

**GÜNEŞ PİLLERİNDE ARAYÜZEY DURUMLARININ C-V  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ**

85920

**Ercan YILDIZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK**

85920

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEL. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMAN ENSTİTÜSÜ MERKEZİ**

**AĞUSTOS 1999**

**ANKARA**

Ercan YILDIZ tarafından hazırlanan GÜNEŞ PİLLERİNDE ARAYÜZEY DURUMLARININ C-V KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

  
Yrd. Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, Jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Bahtiyar Salamov   
Üye : Yrd. Doç. Dr. Şemsettin Altındal   
Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin Özer   
Üye : .....  
Üye : .....

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                              | i     |
| ABSTRACT .....                                                          | ii    |
| TEŞEKKÜR .....                                                          | iii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                              | iv    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                                | v     |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                           | vii   |
| <br>                                                                    |       |
| 1. GİRİŞ .....                                                          | 1     |
| <br>                                                                    |       |
| 2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MYY) GÜNEŞ PİLLERİNİN<br>TEORİSİ.....    | 3     |
| 2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) Güneş Pillerinin Özellikleri..... | 4     |
| 2.2. Metal-Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitesi.....        | 13    |
| 2.3. Kapasitans Metodu.....                                             | 17    |
| 2.4. Kondüktans Metodu.....                                             | 19    |
| <br>                                                                    |       |
| 3. DENEYSEL YÖNTEM .....                                                | 21    |
| 3.1. Kristal Temizleme.....                                             | 21    |
| 3.2. Oksit Büyütme.....                                                 | 21    |
| 3.3. Al-SiO <sub>2</sub> -pSi(MYY) Tipi Güneş Pillerinin Yapımı.....    | 22    |
| <br>                                                                    |       |
| 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....                                     | 25    |
| 4.1. Kapasitans Voltaj Karakteristikleri.....                           | 25    |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 4.2. Tartışma..... | 41 |
| KAYNAKLAR.....     | 45 |
| ÖZGEÇMİŞ.....      | 47 |



**GÜNEŞ PİLLERİNDE ARAYÜZEY DURUMLARININ C-V  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ercan YILDIZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
AĞUSTOS 1999**

**ÖZET**

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) güneş pillerinde arayüzey durumlarının ve seri direncin etkisi detaylı olarak çalışıldı. Numunelerde oksit tabakası termal olarak büyütüldü. Al-SiO<sub>2</sub>-pSi Metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) güneş pillerinin kapasitans-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj(G-V) karakteristikleri 20 kHz - 1 MHz frekans aralığında ölçüldü. MIS tipi güneş pilleri ideal olmayan kapasitans-voltaj(C-V) karakteristikleri gösterdi. Sonuç olarak seri direncin frekansa bağlı olarak değiştiği ve artan frekansla azaldığı gözlemlendi. İdeal olmayan bu davranışlar MYY güneş pilindeki yüksek arayüzey durumlarının büyüklük ve dağılımına atfedildi.

Bilim kodu : 404.05.01  
Anahtar kelimeler :Metal-yalıtkan-yarıiletken, ideal olmayan davranışlar, seri direnç, Schottky engeli  
Sayfa adedi : 55  
Tez yöneticisi : Yrd.Doç.Dr. Şemsettin ALTINDAL

**INTERFACE STATES EFFECT ON THE  
CAPACITANCE – VOLTAGE CHARACTERISTICS  
(M.Sc. Thesis)**

**Ercan YILDIZ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
AUGUST 1999**

**ABSTRACT**

A detailed study of the effect of interface states and series resistance in metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells has been done. The thicknesses of the samples are grown about 30Å thermally. Capacitance - voltage (C-V), and conductance-voltage (G-V) characteristics of Al-SiO<sub>2</sub>-pSi metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells were made in the frequency range between 20 kHz and 1MHz at room temperature. The MIS type solar cells showed non-ideal behaviours with C-V characteristics. Consequently, series resistance was strongly frequency dependent and changed decrease with the increases of frequency. This non-ideal behaviour was attributed to an order of magnitude higher density of interface state density in the MIS solar cells.

Science code : 404.05.01

Key Words : metal-insulator-semiconductor, non-ideal behaviours, series resistance , Schottky barrier

Page Number :55

Adviser : Assist Prof. Şemsettin ALTINDAL

---

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yol gösteren çok büyük yardımlarını gördüğüm değerli hocam Yard. Doç.Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım. Yüksek Lisans çalışması yaptığım Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne ve ders aşamasında yardımcı olan Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü idarecilerine ve hocalarıma teşekkür ederim.

Yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Yusuf Ağuş'a ve Araş. Gör. Adem Tataroğlu'na teşekkür ederim.

Bana maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ****Sayfa**

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge. 4.1. GP2 Güneş Pili için bulunan $V_o$ , $V_d$ , $N_a$ , $C_2$ , $D_{it}$ , $\Phi_B$ , $\Phi_f$<br>değerleri..... | 35 |
| Çizelge. 4.2. GP1 Güneş Pili için bulunan $V_o$ , $V_d$ , $N_a$ , $C_2$ , $D_{it}$ , $\Phi_B$ , $\Phi_f$<br>değerleri..... | 43 |





## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

|                                                                                                                 | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Dengedeki MYY Güneş Piline ait band diyagramı .....                                                  | 3     |
| Şekil 2.2. Termal Olarak oksitlenmiş silikonda oluşan arayüzey durumları...                                     | 7     |
| Şekil 2.3. MYY yapılarda arayüzey durumlarına karşılık gelen eşdeğer devre.....                                 | 8     |
| Şekil 2.4. Arayüzey tuzakların etkisini içeren eşdeğer devre.....                                               | 9     |
| Şekil 2.5. $C_{ox}$ ve $C_d$ etkisini içeren eşdeğer devre.....                                                 | 9     |
| Şekil 2.6. MYY yapının eşdeğer devresi.....                                                                     | 12    |
| Şekil 2.7. Arayüzey durumları ihtiva eden MYY devresi.....                                                      | 13    |
| Şekil 2.8. Kapasitans ve Kondüktans ölçümleri.....                                                              | 19    |
| Şekil 3.1. Oksit büyütmede kullanılan fırın sistemi.....                                                        | 22    |
| Şekil 3.2. Yarı geçirgen Alüminyum tabakanın ve ön kontaktların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler..... | 24    |
| Şekil 3.3. MYY tipi Güneş Pilinin kesiti .....                                                                  | 24    |
| Şekil 4.1. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen C-V eğrileri.....                                   | 27    |
| Şekil 4.2. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen $1/C^2$ -V eğrileri .....                           | 28    |
| Şekil 4.3. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen $C-(V_0-V)^{0,5}$ eğrileri.....                     | 29    |
| Şekil 4.4. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen G/w-V eğrileri....                                  | 30    |
| Şekil 4.5 GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen $R_s$ -V eğrileri.....                               | 31    |
| Şekil 4.6. GP2 Güneş Pili için 1MHz için çizilen $C_c$ -V eğrisi.....                                           | 32    |
| Şekil 4.7. GP2 Güneş Pili için çizilen $R_s$ -Ln f grafiği.....                                                 | 33    |
| Şekil 4.8. GP1 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen C-V eğrileri .....                                  | 37    |
| Şekil 4.9. GP1 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen G/w- V eğrileri.....                                | 38    |
| Şekil 4.10. GP1 Güneş Pilinin farklı frekanslar için çizilen $1/C^2$ -V eğrileri.....                           | 39    |

**Şekil 4.11. GP1 Güneş Pili'nin farklı frekanslar için çizilen  $R_s$ -V eğrileri.....40**

**Şekil 4.12. GP1 Güneş Pili'nin farklı frekanslar için çizilen  $R_s$ -Ln*f*.....41**



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklamalar</b>                 |
|-----------------|------------------------------------|
| $R_s$           | Seri direnç                        |
| $\Phi_{Bn}$     | Engel Yüksekliği                   |
| $n$             | İdealite faktörü                   |
| $N_{ss}$        | Arayüzey durum yoğunluğu           |
| $E_c$           | İletkenlik bandı enerjisi          |
| $E_v$           | Valans bandı enerjisi              |
| $I$             | Akım                               |
| $C$             | Kapasitans                         |
| $G$             | Kondüktans                         |
| $V$             | Uygulanan gerilim                  |
| $V_d$           | Difüzyon potansiyeli               |
| $V_D$           | Diyod üzerine düşen gerilim        |
| $\Phi_m$        | Metalin iş fonksiyonu              |
| $\Phi_s$        | Yarıiletkenin iş fonksiyonu        |
| $\chi_s$        | Yarıiletkenin elektron yakınlığı   |
| $E_f$           | Fermi enerjisi                     |
| $N_d$           | Verici (donor) atomların yoğunluğu |

|              |                                      |
|--------------|--------------------------------------|
| $N_a$        | Alıcı (akseptör) atomların yoğunluğu |
| $k$          | Boltzman sabiti                      |
| $T$          | Kelvin cinsinden sıcaklık            |
| F.S.         | Fermi seviyesi                       |
| $V_R$        | Seri direnç üzerine düşen potansiyel |
| $\phi_c$     | Etkin engel yüksekliği               |
| $\rho$       | Uzay yük yoğunluğu                   |
| $\epsilon_o$ | Ortamın dielektrik sabiti            |
| $\epsilon_s$ | Yarıiletkenin dielektrik sabiti      |
| $d$          | Yarıiletkenin arınma bölge genişliği |

## 1.GİRİŞ

Son yıllarda metal- yalıtkan- yarıiletken (MYY) güneş pilleri oldukça dikkat çekmeye başladı. Bütün n-tipi, p-tipi silikon güneş pilleri metal ile yarıiletken arasında ince bir yalıtkan tabaka oluşturulur.

MYY tünel diyotların kapasitans özellikleri geleneksel MYY diyotlardan farklı olduğu sezilebilir. Green MIS tünel diyotları dengede ve dengede olmayan aygıtlar olarak sınıflandırırken geniş tünel akımının, yarıiletken bölgesi düzenini bozması için termal dengedeki yalıtkanın yeterli incelikte olduğunu kabul etti. Dengede olmayan aygıtlar derin azalma modunda ( $V'$ 'ye karşı  $linear 1/C^2$ ) ve frekansa bağımlı piki (eğer akımın baskın elemanları azınlık taşıyıcıları ise) C-V karakteristiğinde meydana gelir. Green MYY tünel diyotlar teorisinde yalıtkan tabaka ince ise yarıiletken elektron quasi Fermi seviyesinin sabit olduğunu gösterdi. Bu model oksitin bulunması durumunda basit bir sınırlama olarak MYY'i p-n kontağı gibi ele alır. Gerçekçi bir model, oksitteki yük geçişinin değişik mekanizmalarına önem vererek Card ve Rhoderick tarafından n-Si alt tabakası için yapılmıştır.

Diğer taraftan MYY tünel diyotun eşdeğer devresinin bildiğimiz kadarıyla birkaç elemente sahip olduğu bildirilmemiştir. Bu tip eşdeğer devre modeli fiziksel olay olan kontrollü empedans daha iyi öğrenmemizi kolaylaştırır. En ilginç kapasitans özelliği dengede olmayan azınlık taşıyıcılı tünel diyotta meydana gelmektedir. Metal temasında güçlü azınlık taşıyıcı boşaltımı C-V karakteristiğinde büyük kapasitans piki oluşturur.

Bu çalışmada metal- yalıtkan-yarıiletken (MYY) güneş pillerinde arayüzey durumlarının C-V ve G-V karakteristiklerine etkisi detaylı olarak araştırıldı.

Oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında elde edilen C-V ve G-V eğrilerinden faydalanılarak arayüzey durum yoğunluklarının yasak enerji aralığındaki dağılım profili elde edildi. Hem yüksek frekans (1MHz) hem de daha küçük frekanslardaki (10kHz- 700kHz) C-V ve G-V eğrilerindeki kuvvetli yığılma (strong accumulation) bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak seri direncin frekansa bağlı değişim grafiği elde edildi. Ayrıca aynı eğrilerin farklı voltaj değerlerinden faydalanılarak seri direnç voltaja bağlı olarak elde edildi. Özellikle arayüzey durumlarının etkin olduğu gerilim bölgelerinde seri dirençte ani artışların olduğu ve bir pikten geçtiği ve bu pikin artan frekansla azaldığı gözlemlendi. Bu durum düşük frekans C-V ve G-V eğrilerinin arayüzey durumlarını daha iyi takip edebilmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu tez dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, MYY yapılarla ilgili tarihsel gelişim ile çalışmanın amacı ve kapsamını içermektedir. İkinci bölüm, MYY yapıların teorisini içermektedir. Üçüncü bölüm, numune hazırlama tekniği, deneysel sistem ve kullanılan araç ve gereçleri içermektedir. Dördüncü bölüm ise, elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili grafikleri; tablolarının yorumunu ve sonuç-tartışmayı içermektedir.

