

# **SIMULASI PENGARUH KONSENTRASI DOPING DAN FRAKSI MOL GERMANIUM TERHADAP BANDGAP NARROWING PADA HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR Si-Ge MENGUNAKAN MATLAB**

**Muhidin<sup>1</sup>, Iwan Sumirat<sup>2</sup>, Fithri Muliawati<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> Program Studi Teknik Elektro

Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jl KH. Soleh Iskandar km 2, Bogor

2 BATAN

muhidin@uika-bogor.ac.id

## **ABSTRAK**

**SIMULASI PENGARUH KONSENTRASI DOPING DAN FRAKSI MOL GERMANIUM TERHADAP BANDGAP NARROWING PADA HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR Si-Ge MENGGUNAKAN MATLAB.** HBT SiGe (*Heterojunction Bipolar Transistor* Silikon-Germanium) merupakan transistor yang dirancang untuk dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Pada HBT SiGe, kinerja transistor ini dipengaruhi oleh perbedaan *bandgap* antara bahan Si dan SiGe. Penyempitan *bandgap* (*bandgap narrowing*) pada SiGe ( $\Delta E_g$ ) dipengaruhi oleh fraksi mol Ge yang ditambahkan pada Si. Selain terjadi karena penambahan Ge pada Si, penyempitan *bandgap* bahan SiGe juga terjadi jika bahan SiGe diberi konsentrasi *doping* yang tinggi (*heavy doping*). Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh konsentrasi doping dan fraksi mol Ge terhadap *bandgap* narrowing, arus dan frekuensi *cut-off*. Dilakukan simulasi dengan menggunakan MATLAB, dengan memvariasikan parameter konsentrasi doping basis NB =  $5 \times 10^{18}$  sampai  $1 \times 10^{20}$ , konsentrasi doping emitor NE =  $5 \times 10^{17}$  sampai  $5 \times 10^{18}$ , dan fraksi mol Ge ( $x$ ) 0.15 sampai 0.25 terhadap model matematis yang digunakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan fraksi mol Ge dari 0.15 menjadi 0.25 meningkatkan  $\Delta E_g$  sebesar 1.4 kali, kenaikan arus kolektor sebesar 22 kali, dan menaikkan frekuensi *cut-off* sebesar 1.12 kali. Penambahan konsentrasi doping dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  meningkatkan  $\Delta E_g$  sebesar 1.6 kali, menurunkan arus kolektor sebesar 4.3 kali, dan menurunkan frekuensi *cut-off* sebesar 1.7 kali. Penambahan konsentrasi doping emitor dari  $5 \times 10^{17}$  menjadi  $5 \times 10^{18}$  menyebabkan meningkatnya arus kolektor sebesar 1.2 kali dan meningkatkan frekuensi *cut-off* sebesar 1.4 kali.

**Kata-kata kunci:** HBT SiGe, konsentrasi doping, fraksi mol Ge, arus, frekuensi *cut-off*.

**ABSTRACT-- SIMULATION OF THE EFFECT OF DOPING CONCENTRATION AND GERMANIUM MOLE FRACTION ON BANDGAP NARROWING IN THE HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR Si-Ge USING MATLAB.** HBT SiGe (*Heterojunction Bipolar Transistor Silicon-Germanium*) is a transistor designed to work at high frequencies. In HBT SiGe, the performance of this transistor is affected by the difference in *bandgap* between Si and SiGe materials. The *bandgap* narrowing of SiGe ( $\Delta E_g$ ) is affected by the mole fraction of Ge added to Si. Besides occurring due to the addition of Ge to Si, the narrowing of the *bandgap* of SiGe materials also occurs when the SiGe material is given high doping concentrations (*heavy doping*). To find out how much influence doping concentration and mole fraction of Ge have on *bandgap* narrowing, current and *cut-off* frequency. Simulations were carried out using MATLAB, by varying the parameters of the base doping concentration NB =  $5 \times 10^{18}$  to  $1 \times 10^{20}$ , the emitter doping concentration NE =  $5 \times 10^{17}$  to  $5 \times 10^{18}$ , and the mole fraction of Ge ( $x$ ) 0.15 to 0.25 for the mathematical model used. The simulation results show that the addition of the mole fraction of Ge from 0.15 to 0.25 increases  $\Delta E_g$  by 1.4 times, increases the collector current by 22 times, and increases the *cut-off* frequency by 1.12 times. The addition of the doping concentration from  $5 \times 10^{18}$  to  $10^{20}$  increased  $\Delta E_g$  by 1.6 times, decreased the collector current by 4.3 times, and decreased the *cut-off* frequency by 1.7 times. The addition of emitter doping concentration from  $5 \times 10^{17}$  to  $5 \times 10^{18}$  causes an increase in collector current by 1.2 times and an increase in the *cut-off* frequency by 1.4 times.

