

Çay atığı biyokütlesinden türetilen yenilenebilir karbon ile silisyum altlık üzerine PN eklemi uygulaması

A PN junction application of renewable carbon derived from tea waste biomass on a silicon substrate

Gökçen AKGÜL^{1*} , Sözer SÖZER¹ 

¹Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.
gokcen.akgul@erdogan.edu.tr, sozerszer@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 25.01.2022
Kabul Tarihi/Accepted: 26.05.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 14.04.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.58997
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada fosil kaynaklı karbon yerine yenilenebilir, çevreci ve sürdürülebilir karbon kaynağı olarak çay atığı biyokütlesinden yarı iletken teknolojisine uygun P-tipi karbon geliştirilmiş ve N-tipi silisyum bir altlık üzerinde PN hetero-eklem uygulaması yapılmıştır. Oluşturulan PN hetero-eklem yapısı diyot karakteristiği göstermiştir. Yapıya ilişkin diyot denkleminin ters doyma akımı $I_s=0.035 \mu A$ olarak, idealite faktörü ise $n = 14.08$ olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörünün çok büyük çıkması, yapıda seri direncin büyük değerde olmasına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca yenilenebilir karbon kaynağı biyokütlenin teknolojik ürünlerin oluşturulmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çay atığı, Karbon, PN hetero-eklemi.

Abstract

In this study, carbon-based semiconductor technology was developed from tea waste biomass as a renewable, environmentally friendly and sustainable carbon source instead of fossil-sourced carbon, and a PN hetero-junction was formed with a P-type carbon layer on an N-type silicon substrate. The structure have the traditional diode characteristics, with a reverse saturation current $I_s=0.035 \mu A$ and ideality factor $n=14.08$. The large value of the ideality factor is attributed to the large series resistance in the structure. Additionally, it was demonstrated that that tea wastes can be considered as a technological product as a carbon source.

Keywords: Tea waste, Carbon, PN hetero-junction.

1 Giriş

Karbon, dünyadaki en yaygın elementlerden bir tanesidir ve organik moleküllerin iskeletidir. Modifiye edilebilmesi, yüksek kristalinite özelliği, elektronik-optik-mekanik ve termal kararlılık, yüksek yüzey alanı, düşük yoğunluk gibi özellikleri ile sensörlerden [1] enerji [2] ve tarım uygulamalarına [3] kadar birçok alanda kullanılabilmektedir.

Teknolojik alanda karbon materyalinin kullanımı, daha çok nanomateryallerin elektrik/elektronik alanında uygulamaları anlamına gelmektedir [4]. Özellikle yeni akıllı teknolojilerin geliştirilmesinde metallere göre daha çevreci, ekonomik, esnek, hafif, küçük, giyilebilir/dokunmatik elektrik/elektronik cihazların yapımında kullanılabilme avantajlarına sahiptir [5]. Güneş pilleri, esnek ve yazılabilir elektronik devreler ve ışık yayan aygıtlar, karbon nanoyapılarının bazı uygulamalarıdır [6]. Elektrik/elektronik cihaz uygulamalarında karbon nano materyaller, elektron alıcı/verici/iletici ve destek materyali gibi ana görevleri üstlenirler.

Karbon, çok çeşitli allotropları mevcut olan bir materyaldir ve elektrik/elektronik alanında uygulamalarında da çok çeşitli olan iletken ve nano boyuttaki allotropları kullanılır [7],[9]. Nano karbon yapıları; fulleren, karbon nano tüp, grafen, kuantum nokta, nano-fiber, nano-horn, nano-ribbon, nano-onion ve benzeri biçimlerde olabilirler. Her bir allotrop kendine has kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Boyut azaldıkça üretim maliyeti ve performans artar, ancak elektriksel özellikler iyileşir.

