

SIMULASI KUANTUM TRANSISTOR EFEK MEDAN MULTI GERBANG (NWFET)

Syamsudin Nur Wahid*, Rizal Maulana Kusmayadi
*Universitas Islam Balitar
Jl. Majapahit 12A Blitar
Corresponding author: Snowhaatt@gmail.com

Makalah ini membahas metode numerik untuk simulasi kuantum satu dan dua dimensi dari nanowire multigate transistor efek medan. Perangkat dimodelkan berdasarkan teori massa efektif dan formalisme fungsi Green non-ekuilibrium. Simulasi terdiri dari solusi Poisson persamaan tiga dimensi, persamaan Schrodinger dua dimensi pada penampang lintang dan persamaan transport satu dimensi. Dijelaskan detail teknik numerik untuk setiap langkah-langkah simulasi.

Kata Kunci: Simulasi, Transistor, kuantum

1 PENDAHULUAN

Transistor adalah blok pembangun fundamental dalam perangkat elektronika. Pada komputasi chip silikon, jumlah transistor mencerminkan jumlah relatif kekuatan pemrosesan chip. Sejak 1970-an jumlah transistor yang dibangun didalam sebuah chip silikon telah berkembang dari hanya beberapa ratus hingga lebih dari dua milyar transistor pada sebuah chip tunggal. Perangkat elektronik sekarang ini memerlukan lebih banyak transistor pada setiap chip, juga memerlukan chip semikonduktor yang lebih kecil, lebih hemat energi, dan lebih hemat biaya.

Transistor arsitektur konvensional yang digunakan untuk 40 tahun terakhir tidak dapat lagi mengikuti permintaan ini. Transistor saat ini berbasis pada sambungan, yang dibentuk dengan menyambungkan dua potongan silikon dengan polaritas yang berbeda pada sisi-sisinya. Kontroler bekerja dengan cara mengaktifkan dan mematikan sambungan arus dalam perangkat. Penempatan banyak transistor pada sebuah chip membutuhkan metode fabrikasi yang lebih tepat, yang akan sangat meningkatkan biaya chip.

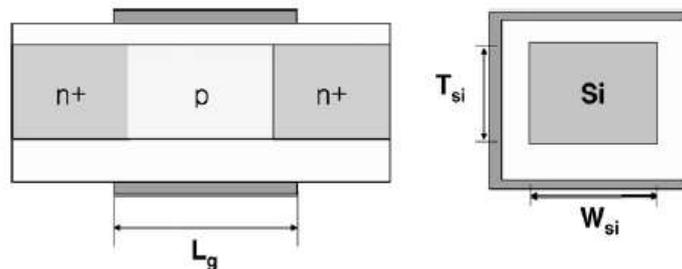
Nanowire transistor efek medan multi gerbang (NWFET), yang memiliki beberapa gerbang disekitar kanal silikon nanowire, adalah kandidat yang menjanjikan untuk transistor generasi berikutnya dan telah menarik perhatian baru-baru ini. Selain penekanan efektif efek kanal pendek karena peningkatan kekuatan gerbang, NWFET multi gerbang menunjukkan penggerak arus yang baik dan juga kompatibel dengan prosesor CMOS konvensional. Makalah ini bertujuan untuk mencari pemodelan yang akurat dan perhitungan berdasarkan mekanika kuantum untuk menilai batas kinerjanya, karena tampang - melintang dari NWFET multigate diharapkan luasnya menjadi beberapa nanometer saja.

Pada makalah ini dibangun simulasi NWFET menggunakan mekanika kuantum dengan berdasarkan teori masa efektif dan *non-equilibrium green functions (NEGF)* dengan menggunakan persamaan *schrodinger* sebagai basis awal perhitungan. dimana

pada makalah ini penyelesaian masalah persamaan schrodinger 3D akan di bagi menjadi 1D dan 2D.

1.1 Pendekatan

Pada makalah ini yang digunakan sebagai Perangkat simulasi adalah FET nanowire tiga dimensi dengan sumber/cerat, kanal, dan beberapa gerbang. Sumber/cerat dimodelkan sebagai timbal semi-infinite yang didoping n-silikon berat, dengan doping tipikal konsentrasi 10^{20} cm^{-3} . Kanal silikon bisa bertipe-n atau tipe-p, dan gerbang diasumsikan logam dengan *mid-gap work function*.



