

**PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS
MATLAB UNTUK MERANCANG MODULATOR
FIBER OPTIK ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR
WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY
FABRY-PERROT**

SKRIPSI

Oleh

HIMAWAN KARTAATMADJA

0404030474



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS
MATLAB UNTUK MERANCANG MODULATOR
FIBER OPTIK ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR
WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY
FABRY-PERROT**

Oleh

HIMAWAN KARTAATMADJA

0404030474



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS MATLAB UNTUK
MERANCANG MODULATOR FIBER OPTIK ELEKTROABSORPSI
BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY
FABRY-PERROT**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 27 Mei 2008

(Himawan Kartaatmadja)
NPM 0404030474

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS MATLAB UNTUK
MERANCANG MODULATOR FIBER OPTIK ELEKTROABSORPSI
BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY
FABRY-PERROT**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada 27 Mei 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 27 Mei 2008

Dosen Pembimbing,

Ir. Purnomo Sidhi Priambodo M.Sc., Ph.D.
NIP . 0407050192

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmatNya sehingga penulis diberi kekuatan untuk mencapai hasil yang maksimal dalam pengerjaan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

Ir. Purnomo Sidhi Priambodo M.Sc., Ph.D.

selaku Dosen Pembimbing skripsi atas kontribusinya dalam menentukan judul dan telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, petunjuk, dan saran-saran serta kemudahan lainnya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Selain itu penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu mendukung dan menguatkan baik dalam doa dan materiil.
2. Kakak saya, Norman Kartaatmadja yang selalu memberikan dukungan doa dan kekuatan.
3. Rekan-rekan asisten laboratorium Elektronika dan Kendali Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang selalu mendukung dan memberikan bantuan.
4. Rekan-rekan kosan 'Pokus' yang telah memberikan dukungan dan semangat.
5. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu atas bantuannya dan doanya.

Depok, 27 Mei 2008

Penulis,

Himawan Kartaatmadja
NPM. 0404030474

Himawan Kartaatmadja
NPM 04 04 03 0474
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
*Ir. Purnomo Sidhi Priambodo M.Sc.,
Ph.D.*

**PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS MATLAB UNTUK
MERANCANG MODULATOR FIBER OPTIK ELEKTROABSORPSI
BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY
FABRY-PERROT**

ABSTRAK

Kebutuhan akan sistem fiber optik semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan kecepatan dan kapasitas transfer data. Karena keterbatasan kecepatan dari *direct injected* modulator pada sistem fiber optik maka eksternal modulator semakin dipilih saat ini. Ada berbagai jenis modulator optik, tetapi yang menjadi topik bahasan utama dalam skripsi ini adalah modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide*.

Dalam skripsi ini dibahas mengenai perancangan modulator *elektroabsorpsi* tipe *waveguide* dengan menggunakan *software* yang berbasis MATLAB. Pada skripsi ini akan dirancang modulator *elektroabsorpsi* dengan penumbuhan *grating* pada bagian atasnya sebagai cermin dan menggunakan *multiple quantum well* AlGaSb/GaSb di bagian tengah *waveguide* untuk meningkatkan kemampuan penyerapannya. Penumbuhan *grating* berfungsi sebagai cermin yang dapat meningkatkan intensitas pada *cavity*. Modulator ini ditumbuhkan diatas substrat GaSb. Dengan *software* ini dapat diketahui *mode* yang terdapat pada *waveguide*, bentuk *mode* yang bergerak di *waveguide*, spesifikasi *perturbation region*, serta rasio ON/OFF dan *insertion loss* nya.

Berdasarkan hasil perancangan modulator dengan panjang gelombang kerja 1550nm, hanya terdapat *fundamental mode* yang bergerak di *waveguide*. Sedangkan *grating* diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan *reflectance* sebesar 50%. Dengan adanya penambahan *grating* ini maka rasio ON/OFF dari modulator dapat ditingkatkan sampai 45 kali dan kecepatannya dapat ditingkatkan sampai 3 kalinya.

Kata kunci : Modulator elektroabsorpsi, Waveguide, Grating, AlGaSb/GaSb, MATLAB.

Himawan Kartaatmadja
NPM 04 04 03 0474
Electrical Department Engineering

Counsellor
*Ir. Purnomo Sidhi Priambodo M.Sc.,
Ph.D.*

**SOFTWARE DEVELOPMENT BASED ON MATLAB FOR DESIGNING
FIBER OPTIC ELECTROABSORPTION MODULATOR TYPED
WAVEGUIDE WITH FABRY-PERROT CAVITY STRUCTURE**

ABSTRACT

The demand of fiber optic system has increased along with the increasing of need speed and data transfer capacity. Because of speed limitation of direct injected modulator in fiber optic system, external modulator has become popular nowadays. There are several types of optical modulators, but we will make a major discuss in electroabsorption modulator typed waveguide.

The research will develop software for designing electroabsorption modulator typed waveguide with MATLAB program. In this research, we develop an electroabsorption modulator with grating above as a reflector and multiple quantum well AlGaSb/GaSb in the middle of waveguide to increase absorption. Grating acts as a mirror that increases the intensity in cavity. Modulator is made on GaSb substrate. With this software, we can analyze type of mode that travels inside the waveguide, shape of the mode, specification of perturbation region, and also ON/OFF Ratio and insertion loss.

The research has obtained a result for this modulator design that operates in 1550nm wavelength. There is only fundamental mode that travels along the waveguide. Besides that, grating is arranged so it will act as a 50% mirror. With this grating added, ON/OFF ratio of this modulator will increase 45 times dan its speed 3 times normal.

Key words : Modulator electroabsorption, Waveguide, Grating, AlGaSb/GaSb, MATLAB.

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 BATASAN MASALAH	3
1.5 SISTEMATIKA PENELITIAN	3
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 MODULATOR OPTIK	5
2.1.1 Jenis-jenis dari modulator optik	5
2.1.1.1 <i>Modulator Acousto-optic (MAO)</i>	5
2.1.1.2 <i>Modulator Elektro-optik (MEO)</i>	6
2.1.1.3 <i>Modulator Interferometrik</i>	6
2.1.1.4 <i>Modulator Elektroabsorpsi (MEA)</i>	7
2.2 WAVEGUIDE	8
2.2.1 Fungsi dari waveguide	9
2.2.2 Proses pembuatan waveguide	9
2.2.3 Mode pada waveguide	10

2.3	MODULATOR OPTIK BERBASIS ELEKTROABSORPSI	11
2.3.1	Pengaruh MQW pada Modulator Elektroabsorpsi	11
2.3.2	Rasio ON/OFF	16
2.3.3	Insertion Loss	19
2.3.4	Kecepatan Divais	20
2.3.5	Modulator MQW Vs Direct Modulated Injected Laser	23
2.4	MODULATOR OPTIK BERBASIS ELEKTROABSORPSI DENGAN GRATING	24
2.4.1	Faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat pemantulan pada grating	25
2.4.1.1	<i>Tinggi Grating</i>	25
2.4.1.2	<i>Panjang Perturbation Region</i>	25
2.4.1.3	<i>Tebal Waveguide</i>	26
2.4.1.4	<i>Indeks bias grating dan index bias medium sekitarnya</i>	26
2.4.2	Perturbation region	26
2.4.3	Keuntungan dari penambahan struktur corrugation grating	27
2.4.3.1	<i>Meningkatkan on/off ratio</i>	27
2.4.3.2	<i>Mengurangi Drive voltage</i>	28
2.4.3.3	<i>Memperkecil ukuran modulator dan meningkatkan kecepatan modulator</i>	28
BAB III PERANCANGAN MODULATOR OPTIK ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY FABRY-PERROT		29
3.1	RANCANG BANGUN WAVEGUIDE OPTIK	29
3.1.1	Bentuk geometris dari waveguide	30
3.1.2	Jumlah mode pada waveguide	32
3.1.3	Gambar mode	35
3.2	RANCANG BANGUN STRUKTUR GRATING	38
3.2.1	Teori perturbasi untuk kopling mode	38
3.2.2	Corrugated periodic waveguide/grating	40
3.2.3	Solusi dari Coupled Mode	45

3.3	MODULATOR ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN GRATING	47
3.3.1	Intensitas pada struktur cavity	48
3.3.2	Rasio ON/OFF	50
3.3.3	Internal Insertion Loss	50
3.3.4	Kecepatan Divais	50
BAB IV PERHITUNGAN PARAMETER-PARAMETER PADA MODULATOR		52
4.1	GaSb	52
4.2	AlGaSb	53
4.3	SiO ₂	53
4.4	BENTUK GEOMETRIS MODULATOR	54
4.5	GAMBAR MODE YANG BERGERAK PADA WAVEGUIDE	55
4.6	STRUKTUR GRATING	56
4.7	RASIO ON/OFF DAN INSERTION LOSS PADA MODULATOR	57
4.7.1	Kondisi 1	59
4.7.2	Kondisi 2	60
4.8	KECEPATAN MODULATOR	60
BAB V KESIMPULAN		62
DAFTAR ACUAN		64
DAFTAR PUSTAKA		66
LAMPIRAN		68

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Modulator Acousto-optic. Transducer menghasilkan gelombang suara, sehingga berkas cahaya terdifraksi	5
Gambar 2.2 Sel Pockel pada MEO dengan longitudinal electric field modulation	6
Gambar 2.3 <i>Mach-Zehnder</i> interferometer, BS adalah beam splitter	7
Gambar 2.4 Bagian kiri adalah modulator <i>electroabsorption</i> tipe bulk, and sebelah kanan adalah modulator <i>electroabsorption</i> tipe <i>waveguide</i>	7
Gambar 2.5 <i>Waveguide</i>	8
Gambar 2.6 Struktur umum dari <i>waveguide</i>	9
Gambar 2.7 Model planar <i>waveguide</i>	10
Gambar 2.8 <i>Quantum Well</i>	12
Gambar 2.9 (a) <i>Quantum Well</i> pada saat tidak diberi medan listrik. (b) Saat diberi medan listrik	13
Gambar 2.10 Grafik wavelength/ <i>photon</i> energy VS Absorption Coefficient	14
Gambar 2.11 <i>Transverse</i> modulator	15
Gambar 2.12 Transmisi dari MQW	16
Gambar 2.13 Modulator tipe <i>waveguide</i>	18
Gambar 2.14 Pengujian <i>speed</i> dari modulator berdasarkan domain waktu	21
Gambar 2.15 Pengujian <i>speed</i> dari modulator berdasarkan domain frekuensi	22
Gambar 2.16 (atas) Struktur <i>waveguide</i> yang ditumbuhkan <i>grating</i> . (bawah) Intensitas <i>mode</i> yang dipantulkan dan diteruskan pada <i>perturbation region</i>	27
Gambar 3.1 Struktur <i>layer</i> dari modulator elektroabsorpsi GaSb/AlGaSb tanpa <i>cavity Fabry-Perrot</i>	31
Gambar 3.2 Software untuk menentukan jumlah <i>mode</i>	31
Gambar 3.3 Penampang longitudinal <i>Waveguide</i>	33

Gambar 3.4	Gambar distribusi medan elektromagnetik dari <i>mode</i> dalam struktur <i>waveguide</i>	36
Gambar 3.5	Gambar struktur <i>grating</i>	38
Gambar 3.6	Corrugated periodic <i>waveguide</i>	41
Gambar 3.7	Gambar spesifikasi <i>grating</i> dan <i>perturbation region</i>	47
Gambar 3.8	Program menghitung parameter-parameter pada modulator <i>elektroabsorpsi</i> dengan <i>grating</i>	48
Gambar 4.1	Grafik indeks bias dari GaSb pada suhu 300K (pendekatan)	52
Gambar 4.2	Grafik indeks bias dari SiO ₂ pada suhu 300K	53
Gambar 4.3	Modulator elektroabsorpsi dengan <i>grating</i>	54
Gambar 4.4	Program untuk menghitung spesifikasi <i>waveguide</i>	55
Gambar 4.5	Gambar <i>mode</i>	56
Gambar 4.6	Struktur <i>Grating</i> yang simetris	57
Gambar 4.7	Spesifikasi <i>Grating</i>	57
Gambar 4.8	Rasio ON/OFF dan <i>Insertion loss</i> Modulator	58

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Perbandingan antara modulator dengan <i>grating</i> dan tanpa <i>grating</i> pada ukuran yang sama	59
Tabel 4.2 Perbandingan ukuran modulator yang memiliki Rasio <i>ON/OFF</i> yang sama	60



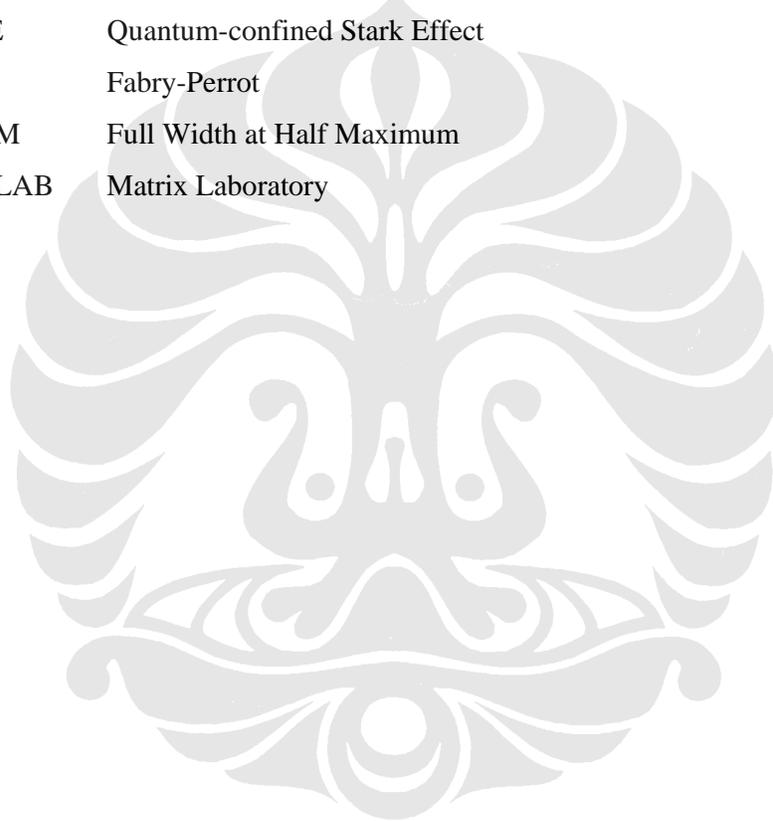
DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Data input pada 'Tugas3_rev3 (substrate added)' MATLAB	68



DAFTAR SINGKATAN

MAO	Modulator Acousto-optic
MEO	Modulator Elektro-optik
MEA	Modulator Elektroabsorpsi
QW	Quantum Well
MQW	Multiple Quantum Well
QCSE	Quantum-confined Stark Effect
FP	Fabry-Perrot
FWHM	Full Width at Half Maximum
MATLAB	Matrix Laboratory



DAFTAR ISTILAH

Insertion Loss	Daya yang hilang pada kondisi ON.
Contrast ratio	Perbandingan daya pada saat kondisi ON dengan kondisi OFF.
Rasio ON/OFF	Contrast ratio.
Quantum Well	Sruktur semikonduktor yang terdiri dari 3 lapis bahan dimana bahan yang bandgap-nya lebih rendah diapit dengan yang lebih tinggi.
Multiple Quantum Well	Struktur yang terdiri dari beberapa Quantum Well yang ditumpuk.
Drive voltage	Beda potensial yang diperlukan untuk menjalankan modulator sesuai dengan spesifikasi.
Sudut kritis	Sudut minimum yang dapat menghasilkan pemantulan.
Doping	Memberikan suatu tambahan (dopant) agar suatu material kekurangan atau kelebihan elektron.
Metallic	Bersifat metal.
Superlattice	Lapisan tipis yang disusun bertumpuk-tumpuk, ketebalan masing-masing lapisan sekitar 10 ^Å .

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Akhir-akhir ini kebutuhan akan dukungan *transfer data* sangat meningkat, apalagi dengan bertambah besarnya lalu lintas data baik dari segi bisnis maupun non-bisnis. Kecepatan transmisi data merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan masyarakat saat ini. Untuk menjawab kebutuhan tersebut, maka telah diciptakan berbagai teknologi untuk transmisi data. Sebagai acuan baik tidaknya suatu teknologi dalam mentransmisikan data, dapat dilihat dari berbagai kriteria, misalnya kecepatan (*speed data transfer*), biaya, fleksibilitas, keakuratan data yang diterima dan lain-lain.

Berangkat dari kebutuhan ini, maka para peneliti menciptakan berbagai alternatif teknologi untuk menghantarkan informasi/data tersebut, yang diawali dengan menggunakan kabel tembaga sampai teknologi *wireless*. Saat ini telah ditemukan berbagai macam teknologi untuk penghantaran informasi, salah satu jenis teknologi yang saat ini sangat populer digunakan dan mempunyai potensi besar adalah sistem komunikasi fiber optik.

Dalam menjalankan perannya, sistem komunikasi *fiber* optik mempunyai beberapa komponen yang saling menunjang. Salah satu bagian penting dari sistem fiber optik yang akan menjadi topik bahasan ini adalah modulator. Modulator mempunyai peranan yang sangat penting yaitu dalam proses modulasi data pada cahaya, sebagai media pembawa informasi dalam sistem komunikasi *fiber* optik. Paling sedikit ada 3 kriteria utama yang menentukan kualitas modulator yaitu: *insertion loss*, kecepatan divais dan *contrast ratio*. Dari setiap modulator yang ada sangat diharapkan untuk memiliki *insertion loss* yang relative kecil, kecepatan divais dan *contrast ratio* yang sangat besar. *Insertion loss* yang kecil sangat berperan dalam menentukan banyaknya energi yang hilang pada proses penumpangan dan pengiriman informasi sehingga tidak diperlukan lagi 'repeater'. *Contrast ratio* yang besar akan menentukan kualitas dari informasi yang ditumpangkan pada medium pembawa dan menghindarkan *error detection*. Kecepatan divais dapat sangat berpengaruh pada respon modulator pada input dan

output yang diberikan. Selain ketiga hal ini, masih banyak lagi hal-hal yang menjadi penentu kualitas modulator *fiber* optik, misalnya: *device capacitance*, *resistance*, *drive voltage*, dan lain sebagainya.

Modulator yang menjadi topik bahasan utama dalam skripsi ini adalah modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide*. Prinsip dasar dari modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide* ini adalah dengan menyusun struktur *waveguide* yaitu sebuah lapisan *waveguide* yang index bias nya lebih tinggi dibandingkan dengan index bias lapisan di atas (*cover*) dan di bawahnya (*substrate*). Dengan memanfaatkan modulasi medan listrik yang ditimbulkan akibat beda potensial yang tegak lurus terhadap bidang planar *waveguide*, maka tingkat absorpsinya akan berubah-ubah. Prinsip elektroabsorpsi ini berlandaskan kepada efek Frans-Keldysh [1]. Penggunaan *Multiple Quantum Well* (MQW) pada lapisan film dapat meningkat daya absorpsi modulator tersebut. Efek ini disebut quantum confined stark effect (QCSE).

Bagian istimewa dari modulator yang menjadi topik bahasan utama ini adalah dengan ditambahkannya *grating* pada bagian depan dan belakang dari modulator. *Grating* akan berfungsi sebagai cermin yang dapat diatur kadar pemantulannya (*reflectance*) sehingga daya absorpsinya akan meningkat jauh lebih besar. Hal ini secara langsung akan meningkatkan kinerja dan efisiensi dari modulator karena dapat memperkecil ukuran modulator.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Secara garis besar, rumusan masalah penelitian ini ada dua, yaitu:

- Penyusunan dan identifikasi kriteria-kriteria prioritas yang menunjang kualitas modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide* dan diskusi tentang teknik untuk mengoptimalkan kinerja modulator tipe *waveguide* tersebut dengan menggunakan *grating*.
- Pembuatan software berbasis MATLAB yang mendukung perancangan dengan mensimulasikan cara kerja elektroabsorpsi dan metode *grating* pada modulator tipe *waveguide* serta *output-output* pada modulator tersebut.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

- Membuat program berbasis MATLAB yang dapat berfungsi untuk mensimulasikan modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide* dengan menggunakan *grating*.
- Merancang elektroabsorpsi modulator tipe *waveguide* dengan menggunakan *grating* yang dapat menghasilkan kinerja yang maksimal sesuai dengan yang diinginkan.

1.4 BATASAN MASALAH

- Modulator yang dirancang menggunakan prinsip elektroabsorpsi dan bertipe *waveguide* dengan penambahan *grating* yang dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi.
- Simulasi menggunakan software MATLAB dan *Grafik User Interface* (GUI) untuk mempermudah pengoperasian.
- Hasil dari perancangan modulator hanya terbatas pada penyediaan spesifikasi-spesifikasi yang dapat mengoptimalkan kerja dari modulator sesuai dengan yang diinginkan.
- Cara-cara penghitungan dalam merancang modulator berdasarkan prinsip-prinsip *waveguide* yang simetris.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**
Bagian ini berisi latar belakang dari penulisan yang akan dilakukan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- **BAB II LANDASAN TEORI**
Berisi tentang kriteria-kriteria yang dapat menentukan kinerja dari suatu modulator; prinsip kerja umum dari *electroarbsorption* modulator tipe *waveguide*; jenis-jenis lapisan penyusun modulator; sifat-sifat dari masing-masing lapisan; metode pencarian indeks bias gabungan pada

bagian *substrat*, film dan *cover*; sifat dan karakteristik dari *Multiple Quantum Well*; metode pencarian spesifikasi *grating* yang sesuai dengan keinginan; efek penambahan *grating* pada kinerja modulator.

