

GRAPHENE DAN APLIKASINYA PADA DIVAIS ELEKTRONIKA

Endi Suhendi

Jurusan Pendidikan Fisika, FPMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudi No. 229 Bandung, E-mail: endisuhendi@yahoo.com

ABSTRAK

GRAPHENE DAN APLIKASINYA PADA DIVAIS ELEKTRONIKA. Artikel ini mengkaji tentang sifat kelistrikan graphene dan aplikasinya untuk divais elektronik masa depan. Pembahasan sifat listrik graphene diawali dengan meninjau struktur atom graphene dan dengan mengaplikasikan pendekatan tight-binding akan diperoleh hubungan dispersi linier. Graphene memiliki energi gap nol. Untuk limit energi rendah, elektron pada graphene memenuhi suatu persamaan yang mirip dengan persamaan Dirac untuk partikel bermassa nol. Aplikasi graphene untuk divais elektronik mensyaratkan graphene berukuran berhingga sehingga muncul graphene nano ribbon (GNR). Pembatasan dimensi pada graphene yang menghasilkan GNR memiliki sifat yang berbeda dengan graphene. GNR dapat bersifat semikonduktor maupun metal bergantung pada struktur batasnya, yaitu GNR zigzag dan GNR armchair. GNR memiliki energi gap yang bergantung pada lebarnya. Sifat-sifat yang dimiliki GNR ini memungkinkan untuk diaplikasikan pada berbagai divais elektronik.

Kata kunci: graphene, graphene nanoribbon (GNR), divais elektronik

ABSTRACT

GRAPHENE AND ITS APPLICATION TO ELECTRICAL DEVICES. This article investigates about electrical properties of graphene and its application to electrical devices for future. Study of electrical properties of graphene started with atomic structure of graphene and using tight binding approximation, it yields linier dispersion relation. Graphene has zero energy gap. For low energy limit, electrons in graphene appropriate to massless Dirac like equation. Application of graphene to electrical devices need finite size of it, then appear graphene nano ribbon (GNR). GNR has different properties from graphene. GNR has semiconductor or metal properties depend on its bound structure, there are zigzag and armchair. GNR has energy gap which depend on its wide. These properties make GNR possible for electrical devices application.

Keywords: graphene, graphene nanoribbon (GNR), electrical devices

1. PENDAHULUAN

Graphene merupakan material dengan ketebalan satu atom yang tersusun atas atom-atom karbon membentuk kisi heksagonal. Graphene pertama kali dapat dibuat oleh A. Geim dan K. Novoselov pada tahun 2004 [1] dimana keduanya merupakan ilmuwan pada Universitas Manchester Inggris. Sejak graphene dapat dibuat, berbagai kajian teoritis maupun

eksperimen telah banyak dilakukan oleh ilmuan-ilmuan di seluruh dunia, sehingga pada tahun 2010 kedua ilmuan tersebut memperoleh Nobel Prize di bidang Fisika [2]. Graphene menjadi material yang menarik untuk dikaji karena memiliki berbagai sifat yang unik seperti sifat mekanik, optik, thermal dan listrik. Pada artikel ini akan dikaji tentang sifat kelistrikan graphene dan aplikasinya untuk divais elektronik masa depan.

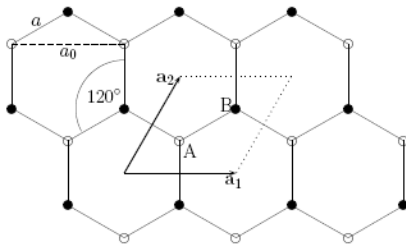
2. METODE

Metode yang penulis gunakan pada kesempatan ini adalah kajian pustaka. Penulis mengkaji berbagai makalah internasional dan buku untuk memperoleh informasi terkait material graphene dan aplikasinya pada divais elektronika.

3. PEMBAHASAN

3.1. Struktur Atom Graphene

Lapisan tunggal graphene memiliki struktur seperti pada gambar 1. Struktur graphene bukan termasuk kisi Bravais tetapi dapat dipandang sebagai kisi triangular dengan basisnya terdiri dari dua atom tiap sel satuan. Atom-atom ini kita namakan atom A dan atom B.