## 2. METAL -YALITKAN-YARIİLETKEN (MYY) GÜNEŞ PİLLERİNİN TEORİSİ

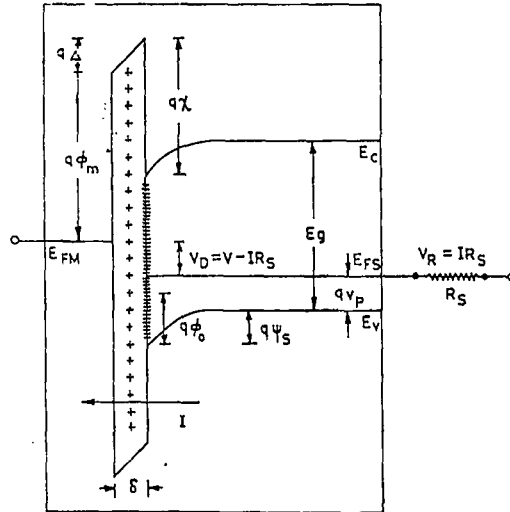
Dengedeki MYY(p-Si) güneş piline ait (sıfır-beslem durumunda) bant diyagramı Şekil 2.1. de gösterilmiştir. Dengede, metal ve yarıiletken arasındaki toplam potansiyel farkı  $V_b$ , yarıiletken üzerine düşen potansiyel  $V_d$  ve oksit üzerine düşen potansiyel  $V_i$  olmak üzere (2.1) ile verilir.

$$V_b = V_d + V_i \quad (2.1)$$

Uygulanan dış potansiyel  $V$  ise (2.3) ile verilir.

$$V = \Delta V_i + \Delta V_d \quad (2.2)$$

Burada  $\Delta V_i$   $V_i$ 'deki değişim,  $\Delta V_d$  ise  $V_d$ 'deki değişimdir. Yalıtkan-yarıiletken arasına düşen fotonlar, elektron ve deşik çiftleri meydana getirir. Elektron-deşik çiftleri metalden yarıiletkene akan elektron akımı ile nötralize edilir. Eğer yeniden birleşim ihmal edilirse deşik akımı yarıiletkenden metale doğru olur.



Şekil 2.1. Dengedeki MYY(p-Si) güneş piline ait (sıfır-beslem durumunda) bant diyagramı

Elektronlar ve boşluklar aşağıdaki yollarla iletilir[1]:

- 1) Yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların engel üzerinden karşıya geçmeleri.
- 2) Engel içerisinde direk kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla geçmeleri.
- 3) Arayüzey durumları vasıtasıyla: Metal-yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine dağılmış ve yoğunluğu  $D_s$  enerjisi  $E_s$  olan arayüzey durumlarını tartışmamız gerekir.  $E_s$  enerjisine karşılık gelen arayüzey durumlarının yoğunluklarını ( $D_s$ ) bulmak için bazı varsayımlar şunlardır:

- 1) Arayüzey durumları bağımsız durumlardır. Yani kendi aralarında bir yük geçişi yoktur.
- 2) Yüzey durumlarının yoğunluğunun oksit kalınlığına bağlı olduğu hakkında yeteri kadar bir kanıt yoktur. Bu nedenle yüzey durumlarının oksit kalınlığına bağlı olmadığı söylenebilir.
- 3) Fermi seviyesinin üstündeki arayüzeyler verici ve altındakiler alıcı tip olarak alınır.

## 2.1 Metal- Yalıtkan- Yarıiletken(MYY) Güneş Pillerinin Özellikleri

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapısında yalıtkan, metali yarıiletkenden yalıtmak amacıyla kullanılır. Genellikle yarıiletken olarak silikon, yalıtkan olarak silikon dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve metal olarak da doğrultucu kontak temin edilmesi için altın veya alüminyum kullanılır. Oksit tabakası büyütme için çok çeşitli yöntemler vardır fakat bunlardan en çok kullanılan silikon üzerine termal olarak kuru  $\text{O}_2$  büyütülmesidir.



$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$  kimyasal reaksiyonu sonucu büyütülen  $\delta$  kalınlığındaki oksit tabakasının 0.45 $\delta$  kadar silikon yüzeyinden içeri, kalanı da dışarı doğru büyür [2]. Arayüzey oksit tabakasının tam ve doğru fonksiyonu şimdilik tam olarak bilinmiyor. Bununla beraber  $\text{SiO}_2$  bir çok yüzey tesirini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilebilmesini sağlar[2]. Pratikte bir MYY yapı için arayüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı ideal MYY karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Bir MYY yapının hazırlanışı sırasında silikon yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulunduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Tamm ve Shockley tarafından ileri sürülen bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [2].

Yüzey durumlarının yoğunluğu için teorik tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  civarında fakat deneysel sonuçlar bunun daha küçük olduğunu göstermektedir [2].

Şekil 2.2 termal olarak oksitlenmiş silikonda arayüzey durumlarını göstermektedir. Burada oksit yükleri MYY kapasitesini etkilemez, fakat tuzaklanmış arayüzey yükleri (hızlı yüzey durumları), yasak band aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede yarıiletkendeki  $E_c$  veya  $E_v$  bandı ile ani yük alışverişi yapabildiklerinden MYY yapıları etkilerler.

**1- Tuzaklanmış arayüzey yükleri:** Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde, silikonun yasak band aralığında ki enerji durumuna sahip ve kısa bir sürede silikondaki iletkenlik veya valans bandı ile yük alışverişi yapabilirler. Bundan dolayı bu yüzey durumlarına, yüzey rekombinasyon merkezleri de denir.

**2-İyonlaşmış Tuzaklar:** Kimyasal yapı bozukluklarından kaynaklanan bu tuzaklar oksit içinde bulunurlar. Yarıiletken yüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylelikle oksit ve oksit yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz duruma geçerler. İyonlaşmış tuzaklar C-V eğrisine etki ederler.

**3-Hareketli İyonlar:** Oksit yükünün başka bir tipi, hareketli yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler, ya metal-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde lokalize olmuşlardır, yada Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyine lokalize olmuşlardır. Böyle iyonlar nisbeten düşük sıcaklıklarda SiO<sub>2</sub> 'de hareketli olduklarından dolayı sürüklenme olabilir.

Hareketli iyonlar; kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitlenme fırını, kuvarz tutucuların kirli olması ve oksitlenme gazlarında bulunan safsızlıklar gibi sebeplerden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler elektrik alan altında hareketli olduklarından ideal yapının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

**4- Sabit Oksit ve Arayüzey Yükleri:** Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına, silikonun yüküne bağlıdır. Sabit oksit yükleri, oksit yükünün yoğunluğu, silikondaki kirlilik konsantrasyonu, silikonun tipiyle veya oksit kalınlığıyla çokca etkilenmezler. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir.

Arayüzey durumları, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Bu yüzey durumlarını dört kısma ayırabiliriz:

a) Metal ile kontakten önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde

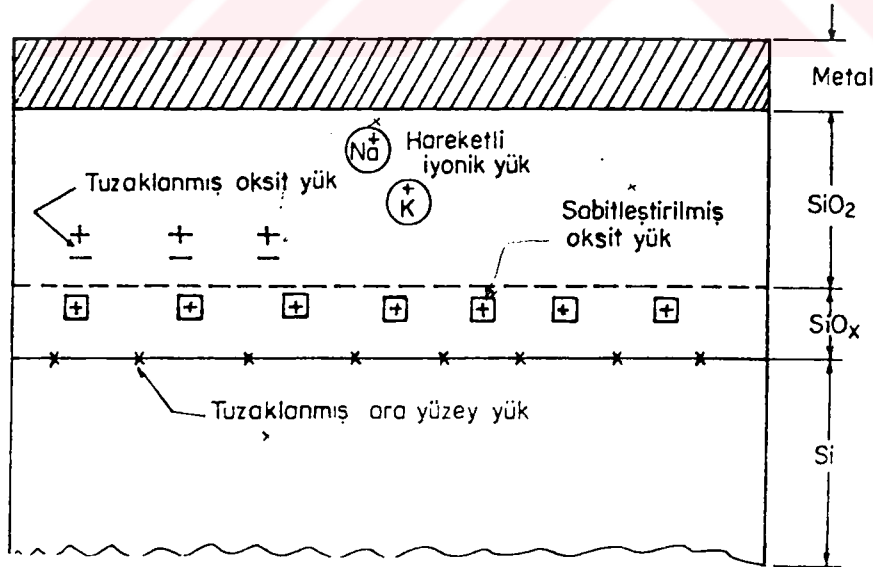
mevcut olan asal yüzey durumları. Bunlar genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde kesilmesinden ortaya çıkarlar.

b) Metal ile kontakta sonra ortaya çıkan yüzey durumları. Bunlar yarıiletkenin yüzeyinde yığılmış olan yabancı atomların varlığından veya metalin yeteri kadar temiz olmayışından dolayı oluşan yüzey durumlarıdır.

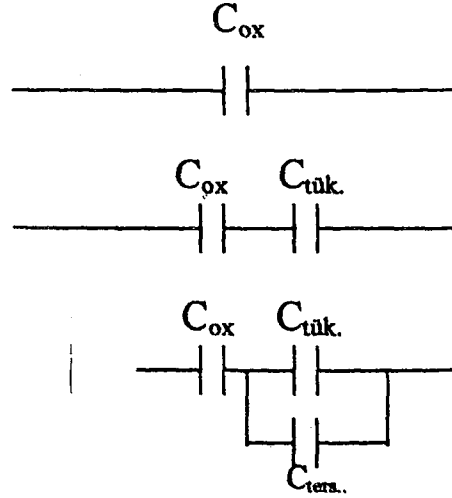
c) Hem yarıiletken yüzeyinde ve hemde yarıiletkenin gövdesinde bulunan kusurlar ve kirlilerden ortaya çıkan yüzey durumları.

d) Arayüzey kimyasal reaksiyonlarından ortaya çıkan arayüzey durumları veya metalle uyarılan yüzey durumları.

Temiz yüzeylerde ve yüksek vakum altındaki ölçümler, yüzey atomlarının yoğunluğunun mertebesini çok yüksek yapar ( $10^{15}$  atom  $\text{cm}^{-2}$ ). Arayüzey tuzak bir verici olarak düşünülürse o nötral veya bir elektron vererek pozitif hale gelebilir veya bir alıcı arayüzey tuzak ise nötral veya bir elektron kabul ederek negatif olabilir.



Şekil.2.2. Termal olarak oksitlenmiş silikonda oluşan arayüzey durumları.



Şekil 2.3. MYY yapılarında arayüzey durumlarına karşılık gelen eşdeğer devre

Arayüzey tuzaklar için dağılım fonksiyonu,

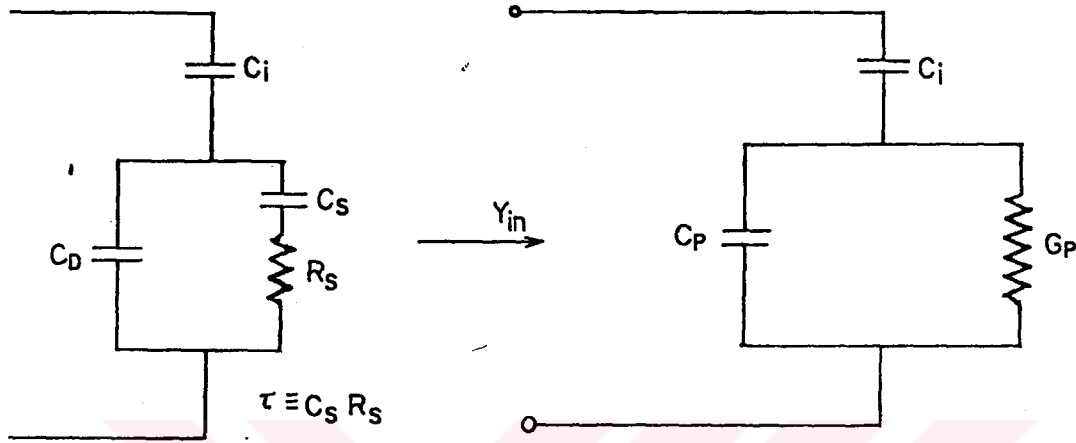
$$F_{SD}(E_t) = \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \right) \quad (2.3)$$

verici arayüzey tuzaklar ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

$$F_{SA}(E_t) = \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \right) \quad (2.4)$$

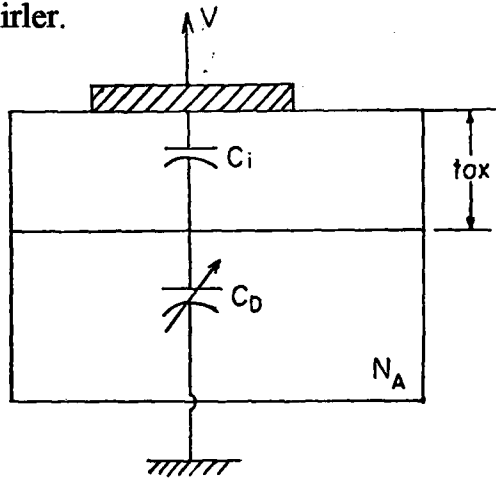
şeklindedir. Burada  $E_t$ , arayüzey tuzagının enerjisi,  $g$  ise temel durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için ise 4 dür. Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bandları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket ederler. Bu değişme MYY kapasitansında ve ideal eğrisinde değişmeye

sebepl olur[2]. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren MYY yapının devresi Şekil. 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre.