- BAB III PERANCANGAN OPTIKAL MODULATOR ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN GRATING.

Menampilkan gambaran umum mengenai langkah-langkah dan prosedur simulasi menggunakan software MATLAB; perancangan dari modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide* dengan menggunakan *grating* beserta parameter-parameter yang dapat mengoptimalkan fungsinya.

- BAB IV PERHITUNGAN PARAMETER-PARAMETER PADA MODULATOR

Memaparkan hasil-hasil perhitungan parameter-parameter pada modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide* dengan menggunakan bantuan software maupun secara manual serta analisa-analisa yang berkaitan langsung dengan kinerja modulator.

- BAB V KESIMPULAN

Merupakan kesimpulan dari permasalahan yang telah dirumuskan dan hasil akhir pelaksanaan penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 MODULATOR OPTIK

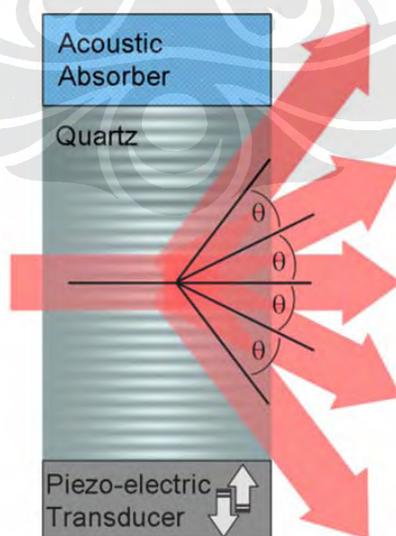
Definisi dari modulator optik adalah alat yang dapat digunakan untuk memodulasi karakter fisik berkas cahaya yang melaluinya. Karakter fisik cahaya yang dapat dimodulasi oleh modulator optik adalah intensitas, fase, polarisasi, frekuensi dan arah propagasi.

2.1.1 Jenis-jenis dari Modulator Optik

Ada beberapa jenis modulator optik yang telah dikembangkan sejauh ini, antara lain:

2.1.1.1 Modulator Acousto-optic (MAO).

Modulator ini bekerja berdasarkan efek *Acousto-optic*. Efek tersebut adalah proses modulasi indeks refraksi dari medium dengan bantuan gelombang suara (*phonon*). Karena adanya modulasi suara (*phonon*) tersebut, muncul standing wave berupa periodik kerapatan dan kerenggangan materi dalam MAO. Akhirnya modulasi menciptakan struktur periodik *grating* refraksi indeks yang terlihat pada Gambar-2.1.

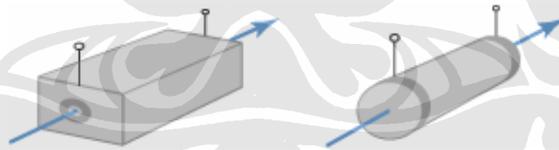


Gambar-2.1. Modulator Acousto-optic. Transducer menghasilkan gelombang suara, sehingga berkas cahaya terdifraksi [2].

Cahaya akan termodulasi berdasarkan pada efek difraksi. Modulator MAO tersebut berfungsi secara kontinu mengatur ada atau tidaknya berkas cahaya (laser) pada arah (orde) tertentu menggunakan *electrical drive signal*. Ada atau tidaknya intensitas pada arah tertentu merepresentasikan *bit* 0 atau 1 pada sinyal modulasi.

2.1.1.2 Modulator Elektro-optik (MEO).

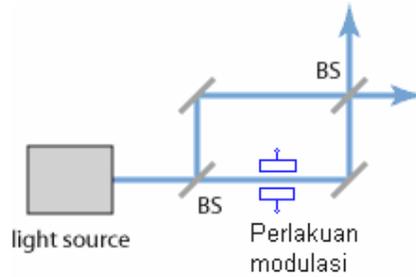
Modulator elektro-optik (MEO) adalah jenis modulator yang dapat mengontrol intensitas, fasa atau polarisasi dari sinar laser dengan menggunakan sinyal control berupa medan elektrik. Ada 2 jenis MEO, yang pertama berdasarkan kepada efek Pockel dan yang kedua berdasarkan kepada efek Kerr [3]. Pada modulator berbasis Pockel, proses modulasi berupa perubahan indeks refraksi pada pockels cell. Pockels cell tersebut adalah medium yang berupa kristal elektro-optik, dimana cahaya yang propagasi didalamnya mengalami modulasi fase. Penggeseran fase cahaya dalam kristal kristal dapat dilakukan dengan memberikan beda tegangan pada kedua plate yang menjepit sel pockel tersebut, dalam hal ini sel pockel berfungsi sebagai *voltage-controlled waveplate* [4].



Gambar-2.2. Sel Pockel pada MEO dengan *longitudinal electric field modulation* [4].

2.1.1.3 Modulator Interferometrik.

Alat ini menggunakan prinsip-prinsip dari interferensi. Pertama-tama terdapat berkas cahaya yang masuk, lalu dipisahkan dengan *beamsplitter*. Berkas cahaya yang sudah terpisah-pisah ini akan mengalami perlakuan yang berbeda misalnya salah satu digeser fasenya dan selanjutnya akan digabungkan kembali dan menghasilkan signal hasil interferensi dan sesuai dengan karakteristik yang diinginkan.

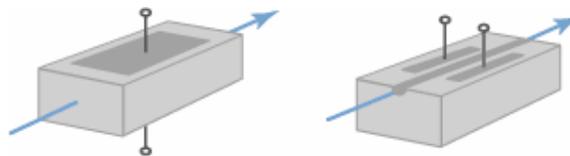


Gambar-2.3. Mach-Zehnder interferometer, BS adalah beam splitter [5].

2.1.1.4 Modulator Elektroabsorpsi (MEA).

Modulator jenis ini selanjutnya akan menjadi topik bahasan utama dalam tulisan ini. Pada modulator ini digunakan sinyal medan listrik untuk memodulasi karakter absorpsi bahan terhadap cahaya yang propagasi melalui modulator. Bahan yang digunakan umumnya adalah semikonduktor. Elektroabsorpsi ini berdasarkan kepada efek Franz-Keldysh [1], dimana terjadi perubahan pada spectrum absorpsi yang disebabkan oleh medan listrik yang dialirkan yang berakibat langsung pada perubahan energi *band-gap*. Selanjutnya untuk meningkatkan kinerja dari alat digunakan *Multiple Quantum Well*, dan efek pada *Multiple Quantum Well* ini disebut Quantum Confined Stark Effect [6]. Umumnya modulator tipe ini dibuat dengan menggunakan *Molecular Beam Epitaxy (MBE)* atau *Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)*.

Dalam perkembangannya ada 2 jenis struktur MEA, yang pertama tipe *transverse*, dimana cahaya propagasi tegak lurus terhadap bidang plat elektroabsorpsi dan sejajar dengan medan elektrik yang terpasang. Jenis yang kedua adalah tipe *waveguide*, dimana cahaya merambat sejajar dengan plat elektroabsorpsi dan tegak lurus terhadap medan elektrik yang terpasang, seperti terlihat pada Gambar-2.4.



Gambar-2.4. Bagian kiri adalah modulator *electroabsorption* tipe bulk, and sebelah kanan adalah modulator *electroabsorption* tipe *waveguide* [4].

2.2 WAVEGUIDE

Waveguide optik adalah struktur lapisan film yang terdiri atas beberapa lapisan film yang tidak sama (*inhomogeneous*) ketebalannya maupun sifat-sifat optiknya (indeks refraksi) dan berfungsi untuk menghantarkan cahaya.

Biasanya *waveguide* adalah film dimana indeks refraksinya relatif lebih tinggi dibandingkan dengan daerah sekitarnya (*cladding*). Sehingga apabila cahaya dengan sudut datang lebih besar dari sudut kritis yang dinyatakan dalam persamaan

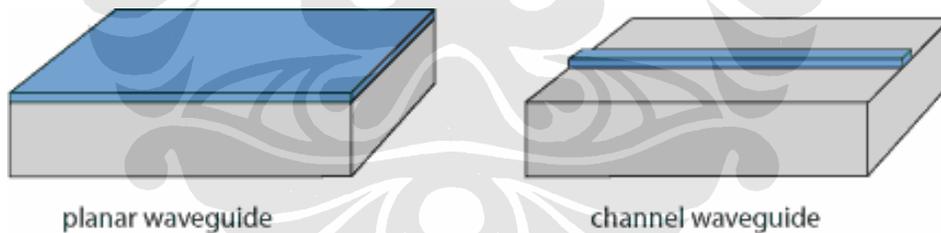
$$\sin \theta_c = \frac{n_c}{n_{wg}} \quad (2.1)$$

dimana,

n_c = index bias media cladding

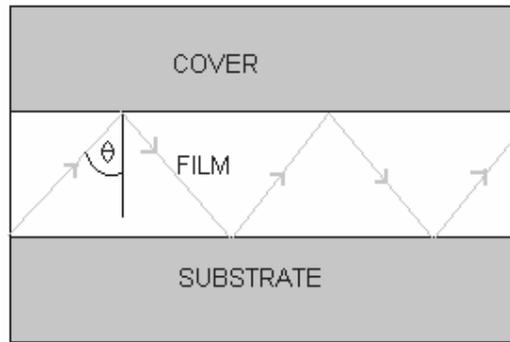
n_{wg} = index bias *waveguide*

maka cahaya akan terus dipantulkan pada saat menyentuh lapisan *cladding*. Proses *waveguiding* juga dapat terjadi dengan menggunakan bahan yang mudah memantulkan seperti *metallic interface* sebagai *cladding*.



Gambar-2.5. Waveguide [7]

Pada *waveguide* yang sederhana terdapat 3 bagian utama yaitu bagian *cover*, *film*, dan *substrate*. Bagian *cover* dan *substrate* dapat juga disebut *cladding* itu sendiri. Proses propagasi cahaya terjadi dibagian *waveguide*.



Gambar-2.6. Struktur umum dari *waveguide*

2.2.1 Fungsi dari *waveguide*:

Waveguide sebagai perangkat penting dalam divais optik mempunyai beberapa fungsi, misalnya:

- Untuk propagasi mode cahaya dalam jarak yang sangat jauh. Sehingga dapat mempertahankan intensitas dari suatu cahaya agar tetap tinggi walaupun setelah melalui jarak tertentu. Contoh: pada bidang telekomunikasi dengan menggunakan fiber optik.
- Untuk menghantarkan sinyal cahaya pada *integrated optical chips*.
- *Waveguide* sensor yaitu sebagai media kontak/interaksi antara cahaya dengan medium sekitarnya, yang akan dideteksi dalam hal ini yang akan berinteraksi dengan medium sekitarnya hanya *evanescent field* nya saja.
- *Waveguide* coupler dan splitter berfungsi sebagai pemisah dan penggabung suatu berkas cahaya.

2.2.2 Proses pembuatan *Waveguide*

Pada saat ini banyak sekali terdapat teknik-teknik dalam pembuatan *waveguide*. Berikut ini adalah beberapa contoh:

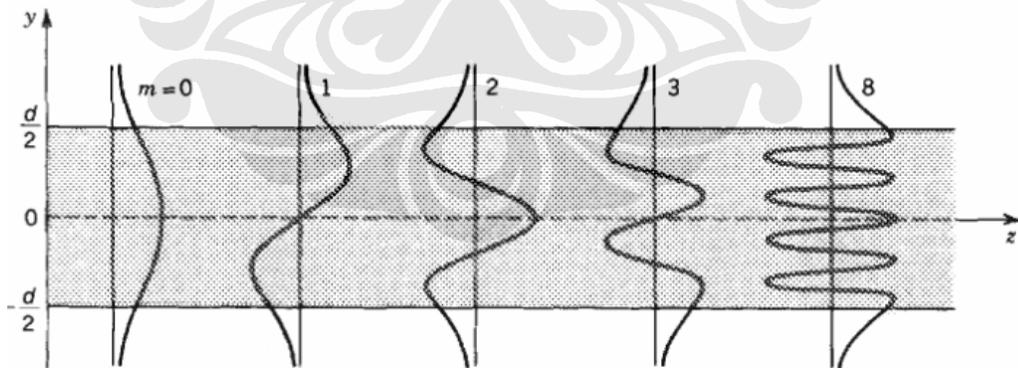
- *Planar waveguide* dapat dibuat diatas berbagai jenis *substrate* dengan bahan kristal ataupun kaca dengan metode *epitaxy*.
- *Channel waveguide* pada material semiconductor, kristal, dan kaca dapat dibuat dengan kombinasi beberapa metode lithografi seperti *epitaxy*, *ion exchange*, atau *thermal diffusion*.

2.2.3 Mode pada Waveguide

Untuk mempermudah penjelasan tentang *mode-mode* dalam *waveguide* optik, digunakan model *waveguide* metalik yang digunakan dalam *microwave*. Jika ada suatu berkas cahaya *monochromatic* datang dengan sudut θ . Maka cahaya tersebut akan dipantulkan oleh bagian atas dan bawah dari *waveguide* dengan sudut pantul sebesar θ (seperti terlihat pada Gambar-2.7). Pada saat pemantulan terjadi pergeseran fase sebesar π , tetapi amplitudo dan polarisasi tidak berubah. Pergeseran fasa sebesar π ini menyebabkan medan listrik yang dihasilkan oleh gelombang asal dengan gelombang pantul akan saling interferensi menghilangkan pada saat memantul di dinding *waveguide* sedangkan pada bagian tengah *waveguide* akan terdapat interferensi *planewave* cahaya yang bergerak dengan sudut θ maupun $-\theta$, dan memunculkan *mode-mode* cahaya dalam *waveguide*. Dalam hal ini contoh yang tersedia adalah TE polarisasi.

Jadi, *mode* adalah medan yang memiliki intensitas dan polarisasi yang sama untuk sepanjang sumbu *waveguide* pada suatu titik di sumbu-y.

Bentuk-bentuk dari *mode* dapat dilihat dari Gambar-2.7. Kedudukan konsentrasi intensitasnya akan bertambah seiring bertambahnya jumlah *mode* dari suatu *waveguide*.



Gambar-2.7. Model planar *waveguide* dengan metalik mirror[3].

2.3 MODULATOR OPTIK BERBASIS ELEKTROABSORPSI

Modulator optik semakin diminati karena bertambahnya kebutuhan akan peningkatan performa dari sistem transmisi. Sejauh ini fiber optik tipe long-haul yang digunakan untuk sistem transmisi hanya dapat mencapai kecepatan 8Gbit/s. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi *direct injected laser* telah mencapai batasnya, maka perhatian saat ini dialihkan pada modulator eksternal yang diharapkan dapat memberikan kinerja yang lebih baik lagi.

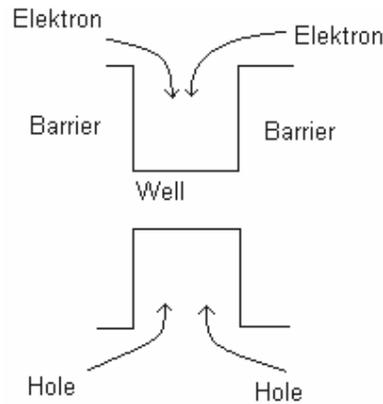
Selain itu kebutuhan untuk proses *encoding* dan transmisi data dalam jumlah besar serta proses switching yang menggunakan energi relatif kecil telah mengarah pada pencarian alat yang lebih kompak.

Untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan di atas, maka modulator elektroabsorpsi sangat tepat penggunaannya. Ditambah dengan proses pembuatan MBE dan MOCVD maka sangat dimungkinkan untuk menumbuhkan lapisan-lapisan tipis semikonduktor. Kinerja dari modulator optik berbasis elektroabsorpsi ini dapat ditingkatkan dengan menumbuhkan lapisan *Quantum Well* ditengah-tengah modulator.

2.3.1 Pengaruh MQW pada Modulator Elektroabsorpsi

Multiple Quantum Well yang digunakan pada modulator biasanya terdiri dari 2 lapisan yaitu untuk *well* yang *index bias* nya dan energi *band gap*-nya lebih rendah digunakan GaSb dan untuk *barrier* yang *index bias* nya dan energi *band gap*-nya lebih tinggi digunakan AlGaSb. Kedua lapisan ini disusun saling tumpuk dan berseling-selingan antara *well* dan *barrier*. Ketebalan dari masing-masing lapisan biasanya sekitar 100Å atau sekitar 30 lapisan atom.

Keistimewaan dari *quantum well* (QW) ini adalah elektron dan hole cenderung menempati daerah atau band yang memiliki energi potensial yang lebih rendah. Pada QW maka elektro atau hole yang ada di tingkat energi lebih tinggi yang berada di sekitarnya akan cenderung menuju ke *well* dimana potensial energinya paling rendah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8. Elektron atau hole akan cenderung mengumpul di *well*.



Gambar-2.8. *Quantum Well*

Elektron dan hole yang berkumpul di *well* maka akan mengalami efek *quantum*. Efek ini menyebabkan elektron atau hole yang awalnya dapat bergerak dalam tiga dimensi setelah terjebak pada *quantum well* maka hanya akan dapat bergerak dalam 2 dimensi [8].

Dengan terpusatnya elektro dan hole di bagian *well*, maka *density of state* nya akan berubah dan terjadi pemusatan di bagian *well*. Dengan adanya perbedaan *density of state* yang sangat besar ini, maka secara langsung akan meningkatkan kemampuan untuk mengubah penyerapan cahaya dari suatu materi walaupun hanya diberikan beda potensial yang relatif kecil [8].

Tingkat-tingkat energi dari hole dan elektron yang berada di dasar *well* dan mempunyai energi potensial yang paling minimum, dimana tingkat energi itu diukur dari dasar *well* disebut *zero-point energy*. *Zero-point energy* ini sangat penting dalam menentukan dari mana melakukan pengukuran potensial energi partikel-partikel yang berada dalam *quantum well*.

Jika terdapat suatu cahaya yang melintasi suatu material, maka cahaya yang dapat diserap oleh material tersebut adalah cahaya yang mempunyai quantum energi yang lebih tinggi dari bandgap material tersebut sehingga dapat memindahkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Energi minimum dari cahaya yang dapat memindahkan elektron ini disebut *exciton* energi, dengan kata lain *exciton* adalah energi cahaya minimal agar dapat diserap oleh materi. Dalam diagram tingkat-tingkat energi, dapat digambarkan *exciton* dengan persamaan[8]:

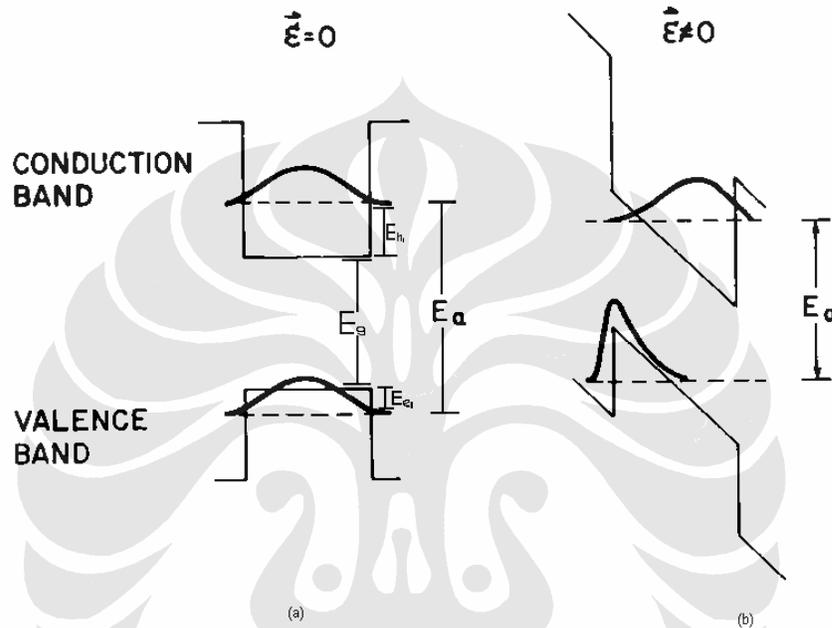
$$E_a = E_g + E_{e1} + E_{h1} - B \quad (2.2)$$

dimana,

E_g = band gap dari material *well*

E_{e1}, E_{h1} = zero point energy dari hole dan elektron

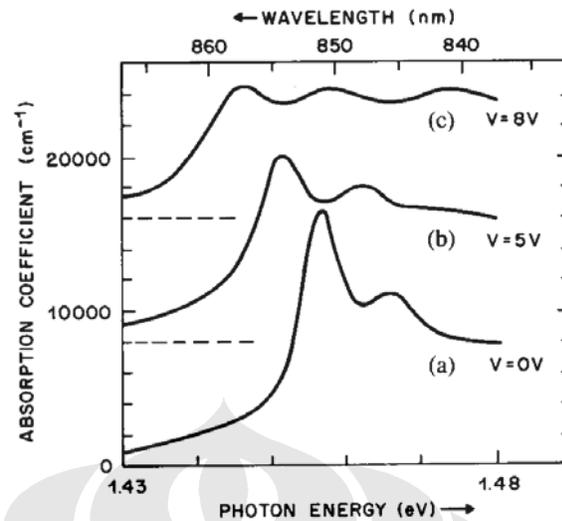
B = energi ikatan antara hole dan elektron



Gambar-2.9. (a) *Quantum Well* pada saat tidak diberi medan listrik. (b) Saat diberi medan listrik [3].