**Key words:** HBT SiGe, doping concentration, Ge mole fraction, current, *cut-off* frequency.

# 1 PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pengiriman data dan komunikasi *wireless* yang semakin pesat, membutuhkan divais yang mampu bekerja pada daerah frekuensi tinggi yang pada kisaran puluhan bahkan ratusan GHz. Disain dan fabrikasi berbagai material dan divais untuk keperluan tersebut terus dikembangkan. Divais yang paling signifikan perkembangannya adalah transistor. *HBT SiGe (Heterojunction Bipolar Transistor Silikon-Germanium)* merupakan transistor yang dirancang untuk dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Pada *HBT SiGe*, kinerja transistor ini dipengaruhi oleh perbedaan *bandgap* antara bahan Si dan SiGe. *Bandgap* bahan SiGe ini lebih sempit dibanding bahan Si[1,2].

Penyempitan *bandgap (bandgap narrowing)* pada SiGe dipengaruhi oleh fraksi mol Ge yang ditambahkan pada Si. Semakin tinggi fraksi mol Ge yang ditambahkan pada Si, semakin sempit *bandgap* SiGe[1,2]. Selain terjadi karena penambahan Ge pada Si, penyempitan *bandgap* bahan SiGe juga terjadi jika bahan SiGe diberi konsentrasi *doping* yang tinggi (*heavy doping*)[3]. Penyempitan *bandgap* akan berpengaruh terhadap konsentrasi muatan pembawa intrinsik (*intrinsic carrier*) pada *HBT SiGe*. Penurunan jumlah muatan pembawa intrinsik akan mempengaruhi penguatan arus dan respon frekuensi dari transistor tersebut.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 HBT (Hetero Junction Bipolar transistor)

semikonduktor yang mempunyai *bandgap* yang berbeda digabungkan, sedangkan *homojunction* adalah sambungan yang terbentuk oleh bahan yang memiliki *bandgap* yang sama. Dengan demikian *HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)* adalah transistor bipolar yang emitor dan basisnya terbuat dari bahan semikonduktor yang mempunyai *bandgap* yang berbeda. Konsep *heterojunction* ini pertama kali dikemukakan oleh Shockley dan Kroemer pada tahun 50-an (Shockley merupakan pemegang paten untuk *heterojunction*). Menurut Kroemer penguatan arus *HBT* dapat diatur oleh perbedaan *bandgap* antara emitor dan basis. Penguatan arus dapat ditingkatkan dengan menggunakan emiter yang mempunyai *bandgap* lebar atau basis yang mempunyai *bandgap* sempit[4].

Kedua bahan semikonduktor yang mempunyai *bandgap* berbeda, akan terjadi diskontinuitas energi pada persambungannya. Sambungan yang terbentuk dapat berupa sambungan *aburpt* atau *graded*. Sambungan *aburpt* terjadi jika perubahan dari satu bahan ke bahan lainnya terjadi secara tiba-tiba, sedangkan sambungan *graded* terjadi jika perubahan dari bahan satu ke bahan lainnya terjadi secara perlahan-lahan. Keduanya terjadi karena bentuk sebaran *mole fraction* yang berbeda, bentuk sebaran *mole fraction (x)* untuk sambungan *aburpt* adalah *uniform* disetiap daerah, sedangkan pada sambungan *graded* sebaran *mole fraction (x)* berbeda disetiap daerah[1].