Modern elektrik-elektronik devre uygulamalarında çeşitli yarıiletken aygıtlar, diyotlar, transistörler, tümleşik devreler ve güç aygıtları kullanılır. Bu yarıiletken aygıtlarda çeşitli boyut ve biçimlerde PN eklemleri oluşturulur. Bu eklemlerin çeşitli yapısal düzenlemeleriyle ilgili aygıtın akım-gerilim ilişkileri belirlenir. Bir PN eklemi tek başına da bir yarıiletken aygıt olarak, akımı bir yöne ileten diğer yöne iletmeyen bir diyot olarak kullanılabilir.

Diyot yarıiletken teknolojisinde metallere alternatif olarak P ve N katkılanabilen nano karbon materyallerin uygulamaları son yıllardaki araştırma konularındandır. Xu ve diğ. [10] karbon nanotüpleri eş zamanlı olarak bor ve azot ile katkılayarak yarıiletken özelliği kazandırmıştır. Yang ve diğ. [11], karbon nanotüp (SWCNT) yapının bir tarafına Al diğer tarafına da Pd kontaklar yaparak bir Schottky diyodu oluşturmuştur. SiO₂ kaplı N tipi silisyum altlık üzerinde kanal olarak yerleştirilen yapı arka-geçitli alan etkili transistör (FET) olarak denenmiştir. Metal-yarı iletken eklemine ili veya ters kutuplanmasına bağlı olarak karbon nanotüp, hem metalik hem yarı iletken özelliklerini bünyesinde taşıyan, P tipi veya ambipolar karakter göstermiştir. Jariwala ve diğ. [12] karbon nanotüp-MoS₂ heteroeklem fotodiyot oluşturmuştur. Feng ve diğ. [13], grafen oksit yüzeyine COOH grupları kazandırarak ve çeşitli kimyasallarla muameleler sonucunda P ve N tipi sentezledikleri grafen oksit ile saydam bir altlık üzerinde PN eklem diyotu gerçekleştirmiştir. Lukaszewicz [14], furfural alkolün pirolizi ile kuvarz altlık üzerinde karbon yarı iletken tabakalar oluşturularak nem ölçücü diyot cihazı yapmıştır. Benzer araştırmalar literatürde bulunabilir [15],[20].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Elektronik endüstrisinde karbon tabanlı ileri materyallerin uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Karbon, modern hayatın bir kaçınılmazı haline gelmiş plastik ve diğer ambalaj malzemelerinin yapıtaşlarından biridir. Petrol, doğal gaz ve diğer fosil yakıtlardan üretilen etilen (C_2H_4), oksitleme veya başka kimyasal işlemlerle pek çok sentetik maddenin esasını oluşturmaktadır. Fosil kaynakların tükenme riski, alternatif yenilenebilir karbon kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Dolayısıyla elektrik/elektronik alanında karbon uygulamaları için alternatif, sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevreci karbon kaynakları tercih edilecektir. Bu bağlamda, biyokütle; alternatif, yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevreci başlıca karbon kaynağıdır.

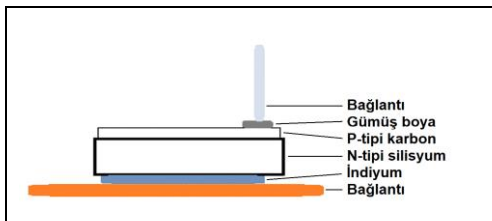
Biyokütle, yaşayan organizmalardan ortaya çıkan ve daha çok atık/artık durumunda olan orman, tarım, bitki, hayvan atıkları/artıkları gibi materyallerdir [21]. Bu organik maddelerin iskeletini karbon elementi oluşturur ve hidrojen, oksijen, azot, fosfor gibi atomlarla kimyasal bağlara sahiptir. Biyokütle aynı zamanda inorganik mineraller de içerir. Biyokütlenin yapısındaki karbon, uygun teknolojiler kullanılarak teknolojik ürünlerde kullanılabilir yüksek performans karbona dönüştürülebilir [22].

