

## PEMODELAN PENYEMPITAN CELAH PITA ENERGI SEBAGAI FUNGSI KONSENTRASI DOPING PADA HBT SIGE

Engelin Shintadewi Julian

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology  
Trisakti University Indonesia 11440, email: eshintadewij@yahoo.com.

### ABSTRACT

Smaller bandgap material in the base of SiGe HBT is obtained by using high doping concentration and Germanium addition into the base of silicon bipolar transistor. In this work, a simple natural logarithm model bandgap narrowing due heavy doping in the base of SiGe HBT is proposed. The model is developed using least square method for the data collected by Huetting. This simple formulation is very useful to derive an analytical model of SiGe HBT. To test the validity of our model, we compare our model with other models used by Huetting and Sze as well as experimental data that have already been published. The result shows that our model of bandgap narrowing is in good agreement with the experimental data.

**Keywords:** Modeling, bandgap energy, doping concentration, HBT SiGe.

### ABSTRAK

Basis HBT SiGe dibuat dari campuran bahan Silikon dan Germanium yang mempunyai celah pita energi lebih sempit dari celah pita energi bahan Silikon. Penyempitan celah pita energi ini selain terjadi karena penambahan bahan Germanium, juga terjadi karena penggunaan konsentrasi doping yang tinggi pada basis. Pada makalah ini dibahas pengembangan model penyempitan celah pita energi yang disebabkan oleh konsentrasi doping pada basis HBT SiGe dengan menggunakan metode kuadrat terkecil. Model dibuat dalam bentuk logaritma natural sederhana sehingga memudahkan dalam perhitungan kinerja HBT SiGe yang berbentuk pangkat eksponensial penyempitan celah pita energi. Model yang dibuat dibandingkan dengan model-model lain yang digunakan oleh Huetting dan Sze. Hasilnya menunjukkan bahwa model penyempitan bandgap yang dibuat dapat merepresentasikan data eksperimen lebih baik dibandingkan dengan model lainnya.

**Kata kunci:** Pemodelan, Celah Pita Energi, Konsentrasi Doping, HBT SiGe

## PENDAHULUAN

*Heterojunction bipolar transistor* (HBT) adalah transistor bipolar yang emiter, basis dan kolektornya dibuat dari bahan semikonduktor yang berbeda. HBT Silikon Germanium (SiGe) mempunyai emiter dan kolektor yang dibuat dari bahan Si sedangkan basisnya dibuat dari bahan SiGe. Bahan SiGe mempunyai celah pita energi (bandgap) lebih sempit dibandingkan bahan Si.

Konsep HBT diperkenalkan pertama kali oleh William Shockley pada tahun 1948 [1] sedangkan teori yang menjelaskan cara kerja HBT secara rinci dikembangkan oleh Kroemer pada 1957 [2]. Menurut Kroemer, 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 energi lebih sempit dari emiter. Hal ini memberikan keleluasaan kepada perancang divais dalam meningkatkan kinerja HBT SiGe agar dapat bekerja pada frekuensi yang lebih tinggi. Dewasa ini telah dapat dibuat HBT SiGe dengan frekuensi cutoff ft 375 GHz [3] dan frekuensi osilasi maksimum 350 GHz [4].

Perbedaan celah pita energi antara emiter dan basis pada HBT SiGe diperoleh dengan cara menambahkan bahan Ge pada basis. Emiter yang dibuat dari Si mempunyai celah pita energi  $E_g$  1,12 eV pada temperatur ruang. Penambahan Ge pada Si menyebabkan penyempitan celah pita energi (*bandgap narrowing due to Ge addition*) sebesar

$$\Delta E_{g,Ge} = 0,74x \text{ meV} \quad (1)$$

dengan  $x$  adalah fraksi mol Ge [5].

Penyempitan celah pita energi pada basis HBT SiGe selain disebabkan oleh penambahan Ge, juga disebabkan tingginya konsentrasi *doping* pada basis. Umumnya penyempitan celah pita energi yang disebabkan oleh konsentrasi doping yang tinggi ( $\Delta E_{g,hd}$ ) pada basis HBT SiGe dihitung dengan menggunakan model yang dikembangkan untuk bahan Si oleh sebab itu hasilnya kurang akurat.

