

Research Article

Perancangan Modulator Elektro-Optik Transversal Pockels

Rg Setiawan S¹, Darjat², Budi Setiyono²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang
2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

Perkembangan teknologi telekomunikasi mengakibatkan kebutuhan akan sistem telekomunikasi yang berkapasitas besar dan berkecepatan tinggi semakin meningkat. Peningkatan permintaan sarana telekomunikasi yang berkapasitas besar dan berkecepatan tinggi ini menempatkan sistem komunikasi serat optik sebagai infrastruktur utama yang mampu meningkatkan sistem konvensional yang selama ini dipakai. Penggunaan sistem komunikasi serat optik telah berkembang ke arah alat yang dapat memodulasi amplitudo, fasa, frekuensi atau intensitas cahaya dengan kecepatan tinggi yaitu modulator optik.

Pada modulator elektro-optik ini hal utama yang menjadi pertimbangan dalam perancangan adalah kinerja dari sistem. Kinerja modulator elektro-optik dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, misalnya bahan media interaksi, dimensi media interaksi serta faktor-faktor lain di luar itu seperti karakteristik cahaya masukan dan tegangan kerja yang digunakan.

Dari hasil perhitungan, dapat ditentukan bahan-bahan yang paling cocok untuk merancang sel modulator yaitu kristal KD*P untuk sumber cahaya laser He-Ne, serta dapat ditentukan dimensi dari modulator yang berbentuk balok dengan panjang 57,043 mm, berpenampang bujur sangkar dengan panjang sisi 0,75 mm

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan jaringan telekomunikasi sudah semakin kompleks dan terintegrasi yang mengarah kepada sistem komunikasi berkapasitas besar dengan menggunakan lebar pita (*bandwidth*) yang besar. Salah satu contoh sistem komunikasi yang berkapasitas besar dan terintegrasi yaitu Jaringan digital Pelayanan Terpadu (*ISDN*). Sistem ini sangat handal diterapkan pada jaringan telekomunikasi. Untuk dapat menjawab tantangan tersebut diperlukan sarana telekomunikasi yang berkapasitas besar dan berkecepatan tinggi. Penggunaan sistem komunikasi serat optik sangat tepat untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Jaringan komunikasi yang menggunakan sistem komunikasi serat optik memiliki keuntungan-keuntungan antara lain :

- Kapasitas yang jauh lebih besar dibanding sistem konvensional.
- Redaman dan tingkat derau yang sangat rendah
- Mampu memproses sinyal dengan kecepatan tinggi
- Lebar pita yang besar
- Kepekaan terhadap variasi suhu sangat rendah

1.2 Tujuan

Tujuan penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui prinsip interaksi elektro-optik.
2. Menentukan komponen-komponen modulator elektro-optik yang tepat dalam merancang suatu modulator elektro-optik yang baik pada sistem komunikasi serat optik.
3. Mengetahui prinsip kerja modulator elektro-optik.

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini, pembahasan dibatasi pada :

1. Gejala-gejala yang terjadi pada interaksi elektro-optik.

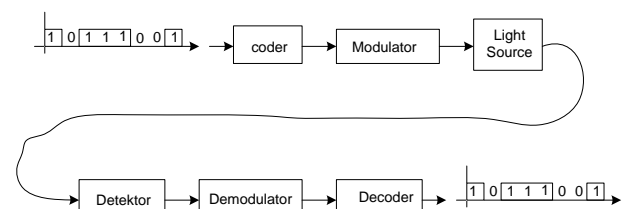
2. Perancangan modulator elektro-optik.
3. Analisis kinerja dari modulator elektro-optik hasil perancangan tersebut.
4. Perancangan modulator menggunakan mode transversal Sel Pockel.
5. Semua komponen dalam perancangan ini dianggap dalam kondisi ideal.
6. Digunakan Visual Basic 6.0 sebagai program bantu perancangan.

II. DASAR – DASAR INTERAKSI ELEKTRO OPTIK

2.1 Komunikasi Serat Optik

Modulasi dalam serat optik adalah suatu proses yang mana informasi dimuatkan pada sinyal optik untuk ditransmisikan oleh kabel serat optik. Sedangkan demodulasi adalah proses yang mana informasi diambil kembali dari pembawa pada penerima akhir dari fiber.

Sebagian besar sistem komunikasi serat optik menggunakan modulasi digital, seperti ditunjukkan pada gambar 1. Informasi yang ditransmisikan berupa runtun pulsa 1 dan 0.

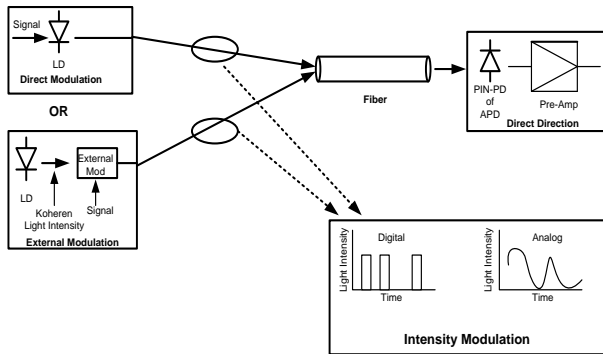


Gambar 1 Sistem komunikasi digital serat optik^[1]