Burada  $C_{OX}$  ve  $C_D$  sırası ile oksit(yalıtkan) kapasitans ve yarıiletken tüketim tabaka kapasitansı olup şekil 2.5 de gösterilmiştir.  $C_S.R_S$  çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü ( $\tau$ ) olarak tanımlanmıştır ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler.



Şekil 2.5  $C_{OX}$  ve  $C_D$  etkisini içeren eşdeğer devre.

Şekil 2.4a' nın paralel kolu, Şekil 2.4b' deki gibi frekans bağımlı kapasitans  $C_p$  ve ona paralel bağlı frekans bağımlı kondüktans  $G_p$  şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admitans

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} \quad (2.5)$$

$$= \frac{R_s^2 \omega^2 C_s^2}{1 + R_s^2 \omega^2 C_s^2} + j\omega \left( C_D + \frac{C_s}{1 + R_s^2 \omega^2 C_s^2} \right) = G_p + j\omega C_p$$

dir. Burada kondüktans  $G_p$  ve kapasitans  $C_p$

$$G_p = \frac{1}{R_p} + \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.5a)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.5b)$$

eşitliği ile verilir. Toplam empedans  $Z$  ise,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j \left( \frac{1}{\omega C_i} + \frac{1}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \right) + \frac{1}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}$$

ve buradan toplam admitans  $Y_{top}$  için

$$Y_{top} = \left( \frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p} \right) + j\omega \left( \frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2) C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p} \right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.6)$$

eşitliği elde edilir [3]. Eğer seri rezistans varsa ve büyükse, ölçülen kondüktans  $G_m$  ve kapasitans  $C_m$  gerçek değerler değildir [4].

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_m + G_m}, Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T}, Z_3 = \frac{1}{j\omega C_m + G_m}$$

dir. Şimdi ölçülen  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinin düzeltilmiş halleri için analitik çözümü aşağıdaki şekilde yapılabilir.

$Z = Z_1 + Z_2$  den  $Z_1 = Z - Z_2$  dir. Buna göre,

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_m' + G_m' = \left( \frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j\omega(C_T - C_m)}$$

denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır,  $G_T = 1/R_s$  yazılır ve  $C_T$  değeri ihmal edilirse düzeltilmiş kondüktans için,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.8)$$

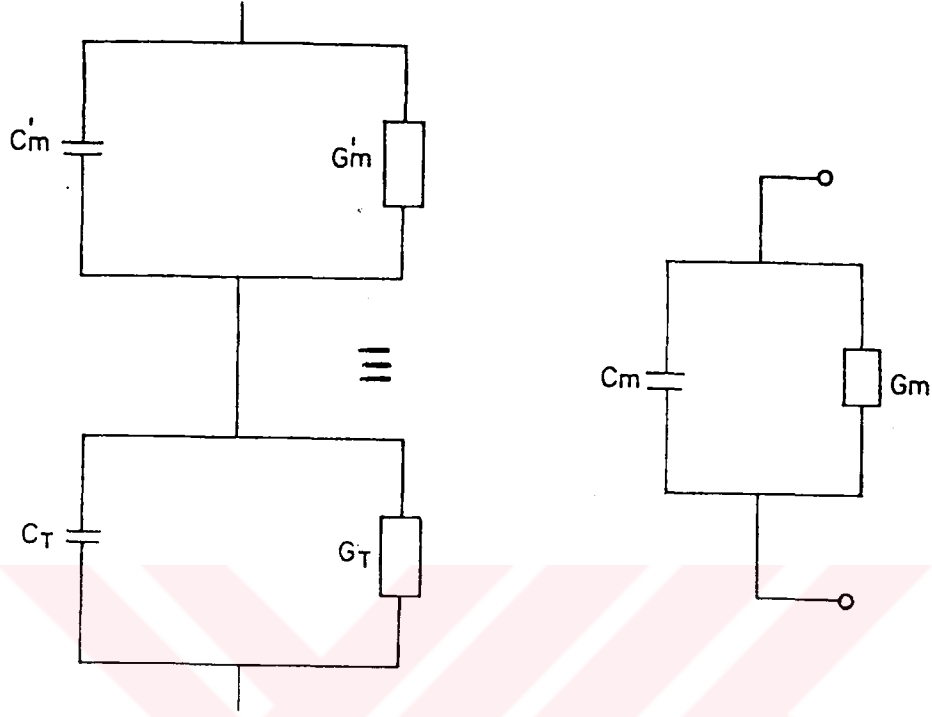
elde edilir. Burada seri direnç  $R_s$ , şekil 2.6b'deki devrenin empedansı  $Z$  nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli akümülyasyondaki  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinden hesaplanabilir [5].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2}$$

den

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.9)$$

elde edilir. Denk.(2.7) nin düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı ise,



Şekil 2.6 MYY yapının eşdeğer devresi,

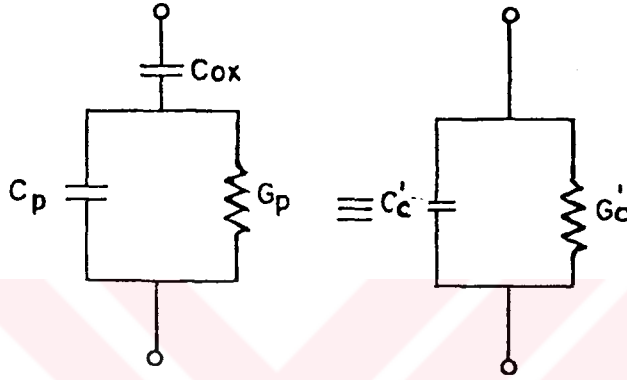
$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + W^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.10)$$

dir.  $R_s=0$  durumunda  $C_c=C_m$  ve  $G_c=G_m$  olur. Benzer şekilde  $G_p/W$  için Şekil 2.7' dan,  $C_{ox}$  oksit kapasitans olmak üzere

$$\frac{G_p}{W} = \frac{G_c / W}{(G_c / W C_{ox})^2 + (C_c / W C_{ox})^2} \quad (2.11)$$



denklemleri elde edilir [6]. Tuzaklanmış arayüzey yükleri hesaplamak için ya kapasitans-voltaj (C-V) ya da kondüktans-voltaj(G-V) ölçüm teknikleri kullanılır. Her iki teknik de arayüzey tuzaklar hakkında benzer bilgiler içerir.



Şekil 2.7 Arayüzey durumlarını ihtiva eden MYY eşdeğer devresi.

## 2.2. Metal- Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitesi

Metal-yalıtkan-yarıiletken(MYY) güneş pilleri paralel levhalı bir kondansatöre benzetilebilir. İdeal bir MYY yapı ters beslem durumunda, gerilim artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak uygulanan gerilimin artmasıyla arınma bölgesinin genişliği artar. Aynı zamanda yarıiletkendeki metale yakın önemli bir deşik konsantrasyonu varsa, deşiklerin yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesiyle çakışacağından deşik konsantrasyonu azalacaktır. Bundan

dolayı bu tür yapılar ve Schottky diyodları varaktör (değişken kapasitör) olarak da kullanılır. Ters beslem altındaki kontak sığasından, diyodun temel fiziksel parametreleri bulunabilir.

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapının, potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson denklemi ile verilir.

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.12)$$

Burada  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti ve  $\rho(x)$  uzay-yükü yoğunluğudur. p-tipi yarıiletkenin alıcı atomlarının (acceptor) yoğunluğu  $N_a$  ve yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu  $n$  olmak üzere,  $\rho(x)$  uzay-yükü yoğunluğu,

$$\rho(x) = (N_a - n) \quad (2.13)$$

ifadesi ile verilir.  $e(V_d - V) \gg kT$  olduğunda,  $0 \leq x \leq d$  aralığında  $N_a \gg n$ 'dir ve bundan dolayı,  $\rho(x)$ ,

$$\rho(x) = eN_a \quad (2.14)$$

yazılabilir.  $\rho(x)$ 'in bu değeri (2.12) denkleminde yerine konulursa, tek boyutta Poisson denklemi,

$$\frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = \frac{e N_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.15)$$

şeklinde olur. Denklem (2.15) aşağıdaki sınır şartları altında çözülürse  $\psi(x)$  bulunabilir. Sınır şartları:

$$1) x = 0 \text{ da } \psi(x) = 0 \quad 2) x \geq d \text{ de } \psi(x) = V_d \pm V \text{ ve } d\psi(x)/dx = 0$$

şeklindedir. (2.15) denkleminin,  $d\psi(x)/dx = 0$  sınır şartı altında, birinci integrali kontak bölgesindeki elektrik alanı verir.

$$E(x) = d\psi(x)/dx = eN_a/\epsilon_s\epsilon_0 (x-d) \quad (2.16)$$

Bu ifadenin integrali birinci sınır şartı altında alınırsa  $\psi(x)$  potansiyel fonksiyonu,

$$\psi(x) = -eN_a/\epsilon_s\epsilon_0 [(x^2/2) - xd] \quad (2.17)$$

olur. Denklem (2.17),  $x \geq d$  de  $\psi(x) = V_d \pm V$  sınır şartı altında çözülürse, Schottky tabakasının  $d$  genişliği bulunur.

$$(V_d \pm V) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s\epsilon_0} d^2, \quad d = \left[ \frac{2\epsilon_s\epsilon_0}{eN_a} (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

Pozitif beslem için kontak ters beslemdeedir. Schottky tabakasının kapasite gibi davranacağına daha önce işaret edilmişti. Yarıiletkenin yüzey birimi başına yük miktarı,

$$Q = e N_a \cdot d = [2\epsilon_s\epsilon_0 e N_a (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (2.19)$$

ifadesiyle verilir. Birim alan başına küçük-sinyal kapasitesi, uygulanan voltaja göre yük değişimi olarak tanımlanır.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[ \frac{e\epsilon_s\epsilon_0 N_a}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} = \frac{\epsilon_s\epsilon_0}{d} \quad (2.20)$$

Bu ifadeden de görüldüğü gibi uygulanan voltajı arttığında kapasite azalır,  $d$  ise artar. Eğer kapasitans ( $C$ ), verici akımların ( $N_a$ ) fonksiyonu olarak düşünülecek olursa,  $N_a$ 'nin artması ile kapasitans ( $C$ ) artar, buna bağlı olarak  $d$  azalır. (2.20) denkleminde  $N_a$  ve  $V_d$ 'yi veren ifadeleri elde edilebilir. Denk. (2.20) yeniden düzenlenirse,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{e\epsilon_s\epsilon_0 N_a A^2} \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir.  $C^{-2}$ - $V$  grafiği ters beslemde bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden,

$$N_a = (2/e\epsilon_s\epsilon_0 A^2) \cdot dV/d(1/C^2) \quad (2.22)$$

şeklinde elde edilir. Doğrunun  $V$  eksenini kestiği nokta  $V_o$  değerinden,  $V_d$  difüzyon potansiyeli,

$$V_d = V_o + kT/q \quad (2.23)$$

Eşitliğinden bulunur. Potansiyel engel yüksekliği  $\Phi_{Bn}$  ise

$$\Phi_{Bn} = V_o + E_F \quad (2.24)$$

eşitliğinden bulunur. Burada  $E_F$ , Fermi seviyesi olup,

$$E_F = kT/q \ln(N_v/N_a) \quad (2.25)$$

Denklem 2.22 kullanılarak

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = 2/e\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \quad \text{elde edilir.} \quad (2.26)$$

Burada arayüzey durumlarının etkisi dikkate alınır

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = 2(1+\alpha)/e\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \quad \text{burada } \alpha = eD_{it}\delta/\epsilon_0 \quad (2.27)$$

$D_{it}$  arayüzey durumlarının yoğunluğu olmak üzere

$$D_{it} = \alpha \epsilon_0 / e \delta \quad \text{olarak elde edilir.} \quad (2.28)$$

$c_2 = 1/1 + \alpha$  olarak tanımlanırsa denklem 2.27 yardımıyla

$$c_2 = \frac{Na(\text{deneysel})}{Na(\text{teorik})} \quad \text{bulunur.} \quad (2.29)$$

