

Aplikasi Pemodulat Keamatan Elektro-Optik Dalam Sistem Komunikasi Optik

SABARINA ISMAIL

Kolej Universiti Kejuruteraan Utara Malaysia

ABSTRAK

Tumpuan kepada pelaksanaan projek ini adalah untuk menganalisa sifat pemodulat keamatan elektro-optik Mach Zehnder yang mana sifat penghantaran optiknya dalam sistem komunikasi boleh dikawal oleh medan elektrik yang dibekalkan. Kendalian peranti ini adalah berasaskan kesan elektro-optik linear (Pockels) yang biasa dan lithium niobate (LiNbO_3) diambil kira sebagai bahan peranti kerana ia memungkinkan kecekapan yang tinggi bagi aplikasi seperti kawalan pemodulan dan pensuisan. Medan Elektrik akan memodulat cahaya optik dari laser dengan mengubah keamatan cahaya optik keluaran. Projek ini juga memfokuskan kepada penganalisaan terhadap kesan medan elektrik elektrod ke atas ciri-ciri fasa gelombang, kuasa pemacu optima yang diperlukan oleh pemodulat tersebut dengan menetapkan beberapa parameter peranti tersebut. Bagi menganalisis kesan elektro-optik, pengiraan matematik dibuat menggunakan perisian simulasi MATLAB dan BPM_CAD (Beam Propagation Method). Perubahan fasa cahaya mempengaruhi keamatan keluaran cahaya berdasarkan nilai (V_{π}) voltan separuh gelombang peranti pemodulat yang diperolehi.

ABSTRACT

This project tends to analyst the properties of Mach Zehnder electro-optic modulators whose optical transmission characteristic can be controlled by an applied electric field. The devices operations are based on linear (Pockels) electro-optic affect which common and lithium niobate (LiNbO_3) is used as electro-optic material because of it possible to realize highly efficient such as modulation and switching control. The electric field will modulate optical signal, which affect the intensity of optical signal output. This project also focuses to analyze on electric field effect electrode for wave phase characteristics, optimize driving power need for modulator within structure by certain parameters. By using MATLAB and BPM_CAD (Beam Propagation Method) simulation software, mathematical equations were done to analyst electro-optic effect. This changes phase produce light intensity refers to the device half wave voltage, V_{π} .

PENGENALAN

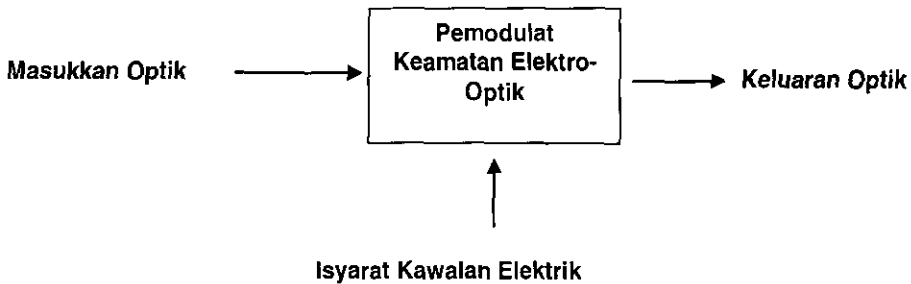
Dengan pertambahan penggunaan era dunia Internet, melibatkan permintaan perkhidmatan telekomunikasi kian bertambah banyak dan lebar jalur yang besar diperlukannya. Kabel fiber optik digunakan sebagai medium penghantaran isyarat kerana lebar jalur yang besar dan berkelajuan tinggi disediakan. Dalam penggunaan komunikasi digital berkelajuan tinggi, prestasi sistem fiber optik dihadkan oleh penyerakan fiber. Bahan lithium niobate (LiNbO_3) digunakan sebagai kristal pemodulat disebabkan ia mempunyai ciri koefisien elektro-optik yang tinggi dan terbaik. Pemodulat LiNbO_3 juga berkeupayaan menyediakan lebar jalur yang diperlukan dan meminimumkan penyerakan^[2]. Antara kelebihan peranti pemodulat LiNbO_3 adalah kendaliannya yang stabil melawan suhu, kadar hanyutan voltan bias yang

tersangat rendah dan peranti bebas bias. Ini menjadikannya sebagai komponen pemodulat berkualiti tinggi untuk digunakan dalam sistem komunikasi fiber optik⁽¹⁾⁽²⁾.

