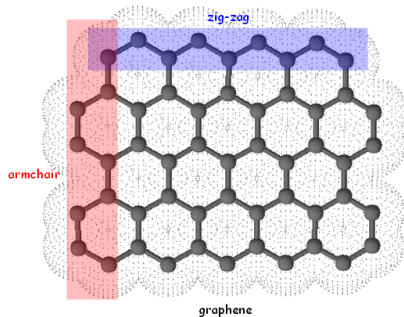




دانشگاه سیستان و بلوچستان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

Section II: Graphene



گرافن



زاهدان - دانشگاه سیستان و بلوچستان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر -

گروه مهندسی برق و الکترونیک - محمدعلی منصوری بیرجندی

mansouri@ece.usb.ac.ir

mamansouri@yahoo.com

References

□ Main references

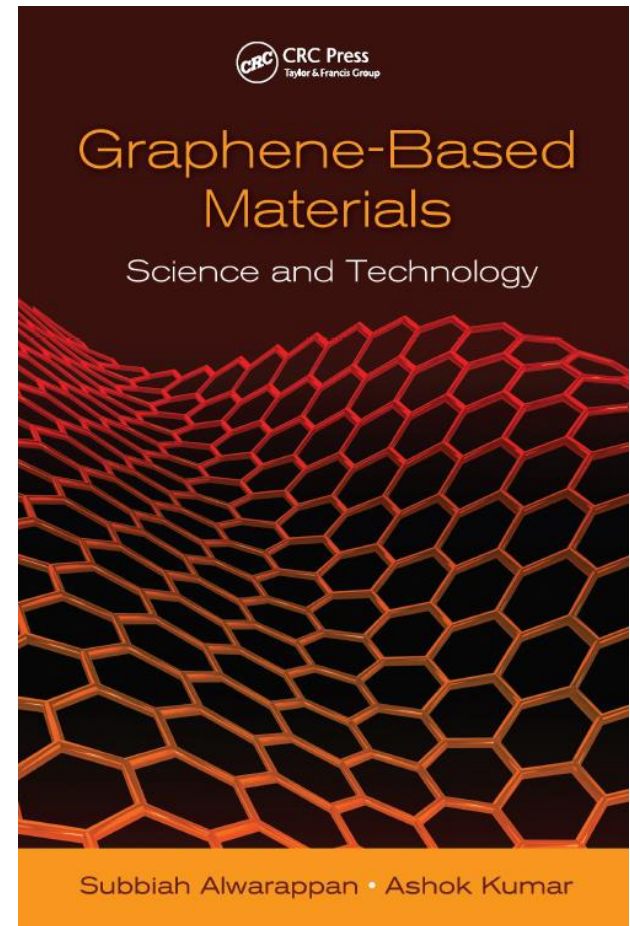
➤ Textbook:

● Subbiah Alwarappan, Ashok Kumar

*Graphene-Based Materials Science and Technology:
Science and Technology*

CRC PressTaylor & Francis Group, 2014

Lecture notes



References

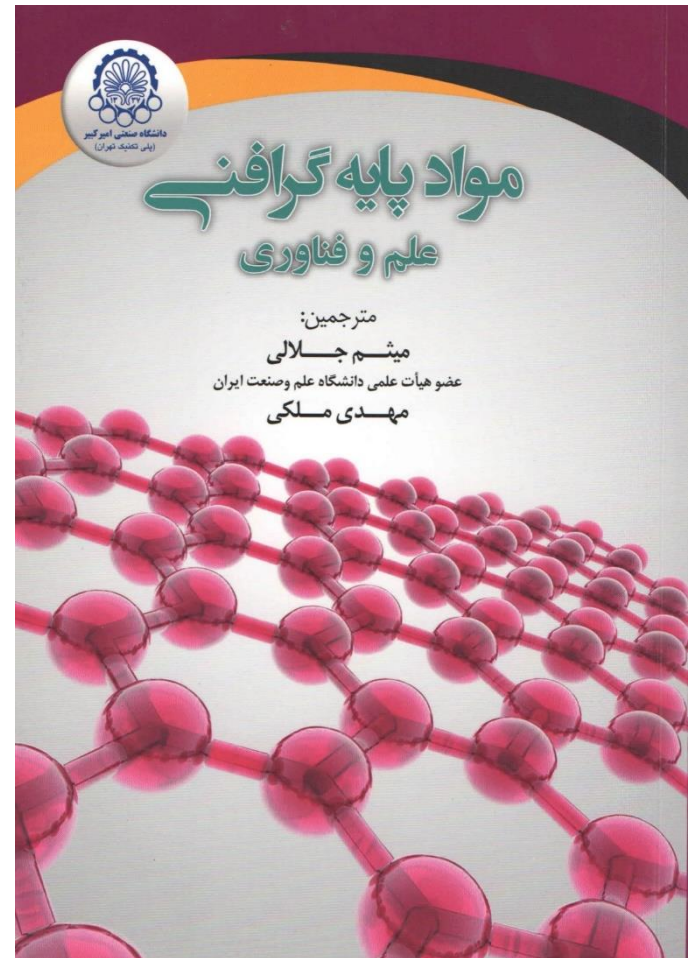
□ مرجع اصلی

❖ مواد پایه گرافنی: علم و فناوری

مترجمین: میثم جلالی، مهدی ملکی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک
تهران)

چاپ اول، ۱۳۹۵



Contents:(1)

1 Graphene: An Introduction.....	1
1.1 Graphene: History and Background.....	1
1.2 Graphene Properties.....	4
1.2.1 Electrical Transport Property.....	5
1.2.2 Quantum Hall Effect.....	14
1.2.3 Optical Properties.....	15
1.2.4 Mechanical Properties.....	19
1.2.5 Thermal Properties.....	20
2 Graphene Synthesis.....	31
2.1 Introduction.....	31
2.2 Mechanical Exfoliation.....	31
2.3 Alternatives to Mechanical Exfoliation.....	34
2.3.1 Chemical Method.....	36
2.3.2 Total Organic Synthesis.....	37
2.3.3 Depositions.....	39
2.3.3.1 Overview.....	39
2.3.3.2 Chemical Vapor Deposition.....	41
2.3.3.3 Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition.....	44
2.3.4 Thermal Decomposition.....	45
2.3.5 Thermal Decomposition on Other Substrates.....	46
2.3.6 Unzipping Multiwall Carbon Nanotubes.....	47
2.3.7 Electrochemical Synthesis.....	48
2.3.8 Other Available Methods.....	51
References.....	52

Contents:(2)

3 Surface Characterization of Graphene.....59

3.1 Graphene Characterization.....	59
3.1.1 Optical Imaging of Graphene Layers.....	59
3.1.2 Fluorescence Quenching Technique.....	60
3.1.3 Atomic Force Microscopy.....	62
3.1.4 Transmission Electron Microscopy.....	63
3.1.5 Raman Spectroscopy.....	68
3.1.6 Electrochemical Characterization.....	70

4 Graphene-Based Materials in Gas Sensors.....77

4.1 Graphene-Based Materials as Gas Sensors.....	77
4.1.1 Improving Graphene's Gas Sensing by the Insertion of Dopants or Defects.....	85
4.1.1.1 CO on Graphene.....	88
4.1.1.2 NO on Graphene.....	91
4.1.1.3 NO ₂ on Graphene.....	92
4.1.1.4 NH ₃ on Graphene.....	93
4.1.2 Density of States of the Molecule–Graphene System.....	95
4.1.3 The I–V Curves of Molecules on Graphene.....	97
4.1.4 Concerns for Practical Application.....	99
4.2 Graphene as a Membrane for Gas Separation.....	100
References.....	114

Contents:(3)

5 Graphene-Based Materials in Biosensing and Energy Storage Applications.....119

5.1 Electrochemical Biosensors Based on Graphene....	119
5.1.1 Graphene-Based Enzymatic Biosensors.....	119
5.1.2 Graphene-DNA Biosensors.....	121
5.1.3 Graphene Sensors for Heavy Metal Ion Detection.....	123
5.1.4 Graphene for the Rapid Sequencing of DNA Molecules.....	124
5.2 Graphene for Energy Storage Applications.....	132
5.2.1 Transparent Electrodes.....	141
5.2.2 Ultracapacitors.....	141
5.2.3 N-Doped Graphene.....	141

6 Graphene-Based Materials for Photonic and Optoelectronic Applications.....159

6.1 Introduction.....	159
6.2 Linear Optical Absorption.....	162
6.3 Saturable Absorption.....	164
6.4 Luminescence.....	165
6.5 Transparent Conductors.....	167
6.6 Photovoltaic Devices.....	168
6.7 Light-Emitting Devices.....	170
6.8 Photodetectors.....	172
6.9 Touch Screens.....	173
6.10 Flexible Smart Windows and Bistable Displays.....	175
6.11 Saturable Absorbers and Ultrafast Lasers.....	176
6.12 Optical Limiters.....	181
6.13 Optical Frequency Converters.....	181
6.14 Terahertz Devices.....	182

مقدمه ای بر گرافن (Graphene)

- ❖ گرافن باریک ترین ماده ای است که می توان تصور کرد. ضخامت آن تنها یک اتم است.
- ❖ گرافن، تک لایه ای از اتم های کربن با پیوند sp^2 در یک شبکه لانه زنبوری است.
- ❖ گرافن از شکل های کربن است و به عنوان یکی از آلوتروپ های کربن شناخته می شود.
- ❖ آلوتروپ ها ساختارهای متفاوتی از یک عنصر مشابه هستند که در آنها اتم های مشابه به شکل های متفاوتی کنار هم قرار می گیرند.
- ❖ گرافن به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانندگی الکتریکی و گرمایی، چگالی بالا و تحرک پذیری حامل های بار، رسانندگی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده ای منحصر بفرد تبدیل شده است.
- ❖ این ماده جدید بواسطه خواص فوق العاده اش بعنوان کاندیدای بسیار مناسبی در نسل بعدی افزاره های فوتونی و الکترونی در نظر گرفته شده است.

۱-۱- گرافن: تاریخچه و پیش زمینه

- امکان وجود گرافن با آلوترایی دوبعدی کربن از لحاظ نظری ۶۰ سال است که مطالعه شده است.
- اغلب، واژه **گرافن** برای توصیف خواص آلوترایی های کربن اسفاده میشود. اما پس از چهار دهه مشخص شده است که گرافن همچنین یک ماده چگال عالی با خواص الکتروودینامیک کوانتومی ۲+۱ بعدی را در اختیار می گذارد که گرافن را به سمت مدل نظری "**اسباب بازی**" سوق میدهد.
- انتظار این بود که **گرافن** به دلیل تشکیل ساختارهای **انحنادار** همچون دوده، **فولرین ها** (Fullerene)، و **نانولوله ها** (nanotubes)، ناپایدار باشد. در ضمن، عقیده بر این بود که گرافن در حالت آزاد وجود نخواهد داشت.
- در سال ۲۰۰۴ برخلاف انتظار، زمانی که گرافن خودایستا (freestanding) توسط **گیم و نووسلوف** کشف شد، پیش بینی **وجود گرافن** محقق شد.
- در سال ۲۰۱۰ ، **گیم و نووسلوف** برای کشف گرافن، **جایزه نوبل فیزیک** را از آن خود کردند.

۱-۱- گرافن: تاریخچه و پیش زمینه (۲)

□ یک صفحه اتمی منفرد از گرافن به عنوان یک بلور دوبعدی لحاظ میشود،

□ در حالیکه گرافن بیش از ۱۰۰ لایه معمولاً لایه نازکی از یک ماده سه بعدی محسوب میشود.

□ چه تعداد لایه از این ماده، را یک ساختار سه بعدی میکنند؟

در گرافن مشخص شده است ساختار الکترونی به سرعت با تعداد لایه ها دگرگون میشود و در دقیقا ۱۰ لایه، به حد سه بعدی گرافیت نزدیک میشود.

