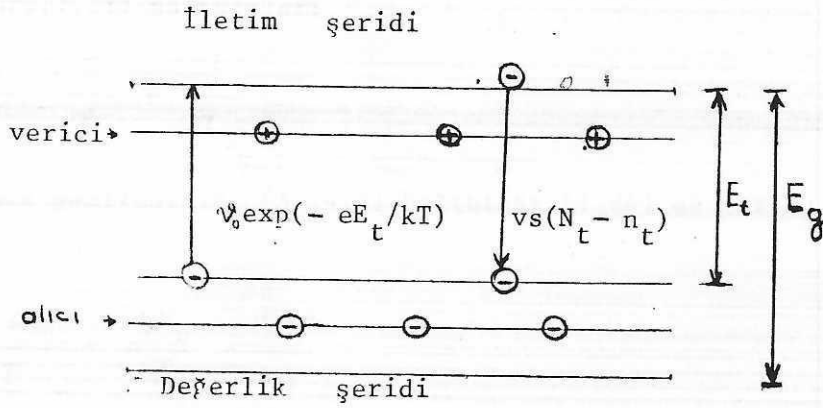
$$-v_s(N_t - n_t)n + v_o \exp\left(-\frac{eE_t}{kT}\right)n_t = \frac{dn}{dt} \quad (1.19.a)$$

$$+ vs(N_t - n_t)n - v_0 \exp\left(-\frac{eE_t}{kT}\right)n_t = -\frac{dn}{dt} = \frac{dn_t}{dt} \quad (1.19.b)$$

ile verilir. Burada,  $\bar{v}_n = \bar{v}_p = \bar{v}$  ısısal ortalama hız;  $s$ , yakalama kesiti;  $v_0 \exp(-eE_t/kT)$  tutulan elektronların örgü titreşim frekansıdır. (1.19.a), (1.19.b) bağıntılarından

$$\frac{d}{dt} (n + n_t) = 0 \quad \text{ve} \quad n + n_t = n_0 \quad (1.20)$$

elde edilir.



Şekil.1.2: Tuzak seviyelerinde tutulan elektronların davranışları

$\tau_1$ , elektronların serbest haldeki yaşama süresi;  $\tau_2$ , yakalanan elektronların tutulma süresi olmak üzere

$$\frac{1}{\tau_1} = vs(N_t - n_t) \quad \text{ve} \quad \frac{1}{\tau_2} = v_0 \exp\left(-\frac{eE_t}{kT}\right) \quad (1.21)$$

alınarak ve denge durumu için,  $dn/dt = dn_t/dt = 0$  koşulu kullanılarak

$$n = n_0 \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \quad \text{ve} \quad n_t = n_0 \frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \quad (1.22)$$

değerleri elde edilir. (1.22) ve (1.21) bağıntıları (1.19.a), (1.19.b) de yerine bırakılarak, elektron artışı için

$$-\frac{\Delta n}{\tau_1} + \frac{\Delta n_t}{\tau_2} = \frac{d\Delta n}{dt} \quad (1.23)$$

bağıntısı bulunur. (1.23) bağıntısına

$$\Delta n + \Delta n_t = \Delta n_o \quad (1.23.a)$$

bırakılarak

$$-\frac{\Delta n}{\tau_1} + \frac{\Delta n_o - \Delta n}{\tau_2} = \frac{dn}{dt} \quad (1.24)$$

$$-\Delta n \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) + \frac{\Delta n_o}{\tau_2} = \frac{d\Delta n}{dt}$$

bulunur. (1.21) bağıntıları

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad (1.24.a)$$

şeklinde yazılabilir. (1.24.a) bağıntısı (1.24) de yerine bırakılarak elektron artışı için

$$-\frac{\Delta n}{\tau} + \frac{\Delta n_o}{\tau_2} = \frac{d\Delta n}{dt} \quad (1.25)$$

bağıntısı elde edilir.

Shockley - Read kuramına göre elektron ve deşiklerdeki artış

$$\begin{aligned} -a(N_t - n_t)n + bn_t &= \frac{dn}{dt} \\ -cn_t p + d(N_t - n_t) &= \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (1.26)$$

bağıntılarıyla verilir.  $N_t$ , birleşim merkezlerindeki toplam durum sayısı;  $n_t$ , tutulmuş elektronsayısı; a, b, c, d sabitleri gösterirler.

Fotouyarmada yalnız birleşim merkezlerinin katkıları halinde, denge durumuna dönüş bağıntıları,  $p = n$  olduğundan  $g'_p = g'_n = g'$  alınarak

$$\begin{aligned} -vs_1(N_t - n_t)n + v_{o1} \exp\left(-\frac{eE_1}{kT}\right)n_t + g' &= \frac{dn}{dt} \\ -vs_2 n_t p + v_{o2} \exp\left(-\frac{eE_2}{kT}\right)(N_t - n_t) + g' &= \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (1.27)$$

ile verilir.  $s_1$  ve  $s_2$ , elektron ve deşik merkezlerinin yakalama kesitleri;  $\nu_{01}$  ve  $\nu_{02}$ , elektron ve deşik merkezlerinin saniyedeki titreşimleridir. yaklaşık olarak  $10^{12}$  titreşim/saniye mertebesinde.  $E_1$ , iletkenlik şeridi ile birleşim merkezi arasındaki enerji aralığı;  $E_2$ , birleşim merkezi ile deşik şeridi arasındaki enerji aralığıdır. (1.27) de  $n_t$  yok edilir ve

$$N_0 = n + n_t - p \quad (1.27.a)$$

alınarak

$$-vs_1(N_t - n_t)n + g' = 0 \quad (1.28)$$

$$-vs_2n_t p + g' = 0$$

bağıntıları bulunur. Burada sıcaklığa bağlı olan  $\nu_{01} \exp(-eE_1/kT)n_t$  ve  $\nu_{02} \exp(-eE_2/kT)(N_t - n_t)$  terimleri küçümsenmiştir. Böylece  $n$  ve  $p$  değerleri için

$$n = \frac{g'}{vs_1(N_t - n_t)} \quad \text{ve} \quad p = \frac{g'}{vs_2n_t} \quad (1.29)$$

bağıntıları elde edilir. Eğer  $n_t \ll N_t$  ise  $n$  ile  $g'$  çizgisel davranır.  $n_{to}$ , başlangıçta tutulmuş olan elektronlar olmak üzere  $n_t \sim n_{to}$  alınabilirse  $p$  ile  $g'$  çizgisel davranır. Bu ise ancak düşük ışık yoğunluklarında olur.

$g'$  nün daha büyük değerlerinde işlemler dahada karışıktır. Burada bağıntılar çizgisel değildir ve denklemlerin çözümü zordur. Şayet deşikler elektronlardan daha yüksek bir hareketliliğe sahip ise yarıiletken şiddetli ışık yoğunluklarında yarıçizgisel davranır.  $n_t$  de  $g'$  artışıyla arttığından dolayı  $p, g'$  den daha yavaş artar. Eğer elektronlar deşiklerden daha yüksek bir hareketliliğe sahip ise o zaman  $n_t \ll N_t$  halinde fotocevap çizgiseldir. Eğer  $n_t \sim N_t$  ise  $(N_t - n_t)$  nin yeteri kadar küçük olduğu ve  $g'$  nün artması ile azaldığı zaman fotocevap süperçizgiseldir. Fakat  $(N_t - n_t)$  çok küçük olamaz, çünkü merkezler eğer gerçek yeniden birleşim merkezi ise  $s_1 \sim s_2 = s$  alınabilir. Böylece kararlı durum bağıntıları

$$n(N_t - n_t) = \frac{g'}{vs} \quad (1.30)$$

$$pn_t = \frac{g'}{vs}$$

haline gelir.  $n + n_t \gg N_0$  ise  $(n + n_t - p = N_0)$  yi  $n + n_t = p$  alarak  $p$  ve  $n$  (1.30) dan çıkarılırsa

$$\frac{g'}{vs} n_t + n_t^2 (N_t - n_t) = \frac{g'}{vs} (N_t - n_t) \quad (1.31)$$

bağıntısı bulunur. (1.31) de  $n_t^2 (N_t - n_t) > 0$  olduğundan  $N_t - n_t > n_t$  veya  $n_t < 1/2 N_t$  olur. Yani  $s_1$  ve  $s_2$  karşılaştırılabiliriyorsa yarıiletken süperçizgisel olamaz.

3) Elektron Tuzaklanması: Tuzaklama merkezleri her yarıiletken için, değişik olduğundan burada verilmemiştir. Bölüm - II de  $Cu_2O$  için verilmiştir.

### 1.3.2: Katkılı Yarıiletkende İletkenlik ve Fotoiletkenlik İşlemi

Katkılı yarıiletkende yalnız bir tip taşıyıcılar iletkenliğe katkıda bulunurlar. Diğer taşıyıcıların katkısı küçümsenir.  $n$  - tipi bir yarıiletken için, taşıyıcılardaki değişme

$$a(N_d - n) - bn^2 + g' = \frac{dn}{dt} \quad (1.32)$$

bağıntısıyla verilir.  $g'$  fotouyarma ile meydana gelen elektronların sayısıdır. Fotouyarma yapılmadan  $g' = 0$  ve kararlı durumda  $dn/dt = 0$  dir. Böylece (1.32) bağıntısı

$$a(N_d - n) - bn^2 = 0$$

$$n = n_0 = -\frac{a}{2b} + \left( \frac{a^2}{4b^2} + \frac{aN_d}{b} \right)^{1/2} \quad (1.33)$$

haline gelir.  $a, b$  sabitleri;  $N_d$  verici merkezlerin sayısını göstermektedir. Eğer düşük yoğunlukta ışık düşürülürse elektron sayısındaki  $\Delta n$  artışı  $\Delta n \sim n_0$  ise, diğer bir deyimle  $\Delta n$  küçükse  $dn/dt = 0$  kararlı durumunda (1.32) bağıntısı

$$a\Delta n - 2bn_0\Delta n + g' = 0 \quad (1.34)$$

halinde yazılabilir. Bu durumda fotocevap çizgiseldir. (1.34) bağıntısından

$$\Delta n = \frac{g'}{a + 2bn_0} = g'\tau \quad (1.35)$$

elde edilir. Burada

$$\tau = 1/(a + 2bn_0) \quad (1.35.a)$$

olarak verilir.  $\tau$ , fazla taşıyıcıların yaşama süresidir.  $n \gg n_0$  halinde (1.32) bağıntısı kararlı durumda

$$-bn^2 + g' = 0 \quad \text{ve} \quad n = \left(\frac{g'}{b}\right)^{1/2} \quad (1.36)$$

haline gelir. Akımın ışık yoğunluğunun karekökü ile değiştiği görülmektedir. Fotocevap çizgiseldir.

#### 1.4: İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK

Isısal denge halinde yarıiletkenlerdeki karanlık iletkenlik

$$\sigma = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \quad (1.37)$$

bağıntısıyla verilir. Bu iletkenlik yalıtkanlarda küçümsenebilir. Ancak yarıiletkenlerde soğutma işlemi yapılırsa küçümsenemez.

Aydınlatılan bir yarıiletkende, saniyede meydana gelen elektron - deşik çifti sayısı kabaca

$$Q = \eta \frac{E(1 - R)}{hf} \quad (1.38)$$

bağıntısıyla verilir. Burada, E Watt olarak, ışığın gücünü; R, üst yüzeyden gücün yansımaya katsayısını;  $\eta$ , elektron - deşik çifti oluşma frekansını gösterir.

##### 1.4.1: Katkısız Yarıiletkende İletkenlik ve Fotoiletkenlik

Katkısız yarıiletkende kararlı durumdaki taşıyıcı sayıları

$$\Delta N = Q \tau_n \quad \text{ve} \quad \Delta P = Q \tau_p \quad (1.39)$$

ile verilir.  $\tau_n$  ve  $\tau_p$ , Q ya bağlı olduğundan aydınlatılan E ışık gücünde bağlıdır. Kesit alanı A, uzunluğu L, olan bir yarıiletken için denge halinde (1.39) bağıntısı

$$\Delta N = N_0 = n_0 AL \quad \text{ve} \quad \Delta P = P_0 = p_0 AL \quad (1.39.a)$$

olur. Burada  $n_0$ ,  $p_0$  birim hacimdeki elektron ve deşik sayılarını gösterirler. Isısal dengede ve hiçbir uyarma olmadan bu yarıiletkenin iletkenliği için (1.37) ve (1.39) bağıntılarından

$$\begin{aligned} c_0 &= \sigma \frac{A}{L} = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \frac{A}{L} \\ &= e \left( \frac{N_0}{AL} \mu_n + \frac{P_0}{AL} \mu_p \right) \frac{A}{L} = \frac{e(N_0 \mu_n + P_0 \mu_p)}{L^2} \end{aligned} \quad (1.40)$$

bağıntısı elde edilir. Herhangi bir uyarma altında bu iletkenlikteki değişme

$$\Delta c = \frac{e(\Delta N \mu_n + \Delta P \mu_p)}{L^2} = \frac{eQ(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)}{L^2} \quad (1.41)$$

ile verilir.  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  elektron ve deşiklerin hareketliliği;  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  elektron ve deşiklerin yaşama sürelerini gösterirler. Bu iletkenlik yalıtkanlar- da, yalıtkanın gösterebileceği en büyük iletkenliktir.

genel olarak denge halinde elektron ve deşiklerin herikisinde akıma temel katılımı sağlarlar. Fakat  $\mu_n \tau_n$  ve  $\mu_p \tau_p$  de ya hareketlilik yada yaşama süresindeki farklılıklardan ötürü, iletkenliğe birinin katkısının diğeri- den fazla olduğu durumlar olabilir. Bu durumda artan iletkenliğe en büyük katkı  $\mu \tau$  nün en büyük değerine sahip olan taşıyıcılardan ileri gelir. Diğ- er bir deyimle bazı fotoiletkenlerde elektronlar, bazılarında ise deşik- ler akıma temel katkıyı sağlarlar.

Uyarılmış durumda bulunan bir yarıiletkene V gerilimi uygulandığında, a- kımdaki değişme

$$\Delta I = V \cdot \Delta c = \frac{eV(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)}{L^2} Q \quad (1.42)$$

bağıntısıyla verilir. Buradan akımdaki değişimin uygulanan gerilime göre çiz- gisel olduğu görülür. (1.42) bağıntısındaki  $(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)/L^2$  ifadesi fotoileticilerde duyarlılığın bir ifadesidir.  $\Delta C$  değişiminde  $\mu_n$ ,  $\tau_n$ ,  $\mu_p$   $\tau_p$  nin değişik değerleriyle fotoduyarlılık arttırılabilir.

Yarıiletken üzerine gönderilen ışık zamana göre değişkense, (1.38) bağın-

tısı

$$Q = Q_0 \exp(J\omega t) \quad (1.43)$$

ile verilir.

Böylece elektronlardaki değişme ifadesi

$$\frac{d\Delta N}{dt} = -\frac{\Delta N}{\tau_n} + Q_0 \exp(J\omega t) \quad (1.44)$$

olur. (1.44) dñn çözümiyle

$$\Delta N = N_0 \exp(J\omega t) \quad (1.45)$$

$$(J\omega - \frac{1}{\tau_n}) \Delta N_0 = Q_0 \quad (1.45.a)$$

bağıntıları bulunur. Deşikler içinde benzer bir ifade çıkarılabilir. Böylece uygulanan V gerilimi altında akımdaki değişme için, genel bir ifade

$$\Delta I = \frac{eV}{L^2} \left( \frac{\mu_n \tau_n}{1 - J\omega \tau_n} - \frac{\mu_p \tau_p}{1 - J\omega \tau_p} \right) Q_0 \exp(J\omega t) \quad (1.46)$$

bağıntısıyla verilir.

#### 1.4.2: Katkılı Yarıiletkende İletkenlik ve Fotoiletkenlik

Katkılı yarıiletkende, iletkenliğe katkı yalnız bir tip taşıyıcıdan ileri gelir. Diğerinin etkisi küçümsenir. p - tipi ve n - tipi katkılı yarıiletken için iletkenlik ve fotoiletkenlik şöyle verilir.

1) p - Tipi Yarıiletken: p - tipi yarıiletkende iletkenlik ve fotoiletkenlik bağıntıları, (1.40) bağıntısından (1.46) bağıntısına kadar olan yerlerde,  $\mu_n = 0$  ve  $\tau_n = 0$  alınarak elde edilir. Böylece p - tipi bir yarıiletken için karanlık iletkenliği (1.37) bağıntısından

$$\sigma_p = e p_0 \mu_p \quad (1.47)$$

olur. p - tipi yarıiletkenin kesiti A, uzunluğu L, ise ve hiçbir uyarma yoksa karanlık iletkenliği için, (1.40) bağıntısından

$$c_{po} = \sigma_p \frac{A}{L} = e p_o \mu_p \frac{A}{L} = \frac{e p_o}{AL} \mu_p \frac{A}{L} = \frac{e p_o \mu_p}{L^2} \quad (1.48)$$

bulunur. Herhangi bir uyarma altında iletkenlikteki değişme için, (1.41)bağıntısından

$$\Delta c_p = \frac{e \Delta P \mu_p}{L^2} = \frac{e Q \mu_p \tau_p}{L^2} \quad (1.49)$$

bağıntısı elde edilir.

Uyarılmış durumda bulunan p - tipi yarıiletkene V gerilimi uygulandığında akımdaki değişme için, (1.42) bağıntısından

$$\Delta I_p = V \cdot \Delta c_p = \frac{eV \mu_p \tau_p}{L^2} Q \quad (1.50)$$

olur

Zamana göre değişken bir ışıkla aydınlatıldığında (1.46) dan

$$\begin{aligned} \Delta I_p &= \frac{eV \mu_p \tau_p}{L^2(1 - Jw \tau_p)} Q_o \exp(Jwt) \\ &= \frac{eV \mu_p \tau_p}{L^2(Jw \tau_p - 1)} Q_o \exp(Jwt) \end{aligned} \quad (1.51)$$

bağıntısı bulunur.

2) n - Tipi Yarıiletken: n - tipi yarıiletkende iletkenlik ve fotoiletkenlik bağıntıları, (1.40) dan (1.46) ya kadar olan yerlerde bu defa  $\mu_p = 0$  ve  $\tau_p = 0$  konmak suretiyle elde edilir. Böylece n - tipi yarıiletken için karanlık iletkenlik (1.37) bağıntısından

$$\sigma_n = e n_o \mu_n \quad (1.52)$$

olur. Kesiti A, uzunluğu L, olan n - tipi yarıiletkenin hiçbir uyarma yoksa, karanlık iletkenliği (1.40) dan

$$\Delta c_{no} = \sigma_n \frac{A}{L} = e n_o \mu_n \frac{A}{L} = \frac{e N_o}{AL} \mu_n \frac{A}{L} = \frac{e N_o \mu_n}{L^2} \quad (1.53)$$

olarak bulunur. Herhangi bir uyarma altında iletkenlikteki değişme (1.41) ba-

ğıntısından

$$\Delta c_n = \frac{e \Delta N \mu_n}{L^2} = \frac{e Q \mu_n \tau_n}{L^2} \quad (1.54)$$

ile verilir.

Uyarılmış durumda bulunan n - tipi yarıiletkene V gerilimi uygulandığında (1.42) bağıntısı

$$\Delta I_n = V \cdot \Delta c_n = \frac{e V \mu_n \tau_n}{L^2} Q \quad (1.55)$$

olur.

Zamana göre değişken bir ışıkla aydınlatıldığında (1.46) bağıntısından

$$\Delta I_n = \frac{e V \mu_n \tau_n}{L^2 (1 - J \omega \tau_n)} I_0 \exp(j \omega t) \quad (1.56)$$

elde edilir.

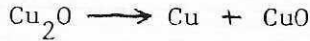
## BÖLÜM - II

Cu<sub>2</sub>O NUN İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde Cu nun oksitlenmesi ve Cu<sub>2</sub>O nun yarıiletkenlik özellikleri incelenmiştir. Cu<sub>2</sub>O da iletkenlik ve fotoiletkenlik işlemleri verilmiştir ( 2 ) ( 3 ) ( 4 ) ( 5 ) ( 6 ) ( 7 ) . Cu<sub>2</sub>O nun değişik metallere yapılan bağlantıları içinde verimin en yüksek olduğu Cu/Cu<sub>2</sub>O yapısının özellikleri verilmiştir ( 10 ) .

2.1: BAKIRIN OKSİTLENMESİ VE Cu<sub>2</sub>O NUN STOKİYOMETRİSİ

(%99,99) saf bakırın, 50 - 1100 °C aralığındaki oksitlenmesinde Cu<sub>2</sub>O ve CuO meydana gelir. 275°C den aşağıdaki sıcaklıklarda meydana gelen Cu<sub>2</sub>O kararsızdır.



denkliği ile hemen ayrışır. Cu<sub>2</sub>O nun çoklu kristalleri 875 - 1100°C aralığında ki oksitlemelerde meydana gelir. Deneysel incelemeler için, bu aralıktaki oksitlemeler kullanılır. Cu<sub>2</sub>O pek çok yöntemle elde edilir. Burada yüzey oksitlemesi ile elde edilen Cu<sub>2</sub>O kristalleri üzerinde durulmuştur. Yüzey oksitlemesi , genel olarak üç işlemler yapılır.

1) Temizleme: Bakır yüzeylerinde bulunan kirlerin, oksitleme esnasında Cu<sub>2</sub>O yapısına girmemesi için temizlenmeleri gerekir. Temizleme işlemi önce Asetonla, varsa ultrasonik banyo ile uzun süre yıkanır. Sonra %50 HNO<sub>3</sub> içinde yıkanır ve saf su dökülerek temizlenir. Eğer temizliğin daha hassas olması istenirse, Bakır 700°C de kuru Hidrojen içinden geçirilir.

2) Oksitleme: Temizlenmiş yüzeyler 850 - 1050°C ler arasında oksitlenerek havada soğutulur. Kararlı yapı elde etmek için 600°C de bir müddet tavllanır. Tavlanan oksitlenmiş yüzeyler su ile ani soğutma yapılır. Böylece Bakır tabakalardan oksitlenme sonucu CuO/Cu<sub>2</sub>O/Cu tabakaları elde edilir.

3) CuO Tabakasını Temizleme: Cu<sub>2</sub>O üzerindeki CuO tabakasını temizlemek için önce %20 ( HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) de yıkanır ve saf su dökülerek temizlenir. Sonra kurutulmuş yüzeyler %50 HNO<sub>3</sub> ile yıkanır ve saf su dökülerek temizlenir.

Böylece  $\text{Cu}_2\text{O}$  yüzeyler elde edilir ( 9 ) ( 16 ).

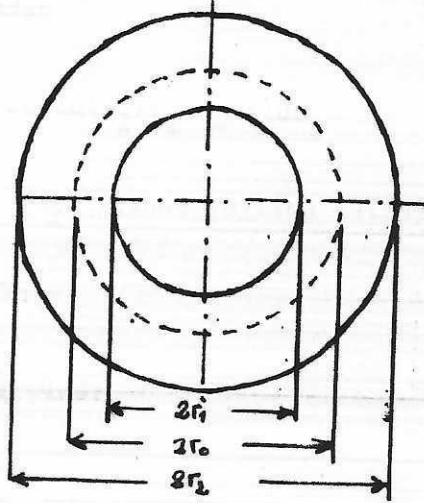
Yukarda genel hatları ile incelenen oksitlenme işleminde, oksitlenme ve yıkanma süreleri, numunelerin kalınlığına ve genişliğine bağlıdır.