### 2.3. Kapasitans Metodu

Tuzaklanmış arayüzey yüklerinden dolayı C-V eğrisinde frekansa bağlı olarak bir yarıma (genleşme) meydana gelir. Beslem altında arayüzey tuzaklarının etkisiyle ideal MYY eğrisi voltaj eksenini boyunca kayar. Yüksek frekanslarda ( $W\tau \gg 1$ ) arayüzey tuzaklar C-V eğrisini etkilemez ve kapasitans ifadesi

$$C = C_{OX} \cdot C_D / (C_{OX} + C_D) \quad (2.30)$$

denklemine indirgenir. Uygulanan voltajın bir kısmı yalıtkan diğer kısmı da silikon üzerine düşer. Yalıtkan üzerine düşen voltaj  $V_i$ ,

$$V_i = |Q_s| \delta_{ox} / \epsilon_i = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} \quad (2.31)$$

eşitliği ile verilir.  $V = V_i + \psi_s$  olduğundan,

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial V} = \frac{C_{ox}}{C} - 1 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \psi_s}{\partial V} = 1 - \frac{C}{C_{ox}} \quad (2.32)$$

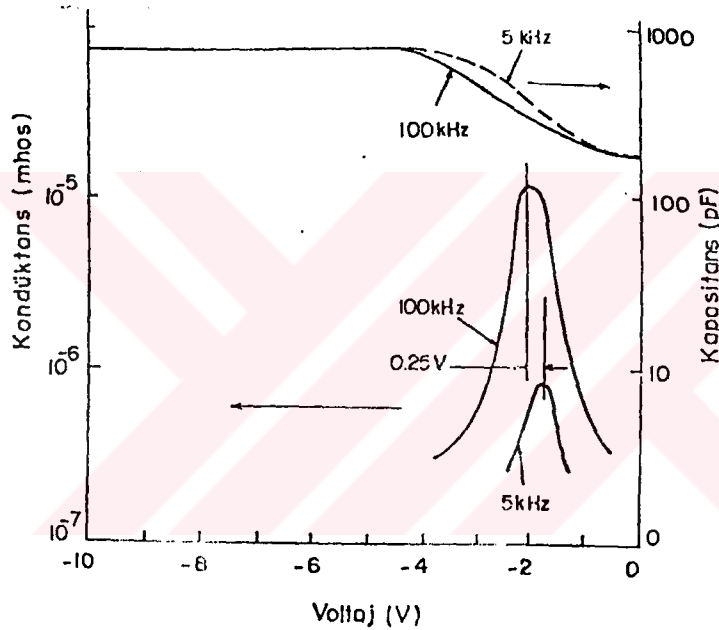
elde edilir. Bu denklem kuvvetli akümlasyon voltaj  $V_a$  dan, kuvvetli inversiyon voltajı olan  $V_i$  ye kadar integre edilirse,

$$\psi_s(V_1) - \psi_s(V_2) = \int_{V_a}^{V_i} [1 - C / C_{ox}] dV \quad (2.33)$$

eşitliği elde edilir.  $(1 - C / C_{ox})$  eğrisinin integrasyonu ile yüzey potansiyeli hesaplanabilir. Yalnız ölçüm frekansı yeterince küçük olmalıdır ki tüm arayüzey tuzakları voltaj ve a.c. sinyalinin ikisini izleyebilsin. Voltaj ile yüzey potansiyeli arasındaki ilişkiyi elde etmek için en hassas metotlardan biri C.N. Berglund[7] tarafından geliştirilmiştir ve bundan dolayı denk.(2.33) Berglund integrali olarak da adlandırılır. Voltaja karşı yüzey potansiyeli ölçülen datadan iki adımda elde edilir. İlki her voltajda bir ekleme sabiti ihtiva eden yüzey potansiyeli bulunur. Sonra da ekleme sabiti değişik yöntemlerle elde edilebilir.

## 2.4. Kondüktans Metodu

Arayüzey tuzakların yoğunluğu, düşük frekans kapasitans, Kuasistatik kapasitans ve karanlıkta ya da ışık altında deneysel kondüktans teknikleri ile hesaplanabilir. Bunlardan ilk iki deneysel metot ile hesaplanan arayüzey durumları yeteri kadar hassas olmayabilir ve silikon yasak enerji aralığının bir kısım ile sınırlıdır[8]. Diğer taraftan kondüktans teknik biraz daha hassas sonuçlar verir fakat ölçümler oldukça zordur ve uzun bir zaman alır.



Şekil 2.8.Kapasitans ve kondüktans ölçümleri (p-tipi Si için)  
kapasitansın (C) uygulanan voltaj ile nasıl değiştiğini gösterir.

Şekil 2.8.'ten şu sonuçlar çıkar:

- (i) Bu frekans bölgesinde maksimum kapasitans dispersiyonu % 14 civarındadır. Halbuki eşdeğer paralel kondüktans büyüklüğü mertebesinden fazla değişir.
- (ii) Kondüktans piki, düz banda yakın beslem voltajlarına doğru kayar. 50 Hz ve 500 kHz arasındaki kondüktans ölçümlerinde düz band bölgesinde pik gözükmez. Bu pik zayıf terslenimden tüketim bölgesine kadar olan beslem

üzerinden kayar. (iii) Frekans arttıkça kondüktans pik değerleri düz banda doğru kayar. Bu pikler kapasitans dağılımının olduğu beslem bölgesinde meydana gelir.





### 3. DENEYSEL YÖNTEM

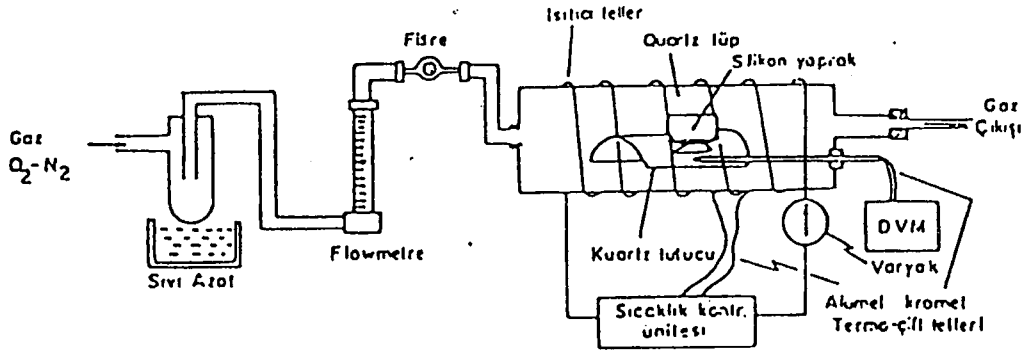
#### 3.1. Kristal Temizleme

Al-SiO<sub>2</sub>-pSi(MYY) güneş pilleri p-tipi(boron katkılı) 1Ω cm öz dirençli, 350 μ m kalınlıklı, 2"çapında ve <100> yüzey yönelimli tek kristal silisyum yapraklar üzerinde oluşturulur. Numuneler, Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi(ANAEM) Katıhal Laboratuvarında aşağıdaki işlem sırasına göre hazırlanmıştır. Si yaprakları önce (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>), (CH<sub>3</sub>OH) organik çözücülerde 3 dakika süreyle ve sonra eşit oranlarda sülfirik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve % 20 HF karışımında 3 dakika süreyle ve daha sonra, 6 hacim nitrik asit(HNO<sub>3</sub>) +1 hacim hidroflorik asit (HF)+35 hacim deiyonize su(H<sub>2</sub>O) ile % 20 hidroflorik asit(HF) karışımında 3 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenir. Kimyasal temizlemenin son adımı olarak kristaller kuru azot(N<sub>2</sub>) ile kurulanır.

#### 3.2. Oksit Büyütme

Kimyasal olarak temizlenen Si yaprakları üzerine oksit (SiO<sub>2</sub>) büyütmek için çok kullanılan yöntemlerden biri olan, fırında oksit büyütmeye yöntemi kullanılır. Bu yöntem için kullanılan sistem şekil 3.1' de verildi. Kuartz tüp, rezistans telinden geçen akım vasıtasıyla ısıtılır ve sıcaklık, ELİMKO 6000 kontrol ünitesi ile kontrol edilir. Kuartz tüpün içindeki numunelerin olduğu bölgeye yerleştirilen kromel-alümel termo-çifti ile ayrıca sıcaklık kontrol edilir. Oksitleme için gerekli gaz akış hızı bir flowmetre ile ölçülür. Oksitleme

işleminde kullanılan gazlar, nemin alınması için şekil 3.1' de gösterildiği gibi, gazlar sıvı azot kabının üstünde tutulmuş bir nem tutucudan (cam tüp) geçirildikten sonra oksidasyon fırınına gönderilir.



Şekil 3.1. Oksit büyütmede kullanılan fırın sistemi

### 3.3. Al-SiO<sub>2</sub>-pSi(MYY) Tipi Güneş Pillerinin Yapımı

Al-SiO<sub>2</sub>-pSi(MYY) tipi güneş pillerinin yapımında, yarı geçirgen metal(Al) tabaka ile alt ve üst kontakları almak için gerekli kalınlıktaki alüminyum tabaka, yağ-vakum pompa sisteminde buharlaştırma yöntemiyle aşağıdaki basamaklardan oluşturulur:

1. Vakum sistemi ile elde edilen  $2 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla oldukça saf alüminyum (~99.99%) buharlaştırılarak Si yaprağın arka yüzeyine ~2000 Å Al tabaka oluşturulur.

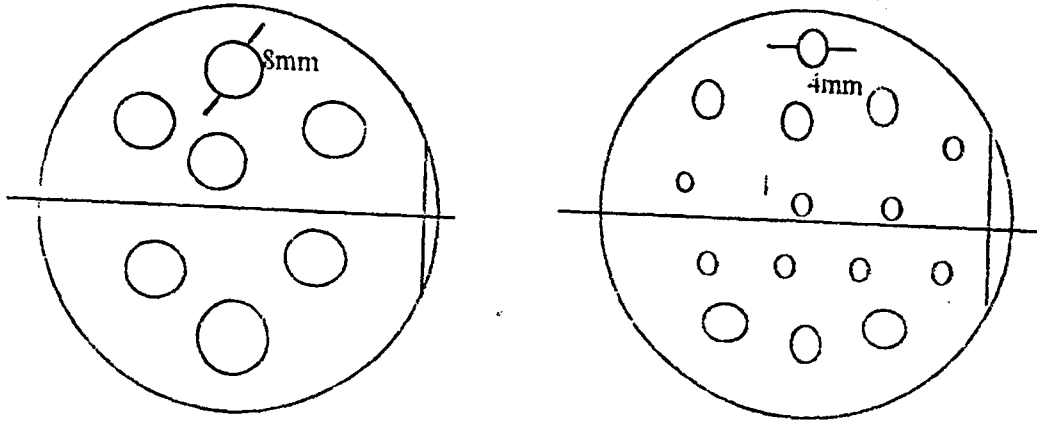
2. Buharlaştırma ile elde edilen bu arka kontağın, Si yaprağın üzerine çöktürülmesi ile omik kontak elde edilir. Bu işlem  $650^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ortamında 60 dakika süreyle ortamdan  $\sim 2$  litre/dak. hızında kuru azot gazı ( $\text{N}_2$ ) geçirilerek yapılır. Bu işlemle hem alüminyumun Si yapraklar üzerine çöktürülmesi hem de Si yaprakların üst yüzeylerinde ince ( $\sim 20\text{-}30 \text{ \AA}$ )  $\text{SiO}_2$  tabakasının oluşturulması sağlanır.

3. Termal işlemiden hemen sonra Si yaprakları vakum sistemine yerleştirilir. Bu yaprakların üzerine  $\sim 70 \text{ \AA}$  kalınlığında ve 6mm çapında yarıgeçirgen Al ön kontakları  $\sim 1\text{-}4 \text{ \AA/sn}$  hızında, Şekil 3.2' de gösterilen ince bakır maskeler yardımıyla buharlaştırılır.