Biasanya nilai dari B sangatlah kecil, sehingga elektron yang berikatan dengan hole hanya dapat diamati pada suhu yang relatif rendah, tetapi karena pada *Quantum Well* elektron-hole hanya bersifat 2 dimensi, maka nilai B pada *Quantum Well* meningkat. Karena alasan inilah maka *exciton* pada *Quantum Well* lebih stabil dibanding dengan material sejenis dalam bentuk bulk. Secara jelas dapat kita lihat bahwa *Quantum Well* lebih dapat menyerap cahaya walaupun di suhu yang relatif lebih tinggi.

Untuk memperjelas pengaruh penyerapan terhadap energi *photon* yang diberikan, mari kita lihat Gambar-2.10.



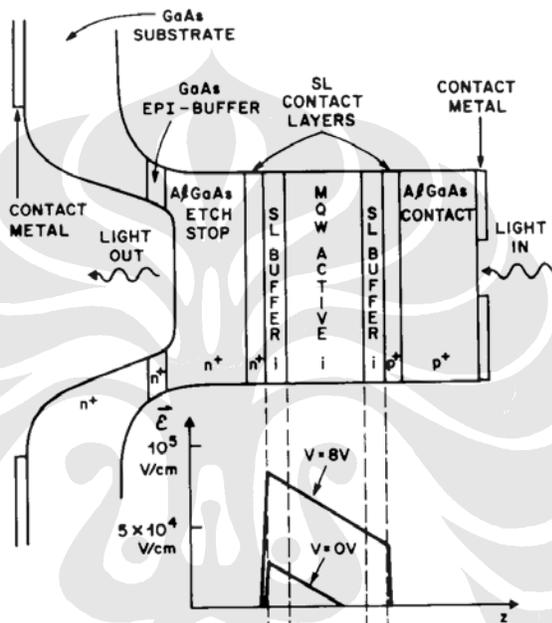
Gambar 2.10. Grafik wavelength/photon energy VS Absorption Coefficient [8].

Pada Gambar-2.10 dapat kita lihat bagian (a), dimana terjadi 2 buah puncak penyerapan. Puncak penyerapan itu menandakan bahwa pada panjang gelombang tersebut terjadi *exciton*, berarti pada grafik ini (a) menunjukkan terjadi 2 buah *exciton*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan terjadinya rekombinasi antara elektron dengan light hole dan elektron dengan heavy hole. Nilai *exciton* dari keduanya berbeda karena nilai E_{h1} dan B berbeda untuk masing-masing kondisi.

Jika diberikan medan listrik yang tegak lurus pada *Quantum Well* maka efek *Quantum-confined Stark Effect* (QCSE) akan terjadi. Efek ini dapat dijelaskan dengan melihat Gambar-2.9 (b), dimana pita-pita energi akan cenderung condong kebawah searah dengan medan listrik. Hal ini mengakibatkan *zero-point energy* dari *Quantum Well* akan menurun. Secara nyata dapat dilihat pada Gambar-2.10, dimana dengan diberikannya medan listrik pada *Quantum Well* maka efektifitas bandgap akan menurun, sehingga pada saat diberikan medan maka puncak dari grafik akan cenderung bergeser ke kiri. *Quantum Well* baru dapat menyerap secara maksimal (*exciton*) pada panjang gelombang yang lebih panjang dibandingkan dengan sebelum diberikan medan, dan tentunya membutuhkan energi yang lebih sedikit dari sebelumnya. Semakin besar medan, maka puncak grafik akan semakin bergeser ke kiri (Gambar-2.10 (c)).

Sebagai contoh modulator elektroabsorpsi yang bertipe transversal dapat dilihat pada Gambar-2.11. MQW diapit oleh struktur semikonduktor yang telah di

dopan sebagai tipe n dan tipe p. Semikonduktor yang bersinggungan langsung dengan MQW adalah yang intrinsik. Cahaya akan masuk dari sebelah kiri lalu keluar dibagian kanan modulator. Metal kontak yang terletak disebelah kanan dan kiri berfungsi mengalirkan listrik. Listrik yang dialirkan sengaja diatur dalam bentuk reverse bias, sehingga tidak ada arus bocor yang melalui MQW, hanya medan listriknya saja yang ada.

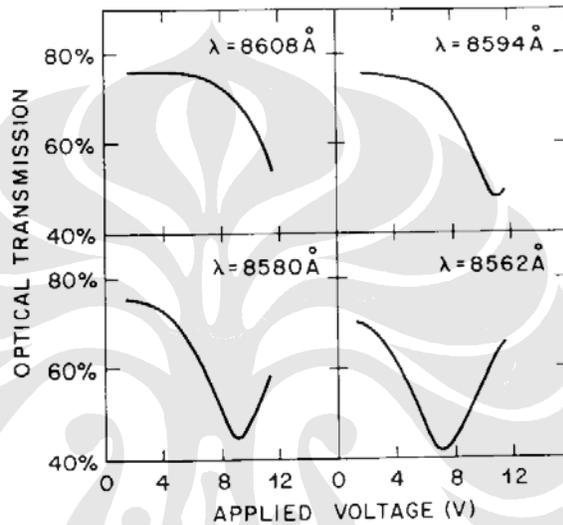


Gambar-2.11. Transverse modulator [8].

Arus bocor yang melalui MQW dapat menyebabkan naiknya suhu pada lapisan MQW, sehingga dapat terjadi kerusakan. Selain itu, medan yang melalui MQW harus homogen untuk menghasilkan efek *Quantum-confined Stark Effect* (QCSE) yang sempurna. Terkadang kondisi ini sulit untuk tercapai dikarenakan adanya ketidakhomogenan pada lapisan intrinsik yang mengapit MQW. Ketidakhomogenan ini diakibatkan adanya *residual doping* pada lapisan intrinsik.

Kinerja dari modulator ini seiring dengan perubahan panjang gelombang dapat dilihat pada Gambar-2.12. Seiring bertambahnya tegangan, maka berkas-berkas cahaya yang ditransmisikan akan menurun. Hal ini sangat jelas sesuai dengan kondisi pada Gambar-2.10, dimana dengan meningkatnya tegangan maka penyerapan juga akan meningkat. Titik terendah pada grafik menunjukkan

exciton. Hal ini juga sesuai dengan Gambar-2.10 dimana semakin tinggi tegangan yang dipakai maka akan semakin panjang pula gelombang yang diperlukan untuk mencapai titik *exciton*. Pada Gambar-2.12 juga menunjukkan hal yang sama, pada saat panjang gelombang 8608Å, untuk mencapai *exciton* diperlukan tegangan yang lebih besar dari 12, sedangkan pada panjang gelombang 8594Å hanya diperlukan ±11 volt. Begitu seterusnya, sampai pada pada panjang gelombang 8594Å hanya diperlukan ±9 volt.



Gambar-2.12. Transmisi dari MQW [8].

Suatu modulator yang mempunyai grafik transmisi yang semakin tajam gradiennya akan menghasilkan modulator yang semakin baik. Hal ini disebabkan karena perubahan nilai absorpsi akan semakin besar hanya dengan sedikit perubahan tegangan.

2.3.2 Rasio ON/OFF

Salah satu kriteria penting yang menentukan kinerja dari suatu modulator adalah *rasio ON/OFF*. *Rasio ON/OFF* adalah perbandingan intensitas cahaya yang diteruskan oleh modulator pada saat modulator itu on dan off. Rasio ON/OFF dapat diformulasikan sebagai berikut [8]:

$$R = \exp(\Delta\alpha L) \quad (2.3)$$

dimana:

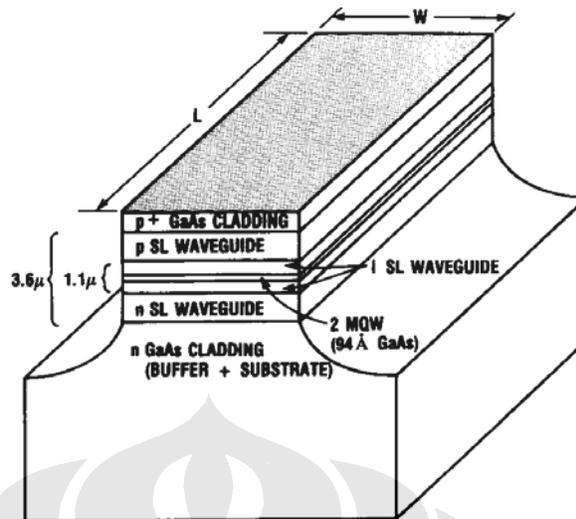
$\Delta\alpha$ = perbedaan koefisien absorpsi pada saat *off* dan *on*

L = panjang medium yang berinteraksi dengan cahaya

Modulator akan semakin baik jika memiliki nilai $\Delta\alpha$ yang besar. Tetapi walaupun nilai $\Delta\alpha$ besar (akibat adanya MQW), bisa saja rasio ON/OFF tetap tidak menunjukkan hasil yang besar, hal ini disebabkan karena panjang L sangat kecil yaitu misalnya pada modulator transversal. Pada *transverse* modulator (Gambar-2.11), nilai L hanya dapat mencapai 0.475 μm , sesuai dengan tebal medium absorpsi[8].

Untuk mengatasi masalah dalam struktur transversal dapat dengan memperbesar nilai L. Penambahan nilai L dapat dilakukan dengan sedikitnya 2 cara, yaitu

1. Dengan mengoperasikan alat pada kondisi pemantulan sehingga cahaya yang masuk akan melalui MQW dua kali sehingga nilai L akan menjadi 2 kali (transverse modulator dengan struktur *fabry perrot* non simetri [8]).
2. Selanjutnya dengan cara menambah jumlah *well* pada divais, tetapi dengan melakukan cara ini ada beberapa efek negatif yang akan timbul, yaitu:
 - a. Akan dibutuhkan tegangan listrik yang lebih besar untuk menghasilkan medan yang cukup untuk mengoperasikan divais tersebut.
 - b. Dengan bertambahnya jumlah *well*, maka ketidakseragaman (*inhomogeneity*) pada medan akan bertambah. Untuk menciptakan material yang cukup murni untuk menghilangkan ketidakseragaman ini sangatlah sulit.
3. Cara yang cukup efektif adalah dengan mengubah bentuk geometris dari modulator elektroabsorpsi. Cahaya yang biasanya melalui modulator secara tegak lurus material, maka akan melalui modulator secara sejajar dengan MQW. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar-2.13.



Gambar-2.13. Modulator tipe *waveguide* [8].

4. Cara yang terakhir yaitu dengan menambahkan cermin pada bagian arah datang cahaya dan arah keluar cahaya pada modulator tipe *waveguide*. Cermin yang dipasang ini dapat berupa *grating* yang *reflectance*-nya kurang dari 100%. Dengan menempatkan kedua cermin ini maka symmetric Fabry-Perrot (FP) *cavity structure* akan terbentuk. Teknik ini akan meningkatkan rasio ON/OFF secara signifikan dimana cahaya yang melalui daerah absorpsi akan terpantul berulang-ulang. Penguraian lebih lanjut mengenai teknik ini akan dijabarkan pada sub-bab 2.4.

Pada bentuk modulator ini, media interaksi antara MQW dengan cahaya akan semakin panjang (cahaya bergerak sejajar sepanjang MQW). Sehingga rasio ON/OFF dari modulator akan semakin maksimal. Selain itu dengan mengubah bentuk geometris dari modulator maka kemungkinan polarisasi yang awalnya hanya satu TEM (pada transversal), sekarang dapat menjadi dua buah (dalam TE dan TM) pada tipe *waveguide*. Pada modulator di atas (Gambar-2.13), hanya bagian tengahnya saja yang berupa MQW terbuat dari bahan yang efisien menyerap cahaya.

2.3.3 Insertion Loss

Kriteria penting lainnya pada modulator adalah *insertion loss*. Definisi dari *insertion loss* adalah rasio perbandingan antara daya pada output dengan daya pada input pada kondisi ON, dimana pengukuran dilakukan di udara. Ada 2 jenis *insertion loss* yang ada pada modulator tipe ini, yaitu eksternal dan internal *insertion loss*. Eksternal *insertion loss* umumnya disebabkan oleh kehilangan energi cahaya karena koneksi input dan output modulator. Sedangkan internal *insertion loss* diakibatkan oleh kehilangan energi pada saat kondisi modulator pada kondisi ON (atau penyerapan pada saat ON).

Setiap divais yang dibuat pasti mempunyai *insertion loss* yang mempengaruhi kinerjanya. Adapun beberapa cara yang dapat digunakan untuk meminimalisasi *insertion loss* ini.

Eksternal *insertion loss* yang pertama disebabkan oleh pemantulan pada penyambungan semikonduktor dengan udara atau udara dengan semikonduktor (terjadi dibagian ujung). *Insertion loss* ini dapat mencapai sebesar 30%. Pada saat ini, untuk mengatasi masalah ini dapat dilakukan dengan memasang lapisan anti refleksi (*anti-reflection coating*) pada semikonduktor yang baru dibuat. *Insertion loss* dapat ditekan sampai 0.1 dB.

Internal *insertion loss* selanjutnya dapat diakibatkan adanya penyerapan cahaya pada keadaan on dari modulator. Hal ini dapat dimaklumkan karena walaupun koefisien penyerapan dapat ditekan sekecil apapun, tetap saja tidak dapat dihilangkan begitu saja. Nilai minimum dari α pada saat keadaan ON dapat dilambangkan dengan α_{ON} . Jadi, nilai *insertion loss* nya dapat dicari dengan persamaan [8]:

$$T_{ABS} = \exp(-\Gamma \alpha_{ON} L) \quad (2.4)$$

dimana Γ adalah confinement factor.

T_{ABS} dapat diminimalisasi dengan mengoperasikan pada panjang gelombang yang lebih panjang dari bandgap yang pada saat tidak diberi medan listrik. Tetapi tindakan ini dapat menyebabkan nilai $\Delta\alpha$ akan menurun. Dalam kondisi ini sangatlah penting untuk melihat dari kebutuhan modulator, apakah yang lebih penting rasio ON/OFF atau *insertion loss*.

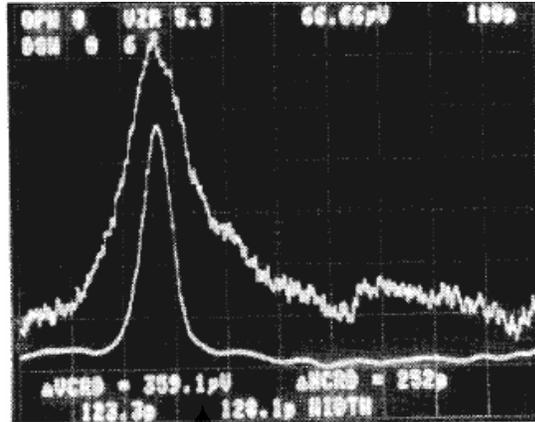
Insertion loss internal pada modulator optik yang paling sering dipelajari adalah loss yang diakibatkan ketidakmurnian bahan sehingga terjadi *scattering* pada berkas cahaya yang melalui modulator. Dengan pemilihan bahan dan proses yang baik maka loss ini dapat dikurangi. Tetapi pada jenis MQW modulator tipe transversal, loss ini tidaklah banyak berpengaruh. Hal ini dikarenakan panjang dari modulator relatif kecil.

Jenis loss selanjutnya terdapat pada struktur *waveguide*. Untuk *waveguide* konvensional dijelaskan bahwa nilai index bias film harus lebih tinggi dibandingkan dengan bagian atas dan bawahnya. Tetapi pada desain *waveguide* Gambar-2.13 merupakan *waveguide* yang *lossy* dimana indeks bias bagian *waveguide* tidak lebih tinggi dari sekitarnya. Karena hal ini maka dapat terjadi *insertion loss* sekitar 2dB untuk cahaya-cahaya yang tidak ter-*guide* di bagian film. Sebenarnya dapat saja diciptakan *waveguide* yang konvensional tadi, tetapi akan menjadi sangat sulit pada proses penggabungan antar divais (*coupling*) karena index bias film terlalu tinggi maka akan terdapat pemantulan kembali. Masalah seperti ini dapat diatasi dengan menggunakan bahan yang indeks biasnya lebih rendah dibandingkan indeks bias *waveguide*.

2.3.4 Kecepatan divais

Agar modulator MQW memiliki kecepatan tinggi maka harus memperhatikan seberapa cepat responnya. Kecepatan divais dapat pula didefinisikan sebagai respon dari modulator. Dalam menguji parameter ini, dapat dilakukan dalam 2 *domain*, yaitu domain waktu dan domain frekuensi.

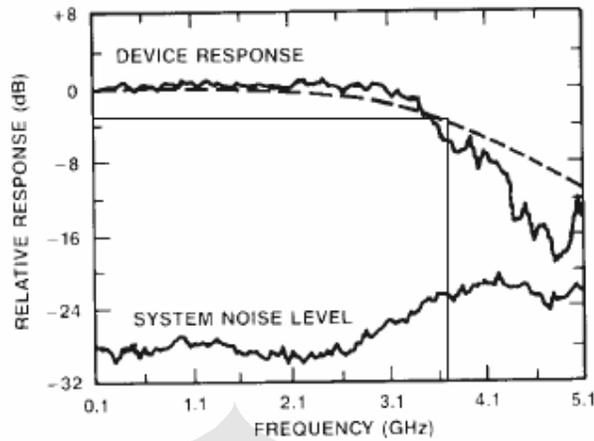
Pada pengukuran berdasarkan domain waktu, modulator MQW diberikan inputan berupa impuls. Kemudian keluaran yang berupa respon impuls akan diukur untuk menentukan seberapa cepat respon modulator itu. Untuk lebih jelasnya, Gambar-2.14 menunjukkan pengukuran kecepatan modulator berdasarkan domain waktu. Grafik bagian bawah menunjukkan masukan yang diberikan pada modulator MQW., nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) nya sekitar 60ps. Dengan menggunakan *high-speed photodetector* maka dapat diketahui response dari modulator sebesar 97ps, nilai ini diperoleh setelah memperhitungkan toleransi-toleransi pada alat penditeksinya.



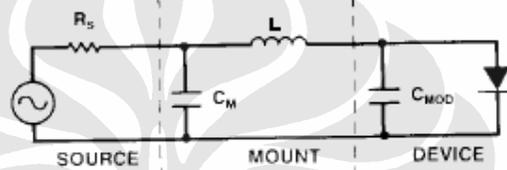
Gambar-2.14. Pengujian *speed* dari modulator berdasarkan domain waktu[8].

Pengukuran berdasarkan domain frekuensi agak sedikit berbeda. Jika pada pengukuran berdasarkan waktu digunakan impulse yang sangat cepat tetapi pada pengukuran berdasarkan domain frekuensi menggunakan metode *swept-frequency*. Pada metode ini, modulator diberikan inputan dengan frekuensi yang dibuat naik terus menerus. Pada saat respon dari modulator turun menjadi setengahnya atau 3dB, maka pada frekuensi itulah *speed* dari modulator diketahui. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar-2.15 (a). Pada gambar terlihat bahwa *swept-frequency* dimulai dari 0.1 GHz dan diakhiri pada 5.1 GHz. Respon dari modulator akan menurun seiring dengan bertambahnya frekuensi. Garis putus-putus menunjukkan respon dari modulator setelah mengalami interpolasi. Pada saat respon mencapai -3dB, maka frekuensi kerja dari modulator dapat diketahui. Pada grafik ini, pada saat respon turun sebesar 3dB, maka frekuensi menunjukkan sekitar 3.7 GHz.

Untuk lebih memahami pengukuran ini, dapat kita lihat rangkaian ekuivalen pada Gambar-2.15 (b). R_s adalah hambatan pada sumber inputan. C_M , L dan C_{MOD} adalah rangkaian ganti dari modulator. Hambatan seri pada modulator dapat diabaikan karena nilainya yang sangat kecil.



(a)



(b)

Gambar-2.15. Pengujian *speed* dari modulator berdasarkan domain frekuensi[8].

Keterbatasan dari kecepatan modulator MQW terletak pada jaringan listriknya dan bukan pada keterbatasan fisiknya, misalnya perpindahan panas, masa hidup pembawa muatan listrik (*carrier lifetime*), dan lain-lain. Dengan memperhitungkan komponen-komponen listrik yang ada, maka kecepatan modulator dapat dihitung dengan persamaan:

$$v_{3-dB} = \frac{1}{2\pi RC_{MOD}} \quad (2.5)$$

Dengan melihat dari rumus ini, maka salah satu cara yang paling mudah untuk meningkatkan frekuensi kerja modulator adalah dengan menurunkan nilai kapasitas (C_{MOD}). Caranya adalah dengan memperkecil luas dari divais tersebut. Cara ini sangat efektif dan mudah tetapi mempunyai keterbatasan yaitu pada saat luas diperkecil terus, maka hambatan seri pada modulator akan membesar dan tidak dapat diabaikan lagi.

