

## Silisyum İnce Filmlerde Taban Malzemelerin Elektronik Kusurlar Üzerine Etkisinin Belirlenmesi

Gökhan YILMAZ<sup>ORCID</sup>

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü,  
15030, Burdur, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 01.06.2021, Kabul / Accepted: 15.12.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2022)

### Anahtar Kelimeler

Silisyum ince film,  
PECVD,  
Elektronik kusurlar,  
Taban malzeme etkisi

**Özet:** Silisyum ince filmlerin taban malzeme ve üretim koşullarına bağlı olarak kristal hacim oranları değişmektedir. Kristal hacim oranlarındaki bu farklılık ince filmlerin yasak enerji aralığında bulunun elektronik kusur çeşitlerini de etkilemektedir. Silisyum ince filmlerde atmosferik koşullardan ya da uzun süre ışığa maruz kalmalarından kaynaklı olarak elektronik kusurlar oluşmaktadır. Elektronik kusurların değişimine bağlı olarak iletkenlik değerlerinde değişimler oluşmaktadır. Bu çalışmada PECVD tekniği kullanılarak aynı anda üç farklı taban malzeme üzerine silisyum ince filmler büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin kristal hacim oranları Raman Spektroskopisi ile yüzey morfolojileri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile belirlenmiştir. Büyütülen silisyum ince filmler farklı atmosferik koşullara (laboratuvar atmosferi, ışık banyosu ve UV ışık yaşlandırmasına) maruz bırakılarak bilinçli bir şekilde ince filmlerin yapısında elektronik kusurlar oluşturulmuştur. Bu kusurların davranışı elektriksel iletkenlik yöntemleri olan zamana bağlı karanlık iletkenlik, fotoiletkenlik ve mobilite-yaşam süresi hesaplamaları ile incelenmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda taban malzemelerin farklı olmasından kaynaklı malzemelerin kristal hacim oranlarında ve kalınlıklarında belirgin farklılıklar olduğu ve bu farklılıklardan kaynaklı olarak malzemelerin aynı atmosferik koşullarda farklı elektronik kusur durumlarından etkilendikleri belirlenmiştir.

## Determination of the Effect of Substrates on Electronic Defects in Silicon Thin Films

### Keywords

Silicon thin film,  
PECVD,  
Electronic defects,  
Substrate effect

**Abstract:** The crystal volume ratios of silicon thin films vary depending on the substrate material and production conditions. The difference in crystal volume fraction also affects the types of electronic defects in the band gap of thin films. Electronic defects occur in silicon thin films due to atmospheric conditions or prolonged light exposure. Conductivity values changes can occur due to the change of electronic defects. In this study, silicon thin films were grown on three different substrates at the same time using the PECVD technique. The crystal volume ratios and surface morphology of the grown films were determined by Raman Spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) respectively. The grown silicon thin films intentionally were exposed to different atmospheric conditions (such as laboratory atmosphere, light soaking and UV aging) and electronic defects were created in the structure of the thin films. The behavior of these defects were investigated by electrical conductivity methods, which are time dependent dark conductivity, photoconductivity and mobility-lifetime calculations. As a result of the findings, it was determined that there were significant differences in the crystal volume ratios and thicknesses of the materials due to the different base materials, and that the materials were affected by different electronic defect states in the same atmospheric conditions due to these differences.

### 1. Giriş

Yarıiletken ince filmler günümüz elektronik uygulamalarının temelini oluşturmaktadır.

Transistörler, diyotlar, dedektörler, sensörler ve fotovoltaik uygulamalarında silisyum ince filmlerin büyük bir yere sahip olduğu görülmektedir. Özellikle fotovoltaik alanında üretilen silisyum ince filmler

\*İlgili yazar: gyilmaz@mehmetakif.edu.tr

sahip oldukları kristal hacim oranlarına bağlı olarak farklı elektronik davranışlar sergilemektedirler [1,2]. Silisyum ince filmler amorf fazda üretilmeleri durumunda üretilen ince filmlerde kristal hacim oranından bahsetmek mümkün değildir. Silisyum ince filmler nano-kristal ya da mikro kristal fazda üretilmeleri durumunda yapıda hacimsel olarak nano ya da mikro ölçekte kristal adacıklar oluşmaktadır [1,2]. Bu farklı üretim formları silisyum ince filmlerde hem yapısal hem de morfolojik özelliklerin değişimi anlamına gelmektedir. Örneğin amorf fazda üretilen silisyum ince filmler uzun süre ışığa maruz kalmaları durumunda elektronik bozunmaya uğramaktadırlar [3]. Bununla birlikte amorf fazda üretilen silisyum ince film malzemeler atmosferik koşullardan etkilenmemektedir[3,4]. Nano ya da mikro kristal öbeklerine silisyum ince film malzemelerde belirli bir kristal hacim oranının üzerine çıkılması ile (%10-%15) Stabler-Wronski etkisi ortadan kalktığı görülmektedir[2,4,5,13-15].

Buna karşın yapısında nano ya da mikro kristal yapılar barındıran ve belirli bir ~%10'in üzerinde kristal hacmine sahip silisyum ince filmler atmosferik koşullardan etkilenmekte ve elektronik bozunma yaşamaktadır.[4,6,13,14,16-21]. Nano ya da mikro kristal silisyumlarda oluşan bu elektronik bozunmalar tamamen geri dönüşümlü olabildiği gibi kısmi ya da tamamen geri dönüşümsüz etkiler de oluşturduğu literatüre rapor edilmiştir[6,13,14,19,20,22,26-29].

