

## Perancangan Modulator Fiber Optik 1.55 $\mu\text{m}$ Berbasis Elektroabsorpsi MQW AlGaSb / GaSb Jenis Waveguide Menggunakan Struktur Resonator Fabry-Perrot tidak simetri

Purnomo Sidi Priambodo<sup>1)</sup> dan Dodi Sudiana<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Optics and Remote Sensing (OPRES) Research Group

<sup>2)</sup>Department Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Email: [pspriambodo@ee.ui.ac.id](mailto:pspriambodo@ee.ui.ac.id)

### Abstrak

Dalam makalah ini dipresentasikan perancangan modulator fiber optik 1.55  $\mu\text{m}$  berbasis elektroabsorpsi MQW AlGaSb / GaSb jenis waveguide yang memanfaatkan struktur simetrik resonator Fabry-Perrot. Berbeda dengan struktur modulator tipe transversal yang eksis di pasar, dimana struktur resonator Fabry-Perrot adalah dalam bentuk cermin Bragg yang asimetrik yang tersusun atas lapisan-lapisan tipis film, sedangkan pada modulator tipe waveguide ini strukturnya adalah resonator Fabry-Perrot yang simetrik dengan reflektor berupa distribusi grating. Keuntungan dari modulator optik tipe waveguide ini dibandingkan dengan struktur transversal yang eksis adalah peningkatan pada rasio on/off dan selanjutnya akan mudah diintegrasikan dengan laser semikonduktor dan amplifiler optik semikonduktor yang dibangun diatas substrat GaSb yang sama. Paper ini memberikan kontribusi yang nyata pada perancangan modulator fiber-optik berbasis elektroabsorpsi.

**Keywords** — *electro-absorption, optical modulator, Fabry-Perrot cavity, waveguide MQW, waveguide grating.*

### I. LATAR BELAKANG

Kebutuhan akan modulator fiber optik dengan kecepatan tinggi meningkat sejak dekade 1990 karena peningkatan kebutuhan akan kinerja dari sistem telekomunikasi yang memanfaatkannya. Untuk sistem komunikasi jarak jauh, dimana *bandwidth* fiber optik mencapai beberapa THz dan konversi kecepatan antara optik dan elektronik telah meningkat ke puluhan GHz, telah mendorong pencarian modulator kecepatan tinggi yang handal. Teknik modulasi dengan secara langsung memodulasi laser semikonduktor tidak dikehendaki karena menyebabkan ketidak-stabilan laser dan menghasilkan noise yang menyebabkan penurunan unjuk kerja [1]. Satu-satunya jawaban untuk kebutuhan kecepatan tinggi tersebut adalah dengan menggunakan modulator eksternal. Dalam dunia *optical computing* and sistem komunikasi, kebutuhan untuk pengiriman jumlah data yang besar dan *switching light* dengan energi rendah, telah

mendorong pencarian terhadap perangkat modulator optoelektronik yang kecil dan ringkas.

Paling sedikit ada empat jenis modulator optik eksternal yang telah dikembangkan oleh para peneliti, yang berbasis kepada elektro-optik, akusto-optik, magneto-optik dan elektroabsorpsi. Modulator jenis elektro-optik telah dikembangkan sejak 1970-an. Modulator elektro-optik tersebut berbasis kepada efek Pockel dan Kerr. Kekurangan dari tipe modulator ini adalah karena tidak dapat diintegrasikan dengan laser semikonduktor dan amplifiler optik semikonduktor dengan basis substrat yang sama. Kekurangan lainnya lagi adalah kebutuhan akan catu daya yang tinggi dan ukurannya sangat besar sehingga menyebabkan kapasitans yang tinggi akhirnya menyebabkan piranti kecepatan rendah [2]. Catu daya yang tinggi membutuhkan catu daya ekstra untuk modulator, yang tidak kompatibel dengan sirkuit elektronik yang berkecepatan tinggi (5V atau kurang) [3]. Hal ini terjadi pula dalam modulator tipe akusto-optik dan magneto-optik. Sehingga modulator ketiga jenis modulator optik tersebut diatas bukan merupakan akhir jawaban.

