



BOROFENİN Si/SiO₂ SUBSTRATINA KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE DİREKT OLARAK SENTEZLENMESİ VE ANALİZİ

Mehmet BAY^{1*}

¹Eskisehir Technical University, Porsuk Vocational School, Department of Electronics and Automation, 26140, Eskisehir, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, borofenin doğrudan Si/SiO₂ alt taşı üzerine kimyasal buhar biriktirme metodu (KBB) ile sentezlenmesi ve analizine, ayrıca potansiyel uygulamalarına yer verilmiştir. Borofenin kalınlık kontrollü olarak homojen büyütülmesi, 2 boyutlu malzeme tabanlı yüksek performanslı cihaz üretiminde kritik öneme sahiptir. Borofen, Grafene benzer özelliklere sahip olup kristal yapısı, yüksek çekme gücü ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri nedeniyle, sensör uygulamaları, foto detektörler, gaz sensörleri, 2 boyutlu enerji depolama uygulamaları gibi birçok alanda cazip bir malzeme haline gelmiştir. Sonuçlar, borofen tabanlı cihazların potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu potansiyel, yüksek kristalli ve katmanlı iki boyutlu düzenleme gibi benzersiz yapısal özellikler nedeniyle elde edilmiştir. Metal alt taşlarında borofenin büyütülmesi, kolay bir şekilde sentezlenirken, yüksek kaliteli analiz imkânı ve performanslı cihazlar için kritik olan Si/SiO₂ alt taşlarında büyütülmesi, katalizör etkisi azaldığı için daha zor olur. Bu zorluk, KBB parametreleri olan basınç, reaksiyon sıcaklığı, gaz akış oranı, kimyasal toz miktarları gibi birçok KBB parametresi optimize edilerek borofenin Si/SiO₂ alt taşı üzerine başarılı şekilde büyütülmesiyle aşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Borofen, KBB, Si/SiO₂

Analysis and Direct Synthesis of Borophene on Si/SiO₂ Substrate using CVD Method

Abstract: This study presents the synthesis and analysis of borophene by chemical vapor deposition (CVD) on Si/SiO₂ substrate, as well as its potential applications. The controlled growth of borophene with homogeneous thickness is crucial for the production of high-performance devices based on two-dimensional materials. Borophene, with its graphene-like properties, including crystalline structure, high tensile strength, and electrical conductivity, is a promising material for various applications, such as sensors, photodetectors, gas sensors, and 2D energy storage devices. The results demonstrate the potential of borophene for the development of essential devices. This potential is attributed to its unique structural features, including high crystallinity and layered two-dimensional arrangement. While borophene can be easily synthesized on metal substrates, its growth on Si/SiO₂ substrate is more challenging due to the reduced catalyst effect. However, this challenge was overcome by optimizing the CVD parameters, including pressure, reaction temperature, gas flow rate, and chemical powder concentration, resulting in successful growth of borophene on Si/SiO₂ substrate.

Keywords: Borophene, CVD, Si/SiO₂

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Eskisehir Technical University, Porsuk Vocational School, Department of Electronics and Automation, 26140, Eskisehir, Türkiye

E mail: mehmetbay@eskisehir.edu.tr (M. BAY)

Mehmet BAY <https://orcid.org/0000-0001-6447-6460>

Gönderi: 11 Eylül 2024

Kabul: 23 Ekim 2024

Yayınlanma: 15 Kasım 2024

Received: September 11, 2024

Accepted: October 23, 2024

Published: November 15, 2024

Cite as: Bay M. 2024. Analysis and direct synthesis of borophene on Si/SiO₂ substrate using CVD method. BSJ Eng Sci, 7(6): 1280-1286.

1. Giriş

Grafenin keşfiyle iki boyutlu malzemelere olan ilgi artarak devam etmektedir (Novoselov ve ark., 2005a; Geim ve Novoselov, 2007). İki boyutlu malzemelerin yapısal özellikleri bakımından ele alındığında kristal yapı özellikleri, elektriksel özellikleri, manyetik özellikleri, yüzey özellikleri nedeniyle birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırma konularıyla ilgili akademik çalışmalar artarak devam etmektedir (Novoselov ve ark., 2005b). Grafene benzer özellikleriyle ilgi çeken diğer bir malzeme ise borofendir (Hou ve ark., 2020). Borofen içyapısal özellikleri ve 30 dan fazla kristal örgü çeşidi olması nedeniyle araştırma konularında önemli merak

konusu olmuştur (Rahman ve ark., 2023). Bu gizemli malzemenin bazı özellikleri 2 boyuta düştüğünde değişmesi, birçok uygulamada cihaz üretimi olarak karşımıza çıkmaktadır (Somesh ve ark., 2024). İki boyutlu malzemelerin üretiminde kimyasal aşındırma, mekanik eksfoliasyon, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (KBB) birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin içinde KBB kullanım kolaylığı ve birçok parametrelerin olması bakımından çok kullanışlı bir yöntemdir (Bay ve ark., 2019). Bu çalışmada, özellikle metal alt taşların katalizör etkisiyle üzerinde homojen ve tam kaplama olacak şekilde borofen büyütülmesi başarılmıştır ancak borofenin, kalınlık kontrolü dâhil 300