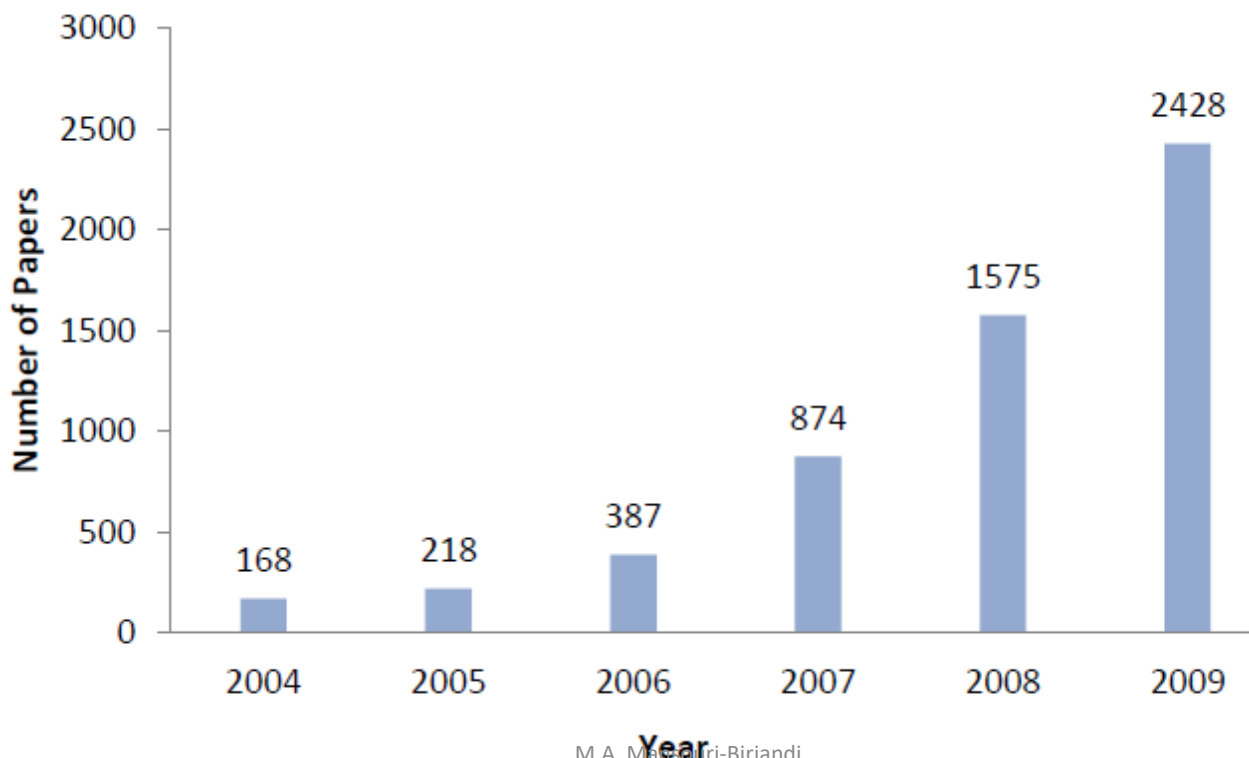
□ گرافن تک لایه (Single-layer graphene (SLG)، و گرافن دولایه طیف الکترونی ساده ای دارند؛ هر دو نیمه رسانایی هایی با شکاف نوار صفر (نیمه فلزهای فاقد همپوشانی نیز گفته میشوند) با یک نوع الکترون و یک نوع حفره میباشد.

□ طیف گرافنی حاوی سه یا بیشتر لایه بسیار پیچیده می شود. ولی میتوان SLG و گرافن دو یا چند لایه (کمتر از ۱۰) را به عنوان انواع متفاوتی از بلورهای دوبعدی (گرافن ها) متمایز کرد.

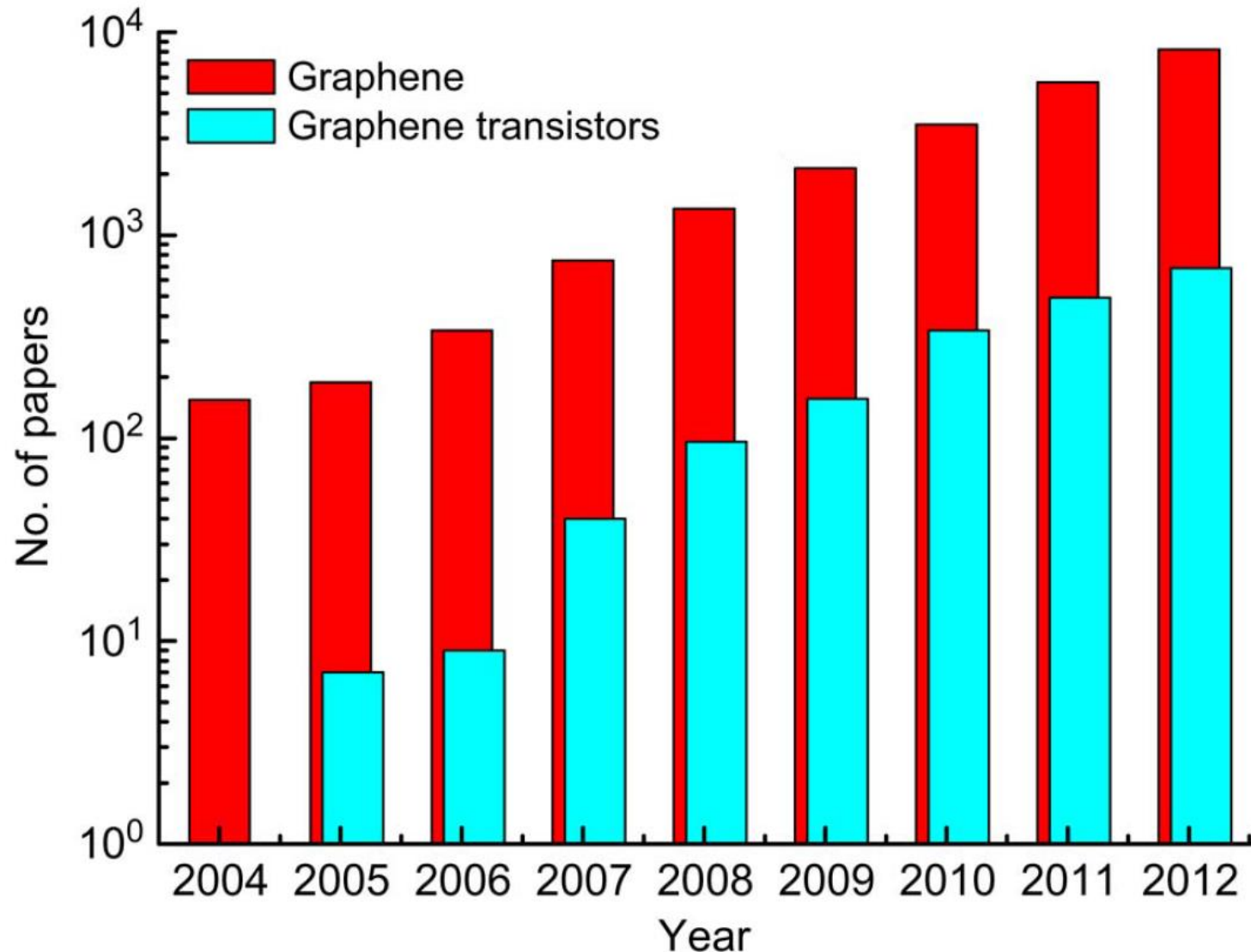
گرافن: تاریخچه و پیش زمینه (۳)

❖ در سال ۲۰۰۴، آندره جیم (Andre Geim) در دانشگاه منچستر، و همکاران روسی خود توانست **گرافن** را از گرافیت به **روش مکانیکی** جدا کند.

❖ در زمان کوتاهی شاخه جدیدی از تحقیقات بنام مطالعه ساختارهایی **بر پایه گرافن** شروع بکار کرد.



رشد تحقیقات بر روی گرافن



خواص متمایز گرافن

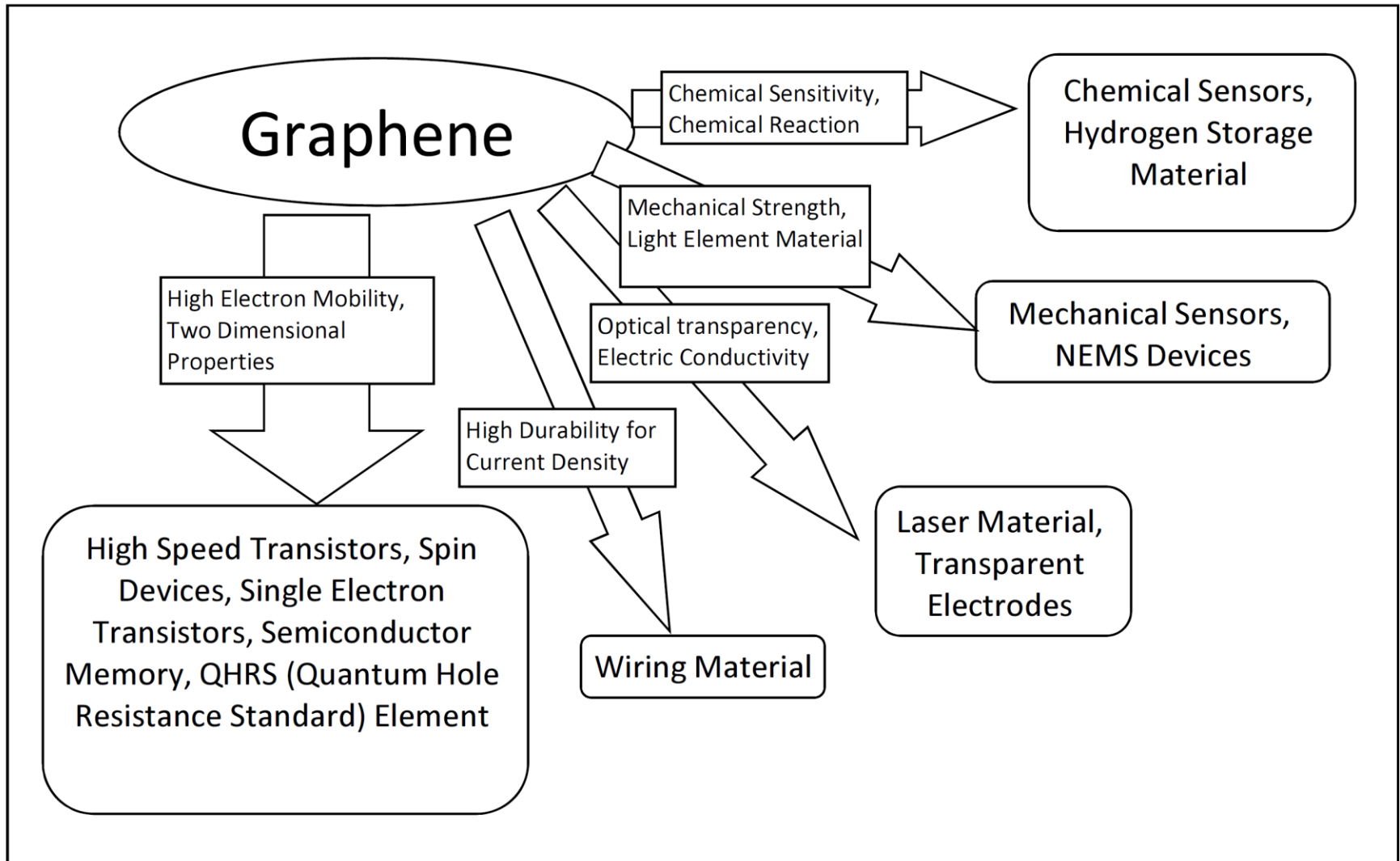


Figure 2 : Distinctive Properties of Graphene and Possible Application Fields

ساختارهای مختلف گرافن

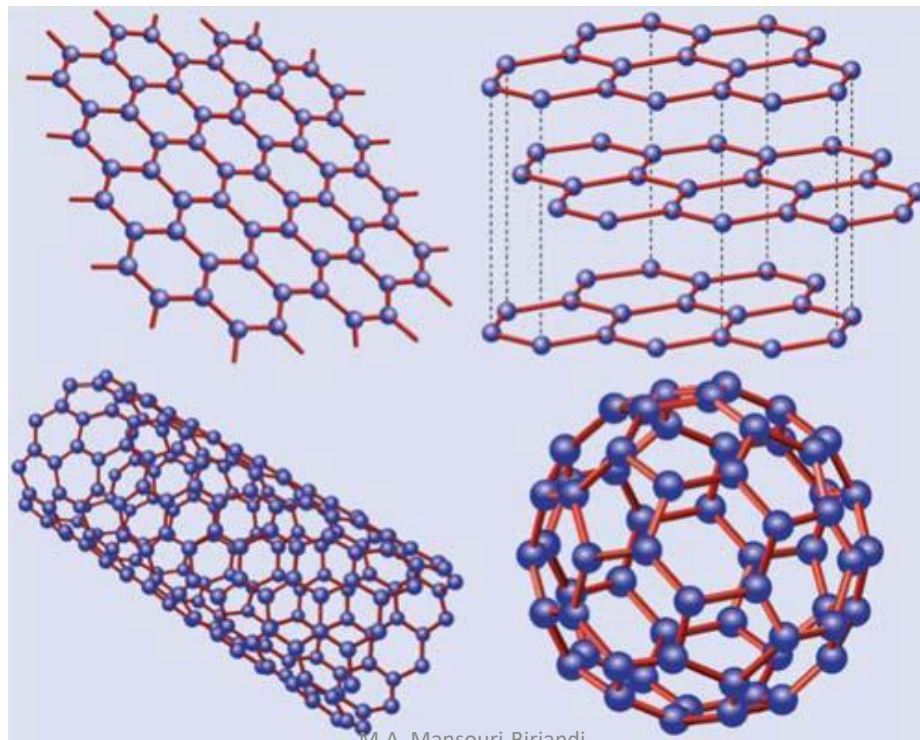
- **گرافن** یک ورقه **دوبعدی** از اتم های کربن در یک پیکر بندی **شش ضلعی** (لانه زنبوری) می باشد.
- در حقیقت این ماده یک صفحه به ضخامت **یک اتم** با پیوند **SP²** از اتم های کربن است.
- نام گرافن از ترکیب **“Graphite+ene”** تشکیل شده است.
- **گرافن** شامل صفحات دو بعدی از اتم های کربن است که روی هم قرار گرفته اند و توسط نیروی **ضعیف واندروالسی** با هم پیوند دارند.
- کلمه **ene** در شیمی آلی به ترکیبات کربنی گفته می شود که در آن کربن دارای یک **پیوند دو گانه** است. **(-C=C-)**
- طول پیوند کربن-کربن در گرافن حدود ۱/۴۲ آنگستروم است.

