

Studi Distribusi Elektron pada Semikonduktor Tipe N dan P sebagai Penyusun Transistor

Duwi Hariyanto^{1,2,3*}, Sabar^{1,2}, Kisna Pertiwi^{1,2}, Imam Ghazali Yasmini³, Yusraida Khairani Dalimunthe³

¹Program Studi Rekayasa Instrumentasi dan Automasi, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera

²Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknologi Produksi dan Industri, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 3536

³Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

*Corresponding email: duwi.hariyanto@staff.itera.ac.id

Riwayat Artikel

Diterima
13/07/2021
Disetujui
31/07/2021
Diterbitkan
31/07/2021

Abstrak

Bahan yang digunakan dalam produksi transistor yaitu bahan semikonduktor tipe N dan tipe P. Karakteristik dari bahan tersebut dapat ditentukan dari keadaan elektron (pembawa) pada pita energi. Elektron dalam semikonduktor merupakan fermion sehingga probabilitas keadaan elektron dalam pita energi ditentukan oleh distribusi Fermi-Dirac. Studi ini bertujuan untuk mempelajari distribusi elektron pada semikonduktor tipe N dan tipe P sebagai penyusun transistor menggunakan perhitungan sederhana. Perangkat lunak pengolah grafik Microsoft Excel digunakan untuk melakukan perhitungan distribusi Fermi-Dirac dan tingkat Fermi. Hasil perhitungan dapat menunjukkan dengan baik status keadaan elektron dan penyimpangan dari tingkat Fermi akibat kenaikan temperatur.

Kata Kunci: semikonduktor, Distribusi Fermi-Dirac, pita energi, *hole*

Abstract

The materials used in the production of transistors are N-type and P-type semiconductors. The characteristics of these materials can be determined from the state of the electrons (carriers) in the energy band. Electrons in semiconductors are fermions, so the probability of an electron's state in the energy band is determined by the Fermi-Dirac distribution. The aimed of the study is to examine the distribution of electrons in N-type and P-type semiconductors as transistor materials using simple calculations. The Microsoft Excel software was used to calculate the Fermi-Dirac distribution and the Fermi level. The results of the calculations have a good agreement with the state of the electron and deviations from the Fermi level due to increasing temperature.

Keywords: semiconductor, Fermi-Dirac distribution, energy band, hole

1. Pendahuluan

Penggunaan semikonduktor tentu sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, terutama pada perangkat-perangkat elektronika karena sifat hantar listriknya yang dapat diubah-ubah dengan menyuntikkan material lain yang biasa disebut sebagai doping. Dalam hal ini, bahan semikonduktor memiliki sifat konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor [1]. Pada temperatur yang sangat rendah semikonduktor bersifat sebagai isolator, namun pada temperatur ruangan bersifat sebagai konduktor. Hal ini, berkaitan dengan celah energi atau celah pita dalam bahan semikonduktor [2].

Celah pita semikonduktor biasanya berkisar dari persepuluh elektronvolt (eV) hingga 3 eV, sedangkan jika sekitar 4 eV atau lebih besar, bahan tersebut dianggap sebagai isolator [3]. Germanium (Ge) dan Silikon (Si) merupakan material semikonduktor dengan konfigurasi atom masing-masing $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^2$ dan $[Ne] 3s^2 3p^2$. Artinya, di tingkat energi terluar kedua atom

tersebut terdapat 4 elektron dan akibat tumpang tindih pita energi di tingkat energi terluar, pita energi akan terisi penuh oleh 8 elektron. Sebagian elektron di pita valensi dapat naik ke pita konduksi dengan meninggalkan tempat kosong (*hole*) di pita valensi akibat celah pita semikonduktor yang sempit. Elektron yang telah berada di pita konduksi maupun *hole* yang terbentuk di pita valensi akan bertindak sebagai pembawa muatan untuk terjadinya arus listrik. Konduktivitas listrik semikonduktor akan mengalami kenaikan dengan cepat seiring kenaikan temperatur. Dalam hal ini, temperatur kamar cukup mampu menstimulasi sejumlah elektron meninggalkan *hole* di pita valensi dan naik ke pita konduksi [4].

