

**ANALISIS STRUKTUR KISI PERIODIK BERHINGGA
UNTUK DESAIN DEVAIS FOTONIK FUNGSI PENAPIS**



PERPUSTAKAAN	UNIVERSITAS NEGERI PADANG
TGL	11-3-2014
SUMBER/HARGA	Hd
KATEGORI	U1
INVENTARIS	564/hd/2014-a.r Cr
LOKASI	

OLEH

Dra. HIDAYATI, M.Si, dkk

*Disampaikan pada Seminar dan Rapat Tahunan (Semirata)
Koordinasi Bidang MIPA di UNSYIAH, Banda Aceh
tanggal 4-5 Mei 2009*

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2009**

**MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG**

ANALISIS STRUKTUR KISI PERIODIK BERHINGGA UNTUK DESAIN DEVAIS FOTONIK FUNGSI PENAPIS

Hidayati¹, Yulia Jamal¹, Alexander A. Iskandar², Agoes Soehanie²

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang

²KK Fisika Magnetik dan Fotonik, Jurusan Fisika FMIPA, ITB

ABSTRAK

Pada saat ini telekomunikasi dan informasi menggunakan perangkat optik, yaitu penyaluran informasi menggunakan kabel serat optik dan untuk keperluan mengolah sinyal optik diperlukan berbagai komponen dengan berbagai fungsinya yang dikenal dengan devais optik terintegrasi (*Integrated Optics*). Bangun dasar untuk devais fotonik ini dapat dibuat dari struktur periodik yang lebih dikenal dengan nama kristal fotonik Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami respons dari kisi periodik 2-dimensi melalui metoda indeks bias efektif terhadap gelombang elektromagnetik (optik). Perambatan gelombang elektromagnetik ditelaah melalui formulasi matriks yang menghubungkan amplitudo-amplitudo gelombang pada setiap lapisan dengan amplitudo gelombang datang dan amplitudo gelombang transmisi. Respons karakteristik dari struktur ini terhadap gelombang elektromagnetik yang datang padanya, dinyatakan dengan kurva transmitansi dari kisi periodik ini. Melalui penelitian telah didapatkan bahwa variasi parameter sistem dapat dipakai untuk mendesain respons struktur dari kristal fotonik fungsi penapis.

Kata Kunci : Fotonik, Divais Fotonik, *Integrated Optics*

PENDAHULUAN

Dalam era perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang demikian cepat, masyarakat modern memerlukan adanya sarana komunikasi yang lebih handal. Sarana komunikasi yang dibutuhkan tersebut harus berorientasi untuk memenuhi kebutuhan layanan masa sekarang dan masa yang akan datang. Hal ini berhubungan dengan kebutuhan akan kecepatan dalam transfer data, ketersediaan *bandwidth* yang lebih lebar, penambahan kapasitas informasi dan fleksibilitas yang baik. Kebutuhan ini terjawab dengan dikembangkannya teknologi serat optik 30 tahun belakangan ini. Teknologi ini menawarkan pengiriman data dengan kecepatan tinggi sepanjang jarak yang lebih jauh dengan biaya yang lebih ekonomis dibandingkan dengan sistem kawat tembaga.

Disampaikan pada Semirata BKS-PTN 2009 di UNSYIAH, tanggal 4-5 Mei 2009

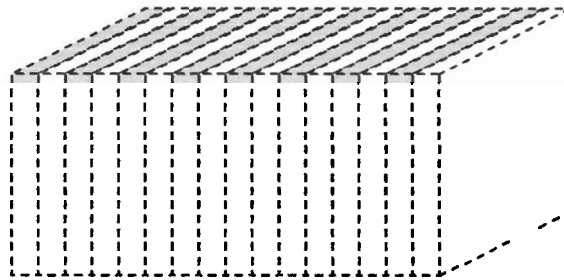
Serat optik dapat mengirimkan data dengan lebar pita (*bandwidth*) yang sangat beda dan kecepatan tinggi. Namun, pemrosesan dan pengaturan (*switching*) data masih menggunakan rangkaian elektronik, sehingga diperlukan konversi data elektronik/optik (E/O) pada *transmitter* dan optik/elektronik (O/E) pada *receiver*. Hal ini menyebabkan kecepatan seluruh sistem masih dibatasi oleh kecepatan rangkaian elektronik. Karena itu, perlu dikembangkan devais-devais optik untuk mempercepat pemrosesan data.