ساختارهای مختلف گرافن

➤ چندین شکل (آلوتروپ) از کربن در طبیعت وجود دارد که شناخته شده ترین آنها عبارتند از:

گرافیت، الماس، فولرن ها و نانولوله های کربنی

➤ گرافن بعنوان ساختار پایه ای برای کل ترکیبات برپایه کربن مطرح می شود.



ساختارهای مختلف گرافن

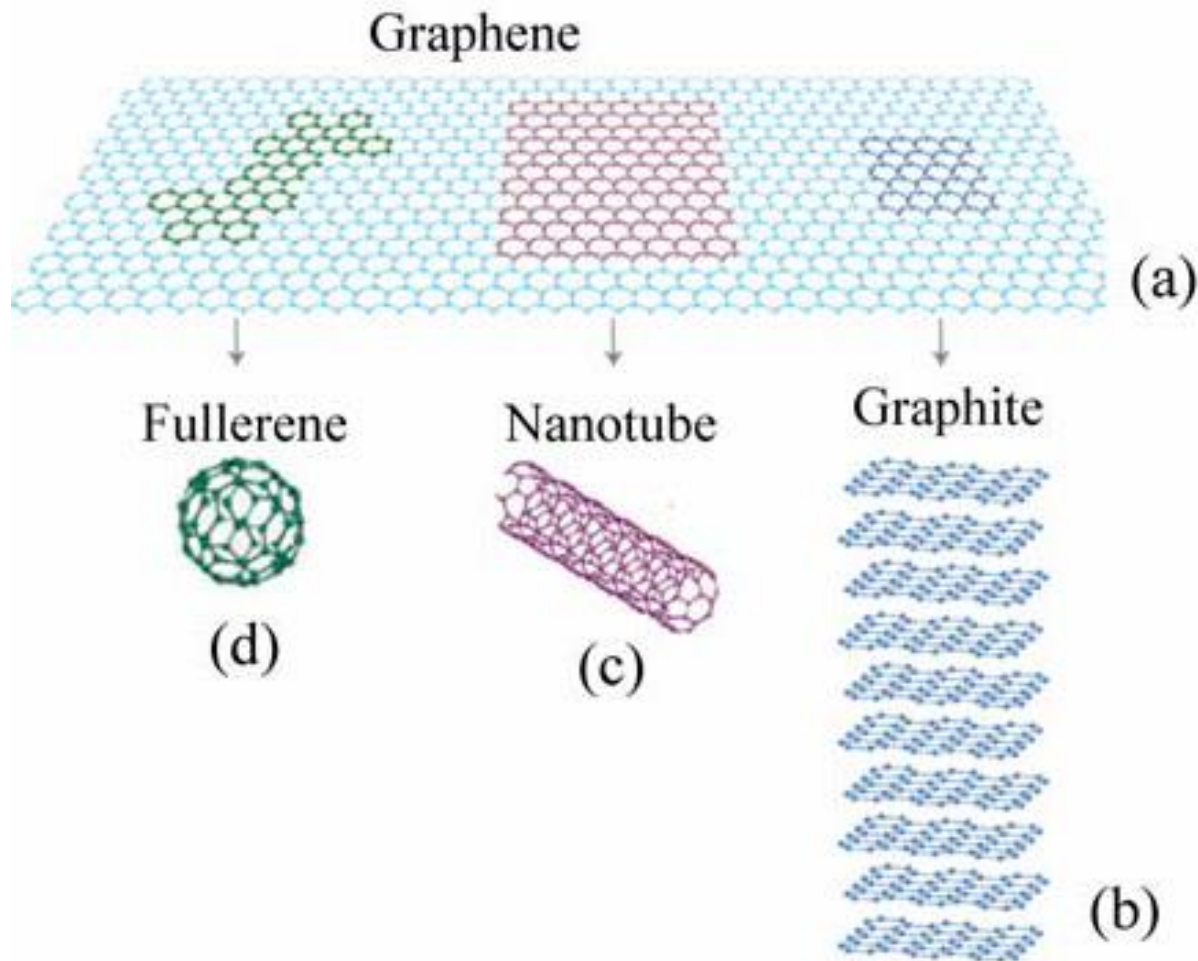
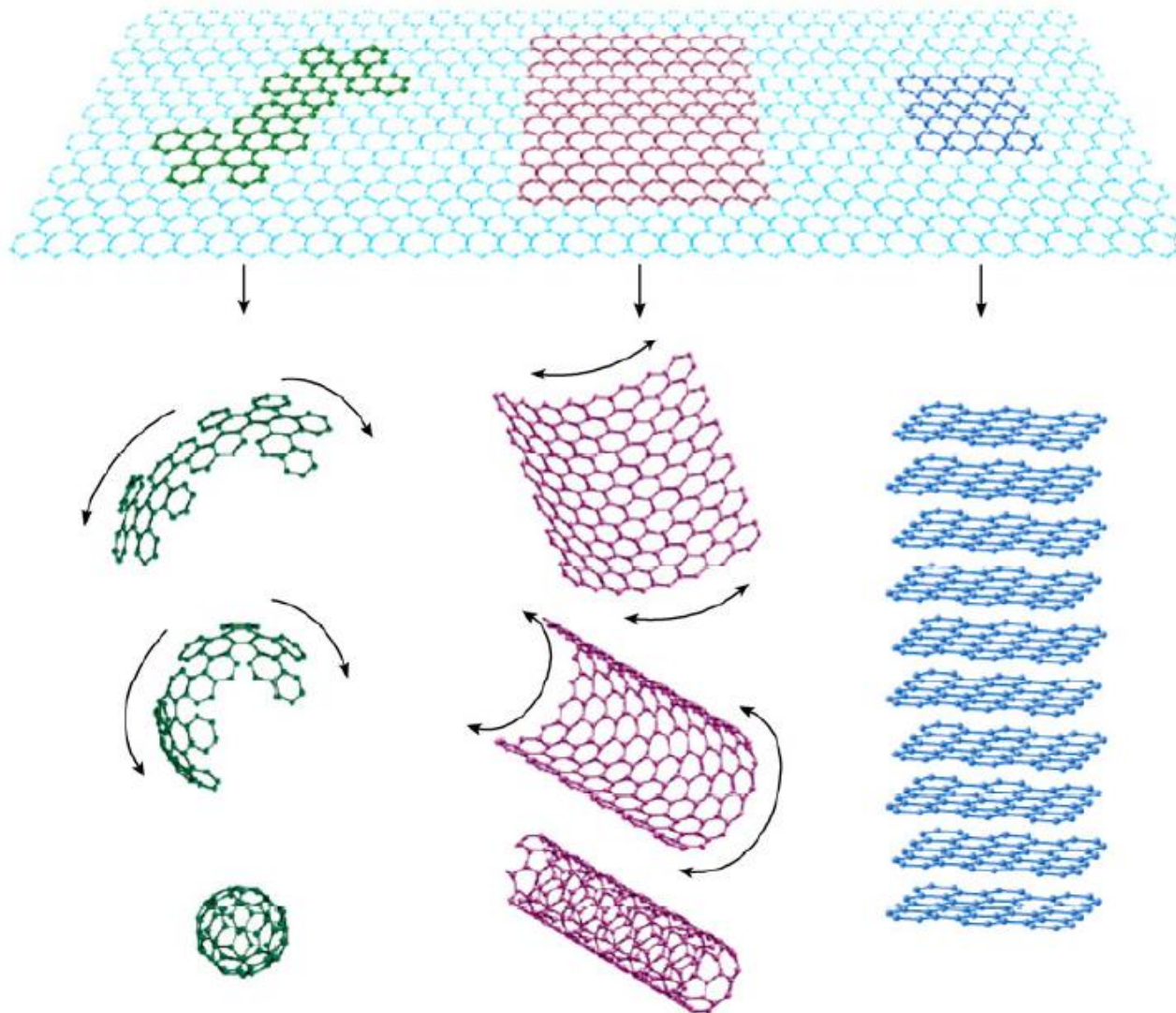


Figure 1.1 Scheme showing graphene can be wrapped to 0D fullerenes, wrapped to form 1D carbon nanotubes (CNTs), or stacked to form 3D graphite.

ساختارهای مختلف گرافن



خصوصیات فیزیکی گرافن

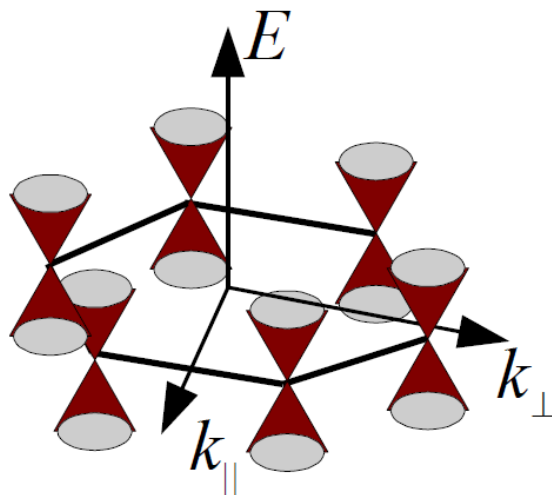
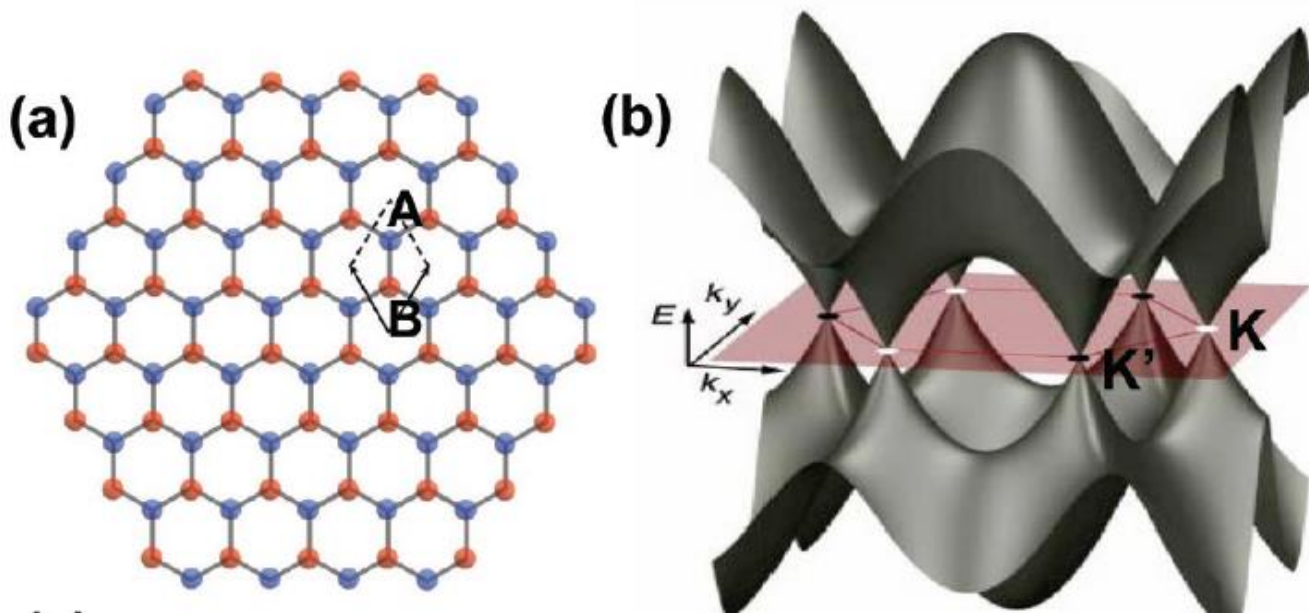
خصوصیات فیزیکی گرافن در دمای اتاق

0.142 nm	طول پیوند کربن-کربن
$10^{-6} \Omega \text{cm}$	مقاومت ویژه
10^{13} cm^2	چگالی حامل های بار
$2.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{v.s}$	تحرک پذیری الکترون ها
0.5 Tpa	مدول یانگ
5000 W/mk	رسانایی حرارتی
0.77 mg/m ²	وزن گرافن

ویژگی گرافن

- گرافن یک نیمه هادی دارای گاف انرژی صفر یعنی یک شبه فلز است.
- رابطه انرژی بر حسب بردار موج در شش گوشه از ناحیه بریلوین یک رابطه خطی است که این بدان معنی است که جرم موثر الکترون ها و حفره ها در نزدیکی این نقاط صفر است.
- در واقع در نزدیکی این شش نقطه، الکترون ها و حفره ها رفتاری شبیه ذرات نسبیتی دارند که توسط معادله دیراک برای ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ توصیف می شوند.
- به همین دلیل الکترون ها و حفره ها در چنین ساختاری فرمیون های دیراک و شش گوشه ناحیه بریلوین را نقاط دیراک نامیده می شود.