Kemajuan dalam proses penumbuhan material kristal telah memungkinkan untuk mem-fabrikasi lapisan-lapisan tipis semikonduktor dengan presisi yang sangat tinggi. Sebagai contoh, *molecular beam epitaxy (MBE)* dan *metal organic chemical vapor deposition (MOCVD)* telah memiliki kapabilitas untuk menumbuhkan lapis-lapis tipis semikonduktor heterostruktur dengan *interface* tanpa cacat. Teknologi-teknologi ini menyebabkan efek mekanika kuantum dimungkinkan untuk terjadi. Satu hal yang sangat berarti dari teknologi pelapisan tipis semikonduktor tersebut adalah pengembangan modulator optik elektroabsorpsi berbasis kepada semikonduktor *multi quantum well (MQW)*. Efek elektroabsorpsi pada struktur semikonduktor adalah teknologi akhir yang diaplikasikan pada modulator optik. Prinsip bekerjanya berdasarkan kepada efek Franz-Keldysh [4], yaitu penggeseran spektrum absorpsi karena adanya medan listrik yang menyebabkan perubahan energi bandgap. Mekanisme efek ini disebut proses *tunneling*. Teorinya menyatakan bahwa *threshold* pada spektrum absorpsi bergeser ke daerah spektrum gelombang yang lebih panjang karena adanya medan

listrik. Akan tetapi, medan listrik tersebut tidak menghasilkan pasangan elektron dan *hole*. Pada saat awal, pengembangan modulator elektroabsorpsi dimulai dengan material *bulk*. Selanjutnya diketahui bahwa efek elektroabsorpsi meningkat beberapa kali lipat dengan memanfaatkan struktur MQW dalam modulator [3]. *Quantum well (QW)* menghasilkan efek *confinement* pada elektron dan *hole*, yang terperangkap dalam *well*. Struktur MQW terdiri atas barrier dan *well*, yang masing-masing memiliki ketebalan  $70\text{\AA}$ , menyebabkan elektron dan hole terbatas dalam gerakan 2-D. Terbatasnya gerakan pada dimensi yang lain (tegak lurus pada bidang struktur quantum well) menyebabkan efek kuantisasi pada fungsi kerapatan energi dari elektron dan hole didalam struktur tersebut. Hal ini menajamkan kurva absorpsi dan meningkatkan efektivitas modulator [1]. Photon dengan cukup energi akan di-absorpsi dan akan menghasilkan satu pasangan elektron dan hole yang disebut sebagai eksiton. Karena terperangkap dalam QW, ikatan energi eksiton meningkat. Karena adanya kuantisasi energi dan ikatan energi eksiton yang tinggi, akan menajamkan kurva absorpsi. Untuk meningkatkan efek QW, para peneliti meningkatkan jumlah QW menjadi MQW. Efek paling fundamental karena adanya medan listrik terpasang adalah penurunan *zero-point energy* (energi dasar) dari kuantisasi elektron dan hole pada QW. Efek ini disebut sebagai quantum-confined Stark effect (QCSE) [5].

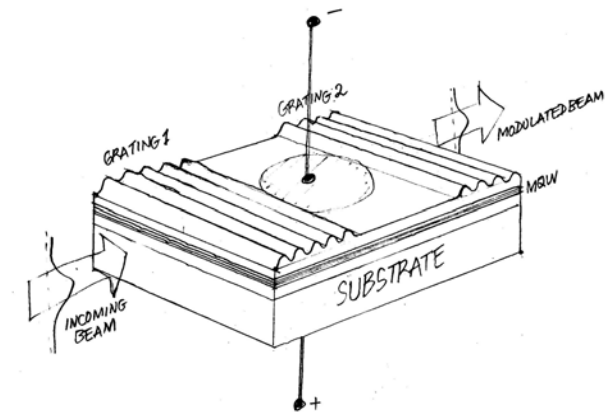
Ada dua struktur divais yang fundamental dalam pengembangan modulator optik berbasis elektroabsorpsi. Struktur yang pertama adalah jenis modulator transversal dan yang kedua adalah struktur lateral atau waveguide. Pada modulator jenis transversal, sinar masuk dan keluar tegak lurus terhadap substrat dan struktur MQW. Keuntungan dari struktur transversal adalah kompatibel dengan struktur *vertical cavity surface emitting laser (VCSEL)* dan ideal untuk interkoneksi matrik 2-D dan aplikasi untuk komputasi optik [6]. Kekurangan dari struktur transversal ini adalah interaksi antara sinar dan material sangat pendek, sependek tebalnya lapisan MQW, yang menyebabkan rasio on/off menjadi rendah. Untuk meningkatkan interaksi sinar dan materialnya, selanjutnya dipergunakan struktur resonator Fabry-Perrot (FP) yang tidak simetrik [7-9]. Dimana reflektor utamanya pada substrat adalah struktur reflektor Bragg yang terdiri atas susunan layer-layer film dengan tebal seperempat panjang gelombang dengan tingkat reflektiviti 99%. Sedangkan reflektor yang kedua adalah struktur sederhana yang berupa interface antara udara dan semikonduktor yang umumnya memiliki reflektiviti kurang lebih 30%. Secara umum modulator transversal dirancang sebagai modulator jenis reflectance [7-10]. Jenis kedua adalah modulator waveguide, dimana interaksi antara sinar dan material lebih panjang yang berarti memiliki rasio on/off yang

