



Review Article

Journal of Marine and Engineering Technology (JOINMET) 4(1), 30-43, 2024

Received: 10-Jun-2024 Accepted: 23-Jun-2024

homepage: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/joinmet>

<https://doi.org/10.58771/joinmet.1498953>



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Optoelektronik Uygulamalar için Grafen

Pınar KÖÇ BAKACAK^{1*} , Aytaç LEVET² 

^{1*} Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Deniz ve Liman İşletmeciliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye. pinarkoc@subu.edu.tr

² İspir Hamza Polat Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye. aytaclvet@atauni.edu.tr

ÖZ

Grafen ilk izolasyonunun gerçekleştirildiği 2004 yılından beri iki-boyutlu nano materyaller arasında bir yıldız olarak araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Özellikle yeni keşfedilen 2D boyutlu materyal ailesi boyutsallıklarına bağlı olarak esneklik özelliğinin oluşumuna olanak sağlamaktadır. Bilinen ilk iki-boyutlu nano materyal olan grafenin sahip olduğu mükemmel termal, elektronik, optik ve mekaniksel özelliklerinin zenginliğinin yanı sıra, eşsiz 2D yapısından dolayı esnek optoelektronik aygıt uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu sayede insan arayüzlü cihazlar, robotik cilt, giyilebilir optoelektronik cihazlar, dokunmatik ekranlar, ultra hızı lazerler ve ışık yayan aygıtlar gibi esnek ya da gerilebilir cihazlara duyulan büyük ilginin oluşmasına ve bu alanda yürütülen çalışmaların hız kazanmasına sebep olmaktadır. Bu incelemede, grafen tabanlı optoelektronik aygıtların geliştirilmesindeki son gelişmelere kapsamlı bir genel bakış açısı sunmanın yanı sıra bu alana ilişkin gelecek perspektifleri de tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Grafen, optoelektronik, karbon

Graphene for Optoelectronic Applications

ABSTRACT

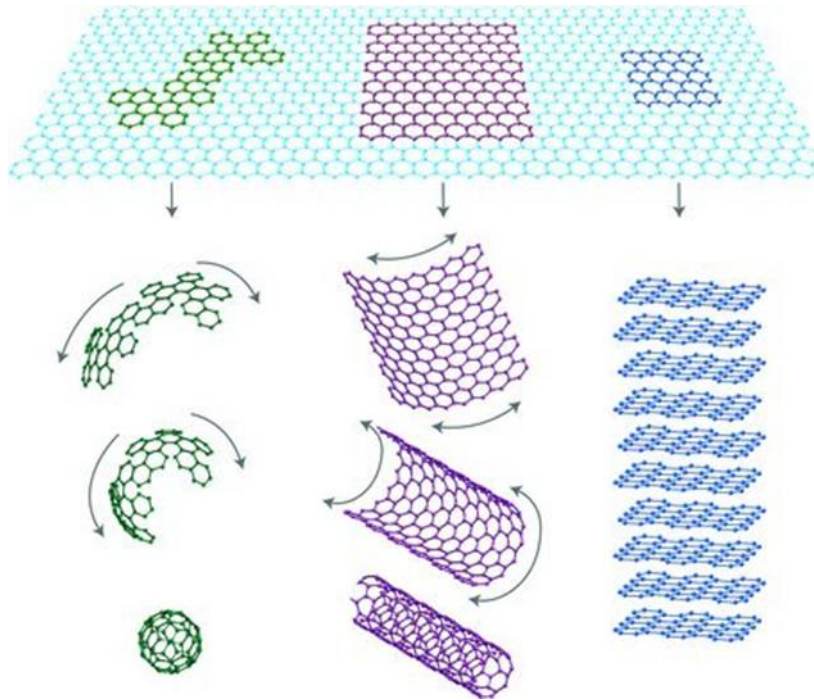
Graphene has attracted the attention of researchers as a star among two-dimensional nanomaterials since its first isolation in 2004. In particular, the newly discovered 2D-dimensional material family allows the formation of flexibility properties depending on their dimensionality. Graphene, the first known two-dimensional nanomaterial, is frequently preferred in flexible optoelectronic device applications due to its unique 2D structure, as well as its excellent thermal, electronic, optical, and mechanical properties. In this way, it causes great interest in flexible or stretchable devices such as human interface devices, robotic skin, wearable optoelectronic devices, touch screens, ultra-fast lasers, and light-emitting devices and the acceleration of studies in this field. This review provides a comprehensive overview of the latest advances in the development of graphene-based optoelectronic devices, as well as discusses future perspectives for this field

Keywords: Graphene, optoelectronic, carbon

^{1*} Sorumlu yazarın e-postası: pinarkoc@subu.edu.tr

1 Giriş

Grafen sp^2 hibrit yapısına sahip karbon atomlarının altgen bal peteği örgü yapısı içerisinde dizilim gösterdiği, bir atomik tabaka kalınlığına sahip bilinen ilk iki boyutlu nano materyaldir. Grafen sıfır boyutlu (0D) fullerenler, bir boyutlu (1D) karbon nanotüpler ve üç boyutlu (3D) grafit ve elmas yapılarını içeren oldukça büyük karbon ailesinin reisi durumdadır. Yeryüzünde oldukça bol miktarda bulunan karbon elementinin 1980' li yıllara kadar sadece iki fiziksel formu biliniyordu. Bunlar üç boyutlu grafit ve elmadır. Grafitin 1779 yılında Scheele tarafından yürütülen çalışmalara kadar kurşun cevheri olduğu düşünülüyordu. Verner ise 1789 yılında Yunanca "yazı" anlamına gelen grafit terimini literatüre kazandırmıştır. 1985 yılında grafenin yeni bir formu olan fullerenler keşfedildi. 1960' lı yıllarda Ubbelohde ve Lewis tarafından grafitten izole edilen ve 1962 yılında elektron mikroskopunda görüntülenen grafenin ismi, ilk olarak 1994 yılında Boehm tarafından tanımlandı. Bu alanda yürütülen ilk başarılı çalışma ise 2004 yılında Novoselov ve Geim tarafından gerçekleştirildi. Bulk grafitten mikromekaniksel ayrışma yöntemi ile tek tabaka grafen kristalini ele etmeyi başardılar. Sonrasında Scotch Tape teknolojisi yardımıyla silikon alttaş üzerinde bulunan ince silikon dioksit (SiO_2) üzerine transfer ederek grafen tabanlı transistör aygıtını elde ettiler ve bu sayede birçok çalışmada silikonun yerini alan grafen materyalinin özellikleri incelendi. Şekil 1' de grafen ve türevlerinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 1. Farklı türdeki karbon bazlı malzemelerin anası olarak grafenin şematik gösterimi. (Geim ve Novoselov, 2007)

Bu araştırma iki boyutlu karbon dünyası için oldukça önem arz ediyor. Çünkü bu sayede grafenin yük taşıyıcılarının hızının $\sim 200.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve spesifik yüzey alanının $\sim 2600 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ değerine sahip olduğu kanıtlanmıştır (Trivedi vd., 2019).