Gambar 1. device Perangkat simulasi adalah FET nanowire tiga dimensi dengan sumber/cerat

Hamiltonian Masa efektif dari *device* yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 1 dapat ditulis sebagai :

$$H^{3D}\psi(x, y, z) = E\Psi(x, y, z) \quad (1)$$

Dimana nilai H^{3D} adalah :

$$H^{3D} = -\frac{\hbar^2}{2m_x^*} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{m_y^*} \frac{\partial}{\partial y} \right) - \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{m_z^*} \frac{\partial}{\partial z} \right) + V(x, y, z), \quad (2)$$

Dimana nilai m_x^* m_y^* m_z^* adalah nilai masa efektif pada arah x, y,z dan V adalah *conduction band edge profil* yang nilainya sebesar :

$$V(x, y, z) = E_c^0(y, z) - \phi(x, y, z), \quad (3)$$

E_c^0 adalah setengah pita konduksi pada silikon atau oksida, dan $\phi(x,y,z)$ adalah level potensial vakum. $\Psi(x,y,x)$ yang merupakan persamaan Schrodinger 3D dapat diekspansikan sebagai berikut :

$$\Psi(x, y, z) = \sum_m \phi_m(x)\psi_m(y, z; x), \quad (4)$$

Persamaan tersebut dapat dipecah menjadi persamaan schrodinger 2 D dan 1D. Dimana $\Psi_m(x,y,x)$ adalah fungsi eigen ke-m dari Schrodinger 2D

$$H^{2D}\psi_m(y, z; x) = E_m(x)\psi_m(y, z; x), \quad (5)$$

Dengan nilai H^{2D} adalah :

$$H^{2D} = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{m_y^*(y, z)} \frac{\partial}{\partial y} \right) - \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{m_z^*(y, z)} \frac{\partial}{\partial z} \right) + V(y, z; x), \quad (6)$$

Persamaan schrodinger 2D digunakan untuk menghitung fungsi gelombang pada penampang lintang. Nilai $\phi_m(x)$ Merupakan fungsi Eigen dari Schrodinger 1D

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m_x^*} \frac{d^2}{dx^2} + E_m(x) \right\} \phi_m(x) = E_{\phi_m}(x), \quad (7)$$

Schrodinger 1D digunakan untuk menghitung fungsi gelombang *direct transport*.

Persamaan schrodinger 1D pada persamaan (7) dapat diselesaikan dengan menggunakan metode NEGF. Pertama kita tulis persamaan Green 1D. G_m untuk sub pita m.

$$G_m = [E - H_m^{1D} - \Sigma_{S,m} - \Sigma_{D,m}]^{-1}, \quad (8)$$

Dimana :

$$H_m^{1D} = -\frac{\hbar^2}{2m_x^*} \frac{d^2}{dx^2} + E_m(x), \quad (9)$$

Σ_{sm} dan Σ_{dm} adalah *source (s) dan drain (D) self-energies* dari sub pita m lalu dengan menggunakan persamaan green didapat rapat muatan pada 1D sebesar :

$$n_m^{1D}(x) = \frac{1}{2\pi\Delta x} \int dE (f_S G_m \Gamma_{S,m} G_m^\dagger + f_D G_m \Gamma_{D,m} G_m^\dagger), \quad (10)$$

Dimana Δx adalah jarak kisi . sedangkan Γ_{sm} dan Γ_{Dm} didefinisikan sebagai :

$$\Gamma_{S,m} = i(\Sigma_{S,m} - \Sigma_{S,m}^\dagger) \quad (11)$$

$$\Gamma_{D,m} = i(\Sigma_{D,m} - \Sigma_{D,m}^\dagger) \quad (12)$$

Dan $f_{S(D)}$ adalah fungsi distribusi Fermi dari sumber dan cerat yang diberikan sebesar :

$$F_{S(D)}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F^{S(D)})/k_B T}}, \quad (13)$$

Jika rapat muatan 1D telah diketahui, dapat ditentukan rapat muatan 3D. sebesar

$$n^{3D}(x, y, z) = \sum_m n_m^{1D}(x) |\psi_m(y, z; x)|^2, \quad (14)$$

Dengan menggunakan persamaan poisson kita bisa mendapatkan nilai potensialnya

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = -\frac{q}{\epsilon} (N_D(x, y, z) - n^{3D}(x, y, z)) \quad (15)$$