Salah satu perangkat semikonduktor yang memanfaatkan karakteristik tersebut dan telah banyak dikenal adalah transistor [5]. Perangkat aktif tiga terminal tersebut dibuat dari tipe semikonduktor berbeda sehingga dapat bersifat sebagai isolator atau konduktor dengan pemicu berupa sinyal tegangan kecil [6]. Tiga terminal pada

transistor yaitu basis, kolektor, dan emitor disusun dari dua tipe semikonduktor yaitu semikonduktor tipe N dan tipe P. Semikonduktor tipe N memiliki pengotor pentavalen sehingga dapat menjadi pendonor elektron (karena memberikan elektron lebih). Sementara, semikonduktor tipe P memiliki pengotor trivalen sehingga dapat menjadi akseptor elektron (karena menerima elektron dari pita valensi) [7]. Apabila transistor disusun dari semikonduktor tipe P, N dan P maka yang terbentuk dinamakan transistor PNP sedangkan apabila transistor disusun dari semikonduktor tipe N, P dan N maka dihasilkan transistor NPN.

Berdasarkan uraian tersebut, distribusi elektron sangat penting dalam menentukan karakteristik suatu material. Oleh sebab itu, dilakukan studi distribusi elektron pada semikonduktor tipe N dan tipe P sebagai penyusun transistor. Studi ini menerapkan distribusi Fermi-Dirac dan perhitungan menggunakan pengolah grafik Microsoft Excel yang telah dikenal luas [8]. Studi ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi yang menawarkan pemecahan masalah karakteristik bahan secara sederhana.

2. Perumusan Topik dan Metode

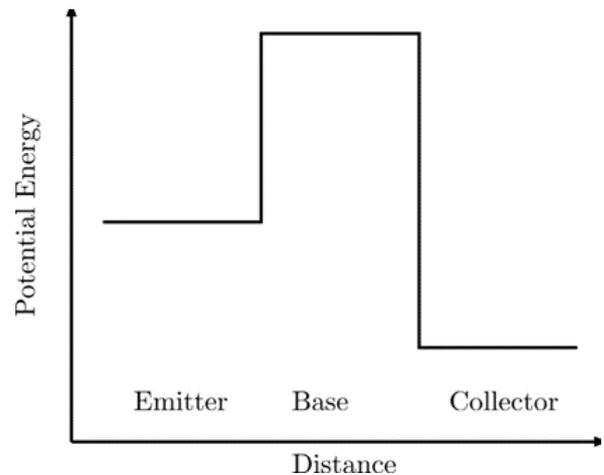
Seperti telah disebutkan, Germanium dan Silikon adalah bahan yang biasa digunakan dalam transistor, dalam hal ini, merupakan bahan semikonduktor yang ditandai dengan peningkatan konduktivitas terhadap temperatur saat pembawa bebas (*free carriers*) dipindahkan dari pita valensi ke pita konduksi. Namun, kedua bahan semikonduktor tersebut memiliki sifat fisik dan elektronik yang sangat berbeda, seperti ditunjukkan Tabel 1 [9].

Tabel 1. Beberapa Sifat Fisik dan Elektronik Germanium dan Silikon pada Temperatur 300 K [9].

Properti	Silikon	Germanium
Mobilitas elektron (cm ² /Vs)	1400	3900
Mobilitas <i>hole</i> (cm ² /Vs)	450	1900
<i>Bandgap</i> (eV)	1.12	0.661
Konsentrasi pembawa intrinsik (cm ⁻³)	1.0×10 ¹⁰	2.8×10 ¹³
Resistivitas intrinsik (Ω cm)	3.2×10 ⁵	46
Densitas (g/cm ³)	2.33	5.33

Dapat ditemukan bahwa mobilitas Germanium jauh lebih besar dibandingkan Silikon. Dalam hal ini, elektron dan *hole* berperan penting dalam proses hantar listrik pada semikonduktor. Partikel-partikel dalam semikonduktor disusun pada tingkat energi yang berbeda. Pergerakan elektron dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya dapat menghasilkan arus listrik. Elektron di dalam bahan harus memiliki energi yang lebih besar dari potensial penghalang untuk melarikan diri ke tingkat energi yang lebih tinggi. Dalam transistor

NPN, penghalang bagi elektron yang harus diatasi yaitu sebagai berikut.



