

# PENGARUH PROFILE BASIS PADA HETERO JUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR SILIKON GERMANIUM (SIGE HBT). TERHADAP PARAMETER SCATTERING

Ahmad Tossin Alamsyah<sup>1</sup> dan Engelin Shitadewi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Jakarta

<sup>2</sup>FTI Universitas Trisakti Grogol Jakarta

Email : [alamsyah\\_pnj@yahoo.co.id](mailto:alamsyah_pnj@yahoo.co.id)

## ABSTRACT

*Technology of modern Silicon epitaxy at heterojunctions (Si) and Germanium (Ge) likes SiGe, MBE, (Molecular Beam Epitaxy), UHV/CVD (Ultra High Vacuum Chemical Vapor Deposition/) and LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) are used for the realization of profile Ge doping on the design of Bipolar Transistor Heterojunctions (HBT).*

*This Research is conducted on simulation and analysis of Ge doping profile in HBT with a square profile shape, triangle and Trapezoid with mole fraction (x) 0.1 and 0.2. The model design of the HBT Structure analyzed has wide collector (Wc) 350 nm, Doping the collector (Nc)  $3.10^{17}$ , Wide base (Wb) 40 nm, the concentration of base (Nb)  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $A_E 0.25 \times 10 \mu \text{ m}^2$ ,  $W_E 10 \text{ nm}$ , NE maximum  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . SiGe graded Profile with settings in the base gives the different influences on the frequency threshold and the maximum Frequency with different current gain (Ai) almost the same which is around 60 dB until 70 dB. As such generated that Ge Profile rectangular generate scattering parameters required are wider than others i.e. for  $S_{11} 0.18 < -9$  (min) and  $178-0.278 <$  (max.),  $S_{12} 0.0175 < -2$  (min) and  $0.3471 < -171$  (max.),  $S_{21} < 2.889$  (min) and  $56 < 178$  (max) and  $S_{22} 0.27 < 12$  (min) and,  $0.42 < -181$  (max)*

*Keywords : profile graded , HBT SiGe, Scattering Parameter.*

## ABSTRAK

*Teknologi epitaksi modern pada heterojunction Silikon (Si) dan Germanium (Ge) atau SiGe seperti MBE (Molecular Beam Epitaxy) , UHV/CVD (Ultra High Vacuum / Chemical Vapor Deposition) dan LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) digunakan untuk merealisasikan profile doping Ge pada rancangan Heterojunction Bipolar Transistor (HBT).*

*Pada Penelitian ini dilaksanakan simulasi dan analisa profile doping Ge pada HBT dengan bentuk profile Segiempat, Segitiga dan Trapesium dengan mole fraction (x) 0.1 dan 0.2. Model rancangan Struktur HBT yang dianalisa memiliki Lebar Kolektor (Wc) 350 nm, Doping Kolektor (Nc)  $3.10^{17}$  , Lebar basis (Wb) 40 nm, Konsentrasi basis (Nb)  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $A_E 0,25 \times 10 \mu \text{ m}^2$  ,  $W_E 10 \text{ nm}$ , NE maksimum  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Dengan pengaturan Profile graded SiGe pada Basis memberikan pengaruh yang berbeda pada frekuensi threshold dan Frekuensi maksimum yang berbeda dengan current gain (Ai) yang hampir sama yaitu sekitar 60 dB sampai 70dB. Dengan demikian dihasilkan bahwa Profile Ge segi empat menghasilkan parameter scattering yang lebih lebar dibanding yang lain yaitu untuk  $S_{11} 0.18 < -9$  (min) dan  $0.278 < -178$  (maks),  $S_{12} 0.0175 < -2$  (min) dan  $0.3471 < -171$  (maks),  $S_{21} 2.88 < 9$  (min) dan  $56.99 < 178$  (maks) serta  $S_{22} 0.27 < 12$  (min) dan,  $0.42 < -181$  (maks).*

*Kata kunci : profile graded , HBT SiGe, Scattering Parameter*

## PENDAHULUAN

Transistor bipolar heterojunction atau HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) adalah transistor bipolar dengan material semikonduktor berbeda diantara emiter dan basis. Yaitu Silikon

dan Germanium. pemakaian heterojunction untuk memperbaiki performa transistor bipolar. Salah satu keunggulan Transistor Bipolar heterojunction adalah penguatan arus HBT dapat diatur oleh perbedaan bandgap antara emiter dan basis.

