

Struktur *Double Barrier* Untuk Aplikasi Pada Divais Silikon Amorf

Ida Hamidah¹ dan Wilson W. Wenas
Laboratorium Riset Semikonduktor, Jurusan Fisika – ITB
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
¹Jurusan Pend. Teknik Mesin FPTK – UPI
Jl. Dr. Setiabudhi No. 207 Bandung 40154
e-mail: ihamidah@eudoramail.com

Abstrak

Dalam studi ini dikaji sifat-sifat struktur *double barrier* pada divais silikon amorf (*a-Si*). Struktur *double barrier* dibangun dengan mengkombinasikan material *a-Si:H* dengan material *a-SiC:H* yang memiliki celah energi optik yang berbeda. Material *a-Si:H* berfungsi sebagai sumur kuantum di antara material *a-SiC:H* yang berfungsi sebagai *barrier*. Probabilitas tunneling yang menjadi pokok utama sifat-sifat struktur *double barrier* dihitung berdasarkan persamaan *Schroedinger*, pendekatan *WKB*, dan pendekatan *Lorentzian*. Probabilitas tunneling mencapai harga 0,12 untuk tegangan luar 10 V, tebal *barrier* 10 Å dan lebar sumur potensial 10 Å. Selanjutnya, hasil perhitungan probabilitas tunneling diaplikasikan pada salah satu divais *a-Si* yaitu *Thin Film Light Emitting Diode (TFLED)*, untuk menghitung rapat arus tunneling dan *brightness*. Didapatkan bahwa semakin tinggi probabilitas tunneling, rapat arus tunneling semakin meningkat dan pada akhirnya dapat meningkatkan harga *brightness* dari *TFLED*.

Abstract

The properties of double barrier structure applied into amorphous silicon (*a-Si*) device was studied. Double barrier structure was modeled with combining *a-Si:H* and *a-SiC:H* materials having different optical band gap. Potential well and barrier were made by *a-Si:H* and *a-SiC:H*, respectively. Tunneling probability which determine the properties of double barrier structure was calculated by employing the *Schroedinger* equation, *WKB* approximation and *Green function*. Tunneling probability had a value 0.12 for 10 V forward bias, 10 Å barrier width and 10 Å potential well width. The calculation of tunneling probability was then applied to thin film light emitting diode (*TFLED*) to calculate tunneling current density and *brightness* of the device. It was found that the higher tunneling probability the higher tunneling current density and finally the *brightness* of *TFLED* can be enhanced.

1. Pendahuluan

Penggunaan material silikon amorf (*a-Si*) pada divais semikonduktor telah berkembang dengan sangat pesat dalam dua dekade terakhir dengan aplikasi yang berbeda dengan material silikon kristal (*x-Si*) yang sudah lebih dahulu digunakan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan struktur dan sifat fisis antara *a-Si* dan *x-Si*. Berbeda dengan silikon kristal, *a-Si* mempunyai susunan atom yang tidak teratur sehingga tidak memiliki periodisitas berjangkauan jauh atau simetri kristal. Selain itu pada *a-Si* terdapat banyak ikatan bebas (*dangling bond*) yang mengakibatkan rapat keadaan terlokalisasi di daerah celah pita energi. Hal ini menyebabkan adanya perbedaan sifat listrik dan optik antara kedua material tersebut.

Penumbuhan lapisan tipis *a-Si* dengan metode *plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD)* mengandung konsentrasi atom hidrogen sekitar 5% - 15%¹⁾. Kehadiran atom hidrogen ini akan menutup *dangling bond* sehingga terbentuk ikatan *Si-H* yang pada akhirnya akan mereduksi rapat keadaan

terlokalisasinya. Proses pemberian ketakmurnian (impuritas) juga telah dapat dilakukan sehingga memungkinkan dilakukannya pengontrolan tipe penghantaran listrik (*p* atau *n*), dengan demikian material *a-Si* dapat digunakan pada divais semikonduktor.

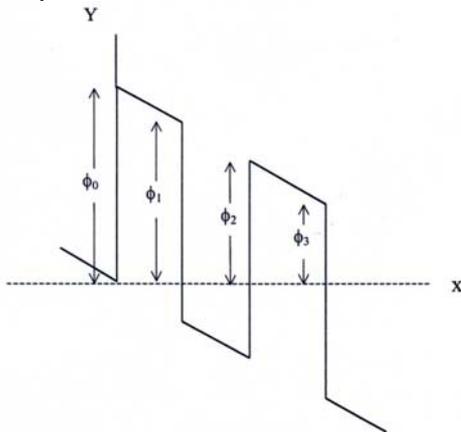
Material *a-Si* memiliki koefisien absorpsi cahaya yang tinggi dan memiliki temperatur penumbuhan yang rendah, serta memiliki kemudahan penumbuhan dalam daerah yang luas. Hal ini menyebabkan *a-Si* menjadi material yang murah untuk diaplikasikan pada berbagai divais semikonduktor²⁾.