Silisyum ince film üretim yöntemleri arasında bulunan Plazma Destekli Kimyasal Buhar Fazdan Büyütme (Plazma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)) sistemleri ile üretilen silisyum ince filmler elektronik kusur oranı en az olan ince filmlerdir [30]. PECVD sistemi ile üretilen silisyum ince film malzemelerde kristal hacim oranını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan birkaçı sıralanması gerekirse, ince film üretim hızı, üretim sistemine uygulanan güç, üretim elektrotları arasındaki mesafe, üretim odasına gönderilen silan-hidrojen oranı (Silan konsantrasyonu (SC)), taban malzeme sıcaklığı, üretim için bir çekirdek nano alt tabakanın kullanılıp kullanılmaması, üretim gazlarının reaksiyon odasındaki basıncı, plazmanın pachen eğrisinin hangi bölgesinde kaldığı ve belki de en önemlilerinden biri taban malzemenin yüzey morfolojisidir. Bütün bu parametreler üretilen ince filmlerin ya da güneş hücrelerinin elektronik kusur durumunu etkilemektedir [31-33].

Bu çalışmada üç farklı taban malzeme (plastik (Polyimide film), pürüzlü cam ve pürüzsüz cam) üzerine PECVD sistemi kullanılarak aynı anda ~600nm kalınlığında nano-kristal, mikrokristal silisyum ince filmler üretilmiştir. Üretilen silisyum ince filmlerin sahip oldukları kristal hacim oranları Raman spektrometresi ile ölçülmüştür. İnce filmlerin kalınlıkları profilometre ile belirlenmiştir. Üretilen silisyum ince filmler arasında atmosferik koşullara

bağlı olarak iletkenlik değerlerindeki değişim, taban malzemeler ile kristal hacim oranı arasındaki ilişki ve kristal hacim oranı ile elektronik kusur durumları arasındaki ilişki mobilite-yaşam süresi çarpımları karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Nano-kristal silisyum ince filmler Almanya'nın Jülich araştırma merkezinde PECVD sistemi ile üç farklı taban malzeme üzerine, 94.7Mhz frekansla, %5 SC'da, elektrotlar arasındaki mesafe 8mm olacak şekilde, 2.1mBar üretim gaz basıncı altında, 0.49nm/dak. üretim hızında üretilmişlerdir. Yukarıda bahsi geçen parametreler üretim optimizasyonu ve homojenlik kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Öyle ki bahsi geçen parametreler ile yapılan ön çalışmalarda 10cm x 10cm pürüzsüz cam taban malzemesi üzerine yapılan büyütmelelerde köşeler ile merkez arasındaki kalınlık farkı %5'den azdır. Buna ek olarak köşeler ile merkez arasındaki kristal hacim oranı farkı %7'den az olarak belirlenmiştir.

Üretilen filmlerin kristal hacim oranları Raman spektrometresi ile kalınlıkları ise Dektak Profilometresi ile ölçülmüştür. İnce filmlerin kristal hacim oranları ve kalınlıkları tablo1'de sunulmuştur. Buna göre tablo 1'de görüleceği üzere pürüzlü taban malzeme %29.5, pürüzsüz malzeme %34.5 ve plastik taban malzeme %33,8 kristal hacim oranına sahiptir. Üretilen filmlerin kalınlıkları, pürüzlü taban malzeme için 610nm, pürüzsüz ve plastik taban malzeme için 590nm olarak belirlenmiştir. Üretilen ince filmler üzerine eş yüzeyli metal kontaklar termal buharlaştırma sistemi ile 700nm olacak şekilde atılmıştır. Metal kontaklar arasındaki mesafe 0.05cm, metal kontakların boyu ise 0.5cm'dir.

**Tablo 1.** Silisyum ince filmlerin yapısal özellikleri.

Malzeme Kodu	Kristal Hacim Oranı (%)	Kalınlık (nm)
11C453-P (P: Plastik (Plastik))	33.8	590
11C453-S (S:Smooth (Pürüzsüz))	34.5	590
11C453-R (R: Rough (Pürüzlü))	29.5	610

Üretilen silisyum ince filmlerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiştir. Silisyum ince filmlerin elektriksel ölçümleri Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Nanomalzemeler ve Optoelektronik (Nano-OP) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elektriksel ölçümler sırası ile I-V, zamana bağlı karanlık iletkenlik, sıcaklığa bağlı karanlık iletkenlik ve ışık akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümlerini içermektedir. Silisyum malzemelerde var olan elektronik kusur durumlarına ek olarak UV yaşlandırma ve ışık banyosu uygulamaları gerçekleştirilerek elektronik kusur durumlarında değişiklik yaratılmış ve bu değişikliklerin geri dönüşümlü olup olmadığı belirlenmiştir.

Silisyum ince filmlerin mobilite-yaşam süresi ( $\mu\tau$ ) çarpımları ışık akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak kararlı durum fotoiletkenlik denklem 1'deki gibi ifade edilebilir[34].

$$\sigma_{(ph)}(G) = q\mu_n\tau_n G + q\mu_p\tau_p G \quad (1)$$

Silisyum ince film malzemelerin yasak enerji aralığında mevcut elektronik kusurların dağılımlarının asimetric olmasından ve buna ek olarak değerlik bant ucuna yakın elektronik kusurların daha geniş ve yüksek yoğunluklara sahip olmasından dolayı serbest elektron ve boşluklar için  $\mu_n\tau_n \gg \mu_p\tau_p$  olduğu bilinmektedir. Bu nedenle fotoiletkenlik sadece elektronların baskın olduğu tek tip yük taşıyıcılardan oluşmaktadır. Buna bağlı olarak denklem 1, denklem 2 şeklinde özetlenebilir.

$$\sigma_{(ph)} \approx q\mu_n\tau_n G \quad (2)$$

Denklem 2'de  $\mu_n\tau_n$  ifadesi yalnız bırakılırsa ısı yük taşıyıcısı yaratma oranı ve fotoiletkenlik ölçümüne bağlı bir denklem elde edilmiş olur. Bu ifade denklem 3'de detaylı olarak gösterilmiştir.