Komponen elektronik memiliki kecepatan sangat tinggi. Namun, hal tersebut memiliki keterbatasan dimana kecepatan maksimum komponen elektronik telah mencapai batasnya. Untuk itu, dibutuhkan suatu terobosan teknologi yang mampu bekerja dengan respon sangat cepat. Hal ini didasarkan kepada kebutuhan akan transmisi data yang semakin cepat. Pengembangan cahaya sebagai pembawa dan pengendali data akan menjawab kebutuhan ini, karena cahaya memiliki kecepatan tiga kali lebih cepat dibandingkan kecepatan elektron (komponen elektronik).

Teknologi transmisi data yang memanfaatkan cahaya (foton) dalam transmisinya dikenal dengan teknologi fotonik seperti *Integrated Optics (IO)*. Teknologi ini mengkaji interaksi materi dengan cahaya. Dalam *IO*, cahaya memegang peran vital, karena kecepatan *transfer* data didasarkan pada kecepatan cahaya. Komponen yang terlibat pada *Integrated Circuit (IC)*, adalah elektronik, sedangkan pada *IO* dipergunakan cahaya untuk mengendalikan cahaya. Persamaan *IO* dan *IC* adalah keduanya mengendalikan dan memroses data. Perbedaannya, Pada *IC* yang diproses adalah sinyal elektronik, sedangkan pada *IO* diproses dalam bentuk sinyal cahaya atau foton sehingga batas kecepatan respon adalah kecepatan cahaya..

Pada teknologi *IO* ada beberapa komponen pengolahan yang diperlukan. Komponen-komponen tersebut antara lain seperti pemanduan (*quiding*), penapis (*filtering*), penggandengan (*coupling*) dan berbagai fungsi lainnya (Tamir,1985). Salah satu komponen penting dalam teknologi piranti optik terintegrasi adalah penapis (*filtering*). Agar pulsa yang dilewatkan tidak mengalami gangguan maka diperlukan devais optik dengan fungsi penapis. Pada tulisan ini yang ditelaah adalah pemahaman respons dari sistem dielektrik berlapis jamak (*multilayer dielectric system*) terhadap gelombang optik dan kemungkinan aplikasinya dalam divais fotonik.

Kristal fotonik 1 dimensi merupakan sistem paling sederhana (*1 dimensional photonic crystal*). Kristal ini dibentuk dari sistem berlapis jamak 1 dimensi, variasi perubahan medium dielektrik hanya terjadi pada satu arah ruang saja. Kristal ini terdiri dari dua macam pelat dielektrik dengan indeks bias n_1 dan n_2 yang tersusun secara periodik seperti pada Gambar.1 berikut :



Gambar 1. Sistem berlapis jamak bahan dielektrik yang periodik dalam satu dimensi yang tersusun dari pelat-pelat dielektrik dengan indeks bias n_1 dan n_2 . (P, Yeah, 1988).