Penguatan arus dapat ditingkatkan dengan menggunakan emiter yang mempunyai bandgap lebar atau basis yang mempunyai bandgap sempit. Transistor bipolar heterojunction Silikon Germanium (HBT SiGe) mempunyai basis yang terbuat dari bahan SiGe, sedangkan emiter dan kolektornya terbuat dari Silikon. Konsep HBT dipatenkan oleh William Shockley pada tahun 1948.

Teori HBT dikembangkan oleh Kroemer dan dipublikasikan pada tahun 1957 yang dikutip oleh R.J. Hueting [1]. Penguatan arus HBT dapat diatur oleh perbedaan celah pita energi antara emiter dan basis. Penguatan arus dapat ditingkatkan dengan menggunakan bahan semikonduktor emiter yang mempunyai celah pita energi lebih lebar dari basis atau menggunakan basis yang mempunyai celah pita energi lebih sempit dari emiter. *Heterojunction bipolar transistor* (HBT) dikembangkan untuk memperbaiki unjuk kerja bipolar junction transistor (BJT), HBT mempunyai struktur yang sama dengan BJT yaitu terdiri dari emiter, basis dan kolektor.

Jika pada BJT seluruh divais aktif dibuat dari bahan semikonduktor yang sama, pada HBT ada bagian divais aktif yang dibuat dari bahan semikonduktor yang tidak sama. Contoh HBT berbasis Silikon (Si) adalah HBT

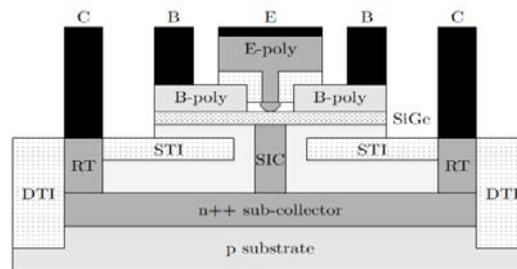
a-Si/Si/Si yang menggunakan bahan Si amorfus (a-Si) sebagai emiter dan Si sebagai bahan basis dan kolektor, lebar celah pita energi (bandgap) Si amorfus  $E_{g,a-Si} = 1,6$  eV dan lebar celah pita energi Si  $E_{g,Si} = 1,12$  eV. Contoh lain adalah HBT Si/SiGe/Si yang menggunakan bahan Silikon Germanium (SiGe) sebagai bahan basis dan Si sebagai bahan emiter dan kolektor,  $E_{g,SiGe} < 1,12$  eV tergantung dari konsentrasi Ge. [4]

Saat ini teknologi epitaksi modern untuk SiGe seperti MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) UHV/CVD (*Ultra High Vacuum*

/ *Chemical Vapor Deposition*) dan LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition*) [1] dapat digunakan untuk merealisasikan berbagai profil doping dan komposisi Ge yang dikehendaki. Oleh sebab itu dapat dibuat rancangan *profile doping* Ge yang memberikan kinerja yang dikehendaki, misalnya rancangan yang dapat memberikan penguatan arus (*current gain*) yang tinggi, frekuensi *cutoff* yang tinggi, atau frekuensi osilasi maksimum yang tinggi

### Model Heterojunction Bipolar Transistor (HBT).

Parameter Rancangan, Struktur HBT SiGe yang digunakan pada penelitian ini mengikuti struktur yang digunakan pada Bipole3. Potongan melintang HBT SiGe yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 1 (a) dan (b)



Gambar 1. Cross Section HBT SiGe

HBT SiGe model dibuat berdasarkan HBT SiGe model IBM, HBT SiGe model mempunyai luas emiter  $A_E = 0,25 \times 10 \mu m^2$ , lebar emiter  $W_E = 10$  nm, lebar basis  $W_B = 40$  nm dan lebar kolektor  $W_C = 350$  nm, sedangkan *profile* Ge adalah segiempat dengan fraksi Ge 0,1. *Profile doping* emiter NE dan basis NB dibuat graded dengan NE tertinggi  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  pada sisi kontak menurun ke arah basis dan NB tertinggi  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pada sisi basis yang dekat dengan emiter menurun ke arah kolektor. Konsentrasi doping kolektor NC dibuat rata sebesar  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

### Frekuensi *Cutoff* ( $f_t$ ) dan Waktu Tunda ( $t_{ec}$ )

Frekuensi cutoff atau frekuensi transit  $f_t$  merupakan suatu ukuran untuk menyatakan unjuk kerja transistor dan didefinisikan sebagai frekuensi pada saat penguatan arus CE (common emitter) sama dengan satu [6].