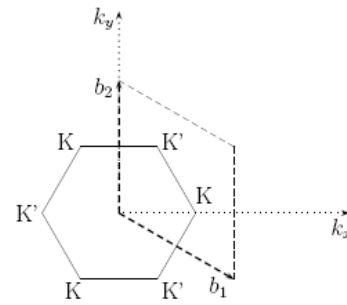
Gambar 1. Struktur kisi graphene.

Vektor kisi pada graphene dapat dituliskan sebagai

$$\mathbf{a}_1 = \sqrt{3}a\mathbf{e}_x \text{ dan } \mathbf{a}_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}a\mathbf{e}_x + \frac{3}{2}a\mathbf{e}_y \quad (1)$$

dimana $a = 1,42 \text{ \AA}$ adalah jarak antar atomnya. Konstanta kisi a_0 terkait dengan jarak antar atom melalui $a_0 = \sqrt{3}a$. Kisi resiproknya juga merupakan sebuah kisi triangular dimana vektor kisinya ditunjukkan pada gambar 2 dan dituliskan sebagai

$$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}(\mathbf{e}_x - \frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{e}_y) \text{ dan } \mathbf{b}_2 = \frac{4\pi}{3a}\mathbf{e}_y \quad (2)$$



Gambar 2. Struktur kisi resiprok graphene.

Daerah Brillouin pertama yang ditunjukkan pada gambar 2 di atas merupakan heksagonal. Dua titik yang tidak ekuivalen pada sudut-sudut daerah Brillouin pertama adalah K dan K', dimana kedua titik ini kemudian akan kita sebut sebagai titik-titik Dirac.

3.2. Struktur Pita Energi

Struktur pita energi pada graphene dapat ditentukan dengan menggunakan pendekatan *tight binding* [3,4,5,6,7,8,9]. Hamiltonian tight binding untuk elektron-elektron pada graphene adalah dengan tinjauan bahwa elektron dapat melompat dari suatu atom ke atom-atom lain yang ada didekatnya (*nearest neighbor*) yang dapat dituliskan sebagai

$$\mathcal{H} = -t \sum_{\langle ij \rangle} (|\phi_j^A\rangle\langle\phi_i^B| + h.c.) \quad (3)$$

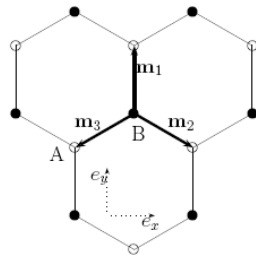
Dengan kata lain elektron-elektron pada atom A(B) dapat melompat pada tiga atom B(A) yang merupakan atom-atom tetangga terdekatnya. Kita meninjau bahwa setiap unit sel pada graphene terdiri dari dua atom sehingga untuk fungsi eigen Hamiltoniannya kita dapat menggunakan teorema Bloch. Fungsi eigen Hamiltonian dituliskan sebagai kombinasi linier fungsi gelombang atomik, dalam notasi spinor,

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{pmatrix} \sum_j e^{ik \cdot R_j} [C_A(\mathbf{k})\phi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j^A)] \\ \sum_j e^{ik \cdot R_j} [C_B(\mathbf{k})\phi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j^B)] \end{pmatrix} \quad (4)$$

dimana N adalah jumlah sel dan fungsi $\phi(\mathbf{r})$ adalah fungsi gelombang orbital p_z dari atom-atom karbon. Koefisien $C_{A/B}$ ditentukan agar $\psi(\mathbf{r})$ merupakan fungsi eigen Hamiltonian tight binding. Sedangkan $\mathbf{R}_j^{A/B}$ adalah vektor posisi atom A/B berturut-turut. Vektor posisi

atom-atom tetangga terdekat seperti pada Gambar 3 dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_1 &= a\mathbf{e}_y, \quad \mathbf{m}_2 = \frac{\sqrt{3}a}{2} \left(\mathbf{e}_x - \frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{e}_y \right), \quad \mathbf{m}_3 = \\ &\frac{\sqrt{3}a}{2} \left(-\mathbf{e}_x - \frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{e}_y \right) \end{aligned} \quad (5)$$



Gambar 3. Vektor posisi atom-atom tetangga terdekat pada graphene.

