



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çay atıklarından türetilen yüksek performans karbonun transistörde iletim kanal materyali olarak uygulanması

Application of high performance carbon derived from tea waste into transistor as a conduction channel material

Yazar(lar) (Author(s)): Saliha Nur BIÇAKÇI¹, Gökçen AKGÜL²

ORCID¹: 0000-0002-6569-0247

ORCID²: 0000-0001-6101-7971

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bıçakçı S. N., ve Akgül G. “Çay atıklarından türetilen yüksek performans karbonun transistörde iletim kanal materyali olarak uygulanması”, *Politeknik Dergisi*, 23(3): 909-914, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.599510

Çay Atıklarından Türetilen Yüksek Performans Karbonun Transistörde İletim Kanal Materyali Olarak Uygulanması

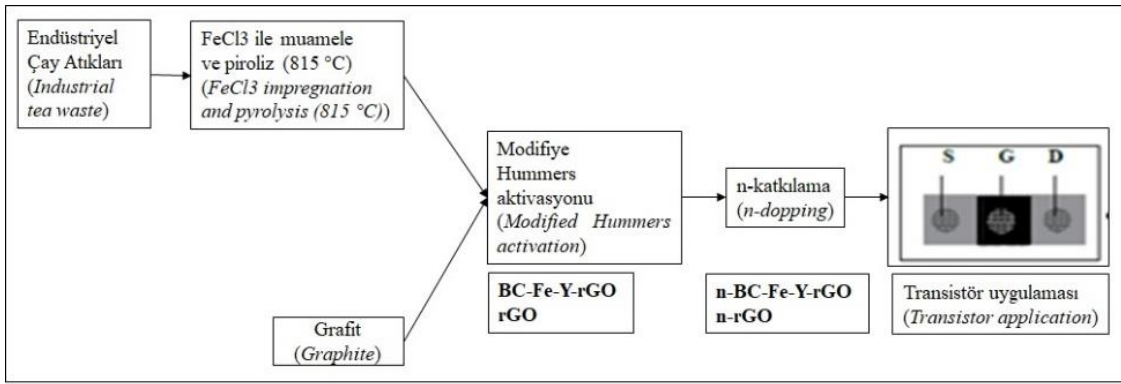
Application of High Performance Carbon Derived from Tea Waste into Transistor as a Conduction Channel Material

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Endüstriyel çay atıklarından biyokömür türetilmiştir (Biochar was derived from industrial tea waste)
- ❖ Karbon yapısı geliştirilmiştir (The carbon structure was developed)
- ❖ Karbonun transistör uygulaması yapılmıştır (Transistor application of the carbon was performed)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Endüstriyel çay atıklarından piroliz ve aktivasyon ile yüksek performans karbon türetilmiştir ve transistörde iletim kanal materyali olarak uygulanmıştır./ High performance carbon material was derived from industrial tea wastes by pyrolysis and activation and applied as a transistor conduction channel material.



Şekil. Grafik özet /Figure. Graphical abstract

Amaç (Aim)

Biyokütle kaynaklı yüksek performans karbon materyal ile transistör aygıtının oluşturulması hedeflenmiştir./ It is aimed to create transistor device with biomass resourced high performance carbon material.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İndirgenmiş grafen oksit benzeri karbon materyal çay atıklarından geliştirilmiş ve alan etkili transistörde iletim kanal materyali olarak kullanılmıştır./ Graphene-like carbon material was developed from tea waste and used as a transistor conduction channel material.

Özgünlük (Originality)

Yarı iletken teknolojide yenilenebilir enerji kaynağı kullanılmıştır./ Renewable energy resource was used in the semiconductor technology.

Bulgular (Findings)

Elektron verici daha fazla grupların biyokütle bazlı karbon materyal tarafından içerilmesi, akım değerini yükseltebilir./ The inclusion of more electron donor groups by the biomass based carbon material may increase the current value.