Biyokütle karbonunun teknolojik karbon kullanımı, ya grafitik karbona dönüştürülmesi veya kararlı bir taşıyıcı olarak uygun bir zemin oluşturması yönünde olabilir [23],[25]. Her iki yönde literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. Bu karbonlar elektronik cihazların tasarımında kullanılabilir ancak biyokütle kaynaklı karbonun direkt olarak diyot uygulamaları üzerine çalışmalar literatürde çok sınırlı sayıdadır ve özellikle lüminesans özelliklere dayalı çalışmalar mevcuttur [26]. Meng ve diğ. [27] avokado kabuklarından ve yenilebilir kısmından, karbonize polimer karbon nano nokta sentezlemiştir. Bu materyaller epoksi reçine ile bir çip üzerine damlatılarak ışık yayan diyot (LED) aydınlatma özellikleri incelenmiştir. Parlak mavi ve beyaz ışık yayan LED'ler oluşturulmuştur. Gong ve diğ. [28] mango yapraklarından sentezledikleri karbon nano noktaları bir LED çipine yerleştirerek beyaz ışık LED oluşturmuştur.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, ayrıntıları sunulan bu çalışmada fabrikada işleme sonucu ortaya çıkan çay atığı biyokütlesinden yüksek performans karbon geliştirilerek silisyum altlık üzerinde PN hetero-eklem diyot uygulaması yapılması hedeflenmiştir.

2 Deneysel

Çay atıkları biyokütlesinden diyot teknolojisine uygun karbon geliştirmek için katalitik piroliz, aktivasyon ve bor katkılıma yöntemleri kullanılmış ve geliştirilen P tipi karbon, N tipi silisyum altlık üzerine uygulanarak bir PN hetero-eklem yapısı oluşturulmuştur (Şekil 1). Eklem akım-voltaj ($I-V$) karakterizasyonu yapılmıştır.



Şekil 1. Oluşturulan PN hetero-eklem ve bağlantıları.

Figure 1. The PN hetero-junction structure under investigation.

2.1 Çay atığı biyokütlesinden P-tipi karbon geliştirilmesi

Yerel bir çay fabrikadan alınan çay atıkları elenmiş (<2.36 mm), öğütücüde öğütülmüş (Spice&HerbGrinder IC-04A) ve 0.5 mm elekten geçirilmiştir. Katalitik piroliz basamağında, 80 °C'de etüvde kurutulan numune, borik asidin (H_3BO_3) sulu çözeltisi ile ağırlıkça 2:1 oranında (çay atığı: H_3BO_3) impregne edilmiştir. Tekrar kurutulan numune 850 °C'de ve inert azot atmosferinde (1 L/dk.) 1 sa. alıkonma süresinde (~ 10 °C/dk. ısıtma hızı) döner fırında (Protherm RTR 11/100/500) piroliz edilmiştir. Karbonize materyalden mineralleri uzaklaştırmak için 6 M HCl ve 6 M HF ile yıkama işlemi yapılmıştır.

Aktivasyon, hem parçacık boyutunun azaltılarak grafitik yapıların kolayca ortaya çıkabilmesi, hem de karbonun gözenek yapısının geliştirilerek bir sonraki katkılıma basamağında etkin olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun için elde edilen karbonize materyal KOH ile impregne edilmiştir. Analizlerle en yüksek yüzey alanı, ağırlıkça 1:2 (karbon:KOH) impregnasyon oranında elde edildiğinden bu oran ideal oran olarak belirlenip sonraki deneysel işlemlere devam edilmiştir. İmpregnasyon sonrasında kurutulan numune tekrar 850 °C'de azot atmosferinde ancak bu kez ~ 35 °C/dk. ısıtma hızında ve 30 dk. alıkonma zamanında piroliz edilmiştir. Piroliz sonrasında karbon numune seyreltik HCl ve saf su ile yıkanarak nötralize edilmiştir.