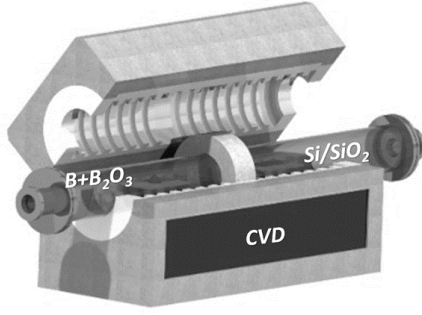


nm silikon dioksit kaplı silikon alt taş (Si/SiO_2) üzerinde homojen tam kaplama ve büyütmesi araştırma ve geliştirme aşamasındadır (Yu ve ark., 2022). Si/SiO_2 alt taşı cihaz tasarımında ve analiz işlemlerinde en çok kullanılan alt taşlardan biridir (Kobayashi ve ark., 2008). Örneğin bakır üzerinde büyütülen Si/SiO_2 AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ölçümü alabilmek için Si/SiO_2 alt taşı üzerine transfer etmek gerekir aynı şekilde optik mikroskop ölçümü SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ölçümü gibi önemli analizlerde Si/SiO_2 alt taşı kullanılmasının avantajı vardır (Chen ve ark., 2017). Bu çalışmada transfer işleminde oluşan kayıplara engel olacak yöntem geliştirilmiştir. Yapılan birçok deneyin ardından gaz akış hızı, sıcaklık, sıcaklık yükseliş süresi gibi birçok KBB parametrenin optimizasyonu sonucunda bir KBB reçetesi geliştirilmiştir ve borofenin KBB yöntemiyle Si/SiO_2 alt taşı üzerine direkt büyütülmesi başarılı şekilde gerçekleşmiştir. Bu çalışmada, borofenin Si/SiO_2 üzerine büyütme ile ilgili geliştirilen yöntem ve analizler iki boyutlu malzeme tabanlı yüksek teknolojik cihazların üretimini kolaylaştırdığı ve performansını arttırabileceği için ümit vadetmektedir. Bu çalışmanın literature katkısı, yüksek performanslı cihaz üretimi için önem arzeden borofen yapılarının transfer işlemine gerek kalmadan direkt olarak Si/SiO_2 alttaşı üzerinde büyütülmesi ve analizidir.

2. Materyal ve Yöntem

Borofen sentezi için yapılan birçok deneyin ardından oluşan KBB reçetesi, KBB parametrelerinin optimizasyonu sonucunda oluşmuştur. KBB parametreleri, örneğin, gaz çeşidinden hidrojen (H_2) 0-100 sccm, Nitrojen (N_2) 0-100 sccm, argon (Ar) 0-100 sccm arasındadır. Sıcaklık iki farklı alanda olmak üzere 0-1000 °C' arasındadır. İki farklı sıcaklık alanı arasındaki sıcaklık farkı ilave izolatör parçaların sayesinde 350 °C kadar ayarlanabilmektedir. Vakum cihazı ve kontrolör sayesinde 2 Torr - 750 Torr arasında basınç ayarlanabilmektedir. Normal basınçta 1000 °C üzerinde olan erime sıcaklığını basıncı düşürerek erime sıcaklığını da 1000 °C altına çekerek aynı malzemenin buharlaşması kontrol edilebilmektedir. Substrate çeşidi olarak cam, kuvars, Si/SiO_2 , bakır (Cu), tungsten (W), molibden (Mo) alt taşları gibi birçok substrate bulunmaktadır (Xie ve ark., 2020). Metal alt taşları üzerinde büyütülen borofenin analizi ve yüksek performanslı aygıt üretimi için Si/SiO_2 alt taşı üzerine transfer edilmesi gerekmektedir. Transfer işleminde uygulanan işlemler nedeniyle iki boyutlu üretimin zarar görmesine yüzey çatlakların ve deformasyonun oluşmasına alt taşla borofen arasındaki bağların kırılmasına, kayıpların artmasına ve dolayısıyla analiz ve yüksek performanslı cihaz üretimine olumsuz etkilemektedir. Bu sorunu bertaraf etmek için, Si/SiO_2 alt taşı üzerine direkt olarak KBB büyütülmesi çok önemli bir ihtiyaçtır. Çünkü kaliteli analizler yapılabilmesi ve iki boyutlu - yüksek performanslı cihaz fabrikasyonu için homojen temiz büyütülmüş borofen gerekiyor. Si/SiO_2 alt taşın üzerinde yaklaşık 300nm Si/SiO_2 olan alt kısmında