Araştırılan karbon ailesi arasında iki boyutlu (2D) grafen sahip olduğu sp^2 hibrit yapısı ve mükemmel fizikokimyasal özellikleri nedeniyle malzeme biliminden biyoloji elektrik ve optik ile ilgili birçok alanda tercih edilen ayrıcalıklı bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra grafen tek

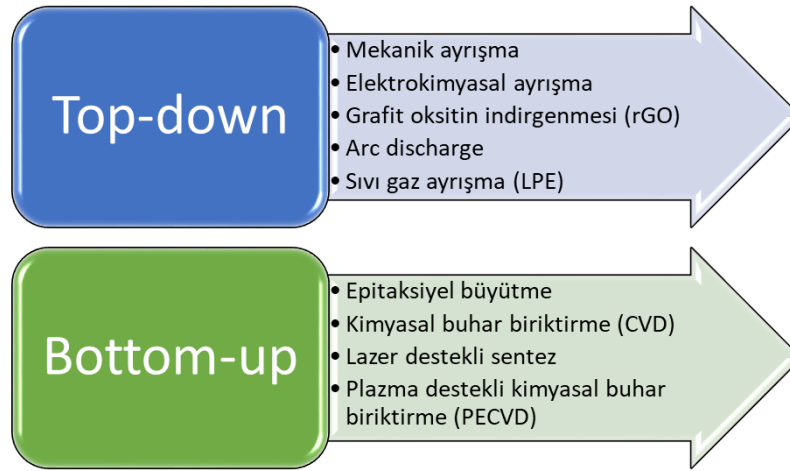
katmanlı yapısı sayesinde son derece elastiktir. Yüksek kırılma mukavemeti (125 GPa), elastik modülü (~ 1,1 TPa grafenin mukavemetinin çeliğe göre 100 kat daha fazla olmasını sağlar), tek tabaka grafenin yüksek ışık geçirgenliği (97,4% 550 nm’ de) yüksek termal iletkenliği (5000Wm⁻¹K⁻¹ bakırınkinden (401 W/mK) 10 kat daha yüksektir), grafenin elektron hareketliliği 106 S/m iletkenliğe ve 31 Ω/sq dirence sahiptir (buda silikonunkinden 140 kat daha fazla olan 2×10^5 cm²/V.s ultra yüksek hareketliliğe karşılık gelir) ve 0,06 mo (mo: serbest eektron kütlesi) etkin elektron kütlesi gibi spesifik ve ayrıcalıklı özellikler sergilemektedir (Bolotin vd., 2008: Dragoman ve Dragoman, 2009:Kim vd., 2009: Gadipelli ve Guo, 2015). Bu çok yönlü özellikleri nedeniyle giyilebilir/esnek elektronikler süper kapasitörler yüksek mukavemeti nedeniyle nanokompozitler esnek şeffaf elektrotlar piller, yakıt hücreleri sensörler kaplamalar ve biyomedikal uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Ghany vd., 2017: Miao ve Fan, 2023).

Keşfedildiği 2004 yılından bu yana tek tabaka grafen (SLG), iki katmanlı grafen (BLG), birkaç katmanlı grafen (FLG), çok katmanlı grafen (MLG), grafen oksit (GO), indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve grafen köpük dâhil olmak üzere grafen bazlı malzemelerin sayısı ve çeşidi artmaktadır. Teknik olarak baktığımızda bu grafen türevlerinin çoğu altı kenarlı şekillerle düzenlenmiş tek bir karbon atomu katmanı olan grafen olmamasına rağmen, kolaylık sağlamak için grafen türevlerini "grafen" olarak adlandırmak yaygındır (Kumar vd., 2021: Wang vd., 2024). Özellikle son zamanlarda büyük bir heyecanla yürütülen çalışmalarda grafenin özelliklerinin dış müdahaleler ile değiştirilebilmesi yeni grafen türevi malzemelerin ortaya çıkmasına imkân tanımaktadır. Süper iletkenliğin ortaya çıkması birden fazla katmandan oluşan tabakalı yapılarda bant aralığının artırılabilmesi, dikey istifleme yöntemi ile grafende kuantum tünelleme, zızzag kenarlı grafen yapılarında görülen manyetizma ailenin büyümesini sağlayan özellikleri arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2009 : Britnell vd., 2012 : Velasco-Soto vd., 2015: Cao vd., 2018: Sanz vd., 2020).

Dikkate değer özelliklere sahip grafenin yapısından tam anlamıyla faydalanmak ve hem performansı hem de uygulama alanlarını arttırmak için grafenin hazırlanış yöntemleri dikkate alınması gereken en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Grafenin hazırlanış şekline bağlı olarak mikro/nano yapısı, yapışma kalitesi ve sahip olduğu bireysel özellikleri büyük ölçüde farklılık göstermektedir (Kumar vd., 2019: Ma vd., 2020). Ticari potansiyeli nedeniyle grafen ve türevlerini elde etme yöntemlerinde verimi ve kaliteyi arttırmak için birçok araştırmacı tarafından oldukça yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

Grafen elde etme yöntemleri, top-down ve bottom-up yaklaşımları olmak üzere iki ana başlık altında toplanır. Grafenin top-down yöntemleri ile elde edilmesi doğal grafitten grafene doğru ilerleyen bir süreç olup grafitin indirgenmesi veya ayrışması tekniğine dayanmaktadır. Mekanik ayrışma, sıvı gaz ayrışma (LPE), elektrokimyasal ayrışma, grafit oksitin indirgenmesi (rGO) ve arc discharge yöntemleri grafitten grafeni elde etmek için kullanılan top-down yöntemleri arasında yer almaktadır. Grafenin sentezlenmesinde kullanılan bir diğer yaklaşım ise bottom-up yöntemleridir. Bu işlemlerde grafenin elde edilmesi için hidrokarbonlar öncü olarak kullanılmaktadır. Epitaksiyel büyütme, Kimyasal buhar biriktirme (CVD), lazer destekli sentez sıklıkla kullanılan bottom-up yöntemleri arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2022).

Şekil 2’ de grafenin elde edilmesinde kullanılan top-down ve bottom-up yöntemlerinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2. Grafenin elde edilmesinde kullanılan top-down ve bottom-up yöntemlerinin şematik gösterimi

2 Grafenin Yapısı, Elektronik ve Optik Özellikleri

2.1 Elektronik Özellikleri

Grafenin birim hücresi iki karbon atomundan oluşmaktadır ve temel halde bir yarı metaldir. sp^2 hibrit bağ yapısı içerisinde her bir atom arası mesafe (molekül bağ uzunluğu) 0,142 nm olup, birleştirilmiş benzen halkasına benzer bir yapıya sahiptir. Yapı içerisinde oksijen gruplarının olmayışından dolayı hidrofobik (su sevmeyen) bir özellik sergilemektedir (Mbayachi vd., 2021).

Grafenin p_x ve p_y yörüngelerinin kombinasyonu sonucu oluşan düzleme dik 3σ ve son p_z elektronu tarafından oluşturulan ve elektronların serbest hareket etmesine izin veren yarı dolu bandın anahtarı olan 1 adet π bağı olmak üzere toplam 4 bağı bulunmaktadır. Düzlem içi σ bağları (Kovalent bağ) altıgen yapı içerisinde sert omurga yapısı görevi görürken, düzlem dışı π bağları 0,335 nm mesafe aralıkları ile düzenli bir şekilde üst üste gelerek istiflenen grafen tabakaların oluşturduğu grafit yapısı içerisinde farklı grafen katmanlar arasında etkileşimden sorumludur (Yang, 2018).

