

# Simulasi Karakteristik Elektron dan *Hole* pada Daerah Pertemuan Dioda Silikon

Iwan Sumirat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro - Fakultas Teknik – Universitas Ibn Khaldun Bogor  
Jl. KH Sholeh Iskandar km.2 Kedung Badak, Tanah Sareal, Kota Bogor

Email: iwan.sumirat@ft.uika-bogor.ac.id

## ABSTRAK

**Simulasi Karakteristik Elektron dan *Hole* pada Daerah Pertemuan Dioda Silikon.** Telah dilakukan simulasi mengenai karakteristik elektron dan hole pada daerah pertemuan dioda silikon. Simulasi dilakukan menggunakan metoda *finite element*. Tiga kuantitas hasil simulasi yakni *carrier density*, *current density*, dan *maximum electric field* dipilih untuk dianalisa. Kurva-kurva hasil simulasi menunjukkan tren yang relatif sama dengan kurva-kurva teoritis. Secara kuantitatif terdapat perbedaan antara perhitungan simulasi dengan perhitungan berdasarkan teori. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan karena nilai-nilai parameter simulasi yang digunakan belum merupakan nilai-nilai optimal. Selain itu, pada proses simulasi, penyelesaian persamaan-persamaan transport semikonduktor dilakukan secara aproksimasi menggunakan metoda *finite element* dimana akurasi hasilnya sangat ditentukan oleh ukuran elemen yang digunakan.

**Kata-kata kunci:** simulasi, elektron, *hole*, daerah pertemuan, dioda, silikon

## ABSTRACT

*Characteristics of electron and hole at junction area of silicon diode have been simulated using finite element based method. Three parameters i.e. carrier density, current density, and maximum electric field are chosen to be investigated. Curves from simulation show similar trend compare with theoretical ones. Quantitatively, there are discrepancies between simulation results and theoretical values. The discrepancies are due to the determination of parameters used in this simulation which have not been their optimal values. The discrepancies also caused by the nature of the simulation itself which solve the transport equations of semiconductor approximately using finite element method in which accuracy is strongly depend on the size of element chosen.*

**Key words:** simulation, electron, hole, junction area, diode, silicon

## 1 PENDAHULUAN

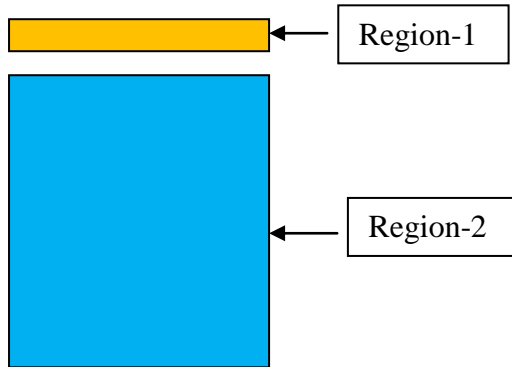
Memahami dengan baik karakteristik divais elektronik seperti dioda, transistor, dan IC merupakan hal yang sangat penting bagi para mahasiswa teknik Elektro khususnya yang akan mengambil divais elektronik sebagai spesialisasinya. Berdasarkan pengalaman memberikan kuliah di kelas, transfer materi melalui kuliah normatif saja dirasakah masih belum optimal. Penjelasan pada perkuliahan biasanya hanya memaparkan aspek-aspek teori serta penurunan dan aplikasi persamaan-persamaan transport semikonduktor. Nampaknya, penjelasan teoritis tersebut akan lebih mudah dipahami dan dibayangkan oleh para mahasiswa bila disertai dengan visualisasi dari proses mikroskopis yang dialami elektron atau *hole* saat berinteraksi dengan atom-atom bahan semikonduktor atau pengamatan melalui model, bagaimana respon dari elektron atau *hole* pada bahan semikonduktor terhadap variasi medan listrik eksternal. Visualisasi, khususnya untuk mengamati karakter elektron dan *hole* pada divais elektronik dapat dilakukan

melalui simulasi atau pemodelan. Makalah ini membahas simulasi karakteristik elektron dan *hole* pada daerah pertemuan dioda silikon menggunakan metoda *finite element* yang diimplementasikan dalam paket aplikasi PC1D versi 5.9 [1]-[2]. Jastifikasi terhadap hasil-hasil perhitungan simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil-hasil simulasi dengan perhitungan-perhitungan teoritis yang umumnya dibahas pada buku-buku standar mengenai teori semikonduktor [3]-[5]. Tujuan dari makalah ini adalah untuk menunjukkan bahwa proses belajar mengajar mata kuliah Divais Semikonduktor dapat lebih dioptimalkan dengan bantuan simulasi dan pemodelan mengenai perilaku pembawa muatan listrik pada divais-divais yang sedang dipelajari.