silisyum olan bir alt taşdır. Si/SiO_2 alt taşın birçok avantajı vardır, bunların başında, kaliteli analiz sonuçları gelir, örneğin optik mikroskopta analiz yaparken, yüzey görüntüyü görmemiz için uyumludur. Başka bir örnek AFM ölçümüdür. Piezoelektrik malzemeye belirli bir potansiyel farkla yüzeye mesafe kullanarak ölçüm yapan AFM cihazı, pürüzlülüğü ölçerken alt taşın daha az pürüzlü olmasıyla, 2 boyutlu yapının yüzeyinden pürüzlülük ölçümü alındığında daha az pürüzlülük değeri verecektir. Diğer bir örnek ise SEM cihazında yüzeyde metal alt taş üzerinde büyütme göre daha az elektrik şarlanması yapar. Si/SiO_2 üzerinde büyütülen örneklerin hem düz zeminde olması hem de yalıtkan zeminde olması avantajdır ve yüksek çözünürlüklü SEM görüntülerin kalitesine olumlu etki etmektedir. I-V ölçümünde alt taşın metal olmadığı için zeminin IV grafiğine etkisi minimumdur. EDX (Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi) ve XRD (X-ray spektroskopisi) de aynı durum söz konusudur. Si/SiO_2 üzerinde homojen şekilde borofen üretiminin yapılamamasının nedeni, metaldeki katalizör etkisinin olmayışındır. Metal alt taşlar metal özelliklerinden dolayı katalizör etkisi yaparak bor atomlarının birbiriyle ve metal alt taş yüzeyi ile bağ kurması için daha uygun hale getirir ve borofen yapılarının homojen büyümesine olumlu etki eder. Katalizör etkisinden yola çıkarak, borofenin geçiş metalleriyle etkileşimden dolayı ortaya yeni malzemeler çıkıyor ve metal borürler ismiyle tanımlanıyor (Zha ve ark., 2019). Borofen büyütmede her hangi bir geçiş metalini KBB yönteminde alt taş olarak kullanılması durumunda Si/SiO_2 alt taş olduğu duruma göre homojen ve tam kaplama olarak büyüdüğü gözlemlenecektir. Bu çalışmada, metal alt taşı üzerinde tam kaplama borofen büyütme, Si/SiO_2 alt taşı üzerinde kaliteli analiz sonuçları ve yüksek performanslı cihaz üretimi imkânını aynı anda sağlayacak şekilde KBB parametreleri geliştirilmiştir. Borofenin Si/SiO_2 üzerinde direkt olarak homojen, tam kaplama, kalınlık kontrollü olacak şekilde büyütülmesi başarıyla gerçekleşmiş, üretilen borofen yapılarını olumsuz etkileyen transfer işlemine gerek kalmamıştır. Borofenin Si/SiO_2 alt taşı üzerinde büyütürken, reaksiyon sıcaklığı 1000 °C ve reaksiyon süresi 20 dakika olarak optimize edilmiştir. Vakum şartlarında gerçekleşen KBB reaksiyonları için 100 sccm N_2 ve 20 sccm H_2 gazı KBB sistemine verilmiştir. Boron (B) ve Diberon trioksit (B_2O_3) kimyasal tozların oranı 1:1 olarak belirlenerek toplamda 50 mg kimyasal karışım kuvars plakaya eklenmiştir. Kimyasal tozlar ile Si/SiO_2 alt taşı arasında 30 cm mesafe bırakılarak deney seti hazırlanmıştır (Şekil 1). Birçok deneyin ardından elde edilen KBB reçetesi, tekraren yapılan deneyleriyle aynı parametreler ile borofenin Si/SiO_2 alttaşı üzerinde büyütülmesi test edilmiş, reçetenin başarılı olduğu tespit edilmiştir.



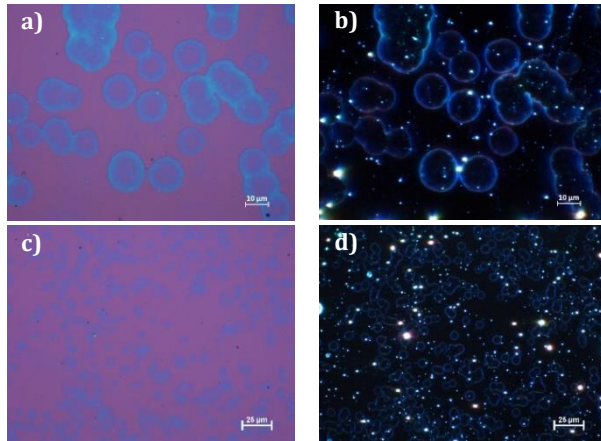
Şekil 1. Kimyasal buhar biriktirme (KBB) sistemi.

Borofenin KBB ile Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmesinden sonra, analiz aşaması başlar. İlk olarak optik mikroskopta yüzey formasyonu ve kaplama oranı incelenen borofen yapıları daha sonrasında XRD kristal yapısı incelemek için analiz yapılır. Yüksek çözünürlüklü SEM ile borofen yapılarının yüzey morfolojisi incelenir. EDX kullanılarak Si/SiO₂ alt taşı ve borofen yapılarının yüzdelik oranda kimyasal ve element olarak dağılımı tespit edilir. Raman spektroskopisi sayesinde borofen yapılarının kendi aralarında ve Si/SiO₂ alt taşı arasındaki bağların moleküler titreşimleri analiz edilir. AFM atomik kalınlıklarda üretilen borofen yapılarının topograf analizi gerçekleştirilir. Son olarak üzerine metal kontaklar atılmış borofen yapılarının akım-gerilim (I-V) ölçümü yapılarak incelenir.

