

## Arus Terobosan Pada Transistor Dwikutub Struktur Hetero Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si Anisotropik Melewati Basis Tergradasi (*Graded Base*)

Lilik Hasanah<sup>1)</sup> dan Khairurrijal<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia,

Jl. Dr. Setiabudhi No 229 Bandung Telp : +62(022)2504548

<sup>2)</sup> Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik Program Studi Fisika, FMIPA-ITB

Jl. Ganesa 10 Bandung 40212, Telp./Fax. : +62(022)2511848

E-mail: [lilikhasanah@upi.edu](mailto:lilikhasanah@upi.edu)

### Abstract

Tunneling current in bipolar transistors Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si anisotropic hetero structure for germanium conditions on a constant basis is not analyzed here. The concentration of germanium in the base which is not constant will result in the potential profile at the base is not flat, but will be graded according to the germanium concentration. Tunneling current calculation is performed semi-analytically and numerically. The calculation result obtained then matched with experimental data. The results show that the results of analytical calculations with results of semi-numerical calculations. While analytical calculations with experimental data only flows from the V<sub>BE</sub> 0.3 to 0.6 V.

**Keywords:** Tunneling current, germanium concentration, anisotropic material, transfer matrix method, hetero structure bipolar transistor

### Abstrak

Arus terobosan di transistor dwikutub struktur hetero Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si anisotropik untuk kondisi germanium pada basis yang tidak konstan dianalisis di sini. Konsentrasi germanium pada basis yang tidak konstan akan mengakibatkan profil potensial pada basis tidak datar, melainkan akan bertingkat sesuai dengan konsentrasi germaniumnya. Perhitungan arus terobosan ini dilakukan secara analitik dan semi-numerik. Hasil perhitungan yang diperoleh kemudian dicocokkan dengan data eksperimen. Hasilnya menunjukkan bahwa hasil perhitungan analitik sama dengan hasil perhitungan semi numerik. Sedangkan perhitungan analitik sama dengan arus dari data eksperimen hanya pada V<sub>BE</sub> 0,3 sampai dengan 0,6 V

**Kata-Kata Kunci:** Arus terobosan, konsentrasi germanium, material anisotropik, metode matriks transfer, transistor dwikutub sambungan hetero

### PENDAHULUAN

Sekarang ini perkembangan divais mikroelektronik berkembang dengan sangat pesat dengan kinerja yang semakin mengagumkan. Peningkatan unjuk kerja divais ini dipicu oleh jumlah transistor yang semakin banyak dalam sebuah *chip* rangkaian terpadu (*integrated circuit*). Kerapatan transistor yang semakin besar akan diperoleh jika ukuran transistor semakin kecil. Usaha pengecilan ukuran transistor diikuti dengan peningkatan unjuk kerjanya suatu saat akan mencapai titik jenuh ketika ukuran transistor tidak dapat diperkecil lagi sedangkan tuntutan peningkatan unjuk kerja tidak berhenti. Oleh karena itu, saat ini, ruang lingkup penelitian material sebagai komponen utama divais diarahkan pada pencarian material baru yang memiliki sifat-sifat unggul yang bersesuaian dengan divaisnya. Hal ini merupakan usaha untuk memenuhi kebutuhan terhadap divais dengan

unjuk kerja tinggi serta biaya produksi yang lebih murah sehingga penggunaannya lebih efisien. Salah satu upaya untuk mendapatkan material baru yang sifat-sifatnya sesuai dengan sifat divaisnya adalah dengan cara melakukan simulasi karakter divais berbasis material baru sehingga dapat diprediksi sifat dari divais tersebut tanpa harus memfabrikasikannya terlebih dahulu. Hal ini tentu akan lebih efisien dan hemat dalam upaya pencarian material baru.

Berkaitan dengan usaha untuk mendapatkan material baru dengan biaya yang lebih murah dan waktu yang lebih efektif maka dalam penelitian ini dilakukan studi analitik dan numerik dari sifat divais berupa kurva arus-tegangan (I-V). Divais yang ditinjau adalah transistor dwikutub sambungan hetero (*heterojunction bipolar transistor/HBT*) Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si anisotropik, yang diharapkan dapat diterapkan pada divais gelombang mikro dan

divais digital kecepatan tinggi. Di sini, persamaan Schrödinger digunakan untuk mengetahui dinamika elektron dalam divais tersebut. Dengan mempertimbangkan bahwa energi kinetik transversal terkopling dengan energi longitudinal elektron, arus terobosan pada transistor dwikutub sambungan hetero Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si anisotropik bergantung pada kecepatan elektronnya.