## 2 METODE SIMULASI

Model divais yang dianalisa berupa kristal tunggal (*single crystal*) silikon yang didoping secara tidak merata (*nonuniform*). Kristal tunggal

silikon dibagi menjadi dua daerah secara asimetri, masing-masing dinamakan Region-1 dan Region-2. Model divais tersebut diberi bias maju 0.8 volt. Skema model divais pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 1. Total tebal model divais 25  $\mu\text{m}$ , dimana tebal Region-1 adalah 1  $\mu\text{m}$  dan Region-2 adalah 24  $\mu\text{m}$ .



Gambar 1. Skema model divais yang disimulasikan

Nilai-nilai parameter untuk model divais ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai-nilai tersebut berfungsi sebagai parameter input pada aplikasi PC1D dan digunakan untuk melakukan perhitungan menggunakan metoda *finite element* untuk menyelesaikan persamaan-persamaan diferensial transport semikonduktor. Pada simulasi ini ukuran elemen yang digunakan adalah ukuran *default* dari PC1D versi 5.9. Nilai-nilai yang diperoleh dari perhitungan simulasi kemudian dianalisa dan dibandingkan dengan perhitungan teoritis.

Tabel 1. Nilai-nilai parameter pada model divais

Parameters	Values
Device	Area: 1 mm <sup>2</sup> , Emitter contact: enabled, Base contact: enabled
Region-1	Thickness: 1 $\mu\text{m}$ , Material: silicon, dielectric constant: 11.9, band gap: 1.124 eV, N-type background doping: $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ , Bulk recombination: 0.2495 $\mu\text{s}$
Region-2	Thickness: 24 $\mu\text{m}$ , Material: silicon, dielectric constant: 11.9, band gap: 1.124 eV, P-type background doping: $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ , Bulk recombination: 0.0175 $\mu\text{s}$
Excitation	Mode: steady state, Temperature: 300 K, Base circuits: 0, Light sources: disabled

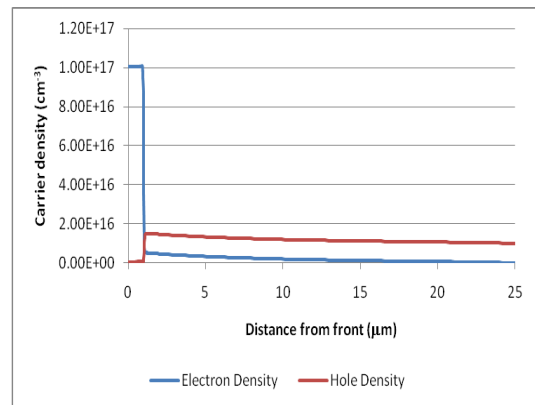
### 3 HASIL SIMULASI

Tiga kuantitas dipilih untuk merepresentasikan karakteristik elektron dan *hole* sebagai pembawa muatan pada model dioda silikon. Ketiga kuantitas tersebut adalah *carrier density*, *current density*,

dan *maximum electric field* pada posisi di sekitar daerah pertemuan (*junction area*).

#### A. Carrier Density

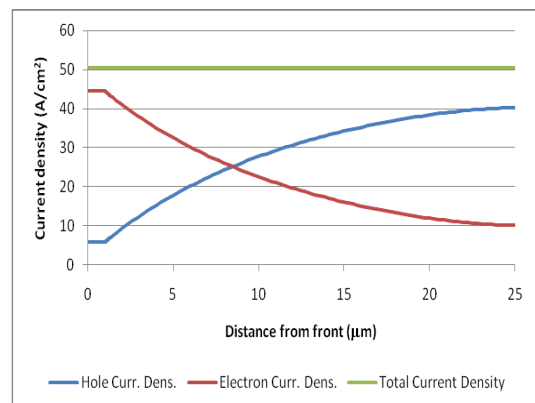
Hasil perhitungan simulasi *carrier density* yang masing-masing ditampilkan dengan warna biru untuk elektron dan warna merah untuk *hole* ditunjukkan pada Gambar 2. *Carrier density* digambarkan atau diukur dari mulai tepi Region-1. Posisi perpotongan *electron density* dengan *hole density* berada pada koordinat (1.035  $\mu\text{m}$ ,  $8.458 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ).



Gambar 2. Kurva *carrier density* diukur dari tepi Region-1

#### B. Current Density

Kurva *current density* untuk elektron (merah), *hole* (biru), dan total *current density* yang merupakan jumlah dari *electron density* dan *hole density* (hijau) ditunjukkan pada Gambar 3. Masing-masing *current density* diukur dari tepi bawah Region-1 yang berbatasan dengan tepi atas Region-2 (lihat Gambar 1).

