

Metilamonyum Bizmut İyodür İnce Filmlerinin Flaş ve Eş Zamanlı Buharlaştırma Yöntemleriyle Üretimi: Yapısal ve Optik Özelliklerin Karşılaştırılması

Fabrication of Methylammonium Bismuth Iodide Thin Films by Flash Evaporation and Co-Evaporation Methods: Comparison of Structural and Optical Properties

Gökhan YILMAZ^{1*}, Asuman Koçu²

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı, Burdur, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1759622

Corresponding Author

Gökhan YILMAZ

Email:gyilmaz@mehmetakif.edu.tr

Article History

Received: 06.08.2025

Revised: 08.09.2025

Accepted: 14.09.2025

Available Online:29.12.2025

To Cite

Yılmaz, G., & Koçu, A., (2025). Metilamonyum bizmut iyodür ince filmlerinin flaş ve eş zamanlı buharlaştırma yöntemleriyle üretimi: Yapısal ve optik özelliklerin karşılaştırılması. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 16(2), 71–78. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1759622>

Bu çalışma, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından (Proje No: 0772-YL-21) desteklenmiştir. Ayrıca KOSGEB tarafından 1328200 başvuru numarası ve 2024-620-19/01 karar numarası ile desteklenmiştir.

Öz: Bu çalışmada, kurşunsuz perovskit malzeme $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_3\text{BiI}_9$ (MA_3BiI_9) ince filmleri, iki farklı fiziksel buharlaştırma tekniği olan flaş buharlaştırma ve eş zamanlı buharlaştırma yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilerek, üretim yöntemlerinin film kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) ile kristal yapı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojisi ve UV-Vis spektroskopisi ile optik özellikler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki yöntemin de optik olarak aktif MA_3BiI_9 ince filmleri üretebildiğini göstermekle birlikte, flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerin daha yoğun, homojen ve yüksek optik absorpsiyon performansına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Doğrudan bant aralığı değerleri eş zamanlı buharlaştırma yöntemi için 1,89 eV, flaş buharlaştırma yöntemi için ise 1,91 eV olarak belirlenirken, dolaylı bant aralığı her iki yöntem için de 1,78 eV olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, flaş buharlaştırma yönteminin kurşunsuz MA_3BiI_9 perovskit ince filmlerin üretim optimizasyonu açısından önemli avantajlar sunduğunu ve yüksek performanslı optoelektronik cihaz uygulamaları için potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Metilamonyum bizmut iyodür, ince film, flaş buharlaştırma, eş zamanlı buharlaştırma, optik özellikler, yapısal özellikler

ABSTRACT : In this study, lead-free perovskite material $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_3\text{BiI}_9$ (MA_3BiI_9) thin films were fabricated using two different physical vapor deposition techniques: flash evaporation and co-evaporation. The structural, morphological, and optical properties of the fabricated films were thoroughly characterized, and the effects of the deposition methods on film quality were comparatively evaluated. The crystal structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD), surface morphology by scanning electron microscopy (SEM), and optical properties by UV-Vis spectroscopy. The results demonstrated that both methods are capable of producing optically active MA_3BiI_9 thin films; however, films produced by flash evaporation exhibited a denser, more homogeneous structure with superior optical absorption performance. The direct band gap was determined to be 1.89 eV for the co-evaporation method and 1.91 eV for the flash evaporation method, while the indirect band gap was calculated as 1.78 eV for both. These findings indicate that the flash evaporation technique offers significant advantages in the fabrication of lead-free MA_3BiI_9 perovskite thin films and holds potential for high-performance optoelectronic device applications.

Keywords: Methylammonium bismuth iodide, thin film, flash evaporation, co-evaporation, optical properties, structural properties