Tek tabaka grafenin elektronik yapısı, sıkı bağlanma Hamiltoniyeni kullanılarak açıklanabilir. Bağlanma ve bağlanma karşıtı σ -bantları enerji açısından iyi bir şekilde ayrıldığından (Brillouin bölgesi merkezinde $\Gamma > 10$ eV), yalnızca kalan iki π -bandı tutularak yarı ampirik (deneysel) hesaplamalarda ihmal edilebilirler. Altıgen kafes üzerindeki farklı atomlardan gelen elektronik dalga fonksiyonları örtüşmektedir. Yani benzen halkalarının kaynaşması temel halde iletkenlik ve valans bantları arasında çakışmaya (sıfır yasak enerji aralığı) yol açar. Bununla birlikte, $p_z(\pi)$ ile s veya p_x ve p_y yörüngeleri arasındaki bu tür herhangi bir örtüşme, simetri açısından sözkonusu değildir. Sonuç olarak, π bağlarını oluşturan p_z elektronları diğer değerlik elektronlarından bağımsız olarak ele alınabilir. Bu π -bant yaklaşımı içerisinde, toplam Hamiltoniyenin elektronik spektrumunu tanımlamak ve yalnızca ilk en yakın komşu etkileşimleriyle sınırlı olan $E^\pm(k_x, k_y)$ dağılım ilişkilerini elde etmek kolaydır (Wallace, 1947; Charlier vd., 2008)

$$E^\pm(k_x, k_y) = \pm\gamma_0 \sqrt{1 + 4 \cos \frac{\sqrt{3}k_x a}{2} \cos \frac{k_y a}{2} + 4 \cos^2 \frac{k_y a}{2}}$$

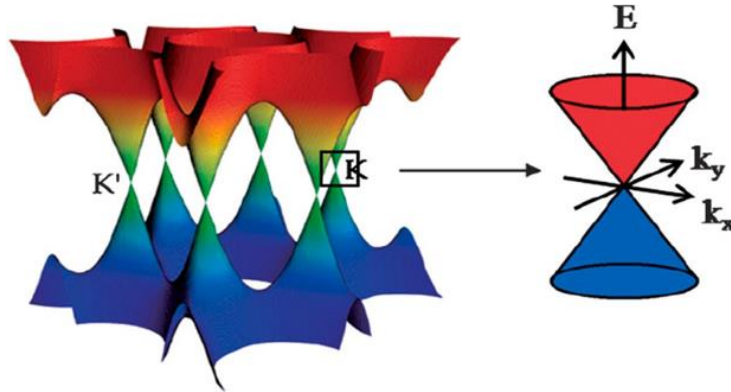
Burada $\alpha = \sqrt{3} a_{cc}$ ($a_{cc} = 1,42 \text{ \AA}$ iki karbon atomu arası mesafe), $\gamma_0 = 2,9 - 3,1 \text{ eV}$, $k=(k_x, k_y)$ ise Birinci Brillouin bölgesindeki mevcut elektronik momentum topluluğunu gösteren vektörlerdir. Buradaki (-) negatif tam dolu olan bandı temsil ederken, (+) tamamen boş olan enerji bandını temsil etmektedir. Valans ve iletkenlik bandının çakıştığı bu noktaya Dirac noktası denilmektedir. Bu noktada Fermi seviyesi E_f sıfır enerji referansıdır, Fermi yüzeyi K ve K' ile tanımlanır ve Dirac fermiyonları için

$$E^\pm(\kappa) = \pm \hbar v_F |\kappa|$$

Burada $\kappa = k - K$ ve v_F ise elektronik grup hızı olup elektronlar sahip oldukları

$$V_f = \sqrt{3}\gamma_0 a/2 \cong 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

hızı ile kütsüz dirac fermiyonlarına benzer bir davranış sergilemektedirler. Yani bu noktada elektronlar fermi hızı ile hareket ederler ve enerji-momentum dağılımı liner bir performans gösterir. Bu nedenle grafendeki yük taşıyıcıları, yarıiletken veya metallerdeki Schrödinger eşitliği ile tanımlanan normal yük taşıyıcılarından ziyade göreceli parçacıklardır. Grafen benzersiz elektronik yapısından dolayı yüksek yük taşıyıcı hareketliliği (mobilité), ambipolar alan etkisi, kuantum hall effect, balistik taşınma, Klein paradoksu, taşıyıcı konsantrasyonunun sıfıra yaklaştığı durumda dahi $\sim 4e^2/h$ büyüklüğünde iletkenlik ve zayıf antilokasyon gibi ayrıcalıklı özellikler sergilemektedir. Şekil 3' de grafenin üç boyutlu band yapısı ve düşük enerjili bant yapısının Dirac noktasında birbirine değen iki koni şeklinde yaklaşımı yer almaktadır (Bonaccorso vd., 2010 : Iyechika, 2010 : Neto and Novoselov, 2011 : Sarma vd., 2011) .



Şekil 3. Grafenin üç boyutlu band yapısı ve düşük enerjili bant yapısının Dirac noktasında birbirine değen iki koni şeklinde yaklaşımı (Rao vd., 2009)

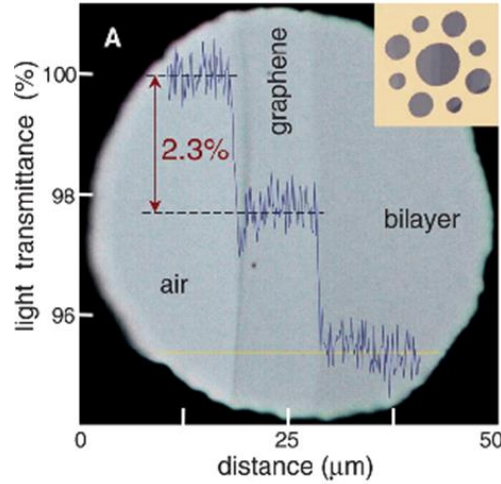
2.2 Optik Özellikleri

Grafenin optik özellikleri, doğrusal bant yapısı, sıfır bant aralığı ve Dirac Fermiyonlarının elektromanyetik radyasyonla güçlü etkileşimi nedeniyle benzersizdir. Tek bir atomik kalınlığa sahip olmasına rağmen görüntülenebilmektedir. Dirac elektronlarının doğrusal dağılımı geniş bant uygulamalarını mümkün kılmaktadır. Grafenin görünür bölgeden yakın kızılötesi bölgeye uzanan oldukça geniş bir spektral aralıkta absorpsiyonu bantlar arası geçişlerle modellenir ve frekanstan bağımsızdır. Optik geçirgenliği (T) ince yapı sabiti cinsinden ifade edilebilir ve bu durum bantlar arası ve bant içi optik geçişlerden kaynaklanmaktadır. Uzak kızılötesi bölgedeki optik tepki ise, bant içi geçişlerden veya serbest taşıyıcı absorpsiyonu sonucu oluşmaktadır. Momentum uyumsuzluğu nedeniyle bant içi geçişle doğrudan foton soğurulması mümkün değildir. Momentumu korumak için fonon saçılması meydana gelir ve bunu K noktası yakınında serbest taşıyıcıların popülasyonunun tersine çevrilmesi izler.