### 2.1.1: Silindirik Yüzeylerinin Oksitlenmesi

Silindirik yüzeylerin oksitlenmesinden sonra Bakır yoğunluğu uzaklığa bağlı olarak

$$\rho(r) = \rho_0 \ln(r/r_1) \ln(r/r_2) \quad (2.2)$$

bağıntısıyla verilir. Oksitlenmiş silindirik Bakırın kesiti Şekil.2.1 de verilmiştir.



Şekil.2.1: Oksitlenmiş silindirik Bakırın alt kesiti

Oksitlenme esnasında, dt zaman aralığında  $\text{Cu}_2\text{O}$  hacmindeki artış

$$dV_{\text{Cu}_2\text{O}} = 2\pi r m_{\text{Cu}_2\text{O}} J(r_2) dt / 2 \quad (2.3)$$

bağıntısıyla verilir.  $J(r)$ , r uzaklığındaki Cu iyonlarının akımı:  $m_{\text{Cu}_2\text{O}}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun molar hacmini gösterir. oksitlenme esnasında, dt zaman aralığında Cu tabakasındaki hacimsel azalma

$$dV_{\text{Cu}} = 2\pi r_1 m_{\text{Cu}} J(r_1) dt \quad (2.4)$$

bağıntısıyla verilir.  $m_{Cu}$ , Cu nun molar hacmi:  $J(r_1)$ ,  $r_1$  uzaklığındaki Cu iyon akımını gösterir. Böylece silindirik örneklerin hacmindeki değişme (2.3) ve (2.4) bağıntılarından

$$dV = dV_{Cu_2O} \quad dV_{Cu} = 2\pi r_2 dr_2 \quad (2.5)$$

olur.

$$h = m_{Cu_2O}/2m_{Cu} = (r_2^2 - r_1^2)/(r_0^2 - r_1^2) \quad (2.5.a)$$

alınarak (2.5) bağıntısından

$$(h - 1)m_{Cu_2O} D_v \int_0^{dt/2h} \ln(r_2/r_1) = r_2 dr_2 \quad (2.6)$$

elde edilir.  $D_v$ ,  $V_{Cu}$  nun  $Cu_2O$  içinde yayılma katsayısını gösterir. Böylece

$$(h - 1)m_{Cu_2O} D_v \int_0^{dt/2h} = \quad (2.7)$$

$$r_2 \ln r_2 dr_2 + (h - 1)r_1 \ln r_1$$

$$D_{Cu} = D_v \int_0^{m_{Cu_2O}/2} \quad (2.7.a)$$

bağıntıları bulunur.  $t = 0$  da  $r_0 = r_1 = r_2$  olduğundan (2.6) bağıntısı,  $r_1$  den  $r_2$  ye kadar integrale edilerek silindirik örneklerde oksitlenme işleminin zamana bağlılığı için

$$(2D_{Cu}/hr_0^2)t =$$

$$(r_1/r_0)^2 \ln(r_1/r_0) + (r_2/r_0)^2 \ln(r_2/r_0)/(h - 1) \quad (2.8)$$

bağıntısı bulunur. Silindirik örneklerde  $Cu_2O$  nun büyüme oranı  $D_{Cu}$  yu belirlemek için,  $r_0$  yarıçapındaki silindirik örnekler değişik sıcaklıklarda oksitlenerek her defasında  $r_0$ ,  $r_1$  ve  $r_2$  ölçülerek (2.8) bağıntısında düşey eksene

göre

$$y = (hr_0^2/2)(r_1/r_0)^2 \log(r_1/r_0) + (r_2/r_0)^2 \log(r_2/r_0)/(h - 1) \quad (2.9)$$

yazılır ve  $y \rightarrow t$  çizilerek , doğruların eğiminden  $D_{Cu}$  bulunur. Deneysel verilerden , sıcaklığa bağlı olarak

$$D_{Cu} = 0.006 \exp(-1.57/kT)(\text{cm}^2/\text{sn.}) \quad (2.10)$$

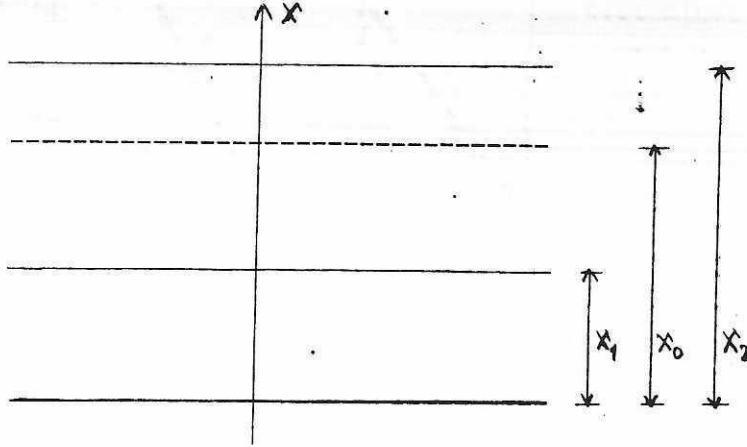
değeri hesaplanmıştır.

### 2.1.2: Tabaka Yüzeylerin Oksitlenmesi

Tabaka yüzeylerin oksitlenmesi zamana göre paraboliktir. Oksit tabaka kalınlığı  $x$  olmak üzere , parabolik bağıntı

$$At = x^2 \quad (2.11)$$

ile verilir.  $A$  , parabolik oran sabiti;  $t$  , oksitlenme süresini gösterir. Şekil.2.2 de verildiği gibi ,  $2x_0$  kalınlığındaki Bakır tabaka  $t$  kadar oksitlendikten sonra  $2x_1$  kalınlığına gelir.



Şekil.2.2: Oksitlenmiş tabaka Bakırın kesiti

$D_{Cu}$  ,  $Cu_2O$  nun büyüme oranının oksitlenme süresine bağımlılığı

$$g(x_2) = g_0 \quad \text{ve} \quad g(x_1) = 0 \quad (2.12)$$

sınır koşulu göz önünde tutularak

$$2D_{Cu}t = (x_2 - x_1)^2 \quad (2.13)$$

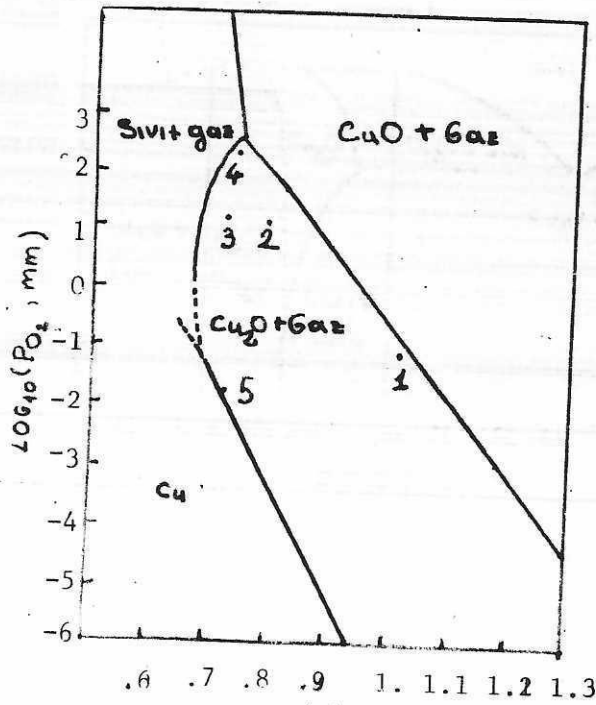
parabolik bağıntısıyla verilir. (2.11) ve (2.13) bağıntılarından  $A = 2D_{Cu}$  olduğu çıkarılır. Tabaka örnekler için,  $D_{Cu}$  yayılma katsayısı deneysel verilerden

$$D_{Cu} = 0.29 \exp \left[ - (1.63 \pm 0.12)/kT \right] \text{ (cm}^2/\text{sn.)} \quad (2.14)$$

olarak hesaplanmıştır.

### 2.1.3: $Cu_2O$ nun Stokiyometrisi

Kimyanın kimyasal reaksiyonlardaki ağırlık bağıntılarıyla ilgilenen bölümüne Stokiyometri denir. Bakır - Oksijen sisteminde  $Cu_2O$  alanı, Şekil 2.3 de verilmiştir.



Şekil 2.3: Bakır - Oksijen sisteminde  $Cu_2O$  nun basınç - sıcaklık dengesi

$Cu_2O$  geniş bir basınç - sıcaklık aralığında kararlıdır. Oksitlenme esnasında, sıcaklık ve uygulanan oksijen basıncından dolayı  $Cu_2O$  içindeki Bakır ve Oksijen miktarlarının farklı olabildiği deneylerle gözlenmiştir. Bundan dolayı  $Cu_2O$  nun Stokiyometrisinde sapma vardır. Stokiyometrideki sapma

$$\log_{10} y = \frac{1}{n} \log_{10} P_{O_2} - \frac{E}{RT} + A \quad (2.15)$$

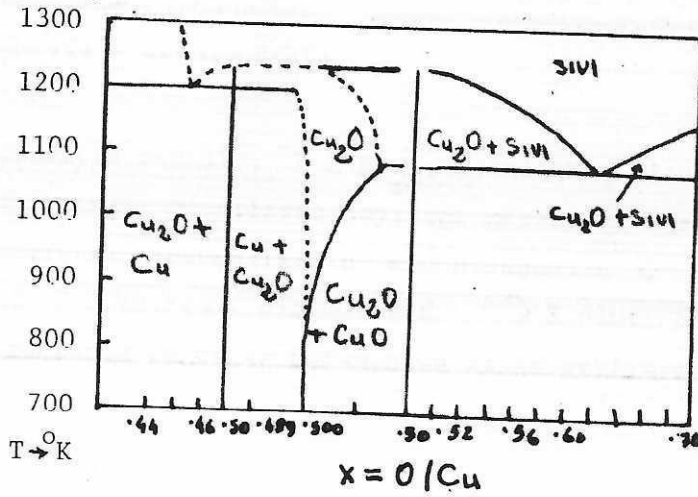
bağıntısıyla verilir.  $y$ , molekül başına düşen atomların sayısını;  $P_{O_2}$ , Oksijenin kısmi basıncını;  $1/n$ ,  $E$ ,  $A$  sabitleri gösterirler. sabitlerin değerleri

$$1/n = 0.27 \pm 0.05$$

$$E = -21.7 \pm 1.5 (\text{kCal/mol})$$

$$A = 0.29 \pm 0.24$$

ile verilir. Sıcaklığa ve uygulanan Oksijen basıncına bağlı olarak, Oksijenin Bakır içindeki yayılması Şekil 2.4 de verilmiştir.



Şekil 2.4: Sıcaklığa ve uygulanan Oksijen basıncına bağlı olarak, Oksijenin Bakır içindeki yayılması

## 2.2: $Cu_2O$ DA ELEKTRON TUZAKLAMA

$Cu_2O$  nun yasak enerji aralığındaki tuzak merkezleri,  $n$  - tipi yarıiletkenlerde ısıl uyarma altındaki iletkenlik için verilen ifadeden yararlanılarak bulunmuştur (4).

Yasak enerji aralığında herhangi bir yerde

$$n_t p v_s \ll n_t s_n v N_C \exp(-E_t/kT) \quad (2.16)$$

olacak şekilde düzensizlik seviyeleri varsa , bu düzensizlik seviyeleri tuzak merkezi olarak davranır. Burada  $E_t$  , düzensizlik seviyesi ile iletkenlik şeridinin arasındaki enerji aralığını;  $n_t$  , tutulan elektronların sayısını;  $p$  , deşik sayısını;  $v$  , ısısal hızı;  $s_p$  , deşik yakalama kesitini;  $s_n$  , elektron yakalama kesitini;  $N_c$  , iletim şeridinin toplam durum sayısını gösterirler.

$n$  - tipi yarıiletkenlerde tuzak seviyesinin , en fazla iletkenlik gösterdiği  $T_m$  sıcaklığına bağlılığı ,  $\beta = dT/dt =$  sabit ısıtma hızı altında

$$\ln(T^2/\beta) = (E_t/kT_m) - \ln(N_c s_n v k/E_t) \quad (2.17)$$

bağıntısıyla verilir. (2.17) bağıntısına benzer bir ifade  $Cu_2O$  için , aşağıdaki şekilde verilmiştir.  $Cu_2O$  da sıcaklığa bağlı olarak karanlık ve aydınlatmadan sonraki iletkenlik

$$\sigma(T) = K \exp(-E/kT) \quad (2.18)$$

$$\sigma'(T) = K \exp(-E'/kT) \quad (2.19)$$

bağıntısıyla verilir.  $K = BN_{ao}$  , iyonlaşmış alıcıların bir özelliğidir.  $N_{ao}$  , başlangıçtaki alıcıların sayısını gösterir.  $T = 0$  da  $N_{ao} = N_a - (N_a^-)$  dir. Aydınlatılan iletkenlikte  $n_t \neq 0$  olduğundan  $\sigma'(T) > \sigma(T)$  olur.  $E \approx E' \approx 0.4$  eV alınır , ölçümlerden  $K' > K$  olur. Sıcaklık arttırılırsa , uyarılan elektronlarla değerlik şeridinden alıcı seviyelerine  $p$  - tipi iletkenlik akımı başlar. Böylece

$$N_{ao} = N_a - [(N_a^-) + p] \quad (2.20)$$

olur.  $N_{ao}$  , başlangıçtaki alıcıların sayısını;  $N_a$  , alıcıların toplam durum sayısını;  $N_a^-$  , iyonlaşmış alıcı sayısını;  $p$  , sıcaklıkla meydana gelen deşik sayısını gösterir.  $p \ll [N_a - (N_a^-)]$  olduğundan ,  $n_t$  tutulmuş elektronlar olmak üzere (2.20) bağıntısı

$$N_{ao} = N_a - [(N_a^-) - n_t] \quad (2.21)$$

olarak verilir. Aydınlatma ile meydana gelen fazla iletkenlik (2.18) ve (2.19)

bağıntılarından

$$\begin{aligned}\sigma^*(T) &= \sigma'(T) - \sigma(T) \\ &= (K' - K) \exp(-E_a/kT) \propto (p' - p)\end{aligned}\quad (2.22)$$

olur.  $(K' - K) = Bn_t$  dir.  $\text{Cu}_2\text{O}$  da hall etkisiyle bulunan deşik sayısı

$$p = \frac{N_a - (N_d^+ + p)}{N_d^+ + p} N_v \exp(-E_a/kT) \quad (2.23)$$

ile verilir.  $N_d^+$ , iyon halindeki verici sayısını gösterir. İletimde  $p \ll N_d^+ < N_a$  olduğundan (2.23) bağıntısı

$$p = \frac{(N_a - N_d^+)}{N_d} N_v \exp(-E_a/kT) \quad (2.24)$$

alınabilir. Genellikle  $N_d = N_a$  ve  $B/q \mu_p = N_v/N_d$  dir. Böylece

$$\begin{aligned}N_{a0} &= N_a - N_d^+ \\ N_d^+ &= N_d - n_t\end{aligned}\quad (2.25)$$

alınabilir.  $E_n$  büyük iletkenlik için  $d\sigma^*/dt = 0$  olmalıdır. Bu ise  $d\Delta p/dT = 0$  olması demektir.  $\beta = dT/dt = \text{sabit}$  alınarak (2.25)(2.24), (2.22) bağıntılarından

$$\frac{d\Delta p}{dT} = \beta^{-1} \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2.26)$$

$$\frac{d(\ln \Delta p)}{dt} = 0$$

$$\sigma^*(T) = q \mu_p \Delta p \quad (2.26.a)$$

bağıntıları bulunur.  $T = T_m$  de bu bağıntılar

$$\frac{d}{dt} \left[ \ln(\beta/q \mu_p) + \ln n_t - E_a/kT \right] = 0 \quad (2.27)$$

olur. (2.27) çözümlenirse

$$\frac{\beta E_a}{kT_m^2} = - \frac{1}{n_t} \cdot \frac{dn_t}{dt} \quad (2.28)$$

elde edilir. Bu bağıntı tuzaklardan kaçmayı ifade eder. (2.26) bağıntısı

$$n_t^{-1} \left( \frac{dn_t}{dt} \right) = P = N_C v s_t \exp(-E_t/kT) \quad (2.29)$$

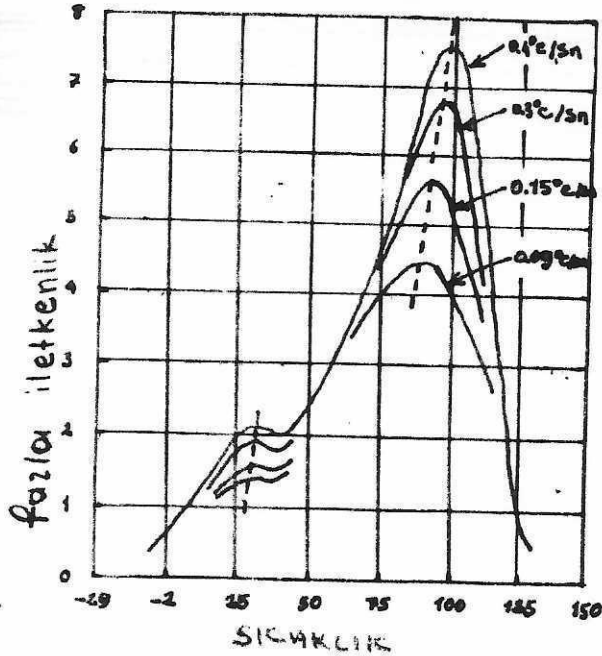
yazılabilir.  $s_t$ , tuzakların taşıyıcı yakalama kesitini gösterir. (2.29)  $T = T_m$  de

$$\frac{E_a}{kT_m^2} = - n_t^{-1} \left( \frac{dn_t}{dt} \right) = P = N_C v s_t \exp(-E_t/kT_m) \quad (2.30)$$

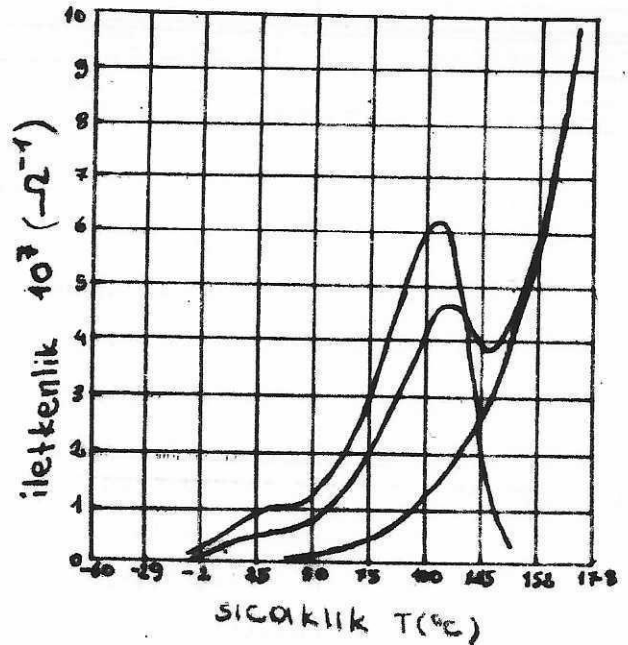
olur. (2.30) düzenlenerek

$$\ln(T_m^2/\beta) = (E_t/kT_m) - \ln(N_C s_t v k/E_a) \quad (2.31)$$

bağıntısı elde edilir.  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun tuzak seviyeleri kuramsal olarak (2.31) bağıntısıyla bulunur. Fazla iletkenlik eğrileri Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 da verilmiştir.

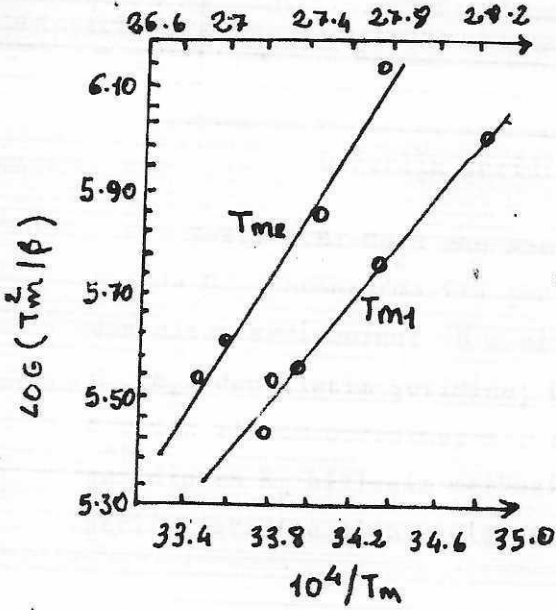


Şekil 2.5:  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun fazla iletkenliğinin ısıtma hızına göre değişmesi



Şekil 2.6:  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun fazla iletkenlik eğrileri

$\text{Cu}_2\text{O}$  daki tuzak seviyeleri deneysel olarak bulunabilir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 da en büyük iletkenlik gösteren sıcaklıklar  $T_{m1} = 298^\circ\text{K}$  ve  $T_{m2} = 373^\circ\text{K}$  dir. Bu sıcaklıklarda ve değişik  $\beta$  ısıtma hızlarında  $T_m^2/\beta \rightarrow 1/T_m$  ye göre değişimi Şekil 2.7 de verilmiştir. Bu iki eğriden her birinin eğimi  $E_t/k$  yı verir. Buradan  $E_t$  değerleri hesaplanabilir.

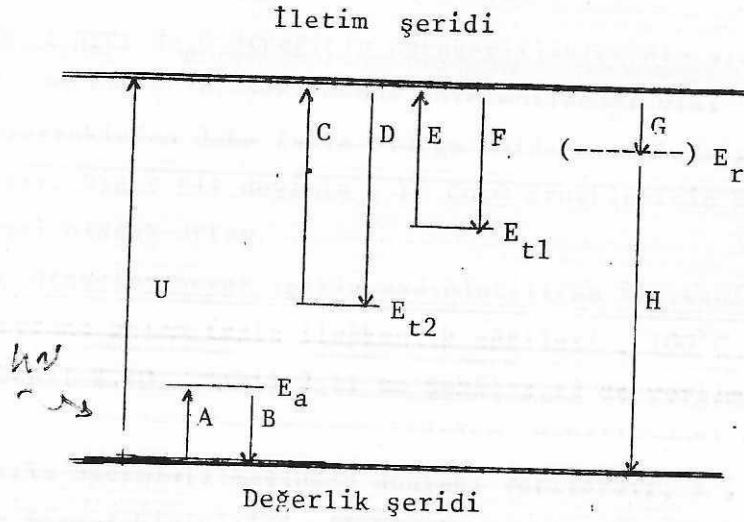


Şekil 2.7:  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun değişik ısıtma hızları altında  $\log(T_m^2/\beta)$  nın  $1/T$  ye göre değişimi

Deneysel olarak  $E_{t1} = 1.03$  eV ve  $E_{t2} = 1.34$  eV değerleri hesaplanmıştır.