2.2 Modulator Optik

Untuk modulasi intensitas cahaya pada jarak jauh, diperlukan sumber cahaya koheren yang berintensitas besar. Sumber cahaya laser memiliki karakteristik yang mampu

menghasilkan modulasi intensitas. Berdasarkan tempat terjadinya modulasi cahaya, ada dua macam modulator optik yaitu modulator dalam (*internal modulator*) atau modulator langsung (*direct modulator*) dan modulator luar (*external modulator*). Modulator dalam modulasi cahaya di dalam perangkat sumber cahayanya sedangkan modulator luar memodulasi cahaya di luar perangkat sumber cahaya. Bagan kedua jenis modulator tersebut dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 Bagan modulator optik dengan modulasi intensitas cahaya

2.3 Interaksi Elektro-Optik

Interaksi elektro-optik merupakan perubahan indeks bias media interaksi optik akibat pengaruh medan elektrik yang diberikan kepada media tersebut.

2.3.1 Media Interaksi Elektro-Optik

Media interaksi elektro-optik disebut sel modulator. Sel modulator merupakan media yang menghasilkan interaksi elektro-optik karena pengaruh medan elektrik yang diberikan. Media interaksi elektro-optik ini dibuat dari bahan optik yang berupa kristal.

2.3.2 Birefringence

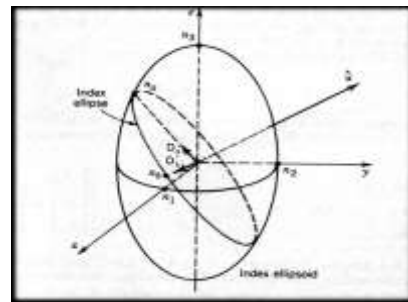
Umumnya sumbu utama pada kristal memiliki indeks bias yang sama. tetapi ada beberapa kristal yang memiliki dua indeks bias yang berbeda, yang disebut indeks bias biasa (*ordinary indices of refraction*) dan indeks bias istimewa (*extraordinary indices of refraction*). Indeks bias ganda suatu kristal inilah yang disebut dengan *birefringence*. Pengaruh *birefringence* dapat dilihat pada gambar 3 berikut :



Gambar 3 Indeks bias ganda pada kristal Calcite

2.3.3 Perambatan Cahaya pada Media Interaksi

Media interaksi elektro-optik pada umumnya menggunakan kristal anisotropik. Pada kristal anisotropik terjadi gejala elipsoida indeks bias (*index ellipsoid*) atau indikatrik (*indicatrix*) jika berkas cahaya jatuh pada kristal. Seperti ditunjukkan pada gambar 4 berikut :



Gambar 4 Mode normal indeks ellipsoid

Hal ini menyebabkan cahaya terpolarisasi elips. Secara umum indikatrik ini dinyatakan dengan :

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \tag{1}$$

dengan: n_i = indeks bias untuk arah rambatan cahaya pada sumbu i .

Perubahan indeks bias yang dihasilkan oleh perubahan pada koefisien indikatrik diperoleh dengan :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = rE + pE^2 \tag{2}$$

dengan:

r adalah koefisien dari efek linier elektro-optik (Pockels)
 p adalah koefisien efek kuadrat elektro-optik (Kerr)

Pengaruh medan elektrik pada perubahan indeks bias kristal menghasilkan dua macam interaksi elektro-optik yaitu:

- Efek elektro-optik Kerr
- Efek elektro-optik Pockels

2.4 Efek Elektro-Optik Kerr

Efek elektro-optik Kerr merupakan efek kuadrat pada media interaksi yang umumnya berupa zat cair seperti pada Karbon Disulphida. Perubahan indeks bias media interaksi pada persamaan 2 akan dipengaruhi oleh koefisien elektro-optik kuadrat saja sehingga menjadi :

$$\Delta n = p\lambda_0 E^2 \tag{3}$$

p adalah konstanta Kerr untuk beberapa media yang umumnya berupa zat cair dan λ_0 merupakan panjang gelombang cahaya laser pada ruang hampa.

2.5 Efek Elektro-Optik Pockels

Efek elektro-optik Pockels merupakan efek elektro-optik linier yang tergantung kepada struktur kristal dan simetris bahan kristal tersebut

Pada efek elektro-optik Pockels, persamaan (2) hanya dipengaruhi oleh koefisien elektro-optik Pockels sehingga menjadi sebagai berikut :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = \sum_k r_{ijk} E_k \tag{4}$$

dengan E_k adalah medan yang diberikan, r_{ijk} merupakan komponen tensor atau koefisien elektro-optik linier, variabel i, j berharga dari 1 hingga 3. Tensor merupakan notasi matrik singkat yang diperoleh tergantung pada kelas-kelas kristal.