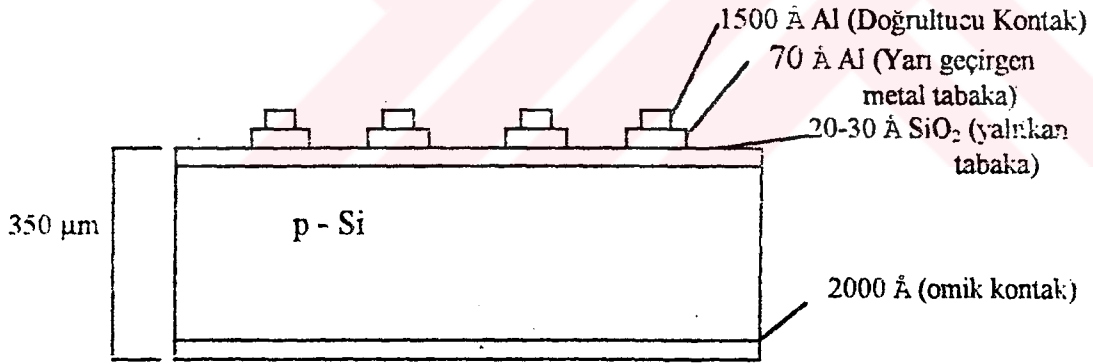
4. Gerekli elektriksel ölçümleri yapabilmek için  $\sim 1500 \text{ \AA}$  kalınlığında, 4 mm çapında Al kontaklar yarı-geçirgen ön tabakanın üzerine yine aynı hızda maskeler yardımıyla buharlaştırılarak pilcikler oluşturulur.

Kontakların oluşturulmasında metal tabaka kalınlığı ve metal buharlaştırma hızı kuartz kristal monitörü (Inficon Leybold Heraeus Model XTM) ile takip edildi. Numunelerin yapım işlemleri tamamlandıktan sonra bu Si yapraklar özel olarak hazırlanan bakır tutucular üzerine gümüş pasta yardımıyla yapıştırılır. Üst elektrotlara gümüş kaplamalı ince teller kullanılarak yine gümüş pasta yardımıyla elektriksel kontaklar yapılır.

Bu şekilde ölçmeye hazır hale getirilen çok sayıdaki güneş pili, eğri izleyicide (Telequipment CT7 Curve Tracer) test edilerek iyi diyod özelliği gösteren numuneler belirlenir ve bunların elektriksel karakteristiklerinin incelenmesine geçilir. Yukarıda verilen basamaklar sonunda hazırlanan Si tipi bir güneş pilinin kesiti Şekil 3.3' de verildi.



Şekil 3.2. Yarı geçirgen Alüminyum tabakanın ve ön kontakların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler



Şekil 3.3. Metal-yalıtkan-yarıiletken ( MYY) tipi bir güneş pilinin kesiti.

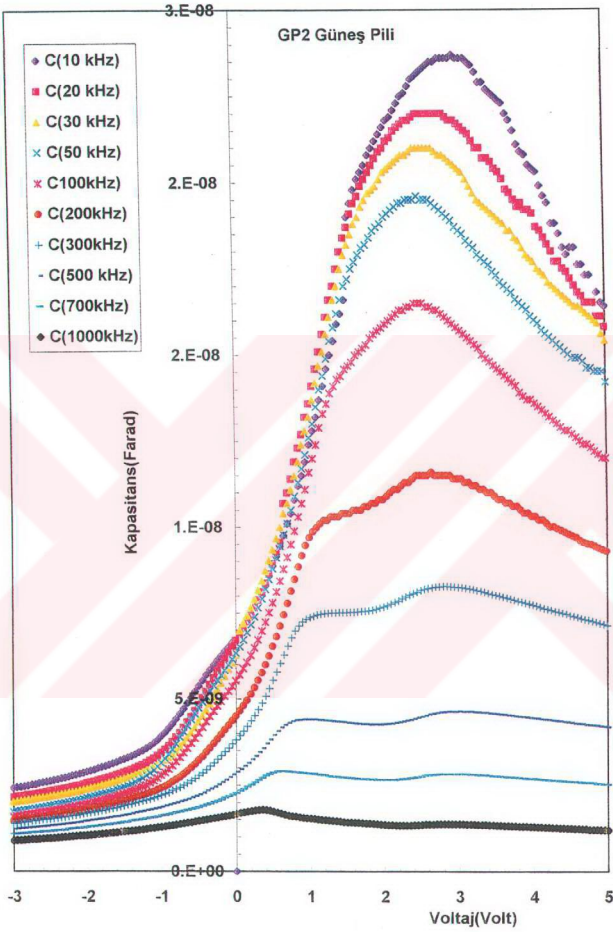
## 4.DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Kapasite-Voltaj Karakteristikleri

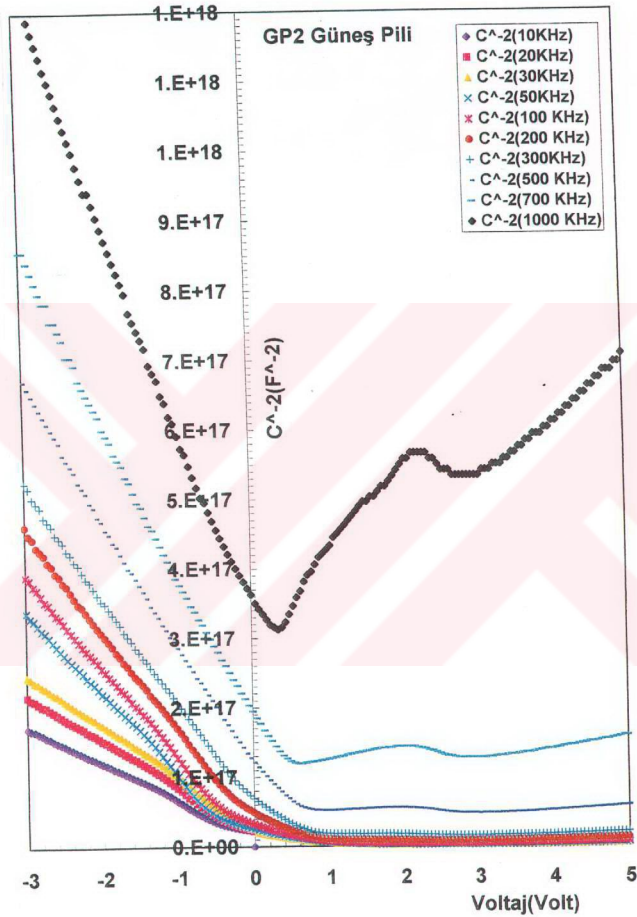
Kapasite-Voltaj ölçümleri, oda sıcaklığında ve geniş bir frekans aralığında “Hewlett Packard 4192A (Düşük Frekans) LF Empedans Analizmetre (5 Hz-13MHz)” ile gerçekleştirildi. Oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda (10 kHz-1MHz) GP2 örneği için elde edilen C-V eğrileri Şekil 3.1. de verilmiştir. GP2 dc gerilimi altında iken, genliği de dc geriliminden çok küçük olan w açısal frekansı bir ac sinyali uygulanarak ölçümler gerçekleştirildi. Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi kapasitans artan frekansla ters orantılı olarak azalmaktadır. Çünkü yüksek frekans Kapasite-Voltaj (C-V) eğrisi  $1/w$  süresine sahip olacağından, bu süre taşıyıcının yaşam süresi civarında veya daha yüksek olabileceğinden arayüzey durumlarındaki taşıyıcı, ac sinyalini takip edememektedir. Bu nedenle yüksek frekans C-V eğrisinde arayüzey durumlarının katkısı olmadığı söylenilebilir [2-10]. C-V eğrilerinin bir pikten geçmesi akım sınırlamalarının olmasından dolayıdır[11].

Bu arayüzey durumlarından dolayı Şekil 4.2’de görüldüğü gibi küçük frekanslarda ki  $1/C^2-V$  eğrileri, ters beslemde lineer bir davranışa sahip değildirler. Çünkü düşük frekanslarda C-V eğrilerinin  $1/w$  süresi yeterince büyük olduğu için arayüzey durumlarının etkisi kendini açıkça göstermektedir. İdeal bir davranış göstermeyen bu kapasitans-voltaj karakteristikleri,  $C-(V_0-V)^{-1/2}$  formunda lineer duruma dönüştürülebilir. Burada  $V_0$ ,  $1/C^2-V$  eğrisinde lineer kısmın voltaj eksenini sıfırda kestiği nokta, V ise uygulanan ters gerilim voltajıdır. Şekil 4.3’de  $C-(V_0-V)^{-1/2}$  eğrisinin lineer kısmının kapasitans eksenini kestiği noktadan ;50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000kHz değerleri için sırasıyla 890, 700, 450, 300, 250, 100, ve 0 pF değerleri bulundu Şekil 4.3’de görüldüğü gibi düşük frekanslara doğru gidildikçe ilave kapasitansın

azalan frekansla arttığı görülmektedir. Düşük ve orta frekanslarda ki C-V eğrilerinde  $1/w$  süresi, bazı taşıyıcıların yaşam süresine yakın veya büyük olabileceğinden arayüzey durumlarında ki bazı taşıyıcılar ac sinyali takip edebilirler. Bu yüzden düşük frekanslarda olduğu gibi orta frekans eğrilerinde de arayüzey durumlarının etkisi vardır. Yani yeteri kadar düşük bir frekans ta (10 Hz) çizilen bir C-V eğrisi yeteri kadar küçük  $1/w$  süresine sahip olacağından, bu süre hemen hemen tüm taşıyıcıların yaşam süresinden daha yüksek olduğundan arayüzey durumlarında ki tüm taşıyıcılar, ac sinyali takip edebilmektedir. Arayüzey durumları yasak enerji aralığında dağıldıkları için seri direncin bu bölgelerde farklılık göstereceği düşünüldü. Bu nedenle farklı frekanslarda hem kuvvetli akümlasyon bölgesinde voltaja bağlı  $R_s$  değerleri elde edilerek Şekil 4.5. de verildi.

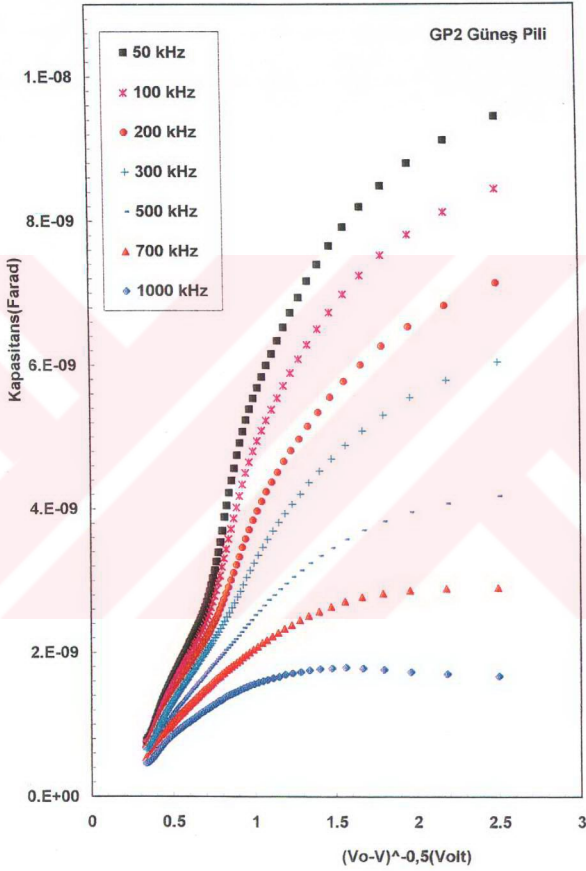


Şekil 4.1. GP2 Güneş Pili'nin farklı frekanslar için çizilen C-V eğrileri

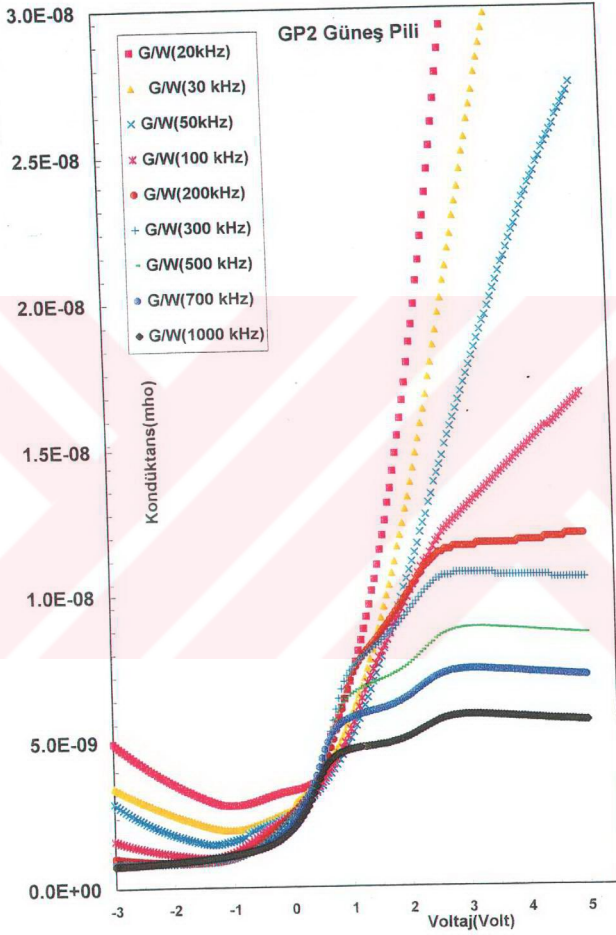


Şekil 4.2. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslardaki  $1/C^2$ -V eğrileri