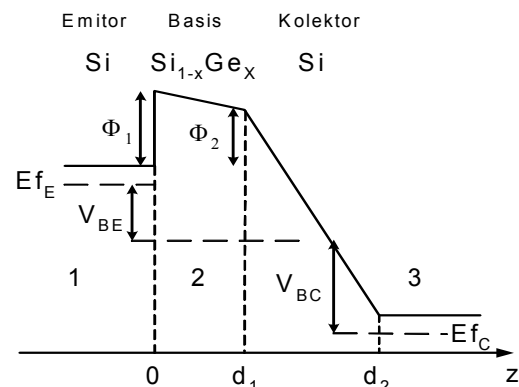
Studi sifat-sifat transistor dwikutub sambungan hetero Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si secara teoritik telah banyak dilakukan. Berbagai model transport pembawa seperti difusi-*drift*, transport-energi, transport-hidrodinamik, dan transport-kuantum dapat digunakan untuk memodelkan divais struktur hetero. Tetapi model yang paling populer digunakan adalah model transport difusi-*drift* [9],[1],[11]. Dengan semakin menyusutnya ukuran divais, efek kuantum menjadi lebih nyata dan harus dikutsertakan dalam perhitungan. Transport difusi-*drift* jauh lebih kecil daripada transport kuantum sehingga transport difusi-*drift* dapat diabaikan dalam perhitungan transport elektron pada divais.

Pernyataan analitik dari terobosan elektron pada sambungan hetero semikonduktor-semikonduktor curam (*abrupt*) dengan asumsi bahwa komponen-komponen longitudinal dan transversal dari gerak elektron adalah terpisah untuk semikonduktor isotropik telah dikerjakan sebelumnya [12],[3]. Demikian pula dengan pembahasan mengenai koefisien transmisi dan waktu terobosan pada semikonduktor isotropik dengan mempertimbangkan energi kinetik tegak lurus dan sejajar permukaan penghalang potensial terkopling untuk keadaan tanpa pemberian tegangan panjar [5], [9]. Pembahasan mengenai terobosan elektron pada struktur hetero anisotropik dengan mengikutsertakan kopling antara energi transversal dan longitudinal dari gerak elektron juga telah banyak dilakukan [4],[7]. Kemudian telah diteliti pula efek kopling energi kinetik tegak lurus-sejajar permukaan penghalang pada batas struktur hetero kabel kuantum [6] dan sumur kuantum. Selain itu, kopling antara komponen-komponen longitudinal dan transversal dari gerak elektron juga diterapkan pada perhitungan *metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor* (MOSFET) [8]. Di sini akan dibahas mengenai arus terobosan pada transistor dwikutub sambungan hetero Si(110)/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(110)/Si(110) n-p-n dengan konsentrasi x pada basis tidak konstan.

## METODE PENELITIAN

Apabila konsentrasi germanium pada basis tidak konstan, akan mengakibatkan profil

potensial pada basis tidak datar, melainkan akan bertingkat sesuai dengan konsentrasi germaniumnya. Semakin besar konsentrasi germanium maka akan semakin kecil ketidakkontinuan pita konduksinya dengan pita konduksi silikon. Berikutnya akan dibahas mengenai arus terobosan pada transistor dwikutub sambungan hetero Si(110)/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(110)/Si(110) n-p-n dengan konsntrasi x pada basis tidak konstan. Konsentrasi germanium yang dipergunakan dalam perhitungan tidak melebihi 50% untuk menjaga agar karakteristik Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> tetap bertahan menyerupai struktur silikon [2]. Profil potensial untuk konsentrasi germanium bervariasi sepanjang basis adalah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Persamaan potensial pada arah sumbu z adalah sebagai berikut



Gambar 1. Profil potensial jika konsentasi germanium pada basis tidak konstan

$$V(z) = \begin{cases} eV_{BE} & \text{for } z \leq 0 \\ \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d_1} z & \text{for } 0 < z < d_1 \\ \Phi_2 - \frac{\Phi_2 + eV_{BC}}{d_2 - d_1} z & \text{for } d_1 < z < d_2 \\ -eV_{BC} & \text{for } z \geq d_2 \end{cases} \quad (1)$$

dimana  $\Phi_1$  dan  $\Phi_2$  masing-masing adalah ketidakkontinuan pita akibat konsentarsi germanium pada basis dekat emitor dan kolektor. Perhitungan arus terobosan untuk profil potensial menurun-menurun, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1, dikerjakan dengan dua metoda yaitu secara analitik dan matriks transfer. Pada metoda analitik, massa efektif sepanjang basis dianggap konstan. Sedang pada metoda matriks transfer, massa efektif sepanjang basis bervariasi sesuai dengan konsentrasi germaniumnya.