$$\mu_n\tau_n = \sigma_{(ph)}/qG \quad (3)$$

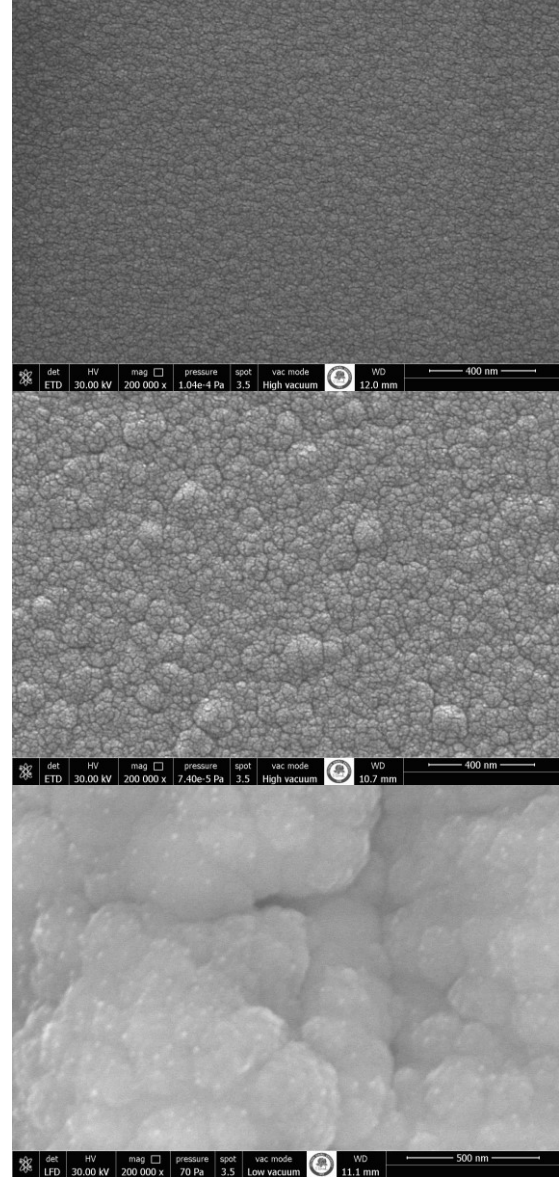
Denklem 3'de fotoiletkenlik ifadesi ve ısı yük taşıyıcısı yaratma oranı deneysel olarak ölçülebilen parametrelerdir. Elementel yük  $q$  ise bir sabit olduğundan dolayı mobilite-yaşam süresi çarpımı deneysel olarak belirlenebilmektedir.

### 3. Bulgular

Üretilen silisyum ince filmlerin yapısal analizlerinden yüzey morfolojisi ölçümleri taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiş ve şekil 1'de elde edilen bulgular sunulmuştur. Burada amaç farklı taban malzemelerin sahip oldukları farklı yüzey morfolojilerine bağlı olarak ince filmlerin büyümesindeki değişimler belirlenmeye çalışılmıştır. Üç farklı taban malzemeye ait ince film silisyum malzemeler aynı anda üretildikleri için üretim koşullarında herhangi bir farklılık bulunmamaktadır. Bu nedenle yüzeylerde gözlemlenen morfolojik değişimler tamamen taban malzemedeki kaynaklı olarak oluşmaktadır.

Şekil 1'de 200.000 büyütme faktörü ile esnek, pürüzsüz ve pürüzlü taban malzemeler üzerine büyütülen silisyum ince filmlerin görüntüleri sunulmuştur. Şekil 1'de görüleceği gibi esnek taban malzeme üzerine büyütülen ince filmin yapısında daha küçük öbekler oluşurken bu öbeklenme taban malzemenin pürüzsüz olması ile büyümekte ve pürüzlü taban malzeme de ise en büyük halini almaktadır. Bu durum aynı zamanda esnek malzemenin daha sıkı (compact) bir yüzey morfolojisine sahip olmasını sağlarken pürüzlü taban malzemedeki daha gözenekli (porous) bir yüzey

morfolojisinin oluşmasını sağlamaktadır. Böylesi bir durumda farklı atmosferik gazların yüzeye tutunabilmesi için daha geniş bir yüzey alanı oluşturduğu anlaşılmaktadır.

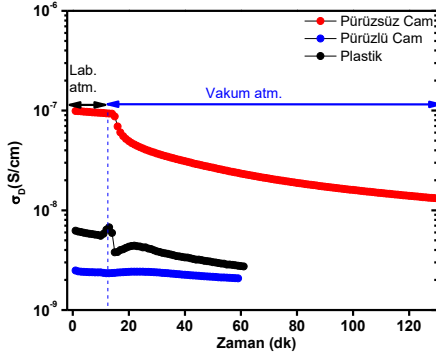


**Şekil 1.** Silisyum ince filmlerin 200.000 büyütme SEM görüntüleri yukarıdan aşağıya doğru sırayla esnek taban malzeme, pürüzsüz taban malzeme, pürüzlü taban malzeme

Silisyum ince filmler ilk olarak laboratuvar atmosferinde karanlık ortamda I-V ölçümleri alınarak Ohmik gerilimleri belirlenmiştir. Akabinde Ohmik gerilim altında laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişleri sırasında zamana bağlı karanlık iletkenlik verileri kayıt altına alınmıştır. Bu şekilde malzemelerden laboratuvar atmosferinden kaynaklı bir iletkenlik değişimi olup olmadığı belirlenmiştir. Şekil 2'de her üç taban malzemenin de laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişleri sırasında elde edilen karanlık iletkenlik değerleri sunulmuştur.