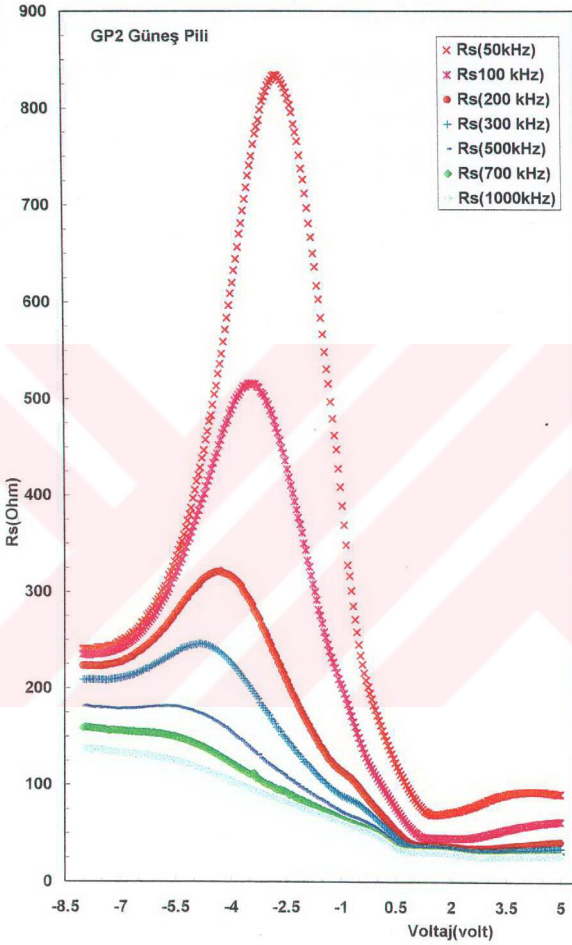




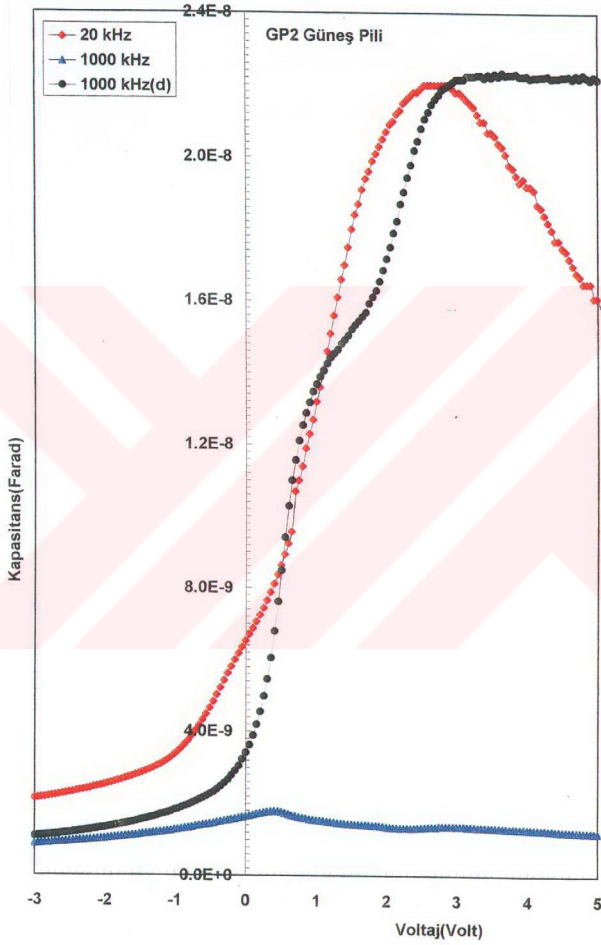
Şekil 4.3. GP2 Güneş Pilinin Farklı frekanslardaki  $C-(V_o-V)^{-0.5}$  eğrileri



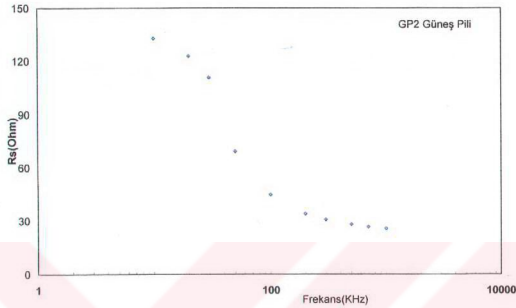
Şekil 4.4. GP2 Güneş Pilinin farklı frekanslardaki G/w-V eğrileri



Şekil 4.5. GP2 Güneş Pili'nin farklı frekanslardaki  $R_s$ -V eğrileri



Şekil 4.6. GP2 Güneş Pili için 1MHz için Cc-V eğrisi



Şekil 4.7. GP2 Güneş Pili için çizilen  $R_s$ -Ln $f$  grafiği

GP2 örneğinin farklı frekanslardaki (10kHz-1MHz) çizilen şekil 4.1. deki C-V ve şekil 4.4. deki G/w-V eğrilerinin kuvvetli akümlasyondaki değerlerinden faydalanılarak denklem 2.9. dan voltaja bağlı değişen tüm  $R_s$  değerleri elde edilerek şekil 4.5.de verildi. Burada  $R_s$  kuvvetli akümlasyon bölgesinde örneğin seri direncidir. Sıfır gerilim civarında arayüzey durumlarından dolayı gerek kapasitans gerekse iletkenlik eğrisinde bir artış gözlenmektedir. Bu artıştan dolayı bu bölgelerde seri direnç bir pikten geçmekte ve bu pik azalan frekansla akümlasyon bölgesine kaymaktadır.

Bu pik aynı zamanda C-V eğrilerindeki pike paralel bir davranış göstermektedir. O halde bu bölgelerde seri direnç ifadesi daha ziyade arayüzey durumlarından kaynaklandığı için bir düzeltme faktörü olarak alınabilir.

Arayüzey durumlarından kaynaklanan ilave kapasitans şekil 4.3. de verildiği gibi burada da arayüzey durumlarının etkisinin ortadan kalktığı yüksek frekanstaki (1MHz) deki C-V ve G/w-V eğrilerinin kuvvetli akümülyasyonda hesaplanan seri direncin ( $R_s$ )'nin 25.87 Ohm değeri kullanılarak 1MHz deki C-V eğrisinin düzeltilmiş değeri elde edilerek şekil 4.6. da verildi. Şekilden de görüldüğü gibi , arayüzey durumlarının etkisinin hemen hemen maksimum olduğu 20 kHz deki C-V eğrisi ile 1MHz deki düzeltilmiş C-V eğrisi kuvvetli akümülyasyonda aynı değere sahip olmaktadır. Ayrıca her frekanstaki kuvvetli akümülyasyonda elde edilen  $R_s$  değerlerinin frekansa karşı yarı logaritmik grafiği şekil 4.7. de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi seri direnç değerleri artan frekansla azalmakta küçük frekanslarda sabit hale gelmektedir. Bu sonuç arayüzey durumlarının yeteri kadar büyük olduğunu ve yasak enerji aralığında özel bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Çünkü yüksek frekanslarda çizilen C-V eğrilerinin süresi ( $1/w$ ), taşıyıcının yaşam süresinden ( $\tau$ ), küçükse arayüzey durumlarındaki taşıyıcı a.c. sinyalini takip edemez. 1MHz de  $1/C^2$ -V eğrisinin eğiminden faydalanılarak arayüzey yoğunluğu yaklaşık  $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  mertebesinde dir. Bu değerler band genişliğinin orta noktasına yakın yerlerde dikkate alınırsa literatürle iyi uyum sağlamaktadır.

(50kHz-1MHz) için 2. kısımdaki denklemler yardımıyla hesaplanan difüzyon potansiyeli, katkı atomlarının yoğunluğu, fermi enerjisi, potansiyel engel yüksekliği ve arayüzey durumlarının sayısı tablo 4.1. de verildi.

| F(kHz) | $V_o(V)$ | $V_d(eV)$ | $N_a(cm^{-3})$ | $\Phi_B(eV)$ | $D_{it}(cm^{-2}eV^{-1})$ | $\Phi_f(eV)$ | $C_2$  |
|--------|----------|-----------|----------------|--------------|--------------------------|--------------|--------|
| 1000   | 0,8404   | 0,86584   | 9,65E+14       | 1,102        | 7,66E+13                 | 0,236        | 0,0699 |
| 700    | 0,5972   | 0,6226    | 1,32E+15       | 0,89         | 7,45E+13                 | 0,228        | 0,0953 |
| 500    | 0,4415   | 0,4669    | 1,62E+15       | 0,68         | 7,27E+13                 | 0,223        | 0,1175 |
| 300    | 0,2769   | 0,3024    | 1,99E+15       | 0,51         | 7,05E+13                 | 0,217        | 0,1444 |
| 200    | 0,1728   | 0,1982    | 2,19E+15       | 0,40         | 6,933E+13                | 0,215        | 0,1588 |
| 100    | 0,0281   | 0,5356    | 2,45E+15       | 0,74         | 6,77E+13                 | 0,212        | 0,1777 |
| 50     | 0,012    | 0,3744    | 2,75E+15       | 0,583        | 6,600E+13                | 0,209        | 0,1992 |

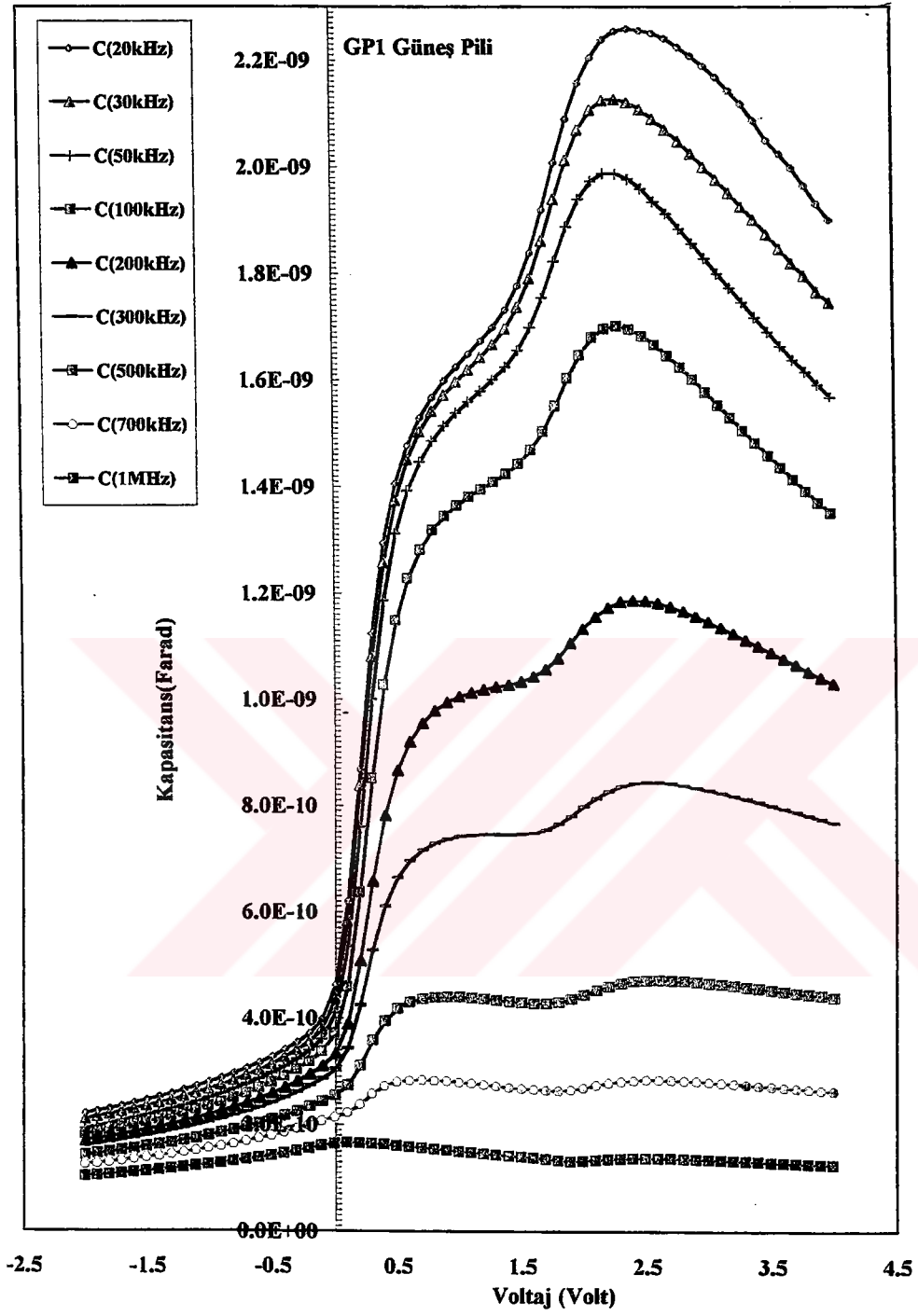
Tablo 4.1. GP2 Güneş Pili için bulunan  $V_o$ ,  $V_d$ ,  $N_a$ ,  $\Phi_B$ ,  $C_2$ ,  $D_{it}$ ,  $\Phi_f$  değerleri

Tablodan da görüleceği gibi düşük frekanslardaki  $1/C^2$ -V eğrilerinde lineer olmayan davranıştan dolayı azalan frekansla difüzyon potansiyeli, Fermi enerjisi, dolayısıyla potansiyel engel yüksekliği de azalmaktadır. Bu sonuç katkı atomlarının yoğunluğu, Fermi enerjisi, potansiyel engel yüksekliği, gibi temel parametrelerin sağlıklı hesaplanabilmesi için arayüzey durumlarının etkisini hemen hemen hiç içermeyen yeterince yüksek frekanstaki (1MHz)  $1/C^2$ -V eğrilerinden hesaplanması gerekir[2-12].