Sonuç (Conclusion)

Biyokütle kaynaklı karbon iletim materyali ile transistörün daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür./ Transistor has a better performance with biomass derived conduction carbon material.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Çay Atıklarından Türetilen Yüksek Performans Karbonun Transistörde İletim Kanal Materyali Olarak Uygulanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Saliha Nur BIÇAKÇI, Gökçen AKGÜL*

Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.07.2019 ; Kabul/Accepted : 24.09.2019)

ÖZ

Diyotlar, transistörler ve benzeri aygıtlar gibi ileri teknoloji alanlarında karbon malzemeler çalışılmaktadır. Gözenekli karbon materyallerin elektronik aygıtlarda kullanımı ve enerji depolama alanlarında uygulamaları da daha ekonomik yöntemler geliştirilmesi ve boyutların küçültülmesi bakımından önemlidir. Son yıllarda literatürde çok sayıda karbon kanallı transistör rapor edilmiş olsa da, gözenekli karbon olarak biyokütleden elde edilen karbonun transistör uygulamaları sınırlı sayıdadır. Karbon malzemelerin çoğu, giderek tükenmekte olan fosil kaynaklardır. Bu sebeple yenilenebilir karbon kaynakları önem kazanmaya başlamaktadır. Biyokütle tek yenilenebilir karbon kaynağıdır. Piroлиз yöntemi ile biyokömür olarak adlandırılan karbonize materyale dönüştürülebilir. Ancak biyokömürün karbon tabanlı elektriksel aygıtlara uygulanabilmesi için yapısının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel çay atıklarından elde edilen biyokömür, kimyasal ve fiziksel yöntemlerle yüksek performans ve n-katkılı karbon materyale dönüştürülmüştür. Yeni türetilen karbon materyal SEM, XRD, ve FT-IR yöntemleriyle karakterize edilmiştir. Oluşturulan bu karbon transistörde iletim kanal matemesi olarak kullanılmıştır. Geliştirilen alan etkili karbon transistörün akım-gerilim (I-V) karakteristikleri belirlenmiştir. Daha hızlı ve verimli elektriksel aygıtlar, yenilenebilir, sürdürülebilir ve yerel biyokütle kaynakları kullanılarak geliştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel çay atığı, yüksek performans karbon, alan etkili transistör.

Application of High Performance Carbon Derived from Tea Waste into Transistor as a Conduction Channel Material

ABSTRACT

Carbon materials are studied in high-tech electronics such as diodes, transistors similar devices. The use of porous carbon materials in electronic devices and their application in energy storage areas are important in terms of developing more economical methods and reducing the dimensions. Although a large number of carbon channel transistors have been reported in the literature in recent years, transistor applications of carbon from biomass as porous carbon are limited. Most of the carbon materials are originated from fossil sources that are diminishing. Renewable carbon resources are gaining importance. Biomass is the only renewable carbon resource. It can be converted to carbonized material called biochar by pyrolysis. However, in order to apply the biochar to carbon-based electrical devices, its structure needs to be improved. In this study, biochar obtained from industrial tea wastes was converted to high performance and n-doped carbon material by chemical and physical methods. The newly derived carbon material was characterized by SEM, XRD, and FT-IR methods. This formed carbon transistor was used as conduction channel material. The current-voltage (I-V) characteristics of the developed field effect carbon transistor were determined. Faster and more efficient electrical devices can be developed using renewable, sustainable and local biomass resources.

Keywords: Industrial tea waste, high performance carbon, field effect transistor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan yaşamının konforu, teknolojinin gelişmesi ve artan otomasyon ile giderek artmaktadır. Günümüzde otomasyon, nesnelerin interneti ve her şey için internet kullanımı ile bağdaştırılmaktadır. Endüstri 4 olarak da değerlendirilen bu çağda, otomasyonu sağlayan elektronik devre elemanları ve aygıtların kullanımı yaygınlaşmaktadır [1].

Elektronik aygıtlar genellikle yarı iletken malzemeler içeren devrelerden oluşmaktadır. Otomasyonun artması, elektroniklerde minyatürizasyonu getirmiştir. Yarı iletken endüstrisi elektronik sistemleri küçültme ve esnekleştirme alanında çalışmalar yapmaktadır. Özellikle silikon temelli transistörlerde karbon bazlı yeni malzemeler geliştirilmesi ve uygulanması, yeni nesil elektroniklerin gelişimine katkı sağlamaktadır [2].

Transistörler bilgisayar, cep telefonları, radyo, televizyon gibi neredeyse tüm elektronik aygıtlarda bulunan yarıiletken malzemelerden oluşan ve elektrik akımını

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : gokcen.akgul@erdogan.edu.tr

kontrol eden aktif devre elemanlarıdır. Transistörlerde karbon materyaller, özellikle iletim kanal malzemesi olarak kullanılmakta ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesinde katkı sağlamaktadır [3]. Literatürde alan etkili transistörlerde karbon malzemelerin uygulamaları ile ilgili güncel çalışmalar bulunabilir [4-9]. Transistörlerde karbon materyaller; sinyallerin doğrultulması, esneklik sağlanması, düşük güç tüketimi, yüksek anahtarlama hızı, boyutların küçültülmesi ve düşük maliyet gibi nedenlerle kullanılmaktadır.