### 2.2 Bandgap Narrowing

Parameter bahan yang paling signifikan yang akan ditentukan dalam simulasi *HBT SiGe* adalah penyempitan celah pita (*bandgap narrowing*) yang disebabkan oleh penggabungan fraksi mol (*x*) Ge. Sejumlah model matematis berbeda telah diajukan[6]. Dalam tugas akhir ini akan dibahas model matematis untuk *bandgap narrowing*, seperti ditunjukkan pada persamaan (1) dan 2.

$$\Delta E_{g,GE} = E_{g,Si} - E_{g,SiGe} = 0.896x - 0.396x^2 \dots\dots\dots (1),$$

$$\Delta E_{g,dop} = C_1 \left\{ \ln \left( \frac{N_B}{C_2} \right) + \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{N_B}{C_2} \right) \right]^2 + 0.5} \right\} \dots\dots\dots (2),$$

dimana:

$\Delta E_{g,GE}$  = energi *bandgap narrowing* pada SiGe akibat fraksi mol Ge, [eV];

$E_{g,Si}$  = energi *bandgap* pada Si, [eV];

$E_{g,SiGe}$  = energi *bandgap* pada SiGe, [eV];

$\Delta E_{g, dop}$  = Energi *bandgap narrowing*, [eV];

$x$  = fraksi mol Germanium, [%].

$N_B$  = konsentrasi *doping* pada Basis, [ $\text{cm}^{-3}$ ];

$C_1$  dan  $C_2$  adalah konstanta dengan nilai  $C_1 = 0.009$  eV,  $C_2 = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  untuk bahan tipe-n dan  $C_1 = 0.00692$  eV,  $C_2 = 1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  untuk bahan tipe-p

### 2.3 Karakteristik elektrik HBT SiGe

*Heterojunction* akan mempengaruhi transportasi elektron dan *hole*. Ini secara langsung akan mempengaruhi arus terminal transistor bipolar yaitu arus basis dan arus kolektor. Dimana penguatan arus didefinisikan sebagai ratio antara arus kolektor dan arus basis[7], seperti ditunjukkan pada persamaan (3).

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \propto \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \dots\dots\dots (3),$$

dengan:

$\beta$  = penguatan arus;

$I_C$  = arus kolektor;

$I_B$  = arus basis;

$k$  = konstanta boltzman;

$T$  = temperatur, [K].

Arus basis  $I_B$  sebagian besar terdiri dari *hole*, yang disuntikan dari emitor ke basis. Besarnya arus basis dikendalikan oleh difusi *hole* dan rekombinasi *hole* di emitor *polysilicon*. Untuk  $V_{BE}$  tetap  $I_B$  tidak berubah dengan masukan Ge di basis, dan oleh karena itu  $\beta$  meningkat disebabkan  $I_C$  yang lebih tinggi. Pada bagian berikut kita memberikan derivasi (turunan) formal densitas arus kolektor,  $J_n = I_C/A_E$ , dimana  $A_E$  adalah area emitor. Densitas arus kolektor ( $J_n$ ) secara umum dapat diperoleh dengan hubungan *Moll-Ross*, yang diperoleh oleh Kroemer [7,8], seperti ditunjukkan pada persamaan (2.4) dan (2.5).

$$J_n = \frac{q \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)}{\int_0^{W_B} \frac{p(x)}{n_i^2(x) D_{nB}(x)} dx} \dots\dots\dots (4),$$

$$G_B = \int_0^{W_B} \frac{p(x)}{n_i^2(x) D_{nB}(x)} dx \dots\dots\dots (5),$$

dengan:

$p(x)$  = konsentrasi *hole*;

$D_{nB}(x)$  = difusivitas pembawa minoritas;

$q$  = muatan;

$n_i^2$  = konsentrasi pembawa intrinsik;

$G_B$  = jumlah *Gummel* basis.

Sebagian besar arus basis terdiri dari arus injeksi hole dari basis ke emitor (arus difusi), maka persamaan arus basis pada HBT, seperti ditunjukkan pada persamaan (6).

$$J_{B,dif} = -\frac{qD_{pE} n_{i,Si}^2}{N_E W_E} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} \dots\dots\dots (6),$$

dengan:

- $J_{B,dif}$  = densitas arus difusi pada basis;
- $D_{pE}$  = konstanta difusi hole pada emiter;
- $N_E$  = konsentrasi *doping* pada emiter;
- $W_E$  = lebar emiter netral.

### 3 METODOLOGI

#### 3.1 Bahan dan Alat Penelitian

Keseluruhan bahan dan alat penelitian yang diperlukan dalam pembuatan simulasi pengaruh konsentrasi *doping* dan fraksi mol germanium terhadap *bandgap narrowing* pada *heterojunction bipolar transistor* SiGe menggunakan MATLAB, hanya menggunakan program aplikasi MATLAB.