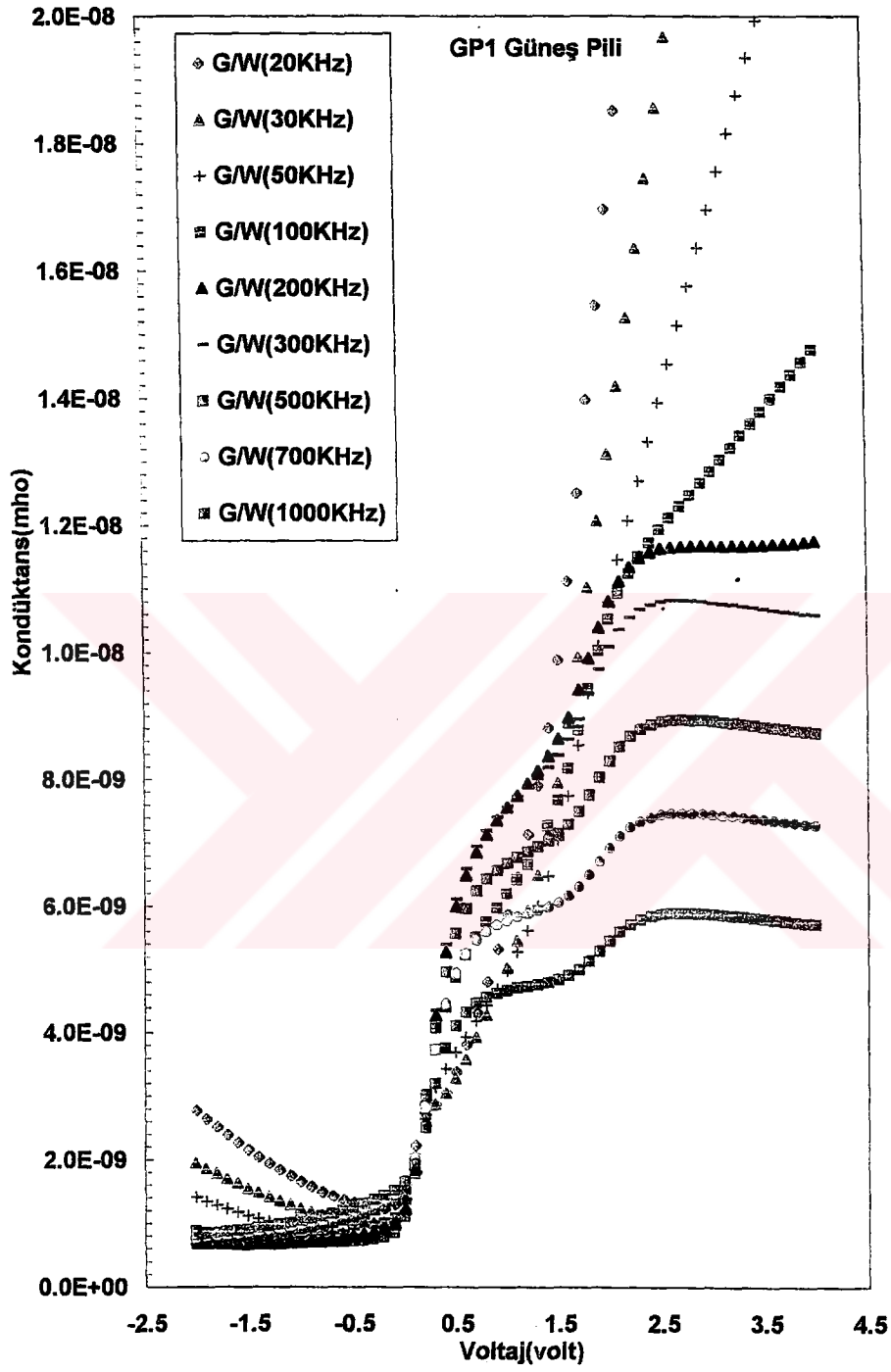
Bir kıyaslama olması açısından Al-SiO<sub>x</sub>-pSi (MIS) GP1 güneş pilinde C-V ve G/w-V eğrileri yine farklı frekanslarda HP 4192A Düşük Frekans Empedans analizmetre ile gerçekleştirildi. Arayüzey durumları ve kapasitans arasındaki bağıntı  $C_{it}=qD_{it}$  şeklindedir. Burada  $D_{it}$ , eV<sup>-1</sup>cm<sup>2</sup> başına arayüzey durumlarının sayısı,  $C_{it}$  ise birim alan başına kapasitansdır. Yalıtkan kapasitans ( $C_{ox}$ ), kuvvetli yığılma bölgesinden hesaplandı. Tüketim kapasitans ( $C_{tık}$ ) ve yalıtkan kapasitans( $C_{ox}$ ) tuzaklanmış arayüzey kapasitansından izole edilmiştir. Şekil 4.8. ve şekil 4.9.da sırasıyla GP1 güneş pilinin geniş bir frekans aralığındaki C-V ve G/w-V eğrileri verilmiştir.

Seçilen örneklerden ikincisi olan GP1 Güneş Pilinin geniş bir frekans aralığında çizilen C-V, G/w-V,  $1/C^2$ -V,  $R_s$ -V,  $R_s$ -lnf, grafikleri Şekil 4.8.-4.12de verildi. görüldüğü gibi kapasitans değerleri artan frekansla artmakta ve doğru beslemde hemen hemen tüm frekanslarda iki pik vermekte ve ilk pik düşük frekanslara doğru gidildikçe kaybolmaktadır. Gerek bu davranış gerekse Şekil 4.9. daki kondüktans eğrilerindeki benzer davranışlar arayüzey durumlarının yasak enerji aralığındaki özel bir dağılımına ve seri direncin varlığına ve yeterince büyük olduğuna atfedildi.

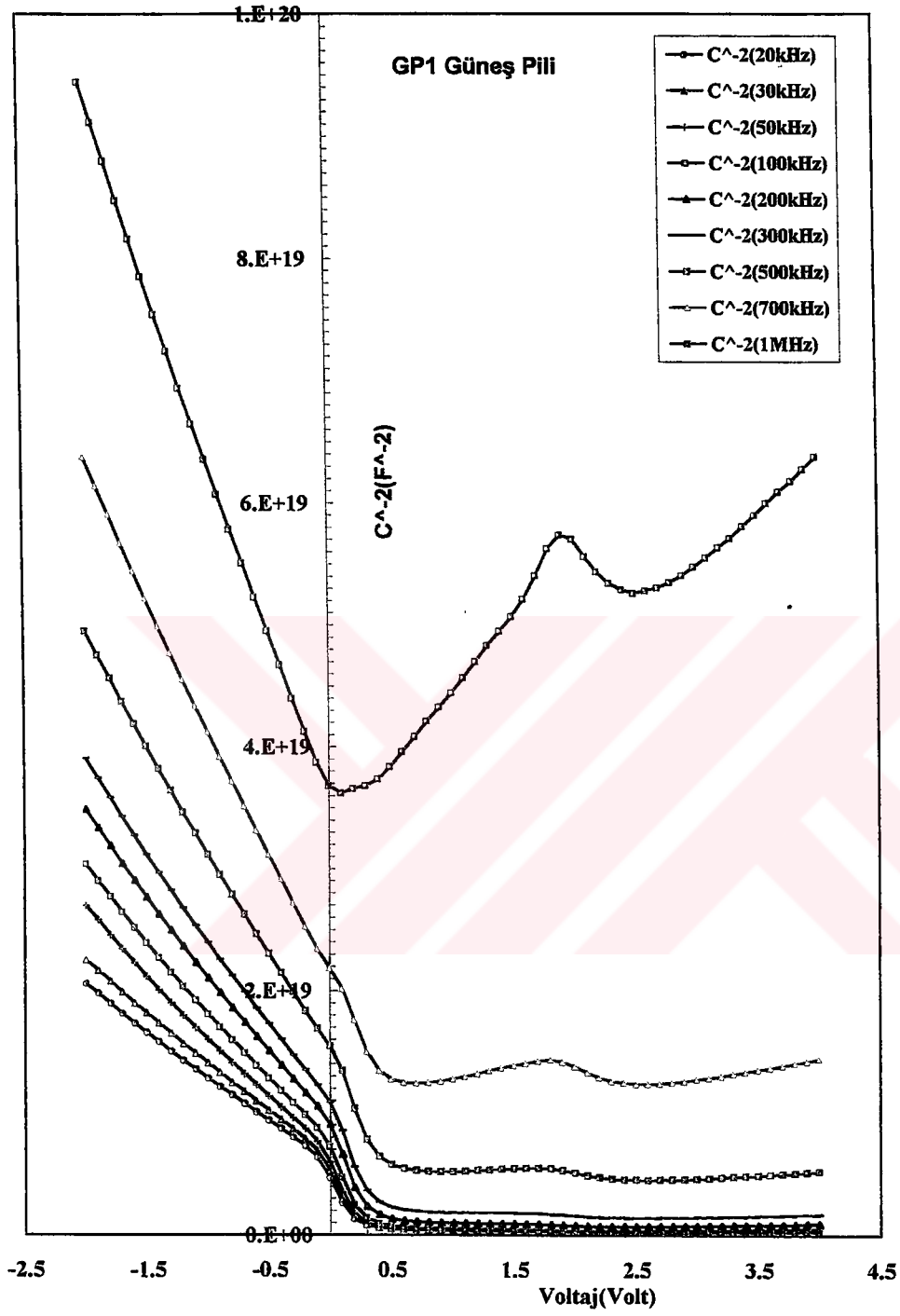




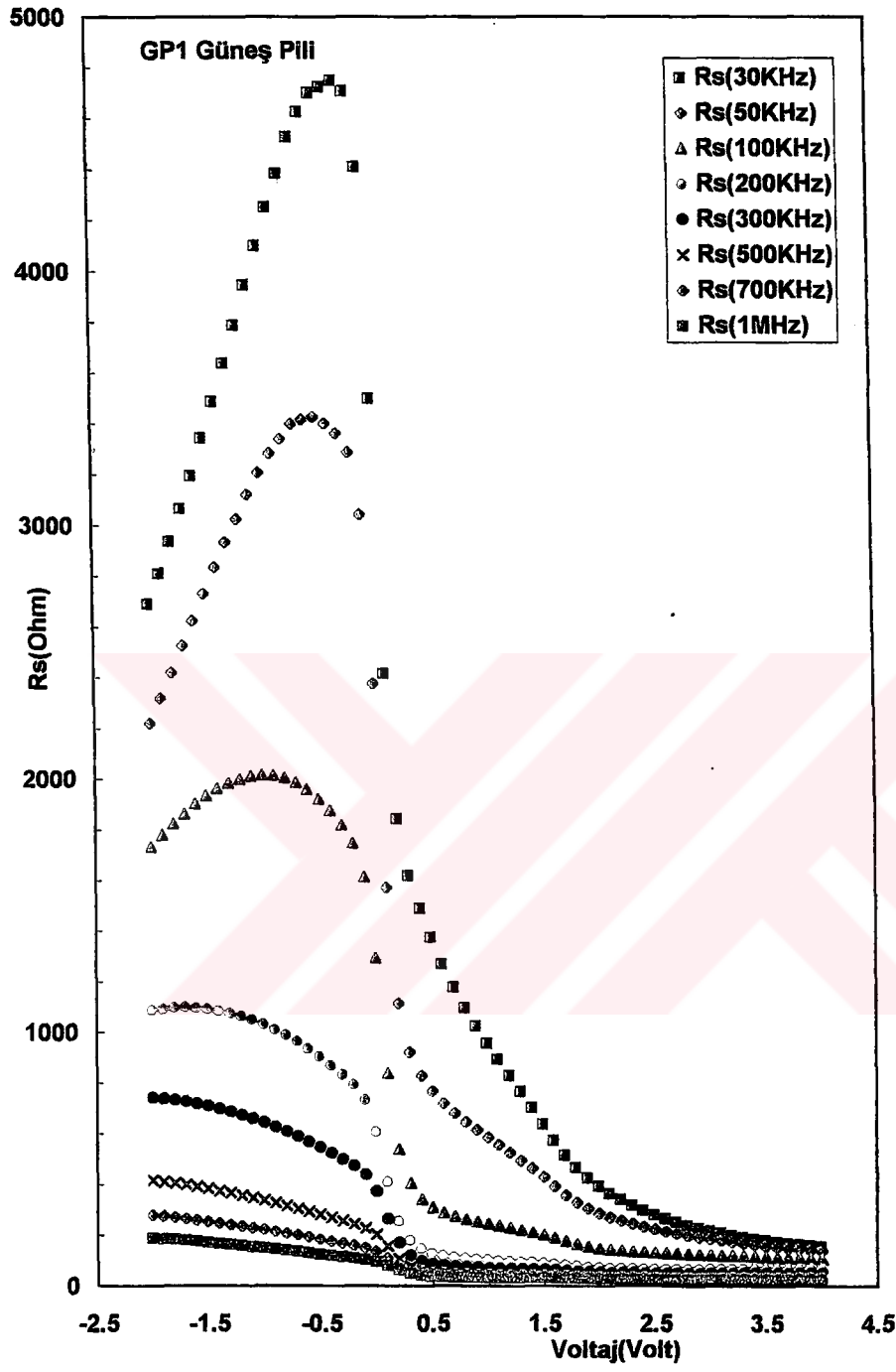
Şekil 4.8. GP1 Güneş Pili'nin değişik frekanslardaki (C-V) eğrileri