### 2.3: $\text{Cu}_2\text{O}$ DA İLETKENLİK VE FOTOİLETKENLİK

$\text{Cu}_2\text{O}$  nun yasak enerji aralığında iki tuzak seviyesi ve bir alıcı seviyesi vardır. Fotoiletkenliğin,  $100^\circ\text{C}$  nin altındaki sıcaklıklarda davranışını açıklayan deneysel verilerin dışında kuramsal bilgiler henüz verilmemiştir. Fotoiletkenliğin  $100^\circ\text{C}$  nin üzerindeki davranışlarını açıklamak için yasak enerji aralığında iki tuzak merkezi ve bir alıcı merkezin dışında bir bozuk merkezin varlığı kabul edilmiştir.  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun enerji - band yapısı Şekil 2.8 de verilmiştir. Şekil 2.3 den  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun geniş bir basınç - sıcaklık aralığında kararlı olduğu görülmektedir. Stokiyometrisindeki sapmadan dolayı farklı sıcaklık ve farklı Oksijen basıncı uygulamak suretiyle, Bakır - Oksit sisteminde  $\text{Cu}_2\text{O}$  alanı içinde değişik yerlerde dengelenen örnekler elde edilebilir.



Şekil 2.8:  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun enerji - band yapısı ve olası geçişler. Burada U , fotouyarma ile şeritten şeride; A , değerlik şeridinden alıcı seviyesine; B , alıcı seviyesinden değerlik şeridine; C ,  $E_{t2}$  den iletim şeridine; D , iletim şeridinden  $E_{t2}$  ye; E ,  $E_{t1}$  den iletim şeridine; F , iletim şeridinden  $E_{t1}$  e; G , iletim şeridinden  $E_r$  birleşim merkezine; H ,  $E_r$  birleşim merkezinden değerlik şeridine olan geçişleri gösterirler.

Şekil 2.3 de yerleri gösterilen  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneklerinin elektriksel özellikleri Çizelge 2.1 de verilmiştir.

Örnek	kararlı bölgesi	denge sıcaklığı	denge Ok. basıncı	$E_a$ (eV)	$N_a/N_d$	$P_o$ $100^\circ\text{C}$ de
1	$\text{Cu}_2\text{O}$ böl.	$750^\circ\text{C}$	0.1 torr	0.42	1.056	$1.8 \times 10^{12}$
2	$\text{Cu}_2\text{O}$ böl.	$1020^\circ\text{C}$	8.4 torr	0.41	1.032	$1.25 \times 10^{12}$
3	$\text{Cu}_2\text{O}$ böl.	$1100^\circ\text{C}$	8.4 torr	0.38	1.013	$1.44 \times 10^{12}$
4	$\text{CuO} - \text{Cu}_2\text{O}$ faz sınırı	$1100^\circ\text{C}$	150 torr	0.40	1.018	$9.77 \times 10^{11}$
5	$\text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O}$ faz sınırı	$1100^\circ\text{C}$	0 torr	0.16	1.022	$7.62 \times 10^{14}$

Çizelge 2.1: 5 ayrı  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneğinin denge iletiminde elektrik özellikleri

Bu 5 ayrı  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneğinin hareketliliklerinin sıcaklıkla değişmesi Şekil-2.9 da verilmiştir. Şekildende görülebileceği gibi 5. örneğin hareketliliği diğerlerinkinden daha fazla olduğu halde sıcaklığa göre davranışı aynı özellik gösterir. Diğer bir deyimle , bu  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneklerinin hareketlilikleri sıcaklıkla çizgisel olarak artar.

Bu örnekler beyaz ışıkla aydınlatılırsa iletkenlikleri artar. Aydınlatma ile meydana gelen fazla iletkenlik eğrileri ,  $100^\circ\text{C}$  nin altındaki sıcaklıklar için Şekil 2.10 , Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 de verilmiştir. Bu eğriler  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun  $100^\circ\text{C}$  ye kadar olan davranışlarıdır. Şekillerdeki veriler  $-80^\circ\text{C}$  de örneklerin 15 dakika aydınlatılmasından sonraki verilerdir. 1 , 2 , 3.örneklerin elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri aynıdır. Önceden aydınlatma altında iletkenliğinde  $20^\circ\text{C}$  ve  $100^\circ\text{C}$  de iki fazla iletkenlik gösterir (Şekil 2.10). Bu pikler tuzak merkezlerinin boşaldığı sıcaklıkları belirler. 4. örneğin elektriksel özellikleri 1 , 2 , 3. örneklerinkine benzer , fakat fotoelektrik özellikleri farklıdır (Şekil 2.11). 5. örneğin elektriksel özellikleri 1 , 2 , 3. örneklerinden farklıdır. Fotohafıza etkisi vardır (Şekil 2.12). Sonuç olarak 4. örneğin dışında diğer örneklerin Fotohafıza etkisi olmakla beraber , genel olarak 1 , 2 , 3. örneklerin özellikleri tipiktir. Fotohafıza etkisinin incelenmesinde Şekil 2.3 de yerleri belirtilen 1 , 2 , 3 örneklerinin Stokiyometrilere seçilmelidir.

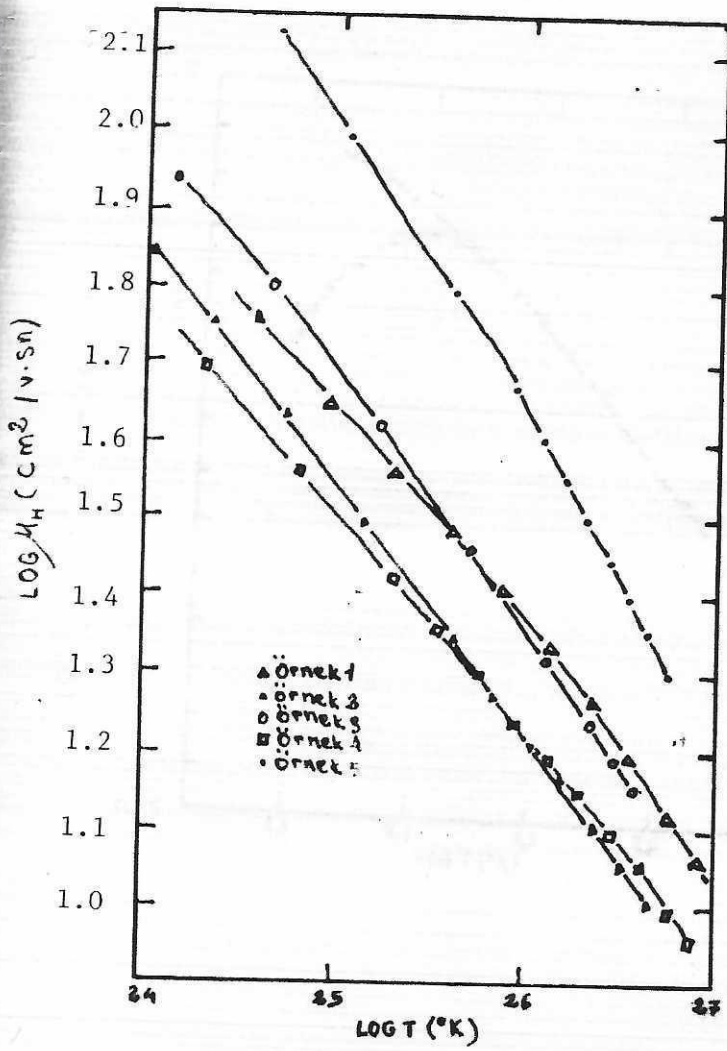
$\text{Cu}_2\text{O}$  nun  $100^\circ\text{C}$  den yukarıdaki davranışları için ,  $100^\circ\text{C}$  de tuzakların boşaldığı ve elektronların ısısal uyarma ile bozuk merkezden iletken şeride veya değerlik şeridinden bozuk merkeze geçemediği kabul edilir. Aşağıda verilen kuramsal bilgilerde  $E_{t1}$  ve  $E_{t2}$  de bulunan elektronların deşiklerle yeniden birleşmesi küçümsenecektir. Bu koşullar altında

### 2.3.1: Geçici Fotoiletkenlik

geçici fotoiletkenlikte Şekil 2.8 deki A , B , C , E , G , H geçişlerinin olası olduğu kabul edilir. Aydınlatma ile ortaya çıkan fazla iletkenlik

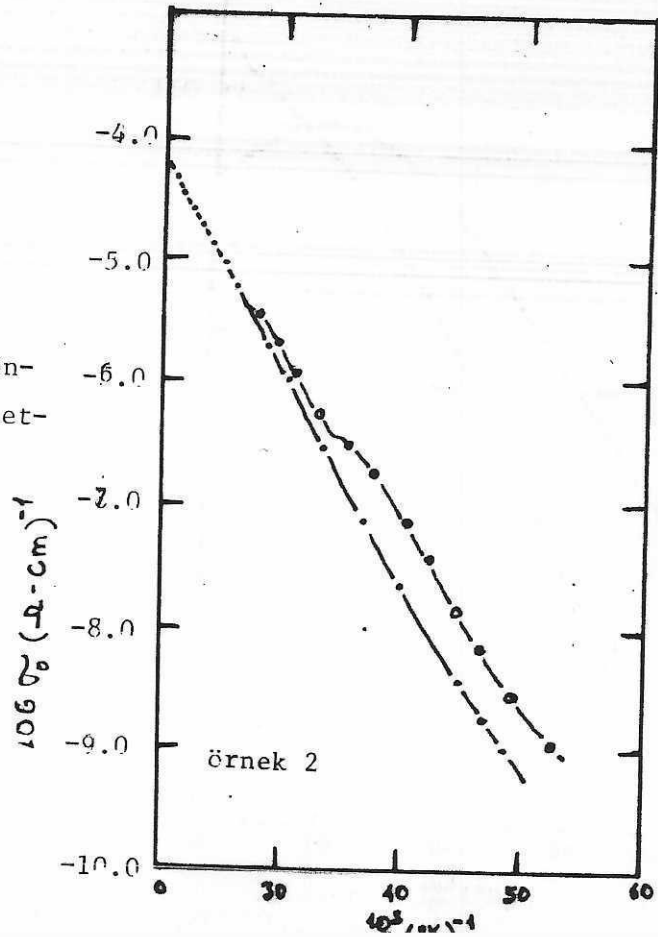
$$\Delta\sigma = e\mu_p\Delta p + e\mu_n\Delta n \quad (2.32)$$

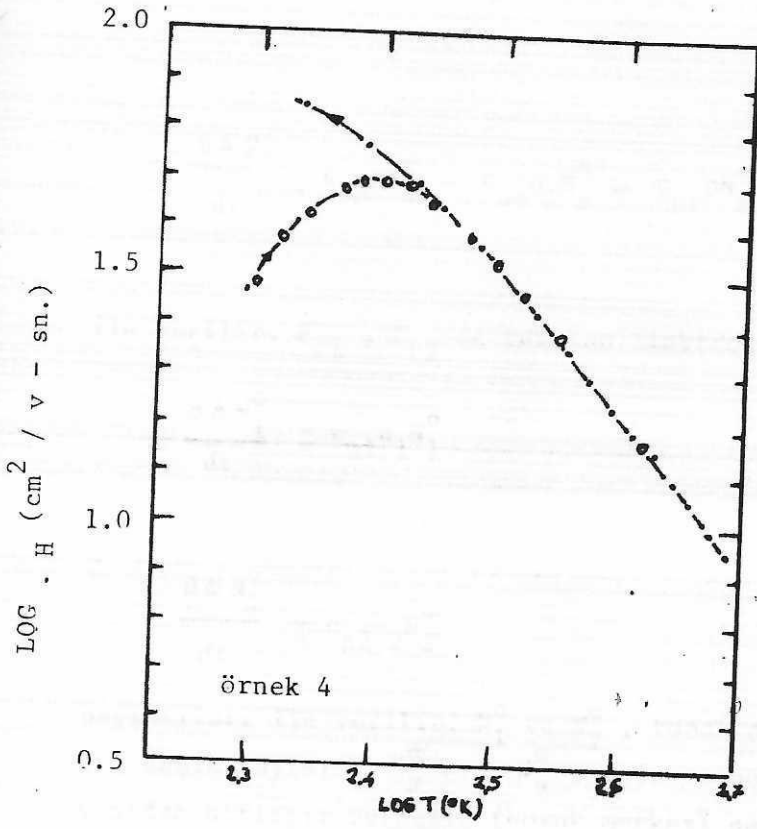
bağıntısıyla verilir. Düşük aydınlatma altında  $\Delta n < \Delta p$  olduğu deneysel olarak gözlenmiştir. Bu durumda (2.32) bağıntısında sadece birinci terim önemli olur. Aydınlatma kaldırılırsa fazla deşik sayısının zamanla değişmesi



Şekil 2.9: Çizelge 2.1 deki 5 ayrı Cu<sub>2</sub>O örneği için , hareketlilik sıcaklık değişimi

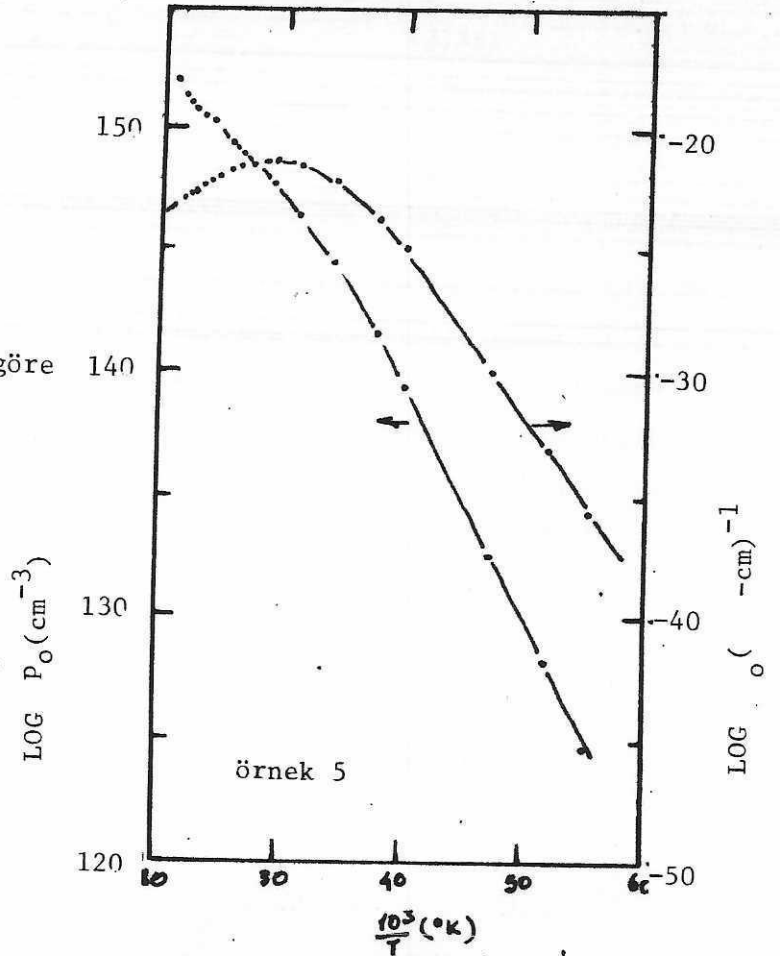
Şekil 10: aydınlatmadan önce ve sonra sıcaklığa göre iletkenlik değişimi





Şekil 2.11: Aydınlatmadan önce ve sonra sıcaklığa göre hareketlilik değişimi

Şekil 2.12: Sıcaklığa göre deşik ve iletkenlik değişimi



$$-\frac{d\Delta p}{dt} = c_{pa} p N_a^- - c_{pa} p_1 N_a^0 + c_{pr} p N_r^0 \quad (2.33)$$

ile verilir.  $E_{t1}$ ,  $E_{t2}$  de tutulan elektronların azalması

$$-\frac{d\Delta N_1^0}{dt} = c_{n1} n_1 N_1^0 \quad (2.34)$$

$$-\frac{d\Delta N_2^0}{dt} = c_{n2} n_2 N_2^0 \quad (2.34.a)$$

bağıntıları ile verilir.  $N_1^0$  ve  $N_2^0$ , tuzakların tutabileceği toplam sayılarını  $p$ , deşik sayısını:  $N_a^-$  ve  $N_a^0$ , dolu ve boş olan alıcı sayılarını;  $N_r^0$ , dolu yeniden birleşim merkezin (bozuk merkez) sayısını gösterirler.  $p_1$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  de

$$p_1 = N_v \exp \left[ \frac{(E_v - E_a)}{kT} \right]$$

$$n_1 = N_C \exp \left[ \frac{(E_{t1} - E_C)}{kT} \right] \quad (2.35)$$

$$n_2 = N_C \exp \left[ \frac{(E_{t2} - E_C)}{kT} \right]$$

ile verilirler.  $N_v$ ,  $N_C$  değerlik ve iletim şeridindeki toplam bulunma sayılarını gösterirler.  $c$ 'ler çeşitli merkezlerin yakalama katsayısını gösterir ve elektron veya deşiklerin ısısal hızı ile elektron veya deşiklerin yakalama kesitlerinin çarpımı olarak tanımlanır. Böylece  $c_{pa}$ , alıcı seviyelerinin deşik yakalama katsayısını;  $c_{pr}$ ,  $E_r$  yeniden birleşme merkezinin deşik yakalama katsayısını gösterir. (2.33), (2.34), (2.34.a) bağıntıları denge birimleri cinsinden, dengeden ani ayrılmalar halinde

$$-\frac{d\Delta p}{dt} = (c_{pa} N_{a0}^- + c_{pr} N_{r0}^0) \Delta p +$$

$$c_{pa} (p_0 + p_1) \Delta N_a^- + c_{pr} \Delta N_r^0 p_0 + \quad (2.36)$$

$$c_{pa} \Delta N_a^- \Delta p + c_{pr} \Delta N_r^0 \Delta p$$

ve tuzaklarda

$$-\frac{d\Delta N_1^0}{dt} = c_{n1} \Delta N_1^0 n_1 \quad (2.37)$$

$$-\frac{d\Delta N_2^0}{dt} = c_{n2} \Delta N_2^0 n_2 \quad (2.37.a)$$

bağıntılarına göre davranırlar.  $p_0$ , dengedeki deşik sayısını;  $N_{ao}^-$ ,  $\Delta N_a^-$  dengede ve fazla olan dolu alıcı sayılarını;  $N_{ro}^0$ ,  $\Delta N_r^0$  dolu yeniden birleşme merkezinin dengede ve fazla olan sayılarını gösterir. (2.36), (2.37), (2.37.a) bağıntıları arasında bir toplama yapılırsa

$$\Delta p + \Delta N_1^+ + \Delta N_2^+ + \Delta N_r^+ = \Delta n + \Delta N_a^- \quad (2.38)$$

bağıntısı bulunur. Bu bağıntı yük nötrleşmesi koşulunu belirtir. Tam dolu veya yarı iyonlaşmış alıcı seviyelerinde (2.38) bağıntısı

$$\Delta N_1^+ + \Delta N_2^+ \approx \Delta N_a^- \quad (2.39)$$

olur. Burada  $\Delta N_1^+$ ,  $\Delta N_2^+$ , iyonlaşmış tuzak sayılarını gösterir.  $\Delta n$  ve  $\Delta N_r^0$  in zamanla bozunmalarını tanımlamak için fazladan bağıntılar yazılabilir. Bunun için kuvvetli p - tipi madde ile fermi seviyesinin üzerindeki  $E_r$  bozunması yaklaşık olarak

$$\Delta n \approx C \exp(-t/\tau_r) \quad (2.40)$$

$$\Delta N_r^0 \approx C' \exp(-t/\tau_r) + C'' \exp(-t/\tau_r') \quad (2.40.a)$$

bağıntılarıyla verilir. Yukarıdaki bağıntılarda

$$\frac{1}{\tau_r} = c_{nr} N_r \quad \text{ve} \quad \frac{1}{\tau_r'} = c_{pr} p_0 \quad (2.40.b)$$

ile verilir.  $N_r$ , yeniden birleşme merkezi sayısını gösterir. Bu iki sabitten

büyük olanı ( ki en çok  $\tau_r$  dir. ) maddenin azınlık taşıyıcı yaşama süresi olarak adlandırılır.

Aydınlatmadan sonra  $\Delta n$  ve  $\Delta N_r^0$  in çabucak küçük değerlere bozunmasından dolayı bu özellikler birkaç azınlık taşıyıcı yaşama süresinden çok defa önemsiz olur. (2.36) bağıntısında dengeden küçük sapmalar halinde çizgisel olmayan terimler  $\Delta N_r^0$  kadar azalır. (2.36) , (2.37) , (2.37.a) ve (2.38) bağıntılarıyla ve kütle denkliği yardımıyla  $\Delta p$  çözülür. Bu çözümde

$$\Delta N_1^+ = - \Delta N_1^0 \quad \text{ve} \quad \Delta N_2^+ = - \Delta N_2^0 \quad (2.41)$$

kullanılmalıdır. Böylece çözüm üç üstel toplam olarak

$$\Delta p = c_a \exp(-t/\tau_a) + c_1 \exp(-t/\tau_1) + c_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (2.42)$$

bağıntısıyla verilir.  $c_a$  ,  $c_1$  ,  $c_2$  zamandan bağımsız sabitlerdir. Ve

$$1/\tau_a = c_{pa} N_{ao}^- + c_{pr} N_{ro}^0$$

$$1/\tau_1 = c_{n1} n_1 \quad (2.42.a)$$

$$1/\tau_2 = c_{n2} n_2$$

ile verilir.  $E_r$  fermi seviyesinin üzerinde kabul edildiğinden  $N_{ro}^0 = 0$  dır. Böylece  $1/\tau_a = c_{pa} N_{ao}^-$  olur.  $\tau_a$  , tuzak bağılılığı için gereken zamanla karşılaştırılacak olursa çok kısadır. Böylece (2.42) bağıntısı

$$\Delta p \approx c_1 \exp(-t/\tau_1) + c_2 \exp(-t/\tau_2) \quad (2.43)$$

haline gelir. Zamandan bağımsız olan  $c_1$  ve  $c_2$  sabitleri

$$c_1 \approx (p_0 + p_1) N_1^0(n) / N_{ao}^- \quad (2.44)$$

$$c_2 \approx (p_0 + p_1) N_2^0(n) / N_{ao}^-$$

ile verilirler.  $N_1^0(0)$  ve  $N_2^0(0)$ , dolu tuzak merkezlerinin  $t = 0$  daki sayılarını gösterir. Böylece geçici aydınlatmadaki fotoiletkenlik bozunmasındaki değişim sayısı  $E_{t1}$  ve  $E_{t2}$  de tuzaklanan elektronların ısıyla yayılmalarının oranına bağlı olur.