3. Bulgular

3.1. Optik Mikroskobu Ölçümü

Borofenin yapılarının optik mikroskobu ölçümleri, homojen kaplama oranı ve yüzey formasyonu hakkında bilgi edinmek için alınmıştır (Şekil 2). İlk olarak 10 µm bar ölçekli bright ve dark field modunda ölçümler alınmış yüzeyin detaylarını daha rahat gözlenmesi sağlanmıştır (Şekil 2a ve 2b). Daha sonra 25 µm barlı ölçümler alınmıştır bu ölçümler mikroskobun 50x merceğinde alınmıştır (Şekil 2c ve 2d). Bu sayede borofenin Si/SiO₂ alt taşı üzerine direk büyütülmesinde homojen kaplamanın olduğu gözlenmiştir.

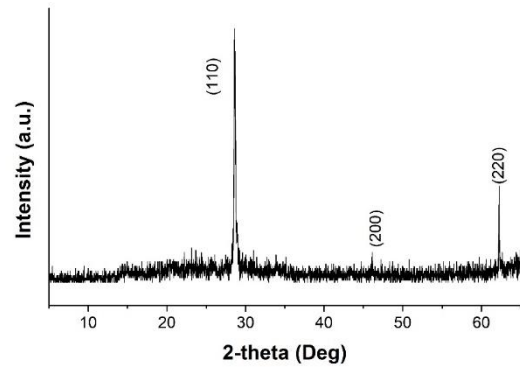


Şekil 2. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin optik mikroskobu ölçümleri a) bright field 100x, b) dark field 100x, c) bright field 50x, d) dark field 50x.

3.2. XRD Ölçümü

Borofenin X-ray spektroskopisi ölçümü 0°-90° arasında alınmış olup her dakikada 2° olacak şekilde ilerleme sağlanmıştır (Şekil 3). Yaklaşık 45 dakika süren ölçümün sonucunda alınan tepe değerleri; 28° (110), 48° (200), 63° (220) derecelere denk gelmiştir ve sonuçlar literatür ile uyumludur (Chinnalagu ve ark., 2023). En uzun tepe değeri olan 28° de (110) tepe değeri verilerini Scherrer denklemini (1) uyguladığımızda parçacık size değeri yaklaşık olarak 17 nm olarak hesaplanmıştır (Alemán-Vázquez ve ark., 2005). Scherrer denkleminde D kristal grain büyüklüğünü (nm), K boyutsuz sabit sayıyı (0.9), λ (nm) X-ray dalga boyunu, β (rad) yarı maksimumdaki tam genişlik değerini, θ (rad) Bragg açısını niteler (eşitlik 1).

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

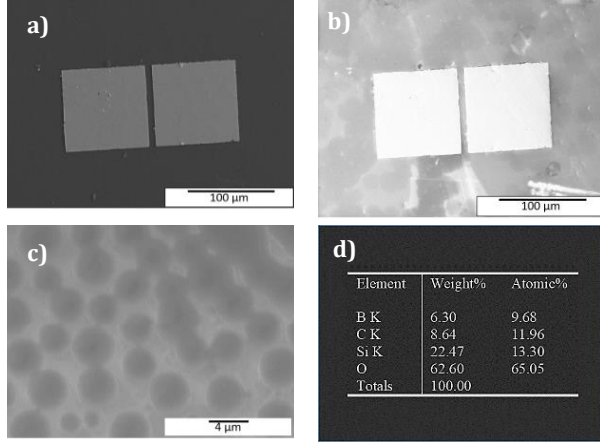


Şekil 3. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin XRD ölçümü.

3.3. Yüksek Çözünürlüklü Taramalı Elektron SEM & EDX Ölçümleri

Borofenin yüksek çözünürlüklü (SEM & enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi (EDX) ölçümleri borofen yapıları, metal kontak yüzeyleri daha ayrıntılı inceleme imkânı sunmuştur. Ölçüm alınırken EHT değeri 20 KV, magnifikasyon değeri 1000x ve 5000x, working distance (WD) değeri 8 mm olarak ayarlanmıştır. SEM ölçümlerinde görüntülerin detaylarını incelemek için farklı modlarda görüntü ölçümü alınmıştır. Bu görüntüleme modları inlens ve secondary electron modu olarak tanımlanır. İki modun farklarını aynı şekil üzerinden alınmış iki farklı moddaki görüntü ölçümünden bakarak incelenebilir (Şekil 4a ve 4b). Şekil 4b bakıldığında inlens modunda en üstteki metal kontak yüzeyinin detaylı gözüktüğü ve secondary electron modda ise Si/SiO₂ alt taşı ile metal kontak arasında bulunan borofen yapılarının detaylarını gözüktüğü tespit edilmiştir. Borofenin Si/SiO₂ üzerine kaplandıktan sonra, fotolitografi işlemi yapıldı ve daha sonrasında metal evaporatör cihazıyla Au/Ti metal kontaklar atıldı. Uzun süren bu işlemin ardından yüzeye nasıl kontak yaptığını gözlemlemek için SEM görüntüsünü alındı. Şekil 4c ve 4d ise tek katmanlı borofen yapılarını SEM ölçümü vasıtasıyla inceleme imkânı sunmaktadır. Ek olarak aynı