Pada makalah ini diuraikan pengembangan model penyempitan celah pita energi yang disebabkan oleh pemberian konsentrasi doping yang tinggi (*bandgap narrowing due to heavy doping*) pada basis HBT yang dibuat dari bahan SiGe.

## METODOLOGI

Celah pita energi merupakan salah satu parameter penting yang sangat menentukan kinerja HBT SiGe, oleh sebab itu penyempitan celah pita energi juga akan sangat mempengaruhi kinerja HBT SiGe. Sebagai contoh, arus kolektor pada HBT SiGe dapat dinyatakan dengan Persamaan (2) [6].

$$J_C \approx \frac{qD_{nb}}{N_{ab}W_b} \left( e^{qV_{BE}/kT} - 1 \right) \times n_{io}^2 e^{\Delta E_{g,hd}/kT} \left\{ \gamma \eta e^{\Delta E_{g,Ge(0)}/kT} \right\} \quad (2)$$

dimana ;

$q$  = satuan muatan elektron,  
 $D_{nb}$  = konstanta difusi elektron pada basis,  
 $N_{ab}$  = konsentrasi doping basis,

$W_b$  = lebar basis,  
 $V_{BE}$  = tegangan basis-emiter,  
 $k$  = konstanta Boltzmann,  
 $T$  = temperatur,  
 $n_{io}$  = konsentrasi pembawa muatan intrinsik,  
 $\gamma$  = perbandingan *effective density of state* SiGe terhadap Si,  
 $\eta$  = perbandingan konstanta difusi SiGe terhadap Si.

Dapat dilihat bahwa arus kolektor dipengaruhi oleh pangkat eksponensial dari penyempitan celah pita energi ( $e^{\Delta E_g}$ ). Selain arus kolektor, penguatan arus juga dipengaruhi oleh  $e^{\Delta E_g}$ . Untuk mempermudah dalam menyelesaikan perhitungan, model  $\Delta E_{g,hd}$  akan dibuat dalam bentuk fungsi logaritma natural  $\ln$  pada Persamaan (3)

$$\Delta E_{g,hd} = \ln a_0 + a_1 \ln \left( \frac{N}{10^{17}} \right) \quad (3)$$

dengan  $N$  adalah konsentrasi *doping* basis dan  $a_1$  dan  $a_2$  adalah koefisien.

Koefisien  $a_0$  dan  $a_1$  akan ditentukan dengan metode regresi kuadrat terkecil menggunakan data yang yang dikumpulkan oleh Hueting [7] pada Tabel 1.

Tabel 1. Data eksperimen  $\Delta E_{g,hd}$

Ge (%)	N (cm <sup>-3</sup> )	$\Delta E_{g,hd}$ (meV)
10	1 x 10 <sup>19</sup>	61
10	3 x 10 <sup>19</sup>	48
10	1 x 10 <sup>20</sup>	38
13	2 x 10 <sup>18</sup>	25
19	1,2 x 10 <sup>18</sup>	30
19	3 x 10 <sup>18</sup>	40
19	2 x 10 <sup>19</sup>	57
19	7 x 10 <sup>19</sup>	68
20	3 x 10 <sup>18</sup>	10
20	2 x 10 <sup>19</sup>	70
20	3 x 10 <sup>19</sup>	57
20	1 x 10 <sup>20</sup>	53

Data pada Tabel 1 kemudian diolah lebih lanjut dengan mengambil harga logaritma natural  $\Delta E_{g,hd}$  dan  $(N/10^{17})$ .