Tek değerli iki tuzak seviyesi olan yarıiletkenlere uygulanan yukarıdaki bağıntılar, çift değerlikli tek tuzak seviyeleri olan yarıiletkenlere uygulanabilir. Böylece (2.37) bağıntısı

$$-\frac{d\Delta N^0}{dt} = c_{n1} N_1^0 n_1$$

$$-\frac{d\Delta N^+}{dt} = c_{n2} N_2^+ n_2 + \frac{d\Delta N^0}{dt} \quad (2.45)$$

halinde verilir.  $\Delta N^0$ ,  $\Delta N^+$  yüksüz ve tek iyonlaşan tuzakların sayılarını gösterir. Burada yaklaşık yüksüzlük koşulu

$$2\Delta N^{++} + \Delta N^+ = \Delta N_a^- \quad (2.46)$$

ile ve kütle eşitliği koşulunda

$$0 = \Delta N^0 + \Delta N^+ + \Delta N_p^{++} \quad (2.47)$$

bağıntısıyla verilir.  $\Delta N^{++}$ , tuzaktaki çift iyonlaşma sayısını gösterir. Böylece (2.43) bağıntısı

$$\Delta p \approx c_+ \exp(-t/\tau_1) + c_{++} \exp(-t/\tau_2) \quad (2.48)$$

haline gelir. Burada

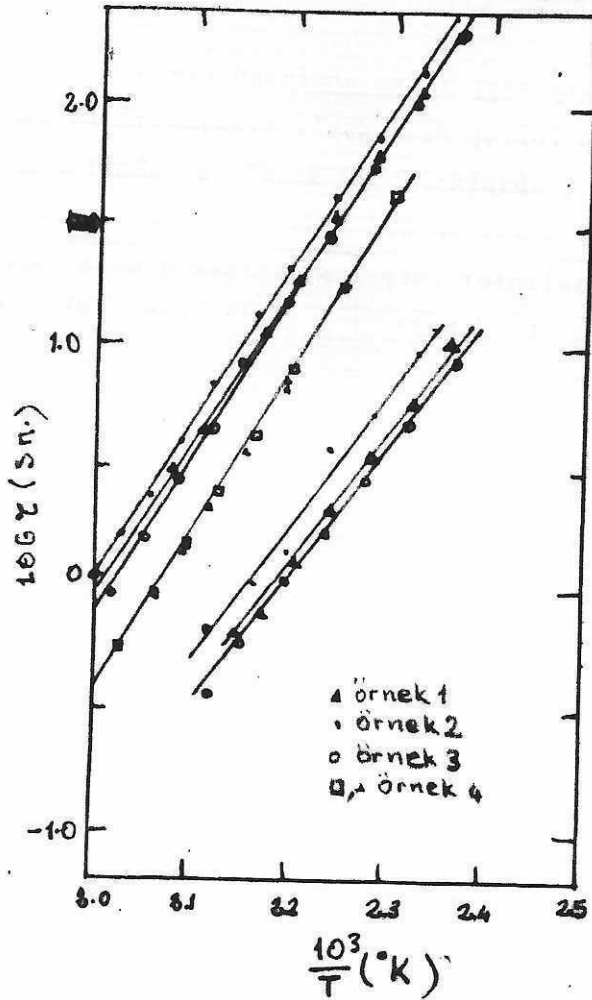
$$\begin{aligned} 1/\tau_1 &= c_{n1} n_1 \\ 1/\tau_2 &= c_{n2} n_2 \end{aligned} \quad (2.49)$$

ile ve

$$c_+ \approx \tau_a \Delta N^0(0) c_{pa} (p_0 + p_1) \left( \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} + 2 \right) \quad (2.50)$$

$$c_{++} \approx \tau_a c_{pa} (p_0 + p_1) \left( \Delta N^+(0) - \frac{\tau_2 N^0(0)}{\tau_1 - \tau_2} \right)$$

bağıntıları ile verilir. Çizelge 2.1 deki  $\text{Cu}_2\text{O}$  örnekleri için ,  $0.65 \mu\text{m}$  dalga boylu ışıkla geçici aydınlatma ile elde edilen fotoiletkenlik özellikleri Şekil 2.13 de verilmiştir.



Şekil 2.13: 1 - 4 örneklerinin , geçici aydınlatma altında fotoiletkenliğindeki değişim

bozunma sabitleri

$$1/\tau_1 = s_{n1} v_e N_C \exp \left[ - (E_C - E_{t1})/kT \right] \quad (2.51)$$

$$1/\tau_2 = s_{n2} v_e N_C \exp \left[ - (E_C - E_{t2})/kT \right]$$

bağıntılarıyla verilir.  $s_{n1}$  ve  $s_{n2}$  iki tuzak seviyesi için elektron yakalama kesitini gösterir ve elektronların iletkenlik şeridindeki ısısal hızların bir ölçüsüdür. Diğer bir deyimle ısısal hızlar bu kesitlere bağlıdır.

### 2.3.2: Kararlı Durum Fotoiletkenliği

100°C nin üzerinde sabit ışık şiddetiyle aydınlatmada  $E_{t1}$  ve  $E_{t2}$  deki tutulan elektronlarla iletkenlik şeridi arasında bir denge olur. Çok düşük ışık şiddetlerinde ve yüksek sıcaklıklarda, tuzaklarda önemli sayılabilecek kadar elektron tutulur. Şekil 2.8 de gösterilen U, A, B, C, D, G, H geçişleri olur. E ve F geçişleri geçici fotoiletkenlikte olduğu gibi küçümsemiştir. İletkenlik şeridi ile  $E_{t2}$  arasındaki denge

$$c_{n2} N_2^0 N_C \exp \left[ - (E_C - E_{t2})/kT \right] = c_{n2} N_2^+ n \quad (2.52)$$

bağıntısıyla verilir.  $N_2^0$ ,  $N_2$  dolu ve boş tuzakların sayılarını;  $n$ , iletkenlik şeridindeki elektron sayısını gösterir. İletkenlik şeridindeki elektron sayısı daha çok aydınlatma ile meydana gelen U geçişine ve  $E_r$  deki yeniden birleşme hızına bağlıdır. Kararlı durumda U geçişi

$$U = c_{nr} N_r n = n/\tau_r \quad (2.53)$$

bağıntısıyla verilir.  $N_r$  yeniden birleşme merkezinin sayısını gösterir. (2.52) ve (2.53) bağıntılarından dolu tuzakların sayısını ifade edecek şekilde kütle denkleği koşulu

$$N_2 = N_2^+ + N_2^0 \quad (2.54)$$

ile verilir. Burada

$$N_2^0 = N_2 \left[ 1 + \frac{N_C \exp \left[ - (E_C - E_{t2}) / kT \right]}{U \tau_r} \right]^{-1} \quad (2.55)$$

dir. Değerlik şeridindeki deşik sayısı  $U$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $H$  geçişleriyle tanımlanır. Düşük aydınlatmalarda  $A$  ve  $B$  geçişleri önemlidir.  $A$  ve  $B$  geçişleri eşit hızlarda oluyorsa

$$p = (N_a^0 / N_a^-) N_v \exp(-E_a / kT) \quad (2.56)$$

olur.  $N_a^0$ ,  $N_a^-$  yüksüz ve iyonlaşmış alıcı sayılarını gösterir. Kararlı durumdaki maddenin yük nötrlüğü koşulu

$$n + N_a^- = p + N_2^+ + N_{d-a}^+ \quad (2.57)$$

bağıntısıyla verilir.  $N_{d-a}^+$ , iyonlaşmış vericilerin toplam sayısından, yarıiletkendeki  $N_2$  ve  $N_a$  alıcılarından başka olan alıcıların çıkarılmasıyla elde edilen sayıdır. Bu durumda  $E_a$  yı büyük oranda vericiler etkiler. Bundan dolayı (2.57) bağıntısındaki  $n$  ve  $p$  değerleri, diğer değerlere göre önemsizdir. Böylece yük nötrleşmesi yaklaşık olarak

$$N_a^- \approx N_2^+ + N_{d-a}^+ \quad (2.58)$$

ile verilir. (2.58), (2.56) bağıntısında yerine bırakılır ve  $N_a = N_a^0 + N_a^-$  alınırsa

$$p = \frac{N_a - N_2^+ - N_{d-a}^+}{N_2^+ + N_{d-a}^+} N_v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.59)$$

bağıntısı bulunur. (2.59) bağıntısını sağlayan bir yarıiletkenin karanlıktaki

deşik sayısı

$$p_0 = \frac{N_a - N_2 - N_{d-a}^+}{N_2 + N_{d-a}^+} N_v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.60)$$

olur. Isısal dengede ve aydınlatma olmadan  $N_2^+ \approx N_2$  olduğundan (2.59) dan (2.60) bağıntısı çıkarılarak fazladeşik sayısı için

$$\Delta P_f = \frac{N_2^0}{N_2 + N_{d-a}^+} \left[ p + N_v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \right] \quad (2.61)$$

bağıntısı bulunur. Çizelge 2.1 deki  $N_a/N_d \approx 1.05$  sonucu kullanılarak, yüksek sıcaklık ve zayıf aydınlatma halinde

$$p \approx p_0 \ll N_v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.62)$$

alınabilir. Böylece (2.61) bağıntısı

$$\Delta P \approx \frac{N_2^0}{N_2 + N_{d-a}^+} N_v \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.63)$$

haline gelir. (2.63) de (2.55) yerine konup (2.60) ile bölünerek, sabit aydınlatmadan dolayıdeşik sayısındaki artma için

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta P}{P_0} = \quad (2.64)$$

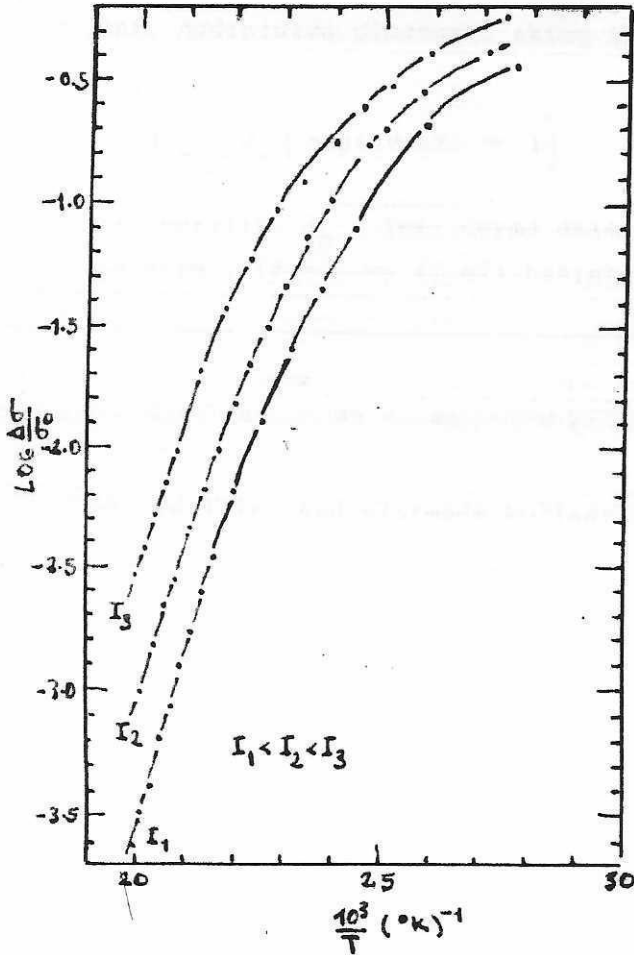
$$\frac{UN_2}{(N_a - N_2 - N_{d-a}^+) \left\{ U + N_C \exp \left[ \frac{(E_{t2} - E_C)}{kT} \right] \right\}}$$

bağıntısı bulunur. Çizelge 2.1 deki 3.  $Cu_2O$  örneği için sabit aydınlatma altında

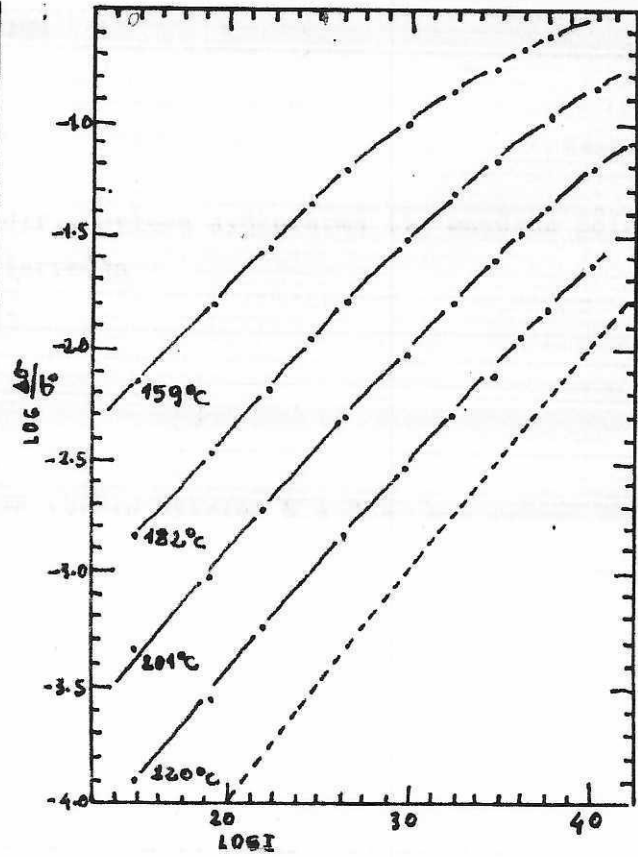
ve  $100^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$  aralığındaki deneysel veriler , Şekil 2.14 de verilmiştir. Yüksek sıcaklık sınırlarında (2.64) bağıntısı

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \approx \frac{UN_2 \tau_r \exp \left[ \frac{(E_C - E_{t2})}{kT} \right]}{(N_a - N_2 - N_{d-a}^+) N_c} \quad (2.65)$$

alınmalıdır. Aydınlatmadan dolayı elektronlarda meydana gelen optik hızı (U) ışık şiddeti ile orantılıdır; (2.65) in değişik sıcaklıklardaki verileri Şekil-2.15 de verilmiştir.



Şekil 2.14: 3.  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneğinin kararlı durum fotoiletkenliği



Şekil 2.15: 3.  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneğinin değişik sıcaklıklarda , fotoiletkenliğinin ışık şiddetine göre değişimi

Cörüldüğü gibi sıcaklık arttıkça çizgisellik artmaktadır.

## 2.4: Cu/Cu<sub>2</sub>O EKLEMİNİN ÖZELLİKLERİ

Cu/Cu<sub>2</sub>O eklemi diyod özelliği gösterir. Aydınlatma ile meydana gelen kısa devre akımı , yansıma kayıpları küçümsenerek

$$J_{sc} = q \int_{\lambda} \alpha(\lambda) \phi(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \exp\left[-\frac{(x-x')}{L}\right] dx d\lambda \quad (2.66)$$

bağıntısıyla verilir. Burada  $\phi(\lambda)$  , gönderilen ışığın akısını;  $x$  , eklem içindeki azınlık taşıyıcılarının yüzeye uzaklığını;  $\lambda$  , ışığın dalga boyunu gösterir.  $x$  uzaklığında azınlık taşıyıcıları  $\exp(-x/L)$  ye göre hareket ederler. Aydınlatma olmadık eklem akımı'

$$J_{sh} = J_o \left[ \exp(qV/kT) - 1 \right] \quad (2.67)$$

ile verilir.  $J_o$  , ters doyma akımıdır. Böylece aydınlatma ile meydana gelen fazla akım , (2.66) ve (2.67) bağıntılarından

$$J = J_{sc} - J_{sh} = J_{sc} - J_o \left[ \exp(qV/kT) - 1 \right] \quad (2.68)$$

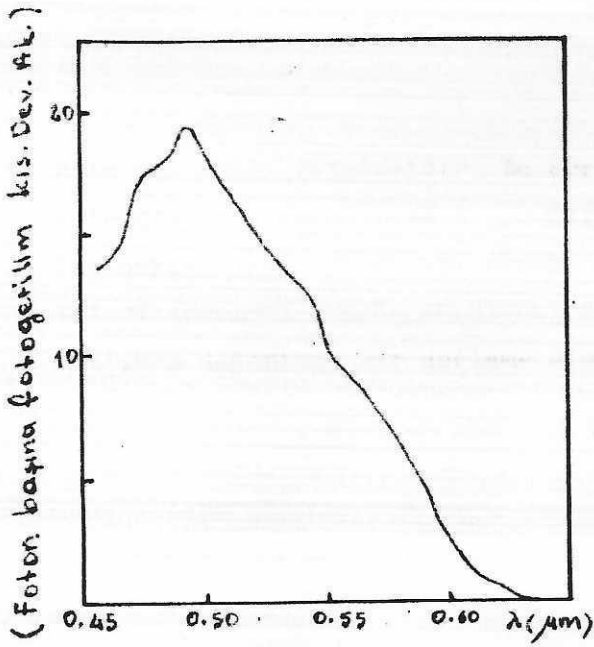
ile verilir. Aydınlatmada kullanılan ışığın akısına N.A.S.A. nın cetvel haline getirdiği değerlerden bakılır.

### 2.4.1: Spektral Özellikleri

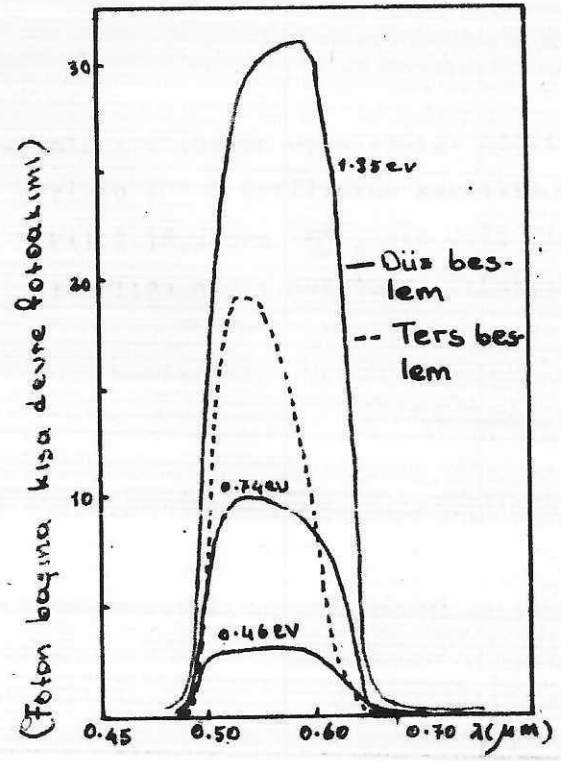
Cu/Cu<sub>2</sub>O eklemının 0.45 - 0.75  $\mu$ m aralığındaki spektral özellikleri Şekil-2.16 da verilmiştir. 0.5  $\mu$ m ile 0.65  $\mu$ m de iki en fazla iletkenlik olduğu görülmektedir. Fotogerilim eğrilerinde Şekil 2.17 , düz beslemde farklı gerilimlerde benzer özellik gösterdikleri halde , ters beslemde akım hemen hemen uygulanan gerilimden bağımsızdır.

### 2.4.2: Engel Yüksekliği

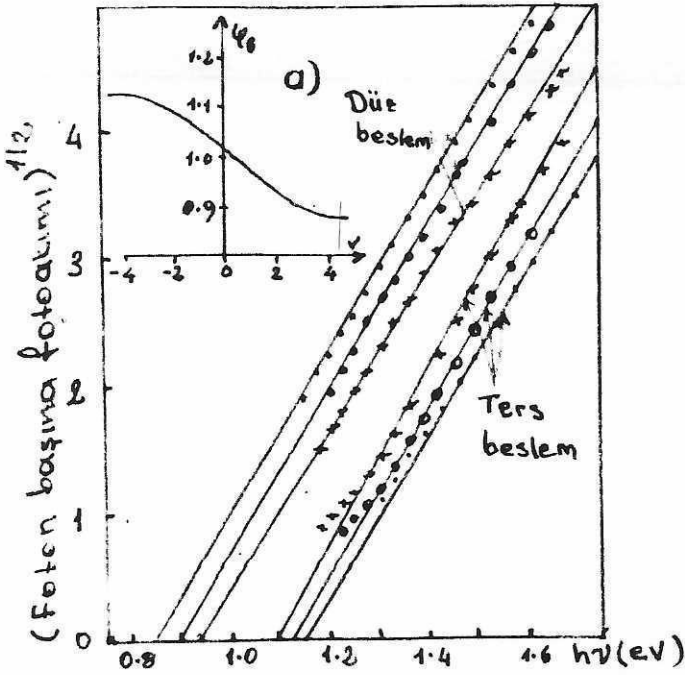
Cu/Cu<sub>2</sub>O eklemının fotoakımın karekökünün ışığın enerjisine bağıllığı Şekil-2.18 de verilmiştir. Görüldüğü gibi fotoakımın karekökü , ışığın dalga boyuna



Şekil 2.16: Cu/Cu<sub>2</sub>O eklemine değişik aydınlatmalardaki spektral eğrisi



Şekil 2.17: Ters ve düz beslemde uygulanan gerilime bağlı olarak fotocevabın değişmesi



Şekil 2.18: Gönderilen foton başına fotoakımın karekökünün, gönderilen fotonun enerjisine bağlılığı. Değişik gerilimlerdeki davranışından engel yüksekliğinin hesaplanması (küçük şekil). (Çizitki küçük şekilden  $V=0$  a karşılık gelen değerin  $\phi_B = 1.02$  eV olduğu görülmektedir.)

göre davranışı çizgiseldir. Bu eğrilerin eğimleri alınarak uygulandığı gerilime göre çizilir. (Şekil 2.18.a) . Çizilen bu eğrinin  $V = 0$  gerilimine karşılık gelen nokta engel yüksekliği olarak alınır. Şekil 2.18.a dan  $\phi_B$  nin 0.75 ile 1.1 eV arasında olduğu görülmektedir.  $\phi_B$  sıcaklığa bağlı değildir. Sıcaklık arttıkça değerinde bir değişme olmaz.

## BÖLÜM III

## DENEYLER

## 3.1: KULLANILAN ARAÇLAR

Bakır tabakaların oksitlenmesinde ;  $1100^{\circ}\text{C}$  ye kadar çıkan fırın (Hoskins Electric Furnace ) , Chromel - Alumel termokupl ( termocouple ) , termokupl'un uçlarındaki gerilime göre fırının ısısını otomatik olarak veren,ısı denetim cihazı ( Gebr Ruhstrat A. G. Gottingen ) kullanılmıştır.

$\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Metal}$  başlamasında , metal başlamalar vakum sisteminde (  $10^{-5}$  torr) yapılmıştır. Örneklerin sıcaklık denetimleri , ısı denetim cihazı ( $100^{\circ}\text{C}$  ye kadar ) ile yapılmış ve ölçümlerin alınmasında voltmetre , ampermetre kullanılmıştır.

$\text{Cu}_2\text{O}$  da tuzakların kayıt edilmesinde X - Y ve t - T çift kayıtedicileri ile Bakır - Constantan termokupl'u kullanılmıştır.

## 3.2: ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI

(%99.99)saf ve  $\sim 0.5$  mm kalınlığında Bakır tabakalar , Asetonla iyice yıkandıktan sonra %50  $\text{HNO}_3$  içerisinde 6 - 7 sn. bekletilerek saf su ile yıkanıp kurutuldu . Yüzeyi temizlenen Bakır tabakalar  $1000^{\circ}\text{C}$  de 5 - 6 dakika oksitlenerek havada soğutuldu.  $600^{\circ}\text{C}$  de 20 dakika tavlama yapıldı ve su içinde aniden soğutuldu (kısım 2.1).Soğutma işlemi iki ayrı ortamda yapıldı. 1) Saf su ile; 2) Orthofosforik asit çözeltisiyle (C = 0.737 molar)

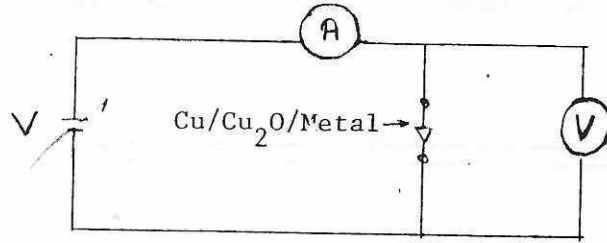
Oksitlemeyle  $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  tabakaları elde edildi. Oksit tabakalar , %20 HCl ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  karışımında 1 dakika yıkanarak saf su döküldü ve kurutuldu. Böy-

lelikle CuO tabakası temizlendi ve  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  yapısı elde edildi.  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  yapısı daire şeklinde tutuculara yapıştırıldı. Cu tabakasından Kurşun lehimle ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  tabakasından vakum sisteminde ( $10^{-5}$  Torr ) Au ve Cd metalleri buharlaştırılarak kaplama yapıldı. Böylece

- 1) Soğutma işleminde su kullanılarak hazırlanan örnekler
    - a)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$
    - b)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$
  - 2) Soğutma işleminde Orthofosforik asit çözeltisi (  $C = 0.737$  molar ) kullanarak hazırlanan örnekler
    - a)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$
    - b)  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$
- olmak üzere 4 ayrı çeşit yapı yapıldı

### 3.3: YAPILAN DENEYLER

I: Örneklerin I - V davranışı için alınan ölçümlerde , Şekil 3.1 deki devre kullanıldı. Karanlık ve zayıf aydınlatma altındaki ( $\sim 10$  lux) iletkenlik ölçümleri  $1^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}$  aralığında alındı.