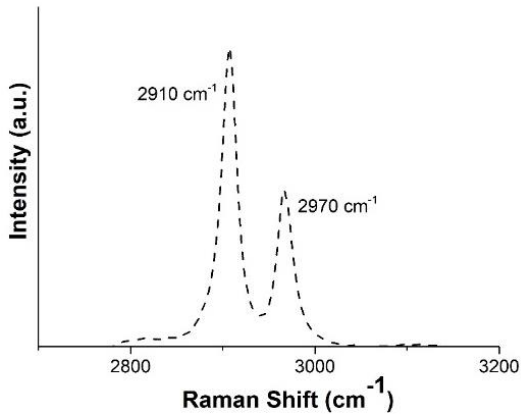
alandan alınan EDX ölçümünden alınan sonuçlara göre; ağırlık olarak borofen (B) % 6,30, karbon (C) % 8,64, silikon (Si) % 22,47, oksijen (O) % 62,60. Atomik olarak borofen (B) % 9,68, karbon (C) % 11,96, silikon (Si) % 13,30, oksijen (O) % 65,05 olarak rapor edilmiştir. Sem ölçümlerine bakıldığında, borofenin benzer formda ve homojen şekilde büyütüldüğü ispatlanmıştır.



Şekil 4. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin SEM ölçümü: a) Au/Ti metal kontak in lens mod, b) Au/Ti metal kontak sekonder elektron mod, c) tek katmanlı borofen yapıları, d) tek katmanlı borofen yapıların EDX ölçümü.

3.4. Raman spektroskopisi Ölçümü

Si/SiO₂ üzerine büyütülmüş borofenin sahip olduğu bağların titreşimleri hakkında veri alabilmek için Raman spektroskopisi ölçümü yapıldı. Sonuçlara bakıldığında borofene has 2910 cm⁻¹ ve 2970 cm⁻¹ de oluşan tepe değerleri bulunmaktadır (Şekil 5). Borofeni niteleyen bu iki tepe değeri D+G overtone tepe değerine denk gelmektedir (Childres ve ark., 2013). Bu tepe değerleri, tek katma ve az katmanlı (2-3 layer) borofen yapılarına has değerlerdir.

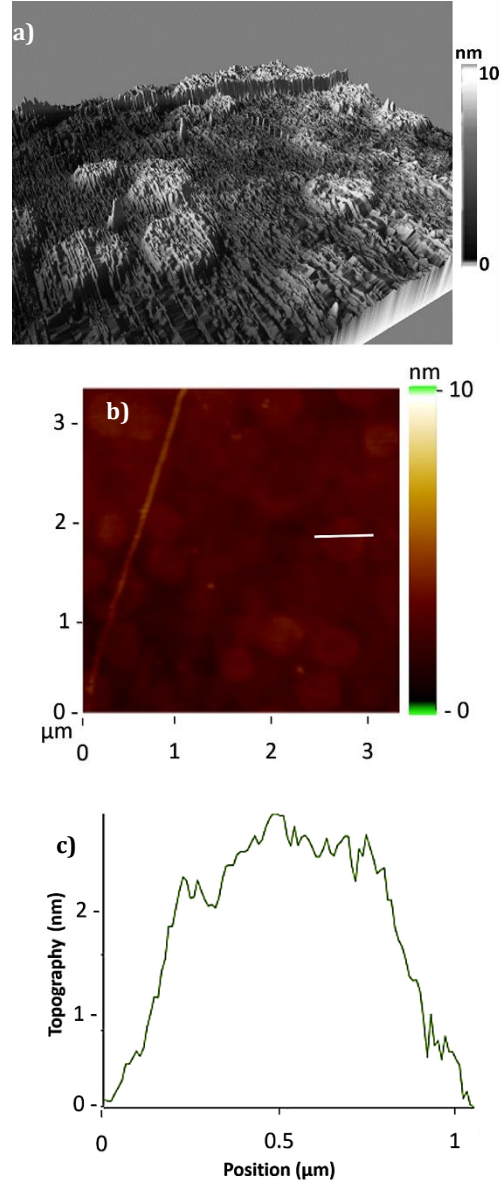


Şekil 5. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin Raman spektroskopisi ölçümü.

3.5. AFM Ölçümü

Si/SiO₂ üzerine büyütülmüş borofenin AFM ölçümleri atomik seviyede üretim yapıldığını göstermek amacıyla

topograf analizi gerçekleştirildi (Şekil 6). Piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı AFM cihazında yüzeye dokunmadan yaklaşık 2 Volt değerinde bir potansiyel fark ayarlanarak yüzeye dokunmadan yani dinamik modda ölçüm alınmaktadır. Şekil 6a tomografik ölçümün 3 boyutlu olarak simülasyonu görülmektedir. Yüzeye dikkatli bakıldığında çalışmanın önceki analiz sonuçlarıyla uyumlu ve benzer disk şekilli yapıların oluştuğu gözlenebilir. Şekil 6b de ise topografi ölçümü görülmektedir yine benzer disk görünümlü borofen yapıları tespit edilmiştir. İçlerinden örnek borofen yapısı seçilerek üzerindeki çizgi ile profil kalınlığı yaklaşık 2,5 nm olarak tespit edilmiştir (Şekil 6c).