Cara lain untuk memperkecil nilai kapasitannya adalah dengan memperbesar lapisan intrinsik yang mengapit MQW. Sesuai dengan persamaan

$C = \epsilon \frac{A}{d}$, maka dengan membesarnya nilai d , nilai C akan menjadi mengecil mengikuti secara linear. Pada Gambar-2.13 terdapat rancangan yang serupa dimana tebal dari MQW hanya sekitar $0.04 \mu\text{m}$ sedangkan tebal dari lapisan intrinsik jauh lebih tebal, yaitu sekitar $1.1 \mu\text{m}$ [8]. Tetapi dengan semakin tebalnya lapisan intrinsik maka tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan medan listrik yang cukup juga akan semakin membesar secara linear. Diperlukan pertimbangan untung rugi untuk mendapatkan kondisi optimum kecepatan dan kebutuhan *drive-voltage* yang kompatibel dengan rangkaian elektronik

2.3.5 Modulator MQW Vs Direct Modulated Injected Laser

Pada awal sub bab 2.3 telah didiskusikan bahwa untuk meningkatkan kinerja suatu sistem telekomunikasi maka diperlukan modulator eksternal yang dipercaya dapat mengatasi keterbatasan *Direct Modulated Injected Laser*. Uraian berikut akan menjelaskan kelebihan modulator MQW untuk meningkatkan kecepatan dibandingkan dengan *direct modulated injected laser*.

Kedua divais ini sama-sama mempunyai keterbatasan kecepatan yang disebabkan oleh keterbatasan sumber yang menghasilkan signal microwave untuk *men-charge* dan *discharge* kapasitor (C_{MOD}). Respon dari *direct modulated laser* dipengaruhi oleh komponen parasitiknya (C_M , L dan C_{MOD}) dan *intrinsic laser*. Walaupun keduanya mempunyai kelemahan yang sama, tetapi pada modulator MQW mempunyai angka *impedance* yang tinggi, sebaliknya *direct modulated laser* mempunyai nilai *impedance* yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa efek *parasitic capacitance* di *direct modulated laser* lebih kecil dibandingkan dengan modulator MQW.

Disisi lain, keunggulan dari modulator MQW juga tidak sedikit. Dimana pada modulator bentuk fisiknya lebih pendek dibandingkan dengan laser sehingga luas tempat terjadi modulasi menjadi lebih kecil, selain itu karena mengalami *reverse-bias* maka daerah *junction* juga akan membesar. Kedua hal diatas inilah yang menyebabkan nilai kapasitansi dari modulator dapat jauh lebih kecil lagi, sehingga kecepatannya juga dapat jauh bertambah. Pada modulator MQW juga

dapat dioperasikan pada tingkat energi yang lebih rendah dibandingkan dengan laser.

2.4 MODULATOR OPTIK BERBASIS ELEKTROABSORPSI DENGAN GRATING

Pada penjelasan untuk meningkatkan on/off *ratio* di sub-bab 2.3.2, salah satu cara yang paling efektif yaitu dengan menggunakan *symmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure*. Pengertian *symmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* adalah dengan menempatkan 2 buah *reflector* yang identik pada bagian depan dan belakang modulator.

Penggunaan *symmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* pada *waveguide* modulator berbeda dengan *asymmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* pada *transverse* modulator dimana *reflector* yang digunakan tidaklah identik. Biasanya untuk *reflector* pada bagian belakang modulator *transverse* digunakan *Bragg stack quarter wavelength* yang berupa lapisan-lapisan tipis yang disusun *sandwich*, pemantulan yang dihasilkan bisa mencapai 99%. Sedangkan untuk bagian depan pemantulan hanya berasal dari hubungan antara udara dengan semikonduktor yang hanya mencapai 30% pemantulan [20-23].

Kedua perbedaan ini dapat jelas dipahami dari perbedaan fungsi kedua modulator, dimana *asymmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* digunakan sebagai *reflectance* modulator sedangkan *symmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* digunakan sebagai *transmittance* modulator [18].

Pada bagian ini yang menjadi topik bahasan utama adalah *symmetric Fabry-Perrot (FB) cavity structure* yang diimplementasikan pada modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide*. *Reflector* yang dipasang berupa cermin *grating*. *Grating (corrugation grating)* ini berbentuk struktur bergerigi diatas bagian *waveguide* dengan periode gerigi yang diatur sesuai dengan spesifikasi *waveguide* dan bahan yang digunakan dalam disain ini adalah SiO₂. Alasan digunakan bahan ini adalah mudah difabrikasi dengan sistem *sputtering*.

Penjelasan singkat mengenai cara kerja struktur *grating* yang digunakan adalah *grating* akan bersifat sebagai *reflector* terhadap *mode* yang bergerak disepanjang *waveguide*. *Mode* yang bergerak disepanjang *waveguide* dapat terdiri

dari beberapa *mode* tetapi struktur *waveguide* ini dirancang agar hanya terbentuk *fundamental mode* saja. *Fundamental mode* memiliki kecepatan yang paling tinggi dibandingkan dengan *mode* yang lain dan pemusatan intensitas energinya lebih baik.

Pada saat *fundamental mode* bergerak menyentuh struktur grating (memasuki *perturbation region*) maka *mode* tersebut akan dipantulkan kembali. Pemantulan ini dapat terjadi karena pada saat *mode* menyentuh *grating*, walaupun hanya sebagian saja (bagian evanescence saja), *mode* akan tetap terpengaruh seluruhnya. Analogi dari peristiwa ini bagaikan seseorang yang terjegal kakinya, walaupun hanya sebagian atau kakinya saja yang terantuk maka akan mempengaruhi seluruh badan.

2.4.1 Faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat pemantulan pada grating.

Tingkat pemantulan pada struktur *grating* dapat diatur sesuai dengan beberapa faktor sebagai berikut [19]:

1. Tebal *grating*
2. Panjang *perturbation region*
3. Tebal *waveguide*
4. Index bias *grating* dan index bias medium sekitarnya.

2.4.1.1 Tinggi grating.

Tinggi *grating* sangat berpengaruh pada tingkat pemantulan. Apabila tinggi *grating* dibesar maka tingkat pemantulan akan menjadi lebih besar, demikian juga sebaliknya. Hal ini dapat dimengerti dengan semakin tingginya *grating* maka akan semakin besar bagian *mode* yang berpotongan/berinteraksi dengan *grating* tersebut.

2.4.1.2 Panjang perturbation region

Semakin panjang *perturbation region* maka pemantulan akan semakin tinggi, hal ini dapat disebabkan dengan semakin panjang *perturbation region* maka daerah interaksinya juga akan semakin panjang.

2.4.1.3 Tebal Waveguide

Semakin tebal *waveguide* maka tingkat pemantulan akan semakin rendah. Penjelasannya adalah semakin tebal *waveguidenya* maka sebagian besar bagian *mode* akan hanya bergerak didalam *waveguidenya*, sehingga memperkecil daerah interaksi dengan *grating*.

2.4.1.4 Indeks bias *grating* dan index bias medium sekitarnya.

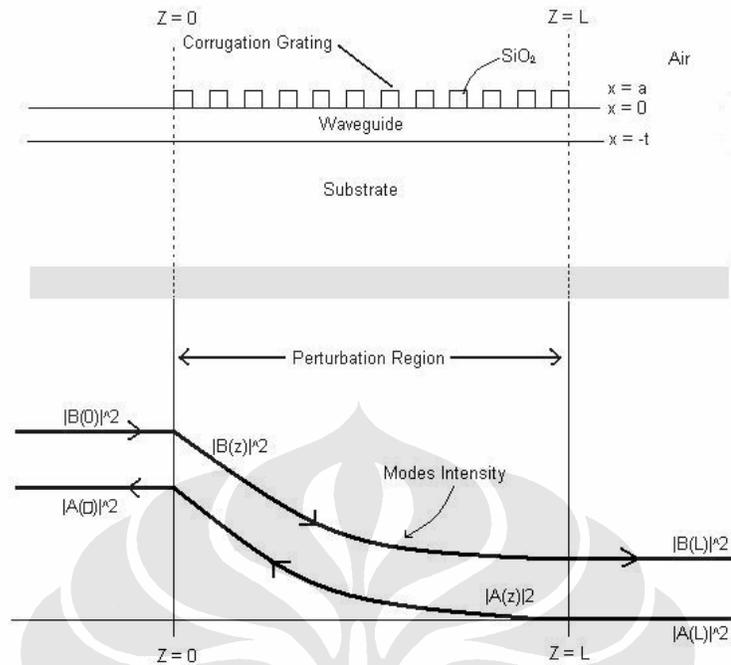
Perbedaan nilai index bias antara *grating* dengan medium mempengaruhi tingkat pemantulan dari struktur *grating* tersebut. Tetapi perbedaan index bias ini tidak berbanding lurus dengan tingkat pemantulannya.

2.4.2 Perturbation Region

Berdasarkan definisi tersebut *perturbation region* adalah daerah dimana terjadi gangguan pada *mode* yang terpandu di dalam *waveguide*. Gangguan tersebut dapat berupa perubahan karakteristik elektromagnetik (polarisasi), transfer *mode*, dan arah. Untuk konteks penelitian ini, perubahan yang diinginkan adalah perubahan arah (pantulan).

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *perturbation region* ini adalah daerah dari *waveguide* yang bagian atasnya ditumbuhkan *grating*. Pada daerah ini *mode* akan dipantulkan dengan pergeseran fasa tertentu sesuai dengan panjang *cavity*. Sketsa gambar *perturbation region* dapat dilihat pada Gambar-2.16 [19].

Pada Gambar-2.16 terdapat 2 buah kurva yaitu kurva $A(z)$ dan $B(z)$. Dimana $A(z)$ melambangkan amplitudo *mode* yang bergerak ke arah kiri sedangkan $B(z)$ melambangkan amplitudo *mode* yang bergerak ke arah kanan. *Mode* yang bergerak ke kanan merupakan *mode* yang ditransmisikan sedangkan *mode* yang bergerak ke kiri merupakan *mode* yang dipantulkan. Besar intensitas dari $A(z)$ dan $B(z)$ dapat diperoleh dari $|A(z)|^2$ dan $|B(z)|^2$ [19]. Dapat dilihat bahwa dalam *perturbation region* terjadi penurunan amplitudo untuk *mode* yang bergerak ke kanan, sedangkan untuk *mode* yang bergerak ke kiri akan mengalami peningkatan amplitudo, dengan kata lain pada *perturbation region* terjadi pemantulan sebagian intensitas *mode*.



Gambar-2.16. (atas) Struktur waveguide yang ditumbuhkan grating. (bawah) Intensitas mode yang dipantulkan dan diteruskan pada perturbation region.

2.4.3 Keuntungan dari penambahan struktur corrugation grating

Walaupun dengan penambahan grating ini hasil keluaran tetaplah sama, tetapi dengan penambahan grating ini terdapat beberapa keuntungan:

1. Meningkatkan rasio ON/OFF
2. Mengurangi Drive Voltage
3. Memperkecil ukuran modulator
4. Meningkatkan kecepatan modulator

2.4.3.1 Meningkatkan on/off ratio

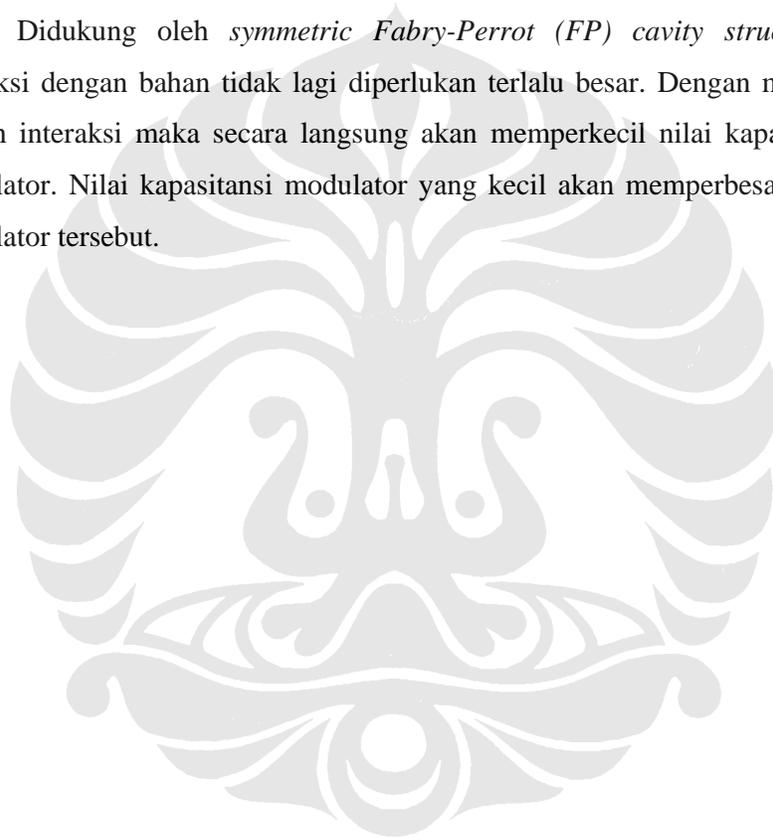
Sesuai dengan penjelasan-penjelasan sebelumnya, dengan membentuk *symmetric Fabry-Perrot (FP) cavity structure* maka mode akan seolah-olah terpantul-pantul dan melalui daerah absorpsi berulang kali sehingga penyerapan akan terjadi berulang-ulang. Peristiwa ini menyebabkan peningkatan *on/off ratio* secara signifikan.

2.4.3.2 Mengurangi Drive voltage

Dengan menambahkan *corrugation grating* maka rasio ON/OFF akan meningkat secara signifikan (sesuai dengan penjas di sub sub bab 2.4.3.1) sehingga perubahan indeks absorpsi bahan yang diperlukan tidak terlalu besar. Perubahan indeks *absorpsi* bahan kecil hanya memerlukan medan listrik yang kecil pula sehingga *drive voltage* modulator dapat diperkecil.

2.4.3.3 Memperkecil ukuran modulator dan meningkatkan kecepatan modulator

Didukung oleh *symmetric Fabry-Perrot (FP) cavity structure* maka interaksi dengan bahan tidak lagi diperlukan terlalu besar. Dengan memperkecil daerah interaksi maka secara langsung akan memperkecil nilai kapasitansi dari modulator. Nilai kapasitansi modulator yang kecil akan memperbesar kecepatan modulator tersebut.



BAB III

PERANCANGAN MODULATOR OPTIK ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN CAVITY FABRY- PERROT

Bab ini akan membahas mengenai perancangan modulator elektroabsorpsi dengan bantuan software berbasis MATLAB beserta penjelasan-penjelasan perhitungan. Modulator elektroabsorpsi yang dirancang merupakan modulator yang menggunakan struktur *cavity Fabry-Perrot (FB)* simetrik dengan *grating* sebagai cerminnya . Panjang gelombang operasi yang digunakan adalah 1550nm. Panjang gelombang ini adalah untuk sistem komunikasi *fiber* optik jarak jauh. Berikut akan diuraikan proses rancang bangun modulator tipe *waveguide* tersebut.

3.1 RANCANG BANGUN WAVEGUIDE OPTIK

Untuk meningkatkan kinerja modulator khususnya rasio ON/OFF, maka digunakan modulator elektroabsorpsi tipe *waveguide*, dimana arah propagasi cahaya atau *mode* sejajar dengan bidang *substrate* dan MQW. Dalam rangka peningkatan rasio ON/OFF lebih lanjut maka pada modulator ditambahkan struktur *cavity Fabry-Perrot*. Cahaya akan berpropagasi dan dipandu didalam *waveguide* berupa *mode* dan selalu bersinggungan untuk diserap oleh MQW dan dipantulkan kembali oleh cermin *cavity* untuk mengalami penyerapan lagi.

Dalam perancangan ini dirancang distribusi medan interferensi elektromagnetik yang dihasilkan oleh cahaya dalam bentuk *fundamental mode* saja. Karena dirancang untuk bekerja di daerah 1550nm, bahan-bahan yang digunakan sebagai penyusun *waveguide* adalah GaSb dan AlGaSb. Campuran dari GaSb dan AlGaSb digunakan untuk bagian core, sedangkan untuk claddingnya digunakan GaSb yang index biasanya relatif lebih rendah dari campuran kedua senyawa pada bagian core. Hal ini disebabkan dengan ditamhkannya unsur Alumunium pada GaSb maka index bias akan meningkat.

3.1.1 Bentuk geometris dari waveguide

Waveguide modulator yang akan dirancang terdiri dari 3 lapisan utama yaitu *film*, *cover*, dan *substrate*. Bahan penyusun *cover* adalah GaSb tipe p. Sedangkan *substratenya* adalah GaSb tipe n yang cukup tebal.

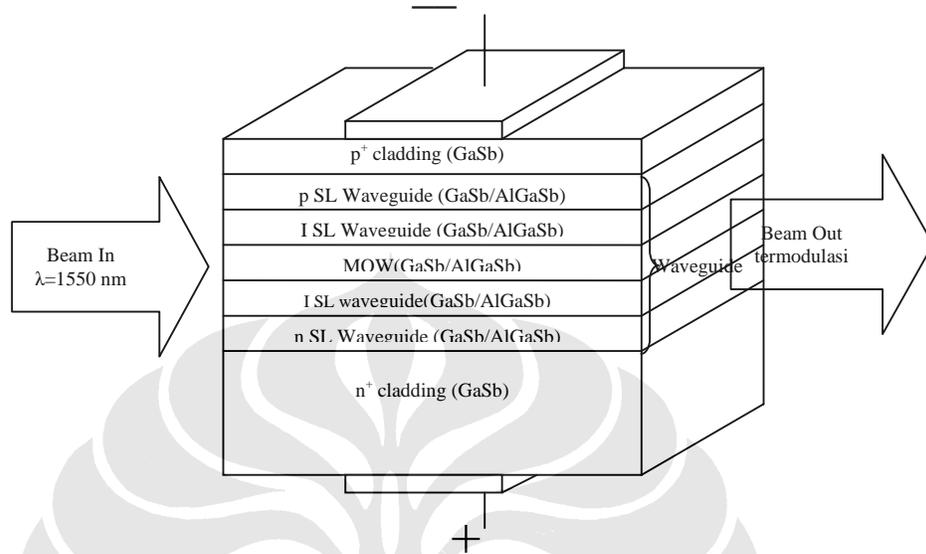
Bagian *waveguide film* terdiri atas 5 lapisan penyusun. Lapisan paling bawah disusun oleh *superlattice* tipe n yang terdiri dari GaSb/AlGaSb tipe n, selanjutnya di atasnya disusun oleh *superlattice* yang terdiri dari GaSb/AlGaSb intrinsik. *Superlattice* pada *waveguide* ini terdiri dari lapisan-lapisan yang sangat tipis, masing-masing lapisan bisa hanya terdiri atas 1 atau 2 lapisan atom yang tebalnya sekitar 10\AA . Lapisan ini disusun selang seling antara GaSb dengan AlGaSb. Fungsi dari lapisan *superlattice* adalah untuk mencegah terjadinya kerusakan pada struktur senyawa MQW pada saat penumbuhan di atas substrate.

Dibagian atas *superlattice* intrinsik ditumbuhkan MQW yang disusun oleh *well* dan *barrier* dengan bahan GaSb dan AlGaSb. Untuk rancangan *waveguide* ini, pada bagian ini akan ditumbuhkan 5 MQW. Ketebalan masing-masing lapisan pada MQW biasanya lebih tebal dibandingkan dengan *superlattice* dan dapat mencapai 70\AA - 100\AA untuk *well* dan 70\AA untuk *barriernya*. Pada *barrier* digunakan bahan yang mempunyai energi *bandgap* yang lebih tinggi. Struktur *well* dirancang mempunyai ketebalan yang lebih besar agar elektron dan *hole* yang 'terperangkap' lebih banyak.