Gambar 1. Energi potensial transistor NPN [10]

Elektron dalam semikonduktor adalah fermion, sehingga mengikuti statistik Fermi-Dirac [9]. Oleh karena itu, probabilitas keadaan elektron dalam pita energi ditentukan oleh distribusi Fermi-Dirac.

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \tag{1}$$

Fungsi distribusi ini memperhitungkan bahwa tidak ada dua fermion yang memiliki fungsi gelombang yang sama (menempati keadaan yang sama).

Jika multiplisitas keadaan energi dari E ke $E+dE$ diberikan oleh $g(E) dE$, maka banyaknya elektron $n(E) dE$ dengan energi dari E ke $E+dE$ adalah.

$$n(E)dE = g(E)f_e(E) dE \tag{2}$$

Untuk kasus elektron pada pita konduksi, dapat digunakan multiplisitas keadaan seperti pada sistem elektron bebas, dengan syarat bahwa densitas keadaan dari tepi pita konduksi ke atas diukur. Secara kebetulan, densitas keadaan dekat tepi pita memiliki distribusi parabola. Maka, untuk elektron pada pita konduksi berlaku.

$$g(E)dE \propto (E - E_c)^{1/2} \tag{3}$$

Ketika energi meningkat melampaui tepi pita, distribusi akan menyimpang dari bentuk parabola sederhana, tetapi karena fungsi probabilitas menurun sangat cepat, integral hampir tidak akan terpengaruh. Jika $E-E_F$ setidaknya beberapa kali $k_B T$, distribusi Fermi dapat didekati dengan distribusi Boltzmann.

$$f_e(E) \approx e^{-(E-E_F)/k_B T} \tag{4}$$

Dengan penyederhanaan ini, jumlah elektron pada pita konduksi dalam kesetimbangan termal adalah.

$$n_e \propto (k_B T)^{3/2} e^{-(E_c - E_F)/k_B T} \quad (5)$$

Dengan N_c adalah densitas keadaan efektif di tepi pita, dapat diperoleh [11].

$$n_e \equiv n = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T} \quad (6)$$

Cara yang hampir sama dapat diterapkan untuk *hole* pada pita valensi, yaitu dapat digunakan multiplisitas keadaan seperti pada sistem elektron bebas. Persyaratannya adalah densitas keadaan dari tepi pita valensi ke bawah diukur. Maka untuk *hole* pada pita valensi berlaku.

$$g(E)dE \propto (E_v - E)^{1/2} \quad (7)$$

Menerapkan aproksimasi pada okupansi status *hole*, probabilitas status *hole* ditempati, yaitu status valensi kosong adalah.

$$f_h(E) = 1 - f_e(E) = \frac{1}{e^{(E_F - E)/k_B T} + 1} \approx e^{-(E_F - E)/k_B T} \quad (8)$$

Dengan N_v adalah densitas keadaan efektif di tepi pita valensi dan proses penyederhanaan yang sama seperti sebelumnya, jumlah *hole* pada pita valensi dalam kesetimbangan termal diberikan oleh.

$$n_h \equiv p = N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T} \quad (9)$$

Dalam semikonduktor murni (semikonduktor intrinsik) berlaku persamaan.

$$N_c = N_v = n_i \quad (10)$$

Dalam hal ini, n_i adalah jumlah elektron atau *hole* intrinsik pada semikonduktor murni, yaitu dimana hanya sumber pembawa bergerak yang tereksitasi termal melintasi *bandgap* tanpa atom pengotor tambahan atau ketidaksempurnaan kristal yang memungkinkan mekanisme eksitasi lain. Kemudian, energi intrinsik E_i dapat menjelaskan E_c dan E_v , sehingga lebih mudah untuk merujuk semua kuantitas ke energi tersebut. Dengan demikian, dapat dihitung energi Fermi untuk elektron pada pita konduksi sebagai.

$$E_{Fn} = E_i + k_B T \ln \frac{n}{n_i} \quad (11)$$

Sementara, energi Fermi untuk *hole* pada pita valensi adalah.