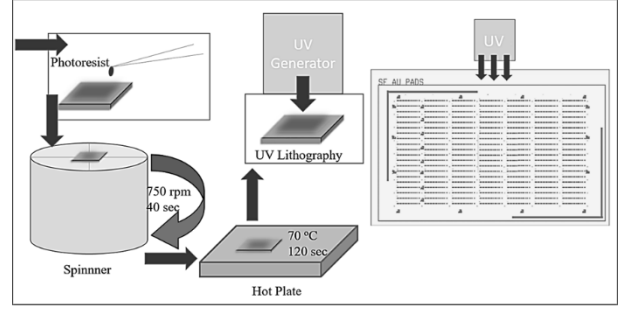
Şekil 6. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin AFM ölçümü: a) 3 boyutlu gösterim, b) topoğraf ölçümü, c) kalınlık profili.

XRD ve AFM sonuçları arasında direkt olarak bağlantı bulunmamakla birlikte, XRD ölçümünden hesaplanan parçacık boyutu; yapının lateral büyüyen kristal örgünün boyutunun hesaplandığı bir değerdir. AFM ölçümünde ise

kalınlık ölçümü yapılmaktadır. İki veri arasında değerlendirme yapılacak olursa, lateral olarak kristal örgünün daha büyük değerde olması, tek tip yönelme olması daha kalite kristal yapının olduğunu gösterirken, AFM ölçümünde pürüzlülük değeri ve kalınlık değerinin küçük olması kaliteli homojen bir büyütme olduğunu gösterir.

3.6. Fotolitografi & Metal Kontak Prosesleri

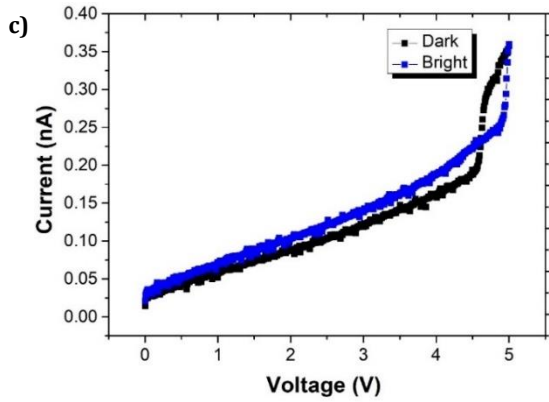
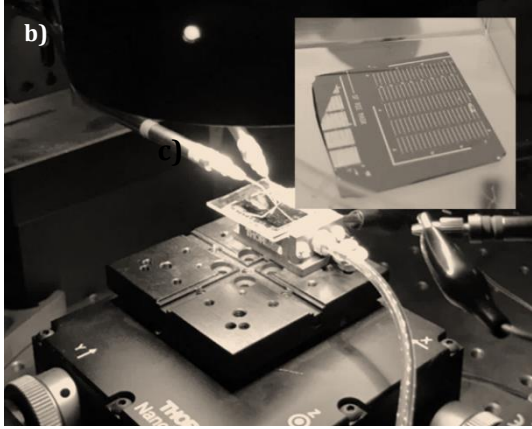
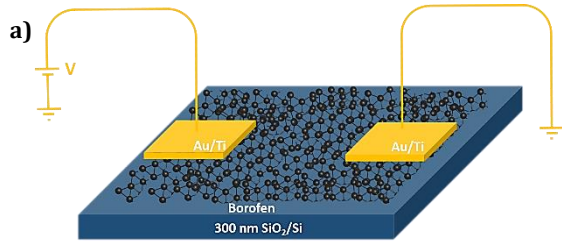
Fotolitografi Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülen borofen yapıları üzerine metal kontak üretimi için kullanılan önemli ve birçok detaylı işlemi olan metottur, borofen yapılarının, bir maskenin yardımıyla, ışığa duyarlı bir direnç üzerine görüntülenmesiyle başlar (Hubenthal, 2011). İşlemlerin dikkatlice yapılması gerekir, zira hata yapıldığında uzun süren bu zorlu süreç baştan başlamaktadır. Fotolitografi ile metal kontak üretimi, transfer işlemi olmadığı için Si/SiO₂ üzerinde direkt büyütülmüş borofen yapıların daha sağlam olması, geniş alanda büyütülmüş olması ve homojen olması nedeniyle daha kaliteli sağlam kontak atma imkânı sağlıyor. Çünkü metal kontak alınacak alanda tamamına yakını borofenle kaplanmıştır her hangi bir yırtılma çekme deformasyon söz konusu değildir. Direkt büyütmenin en büyük avantajı fotolitografi işlemine sağlam zemin oluşturulmasıdır. Fotolitografi işlemi yapıldığında kolayca koparak gitmez. Fotolitografiye hazırlık işlemleri homojen kaplı borofen yapılarının üzerine fotoresist damlatılarak yüzeyde bir kaplama oluşmasıyla başlar, daha sonra spinner ile 750 rpm ve 40 saniye olarak döndürülür. Bu işlemin amacı yüzeye homojen yayılma ve kururken aynı kalınlık elde etmektir. 70 °C de 120 sn sıcak plaka cihazında bekletilir, kurutma işlemi gerçekleşir. UV cihazı ile maskenin ışığı geçirgen kısımlarından geçen UV ışınları fotoresist kaplı alanları kaldırır ışığın geçmediği alanlarda fotoresist kaplı şekilde kalır. Daha sonra metal evaporatör cihazı kullanılarak bu boşluklara Au/Ti kaplanır. Kaplama işlemi 10 nm titanyum (Ti) 90 nm altın (Au) kaplanır. Tüm yüzeyin bu iki metal ile kaplanmasının ardından, asetonda 70 °C de bekletilerek cımbız yardımıyla hafif titrasyon yapılır ve fotoresist olan kısımların altın ve titanyumla birlikte kalkması sağlanır ve yüzeyde borofen üzerinde sadece metal kontaklar kalır. SEM ölçümlerinde görüldüğü üzere metal kontaklar homojen pürüzsüz ve kaliteli şekilde kaplanmıştır. Bu kaplamaların borofen yapıları üzerinde olması alınacak ölçümler ve üretilecek cihazlar için önem arz etmektedir. Fotolitografi işlemlerinin kaliteli şekilde tamamlanarak metal kaplama işleminin sağlam olabilmesini için borofenin Si/SiO₂ üzerine direkt sentezlenmesi kritik öneme sahiptir.



