



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Gaz Akış Hızının Fiziksel Buhar İletimi Yöntemiyle Büyütülen Antrasen Tek Kristallerin Özellikleri Üzerine Etkisi

 Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK ^{a,*},  Selen POLAT ^a

^a Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ckirbiyik@ktun.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.765025

ÖZET

Elektronik cihazlar uygulamalarında kullanılan organik yarıiletkenlerin moleküler yapıları ve düzenlilikleri cihaz performansı üzerinde oldukça önemli özelliklerdir. Bu çalışmada, elektronik cihazlarda sıklıkla tercih edilen antrasenin fiziksel buhar iletimi (PVT) yöntemiyle büyük boyutlu ve yüksek moleküler düzene sahip tek kristalleri büyütülmüştür. Açık sistem PVT yönteminde kullanılan argon gazının akış hızının büyütülen tek kristallerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Büyütülen tek kristaller optik mikroskop, AFM, XRD ve UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Yapısal ve optik analizler sonucunda gaz akış hızının kristal özellikleri üzerinde büyük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. 3,0 L sa⁻¹ argon akış hızında büyütülen antrasen tek kristallerinin en ince (670 nm) ve en yüksek elektriksel iletkenlik değerine (1,80x10⁻⁴ S cm⁻¹) sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma, yüksek performanslı elektronik cihazlarda kullanılacak organik yarıiletken tek kristallerinin özelliklerinin gaz akış hızı ile değiştirilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Antrasen, Tek kristal büyümesi, PVT, Optik özellikler

The Effect of Gas Flow Rate on Properties of Anthracene Single Crystals Grown by Physical Vapour Transport Method

ABSTRACT

Molecular structure and ordering of organic semiconductors used in electronic devices are the key parameters on device performance. In this study, anthracene single crystals with large size and high quality, which is one of most widely used organic semiconductor, were growth by open physical vapour transport (PVT) process. The effect of inert argon flow rate used in open PVT method on structural, optical and electrical properties of anthracene single crystals was investigated. The single crystals were characterized by optical microscope, AFM, XRD and UV-Vis absorption spectroscopy. According to structural and optical properties, it was observed that the argon flow rate has a strong effect on single crystal properties. It was determined that the thinnest (670 nm) single crystal and the highest electrical conductivity (1.80x10⁻⁴ S cm⁻¹) were obtain under 3.0 L h⁻¹ argon flow rate. Herein, it was concluded that the properties of organic semiconductor single crystals utilized in high performance electronic devices could be easily tuned.

Keywords: Anthracene, Single crystal growth, PVT, Optical properties

I. GİRİŞ

Organik yarı iletkenler temel olarak zayıf van der Waals kuvvetleriyle bağlanmış π -konjuge sistemlerdir. Polimerler ve küçük moleküller olmak üzere iki ana gruba ayrılan organik yarı iletkenler benzersiz fizikokimyasal özellikleri dolayısıyla optik ve elektronik cihaz uygulamalarında oldukça dikkat çekmektedirler. Bu malzemelerin esnek yapıları ve geniş yüzeylere kolaylıkla uygulanabilmelerinin yanında az maliyetli olmaları geleneksel yarı iletkenlerin yerini doldurabileceğini göstermiştir. Ayrıca organik yarı iletkenlerin uygulamaya özgü sentezlenebilmeleri, çözelti süreçleri, vakum buharlaştırma ya da baskı teknolojileriyle ince film olarak kaplanabilmeleri sayesinde elektronik cihazların üretiminde büyük kolaylıklar sağlamaktadır [1].