Dengan memecahkan persamaan eigen

$$\mathcal{H}\psi = E\psi \quad (6)$$

Hamiltonian dapat dituliskan sebagai

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} 0 & tf(k) \\ tf(k) & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

dengan

$$f(k) = \sum_{i=1}^3 e^{-ik \cdot \mathbf{m}_i} = \sqrt{1 + \cos^2 \left(k_x \frac{\sqrt{3}}{2} a \right) + 4 \cos \left(k_x \frac{\sqrt{3}}{2} a \right) \cos \left(k_y \frac{3}{2} a \right)}$$

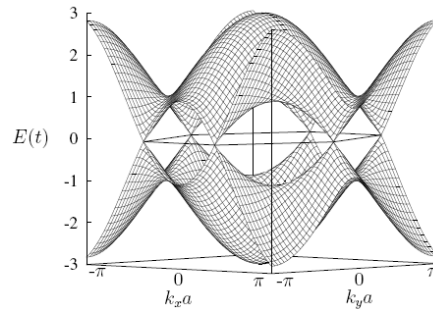
Nilai eigen (energi) berkaitan adalah:

$$E(k) = \pm t|f(k)| \quad (8)$$

Struktur pita energi graphene dilukiskan pada Gambar 4.

Sebagai konsekuensi dari dua atom tiap sel satuan, hubungan dispersinya terdiri dari dua pita: pita valensi dan pita konduksi. Kedua pita tersebut bertemu pada enam buah titik yang terdapat pada sudut-sudut zona Brillouin pertama yang dinotasikan oleh K dan K'. Pada titik-titik K dan K' (*Dirac points*) ini, energi bernilai nol. Akibatnya graphene tidak memiliki celah (*gap*) sehingga dapat dikatakan bersifat sebagai metal. Akan tetapi, rapat keadaan (*density of state/DOS*) pada graphene

hilang pada titik-titik K dan K', sehingga dari tinjauan ini, graphene disebut juga sebagai semikonduktor yang tidak memiliki celah (*zero gap semiconductor*).



Gambar 4. Struktur pita energi graphene dimana energi dalam satuan t .

3.3. Persamaan Dirac

Selanjutnya kita akan gunakan hamiltonian Persamaan (7) untuk menganalisis perilaku elektron pada graphene di sekitar *Dirac points* atau sering disebut limit energi rendah (*low energy limit*) [10,11,12,13,14,15,16]. Elektron yang berada di sekitar *Dirac point* (K dan K') memiliki momentum \mathbf{k} dimana

$$\mathbf{k} = \mathbf{K} + \mathbf{q} \quad \text{atau} \quad \mathbf{k} = \mathbf{K}' + \mathbf{q} \quad (9)$$

dengan $|\mathbf{q}| \ll |\mathbf{K}|$ atau $|\mathbf{q}| \ll |\mathbf{K}'|$. Nilai $f(k)$ disekitar titik K dan K' dengan menguraikan cukup sampai orde pertama berturut-turut adalah

$$\begin{aligned} f(k) &= -\frac{3a}{2} (q_x + iq_y) \quad \text{dan} \\ f(k) &= -\frac{3a}{2} (-q_x + iq_y) \end{aligned} \quad (10)$$