Bağımsız bir tek tabaka grafenin geçirgenliği, sabit evrensel optik iletkenliğe sahip bir malzeme için ince film sınırında Fresnel denklemlerinin uygulanmasıyla elde edilebilir.

$$T = (1 + 0.5\pi a)^{-2} \approx 1 - \pi a \approx \%97,7$$

Burada $a = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = G_0/(\pi\epsilon_0 c) \approx 1/137$ ince yapı sabiti, $G_0 = e^2/(4\hbar) \approx 6,08 \times 10^{-5}\Omega^{-1}$ evrensel optik iletkenlik sabitidir. Grafen, görünür bölgede gelen ışığın sadece %0,1'inden daha az kısmını yansıtır. Tabaka sayısı arttırdığı zaman bu değerde artmaktadır. Örneğin on katman için bu değer yaklaşık olarak ~%2'ye yükselir. Böylelikle grafen katmanlarının optik absorpsiyonunu katman sayısı ile orantılı olarak değerlendirebiliriz. Çünkü her bir tabaka görünür spektrumda $A \approx 1 - T \approx \pi a \approx \%2,3$ 'ünü absorbe etmektedir. Pauli bloklama ilkesinin (Aynı adreste iki elektron bulunamaz) sonucu olarak absorpsiyon doyuma ulaşır ve dengesiz taşıyıcılar sıcak lüminesansa neden olur. Ayrıca kimyasal ve fiziksel işlemler de lüminesansa yol açabilir. Bu özellikler grafeni fotonik ve optoelektronik uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirir (Blake vd., 2007 : Casiraghi vd., 2007 : Mak vd., 2009). Şekil 4' de Kısmen tek tabaka grafen ve onun çift katmanıyla kaplanmış 50 mm' lik bir açıklığın fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4. Tek tabaka ve iki tabaka grafen ile kaplanmış 50 mm'lik bir açıklığın fotoğrafı (Nair vd., 2008)

2.3 Grafenin Fotonik ve Optoelektronik Uygulamaları

Katlanabilir dokunmatik ekranlar, epidermal sensörler, yumuşak ışık yayan diyotlar, bükülebilir güneş pilleri ve deforme olabilen enerji dönüştürme/depolama cihazları gibi akıllı giyilebilir elektroniklerin ortaya çıkması ve hızla gelişmesiyle birlikte, esnek ve gerilebilir şeffaf iletken elektrotlara yönelik talebin, kırılğan indiyum kalay oksidin önüne geçmesine yol açtı (Olabi vd., 2021; Nair vd., 2023; Su ve Hu, 2023; Liv d., 2024; Mohebbi vd., 2024).

Görüntüleme cihazları, dokunmatik cihazlar, ışık yayan diyotlar ve güneş pilleri gibi optoelektronik aygıt tasarımlarında tercih edilen malzemenin tabaka direncinin (R_s) oldukça düşük ve yüksek şeffaflık değerine sahip olması başlıca zorunluluklar arasında yer almaktadır. İnce filmlerde $R_s = \rho/t$ olup burada t ; kalınlık, $\rho=1/\sigma$ direnç ve σ ise dc iletkenlik değeri olarak tanımlanmaktadır. Şeffaf iletken elektrotların (TCE) alt katmanı çok esnek ve gerilebilir bir plastik alt katman olduğundan, plastiğin yumuşak ve düzensiz yüzeyi nedeniyle kalınlığın belirlenmesi zordur. Bu nedenle, TCE'lerin direnci genellikle levha direnci R_s ile temsil edilir. Optoelektronik cihazların farklı uygulama alanlarına göre, TCE'lerin R_s 'leri için değişen gereksinimler vardır. Çoğu optoelektronik cihaz, R_s değeri $500 \Omega/\text{sq}$ 'den düşük olan

TCE' lere ihtiyaç duyar (Hecht vd., 2011 : Ellmer, 2012). Aynı zamanda pürüzlü plastik yüzey TCE yapılarında yüksek yüzey pürüzlülüğüne yol açmaktadır. Optoelektronik cihazların anot ve katot elektrotları arasında sızıntı akımına neden olabilir ve bu da elektronik cihazların kısa devre arızasına neden olur (Patil vd., 2021).

Günümüzde şeffaf elektrot olarak kullanılan malzemeler; İndiyum oksit (In₂O₃), Çinko oksit (ZnO), Kalay oksit (SnO₂) ve bunların üçlü kombinasyonları ile oluşan yarıiletkenlerdir. En yaygın olarak kullanılan %90 (In₂O₃) ve %10 (SnO₂) bileşiminden oluşan, kalay atomlarından dolayı n-tipi yarıiletken özelliği gösteren İndiyum kalay oksit (ITO) dir. ITO' nun kullanımı yapısal özelliklerinden dolayı bazı kısıtlamalara neden olmaktadır. Örneğin elektriksel ve optik özellikleri yapısına istemli ya da istemsiz dâhil olan yabancı atomlardan dolayı çok yönlü bir şekilde etkilenecek değişiklik göstermektedir. Bantlar arası geçişlerden dolayı 4eV enerji değerinin üzerinde güçlü bir absorpsiyona sahiptir. Ticari olarak temin edilen ITO T_≅%80 (550 nm de) ve cam, polietilen gibi farklı alttaşlar üzerinde sırasıyla 10 ve 60-300 Ω arasında değişen minimum R_s değerine sahiptir. Ayrıca indiyumun doğada az oluşu nedeniyle maliyetlerdeki önlenemeyen artış, işleme gereksinimleri, asidik ve bazik ortamlara karşı aşırı duyarlılık ve örneklemelerde yaşanan zorluklar başlıca karşılaşılan kısıtlamalar arasında yer almaktadır. Tüm bu kısıtlamaların yanı sıra kırılma katsayısının yüksek olması, esnek ve bükülebilir ekran uygulamalarında kullanılması durumunda kolayca kırılabilmesinden dolayı yüksek performansa sahip yeni alternatif malzeme arayışı ortaya çıkmıştır. İlk olarak metalik nanoteller veya diğer metal oksitler araştırılmış sonrasında nanotüpler ve grafen sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır (Holland ve Siddall 1953;Hamberg ve Granqvist, 1986:: Minami, 2005: De vd., 2009: Köç vd., 2013).

Grafenin karbon nanotüplerden, ITO ve diğer metalik ince filmlerden esnek olmasının yanı sıra daha geniş dalga boyu aralığının da ($\lambda=380-780$ nm) daha yüksek T değerine (%97,7) sahip olması başlıca tercih sebebidir.