Dengan persamaan 4 dapat diperoleh interaksi elektro-optik akibat pengaruh indikatrik kristal. Misalkan pada KDP (sistem tetragonal, simetri 42 m pada suhu ruang) memiliki dua koefisien yang tidak dapat diabaikan yaitu r_{41} dan r_{63} . Saat medan elektrik E_3 diberikan sepanjang sumbu z maka indikatrik kristal diperoleh :

$$\frac{x^2 + y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2r_{63}E_3xy = 1 \quad (5)$$

Dengan memutar koordinat sebesar 45° terhadap sumbu z, persamaan 5 menjadi :

$$\frac{x'^2}{(n_o + \Delta n)^2} + \frac{y'^2}{(n_o - \Delta n)^2} + \frac{z'^2}{n_e^2} = 1 \quad (6)$$

dan dari persamaan 6 di atas akan diperoleh perubahan indeks bias kristal pada efek elektro-optik Pockels sebagai berikut :

$$\Delta n = \frac{n_o^3}{2} r_{63} E_3 \quad (7)$$

dengan x' dan y' merupakan sumbu koordinat baru indikatrik dan menggunakan pendekatan $n_o \gg \Delta n$

2.5.1 Mode Longitudinal Sel Pockels

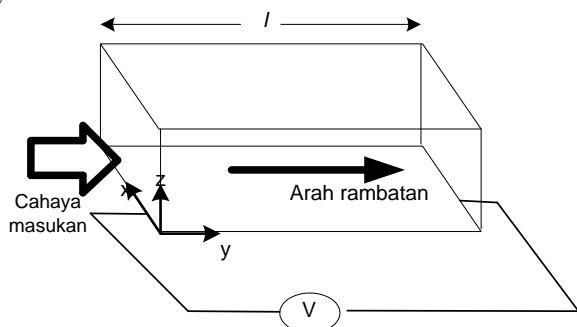
Efek elektro-optik Pockels memiliki dua mode sel modulator berdasarkan arah medan elektrik yang diberikan terhadap rambatan cahaya masukan. Pada mode longitudinal ini medan elektrik diberikan searah dengan arah rambatan cahaya.

Perubahan fasa cahaya dinyatakan dengan :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_e - n_o) l = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n l \quad (8)$$

dengan l merupakan jarak antara kedua elektroda yang merupakan panjang dari sel modulator longitudinal Pockels.

Perubahan fasa cahaya di atas dihasilkan oleh mode longitudinal sel Pockels.



Gambar 5 Modulator elektro-optik mode longitudinal dengan medan elektrik sejajar terhadap arah rambat cahaya

2.5.2 Mode Transversal Sel Pockels

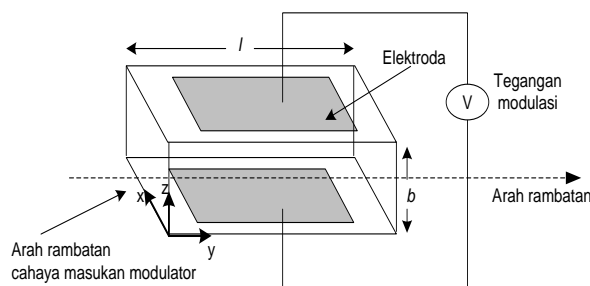
Mode transversal adalah pemberian medan elektrik dengan arah tegak lurus terhadap arah rambatan cahaya, dengan memasang elektroda pada sisi tegak lurus dengan arah rambatan cahaya seperti gambar 2.8, maka medan elektroda tidak mengakibatkan interferensi terhadap cahaya dan perubahan fasa cahaya tergantung pada dimensi kristal. pengaruh dimensi kristal disebabkan medan yang diberikan oleh tegangan $V=E_3b$, maka beda fasanya adalah sebagai berikut :

$$\Phi = \frac{\pi}{\lambda} r_{63} n_o^3 \frac{Vl}{b} \quad (9)$$

dengan l adalah panjang kristal, b adalah tebal kristal pada arah aliran medan elektrik dengan tegangan V dan n_o adalah indeks bias utama kristal.

Tegangan setengah gelombang yang diperoleh dari persamaan 10 adalah :

$$V_x = \frac{\lambda}{n_o^3 r_{63}} \frac{b}{l} \quad (10)$$



Gambar 6 Modulator elektro-optik mode transversal dengan medan elektrik tegak lurus terhadap arah rambat cahaya

2.6 Modulasi Intensitas Cahaya

Perubahan fasa berkas cahaya yang melewati media interaksi kristal akan menyebabkan perubahan intensitas cahaya. Perubahan intensitas cahaya dari intensitas awalnya akibat pengaruh beda fasa cahaya dapat diperoleh :

$$I = I_o \text{Sin}^2 \frac{\Phi}{2} \quad (11)$$

I_o adalah intensitas awal cahaya yang memasuki kristal, sehingga perbandingan intensitas cahaya hasil modulasi terhadap intensitas awal dapat diperoleh fungsi sebagai berikut :

$$\frac{I}{I_o} = \frac{1}{2} (1 - \text{Cos}\Phi) \quad (12)$$

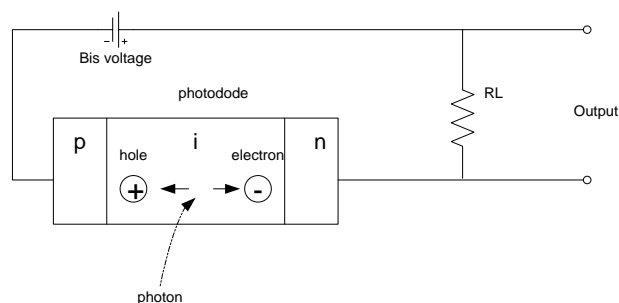
2.7 Photodetector^[1]

Pada keluaran akhir dari sebuah transmisi optik harus ada sebuah perangkat penerima yang dapat menerjemahkan informasi yang terkandung dalam sinyal optik. Elemen pertama dari penerima ini adalah photodetector.