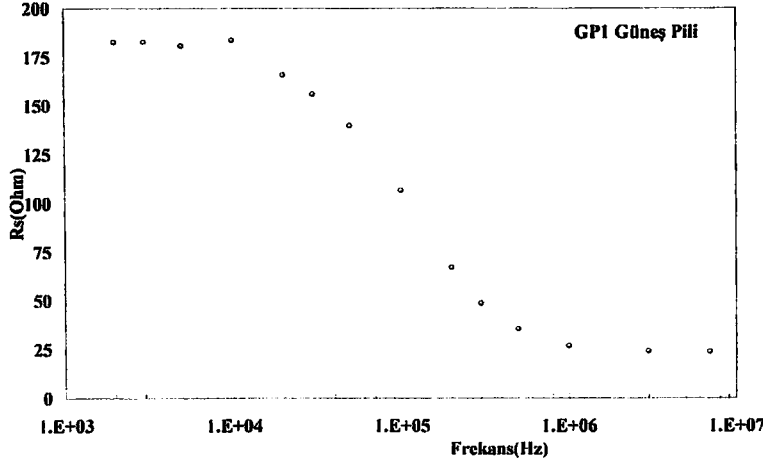
Şekil 4.9. GP1 Güneş pilinin değişik frekanslardaki (G/W-V) eğrileri



Şekil 4.10. GP1 Güneş pilinin farklı frekanslardaki  $1/C^2$ -V eğrileri



Şekil 4.11. GP1 Güneş Pili'ni farklı frekanslardaki Rs-V eğrileri



Şekil 4.12 GP1 Güneş pilinin değişik frekanslardaki Rs-lnf grafiği

#### 4.2. Tartışma

Arayüzey durumlarından kaynaklanan kapasitans ( $C_p$ ) GP2 ve GP1 örnekleri için tüm voltajlarda elde edildi. Arayüzey durumlarından dolayı kapasitans frekansa bağımlılık göstermektedir. Tablo 4.1.den de görüldüğü gibi arayüzey durumlarının yoğunluğu yeteri kadar büyük olup  $10^{13} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  mertebesinde olup arayüzey durumları uygulanan voltaj ile azalmaktadır. Benzer davranışlar Kar ve Dahlke [10] Castagne ve Vapaile [9] tarafından metal yarıiletken kontaklarda gözlenmiştir.  $C_p(v,W)=C(V,W)-C(V,100\text{kHz})$  ile hesaplanan arayüzey durumlarından kaynaklanan  $C_p$  yüzey yük kapasitansı  $C_{sc}$  (100kHz) deki ile ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu nedenle 100kHz civarındaki frekanslarda hesaplanan arayüzey durumları %10 dan daha fazla bir hata vermektedir[11].

Bu yüzden arayüzey durumlarını daha büyük hassasiyetle hesaplayabilmek için 1MHz deki kapasitans ölçümleri kullanıldı. Çünkü GP2 örneğinin farklı frekanslarda çizilen Şekil 4.3. deki eğrilerinden 1MHz de arayüzey durumlarından kaynaklanan ilave kapasitansın sıfır olduğu görülmektedir. Litaratürde , arayüzey durumlarının etkisini içermeyen kapasitans – Voltaj eğrisinin en az 1MHz ve arayüzey durumlarının etkisini içeren C-V eğrisinin ise en fazla 30 Hz civarında olması gerektiği belirtiliyor[13].

Seçilen örneklerden GP2 için hesaplanan Tablo 1 den gibi arayüzey durumlarının bir ölçüsü olan  $C_2$  katsayısı 1'e kıyasla oldukça küçük olup artan frekansla azalmaktadır. Literatürde arayüzey durumlarının yoğunluğu çok büyükse  $C_2$  sıfıra , eğer çok küçükse bire yaklaşır[2]. Bu nedenle geniş bir frekans aralığında elde edilen ve şekil 4.2. de verilmiş olan  $1/C^2$ -V eğrilerinin eğimleri yüksek frekanslara doğru gidildikçe sabitleşmekte düşük frekanslarda ise oldukça değişmektedir. Aynı eğrilerin eğimlerinden hesaplanan katkı atomlarının sayısı benzer nedenlerden dolayı yüksek frekanslarda arayüzey durumlarının etkisi olmadığı için daha gerçekçi fakat düşük frekanslardaki artış arayüzey durumlarından kaynaklandığı için gerçek katkı atomlarının sayısı değildir. Bu nedenlerden dolayı , yüksek frekansta hesaplanan difüzyon potansiyelinin 0,866 eV değeri ile Fermi enerjisinin 0,236 eV değeri kullanılarak potansiyel engel yüksekliği 1,102 eV bulundu. Bu değer silikonun oda sıcaklığındaki yasak enerji aralığı olan 1.12 eV değerine yakındır. Hazırlanan örneklerden GP1 Güneş Pilinin ve diğer örneklerin elektriksel karakteristiklerinden de benzer davranışlar gözlemlendi.

Sonuç olarak tüm örneklerde arayüzey durumlarının kapasitans - voltaj karakteristiklerine bilhassa küçük frekanslarda oldukça etkilediği gözlemlendi. Ayrıca tüm frekanslar için kuvvetli akümlasyon bölgesinde hesaplanan seri

direnç değerlerinin artan frekansla logaritmik olarak azaldığı ve dolayısıyla seri direncin frekansa bağlı olduğu gözlemlendi.

| F(kHz) | $V_o$ (V) | $V_d$ (eV) | $N_a$ (cm <sup>-3</sup> ) | $\Phi_B$ (eV) | $D_{it}$ (cm <sup>2</sup> eV <sup>-1</sup> ) | $\Phi_s$ (eV) | $C_2$   |
|--------|-----------|------------|---------------------------|---------------|----------------------------------------------|---------------|---------|
| 700    | 0,76      | 0,78       | 1,45E+13                  | 1,11          | 6,65E+15                                     | 0,32          | 1,05E-3 |
| 500    | 0,7       | 0,72       | 1,79E+13                  | 1,06          | 5,40E+15                                     | 0,337         | 1,30E-3 |
| 300    | 0,64      | 0,66       | 2,17E+13                  | 0,99          | 4,44E+15                                     | 0,332         | 1,57E-3 |
| 200    | 0,6       | 0,62       | 2,39E+13                  | 0,95          | 4,04E+15                                     | 0,33          | 1,73E-3 |
| 100    | 0,56      | 0,58       | 2,72E+13                  | 0,91          | 3,55E+15                                     | 0,327         | 1,97E-3 |
| 50     | 0,54      | 0,56       | 3,03E+13                  | 0,88          | 3,19E+15                                     | 0,32          | 2,19E-3 |

Tablo 4.2. GP1 Güneş Pili için bulunan  $V_o$ ,  $V_d$ ,  $N_a$ ,  $\Phi_B$ ,  $C_2$ ,  $D_{it}$ ,  $\Phi_F$  değerler

Yine voltaja bağlı olarak elde edilen seri direnç değerleri , arayüzey durumlarının etkin olduğu voltaj bölgelerinde hemen hemen tüm frekanslarda pikin azalan frekansla arttığı gözlemlendi. Literatürde her ne kadar metal ile yarıiletken arasında büyütülen yalıtkan arayüzey tabakasının rolü henüz net bir şekilde aydınlatılmamış olmasına rağmen, yalıtkan SiO<sub>2</sub> tabakasının kalınlığına bağlı olduğu gözlemlendi. Ayrıca yalıtkan tabakanın küçülmesi arayüzey durumlarının yoğunluğunu arttırdığı Hung ve Cheng tarafından da gözlenmiştir. Bu nedenle GP1 numunesinde arayüzey durumlarının büyük çıkması , metal ile yarıiletken arasında büyütülen yalıtkan SiO<sub>2</sub> tabakasının daha ince olduğunu göstermektedir.

İkinci bir pik GP2'ye nazaran daha net gözükmemektedir. Fakat düşük frekanslarda ilk pik kaybolmaktadır. İkinci pik ise her frekansta mevcut olup pik yeri kaymamaktadır. Bu durum da ikinci pikin derin arayüzey tuzaklarından ve durumlarından kaynaklandığı söylenebilir. Birinci pikin ise

daha ziyade yüzeye yakın arayüzey durumlarından kaynaklandığı söylenmektedir.

Şekil 4.2 ve 4.10 da sırasıyla GP2 ve GP1 numuneleri için verilen  $1/C^2-V$  grafiklerinden de görüldüğü gibi 700kHz den daha büyük frekanslarda eğriler bir pik vermektedir. Bu piklerin varlığı arayüzey durumlarının etkisinin kalmadığı yani ilave kapasitansın sıfır olduğuna atfedildi. Benzer durumlar Z. Ouennoughi tarafından [16] gözlenmiştir. Yani artan arayüzey durumlarına paralel olarak seri direnç artmakta ve  $1/C^2 -V$  eğrisinde gözlenen pik keskinleşip yukarı kaymaktadır.





## KAYNAKLAR

1. Biswas, S., and Mansingh, **J.Appl. Phys.**, 25 (1992)
  2. Sze, S.M., **Physics of Semiconductor Devices** (Wiley New York, 1981)
  3. Ulrich, B., and Kuchar, **Thin Solid Film**, 168,157, (1989)
  4. Hadara, S.H., and Mohammed, **Solid State Electron.**, 31,1289 (1988)
  5. Nicollian, E.H., and Brews, **MOS Physics and Technology**,  
(John Willey and Sons, 1982)
  6. Narsale, A.M., and Arora , **Phys. State Sil.(a)** ,95, 743 (1986)
  7. Berglund, C.N., **IEEE Trans. Elect. Dev.** Ed- 13, 701 (1966)
  8. Nicollian, E.H., and Goetzberger., **Bell. System Tech. J.**,46,1055 (1967)
  9. Castagne, R., and Vapaile., **Surface Sci.**, 28,157 (1971)
  10. Kar, S., and Dahlke **Solid State Electron** 15, 221 (1972)
  11. Singh, A., **Solid State Electronics** , 28 (3), 223-232, (1985)
-

12. Nicollian, E.H., MOS (Metal- Oxide- Semiconductor) Physics and Technology, (Wiley New York, 1981)
13. Nicollian, E.H., and Goetzberger., Lopez **Solid State Electron.**, 12,937 (1969)
14. Hung, K., and Cheng **J. Appl. Phys.**, 62 ,4204 (1987)
15. Hung, K., and Cheng **J. Appl. Phys.**, 64 ,950 (1988)
16. Ouennoughi, Z., **Sol. Stat. Phys. (a)** 160,127 (1997)



## ÖZGEÇMİŞ

01/10/1973 tarihinde Sivas'da doğdu. İlk orta ve lise eğitimimi Ankara'da tamamladı. 1991 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 1995 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik bölümüne kaydoldu.

Halen 1996 yılında başladığı öğretmenlik görevine devam etmektedir.



TC MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI  
KURULU  
MÜDÜRLÜĞÜ  
GİZLİ