İletim kanalı malzemesi olarak kullanılan karbon materyaller genellikle nano boyutlardadır (karbon nanotüp, karbon nanohorn, karbon nanoions, karbon nanoribbons, grafen...) ve fosil kaynaklıdır. Mekanik, termal ve elektronik kararlılık göstermektedirler. Özellikle grafen, elektronik aygıtlarda uygulamaları çokça araştırılan materyaldir. Ancak grafenin gösterdiği Dirac-benzeri davranış ve band aralığının olmaması sebebi ile yarı iletken davranışından ziyade iletken davranışı baskındır. Yarı iletken özelliği kazandırmak için COOH, OH, C-O-C gibi fonksiyonel gruplar ve p/n aktif grupları yapıya katılabilir [10, 11].

Son zamanlarda, nano-karbon veya grafen materyallerinden farklı olarak, yüzey fonksiyonel gruplarınca zengin gözenekli karbon materyallerin elektronik aygıtlarda kullanımı ve enerji depolama alanlarında uygulamaları da daha kontrol edilebilir ve ekonomik materyaller geliştirilmesi bakımından araştırma konuları arasında yer almıştır [12]. Gözenekli karbon, yenilenebilir karbon kaynağı biyokütlenin pirolizi ile de elde edilebilir.

Piroliz ile elde edilen karbonize ürün biyokömür (biocchar) olarak adlandırılır. %75-85 oranında karbon içeren biyokömür; yüzey fonksiyonel gruplarınca zengin, yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevreci karbonize ürün olarak elektronik aygıtlarda uygulanabilir [13]. Biyokömür, genel olarak amorf yapıdadır ve elektriksel iletkenliği düşüktür ancak karbon yapısı grafit/grafen-oksit benzeri yapılara kimyasal ve fiziksel metotlarla düzenlenebilir ve elektriksel iletkenlik özelliği geliştirilebilir [14-16].

Bu çalışmada çay atıkları biyokütlesinden katalitik piroliz yöntemi ile biyokömür türetilmiştir. Biyokömürün karbon yapısı ileri kimyasal yöntemlerle indirgenmiş grafen oksite doğru geliştirilmiş, daha sonra n tipi katılanmış ve transistörde kanal malzemesi olarak kullanılmıştır. Kanal malzemesi olarak transistör üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma 3 ana başlık altında gerçekleştirilmiştir; (1) çay atıkları biyokütlesinden indirgenmiş grafen oksit-benzeri karbon materyal geliştirilmesi, n- tipi katılanması ve materyal karakterizasyonu, (2) n- tipi katılanmış karbon kullanılarak alan etkili transistör geliştirilmesi ve (3) transistörün karakterizasyonu.

2.1. Çay Atıkları Biyokütlesinden Yüksek Performans Karbon Türetilmesi ve n- Katılanması (Derivation of High Performans Carbon from Tea Waste Biomass and n-Dopping)

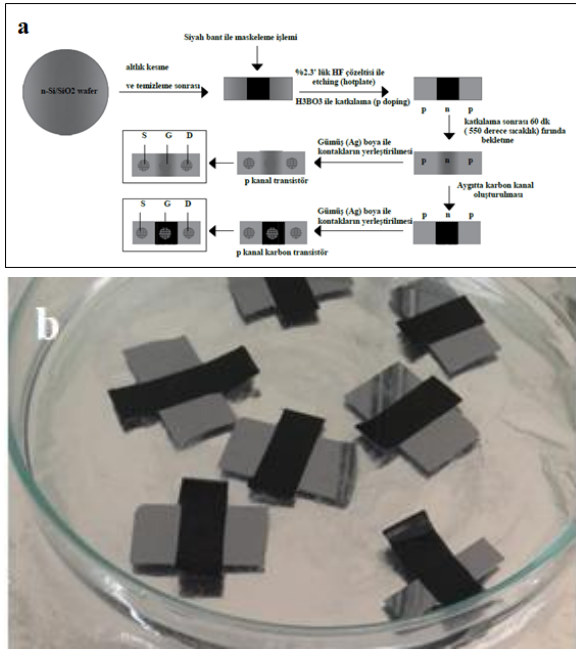
Yerel bir çay fabrikasından temin edilen son ürün endüstriyel çay atıkları öğütülüp 0,5 mm elekten elenmiş 80 °C'de 1 gece etüvde kurutulmuştur. Kuru biyokütle 3:1 (w/w) oranında FeCl₃ (Tekkim) ve yerince su ile karıştırılarak Fe ile impregne edilmiş ve tekrar etüvde kurutulmuştur. Bu numune döner fırında (Protherm RTR 11/100/500) 815 °C sıcaklıkta ve azot atmosferinde 1.5 h piroliz edilmiştir (elde edilen ürün BC-Fe olarak adlandırılmıştır). FeCl₃ impregnasyonunun nedeni, biyokütlenin pirolizi sırasında amorfdan ziyade grafitik karbon yapısının katalitik olarak oluşturulmaya çalışılmasıdır.