Dari semua jenis photodetector, photodiode adalah jenis yang digunakan secara khusus untuk system komunikasi serat optik karena ukurannya yang kecil, sensitivitas tinggi dan respon waktu yang cepat. Dua tipe photodiode yang digunakan adalah pin photodiode dan avalanche photodiode (APD).

2.7.1 Pin Photodiode^[1]

Semikonduktor pendeteksi cahaya yang paling umum digunakan adalah pin photodiode yang secara skematik ditunjukkan pada gambar 7 berikut.

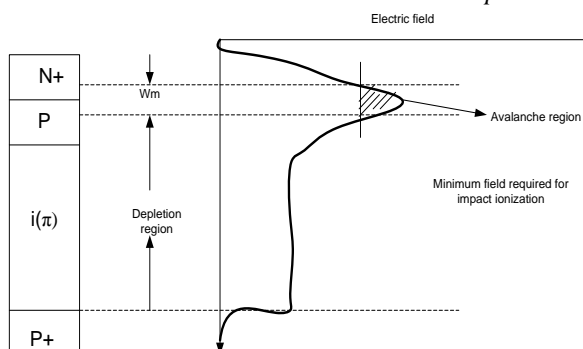


Gambar 7 skema pin photodiode dengan bias mundur^[1]

2.7.2 Avalanche Photodiode [1]

Avalanche photodiode (APD) melipatgandakan sinyal utama arus cahaya sebelum memasuki amplifier. Ini meningkatkan sensitivitas penerima, karena arus cahaya dilipatgandakan sebelum bertemu dengan noise thermal yang menjadi satu dengan rangkaian penerima.

Berikut adalah struktur dari avalanche photodiode



Gambar 8 Struktur avalanche photodiode dan medan listrik pada wilayah pengosongan dan wilayah pelipatgandaan [1]

III. PERANCANGAN MODULATOR ELEKTRO-OPTIK

3.1 Pemilihan Sumber Cahaya

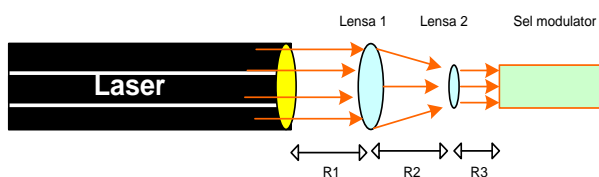
Sumber cahaya yang umum digunakan dalam sistem komunikasi serat optik untuk menghasilkan lebar pita (*bandwidth*) yang besar pada modulasi intensitas adalah Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Ada beberapa jenis Laser yang digunakan dalam komunikasi serat optik, tetapi yang paling banyak digunakan adalah Laser He-Ne dan dioda Laser DH InGaAsP/InP. Karakteristik kedua Laser ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik Laser He-Ne dan dioda Laser DH InGaAsP/InP

Jenis	Panjang Gelombang (nm)	Sudut Divergensi (mrad)	Daya Keluaran (mW)	Ukura n (mm)
Laser He-Ne	632,8	0,24	0,5-5	±37
Laser InGa-AsP/InP	1300	1,12	0,5-7	±33

3.2 Kondensor Berkas Cahaya (*Beam Condenser*)

Kondensor cahaya berfungsi untuk memotong berkas cahaya laser agar dapat melewati modulator elektro-optik yang menggunakan sel modulator kristal berukuran kecil. Kondensor cahaya merupakan dua buah lensa dengan perbandingan panjang fokus masukan dan keluaran lensa (f_1/f_2). Adapun susunannya adalah sebagai berikut :



Gambar 9 Teknik penyambungan Laser ke fiber optic dengan system lensa confocal [1]

Untuk mengetahui jarak masing-masing komponen pada kondensor berkas cahaya digunakan rumus-rumus sebagai berikut :

Jarak Laser terhadap lensa 1 ($R1$) = $f1$

Jarak lensa 1 terhadap lensa 2 ($R2$) = $f1 + f2$

Jarak lensa 2 terhadap sel modulator ($R3$) = $f2$

Dimana : f_1 = fokus lensa 1
 f_2 = fokus lensa 2

3.3 Sel Modulator

Parameter penting dalam perancangan modulator elektro-optik adalah sel modulator elektro-optik yang berupa kristal. Tabel 2 di bawah memberikan karakteristik kristal yang biasa digunakan sebagai sel elektro-optik Pockels.

Tabel 2 Karakteristik Bahan sel elektro-optik Pockels pada $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$

Material	Koefisien elektro-optik r	n_o	n_e	ϵ_r	V_π	U_π
KD ₂ PO ₄	26,4	1,51	1,47	50	7,5	3,0
LiTaO ₃	30,3	2,17	2,18	43	2,8	3,7
CdTe	6,8	2,6		7,3	44	
GaAs	1,6	3,6		11,5	91	
KH ₂ PO ₄	10,6	1,51	1,47	42	8,1	4,1

3.3.1 Dimensi Sel Modulator Elektro-Optik

Sel modulator Pockels berupa kristal balok berpenampang bujur sangkar dengan sisi b dan panjang l . Tebal dan panjang sel modulator mempengaruhi tegangan pengatur, daya pengatur dan lebar pita modulator.

a. Tebal Sel Modulator

Tebal sel modulator ditentukan oleh diameter minimum berkas cahaya laser $2w_o$, yang dapat diperoleh pada persamaan 13 di bawah ini :

$$b = S \cdot 2\sqrt{2} \cdot w_o \tag{13}$$

dengan S merupakan faktor toleransi bahan kristal ($S \geq 1$) agar cahaya dapat melewati sel kristal.