lebih tinggi. Keuntungan lain dari modulator tipe waveguide adalah kemungkinan terintegrasinya dengan semikonduktor laser dan semikonduktor amplifiler optik pada satu substrat yang sama [5]. Masing-masing jenis struktur modulator tersebut memiliki keuntungan dan kerugian. Akan tetapi dengan mempertimbangkan integrasi perangkat, rasio on/off yang lebih tinggi dan kecepatan, penulis memilih struktur modulator jenis waveguide untuk dikembangkan.

## II. PERANCANGAN DAN PERHITUNGAN

Karena modulator tipe waveguide memiliki interaksi sinar-material yang panjang, maka sebagian peneliti umumnya menggunakan metoda sekali-jalan untuk sinar berinteraksi dengan wilayah elektro-absorpsi, tanpa harus mengulang kembali penggunaan wilayah absorpsi tersebut. Berbeda dengan jenis transversal yang memiliki wilayah absorpsi yang sangat pendek sehingga memerlukan struktur resonator Fabry-Perrot untuk meningkatkan performa rasio on/off-nya [7-9].

Ada ide baru yang disampaikan dalam paper ini yaitu memanfaatkan struktur resonator FP seperti yang terlihat pada Gambar-1. Dengan mengimplementasikan struktur FP tidak simetri pada modulator waveguide, yang akan memperpendek wilayah interaksi sinar dan material absorpsi untuk mendapatkan rasio on/off yang sama. Selanjutnya dengan wilayah interaksi yang mengecil akan menyebabkan area kontak mengecil dan mengecilkan nilai kapasitans yang pada akhirnya akan menaikkan kecepatan dari modulator tersebut.



Gambar 1. Modulator optik tipe waveguide yang menggunakan struktur resonator Fabry-Perrot

Ada 3 langkah untuk merancang modulator optik tersebut. Langkah pertama adalah perancangan satu fundamental mode yang terpandu dalam modulator waveguide. Karena waveguide tersebut berisi banyak lapisan superlattice dan MQW, maka butuh proses rata-rata estimasi dari indeks refraksi efektif dari waveguide yang dapat didekati oleh teori medium

efektif[11-13]. Indeks refraksi efektif dari waveguide dapat dituliskan sebagai berikut

$$n_{wg} = [n_L^2 + f(n_H^2 - n_L^2)]^{0.5} \quad (1)$$

dimana  $f$  adalah rasio  $d_H/(d_H+d_L)$  dan  $d_H$ ,  $d_L$  adalah indeks refraksi tinggi dan rendah.

Langkah kedua, setelah mengetahui indeks refraksi efektif waveguide, kemudian dilanjutkan dengan menghitung jumlah mode didalam waveguide dengan menggunakan persamaan dispersi [14]:

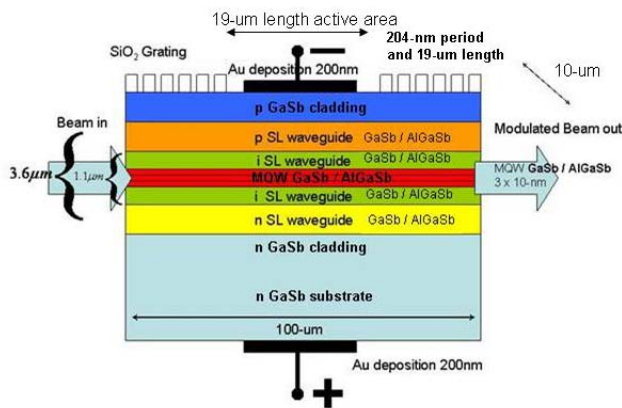
$$2k n_{wg} h \cos \theta - 2\Phi_s - 2\Phi_c = 2q\pi \quad (2)$$