ویژگی گرافن



ویژگی گرافن

➤ رابطه انرژی و بردار موج برای گرافن بصورت زیر خواهد بود:

$$E = v_F \hbar k$$

➤ این رابطه بیانگر آن است که با ذرات بدون جرم نسبیتی مانند فونون سروکار داریم با این تفاوت

که به جای سرعت نور، سرعت فرمی $v_F = c/300$ جایگزین شده است.

➤ در این حالت امکان هدایت بدون پراکندگی یا هدایت بالستیک فراهم می شود.

ساختار نواری گرافن

➤ ترکیب یک الکترون اربیتال $2s$ با n الکترون اربیتال $2p$ ($n=1,2,3$) اربیتال پیوندی sp^n را تشکیل می دهد.

➤ در کربن امکان ایجاد سه نوع اربیتال های پیوندی بین اربیتال های لایه ظرفیت (s,p) وجود دارد که عبارتند از: sp^3 , sp^2 , sp

➤ الکترون های ظرفیت در اربیتال های $2s$, $2p_x$, $2p_y$, $2p_z$ جای می گیرند.

➤ برای داشتن بلور دو بعدی پایدار وجود اربیتالهای پیوندی sp^2 الزامی است.

➤ در این نوع اربیتالهای پیوندی سه پیوند σ بین اربیتال های پیوندی و یک پیوند π بین اربیتال های p_z خواهیم داشت.

➤ انرژی پیوند برای پیوندهای σ خیلی بیشتر از پیوند برای π است. در نتیجه بطور کلی پیوند π خیلی ضعیف تر از σ است.

ساختار نواری گرافن

➤ در یک صفحه ی گرافن هر اتم کربن با سه اتم کربن دیگر پیوند تشکیل می دهد که این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند.

➤ این پیوند ها به پیوندهای σ معروفند و زوایای بین آن ها 120° درجه است.

➤ الکترون چهارم که الکترون ظرفیت است در پیوند کووالانسی شرکت نمی کند.

➤ این الکترون در حالت اربیتال $2P_z$ در جهت عمود بر صفحه گرافن جهت گیری شده است که پیوند رسانش π را شکل می دهد بنابراین یک الکترون بطور آزادانه برای رسانش الکتریکی باقی می ماند.

➤ این الکترون های پرسرعت الکترون های π نامیده می شوند که در بالا و پایین صفحه گرافن قرار دارند.

ساختار نواری گرافن

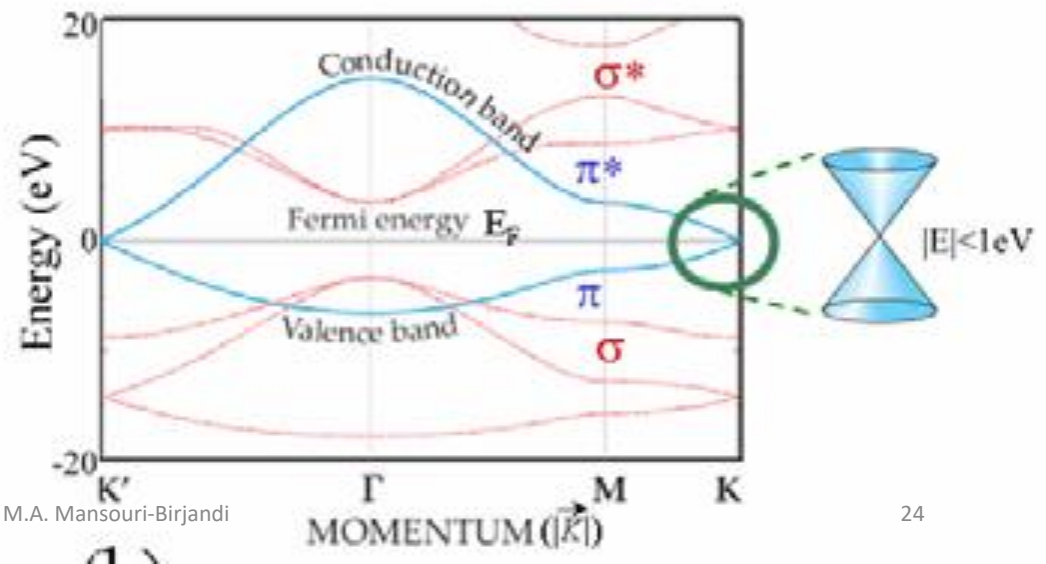
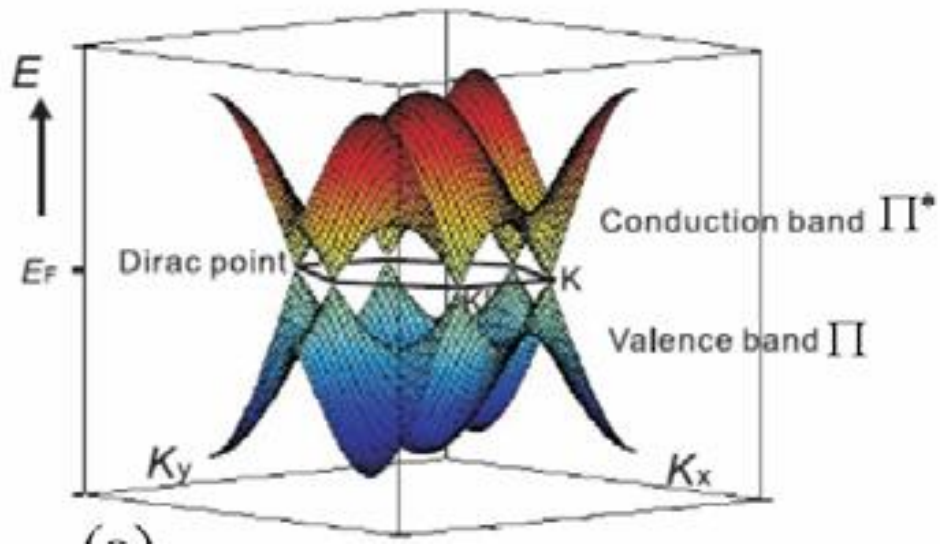
➤ ساختار شبکه گرافن با دو نوع پیوند C-C (π , σ) تعیین می شود.

➤ سه پیوند σ اتم کربن را به سه اتم همسایه اش متصل می کند، که این پیوندها بسیار محکم هستند .

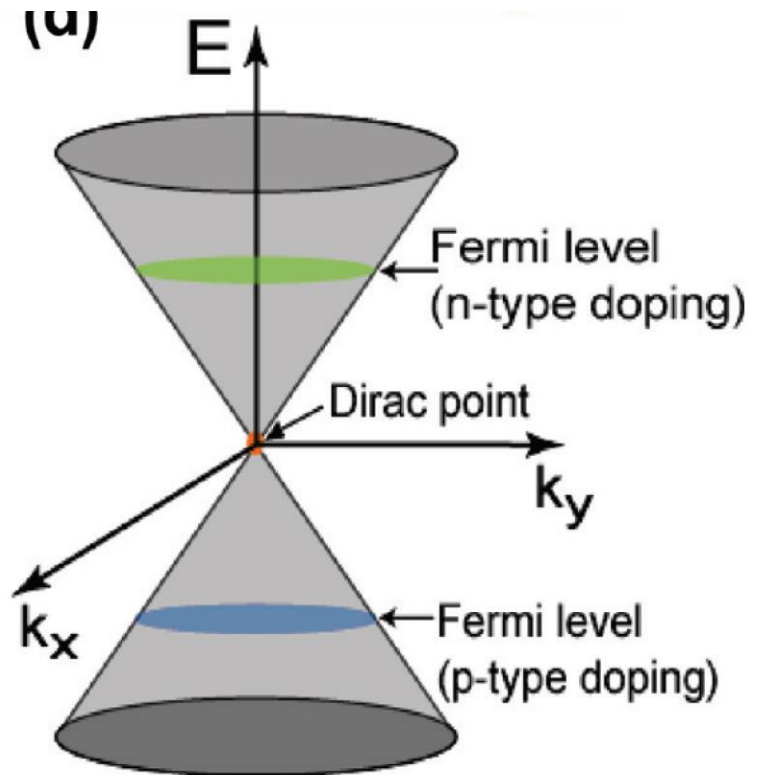
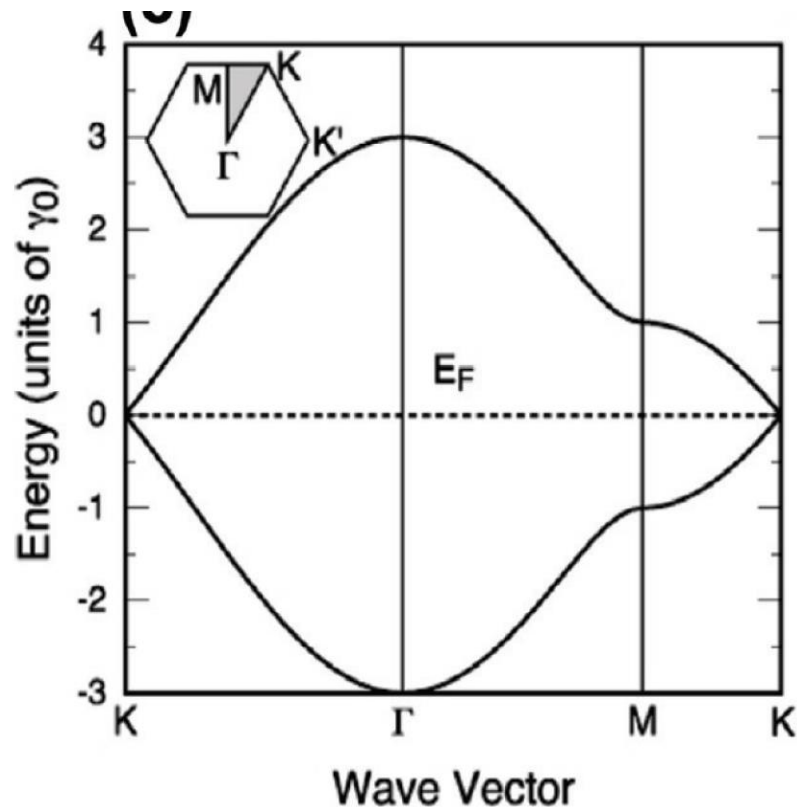
➤ پیوند چهارم به اربیتال p_z وابسته شده است. (پیوند π)

➤ خصوصیات الکتریکی گرافن بوسیله اربیتالهای پیوندی π و ضد پیوندی π^* که به ترتیب نوارهای ظرفیت و رسانش را شکل می دهند، مشخص می شود.

ساختار نواری گرافن



ساختار نواری گرافن



ساختار نواری گرافن

➤ ساختار نواری گرافن با دیگر نیمه رساناهای معمولی در چندین مورد متفاوت است که در زیر آمده است:

۱- در گرافن اطراف نقطه ی که نوار ظرفیت و نوار رسانش در یکدیگر را قطع می کنند شیب ساختار نواری خطی است.