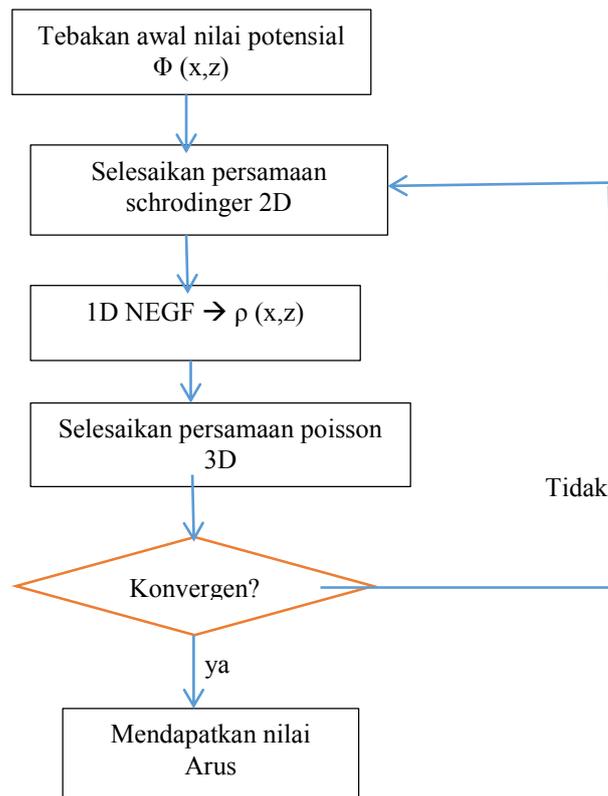
Dengan $N_D(x, y, z)$ adalah fungsi profil sebaran doping. Persamaan dapat diselesaikan setelah iterasi hingga konvergen dan mendapatkan potensial yang nilainya konstan sehingga kita bisa mendapatkan distribusi muatan dari transistor tersebut. Dengan menggunakan fungsi Landauer-Büttiker kita bisa mendapatkan nilai dari arus

$$I_d = \frac{2q}{h} \sum_m \int dE T_m(E) (f_S(E) - f_D(E)), \quad (16)$$

Dengan *probabilitas tranmisi* untuk subpita m diberikan sebesar :

$$T_m(E) = Tr(\Gamma_{S,m} G_m \Gamma_{D,m} G_m^\dagger), \quad (17)$$

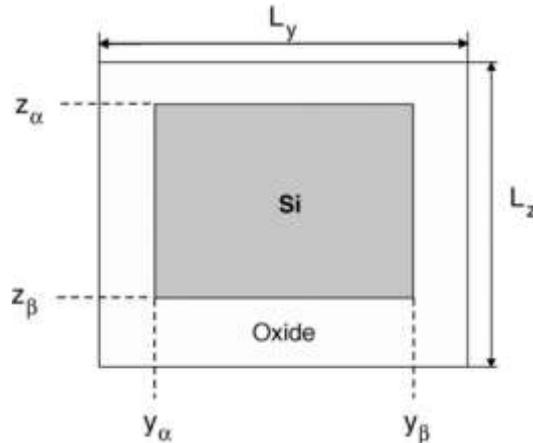
2 METODE



Gambar 2. Flowchart simulasi

Langkah-langkah simulasi penentuan sebaran potensial dan arus yang melalui NWFET dapat dideskripsikan pada Gambar 2. Flowchart simulasi Gambar 2. Terlebih dahulu ditentukan sebaran nilai potensial pada tampang melintang yang akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan schrodinger 2D. kemudian diselesaikan NEGF 1D untuk memperoleh

rapat muatan. Penggabungan persamaan 1D dan 2D menghasilkan persamaan Poisson 3D. Jika setiap persamaan menghasilkan nilai yang konvergen, maka didapatkan nilai arus, jika tidak, perhitungan diulangi dengan nilai potensial yang baru. Ukuran NWFET yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampang melintang dari NWFET

Pada makalah ini ukuran NWFET yang digunakan adalah Lebar: $L_y = 5 \text{ nm}$, Tebal: $L_z = 5 \text{ nm}$, Mesh: $15/\text{nm}$, Tebal oksida: $10/15 \text{ nm}$, $y_\alpha = 10/15 \text{ nm}$, $y_\beta = 5-10/15 \text{ nm}$, $z_\alpha = y_\beta$, $z_\beta = y_\beta$, semua perhitungan menggunakan MATLAB.