dimana  $q$  adalah bilangan bulat (0,1,2, ...), yang mengidentifikasi nomor mode-nya. Pergeseran fase  $\Phi_s$  dan  $\Phi_c$  adalah pergeseran fase pada interface substrate dan cover dan merepresentasikan fungsi  $\theta$ .  $h$  adalah tebal dari waveguide. Untuk struktur film yang hamper simetri seperti yang kami rancang, jumlah mode dalam waveguide dapat diturunkan dari persamaan (2) dan menjadi [14]

$$N = \frac{2h}{\lambda} \sqrt{n_{wg}^2 - n_s^2} \quad (3)$$

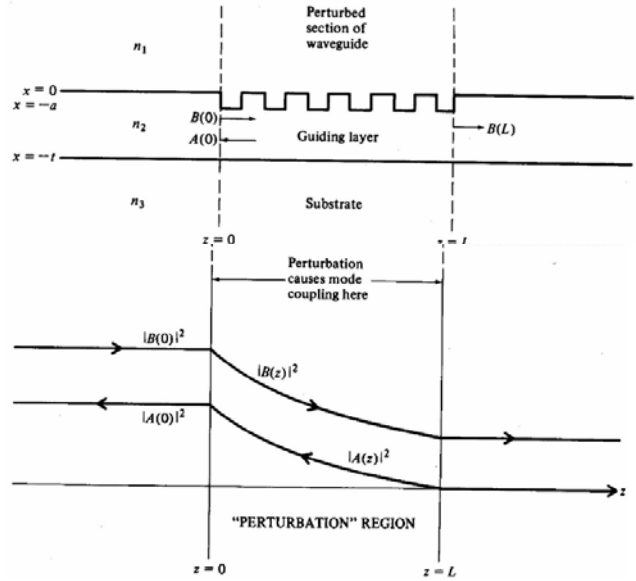
Dimana  $N$  adalah bilangan bulat dan  $N = q+1$ . Selanjutnya, harga eksak dari  $\theta$  dapat diselesaikan secara komputasi dengan menggunakan persamaan (2).

Struktur rinci dari rancangan modulator waveguide elektroabsorpsi ditunjukkan dalam Gambar-2. Berbeda dengan laser semikonduktor yang beroperasi dengan bias forward, modulator elektroabsorpsi ini menggunakan bias reversed (terbalik).



**Gambar 2.** Struktur rinci rancangan modulator waveguide elektroabsorpsi

Langkah ketiga, struktur grating berfungsi sebagai cermin 1 dan 2 dari resonator FP. Perancangan cermin grating tersebut berbasis kepada teori perturbasi dari kopling mode dalam waveguide optik [15]. Dasar teorinya adalah bahwa cermin grating tersebut meng-kopling mode gelombang datang dengan yang terpantulkan.



**Gambar 3.** (Atas) Cermin grating sebagai bagian dari FP. (Bawah) Kopling diantara gelombang datang dan pantul dalam grating

Kopling diantara gelombang datang  $B(z)$  dan pantul  $A(z)$  dapat diterangkan sebagai berikut [15]

$$\frac{dA}{dz} = \kappa_{ab} B e^{-i2(\Delta\beta)z} \quad (4-a)$$

$$\frac{dB}{dz} = \kappa_{ab}^* A e^{+i2(\Delta\beta)z} \quad (4-b)$$

dimana  $\kappa_{ab}$  adalah kopling diantara gelombang A ke B dan konjugatnya. Jawaban untuk persamaan (4) untuk kondisi dimana  $A(L) = 0$  dan dalam kondisi matched (pas)  $\Delta\beta = 0$ , dapat dirumuskan sebagai

$$A(z) = B(0) \frac{\kappa_{ab}}{|\kappa_{ab}|} \frac{\sinh[\kappa(z-L)]}{\cosh \kappa L} \quad (5-a)$$

$$B(z) = B(0) \frac{\cosh[\kappa(z-L)]}{\cosh \kappa L} \quad (5-b)$$

Pada  $z = L$ , sebagai contoh misalnya kita merancang cermin grating dengan  $R = T = 25\%$ . Sehingga dari persamaan (5-b), didapatkan

$$\cosh \kappa L = 2 \cosh 0 = 2 \quad (6)$$

Hal ini berarti  $L = 1.32 / \kappa$ . Untuk menyelesaikan panjang  $L$ , diperlukan penyelesaian untuk koefisien kopling  $\kappa$ , yang diatur oleh persamaan berikut [15]:

$$\kappa = \frac{i\omega\epsilon_0 a_i}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \left[ \xi_y^s(x) \right]^2 dx \quad (7)$$