Unjuk kerja divais semikonduktor dapat ditingkatkan, salah satu caranya adalah dengan pengoptimalan struktur divais itu sendiri, misalnya dengan penggunaan struktur *double barrier*. Struktur *double barrier* dapat diaplikasikan pada divais yang memiliki unjuk kerja berdasarkan pemancaran atau penyerapan cahaya, dimana struktur *double barrier* dapat meningkatkan efisiensi injeksi pembawa muatan (probabilitas tunneling)³⁾.

Fenomena resonans *tunneling* pada struktur *double barrier* telah diaplikasikan pada beberapa material kristal seperti GaAs, ZnSe, dan lain-lain. Dalam hal ini unjuk kerja divais-divais kristal tersebut telah dapat ditingkatkan⁴⁾. Namun demikian masih sedikit studi tentang struktur *double barrier* pada divais a-Si, sehingga aplikasi struktur *double barrier* pada divais a-Si diharapkan dapat meningkatkan unjuk kerja divais-divais tersebut. Pada studi yang lalu telah diaplikasikan struktur *double barrier* pada divais TFLED yang ditempatkan pada perbatasan lapisan p-i dan i-n. Dalam studi ini dikaji struktur *double barrier* yang lebih umum yang ditempatkan di tengah-tengah lapisan-i pada divais p-i-n a-Si^{2,5)}.

2. Probabilitas Tunneling

Struktur *double barrier* dalam studi ini dapat dibangun dengan mengkombinasikan material a-Si:H dengan material a-SiC:H yang memiliki celah energi optik yang berbeda. Celah energi optik a-Si:H dan a-SiC:H dapat diatur dengan mengontrol kandungan atom hidrogen dan atom karbon dalam material a-Si:H dan a-SiC:H. Profil potensial struktur *double barrier* di bawah pengaruh bias maju ditunjukkan pada Gambar 1, dimana d adalah tebal *barrier* dan w adalah lebar sumur potensial.



Gambar 1. Profil potensial struktur *double barrier* di bawah pengaruh bias maju.

Peningkatan unjuk kerja divais semikonduktor dengan struktur *double barrier* ditentukan oleh efisiensi injeksi pembawa muatan (elektron atau *hole*) melalui proses *tunneling*. Konsep yang mendasari peristiwa *tunneling* adalah sifat-sifat solusi persamaan schrodinger dan interpretasi probalistik. Jika ada elektron/*hole* datang dengan fungsi gelombang tertentu, maka hal terpenting dari gejala tersebut menurut

pandangan teori kuantum adalah probabilitas elektron atau *hole* untuk menerobos *barrier*.

Tunneling merupakan gejala kuantum dimana partikel dapat menembus *barrier*, walaupun energi partikel datang lebih kecil dibandingkan dengan energi potensial *barrier*. Kemampuan partikel untuk menembus *barrier* tersebut disebabkan oleh sifat dualisme gelombang-partikel, dimana sifat gelombang dari elektron/*hole* lebih berperan daripada sifat partikelnya.

Peristiwa *tunneling* pada struktur *double barrier* dapat dijelaskan sebagai berikut: Struktur potensial *double barrier* yang dilukiskan pada Gambar 1 terdiri dari dua *barrier* simetris dengan lebar *barrier* d dan lebar sumur potensial w . Jika ada elektron/*hole* datang dengan energi ϵ yang lebih kecil daripada energi potensial *barrier* V_0 , maka dalam keadaan ini elektron/*hole* dapat memasuki sistem dengan probabilitas *tunneling* mendekati harga satu. Hal ini dapat dijelaskan dengan keadaan resonans, yaitu bahwa elektron/*hole* mendapatkan penambahan probabilitas *tunneling* ketika energi elektron/*hole* yang datang tepat sama dengan energi resonans keadaan-keadaan eigen di dalam sumur potensial. Peristiwa ini juga dapat dipandang sebagai interferensi konstruktif antara gelombang elektron/*hole* yang meninggalkan *barrier* pertama dengan gelombang elektron/*hole* yang direfleksikan oleh *barrier* kedua.