Perhitungan arus secara analitik dikerjakan dengan cara menyelesaikan persamaan Schrödinger untuk potensial Persamaan (1). Diperoleh solusi persamaan Schrödinger sebagai berikut

$$\psi_1(z) = \begin{pmatrix} Ae^{ik_1z} + Be^{-ik_1z} \\ x < 0 \end{pmatrix} e^{-i\gamma_1z} e^{-i(k_x x + k_y y)}, \quad (2.a)$$

$$\psi_2(z) = \begin{pmatrix} CA(\xi(z)) + DB(\xi(z)) \\ 0 < x < d_1 \end{pmatrix} e^{-i\gamma_2z} e^{-i(k_x x + k_y y)}, \quad (2.b)$$

$$\psi_3(z) = \begin{pmatrix} EA(\zeta(z)) + FB(\zeta(z)) \\ d_1 < x < d_2 \end{pmatrix} e^{-i\gamma_3z} e^{-i(k_x x + k_y y)}, \quad (2.c)$$

$$\psi_4(z) = \begin{pmatrix} Ge^{ik_3z} \\ x > d_2 \end{pmatrix} e^{-i\gamma_4z} e^{-i(k_x x + k_y y)}, \quad (2.d)$$

dimana

$$k_1 = \left( \frac{2m_o}{\hbar^2} \frac{1}{\alpha_{zz1}} (E_z - V_{BE}) \right)^{1/2}, \quad (3.a)$$

$$\xi(z) = \left( \frac{2m_o}{\hbar^2} \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{d_1} \frac{1}{\alpha_{zz2}} \right)^{1/3} \left( -z + (\Phi_2 - E_z) \frac{d_1}{\Phi_2 - \Phi_1} - \frac{1}{2} \frac{V_e^2 m_o}{d_1} (\Phi_2 - \Phi_1) \sum_{i,j \in \{x,y\}} \frac{1}{\beta_{ij,l}} (\beta_{ij,l} - \beta_{ij,II}) \right), \quad (3.b)$$

$$\zeta(z) = \left( \frac{2m_o}{\hbar^2} \frac{\Phi + eV_{BC}}{d_2 - d_1} \frac{1}{\alpha_{zz,l}} \right)^{1/3} \left( -z + (\Phi - E_z) \frac{d_2 - d_1}{\Phi + eV_{BC}} \right), \quad (3.c)$$

$$k_3 = \left\{ \frac{2m_o (E_z + eV_{BC})}{\hbar^2} \frac{1}{\alpha_{zz,1}} \right\}^{1/2}. \quad (3.d)$$

Dengan menerapkan fungsi gelombang pada Persamaan (2) akan diperoleh sistem persamaan linier berikut

$$A + B = CAi(\xi(0)) + DBi(\xi(0)), \quad (4.a)$$

$$ik_1 \alpha_{zz1} (A - B) = p_1 (CAi'(\xi(0)) + DBi'(\xi(0))), \quad (4.b)$$

$$[CAi(\xi(d_1)) + DBi(\xi(d_1))] e^{i\gamma_2 d_1} = [EAi(\zeta(d_1)) + FBi(\zeta(d_1))] e^{i\gamma_1 d_1}, \quad (4.c)$$

$$\alpha_{zz2} [CAi'(\xi(d_1)) + DBi'(\xi(d_1))] e^{i\gamma_2 d_1} = \alpha_{zz1} [EAi'(\zeta(d_1)) + FBi'(\zeta(d_1))] e^{i\gamma_1 d_1}, \quad (4.d)$$

$$EAi(\zeta(d_2)) + FBi(\zeta(d_2)) = Ge^{ik_3 d_2}, \quad (4.e)$$

$$p_2 [EAi'(\zeta(d_2)) + FBi'(\zeta(d_2))] = \alpha_{zz1} ik_3 Ge^{ik_3 d_2}, \quad (4.f)$$

dimana

$$p_1 = -\alpha_{zz2} \left( \frac{2m_o}{\hbar^2} e \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d_1} \frac{1}{\alpha_{zz2}} \right)^{1/3}, \quad (4.g)$$

$$p_2 = -\left( \frac{2m_o}{\hbar^2} e \frac{\Phi_2 + eV_{BC}}{d_2 - d_1} \frac{1}{\alpha_{zz1}} \right)^{1/3}. \quad (4.h)$$