Şekil 7. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin üzerine metal kontak yapılarının fabrikasyonunda kullanılan fotolitografi işlemleri.

3.7. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümü

Si/SiO₂ alt taşı üzerine büyütülmüş borofenin metal kontaklarını kullanarak alınmış I-V ölçümü görülmektedir (Şekil 8). Şekil 8a metal kontak kaplanmış borofen yapılarının üç boyutlu gösterimi yapılmıştır. Şekil 8b de I-V ölçümü için kullanılan prop istasyonu görülmektedir. Prop istasyonunun metal iğneleri kullanılarak borofen yapılarının üzerinde bulunan metal kontaklara temas ederek, kapalı devre kurulmuş olur. Bu devre üzerinde I-V ölçümü alınmıştır. Alınan ölçümlerde bright ve dark ortamda alınarak farkına bakılmıştır (Sahoo ve ark., 2023). 0-5 volt aralığında uygulanan gerilimin sonucunda akımın maksimum 0,35 nA olarak ölçülmüştür (Şekil 8c). Literatürde yayınlanan çalışmalardan biri olan borofenin zararlı gaz detektörü uygulamasındaki I-V sonuçlarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Tian ve ark., 2021). Altın kontakların borofen yapılarının üzerinde fabrike edilmesinden sonra alınan I-V ölçümü karanlık ve aydınlık ortamda voltaj değeri ise 0-5 V aralığında alınmıştır. Gaz sensörü uygulamasında potansiyeli olan bu testin Tian ve arkadaşlarının çalışmasında 0-1 volt aralığında alındığı görülmektedir. Bizim çalışmamızda ise yaklaşık 4 volt değerine kadar lineer bir artış görülmektedir. 4.5 V değerinden sonra oluşan değişim, borofen tabanlı cihazın ışığa karşı hassasiyeti nedeniyle oluşmuştur. Si/SiO₂ alt taşı üzerine büyütülmüş borofen araştırması ilerleyen aşamalarda, özellikle foto detektörü ve gaz detektörü gibi cihaz uygulaması olarak potansiyeli vardır.



Şekil 8. Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmüş borofenin I-V ölçümü a) 3 boyutlu gösterim, b) prop istasyonu, c) IV grafiği.

4. Tartışma

Elde edilen bulgular ışığında, borofenin Si/SiO₂ üzerine büyütülme ihtiyacı tespit edilmiş homojen ve kontrollü şekilde büyütme gerçekleşmiştir. Daha sonra üretilen borofen yapılarının AFM, Raman, EDX, SEM, XRD gibi önemli mikro analizleri yapılarak fiziksel ve yapısal özellikleri incelenmiştir. I-V ölçümüyle akım gerilim ölçümü incelenmiştir. Fotolitografi ve aygıt fabrikasyonu için çok önemli bir sorun olan transfer işlemine gerek duymadan direk büyütme gerçekleşmiştir. Transfer işlemlerinin dezavantajlarından; yüzey kırılmaları malzeme, deformasyonu, kaplanan yüzeyin büyük bir kısmının transfer edilen yüze transfer edilmemesi gibi önemli problemlerin olumsuz etkileri ve riskler bertaraf edilmiştir. Borofenin Si/SiO₂ üzerine KBB yöntemiyle direkt büyütülmesi bir yandan zamandan ve kimyasal işlemlerden ve proje bütçesinden tasarruf sağlarken, öte yandan kaliteli analiz imkânı sağlamaktadır ve 2 boyutlu