Türetilen BC-Fe öğütülüp 25 µm elekten elenmiş ve konsantre HCl ve HF asit ile yıkanarak Fe mineralinden arındırılmıştır. Saf su ile tekrar yıkanarak pH değeri nötral seviyeye getirilen ve etüvde kurutulan bu numune BC-Fe-Y olarak adlandırılmıştır. Bir sonraki adımda numuneye modifiye Hummers yöntemi ile yükseltgeme ve hidrazin ile indirgeme yöntemleri uygulanarak grafitize edilmiş karbondan indirgenmiş grafen oksit (BC-Fe-Y-rGO) elde edilmeye çalışılmıştır [16]. Ayrıca, türetilen materyali karşılaştırma amacıyla grafit başlangıç materyali (SBM teknik, amorf) kullanılarak da indirgenmiş grafen oksit (rGO) üretilmiştir. En son aşamada karbon materyaller konsantre H₃PO₄ ile muamele edilerek n-tipi katılama sağlanmıştır. Numuneler saf su ile yıkanarak nötralleştirilmiştir. Kurutulan karbon materyaller NMP (N-metil 2-pirolidon) çözgeni ile sonikâtorde karıştırılmış, 30 dk 4000 rpm' de santrifüj edilmiş ve santrifüj sonrası süpernatant kısmı transistör kanal malzemesi olarak kullanılmıştır.

Her iki karbon materyalin (n-BC-Fe-Y-rGO ve n-rGO) yapısal karakteristikleri SEM (Scanning Electron Microscopy, JEOL/ JSM-6610), XRD (X-Ray Diffraction, Rigaku SmartLab X-ray diffractometer non-monochromatographic Cu Kα₁-radiation (40 kV, 30 mA, λ = 1.54 Å)) ve FTIR (Perkin Elmer Spectrum 100) ile gerçekleştirildi.

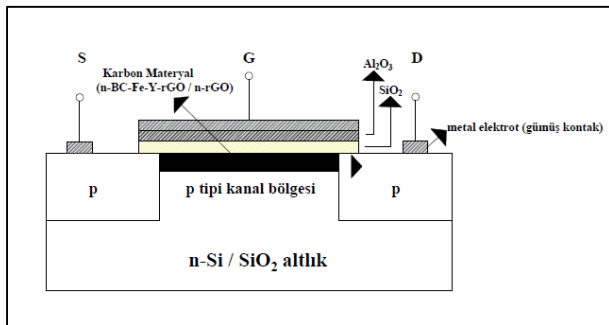
2.2. Alan Etkili Karbon Transistör Aygıt Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu (Development of field effect carbon transistor device and characterization)

Alan etkili karbon transistör geliştirmek için bir tarafı parlatılmış Crystec marka n tipi Si/ SiO₂ (3 inç, 380 µm, (100) yönelimli, 0.1-20 Ω.cm yüzey direnci) altlıklar kullanılmıştır. Yüzey temizliğinde RCA temizleme prosedürü gerçekleştirilmiştir. Alan etkili karbon transistör üretiminde Şekil 1a' da şematik gösterimi verilen işlem basamakları gerçekleştirilmiştir. 1.5×0.5 cm boyutlarındaki altlıkların (orantılı olacak şekilde) orta kısımları bantlanmıştır. % 2.3' lük HF' nin sulu çözeltisi içerisine daldırılan altlıkların bant dışında kalan bölgelerine aşındırma işlemi (etching) gerçekleştirilmiştir. Oksit tabakası aşındırılan altlıkların bu kısımlarına borik asit ile p katılama yapılmıştır (Şekil 1b).