Pemodulat keamatan elektro-optik menggunakan medan elektrik bagi mengubah indeks medium di elektrik iaitu kristal LiNbO_3 . LiNbO_3 mempunyai lebar jalur pemodulatan intrinsik yang sangat tinggi, tetapi kelajuan pensuisan peranti terhad oleh pelbagai kekangan fizikal. Pemodulatan dihasilkan oleh perubahan aruhan voltan dalam indeks biasan. Perubahan indeks yang boleh dicapai adalah kecil. Oleh itu sama ada voltan yang besar atau panjang elektrod yang panjang diperlukan untuk memperolehi pemodulatan yang mencukupi. Maka perkara yang seharusnya bagi pemodulatan dicapai adalah penghasilan voltan pensuisan dan panjang elektrod. Dalam aplikasi pemodulat keamatan elektro-optik ini, akan ditunjukkan perkara tersebut iaitu kesan elektro-optik linear terhadap perubahan fasa dan parameter-parameter yang berkaitan dengan prestasinya sebagai pemodulat isyarat optik. Kaedah simulasi MATLAB 6.0 digunakan dalam penganalisan bagi mengenal pasti prestasi dan keberkesanan kesan elektro-optik pada struktur peranti optik ini.

METODOLOGI

Pendekatan yang digunakan dalam projek ini adalah mensimulasikan parameter pemodulatan menerusi kesan elektro-optik linear dengan menghasilkan perkakasan simulasi berangka untuk menilai prestasinya. Peranti pemodulat keamatan, iaitu pemodulat Mach Zehnder digunakan. Dalam pemodulat Mach Zehnder, cahaya dimasukkan dipisahkan ke dalam dua lengan pandu gelombang selari dan digabung bersama menerusi cabang berbentuk Y secara berturutan⁽³⁾. Lengan ini dikawal oleh medan elektrik yang dibekalkan secara luaran melalui elektrod logam, yang mana mengaruh perubahan indeks pembiasan merujuk kepada sifat kristal bahan elektro-optik LiNbO_3 .



Kesan Elektro-Optik

Pemodulat keamatan ini berasaskan kepada kesan elektro-optik linear, di mana perubahan indeks biasan kristal diaruh bergantung kepada konfigurasi, kedudukan kristal dan arah medan elektrik yang dibekalkan merujuk kepada pengutuban optik. Tensor elektro-optik r_{ij} (atau koefisien elektro-optik) dalam bentuk persamaan matematik ditakrifkan sebagai;

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, 6 \\ j = x, y, z = 1, 2, 3 \end{matrix} \quad (1)$$

di mana E_x , E_y dan E_z sama kepada komponen medan elektrik yang diberikan x , y dan z . Kesan ini dicirikan oleh indeks berbentuk ellipsoid.

$$x^2 \left(\frac{1}{n^2} \right)_1 + y^2 \left(\frac{1}{n^2} \right)_2 + z^2 \left(\frac{1}{n^2} \right)_3 + 2yz \left(\frac{1}{n^2} \right)_4 + 2zx \left(\frac{1}{n^2} \right)_5 + 2xy \left(\frac{1}{n^2} \right)_6 = 1 \quad (2)$$

di mana x , y dan z adalah arah relatif kepada paksi kristal. Dimudahkan persamaan (1) dengan mengambil kira kristal LiNbO_3 adalah simetri, maka

$$\left(\frac{1}{n^2} \right)_4 = \left(\frac{1}{n^2} \right)_5 = \left(\frac{1}{n^2} \right)_6 = 0 \quad (3)$$