Kedua hasil di atas hanya berbeda sebuah tanda, kita dapat mendefinisikan indeks α dimana nilainya +1 untuk daerah sekitar K dan -1 untuk daerah sekitar K'. Indeks ini biasa dikenal sebagai *chirality* dari elektron Dirac. Hamiltonian pada limit energi rendah untuk daerah sekitar K dapat dituliskan sebagai

$$\mathcal{H} = -\frac{3\tau a}{2} \begin{bmatrix} 0 & q_x + iq_y \\ q_x - iq_y & 0 \end{bmatrix} = \hbar v_F \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{q} \quad (11)$$

dimana σ adalah elemen-elemen matriks Pauli dan

$$v_F = \frac{3ta}{2\hbar} \cong 10^6 \frac{m}{s} \quad (12)$$

yang dinamakan kecepatan Fermi. Nilai eigen energi yang berkaitan adalah:

$$E = \pm \hbar v_F |q| \quad (13)$$

Pada daerah disekitar K dan K' energi bergantung secara linier pada q dan hanya ditentukan oleh sebuah parameter tunggal yaitu kecepatan fermi v_F . Keberlakuan secara linier ini merupakan sesuatu yang menarik terkait dengan sifat graphene jika dikaitkan dengan fenomena relativistik. Seperti kita ketahui energi partikel relativistik (hubungan dispersi) yang diperoleh dari persamaan Dirac adalah:

$$E = \pm \sqrt{c^2 \hbar^2 k^2 + m^2 c^4} \quad (14)$$

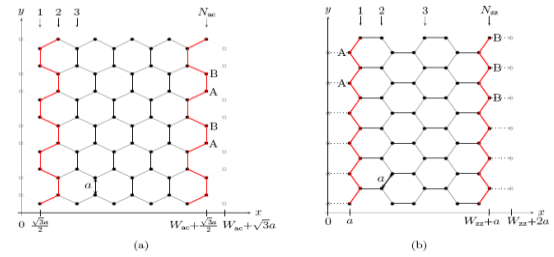
Jika massanya nol ($m = 0$), energi bergantung secara linier dan mirip dengan energi pada graphene, dimana kecepatan Fermi berperan sebagai kecepatan cahaya

$$E = \pm c \hbar |k| \quad (15)$$

Dari hasil di atas kita dapat simpulkan bahwa elektron energi rendah pada graphene berperilaku seperti fermion Dirac bermassa nol (*massless Dirac fermion*). Itulah mengapa titik-titik K dan K' dinamakan sebagai *Dirac points* dan hamiltonian Persamaan (11) dinamakan hamiltonian Dirac.

3.4. Graphene Nanoribbon

Pada pembahasan sebelumnya kita telah mengkaji sifat listrik lembaran graphene yang berukuran takhingga (sangat luas). Tentunya dalam eksperimen kita harus berurusan dengan material yang berdimensi berhingga, sehingga pembahasan kali ini akan difokuskan pada graphene yang ukurannya berhingga yang dikenal sebagai graphene *nanoribbons* (GNR) [19,20,21,22,23,24]. Terdapat dua jenis GNR terkait dengan bentuk sisi-sisinya yaitu armchair GNR dan zigzag GNR seperti pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. a. Armchair GNR dan b. Zigzag GNR.

Struktur pita energi dari masing-masing GNR dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Dirac (Persamaan 16). Untuk armchair GNR, syarat batas yang harus dipenuhi fungsi gelombang adalah fungsi gelombang bernilai nol pada $x = 0$ dan $x = W_{ac} + \sqrt{3}a$. Sehingga nilai eigen energi yang dihasilkan berbentuk:

$$E^2 = \mp \sqrt{k_n^2 + q_y^2} \quad (23)$$

dengan

$$k_n = \frac{n\pi}{W_{ac} + \sqrt{3}a} + \frac{2\pi}{2\sqrt{3}a} \quad (24)$$

Hasil di atas merupakan hubungan dispersi untuk limit energi rendah pada armchair GNR. Hasil yang menarik adalah muncul tidaknya gap pada armchair GNR bergantung pada lebarnya. Armchair GNR akan bersifat seperti logam ketika $k_n = 0$, hal ini dapat terjadi jika $W_{ac} = (N_{ac} - 1) \frac{\sqrt{3}}{2} a$ dengan $N_{ac} = 3m - 1$, m interger. Sedangkan untuk lebar yang lain, gap pada armchair GNR hadir. Sedangkan untuk zigzag GNR, syarat batas yang harus dipenuhi fungsi gelombang adalah fungsi gelombang bernilai nol pada $x = 0$ dan $x = W_{zz} + 2a$. Sehingga nilai eigen energi yang dihasilkan berbentuk:

$$E^2 = \mp \sqrt{q_y^2 + k_n^2} \quad (25)$$

dengan

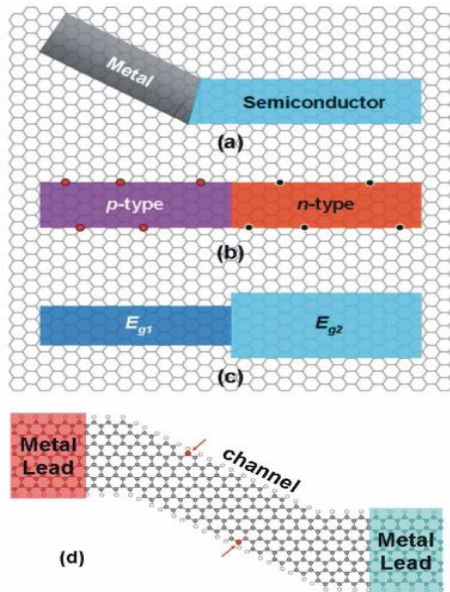
$$q_y = \frac{k_n}{\tan[k_n (W_{zz} + 2a)]} \quad (26)$$

Berbeda dengan armchair GNR, zigzag GNR bersifat sebagai metal terlepas berapapun lebarnya.

3.5. Divais Elektronik

Sifat yang menarik dari GNR seperti orientasi dan kebergantungan sifat transport

pada lebarnya membuka peluang untuk aplikasi divais elektronika [25,26,27,28,29]. Dibandingkan dengan material elektronik lain, keuntungan yang paling menonjol dari GNR adalah bahwa divais berbasis GNR bahkan sampai pada rangkaian terintegrasi pun dapat dibuat melalui proses tunggal dari material graphene.



Gambar 6. Skema divais elektronika berbasis GNR.

Gambar 6 menunjukkan ilustrasi susunan dasar divais berbasis GNR. Gambar 6.a menunjukkan divais sambungan metal-semikonduktor yang dibuat dengan sambungan zigzag GNR dan armchair GNR. Gambar 6.b menunjukkan sambungan p-n yang dibuat dari sambungan armchair GNR dengan perbedaan doping pada batas. Gambar 6.c menunjukkan sebuah divais heterojunction diantara dua armchair GNR yang berbeda lebarnya (*band gap*). Gambar 6.d menunjukkan skema sebuah GNR-FET, terbuat dari 10-armchair GNR channel dan dua metalik 7-zigzag GNR lead yang dihubungkan dengan dua elektroda metal eksternal.

4. KESIMPULAN

Kita telah mengkaji sifat dasar listrik dan sifat transport graphene dan GNR serta berbagai aplikasinya pada divais elektronika. GNR telah muncul sebagai suatu pilihan