#### 3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini berupa simulasi menggunakan software aplikasi MATLAB. Langkah-langkah proses simulasinya dapat diuraikan sebagai berikut:

- 1) Menentukan model matematis yang akan digunakan
- 2) Menentukan nilai parameter-parameter input dan parameter-parameter output pada model matematis yang digunakan, parameter input mengacu pada tabel 1.
- 3) Mensimulasikan efek variasi nilai parameter input terhadap parameter output
- 4) Melakukan analisa hasil simulasi

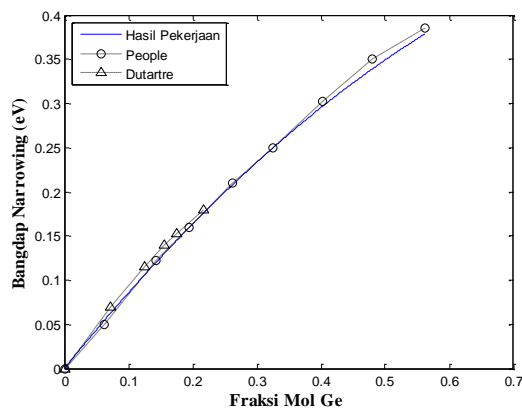
**Tabel 1 Parameter input yang digunakan**

Simbol	Deskripsi	Satuan
$N_E$	Konsentrasi Doping pada emiter	$5 \times 10^{17}$ , $1 \times 10^{18}$ , $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$W_E$	Lebar emiter	50 nm
$N_B$	Konsentrasi doping pada basis	$5 \times 10^{18}$ , $5 \times 10^{18}$ , $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
$W_B$	Lebar basis	20 nm
$x$	Fraksi mol Ge	0.15 – 0.25
$N_C$	Konsentrasi doping kolektor	$10^{17} \text{ cm}^{-3}$

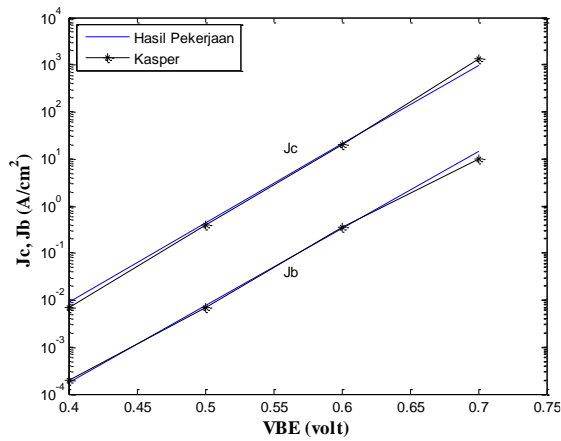
### 4 HASIL

#### 4.1 Validasi

Perbandingan dengan hasil People, Dutartre, dan Lopez, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