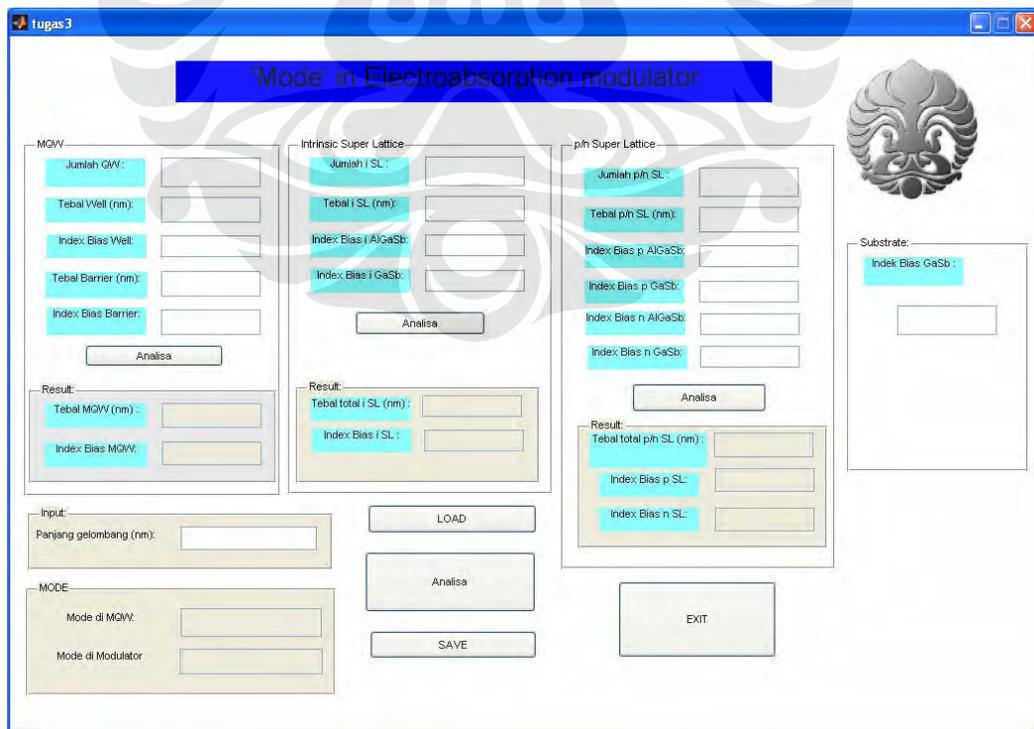
Untuk 2 lapisan di atas MQW ditumbuhkan lapisan yang sama, yaitu *superlattice*. Urutan penumbuhannya juga sama, yaitu *superlattice* intrinsik kemudian di atasnya *superlattice* tipe p. Jumlah lapisan yang ditumbuhkan juga sama dengan lapisan yang terletak dibawah MQW. Untuk lebih jelasnya, struktur *waveguide* dapat dilihat pada Gambar-3.1.

Superlattice tipe n maupun tipe p tidak ada perbedaan nilai index bias secara berarti, hal ini disebabkan oleh ketebalan yang dimiliki sangatlah kecil. Disain tebal *waveguide* ditentukan dengan menggunakan simulasi software berbasis MATLAB. Pada program ini dapat diperoleh jumlah *mode* yang sesuai target (dalam hal ini fundamental *mode*), dengan mengatur tebal *waveguide* sedemikian rupa sehingga hanya *fundamental mode* saja yang terdapat pada

waveguide. Pada Gambar-3.2 dapat dilihat tampilan utama dari program yang digunakan.



Gambar-3.1. Struktur layer dari modulator elektroabsorpsi GaSb/AlGaSb tanpa cavity Fabry-Perrot.



Gambar-3.2. Software untuk menentukan jumlah mode.

3.1.2 Jumlah mode pada waveguide

Dalam perancangan *waveguide*, yang sangat penting untuk ditentukan adalah jumlah *mode* yang eksis pada *waveguide*. *Mode* yang diharapkan ada pada *waveguide* hanyalah *fundamental mode*. *Multimode* tidak dikehendaki karena memiliki kecepatan berbeda (lebih lambat dari pada *fundamental mode*) dan akan saling interference yang menyebabkan speed modulator rendah. Bentuk sketsa *fundamental mode* dapat dilihat pada Bab II Dasar Teori.

Untuk menghitung jumlah *mode*, perlu diketahui indeks bias rata-rata pada masing-masing lapisan yaitu *cover*, *waveguide*, dan *substrate*. Untuk menghitung indeks bias rata-rata pada lapisan MQW dan *superlattice* dapat digunakan formula sebagai berikut [14-16]:

$$n_o^{(o)} = \left[n_L^2 + f (n_H^2 - n_L^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

dimana,

$n_o^{(o)}$ = indeks bias total

n_L = indeks bias lapisan yang lebih tinggi nilainya

n_H = indeks bias lapisan yang lebih rendah nilainya

f = *fill factor*

Rumus di atas merupakan pendekatan untuk indeks bias pada polarisasi TE dengan dengan pendekatan $\left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right) \rightarrow 0$.

Dari ketiga lapisan ini (*superlattice intrinsik*, *superlattice type-p/n* dan MWQ), dilakukan pendekatan rata-rata untuk mencari nilai total index bias dari ketiganya. Pendekatan rata-rata yang dilakukan dengan cara:

$$n_t = \frac{n_{MQW} + 2 \times n_{intrinsik} + n_{type-p} + n_{type-p}}{5} \quad (3.2)$$

Nilai inilah (n_t) yang mewakili indeks bias *film* dari *waveguide*.

Selanjutnya akan dibahas perhitungan manual dan rumus-rumus yang digunakan untuk mencari *mode*. Pertama-tama yang paling penting adalah sudut kritis dari sebuah modulator yang dapat juga ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\sin \theta_c = \frac{n_s}{n_{wg}} \quad (3.3)$$

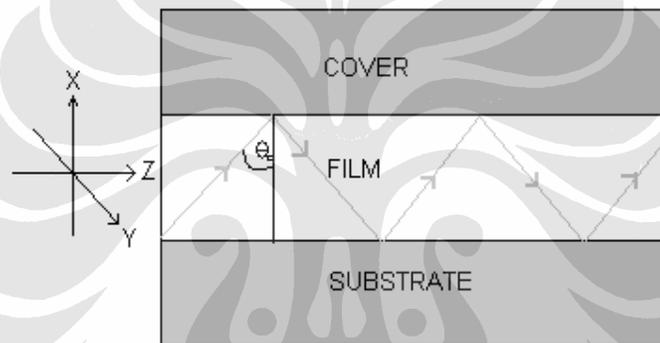
dimana,

n_s = indeks bias *substrate*

n_{wg} = indeks bias *waveguide/film*

$n_{wg} > n_s \geq n_c$

Jadi sudut kritis ini adalah sudut datang minimum dari cahaya yang masih bisa di *guide* oleh *waveguide*. Dapat dilihat pada Gambar-3.8, θ_c adalah sudut kritis *waveguide*.



Gambar-3.3. Penampang longitudinal *Waveguide*.

Pada saat cahaya mencapai *cover* atau *substrate*, maka cahaya yang sudut datangnya lebih besar sama dengan sudut kritis akan dipantulkan dan fasanya akan bergeser berdasarkan persamaan:

$$\tan \phi_{TE} = \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{(n_1 \cos \theta_1)} \quad (3.4)$$

ϕ_{TE} adalah besar sudut pergeseran fasa pada polarisasi TE. Sedangkan persamaan:

$$\tan \phi_{TM} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{(n_1 \cos \theta_1)} \quad (3.5)$$

ϕ_{TM} adalah besar sudut pergeseran fasa pada polarisasi TM. Pergeseran fasa ini akan bernilai 0 apabila sudut datangnya adalah sudut kritis, hal ini dapat dibuktikan dengan memasukkan nilai sudut kritis θ_c pada rumus (3.4) dan (3.5).

Propagasi cahaya didalam *waveguide* dapat diproyeksikan dalam 2 sumbu, yaitu sumbu X yang tegak lurus arah propagasi utama akan menghasilkan standing wave *mode*. Sedangkan yang sejajar sumbu Z adalah propagasi *mode* tersebut.

Jika kita melihat arah jalannya cahaya, pada saat melintas melalui film yang memiliki ketebalan h maka juga akan terjadi pergeseran fasa sebesar $kn_f h \cos \theta$ lalu cahaya tersebut akan dipantulkan pada bagian *film-cover* sebesar $2\phi_s$, selanjutnya pergeseran fasa akan terjadi lagi pada bagian *film* sebesar $kn_f h \cos \theta$ dan bagian terakhir akan dipantulkan pada bagian *film-substrate* sebesar $2\phi_c$. Dengan melihat perjalanan fasa cahaya pada sumbu X, secara umum *mode* dapat dijelaskan dengan persamaan [3]:

$$2kn_f h \cos \theta - 2\phi_s - 2\phi_c = 2v\pi \quad (3.6)$$

dimana,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

ϕ_c = Pergeseran fasa di persambungan *film-cover*

ϕ_s = Pergeseran fasa di oersambungan *film-substrate*

v = nomor *mode*

Untuk mempermudah perhitungan maka dilakukan normalisasi pada persamaan di atas menjadi [3]:

$$V \sqrt{1-b} = v\pi + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{(b+a)}{1-b}} \quad (3.7)$$

dimana,

$$V = kh \sqrt{n_f^2 - n_s^2}$$

$$a = \frac{(n_s^2 - n_c^2)}{(n_f^2 - n_s^2)}$$

$$b = \frac{(N^2 - n_s^2)}{(n_f^2 - n_s^2)} \text{ (polarisasi TE)}$$

$$b = \frac{n_f^4 (N^2 - n_s^2)}{n_c^4 (n_f^2 - n_s^2)} \text{ (polarisasi TM)}$$

$$N = \frac{\beta}{k} = n_f \sin \theta \approx n_s + b(n_f - n_s)$$

Karena hanya sudut cahaya yang lebih besar dari sudut kritis yang dapat di guide oleh *waveguide*, maka perhitungan kita menggunakan sudut kritis sebagai asumsi sudut datangnya. Dengan memandang kondisi ini, maka nilai $b = 0$ sehingga persamaan (3.7) menjadi [3]:

$$v = \frac{2h}{\lambda} \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (3.8)$$

nilai v yang dihasilkan berupa bilangan bulat. Untuk semua hasil perhitungan dilakukan pembulatan kebawah untuk mengantisipasi asumsi diatas.

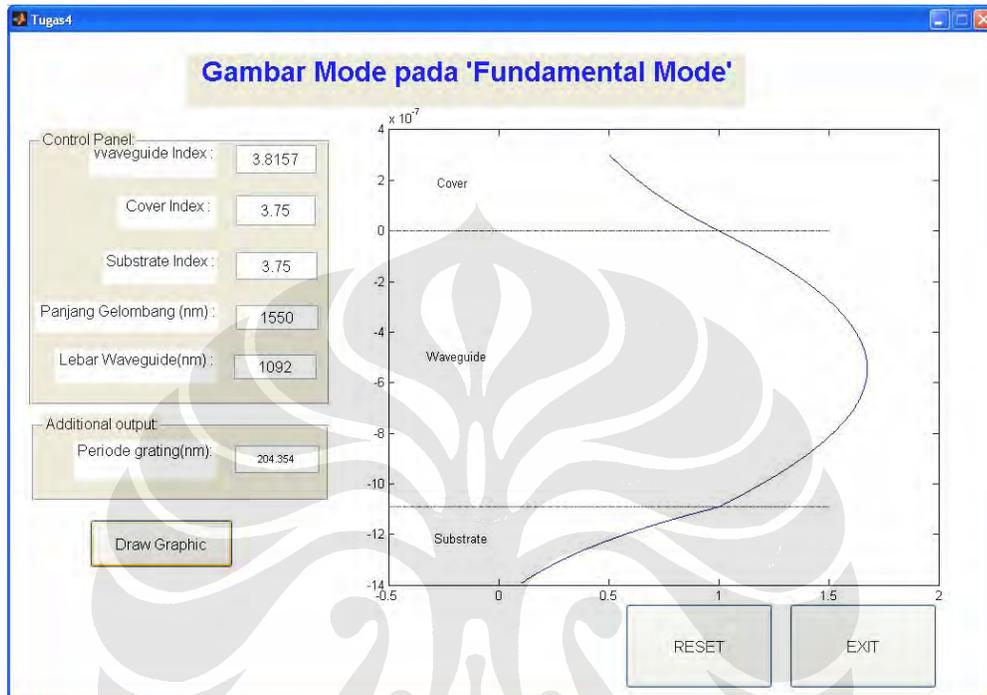
Sebenarnya tidak hanya pada *waveguide* saja yang terdapat *mode* (dalam hal ini *fundamental mode*) tetapi pada MQW juga terdapat *fundamental mode*. *Multi fundamental mode* dapat mengganggu kecepatan dari modulator, tetapi hal ini tidaklah menjadi masalah karena *fundamental mode* yang berasal dari MQW bergerak lebih cepat dan mudah dihilangkan (*kick out*) oleh struktur *grating* [18].

Semua rumus-rumus diatas merupakan perhitungan manual yang sudah terdapat ada program di Gambar-3.2 sehingga untuk menentukan *mode* yang terdapat pada modulator dapat langsung menggunakan program ini.

3.1.3 Gambar mode

Walaupun kita sudah mengetahui jumlah *mode* yang bergerak pada *waveguide* dengan menggunakan program di Gambar-3.2, alangkah pentingnya apabila kita dapat mengetahui bentuk *mode* yang bergerak pada *waveguide*.

Dengan mengetahui bentuk *mode*, kita dapat mengetahui distribusi intensitas di dalam maupun di luar *waveguide* (*evanescence*). Program untuk menentukan gambar *mode* dapat dilihat pada Gambar-3.4.



Gambar-3.4. Gambar distribusi medan elektromagnetik dari *mode* dalam struktur *waveguide*.

Program yang ditunjukkan pada Gambar-3.4 ini hanya dapat menggambarkan *fundamental mode*. Dapat dilihat bentuk *mode* terdiri 2 jenis grafik, yaitu grafik sinusoidal (di dalam *waveguide*) dan grafik eksponensial (*evanescence* pada *cover* dan *substrate*). Grafik sinusoidal menunjukkan penumpukan intensitas energi pada bagian tengah *waveguide* sedangkan grafik eksponensial menunjukkan penurunan intensitas energi.

Persamaan grafik yang digunakan untuk menggambarkan *fundamental mode* adalah [19]:

$$\xi_y = \begin{cases} C \exp(-qx) & 0 \leq x < \infty \\ C \left(\cos hx - \frac{q}{h} \sin hx \right) & -t \leq x \leq 0 \\ C \left(\cos ht - \frac{q}{h} \sin ht \right) \exp[p(x+t)] & -\infty < x \leq -t \end{cases} \quad (3.9)$$

$$h = \left(n_2^2 k_0^2 - \beta^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

$$q = \left(\beta^2 - n_1^2 k_0^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$p = \left(\beta^2 - n_3^2 k_0^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

dimana,

n_1 = indeks bias *cover*

n_2 = indeks bias *waveguide*

n_3 = indeks bias *substrate*

β = konstanta *propagasi*

Konstanta *propagasi* adalah komponen yang terpenting dalam menentukan bentuk *mode* maupun karakteristik *mode*. Konstanta *propagasi* pada dicari dengan persamaan [19]:

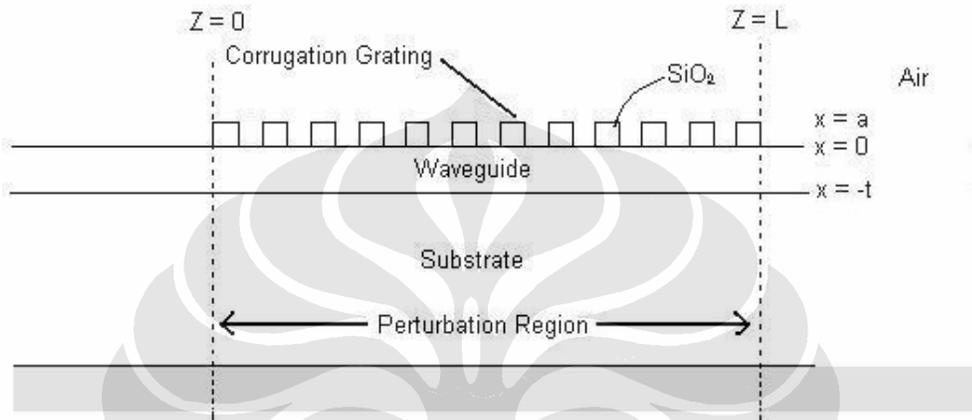
$$\beta = k n_{\text{waveguide}} \sin \theta \quad (3.13)$$

Karena pada *waveguide* yang dirancang hanya terdapat *fundamental mode*, maka sudut yang digunakan adalah sudut yang dapat menghasilkan *fundamental mode*. Salah satu kendala dalam mencari konstanta *propagasi* dari *fundamental mode* adalah menentukan sudut pada persamaan (3.13). Sudut tersebut dapat dicari dengan memanfaatkan persamaan (3.4), dan (3.6) dimana nilai $v=0$ (v menandakan nomor *mode* dan *fundamental mode* adalah *mode* dengan nomor $v=0$).

Pada perhitungannya digunakan metode iterasi untuk mendapatkan sudut dan kemudian dapat diperoleh konstanta *propagasinya*.

3.2 RANCANG BANGUN STRUKTUR GRATING

Setelah perancangan *waveguide* selesai, struktur penting selanjutnya yang menjadi topik bahasan kita adalah struktur *Fabry-Perrot* dengan komponen utama cermin *grating*. Seperti pembahasan sebelumnya, *grating* ini berfungsi sebagai cermin yang dapat memantulkan *mode*. Struktur sederhana *grating* dapat dilihat pada Gambar-3.5.



Gambar-3.5. Gambar struktur *grating*

Cara kerja secara singkat dan sederhana dari *grating* ini sudah dijelaskan pada awal sub bab 2.4, tetapi untuk lebih jelasnya maka akan diberikan penjelasan lebih rinci pada sub bab ini.

3.2.1 Teori perturbasi untuk kopling antar mode

Perturbation region pada sub bab sebelumnya telah dijelaskan sebagai daerah dimana bagian atasnya ditumbuhkan *grating*, tetapi secara fungsinya *perturbation* area mempunyai arti sebuah daerah dimana *mode* yang melaluinya akan mengalami gangguan, gangguan itu dapat menyebabkan *mode* mengalami perubahan karakter dan berpindah menjadi *mode* yang lain, dalam hal ini karakter yang paling penting adalah perubahan arah. Jika dilihat dari sudut pandang yang berbeda maka *perturbation region* ini merupakan daerah yang menjadi penghubung (*coupling*) antar *mode-mode* yang berbeda.

Penjelasan secara matematis mengenai fenomena ini dapat kita mulai dari persamaan Maxwell yang sangat terkenal [19].

$$\nabla^2 E(r,t) = \mu \varepsilon_o \frac{\partial^2 E(r,t)}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} P(r,t) \quad (3.14)$$

Total polarisasi yang terjadi disebuah medium [19].

$$P(r,t) = P_o(r,t) + P_{pert}(r,t) \quad (3.15)$$

dimana,

$$P_o(r,t) = [\varepsilon(r) - \varepsilon_o] E(r,t) \quad (3.16)$$

P_o adalah polarisasi yang disebabkan oleh medan $E(r,t)$ pada *unperturbed waveguide* jika dielektrik konstan nya $\varepsilon(r)$. Jika persamaan (3.15) dan (3.16) disubstitusikan pada persamaan (3.14) maka akan menjadi

$$\nabla^2 E_y - \mu \varepsilon(r) \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} [P_{pert}(r,t)]_y \quad (3.17)$$

Persamaan ini sama untuk E_x dan E_z .

Dengan mengasumsikan hanya *fundamental mode* saja yang bergerak di *waveguide* sehingga radiasi pada 'ekor' *mode (mode di substrate)* tidak ada, maka medan yang terjadi di *perturbation region* dapat dinyatakan sebagai [19]:

$$E_y(r,t) = \frac{1}{2} \sum_m A_m(z) \xi_y^{(m)}(x) e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c.c. \quad (3.18)$$

m adalah nilai eigen diskrit sehingga memenuhi persamaan

$$\left(\frac{\delta^2}{\delta x^2} - \beta_m^2 \right) \xi_y^{(m)}(r) + \omega^2 \mu \varepsilon(r) \xi_y^{(m)}(r) = 0 \quad (3.19)$$

Persamaan (3.19) diambil dari persamaan Maxwell yang dibuat dalam bentuk eksplisit dimana,

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_o n^2(r) \quad (3.20)$$

Selanjutnya dengan mensubstitusi persamaan (3.18) kedalam (3.17) akan menghasilkan [19]

$$e^{i\omega t} \sum_m \left[\begin{aligned} & \frac{A_m}{2} \left(-\beta_m^2 \xi_y^{(m)} + \frac{d^2 \xi_y^{(m)}}{dx^2} + \omega^2 \mu \varepsilon(r) \xi_y^{(m)} \right) e^{-i\beta_m z} \\ & + \frac{1}{2} \left(-2i\beta_m \frac{dA_m}{dz} + \frac{d^2 A_m}{dz^2} \right) \xi_y^{(m)} e^{-i\beta_m z} \end{aligned} \right] + c.c. = \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} [P_{pert}(r,t)]_y \quad (3.21)$$

Berdasarkan persamaan (3.19), maka suku pertama pada persamaan (3.21) akan hilang karena bernilai 0. Dengan asumsi

$$\left| \frac{d^2 A_m}{dz^2} \right| \ll \beta_m \left| \frac{dA_m}{dz} \right| \quad (3.22)$$

Maka persamaan (3.21) menjadi

$$\sum_m -i\beta_m \frac{dA_m}{dz} \xi_y^{(m)} e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c.c. = \mu \frac{d^2}{dt^2} [P_{pert}(r, t)]_y \quad (3.23)$$

Pada persamaan (3.23), nilai polarisasinya dalam bentuk turunan, untuk mendefinisikan secara keseluruhan kita mengintegrasikan dengan batas $-\infty$ sampai ∞ , dengan memanfaatkan persamaan

$$\int_{-\infty}^{\infty} \xi_y^{(l)} \xi_y^{(m)} dx = \frac{2\omega\mu}{\beta_m} \delta_{l,m} \quad (3.24)$$

Maka persamaan (3.23) menjadi

$$\frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_s z)} - \frac{dA_s^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_s z)} - c.c. = -\frac{i}{2\omega} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_{-\infty}^{\infty} [P_{pert}(r, t)]_y \xi_y^{(s)}(x) dx \quad (3.25)$$

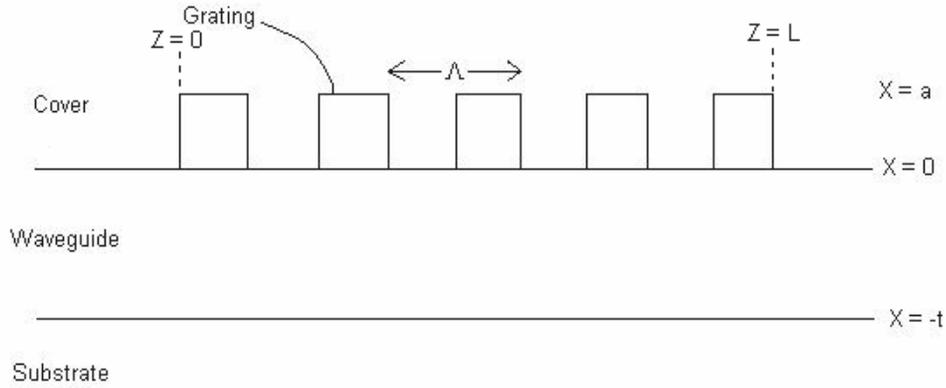
Di sisi sebelah kanan terdapat 2 buah suku yang berasal dari asumsi persamaan (3.23) dimana nilai m ada yang positif dan negatif untuk menunjukkan arah. Nilai negatif pada persamaan (3.25) sebelah kiri menunjukkan *mode* yang bergerak ke sumbu $-Z$ sedangkan nilai positif menunjukkan *mode* $+Z$.