Dalam kehadiran medan elektrik, LiNbO_3 adalah dwibiasan dengan indeks elipsoid diberikan oleh

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (4)$$

di mana n_o and n_e adalah indeks biasa dan indeks luar biasa. Disebabkan LiNbO_3 adalah kelas simetri kristal trigonal $3m$, tensor elektro-optik adalah dalam bentuk

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & r_{12} & r_{13} \\ 0 & -r_{12} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ r_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Jika E_z diberi pada LiNbO_3 bagi mempergunakan koefisien elektro-optik, r_{33} , dengan menggunakan tindak balas medan sepanjang arah z , dari persamaan (2) dan (4) menjadi

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) (x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right) z^2 = 1 \quad (6)$$

Tiada perubahan kepada kedudukan elipsis, dan keadaan pengutuban linear tidak berubah sepanjang paksi utama, tetapi indeks pembiasan n_z adalah ditentukan dari hubungan⁽⁴⁾.

$$\frac{1}{n_z^2} = \frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \quad (7)$$

untuk perubahan kecil indeks biasan untuk keratan-x, mod TE bagi mencapai kecekapan pemodulatan terbaik, pendekatan penyelesaian adalah

$$n_z = n_e - \frac{n_e^3}{2} r_{33} E_z = n_e + \Delta n_e \quad (8)$$

Pemodulat Keamatan Elektro-Optik

Kawalan pemodulat optik atau suis berasaskan kesan elektro-optik, yang disifatkan oleh koefisien Pockel linear. Dengan menggunakan ciri ini, adalah mungkin untuk mengubah indeks biasan pandu gelombang dengan memberikan medan luaran, mengubah pemalar perambatan pandu dan mengaruh perbezaan dalam fasa alur cahaya optik^[5]. Kesan ini digunakan bagi memodulat keamatan dan fasa alur cahaya. Perbezaan fasa $\Delta\phi$ dicapai oleh perbezaan indeks pembiasan kristal LiNbO_3 oleh Δn .

$$\Delta n = -\frac{n_e^3 r_{33}}{2} E_z \Gamma = -\frac{n_e^3 r_{33}}{2} \frac{V}{d} \Gamma \quad (9)$$

Voltan V dibekalkan menerusi elektrod memberikan medan seragam $E=V/d$, di mana d adalah ruang antara elektrod dan kamilan pertindihan antara medan elektrik dan medan optik ($0 \leq \Gamma \leq 1$). Perubahan yang sama dalam pemalar perambatan ($\Delta\beta$) gelombang optik pada jarak gelombang λ adalah

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n) \quad (10)$$

Secara elektro-optik, perubahan fasa yang diaruh ($\Delta\phi$) pada jarak saling tindak L adalah

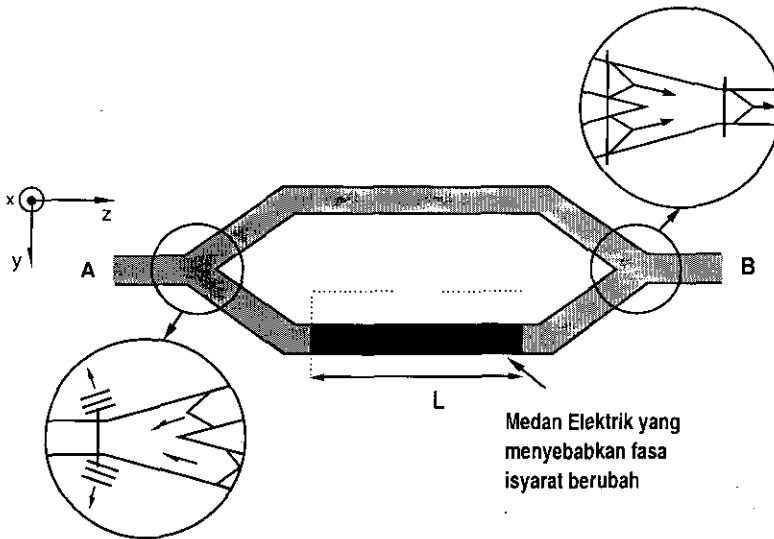
$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} L \frac{n_e^3 r_{33}}{2} \frac{V}{d} \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} L \Delta n = \Delta\beta L \quad (12)$$