Dari Persamaan (4) maka akan diperoleh koefisien transmisi seperti di bawah ini

$$\frac{G}{A} = \frac{2C_{11} C_{12} a_1 \exp(-ik_3 d_2) \exp(i(\gamma_1 - \gamma_2) d_2)}{C_1 (C_2 C_3 + C_4 C_5) - C_6 (C_7 C_8 + C_9 C_{10})}, \quad (6)$$

dimana

$$C_1 = \alpha_{zz1} ik_1 Ai(\xi(0)) + p_1 Ai'(\xi(0)), \quad (7.a)$$

$$C_2 = \alpha_{zz2} Ai(\xi(d_1)) Bi(\xi(d_1)) - \alpha_{zz2} Ai(\xi(d_1)) Bi'(\xi(d_1)), \quad (7.b)$$

$$C_3 = p_2 Bi'(\zeta(d_2)) - ik_3 Bi(\zeta(d_2)), \quad (7.c)$$

$$C_4 = \alpha_{zz1} Bi(\xi(d_1)) Bi(\zeta(d_1)) - \alpha_{zz2} Bi(\xi(d_1)) Bi'(\zeta(d_1))$$

$$C_5 = p_2 Ai'(\zeta(d_2)) - ik_3 Ai(\zeta(d_2)), \quad (7.d)$$

$$C_6 = \alpha_{zz1} ik_1 Bi(\xi(0)) + p_1 Bi'(\xi(0)), \quad (7.e)$$

$$C_7 = \alpha_{zz2} Ai(\zeta(d_1)) Ai(\xi(d_1)) - \alpha_{zz1} Ai(\zeta(d_1)) Ai'(\xi(d_1)), \quad (7.f)$$

$$C_8 = p_2 Bi'(\zeta(d_2)) - ik_3 Bi(\zeta(d_2)), \quad (7.g)$$

$$C_9 = \alpha_{zz1} Ai(\xi(d_1)) Bi(\zeta(d_1)) - \alpha_{zz2} Ai(\xi(d_1)) Bi'(\zeta(d_1)), \quad (7.h)$$

$$C_{10} = p_2 Ai'(\zeta(d_2)) - ik_3 Ai(\zeta(d_2)), \quad (7.i)$$

$$C_{11} = p_2 \{ Ai(\zeta(d_2)) Bi'(\zeta(d_2)) - Bi(\zeta(d_2)) Ai'(\zeta(d_2)) \}, \quad (7.j)$$

$$C_{12} = \alpha_{zz2} Ai(\xi(d_1)) Bi'(\xi(d_1)) - \alpha_{zz2} Ai(\xi(d_1)) Bi(\xi(d_1)), \quad (7.k)$$

Transmitansi elektron dihitung dengan menggunakan Persamaan di bawah ini

$$T = \left( \frac{G}{A} \right)^* \frac{G}{A}, \quad (8)$$

dengan  $\left( \frac{G}{A} \right)^*$  adalah konjugat dari koefisien

transmisi  $\frac{G}{A}$ . Arus persatuan luas (rapat arus) dari emitor ke kolektor [8] adalah

$$J = \int_0^{\infty} \frac{qm_o}{2\pi^2 \hbar^3} \frac{1}{\alpha_{zz1}} T(E_z) \left( \int_0^{\infty} f_E(E) - f_C(E) dE_{xy} \right) dE \quad (9)$$

dengan  $T(E_z)$  adalah transmitansi elektron yang merupakan fungsi dari energi longitudinal  $E_z$  sedangkan  $E_{xy}$  adalah energi transversal. Fungsi distribusi fermi pada kontak emitor dan kolektor masing-masing adalah

$$f_E(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_{FE})/kT]} \quad (10)$$

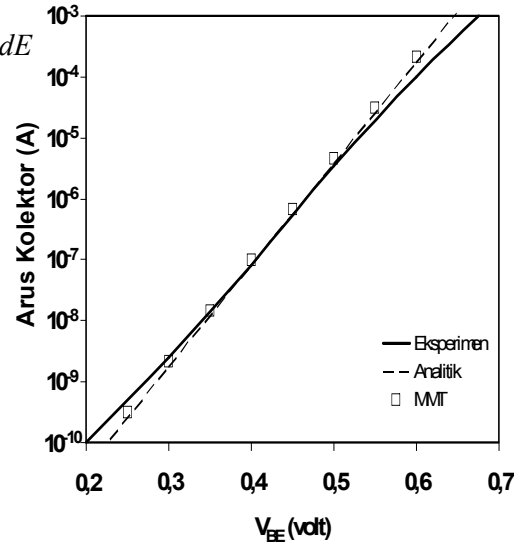
dan

$$f_C(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_{FC})/kT]}, \quad (11)$$