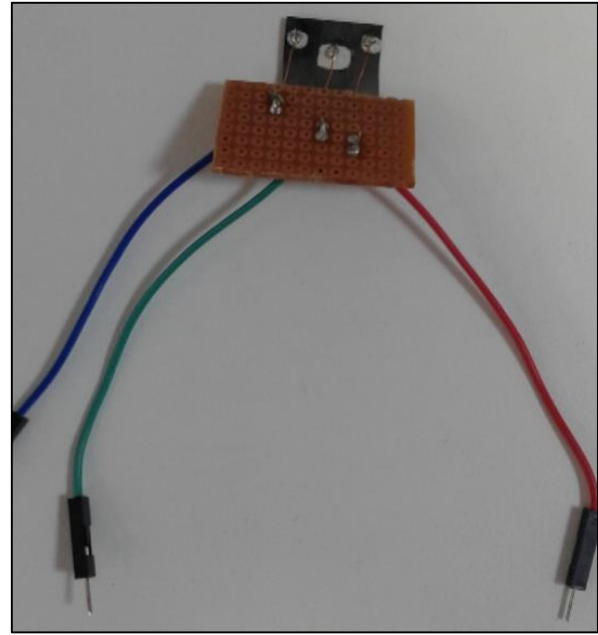


Şekil 1. Alan etkili karbon transistör işlem basamakları (a) ve doplama işlemi (b) (Field effect transistor process steps (a) and doping process)

p katkılama yapılan n-tipi Si/SiO₂ altlıkların bantlı kısmı alan etkili karbon transistörün iletim kanal bölgesidir. Bu bölgedeki bant sökülerek 550 °C’ de 1 saat boyunca tavlama yapılmıştır. Tavlama sonrasında, p-n-p tipi mimariye sahip altlıklar elde edilmiştir. İletim kanalına karbon materyalinin yerleştirilmesi için n kısımlar % 2,3 HF çözeltisi ile silinerek aşındırılmış ve bir önceki bölümde türetilen karbon materyal (n-rGO ve n-BC-Fe-Y-rGO) kanal bölgesine kaplanmıştır. Karbon malzeme kaplanan rGO-MOSFET ve BC-Fe-Y-rGO-MOSFET aygıtlarının geçiti kanaldan ayıran dielektrik tabakası Al₂O₃ ile oluşturulmuştur. Bunun için, Al(NO₃)₃’ün (Merck) doymuş çözeltisi hazırlanmıştır. Karbon materyal kaplanan geçit bölgesine mikropipet yardımıyla damlatılmış, 100 °C’ de bekletilerek nitrat iyonlarının uçarak geçit bölgesinde Al₂O₃ katmanı oluşması sağlanmıştır. p kanal alan etkili karbon transistör yapısına sahip olan aygıt mimarisinin kaynak (S), akış (D) ve kapı (G) kontaktları gümüş iletken boya ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan aygıtın şematik gösterimi Şekil 2’ de ve aygıtın resmi Şekil 3’ de verilmektedir.

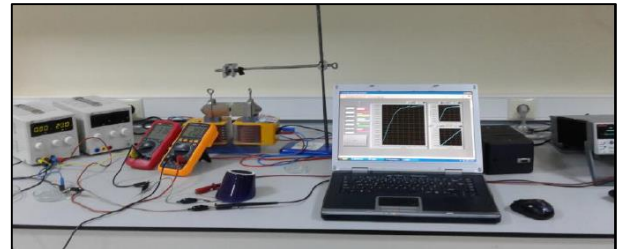


Şekil 2. Üst kapı-üst kontak yapıda alan etkili karbon transistor yapısı (top gate-top contact structured field effect carbon transistor)



Şekil 3. Gümüş kontaklı p-n-p yapı (Ag contacted p-n-p device)

Üretilen alan etkili karbon transistörlerin elektriksel karakterizasyonu, akım-voltaj verileri ile değerlendirilmiştir. Şekil 4’ de verilen Keithley 2410 marka yarıiletken parametre analiz aygıtı kullanılarak, Labview 2011 yazılımı ile hazırlanmış bilgisayar kontrollü program düzeneği ile alan etkili karbon transistörlerin akım-voltaj verileri ölçülmüştür.