Untuk pemodulat keamatan, V_π yang rendah boleh dicapai dengan mengubah satu atau lebih parameter dalam persamaan (13) dan ia umumnya merujuk kepada perubahan voltan yang diperlukan untuk pemodulatan penuh ON-OFF, jika $\Delta\phi = \pi$, keadaan logic '0' atau OFF. Maka persamaan (12) boleh diringkaskan sebagai

$$V_\pi = \frac{\lambda}{n_e^3 r_{33}} \frac{d}{\Gamma L} \quad (13)$$

KEPUTUSAN SIMULASI

Pemodulat Mach Zehnder digunakan sebagai pemodulat keamatan elektro-optik. Ia terdiri dari mod tunggal pandu gelombang yang dicabangkan dalam bentuk Y simetri yang mempunyai dua lengan^[6]. Elektrod pada jarak L tertentu supaya dapat membekalkan voltan untuk mengaruh perubahan fasa.

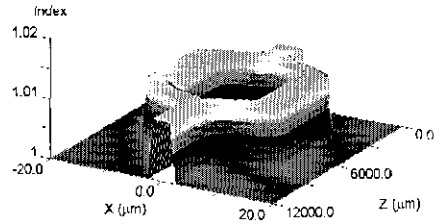
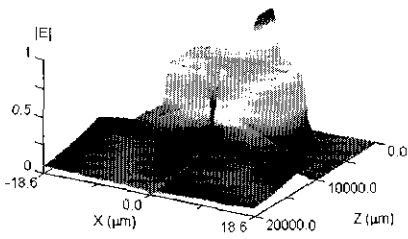
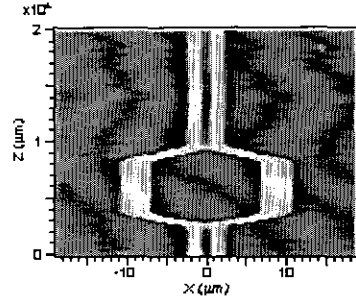
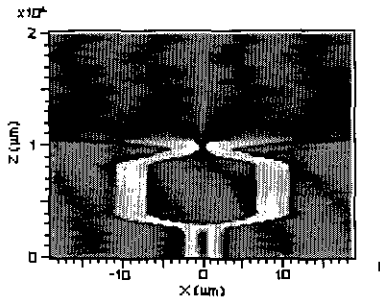


Rajah 1: Pemodulat Mach Zehnder

Penghantaran optik adalah fungsi sinus anjakan fasa relatif antara dua laluan. Nilai keluaran I_{out} dihubungkan kepada masukan I_n adalah

$$I_{out} = \frac{1}{2}[1 + \cos(\Delta\phi)]$$
$$= \frac{1 + \cos(\Delta\beta L)}{2}$$

Ketidaktepadan perambatan adalah berkadar secara linear kepada voltan yang dibekalkan.