b. Panjang Sel Modulator

Cahaya laser yang merambat pada sel modulator dipengaruhi oleh indeks bias bahan. Cahaya laser yang merambat pada sel modulator sepanjang l dengan indeks bias n dan diameter minimum $2w_o$, yang diperoleh dari persamaan 14 dibawah ini :

$$w_o^2 = \frac{\lambda \cdot l}{2\pi n} \tag{14}$$

dari persamaan 14 di atas dapat diperoleh panjang sel modulator dengan persamaan 15 dibawah ini :

$$l = \frac{2\pi n w_o^2}{\lambda} \tag{15}$$

3.3.2 Pelat Setengah Gelombang

Pelat setengah gelombang disisipkan diantara dua buah kristal berukuran sama namun dengan sumbu dengan sumbu kristal yang berlawanan arah sebagai sel modulator. Tabel 3 berikut memberikan karakteristik bahan yang digunakan untuk pelat setengah gelombang.

Tabel 3 Karakteristik bahan pelat polarisasi

Material	n_o	n_e
Quartz (SiO ₂)	1,5442	1,5533
Calcite (CaCO ₃)	1,6557	1,4852
MgF ₂	1,3836	1,3957

Tebal pelat setengah gelombang ini dapat diperoleh dengan persamaan 16 di bawah ini :

$$d_{1/2} = \frac{\lambda / 2}{|n_o - n_e|} \quad (16)$$

3.3.3 Elektroda Sel Modulator

Tabel 4 di bawah ini memberikan karakteristik beberapa bahan elektroda.

Tabel 4 Karakteristik elektroda sel elektro-optik

Bahan	V (10 ⁵ cm/det)	Z (10 ⁶ g/det.cm ²)	Redaman (dB/μm@1 GHz)
Epoxy	2,6	0,286	Sangat besar
In	2,25	1,64	8
Au	3,24	6,25	0,02
Al	6,42	1,73	0,02
Ag	5,65	3,80	0,02
Cu	5,01	4,06	0,025

Elektroda yang digunakan merupakan lempeng tipis dengan panjang l (sama dengan panjang sel modulator) dan lebar yang diperoleh dari persamaan berikut :

$$m = \frac{Kb}{K_e} \quad (17)$$

dengan K adalah konstanta dielektrik relatif kristal dan K_e adalah akar perbandingan kecepatan udara dengan kecepatan fasa modulasi di dalam kristal.

3.4 Pelat Seperempat Gelombang

Penambahan pelat seperempat gelombang ini seperti halnya pelat setengah gelombang terbuat dari bahan pada table 3.3 di atas berdimensi bujur sangkar dengan panjang sisi b dan tebal pelat diperoleh dari persamaan 3.9 di bawah ini :

$$d_{1/4} = \frac{\lambda / 4}{n_o - n_e} \quad (18)$$

3.5 Pelat Polarisasi (Analyzer)

Pelat polarisasi atau analiser yang diberikan kepada modulator elektro-optik berfungsi untuk mengubah dari berkas cahaya keluaran modulasi intensitas yang terpolarisasi ellipsis di dalam kristal menjadi berkas cahaya keluaran modulasi intensitas yang terpolarisasi linier.

3.6 Pengaturan Tegangan Kerja

Perbedaan fasa cahaya untuk modulator elektro-optik transversal Pockels diperoleh pada persamaan 19 di bawah ini

$$\Phi = \frac{\pi n^3 r l V}{\lambda b} \quad (19)$$

dengan :

Φ = beda fasa dalam radian

n = indeks bias kristal

r = koefisien elektro-optik dalam m/V

λ = panjang gelombang udara dalam meter

l = panjang sel modulator

V = tegangan yang diberikan terhadap sel modulator

b = tebal kristal

Perbedaan fasa yang terjadi pada komponen x dan y cahaya menyebabkan perubahan polarisasi linier cahaya masukan menjadi polarisasi ellipsis cahaya keluaran kristal . Tegangan dari puncak ke puncak yang diberikan terhadap modulator intensitas ditentukan dengan beda fasa $\Phi = \pi$, maka diperoleh persamaan 20 di bawah ini :

$$V_\pi = \left[\frac{\lambda}{n^3 r} \right] \frac{1}{l/b} \quad (20)$$

Pada persamaan 20 di atas, nilai dalam tanda kurung disebut tegangan beda fasa setengah gelombang dan l/b merupakan perbandingan panjang dan tebal sel. Tegangan kerja modulator dalam harga rmsnya diperoleh dengan persamaan 21 di bawah ini :

$$V = \frac{V_\pi}{2\sqrt{2}} = M \frac{b}{l} \quad (21)$$

dengan V adalah tegangan rms dan M adalah harga rms dari tegangan beda fasa setengah gelombang.