Hasil perhitungan diperlihatkan pada Tabel 2. Untuk regresi linier berlaku:

$$n \ln(a_0) + \left( \sum \ln \left( \frac{N_i}{10^{17}} \right) \right) a_1 = \sum \Delta E_{g,hd_i} \quad (4)$$

$$\left( \sum \ln \left( \frac{N_i}{10^{17}} \right) \right) \ln(a_0) + \left( \sum \ln \left( \frac{N_i}{10^{17}} \right)^2 \right) a_1 = \sum \Delta E_{g,hd_i} \sum \ln \left( \frac{N_i}{10^{17}} \right) \quad (5)$$

Substitusi hasil perhitungan pada Tabel 2 ke persamaan (4) dan (5) di atas menghasilkan

$$12 \ln(a_0) + 59,199901 a_1 = 557 \quad (6)$$

$$59,199901 \ln(a_0) + 318,4224 a_1 = 2942,079 \quad (7)$$

Penyelesaian dari persamaan (6) dan (7) di atas menghasilkan  $a_0 = 23906,3645$  dan  $a_1 = 7,3652$ . Dengan demikian model penyempitan celah pita energi yang disebabkan oleh konsentrasi doping adalah

$$\Delta E_{g,hd} = \ln 23906,3645 + 7,3652 \ln \left( \frac{N}{10^{17}} \right) \quad (8)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Model penyempitan celah pita energi yang diperoleh dengan regresi kuadrat terkecil diperlihatkan pada Gambar 1 bersama model yang digunakan oleh Hueting (Persamaan 9) ([7], model yang digunakan oleh Sze (Persamaan 10) [8] dan data eksperimen yang berhasil dikumpulkan oleh Hueting.

$$\Delta E_{g,hd} = 6,92 \left\{ \ln \left( \frac{N}{1,3 \times 10^{17}} \right) + \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{N}{1,3 \times 10^{17}} \right) \right]^2 + 0,5} \right\} \quad (9)$$

$$\Delta E_{g,hd} = 22,5 \left( \frac{N}{10^{18}} \right)^{0,5} \quad (10)$$

Dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa model yang dihasilkan dengan regresi kuadrat terkecil menggunakan data-data eksperimen yang dikumpulkan oleh Hueting dapat merepresentasikan data-data dengan lebih baik dibandingkan

dengan model lain yang dinyatakan dengan Persamaan (9) dan (10).

Model dibuat dalam bentuk logaritma natural yang sederhana sehingga akan mempermudah penyelesaian persamaan-persamaan tertutup yang merupakan fungsi pangkat eksponensial penyempitan celah pita energi.

## KESIMPULAN.

Telah berhasil disusun sebuah model penyempitan celah pita energi pada basis HBT SiGe yang disebabkan oleh pemberian konsentrasi doping yang tinggi. Model yang berbentuk logaritma natural tersebut dapat merepresentasikan data-data hasil pengukuran dengan lebih baik dibandingkan dengan model lainnya.