Dari persamaan (3.25) dapat dilihat penjelasan secara matematis dimana menggambarkan definisi yang sama mengenai *perturbation region*. *Perturbation region* menjadi menghubungkan antara 2 *mode*, yaitu antara *mode* yang bergerak ke kanan dengan yang ke kiri.

3.2.2 Corrugated periodic waveguide grating

Pada sub bab sebelumnya, penjelasan mengenai *perturbation region* dalam mempengaruhi jalannya *mode* sudah dijelaskan secara terperinci. Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai struktur *grating* sehingga dapat menghasilkan *perturbation region* sesuai dengan yang diinginkan.

Secara detail bentuk *grating* yang ditumbuhkan diatas *waveguide* mempunyai pola yang periodik. Bentuknya dapat dilihat pada Gambar-3.6.



Gambar-3.6. Corrugated periodic waveguide

Dalam rancangan ini, untuk bahan *cover* digunakan udara dan *grating* digunakan SiO₂ dan udara.

Pada *perturbation region* akan terjadi perubahan kontanta dielektrik yang dapat dinyatakan pada persamaan [19]:

$$\varepsilon'(r) = \varepsilon(r) + \Delta\varepsilon(r) \quad (3.26)$$

dimana $\Delta\varepsilon(r) \equiv \varepsilon_o \Delta n^2$ (3.27).

Polarisasi pada daerah *perturbation* dapat pula dinyatakan dengan persamaan [19]

$$P_{pert}(r, t) = \Delta\varepsilon(r)E(r, t) = \Delta n^2(r)\varepsilon_o E(r, t) \quad (3.28)$$

selanjutnya dengan mensubstitusikan persamaan (3.18) ke dalam (2.38) maka akan diperoleh persamaan

$$\left[P_{pert}(r, t) \right]_y = \frac{\Delta n^2(r)\varepsilon_o}{2} \sum_m \left[A_m \xi_y^{(m)}(x) e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c.c. \right] \quad (3.29)$$

Dengan memanfaatkan persamaan (3.25) maka akan menghasilkan

$$\begin{aligned} & \frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_s z)} - \frac{dA_s^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_s z)} - c.c. = \\ & - \frac{i\varepsilon_o}{4\omega} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sum_m \left[A_m \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x, z) \xi_y^{(m)}(x) \xi_y^{(s)}(x) dx e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c.c. \right] \end{aligned} \quad (3.30)$$

Persamaan ini dapat menjelaskan secara langsung hubungan antara *grating* dengan daerah *perturbation*. Dari persamaan diatas, kita dapat menganggap bahwa ruas kanan merupakan sumber tenaga penggerak *mode-mode* yang

bergerak maju $\frac{dA_s^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_s z)}$ maupun mundur $\frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_s z)}$. Agar suatu *mode* dapat digerakkan oleh tenaga penggerak (ruas kanan), maka antara *mode* dan sumber harus memiliki frekuensi yang sama. Jika hal ini tidak terpenuhi maka hasil interaksi akhirnya akan bernilai 0. Selain itu faktor yang penting untuk diperhitungkan adalah perbedaan fasa ($i\beta z$) antara *mode* dengan sumbernya, jika hal ini tidak terpenuhi maka interaksi akan bernilai 0 untuk jarak propagasi sepanjang z .

Untuk lebih jelasnya apabila diinginkan *mode* yang bergerak maju $A_s^{(+)} \exp[i(\omega t - \beta_s z)]$, maka setidaknya salah satu suku diruas kanan (misalnya suku ke-1) harus bernilai $\exp[i(\omega t - \beta z)]$ dengan $\beta \approx \beta_s$. Apabila kondisi ini tidak dapat terjadi (ruas kanan dari persamaan (3.30) tidak ada yang sama), kita dapat mempermudah persamaan ini menjadi *mode* yang bergerak maju $A_s^{(+)} \exp[i(\omega t - \beta_s z)]$ disebelah kanan dan suku ke-1 disebelah kiri, untuk menjembatani (*coupling*) kedua ruas ini digunakan $\Delta n^2(x, z)$. Corrugated $\Delta n^2(x, z)$ berfungsi untuk menghubungkan *mode* pada ruas kanan dengan *mode* pada ruas kiri. Nilai $\Delta n^2(x, z)$ merupakan deret fourier dan dapat ditulis ulang dalam bentuk [19]

$$\Delta n^2(x, z) = \Delta n^2(x) \sum_{-\infty}^{\infty} a_q e^{i\left(\frac{2q\pi}{\Lambda}\right)z} \quad (3.31)$$

dengan mengambil pendekatan $\frac{l\pi}{\Lambda} \approx \beta_s$ dalam perhitungan nanti dipakai nilai $l=1$.

Setelah dilakukan substitusi persamaan (3.31) kedalam persamaan (3.30), maka diambil asumsi $q=1$, $m=s$ sehingga pergeseran fasa pada ruas kanan menjadi proporsional dengan $A_s^{(+)} \exp\left[i\left(\frac{2l\pi}{\Lambda} - \beta_s\right)z\right]$. Tetapi dengan terjadi persamaan ini maka [19]

$$\frac{2l\pi}{\Lambda} - \beta_s \approx \beta_s \quad (3.32)$$

sehingga secara bersamaan pada ruas kiri persamaan (3.30) juga dapat dihasilkan/digerakkan $A_s^{(-)} \exp(i\beta_s z)$, ini berarti dengan adanya *mode* yang bergerak ke kanan, maka *mode* yang bergerak ke kiri akan terjadi dengan sendirinya. Berdasarkan hal ini maka persamaan (3.30) dapat ditulis ulang dengan mengasumsikan $A_m = A_s^{(+)}$ dan menghilangkan $\frac{dA_s^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_s z)}$ pada ruas kanan:

$$\begin{aligned} \frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_s z)} = \\ -\frac{i\varepsilon_o}{4\omega} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sum_m \left[A_s^{(+)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \sum_{-\infty}^{\infty} a_q e^{i\left(\frac{2q\pi}{\Lambda}\right)z} \xi_y^{(m)}(x) \xi_y^{(s)}(x) dx e^{i(\omega t - \beta_m z)} + c.c. \right] \end{aligned} \quad (3.33)$$

Kemudian dilakukan asumsi $q=1, m=s$

$$\begin{aligned} \frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_m z)} = \\ -\frac{i\varepsilon_o}{4\omega} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sum_m \left[A_s^{(+)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \sum_{-\infty}^{\infty} a_1 \xi_y^{(s)}(x) \xi_y^{(s)}(x) dx e^{i\left(\frac{2q\pi}{\Lambda} + \omega t - \beta_m\right)z} + c.c. \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Derivasi terhadap persamaan (3.34)

$$\begin{aligned} \frac{dA_s^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_m z)} = \\ -\frac{i\varepsilon_o}{4\omega} \omega^2 \sum_m \left[A_s^{(+)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \sum_{-\infty}^{\infty} \xi_y^{(s)}(x) \xi_y^{(s)}(x) dx a_1 e^{i\left(\frac{2q\pi}{\Lambda} + \omega t - \beta_m\right)z} \right] \end{aligned} \quad (3.35)$$

Hasil akhir penguraian dapat dituliskan dalam bentuk [19]

$$\frac{dA_s^{(-)}}{dz} = \frac{i\omega\varepsilon_o}{4} A_s^{(+)} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx a_1 e^{i\left[\left(\frac{2l\pi}{\Lambda}\right) - 2\beta_s\right]z} \quad (3.36)$$

Coupling antara *mode* yang bergerak maju dengan yang mundur dapat digambarkan pada persamaan [19]

$$\frac{dA_s^{(+)}}{dz} = \kappa A_s^{(-)} e^{i2(\Delta\beta)z} \quad (3.37)$$

Begitu sebaliknya

$$\frac{dA_s^{(-)}}{dz} = \kappa A_s^{(+)} e^{-i2(\Delta\beta)z} \quad (3.38)$$

dimana

$$\kappa = \frac{i\omega\epsilon_0 a_l}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx \quad (3.39)$$

$$\Delta\beta \equiv \beta_s - \frac{l\pi}{\Lambda} \equiv \beta_s - \beta_o \quad (3.40)$$

Apabila digunakan *grating* seperti pada Gambar-3.6, maka *grating* akan membentuk susunan sederhana yang memiliki periode (periode = Λ) yang bergerak sepanjang sumbu-Z.

$$\Delta n^2(x, z) = \Delta n^2(x) \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\sin \eta z + \frac{1}{3} \sin 3\eta z + \dots \right) \right] = \Delta n^2(x) \sum_l a_l e^{i\eta l z} \quad (3.41)$$

$l = 1, 3, 5, \dots$

dimana

$$\Delta n^2(x) = \begin{cases} n_1^2 - n_2^2 & -a \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\eta \equiv \frac{2\pi}{\Lambda}$$

sehingga

$$a_l = \begin{cases} \frac{-i}{\pi l} & l \text{ odd} \\ 0 & l \text{ even} \\ \frac{1}{2} & l = 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

Untuk nilai ganjil maka persamaan (3.39) dan (3.41) menjadi [19]

$$\kappa = \frac{+i\omega\epsilon_0}{4\pi l} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx \quad (3.44)$$

Pada periodik *grating* untuk suatu nilai l , nilai $\Delta\beta \approx 0$, maka dapat dituliskan untuk $\Delta\beta = 0$

$$\Lambda = l \frac{\lambda_g^{(s)}}{2} \quad (3.45)$$

dimana

$$\lambda_g^{(s)} = \frac{2\pi}{\beta_s} \quad (3.46)$$

adalah panjang gelombang untuk *mode* ke- s .

Dengan menggunakan persamaan (3.9) ditambah (3.42) untuk menghasilkan integrasi pada persamaan (3.44)

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx &= (n_1^2 - n_2^2) \int_{-a}^0 \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx \\ &= (n_1^2 - n_2^2) C_s^2 \int_{-a}^0 \left[\cos h_s x - \frac{q_s}{h_s} \sin h_s x \right]^2 dx \end{aligned} \quad (3.46)$$

Persamaan (3.46) dengan menggunakan bantuan asumsi-asumsi dibawah ini

$$\begin{aligned} \frac{t(n_2 - n_3)}{s\lambda} &\gg 1 \\ \beta_s &\approx n_2 k_o \\ h_s &\rightarrow \frac{\pi s}{t} \quad s = 1, 2, \dots = \text{transverse mode number} \\ \frac{q_s}{h_s} &\approx (n_2^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2t}{s\lambda} \right) \\ q_s &\gg h_s \\ C_s^2 &= \frac{4h_s^2 \omega \mu}{\beta_s t q_s^2} \end{aligned} \quad (3.47)$$

akan menjadi

$$(n_1^2 - n_2^2) \int_{-a}^0 \left[\xi_y^{(s)}(x) \right]^2 dx = (n_1^2 - n_2^2) \frac{4\pi^2 \omega \mu}{3n_2 k_o} \left(\frac{a}{a+t} \right)^3 s^2 \left(1 + \frac{3}{q_s a} + \frac{3}{q_s^2 a^2} \right) \quad (3.48)$$

Persamaan (3.48) disubstitusikan pada (3.44) menjadi

$$\kappa_s \approx \frac{2\pi^2 s^2}{3l\lambda} \frac{(n_2^2 - n_1^2)}{n_2} \left(\frac{a}{a+t} \right)^3 \left[1 + \frac{3}{2\pi} \frac{\lambda/a}{(n_2^2 - n_1^2)^{1/2}} + \frac{3}{4\pi^2} \frac{(\lambda/a)^2}{(n_2^2 - n_1^2)^{1/2}} \right] \quad (3.49)$$

3.2.3 Solusi dari Coupled Mode

Untuk mempermudah pengertian persamaan (3.37), maka nilai $A_s^{(-)} \equiv A$ dan $A_s^{(+)} \equiv B$ sehingga [19]

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} &= \kappa_{ab} B e^{-i2(\Delta\beta)z} \\ \frac{dB}{dz} &= \kappa_{ab}^* A e^{+i2(\Delta\beta)z} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Grating yang digunakan seperti pada Gambar-2.16 dengan panjang L dan ada input dengan *amplitude* $B(0)$ datang dari sisi kiri *corrugated section*. Solusi (3.50) dengan asumsi $A(L)=0$ akan menjadi [19]

$$A(z)e^{i\beta z} = B(0) \frac{i\kappa_{ab} e^{i\beta_0 z}}{-\Delta\beta \sinh SL + iS \cosh SL} \sinh [S(z-L)] \quad (3.51)$$

$$B(z)e^{-i\beta z} = B(0) \frac{e^{i\beta_0 z}}{-\Delta\beta \sinh SL + iS \cosh SL} \times \left\{ \Delta\beta \sinh [S(z-L)] + iS \cosh [S(z-L)] \right\} \quad (3.52)$$

dimana

$$S = \sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2} \quad (3.53)$$

$$\kappa \equiv |\kappa_{ab}|$$

Untuk beberapa kondisi dimana nilai $\Delta\beta = 0$, persamaan menjadi [19]

$$A(z) = B(0) \frac{\kappa_{ab}}{\kappa} \frac{\sinh [\kappa(z-L)]}{\cosh \kappa L} \quad (3.54)$$

$$B(z) = B(0) \frac{\cosh [\kappa(z-L)]}{\cosh \kappa L} \quad (3.55)$$

Persamaan (3.54) dan (3.55) merupakan persamaan garis yang melambangkan amplitudo. Daya dari masing-masing amplitudo adalah $A(z)^2$ dan $|B(z)|^2$ [19]. Gambar-2.16 menunjukkan grafik yang tergambar dari persamaan (3.54) dan (3.55). Pada *perturbation region* akan terjadi penurunan daya secara eksponensial, hal ini tidak dikarenakan penyerapan tetapi adanya daya yang dipantulkan.

Besarnya pemantulan dan transmisi dapat dituliskan dalam persamaan [19]

$$T_{eff} = \left| \frac{B(L)}{B(0)} \right|^2 \quad (3.56)$$

$$R_{eff} = \left| \frac{A(0)}{B(0)} \right|^2$$

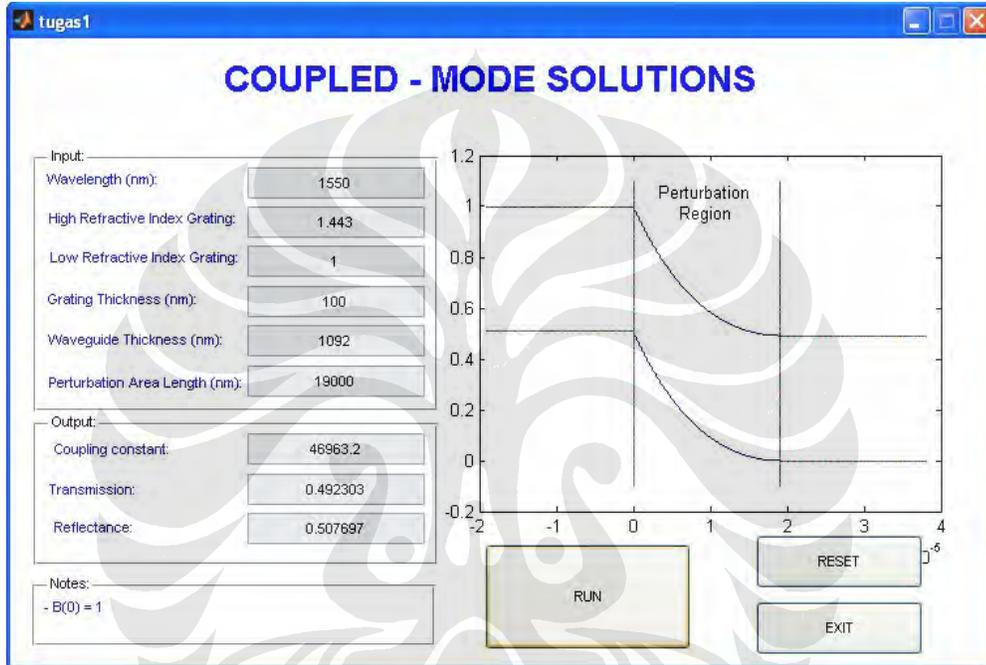
Untuk mendapatkan semua spesifikasi dari *grating* beserta sketsa dari *perturbation region* yang sesuai dengan perhitungan manual diatas maka dapat digunakan program simulasi yang terdapat pada Gambar-3.6. Dengan masukan panjang gelombang, indeks bias, ketebalan *grating*, ketebalan *waveguide*, dan

panjang *perturbation region*, maka dapat dihasilkan κ , *reflectance* dan *transmittance* beserta sketsa *perturbation region*.

Besar periode *grating* dapat diperoleh dari persamaan [19]

$$\Lambda = \frac{\pi}{\beta} \quad (3.57)$$

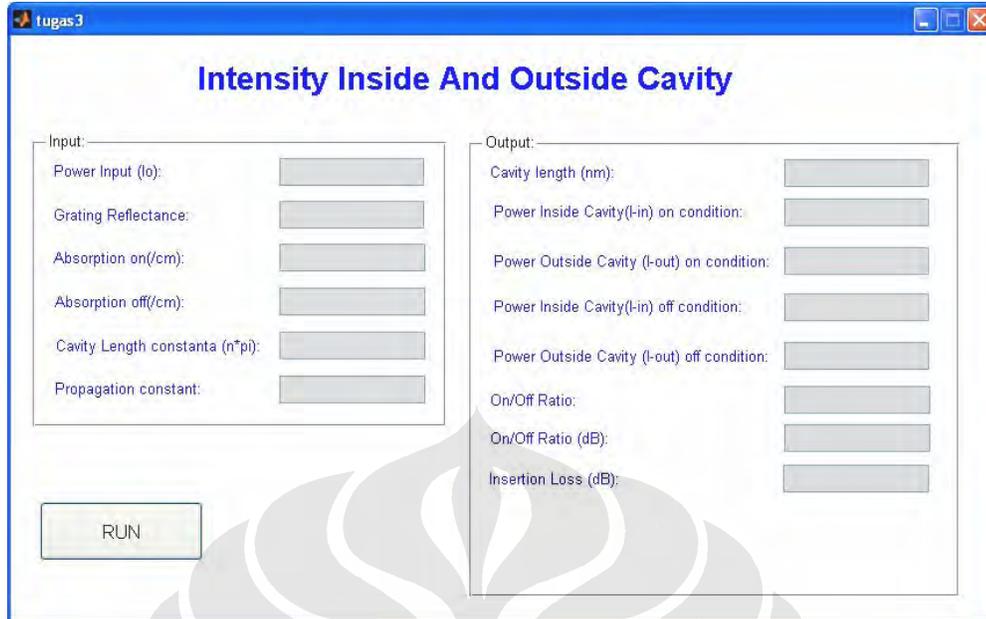
Nilai periode *grating* dapat diperoleh juga dari program simulasi pada Gambar-3.4.



Gambar-3.7. Gambar spesifikasi *grating* dan *perturbation region*.

3.3 MODULATOR ELEKTROABSORPSI BERSTRUKTUR WAVEGUIDE DENGAN MENGGUNAKAN STRUKTUR CAVITY FABRY-PERROT.

Tiga parameter utama dari perancangan sebuah modulator adalah *device capacitance*, rasio ON/OFF, dan *internal insertion loss* [18]. Penggunaan *symmetric FB cavity* didapatkan meningkatkan kinerja dari ketiga kriteria tersebut. Untuk mengetahui parameter-parameter penting tersebut dapat digunakan software simulasi pada Gambar-3.7. Penjelasan mengenai rumus-rumus maupun perhitungan manual akan dijelaskan pada sub bab-sub bab dibawah ini.



Gambar-3.8. Program menghitung parameter-parameter pada modulator *elektroabsorpsi* dengan *grating*.