3.7 Perancangan demodulator

3.7.1 Photodetector

Ada beberapa jenis *photodetector* yang digunakan dalam komunikasi serat optik, tetapi yang paling sering digunakan adalah *pin photodiode* dan *avalanche photodiode* (APD). Adapun bahan atau material yang biasa untuk membuat *photodiode* serta karakteristiknya dapat di lihat pada tabel 5 berikut :

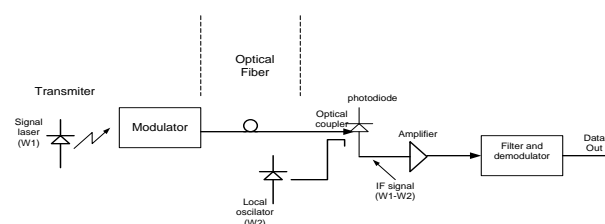
Tabel 5 Karakteristik bahan-bahan photodiode

Bahan Photodiode	Effisiensi quantum η (%)	Panjang Gelombang λ (nm)
Silicon (Si)	90	900
Germanium (Ge)	50	1300
Indium Gallium Arsenide (InGaAs)	60	1300

3.7.2 Local Oscillator

Dalam proses demodulasi optik, sinyal yang diterima oleh *photodetector* sangat lemah untuk itu diperlukan sebuah osilator lokal yang dapat menghasilkan gelombang yang cukup besar. Kemudian kedua sinyal itu dicampur dan diubah oleh photodetector menjadi sinyal-sinyal listrik yang identik dengan informasi atau data yang dikirimkan dari modulator.

Adapun proses pendeteksian itu dapat dilihat pada gambar 3.2 sebagai berikut :

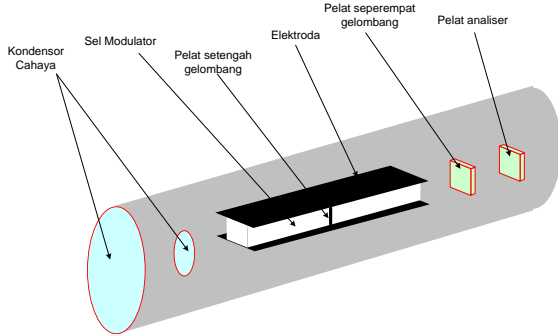


Gambar 3.2 Konsep fundamental dari sistem gelombang cahaya coheren

IV. ANALISIS KINERJA MODULATOR ELEKTRO OPTIK

4.1 Dimensi Modulator

Rancangan akhir modulator elektro-optik transversal dengan menggunakan sel modulator Pockels yang terbuat dari bahan KD*P dengan elektroda aluminium diperlihatkan pada gambar 10 berikut.



Gambar 10 Rancangan modulator elektro-optik transversal Pockels

Dengan menggunakan program Bantu didapatkan :

Tabel 6 Dimensi sel modulator elektro-optik transversal Pockels berbagai bahan dengan sumber cahaya Laser He-Ne

Bahan	Panjang sel <i>l</i> (mm)	Tebal sel <i>b</i> (mm)	Lebar elektroda <i>m</i> (mm)	Diameter cahaya masukan <i>D</i> (mm)
KD*P	57,043	0,750	2,514	4,418
KDP	57,043	0,820	1,153	4,837
LiTaO ₃	82,165	1,169	8,765	6,894
LiNbO ₃	86,509	2,023	3,089	2,016
GaAs	135,997	0,907	2,656	5,246

Tabel 7 Dimensi sel modulator elektro-optik transversal Pockels berbagai bahan dengan sumber cahaya Laser DH InGaAsP/InP

Bahan	Panjang sel <i>l</i> (mm)	Tebal sel <i>b</i> (mm)	Lebar elektroda <i>m</i> (mm)	Diameter cahaya masukan <i>D</i> (mm)
KD*P	27,767	0,750	2,514	4,314
KDP	27,767	0,820	1,154	4,732
LiTaO ₃	39,995	1,169	8,765	6,743
LiNbO ₃	42,110	2,023	3,809	11,857
GaAs	66,199	0,907	2,656	4,997

4.2 Parameter Kinerja Modulator Elektro-Optik

Tabel 8 Kinerja modulator elektro-optik transversal Pockels pada berbagai bahan kristal dengan cahaya masukan laser He-Ne

Bahan	V (Volt rms)	Δf_M (MHz)	P (mW/MHz)	T (ns)
KD*P	32,369	528,2	65,858	11,990
KDP	88,117	497,2	235,312	12,627
LiTaO ₃	10,208	467,6	8,593	13,442
LiNbO ₃	14,149	300,2	12,950	20,938
GaAs	19,992	219,2	19,572	28,675

Tabel 9 Rangkaian pengganti modulator elektro-optik transversal Pockels pada berbagai bahan kristal dengan cahaya masukan laser He-Ne

Bahan	R (Ohm)	C (pF)	L (nH)
KD*P	80,779	28,284	21,398
KDP	167,543	13,637	50,948
LiTaO ₃	61,579	37,102	13,772
LiNbO ₃	78,496	29,096	57,774
GaAs	103,684	22,036	58,378

Pada tabel 8 diperoleh lebar pita modulator KD*P yang paling lebar, hal ini mengakibatkan waktu penyempungan menjadi lebih singkat. Daya modulasi yang dibutuhkan pada semua bahan sel modulator umumnya kecil kecuali pada bahan KDP. Tegangan kerja maksimum V pada berbagai jenis bahan kristal menghasilkan kesamaan karakteristik cahaya modulasi intensitas keluaran modulator elektro-optik transversal Pockels.

Untuk cahaya masukan dioda laser DH InGaAsP/InP diperoleh kinerja modulator elektro-optik transversal Pockels seperti pada tabel 10 Sedangkan untuk rangkaian penggantinya dapat dilihat pada tabel 11 berikut.