Persamaan (7) menjelaskan bahwa koefisien kopling diantara mode tergantung pada beberapa parameter, yaitu: (1)  $\Delta n(x)$  perbedaan tinggi rendah indeks refraksi dari material grating; (2)  $\omega$  frekuensi; (3)  $a_i$  komponen Fourier dari grating yang berkontribusi

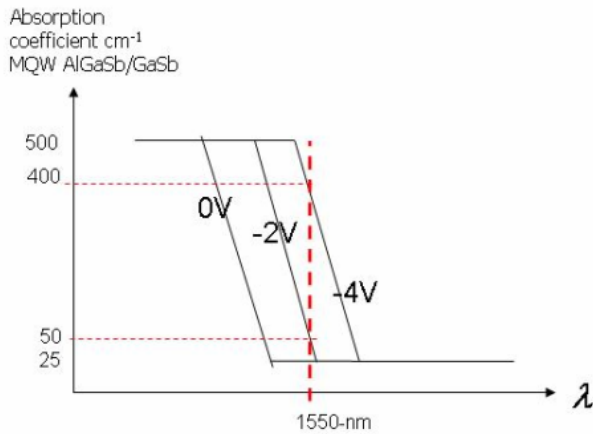
terhadap kopling (dalam kasus ini, ditentukan  $l = 1$  dimana  $a_1 = -i/\pi$ ) dan (4)  $\xi_y$  adalah bagian dari mode yang terpandu overlap pada grating. Periode grating  $\Lambda$  dihitung dengan [15]

$$\Lambda = \frac{\pi}{\beta} \quad (8)$$

Setelah menyelesaikan kalkulasi untuk panjang grating dan periodenya, berarti telah menyelesaikan struktur waveguide dan FP.

Ada 3 parameter yang menjadi tujuan dalam perancangan modulator: (1) kapasitans divais, (2) rasio on/off dan (3) *internal insertion loss*. Nilai kapasitans divais secara mudah didapatkan dengan menghitung luasan kontak bias, tebal wilayah intrinsik dari waveguide dan akhirnya rata-rata konstanta dielektrik dari waveguide. Untuk struktur yang diperlihatkan pada Gambar-2, dimana panjang area yang aktif adalah 19- $\mu\text{m}$  dengan lebar 10- $\mu\text{m}$ , didapattkan nilai kapasitans  $3.1 \times 10^{-5}$  nF. Dengan asumsi impedance sumbernya adalah 50- $\Omega$ , nilai tersebut sebanding dengan 3-dB bandwidth  $1/2\pi RC_{\text{Mod}}$  dari 100-GHz.

Analisa parameter seperti rasio on/off dan internal insertion loss membutuhkan informasi lebih lanjut tentang kurva absorpsi dari MQW. Dari langkah pertama dari perancangan, untuk tujuan simulasi, kita dapat mengasumsikan kurva absorpsi seperti terlihat pada Gambar-4. Untuk menghitung rasio on/off, efek dari resonator FP harus dihitung terlebih dahulu.



**Gambar 4.** Asumsi kurva elektroabsorpsi dari MQW pada beberapa nilai reversed bias (0, -2V and -4V)

Untuk kasus FP yang tidak simetri dimana reflektans cermin ke1 adalah  $r_1$  dan reflektans cermin ke2 adalah  $r_2$ , maka jika mode datang memiliki insitas  $I_{in}$ , setelah melalui resonator FP, keluaran modenya pada kondisi ON kurang lebih adalah

$$I_{out} = (1-r_2)I_{in}e^{-\alpha_{ON}L} \left( 1 + r_2r_1e^{j\varphi}e^{-2\alpha_{ON}L} + (r_2r_1e^{j\varphi}e^{-2\alpha_{ON}L})^2 + \dots \right) \quad (9)$$

Atau dapat ditulis dalam bentuk:

$$I_{out} = \frac{(1-r_2)I_{in}e^{-\alpha_{ON}L}}{(1-r_2r_1e^{j\varphi}e^{-2\alpha_{ON}L})^2} \quad (10)$$