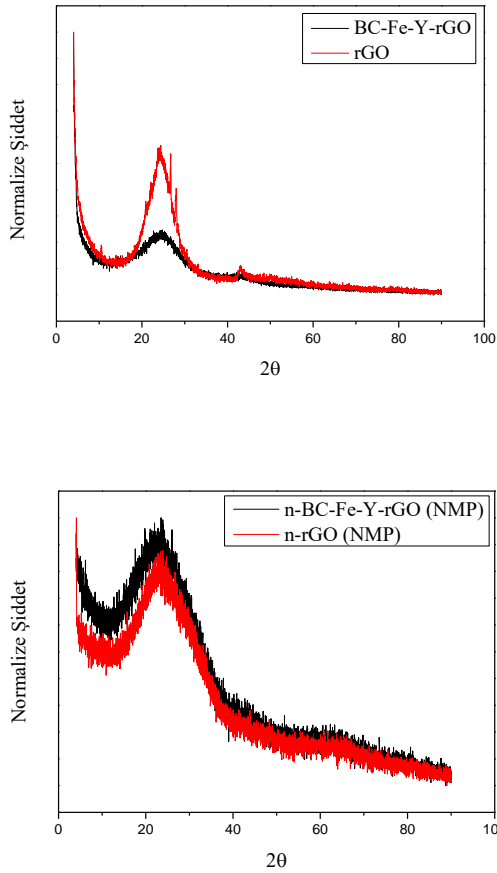


Şekil 4. Alan etkili karbon transistörlerin elektriksel karakterizasyon düzeneği (electrical characterization setup)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Karbon Materyalin Karakterizasyonu (Characterization of Carbon Materials)

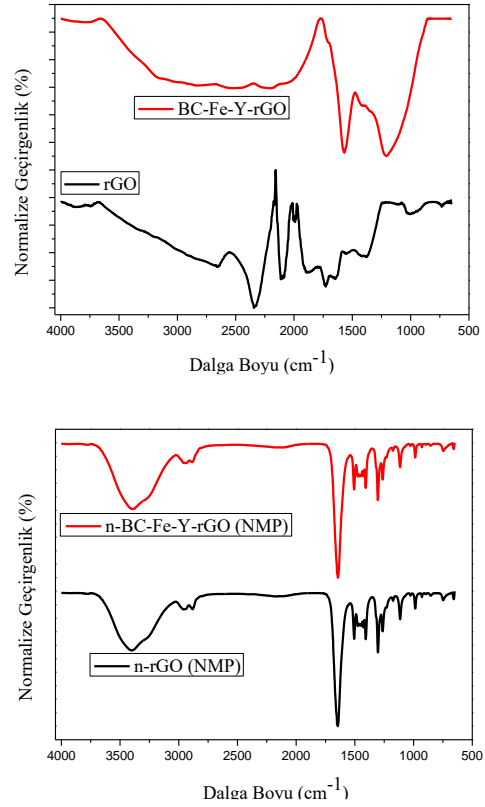
n-rGO ve n-BC-Fe-Y-rGO karbon materyallerinin SEM, XRD ve FTIR karakteristikleri sırasıyla Şekil 5-7’de verilmektedir. XRD analizleri göstermektedir ki biyokütleden indirgenmiş grafen oksit geliştirilebilmektedir. İndirgenmiş grafen oksite gidilte karbon malzemenin yapısındaki değişim ve bunun grafitten elde edilen rGO’ ya benzerliği Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. Karbon numunelerin XRD analizleri (XRD analyses of the carbon samples)

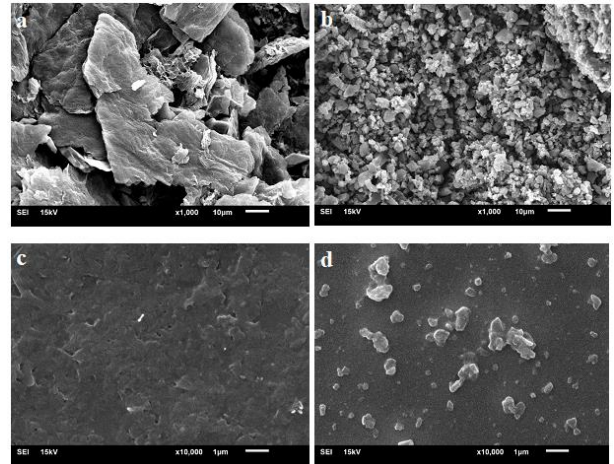
Şekil 6' da verilen FT-IR spektrumlarında rGO ve BC-Fe-Y-rGO numunelerinin fonksiyonel grupların analiz sonuçları görülmektedir. 3600-2400 cm^{-1} dalga boyu bölgesi her iki malzeme için OH ve C-H gerilimlerini göstermektedir. rGO için 2340 cm^{-1} civarında ve 1727 cm^{-1} 'de belirgin olan pik, C=O gerilimini belirtmektedir. 2100 cm^{-1} civarında rGO'da belirgin olan pik C=C bağı göstermektedir. BC-Fe-Y-rGO'da 1570 cm^{-1} 'de olan pik aromatik C=C gerilimlerini, 1200 cm^{-1} civarındaki pik ise C=O gerilimini göstermektedir. Sonuç olarak biyokömür numunesi aromatiklik ve C-H bakımından zengin görünmektedir. rGO'da ise kararlı C=O bağları bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu da oksitlenme özelliği bakımından grafitin daha istekli olduğunu gösterebilir. Dolayısıyla grafit tabakalarının açılması ve grafene dönüşüm, grafit için daha kolay olabilir.