Tabel 10 Kinerja modulator elektro-optik transversal Pockels pada berbagai bahan kristal dengan cahaya masukan laser DH InGaAsP/InP

Bahan	V (Volt rms)	Δf_M (MHz)	P (mW/MHz)	T (ns)
KD*P	136,612	1085,0	571,010	5,793
KDP	371,891	1021,2	2040,209	6,155
LiTaO ₃	43,085	960,4	74,505	6,544
LiNbO ₃	59,717	616,5	112,283	10,195
GaAs	84,373	450,2	169,693	13,962

Tabel 11 Rangkaian pengganti modulator elektro-optik transversal Pockels pada berbagai bahan kristal dengan cahaya masukan laser DH InGaAsP/InP

Bahan	R (Ohm)	C (pF)	L (nH)
KD*P	165,950	13,767	10,476
KDP	344,194	6,638	24,800
LiTaO ₃	126,507	18,060	6,704
LiNbO ₃	161,259	14,168	28,123
GaAs	213,005	10,726	28,416

Bila pertimbangan lebar pita yang besar dengan tegangan kerja maksimum yang relatif rendah maka penggunaan bahan sel modulator KD*P sangat baik untuk sumber cahaya masukan laser He-Ne dan bahan sel modulator LiTaO₃ paling baik untuk sumber cahaya masukan dioda laser DH InGaAsP/InP.

4.3 Karakteristik Cahaya Keluaran Modulator

Tabel 12 Karakteristik cahaya keluaran modulator elektro-optik transversal Pockels pada berbagai bahan kristal dengan cahaya masukan laser He-Ne

Bahan	Beda Fasa	Perbandingan n Intensitas (%)	Pemudaran Cahaya (dB)	Rugi-rugi Sisipan (dB)
KD*P	1,111	72,174	7,903	1,414
KDP	1,111	72,174	7,903	1,414
LiTaO ₃	1,111	72,174	7,903	1,414
LiNbO ₃	1,111	72,174	7,903	1,414
GaAs	1,111	72,174	7,903	1,414

Karakteristik cahaya keluaran modulator elektro-optik transversal Pockels dengan modulasi intensitas cahaya umumnya diatur untuk menghasilkan beda fasa $\Phi = 1,11$ radian.

4.4 Kinerja Demodulator Elektro-Optik

4.4.1 Responsivitas

Tabel 13 Karakteristik pin photodiode pada berbagai bahan

Bahan	Effisiensi quantum (%)	Responsivitas (amp/Watt)
Si	90	0,6521
Ge	50	0,5233
InGaAs	60	0,6803

Tabel 14 Karakteristik avalanche photodiode pada berbagai bahan

Bahan	Effisiensi quantum (%)	Responsivitas (amp/Watt)
Si	90	3,2604
Ge	50	2,6164
InGaAs	60	3,4013

Dua karakteristik penting dari *photodetector* adalah efisiensi quantum dan kecepatan responnya. Efisiensi quantum adalah banyaknya pasangan elektron-hole yang dibangkitkan setiap energi photon yang terjadi. Sedangkan responsivitas merupakan banyaknya arus cahaya tiap satuan daya optik.

4.4.2 Daya Optik

Dengan menggunakan program Bantu perancangan pada komputer dapat diperoleh besarnya daya dan arus yang terdeteksi pada demodulator pada berbagai bahan *photodiode* seperti pada tabel 15 berikut :

Tabel 15 Daya dan arus yang terdeteksi pada berbagai bahan photodiode

Jenis Photodetector	Jenis Bahan	Daya Oscilator (mWatt)	Daya Optik (mWatt)	Arus Yang Terdeteksi	
				bit 0 (mAmp)	bit 1 (mAmp)
pin	Si	1000	1065,8	-310,54	299,54
	Ge	1000	1065,8	-132,56	113,55
	InGaAs	1000	1065,8	-172,33	147,62
Avalanche	Si	1000	1065,8	-1552,3	1497,7
	Ge	1000	1065,8	-662,81	567,77
	InGaAs	1000	1065,8	-861,65	738,10

Dari tabel 15 di atas dapat disimpulkan bahwa besarnya daya optik sama untuk berbagai bahan photodiode. Hal ini dikarenakan daya optik hanya dipengaruhi oleh daya oscilator dan daya sinyal optik yang diterima, sedangkan dalam perancangan ini besarnya daya oscilator dan daya sinyal yang diterima tetap maka daya optik yang diperoleh juga tetap yaitu sebesar 1065,858 mWatt.

Sedangkan untuk besarnya arus yang terdeteksi untuk berbagai bahan hasilnya berbeda-beda. Hal ini dikarenakan masing-masing bahan memiliki harga efisiensi quantum dan responsivitas yang berbeda-beda pula. Namun untuk semua bahan memiliki kemiripan pola untuk jenis bit yang terdeteksi. Besarnya arus untuk bit 1 sama dengan besarnya arus untuk bit 0 tetapi dalam harga negatifnya. Sebagai contoh untuk silicon, besarnya arus untuk bit 1 = 299,548 mA sedangkan untuk bit 0 = -310,472 mA.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada penelitian ini maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Interaksi elektro-optik merupakan interaksi antara media interaksi sel modulator terhadap masukan medan listrik sehingga mengakibatkan perubahan indeks bias sel modulator.
2. Kinerja modulator elektro-optik transversal Pockels sangat ditentukan oleh jenis bahan sel modulator, dimensi sel modulator, pengaturan cahaya masukan laser terhadap sel modulator dan tegangan kerja yang diberikan.