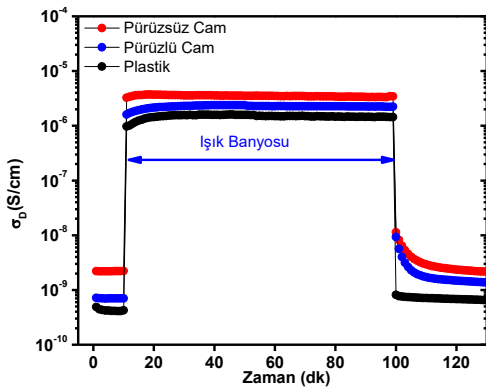
Her üç malzeme de laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişleri sırasında karanlık iletkenlik değerlerinde belirgin bir azalma oluşmaktadır. Bu üç

malzeme arasında laboratuvar atmosferinden en çok etkilenen malzeme ise pürüzsüz cam taban üzerine büyütülen silisyum ince film olduğu net olarak görülmektedir. Pürüzlü ve plastik taban malzeme üzerine büyütülen filmler 60 dakikada kararlı bir iletkenlik seviyesine gelirken pürüzsüz cam taban üzerine büyütülen film 130 dakikada kararlı iletkenlik seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 2. Silisyum ince filmlerin laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişleri sırasındaki karanlık iletkenlik değişim grafiği

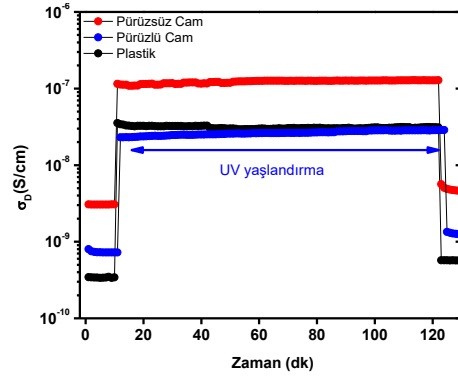
Malzemeler vakum ortamında kararlı iletkenlik seviyelerine ulaştıktan sonra ısıtılarak 450K dereceye kadar çıkarılmış ve 450K'de 30 dakika ısıl işleme (ısıl işlem-1) tabii tutulmuştur. Malzemelere ısıl işlem uygulamasından sonra 300K'e kadar kontrollü bir şekilde soğutulmuştur. Şekil 3'de ısıl işlem-1 uygulamasından sonra 300K'de, vakum ortamında A.M.1.5 ışık şiddeti altında ışık banyosu uygulaması gerçekleştirilen elde edilmiş zamana bağlı iletkenlik verileri sunulmuştur. Işık banyosu uygulaması süresince her üç malzemenin de iletkenlik seviyesi yaklaşık olarak 1000 katlık bir artış sergilemiştir. Işık banyosunun tamamlanmasının ardından malzemelerin karanlık iletkenlik değerlerine bakıldığında ise pürüzsüz ve plastik taban malzeme üzerine büyütülen filmlerde bir değişim olmazken pürüzlü taban malzeme üzerine büyütülen filmde yaklaşık iki katlık bir artış olduğu görülmektedir.



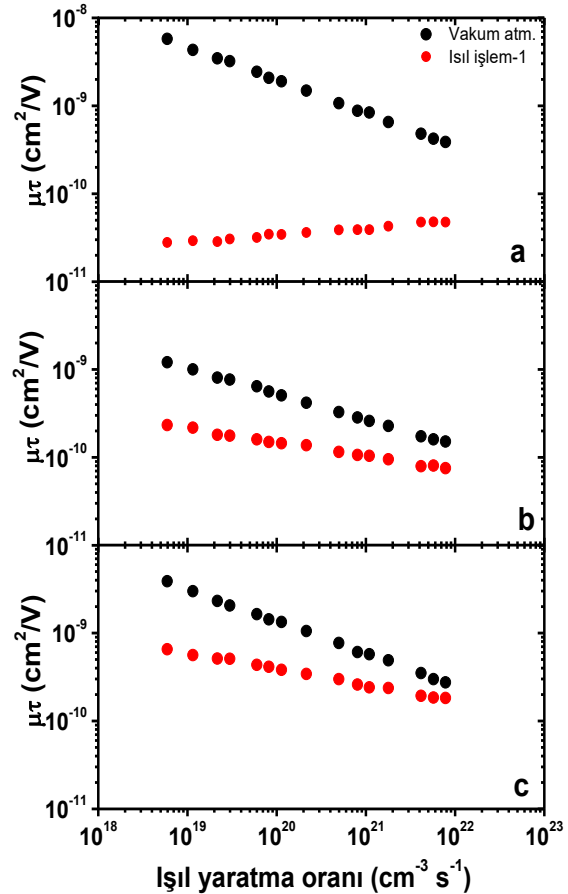
Şekil 3. Silisyum ince filmlerin ışık banyosu altındaki karanlık iletkenlik değişim grafiği

Işık banyosunun ardından malzemeler birinci ısıl işlemle aynı prosedür uygulanarak ikinci ısıl işleme (ısıl işlem-2) tabii tutulmuştur. Isıl işlem-2 sonrası

300K'de malzemeler daha yoğun ve hızlı bir yaşlandırma prosedürü olan UV ışık altında hızlı yaşlandırma uygulamasına tabii tutulmuştur. Şekil 4'de UV hızlı yaşlandırma uygulaması sırasında malzemenin karanlık iletkenlik değişim grafiği sunulmuştur. UV yaşlandırma uygulaması sonrası bütün malzemelerin karanlık iletkenlik değerleri yaklaşık olarak iki katlık bir artış sergilemiştir. UV yaşlandırmanın ardından malzemeler son bir defa daha ısıl işleme (ısıl işlem-3) tabii tutulmuş ve atmosferik ortam ölçümleri tamamlanmıştır. Malzemelerin her yaşlandırma uygulamasından sonra ve ısıl işlemlerden sonra ışık akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri alınmıştır.