Şekil 3.1: Ölçümlerin alınmasında kullanılan devre

### Ölçümler

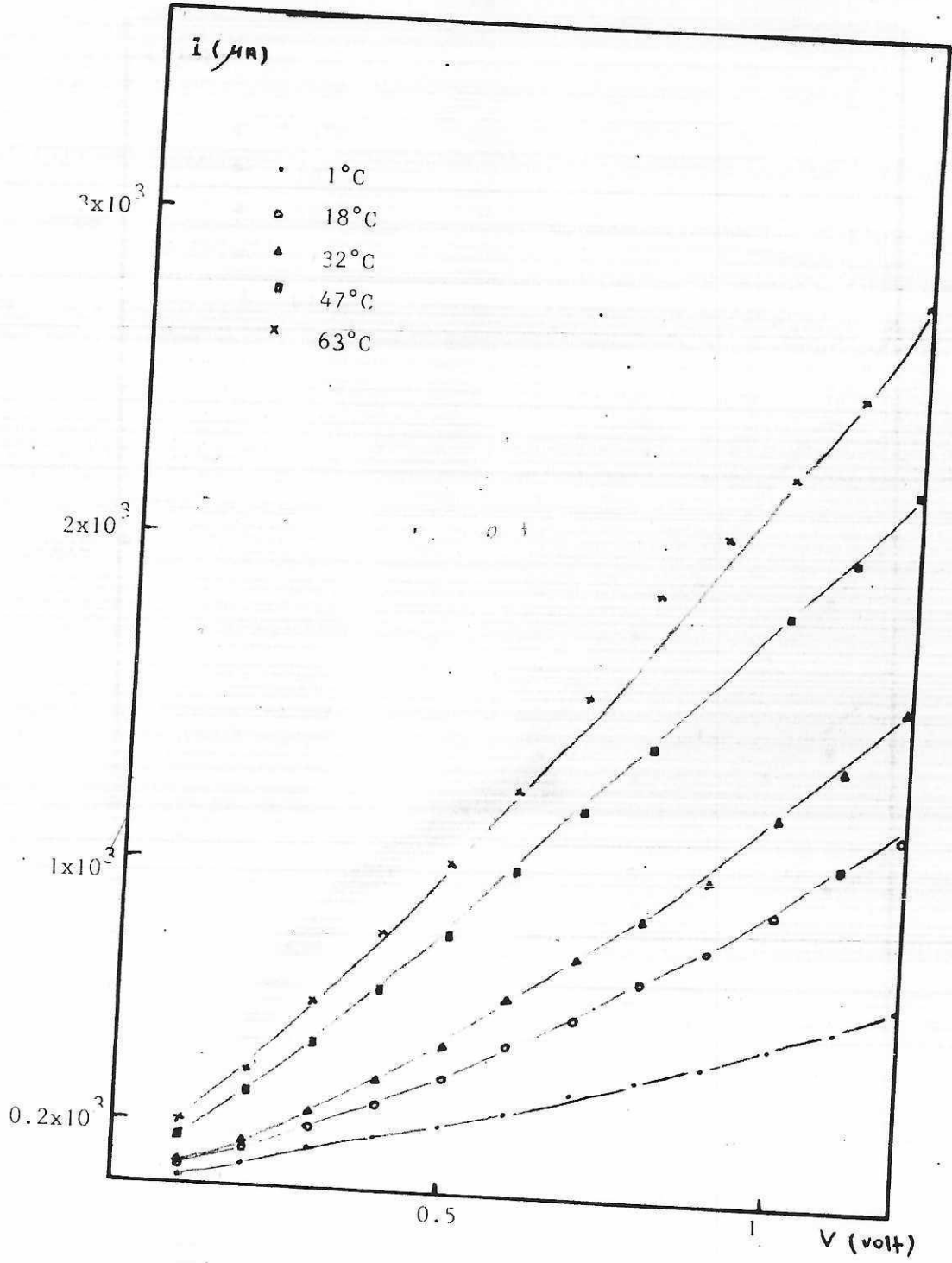
- 1) Su ile ani soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$  yapısında , karanlık ve aydınlatma altında alınan ölçümler Çizelge 3.1 ; 3.2 ; 3.3 ; 3.4 de , bu deneysel verilerden elde edilen I - V eğrileri Çizit 3.1 ; 3.2 ; 3.3 ; 3.4 de verilmiştir.

Uy. Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 63°C
V(volt)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)
0.1	33	70	60	160	200
0.2	75	120	140	300	360
0.3	125	190	240	460	580
0.4	165	270	340	620	800
0.5	215	360	460	800	1020
0.6	260	470	610	1000	1250
0.7	320	560	740	1200	1550
0.8	370	670	870	1400	1870
0.9	420	780	1000	1460	2050
1	490	900	1200	1820	2250
1.1	550	1050	1350	2000	2500
1.2	620	1150	1550	3220	2800

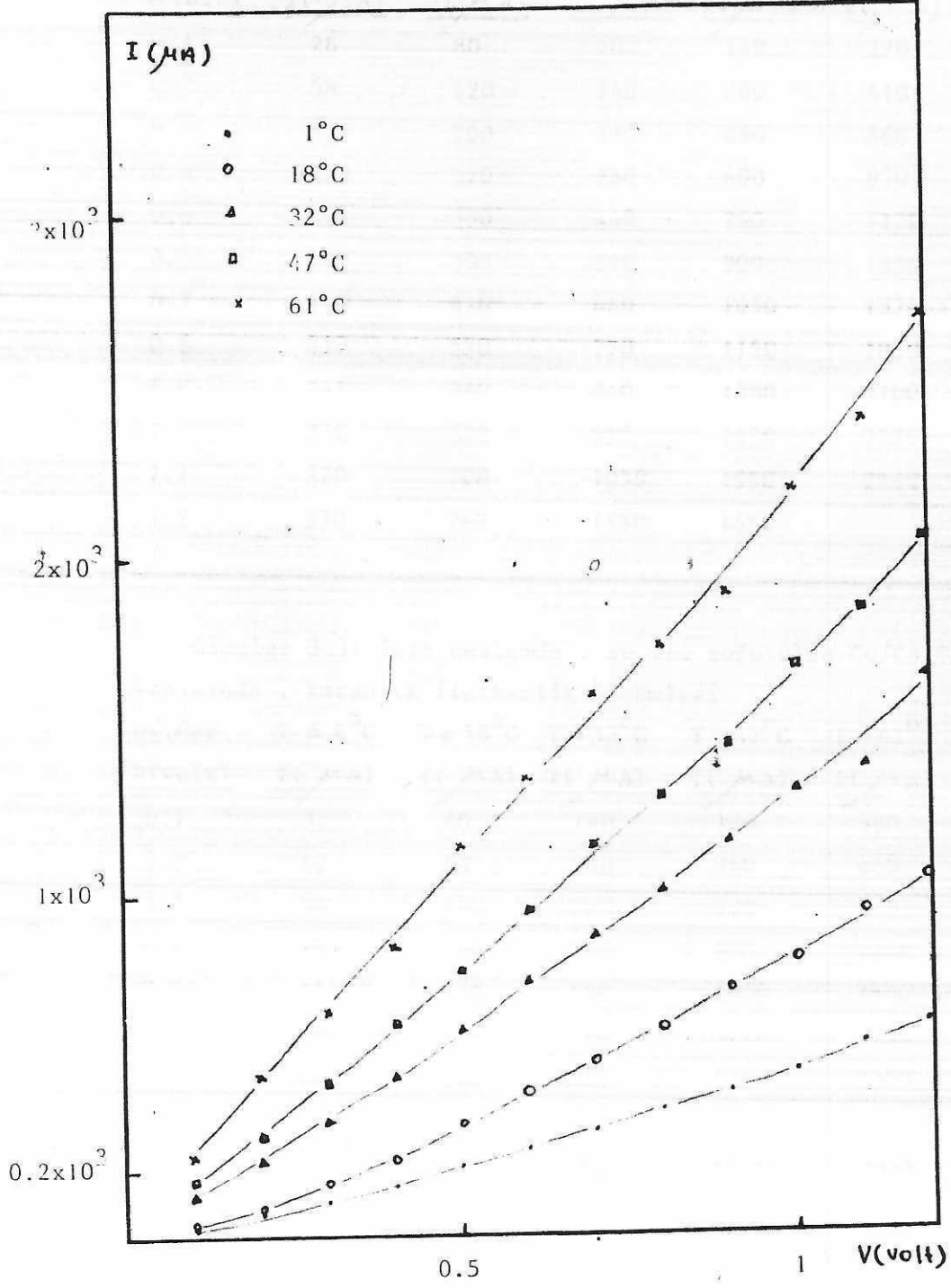
Çizelge 3.1: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy. Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 61°C
V(volt)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)	I( $\mu$ A)
0.1	32	40	120	170	240
0.2	68	90	220	300	470
0.3	112	160	340	450	660
0.4	155	230	470	620	850
0.5	207	330	600	780	1150
0.6	257	420	750	950	1350
0.7	310	510	880	1150	1600
0.8	370	610	1020	1300	1850
0.9	420	720	1170	1450	2100
1	480	810	1310	1680	2400
1.1	560	950	1480	1850	2600
1.2	620	1050	1650	2050	2910

Çizelge 3.2: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik ölçümleri



Çizit 3.1: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



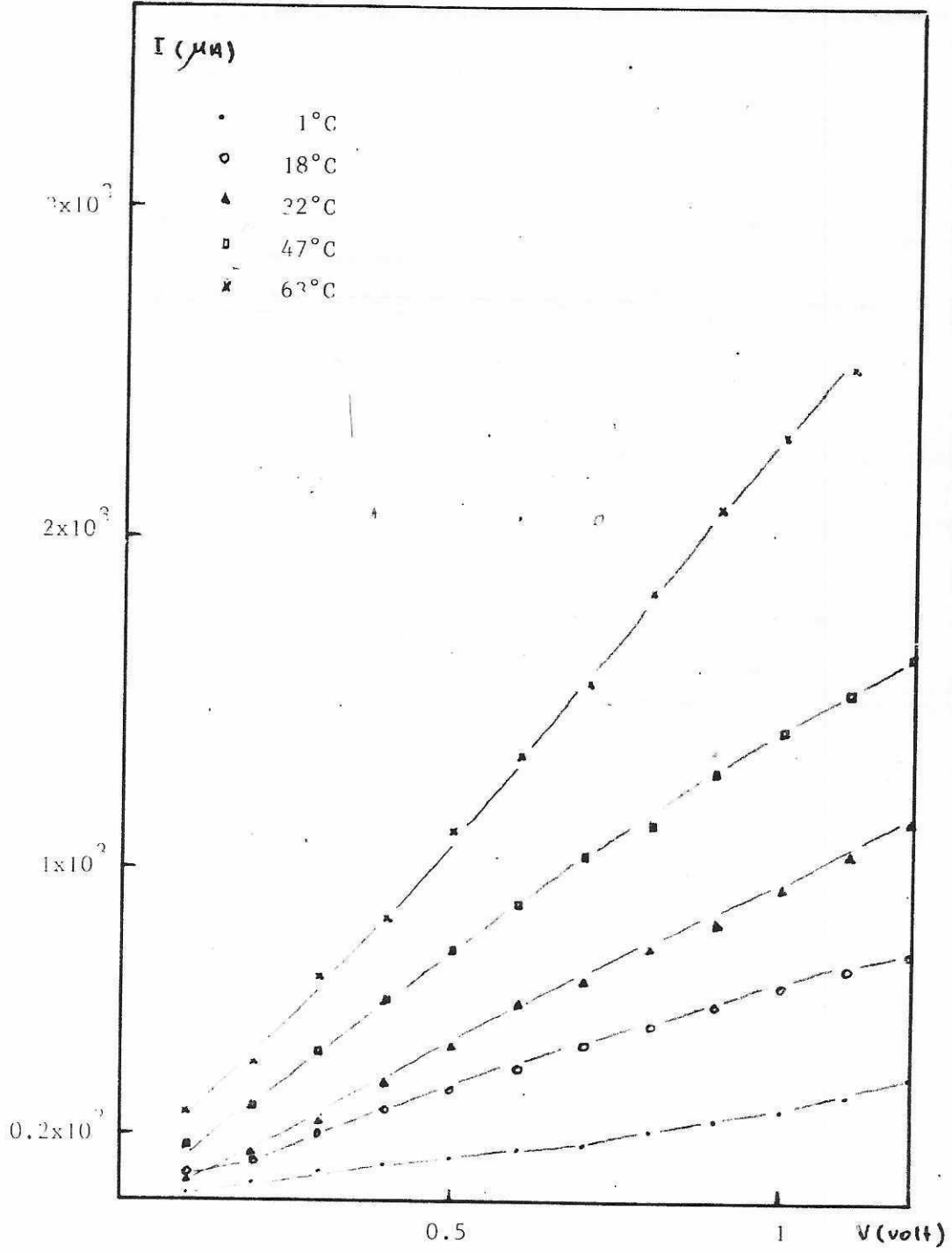
Gizit 3.2: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

Uy.Cer.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 63°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	26	80	70	140	270
0.2	58	120	140	280	410
0.3	83	200	230	460	660
0.4	110	270	350	600	850
0.5	138	330	460	760	1120
0.6	152	400	590	900	1350
0.7	190	470	660	1050	1570
0.8	217	530	770	1150	1850
0.9	245	590	840	1300	2100
1	275	650	950	1420	2320
1.1	320	700	1050	1550	2550
1.2	370	760	1150	1650	

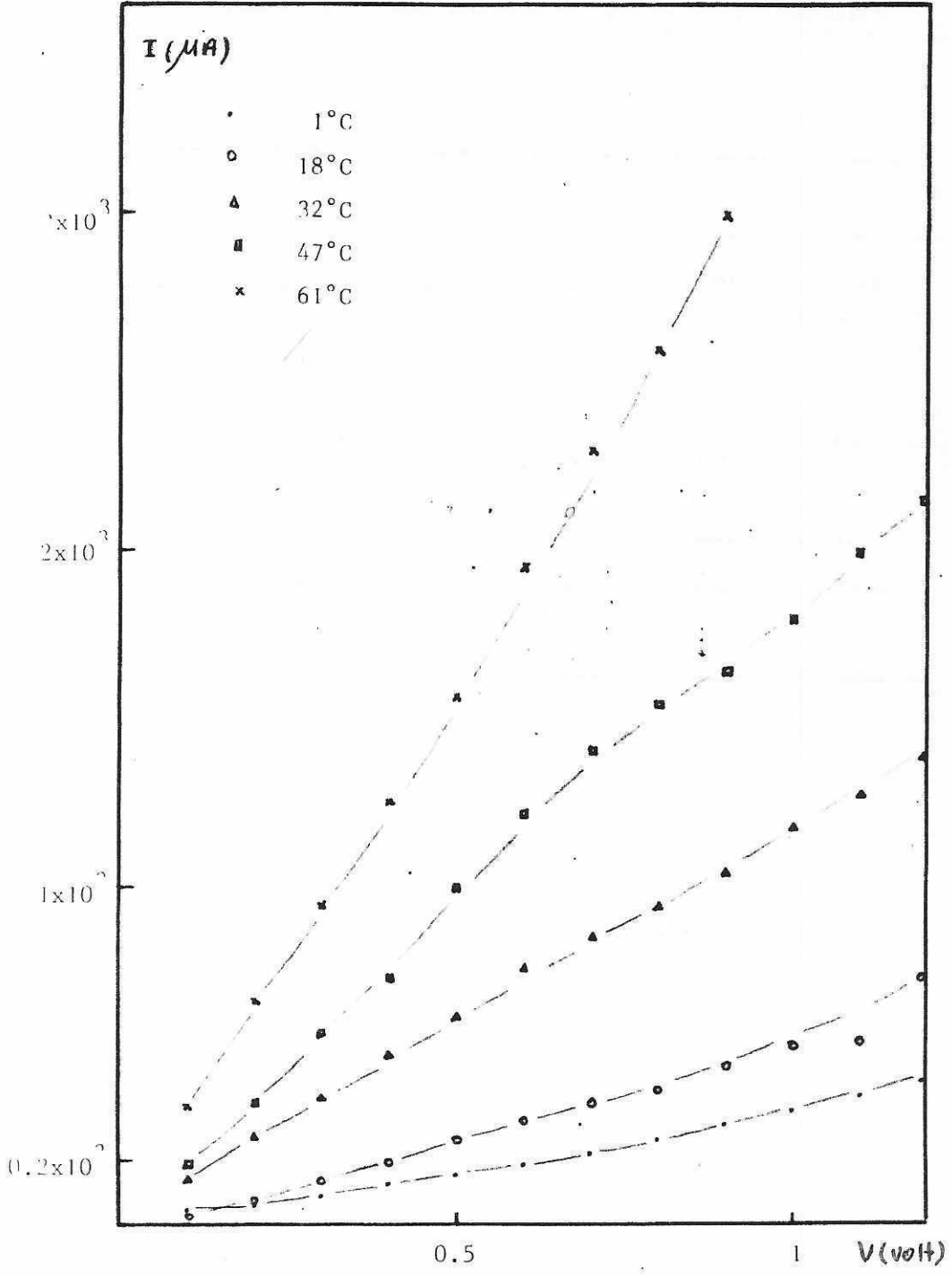
Cizelge 3.3: Ters beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Cer.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 61°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	33	40	140	180	350
0.2	62	80	260	360	660
0.3	92	140	380	570	950
0.4	125	190	510	730	1250
0.5	155	250	640	1000	1580
0.6	180	310	760	1220	1950
0.7	220	360	860	1400	2300
0.8	260	400	950	1650	2600
0.9	300	480	1050	1820	3000
1	340	530	1180	2000	
1.1	390	550	1280	2200	
1.2	430	630	1390	2350	

Cizelge 3.4: Ters beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik ölçümleri



Cizit 3.3: Ters beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



Gizit 3.4: Ters beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

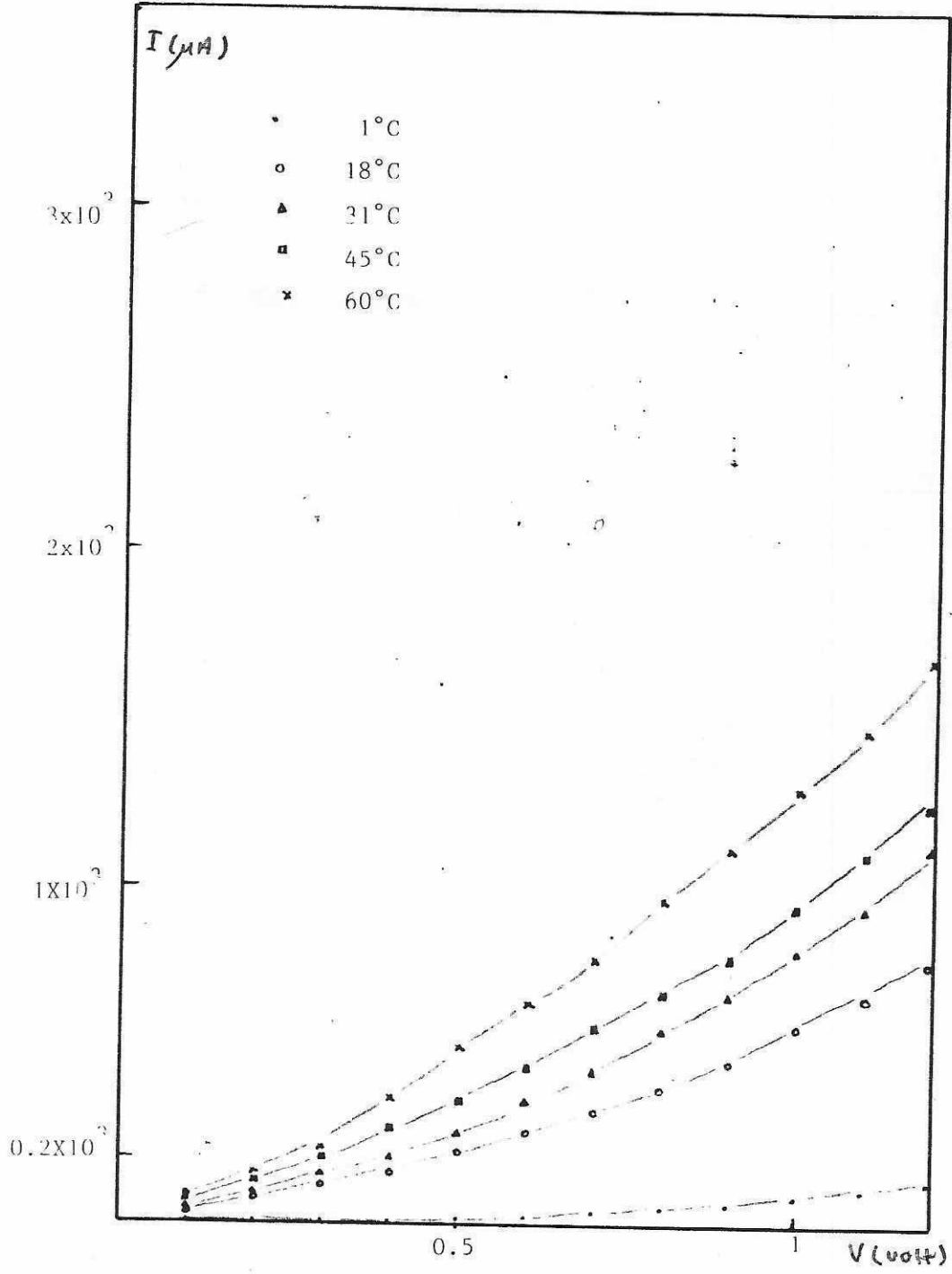
2) Su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık ve aydınlatma altında alınan ölçümler Çizelge 3.5 ; 3.6 ; 3.7 ; 3.8 de , bu deneysel verilerden elde edilen I - V eğrileri Çizit 3.5 ; 3.6 ; 3.7 ; 3.8 de verilmiştir.