Giyilebilir ve portatif olarak taşınabilen elektronik cihazların başarılı bir şekilde geliştirilmesine karşın, bu aygıtların sürekli ve kararlı bir şekilde çalışabilmesi için enerji dönüşümü ve depolama işlevi gören aygıtlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Güneş pilleri süper kapasitörler ve piller gibi hem enerji dönüşümü hem de depolama işlevi gören aygıtlar bu zorlukların üstesinden gelinmesine imkân veriyor. Ancak geleneksel enerji dönüşümü sistemleri opak ve nesnenin orijinal görünümünü kapatacağından giyilebilir sistemlerin modasını ve estetik görünüşünü engeller. Bu nedenle şeffaf enerji dönüşümü ve depolama aygıtlarına ihtiyaç duymaktadır. Şeffaf olmaları insan gözü tarafından algılanmalarını imkânsız kılıyor ve bu sayede aygıt gizli durumda kalıyor (Liu vd., 2017: Pomerantseva vd., 2019: He vd., 2021: Zhao vd., 2021: Zhao vd., 2022). 2D grafen tabakalar bu alana yeni umutlar getiriyor. Grafen levhaların 2600 m²/gramlık yüksek teorik yüzey-kütle oranına sahip olmasının yanı sıra katmanlı yapısı elektrokimyasal reaksiyonlar için çok daha aktif alanlar ve daha zengin iyon taşıma kanalları sağlar. 2019 Nobel komitesi tarafından insanlık üzerinde etkisi kabul edilen şarj edilebilir lityum iyon pillerin, teorik olarak ~ 400 Wh/kg ulaşan yüksek spesifik enerjileri ile en yaygın kullanılan enerji depolama yöntemlerinden biridir. Pillerin güç yoğunluğunun artırılması enerji depolama cihazlarının imalatında karşılaşılan en büyük güçlüktür. 2D grafen levhaların açık ve gözenekli elektrot yapıları anot ve katot görevi görebilirler. Pil cihazları lityum iyonlarının yakalanması ve serbest bırakılmasına dayandığından, yüksek iletkenliğe sahip grafen bazlı gözenekli elektrotlar, hızlı iyon transfer kinetiği ve yeterli sayıda elektrokimyasal reaksiyon için kritik öneme sahiptir ve böylece pilin güç yoğunluğunu etkili bir şekilde artırır. Bununla birlikte, şeffaf lityum iyon pilin enerji yoğunluğu, yüksek optik şeffaflıkta (%60) genellikle düşüktür (~10 Wh/L), çünkü ince şeffaf elektrotlar, enerji depolamak için daha az aktif malzemeyi indükleyecektir. Benzer şekilde, süper kapasitörler, yüklerin çoğunun elektrotların yüzeyinde veya yakınında aktarıldığı iyon adsorpsiyonu veya redoks reaksiyonlarına dayalı olarak enerji

depolar. Süper kapasitörler, lityum iyon pillerden bir kat daha büyük olan yüksek güç yoğunluğunun (en az 10 kWkg⁻¹) gerekli olduğu uygulamalar için idealdir (Bonoccorso vd., 2015: Wang ve Shi, 2015: Castelvechi ve Stoye, 2019: Yang vd, 2011: Liu vd., 2022: Na vd., 2022).

Grafen sahip olduğu geniş yüzey alanının yanı sıra, gözenekli mikro yapısı, elektrokimyasal olarak stabil olmaları ve mekanik olarak iyi stabiliteyi gibi faktörlerden dolayı, batarya ve süperkapasitör gibi enerji depolamak için kullanılan aygıt tasarımında da sıklıkla tercih edilmektedir (M.F. El-Kady vd 2016). Özellikle 1000mAhg⁻¹ ulaşan kapasite değeri, daha uzun ömürlü piller ve saniyeler içinde daha hızlı şarj süresi sunuyor oluşu ile Li-iyon bataryalarda anot elektrot olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Esneklik özelliğinden dolayı katıhal kapasitörlere göre giyilebilir elektronik uygulamalarda kullanımı mümkün olmaktadır (A.M. Abdelkader vd 2017). Ayrıca süper kapasitörlerde, hem çift katmanlı kapasitörler hem de sahte kapasitörler için elektrot malzemesi olarak grafen kullanılmaktadır.

Güneş enerjisi en bol ve en temiz yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir Fosil yakıtın yerini alma potansiyeli yüksek olan ve böylece çevreyi fosil yakıt kullanımından kaynaklanan ciddi etkilerden koruyan bir enerji kaynağıdır. Boyaya duyarlı güneş pilleri, güneş enerjisinin doğrudan toplanması için umut verici bir teknolojidir. Grafen yakıt hücrelerinde boya duyarlılaştırıcı olarak da kullanılmaktadır. (A.G. Olabi vd 2021).

Organik/ perovskit ışık yayan diyot (LED) aygıt yapısında elektrolüminesans katmanı olarak organik/ perovskit bileşenlerine dayanan uygulanan akıma tepki olarak çok daha verimli ışık yayabilen yeni bir LED türüdür. Elektron ve boşluklar katot ve anot boyunca enjekte edildikleri zaman ışık yayan tabaka içerisinde karşılaşılır ve elektron-boşluk rekombinasyonu sonucu ışık yayılır. Organik/ perovskit LED' ler televizyon ekranlarında bilgisayar monitörlerinde küçük taşınabilir ekranlar için umut verici olsa da ticari ITO tabanlı şeffaf iletken elektrotların kimyasal kararsızlığı, rijit oluşu gelişimin önündeki en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle ITO' nun yerine alternatif aday bulma çalışmaları hevesle yürütülmekte ve grafen kimyasal kararlılığı, esnek oluşu ve iş fonksiyonu gibi ayrıcalıklı özelliklerinden dolayı Organik/ perovskit LED uygulamaları için ideal bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Ekibi tarafından yürütülen çalışmalarda fosfomolibdik asit (PMA) ile katılmış tek tabaka grafenin kullanılması ile Organik/ perovskit LED aygıt tasarımı gerçekleştirildi. PMA molekülleri ile karbon atomları arasında oluşan Mo-O-C bağı sayesinde grafen tabakalarında bulunan elektronlar PMA ya transfer edildi. Böylelikle grafen tabakalarda p-tipi doping etkisi oluştu. MA moleküllerinin doping etkisi sayesinde Grafen bazlı TCE'lerin tabaka direnci 694 Ω/sq'den 240 Ω/sq'ye düştü. Bunun yanı sıra anot olarak PMA katkılı grafen bazlı TCE'lere sahip organik ve perovskit LED'ler, saf tek tabaka grafen kullanılarak oluşturulan aygıt tasarımlarına kıyasla %50,8 ve %36,8 artışla 129,3 ve 15,6 cd/A maksimum verimlilik sergiledi. Bu durum grafen bazlı TCE'lerin yeni nesil ekranlar ve katı hal aydınlatma uygulamalarında büyük umut vaat ettiğini göstermektedir. Anot olarak grafen tabanlı TCE' lerin kullanılması ile oluşturulan OLED' lerin lüminesans verimi ITO ile oluşturulan aygıtların performansı ile karşılaştırıldığında düşük iş fonksiyonu ve yüksek tabaka direncinden dolayı sınırlıdır. Bu da OLED'lerin performansının hala ITO tabanlı cihazlarınkinden daha düşük olmasına neden olur. Son zamanlarda, yüksek çalışma fonksiyonuna ve düşük tabaka direncine sahip anot olarak HNO₃ katkılı grafen içeren yüksek performanslı OLED' ler başarıyla geliştirildi; bu, floresan OLED' lerde 37,2 ve fosforesan OLED' lerde 102,7 ile son derece yüksek ışık verimliliği elde etti. Şaşırtıcı bir şekilde OLED' lerin ışık verimliliği, ticari ITO' lu OLED' lerinkinden önemli ölçüde daha yüksektir (Han vd., 2012 : Ahn ve Hang, 2014 : Zurutuza ve Marinelli, 2014 : Cao vd., 2018 : Lin vd., 2018 : Chu vd., 2021: Liu vd., 2021: Huang, 2023)