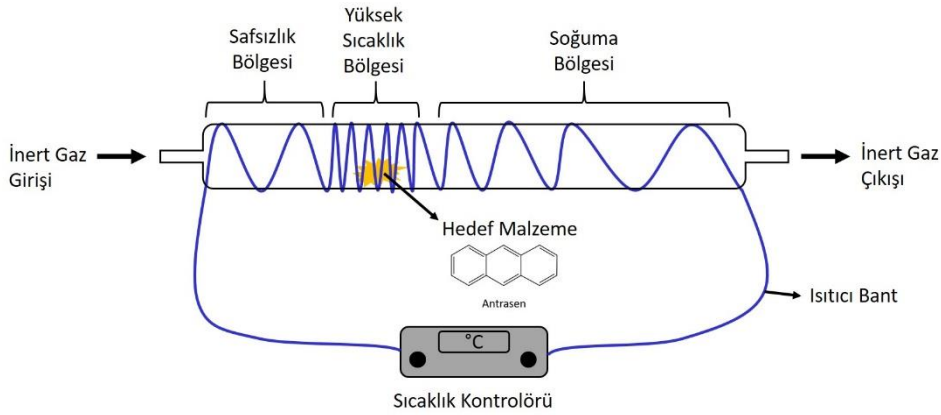
Organik yarı iletkenlerde morfolojik kontrolün sağlanması yük taşıma yeteneğini artırabilmekte ve cihaz performansı geliştirilebilmektedir. Organik ince filmlerle karşılaştırıldığında, organik tek kristallerde yapı bozukluğu ve tane sınırından kaynaklanan iletim problemleri en aza inmektedir [2]. Tek kristallerin kullanımı, yarı iletken mikroelektronik ve katı hal biliminin gelişimi için temel oluşturmaktadır. Günümüzde organik yarı iletken tek kristaller elektronik cihazlarda ara yüzey olaylarının incelenmesinde ve içsel optik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir araç olarak kabul edilmektedir [3]. Tek kristaller sağladıkları yüksek kimyasal saflık ve yapısal düzen sayesinde alan etkili transistör [4], ışık yayan diyot [5] ve güneş pili [6] çalışmalarına temel oluşturmaktadır. Gaz fazı süreçleri, çözelti süreçleri ve eritme-büyütme metodu organik yarı iletkenlerin tek kristallerinin büyütülmesine en çok kullanılan yöntemlerdir. Buna karşın, zayıf van der Waals bağları, moleküler yapı ve organik yarı iletkenlerin sınırlı ısıl kararlılığı uygulanacak yöntemde kısıtlamalara sebep olmaktadır [7]. Organik yarı iletken tek kristallerinin büyütülmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri fiziksel buhar iletimi (physical vapour transport, PVT) yöntemidir. Bu yöntem vakum ortamında veya inert atmosfer altında gerçekleştirilen farklı alt yöntemlere ayrılabilir. Çalışma kapsamında cam bir boru içerisinde tek kristalin büyütüldüğü ve inert gaz giriş-çıkışı olan açık sistem PVT yöntemi tercih edilmiştir. Açık sistem PVT yönteminde kullanılan inert gazın akış hızı büyütülecek tek kristalin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerine büyük etkiye sahiptir. Tek kristali büyütülecek malzemenin süblimleşmesinin ardından soğuma bölgesine taşınması sırasında yardımcı inert gaz akışı ile istenen özelliklere sahip tek kristaller elde edilebilmektedir. Bu amaçla, açık sistem PVT yönteminde inert argon (Ar) gaz akış hızının seçilen antrasen tek kristallerinin büyüme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Antrasen, doğrusal kaynaşmış üç benzen halkasından oluşan, elektronik cihazlarda sıklıkla kullanılan tipik elektron bir vericidir [8]. Bu yarı iletken için en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) enerjileri sırasıyla -5,7 eV ve -1,7 eV olarak belirlenmiştir [9]. Yarı iletkenlerin yapısal ve morfolojik özellikleri uygulandığı cihazın performansı üzerinde büyük etkiye sahip olduğundan antrasen tek kristalinin istenilen niteliklere sahip olarak büyütülmesi oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalara bakıldığında, PVT yönteminin büyük boyutlu ve pürüzsüz antrasen tek kristallerinin elde edilmesinde kullanılabilir en uygun yöntemlerden biri olduğu rapor edilmiştir [10]. Bu yöntemde süblimleşen antrasen sürükleyici gazın yardımıyla soğuma bölgesine sürüklenerek iç ampulde tek kristaller halinde asılı kalır ve karakterizasyon aşamasının kolaylaşmasını sağlar. Tek kristallerde kristal özelliklerinin belirlenmesi ve yapısal analizlerin yapılabilmesi için en önemli teknikler atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve X-ışınları kırınımı (XRD). Elde edilen antrasen tek kristallerinin kalitesinin belirlenmesinde bu yöntemlerle birlikte, optik mikroskop görüntüleri alınmış ve elektronik cihazlarda kullanılabilir büyüklüklerde antrasen tek kristallerinin başarılı bir şekilde büyütüldüğü tespit edilmiştir. Büyütülen tek kristallerin kalınlığı elektronik cihaz uygulamalarında oldukça önemli olduğundan gaz akış hızına bağlı tek kristal kalınlıkları profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Sonuçlar, gaz akış hızının antrasen tek kristallerinin yapısal ve optik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini ve elektronik cihaz uygulamalarına ışık tutacağını göstermektedir.

II. DENEYSEL METOT

A. MALZEMELER VE HAZIRLAMA TEKNİKLERİ

Antrasen (Sigma-Aldrich, %99) malzemesi tek kristal büyütme işlemine geçilmeden önce birkaç kez süblimleştirme yolu ile saflaştırılmıştır. Tek kristallerin büyütülmesi için açık sistem PVT yöntemi tercih edilmiştir. PVT sisteminde; ısıtma kablolarının yardımıyla, boru içinde süblimleşmeye yetecek sıcaklık bölgesi ve süblimleşen malzemeyi kristalleştirebilecek bir soğutma bölgesi oluşturulmaktadır. Süblimleşen malzemenin soğuma bölgesine ilerlemesinde yardımcı inert gaz akışı ile istenen özelliklerde tek kristal elde edilebilmektedir. İner Ar gaz akış hızının istenilen değerlere ayarlanmasında şamandıralı debimetre kullanılmıştır. Kullanılan debimetre 1,6-6,0 L sa⁻¹ aralığında akış hızını ölçmek için tasarlanmıştır. Şekil 1' de uygulanan açık sistem PVT yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Açık sistem PVT yönteminin şematik olarak gösterimi

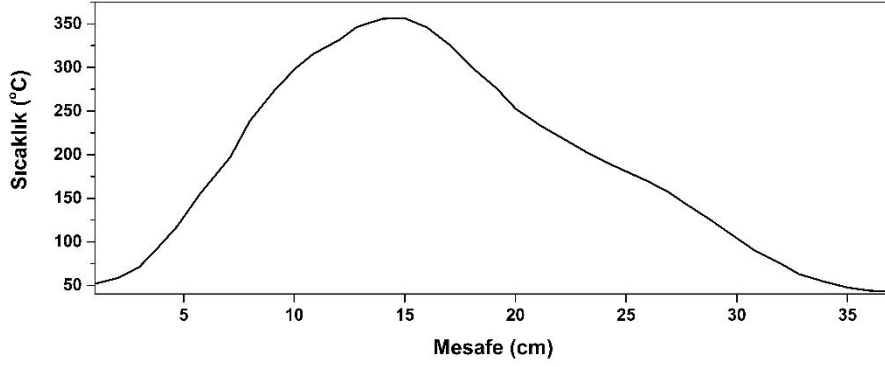
B. MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