Son aşamada P tipi numune oluşturmak için karbon numune borik asit ile muamele edilip aktive edilmiştir. Karbon numune ağırlıkça 1:1 ve 1:2 oranında (H_3BO_3 : karbon) borik asit ile impregne edilmiş, 80 °C'de etüvde kurutulmuş ve sonrasında 200 °C'de atmosfer koşullarında 3 sa. ısıtılarak aktive edilmiştir. Oluşturulan numuneler sırasıyla 1:1 ve 1:2 impregnasyon oranlarını da belirtecek şekilde BC-B-Y-KOH2-B1 ve BC-B-Y-KOH2-B2 olarak adlandırılmıştır (BC; biyo karbon, Y; yıkanmış, KOH2; KOH aktive edilmiş (impregnasyon oranı belirtilerek), B1 ve B2; bor katkılanmış (impregnasyon oranı belirtilerek)). Numunelerin yüzey alanı (BET, Quantachrome Autosorb 1C and Quantachrome Asi Qwin™), yüzey morfolojisi (SEM-EDX, Jeol JSM-6610), taşıyıcı yoğunluğu (Hall etkisi, karanlıkta), öz direnci (van der Pauw yöntemi, 7-5-3-1 μA uygulaması, karanlıkta) ve katkılanan bor miktarları (TGA, NETZSCH STA 449F3) analizleri yapılmıştır.

2.2 Karbonun silisyum altlık üzerine PN eklemi uygulaması ve karakterizasyonu

P katkılanmış karbon numuneler N tipi silisyum altlık üzerine (Crystec, N tipi Si/SiO₂, 3 inç, 380 μm , (100) yönelimli, 1-10 $\Omega.cm$ özgül dirençli, $2 \times 10^{14} - 10^{17} cm^{-3}$ katkı yoğunluklu, çift taraflı, sıcak prob yöntemi ile N tipi olduğu doğrulanmıştır) yerleştirilerek PN eklemi hazırlanmıştır. Altlıklar yaklaşık 0.5 cm \times 0.5 cm boyutlarında kesilmiş ve RCA yöntemi [29] ile temizlenerek kullanıma hazırlanmıştır.

Silisyum altlık üzerine karbon malzemenin partiküller olmadan mümkün olduğunca homojen şekilde yerleştirilmesi için 1 g karbon malzeme 20 ml N-metil pirolidon (NMP) çözeltisi içerisinde çözünmüştür. Bu çözgenin seçilmesinin sebebi grafitik karbonun çözgen içerisinde iyi bir şekilde dağılmasıdır [30]. Çözelti ultrasonik banyoda (Elma S 50R) 45 dk. bekletilmiş ve 5000 rpm'de 30 dk. santrifüjlenmiştir (Universal 320R, Hettich Zentrifugen). Katı kısım dibe çökmüştür.

Altlıklar üzerine süpernatant (sıvı) kısım yerleştirilmiştir. Bunun için altlıklar 2M HF çözeltisine daldırılarak üzerinde doğal olarak oluşmuş SiO₂ katmanı giderilmiştir. Daha sonra bu

altlıklar ısıtıcı bir tabla üzerine yerleştirilmişlerdir. Çözelti halindeki karbon, altlıklar üzerine damlatılmış (~20 µL) ve 80 °C ısıtma işlemi uygulanarak çözgenin uzaklaşması sağlanmıştır. Altlık ile üzerindeki karbonun bağlarının sağlamlaşması için üretilen PN hetero-eklem yapısı, 550 °C'de 1 sa. boyunca atmosfer koşullarında tavlansmıştır. Aynı koşullarda 3 farklı eklem hazırlanmıştır. Eklem her iki yüzeyinden kontaklar alınarak bir DC kaynağı (Uni-T UTP3315TFL), kaynak ölçer (Keithley 2410) ve Labview-2011 görüntüleme programı yardımıyla 0.1V tarama hızında akım-voltaj karakteristikleri belirlenmiştir. Ölçümler, en iyi mekanik kontak ile indiyum(levha)/N-Si/B(x)/Ag düzeninde alınabilmiştir.