**Gambar 1 Perbandingan dengan hasil penelitian People dan Dutartre**

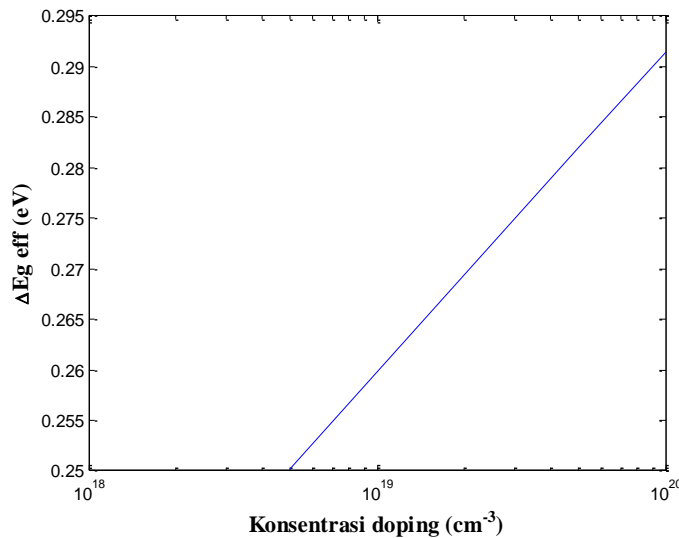


**Gambar 2 Perbandingan dengan pengukuran Kasper**

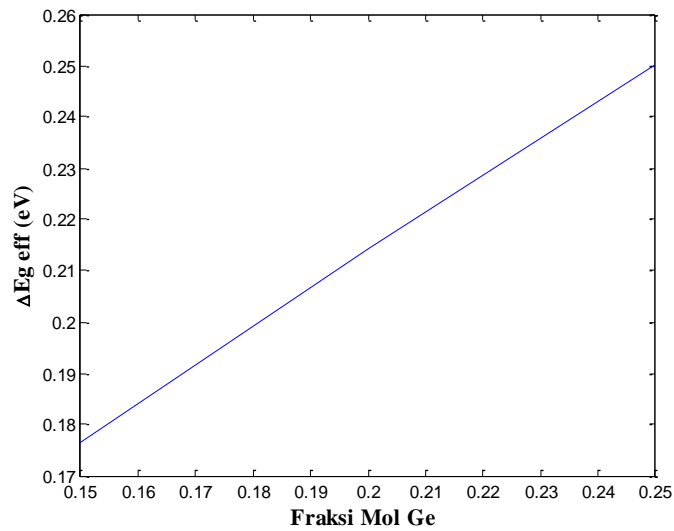
Berdasarkan Gambar 1, dapat di lihat bahwa grafik *bandgap narrowing* yang diperoleh dari hasil penelitian ini hampir sama dengan *bandgap narrowing* dari hasil People maupun Dutartre. Perbedaan terbesar terjadi pada fraksi mol 0.48 yaitu sebesar 1.03 kali lebih kecil dibandingkan dengan hasil dari People, hal ini mungkin disebabkan kesalahan saat mengekstraksi data perbandingan. Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat bahwa densitas arus basis dan densitas arus kolektor yang diperoleh dari hasil penelitian ini hampir sama dengan densitas arus basis dan densitas arus kolektor perhitungan Lopez. Besarnya densitas arus kolektor pada hasil simulasi 1.4 kali lebih besar dibandingkan dengan hasil yang diperoleh Lopez. Sedangkan densitas arus basis yang diperoleh dari penelitian ini 0.7 kali dibanding hasil Lopez untuk VBE 0.7 Volt.

## 4.2 Simulasi

*Bandgap narrowing* vs konsentrasi *doping* dan *Bandgap narrowing* vs fraksi mol Ge, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



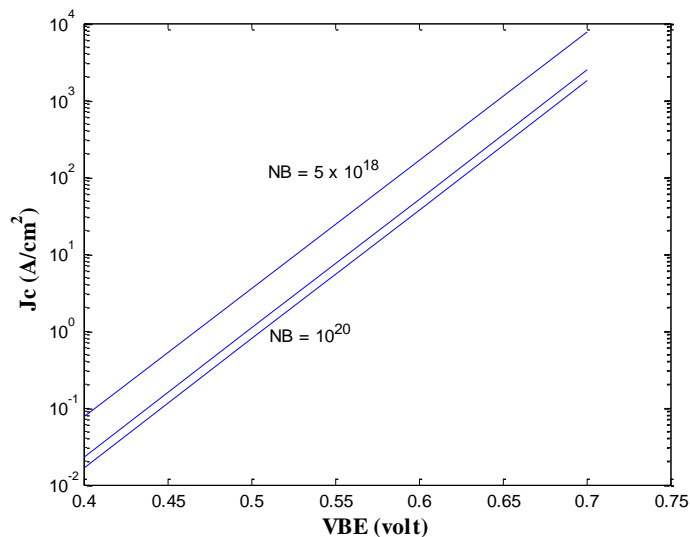
**Gambar 3 *Bandgap narrowing* vs konsentrasi *doping***



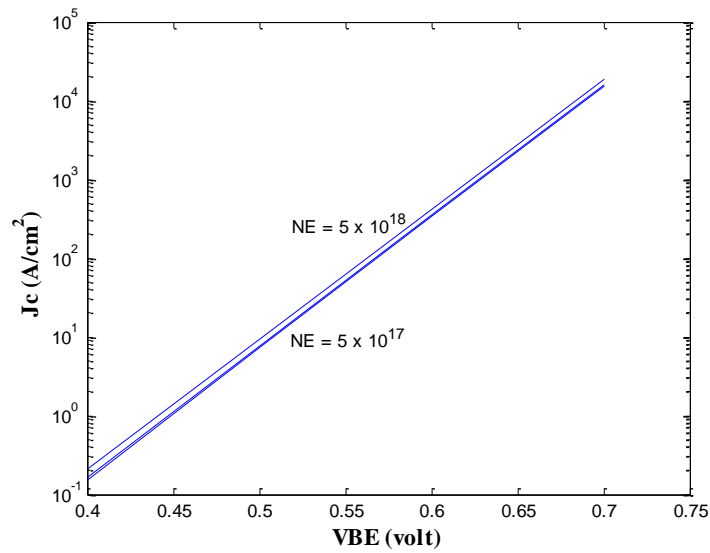
**Gambar 4 Bandgap narrowing vs fraksi mol Ge**