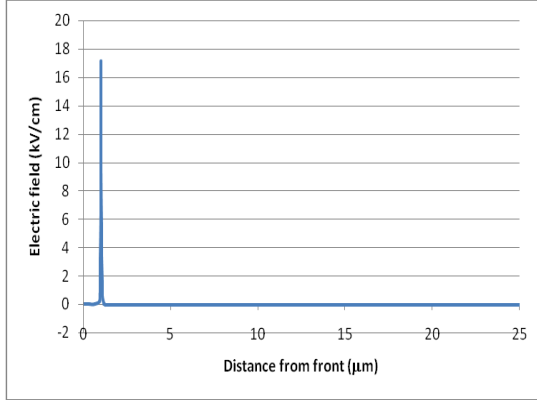


Gambar 3. Kurva *current density* diukur dari tepi Region-1

Posisi perpotongan antara *hole* dan elektron *current density* berada pada koordinat (8.505  $\mu\text{m}$ , 25.26 A/cm<sup>2</sup>). Dari kurva pada Gambar 3 terlihat bahwa sepanjang Region-1 masing-masing *current density* untuk elektron dan *hole* berharga konstan.

#### C. Maximum Electric Field

Kuwa *electric field* terhadap jarak dari tepi Region-1 ditunjukkan pada Gambar 4. Dari kurva hasil simulasi tersebut besarnya *electric field* maksimum sebesar 17.14 kV/cm. Sedangkan puncak *electric field* ini berada pada jarak 1.001  $\mu\text{m}$  dari tepi Region-1.



Gambar 4. Kurva *electric field* pada daerah pertemuan

## 4 BAHASAN

### A. Carrier Density

Pada posisi di sekitar daerah pertemuan, perkalian antara pembawa muatan elektron ( $n$ ) dan *hole* ( $p$ ) dapat ditentukan dengan persamaan:

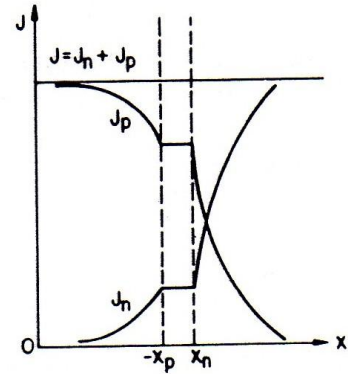
$$n \cdot p = N_i^2 e^{eV/kT} \quad (1)$$

dimana  $N_i$  menyatakan pembawa muatan intrinsik silikon,  $e$  adalah muatan elementer,  $V$  potensial elektrostatik sepanjang daerah pertemuan,  $k$  adalah konstanta Boltzmann, dan  $T$  merupakan temperatur semikonduktor. Dengan menggunakan nilai-nilai konstanta dan parameter yang sesuai, diperoleh bahwa:  $n \cdot p = 3.03 \times 10^{30}/\text{cm}^6$ . Dari kurva pada Gambar 2 diperoleh bahwa pada jarak 1.035  $\mu\text{m}$ , electron density  $n = 9.51 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ , dan *hole* density  $p = 8.45 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ , sehingga dari hasil simulasi diperoleh bahwa  $n \cdot p = 8.08 \times 10^{31}/\text{cm}^6$ . Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara hasil simulasi dengan hasil prediksi teori. Hal ini kemungkinan disebabkan karena penentuan nilai-nilai parameter untuk model divais belum merupakan nilai-nilai optimal. Pada simulasi kali ini hanya parameter ketebalan Region-1 dan Region-2 saja yang divariasikan. Penyebab pasti perbedaan nilai  $E_{\text{max}}$  ini belum dapat dijelaskan secara ilmiah pada makalah ini. Oleh karena itu pada simulasi-simulasi berikutnya akan dicoba untuk memvariasikan parameter-parameter lain

sehingga dapat ditentukan dengan tepat parameter mana yang sangat berpengaruh terhadap current density dioda silikon dan berapa nilai optimal parameter tersebut sehingga hasil simulasi akan mendekati prediksi teori.

### B. Current Density

Gambar 4 menunjukkan kurva teoritis *current density* pada posisi di sekitar daerah pertemuan sebuah dioda [3].