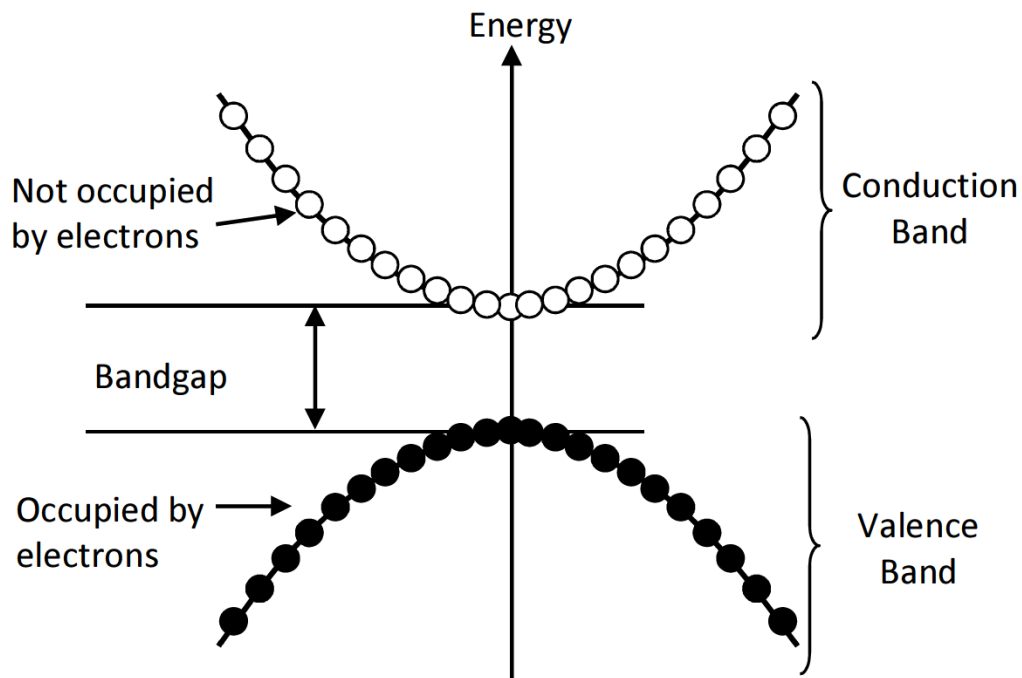
۲- نوار رسانش در گرافن بطور متداول به نوار ظرفیت متصل می شود به این معنی که شکاف نوار انرژی در گرافن صفر است ولی نیمه رساناها دارای شکاف نوار انرژی هستند.

➤ برای یک نیمه رسانای معمولی ساختار نواری در اطراف بالای نوار ظرفیت و پایین نوار رسانش سهمی وار است که شیب آن به تدریج تغییر می کند. با بیشتر شدن شیب جرم موثر الکترون ها کمتر می شود.

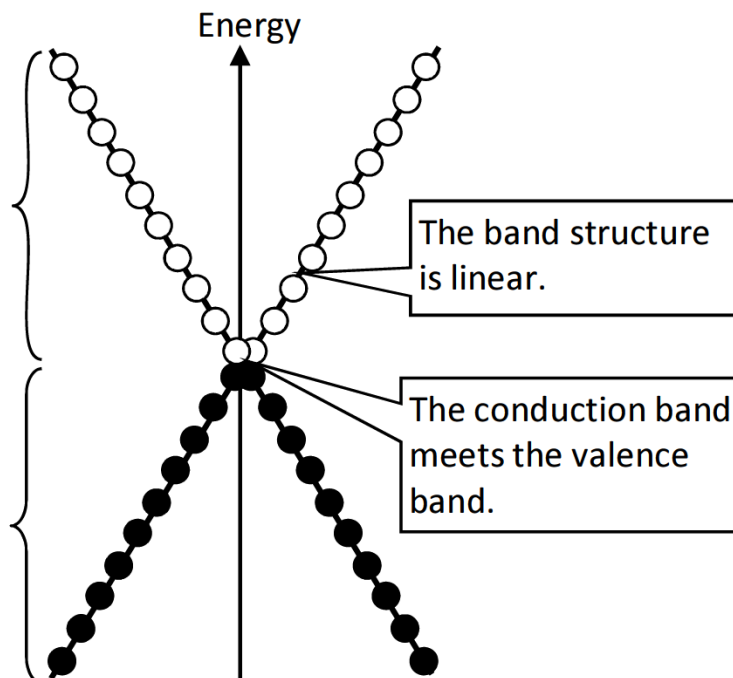
ساختار نواری گرافن

- در گرافن چون شیب خطی است جرم موثر الکترون ها صفر است.
- این به این معنی است که تحرک پذیری الکترون ها در گرافن بالاست.

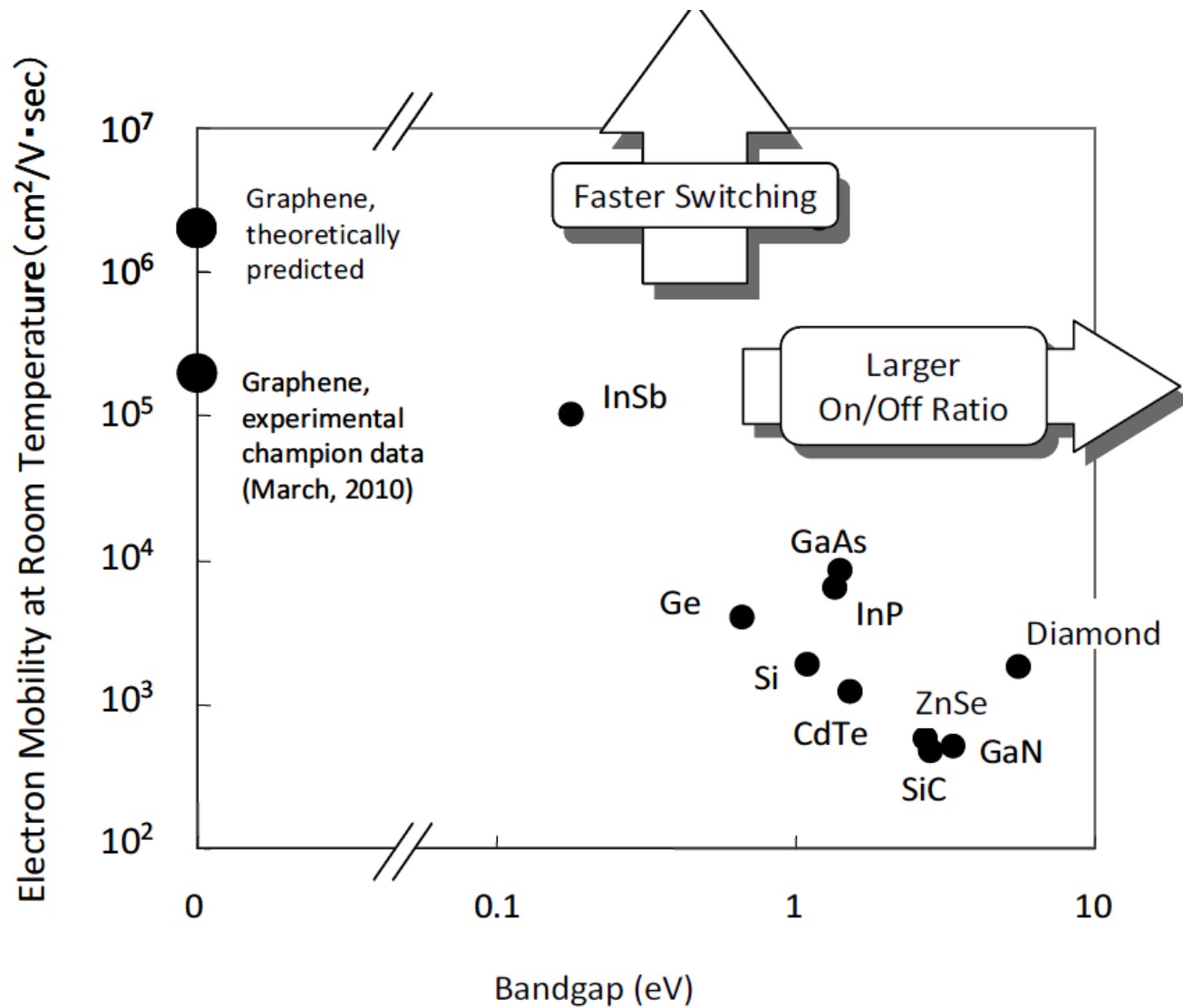
(a) Band Structure of a Typical Semiconductor



(b) Band Structure of Graphene



قابلیت حرکت پذیری در گرافن



مقایسه گرافن با چند نیمه رسانا

ضریب شکست (n_g)	انرژی شکاف نوار $E_g(300k)$ ev	هدایت گرمایی $(Wm^{-1}k^{-1})$	
۲/۶	۰	۵۰۰۰	گرافن
۳/۴۴	۱/۱۱	۱۴۹	سلیسیم (Si)
۳/۴	۱/۴۳	۵۵	گالیم آرسناید (GaAs)

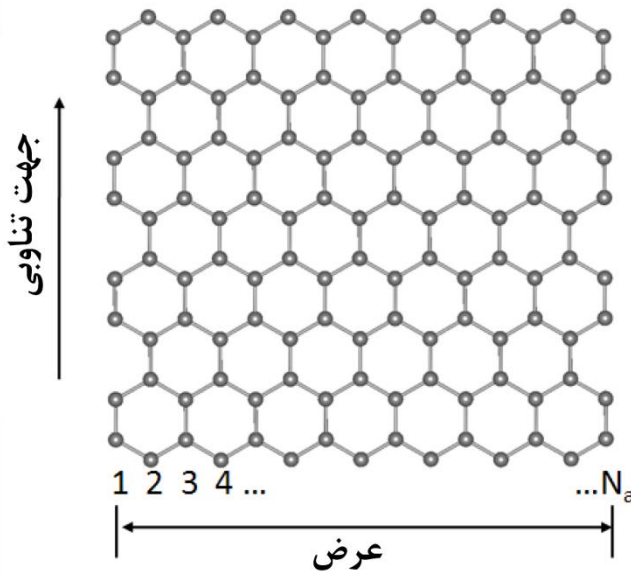
خواص نوری گرافن

- از نظر خواص نوری گرافن تک لایه ۲/۳٪ از نور سفید را مستقل از طول موج نور جذب می کند که این مقدار را با $\pi\alpha$ نمایش می دهند که در آن α ثابت فیزیکی خالص ساختار تعریف می شود.
- در مقایسه با الماس که سخت ترین ماده است گرافن محکم ترین ماده شناخته شده است.
- بطوری که مدول یانگ گرافن 0.5 Tpa است.
- همین خصوصیت ذاتی گرافن را بعنوان ماده مناسبی در ساخت ادواتی از قبیل سنسورهای فشار و رزوناتورهای معرفی می کند.

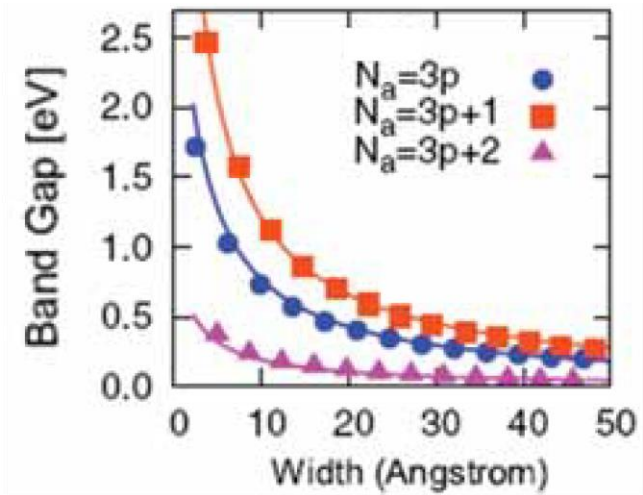
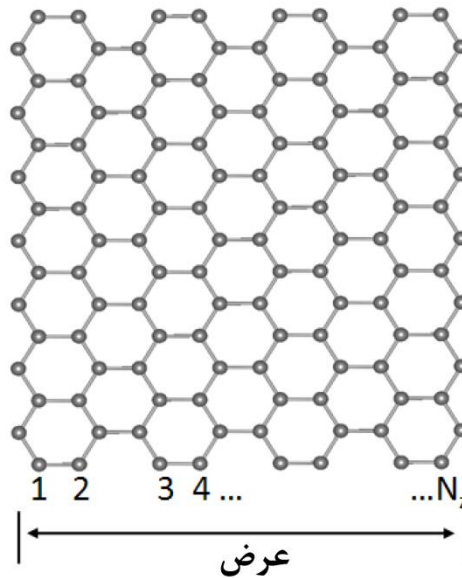
محدود کردن گرافن

- با تبدیل گرافن به نانونوارهای گرافنی می توان الکترون را در یک جهت محدود کرد و سبب باز شدن گاف انرژی در گرافن شد.
- با کاهش عرض صفحه گرافن، گاف انرژی افزایش می یابد.
- در واقع کاهش عرض نانونوارها فاصله مابین نوارهای انرژی را بیشتر می کند پس گاف انرژی افزایش می یابد.