Besarnya probabilitas *tunneling* dari pembawa muatan yang masuk ke dalam struktur *double barrier* dapat dimulai dari persamaan Schrodinger berikut ini:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V(z) \right] \psi(z) = \epsilon \psi(z) \quad (2.1)$$

Dengan memasukkan pendekatan WKB, dimana $z \approx \xi$, akan didapatkan probabilitas *tunneling* untuk *barrier* yang berbentuk segitiga⁶⁾:

$$P_{tri} = \exp \left[-\frac{4\sqrt{2m^*}}{3q\hbar E} (\Delta\epsilon_1)^{3/2} \right] \quad (2.2)$$

dan *barrier* yang berbentuk trapesium⁷⁾:

$$P_{tra} = \exp \left[-\frac{4\sqrt{2m^*}}{3q\hbar E} \left[(\Delta\epsilon_1)^{3/2} - (\Delta\epsilon_2)^{3/2} \right] \right] \quad (2.3)$$

dengan:

E = medan listrik pada *barrier*;

$\Delta\epsilon_1 = 1/2$ beda potensial antara *barrier* pertama dengan lapisan i;

$\Delta\mathcal{E}_2 = \frac{1}{2}$ beda potensial antara *barrier* kedua dengan lapisan *i*;

Pada proses injeksi pembawa muatan dalam struktur *double barrier*, terdapat efek hamburan antar-muka lapisan. Dengan adanya hamburan ini, pembawa muatan akan kehilangan memori fasa sehingga dapat menurunkan probabilitas *tunneling*. Proses hamburan ini terbagi menjadi dua, yaitu hamburan elastik dan hamburan inelastik. Hamburan inelastik berkaitan dengan pembukaan *channel* baru dan efek fisis yang utamanya adalah penyerapan *fluks* (elektron/*hole*) datang, yang akhirnya dapat menurunkan probabilitas *tunneling*^{4,8}). Untuk mendapatkan efek hamburan inelastik kita dapat menambahkan bagian imajiner pada potensial $V(z) = V_r(z) - iV_i(z)$, sehingga diperoleh fungsi eigen $\omega_n(z)$ yang merupakan solusi persamaan Schrodinger dengan potensial kompleks.

Untuk menguji kelakuan probabilitas *tunneling* koheren (dari hamburan elastik), Booker memasukkan faktor peredam (*damping factor*) γ , yang besarnya terletak $0 < \gamma < 1$. Dengan melakukan pendekatan Lorentzian, probabilitas *tunneling* untuk bagian koheren diperoleh:

$$P_c = P_{\max} \frac{\gamma \Gamma_{esc}^2}{\gamma(E_z - \varepsilon_n^0)^2 + \Gamma^2} \quad (2.4)$$

dan bagian inkoheren:

$$P_i = P_{\max} \frac{\frac{1}{2} \Gamma_{esc} (\Gamma_{is} + \gamma \Gamma_c + (1 - \gamma) \Gamma_{esc})}{\gamma(E_z - \varepsilon_n^0)^2 + \Gamma^2} \quad (2.5)$$

sehingga probabilitas *tunneling* total menjadi:

$$P_{tot} = P_{\max} \frac{\frac{1}{2} \Gamma_{esc} (\Gamma_{is} + \gamma \Gamma_c + (1 + \gamma) \Gamma_{esc})}{\gamma(E_z - \varepsilon_n^0)^2 + \Gamma^2} \quad (2.6)$$

dimana:

P_{\max} = probabilitas *tunneling* maksimum tanpa hamburan inelastik;

Γ_{esc} = kontribusi $\frac{1}{2}$ lebar resonansi;

Γ_{is} = kontribusi hamburan inelastik;

Γ_c = kontribusi hamburan akibat refleksi elektron/*hole*;

Γ = $\Gamma_{is} + \Gamma_{esc}$;

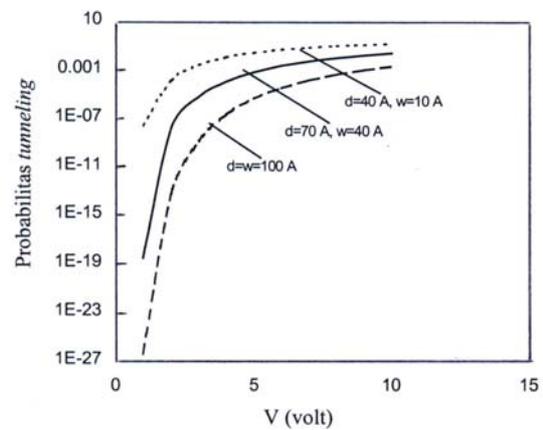
γ = faktor peredaman, dimana $\gamma=1$ menunjukkan hamburan elastik dan $\gamma=0$ menunjukkan hamburan inelastik;

E_z = energi elektron datang;

ε_n^0 = energi dalam keadaan resonan.