Tek kristal örneklerinin görüntüleri Motic B1-220E-SP Optik Mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiştir. Büyütülen tek kristallerin optik karakterizasyonu 300-800 nm dalga boyları aralığında Shimadzu UVmini-1240 (Tarama Hızı: 24-1400 nm dk⁻¹, Spektral bantgenişliği: 5 nm) ultraviyole-görünür (UV-Vis) absorpsiyon spektrofotometresi kullanılarak, tek kristallerin iki şeffaf plaka arasına yerleştirilmesiyle gerçekleştirildi. XRD analizleri Bruker Advance D8 (Cu K α radyasyon) kullanılarak 2° dk⁻¹ tarama hızıyla 2 θ = 5° - 60° aralığında gerçekleştirilmiştir. Tek kristallerin kalınlıkları temaslı profilometre (NanoMap-500LS 3D Stylus) ile belirlendi. AFM görüntüleri temaslı modda çalışan NTMDT AFM NTEGRA Solaris ile ortam koşullarında ve atmosfere açık bir şekilde kaydedilmiştir. Tek kristaller AFM görüntüleri alınmadan önce cam bir yüzeye lamine edilerek numune tutucuya yerleştirilmiştir. Örneklerin basamak yükseklikleri AFM görüntülerinin Nova yazılımı kullanılmasıyla belirlenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

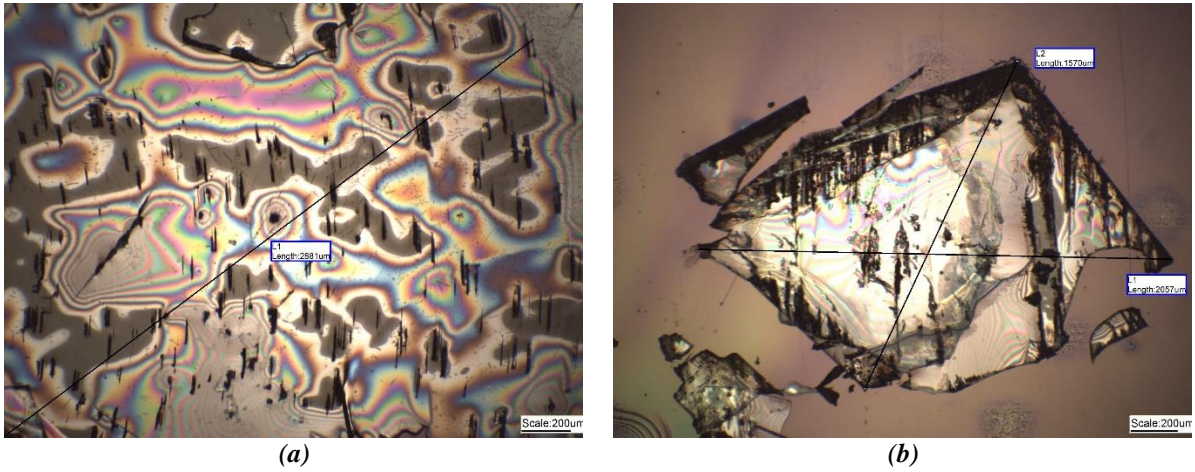
A. MORFOLOJİK KARAKTERİZASYONLAR

PVT yöntemiyle tek kristal büyütme işlemi süblimleşme ve soğuma bölgelerindeki sıcaklık dağılımı kristal kalitesi açısından oldukça önemlidir. Antrasen tek kristallerinin büyütülmesindeki sıcaklık dağılımı grafiği Şekil 2' de görülmektedir. Soğuma bölgesinde yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru tek kristallerin boyutlarının büyüdüğü tespit edilmiştir.