Gambar 4. Kurva teoritis current density di sekitar daerah pertemuan dioda

Bentuk kurva teoritis ini berlaku umum untuk semua jenis kristal semikonduktor, sehingga dapat digunakan sebagai referensi bagi hasil simulasi. Pada sisi  $n$ , *current density* dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$J_p = -eD_p \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_{x_n} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} (e^{eV/kT} - 1) \quad (2)$$

Sedangkan pada sisi  $p$ , *current density* dihitung dengan persamaan:

$$J_n = -eD_n \left. \frac{\partial n_p}{\partial x} \right|_{-x_p} = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} (e^{eV/kT} - 1) \quad (3)$$

$D_n$ ,  $D_p$  masing-masing menyatakan koefisien difusi untuk elektron dan *hole*.  $L_n$  dan  $L_p$  didefinisikan sebagai berikut:

$L_{n,p} \equiv \sqrt{D_{n,p} \tau_{n,p}}$  dimana  $\tau_n$  dan  $\tau_p$  masing-masing adalah waktu rekombinasi untuk elektron dan *hole*.

Pada makalah ini perbandingan kuantitatif antara hasil simulasi dan prediksi teori tidak dilakukan. Jastifikasi hasil simulasi hanya dilakukan secara kualitatif. Dari bentuk kurva pada Gambar 3 dan 4 terlihat bahwa mulai dari daerah pertemuan kemudian bergerak ke arah kanan, baik

kurva hasil simulasi maupun prediksi teori memperlihatkan tren yang relatif sama. Adanya perbedaan tren kurva mulai dari daerah pertemuan ke arah kiri disebabkan karena pada kurva teoritis digunakan divais kristal tunggal simetri antara daerah  $n$  dan  $p$ . Sedangkan pada model divais simulasi tebal bagian  $n$  jauh lebih kecil dibanding daerah  $p$ .

### C. Maximum Electric Field

Secara teoritis, kuat medan listrik maksimum pada daerah sambungan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$E_{\max} = \frac{eN_d W^2}{8k\epsilon_0} \quad (4)$$

dimana  $N_d$  menyatakan densitas atom donor,  $W$  adalah lebar lapisan muatan,  $k$  adalah konstanta dielektrik silikon, dan  $\epsilon_0$  menyatakan permitivitas listrik di ruang hampa. Lebar lapisan muatan  $W$  dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$W = \left[ \frac{12k\epsilon_0 V_g}{eN_d} \right] \quad (5)$$

Pada persamaan (5),  $V_g$  merupakan gradien potensial listrik yakni potensial elektrostatik sepanjang daerah pertemuan dioda yang didefinisikan dengan:

$$V_g = \frac{2kT}{3e} \ln \left[ \frac{N_d^2 k\epsilon_0 kT}{8e^2 N_i^2} \right] \quad (6)$$

Dengan memasukan nilai-nilai konstanta universal serta parameter-parameter yang digunakan pada simulasi, diperoleh nilai-nilai  $V_g = 410$  mV,  $W = 0.032$   $\mu\text{m}$ , dan  $E_{\max} = 19.4$  kV/cm. Dari kurva pada Gambar 4 diperoleh bahwa nilai  $E_{\max} = 17.14$  kV/cm.

Perbedaan nilai  $E_{\max}$  hasil simulasi dan perhitungan teoritis disebabkan karena pemilihan ketebalan masing-masing Region. Dari proses simulasi diperoleh bahwa bila Region-2 nilainya dinaikan maka nilai  $E_{\max}$  simulasi akan mendekati nilai teoritisnya. Hal ini sesuai dengan teori bahwa kuat medan listrik sensitif terhadap perubahan posisi.

## 5 SIMPULAN

Simulasi karakteristik elektron dan *hole* khususnya *carrier density*, *current density*, dan *electric field* pada daerah pertemuan dioda silikon telah dilakukan menggunakan metoda *finite elemen*. Secara kualitatif kurva-kurva hasil simulasi menunjukkan tren yang relatif sama dengan kurva-kurva teoritis. Meskipun secara

kuantitatif ada perbedaan antara hasil simulasi dengan perhitungan teori, dapat disimpulkan bahwa visualisasi karakteristik *carrier* pada semikonduktor, melalui simulasi atau pemodelan dapat digunakan untuk membantu memberikan pemahaman yang lebih baik terhadap penjelasan teoritis kepada para mahasiswa atau para praktisi yang sedang mempelajari *solid state devices*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Bpk. Asep Suheri, S.T., M.T. atas diskusi dan masukan-masukan teknisnya mengenai simulasi dan modeling divais elektronik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] PC1D Version 5: 32-bit Solar Cell Modeling on Personal Computers, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, Sep-Oct 1997, pp.207- 210
- [2] Paul A. Basore, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 37(2) 337 (1990)
- [3] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley and Sons, Inc, New York, 1981.
- [4] S.O. Kasap, *Principle of Electronics Materials and Devices*, 2<sup>nd</sup>.ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [5] S.R. Rio dan M. Iida, *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*, Pradya Paramita, Jakarta, 1982.