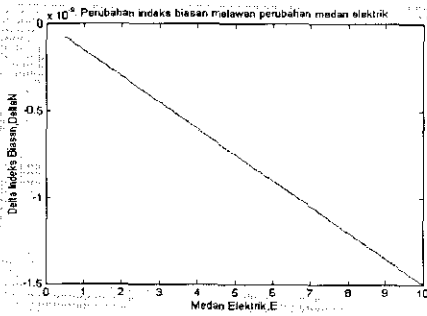


Kadaan OFF

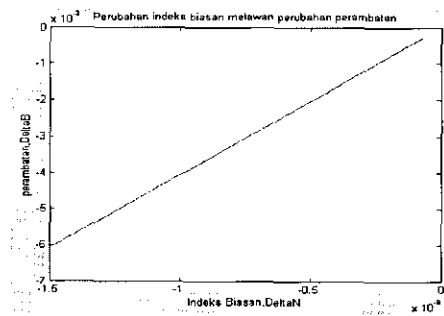
Kadaan ON

Rajah 2: Keadaan keluaran Pemodulat Keamatan Mach Zehnder

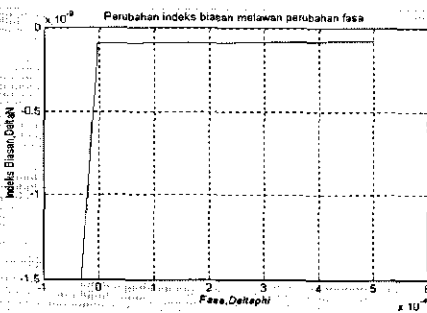
Keputusan simulasi menggunakan MATLAB 6.0 adalah seperti rajah di bawah.



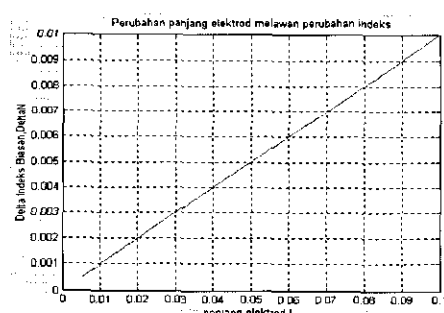
Rajah 3. (a)



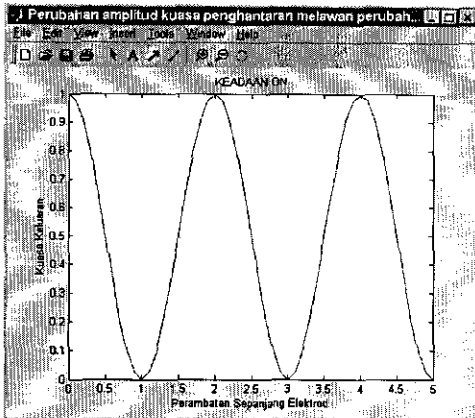
Rajah 3. (b)



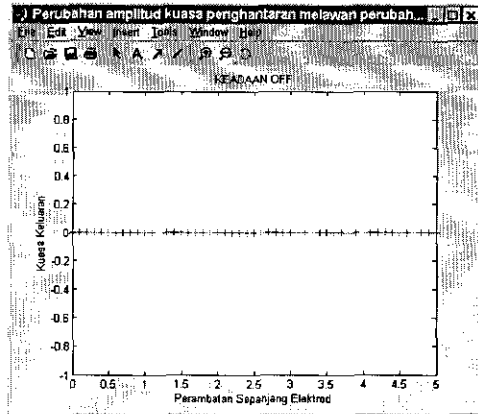
Rajah 3. (c)



Rajah 3. (d)