Frekuensi transit ini dapat dihubungkan dengan struktur transistor, yaitu melalui waktu tunda dari emiter ke kolektor  $t_{ec}$ . Hubungan antara frekuensi transit dan waktu tunda seperti pada persamaan di bawah ini adalah Dengan  $R_b$  resistansi basis dan  $C_{bc}$  kapasitansi sambungan basis-kolektor. Untuk memperoleh  $f_{max}$  yang tinggi  $f_t$  harus tinggi sedangkan  $R_b$  dan  $C_{bc}$  harus rendah. Contoh kurva  $f_t$  dan  $f_{max}$  sebagai fungsi arus kolektor diperlihatkan pada Gambar 2. Dapat dilihat bahwa pada arus kolektor rendah, baik  $f_t$  maupun  $f_{max}$  mengalami peningkatan jika  $I_C$  bertambah. Kedua kurva mencapai maksimum pada  $I_C$  sedang, dan pada  $I_C$  tinggi  $f_t$  maupun  $f_{max}$  mengalami penurunan meskipun terjadi kenaikan  $I_C$ .

$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} \quad (1)$$

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_{eb1} + \tau_{eb2} + \tau_b + \tau_{bc1} + \tau_{bc2} + \tau_c \quad (2a)$$

$$\tau_e = r_E C_{diff,e} \quad (2b)$$

$$\tau_{eb1} = r_E C_{ED} \quad (2c)$$

$$\tau_{eb2} = r_E C_{EN} \quad (2d)$$

$$\tau_b = r_E C_{diff,b} \quad (2e)$$

$$\tau_{bc1} = r_E C_{BC} \quad (2f)$$

$$\tau_{bc2} = r_C C_{BC} \quad (2g)$$

### Frekuensi Osilasi Maksimum

Frekuensi osilasi maksimum dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.[4]

$$f_{osc}^{max} = \left( \frac{f_t}{8\pi R_b C_{bc}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

dengan  $n$  adalah konstanta empiris yang besarnya antara 3 dan 6 dan  $\beta$  adalah penguatan arus.

### Tegangan *Breakdown* (VBO)

Pada transistor bipolar ada dua jenis tegangan *breakdown* (VBO) yaitu pada saat kondisi emiter terbuka (*open emitter*)  $BV_{CBO}$  dan pada kondisi basis terbuka (*open base*)  $BV_{CEO}$ . Besarnya  $BV_{CBO}$  dapat dihitung dengan Persamaan 4 [5]

$$BV_{CBO} = \frac{\epsilon_s E^2}{2qN_c} \quad (4)$$

Dengan  $\epsilon_s$  adalah permitivitas semikonduktor,  $E$  adalah medan listrik,  $q$  adalah muatan elektron dan  $N_c$  adalah konsentrasi doping pada kolektor. Hubungan antara  $BV_{CEO}$  dan  $BV_{CBO}$  dapat dihitung dengan Persamaan berikut:

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[n]{\beta}} \quad (5)$$

Waktu tunda total  $t_{ec}$  pada HBT sama dengan bipolar merupakan penjumlahan komponen waktu tunda pada setiap bagian dari transistor, yaitu waktu tunda pada emiter, e-b scr (emitter-base space charge region), basis, b-c scr (base-collector space charge region) dan kolektor.

## METODE PENELITIAN

*Heterojunction* Bipolar Transistor Silikon Germanium (HBT SiGe) telah diproduksi dan dikaji oleh berbagai Industry manufaktur elektronika berdasar pada teknologi epigrowth [34], unjuk kerja SiGe HBT generasi pertama bekerja pada frekuensi threshold  $f_T$  maksimum 50 Ghz, generasi kedua pada 100 GHz dan generasi ketiga yang akan datang bekerja  $f_T$  maksimum 200 Ghz, sampai saat ini hampir lebih dari 5 (lima) vendor mengembangkan divais ini. Pabrikasi yang digunakan sesuai dengan kemajuan teknologi lithografi yaitu dibawah 0,12  $\mu\text{m}$  yang saat ini sedang berkembang.