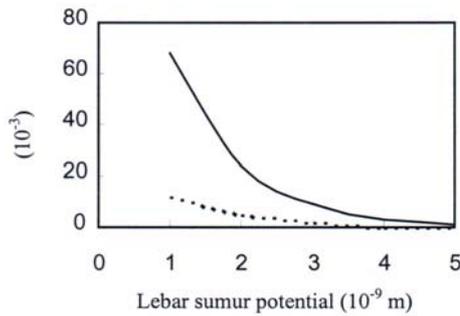
3. Hasil

Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* (P) terhadap tegangan luar pada struktur *double barrier* ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa semakin besar tegangan luar (medan listrik pada *barrier* menjadi lebih tinggi), probabilitas *tunneling* semakin meningkat. Probabilitas *tunneling* akan mengalami saturasi pada tegangan luar sekitar 10 V. Dari gambar terlihat pula bahwa nilai P yang paling tinggi dicapai pada *barrier* yang paling tipis ($d = 40 \text{ \AA}$) dan lebar sumur potensial 10 \AA .

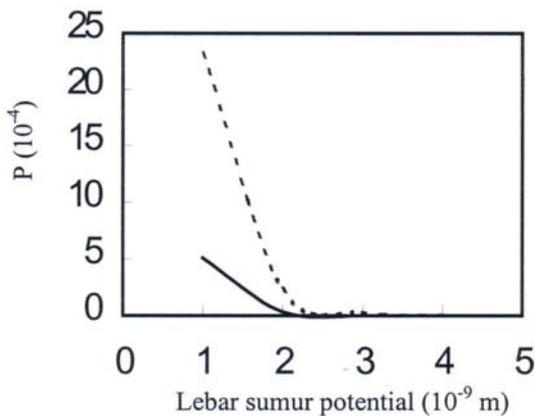


Gambar 2. Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* pada energi optik *barrier* 4 eV.

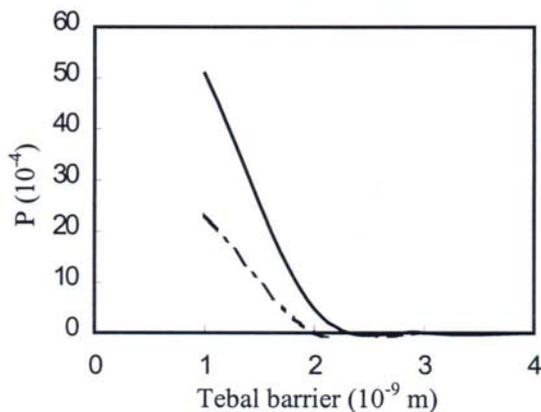
Perbandingan hasil perhitungan probabilitas *tunneling* untuk tinggi *barrier*, lebar sumur potensial dan tegangan bias yang berbeda-beda ditunjukkan pada Gambar 3, 4, 5 dan 6. Didapatkan bahwa bila tinggi *barrier* dibuat lebih rendah, lebar *barrier* lebih sempit, lebar sumur potensial lebih sempit dan tegangan bias lebih tinggi, maka pembawa muatan akan lebih mudah terinjeksi masuk ke dalam *barrier*, yang pada akhirnya dapat meningkatkan probabilitas *tunneling*. Dari hasil di atas terlihat bahwa optimasi probabilitas *tunneling* melalui struktur *double barrier* dari pembawa muatan perlu dilakukan untuk memperoleh unjuk kerja optimal dari divais yang dibentuk oleh struktur tersebut.