Masa efektif pada tampang melintang diberikan oleh :

- Untuk arah y dimana :

$$m_y^*(y, z) = m_y^*(y) \quad \text{untuk } 0 \leq z \leq L_z, \quad (18)$$

Maka didapat :

$$m_y^*(y, z) = \begin{cases} m_{*y}^*(y) & \text{jika } z_\alpha \leq z \leq z_\beta \\ m_{ox}^* & \text{jika } z < z_\alpha \text{ atau } z > z_\beta \end{cases} \quad (19)$$

- Untuk arah z dimana :

$$m_z^*(y, z) = m_z^*(z) \quad \text{untuk } 0 \leq y \leq L_y, \quad (20)$$

Maka didapat :

$$m_z^* = \begin{cases} m_{Si,z}^* & \text{jika } z_\alpha \leq z \leq z_\beta \\ m_{ox}^* & \text{jika } z < z_\alpha \text{ atau } z > z_\beta \end{cases} \quad (21)$$

Kita set konsentrasi doping: $10^{20} \text{ cm}^{-3} = 10^{-1} \text{ nm}^{-3}$. Massa efektif si: $m_{*si}^* = 0.19 m_0$ (arah transversal(z, y)), $m_0 = 9.11 \times 10^{-31}$ = massa diam elektron, Massa oksida: $m_{*ox}^* = 0.18 m_0$ (Zeghbrock, 1997)

Dengan memasukan nilai M_y dan M_z ke persamaan schrodinger 2D (persamaan (6)) lalu gunakan basis set

$$|K\rangle = \chi_i(y)\zeta_j(z), \quad (22)$$

Maka didapat schrodinger pada arah y dan z sebagai berikut

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{m_y^*} \frac{d}{dy} \right) + V(y) \right\} \chi_i(y) = \epsilon_i \chi_i(y), \quad (23)$$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m_z^*} \frac{d}{dz} \right) + V(z) \right\} \zeta_j(z) = \epsilon_j \zeta_j(z), \quad (24)$$

Dengan nilai potensial pada arah y dan z sebagai berikut :

$$V(y) = \frac{1}{z_\beta - z_\alpha} \int_{z_\alpha}^{z_\beta} dz V(y, z), \quad (25)$$

$$V(z) = \frac{1}{y_\beta - y_\alpha} \int_{y_\alpha}^{y_\beta} dy V(y, z), \quad (26)$$

Dengan nilai Potensial awal pita konduksi adalah $V_{yz} = 0.2 \times 1.6 \times 10^{-19}$ V (silikon) dan $V_{yz}(\text{oksida}) = 4\text{eV}$ lebih tinggi dari $V_{yz}(\text{silikon})$ Fungsi eigen $\chi_i(y)$ dan $\zeta_j(z)$ dipecahkan dengan metode beda hingga 1D tiga titik alur maju. Maka Diperoleh matrix

$$\chi_i = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n] \quad (27)$$

$$\zeta_i = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_n] \quad (28)$$

Dengan basis set :

$$|K\rangle = \chi_i \zeta_i = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [y_1] \\ [y_2] \\ \dots \\ [y_n] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [z_1] \\ [z_2] \\ \dots \\ [z_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 z_1 \\ y_2 z_1 \\ \dots \\ y_1 z_n \\ y_n z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \dots \\ k_{nn} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Dengan mengalikan basis tersebut dengan persamaan schrodinger 2D maka didapat :

$$H^{2D}|K\rangle = -\zeta_j(z) \frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{m_y^*(y)} \frac{d\chi_i(y)}{dy} \right) - \chi_i(y) \frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m_z^*(z)} \frac{d\zeta_j(z)}{dz} \right) + V(y, z) \chi_i(y) \zeta_j(z)$$

$$H^{2D}|K\rangle = (\epsilon_i + \epsilon_j + V(y, z) - V(y) - V(z))|K\rangle. \quad (30)$$

Kalikan persamaan diatas dengan basis $\langle L|$. Jika basis $|K\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$, maka basis $\langle L| = [a \ b \ c]$ sehingga didapat :

$$H_{LK}^{2D} = \epsilon_L \delta_{LK} + \langle L|V(y, z) - V(y) - V(z)|K\rangle, \quad (31)$$

Dengan ;

$$\epsilon_L = \epsilon_i + \epsilon_j, \quad (32)$$

$$H_{LK}^{2D} = E_m(x)\psi_m(z, y; x) = \langle L|Ex|K\rangle = E_x \langle L|K\rangle \quad (33)$$