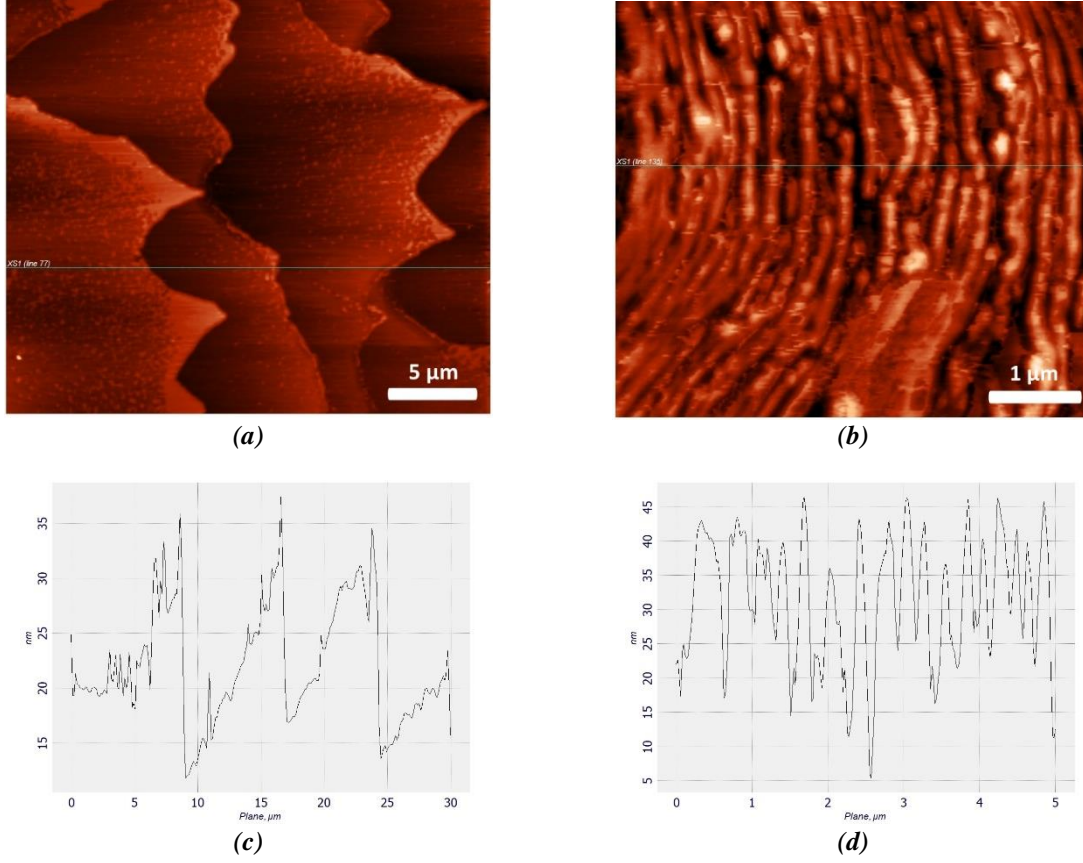


Şekil 2. Süblimleşme ve soğuma bölgelerindeki sıcaklık dağılımı.

Büyütülen tek kristallerin uygun özelliklerde olanları yapısal analizler için seçilmiştir. Şekil 3 (a) ve (b) antrasen yarı iletkeni için üretilen tek kristallerin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, düz ve pürüzsüz yapıları tek kristaller oluşmuştur. Büyütülen tek kristallerin boyutları soğuma bölgesinde kristalin oluştuğu noktaya göre farklılıklar gösterebilmektedir. Daha küçük kristallerde çizgi benzeri yapıların oluştuğu söylenebilir. AFM tekniği tek kristal yüzeylerinin morfolojisinin aydınlatılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 4 (a) ve (b)' de sırasıyla tek kristallerin $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ve $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama aralığında AFM görüntüleri verilmiştir. AFM görüntülerinde yüzeylerde açıkça büyük düz basamaklar serisi görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak yüksek kaliteli tek kristallerin elde edildiği söylenebilir. İlgili AFM görüntülerinden elde edilen basamak yükseklikleri program vasıtası ile hesaplanmıştır (sırasıyla Şekil 4 c-d). Tek kristal yüzeyinde 15-20 nm yüksekliklerinde moleküler basamaklar görülmektedir. Ek olarak, bu basamakların arasındaki genişlikler 5-7 μm arasında değişmektedir. Literatürde tek kristalin büyük düz basamaklar şeklinde büyümesinin iki boyutlu çekirdeklenme süreciyle gerçekleştiği rapor edilmiştir [11].



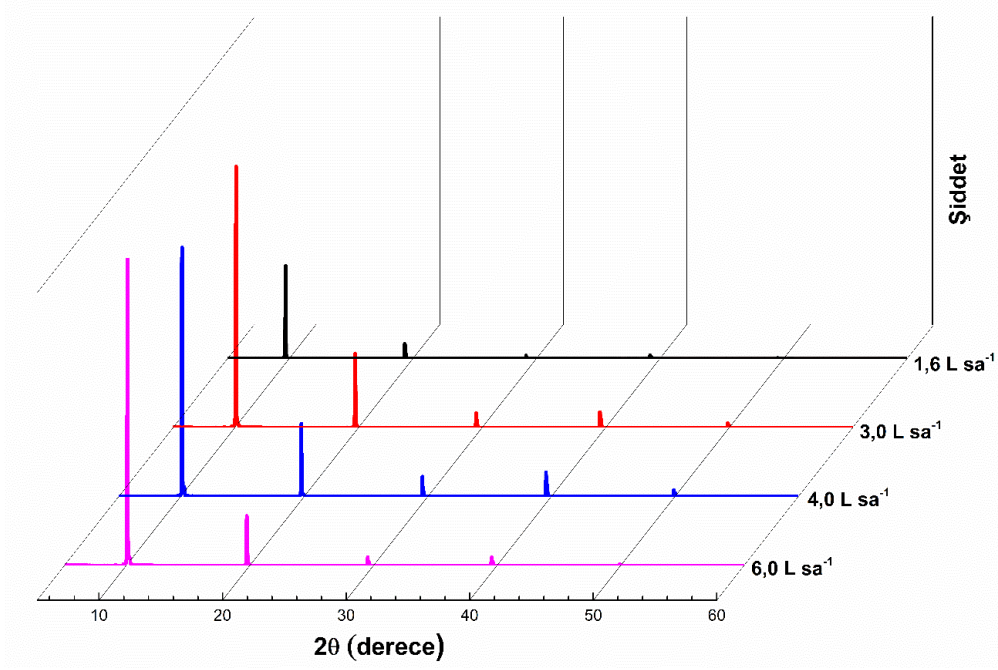
Şekil 3. (a)-(b) Antrasen yarı iletkeni tek kristallerin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4. (a)-(b) Sırasıyla tek kristallerin $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ve $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama aralığında AFM görüntüleri ve (c)-(d) ilgili AFM görüntülerinden elde edilen basamak yükseklikleri.