3.3.1 Intensitas pada struktur cavity

Pada struktur *cavity* modulator akan terjadi peningkatan intensitas yang disebabkan penggunaan *grating*. Hal ini disebabkan adanya pemantulan *mode* yang berulang sehingga menghasilkan resultan intensitas yang lebih besar dari intensitas input. Peningkatan intensitas inilah yang berperan langsung dalam meningkatkan penyerapan di *cavity*.

Intensitas *mode* yang terpantul-pantul terus menerus ini akan mengalami amplitudo yang terus mengecil dan pergeseran fasa yang konstan untuk setiap pemantulannya. Amplitudo yang mengecil ini disebabkan oleh penyerapan yang terjadi di *cavity* dan *loss* pada saat dipantulkan *grating*. Pemantulan pada bagian *grating* memang dirancang kurang dari 100% (*lossy*).

Di dalam struktur *cavity*, intensitas *mode* yang terus menerus dipantulkan dapat dinyatakan dengan [3]

$$U_1 = I_o^{\frac{1}{2}}, \quad U_2 = hU_1, \quad U_3 = hU_2 = h^2U_1 \quad (3.58)$$

dimana $h = re^{i\varphi}$, $|h| = r < 1$ dan I_o adalah intensitas *mode* awal.

Amplitudo dari *mode* ke- m lebih kecil dari *mode* ke- $(m-1)$ dan berbeda fasa sebesar φ .

Superposisi untuk *mode* pada persamaan (3.58) adalah

$$\begin{aligned}
 U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots = I_o^{\frac{1}{2}} (1 + h + h^2 + \dots) \\
 &= \frac{I_o^{\frac{1}{2}}}{1-h} = \frac{I_o^{\frac{1}{2}}}{1-re^{i\varphi}}
 \end{aligned}
 \tag{3.59}$$

Intensitas dari superposisi ini adalah [3]

$$\begin{aligned}
 I = |U|^2 &= \frac{I_o}{|1-re^{i\varphi}|^2} = \frac{I_o}{\left[(1-r\cos\varphi)^2 + r^2\sin^2\varphi \right]} \\
 &= \frac{I_o}{(1-r)^2 + 4r\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}
 \end{aligned}
 \tag{3.60}$$

Untuk mempermudah, persamaan (3.60) dapat ditulis ulang menjadi [3]

$$I = \frac{I_{\max}}{1 + \left(\frac{2\Gamma}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}
 \tag{3.61}$$

dimana

$$\begin{aligned}
 I_{\max} &= \frac{I_o}{(1-r)^2} \\
 \Gamma &= \frac{\pi r^2}{1-r}
 \end{aligned}
 \tag{3.62}$$

Panjang *cavity* diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan pergeseran fasa sebesar $\varphi=2\pi$, dengan menggunakan persamaan (3.61) dan (3.62) maka

$$I = I_{\max} = \frac{I_o}{1-r}
 \tag{3.63}$$

Nilai r pada persamaan (3.63) hanya berasal dari cermin saja. Pengurangan amplitudo bukan hanya pada pemantulan saja melainkan juga dari penyerapan. Oleh karena itu, persamaan untuk mengetahui besar intensitas didalam *cavity* adalah [18]

$$I_{in} = \frac{I_o}{(1-re^{-\alpha L})^2}
 \tag{3.64}$$

Sedangkan intensitas diluar *cavity* adalah [18]

$$I_{out} = \frac{rI_o}{(1 - re^{-\alpha L})^2} \quad (3.65)$$

Intensitas, yang dapat dihitung dari persamaan (3.64) dan (3.65), berlaku untuk kondisi on maupun off. Perbedaannya hanya pada nilai α . Adapun pergeseran fasa yang terjadi dapat ditentukan melalui persamaan

$$\beta(2d) = n(2\pi) \quad (3.66)$$

dimana d adalah panjang *cavity* dan β adalah konstanta propagasi *mode*.

3.3.2 Rasio ON/OFF

Untuk modulator tanpa menggunakan *grating*, rasio ON/OFF dapat dinyatakan dalam persamaan [18]

$$On / Off = \frac{e^{-\alpha_{on}L}}{e^{-\alpha_{off}L}} = e^{-(\alpha_{on} + \alpha_{off})L} \quad (3.67)$$

Dengan ditambahkan *grating*, Rasio ON/OFF dapat ditingkatkan sebesar [18]

$$On / Off \text{ gain of FP} = \frac{(1 - r.e^{\alpha_{off}L})^2}{(1 - r.e^{\alpha_{on}L})^2} \quad (3.68)$$

Sehingga Rasio ON/OFF yang baru menjadi [18]

$$On / Off = \frac{e^{-\alpha_{on}L}}{e^{-\alpha_{off}L}} \cdot \frac{(1 - r.e^{\alpha_{off}L})^2}{(1 - r.e^{\alpha_{on}L})^2} \quad (3.69)$$

3.3.3 Internal Insertion Loss

Parameter penting lainnya yang sangat mempengaruhi kinerja modulator adalah *insertion loss*. Perhitungannya dilakukan pada kondisi ON [18].

$$IIL = \frac{r(1-r)}{(1 - r.e^{-\alpha_{on}L})^2} \quad (3.70)$$

3.3.4 Kecepatan divais

Setelah mendisain struktur dari modulator yang sesuai dengan target, maka untuk mengetahui kecepatannya dapat dihitung dengan menggunakan rumus [8]:

$$v_{3-dB} = \frac{1}{2\pi RC_{MOD}} \quad (3.71)$$

dimana,

R = Resistansi dari sumber (Gambar 2.15)

C_{MOD} = Nilai kapasitansi dari modulator

Nilai kapasitansi dari modulator berbanding terbalik dengan kecepatan modulator, sehingga untuk menghasilkan modulator yang semakin cepat maka nilai kapasitansinya harus semakin kecil. Nilai kapasitansi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (3.72)$$

dimana,

$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$ = konstanta dielektrik

A = luas penampang

d = tebal modulator

Konstanta dielektrik relatif dapat diperoleh dengan persamaan $\varepsilon_r \approx n^2$, dimana nilai index bias total modulator diperoleh dari rerata semua nilai index bias *cover*, *film*, dan *substrate*.

$$n = \frac{n_{MQW} + n_{intrinsik} + n_{intrinsik}}{3} \quad (3.73)$$

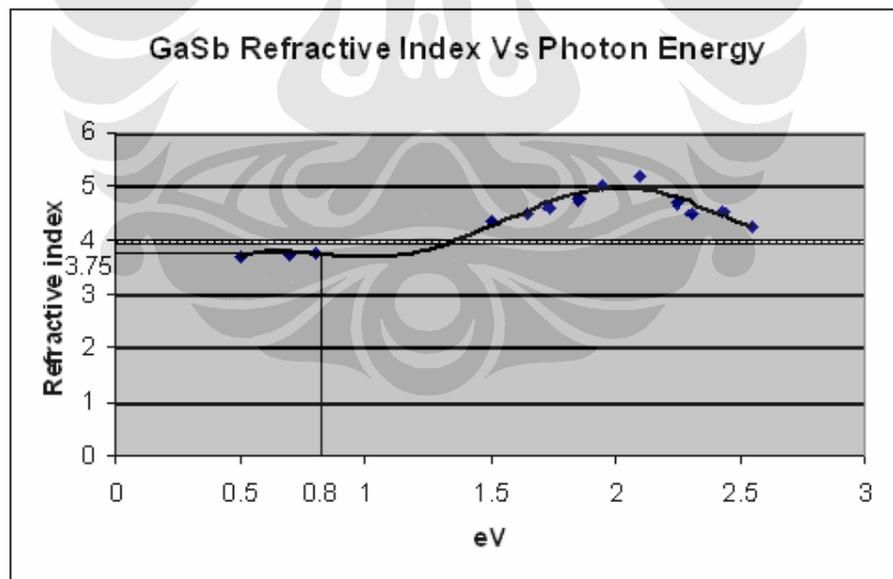
BAB IV

PERHITUNGAN PARAMETER-PARAMETER PADA MODULATOR

Setelah melakukan pembahasan rancang bangun pada Bab III, maka pada Bab ini akan dilakukan perhitungan atas parameter-parameter penting dalam modulator. Perhitungan ini menggunakan berbagai data dari berbagai sumber maupun asumsi-asumsi pendekatan ilmiah.

4.1 GaSb

GaSb digunakan pada MQW, *superlattice* tipe-n dan tipe-p serta *cladding*. Bahan ini mempunyai indeks bias sebesar 3.8 jika dilalui oleh *infrared* [17]. Indeks *bias* ini akan berubah berdasarkan kurva pada Gambar-4.1. Pada panjang gelombang 1550nm yang memiliki energi 0.8eV, indeks bias GaSb menjadi 3.75. Indeks bias ini diukur pada suhu 300K.



Gambar-4.1. Grafik indeks bias dari GaSb pada suhu 300K (pendekatan).

Pada bagian *superlattice*, GaSb diberikan *doping* sehingga menjadi tipe-p maupun tipe-n, perubahan indeks bias yang terjadi tidak terlalu besar disebabkan

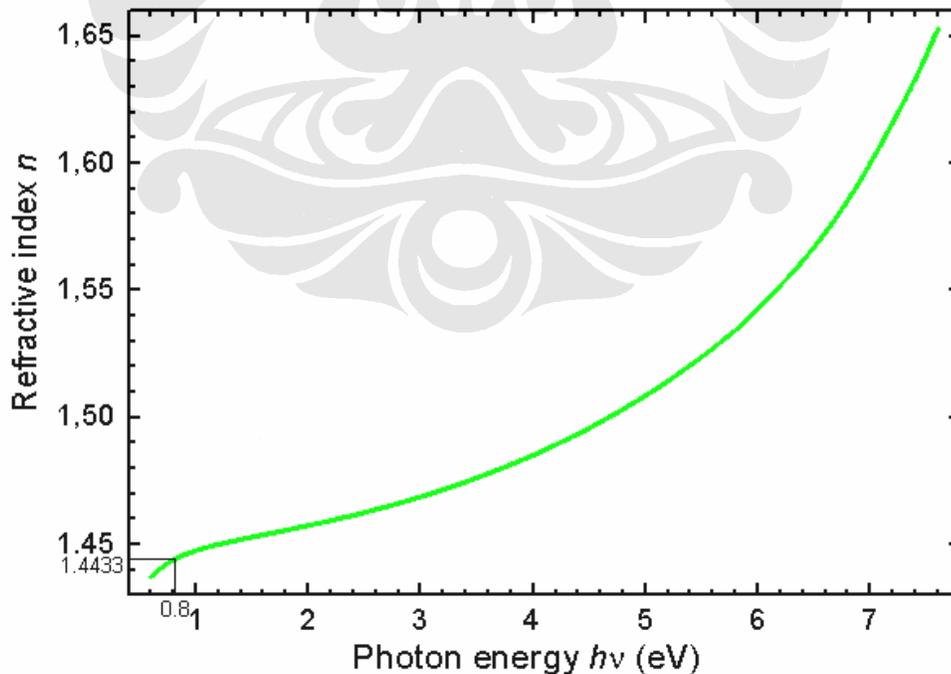
ketebalan *superlattice* yang sangat tipis. Pada perhitungan antara indeks bias GaSb intrinsik dengan GaSb yang diberikan *doping* dianggap sama besar.

4.2 AlGaSb

Bahan lain yang digunakan untuk menyusun MQW dan *superlattice* tipe p dan n adalah AlGaSb. AlGaSb mempunyai indeks bias yang lebih tinggi dari pada GaSb, bahan ini juga berfungsi sebagai *barrier* karena mempunyai energi *band gap* yang lebih tinggi dari GaSb. GaSb berfungsi sebagai *well*. Untuk menentukan besar indeks bias AlGaSb dilakukan asumsi nilai indeks bias sebesar 3.8. Perubahan nilai indeks bias akibat diberikan *doping* dapat diabaikan karena nilainya terlalu kecil.

4.3 SiO₂

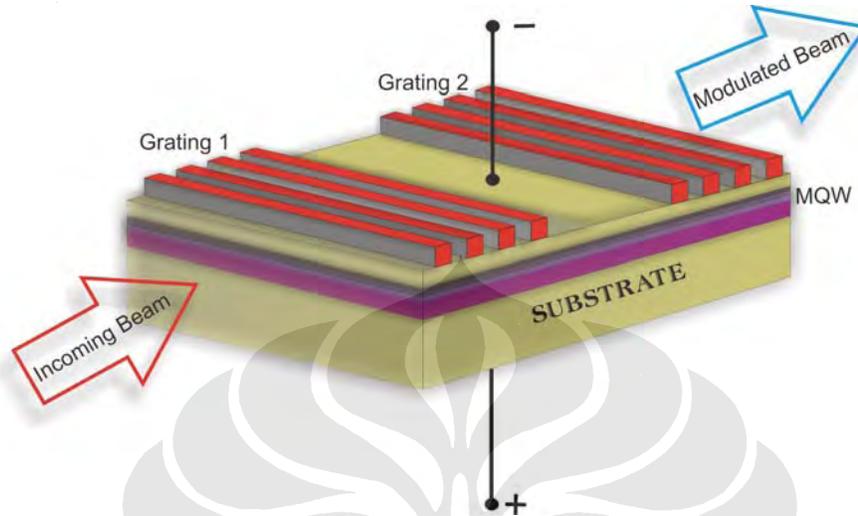
SiO₂ digunakan sebagai bahan penyusun *grating* pada modulator. Indeks bias dari bahan ini pada saat dilewati panjang gelombang 1550nm (0.8eV) adalah sebesar 1.4433 [9]. Grafik perubahan indeks bias dari SiO₂ dapat dilihat pada Gambar-4.2.



Gambar-4.2. Grafik indeks bias dari SiO₂ pada suhu 300K [9].

4.4 BENTUK GEOMETRIS MODULATOR

Gambar sketsa dari modulator yang telah ditambahkan *grating* dapat dilihat pada Gambar-4.3.



Gambar-4.3. Modulator elektroabsorpsi dengan *grating*.

Pada Gambar-4.3, sinyal masuk merupakan cahaya yang belum termodulasi (tanda panah merah). Biasanya signal ini bersumber dari *laser*. Untuk sinyal keluar adalah cahaya yang telah termodulasi (tanda panah biru) dan diteruskan masuk ke sistem *fiber optik*.

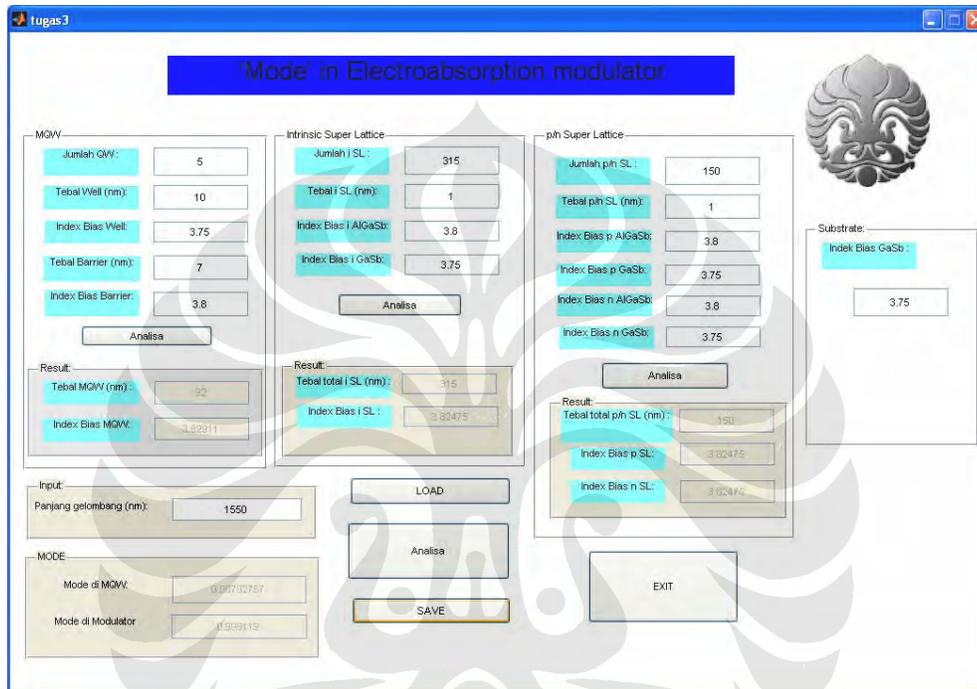
Untuk menghitung dimensi dari struktur *waveguide* dapat digunakan software pada Gambar-3.2. Dengan menggunakan data-data pada penguraian sebelumnya, maka hasil dari perhitungan dapat dilihat pada Gambar-4.4.

Spesifikasi dari *waveguide* yang tertera pada Gambar-4.4 dan tersusun seperti Gambar-3.1 adalah:

- Tebal *Multiple Quantum Well* (MQW) = 92nm.
- Indeks bias *Multiple Quantum Well* (MQW) = 3.82911
- Tebal *intrinsic super lattice* = 315nm
- Indeks bias *intrinsic super lattice* = 3.82475
- Tebal *p/n super lattice* = 150nm
- Indeks bias *p/n super lattice* = 3.82475

Sehingga tebal *waveguide* menjadi 1022nm dengan indeks bias sebesar 3.8256. Sedangkan untuk tebal *substrate* tidak ada ketentuan teknis yang pasti tetapi tebal

substrate harus dipastikan cukup tebal sehingga tidak ada cahaya yang menembus. Untuk tebal *substrate* diambil nilai sekitar 220 μm . Tebal *waveguide* diatur setebal mungkin namun tetap hanya *fundamental mode* saja yang bergerak di dalamnya, kondisi ini diusahakan karena semakin tebal *waveguide*, semakin kecil pula kapasitansinya. Dengan kapasitansi yang semakin kecil maka akan meningkatkan kecepatan kerja modulator.

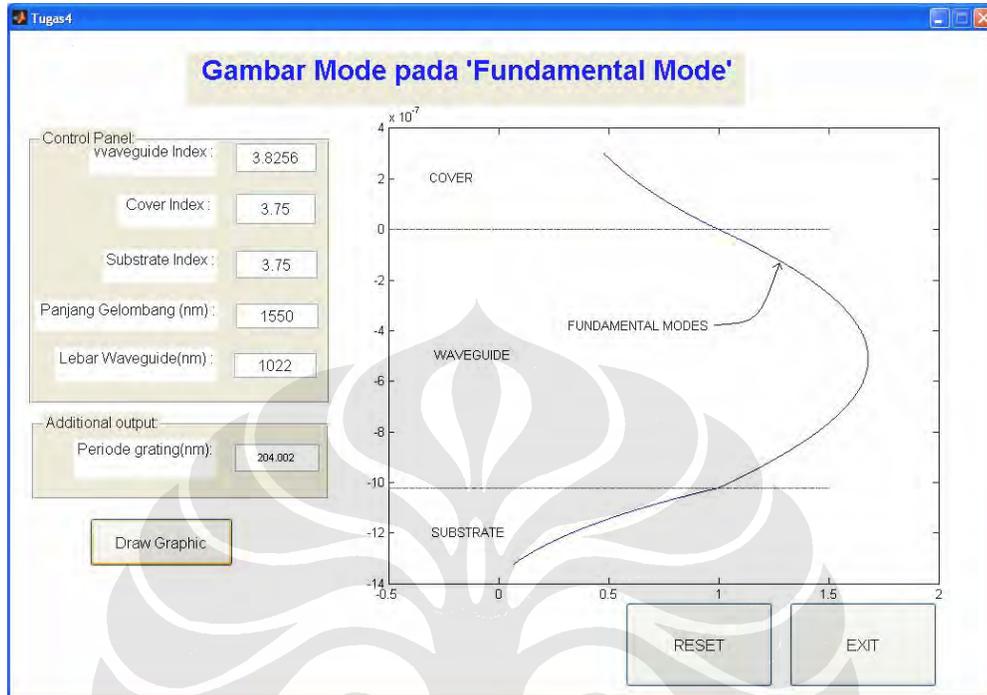


Gambar-4.4. Program untuk menghitung spesifikasi *waveguide*.

4.5 GAMBAR MODE YANG BERGERAK PADA WAVEGUIDE

Selanjutnya uraian mengenai perancangan modulator akan membahas mengenai gambar dari *mode* yang bergerak di dalam *waveguide*. *Mode* yang bergerak sepanjang *waveguide* hanya *fundamental mode* saja. Gambar dari *mode* ini dapat dilihat pada Gambar-4.5, untuk besar indeks bias *cover*, *waveguide*, dan *substrate* dapat diambil dari Gambar-4.4. Pada software ini ditunjukkan pula besar *periode grating* yang harus ditumbuhkan diatas modulator yang diperoleh hasil sebesar 204.002nm. Hasil sampingan lainnya yang tidak ditampilkan secara langsung pada program ini seperti sudut datang cahaya minimum (θ) yang dapat menghasilkan *fundamental mode*, diperoleh sebesar 83.2372°, sedangkan

konstanta propagasi pergerakan *mode* adalah sebesar 1.54×10^7 . Konstanta propagasi ini diperlukan untuk menganalisa struktur *grating*.