Maka didapat nilai energi, yaitu

$$E_x = \frac{H_{LK}^{2D}}{\langle L|K\rangle} \quad (34)$$

Dari persamaan diatas kita bisa mendapatkan nilai Fungsi gelombang arah transversal $\psi_{(y,z)=LK}$, Energi eigen arah longitudinal E_x

2.1 Non Equilibrium Green Function

Fungsi Green seperti pada persamaan (8) bisa didapat dari melakukan inversi matriks

$$G_m^{-1}(E) = \begin{bmatrix} d_{1,1}(E) & t & 0 & \dots \\ t & d_{2,2}(E) & t & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & t & d_{N_x-1, N_x-1}(E) & t \\ \dots & 0 & t & d_{N_x, N_x}(E) \end{bmatrix}, \quad (35)$$

Dimana :

$$d_{n,n} = \begin{cases} E - (2t + E_m(1) + \Sigma_S(E)) & \text{jika } n = 1 \\ E - (2t + E_m(n)) & \text{jika } n = 2, \dots, N_x - 1, \\ E - (2t + E_m(N_x) + \Sigma_D(E)) & \text{jika } n = N_x \end{cases} \quad (36)$$

Dengan N_x adalah jumlah mesh pada arah X dan

$$t \equiv \frac{\hbar^2}{2m_x^* \Delta x^2}, \quad (37)$$

Dimana Δx adalah jarak antar mesh pada arah X. Sedangkan $\Sigma_{S,m}$ (source) dan $\Sigma_{D,m}$ (drain) adalah energi sumber dan cerat yang dapat diperoleh melalui persamaan :

$$\begin{aligned} \Sigma_S(E) &= \frac{1}{2} \left(E - 2t - E_m(1) - i \sqrt{(4t + E_m(1) - E)(E - E_m(1))} \right), \\ \Sigma_D(E) &= \frac{1}{2} \left(E - 2t - E_m(N_x) - i \sqrt{(4t + E_m(N_x) - E)(E - E_m(N_x))} \right), \end{aligned} \quad (38)$$

Dari persamaan diatas dapat dihasilkan persamaan Green dengan memasukan persamaaan (36),(37),(38) kedalam persamaan (8). Didalam Fungsi Green untuk sub pita m dan energi E berupa matrix 2D. $G_m(E)=[x,x]$ untuk Setiap sub pita ada beberapa nilai E. $G_m=[E,x,x]$

Fungsi Green untuk sub pita berbeda-beda. $G=G_m(E)(x)=[m,E,x,x]$ sedangkan Hasilnya untuk fungsi green berupa array matrix 4D $[m,[E,[x,x]]]$ pada makalah ini Diambil 2 buah nilai $m=1,2$ karena yang berperan adalah pita valensi dan pita konduksi dengan Nilai E bervariasi antara 0 s/d E_{max} .

Untuk menentukan nilainya dari fungsi green, Ambil nilai $E_{max}=E_x+E_y+E_z$ untuk setiap sub pita. Diskritisasi nilai E menjadi N bagian dengan rentang $dE=E_{max}/N$ (misal $N=50$) lalu kita Hitung konstanta t dan fungsi Σ_S, Σ_D untuk setiap nilai E . Setelah itu, kita Tentukan matrix dnE untuk setiap nilai E masukan ke persamaan (35) maka kita dapat Hasilnya berupa array 4 dimensi, yaitu 2 dimensi spasial (x), satu dimensi energi dan satu dimensi sub pita.

2.2 Penentuan rapat muatan

Untuk menentukan rapat muatan pertama kali kita tentukan energy Fermi pada *source* dan *drain* berdasarkan konsentrasi doping yaitu sebesar :

$$E_F = \left(\frac{(hc)^2}{8mc^2} \right) \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} n^{2/3} \quad (39)$$

Kita tentukan kerapatan doping di sumber dan cerat adalah 10^{10} cm^{-3} dan 10^{20} cm^{-3} sehingga Kerapatan elektron $n_s=10^{16} \text{ m}^{-3}$ dan $n_d=10^{26} \text{ m}^{-3}$. Energi fermi masing-masing = 1.692414 eV dan 0.078554 eV dari persamaan (39) kita bisa menentukan tingkat distribusi fermi untuk setiap tingkatan energi setelah mendapatkan tingkat energy baik untuk *source* ataupun *drain* maka kita bisa menentukan nilai dari $\Gamma_{S,m}$ dan $\Gamma_{D,m}$ dengan memasukan nilai energy tersebut ke persamaan (11) dan (12).