Dalam penentuan parameter fisika bahan semikonduktor Si dan SiGe dilakukan dengan cara menyesuaikan parameter fisika simulator dengan parameter fisika HBT SiGe yang diperoleh dari berbagai hasil *penelitian* yang telah dipublikasikan dan digunakan secara luas, beberapa parameter yang digunakan dalam pemodelan ini adalah;

- 1) konsentrasi pembawa muatan intrinsik Si dan SiGe [15]
- 2) model Energi bandgap karena penyempitan celah pita energi sebagai akibat konsentrasi *doping* dengan  $N$  konsentrasi *doping*,  $C_1$  dan  $C_2$  sebagai berikut : untuk bahan tipe-n,  $C_1 = 0,009 \text{ eV}$  dan  $C_2 = 1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , serta bahan tipe-p,  $C_1 = 0,00692 \text{ eV}$  dan  $C_2 = 1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- 3) karena terjadi gap hetrostruktur.
- 4) Dengan persamaan ;

$$\Delta E_{g,hd} = C_1 \left[ \ln \left( \frac{N}{C_2} \right) + \sqrt{\ln^2 \left( \frac{N}{C_2} \right) + 0,5} \right]$$

- 5) model mobilitas yang digunakan adalah model mobilitas dengan persamaan sebagai berikut
- 6) Profil Ge yang diteliti adalah profil Ge segiempat, segitiga dan trapesium dengan fraksi Ge 0,1 dan 0,2. Lebar basis dibuat bervariasi yaitu 20, 30

dan 40 nm. Perancangan emiter dilakukan untuk memperoleh  $f_T$  dan  $f_{\text{max}}$  yang tinggi.

## HASIL dan PEMBAHASAN

Perancangan kolektor dilakukan untuk memperoleh  $f_T$  tertinggi dan  $BV_{\text{CEO}}$  sekitar 2 Volt. Nilai  $BV_{\text{CEO}}$  dipilih karena HBT SiGe untuk aplikasi tegangan rendah umumnya mempunyai  $BV_{\text{CEO}}$  antara 1.7 sampai 4 Volt [6]. Untuk memperoleh nilai  $BV_{\text{CEO}}$  di atas, digunakan HBT SiGe model dengan konsentrasi doping kolektor  $N_C$  rata dengan nilai bervariasi yaitu  $10^{17}$ ,  $3 \times 10^{17}$  dan  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Selain profil kolektor tersebut, juga digunakan profil kolektor *SIC (Selective Implanted Collector)* dengan konsentrasi doping  $N_C$  graded  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pada sisi kolektor yang dekat dengan basis meningkat menjadi  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pada sisi kolektor yang dekat dengan burrier layer. Perancangan basis dilakukan untuk memperoleh  $f_T$  dan  $f_{\text{max}}$  yang sama tinggi. Perancangan basis meliputi perancangan profil doping, profil Ge dan lebar basis  $W_B$ . Profil doping *basis graded* dengan konsentrasi doping  $N_B$  tertinggi pada sisi basis yang dekat dengan emiter dibuat bervariasi yaitu  $10^{19}$ ,  $2 \times 10^{19}$  dan  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Profil Ge yang diteliti adalah profil Ge segiempat, segitiga dan trapesium dengan fraksi Ge 0,1 dan 0,2. Lebar basis dibuat bervariasi yaitu 20, 30 dan 40 nm. Perancangan emiter dilakukan untuk memperoleh  $f_T$  dan  $f_{\text{max}}$  yang tinggi. Perancangan emiter meliputi perancangan profil doping emiter dan lebar emiter. Konsentrasi doping emiter dibuat graded dengan konsentrasi doping  $N_E$  pada sisi kontak bervariasi yaitu  $10^{20}$ ,  $5 \times 10^{20}$  dan  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  Lebar emiter  $W_E$  dibuat bervariasi yaitu 10 dan 15 nm

**Scattering Parameter.**

Untuk menentukan parameter  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  dan  $S_{22}$ , maka komponen dipandang sebagai HF amplifier *common emitter*, yang memiliki hubungan antara  $f_t$ ,  $f_{max}$  dan  $S_{12}$  ditunjukkan oleh persamaan (6),(7) dan (8)

$$f_{max} = \left( \frac{f_t}{8\pi R_b C_{bc}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$f_t = f_{max}^2 \cdot 8\pi R_b C_{bc} \quad (7)$$

$$S_{21} = \frac{\omega_t}{j\omega_{max}} \quad (8)$$

dengan asumsi hubungan *fraction mole* (x) terhadap  $E_{gn}$  linier sedang hubungan  $N_b$  terhadap  $E_{gn}$  adalah logaritmik (tidak linier).