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 31°C	T = 45°C	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	3	40	40	70	80
0.2	5	80	80	130	150
0.3	8	120	150	200	230
0.4	13	160	200	290	380
0.5	22	220	280	370	530
0.6	33	280	370	470	660
0.7	46	340	460	590	790
0.8	60	410	580	690	970
0.9	76	490	690	800	1120
1	94	590	820	950	1300
1.1	115	680	950	1100	1470
1.2	140	780	1120	1250	1680

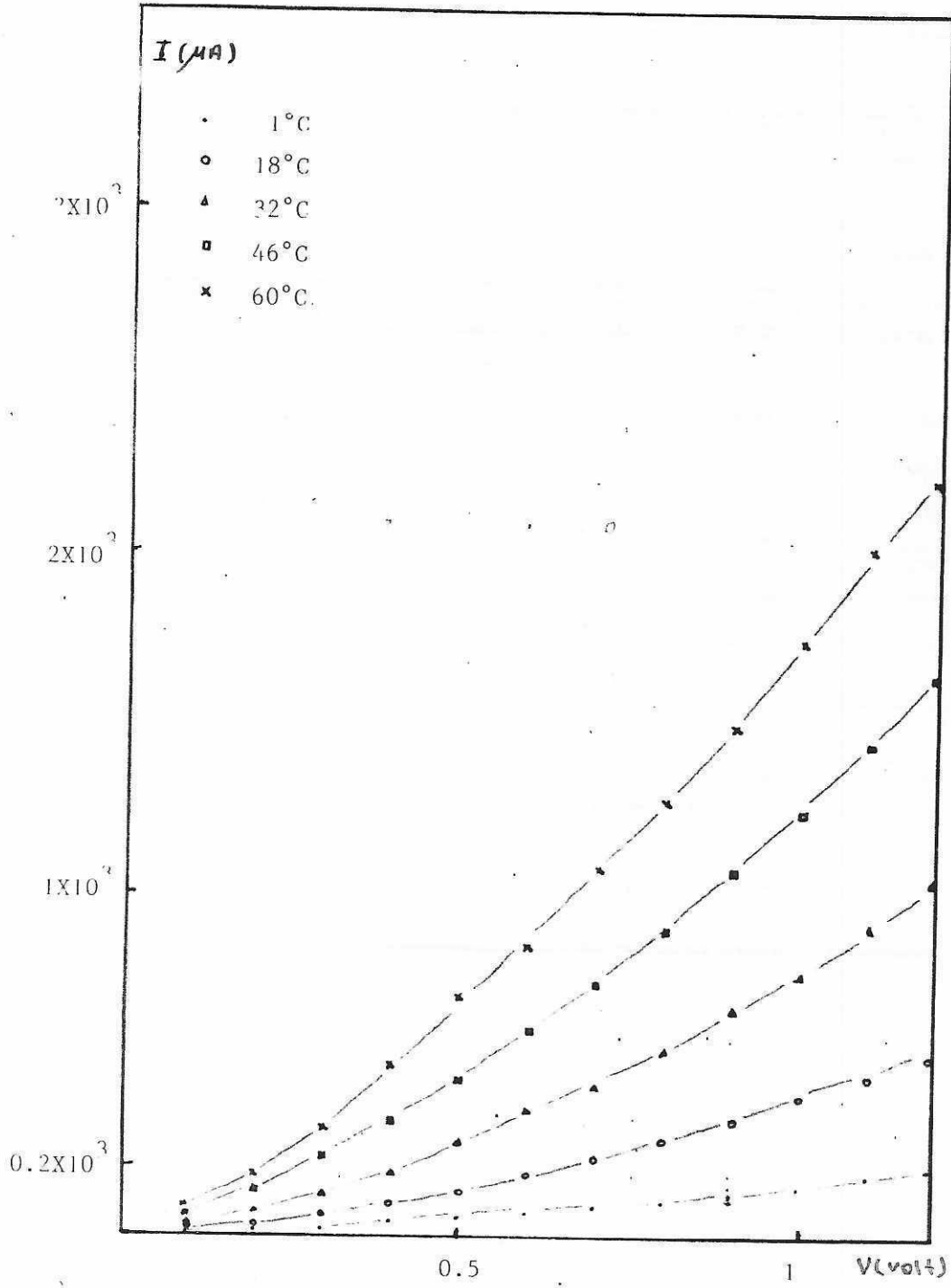
Çizelge 3.5: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 46°C	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	11	20	40	70	90
0.2	22	40	80	140	190
0.3	34	70	130	240	320
0.4	48	100	190	340	500
0.5	62	140	280	460	700
0.6	78	190	370	600	850
0.7	95	240	440	740	1080
0.8	115	290	550	900	1280
0.9	135	340	670	1070	1500
1	155	410	770	1250	1750
1.1	185	470	920	1450	2020
1.2	210	530	1050	1650	2220

Çizelge 3.6: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd



Cizit 3.5: Düz beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



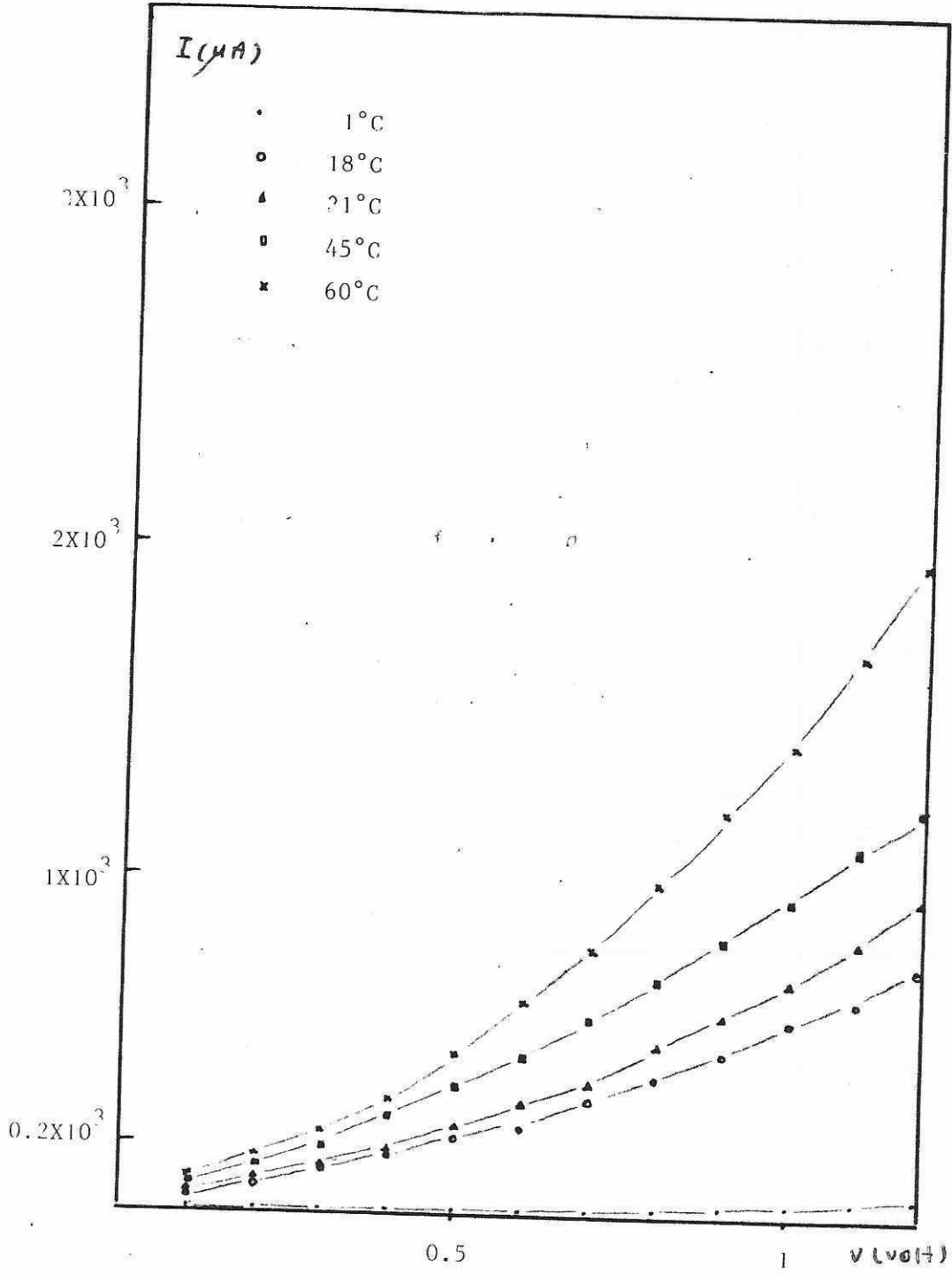
Gizit 3.6: Düz beslemede, su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında, aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 31°C	T = 45°C	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	0.4	40	40	80	90
0.2	4.3	80	80	130	160
0.3	6.9	120	120	190	230
0.4	8.9	160	180	280	330
0.5	10	220	250	370	470
0.6	12.5	240	320	460	630
0.7	17.5	340	390	580	790
0.8	22	400	500	700	980
0.9	27	480	590	820	1210
1	33	580	700	950	1420
1.1	41.5	640	820	1100	1680
1.2	50	740	950	1220	1950

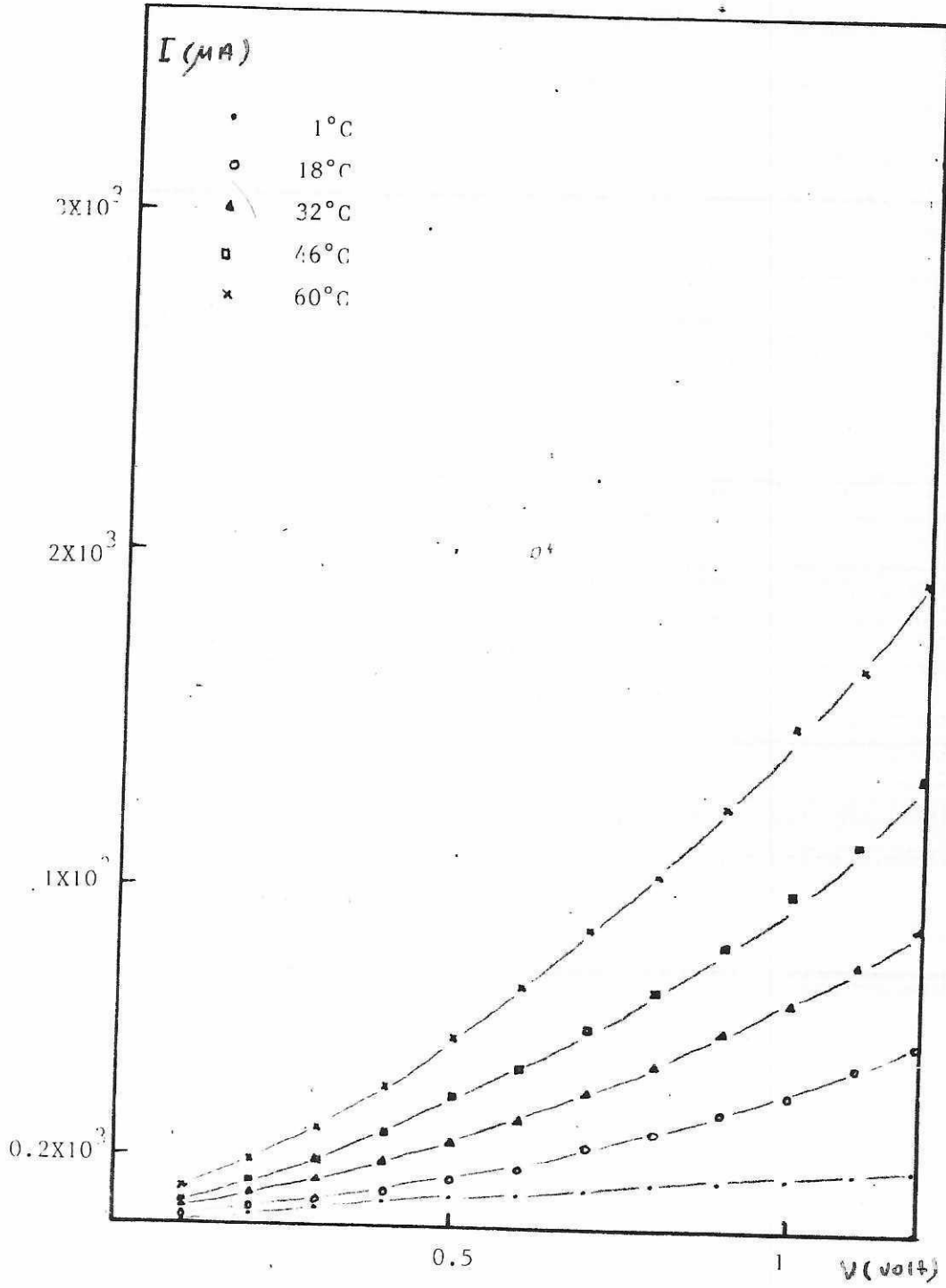
Gizelge 3.7: Ters beslemde , su ile sogutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 46°C	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	16	30	50	70	110
0.2	31	50	90	130	190
0.3	48	70	130	190	290
0.4	65	100	190	270	410
0.5	84	140	250	380	560
0.6	97	170	310	470	710
0.7	115	240	400	590	880
0.8	130	280	480	700	1050
0.9	140	340	580	840	1250
1	150	400	670	1000	1500
1.1	170	480	790	1150	1680
1.2	178	550	900	1350	1950

Gizelge 3.8: Ters beslemde , su ile sogutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , aydinlatma altındaki iletkenlik ölçümleri



Çizit 3.7: Ters beslemde , su ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında ; karanlık iletkenlik eğrileri



Cizit 3.8: Ters beslemde , su ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$  yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

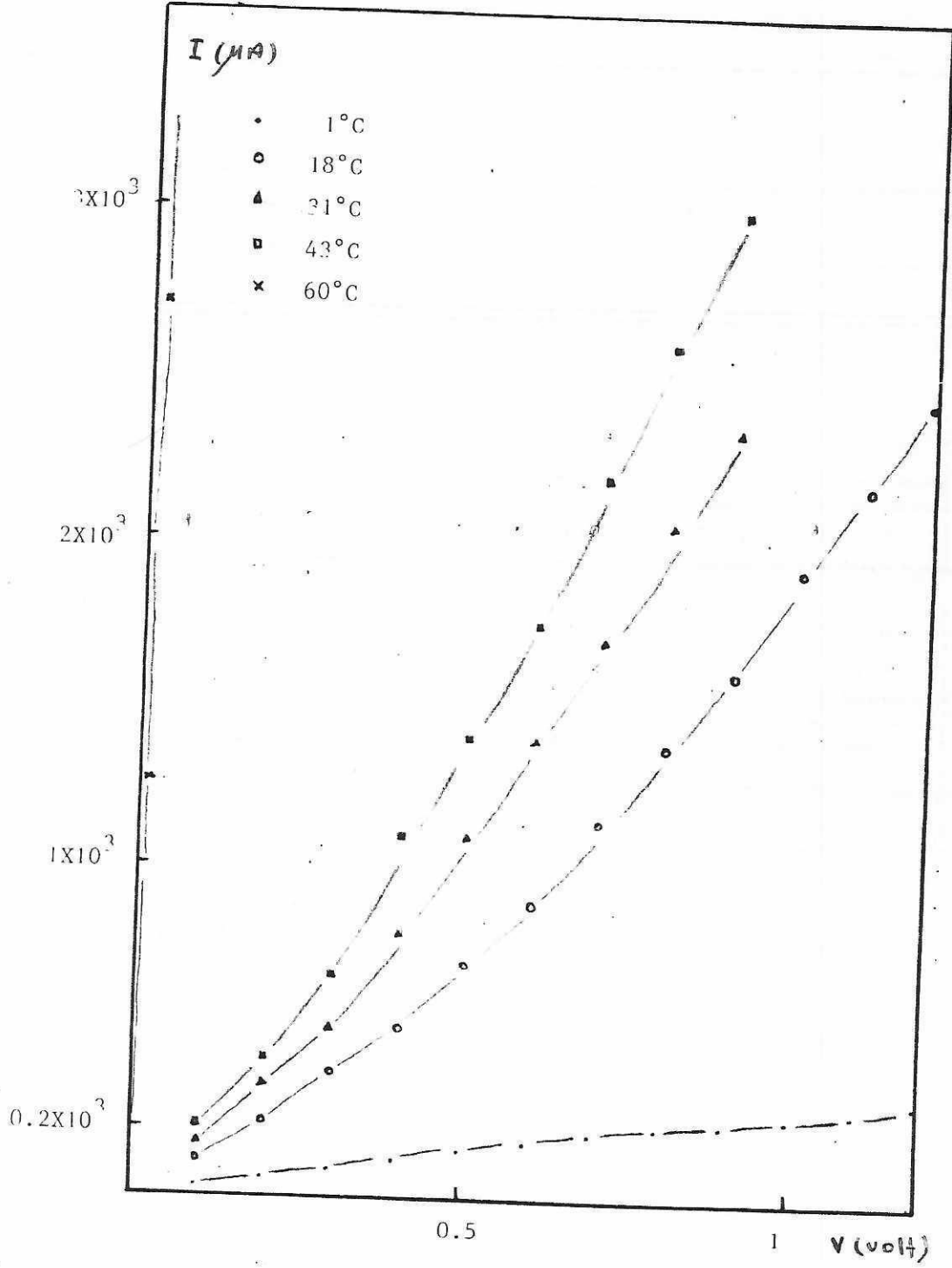
3) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık ve aydınlatma altında alınan ölçümler Çizelge 3.9 ; 3.10 ; 3.11 ; 3.12 de , bu deneysel verilerden elde edilen I - V eğrileri Çizit 3.9 ; 3.10 ; 3.11 ; 3.12 de verilmiştir.

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 31°C	T = 43°C	Uy.Ger.	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	V(volt)	I(μA)
0.1	29	110	160	200	0.01	1250
0.2	58	220	240	420	0.02	2700
0.3	84	370	510	670		
0.4	115	510	800	1100		
0.5	142	710	1100	1400		
0.6	170	900	1400	1750		
0.7	195	1150	1700	2200		
0.8	215	1380	2050	2600		
0.9	230	1600	2350	3000		
1	255	1920				
1.1	275	2180				
1.2	300	2450				

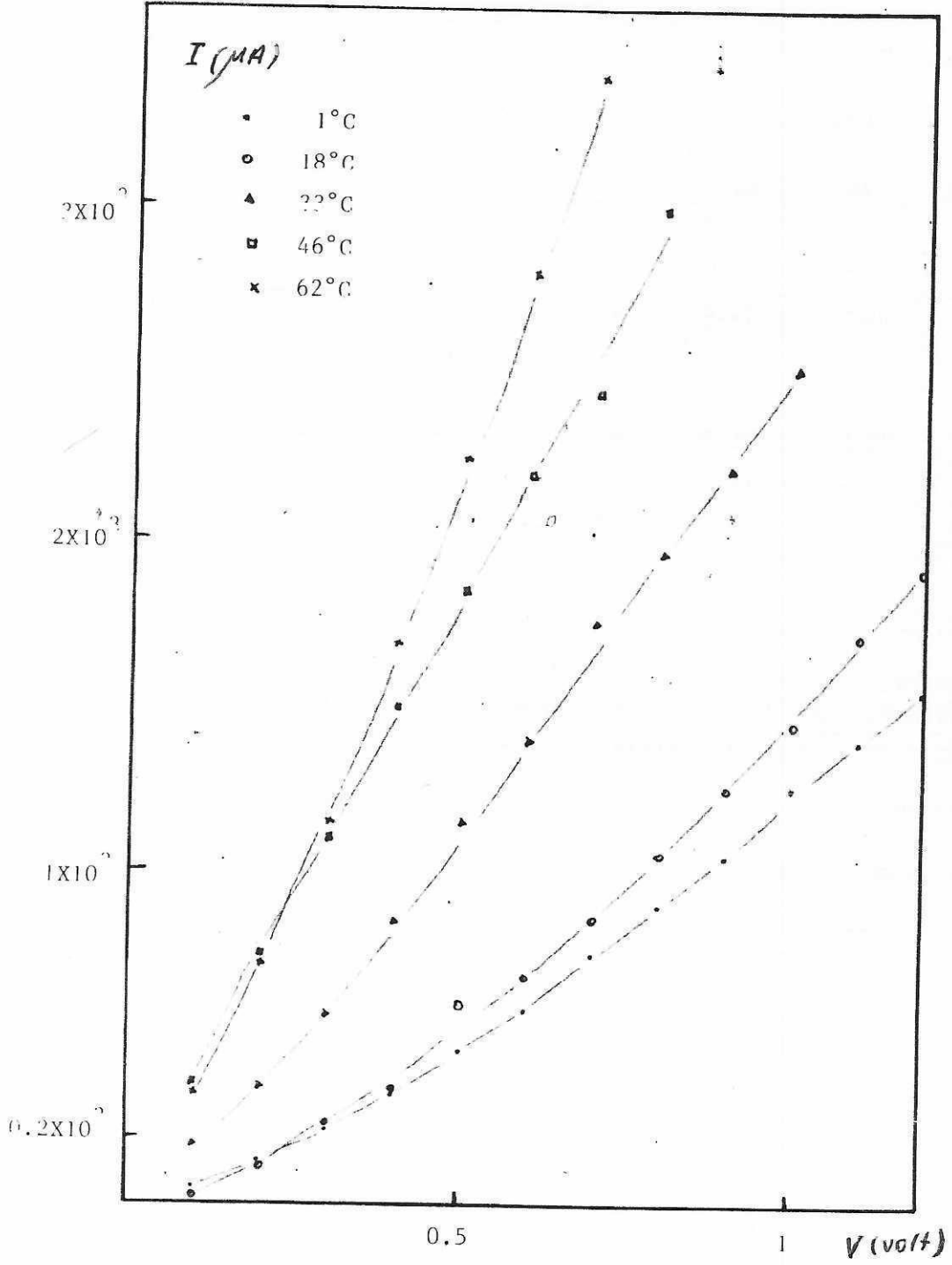
Çizelge 3.9: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 33°C	T = 46°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	52	30	180	260	340
0.2	125	110	350	750	730
0.3	225	240	570	1100	1150
0.4	330	350	850	1500	1700
0.5	460	600	1150	1850	2250
0.6	580	680	1400	2200	2800
0.7	750	850	1760	2650	3400
0.8	900	1050	1970	3200	
0.9	1050	1250	2220		
1	1250	1450	2520		
1.1	1400	1720			
1.2	1550	1920			