1. GİRİŞ

Küresel enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi her geçen gün artırdığı bilinmektedir. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, ulaşılabilirliği, çevre dostu oluşu ve tükenmez yapısı sayesinde sürdürülebilir enerji çözümleri arasında ön plana çıkmaktadır. Fotovoltaik teknolojilerin gelişimiyle birlikte, yüksek verimli, düşük maliyetli ve çevre dostu yeni nesil güneş hücrelerinin geliştirilmesi bilim insanları tarafından büyük ilgi görmektedir. Son yıllarda hibrit organik-inorganik perovskit malzemeler, fotovoltaik performansları ve üretim kolaylıklarıyla ön plana çıkmaktadır (Kojima vd., 2009; Zhou vd., 2024; Rani vd., 2025). Perovskit yapıların özellikle yüksek ışık absorpsiyon katsayısına, uzun taşıyıcı difüzyon mesafesine, düşük üretim maliyetine ve esnek üretim tekniklerine sahip olması, bu malzemelerin sadece güneş hücreleri değil, aynı zamanda LED'ler (light-emitting diode, ışık yayan diyot), fotodetektörler ve sensörler gibi birçok farklı alanda da kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Oga vd., 2014; Chin vd., 2015; Deng vd., 2015; Guo vd., 2015; Hutter vd., 2015; Li vd., 2015; Mei vd., 2015; Motta vd., 2015; Stranks ve Snaith, 2015; Lian vd., 2016). Son yapılan çalışmalarda, perovskit güneş hücrelerinin verimlilikleri %33,2 seviyesine ulaşmıştır (National Renewable Energy Laboratory, 2024). Bu oran, geleneksel silikon bazlı hücrelerle kıyaslandığında oldukça rekabetçi olup, perovskit malzemelerin fotovoltaik alandaki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak bu yüksek verimlilik değerlerine sahip perovskitler genellikle kurşun içermekte ve çevresel toksisite sorunları yaratmaktadır. Bu nedenle çevre dostu, kurşunsuz ve kararlı perovskit bileşiklerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Babayigit vd., 2016; Kim vd., 2023). Son yıllarda, kurşun içermeyen alternatif perovskit yapılar geliştirmek amacıyla yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Bu doğrultuda bizmut (Bi) temelli perovskitler, kurşun yerine daha az toksik ve çevre dostu bir alternatif olarak önerilmektedir (Román-Vázquez vd., 2020). Özellikle Bi³⁺ iyonlarının Pb²⁺ iyonlarının yerine geçerek benzer bir yapı oluşturabilmesi ve iyi bir kimyasal kararlılık göstermesi sayesinde dikkat çekici bir malzeme adayı olmuştur (Park vd., 2015). Aynı zamanda bu yapı, nispeten yüksek stabilitesi ve neme karşı gösterdiği direnç ile çevresel koşullarda daha uzun ömürlü optoelektronik cihazların geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmüştür (Tang vd., 2019). Perovskit güneş hücrelerinde ışığı soğuran aktif katman olan absorber tabaka (absorber layer), güneş hücresinin verimliliği ile optoelektronik cihazların performansını doğrudan belirleyen temel bileşenlerden biridir. Bundan dolayı ışığı soğuran aktif katmanın üretiminde hangi yöntemin kullanıldığı önemlidir. Bu katmanın kristal yapısı, morfolojisi ve optik özellikleri ise

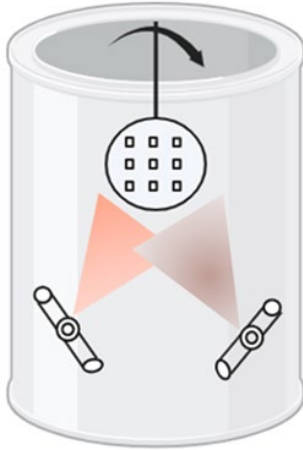
büyük ölçüde tercih edilen ince film üretim tekniğine bağlı olarak şekillenmektedir. Özellikle termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen ince filmlerin saflık derecesi yüksek, homojen ve istenen kalınlıkta film üretimi açısından avantajlıdır.

Bu çalışmada, metilamonyum bizmut iyodür ((CH₃NH₃)₃Bi₂I₉) ince filmleri iki farklı buharlaştırma tekniği kullanılarak üretildi ve sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan bu yöntemlerden ilki olan flaş buharlaştırma, kaynak malzemenin kısa sürede ve yüksek sıcaklıkta buharlaştırılarak hızlı film oluşumunu sağlamaktadır. Diğer yöntem olan eş zamanlı buharlaştırma ise, film bileşenlerinin ayrı kaynaklardan aynı anda belirli oranlarda buharlaştırılması ile kontrollü bir bileşim ve film kalınlığı elde etmeye imkân tanımaktadır (Momblona vd., 2020).

Bu iki yöntemin film üzerindeki etkilerinin ortaya konması, gelecekte güneş hücresinin verimliliği ile yüksek performanslı ve stabil optoelektronik aygıtların tasarımına yön verecek önemli çıktılar sağlayacağı düşünülmektedir. Üretilen ince filmler, cam ve tek kristal silisyum alttaşlar üzerine kaplanarak, farklı üretim yöntemlerinin yüzey morfolojisi, kristal yapı ve optik özellikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda filmlerin kristal yapıları X-ışını kırınımı (XRD) ile, yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ve optik özellikleri UV-Vis spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda her iki üretim yönteminin film kalitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koyulmuştur ve metilamonyum bizmut iyodür ince filmin üretim optimizasyonu açısından literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