B. YAPISAL KARAKTERİZASYONLAR

Çalışmada antrasen tek kristallerinin büyüme davranışları üzerinde Ar gaz akış hızının etkisi incelenmiştir. Yapısal değişikliklerin incelenmesi için XRD yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 5’te 4 farklı Ar akış hızı ($1,6 \text{ L sa}^{-1}$, $3,0 \text{ L sa}^{-1}$, $4,0 \text{ L sa}^{-1}$ ve $6,0 \text{ L sa}^{-1}$) altında PVT yöntemiyle büyütülmüş antrasen tek kristallerinin XRD desenleri görülmektedir. Tüm antrasen tek kristalleri monokliniktir. Desenlerinin tümünün taban çizgisinin düz ve kırınım piklerinin oldukça keskin olduğu görülmektedir. Ayrıca desenler güçlü bir d_{001} tepe noktası ve eşdeğer tepe noktalarını göstermektedir [12]. Bu durum, antrasen tek kristallerinin bütün akış hızlarında (0 0 1) düzlem ile uzun mesafeli bir tutarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu desenler kristal kafeslerinde yüksek derecede bir moleküler düzen olduğunu ortaya koymaktadır [13]. Ayrıca beklenen pikler dışında pik bulunmaması herhangi bir safsızlığın olmadığını ve belirlenen gaz akış hızlarının kristal büyütülmesi için uygun aralıkta olduğunu göstermektedir. Kristallerin kristalografik düzlemlerinin detaylıca incelenebilmesi için XRD desenlerindeki piklere ait değerler Tablo 1’de verilmiştir. Burada hkl düzleme ait Miller indislerini, I/I_0 pik şiddetinin yoğunluğunu ve d ise düzlemler arası mesafeyi ifade etmektedir. Görüldüğü üzere, çalışmada elde edilen tek kristallerde en şiddetli pikler ($I/I_0=100\%$) tüm akış hızlarında (0 0 1) düzleminde elde edilmiştir. Nabok ve arkadaşlarının π -konjuge organik moleküllerin kristalleri üzerine yaptıkları bir çalışmada (0 0 1) düzleminin en düşük yüzey enerjisine sahip olduğu ve bu nedenle en büyük düzlem olacağı belirtilmiştir [14]. Pik şiddetlerinin yoğunluklarına bakıldığında sonuçların literatürle tutarlı olduğu görülmektedir [15]. d_{001} düzlem mesafesi yaklaşık 9 nm olarak hesaplanmıştır. Genel eğilime bakıldığında, tüm düzlemler mesafelerin gaz akış hızının artışıyla azalma göstermiştir. En şiddetli piklerin basamak yükseklikleri AFM görüntülerinde elde edilen basamak yükseklikleri ile oldukça yakındır. AFM görüntülerinde görülen basamakların antrasen tek tabakaları olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Farklı gaz akış hızlarında büyütülen antrasen tek kristallerinin XRD desenleri.

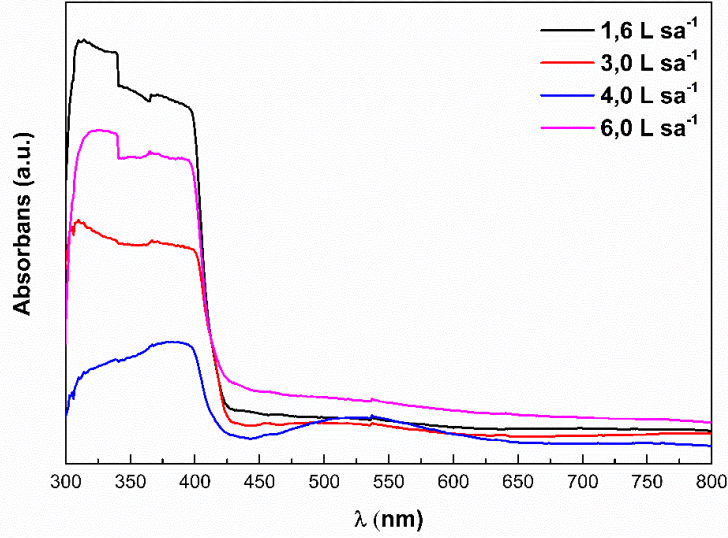
Tablo 1. Antrasen tek kristallerinin XRD deseni verileri.

<i>hkl</i>	1,6 (L sa ⁻¹)			3,0 (L sa ⁻¹)		
	2 Θ ($^{\circ}$)	I/I ₀	d (Å)	2 Θ ($^{\circ}$)	I/I ₀	d (Å)
0 0 1	9,771	100,0	9,100	10,087	100,0	8,762
0 0 2	19,369	16,4	4,579	19,740	19,1	4,494
0 0 3	29,174	3,6	3,059	29,533	3,8	3,022
0 0 4	39,239	1,1	2,294	39,511	4,1	2,277
0 0 5	49,555	1,0	1,838	49,930	0,3	1,825
<i>hkl</i>	4,0 (L sa ⁻¹)			6,0 (L sa ⁻¹)		
	2 Θ ($^{\circ}$)	I/I ₀	d (Å)	2 Θ ($^{\circ}$)	I/I ₀	d (Å)
0 0 1	10,117	100,0	8,736	10,089	100,0	8,760
0 0 2	19,774	28,7	4,486	19,752	12,8	4,491
0 0 3	29,569	8,1	3,019	29,585	1,1	3,017
0 0 4	39,621	1,9	2,273	39,618	1,1	2,273
0 0 5	49,963	0,7	1,824	49,963	0,2	1,823