Berdasarkan Gambar 3, dari gambar tersebut tampak bahwa untuk *HBT* SiGe yang diamati semakin tinggi konsentrasi *doping* pada basis semakin tinggi  $\Delta E_g$  yang diperoleh. Penambahan konsentrasi *doping* pada basis  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  peningkatan  $\Delta E_g$  sebesar 1.6 kali. Sedangkan pada Gambar 4, diketahui bahwa penambahan fraksi mol Ge 0.15 menjadi Ge 0.25 besarnya menjadi 0.25 eV meningkatkan  $\Delta E_g$  yaitu sebesar 1.4 kali.

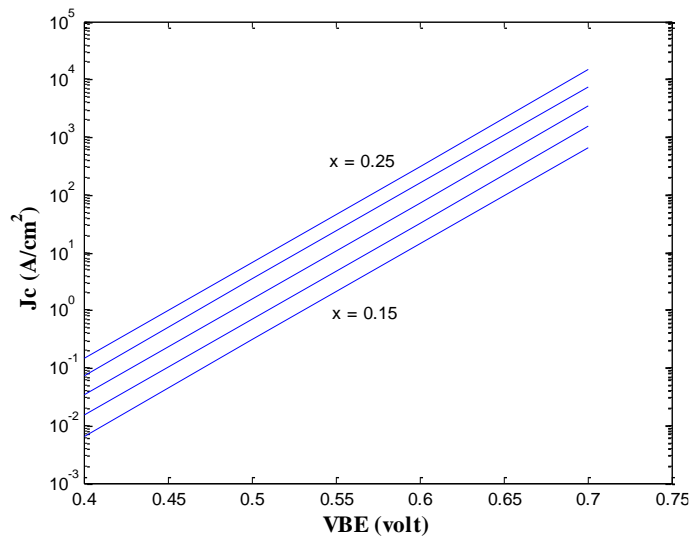
Pengaruh konsentrasi *doping* pada basis dan kolektor dan pengaruh fraksi mol Ge terhadap arus kolektor, seperti ditunjukkan pada Gambar 5, 6, dan 7.



**Gambar 5 Pengaruh konsentrasi *doping* basis terhadap arus kolektor**



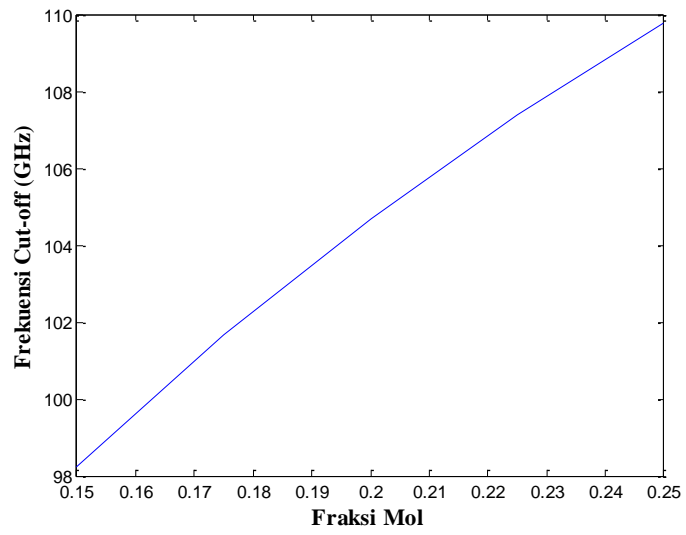
**Gambar 6 Pengaruh konsentrasi *doping* emitor terhadap arus kolektor**