1645 cm^{-1} 'de C=C titreşimlerini, 1400 cm^{-1} 'den küçük bölgelerde çoğunlukla C-O, C-OH titreşimlerini göstermektedir. Bu gerilimler NMP çözgeninden de gelebilmektedir. Ancak 1100-650 cm^{-1} civarında gelen pikler n katkılama sonucu yapıya katılan P-O, C-P bağlarını göstermektedir.



Şekil 6. Karbon numunelerin FTIR analizleri (FTIR analyses of the carbon samples)

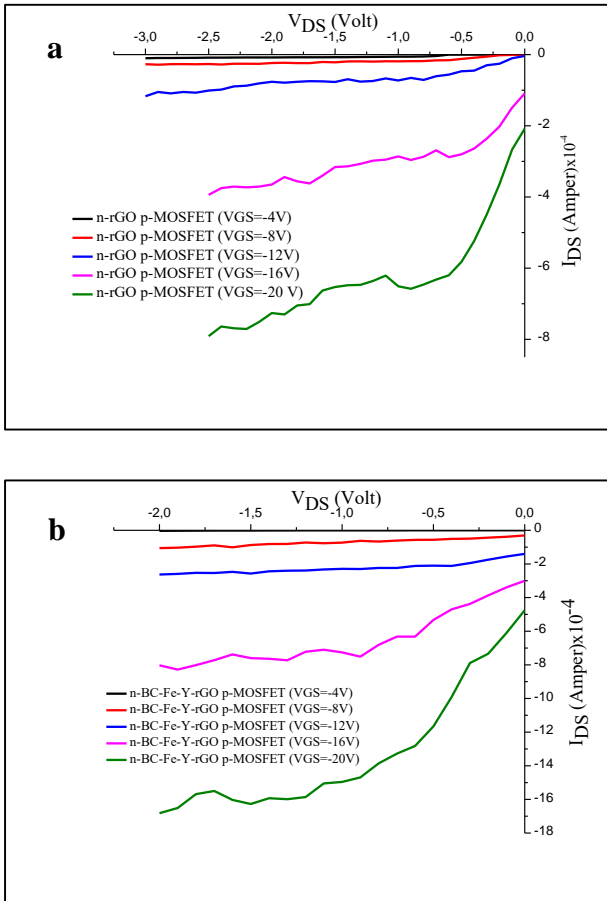
Şekil 7' de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, biyokütle kaynaklı karbona Modifiye Hummers yöntemi uygulanarak elde edilen indirgenmiş grafit oksit (BC-Fe-Y-rGO) ile grafitten elde edilen indirgenmiş grafit oksit (rGO) parçacıklarının farklı olduğu görülmektedir. NMP çözgeninde n-katkılanmış karbon numunelerin SEM görüntülerinde ise, n-BC-Fe-Y-rGO'nun çok daha küçük boyutlarda n-rGO içerdiği gözlenmiştir. XRD ve FTIR analizleri de bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 7. Karbon numunelerinin SEM görüntüleri (a) rGO, (b) BC-Fe-Y-rGO, (c) n-rGO, (d) n-BC-Fe-Y-rGO (SEM pictures of the carbon samples)

3.2. Transistör Karakterizasyonu (Characterization of Transistor)

Alan etkili karbon transistörlerin karakterizasyonunda aygıtların giriş ve çıkış (transfer) karakteristikleri incelenmiştir. Yüksek performans n-katkılı indirgenmiş grafen oksit ve biyokütle kaynaklı indirgenmiş grafen oksit karbon materyallerinden hazırlanan p kanal alan etkili karbon transistörlerin I-V karakteristikleri Şekil 8' de verilmiştir. Transistörlerin çıkış karakteristikleri sırasıyla transistörlerin kapı terminaline (G) -4, -8, -12, -16 ve -20 V kapı voltajları (VGS) uygulanarak elde edilmiştir. Çıkış karakteristiğinde aygıtlar kademeli olarak doyum davranışı göstermiştir. Çalışma karakteristikleri gösterilen tüm MOSFET yapıları kapı gerilimine bağlı olarak p kanal transistör temel performans özelliği göstermektedir. VGS= -16 V' da IDS akımının alan etkili transistörlerde negatif değerlikli $2,5-8 \times 10^{-4}$ A arasında değerlere sahip olduğu görülmüştür. Karbon malzemelerin akım iletimleri örneğin VGS= -16 V'da karşılaştırıldığında n-BC-Fe-Y-rGO'nun n-rGO'ya göre daha yüksek IDS akım değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum biyokütleden elde edilen karbon materyalin daha fazla ve farklı yüzey fonksiyonel gruplar içermesiyle katkılama oranının farklı olması sebebiyle gerçekleşmiş olabilir. Elektron verici daha fazla grupların materyal tarafından içerilmesi, akım değerini yükseltebilir.