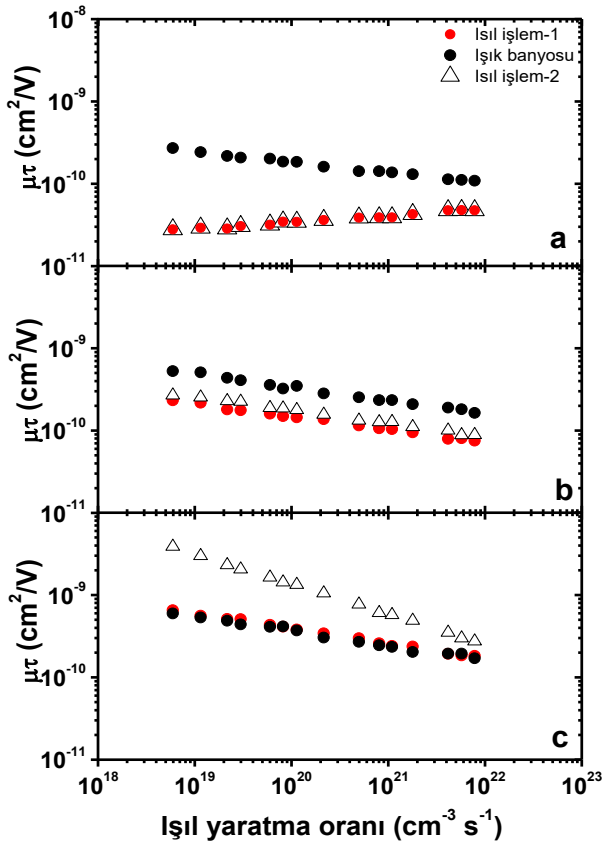
Şekil 4. Silisyum ince filmlerin UV yaşlandırma altındaki karanlık iletkenlik değişim grafiği



Şekil 5. Silisyum ince filmlerin laboratuvar atmosferinde yaşlanmış ve ısıl işlem-1 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımına karşılık ışık yaratma oranı grafiği a) Plastik, b) Pürüzlü cam, c) Pürüzsüz cam taban malzeme.

Fotoiletkenlik ölçümlerinden malzemelerin mobilite-yaşam süresi çarpımı ifadeleri hesaplanmıştır. Şekil 5'de her üç malzeme için de laboratuvar atmosferinde yaşanmış vakum ortamında ve ısıtım işlem-1 uygulamasından sonra elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımına karşı ışıl yaratma oranı grafikleri sunulmuştur.

Şekil 5'de görüleceği gibi her üç malzemede de ısıtım işlem-1 uygulaması sonrası malzemelerin düşük ışıl yaratma oranlarında ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri belirgin bir şekilde (yaklaşık 10 kat) azalma oluşurken, yüksek ışıl yaratma oranı bölgesinde ( $10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu durum ısıtım işlem-1 uygulaması ile malzemelerin elektronik kusur durumlarında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak plastik taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince filmde bu ekti düşük ışıl yaratma oranlarında ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri yaklaşık 100 kat azalma çok daha net olarak görülmektedir. Yüksek ışıl yaratma oranı bölgesinde ( $10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri birbirine yaklaşıp da yine de aradaki fark yaklaşık olarak 10 katlıktır.



Şekil 6. Silisyum ince filmlerin ısıtım işlem-1, ışık banyosu ve ısıtım işlem-2 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımına karşılık ışıl yaratma oranı grafiği a) Plastik, b) Pürüzlü cam, c) Pürüzsüz cam taban malzeme.

Malzemeler ısıtım işlem-1 uygulaması sonrası ışık banyosuna maruz bırakılmış ve akabinde ısıtım işlem-2 uygulaması gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da her üç malzemeye ait ısıtım işlem-1, ışık banyosu ve ısıtım işlem-2 sonrası elde edilen  $\mu\tau$  çarpımı ışıl yaratma oranı

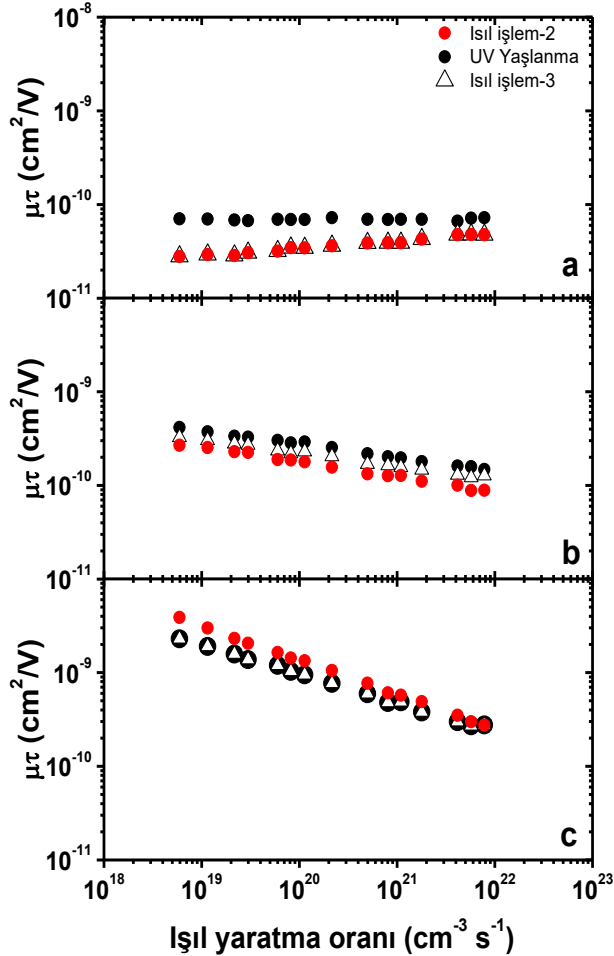
grafiki sunulmuştur. Plastik ve pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülen ince filmlerde ışık banyosu sonrası  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinde belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Bu artışın oranı plastik taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince film için düşük ışıl yaratma oranlarında ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri yaklaşık 10 kat olurken yüksek ışıl yaratma oranı bölgesinde ( $10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri yaklaşık 3 kattır. Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince filmdeki artış ise hem düşük hem de yüksek ışıl yaratma oranlarında  $\mu\tau$  çarpımı değerleri yaklaşık 3 kattır. Pürüzsüz cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince film malzemede ise ışık banyosu sonrası  $\mu\tau$  çarpımı ısıtım işlem-1 değerleri ile örtüşmektedir.