Karbon materyalin öz direnç ve taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesi için 1cm × 1cm boyutlarında ve RCA yöntemi ile temizlenmiş olan 2 ayrı cam altlığa, çözelti damlatılarak yerleştirilmiştir (~90 µL). 4 noktadan indiyum metali lehimli 4 kontaklar alınmış ve ölçümler yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

PN hetero-eklemi geliştirilmesinde kullanılan BC-B-Y-KOH2-B1 ve BC-B-Y-KOH2-B2 örneklerinin yüzey alanları ve katkılama-aktivasyon sonrası içerdiği bor miktarları Tablo1'de verilmiştir. Borik asit ile muamele ve aktivasyon sonucu borik asidin oksitlerine dönüştüğü belirtilmiştir [31].

Tablo 1. Diyot uygulamasında kullanılan karbon numunelerin bazı özellikleri.

Table 1. Some properties of carbon samples used for diode applications.

Numune	Yüzey alanı (m ² /g)	Katkılanan bor miktarları (B _x O _y , %)
BC-B-Y-KOH2-B1	228.5	30
BC-B-Y-KOH2-B2	284.9	20

Bor katkılama miktarları impregnasyon oranları ile orantılı olarak BC-B-Y-KOH2-B1 ve BC-B-Y-KOH2-B2 numuneleri için termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle sırasıyla %30 ve %20 olarak belirlenmiştir. Bor içeriği arttıkça karbon numunenin yüzey alanı azalmıştır. Bunun da gözeneklerin oksitler tarafından doldurulması ile meydana geldiği düşünülmektedir [32]. Her iki durumda da karbonize edilmiş biyokütlelerin yüzey alanlarının, direkt karbonizasyon ile elde edilen çay atıklarına göre (5.7 m²/g) ileri derecede arttığı söylenebilir [32].

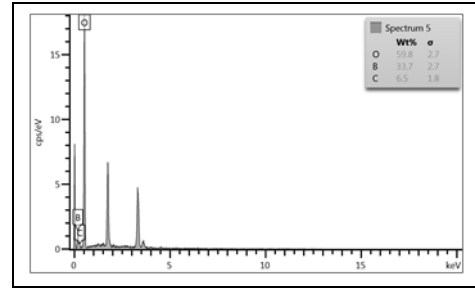
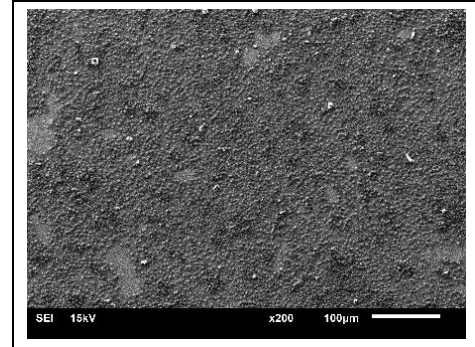
Katkılanan bor bileşiminin yapısı gelişmiş karbon ile birlikte NMP çözgeni içerisinde olduğu SEM analizleri ile tespit edilmiştir. Şekil 2'de PN eklemlerde yüzey morfolojik görüntüleri ve bir numunenin EDX analizi verilmektedir.

BC-B-Y-KOH2-B1 numunesinin yerleştirildiği yüzey homojen değildir. Tomurcuklar şeklinde görülen yapıların B_xO_y olduğu ve miktarların belirlenen katkılama miktarları oranında olduğu EDX analizleri ile belirlenmiştir. BC-B-Y-KOH2-B2 numunesinin yüzeyi çok daha homojen olup film kalınlığı yaklaşık olarak 15 µm civarında ölçülmüştür.

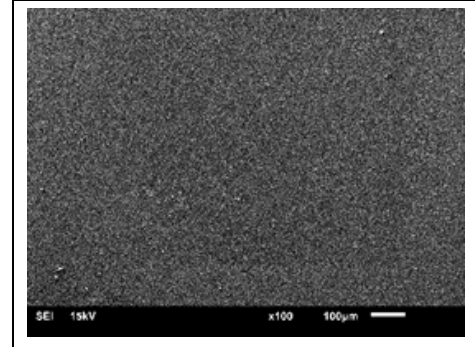
Amaçlanan PN eklemi geliştirilmesinde her iki numunenin de denemeleri yapılmıştır ancak sadece BC-B-Y-KOH2-B2 numunesinde eklem akımı elde edilmiştir. Eklem *I-V* karakteristik eğrisi Şekil 3'te verilmiştir.