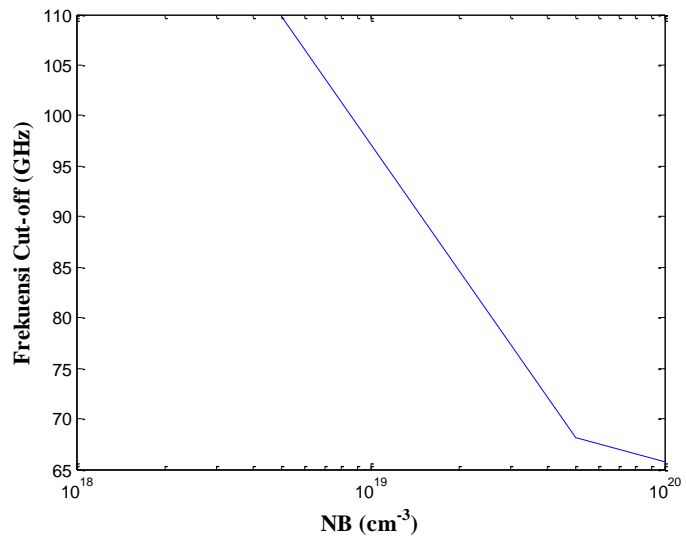
**Gambar 7 Pengaruh konsentrasi *doping* basis terhadap arus basis**

Berdasarkan Gambar 5, 6, dan 7, penambahan konsentrasi *doping* dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  penurunan arusnya sebesar 4.3 kali untuk  $V_{BE} = 0.7$  Volt. Penambahan konsentrasi *doping* pada emitor menyebabkan meningkatnya arus kolektor, dengan penambahan konsentrasi *doping* emitor  $5 \times 10^{17}$  menjadi  $5 \times 10^{18}$  meningkatkan arus kolektor sebesar 1.2 kali untuk  $V_{BE} = 0.7$  Volt. Sedangkan, penambahan fraksi mol Ge menyebabkan meningkatnya arus kolektor yang cukup besar, yaitu dengan penambahan fraksi mol Ge 0.15 menjadi 0.25 menyebabkan meningkatnya arus kolektor sebesar 22 kali.

Frekuensi *cut-off* vs fraksi mol Ge, Frekuensi *cut-off* vs NB, dan Frekuensi *cut-off* vs NC, seperti ditunjukkan pada Gambar 8, 9, dan 10.

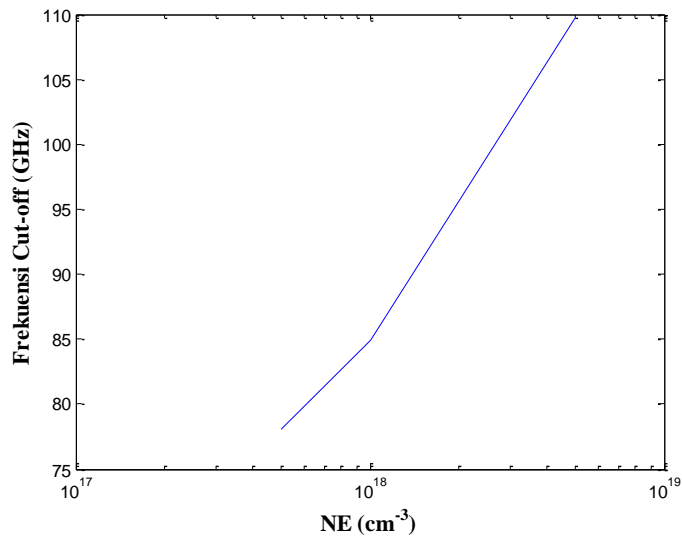


Gambar 8 Frekuensi *cut-off* vs fraksi mol Ge



Gambar 9 Frekuensi *cut-off* vs konsentrasi doping basis





**Gambar 10** Frekuensi *cut-off* vs konsentrasi doping emitor

Berdasarkan Gambar 4.13, dapat kita ketahui bahwa penambahan fraksi mol Ge dari 0.15 menjadi 0.25 dapat meningkatkan frekuensi  $f_T$  sebesar 1.12 kali. Penambahan konsentrasi doping dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $1 \times 10^{20}$  pada basis dapat mengurangi frekuensi  $f_T$  sebesar 1.7 kali. Sedangkan penambahan konsentrasi doping dari  $5 \times 10^{17}$  menjadi  $5 \times 10^{18}$  pada emitor dapat meningkatkan frekuensi  $f_T$  sebesar 1.4 kali.