Akibat dari adanya batas antara medium yang periodik, persamaan Maxwell yang harus dipenuhi oleh gelombang elektromagnet yang merambat dalam medium ini juga memiliki syarat batas yang berulang (P, Yeah, 1988). Periodisitas Λ pada arah y membuat sistem kisi ini menjadi *Bragg* reflektor bagi suatu gelombang elektromagnetik yang masuk pada sistem kisi ini dengan arah perambatan efektif dalam arah sumbu y . Lebih lanjut, karena adanya perbatasan medium, gelombang elektromagnet tersebut akan mengalami peristiwa pembiasan dan pemantulan. Hubungan antara amplitudo medan-medan dalam medium yang berbeda ini dinyatakan melalui *matriks Transfer*. Khususnya dalam sistem periodik, solusi propagasi tersebut dapat diperoleh dengan *Teorema Gelombang Bloch* (yang juga dikenal dalam sistem zat padat (C.Kittel,1996)). Dengan menggunakan Teorema Bloch ini, hubungan dispersi dari sistem dapat ditentukan. Berdasarkan matriks transfer yang diperoleh dan hubungan dispersi tersebut, ditentukan perumusan untuk energi transmisi atau Transmittansi. Spektrum pola transmisi sistem kisi optik diteliti melalui telaah *respons celah pita fotonik (photonic band gap)* terhadap variasi parameter fisis

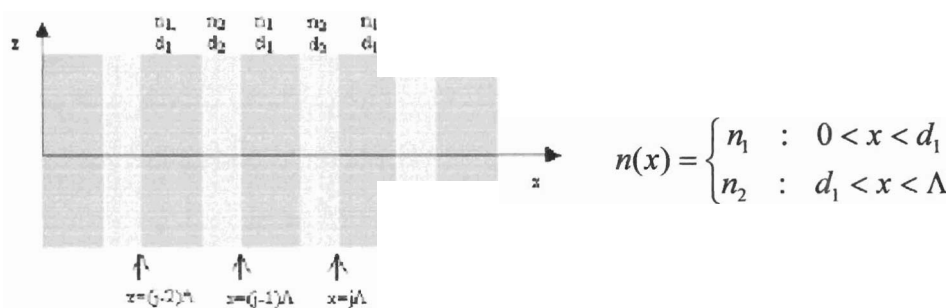
sistem. Melalui pemahaman perilaku karakteristik dari respons ini terhadap variasi parameter geometri akan memberikan pengetahuan yang diperlukan untuk spesifikasi desain piranti (divais) fotonik (Prawiharjo, 2003; A.A. Iskandar,2006). Untuk aplikasinya yang lebih realistis, yaitu model kristal fotonik satu dimensi diperluas menjadi dua dimensi. Caranya adalah dengan membuat salah satu arah sumbu- x atau sumbu- z akan memiliki keterbatasan ruang (tidak homogen dalam arah).

METODOLOGI

Untuk sistem dua dimensi, analisis persoalan disederhanakan dengan *metoda indeks bias efektif*, Lee (1986). Dalam metoda indeks efektif, dilakukan aproksimasi geometri dari struktur dielektrik, sistem dua dimensi ini dipandang sebagai dua buah struktur satu dimensi secara bergantian. Penyederhanaan ini tidaklah menghilangkan derajat kebebasan dari persoalan yang ditinjau, melainkan hanyalah suatu metoda dalam memandang sistem yang lebih rumit sebagai gabungan beberapa sistem yang lebih sederhana.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistim berlapis jamak yang memiliki profil indeks bias untuk 1 unit blok dasar dari kristal seperti Gambar 2, d_1 dan d_2 adalah lebar lapisan, dengan $d_2 = \Lambda - d_1$ dan Λ perioda. Untuk sistim medium yang periodik ini berlaku : $n(x) = n(x + \Lambda)$ dengan Λ : lebar 1 unit sel.



Gambar 2. Sistim Gelombang Berlapis Jamak dengan Struktur Kisi Periodik

Karena kristal yang ditinjau merupakan susunan periodik dalam satu dimensi, maka untuk kasus ini digunakan asumsi bahwa dimensi dalam arah- z dan arah- y jauh lebih besar dari

pada ukuran dalam arah- x . Berdasarkan asumsi ini maka medan vektor $\vec{E}(r,t)$ dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\vec{E}(r,t) = E(x)e^{i(\omega t - \beta z)}\hat{i} \quad (1)$$

Persamaan gelombang untuk medan $E(x)$ adalah :