Geliştirilen PN yapısının akım-gerilim ilişkisi beklenen bir diyot özelliği şeklindedir. Karakteristiğin 1 V ve 2 V gerilime karşılık gelen 0.61 µA ve 10.44 µA akım değerlerinden, alışılagelmiş

üssel $i = I_s(e^{nV/T} - 1)$ şeklindeki diyot denkleminin ters doyma akımı $I_s = 0.035 \mu A$ olarak, idealite faktörü ise $n = 14.08$ olarak hesaplanmıştır.



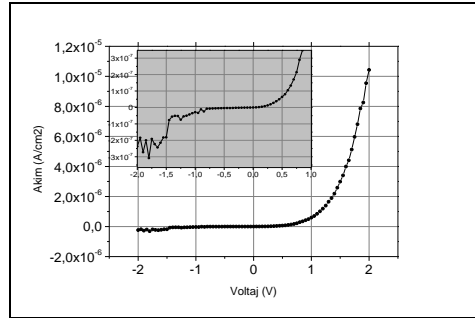
(a)



(b)

Şekil 2. PN eklemlerinde yüzeydeki karbon materyalin SEM görüntüleri. (a): BC-B-Y-KOH2-B1 ve EDX. (b): BC-B-Y-KOH2-B2.

Figure 2. SEM images of carbon materials on PN junction. (a): BC-B-Y-KOH2-B1 and its EDX. (b): BC-B-Y-KOH2-B2.



Şekil 3. BC-B-Y-KOH2-B2 numunesi ile geliştirilen PN hetero-eklemin *I-V* karakteristiği.

Figure 3. *I-V* characteristic of the developed PN heterostructure with BC-B-Y-KOH2-B2.

İdealite faktörünün çok büyük çıkması, yapıda seri direncin büyük değerde olmasına bağlı olabilir. Şekil 3 içinde verilen detaylı karakteristikte negatif gerilimlerde bir kırılma varmış gibi görülse de akım değerinin çok küçük olmasından dolayı ve ileri akımlardan çok küçük kalmasından dolayı, ölçüm yapılan gerilim aralığında bunun bir kırılma olmadığı anlaşılmaktadır.

BC-B-Y-KOH2-B2 numunesinin öz direnci 1.2×10^6 ohm.cm olarak ölçülmüştür. Materyalin iletkenlik özelliği 8.6×10^{-7} S/cm olarak kısmen geliştirilebilmiştir. P tipi olduğu Hall etkisi ölçümü ile doğrulanan materyalin taşıyıcı yoğunluğu da 5.8×10^{11} cm⁻³ olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen akım-gerilim ilişkisinden, borik asit ile P-tipi katkılanmış karbonun N-tipi katkılanmış silisyumla diyot benzeri bir eklem oluşturduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen karakteristik, kontak dirençleri ve karbon bölgenin seri direncini de içermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada çay atığı biyokütlesinden yarı iletken teknolojisine uygun P katkılanmış teknolojik uygulanabilir karbon materyal geliştirilmiş ve N tipi altlık ile PN hetero-eklem denemesi yapılmıştır. Söz konusu yapının I-V karakteristiği belirlenmiştir. Geliştirilen karbon ile yapılan hetero-eklem bir diyot özelliği göstermiştir. Bu çalışmayla karbon kaynağı olarak çay atıklarının teknolojik ürün olarak değerlendirilebileceği ortaya konulmuştur. Karbon yapısının daha homojen yapılara geliştirilmesi ile biyokütle kaynaklı karbondan ideale doğru ucuz ve çevreci teknolojik ürünlerin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