3. Modulasi cahaya pada dasarnya disebabkan oleh perubahan fasa cahaya. Pada modulator elektro-optik transversal Pockels, perbedaan fasa cahaya akibat interaksi elektro-optik mengakibatkan adanya modulasi intensitas cahaya.
4. Bahan potassium dideuterium phosphate (KD*P) merupakan bahan yang paling baik sebagai sel modulator pada modulator elektro-optik transversal Pockels untuk sumber cahaya laser He-Ne.
5. Untuk bahan sel modulator KD*P dan sumber cahaya laser He-Ne diperoleh kinerja sistem sebagai berikut :
 - Sumber cahaya laser yang digunakan memiliki panjang gelombang 0,6328 μm dengan sudut divergensi cahaya 0,24 mrad
 - Dimensi sel modulator berbentuk balok dengan panjang 57,043 mm berpenampang bujur sangkar dengan panjang sisi 0,75 mm.
 - Pelat setengah gelombang yang digunakan tebalnya 34,731 mm.
 - Sel modulator dilapisi elektroda tipis sepanjang sel dengan lebar 2,514 mm
 - Tegangan kerja pengatur yang digunakan 32,369 volt rms
 - Lebar pita data informasi untuk format RZ yang digunakan 69,632 MHz
 - Daya modulasi yang diperlukan tiap MHz dari lebar pita data sebesar 65,858 mW.
 - Rangkaian ekivalen, berupa rangkaian RLC dengan harga C sebesar 28,284 pF, L sebesar 21,398 nH, dan R sebesar 80,779 Ohm.
 - Perbandingan intensitas cahaya (*Extinction ratio*) 72,17 %.
 - Pemudaran intensitas cahaya sebesar 7,938 dB.
 - Rugi-rugi sisipan 1,41 dB.
6. Bahan Silicon (Si) merupakan bahan yang paling baik sebagai *photodetector* untuk jenis *pin photodiode* maupun *avalanche photodiode*, untuk jenis pin photodiode didapatkan kinerja demodulator sebagai berikut :
 - efisiensi quantum 90 %
 - responsivitas 0,6521
 - Daya oscilator yang digunakan 1000 mW.
 - Daya optik yang dihasilkan 10065,858 mW
 - Arus yang terdeteksi untuk bit 0 -310,542 mA.
 - Arus yang terdeteksi untuk bit 1 299,542 mA

5.2 Saran

1. Perancangan modulator elektro-optik pada penelitian ini hanya dibuat dengan bantuan program komputer. Diharapkan penelitian selanjutnya akan dapat mewujudkan implementasinya.
2. Penulis menyarankan penyediaan laboratorium optik di Teknik Elektro UNDIP untuk penelitian selanjutnya karena sistem komunikasi serat optik akan terus berkembang dan menjadi pilihan utama pada komunikasi berkapasitas besar dengan kecepatan tinggi. Laboratorium optik harus mampu menyediakan prasarana berupa peralatan dan komponen-komponen percobaan agar penelitian di bidang optik terus berlanjut sehingga dapat terwujud realisasi dari sistem komunikasi serat optik.

Daftar Pustaka

- [1] Allard, C.A., *Fiber Optics Handbook for Engineers and Scientist*, McGraw Inc., 1990.
- [2] Bhattacharya, Pallab, *Semiconductor Optoelectronic Device*, Prentice Hall International Inc., 1997.
- [3] Chen, Fang-Shang, *Modulator for Optical Communication*, Procc. IEEE, vol. 58, pp. 1440-1457, October 1970
- [4] Kaminow, I.P. and E.H. Turner, *Electrooptic Light Modulators*, Proc. IEEE, vol. 54, pp.1374-1390, October 1966.
- [5] Keiser, G., *Optical Fiber Commu-nication*, Mc. Graw Hill, New York 1991.
- [6] Kwong, C.W., Prucnal, P.R., and M.C. Teich, *Coherent Subscriber Fiber-Optic Communication Systems with Phase-Noise Cancellation*, IEEE Transactions on Communication, vol. 42, no.6, June 1994
- [7] Mackey, J.R., *Flow Induced Birefringence Measurement System Using Dual-Crystal Transverse Electro-Optic Modulators for Microgravity Fluid Physics Applications*, Brook Park, Ohio, 2001
- [8] Mooney, J.W., *Optoelectronic Device and Principles*, Prentice Hall Inc.
- [9] Peters, C.J., *Gigacycle-bandwidth Coherent-Light Traveling-Wave Amplitude Modulator*, Procc.IEEE, vol. 53, pp. 455-460, May 1965.
- [10] Senior, J.M., *Optical Fiber Communications Principles and Practice*, Prentice Hall Inc.
- [11] Shamir, J., *Optical System and Processes*, Prentice Hall of India, New Delhi, 2003
- [12] Tischler, M., *Optoelectronics : Fiber Optics and Lasers*, McGraw Hill, 1992
- [13] Wilson, B., Ghassemlooy, Z., and I. Darwazeh, *Analogue Optical Fiber Communications*, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1991
- [14] ---, Polarization of Light, [http://www.OlympusMicroscopyResourceCenterLightandColor - Polarization of Light.htm](http://www.OlympusMicroscopyResourceCenterLightandColor-PolarizationofLight.htm), Oktober 2005