Işık banyosu uygulaması sonrası gerçekleştirilen ısıtım işlem-2 uygulaması ile malzemelerde ışık banyosundan kaynaklı geri dönüşümlü/ geri dönüşümsüz ya da kısmi geri dönüşümlü bir etki oluşup oluşmadığı belirlenmiştir. Şekil 6 (a) 'da görüleceği gibi ısıtım işlem-2 uygulaması sonrası  $\mu\tau$  çarpımı değerleri ısıtım işlem-1 değerleri ile örtüşmektedir. Yani ışık banyosu bu malzemede tamamen geri dönüşümlü bir etki oluşturmaktadır. Şekil 6 (b) 'de ise ısıtım işlem-2 uygulaması sonrası  $\mu\tau$  çarpımı değerleri kısmi olarak ısıtım işlem-1 değerlerine yaklaşmıştır. Bu durum kısmi geri dönüşümlü bir etki oluşturulduğunu göstermektedir. Ancak pürüzsüz cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince film malzemede ısıtım işlem-2 uygulaması sonrası  $\mu\tau$  çarpımında yaklaşık 10 katlık keskin bir artış görülmektedir. Bu durum pürüzsüz cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince filmlerde ısıtım işlem-2 uygulaması ile elektronik kusur yoğunluğunda belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir.

Isıtım işlem-2 uygulaması sonrası malzemeler UV yaşlandırma uygulamasına tabii tutulmuştur. Şekil 7'de her üç malzeme için ısıtım işlem-2, UV yaşlandırma ve ısıtım işlem-3 sonrası elde edilen  $\mu\tau$  çarpımı verileri sunulmuştur. UV yaşlandırma uygulaması sonrası plastik ve pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince filmlerin  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinde ışık banyosu kadar olmasa da bir artış belirlenmiştir. Özellikle plastik taban üzerine büyütülen malzemede  $\mu\tau$  çarpımı davranışının değiştiği görülmektedir. Işık banyosu uygulaması sonrası düşük ışıl yaratma oranlarında ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerleri 10 kat artarken yüksek ışıl yaratma oranı bölgesinde ( $10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinin 3 kat arttığı belirlenmiştir. Ancak aynı malzemede UV yaşlandırması sonrası ısıtım işlem-2'ye göre bu oran hem yüksek hem de düşük ışıl yaratma oranında yaklaşık 3 kat olarak gözlemlenmiştir. Üçüncü ısıtım işlem sonrası elde edilen  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinin ısıtım işlem-2 ile birebir örtüştüğü yani tamamen geri dönüşümlü bir etki olduğu görülmektedir. Pürüzlü cam taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince film malzemede hem düşük hem de yüksek ışıl yaratma oranında UV



yaşandırmadan kaynaklı  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinde ısıtım işlem-2'ye göre yaklaşık 2 katlık bir artış olmaktadır. Üçüncü ısıtım işlem uygulaması sonrası elde edilen  $\mu\tau$  çarpımı değerleri ise UV yaşlandırma ile ısıtım işlem-2 arasında kalmaktadır. Bu durum yine kısmi geri dönüşümlü bir etkinin oluştuğunu göstermektedir. Pürüzsüz cam taban üzerine büyütülen malzemede ise UV uygulaması sonrası ısıtım işlem-2'ye göre  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinde yaklaşık 2 katlık bir azalma belirlenmiştir. Bu azalma ısıtım işlem-3 ile değişmemiş ve aynı değerler korunmuştur. Bu durum UV yaşlandırmanın tamamen geri dönüşümsüz bir etkinin oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 7. Silisyum ince filmlerin ısıtım işlem-2, UV yaşlandırma ve ısıtım işlem-3 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımına karşılık ısıtım yaratma oranı grafiği a) Plastik, b) Pürüzlü cam, c) Pürüzsüz cam taban malzeme.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen bulgular ışığında farklı taban malzemeler üzerine büyütülen silisyum ince filmlerde üç farklı atmosferik koşul uygulanarak malzemelerde oluşan elektronik kusur değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre aynı anda üretim olmasına rağmen pürüzlü taban malzemede plastik ve pürüzsüz taban malzemelere kıyasla daha düşük kristal hacim oranında ince film üretilmektedir. Literatürdeki bilgiler ile elde edilen bulgular örtüşmektedir[1,2]. Pürüzlü taban malzemede daha düşük bir kristal

hacim oranının olmasının nedeni taban malzemenin sahip olduğu pürüzlülüğünden kaynaklı olarak silisyum atomlarının üretim sürecinde düzgün bir dizilime sahip olamamasıdır. Üretilen ince filmlerin kalınlıkları ve kristal hacim oranları birbirlerine yakın olsa da taban malzemelerinin yüzey morfolojisinden kaynaklı olarak malzemelerin atmosferik koşullardan etkilenme mekanizmaları değişiklik göstermektedir. Benzer şekilde malzemelerin karanlık iletkenlik değerlerinde özellikle laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişlerinde belirgin değişiklikler görülmektedir. Bu değişikliklerin temel nedeni laboratuvar atmosferinde iken malzemelerin yüzeyine tutunan atmosferik gazlardır[18,26,29]. Malzemelerin vakuma alınması ile yüzeye tutunan bu moleküller yüzeylerden uzaklaşmakta ve iletkenlik değerlerinde belirgin değişiklikler oluşturmaktadır.