5 Conclusions

In this study, technologically applicable and suitable for semiconductor technology P doped carbon material was developed from tea waste biomass, and a PN hetero-junction diode application attempt was made on an N-type silicon substrate. The I-V characteristic of the hetero-structure has been determined. The PN hetero-structure displays diode features. It was also revealed that tea wastes can be considered as a technological product as a carbon source. The development of the carbon structure will contribute to inexpensive and environmentally friendly technological products from biomass-sourced carbon.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışma, Yüksek Lisans Tez çalışması ile danışmanın önderliğinde ortaya konulmuş bir çalışmadır. Gökçen AKGÜL fikrin oluşması ve kullanılan malzemelerin temin edilmesi, Sözer SÖZER, literatür taraması ve deneysel çalışmaların gerçekleşmesi başlıklarında; Gökçen AKGÜL ve Sözer SÖZER elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

[1] Power AC, Gorey B, Chandra S, Chapman J. "Carbon nanomaterials and their application to electrochemical sensors: A review". *Nanotechnology Reviews*, 7, 19-41, 2018.

- [2] Hou R, Liu B, Sun Y, Liu L, Meng J, Levi MD, Ji H, Yan X. "Recent advances in dual-carbon based electrochemical energy storage devices". *Nano Energy*, 72, 1-31, 2020.
- [3] Kamali M, Sweyggers N, Al-Salem S, Appels L, Aminabhavi TM, Dewil R. "Biochar for soil applications-sustainability aspects, challenges and future prospects". *Chemical Engineering Journal*, 428, 1-19, 2022.
- [4] Zhong X, Hu H, Fu H. "Self-cleaning, chemically stable, reshapeable, highly conductive nanocomposites for electrical circuits and flexible electronic devices". *ACS Applied Material & Interfaces*, 10, 25697-25705, 2018.
- [5] Javey A, Dai H. *Carbon Nanotube Electronics*. 1st ed. Newyork, USA, Springer, 2006.
- [6] Avouris P, Chen Z, Perebeinos V. "Carbon-based electronics". *Nature Nanotechnology*, 2, 605-615, 2007.
- [7] Zhang X, Lu W, Zhou G, Li Q. "Understanding the mechanical and conductive properties of carbon nanotube fibers for smart electronics". *Advanced Materials*, 32, 1-21, 2020.
- [8] Vieira L de S. "A review on the use of glassy carbon in advanced technological applications". *Carbon*, 186, 282-302, 2022.
- [9] Zhang S, Xu X, Lin T, He P. "Recent advances in nanomaterials for packaging of electronic devices". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 13855-13868, 2019.
- [10] Xu Z, Lu W, Wang W, Gu C, Liu K, Bai X, Wang E, Dai H. "Converting metallic single-walled carbon nanotubes into semiconductors by boron/nitrogen co-doping". *Advanced Materials*, 20, 3615-3619, 2008.
- [11] Yang MH, Teo KBK, Milne WI, Hasko DG. "Carbon nanotube Schottky diode and directionally dependent field-effect transistor using asymmetrical contacts". *Applied Physics Letters*, 87, 1-3, 2005.
- [12] Jariwala D, Sangwan VK, Wu CC, Prabhumirashi PL, Geier ML, Marks TJ, Lauhon LJ, Hersam MC. "Gate-tunable carbon nanotube-MoS2 heterojunction p-n diode". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 18076-18080, 2013.
- [13] Feng X, Zhao X, Yang., Li M, Qie F, Guo J, Zhang Y, Li T, Yuan W, Yan Y. "All carbon materials pn diode." *Nature Communications*, 9, 1-7, 2018.
- [14] Lukaszewicz JP. "An application of carbon-type semiconductors for the construction of a humidity-sensitive diode". *Sensors Actuators B. Chemical*, 6, 61-65, 1992.
- [15] Dere A, Coskun B, Tataroğlu A, Al-Sehemi AG, Al-Ghamdi AA, Alateeq HMA, Qindeel R, Farooq WA, Yakuphanoglu F. "Boron doped graphene based linear dynamic range photodiode". *Physica B Condensed Matter*, 545, 86-93, 2018.
- [16] Dragoman D, Dragoman M, Plana R. "Graphene-based ultrafast diode". *Journal of Applied Physics*, 108, 1-4, 2010.
- [17] Koç MM, Aslan N, Erkovan M, Aksakal B, Uzun O, Farooq WA, Yakuphanoglu F. "Electrical characterization of solar sensitive zinc oxide doped-amorphous carbon photodiode". *Optik*, 178, 316-326, 2019.
- [18] Lefebvre J, Ding J, Li Z, Finnie P, Lopinski G, Malenfant PRL. "High-Purity Semiconducting single-walled carbon nanotubes: A key enabling material in emerging electronics". *Accounts of Chemical Research*, 50, 2479-2486, 2017.