## 5 SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan bahasan, maka dapat ditarik kesimpulan sesuai tujuan penelitian, yaitu:

- 1) Berdasarkan Validasi model, Penambahan fraksi mol Ge dari 0.15 menjadi 0.25 menyebabkan kenaikan *bandgap narrowing* sebesar 1.4 kali, sedangkan penambahan konsentrasi doping pada basis dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  menyebabkan kenaikan *bandgap narrowing* sebesar 1.2 kali.
- 2) Penambahan fraksi mol Ge dari 0.15 menjadi 0.25 menyebabkan kenaikan arus kolektor sebesar 22 kali, dan penambahan konsentrasi doping pada basis dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  menyebabkan penurunan arus kolektor sebesar 4.3 kali. Sedangkan penambahan konsentrasi doping emitor dari  $5 \times 10^{17}$  menjadi  $5 \times 10^{18}$  menyebabkan meningkatnya arus kolektor sebesar 1.2 kali dan mengurangi arus basis sebesar 25 kali.
- 3) Penambahan fraksi mol Ge dari 0.15 menjadi 0.25 menyebabkan kenaikan frekuensi *cut-off* sebesar 1.12 kali. Penambahan konsentrasi doping pada basis dari  $5 \times 10^{18}$  menjadi  $10^{20}$  menyebabkan penurunan frekuensi *cut-off* 1.7 kali. Dan penambahan konsentrasi doping dari  $5 \times 10^{17}$  menjadi  $5 \times 10^{18}$  menyebabkan peningkatan frekuensi *cut-off* sebesar 1.4 kali.

## 6 DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fadhol, Acmad, *Perancangan 196 GHz- $f_{max}$  Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si Heterojunction Bipolar Transistor*, Tesis, Universitas Indonesia, Depok, 2002.
- [2] Julian, E. Shintadewi, *Profil Germanium Segiempat pada Transistor Bipolar Silikon-Germanium*, Jurnal, Universitas Trisakti, Jakarta, 2002.
- [3] Julian, Engelin Shintadewi, *Perancangan Heterojunction Bipolar Transistor untuk Memperoleh Frekuensi Cutoff dan Frekuensi Osilasi Maksimum Lebih dari 130 GHz*, Disertasi, Universitas Indonesia, Depok, 2004.
- [4] Tjahjadi, Gunawan, *Pengaruh Konsentrasi Doping dan Fraksi Mol Germanium pada Basis Transistor Bipolar Heterojunction Silikon-Germanium*, Jurnal, Universitas Trisakti, Jakarta, 2001.
- [5] ANONYMOUS, *LED Basics* Electrical Properties, Department Rensselaer Polytechnic Institute, New York, \_\_\_\_\_. <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap04/chap04.htm>, 14 Juli 2011.

- [6] Maiti, C.K., G.A. Armstrong, *Applications of Silicon–Germanium Heterostructure Devices*, Institute of Physics Publishing, Belfast, Northern Ireland, 2001.
- [7] Malm, B. Gunnar, *High Frequency Characterization and Modeling of SiGe Heterojunction Bipolar Transistors*, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2002.
- [8] Kroemer, H., *Two integral relations pertaining to the electron transport through a bipolar transistor with a nonuniform energy gap in the base region*, *Solid-State Electronics*, vol. 28, pp. 1101 – 110, \_\_\_\_, 1985.
- [9] Wijaya, Marvin Ch., Agus Prijono, *Pengolahan Citra Digital Menggunakan MATLAB*, Informatika, Bandung, 2007.
- [10] Aminuddin, Jamrud, *Dasar-dasar Fisika Komputasi Menggunakan MATLAB*, Gava Media, Yogyakarta, 2008.
- [11] Mehrotra, Saumitra., Abhijeet Paul, Gerhard Klimeck, Mathieu Luisier, *Tight-Binding based SiGe Band Structure Calculations and Implication on Transport*, *Jurnal*, Purdue University, West Lafayette, USA, \_\_\_\_.
- [12] Julian, Engelin Shintadewi, *Perancangan HBT Si/SiGe yang Optimal untuk Memperoleh Frekuensi Transit dan Penguatan Arus yang Tinggi dengan Model HBT yang Memperhitungkan Mekanisme Difusi, Drift dan Emisi Termionik*, Tesis, Universitas Indonesia, Depok, 1999.