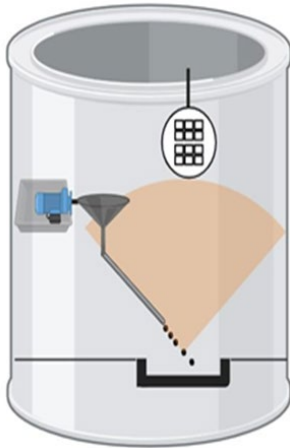
Metilamonyum bizmut iyodür ince filmlerinin üretimi sırasında kullanılan malzemeler eş buharlaştırma yapmak için termal buharlaştırma sistemine 0,0495 g CH₃IN (Solaronix) ve 0,1324 g BiI₃ (Sigma Aldrich %99) kuvars cam potalara yerleştirilmiştir. Eş buharlaştırma işlemi başlatılmadan önce vakum seviyesi 10⁻⁵ mBar'a düşürülmüştür. Bu düşük basınç, filmlerin yüksek saflıkta ve homojen bir şekilde oluşması için kritik öneme sahiptir. CH₃IN ve BiI₃ malzemeleri buharlaştırma sistemi içerisinde aynı anda tek kristal silisyum alttaşlar ve pürüzsüz cam alt tabakalar üzerine biriktirilmiştir. Taban malzemeler biriktirme öncesinde etanol ve deiyonize su ile ultrasonik banyoda temizlenmiş ve azot gazı ile kurutulmuştur. Eş zamanlı buharlaştırma sisteminin görseli Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Eş zamanlı buharlaştırma sistemi

Flaş buharlaştırma sisteminde, eş zamanlı buharlaştırma yönteminde olduğu gibi, 0,0495 g CH_3IN (Solaronix) ve 0,1324 g BiI_3 (Sigma Aldrich, %99 saflıkta) öncül malzemeler olarak kullanılmıştır. Flaş buharlaştırma işlemine başlanmadan önce sistemin buharlaştırma basıncı olan 10^{-5} mBar'a düşürülmüştür. Bu düşük basınç, filmlerin homojen şekilde oluşması ve bileşenlerin kontrollü bir şekilde taban malzemeye aktarılması açısından önemlidir.

Çalışmada kullanılan flaş buharlaştırma sistemi, tarafımızca özel olarak tasarlanmış ve geliştirilmiş bir sistemdir. Bu sistem, farklı bileşenlerin hızlı ve kontrollü bir şekilde anlık olarak buharlaştırılarak aynı anda ince film üretimine olanak sağlamaktadır. Şekil 2'de, kendi laboratuvarımızda tasarlanarak hayata geçirilen flaş buharlaştırma sistemine ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 2. Flaş buharlaştırma sistemi

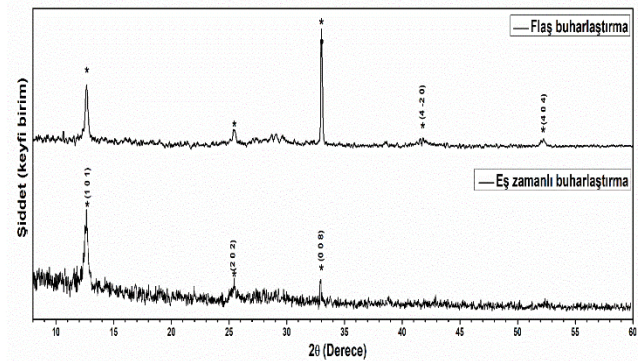
Farklı üretim yöntemleri ile üretilen metilamonyum bizmut iyodür ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri karakterize edilmiştir. Yapısal analizler, XRD tekniği ile gerçekleştirilmiş olup, ölçümler Bruker AXS D8 Advance sisteminde 8 ila 60 derece aralığında yapılmıştır. Filmlerin yüzey morfolojileri, SEM ile incelenmiş; bu analizlerde Quanta FEG 250 cihazı kullanılmış ve incelemeler 40 Pa düşük vakum koşullarında, yüksek voltaj (20,00 kV) altında ve 100.000 kata kadar büyütme oranında gerçekleştirilmiştir. Optik özelliklerin belirlenmesinde ise

UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi kullanılmış; analizler Shimadzu UV-2600 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı buharlaştırma teknikleri ile üretilen metilamonyum bizmut iyodür (MA_3BiI_9) ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Üretim teknikleri olarak eş zamanlı buharlaştırma ve flaş buharlaştırma yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler, her iki yöntemin film kalitesine olan etkisini kapsamlı bir biçimde ortaya koymaktadır.

Farklı buharlaştırma yöntemleriyle üretilen MA_3BiI_9 ince filmlerinin kristal yapıları XRD tekniği ile incelenmiştir. Elde edilen XRD desenleri, JCPDS 00-711-8491 referans kartıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan veriler Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. XRD verilerinin karşılaştırılması

Eş zamanlı buharlaştırma ile üretilen filmin XRD deseninde, MA_3BiI_9 'ün karakteristik pikleri ($2\theta = \sim 12.5^\circ, \sim 25.5^\circ, \sim 33^\circ$) gözlemlenmiştir. Ayrıca flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerde 42° ve 53° civarında zayıf yansımalar gözlemlenmiştir. JCPDS kartı (No. 00-711-8491) ile karşılaştırıldığında, bu pikler sırasıyla (4-20) ve (404) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu yansımaların görünürlüğü, flaş yöntemiyle elde edilen filmlerin daha yüksek kristaliniteye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu yüksek açılı yansımalar bant aralığı değerlerine doğrudan etki etmemekte, yalnızca absorpsiyon kenarının keskinleşmesine ve doğrudan bant boşluğunun daha belirgin hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Flaş buharlaştırma ile üretilen filmde ise aynı karakteristik piklerin daha keskin ve yüksek şiddette olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem, filmlerde daha yüksek kristaliniteye ve muhtemelen daha büyük kristal tanelerine sahip bir yapı oluştuğuna işaret etmektedir. Ayrıca, belirli kristalografik düzlemlere ait kırınım piklerinde görülen yoğunluk artışı, kristallerin bu düzlemler doğrultusunda yönelim gösterdiğini, yani tercihli yönelim (preferred orientation) oluştuğunu düşündürmektedir. X-ışını kırınım desenlerinde, polikristalin numunelerde tüm düzlemlerden gelen kırınım teorik olarak rastgele yönelimli olmalı ve bu durumda her pik şiddeti JCPDS veri tabanındaki standart