Şekil 8. (a) n-rGO, (b) n-BC-Fe-Y-rGO karbon numuneleri iletim kanalına sahip alan etkili transistör transfer (çıkış) karakteristikleri (Out characteristics of carbon conduction channel holder field effect transistor)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar genel olarak 2 kısımda özetlenebilir:

- Çay atıkları biyokütlesi işlenerek yarı iletken özellik gösteren karbonize materyal geliştirilmiştir. Biyokütle fonksiyonel grupları açısından zengin olması n-katkılanmasını kolaylaştırmıştır ve transistör uygulamasına uygun karbonize materyal çay atığı biyokütlesinden geliştirilmiştir.
- Biyokütle kaynaklı karbon materyalin alan etkili karbon transistörlere (C-MOSFET) uygulanabilirliği bu çalışmada gösterilmiştir. Biyokütle kaynaklı karbon materyal ile transistör aygıtının daha iyi performansta çalıştığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (RTEÜ-BAP) birimince FYL-2018-970 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bıçakçı S.N., "Nesnelerin interneti", *Takvim-i Vekayi*, 7(1): 24-36, (2019).
- [2] Avouris P., Chen Z., Perebeinos V., "Carbon-based electronics", *Nature Nanotechnology*, 2: 605-615, (2007).
- [3] Burghard M., Klauk H., Kern K., "Carbon-based field-effect transistors for nanoelectronics", *Advanced Materials*, 21: 2586-2600, (2009).
- [4] Schwierz F., "Graphene transistors", *Nature Nanotechnology*, 5: 487-496, (2010).
- [5] Aikawa S. et al., "Carrier polarity engineering in carbon nanotube field-effect transistors by induced charges in polymer insulator", *Applied Physics Letters*, 112: 013501-1-013501-5, (2018).
- [6] Bargaouia Y., Troudia M., Bondavallib P., Sghaiera N., "Gate bias stress effect in single-walled carbon nanotubes field-effect transistors", *Diamond & Related Materials*, 8: 62-65, (2018).
- [7] Hamam A.M.M. et al., "Sub-10 nm graphene nano-ribbon tunnel field-effect transistor", *Carbon*, 126: 588-593, (2018).
- [8] Jangid P., Pathan D., Kottantharayil A., "Graphene nanoribbon transistors with high ION/IOFF ratio and mobility", *Carbon*, 132: 65-70, (2018).
- [9] Rabieefar F., Dideban D., Utilizing graphene nano-ribbon transistor in data converters: A comparative study", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 8(3): M30-M37, (2019).
- [10] Feng X. et al., "All carbon materials pn diode", *Nature Communications*, 9:3750-1-3750-7, (2018).
- [11] Li X. et al., "Boron Doping of Graphene for Graphene-Silicon p-n Junction Solar Cells", *Advanced Energy Materials*, 2: 425-429, (2012).
- [12] Rahimi R., Ochoa M., Ziaie B., "Direct laser writing of porous-carbon/silver nanocomposite for flexible electronics", *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(26): 16907-13, (2016)

- [13] Li, S. et al., “Development of electrically conductive nano bamboo charcoal/ultra-high molecular weight polyethylene composites with a segregated network”, *Composites Science and Technology*, 132: 31–37, (2016).
- [14] Barbera, K. et al., “Low - temperature graphitization of amorphous carbon nanospheres”, *Chinese Journal of Catalysis*, 35(6): 869–76, (2014).
- [15] Maiti, S. et al., “Silicon-doped carbon semiconductor from rice husk char”, *Materials Chemistry and Physics*, 109(1): 169–73, (2008).
- [16] Roy, S., “Synthesis of graphene oxide using tea-waste biochar as green substitute of graphite and its application in de-fluoridation of contaminated water”, *American Journal of Chemical Research*, 1(1): 1-19, (2017).