C. OPTİK VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONLAR

Büyütülen antrasen tek kristallerinin optik özelliklerinin belirlenmesinde UV-Vis absorpsiyon verileri kullanılmıştır. Şekil 6' da absorptans spektrumları görülmektedir. Tüm tek kristaller için 400-800 nm dalga boyu arası görünür bölgede absorptans oldukça düşüktür. Antrasenin özellikle geçirgen olması istenen cam gibi yüzeylerde faydalanılabilecek fotovoltaikler için oldukça ilgi çekici malzemeler olduğunu göstermektedir. Buna karşın, 300-400 nm dalga boyunda absorptans değerleri artmaktadır. Tek kristallerin bu aralıkta daha yüksek yoğunlukta absorptans bantları göstermesi π - π^* geçişine bağlanabilir [16]. 450-600 nm aralıklarına baktığımızda en yüksek absorptansı 4,0 ve 6,0 L sa⁻¹ Ar akış

hızlarında büyütülen tek kristallerin yaptığı görülmektedir. Bu durum tek kristallerin kalınlıklarının farklılığından kaynaklanabilir.



Şekil 6. Farklı gaz akış hızlarında büyütülen antrasen tek kristallerinin UV-Vis absorbans spektrumları.

Elektronik cihazlarda kullanılan yarı iletken tek kristallerin kalınlıkları performans üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yarı iletken tabakaların kalınlığının artışı yük transferini zorlaştırabilmekte ve tabakalar arasında temas problemleri yaratabilmektedir [17]. Bu nedenle, büyütülen tek kristallerin kalınlıkları yüzey profilometresi cihazıyla ölçülmüştür. Tablo 2’ de görüldüğü gibi, 3,0 L sa⁻¹ Ar akışı altında büyütülen tek kristalin haricinde gaz akış hızı arttıkça kristal kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum süblimleşen antrasenin gaz akış hızı yükseldikçe daha fazla miktarda iletilmesi ve soğuma bölgesinde kristallerdeki basamak sayısını artırmasıyla yorumlanabilir.

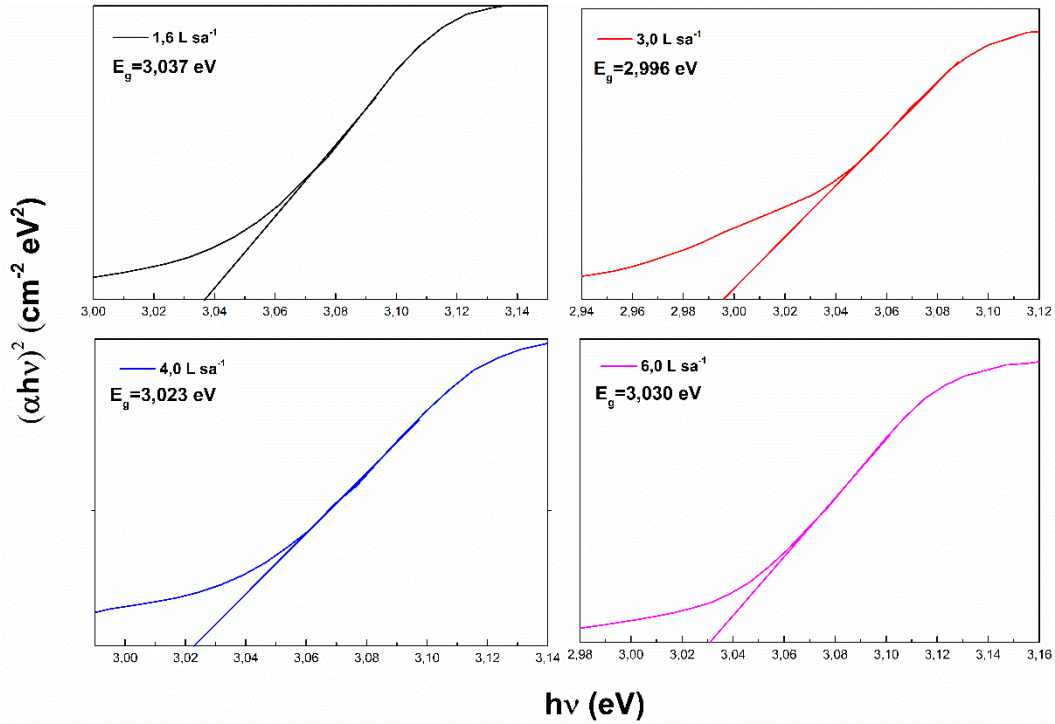
Tablo 2. Antrasen tek kristallerinin ölçülen kalınlık, dört nokta iletkenlik ve E_g değerleri.