yoğunluk oranlarına uygun olmalıdır. Ancak, deneysel verilerde belirli bir düzleme ait kırınım şiddetinin anlamlı şekilde artmış olması, kristal tanelerinin önemli bir kısmının bu düzlem boyunca hizalanmış olduğunu göstermektedir (Cullity ve Stock, 2001). Bu durum, özellikle ince filmlerde elektriksel taşıyıcılık, yük taşınımı yönlülüğü ve optik geçişlerin etkinliği açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Her iki yöntemde de MA₃Bi₂I₉ fazının

başarıyla oluştuğu, ancak flaş buharlaştırma ile elde edilen filmlerin daha iyi kristal kalitesine sahip olduğu bulgularına ulaşılmıştır. Daha yüksek pik şiddetleri flaş buharlaştırma filmlerinin daha az yapısal kusur ve daha düzenli bir kristal yapıya sahip olduğunu desteklemektedir. Bu durum, optik özelliklerde gözlemlenen absorpsiyon performansı ile uyumludur.

Tablo 1. MA₃Bi₂I₉ ince filmlerinin farklı kırınım düzlemleri için FWHM değerleri ve ortalama kristalit boyutları

Üretim yöntemleri	FWHM (°)		Ortalama kristalit boyutu (nm)
	(101)	(008)	
Eş zamanlı buharlaştırma	0,31	0,11	27,01
Flaş buharlaştırma	0,34	0,16	36,68

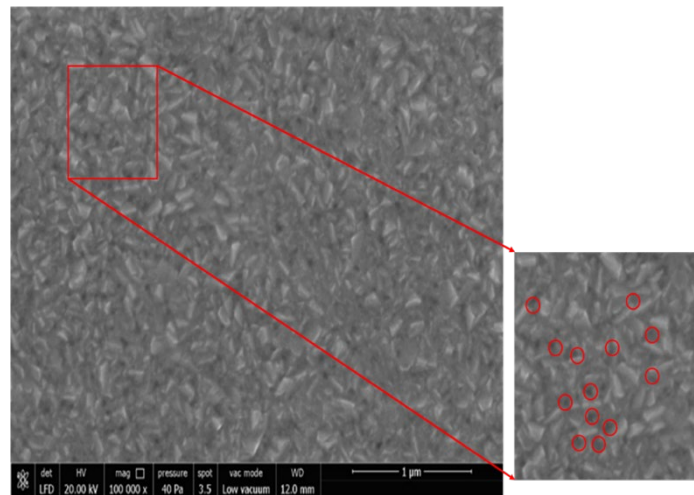
Kristalit boyutlarının belirlenmesi amacıyla XRD desenlerinde baskın olarak gözlenen (101) ve (008) kırınım piklerinden elde edilen FWHM değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalar, literatürde yaygın olarak kullanılan Scherrer denklemi (Debye–Scherrer) ile yapılmıştır. Scherrer denklemi denklem 1’de sunulmuştur:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Burada D ortalama kristalit boyutu, K şekil faktörü (0,9), λ Cu K α radyasyonu için kullanılan X-ışını dalga boyu (0,15406 nm), β ilgili pikin tam genişliği (FWHM, radyan cinsinden) ve θ Bragg açısını ifade etmektedir (Cullity ve Stock, 2001). Her iki yöntem için hesaplanan değerler Tablo 1’de sunulmuştur. Bu sonuçlar, flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerin daha düşük FWHM

değerlerine ve daha büyük ortalama kristalit boyutuna (36,68 nm) sahip olduğunu, eş zamanlı buharlaştırma yöntemiyle elde edilen filmlerde ise ortalama kristalit boyutunun daha küçük (27,01 nm) olduğunu göstermektedir. Daha büyük kristalit boyutları, flaş yöntemiyle üretilen filmlerin daha yüksek kristaliniteye sahip olduğunu ve yapısal kusurlarının azaldığını ortaya koymaktadır. Bu yapısal özellikler, ilerleyen bölümde sunulan optik bulgularla da tutarlı olup, flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerin daha üstün optoelektronik performans göstermesini açıklamaktadır.