دسته صندلی

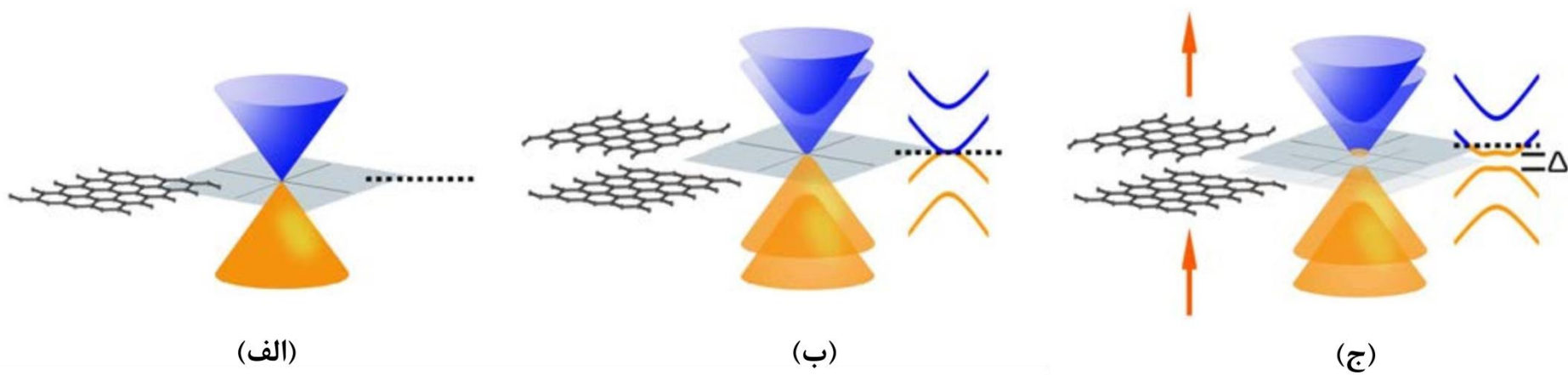


زیگزاگ



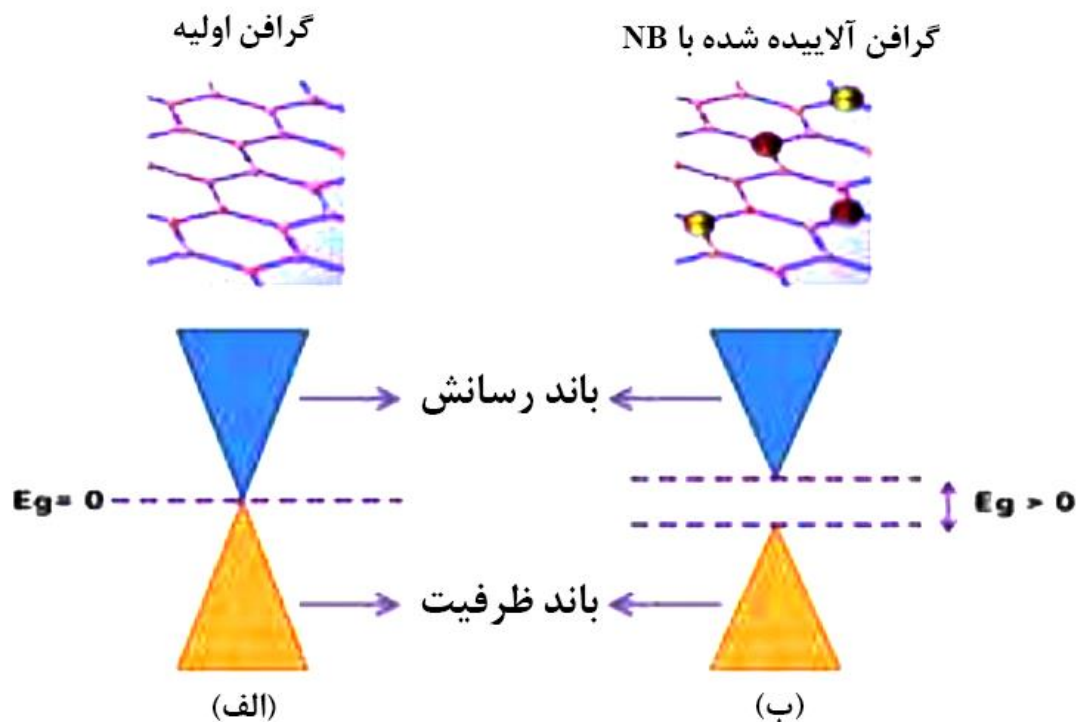
ایجاد گاف انرژی در گرافن (۱)

- در واقع رفتار الکترون‌های دیراک در **گرافن دولایه** وقتی که در معرض یک **پتانسیل تناوبی** خارجی قرار می‌گیرد، تغییر می‌کند.
- که این پتانسیل یک **گاف انرژی** را تولید می‌کند که می‌تواند بوسیله تغییر قدرت پتانسیل خارجی کنترل شود.
- **گاف انرژی** با این روش در حدود 0.3 الکترون‌ولت گزارش شده است.



ایجاد گاف انرژی در گرافن (۲)

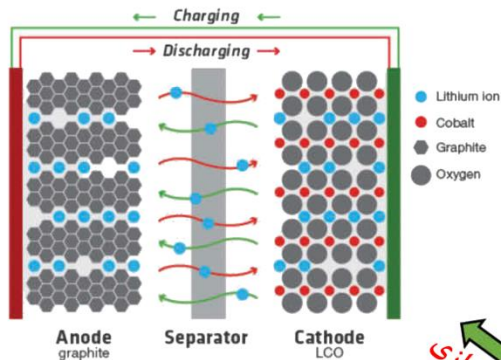
- آرایش شیمیایی می تواند گرافن را به یک نیمه رسانا تبدیل کند و خواص نیمه رسانایی آن را می توان کنترل کرد.
- آرایش شیمیایی گرافن با نیتريد بور (NB) باعث اصلاح ساختار الکترونیکی گرافن می شود.
- گاف انرژی بین نوارهای ظرفیت و رسانش باز می کند



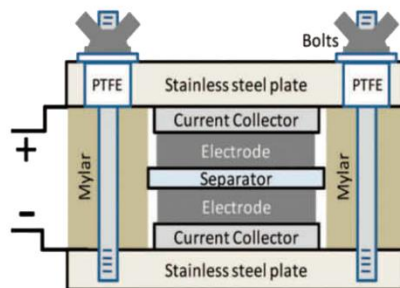
کاربردهای گرافن (۱)



کاربردهای گرافن (۲)

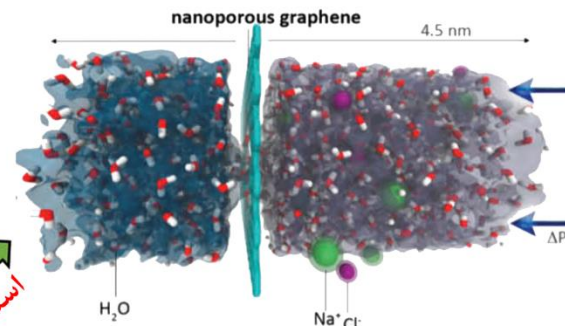


باتری های لیتیوم-یون
قابل شارژ مجدد

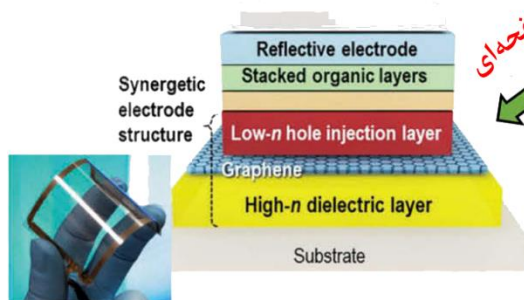


ابر خازن ها

رسانندگی الکتریکی بالا
ناحیه سطحی بزرگ



فیلترهای آبی مبتنی بر گرافن



OLED ها با انعطاف پذیری بالا

ظرفیت ذخیره سازی لیتیومی بالا

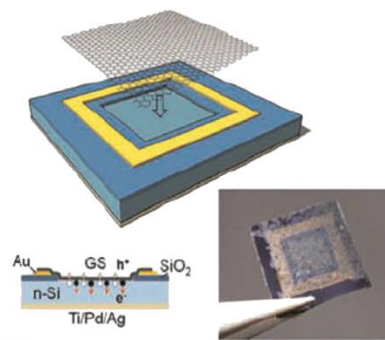
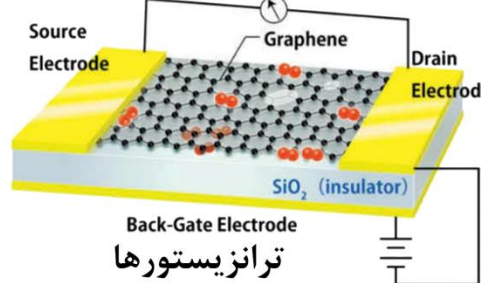
مقاومت صفحه ای کم
شفافیت بالا

استحکام مکانیکی بالا

سد شائستگی



تحرك پذیری
الکترونی بالا



سلول های خورشیدی

رفتار الکترومغناطیسی گرافن

گرافن را به لحاظ الکترومغناطیسی می توان با یک رسانندگی سطحی σ_g مدل کرد.

در رسانندگی گرافن دو **گذار میان-نواری** و **درون-نواری** تاثیر گذارند.

$$\sigma_g = \sigma_{inter} + \sigma_{intra}$$

$$\sigma_{intra} = \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i \tau^{-1}} \left[\frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln \left(\exp \left(-\frac{E_F}{k_B T} \right) + 1 \right) \right]$$

$$\sigma_{inter} \cong \frac{ie^2}{4\pi\hbar^2} \ln \left[\frac{2E_F - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2E_F + \hbar(\omega + i\tau^{-1})} \right]$$

گرافن را بعنوان یک لایه ی بسیار نازک با ضخامت Δ در نظر گرفت که ضریب گذردهی آن برابر:

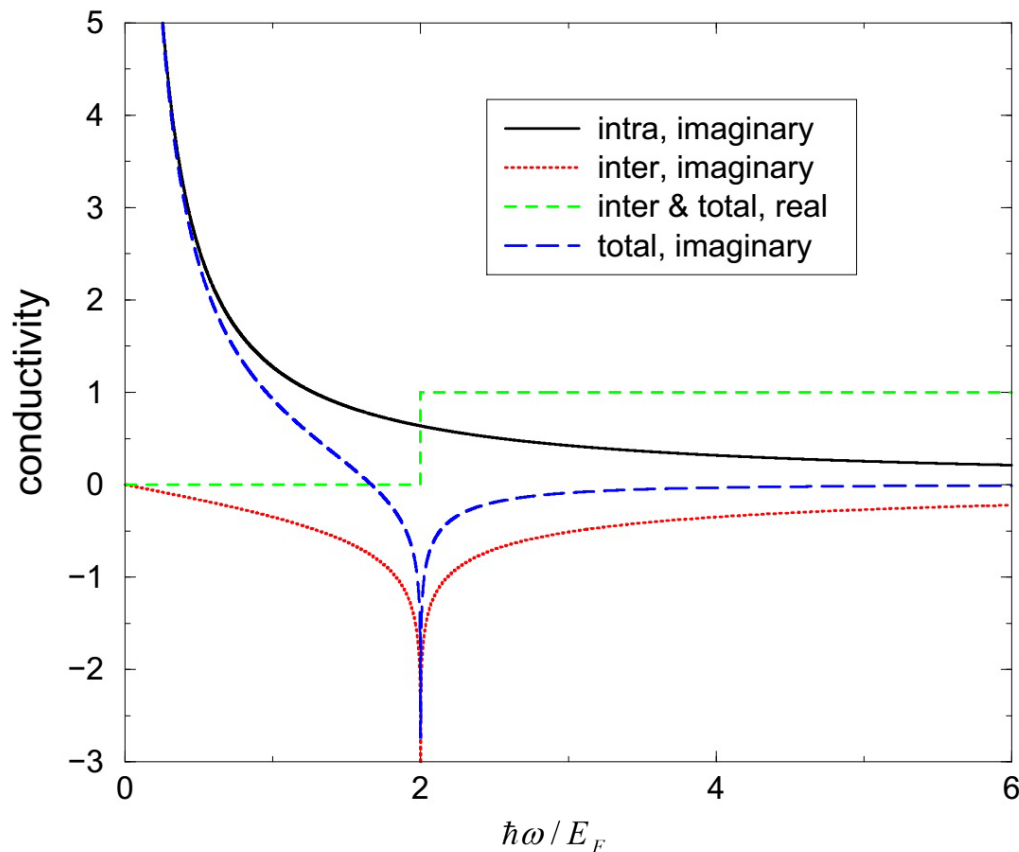
$$\varepsilon_g = 1 + \frac{i \sigma_g}{(\omega \varepsilon_0 \Delta)}$$

ضخامت فیزیکی گرافن که حدود 0.34 نانومتر

رفتار الکترومغناطیسی گرافن

❏ $\ll 2E_F\omega\hbar$ ، در این محدوده رسانندگی بخش حقیقی کوچک و بخش موهومی با مقدار مثبت دارد.