$$E_{Fp} = E_i - k_B T \ln \frac{p}{n_i} \quad (12)$$

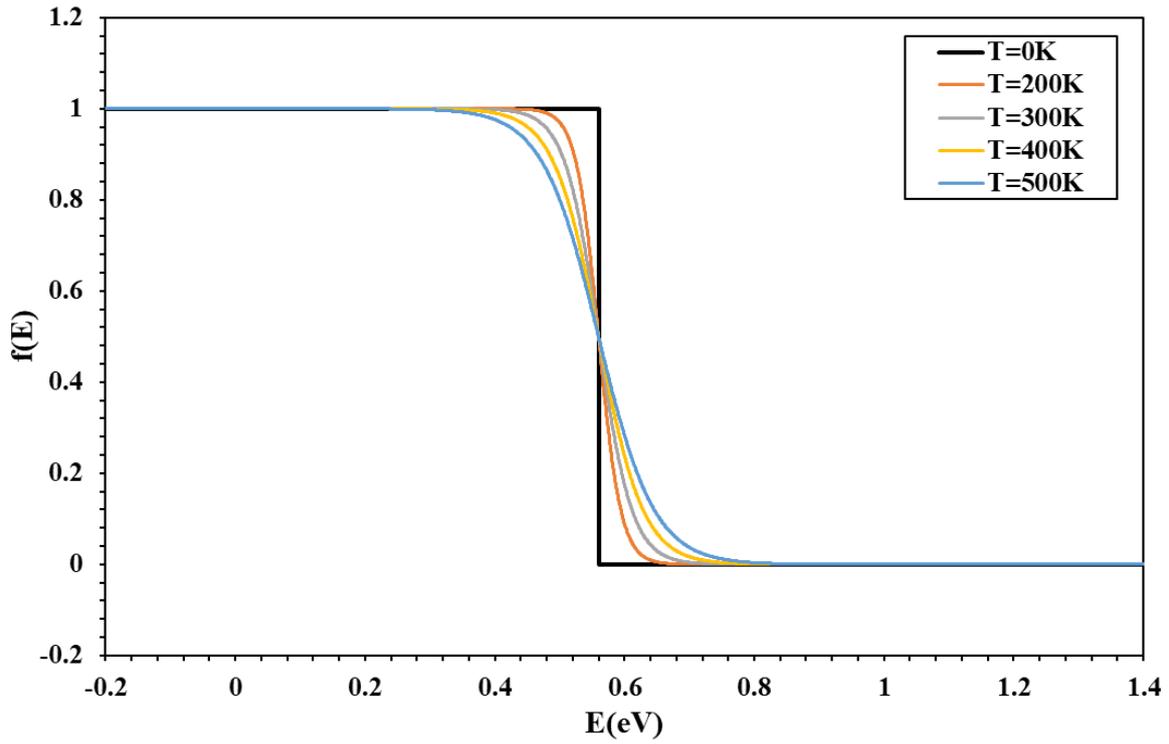
Pada studi ini, digunakan perangkat lunak pengolah grafik Microsoft Excel untuk menghitung

distribusi elektron pada semikonduktor tipe N dan tipe P sebagai penyusun transistor. Parameter pada tabel 1 digunakan sebagai masukan dalam perhitungan yang menerapkan persamaan (1), (11), dan (12). Perhitungan yang dilakukan menawarkan pemecahan masalah karakteristik bahan secara sederhana sehingga dapat diterapkan dalam pembelajaran ataupun praktikum mengenai transistor.