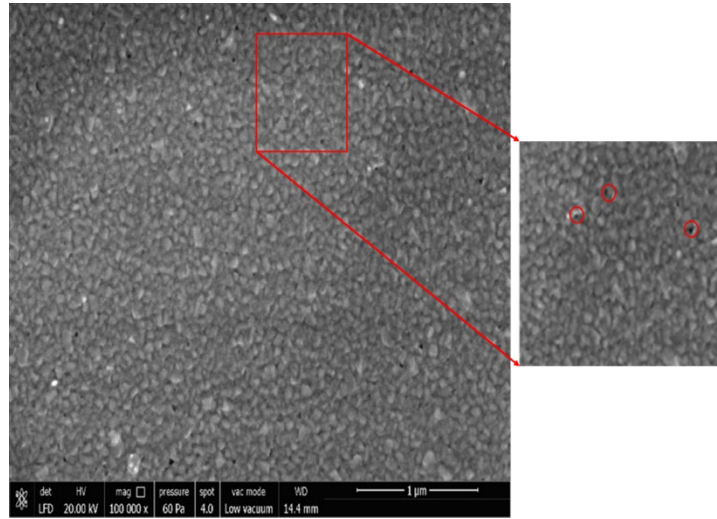
Şekil 4’te sunulan eş zamanlı buharlaştırma ile üretilen filmin SEM görüntüsünde, genellikle daha küçük ve düzensiz şekilli tanelerin bir araya gelmesiyle oluşan bir yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Eş zamanlı buharlaştırma sistemi ile üretilen ince filmin SEM görüntüsü

Şekil 5’te sunulan flaş buharlaştırma ile üretilen filmin SEM görüntüsünde ise daha homojen ve yoğun şekilde kümelenmiş taneciklerden oluşan pürüzsüz bir yüzey morfolojisi sergilemektedir. Film yüzeyinde daha az

boşluk veya kusur gözlemlenmiştir. Bu durum, flaş buharlaştırma yönteminin daha yoğun ve homojen film büyümesini desteklediğini göstermektedir.



Şekil 5. Flaş buharlaştırma sistemi ile üretilen ince filmin SEM görüntüsü

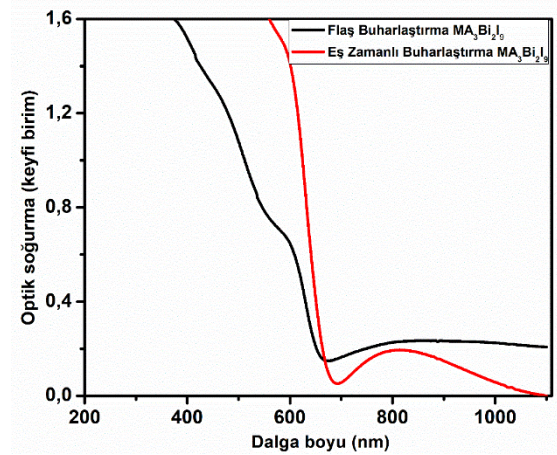
SEM analizi bulguları, flaş buharlaştırma ile daha iyi film kalitesi elde edildiği sonucunu desteklemektedir. Daha homojen ve yoğun bir yüzey morfolojisi, ışık absorpsiyonunun artmasına ve taşıyıcı rekombinasyonunun azalmasına katkıda bulunabilir, bu da optoelektronik cihaz performansını doğrudan etkiler.

$\text{MA}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ ince filmlerinin optik özellikleri UV-Vis spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiş ve her iki buharlaştırma yöntemi için elde edilen sonuçlar Şekil 6-8'de sunulmuştur. Şekil 6'da verilen optik soğurma spektrumuna göre, her iki yöntemle elde edilen filmlerin görünür bölgeye kadar güçlü bir absorpsiyon gösterdiği, 600-700 nm aralığında ise belirgin bir absorpsiyon gözlemlendiği belirlenmiştir. Flaş buharlaştırma yöntemiyle hazırlanan filmde ise özellikle 400-650 nm aralığında daha yüksek absorpsiyon değerlerine sahip olduğu ve bu durumun filmin daha yoğun ve homojen bir yapıya sahip olmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Elde edilen yapısal bulgular ile optik sonuçlar arasında doğrudan bir ilişki gözlenmektedir. Flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmler daha keskin ve yüksek şiddetli XRD pikleri ile daha düzenli bir kristal yapıya işaret etmektedir. Ayrıca SEM görüntülerinde bu filmlerin daha yoğun ve homojen morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. Bu yapısal üstünlükler, optik ölçümlerde daha keskin absorpsiyon kenarları, görünür bölge boyunca daha yüksek ışık soğurma ve Tauc eğrilerinde daha net kesişim noktaları ile örtüşmektedir. Dolayısıyla yapısal kalite ile optik performans arasında güçlü bir korelasyon olduğu ve flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerin daha üstün optoelektronik özellikler sergilediği sonucuna varılmıştır.