Silisyum ince filmlerin taban malzeme ve atmosferik koşullara bağlı olarak  $\mu\tau$  çarpımı değerleri karşılaştırıldığında ise taban malzemenin önemi bir kez daha anlaşılmaktadır. Öyle ki laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişte plastik taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince film malzemede  $\mu\tau$  çarpımı değerleri 100 kata varan azalma göstermektedir. Bu azalma malzemede oluşan elektronik kusur seviyesinde ve çeşidindeki azalmayı işaret etmektedir. Ancak pürüzlü ve pürüzsüz malzemelerde bu etki 10 kat seviyesinde sınırlıdır. Işık banyosu uygulaması ile  $\mu\tau$  çarpımı değerleri en çok plastik taban malzeme üzerine büyütülen ince filmde artmıştır. Bununla birlikte plastik taban malzeme üzerine büyütülen silisyum ince filmlerde bu etkiler tamamen geri dönüşümlü olarak gözlemlenmiştir. Pürüzlü cam taban malzeme üzerine uygulanan atmosferik etkiler sonucu  $\mu\tau$  çarpımı değerleri arttırsa da bu artışlar kısmi geri dönüşümlü olarak gözlemlenmektedir. Pürüzsüz cam taban malzeme üzerine uygulanan ısıtım işlem-2 sonrası  $\mu\tau$  çarpımı değerleri belirgin olarak artmaktadır. Bu artışın temeli ısıtım işlem uygulaması sonrası ışık banyosundan kaynaklı malzemenin yasak enerji aralığında oluşan elektronik kusurların azalması şeklinde yorumlanabilir. Her üç malzemede de UV uygulaması ile  $\mu\tau$  çarpımı değerleri ışık banyosu ile benzer davranış sergileyerek artış gösterse de plastik taban malzemede tamamen geri dönüşümlü, pürüzlü taban malzemede kısmi ve pürüzsüz taban malzemede geri dönüşümsüz etkiler oluşturmaktadır. Literatürde silisyum ince filmlerin ısıtım işlem öncesinde ve sonrasında atmosferik koşullara bağlı olarak  $\mu\tau$  çarpımı değerlerinde değişim olduğu rapor edilmiştir [25].

Sonuç olarak, aynı anda ve tamamen birebir üretimler olmuş olsa dahi taban malzemeler sahip oldukları farklı yüzey morfolojilerinden dolayı ince filmlerin kristal hacim oranlarını, kalınlıklarını, yüzey morfolojilerini etkilemektedir. Bu etkiler sonucu ince filmlerin yüzey alanları değişmekte ve buna bağlı olarak atmosferik gazlarla etkileşimleri de

değişmektedir. Taban malzemeden kaynaklı olarak kristal hacim oranlarının değişmesi malzemelerin yasak enerji bölgesinde sahip oldukları elektronik kusur yoğunluklarını ve çeşitlerini etkilemektedir. Elektronik kusur durumlarındaki bu farklılık malzemelerin farklı atmosferik koşullara maruz bırakılması ile daha belirgin olarak gözlemlenebilmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışmada doktora sonrasında da laboratuvar imkânlarını açtıklarından dolayı Jülich Araştırma Merkezine teşekkür ederim. Buna ek olarak akademik katkıları ve keyifli akademik sohbetleri için Dr. Friedhelm FINGER'a ve Dr. Vladimir SMIRNOV'a teşekkürü bir borç bilirim.

### Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

*Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.*

### Kaynakça

- [1] Houben, L., Luysberg, M., Hapke, P., Carius, R., Finger, F., Wagner, H. 1998. Structural Properties Of Microcrystalline Silicon In The Transition From Highly Crystalline To Amorphous Growth. *Philos. Mag. A Phys. Condens. Matter, Struct. Defects Mech. Prop.*, 77 (6) 1447–1460.
- [2] Vetterl, O., Finger, F., Carius, R., Hapke, P., Houben, L., Kluth, O., Lambert, A., Mück, A., Rech, B., Wagner, H. 2000. Intrinsic Microcrystalline Silicon: A New Material For Photovoltaics. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 62 97–108.
- [3] Staebler, D, L., Wronski, C, R., 1977. Reversible Conductivity Changes In Discharge-Produced Amorphous Si. *Appl. Phys. Lett.*, 31 292-294.
- [4] Güneş, M., Wronski, C, R., 1997. Differences In The Densities Of Charged Defect States And Kinetics Of Staebler-Wronski Effect In Undoped (Nonintrinsic) Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Films. *J. Appl. Phys.*, 81 3526-3536.
- [5] Veprek, S., Iqbal, Z., Kuhne, R, O., Capezzuto, P., Sarott, F., Gimzewski, J, K. 1983. Properties of microcrystalline silicon. Iv. Electrical conductivity, electron spin resonance and the effect of gas adsorption. *J. Phys. C Solid State Phys.*, 16 6241–6262.
- [6] Stutzmann, M., Jackson, W., Tsai, C. 1985. Light-Induced Metastable Defects In Hydrogenated Amorphous Silicon: A Systematic Study. *Phys. Rev. B*, 32 23–47.
- [7] Kočka, J., Vaněček, M., Trýska, A. 1989. Energy And Density Of Gap States In a-Si:H. *Amorphous Silicon and Related Materials vol A*, 297–327.
- [8] Curtins, H., Favre, M. 1989. Surface And Bulk States Determined By Photothermal Deflection Spectroscopy. *Amorphous Silicon and Related Materials vol A*, 329–363.
- [9] Street, R, A. 1991. *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge: Cambridge University Press 417s.
- [10] Vaněček, M., Kočka, J., Poruba, A., Fejfar, A. 1995. Direct Measurement Of The Deep Defect Density In Thin Amorphous Silicon Films With The "Absolute" Constant Photocurrent Method. *J. Appl. Phys.*, 78 6203-6210.
- [11] Vaněček, M., Poruba, A., Remeš, Z., Beck, N., Nesládek, M. 1998. Optical Properties Of Microcrystalline Materials. *J. Non. Cryst. Solids*, 227–230 967–972.
- [12] Vaněček, M., Poruba, A., Remeš, Z., Rosa, J., Kamba, S., Vorlíček, V., Meier, J., Shah, A. 2000. Electron Spin Resonance And Optical Characterization Of Defects In Microcrystalline Silicon. *J. Non. Cryst. Solids*, 266–269 519–523.
- [13] Güneş, M., Cansever, H., Yılmaz, G., Smirnov, V., Finger, F., Brüggemann, R. 2012. Metastability Effects In Hydrogenated Microcrystalline Silicon Thin Films Investigated By The Dual Beam Photoconductivity Method. *J. Non. Cryst. Solids* 358 2074–2077.
- [14] Saleh, Z, M., Nogay, G., Ozkol, E., Yılmaz, G., Sagban, M., Gunes, M., Turan, R. 2014. Atmospheric Aging And Light-Induced Degradation Of Amorphous And Nanostructured Silicon Using Photoconductivity And Electron Spin Resonance. *Can. J. Phys.* 92 713–717.
- [15] Yılmaz, G., Cansever, H., Sagban, H, M., Güneş, M., Smirnov, V., Finger, F., Brüggemann, R. 2014. Reversible And Irreversible Effects After Oxygen Exposure In Thick (>1 Mm) Silicon Films Deposited By Vhf-Pecvd On Glass Substrates Investigated By Dual Beam Photoconductivity. *Can. J. Phys.* 92 778–782.
- [16] Güneş, M., Turan, E., Yılmaz, G. 2009. Investigation of Meta- and In-stability Effect in Thin Film Silicon Materials Using Intensity and Temperature Dependence of Photoconductivity. *J. Optoelectron. Adv. M. symposia*, vol. 1,202–205.
- [17] Yılmaz, G., Turan, E., Güneş, M., Smirnov, V., Finger, F., Brüggemann, R. 2010. Instability Effects In Hydrogenated Microcrystalline