- [19] Haddad PA, Flandre D, Raskin JP. "Intrinsic rectification in common-gated graphene field-effect transistors". *Nano Energy*, 43, 37-46, 2018.
- [20] Strobel C, Chavarin CA, Kitzmann J, Lupina G, Wenger C, Albert M, Bartha JW. "Towards high frequency heterojunction transistors: Electrical characterization of N-doped amorphous silicon-graphene diodes". *Journal of Applied Physics*, 121, 1-7, 2017.
- [21] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Biyokütle". <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle>
- [22] Wang Y, Zhang D, Deng J, Zhou F, Duan Z, Su Q, Pang S. "Mosquito 's compound eyes as inspiration for fabrication of conductive superhydrophobic nanocarbon materials from waste wheat straw. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 3883-3894, 2019.
- [23] Gunasekaran SS, Gopalakrishnan A, Subashchandrabose R, Badhulika S. "Single step, direct pyrolysis assisted synthesis of nitrogen-doped porous carbon nanosheets derived from bamboo wood for high energy density asymmetric supercapacitor". *Journal of Energy Storage*, 42, 1-8, 2021.
- [24] Hunter RD, Davies J, Hérou SJA, Kulak A, Schnepf Z. "Milling as a route to porous graphitic carbons from biomass". *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379, 1-12, 2021.
- [25] Chen F, Yang J, Bai T, Long B, Zhou X. "Facile synthesis of few-layer graphene from biomass waste and its application in lithium ion batteries". *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 768, 18-26, 2016.
- [26] Bi Z, Li T, Su H, Ni Y, Yan L. "Transparent wood film incorporating carbon dots as encapsulating material for white light-emitting diodes". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 9314-9323, 2018.
- [27] Meng W, Wang B, Ai L, Song H, Lu S. "Engineering white light-emitting diodes with high color rendering index from biomass carbonized polymer dots." *Journal of Colloid and Interface Science*, 598, 274-282, 2021.
- [28] Gong Y, Han Y, Zhang F, Zhai M, Chen X, Long, Q, Wang Z, Chen F, Yang J. "Color tuning of biomass-derived carbon nanodots by reaction temperature toward white light-emitting diodes". *Nano*, 15(12), 2050159, 1-10, 2020.
- [29] Munkholm A, Brennan S, Goodbread JP. "Wafer cleaning influence on the roughness of the Si/SiO₂ interface". *MRS Online Proceedings Library*, 386, 303-307, 1995.
- [30] Alma H, Yazıcı M, Yildirim B, Salan T, Tiyek I. "Spunbond dokusuz tekstil yüzeyi üzerine elektro çekim yöntemi ile nano boyutta grafen kaplanması ve karakterizasyonu". *Tekstil ve Muhendis*, 24, 243-253, 2017.
- [31] Tran BH, Tieu K, Wan S, Zhu H. "Understanding the tribological impacts of alkali element on lubrication of binary borate melt". *RSC Advances*, 8, 28847-28860, 2018.
- [32] Akgül G, Maden TB, Diaz E, Jiménez EM. "Modification of tea biochar with Mg, Fe, Mn and Al salts for efficient sorption of PO₄³⁻ and Cd²⁺ from aqueous solutions". *Journal of Water Reuse & Desalination*, 9(1), 57-66, 2019.