UV-Vis spektroskopisinden elde edilen bu bulgular, her iki filmde de $\text{MA}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ bileşiğinin görünür ışık bölgesinde etkin ışık absorpsiyonu gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Ancak flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen film, spektral bölgede daha belirgin ve güçlü absorpsiyon sergileyerek üretim kalitesindeki farkı ortaya koymaktadır. Flaş

buharlaştırma yöntemi ile üretilen ince filmde gözlemlenen daha yüksek absorpsiyonun nedeni olarak, ince filmin kristalinite oranının daha yüksek olması ve dolayısıyla daha az kusur içeren bir film yapısı elde edildiğini işaret edebilir.



Şekil 6. Optik soğurma spektrumu

Malzemelerin optik bant aralıklarının belirlenmesi amacıyla Tauc yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemde absorpsiyon katsayısı (α), foton enerjisi ($h\nu$) ile ilişkilendirilerek bant aralığı tayin edilir. Tauc denklemi denklem 2'de sunulmuştur (Tauc, 1974).

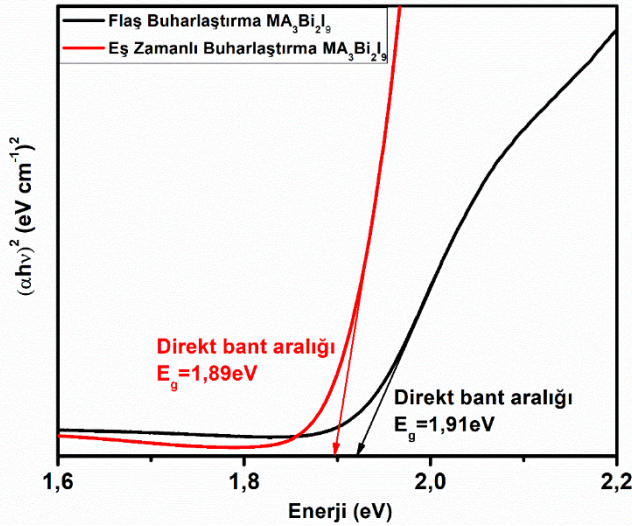
$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

Denklemden; α : absorpsiyon katsayısı, $h\nu$: foton enerjisi, n : geçiş türüne bağlı olarak değişen sabittir ($n=2$: doğrudan bant aralığı, $n=1/2$: dolaylı bant aralığı).

Absorpsiyon katsayısı, absorpsiyon (A) ve film kalınlığı (d) üzerinden yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanır (Swanepoel, 1983):

$$\alpha = \frac{2,303 \times A}{d} \quad (3)$$

Bu çalışmada, üretilen ince filmlerin kalınlıkları yaklaşık ± 20 nm değişiklik göstermekle birlikte, karşılaştırmalı analizlerde bir referans değeri olarak 215 nm kalınlık esas alınmıştır. Bu nedenle, Tauc eğrileri doğrudan absorbans değerleri üzerinden yorumlanarak bant aralığı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de yer alan Tauc grafikleri üzerinden doğrudan bant geçişleri analiz edilmiştir. Eş zamanlı buharlaştırma yöntemi ile 1,89 eV elde edilirken flaş buharlaştırma yöntemiyle elde edilen ince filmlerde 1,91 eV elde edilmiştir. Bu fark, flaş yöntemiyle elde edilen filmlerin daha net enerji seviyeleri ve kristal yapı sunmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Direkt bant aralığı

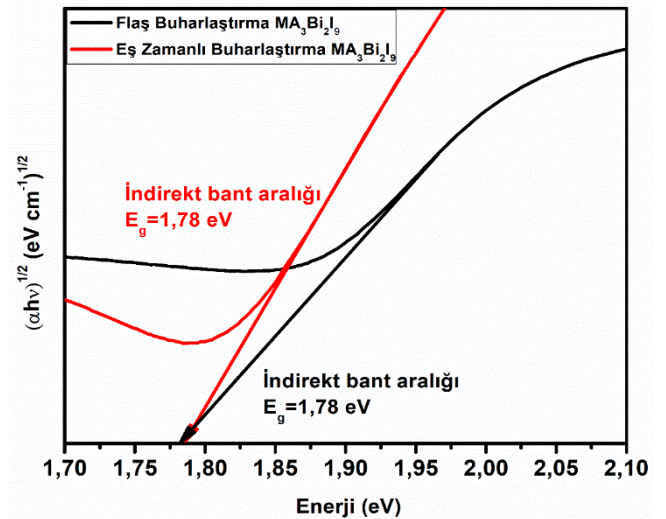
Şekil 8’de gösterilen dolaylı geçişli bant aralığı grafiğine göre her iki yöntemde de dolaylı bant aralığı: 1,78 eV olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan bu sonuç, MA₃Bi₂I₉ malzemesinin hem doğrudan hem dolaylı geçişli yarı iletken karakteri taşıdığını göstermektedir.