Ambipolar alan etkisi elektronikte grafenin kullanılmasını mümkün kılan ve transistörlerde kullanılan bir özelliktir. Alan etkisiyle boşluklar ya da elektronlar tarafından taşıma işlemi modüle edilebilir. Grafen sıfır yasak enerji aralığına sahip bir yarımetal olduğu için iki boyutlu grafen bir boyutlu grafen nanoşeritlere daraltılarak alan etkisi yardımıyla yasak enerji aralığı oluşturma işlemi başarıldı. Yürütülen çalışmalarda 104 açma-kapama oranına sahip transistörler elde edilmiştir. Ayrıca oda sıcaklığında yüksek taşıyıcı mobilitesinden dolayı transistör uygulamalarında doğru bir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır (Caridad vd., 2024; Ludwing vd., 2024). Wu et al ve ekibi tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda CVD yöntemi ile bakır folyo üzerine büyütülen grafen filmler elmas benzeri karbon yapısı üzerine transfer edilerek top-gate radyo frekans transistör tasarımı gerçekleştirildi. 40 nm' lik gate uzunlukları ile en kısa radyo frekans transistör tasarımları arasında yer almaktadır. 155 GHz kadar ulaşabilen kesme (cut-off) frekansları elde edilmiş ve bu değer $1/\text{gate}$ uzunluğu olarak ölçeklendiği sonucuna ulaşılmıştır (Wu vd., 2011). Vicarelli ve ekibi tarafından yürütülen çalışmalarda terahertz radyasyonunu dedekte etmek için anten bağlantılı alan etkili grafen transistörlere dayanan terahertz dedektörler kullanıldı. Oda sıcaklığında 0,3 THz frekansta performans sergileyen grafen tabanlı dedektörler sayesinde proteinleri, biyomolekülleri, hücreleri ve DNA' nın hızlı bir şekilde algılanma ve görüntülenmesini mümkün kıldı (Vicarelli vd., 2012).

Tek tabaka grafenin yanı sıra çift ve çok katmanlı grafen kullanılarak tasarlanan esnek aygıt tasarımı da son yıllarda hız kazanmıştır. Yürütülen çalışmalarda BLG kullanılarak oluşturulan Grafen/4H-SiC ultraviyole Schottky bağlantılı kendi kendine çalışan fotodedektör tasarımı gerçekleştirildi. 240-350 nm aralığında ultraviyole ışık altında gerçekleştirilen elektronik ve optoelektronik karakterizasyon çalışmalarında, fotodedektörün spektral duyarlılığının (R_{max}) $0,008 \text{ AW}^{-1}$ olduğu ve tek tabaka grafen kullanılarak oluşturulan detektöre nazaran %50 daha hızlı yanıt verdiği sonucuna ulaşıldı (Ala K. Jehad 2023)

Köç Bakacak ve çalışma grubu tarafından yürütülen çalışmalarda çok katmanlı grafenin (MLG) kullanımının yanı sıra farklı aygıt tasarımları da öne çıkmaktadır. Tek tabaka grafen yerine, PoliVinil Clorür (PVC) üzerine transfer edilen çok katmanlı grafen (MLG) kullanımı dikkat çeken araştırmalar arasında yer almaktadır. İlave başka bir elektrot kullanmadan sadece grafen yüzeyinden oluşan yeni bir aygıt tasarımı olan coplanar (eş düzlem) aygıt yapısı kullanıldı. Elektrostatik doping yöntemi ile sadece MLG den oluşturulan elektrokromik aygıtın elektrik ve optik özellikleri kontrol edildi. Bu sayede oldukça esnek, basit, ucuz ve performansı yüksek optoelektronik aygıt tasarımı gerçekleştirilmiş oldu. (Köç Bakacak vd., 2021).

3. Sonuç

Karbon atomlarının tek bir atomik tabaka içerisine bal peteği örgüsü şeklinde dizilmeleri sonucu oluşan grafen, mükemmel elektrik, termal iletkenlikleri, yüksek optik geçirgenliği, esnek-bükülebilir oluşu ve kimyasal olarak stabil olması gibi ayrıcalıklı özellikleri sayesinde esnek teknolojik aygıt uygulamalarında kırılğan ITO' nun yerine mükemmel bir adaydır. Grafenin esnek ve bükülebilme özelliği sadece geleneksel cihazların insan vücudu ile sorunsuz bir şekilde entegre olmasını sağlamakla kalmıyor, aynı zamanda geniş optik bant absorpsiyonu özelliği ile yeni esnek ve giyilebilir elektronik aygıtların ortaya çıkmasına imkan tanımaktadır. Mekanik ayrışma yöntemi ile elde edildiği 2004 yılından beri CVD, rGO, Epitaksiyel büyütme ve LPE gibi bir çok yöntem ile başarılı bir şekilde elde edildi. Tüm bu yöntemlerde amaç; kaliteli, pürüzsüz, kontrollü sayıda katmanla büyük ölçekli grafen sentezini elde edebilmektir. Bu çalışmada; grafenin sahip olduğu ayrıcalıklı elektrik, optik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra, optoelektronik cihazlarda neden tercih edildiğini ve son yıllarda bu alanda yürütülen çalışmalarda gerçekleştirilen ilerlemeyi inceledik. Grafen esaslı aygıt tasarımlarının kullanım

alanının her geçen gün genişlemesine rağmen, gelecekte doğrusal olmayan optik cihazlar alanında yürütülen çalışmalarda grafenin ultra geniş bant kapasitesinden tam olarak yararlanmak için farklı dalga boylarına odaklanması gerekmektedir.

4 Beyanname

4.1 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

4.2 Yazarların Katkıları

Pınar KÖÇ BAKACAK: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-Orijinal taslak hazırlama, İnceleme

Aytaç LEVENT: İnceleme, Düzenleme.