Dimana  $\varphi$  adalah perbedaan fase dan  $\alpha_{ON}$  adalah koefisien absorpsi dan L adalah panjang interaksi sinar dan material. Untuk FP, dirancang  $\varphi$  adalah kelipatan dari  $2\pi$ , sehingga persamaan (10) dapat ditulis dalam bentuk:

$$I_{out} = \frac{(1-r_2)I_{in}e^{-\alpha_{ON}L}}{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{ON}L})^2} \quad (11)$$

Untuk single-pass (sekali jalan) divais, rasio on/off ditulis sebagai

$$On / Off = \frac{e^{-\alpha_{ON}L}}{e^{-\alpha_{OFF}L}} = e^{-(\alpha_{ON}-\alpha_{OFF})L} \quad (12)$$

Rasio On/Off dengan menggunakan Fabry-Perrot:

$$On / Off \text{ gain of FP} = \frac{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{OFF}L})^2}{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{ON}L})^2} \quad (13)$$

Sehingga, rasio on/off dari modulator elektroabsorpsi dengan resonator FP tidak simetris ditulis sebagai

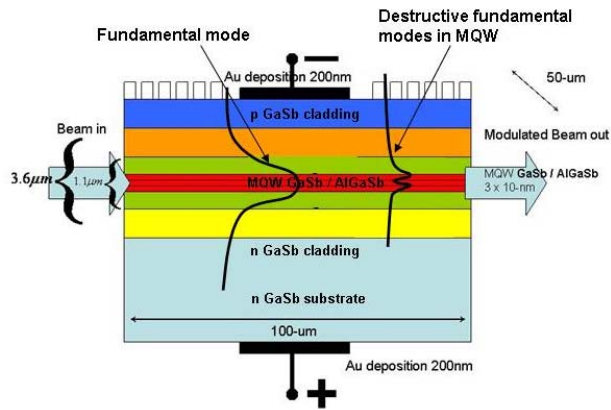
$$On / Off = \frac{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{OFF}L})^2}{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{ON}L})^2} e^{(\alpha_{OFF}-\alpha_{ON})L} \quad (14)$$

internal insertion loss *ILL* dengan mudah dihitung pada kondisi ON

$$ILL = \frac{r_2(1-r_1) \cdot e^{-\alpha_{ON}L}}{(1-r_1r_2 \cdot e^{-2\alpha_{ON}L})^2} \quad (15)$$

### III. HASIL

Dalam proses pengembangan software perancangan, ditemukan bahwa tidak hanya fundamental mode yang eksis didalam modulator waveguide, tetapi juga beberapa fundamental mode eksis dalam struktur MQW karena disebabkan struktur simetris dari lapisan-2nya. Multi fundamental mode tersebut dapat menginterferensi terhadap fundamental mode waveguide yang diinginkan dan hasil selanjutnya adalah penurunan performansi kecepatan divais tersebut. Akan tetapi, multi fundamental mode tersebut yang eksis dalam MQW bergerak lebih cepat dari fundamental mode yang diinginkan, sehingga dengan mudah akan terdifraksi keluar oleh struktur cermin grating pada resonator FP [16].



**Gambar 5.** Fundamental mode dari modulator terinterferensi oleh multi fundamental mode pengganggu yang eksis dalam MQW layers.

Hal ini menjadi bukti bahwa pemanfaatan resonator FP pada modulator elektroabsorpsi jenis waveguide tidak hanya meningkatkan rasio on/off dan mengurangi kapasitas divais, tetapi juga membersihkan fundamental modes yang mengganggu yang eksis dalam lapisan MQW.

Dari simulasi atas rancangan yang ditunjukkan dalam Gambar-2, secara teori kita dimungkinkan untuk mendapatkan kecepatan divais sekitar 100-GHz 3-dB bandwidth. Dengan mengasumsikan bahwa indeks refraksi dari GaSb dan AlGaSb pada panjang gelombang 1550-nm adalah 3.75 dan 3.8, kita mendapatkan hasil bahwa periode grating  $\Lambda = 204.4\text{-nm}$ . Lebih lanjut dengan mengasumsikan bahwa  $\alpha_{ON} = 50\text{ cm}^{-1}$  dan  $\alpha_{OFF} = 2050\text{ cm}^{-1}$  and  $r1 = 0,8$  dan  $r2=0.3$ , didapatkan  $On/Off = 25\text{-dB}$  yang sangat bagus untuk modulator. Sedangkan internal insertion loss  $ILL = 2.365\text{-dB}$ .