❏ بنابراین در این محدوده گرافن ضریب گذردهی معادل منفی با بخش موهومی کوچک خواهد داشت، یعنی معادل یک لایه‌ی پلاسمونی بسیار نازک خواهد بود.



با فرض $\ll 2E_F\omega\hbar$ و $k_B T \ll E_F$

$$\sigma_g \cong \sigma_{intra} \cong \frac{e^2 E_F}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}$$

روش های ساخت گرافن

روش های تولید گرافن

روش پایین به بالا

روش بالا به پایین

رشد اپیتکسی
(رشد همبافته)

لایه نشانی بخار
شیمیایی

لایه نشانی
الکترواستاتیکی

جدا کردن
مکانیکی

روش های ساخت گرافن

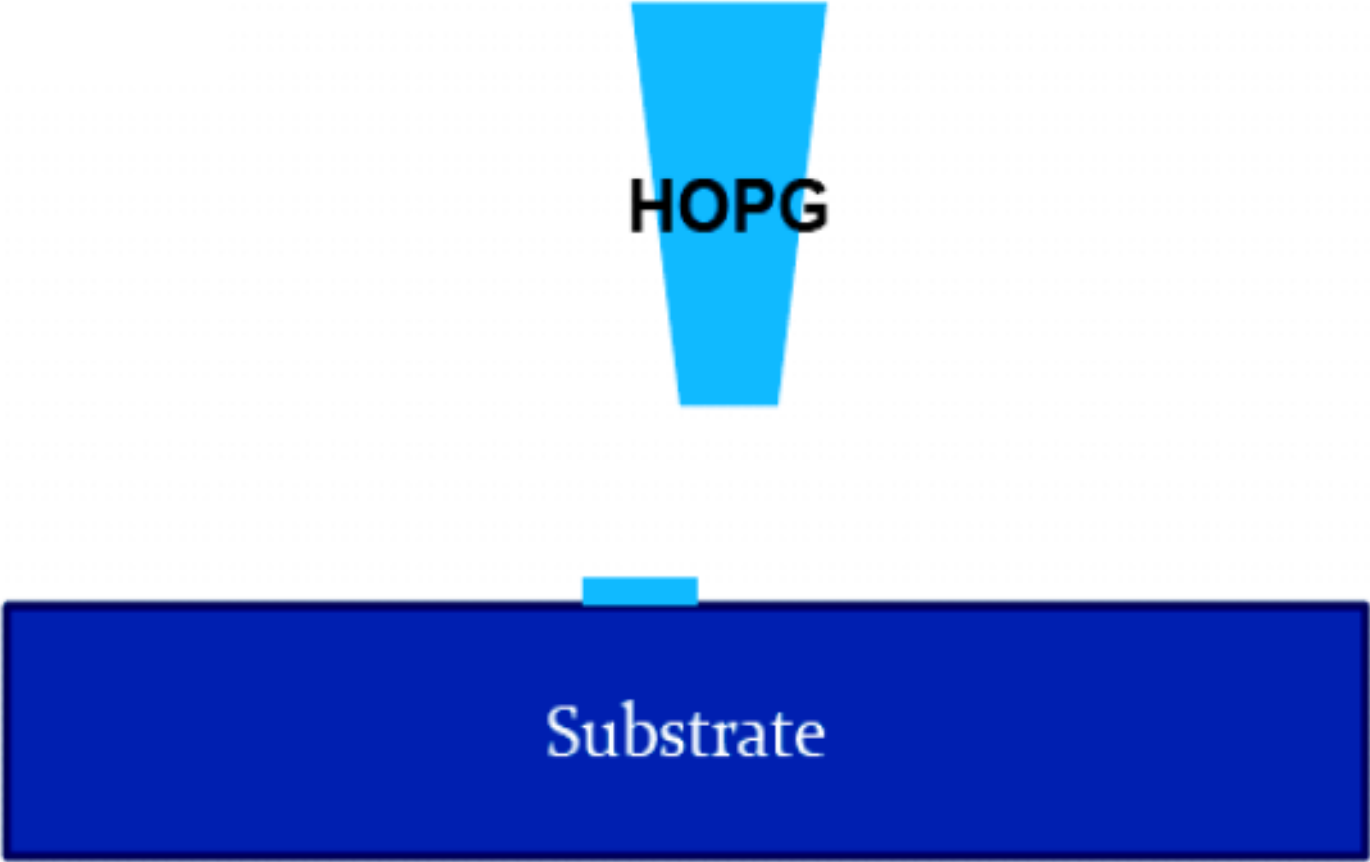
❑ **اولین روش** تولید گرافن توسط نووسلو بکار برده شد که روش **جدا کردن مکانیکی** است.

❑ در این روش یک نمونه گرافیت روی یک زیر لایه کشیده می شود که معمولاً از جنس اکسید سیلیکون است.

❑ این کار سبب می گردد که **یک لایه از گرافن** از گرافیت جدا شده و به زیر لایه بچسبد.

❑ گرافن های بدست آمده از این روش دارای کیفیت بالایی هستند و بنابراین دارای **موبیلهیتی بالاتری** هم هستند.

روش های ساخت گرافن



A diagram illustrating the structure of HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) on a substrate. A blue trapezoidal shape, representing the HOPG layer, is positioned above a dark blue rectangular block representing the substrate. The text 'HOPG' is centered within the blue shape. A small blue rectangular block is positioned between the HOPG layer and the substrate, indicating a thin layer or interface.

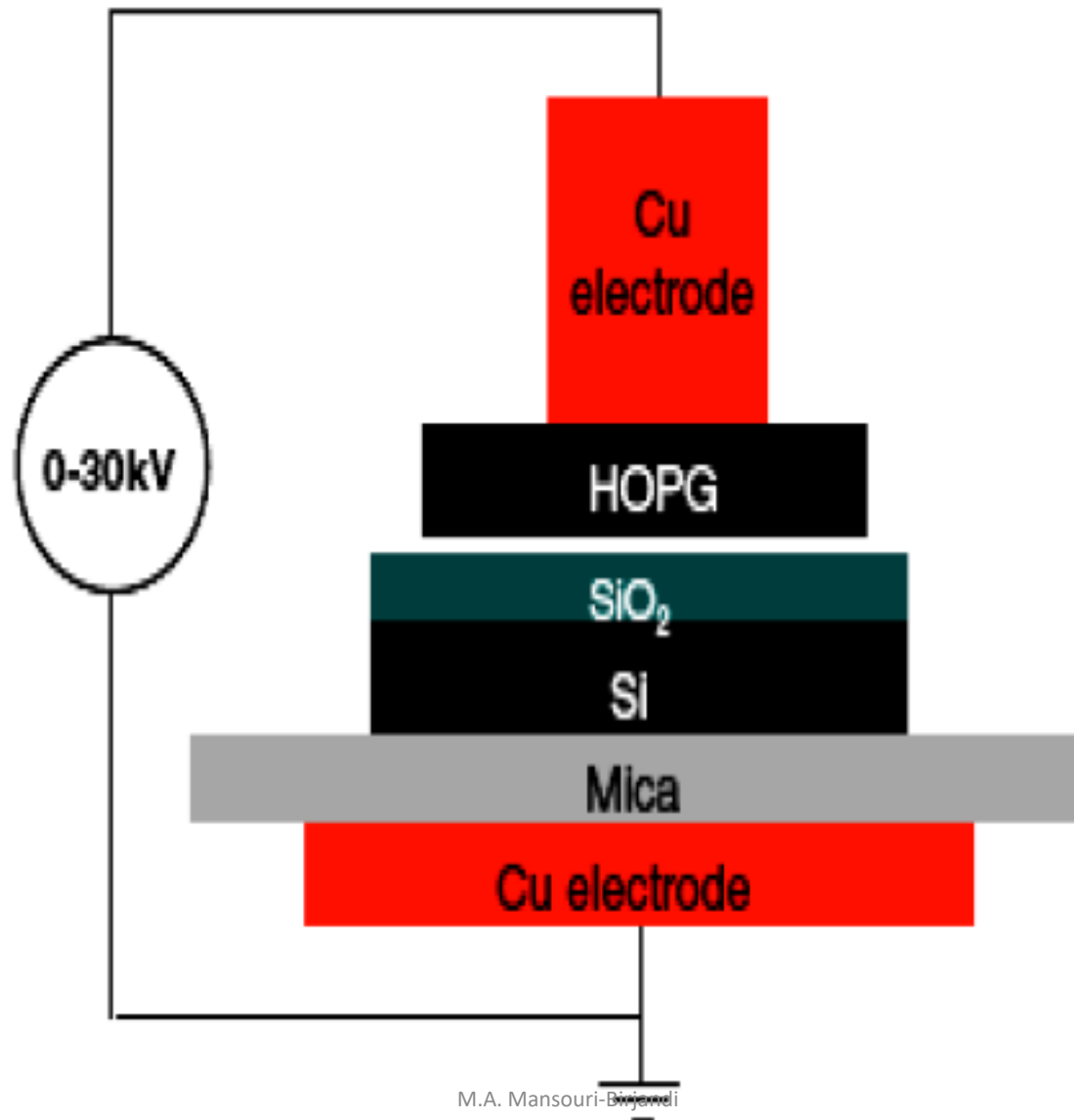
HOPG

Substrate

روش های ساخت گرافن

- **روش دوم** در تولید گرافن روش لایه نشانی **الکترواستاتیکی** است.
- این روش مشابه به روش اول است با این تفاوت که این بار بجای استفاده از مالش مکانیکی از یک میدان الکتریکی خیلی قوی استفاده می کنند.
- این میدان قوی سبب می شود که یک لایه گرافن از گرافیت جدا شده و به زیر لایه بچسبد.
- کنترل میدان برای تولید یک تک لایه گرافن در این روش خیلی سخت است که سبب می شود این روش برای تولید گرافن **خیلی سخت** باشد.
- زیرا تولید یک تک لایه نیاز به دقیق بودن مقدار ولتاژ و فاصله ی بین دو الکترود دارد. اگر فاصله مقداری کم گردد دو لایه یا بیشتر جدا می گردد.
- اگر ولتاژ مقداری زیاد گردد به جای گرافن تک لایه گرافن **چند لایه** ایجاد می شود.

روش های ساخت گرافن



روش های ساخت گرافن

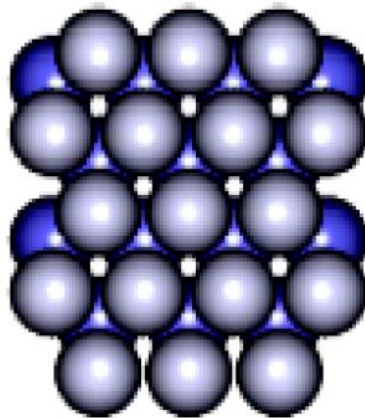
- ❖ **روش سوم** روش رشد اپیتکسی گرافن روی سیلیکون کاربید (SiC) می باشد.
- ❖ در این روش سیلیکون کاربید رشد داده شده در جهت (۱۱۱) را حرارت می دهیم.
- ❖ اتم های سیلیکون از سطح خارج می شوند و یک لایه اتم کربن روی سطح باقی می ماند که تشکیل گرافن می دهد.
- ❖ در اصل دو لایه کربن روی هم قرار دارد که لایه ی زیرین متعلق به خود **سیلیکون کاربید** است و لایه ی بالایی شبیه به یک لایه گرافن عمل می کند.
- ❖ گرافن های ساخته شده با این روش دارای **موبیلیتی خوبی** می باشند.