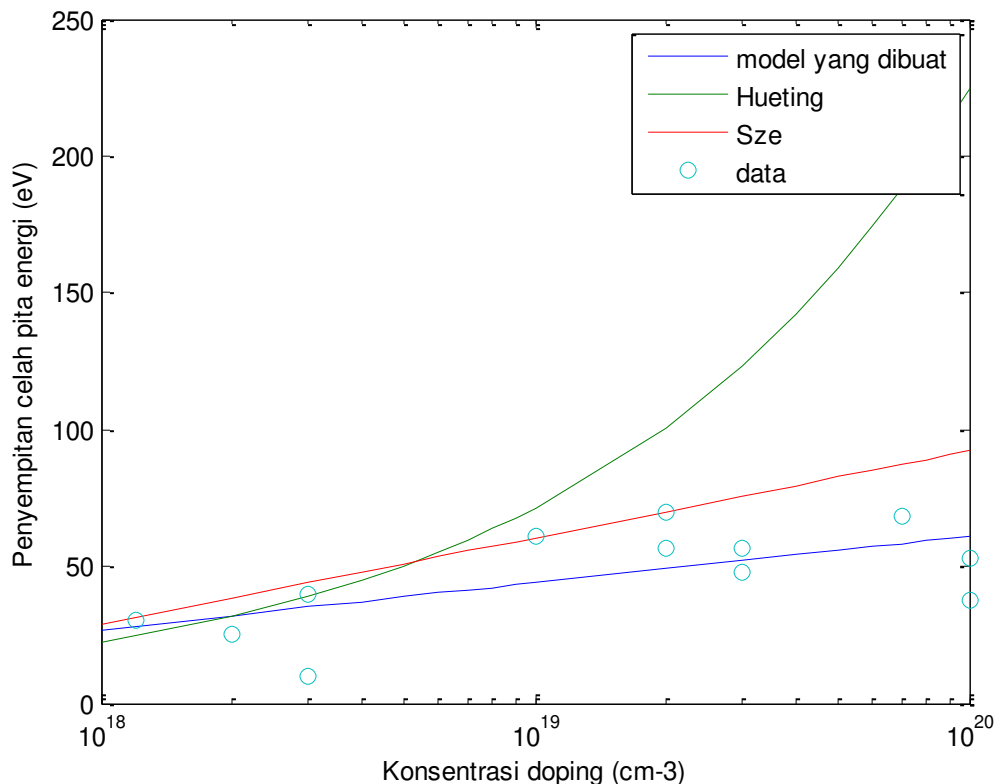
## DAFTAR ACUAN

- [1] Paten Amerika Serikat No. 2.569.347
- [2] Kroemer, H., 1957, "Theory of Wide-gap Emitter for Transistor", Proc. Institute of Radio Engineer (IRE), Vol. 45, hal. 1535-1537.
- [3] Rieh, J.-S., dkk., 2003, "Performance and design considerations for high speed SiGe HBTs of  $f_T/f_{MAX} = 375$  GHz/210 GHz," Proc. of International Conf. On Indium Phosphide and Related Materials, hal. 374-377.
- [4] Rieh, J.-S., dkk., 2002, "SiGe HBTs with cut-off frequency of 350GHz," IEDM Tech. Dig., hal. 771-774.
- [5] Washio, K., dkk., 2002, A 0.2- $\mu$ m 180-GHz-fmax 6.7-ps-ECL SOI/HRS Self-Aligned SEG SiGe HBT/CMOS Technology for Microwave and High Speed Digital Applications, IEEE Trans. On Electron Devices, Vol. 49, No. 2, hal. 271 – 278.
- [6] Cressler, J.D. and Niu, G., 2003, Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors, Artech House, Norwood, Massachusetts, hal. 98.

- [7] Hueting, R.J.E, 1997, *Charge Carrier Transport in Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors*, Disertasi, Delft University of Technology.
- [8] Chapra, S.C., Canale, R.P., 2006, *Numerical Methods for Engineers Edisi ke 5*, McGraw-Hill International.

Tabel 2. Hasil Perhitungan

No	N	$\Delta E_{g,hd}$	$\ln(N/10^{17})$	$(\ln(N/10^{17}))^2$	$\Delta E_{g,hd} \times \ln(N/10^{17})$
1	$1 \times 10^{19}$	61	4,60517	21,20759	280,9154
2	$3 \times 10^{19}$	48	5,70378	32,53311	273,7814
3	$1 \times 10^{20}$	38	6,90776	47,71715	262,4949
4	$2 \times 10^{18}$	25	2,99573	8,974398	74,89325
5	$1,2 \times 10^{18}$	30	2,48491	6,174778	74,5473
6	$3 \times 10^{18}$	40	3,40120	11,56816	136,048
7	$2 \times 10^{19}$	57	5,29832	28,07219	302,0042
8	$7 \times 10^{19}$	68	6,55108	42,91665	445,4734
9	$3 \times 10^{18}$	10	3,40120	11,56816	34,012
10	$2 \times 10^{19}$	70	5,23832	27,44000	366,6824
11	$3 \times 10^{19}$	57	5,70378	32,53311	325,1155
12	$1 \times 10^{20}$	53	6,90776	47,71715	366,1113
Jumlah		557	59,19901	318,4224	2942,079



Gambar 1. Model penyempitan celah pita energi sebagai fungsi konsentrasi doping