Elde edilen bant aralığı değerleri, MA₃Bi₂I₉ malzemesi için literatürde raporlanan 1,8–2,1 eV aralığıyla

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, MA₃Bi₂I₉ ince filmlerinin flaş ve eş zamanlı buharlaştırma yöntemleriyle üretimi ve karşılaştırmalı yapısal, morfolojik ve optik özellikleri başarıyla incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her iki yöntemin de MA₃Bi₂I₉ ince filmleri üretmek için uygun olduğunu göstermiştir. Ancak, flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen filmlerin UV-Vis analizlerinde daha yüksek absorbans değerleri ve daha keskin absorpsiyon sergilediği, bu durumun filmin daha yoğun ve homojen yapısından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bant aralığı analizleri, flaş buharlaştırma filmlerinin daha belirgin doğrudan bant geçişine (1,91 eV) sahip olduğunu göstermiştir. XRD analizleri, flaş buharlaştırma ile üretilen filmlerin daha yüksek kristalinite ve daha iyi yapısal kalite sunduğunu ortaya koymuştur. SEM görüntüleri de flaş buharlaştırma filmlerinin daha homojen ve sıkıca paketlenmiş taneciklerden oluşan bir yüzeye sahip olduğunu

uyumludur (Park vd., 2015; Lyu vd., 2016; Kong vd., 2017; Maiti vd., 2019). Aradaki küçük farklılıkların film üretim yöntemi, film kalınlığı ve morfolojik özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Teorik çalışmalar genellikle dolaylı bant boşluğunu işaret etse de, güçlü absorpsiyon kenarı ve optoelektronik performans açısından doğrudan bant geçişi daha belirleyici olmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda doğrudan bant aralığı değerleri (1,89–1,91 eV) optik performans değerlendirmelerinde esas alınmıştır. Ayrıca flaş buharlaştırma yöntemiyle üretilen film, daha keskin absorpsiyon kenarları, görünür bölge boyunca daha yüksek ışık absorpsiyonu ve daha belirgin Tauc eğrisi kesişim noktaları ile öne çıkmaktadır. Bu durum filmdeki kristal kusurların azlığını ve üretim kalitesinin yüksekliğini göstermektedir. Her iki üretim yöntemiyle optik olarak aktif ince filmler elde edilmiş olsa da flaş buharlaştırma yöntemi optik soğurma performansı, bant geçiş netliği ve optoelektronik uygulamalara uygunluk açısından daha üstün nitelikler sunmaktadır.



Şekil 8. İndirekt bant aralığı

desteklemektedir. Tüm bu sonuçlar, flaş buharlaştırma yönteminin kurşunsuz MA₃Bi₂I₉ perovskit ince filmlerin üretiminde üstün bir yöntem olduğunu ve yüksek performanslı, kararlı optoelektronik cihazların geliştirilmesi için umut vadeden bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu filmlerin doğrudan güneş hücrelerinde kullanılarak cihaz performans testlerinin yapılması ve uzun süreli stabilite analizlerinin gerçekleştirilmesine ve farklı transistör uygulamalarına odaklanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından (Proje No: 0772-YL-21) desteklenmiştir. Ayrıca KOSGEB tarafından 1328200 başvuru numarası ve 2024-620-19/01 karar numarası ile desteklenmiştir.

Yazar Katkıları

Gökhan YILMAZ: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntem, (d) Danışmanlık, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (h) Metin Yazma, (i) Eleştirel İnceleme

Asuman KOÇU: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntem, (d) Danışmanlık, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (h) Metin Yazma, (i) Eleştirel İnceleme

Etik Beyanı

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.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