روش های ساخت گرافن

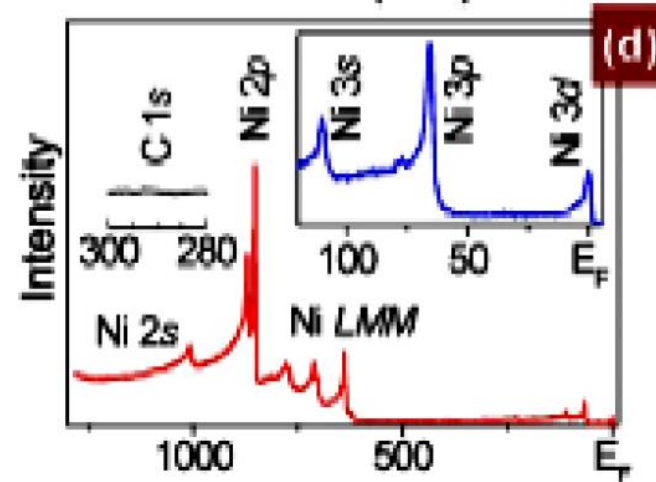
- ☐ روش چهارم در ساخت گرافن روش لایه نشانی بخار شیمیایی (CVD) است.
- ☐ برای تولید گرافن با این روش یک لایه از تنگستن را رد جهت (۰۱۱) به عنوان لایه نگهدارنده رشد داده می شود.
- ☐ سپس یک لایه از کروم یا مس به عنوان زیر لایه در جهت (۱۱۱) رشد داده می شود.
- ☐ با عبور یک گاز هیدروکربن بروی آن پیوند مابین اتم های هیدروژن و اتم های کربن شکسته می شود.
- ☐ اتم های کربن روی سطح زیری می نشینند و تشکیل لایه گرافن می دهند.
- ☐ گرافن های تولید شده با این روش نقص های بیشتری دارند بنابراین **موبیلهیتی کمتری** هم دارند.
- ☐ اما مزیت عمده این روش تولید گرافن در مقادیر بالا است که در صنعت از محبوبیت بالایی برخوردار است.

روش های ساخت گرافن

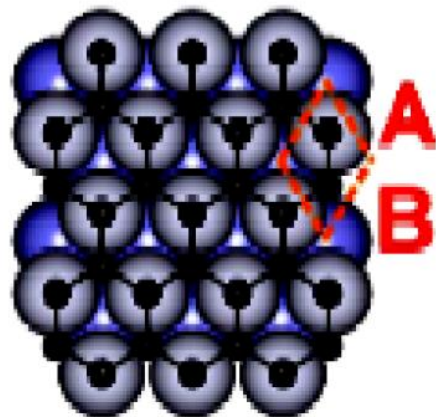
(a)



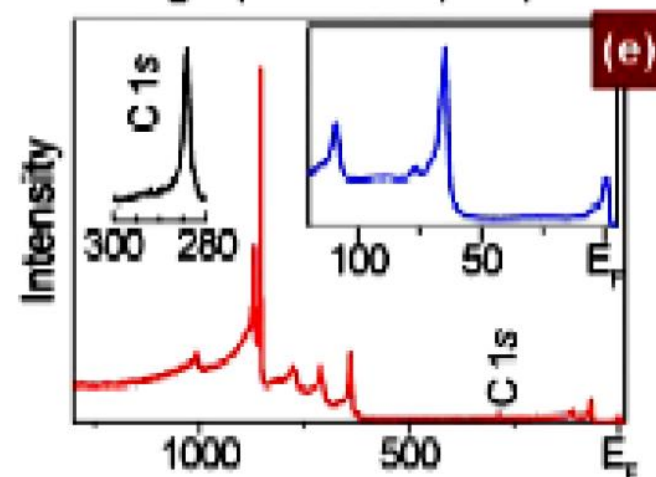
clean Ni(111)



(b)



graphene/Ni(111)



بکار گیری گرافن

□ گرافن به خاطر **موبیلیتی بالا** و **ساختار دو بعدیش** برای کاربردهای در الکترونیک بسیار مناسب می باشد.

□ اما همانطور که بیان شد گرافن ماده ای با **گاف انرژی صفر** می باشد. به این معنی است که گرافن نمی تواند رسانایی الکتریکی را متوقف کند پس نمی توان از آن بعنوان سوئیچ در کاربردهای الکترونیکی استفاده کرد.

□ بنابراین برای استفاده از گرافن در صنایع الکترونیک نیاز داریم در آن گاف انرژی باز کنیم.

□ روشهای مهم برای **ایجاد گاف انرژی** در گرافن عبارتند از:

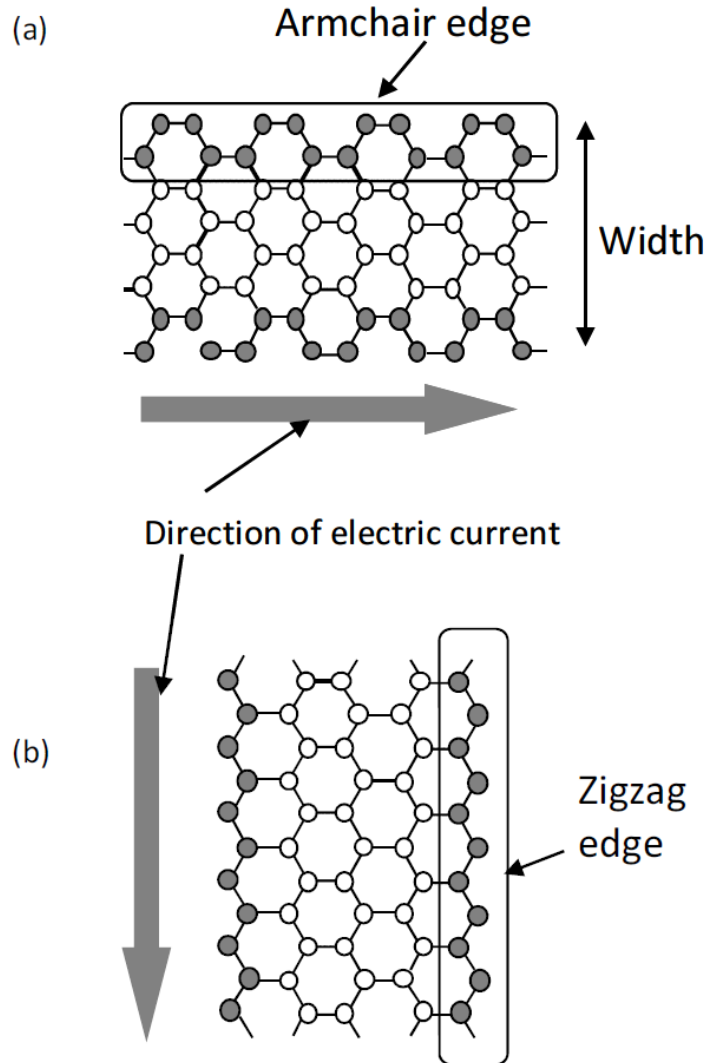
۱- ایجاد نانو روبان های گرافنی

۲- ایجاد میدان خارجی

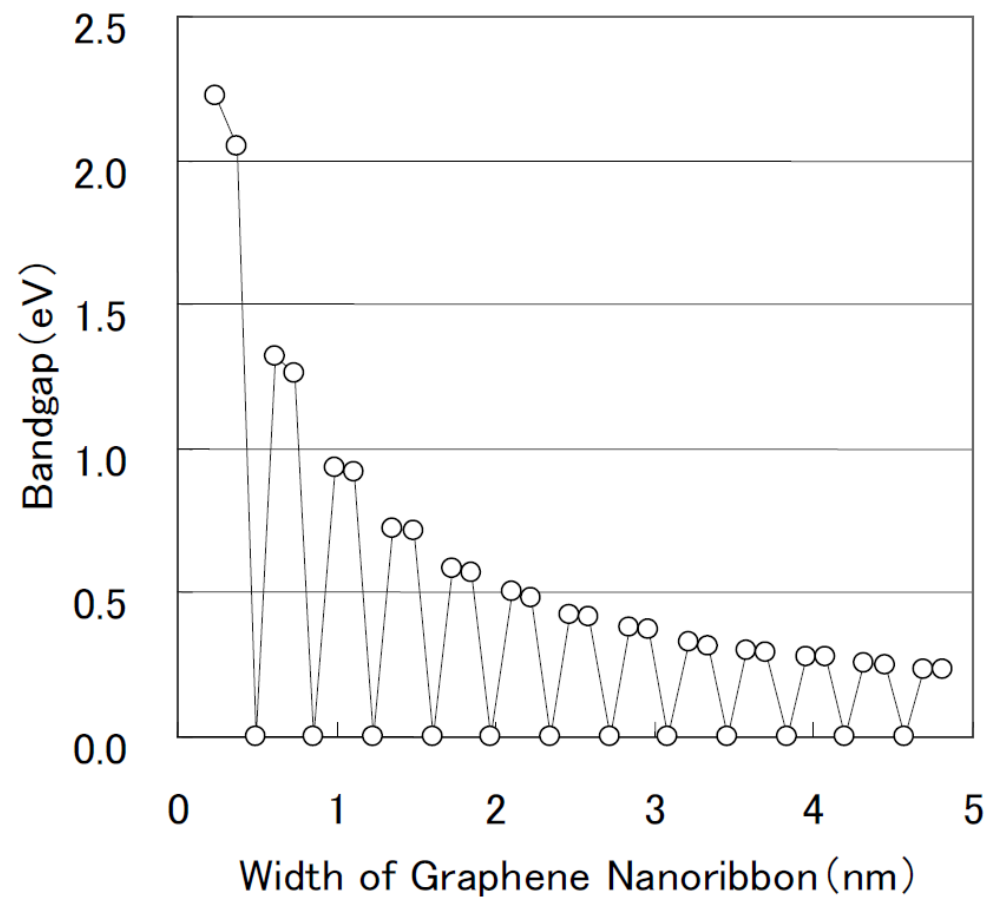
بکار گیری گرافن

- با محدود کردن الکترون می توان به گاف انرژی رسید. بنابراین با تبدیل گرافن به نانو روبان های گرافنی می توان الکترون را در یک جهت محدود کرد و سبب باز شدن گاف انرژی در گرافن شد.
- برای تبدیل گرافن به نانوروبان گرافنی باید عرض صفحه ی گرافن را کاهش داد.
- با کاهش عرض صفحه ی گرافن، گاف انرژی افزایش می یابد.
- در واقع کاهش عرض نانوروبان ها فاصله ی مابین نوارهای انرژی را بیشتر می کند پس گاف انرژی افزایش می یابد و
- اما با کاهش عرض نانوروبان ها جرم موثر را افزایش می دهد که باعث کاهش موبیلیتی می شود.

بکار گیری گرافن



(c)

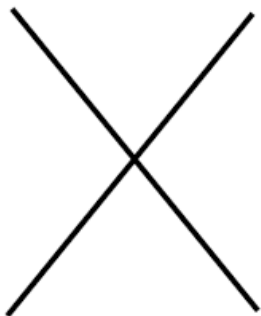


ایجاد گاف در گرافن

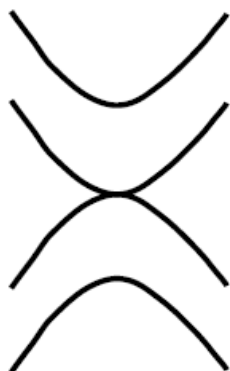
- روش دوم ایجاد گاف انرژی ایجاد میدان خارجی است.
- در واقع ایجاد میدان خارجی بروی حرکت الکترون ها در گرافن تاثیر می گذارد بطوریکه رفتار الکترون ها در گرافن وقتی در معرض یک پتانسیل خارجی قرار می گیرد تغییر می کند.
- این پتانسیل خارجی یک شکاف باند ممنوعه در گرافن ایجاد می کند که با تغییر پتانسیل خارجی این شکاف تغییر می کند.
- با افزایش قدرت این میدان الکتریکی شکاف انرژی در گرافن افزایش می یابد.

ایجاد گاف در گرافن

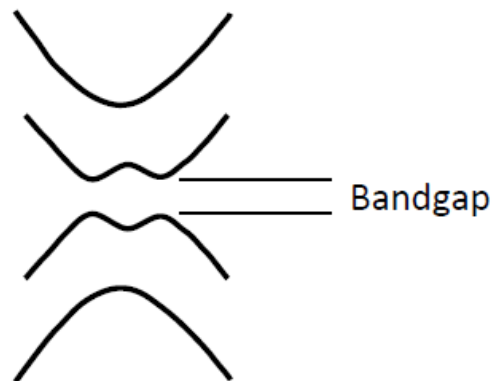
Single layer
graphene



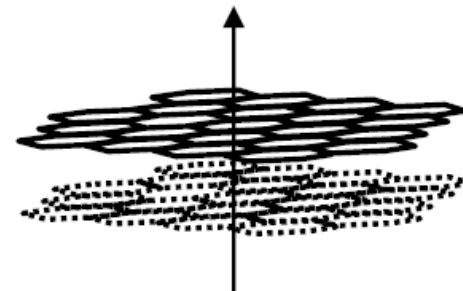
Bilayer
graphene



Bilayer graphene, under
electric field



Electric field



مراجع