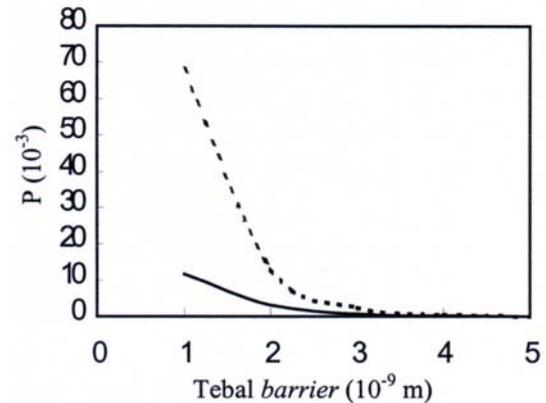
Gambar 3. Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* untuk tebal *barrier* 10 Å dan tinggi *barrier* 1 eV (garis tebal untuk $V = 10$ volt, garis putus-putus untuk $V = 8$ volt).



Gambar 4. Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* untuk tebal *barrier* 10 Å dan tinggi *barrier* 1.5 eV (garis tebal untuk $V = 8$ volt, garis putus-putus untuk $V = 10$ volt)

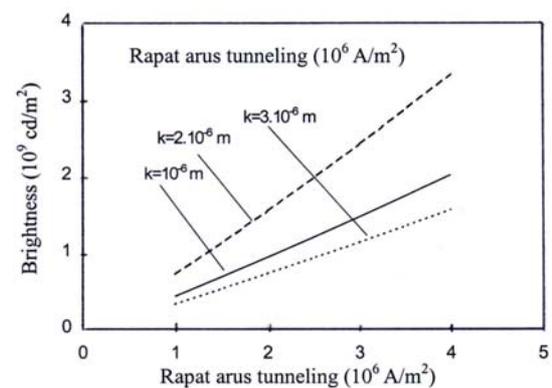


Gambar 5. Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* untuk lebar sumur potensial 10 Å dan tinggi *barrier* 1.5 eV (garis tebal untuk $V = 10$ volt, garis putus-putus untuk $V = 8$ volt).



Gambar 6. Hasil perhitungan probabilitas *tunneling* untuk lebar sumur potensial 10 Å dan tinggi *barrier* 1 eV (garis tebal untuk $V = 8$ volt, garis putus-putus untuk $V = 10$ volt).

Salah satu aplikasi dari struktur *double barrier* pada divais a-Si adalah untuk peningkatan unjuk kerja *Thin Film Light Emitting Diode* (TFLED), dimana struktur *double barrier* dapat meningkatkan rapat arus *tunneling*, yang pada akhirnya dapat meningkatkan harga *brightness* dari TFLED⁵⁾. Hasil perhitungan untuk keadaan ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil perhitungan *brightness* terhadap arus *tunneling* pada *Thin Film light Emitting Diode*

4. Kesimpulan

1. Unjuk kerja divais a-Si berdasarkan efisiensi penyerapan atau pemantulan cahaya dapat ditingkatkan dengan penggunaan struktur *double barrier*, dimana struktur *double barrier* dapat meningkatkan probabilitas *tunneling*.
2. Probabilitas *tunneling* pada struktur *double barrier* akan mencapai harga yang lebih tinggi jika lebar sumur potensial, tebal *barrier*, dan tinggi *barrier* dibuat lebih kecil.

3. Aplikasi struktur double barrier pada *Thin Film Light Emitting Diode* dapat menghasilkan *brightness* yang lebih tinggi jika rapat arus *tunneling* bertambah.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini terealisasi atas dukungan dana Domestic Collaborative Research Grant Program (University Research for Graduate Education) Universitas Pendidikan Indonesia dengan nomor kontrak:

Daftar Pustaka

1. K. Takahashi dan M. Konagai, *Amorphous silicon Solar Cell*, North Oxford Academic, London, 1986.
2. W.W. Wenas, *The 3rd Workshop on Electro Communication and Information*, WECI III (1999), p.4-17 – 4-20.
3. I. Hamidah dan W.W. Wenas, *The 3rd Workshop on Electro Communication and Information*, WECI III (1999), p.4-32 – 4-35.
4. S.M. Booker, *et.al.*, *Semiconductor Sci. Technology* **7** (1992), p.B439.
5. Ida Hamidah, Tugas Akhir, Jurusan Fisika, Institut Teknologi Bandung, 1999.
6. C.M. Wolfe, N. Holonyak, dan G.E. Stillman, *Physical Properties of Semiconductor*, Prentice Hall, New Jersey, 1989), p.303 – 305.
7. M. Paasche, *et. al.*, *IEEE Transaction on Electron Devices* **36**, (1989), p.1761 – 1769.
8. G. Garcia-Calderon, *he Physics of Low Dimensional Structures*, Plenum Press, New York, 1991, p.107 – 116.