- Silicon Thin Films. Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics 7 (3-4), 700-703.
- [18] Dylla, T., Finger, F., Carius, R. 2003. Adsorption and Oxidation Effects in Microcrystalline Silicon. MRS Proc. 762 A2.5
- [19] Cansever, H., Günes, M., Yılmaz, G., Sagban, H, M., Smirnov, V., Finger, F., Brüggemann, R. 2014. Investigation Of Metastability And İnstability Effects On The Minority Carrier Transport Properties Of Microcrystalline Silicon Thin Films By Using The Steady-State Photocarrier Grating Technique. Can. J. Phys. 92 763-767.
- [20] Yılmaz, G., Cansever, H., Sagban, H, M., Günes, M., Smirnov, V., Finger, F., Brüggemann, R. 2014. Reversible And İrreversible Effects After Oxygen Exposure İn Thick (>1 Mm) Silicon Films Deposited By Vhf-Pecvd On Glass Substrates İncıgated By Dual Beam Photoconductivity. Can. J. Phys. 92, 778-782.
- [21] CANSEVER, H. 2012. *Mikro Kristal Silisyum İnce Film Malzemelerde Yaşlandırma İşlemlerinin Malzemenin Optoelektronik Özelliklerine Etkisi* Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 142s, Muğla.
- [22] Turan, E., Yılmaz, G., Smirnov, V., Finger, F., Günes, M. 2012. Rapid Reversible Degradation Of Silicon Thin Films By A Treatment İn Water. Jpn. J. Appl. Phys. 51,070210-3p.
- [23] Astakhov, O., Carius, R., Petrusenko, Y., Borysenko, V., Barankov, D., Finger, F. 2012. The Relationship Between Hydrogen and Paramagnetic Defects in Thin Film Silicon Irradiated with 2 mev Electrons. J. Phys. Condens. Matter 24 305801 8p.
- [24] Persheyev, S, K., Smirnov, V., O'Neill, K, A., Reynolds, S., Rose, M, J. 2005. Atmospheric Adsorption Effects İn Hot-Wire Chemical-Vapor-Deposition Microcrystalline Silicon Films With Different Electrode Configurations. Semiconductors 39 343-346.
- [25] Souffi, N., Bauer, G, H., Brüggemann, R. 2006. Study Of Metastabilities İn Microcrystalline Silicon Films By Photoconductivity Techniques. Thin Solid Films 501 129-132.
- [26] Finger, F., Carius, R., Dylla, T., Klein, S., Okur, S., Günes, M. 2003. Stability of Microcrystalline Silicon for Thin Film Solar Cell Applications. IEE Proc. - Circuits, Devices Syst. 150 300-308.
- [27] Lim, T, H. 2014. New Findings and Interpretation on Atmospheric Adsorption Induced İnstability in Microcrystalline Silicon Films Int. J. Mater. Sci. Appl. 3 100-105.
- [28] Phinikarides, A., Kindyni, N., Makrides, G., Georghiou, G, E. 2014. Review Of Photovoltaic Degradation Rate Methodologies Renew. Sustain. Energy Rev. 40 143-152.
- [29] Finger, F., Carius, R., Dylla, T., Klein, S., Okur, S., Günes, M. 2005. İnstability Phenomena İn Microcrystalline Silicon Films J. Optoelectron. Adv. M. 7 83-90.
- [30] Müller, J., Finger, F., Carius, R., Wagner, H. 1999. Electron Spin Resonance İncıgation Of Electronic States İn Hydrogenated Microcrystalline Silicon. Phys. Rev. B 60 11666-11677.
- [31] Signh. K., Mrutyunjay. N., Dipak. S. K., Vamsi. K.K. 2021. Degradation Study of Carrier Selective Contact Silicon Solar Cells with Ageing: Role of Silicon Surface Morphology. Solid State Electronics 179 107987.
- [32] Han. C. 2020. Analysis of Moisture Induced Degradation of Thin-film Photovoltaic Module. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 210. 110488
- [33] Elkhamisy, K.M., Abdelhamid, H., Elagoos, S., El-Rabaie, E. 2021. The Effect of Temperature Variance with Different Surface Shape on Efficiency of Silicon Thin Film Solar Cell. Opt.Quant.Electron. Underreview.
- [34] Bube R.H. 1960. Photoconductivity of Solids. JOHN WILEY & SONS Inc., NewYork-London 492s.