Setelah nilai $\Gamma_{S,m}$ dan $\Gamma_{D,m}$ didapatkan, kita bisa memasukannya ke persamaan (10) untuk mendapatkan nilai rapat muatan pada 1D. Pada komputasinya perhitungan nilai rapat muatan didapat dengan cara mengubah bentuk integral menjadi sigma $\int \rightarrow \Sigma$ dengan diskritisasi $dE n_m^{1d}$ yang merupakan matrix 2 dimensi (m,x), hasil dari penjumlahan matrix 4 dimensi (m,E,(x,x)). Maka dimensi spasial (x) perlu direduksi menjadi 1 dimensi saja.

Lalu setelah nilai rapat muatan pada 1D didapat kita bisa mendapatkan nilai rapat muatan pada 3D dengan cara memasukan nilai rapat muatan 1d kedalam persamaan berikut :

$$n^{3D}(x, y, z) = \sum_m n_m^{1D}(x) |\psi_m(y, z; x)|^2, \quad (40)$$

Untuk mempermudah masalah kita hitung untuk 2 dimensi saja (x,y) dengan fungsi gelombang ψ_y . Anggap ψ_y sama pada setiap x.

2.3 Persamaan Poisson

Untuk mendapatkan nilai potensial Φ Masukkan sebaran densitas muatan yang diperoleh dari NEGF ke persamaan poisson

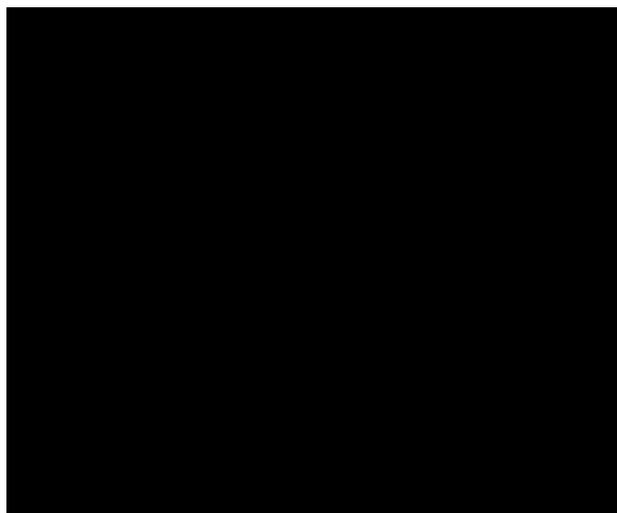
$$\nabla^2 \phi^k = -\frac{q}{\epsilon} \left(N_D - n_{3D}^k e^{(\phi^k - \phi^{k-1})/k_B T} \right), \quad (41)$$

Dengan syarat batas:

- Pada perbatasan gerbang, $\phi(x,y,z) = Vg$
- Selain itu, $d\phi/dn = 0$.
- Untuk Kondisi pada perbatasan silikon dan oksida adalah :