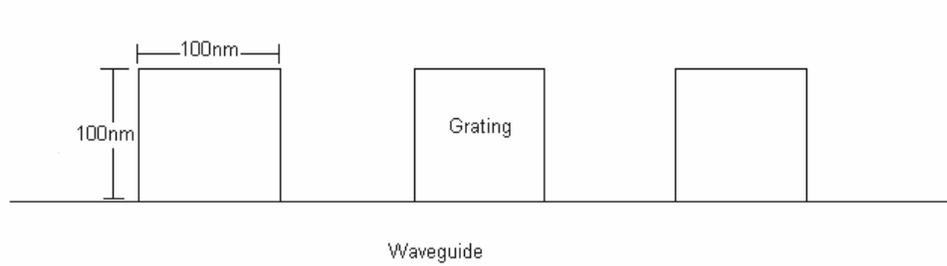
Gambar-4.5. Gambar *mode*.

4.6 STRUKTUR GRATING

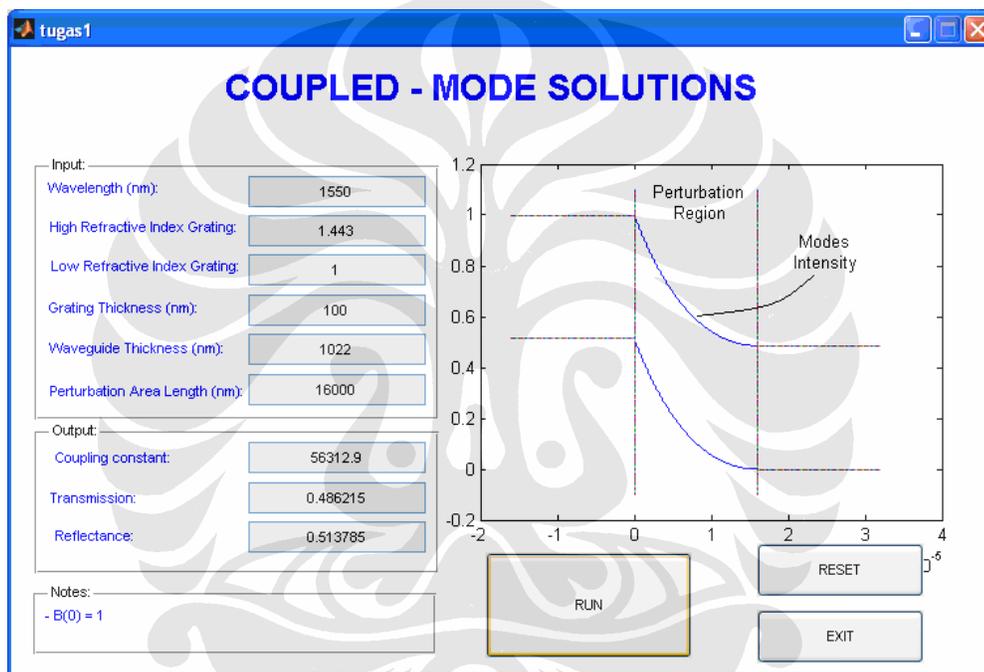
Salah satu bagian paling penting dari perancangan modulator ini adalah perancangan *grating*. Software untuk merancang spesifikasi dari *grating* dapat dilihat pada Gambar-4.7. *High Refractive Index* adalah indeks bias dari SiO_2 , sedangkan untuk *Low Refractive Index* adalah indeks bias udara. Ketebalan dari *waveguide* diperoleh dari software pada Gambar-4.4, sedangkan untuk ketebalan *grating* diambil nilai 100nm disebabkan besar periode *grating* yang mendekati 200nm sehingga bentuk *grating* dapat menjadi simetris (berbentuk bujursangkar, Gambar-4.6). Bentuk ini dapat mempermudah dalam pembuatan *grating*. Dengan panjang *perturbation region* sebesar $16\mu\text{m}$ maka diperoleh

- $Transmission = 0.486215$
- $Reflectance = 0.513785$

Nilai ini diatur sedemikian rupa sehingga *grating* berfungsi sebagai cermin dengan pemantulan $\pm 50\%$.



Gambar-4.6. Struktur *Grating* yang simetris.

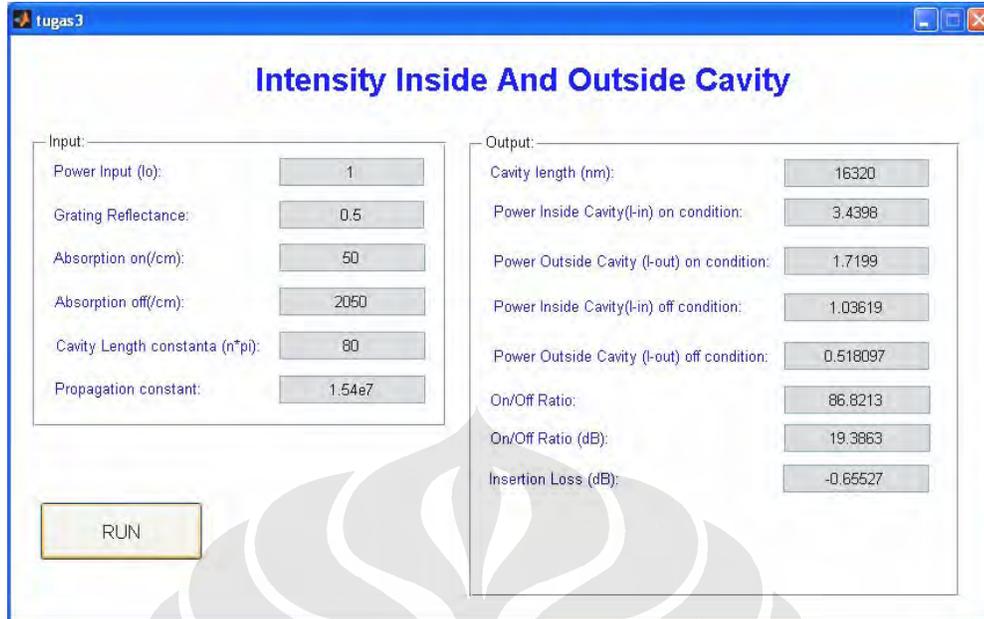


Gambar-4.7. Spesifikasi *Grating* .

Untuk memperjelas grafik yang ditampilkan pada Gambar-4.7 dapat dilihat sketsa gambarnya pada Gambar-2.16.

4.7 RASIO ON/OFF DAN INSERTION LOSS PADA MODULATOR

Bagian terakhir dari perancangan modulator ini adalah menentukan rasio ON/OFF dan *insertion loss*. Pada perancangan ini dapat digunakan software pada Gambar-4.8.



Gambar-4.8.Rasio ON/OFF dan *Insertion loss* Modulator.

Pada perhitungan ini diambil asumsi untuk *power input* sebesar 1, dengan α_{ON} dan α_{OFF} sebesar 50cm^{-1} dan 2000cm^{-1} [18]. Nilai *propagation constant* dapat diperoleh dari *software* di Gambar-4.5.

Untuk membedakan pengaruh penumbuhan *grating* maka akan dilakukan perhitungan pada 2 kondisi. Kondisi yang pertama adalah membandingkan rasio ON/OFF dan *insertion loss* modulator pada kondisi dengan panjang *cavity* yang sama tetapi modulator yang satu ditumbuhkan *grating* sedangkan yang lain tidak. Kondisi kedua adalah untuk mencapai suatu nilai rasio ON/OFF tertentu, berapa panjang *cavity* yang diperlukan untuk suatu modulator dengan *grating* dan modulator tanpa *grating*.

Panjang *cavity* sendiri sangat menentukan volume dari modulator dikarenakan untuk tinggi dan lebar modulator bernilai konstan.

4.7.1 Kondisi 1

Tabel-4.1. Perbandingan antara modulator dengan *grating* dan tanpa *grating* pada ukuran yang sama

	Dengan <i>Grating</i>	Tanpa <i>Grating</i>
Panjang <i>cavity</i> (μm)	16.32	48
Daya didalam <i>cavity</i> pada kondisi ON	3.4398	0.9976
Daya diluar <i>cavity</i> pada kondisi ON	1.7199	0.9976
Daya didalam <i>cavity</i> pada kondisi OFF	1.03619	0.9045
Daya diluar <i>cavity</i> pada kondisi OFF	0.518097	0.9045
Rasio <i>ON/OFF</i> (dB)	19.3863	0.4254
<i>Insertion Loss</i> (dB)	-0.65527	-0.01043

Pada tabel-4.1, perhitungan intensitas kondisi ON maupun kondisi OFF pada modulator tanpa *grating* dilakukan dengan menggunakan persamaan

$$I = I_o \times e^{-\alpha L} \quad (4.1)$$

Sedangkan untuk rasio *ON/OFF* (dB) digunakan persamaan(3.67) dan *Insertion Loss* digunakan perbandingan intensitas antara input dengan output

$$IIL(dB) = 10 \times \log \left(\frac{I_o}{I_o \times e^{-\alpha_{ON} L}} \right) \quad (4.2)$$

Hasil pada tabel-4.1 menunjukkan bahwa daya didalam dan diluar *cavity* pada kondisi yang sama (ON atau OFF) tidak mengalami perubahan. Peningkatan nilai rasio *ON/OFF* maupun *Insertion loss* secara drastis terjadi pada struktur modulator dengan *grating*.

Kondisi 1 ini menunjukkan bahwa dengan ditambahkan struktur *grating*, maka kinerja dari modulator akan meningkat secara drastis walaupun mempunyai dimensi yang sama yaitu panjang keseluruhannya $48\mu\text{m}$.

4.7.2 Kondisi 2

Tabel-4.2. Perbandingan ukuran modulator yang memiliki rasio *ON/OFF* yang sama.

	Dengan <i>Grating</i>	Tanpa <i>Grating</i>
Rasio <i>ON/OFF</i> (dB)	19.3863	19.3863
Daya didalam <i>cavity</i> pada kondisi ON	3.4398	0.8944
Daya diluar <i>cavity</i> pada kondisi ON	1.7199	0.8944
Daya didalam <i>cavity</i> pada kondisi OFF	1.03619	0.0103
Daya diluar <i>cavity</i> pada kondisi OFF	0.518097	0.0103
Panjang <i>cavity</i> (μm)	16.32	2231.926

Rasio *ON/OFF* (dB) yang ingin dicapai pada kondisi 2 ini adalah 19.3863dB. Pada modulator dengan struktur *grating* hanya diperlukan panjang *cavity* sebesar 16.32 μm sedangkan jika tanpa *grating* dapat menjadi sangat besar sekali, 2231.926 μm .

Dari kondisi ini dapat dibuktikan bahwa dengan ditambahkan *grating* maka untuk kinerja yang sama, ukuran modulator dapat sangat diperkecil.

4.8 KECEPATAN MODULATOR

Berdasarkan desain modulator yang sebelumnya, nilai $\varepsilon_r \approx n^2 \approx 3.826203^2$. Untuk rancangan modulator dengan *grating* pada kondisi 1, kecepatan modulator dapat mencapai 22.17 GHz sedangkan untuk modulator tanpa *grating* kecepatannya turun menjadi 7.4 GHz. Hal ini dapat terjadi dikarenakan walaupun 2 jenis modulator tersebut memiliki ukuran fisik yang sama tetapi pada modulator dengan *grating* mempunyai daerah kapasitansi yang lebih kecil, dalam hal ini sepertiga lebih kecil.

Pada kondisi 2, kecepatan modulator dengan *grating* tetap sama seperti sebelumnya, tetapi untuk modulator tanpa *grating* kecepatannya menjadi lambat sekali yaitu 158.95 MHz. Hal ini disebabkan secara langsung karena ukuran modulator yang menjadi sangat besar. Untuk semua perhitungan kecepatan modulator mempunyai 3-dB *bandwidth*.



BAB V

KESIMPULAN

1. Telah berhasil dikembangkan perangkat lunak berbasis MATLAB yang berfungsi terbatas untuk merancang modulator optik berbasis elektroabsorpsi dengan struktur *waveguide* yang menggunakan struktur *cavity Fabry-Perrot* dengan cermin *grating*.
2. Perangkat lunak ini dikembangkan berdasarkan *analysis solution* dan bukan berdasarkan *rigorous solution*.
3. Software 'Mode In Electroabsorption Modulator' hanya dapat digunakan untuk merancang *waveguide* dengan struktur tertentu dengan MQW dibagian tengahnya. Jumlah mode yang diperoleh menunjukkan mode yang bergerak disepanjang *waveguide* dan MQW.
4. Untuk mendapatkan gambar mode yang bergerak pada *waveguide* dapat digunakan program untuk menggambar mode. Mode yang dapat digambarkan pada program ini hanya *fundamental mode*.
5. Spesifikasi *grating* sebagai cermin dapat ditentukan dengan menggunakan program 'coupled-mode solution' [19]. Pada program ini, gambar *perturbation area* dapat diperlihatkan untuk menggambarkan intensitas yang ditransmisikan dan dipantulkan.
6. Pada program 'Intensity inside and outside cavity' dapat diperlihatkan intensitas energi di bagian luar dan dalam *cavity* pada kondisi ON maupun OFF. Program ini juga dapat digunakan untuk menghitung rasio ON/OFF dan insertion loss untuk disain struktur modulator yang sesuai dengan skripsi ini.
7. Dengan perangkat lunak tersebut telah dirancang suatu modulator optik elektroabsorpsi dengan struktur *waveguide* yang menggunakan struktur *cavity Fabry-Perrot* dengan cermin *grating*. Modulator tersebut dirancang sedemikian rupa sehingga bekerja secara optimum di panjang gelombang 1550nm. Untuk mendapatkan panjang gelombang efektif 1550nm tersebut digunakan MQW AlGaSb/GaSb [18].
8. Dari proses perancangan, didapatkan fakta bahwa disamping *fundamental mode* dari modulator, juga muncul beberapa *fundamental mode* liar yang eksis

dalam struktur simetri MQW. *Mode-mode* liar tersebut dapat mendegradasi kecepatan modulator. Dengan adanya cermin *grating*, *mode-mode* liar tersebut dapat didifraksi keluar [18].

9. Dengan menggunakan struktur *cavity Fabry-Perrot*, kinerja dari *moderator* dapat ditingkatkan secara signifikan. *Grating* berfungsi sebagai cermin yang dirancang mempunyai *reflectance* 50% yang berguna untuk meningkatkan kinerja *modulator*.
10. Penambahan struktur *cavity Fabry-Perrot* dapat meningkatkan rasio *ON/OFF* sampai 45 kali untuk dimensi *modulator* yang sama, sedangkan untuk mendapatkan rasio *ON/OFF* yang sama, hanya diperlukan panjang 1/46 kali lebih kecil pada *modulator* yang ditumbuhkan menggunakan struktur *cavity Fabry-Perrot*.
11. Semakin kecil luas daerah kapasitansinya, maka nilai kapasitansinya akan semakin mengecil. Hal ini menyebabkan peningkatan kecepatan *modulator*. Pada rancang bangun *modulator* dengan ukuran fisik yang sama, kecepatan dengan *cavity FP* mencapai 22.17 GHz dan tanpa *cavity FP* hanya 7.4 GHz. Sedangkan untuk mendapatkan rasio *ON/OFF* yang sama, kecepatan dengan *cavityFP* dapat mencapai 2.17 GHz dan tanpa *cavity FP* hanya 158.95 MHz.

DAFTAR ACUAN

- [1] H. I. Ralph, "On the theory of the Franz-Keldysh effect", *J. Phys. C (Proc. Phys. Soc)*, Ser. 2, Vol.1, 1986, pp.378-386.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator, 15 November2007, 14.53 WIB.
- [3] Saleh, Bahaa E. A. and Teich, Malvin Carl."Fundamentals of Fotonics". John Wiley & sons, inc.1991.
- [4] http://www.rp-photonics.com/pockels_cells, 18 November2007, 11.34 WIB.
- [5] <http://www.rp-photonics.com/interferometers>, 18 November2007, 11.35 WIB.
- [6] D.A. B. Miller, D. S. Chemla, and S. Schmitt-Rink. "Relation between electroabsorption in bulk semiconductors and in quantum wells: The quantum-confined Franz-Keldysh effect", *Phys. Rev. B*, vol33, p.6976, 1986.
- [7] <http://www.rp-photonics.com/waveguide>, 15 November2007, 15.21 WIB.
- [8] T. H. Wood, "Multiple quantum well (MQW) waveguide modulators", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 6, June 1988, pp. 743-757.
- [9] [http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/SiO₂](http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/SiO2), 20 February 2008, 10.33WIB.
- [10] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/Figs/441.gif>
- [11] http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/Figs/b14_01.gif
- [12] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/InP>
- [13] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/InP/Figs/841.gif>
- [14] S. M. Rytov, "Electromagnetic properties of a finely stratified medium", *Soviet Physics JEPT*, vol.2, pp.466-475, 1956.
- [15] E. N. Glytsis, T. K. Gaylord, and D. L. Brundrett, "Rigorous coupled-wave analysis and application of grating diffraction", in *Diffraction and Miniaturized Optics*, vol. DR49, S. H. Lee, Ed.:SPIE, pp. 3-31, 1994.
- [16] 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.

- [17] <http://www.rp-photonics.com/> 28 maret 2008, 09.51PM WIB.
- [18] P.S. Priambodo, H. Kartaatmadja, H. Sudibyو dan D. Hartanto, "Design of Electro-Absorption Optical Modulator Incorporated with Waveguide MQW AlGaSb/GaSb and Fabry-Perro Grating Cavity Structure for Fiber-Optics", IEEE journal 978-1-4244-1980-7/08 IEEE., 6-7 May 2008, Surabaya Indonesia.
- [19] A. Yariv, "Optical Communications", Oxford, 1991
- [20] 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 Photonocs Technology Letters, Vol. 3, No.8, August 1991, pp. 733-735.
- [21] 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.
- [22] R. H. Yan, R. J. Simes and L. A. Coldren, "Electroabsorptive Fabry-Perot reflection modulators with asymmetric mirror," IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 1, No.9, September 1989, pp. 273-275.
- [23] M. Whitehead, A. Rivers and G. Parry, "Low-Voltage multiple quantum well modulator with on:off ratio>100:1," Electronics Letters, Vol. 25, No. 25, 20th July 1989, pp. 984-985.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Yariv, "Optical Communications", Oxford, 1991
- D.A. B. Miller, D. S. Chemla, and S. Schmitt-Rink. "Relation between electroabsorption in bulk semiconductors and in quantum wells: The quantum-confined Franz-Keldysh effect," *Phys. Rev. B*, vol33, p.6976, 1986
- 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
- E. N. Glytsis, T. K. Gaylord, and D. L. Brundrett. "Rigorous coupled-wave analysis and application of grating diffraction", in *Diffraction and Miniaturized Optics*, vol. DR49, S. H. Lee, Ed.:SPIE, pp. 3-31, 1994
- H. I. Ralph, "On the theory of the Franz-Keldysh effect", *J. Phys. C (Proc. Phys. Soc)*, Ser. 2, Vol.1, 1986, pp.378-386
- 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
- M. Whitehead, A. Rivers and G. Parry, "Low-Voltage multiple quantum well modulator with on:off ratio > 100:1," *Electronics Letters*, Vol. 25, No. 25, 20th July 1989, pp. 984-985
- P.S. Priambodo, H. Kartaatmadja, H. Sudibyo dan D. Hartando, "Design of Electro-Absorption Optical Modulator Incorporated with Waveguide MQW AlGaSb/GaSb and Fabry-Perro Grating Cavity Structure for Fiber-Optics", to be published in the proceeding of WOCN 2008 IEEE International conference, 6-7 May 2008, Surabaya Indonesia
- 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
- R. H. Yan, R. J. Simes and L. A. Coldren, "Electroabsorptive Fabry-Perot reflection modulators with asymmetric mirror," *IEEE Photonic Technology Letters*, Vol. 1, No.9, September 1989, pp. 273-275
- Saleh, Bahaa E. A. and Teich, Malvin Carl. "Fundamentals of Photonics". John Wiley & sons, inc.1991

T. H. Wood, "Multiple quantum well (MQW) waveguide modulators," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, No. 6, June 1988, pp. 743-757

http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator, 15 November2007, 14.53 WIB

http://www.rp-photonics.com/pockels_cells, 18 November2007, 11.34 WIB

<http://www.rp-photonics.com/interferometers>, 18 November2007, 11.35 WIB

<http://www.rp-photonics.com/waveguide>, 15 November2007, 15.21 WIB



LAMPIRAN

Data input pada 'Tugas3_rev3 (substrate added)' MATLAB:

%Jumlah Quantum Well:

5.000000

%Tebal Well(nm):

10.000000

%Index Bias Well:

3.750000

%%Tebal Barrier(nm):

7.000000

%Index Bias Barrier(nm):

3.800000

%Jumlah Intrinsic Super Lattice:

350.000000

%Tebal Intrinsic Super Lattice(nm):

1.000000

%Index Bias Intrinsic AlGaSb:

3.800000

%Index Bias Intrinsic GaSb:

3.750000

%Jumlah Super Lattice tipe p/n (nm):

150.000000

%Tebal Super Lattice tipe p/n(nm):

1.000000

%Index Bias AlGaSb tipe p:

3.800000

%Index Bias GaSb tipe p:

3.750000

%Index Bias AlGaSb tipe n:

3.800000

%Index Bias GaSb tipe n:

3.750000

%Panjang gelombang input:

1550.000000

%Index Bias substrate:

3.750000