Dengan persamaan regresi 2 (dua) prediktor dapat ditentukan persamaan modelnya dengan menganggap  $E_{gn}$  berhubungan linier dengan *mole fraction* (x) dan berhubungan non linier dengan  $N_b$  sehingga persamaan model adalah sebagai berikut ;

$$E_{gn} = 2.89 + 4.14 \cdot x - 2e-19 \cdot \log(N_b) \quad (13)$$

$E_{gn}$  = Energi bandgap (eg) yaitu variabel tak bebas,

$N_b$  = Doping Konsentrasi pada Basis ( $N_b$ ) variabel bebas

x = *Fraction mole* variabel bebas

Model tersebut di-validasi dengan model yang dikembangkan Pjeconivic [6] maka didapatkan nilai deviasi sebesar 0.04 dengan daerah untuk daerah mole fraction (x) 0 sampai dengan 30 %. Gambar 6 menunjukkan hasil validasi model terhadap model yang dikembangkan oleh Pjeconivic [6]

Beberapa Persamaan S parameter yang akan di elaborasi pada penelitian ini adalah , [20]

$$S_{11} = \frac{(1 - y_{11})(1 + y_{22}) + y_{12}y_{21}}{\Delta Y} \quad (9)$$

$$S_{12} = \frac{-2y_{12}}{\Delta Y} \quad (10)$$

$$S_{22} = \frac{(1 + y_{11})(1 - y_{22}) + y_{12}y_{21}}{\Delta Y} \quad (11)$$

$$S_{21} = \frac{-2y_{21}}{\Delta Y} \quad (12)$$

dimana  $y_{11}$  ,  $y_{12}$  ,  $y_{21}$  dan  $y_{22}$  merupakan parameter HBT yang dapat diturunkan berdasarkan ,  $r_b$  ,  $f_t$  ,  $r_{ce}$  ,  $C_{bc}$  dan  $C_{ce}$  dari transistor HBT tersebut Besarnya *energi bandgap* ( $E_{gn}$ ) pada tabel tersebut disebabkan karena adanya perubahan *fraction mole*(x) dan konsentrasi *doping* pada basis ( $N_b$ ), Berdasarkan pada persamaan diatas maka ketiga model tersebut (model-1,2 dan 3) diterapkan pada. simulasi HBT

$$E_{gn(\text{model-1})} = \int_{-w_b/2}^{w_b/2} f(E_{gn}) \cdot d_{w_b}$$

$$E_{gn(\text{model-2})} = \int_0^{w_b} f(E_{gn}) \cdot d_{w_b}$$

$$E_{gn(\text{model-3})} = \int_0^{w_b} (f(E_{gn}) + k) \cdot d_{w_b}$$

$$(14(a),(b),(c))$$

Dari diagram diatas daerah yang hampir sama dengan hasil validasi dengan model Pjeconivic, dengan *mole fraction* (x) antara 0 sampai 30 %. Pemodelan Energi bandgap pada profil graded basis berbentuk segitiga sama sisi (model-1), segitiga (model-2) dan trapesium (model-3) yang dijelaskan dengan persamaan berikut;

SiGe menghasilkan  $f_t$  dan  $f_{max}$  antara 103 sampai 119 Ghz dengan  $BV_{CEO}$  1.8 Volt. Struktur dan unjuk kerja HBT SiGe tersebut . Kemudian dengan formulasi (13) dan (14) maka didapat

bentuk parameter *scattering* ditunjukkan seperti pada Gambar 42 dengan dan Tabel 1.