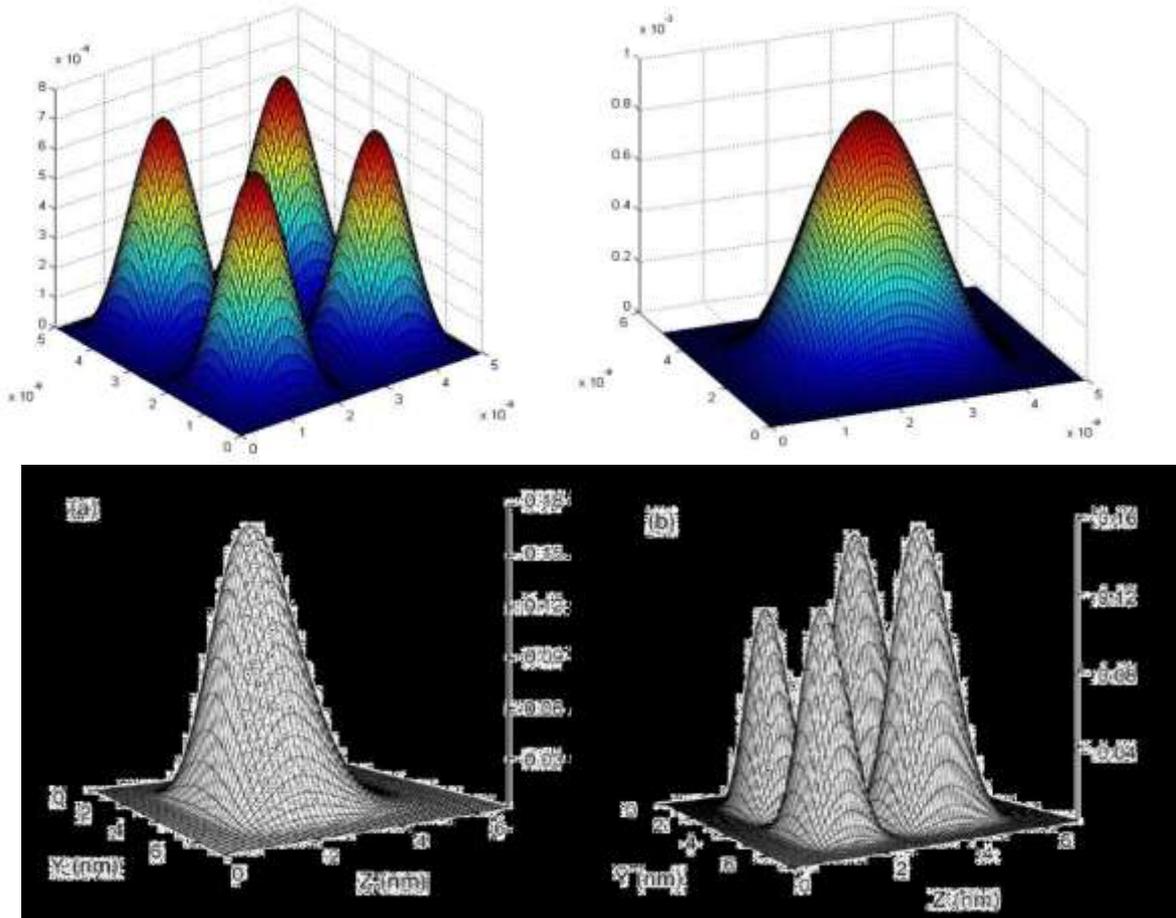
$$\epsilon_{ox} \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{ox} = \epsilon_{si} \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{si} \quad (42)$$

Persamaan Poisson memerlukan konstanta muatan elektron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$), permitivitas silikon dan oksida ($\epsilon_{si} = 10^{-10}$; $\epsilon_{ox} = 3.5 \times 10^{-11}$) (htt1) dan $k_B = 1.3 \times 10^{-23}$, ambil $T = 300$. atau gunakan $k_B T = 0.026$. Persamaan Poisson pada makalah ini dikerjakan dengan metode beda-hingga lima titik pada titik sentral dalam mesh persegi seperti yang ditunjukkan pada *Gambar 4*. Iterasi dilakukan sebanyak 150 kali. Diterapkan syarat batas setiap kali iterasi. Pola distribusi potensial dikembalikan lagi ke langkah awal untuk iterasi selanjutnya. Perhitungan menggunakan MATLAB dengan menggunakan prosesor AMD A6 memerlukan 30 menit dalam sekali putaran iterasi.