#### IV. KESIMPULAN

Ide baru berupa modulator optics berbasis elektroabsorpsi dengan jenis waveguide dikombinasikan dengan penggunaan resonator Fabry-Perrot yang tidak simetri. Hal ini menjanjikan peningkatan rasio on/off, menurunkan kapasitas divais dan akhirnya meningkatkan kecepatan modulator.

Karena modulator tipe waveguide memungkinkan untuk diintegrasikan dengan laser semikonduktor dan amplifier optik semikonduktor, pengembangan divais ini akan sangat berarti di masa mendatang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Preston P. Young and Dr. K. Alavi dari University of Texas at Arlington untuk kontribusi diskusi. Juga terima kasih kepada Prof. R. Magnusson dari

University of Connecticut untuk bantuan yang sangat berharga.

Riset ini didanai oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dalam program Insentif Ristek.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] T.H. Wood, "Multiple quantum well (MQW) waveguide modulators," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 6, June 1988, pp. 743-757.
- [2] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, "Fundamentals of photonics," John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-83965-5, 1991.
- [3] M. Whitehead, A. Rivers and G. Parry, "Very low voltage, normally-off asymmetric Fabry-Perot reflection modulator," *Electronics Letters*, Vol. 26, No. 19, 13th September 1990, pp. 1588-1590.
- [4] H. I. Ralph, "On the theory of the Franz-Keldysh effect," *J. Phys.C (Proc. Phys.Soc)*, Ser. 2, Vol. 1, 1968, pp. 378-386.
- [5] M. Bass and E.W. van Stryland, "Fiber Optics Handbook," Optical Society of America, McGraw-Hill, ISBN 0-07-138623-8, 2002, pp. 4.57-4.63.
- [6] R.H. Yan, R.J. Simes and L.A. Coldren, "Surface-normal asymmetric electroabsorption reflection modulators using asymmetric Fabry-Perot structures," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 7, July 1991, pp. 1922-1931.
- [7] P. Zouganeli, M. Whitehead, P.J. Stevens, A.W. Rivers, G. Parry and J.S. Roberts, "High tolerance for low-voltage, high-contrast, low-insertion-loss asymmetric Fabry-perot modulators," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 3, No. 8, August 1991, pp. 733-735.
- [8] K.K. Law, J.L. Merz and L.A. Coldren, "Superlattice surface-normal asymmetric Fabry-Perot reflection modulators: optical modulation and switching," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 29, No. 2, February 1989, pp. 727-740.
- [9] R.H. Yan, R.J. Simes and L.A. Coldren, "Electroabsorptive Fabry-perot reflection modulators with asymmetric mirror," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 1, No. 9, September 1989, pp. 273-275.
- [10] M. Whitehead, A. Rivers and G. Parry, "Low-voltage multiple quantum well reflection modulator with on:off ratio  $> 100:1$ ," *Electronics Letters*, Vol. 25, No. 15, 20th July 1989, pp. 984-985.
- [11] S. M. Rytov, "Electromagnetic properties of a finely stratified medium," *Soviet Physics JETP*, vol. 2, pp. 466-475, 1956.

- [12] E. N. Glytsis, T. K. Gaylord, and D. L. Brundrett, "Rigorous coupled-wave analysis and applications of grating diffraction," in *Diffraction and Miniaturized Optics*, vol. CR49, S. H. Lee, Ed.: SPIE, pp. 3-31, 1994.
- [13] D. L. Brundrett, E. N. Glytsis, and T. K. Gaylord, "Homogeneous layer models for high-spatial-frequency dielectric surface-relief gratings: conical diffraction and antireflection designs," *Applied Optics*, vol. 33, pp. 2695-2706, 1994.
- [14] T. Tamir, "Integrated Optics", Springer-Verlag, 1979
- [15] A. Yariv, "Optical Communications", Oxford, 1991
- [16] P.S. Priambodo, H. Sudibyo and D. Hartanto, "Design of Electro-Absorption Optical Modulator Incorporated with Waveguide MQW AlGaSb/GaSb and Fabry-Perrot Grating Cavity Structure for Fiber-Optics 1.55  $\mu\text{m}$  Communication System," The 10th Quality in Research International Conference, Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok 4-5 December 2007.