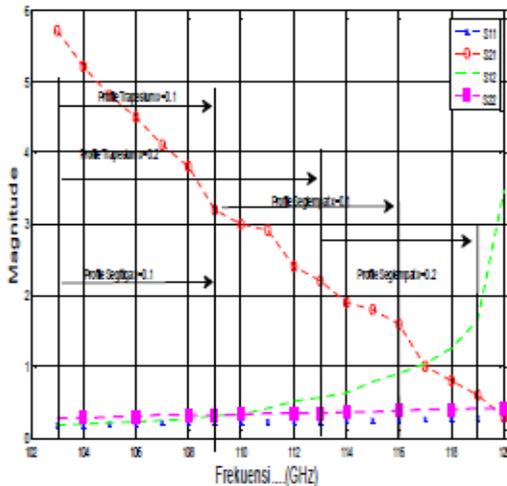
Tabel 1. Nilai *Scattering Paramater* terhadap *fraction mole (x)*

Parameter	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>
Nilai Maksimal	0.278<-178	0.3471<-171	56.99<178	0.42<-181
Nilai Minimal	0.18<-9	0.0175<-2	2.88<9	0.27<12

Bagian ini menjelaskan **hasil dan bahasan**, tidak semua data ditampilkan. pengungkapan dalam table data, pengungkapan dengan Grafik lebih baik. Bahasan dibuat secermat mungkin mengacu pada teori di bagian Pendahuluan. Banyaknya kata sekurang-kurangnya 45% dari keseluruhan tulisan.

## KESIMPULAN

*Profile graded HBT Germanium (Ge)* pada terminal basis berpengaruh pada nilai  $f_t$  dan  $f_{max}$ , *Profile Ge* segiempat mempunyai  $f_{max}$  yang lebih tinggi yaitu 119 Ghz dibanding *profile graded* segitiga 109 Ghz dan trapesium 113 Ghz, pada nilai *fraction mole (x)* yang sama. Nilai *fraction mole (x)* berpengaruh pada nilai *current gain*



Gambar 2. Diagram Scattering Parameter untuk profile yang bervariasi. HBT SiGe model pada  $V_{CB} = 1V$

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai  $f_t$  dan  $f_{max}$ , pada profile Ge Segiempat mempunyai nilai lebih tinggi yaitu 119 Ghz dibanding *profile graded segitiga* 109 Ghz dan trapesium 113 Ghz, pada nilai *fraction mole (x)* yang sama. Nilai *fraction Mole (x)* berpengaruh pada nilai *current gain (hfe)*, *fraction mole* yang rendah menghasilkan *current gain (hfe)* yang besar. Parameter Scattering (S) yang dihasilkan dari keempat profile tersebut adalah ;

(hfe), *fraction mole* yang rendah menghasilkan hfe yang besar.

Dengan demikian dihasilkan bahwa Profile Ge segi empat menghasilkan paramater *scattering* yang yang lebih lebar dibanding yang lain yaitu untuk S<sub>11</sub> 0.18<-9 (min) dan 0.278<-178 (maks), S<sub>12</sub> 0.0175<-2 (min) dan 0.3471<-171(maks), S<sub>21</sub> 2.88<9 (min) dan 56.99<178 (maks) serta S<sub>22</sub> 0.27<12(min) dan, 0.42<-181(maks).

## UCAPAN TERIMAKASIH

Berisi Ucapan Terima kasih kepada Direktur DRPM Dikti yang telah membiayai Penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hueting, R.J.E., 1997, "Charge Carrier Transport in Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors", Disertasi, Delft University of Technology.
- [2] Washio, K., 1999, "SiGe HBTs and Ics for optical-fiber communication systems", *Solid-State Electronics* Vol. 43, hal.1619 – 1625.
- [3] Yuan, J. S.,1999, "SiGe, GaAs, and InP Heterojunction Bipolar Transistors", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] People, R.,1986, *Physics and Applications of GexSi1-x/Si*

- Strained-Layer Heterostructures,  
IEEE Journal of  
Quantum Electronics, Vol.22, No.9,  
hal.1696- 1710.
- [5] Palankovski, vassil, “*H  
modelling issues of SiGe  
semiconductor Devices,*” journal  
of Telecommunications and  
Information Technology, 2007.
- [6] Roulston D.J., *Bipole3 User’s  
Manual*, Bipsim Inc., Canada, 2006.
- [7] K.Das, Mukul dkk, “*Performance  
Analysis of a SiGe/Si  
Heteronunction Bipolar Transistor  
for Different Ge – Composition,*”  
University of Calcuta 92 Acharya  
P.C road , email:nrd@jeee.org,  
diakses maret 2006.
- [8] V.D.Kunz dkk, “*Application of  
Poly crystalline SiGe for gain  
Control in SiGe Heterojunction*”,  
Departmen of Electronics &  
Computer Science, University of  
Southhamton, Southhampton So17  
1BJ, England, diakses bulan Juni  
2008.