Gaz Akış Hızı (L sa ⁻¹)	Kalınlık (nm)	İletkenlik (S cm ⁻¹)	E _g (eV)
1,6	980	1,57x10 ⁻⁴	3,037
3,0	670	1,80x10 ⁻⁴	2,996
4,0	1380	1,67x10 ⁻⁴	3,023
6,0	1500	1,72x10 ⁻⁴	3,030

Yüksek performanslı elektronik cihazlarda kullanılacak malzemelerin en önemli özelliklerinden biri iletkenliğidir. Bir malzemenin elektriksel iletkenliği, o malzemenin içsel elektriksel özelliklerinin yanı sıra kristallik derecesi, fiziksel yapısı ve çevresel faktörler gibi etkenlere de bağlıdır [18]. Bu nedenle malzemenin iletim kanallarının uzunluğu ve enine kesit alanı da oldukça önemlidir. Tek kristalleri ince filmlere güçlü alternatif yapan iletim kanallarının tek kristallerde yüksek düzene sahip olmasıdır [19]. Belirlenen Ar akış hızlarında büyütülen antrasen tek kristallerinin elektriksel iletkenlikleri dört nokta temaslı ölçüm yöntemiyle belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2’ de verilmiştir. Elektronik cihaz uygulamaları için yüksek absorpsiyon katsayıları da göz önünde bulundurularak hem iletkenlik hem de kalınlık olarak en iyi sonuçların 3,0 ve 4,0 L sa⁻¹ hızlarında büyütülen tek kristallerde elde edildiği belirlenmiştir.

Optik özellikler tek kristallerin elektriksel özellikleri hakkında fikir vermektedir. Özellikle yüksek absorpsiyon katsayısına sahip antrasen yarıiletkeni için Tauc yöntemiyle bant boşluğu hesaplanabilir. Bu özellik antraseni ince film elektronik cihazlar için uygulanabilir kılar. Mevcut sistem, doğrudan geçiş kuralına ve gelen fotonun optik bant boşluğu, absorbans katsayısı (α) ve enerjisi $h\nu$ arasındaki

ilişkiye uymaktadır. Doğrudan bant boşlukları (E_g) absorpsiyon katsayılarının Tauc denkleminde uygulanmasıyla elde edilebilmektedir [20]. Yapılan çalışmada doğrudan bant boşlukları, profilometre yardımıyla belirlenen tek kristallerin kalınlıklarının güç yasası uyumu ile karşılaştırılmıştır. Yüksek enerjili geçişler malzeme kalınlığına duyarlıdır ve güç yasasına uyarlar. Şekil 7’de hesaplanan $(h\nu\alpha)^2$ ye karşı foton enerjisi ($h\nu$) grafiği görülmektedir. E_g değerleri, ekstrapolasyon uygulanarak x-ekseni kesişimi ile belirlenir. Sonuçlar Tablo 2’ de verilmiştir. Hesaplanan E_g değerleri literatürde rapor edilen hem teorik hem de deneysel değerlere oldukça yakındır. Wu ve Zhou yapmış oldukları çalışmada antrasen tek kristallerinin bant boşluğunu 3,02 eV olarak hesaplarken, Chen ve ark. pek çok antrasen türevinin bant boşluğunun 2,70-2,90 eV aralığında olduğunu rapor etmişlerdir [21-23]. Bilindiği gibi, bir antrasen kristali, 3 eV’ ta en düşük singlet eksiton durumuna uyarıldığında büyük bir fotoakım gözlenebilir [24]. Bu çalışmayla, organik yarıiletken tek kristallerinin optik ve elektriksel özelliklerinin PVT yönteminde uygulanan gazın akış hızıyla kolaylıkla değiştirilebileceğini göstermiştir.