Gambar 4. Gambaran massa Material penyusun transistor

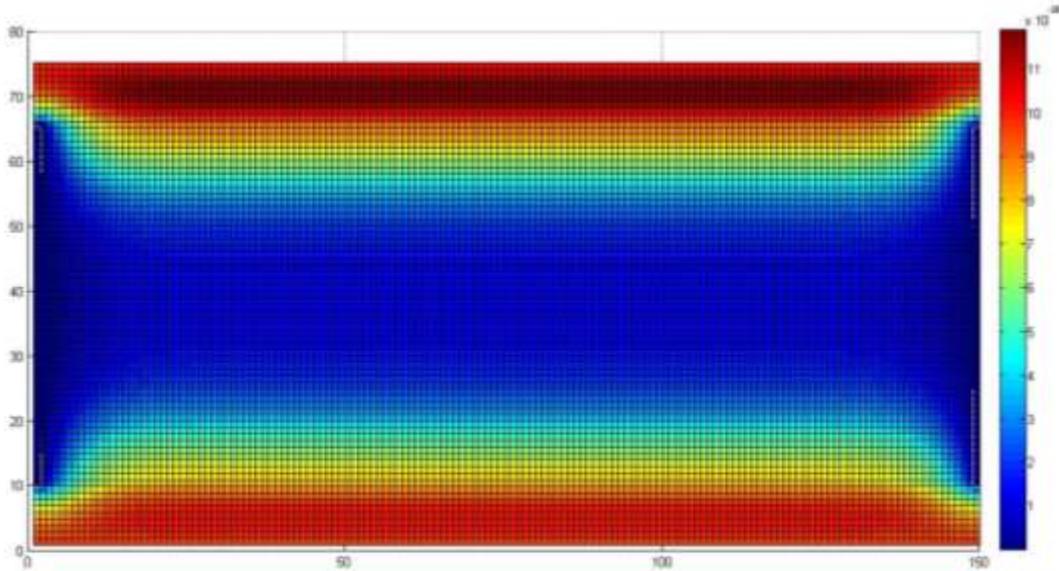
3 HASIL DAN KESIMPULAN



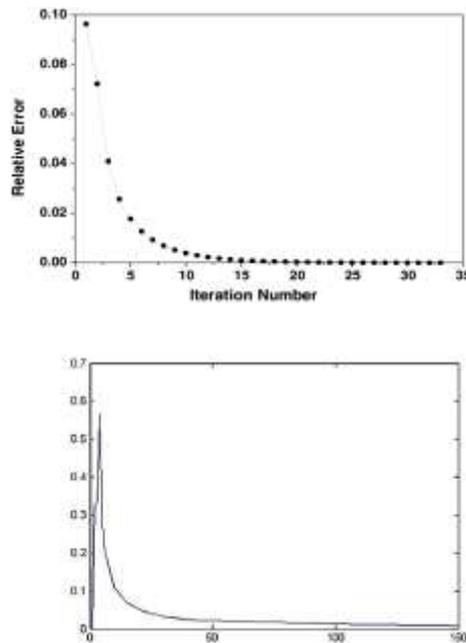
Gambar 5. Fungsi gelombang pada penampang lintang (cross section) untuk modulus pertama dan keempat. Atas adalah Gambar yang didapat dari hasil simulasi (berwarna) sedangkan gambar bawah adalah gambar yang terdapat pada paper referensi (hitam putih) (Shin, 2008).

Dari hasil simulasi didapat gambaran fungsi gelombang pada lintang penampang atau *Cross section* seperti terlihat pada Gambar 5 sesuai yang didapat oleh Shin dalam (Shin, 2008). Sedangkan untuk pola sebaran distribusi potensial pada transistor didapat pada Gambar 6 dimana pola tersebut didapat dari tebakan awal pertama dengan iterasi sebanyak 150 kali di subrutin persamaan poisson. Pada putaran kedua pola yang terjadi sudah tidak konvergen lagi sehingga tidak didapat nilai sebaran potensial. Hal tersebut bisa disebabkan oleh beberapa hal yaitu bisa disebabkan tebakan awala sudah langsung mendekati nilai sebenarnya atau ketidak mampuan software yang digunakan dalam hal ini MATLAB karena pada referensi (Shin, 2008) software yang digunakan adalah LAPACK sedangkan untuk eror didapat error yang relatif sama untuk setiap iterasi jika dibandingkan dengan yang terdapat di paper referensi Gambar 7. Dengan mendapat gambaran error yang hampir sama kita bisa memastikan apa yang kita dapat tersebut sudah konvergen karena gambaran eror tersebut adalah gambaran khusus yang terjadi pada proses iterasi beda hingga persamaan poisson yang telah mencapai iterasi yang

konvergen. Oleh sebab itu apa yang dilakukan dalam makalah ini bisa dikatakan mendekati nilai yang didapat pada jurnal referensi (Shin, 2008).



Gambar 6. Sebaran pola distribusi potensial yang didapat dari simulasi



Gambar 7. Error yang didapat yang merupakan typical convergen behavior dari NEGF.

4 DAFTAR PUSTAKA

(n.d.). Retrieved from <http://inmmc.org/ftp/material/silicon-electrical.html>

Shin, M. (2008). Three-dimensional quantum simulation of multigate nanowire field effect transistor. *Mathematics and Computers in Simulation*(79), 1060-1070. Retrieved from www.sciencedirect.com

Syamsudin Nur Wahid, Rizal Maulana Kusmayadi. 2017. Simulasi Kuantum Transistor Efek Medan Multi Gerbang (NWFET). *Jurnal Qua Teknika*, (2017), 7(1):53-64.

Zeghbroeck, B. J. (1997). *Effective mass in semiconductors*. Retrieved 11 20, 2013,
from <http://ecee.colorado.edu/%7Ebart/book/contents.htm>