yang menyatakan probabilitas bahwa keadaan energi elektron  $E$  ditempati.  $E_{FE}$  dan  $E_{FC}$  adalah energi fermi emitor dan kolektor, secara berurutan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menunjukkan arus terobosan transistor dwikutub sambungan hetero Si(100)/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(100)/Si(100) dari data eksperimen (Prinz, 1992) dan hasil perhitungan secara analitik dan MMT untuk konsentrasi germanium bervariasi sepanjang basis. Ketebalan penghalang Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> adalah 50 nm dan konsentrasi germanium pada basis dekat emitor 0% dan meningkat sampai 20% pada basis dekat kolektor. Luas emitor adalah 62 x 62 μm<sup>2</sup> dan tegangan V<sub>BC</sub> 0 V. Kecepatan elektron yang digunakan pada perhitungan analitik dan MMT masing-masing adalah 22,5 x 10<sup>5</sup> m/s dan 24 x 10<sup>5</sup> m/s. Tampak bahwa, arus kolektor hasil perhitungan analitik sama dengan hasil perhitungan menggunakan MMT. Perbedaan dengan data eksperimen terjadi pada tegangan V<sub>BE</sub> di bawah 0,3 V dan di atas 0,5 V.



Gambar 2. Arus terobosan transistor dwikutub sambungan hetero Si(100)/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(100)/Si(100) dengan konsentrasi germanium pada basis dekat emitor 0% dan pada basis dekat kolektor 20%.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Perhitungan arus untuk konsentrasi germanium tidak konstan sepanjang basis dilakukan secara analitik dan numerik. Hasil perhitungan arus terobosan transistor dwikutub sambungan hetero Si(100)/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(100)/Si(100) yang diperoleh kemudian dicocokkan dengan data eksperimen. Hasilnya menunjukkan bahwa hasil perhitungan analitik sama dengan hasil perhitungan numerik. Sedangkan, perhitungan analitik sama dengan arus dari data eksperimen hanya pada V<sub>BE</sub> 0,3 sampai dengan 0,6 V.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Hänsch, W. 1991. *The Drift Diffusion Equation and Its Application in MOSFET Modeling*. Springer. New York.
- [2]. Iyer, S.S., Patton, G. L., Stork, J. M. C., Meyerson, B. S. and Harame, D. L. 1989. Heterojunction Bipolar Transistor using Si-Ge Alloys. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 36. 2043-2064.
- [3]. Khairurrijal, Noor, F. A. and Sukirno. 2005. Electron Direct Tunneling Time in Heterostructure with Nanometer-Thick Trapezoid Barriers. *Solid-State Electronics*. 49. 923-927
- [4]. Kim, K.-Y. and Lee, B. 1998. Transmission Coefficient of an Electron through a Heterostructure Barrier Grown on Anisotropic Materials. *Physical Review B*. 58, 6728-6731.

- [5]. Lee, B. 1993. Electron Tunneling Time through a Heterostructure Potential Barrier. *Supperlattices and Microstructures*. 14, 295-298
- [6]. Lee, B. and Kim, K.-Y. 1998. Effect of Parallel-Perpendicular Kinetic Energy Coupling under Effective Mass Approximation at Heterostructure Boundaries in a Quantum Wire. *Journal of Applied Physics*. 84. 5593-5596
- [7]. Lim, K. -Y., and Lee, B. 2001. Wigner Function Formulation in Anisotropic Semiconductor Quantum Wells. *Physical Review B*. 64, 115304 (1-8)
- [8]. Mao, L. .2007. The Effects of the Injection-Channel Velocity on the Gate Leakage Current of Nanoscale MOSFETs, *IEEE Electron Device Letters*. 28. 161-163.
- [9]. Paranjape, V.V. 1995. Transmission Coefficient and Stationary-Phase Tunneling Time of an Electron through a Heterostructure. *Physical Review B*. 52. 10 740-10 743.
- [10]. Pejcinovic, B., Kay, L. E., Tang, T.-W. and Navon, D. H. 1989. Numerical Simulation and Comparison of Si BJT's and Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> HBT. *IEEE Electron Device Letters*. 36: 2129-2136 .
- [11]. Pejcinovic, B., Tang, T.-W., Lee, S-C. and Navon, D. H. 1992. A Numerical Study of Performance Potential of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> Pseudomorphic Heterojunction Bipolar Transistors. *IEEE Electron Device Letters*. 39. 2021-2028.
- [12]. Searles, S., Pulfrey, D. L., and Kleckner, T. C. 1997. Analytic Expressions for the Tunnel Current at Abrupt Semiconductor-Semiconductor Heterojunctions. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 44. 1851-1856.