Çizelge 3.10: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik



Çizit 3.9: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



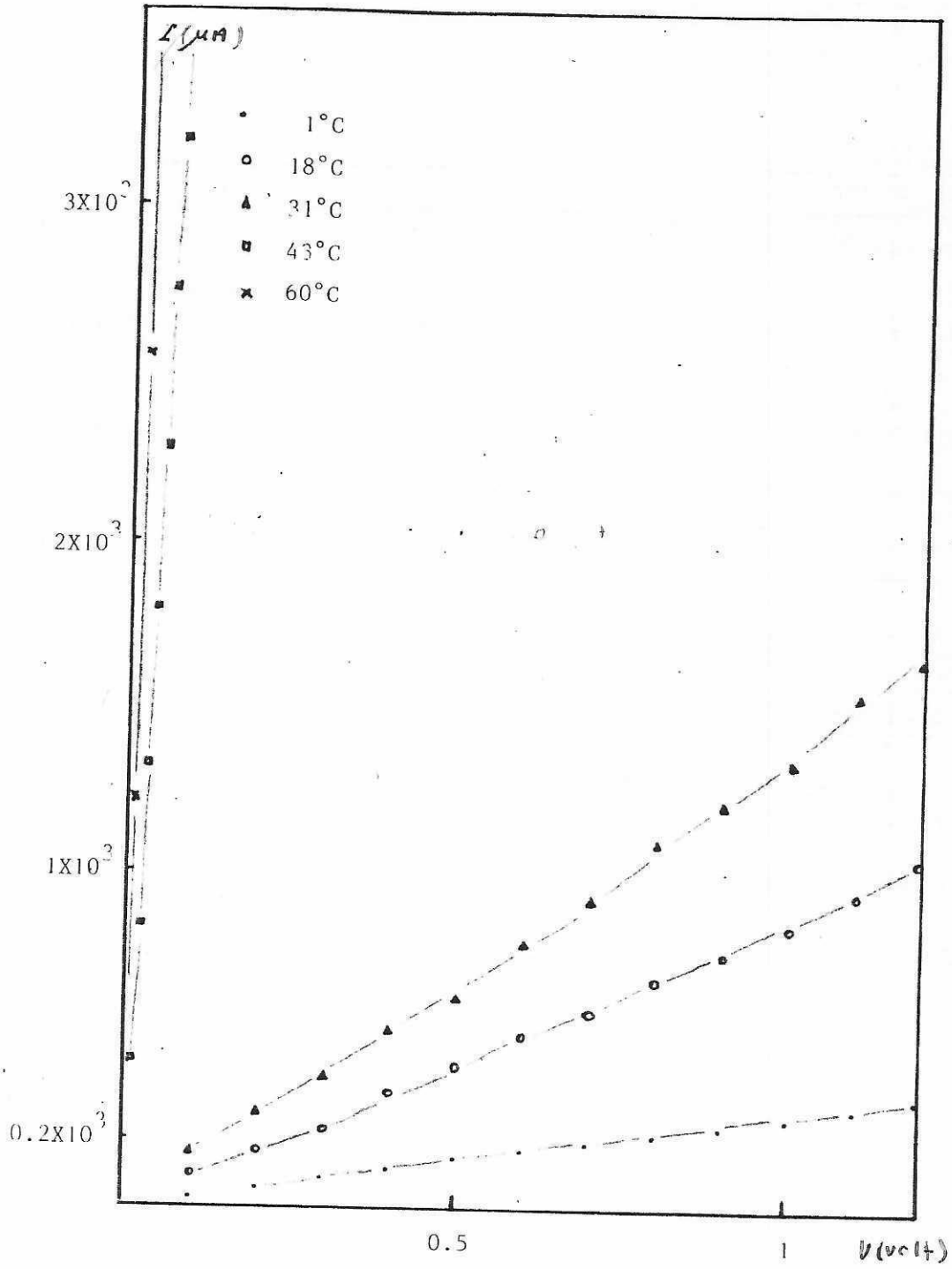
Gizit 3.10: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 31°C	Uy.Ger.	T = 43°C	T = 60°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	V(volt)	I(μA)	I(μA)
0.1	29	100	160	0.01	430	1220
0.2	58	170	280	0.02	840	2550
0.2	86	230	380	0.02	1320	
0.4	115	340	520	0.04	1800	
0.5	145	420	620	0.05	2280	
0.6	170	510	790	0.06	2750	
0.7	195	580	920	0.07	3200	
0.8	220	680	1100	0.08	3700	
0.9	247	760	1220	0.09		
1	275	850	1350			
1.1	300	950	1550			
1.2	330	1050	1650			

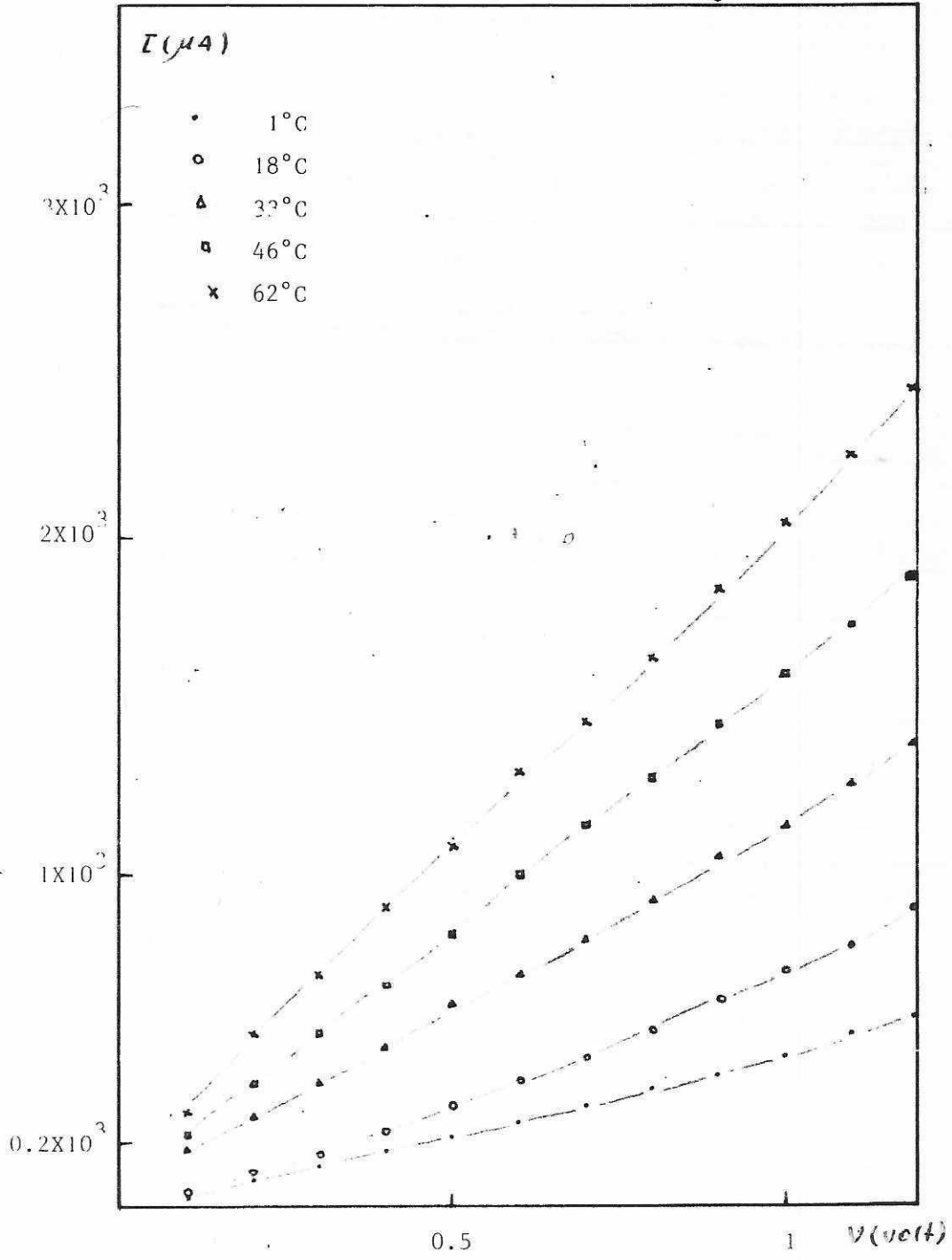
Çizelge 3.11: Ters beslemede , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 33°C	T = 46°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	44	40	180	230	390
0.2	89	110	280	380	520
0.2	135	170	380	530	700
0.4	175	240	490	670	900
0.5	220	310	610	820	1080
0.6	265	390	700	1000	1300
0.7	310	450	810	1150	1450
0.8	360	530	920	1280	1650
0.9	400	620	1050	1450	1850
1	460	710	1150	1600	2050
1.1	520	790	1270	1750	2250
1.2	570	900	1390	1900	2450

Çizelge 3.12: Ters beslemede , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik ölçümleri



Cizit 3.11: Ters beslemede , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



Çizit 3.12: Ters beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Au yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

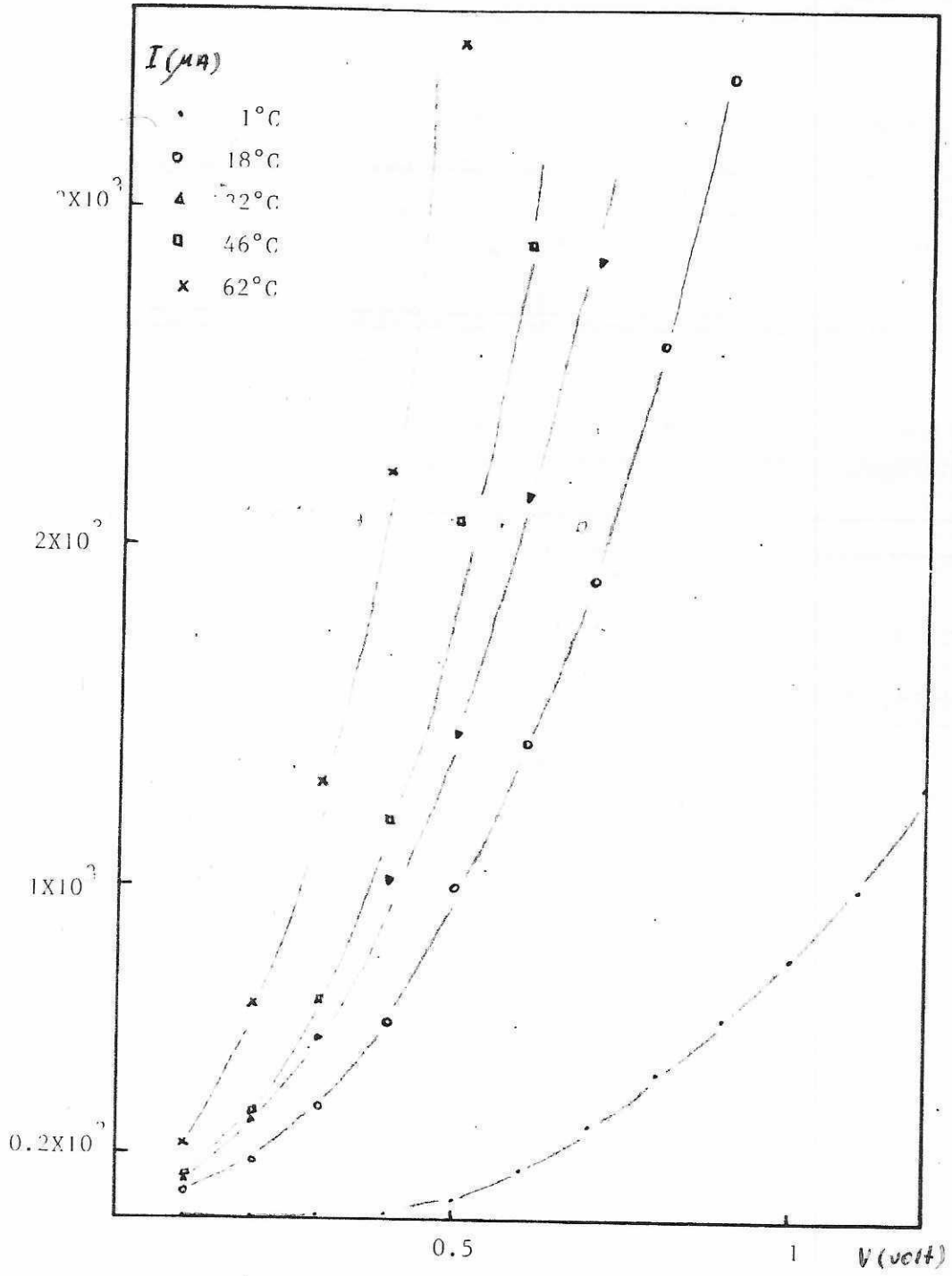
4) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık ve aydınlatma altında alınan ölçümler Çizelge 3.13 ; 3.14 ; 3.15 ; 3.16 da, bu deneysel verilerden elde edilen I - V eğrileri Çizit 3.13 ; 3.14 ; 3.15 ; 3.16 da verilmiştir.

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 46°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	2	90	120	120	230
0.2	4	180	300	320	640
0.3	8	340	540	660	1300
0.4	23	590	1020	1200	2220
0.5	74	1000	1450	2080	3500
0.6	160	1420	2150	2900	
0.7	280	1900	2850		
0.8	440	2600			
0.9	600	3400			
1	790				
1.1	1000				
1.2	1300				

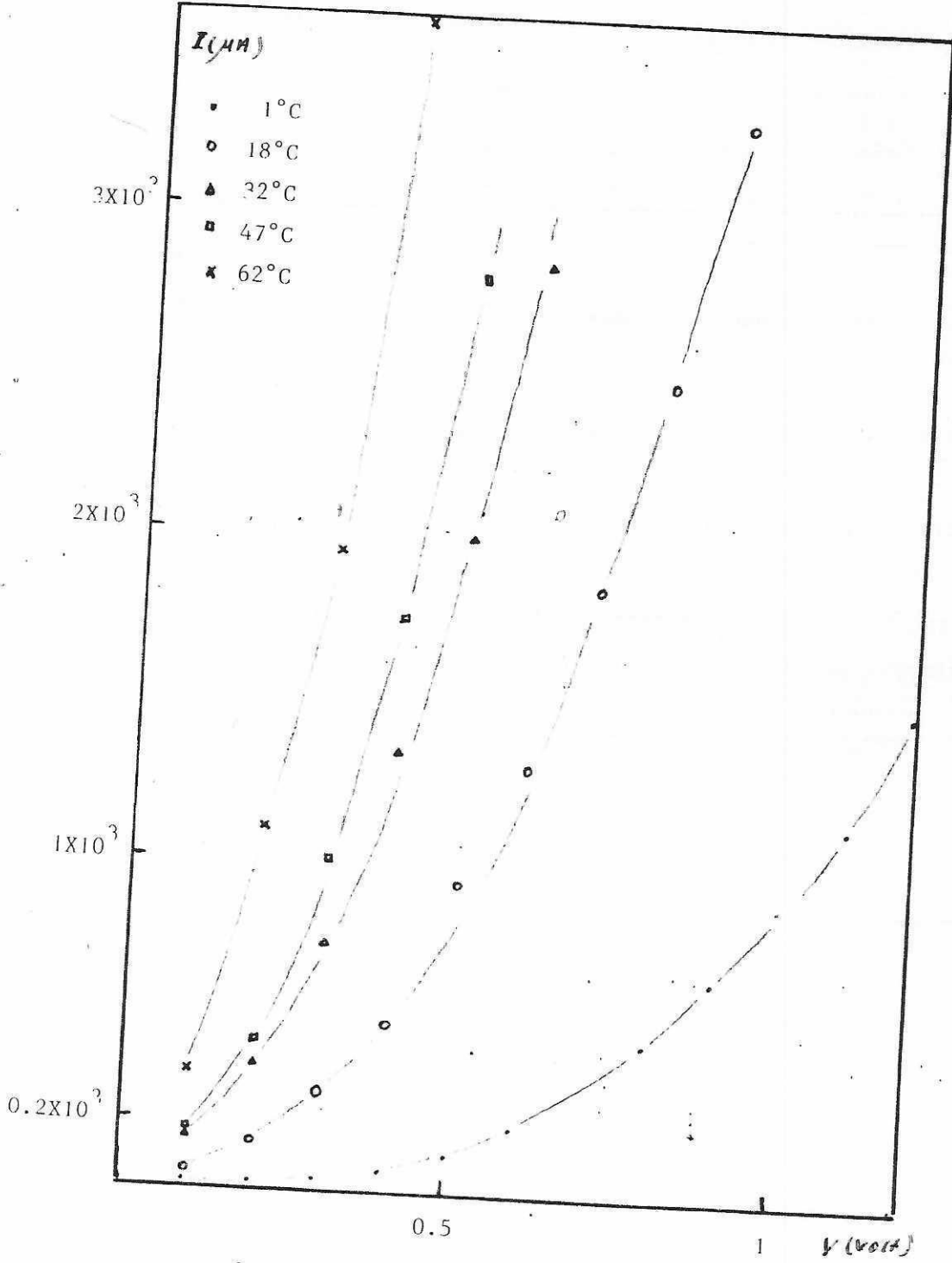
Çizelge 3.13: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Ger.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	8	50	150	170	370
0.2	17	140	380	450	1100
0.3	32	300	750	1010	1950
0.4	58	510	1350	1750	3600
0.5	115	950	2000	2800	
0.6	205	1310	2850		
0.7		1850			
0.8	470	2500			
0.9	670	3300			
1	900				
1.1	1150				
1.2	1500				

Çizelge 3.14: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik ölçümleri



Cizit 3.13: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında, karanlık iletkenlik eğrileri



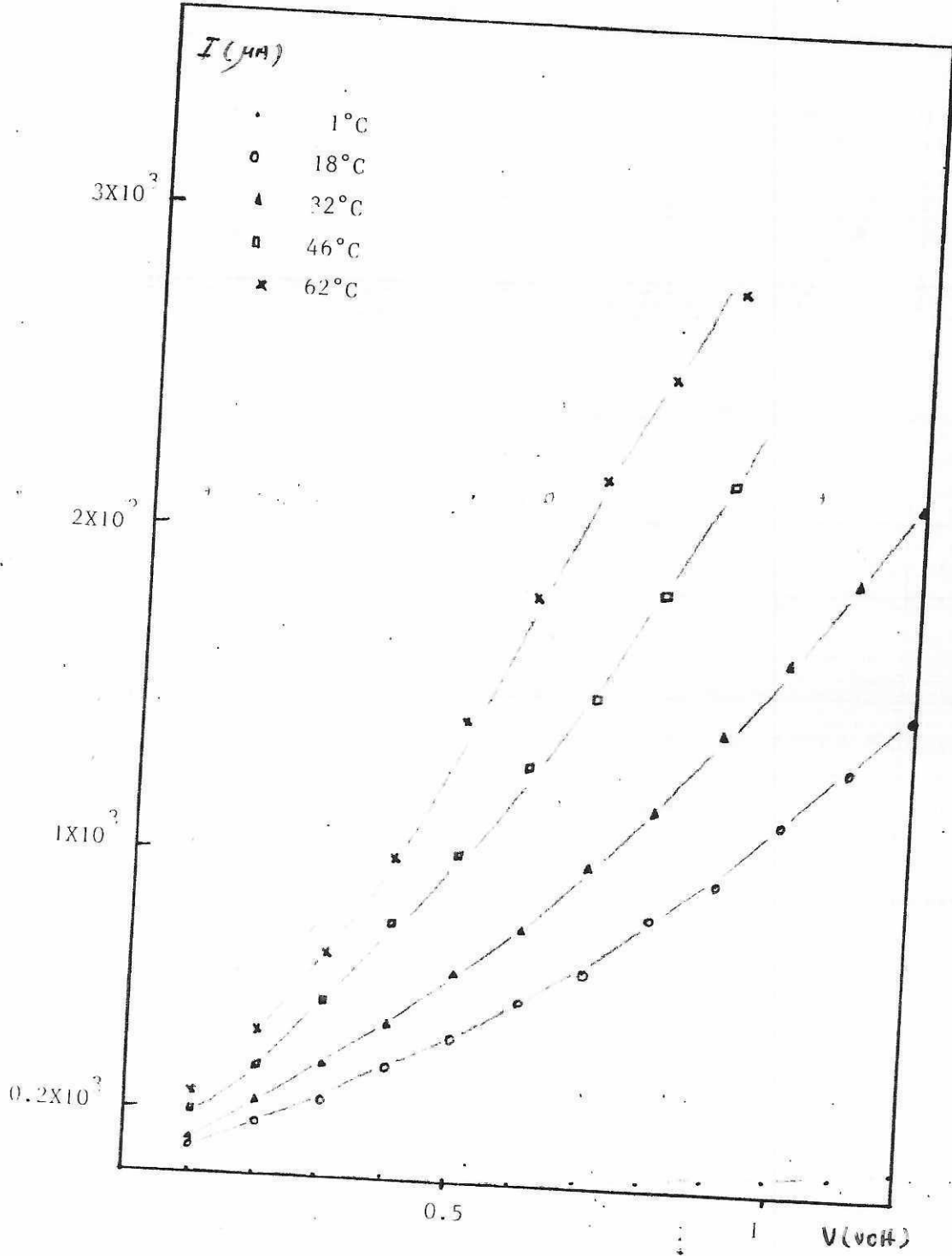
Çizit 3.14: Düz beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan  $Cu/Cu_2O/Cd$  yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

Uy.Cer.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 46°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	2	80	110	200	250
0.2	3.5	160	230	340	440
0.3	5	240	350	550	690
0.4	8	350	480	800	1000
0.5	11	440	640	1020	1420
0.6	15	560	790	1300	1820
0.7	22	660	1000	1520	2200
0.8	31	840	1180	1850	2520
0.9	40	960	1420	2200	2800
1	49	1150	1650		
1.1	64	1320	1900		
1.2	92	1500	2150		

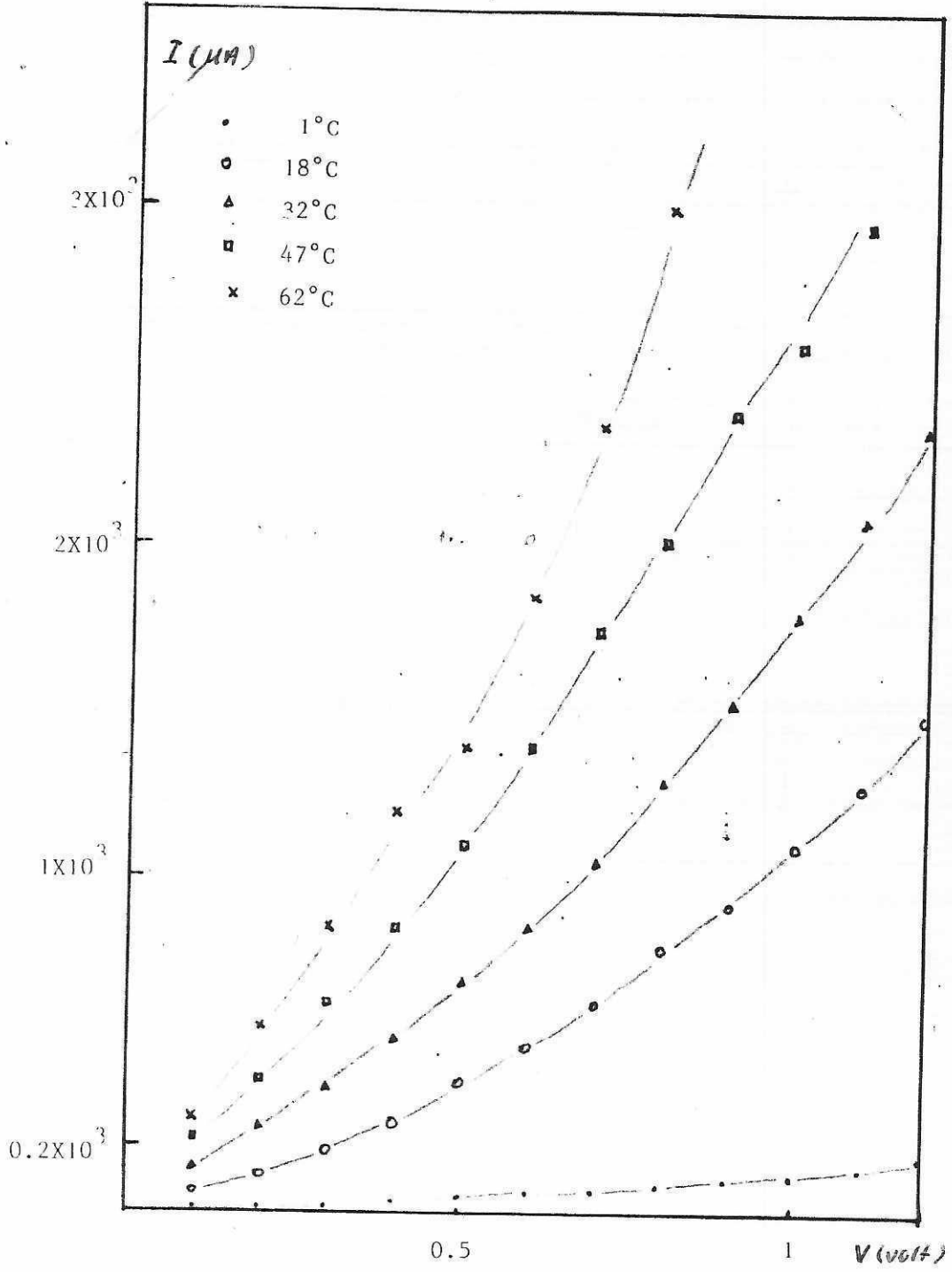
Çizelge 3.15: Ters beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik ölçümleri