Kaynakça

- Abdelkader, A.M., et al., (2017). Ultraflexible and robust graphene supercapacitors printed on textiles for wearable electronics applications. *2D Materials*, 4(3): p. 035016. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa7d71>
- Abdel Ghany, N. A., Elsherif, S. A., Handal, H. T., (2017). Revolution of Graphene for different applications: State-of-the-art. *Surfaces and Interfaces*, 9, 93-106. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.08.004>
- Ahn, J.-H., and Hong, B.H., (2014). Graphene for displays that bend. *Nat. Nanotechnol*, 9 (10), 737–738.
- Blake, P., Hill, E. W., Neto, A. H. C., Novoselov, K. S., Jiang, D., Yang, R., Booth, T. J., Geim, A. K., (2007). Making graphene visible. *Appl. Phys. Lett.* 91, 063124. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2768624>
- Bolotin, K.I., et al. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146 (9-10): p. 351-355. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024>
- Bonaccorso F., Sun Z., Hasan T., Ferrari AC., (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nat Photonics*, 4:611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>
- Bonaccorso, F., Colombo, L., Yu, G., Stoller, M., Tozzini, V., Ferrari, A.C., Ruoff, R.S., (2015). V. Pellegrini, Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage. *Science* ,347 (6217),1246501.
- Britnell, L., Gorbachev, R. V., Jalil, R., Belle, B. D., Schedin, F., Mishchenko, A., Georgiou, T., Katsnelson, M. I., Eaves, L., et al. (2012). Field-Effect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures. *Science*, Vol 335, Issue 6071, pp. 947-950. <https://doi.org/10.1126/science.1218461>
- C. Rao et al. (2009). Graphene, the new nanocarbon. *Journal of Materials Chemistry*, 19(17), 2457-2469. <https://doi.org/10.1039/b815239j>
- Cao, Y., et al. (2018). Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 556,43-50.
- Cao, Y., Wang, N., Tian, H., Guo, J., Wei, Y., Chen, H., Miao, Y., Zou, W., Pan, K., He, Y., (2018). Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometrescale structures. *Nature*, 562 (7726) 249–253.
- Caridad et al., (2024). Room-Temperature Plasmon-Assisted Resonant THz Detection in Single-Layer Graphene Transistors. *Nano Lett.*, 24, 3, 935–942. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c04300>
- Casiraghi, C., Hartschuh, A., Lidorikis, E., Qian, H., Harutyunyan, H., Gokus, T., Novoselov, K. S., Ferrari, A. C., (2007). Rayleigh Imaging of Graphene and Graphene Layers. *Nano Lett.*, 7, 2711.

- Castelvecchi, D., Stoye, E., (2019). Chemistry Nobel honours world-changing batteries. *Nature*, 574 (7777), 308–309.
- Charlier, J.-C., Eklund, P. C., Zhu J., & Ferrari, A. C., (2008). Electron and Phonon Properties of Graphene: Their Relationship with Carbon Nanotubes. *Appl. Physics*, 111, 673–709.
- Chu, S., Chen, W., Fang, Z., Xiao, X., Liu, Y., Chen, J., Huang, J., Xiao, Z., (2021) Large-area and efficient perovskite light-emitting diodes via low-temperature blade-coating. *Nat. Commun.*, 12 (1) 1–9.
- De, S. et al., (2009). Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: extremely high dc to optical conductivity ratios. *ACS Nano*, 3, 1767–1774.
- Dragoman M., Dragoman D., (2009). Graphene-based quantum electronics. *Prog Quantum. Progress in Quantum Electronics*, 33(6):165–214. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2009.08.001>
- El-Kady, M. F., Shao, Y., and Kaner R. B., (2016). Graphene for batteries, supercapacitors and beyond. *Nature Reviews Materials*, 1, 16033 <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.3>
- Ellmer, K., (2012). Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes. *Nat. Photonics*, 6 (12), 809–817.
- Gadipelli, S., Guo, Z.X., (2015). Graphene-based materials: Synthesis and gas sorption, storage and separation. *Prog. Mater Sci.*, 69 (2015) 1–60. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.004>
- Geim, A. K., Novoselov, K. S., (2007). The rise of graphene. *Nat. Mater.*, 6, 183
- Hamberg, I. & Granqvist, C. G., (1986). Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows. *J. Appl. Phys.*, 60, R123–R160.
- Han, T.-H., Lee, Y., Choi, M.-R., Woo, S.-H., Bae, S.-H., Hong, B.H., Ahn, J.-H., Lee, T.W., (2012). Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode. *Nat. Photonics*, 6 (2) 105–110.
- He, J., et al., (2021). Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries. *Nature*, 597 (7874) 57–63.
- Hecht, D.S., Hu, L., Irvin, G., Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures. *Adv. Mater.*, 23 (13), 1482–1513. <https://doi.org/10.1002/adma.201003188>
- Holland, L. & Siddall, G., (1953). The properties of some reactively sputtered metal oxide films. *Vacuum*, 3, 375–391.
- Huang, X. et al., (2023). Transparent shape memory polyimide enables OLED for smart deformation. *Composites: Part A*, 175 107781. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107781>
- Iyechika, Y., (2010). Application of graphene to high-speed transistors: expectations and challenge. *Sci Techno Trends—Q Rev*, 37:3776–3792.
- Jehad, A.K., Fidan, M., Ünverdi, O., Çelebi, C., (2023). CVD graphene/SiC UV photodetector with enhanced spectral responsivity and response speed. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 355,114309. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114309>
- Jinlei Miao, J., and Fan, T., (2023). Flexible and stretchable transparent conductive graphene-based electrodes for emerging wearable electronics. *Carbon*, 202, 495-527. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.018>
- Kim, K.S., et al., (2009). Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 457(7230): p. 706-710.
- Köç Bakacak, P., Tüzemen, S., Kocabaş, C., (2021). New practical device structure for graphene-based electrochromic devices. *Optical Materials*, 122, 111675. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111675>