malzemelerden üretilcek yüksek performanslı aygıtları için zemin oluşturmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışma borofenin Si/SiO₂ alt taşı üzerinde KBB yöntemiyle büyütülmesi ve analizini göstermektedir. Optik mikroskobu, Raman spektroskopisi, SEM, EDX, XRD, AFM, I-V analizleri sonucunda borofenin yapısıyla alakalı bilgiler rapor edilmiştir. Transfer işlemine gerek duymadan büyütülmenin yapılabilmesi 2 boyutlu malzeme tabanlı, yüksek performanslı cihazların üretiminde önem arz etmektedir. Borofenin direkt olarak Si/SiO₂ alt taşı üzerinde büyütülmesi bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarına ümit verici değerli bilgiler sağlamıştır. Yakın gelecekte, iki boyutlu malzeme tabanlı cihazların üretiminde sağlanan bu kolaylık sayesinde, daha yüksek performans gösteren, uzun ömürlü, sağlam aygıtlar üretilebilir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.B.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma TÜBİTAK 20AG025, TÜBİTAK 20AG001, TÜBİTAK 124E061, ESTÜ 21GAP078 numaralı projeler tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Alemán-Vázquez L, Torres-García E, Villagómez R, Cano J-L. 2005. Effect of the particle size on the activity of MoO_x C_y catalysts for the isomerization of heptane. *Catalysis Lett*, 100: 219-226.
- Bay M, Özden A, Ay F, Perkgöz NK. 2019. Bandgap tuning of

- Monolayer MoS₂(1-x)Se_{2x} alloys by optimizing parameters. *Mater Sci Semicond Process*, 99: 134 – 139.
- Chen J, Zhao X, Tan SJR, Xu H, Wu B, Liu B, Fu D, Fu W, Geng D, Liu Y, Liu W, Tang W, Li L, Zhou W, Sum TC, Loh KP 2017. Chemical vapor deposition of large-size monolayer MoSe₂ crystals on molten glass. *J American Chem Soc*, 139: 1073-1076.
- Childres I, Jauregui L, Park W, Cao H, Chena YP. 2013. Raman spectroscopy of graphene and related materials. *New Develop Photon Mater Res*, 2013: 403-418.
- Chinnalagu DK, Murugesan B, Arumugam M, Chinniah K, Ganesan S, Cai Y, Mahalingam S. 2023. Fabrication of 2D-Borophene nanosheets anchored S, N-mesoporous carbon nanocomposite (SNC-Bp//SNC-Bp) symmetric device for high-performance supercapacitor application. *J Energy Stor*, 74: 109328-109336.
- Geim A, Novoselov KS. 2007. The rise of graphene. *Nature Mat*, 6: 183-191.
- Hou C, Tai G, Wu Z, Hao J. 2020. Borophene: current status, challenges and opportunities. *Chem Plus Chem*, 85: 2186-2196.
- Hubenthal F. 2011. Noble Metal Nanoparticles: Synthesis and Optical Properties. In: Andrews DL, Scholes GD, Wiederrecht GP, eds. *Comprehensive Nanoscience and Technology*. Academic Press, Amsterdam, Nederland, pp: 375-435.
- Kobayashi T, Hirajima T, Hiroi Y, Svojtka M. 2008. Determination of SiO₂ Raman spectrum indicating the transformation from coesite to quartz in Gföhl migmatitic gneisses in the Moldanubian Zone, Czech Republic. *J Miner Petrol SCI*, 103: 105-111.
- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Katsnelson MI, Grigorieva IV, Dubonos SV, Firsov AA. 2005a. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438: 197-200.
- Novoselov KS, Jiang D, Schedin F, Booth TJ, Khotkevich VV, Morozov SV, Geim AK. 2005b. Two-dimensional atomic crystals. *Proc Natl Acad Sci*, 102: 10451 -10453.
- Rahman A, Rahman MT, Chowdhury MA, Bin Ekram S, Uddin MMK, Islam MR, Dong L. 2023. Emerging 2D borophene: Synthesis, characterization, and sensing applications. *Sens Actuators A Phys*, 359: 114468-114475.
- Sahoo BB, Pandey VS, Dogonchi AS, Thatoi DN, Nayak N, Nayak MK. 2023. Exploring the potential of borophene-based materials for improving energy storage in supercapacitors. *Inorg Chem Commun*, 154: 110919-110925.
- Somesh TE, Tran DT, Jena S, Bai Y, Prabhakaran S, Kim DH, Kim NH, Lee JH. 2024. Flexible 2D borophene-stacked MXene heterostructure for high-performance supercapacitors. *J Chem Eng*, 481: 148266-148273.
- Tian Y, Yang H, Li J, Hu S, Cao S, Ren W, Wang Y. 2021. A comprehensive first-principle study of borophene-based nano gas sensor with gold electrodes. *Front Phys*, 17: 13501-13509.
- Xie Z, Meng X, Li X, Liang W, Huang W, Chen K, Chen J, Xing C, Qiu M, Zhang B, Nie G, Xie N, Yan X. 2020. Two-dimensional borophene: properties, fabrication, and promising applications. *Research*, 2020: 1-23.
- Yu J, Zhou M, Yang M, Zhang Y, Xu B, Li X, Tao H. 2022. Pristine and defective 2D borophene/graphene heterostructure as the potential anode of lithium-ion batteries. *Adv Mater Interfaces*, 9: 2102088-2102095.
- Zha X, Xu P, Huang Q, Du S, Zhang R. 2019. Mo₂B₃, a MBene member with high electrical and thermal conductivities, and satisfactory performances in lithium ion batteries. *Nanoscale Adv*, 2:347-355.