KAYNAKLAR

- Babayigit, A., Ethirajan, A., Müller, M., & Conings, B. (2016). Toxicity of organometal halide perovskite solar cells. *Nature Materials*, 15(3), 247–251. <https://doi.org/10.1038/nmat4572>
- Chin, X. Y., Cortecchia, D., Yin, J., Bruno, A., & Soci, C. (2015). Lead iodide perovskite light-emitting field-effect transistor. *Nature Communications*, 6, 8383. <https://doi.org/10.1038/ncomms8383>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray diffraction (3rd ed.). Pearson Education.
- Deng, Y., Peng, E., Shao, Y., Xiao, Z., Dong, Q., & Huang, J. (2015). Scalable fabrication of efficient organolead trihalide perovskite solar cells with doctor-bladed active layers. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1544–1550. <https://doi.org/10.1039/c4ee03907f>
- Guo, Z., Manser, J. S., Wan, Y., Kamat, P. V., & Huang, L. (2015). Spatial and temporal imaging of long-range charge transport in perovskite thin films by ultrafast microscopy. *Nature Communications*, 6, 8471. <https://doi.org/10.1038/ncomms8471>
- Hutter, E. M., Eperon, G. E., Stranks, S. D., & Savenije, T. J. (2015). Charge carriers in planar and meso-structured organic-inorganic perovskites: Mobilities, lifetimes, and concentrations of trap states. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(15), 3082–3090. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.5b01361>
- Kim, G. Y., Kim, K., Kim, H. J., Jung, H. S., Jeon, I., & Lee, J. W. (2023). Sustainable and environmentally viable perovskite solar cells. *EcoMat*, 5(4), e12319. <https://doi.org/10.1002/eom2.12319>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Kong, W., Ye, Z., Qi, Z., Zhang, B., Wang, M., Yang, X., ... Wu, H. (2017). Nontoxic (CH₃NH₃)₃Bi₂I₉ perovskite solar cells. *RSC Advances*, 7(13), 7683–7687. <https://doi.org/10.1039/C7RA04924B>
- Li, F., Ma, C., Wang, H., Hu, W., Yu, W., Sheikh, A. D., & Wu, T. (2015). Ambipolar solution-processed hybrid perovskite phototransistors. *Nature Communications*, 6, 8238. <https://doi.org/10.1038/ncomms9238>
- Lian, Z., Yan, Q., Gao, T., Ding, J., Lv, Q., Ning, C., Li, Q., & Sun, J. L. (2016). Perovskite CH₃NH₃PbI₃(Cl) single crystals: Rapid solution growth, unparalleled crystalline quality, and low trap density toward 10⁸ cm⁻³. *Journal of the American Chemical Society*, 138(30), 9409–9412. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b05683>
- Lyu, M., Yun, J. H., Cai, M., Jiao, Y., & Wang, Q. (2016). Organic-inorganic bismuth(III)-based material: A lead-free, air-stable and solution-processable light absorber beyond organolead perovskites. *Nano Research*, 9(3), 692–702. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0948-y>
- Maiti, A., Paul, G., Bhunia, H., & Pal, A. J. (2019). Band-edges of bismuth-based ternary halide perovskites (A₃Bi₂I₉) through scanning tunneling spectroscopy vis-à-vis impact of defects in limiting the performance of solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109941. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109941>
- Mei, Y., Zhang, C., Vardeny, Z. V., & Jurchescu, O. D. (2015). Electrostatic gating of hybrid halide perovskite field-effect transistors: Balanced ambipolar transport at room-temperature. *MRS Communications*, 5(2), 297–301. <https://doi.org/10.1557/mrc.2015.21>
- Momblona, C., Kanda, H., Sutanto, A. A., Mensi, M., Roldán-Carmona, C., & Nazeeruddin, M. K. (2020). Co-evaporation as an optimal technique towards compact methylammonium bismuth iodide layers. *Scientific Reports*, 10(1), 67606. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67606-1>
- Motta, C., El-Mellouhi, F., & Sanvito, S. (2015). Charge carrier mobility in hybrid halide perovskites. *Scientific Reports*, 5, 12746. <https://doi.org/10.1038/srep12746>
- National Renewable Energy Laboratory. (2024, December 25). *Best research-cell efficiency chart*. U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Oga, H., Saeki, A., Ogomi, Y., Hayase, S., & Seki, S. (2014). Improved understanding of the electronic and energetic landscapes of perovskite solar cells: High local charge carrier mobility, reduced recombination, and extremely shallow traps. *Journal of the American Chemical Society*, 136(39), 13818–13825. <https://doi.org/10.1021/ja506936f>
- Park, B. W., Philippe, B., Zhang, X., Rensmo, H., Boschloo, G., & Johansson, E. M. (2015). Bismuth based hybrid

- perovskites A₃Bi₂I₉ (A: methylammonium or cesium) for solar cell application. *Advanced Materials*, 27(43), 6806–6813. <https://doi.org/10.1002/adma.201501978>
- Rani, M., Khan, M. M., Numan, A., Khalid, M., Abbas, S. M., Iqbal, M., & Mansoor, M. A. (2025). Breaking barriers: Addressing challenges in perovskite solar cell development. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177648. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177648>
- Román-Vázquez, M., Vidyasagar, C. C., Muñoz-Flores, B. M., & Jiménez-Pérez, V. M. (2020). Recent advances on synthesis and applications of lead- and tin-free perovskites. *Journal of Alloys and Compounds*, 835, 155112. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155112>
- Stranks, S. D., & Snaith, H. J. (2015). Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices. *Nature Nanotechnology*, 10(5), 391–402. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.90>
- Swanepoel, R. (1983). Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16(12), 1214–1222. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>
- Tang, M., Barrit, D., Munir, R., Li, R., Barbé, J. M., Smilgies, D., Del Gobbo, S., Anthopoulos, T. D., & Amassian, A. (2019). Bismuth-based perovskite-inspired solar cells: In situ diagnostics reveal similarities and differences in the film formation of bismuth- and lead-based films. *Solar: Rapid Research Letters*, 3(2), 1800305. <https://doi.org/10.1002/solr.201800305>
- Tauc, J. (1974). Optical properties of solids. In F. Abeles (Ed.), *Optical Properties of Solids* (pp. 277–301). North-Holland.
- Zhou, K., Qi, B., Liu, Z., Wang, X., Sun, Y., & Zhang, L. (2024). Advanced organic–inorganic hybrid materials for optoelectronic applications. *Advanced Functional Materials*, 34(52), 2411671. <https://doi.org/10.1002/adfm.202411671>