Rajah 4.(a) ON



Rajah 4.(b) OFF

PERBINCANGAN

Daripada simulasi yang dilakukan menggunakan pemodulat elektro-optik Mach Zehnder dengan jarak gelombang cahaya $1.55\mu\text{m}$ dan $1.3\mu\text{mm}$, didapati indeks biasan Δn berkurang secara linear dengan peningkatan medan elektrik (Rajah 3a). Jika gelombang dirambatkan menerusi jarak L , ianya akan dipengaruhi oleh perubahan koefisien perambatan $\Delta\beta$, yang juga berkadar secara linear dengan perubahan fasa isyarat $\Delta\phi$ (Rajah 3b). Dapat dilihat di sini, sedikit perubahan yang berlaku pada Δn tetapi menyebabkan perubahan besar dalam nilai fasa isyarat $\Delta\phi$ (Rajah 3c). Dari rajah 3d, Δn berkadar terus dengan panjang elektrod, L . Ini membolehkan pemodulat berfungsi sebagai pemodulat keamatan atau sebagai suis. Tanpa adanya beza fasa (Rajah 4a), amplitud gelombang bertambah iaitu berkeamatan tinggi pada keluaran (ON), tetapi dengan beza fasa sebanyak $\pi/2$ (Rajah 4b), tiada terdapat amplitud keluaran iaitu dalam keadaan OFF. Voltan fasa V_{π} pula ditentukan melalui pengiraan kedalaman pemodulan dari spektrum medan termodulat fasa. Dengan kelebihan sifat dan ciri yang terdapat pada pemodulat elektro-optik ini membolehkan ianya digunakan sebagai peranti pengawal, suis digital, peranti pemodulat isyarat, pengganding pengarah, penukar dan sebagainya dalam sistem komunikasi optik.

KESIMPULAN

Dalam kes ini simulasi komputer membolehkan ciri-ciri peranti pemodulat keamatan elektro-optik dikaji dan dianalisa supaya konsep yang kompleks dapat ditunjukkan. Jika dilihat dari sudut penggunaan perisian, Beam Propagation Method (BPM) lebih mudah tetapi tidak fleksibel berbanding Matlab. Perisian Matlab boleh dipergunakan sebagai pengatur cara kerana fungsi-fungsi matematikanya dapat menyelesaikan sebarang masalah persamaan berangka dan kita bebas untuk menggunakannya untuk pelbagai penggunaan. Bagaimanapun simulasi memerlukan pemahaman konsep sistem dan juga metodologi perisian yang digunakan. Dalam situasi di mana sukar mendapatkan peralatan yang mencukupi dan mahal, pembangunan perisian secara simulasi adalah sebagai satu pendekatan alternatif. Dalam projek ini, peranti pemodulat keamatan elektro-optik boleh di simulasi dan dianalisis dan dapat ditunjukkan bagaimana terdapat ciri-ciri tipikal yang banyak memberi kesan kepada penghantaran isyarat melalui fiber optik.

PENGHARGAAN

Saya ingin merakamkan penghargaan ikhlas dan terima kasih kepada Profesor Madya Dr. Norazan Bin Mohd Kassim dari UTM dan rakan-rakan di atas idea, ilmu, bimbingan, bantuan dan juga membenarkan saya menggunakan perisian BPM_CAD. Juga tidak dilupakan rakan-rakan seperjuangan yang turut membantu memberi sokongan dan semangat.

RUJUKAN

1. Ed.L Wooten. et al. (January-February, 2000). A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.6, No.1:69-80.
2. Hirotaoshi Nagata.(April, 2000). Activation Energy of DC –Drift of X-cut LiNbO₃ Optical Intensity Modulators, *IEEE Photonic Technology Letter*, Vol 12, No.4 : 386-388.
3. Dechang An. et al. (10 April, 2000). Polymeric Electro-optic Modulator Based on 1x2 Y-fed directional Coupler, *Applied Physics Letters*, Vol 76, No.15:1972-1974.
4. Jeffrey R. Mackey. Flow-induced Birefringence Measurement System Using Dualcrystal Transverse Electro-optic Modulators For Microgravity Fluid Physics Applications, *NYMA*, Inc NASA Lewis Group: 510-515.
5. Joao Geraldo P.T does Reis and Henrique J.A.da Silva, *Modelling and Simulation of Passive Optical Device*, *Department of Electrical Engineering and IT-Coimbra*, University of Coimbra, Portugal.
6. N.Anwar, C.Thermistos, B.M.Azizur Rahman and Kenneth T.V Grattan. (April, 1999). Design Considerations For an Elektrooptic Directional Coupler Modulator, *Journal of Lightwave Technology*. Vol.17, No.4:598-605.