- Köç, P., (2013). Stimulated electroluminescence emission from n-ZnO/p-GaAs: Zn heterojunctions fabricated by electro-deposition. *AIP Advances*, 3, 122107. <https://doi.org/10.1063/1.4842635>
- Kumar, N., et al., (2021). Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. *FlatChem*, 27,100224. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2021.100224>
- Kumar, R., et al., (2019). A review on synthesis of graphene, h-BN and MoS₂ for energy storage applications: Recent progress and perspectives. *Nano Res*, 12(11):2655–94. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2467-8>
- Li, X., et al., (2024). Laser fabrication of epidermal paper-based graphene sensors. *Applied Materials Today*, 36, 102051. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.102051>
- Lin, K., Xing, J., Quan, L.N., De Arquer, F., Gong, X., Lu, J., Xie, L., Zhao, W., Zhang, D., Yan, C., (2018). Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent. *Nature*, 562 (7726) 245–248.
- Liu, L., Dong, R., Ye, D., Lu, Y., Xia, P., Deng, L., Duan, Y., Cao, K., Chen, S., (2021). Phosphomolybdic acid-modified monolayer graphene anode for efficient organic and perovskite light-emitting diodes. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13 (10) 12268–12277. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c22456>
- Liu, R., Wang, Z.L., Fukuda, K., Someya, T., (2022). Flexible self-charging power sources. *Nat. Rev. Mater.*, 1–17.
- Liu, W., Song, M.S., Kong, B., Cui, Y., (2017). Flexible and stretchable energy storage: recent advances and future perspectives. *Adv. Mater.*, 29 (1), 1603436. <https://doi.org/10.1002/adma.201603436>
- Ludwing et al., (2024). Terahertz Detection with Graphene FETs: Photothermoelectric and Resistive Self-Mixing Contributions to the Detector Response. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 6, 4, 2197–2212. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c01511>
- Ma, R., Zhou, Y., Bi, H., Yang, M., Wang, J., Liu, Q, et al. (2020). Multidimensional graphene structures and beyond: Unique properties, syntheses and applications. *Prog Mater Sci.*, 113,100665. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100665>
- Mak, K. F., Sfeir, M. Y., Misewich, J. A., Heinz, T.F., (2009). Electronic Structure of Few-Layer Graphene: Experimental Demonstration of Strong Dependence on Stacking Sequence. *Phys. Rev. Lett.*, 104, 176404. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.176404>
- Mbayachi, V., Ndayiragije, E., Sammani, T., Taj, S., Mbuta, E., Khan, A., (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*, 3, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100163>
- Minami, T., (2005). Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semicond. Sci. Technol.*, 20, S35–S44.
- Mohebbi, E., Pavoni, E., Pierantoni, L., Stipa, P., Hemmetter, A., Laudadio, E., and Mencarelli, D., (2024). Towards graphene-based asymmetric diodes: a density functional tight-binding study. | *Nanoscale Adv.*, 6, 1548-1555. <https://doi.org/10.1039/D3NA00603D>
- Na, Y.W., Cheon, J.Y., Kim, J.H., Jung, Y., Lee, K., Park, J.S., Park, J.Y., Song, K.S., Lee, S.B., Kim, T., (2022). All-in-one flexible supercapacitor with ultrastable performance under extreme load. *Sci. Adv.*, 8 (1), eabl8631. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl8631>
- Nair, M., Mishra, S., Dahiya, R., (2023). Graphene-Based Touch Sensors. *Encyclopedia of Materials: Electronics*, 3,54-70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819728-8.00122-4>
- Nair, R. R., et al (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science* 320, 1308. <https://doi.org/10.1126/science.1156965>
- Neto, AHC., Novoselov KS., (2011). New directions in science and technology: twodimensional crystals. *Rep Prog Phys.*, 74:082501. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/74/8/082501>

- Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., Wilberforce, T., Sayed, E.T., (2021). Application of graphene in energy storage device – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110026>
- Patil, J.J., Chae, W.H., Trebach, A., Carter, K.J., Lee, E., Sannicolo, T., Grossman, J.C., (2021). Failing forward: stability of transparent electrodes based on metal nanowire networks. *Adv. Mater.*, 33 (5), 2004356. <https://doi.org/10.1002/adma.202004356>
- Perala, R., Chandrasekar, N., Balaji, R., Alexander, P., Humaidi, N., Hwang, M., (2024). A comprehensive review on graphene-based materials: From synthesis to contemporary sensor applications. *Materials Science and Engineering: R, Volume 159*, 100805. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100805>
- Pomerantseva, E., Bonaccorso, F., Feng, X., Cui, Y., Gogotsi, Y., (2019). Energy storage: the future enabled by nanomaterials. *Science*, 366 (6468) eaan8285. <https://doi.org/10.1126/science.aan8285>
- Sanz, S., et al. (2020). Uncovering the Triplet Ground State of Triangular Graphene Nanoflakes Engineered with Atomic Precision on a Metal Surface. *Physical Review Letters*, 124, (171), 177201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.177201>
- Sarma SD., Adam S., Hwang EH., Rossi E., (2011). Electronic transport in two-dimensional graphene. *Rev Mod Phys.*, 83:407–470. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.407>
- Seekaew, Y., Arayawut, O., Timsorn, K., Wongchoosuk, C., (2019). Chapter Nine - Synthesis, Characterization, and Applications of Graphene and Derivatives. *Carbon-Based Nanofillers and their Rubber Nanocomposites*, Elsevier, pp. 259–283. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813248-7.00009-2>
- Shams, S., Zhang, R., and Zhu, J., (2015). Graphene synthesis: a Review. *Materials Science-Poland*, 33(3), pp. 566-578. <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0079>
- Shinohara, H., Tiwari, A., (2015). Graphene: an introduction to the fundamentals and industrial applications. John Wiley & Sons.
- Siow, L., Lee, J., Ooi, E., and Lau, E., (2024). Application of graphene and graphene derivatives in cooling of photovoltaic (PV) solar panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 193(3-4), 114288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114288>
- Sua, H., and Hu, Y.H., (2023). 3D graphene: synthesis, properties, and solar cell applications. *Chemical Communications*, 59(44),6660-6673. <https://doi.org/10.1039/d3cc01004j>
- Trivedi, S., Lobo, K., and Matte, H.R., (2019). Synthesis, Properties, and Applications of Graphene. *Fundamentals and Sensing Applications of 2D Materials*, Elsevier, pp. 25–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102577-2.00003-8>
- Velasco-Soto, M.A., Pérez-García, S.A., Alvarez-Quintana, J., Cao, Y., Nyborg L., Licea-Jiménez, L., (2015). Selective band gap manipulation of graphene oxide by its reduction with mild reagents. *Carbon*, 93,967-973. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.06.013>
- Vicarelli, L. et al., (2012). Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors. 2012. 11(10): p. 865-871.
- Wallace P. R., (1947). The Band Theory of Graphite. *Phys. Rev.* 71, 622. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
- Wang, S., Liang, L., Chen, S., (2024). Tensile strength and toughness of carbon nanotube-graphene foam composite materials and the corresponding microscopic influence mechanism. *Materials & Design*, 237,112529. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112529>
- Wang, X., Shi, G., (2015). Flexible graphene devices related to energy conversion and storage. *Energy Environ. Sci.*, 8 (3),790–823.
- Wu, Y. et al., (2011). High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like. *Carbon*, 472(7341): p. 74-78.

- Yang, G., Li, L., Lee, W.B., and Man Cheung Ng, (2018). Structure of graphene and its disorders: a review. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 19(1): p. 613-648. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1494493>
- Yang, Y., Jeong, S., Hu, L., Wu, H., Lee, S.W., Cui, Y., (2011). Transparent lithium-ion batteries. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* 108 (32), 13013–13018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102873108>
- Zhang, F., Yang, K., Liu, G., Chen, Y., Wang, M., Li, S., (2022). Recent advances on graphene: Synthesis, properties and applications. *Composites Part A*, 160,107051. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107051>
- Zhang, Y., Tang, T.-T., Girit, C., Hao, Z., Martin, M.C., Zettl, A., Crommie, M.F., Shen, Y.R., Wang, F., (2009). Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene. *Nature* 459, 820–823.
- Zhao, W., Jiang, M., Wang, W., Liu, S., Huang, W., Zhao, Q., (2021). Flexible transparent supercapacitors: materials and devices. *Adv. Funct. Mater.*, 31 (11), 2009136. <https://doi.org/10.1002/adfm.202009136>
- Zhao, Y., Liu, H., Yan, Y., Chen, T., Yu, H., Ejeta, L.O., Zhang, G., Duan, H., (2022). Flexible transparent electrochemical energy conversion and storage: from electrode structures to integrated applications. *Energy & Environ. Mater.*, 6,12303. <https://doi.org/10.1002/eem2.12303>
- Zurutuza, A., Marinelli, C., (2014). Challenges and opportunities in graphene commercialization. *Nat. Nanotechnol*, 9 (10) 730–734.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).