material yang menjanjikan untuk divais elektronika masa depan setelah silikon. Keuntungan yang paling menonjol dari GNR adalah bahwa divais berbasis GNR dapat dibuat melalui proses tunggal dari material graphene. Berbagai kajian teoritis dan eksperimen tentang GNR masih terus dilakukan oleh para ilmuwan di seluruh dunia.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. NOVOSELOV, K.S., GEIM, A. K., MOROZOV, S. V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S. V., GRIGORIEVA, I. V., and FIRSOV, A. A., *Science* **306**, 666 (2004), Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010, GRAPHENE, The Royal Swedish Academy of Sciences, October 2010.
2. WALLACE, P.R., *Phys. Rev.*, **71** (1947) 622.
3. BENA, C., MOTAMBUX, G., *New Journal of Physics* **11** (2009) 095003 (15pp).
4. REICH, S., MAULTZSCH, J., THOMSEN, C., *Physical Review B* **66**, (2002) 035412.
5. GRUNEIS, A., ATTACALITE, C., WIRTZ, L., SHIOZAWA, H., SAITO, R., PICHLER, T., RUBIO, A., *Physical Review B* **78** (2008) 205425.
6. WU, Y., CHILDS, P.A., *Nanoscale Res Lett.*, **6** (2011) 62.
7. SAITO, R., DRESSELHAUS, G., and DRESSELHAUS, M.S., "Physical Properties of Carbon Nanotubes", Imperial College Press, London (1998).
8. REICH, S., THOMSEN, C., and MAULTZSCH, J., "Carbon Nanotubes", Wiley-VCH, Weinheim (2004).
9. SEMENOFF, G. W., *Phys. Rev. Lett.*, **53** (1984) 2449.
10. KATSNELSON, M.I., NOVOSELOV, K.S., GEIM, A.K., *Nat. Phys.*, **2** (2006) 620.
11. CHAKRABORTY, T., PEETERS, F., and SIVAN, U., Elsevier, Amsterdam (2002).
12. ANDO, T., NAKANISHI, T., and SAITO, R., *Journal Phys. Soc. Japan* **67** (1998) 2857.
13. NOVOSELOV, K.S., GEIM, A.K., MOROZOV, S.V., JIANG, D., ZHANG, Y., KATSNELSON, M.I., DUBONOS, S. V., GRIGORIEVA, I. V., and FIRSOV, A. A., *Nature* **438** (2005) 197–200.

14. GRUNEIS, A., ATTACCALITE, C., RUBIO, A., VYALIKH, D.V., MOLODTSOV, S.L., FINK, J., FOLLATH, R., EBERHARDT, W., BUCHNER, B., and PICHLER, T., Phys. Rev. B 80 (2009) 075431.
15. LU, X., YU, M., HUANG, H., and RUOFF, R.S., Nanotechnology 10 (1999), 269.
16. KATSNELSON, M.I., Phys. Rev. B 74 (2006) 20140.
17. KATSNELSON, M.I., Eur. J. Phys. B 51 (2007) 157.
18. NAKADA, K., FUJITA, M., DRESSELHAUS, G., DRESSELHAUS, M.S., Phys. Rev. B 54 (1996) 17954.
19. FUJITA, M., WAKABAYASHI, K., NAKADA, K., KUSAKABE, D., Journal Phys. Soc. Jpn 65 (1996) 1920.
20. FERNANDEZ-ROSSIER, J., PALACIOS, J.J., BREY, L., Phys. Rev. B 75 (2007) 205441.
21. PERES, N.M.R., CASTRO NETO, A.H., GUINEA F., Phys. Rev. B 73 (2006) 195411.
22. MUNOZ-ROJAS, F., JACOB, D., FERNANDEZ-ROSSIER, J., PALACIOS, J.J., Phys. Rev. B 74 (2006) 195417.
23. BREY, L., FERTIG, H.A., Phys. Rev. B 73 (2006) 235411.
24. YAN, Q., HUANG, B., YU, J., ZHENG, F., ZHANG, J., Wu, J., GU, B.L., LIU, F., and DUAN, W., Nano Lett., 7 (2007) 1469.
25. LIANG, X., FU, Z., and CHOU, S.Y., Nano Lett., 7 (2007) 3840.
26. MERIC, I., HAN, M.Y., YOUNG, A. F., OZYLMAZ, B., KIM, P., and SHEPARD, K. L., Nat. Nanotechnol., 3 (2008) 654.
27. WU, X., SPRINKLE, M., LI, X., MING, F., BERGER, C., and WALT A. de HEER, Phys. Rev. Lett., 101 (2008). 026801.
28. OYILMAZ, B., JARILLO-HERRERO, P., EFETOV, D., ABANIN, D. A., LEVITOV, L. S., and KIM, P., Phys. Rev. Lett., 99 (2007) 166804.

6. DISKUSI

Muhayatun Santoso:

Apakah semua tahapan dalam penelitian ini sudah dilakukan, karena merupakan sebuah kajian?

Endi Suhendi:

Semua tahapan dalam penelitian ini sudah dilakukan, dan untuk menghitungnya menggunakan MATLAB.