Uy.Cer.	T = 1°C	T = 18°C	T = 32°C	T = 47°C	T = 62°C
V(volt)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)	I(μA)
0.1	8	60	130	220	280
0.2	16	110	250	400	550
0.3	24	180	370	620	850
0.4	37	270	510	850	1200
0.5	49	380	690	1100	1600
0.6	62	490	850	1400	2050
0.7	74	620	1050	1750	2550
0.8	85	790	1300	2020	2200
0.9	102	920	1520	2400	
1	118	1100	1800	2600	
1.1	138	1280	2080	2950	
1.2	160	1500	2350		

Çizelge 3.16: Ters beslemde , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , aydınlatma altındaki iletkenlik ölçümleri

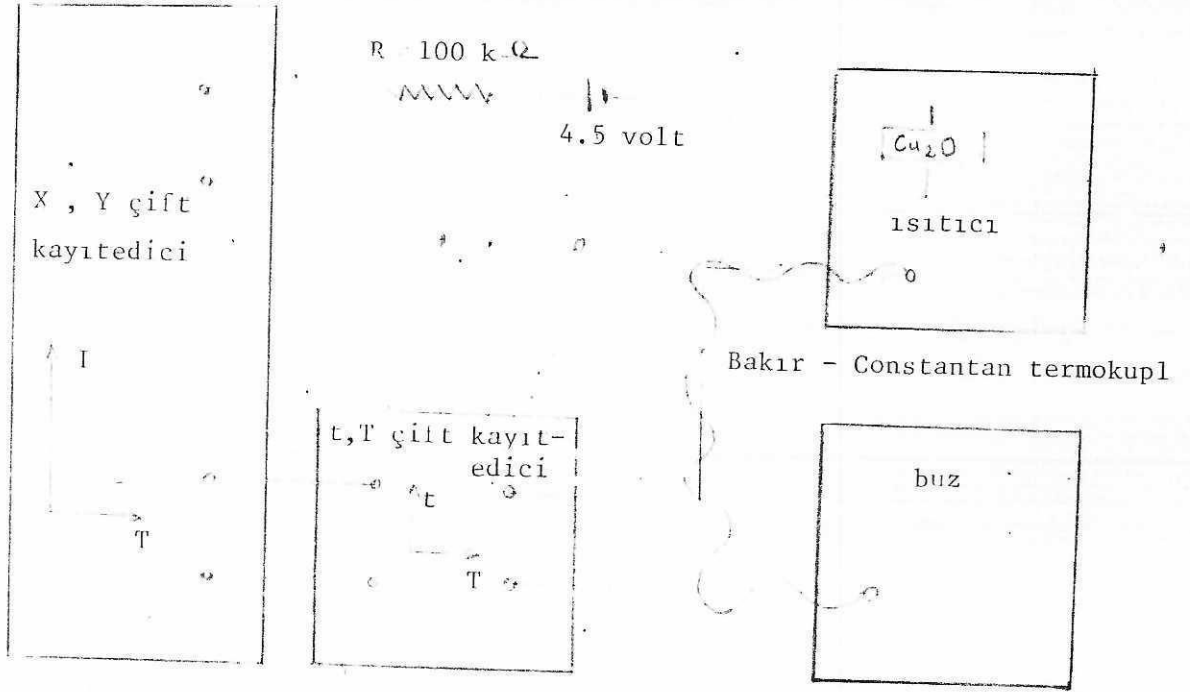


Çizit 3.15: Ters besleme , orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısında , karanlık iletkenlik eğrileri



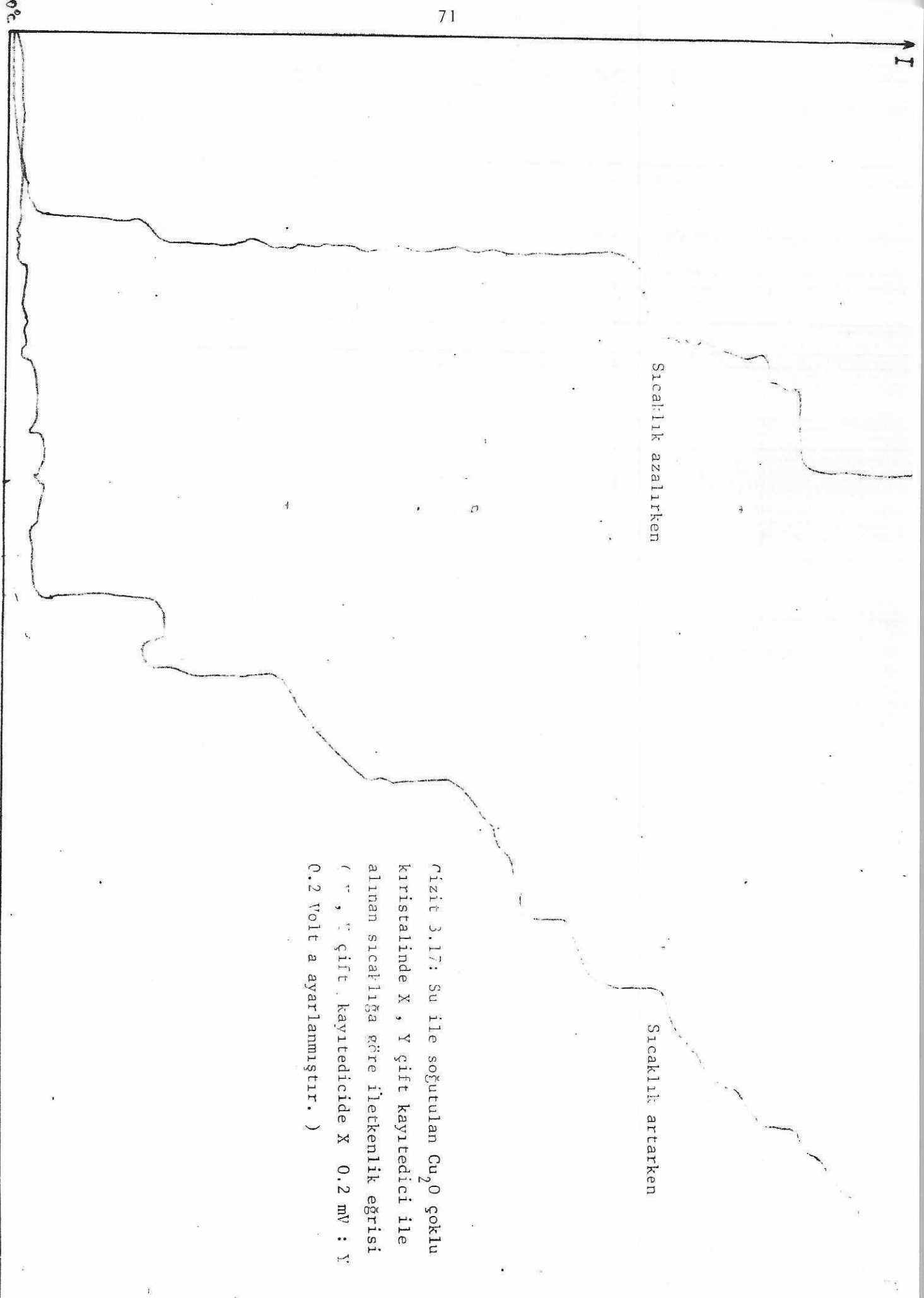
Çizit 3.16: Ters beslemede, orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan  $Cu/Cu_2O/Cd$  yapısında, aydınlatma altındaki iletkenlik eğrileri

11: Soğutma işleminde su kullanılarak hazırlanan Cu/Cu<sub>2</sub>O tabakasından çıkarılan Cu<sub>2</sub>O örneği 15 dakika zayıf aydınlatıldıktan sonra Şekil 3.2 de gösterilen devre ile tuzak seviyeleri izlenmiştir.

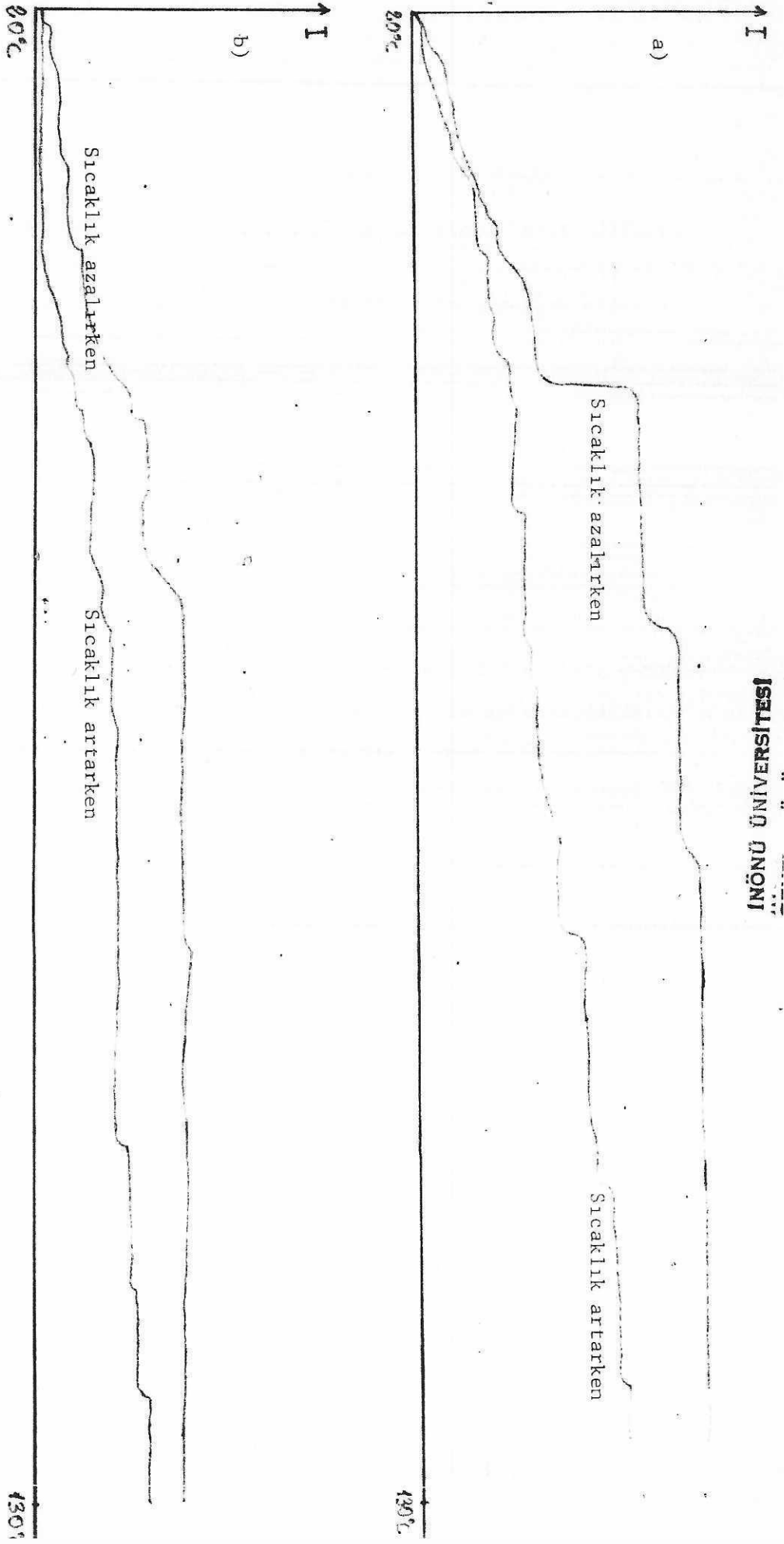


Şekil 3.2: Tuzak seviyelerinin izlenmesinde kullanılan devre

Gizit 3.17 de alınan ölçümlerde Cu<sub>2</sub>O tabakasının yüzeyi diğer alınan ölçümlerde kullanılan Cu<sub>2</sub>O yüzeyinden daha geniştir. Isıtma hızı ( $\beta_1 = 0.81^\circ\text{C}/\text{Sn}$ ) t - T çift kayıtedici ile alınmıştır. Gizit 3.18.a ve 3.18.b de Cu<sub>2</sub>O tabakalarının yüzeyi küçültülmüştür. t - T çift kayıtedici ile alınan ısıtma hızları ( $\beta_2 = \beta_3 = 0.985^\circ\text{C}/\text{Sn}$ ) dir. Cu<sub>2</sub>O tek kırystalinin 2 tuzak seviyesi olduğu bilinmektedir. Bu denevde Cu<sub>2</sub>O çoklu kırystalı kullanıldığından hangi tek kırystalin hangi sıcaklıkta nasıl bir boşalma yaptığı hakkında bir fikir edinilememiştir. Fakat tuzak seviyelerinin varlığı gözlenmiştir.



Rizit 3.17: Su ile soğutulan  $\text{Cu}_2\text{O}$  göklu kristalinde X , Y çift kayıtedici ile alınan sıcaklığa göre iletkenlik eğrisi ( " , " çift kayıtedicide X 0.2 mV : Y 0.2 Volt a ayarlanmıştır. )



Şizit 3.18: Su ile soğutulan  $Cu_2O$  göklu kırystal tabakanın yüzeyi bir önceki deneyde kullanılan tabakadan daha küçük alınarak X, Y kayıtedici ile kayıtedilen sıcaklığa göre iletkenlik efrileri ( X 0.2 mV : Y 0.2 Volt ayarlıdır.)

### 3.4: DEĞERLENDİRME VE SONUC

Bu çalışmada ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  örnekleri 1) su ile , 2) orthofosforik asit çözeltisi ile ani soğutma yapılmıştır. İki ayrı ortamda soğutulan  $\text{Cu}_2\text{O}$  örneklerin ikisinde elektrod olarak Au ve Cd metalleri kullanılmıştır. Bu koşullar altında

- 1) Su ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$  yapısı
- 2) Su ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$  yapısı
- 3) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$  yapısı
- 4) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$  yapısı

olmak üzere 4 ayrı yapıda  $\text{Cu}_2\text{O}$  nun fotoiletkenlik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

#### 3.4.1: Değerlendirme

1) Su ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$  yapısı: Yarıiletkenlik özelliğinin çok az olduğu görülmüştür. Düz beslemde , karanlık iletkenliği ile aydınlatma altındaki iletkenliği arasında çok az bir farklılık vardır.  $T = 18^\circ\text{C}$  de çok azda olsa bir düşme görülmüştür. Ters beslemde , karanlık iletkenliği ile aydınlatma altındaki iletkenliği arasında değişme vardır. Bu değişme düz beslemde olan değişmeden daha fazladır.  $T = 18^\circ\text{C}$  de aydınlatma ile meydana gelen fazla iletkenlikte düşme görülmüştür. Bu düşme düz beslemde olan düşmeden daha belirgindir. Çizit 3.1 ; 3.2 ; 3.3 ; 3.4

2) Su ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}$  yapısı: Yarıiletkenlik özelliğinin çok az olduğu görülmüştür. Düz beslemde , karanlık iletkenliği ile aydınlatma altındaki iletkenliği arasında değişme vardır. Bu değişme sıcaklık arttıkça fazla-laşmaktadır. Ters beslemde , aydınlatma altındaki iletkenlik ile karanlık iletkenlik arasında değişme vardır. Ancak düz beslemdekinin tersine burada fazla iletkenlikteki değişme sıcaklık arttıkça azalmaktadır.  $T = 18^\circ\text{C}$  de hem düz hem ters beslemde fazla iletkenlikte bir düşme vardır. Çizit 3.5 ; 3.6 ; 3.7 ; 3.8

3) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$  yapısı: Yarıiletkenlik özelliğinin düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu , yüksek sıcaklıklarda bu özelliğinin yavaş yavaş kaybolmaya başladığı gözlenmiştir. Hem düz hem ters beslemde karanlık iletkenliğin sıcaklığın artmasıyla büyük bir hızla arttığı ve bu etkinin aydınlatma altında böyle olmadığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda  $T = 18^\circ\text{C}$  dışında , fotoiletkenlikte artma , yüksek sıcaklıklarda ise düşme vardır.  $T = 18^\circ\text{C}$  de her iki beslemde fazla iletkenlikte düşme görülmüştür. Çizit 3.9 ; 3.10 ; 3.11 ; 3.12

4) Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan Cu/Cu<sub>2</sub>O/Cd yapısı: Yarıiletkenlik özelliği diğer örneklerinkine göre daha fazladır. Düz beslemde , karanlık iletkenliği ile aydınlatma altındaki iletkenliği arasında değişme vardır. Aydınlatma ile oluşan fazla iletkenliğin düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Diğer sıcaklıklarda ise fazla iletkenlikteki artışın daha düşük olduğu görülmüştür. Ters beslemde, karanlık iletkenliği ile aydınlatma ile meydana gelen fazla iletkenlik arasında sıcaklık arttıkça fazlalaşan bir artma gözlenmiştir. Her iki beslemede  $T = 18^{\circ}\text{C}$  de fazla iletkenlikte bir düşme görülmüştür. Çizit 3.13 ; 3.14 ; 3.15 ; 3.16.

### 3.4.2: Sonuç

İncelenen örneklerde genel olarak , uygulanan gerilime göre akımdaki değişme üsteldir. Bu durum , orthofosforik asit ile soğutulan örneklerde daha belirgindir. Su ile soğutulan örneklerin , düşük sıcaklıklardaki davranışı çizgisele yarıkindir. Sıcaklık arttırıldıkça uygulanan gerilime göre , akımdaki değişimin üstel hale geldiği görülmüştür. Bu gözlemden İncelenen örneklerin 4'ünde p - Tipi yarıiletken olduğu ortaya çıkmaktadır. Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan örnekler diğer örneklerle göre kuvvetli p - Tipi yarıiletkenlik özelliği gösterirler. Elektrod olarak kullanılan Au ve Cd metallere , Au elektrodlu örneklerin iletkenliğinin arttırılmasında daha iyi netice verdiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak her örneğin ışığa karşı duyarlı olduğu görülmüştür. Örneklerin  $T = 18^{\circ}\text{C}$  civarında fazla iletkenlik eğrilerinde bir düşüşün olması bu sıcaklıklarda tuzak seviyelerinin boşaldığını gösterir. Orthofosforik asit çözeltisi ile soğutulan örneklerin , su ile soğutulan örneklerinkine göre iletkenliğinde büyük bir artış gözlenmiştir. Böylelikle soğutma işleminin yarıiletkenlerde önemli olduğu görülmektedir.

Su ile soğutulan Cu<sub>2</sub>O tabakalarıyla , 15 dakika kadar aydınlatmak suretiyle X - Y kayıtedicide , sıcaklıkla akımdaki değişme için alınan sonuçlar Çizit 3.17 ve Çizit 3.18 de verilmiştir. Alınan 3 sonuç içinde Cu<sub>2</sub>O da tuzaklar gözlenmiştir. Çizit 3.17 de Cu<sub>2</sub>O tabakası geniş alınmış ve ısıtma hızı daha küçük tutulmuştur. Çizit 3.18.a ; 3.18.b de Cu<sub>2</sub>O tabakasının yüzeyi küçültülmüştür. Heriki çizit içinde ısıtma hızı aynı alınmıştır. Çizit 3.18.a ; 3.18.b de açıklıkla iletkenlik davranışının aynı olduğu görülmektedir. Bu ise bize iletkenlik-

teki düşme ve artmalarda tuzakların dolup tekrar boşaldığını gösterir. Böylece su ile soğutulan  $\text{Cu}_2\text{O}$  da tuzakların varlığını söyleyebiliriz. Ancak burada çoklu kırılma incelendiğinden tuzakların seviyeleri hakkında bir fikir vermek çok zordur. Bundan ötürü sadece ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  da tuzak seviyelerinin varlığı deneysel olarak gözlenmiştir. Bu ise , incelenen örneklerin  $\text{Cu} - \text{O}_2$  sisteminde ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  alanının  $\text{Cu}$  faz sınırının dışındaki bölgelerde olduğunu gösterir.

## KAYNAKLAR

- 1 - Semiconductors and Phosphors , 98 - 112 , (1956)  
( Friedr , vieveg & sohn. Braunschweig )
- 2 - Michael O'Keefe and Walter J. Moore , Journal of Chemical Physics , v. 36,  
n. 11 , p. 3009 , ( 1962 )
- 3 - Richard S. Zucker , Journal of the Electrochemical Society , v. 112 , n. 4  
, p. 417 , ( 1965 )
- 4 - Jerome D. Schick and Dan Trivich , Journal of the Electrochemical Society ,  
v. 9 , p. 376 , ( 1972 )
- 5 - G. R. Pollack, Dan Trivich , Journal Apply Physics , v.46 , n. 1 , p. 163 ,  
( 1975 )
- 6 - F. I. Kreingold, B. S. Kulinkin and V. V. Krivolapchuk , Sov. Phys. Semicond.  
, v. 11 , n. 5 , p. 492 , ( 1977 )
- 7 - B. A. Tazekov and V. P. Merzlyakov , Sov. Phys. Semicond. , v. 7 , n. 5 ,  
p. 647 , ( 1972 )
- 8 - S. P. Gaplevskaya, I. I. Ezhik and A. L. Rvachev , Sov. Phys. Semicond. ,  
v.8 , n. 8 , p. 1041 , ( 1975 )
- 9 - Jin Mizuguouh , Japan J. Appl. Phys. , v. 15 , n. 5 , p. 907 , ( 1976 )
- 10 - C. Noguét, M. Tapiéro, C. Schwab, J. P. Zielinger ,  
Laboratoire de Spectroscopie et d'Optique du Corps Solide Associé au  
C. N. R. S. n° 232 Université Louis Pasteur 5, rue de l'Université 67000  
STRASBOURG ( France )  
D. Trivich, R. J. Komp, E. Y. Wang, K. Weng ,  
Wayne State University DETROIT, Michigan, USA  
Cuprous Oxide as a Photovoltaic Converter , p. 1170
- 11 - C. R. C. Handbook of Chemistry and Physics , B. 109 , 50. Edition
- 12 - Encyclopædia of Chemical Kirk - Otmer Technology , v. 4 , p. 472
- 13 - Wan der Ziel , Solid State Physical Electronics
- 14 - Mc Kelvey , Solid State and Semiconductor Physics
- 15 - By S. M. Sze , Physics of Semiconductor Devices .
- 16 - Z. G. Pinsker and R. M. Imamov , Soviet Physics - Crystallography , v. 9 ,  
n. 3 , p. 334 , ( 1964 )