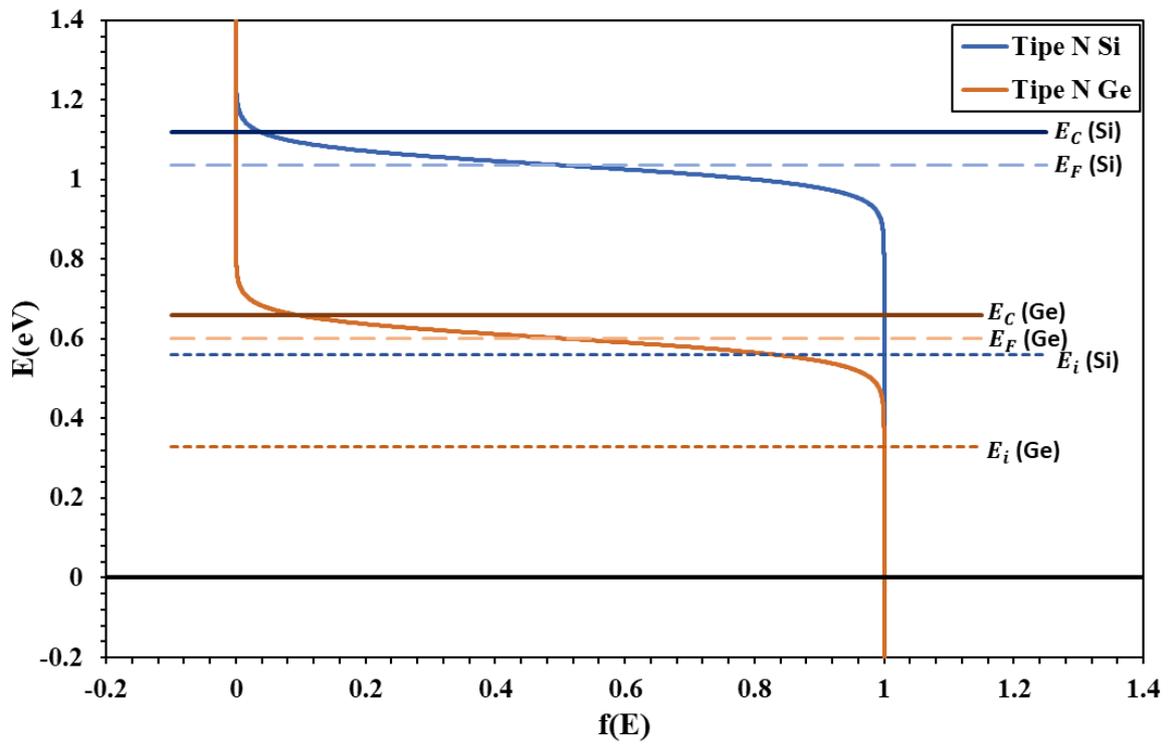
3. Hasil dan Pembahasan

Densitas atom dalam kristal Silikon (Si) atau Germanium (Ge) adalah sekitar 4×10^{22} atom/cm³ [12]. Karena densitas pembawa minimum yang diinginkan dalam transistor adalah 10^{10} hingga 10^{11} cm⁻³, maka probabilitas okupansi yang sangat kecil cukup penting. Diketahui bahwa pada silikon (Si), *bandgap* adalah 1,12 eV. Diasumsikan tingkat Fermi berada di tengah, maka tepi pita akan menjadi 0,56 eV di atas dan di bawah tingkat Fermi. Hasil plot distribusi Fermi-Dirac pada temperatur berbeda menggunakan persamaan (1) ditunjukkan seperti pada Gambar 2. Dapat diamati bahwa, dalam sistem yang terdiri dari N elektron pada temperatur nol Kelvin, semua keadaan yang tersedia ditempati hingga tingkat Fermi. Berkorelasi dengan hal tersebut, elektron pada silikon cenderung berada pada pita valensi yang menyebabkan silikon bersifat sebagai isolator. Kemudian, dapat diamati bahwa semakin tinggi temperatur semakin besar penyimpangan dari tingkat Fermi. Artinya terdapat okupansi yang sangat kecil sehingga menghasilkan densitas pembawa yang signifikan. Oleh sebab itu, terdapat elektron silikon yang berada di pita konduksi pada temperatur kamar (300 K) yang dapat menyebabkan silikon bersifat sebagai konduktor.