Şekil 7. E_g değerlerinin hesaplamak için optik absorpsiyon verilerine göre çizilen Tauc grafikleri.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, günümüz elektronik cihaz uygulamalarında oldukça dikkat çeken organik yarıiletkenlerden biri olan antrasenin PVT tekniği ile tek kristalleri büyütülmüştür. PVT yönteminde yardımcı parametre olarak kullanılan inert argon gaz akış hızının büyütülen antrasen tek kristallerinin morfolojik, yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bilindiği gibi, elektronik uygulamalarda yarıiletkenlerin kalınlık ve elektriksel iletkenlikleri oldukça önemli olduğundan, büyütülen tek kristallerin kalınlık ve elektriksel iletkenlikleri ölçülmüştür. Yüksek gaz akış hızlarında hem tek kristallerin kalınlığının yükseldiği hem de iletkenliğinin düştüğü belirlenmiştir. 3,0 L sa⁻¹ argon akış hızında büyütülen antrasen tek kristallerinin en ince (670 nm) ve en yüksek elektriksel iletkenlik değerine ($1,80 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$) sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapısal ve morfolojik analiz sonuçları göstermiştir ki büyütülen tek kristallerin tümü yüksek moleküler düzene ve kristallığe sahiptir. Yapılan çalışma ile istenilen özelliklere sahip organik yarıiletken tek kristallerinin gaz akış hızının değiştirilmesiyle elde edilebileceği ve yüksek performanslı elektronik cihazlarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma 118M641 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK ve 18201152 numaralı proje kapsamında Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Günes, H. Neugebauer and N.S. Sariciftci, “Conjugated polymer-based organic solar cells,” *Chemical Reviews*, vol. 107, no. 4, pp. 1324-1338, 2007.
- [2] Y. Park, P. Sun Kyung, B. Jun, Y.-E. Lee, S.U. Lee and M. Sung, “Quantitative correlation between carrier mobility and intermolecular center-to-center distance in organic single crystals,” *Chemistry of Materials*, vol. 29, no. 9, pp. 4072-4079, 2017.
- [3] J.A. Lim, H.S. Lee, W.H. Lee and K. Cho, “Control of the morphology and structural development of solution-processed functionalized acenes for high-performance organic transistors,” *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 10, pp. 1515-1525, 2009.
- [4] H. Li, W. Shi, J. Song, H.-J. Jang, J. Dailey, J. Yu and H.E. Katz, “Chemical and biomolecule sensing with organic field-effect transistors,” *Chemical Reviews*, vol. 119, no. 1, pp. 3-35, 2019.
- [5] H. Nakanotani and C. Adachi, “Organic light-emitting diodes containing multilayers of organic single crystals,” *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 5, pp. 053301, 2010.
- [6] Y. Zhang, H. Dong, Q. Tang, S. Ferdous, F. Liu, S.C.B. Mannsfeld, W. Hu and A.L. Briseno, “Organic single-crystalline p–n junction nanoribbons,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 132, no. 33, pp. 11580-11584, 2010.
- [7] H. Jiang and C. Kloc, “Single-crystal growth of organic semiconductors,” *MRS Bulletin*, vol. 38, no. 1, pp. 28-33, 2013.
- [8] P. Hu, H. Li, Y. Li, H. Jiang and C. Kloc, “Single-crystal growth, structures, charge transfer and transport properties of anthracene-F4TCNQ and tetracene-F4TCNQ charge-transfer compounds,” *CrystEngComm*, vol. 19, no. 4, pp. 618-624, 2017.
- [9] P.I. Djurovich, E.I. Mayo, S.R. Forrest and M.E. Thompson, “Measurement of the lowest unoccupied molecular orbital energies of molecular organic semiconductors,” *Organic Electronics*, vol. 10, no. 3, pp. 515-520, 2009.
- [10] Z.A. Tan, S. Li, F. Wang, D. Qian, J. Lin, J. Hou and Y. Li, “High performance polymer solar cells with as-prepared zirconium acetylacetonate film as cathode buffer layer,” *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 4691, 2014.
- [11] X. Zeng, Y. Qiu, J. Qiao, G. Dong and L. Wang, “Morphological characterization of pentacene single crystals grown by physical vapor transport,” *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 7, pp. 3581-3585, 2007.
- [12] P. Zhang, J. Deng, X. Zeng, Z. Liu, Y. Qiu, H. Zhong, Y. Fan, J. Huang, J. Zhang and K. Xu, “Growth mechanism of large-size anthracene single crystals grown by a solution technique,” *Journal of Crystal Growth*, vol. 311, no. 23, pp. 4708-4713, 2009.
- [13] V.A. Postnikov and S.V. Chertopalov, “Growth of large naphthalene and anthracene single-crystal sheets at the liquid–air interface,” *Crystallography Reports*, vol. 60, no. 4, pp. 594-600, 2015.

- [14] D. Nabok, P. Puschnig and C. Ambrosch-Draxl, "Cohesive and surface energies of π -conjugated organic molecular crystals: a first-principles study," *Physical Review B*, vol. 77, no. 24, pp. 245316, 2008.
- [15] V. Nagarajan, A. Nitthin Ananth and S. Ramaswamy, "Investigations onto the role of transition metal oxide dopants in anthracene crystals," *Materials Research Express*, vol. 4, no. 12, pp. 125102, 2017.
- [16] S.J. Chung, K.K. Kim and J.I. Jin, "Fluorescing wholly aromatic polyesters containing diphenylanthracene fluorophores," *Polymer*, vol. 40, no. 8, pp. 1943-1953, 1999.
- [17] A.J. Moulé, J.B. Bonekamp and K. Meerholz, "The effect of active layer thickness and composition on the performance of bulk-heterojunction solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, no. 9, pp. 094503, 2006.
- [18] R.W. Day, D.K. Bediako, M. Rezaee, L.R. Parent, G. Skorupskii, M.Q. Arguilla, C.H. Hendon, I. Stassen, N.C. Gianneschi, P. Kim and M. Dincă, "Single crystals of electrically conductive two-dimensional metal-organic frameworks: Structural and electrical transport properties," *ACS Central Science*, vol. 5, no. 12, pp. 1959-1964, 2019.
- [19] L. Sun, S.S. Park, D. Sheberla and M. Dincă, "Measuring and reporting electrical conductivity in metal-organic frameworks: Cd₂(TTFTB) as a case study," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 138, no. 44, pp. 14772-14782, 2016.
- [20] V. Nagarajan, N. Ananth, T. Doss and S. Ramaswamy, "Investigations on the effect of nano Fe₃O₄ -doped anthracene single crystal," *Materials Research Innovations*, vol. 22, no. 1, pp. 13-21, 2017.
- [21] M. Campione, R. Ruggerone, S. Tavazzi and M. Moret, "Growth and characterisation of centimetre-sized single crystals of molecular organic materials," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 15, no. 25, pp. 2437-2443, 2005.
- [22] H. Wu and J. Zhou, "Optical properties of anthracene single crystals grown by a simple solution technique," *International Journal of Modern Physics B*, vol. 27, no. 8, pp. 1350022, 2013.
- [23] M. Chen, L. Yan, Y. Zhao, I. Murtaz1, H. Meng and W. Huang, "Anthracene-based semiconductors for organic field-effect transistors," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, no. 28, pp. 7416-7444, 2018.
- [24] R. Katoh and M. Kotani, "Observation of singlet exciton photoionization in anthracene single crystal at 2.95 eV", *Chemical Physics Letters*, vol. 166, no. 3, pp. 258-262, 1990.