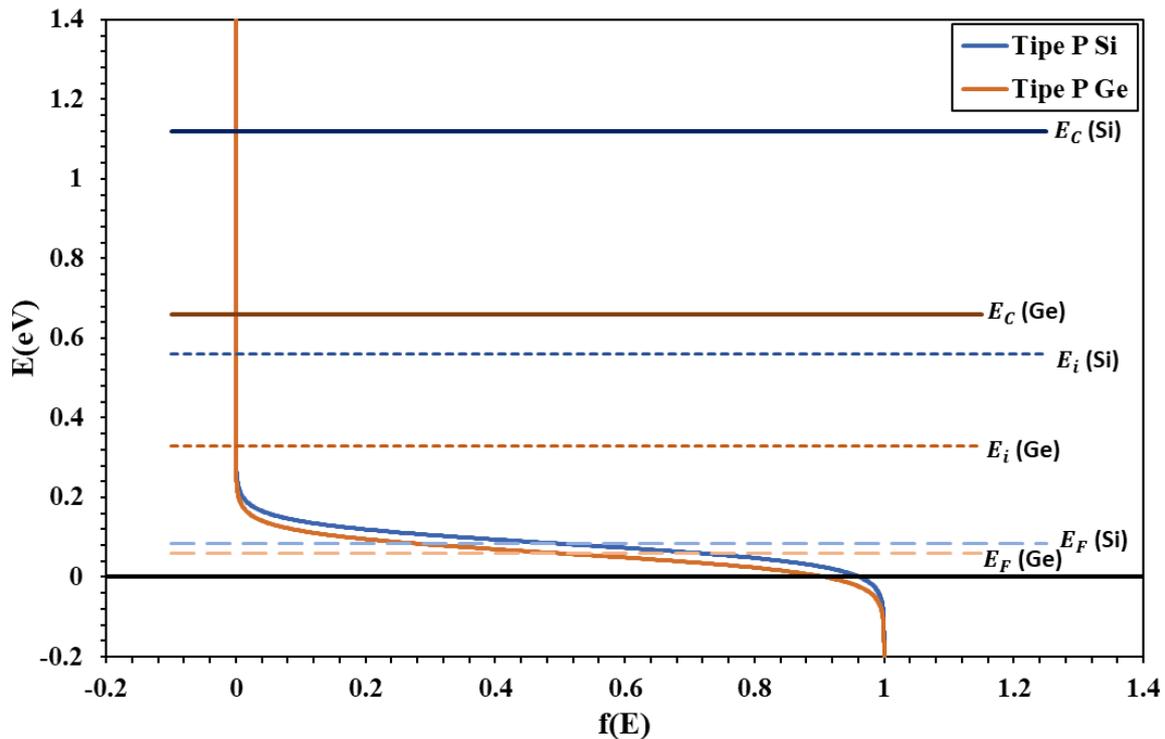
Dengan memanfaatkan persamaan 11 dan data dari tabel 1, diperoleh plot distribusi Fermi-Dirac pada semikonduktor tipe-N (T=300 K) seperti pada Gambar 3. Dapat diamati bahwa setelah melewati tingkat Fermi, pada semikonduktor tipe N, probabilitas keadaan elektron dalam membentuk *hole* cenderung tinggi. Namun, *hole* tersebut dapat dengan mudah menerima elektron sehingga menyediakan cara lain bagi elektron untuk bergerak dan menghantarkan arus. Selain itu, dapat diamati bahwa probabilitas keadaan elektron untuk bergerak menuju pita konduksi sangat kecil. Dengan demikian, eksitasi akan lebih mudah terjadi pada temperatur T=300 K.



Gambar 2. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada temperatur berbeda.



Gambar 3. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada semikonduktor tipe N.



Gambar 4. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada semikonduktor tipe P.

Gambar 4 menunjukkan distribusi Fermi-Dirac pada semikonduktor tipe P ($T=300\text{ K}$), dengan memanfaatkan persamaan 12 dan data dari tabel 1. Dapat diamati bahwa probabilitas keadaan elektron untuk meninggalkan pita valensi dan mengisi tingkat pita konduksi sangat kecil, sehingga pembawa mayoritas di dalam pita valensi adalah *hole-hole* yang dibentuk oleh elektron-elektron, sedangkan pembawa minoritas di dalam pita valensi adalah elektron.

Dapat dibandingkan distribusi Fermi-Dirac pada Silikon dan Germanium. Pada temperatur tersebut, dapat diamati bahwa probabilitas elektron tereksitasi dan *hole* pada Germanium lebih banyak tersedia dibandingkan pada Silikon. Hal ini berdampak pada sifat elektronik Germanium, yaitu dapat menyebabkan pemutusan arus jauh lebih kecil dibandingkan Silikon. Masalah tersebut berkontribusi pada pergeseran progresif dari Germanium ke Silikon sebagai bahan semikonduktor dasar untuk industri transistor[13].

4. Kesimpulan

Probabilitas keadaan elektron dalam pita energi semikonduktor ditentukan oleh distribusi Fermi-Dirac karena elektron dalam semikonduktor adalah fermion. Perhitungan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolah grafik Microsoft Excel dapat menunjukkan dengan baik status keadaan elektron. Pada semikonduktor tipe N, probabilitas keadaan elektron untuk membentuk *hole*

cenderung tinggi sedangkan untuk bergerak menuju pita konduksi sangat kecil sehingga *hole* yang terbentuk dapat dengan mudah menerima elektron hasil eksitasi dan memungkinkan bagi elektron untuk bergerak dan menghantarkan arus. Pada semikonduktor tipe P, probabilitas keadaan elektron untuk mengisi tingkat pita konduksi dan meninggalkan pita valensi sangat kecil sehingga *hole-hole* yang dibentuk oleh elektron-elektron merupakan pembawa mayoritas di dalam pita valensi. Keunggulan bahan Silikon dibandingkan Germanium yaitu pada pemutusan arus sehingga bahan Silikon lebih mendukung fungsi transistor sebagai saklar.

Tata Nama

- f_e distribusi Fermi-Dirac
- k_B konstanta Boltzmann
- T temperatur
- E_F energi Fermi
- E_i energi Intrinsik
- E_c energi di pita konduksi bawah
- E_v energi di pita valensi atas
- E_{Fn} energi Fermi semikonduktor tipe N
- E_{Fp} energi Fermi semikonduktor tipe P
- g densitas keadaan
- n jumlah elektron pada pita konduksi
- p jumlah *hole* pada pita valensi
- N_c densitas keadaan efektif di tepi pita konduksi
- N_v densitas keadaan efektif di tepi pita valensi
- n_i jumlah elektron atau hole intrinsik

Daftar Pustaka

- [1] L. Łukasiak dan A. Jakubowski, "History of Semiconductors," *Journal of Telecommunication and Information Technology*, Vol. 1, pp. 3–9, Jan. 2010.
- [2] M. Akhadi, "Memproduksi Bahan Semikonduktor di Dalam Teras Reaktor Nuklir," *Jurnal Kajian Ilmu dan Teknologi*, Vol 4(1), pp. 90- 97, April 2015.
- [3] R. J. Martín-Palma dan J. M. Martínez-Duart, *Nanotechnology for Microelectronics and Photonics*, Second Edition. Oxford: Elsevier, 2017.
- [4] A. Rahman, "A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors," *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 50-70, 2014.
- [5] Martil, J. M. Martín, S. Garcia, dan G. Gonzalez-Diaz, "Experimental Verification of The Physics and Structure of the Bipolar Junction Transistor," *IEEE Transactions On Education*, Vol. 41, No. 3, pp. 224-228, 1998.
- [6] A. A. Zankawi, "Semiconductors, Diodes, Transistors and Applications," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol 4(1), pp. 147-155, April 2015.
- [7] J. S. Galsin, *Solid State Physics: An Introduction to Theory*. London, UK: Academic Press, 2019.
- [8] D. Hariyanto And S. Permana, "Studi Intensitas Radiasi Menggunakan Survey Meter Berbasis Tabung Geiger M4011 dan Mikrokontroler Arduino Uno," *Prosiding Snips*, P. 7, 2019.
- [9] B. V. Zeghbroeck, "Principles of Semiconductor Devices," Prentice Hall, 2001.
- [10] A. Özdemir, M. M. Aktas, dan M. Siddiqui, "A Demonstration of Statistical Mechanical Distributions," 2018.
- [11] J. Lutz, Ed., *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. Doi: 10.1007/978-3-642-11125-9.
- [12] E. M. Conwellt, "Properties of Silicon and Germanium," *Proceedings of The I.R.E.*, 1327-1337, 1952.
- [13] L. Da F. Costa, "Characterizing Germanium Junction Transistors," *Applied Physics*, Jan. 2018, [Online]. Available: Arxiv:1802.01662.