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + \mu\varepsilon(x)\omega^2 - \beta^2 \right] E(x) = 0 \quad (2)$$

dengan μ adalah konstan untuk semua lapisan. Persamaan ini merupakan persamaan nilai eigen dengan harga indeks bias periodik yaitu $n^2(x) = n^2(x + \Lambda)$. Menurut teorema Bloch, solusi umum persamaan gelombang medium periodik adalah $E_K(x,z) = E_K(x)e^{-i\beta z}e^{-iKx}$, dengan K merupakan bilangan gelombang Bloch. Berdasarkan hal ini dapat dituliskan hubungan antar lapisan dalam bentuk matrik, yaitu berupa persamaan nilai eigen (Hidayati, 2007) :

$$\mathbf{M} \begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix} = e^{iK\Lambda} \begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Dengan menyelesaikan persamaan nilai eigen, diperoleh nilai eigen (λ) dalam bentuk $e^{\pm iK\Lambda}$. Berdasarkan nilai eigen ini, dapat ditinjau untuk nilai K bernilai real, dimana gelombang Bloch akan dapat berpropagasi. Bila K merupakan bilangan kompleks maka gelombang Bloch tidak dapat berpropagasi (*evanescent*). Pada bagian inilah yang disebut '*forbidden bands*' dari medium periodik.

Apabila ada N periodisitas, matriks transformasi dapat dituliskan sebagai (Hidayati, 2007):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^N = \begin{pmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

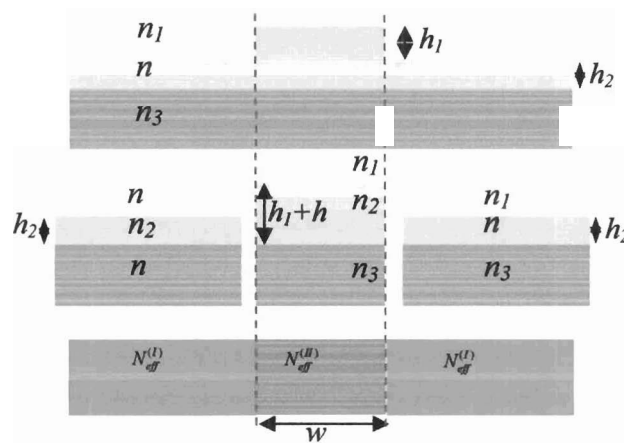
dengan

$$A_s = A \frac{\sin N K \Lambda}{\sin K \Lambda} - \frac{\sin(N-1)K\Lambda}{\sin K \Lambda}, B_s = B \frac{\sin N K \Lambda}{\sin K \Lambda}, C_s = C \frac{\sin N K \Lambda}{\sin K \Lambda}, D_s = D \frac{\sin N K \Lambda}{\sin K \Lambda} - \frac{\sin(N-1)K\Lambda}{\sin K \Lambda}$$

Besarnya nilai Transmittansi atau Reflektansi dapat ditentukan berdasarkan rumusan matriks M . Nilai ini dapat ditentukan dengan mengasumsikan tidak ada gelombang yang datang dari medium akhir ke medium sebelumnya, sehingga dapat diperoleh :

$$R = |r|^2 = \left| \frac{C_s}{A_s} \right|^2 \quad \text{dan} \quad T = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} |t|^2 = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left| \frac{1}{A_s} \right|^2 \quad (5)$$

Untuk spesifikasi desain sebuah piranti fotonik dengan fungsi penapisan pada sistim 2-dimensi, dilakukan melalui telaah respons sistem. Setiap daerah ditinjau sebagai sistem pandu gelombang planar 1 dimensi dan kemudian indeks bias efektif dari masing-masing bagian tersebut dipakai dan dipandang sebagai sistem kisi 1 dimensi.



Gambar 3. Sistem Berlapis Jamak Bahan Dielektrik Dalam Dua Dimensi.

Agar diperoleh gelombang yang terpandu di dalam daerah teras, syarat yang harus dipenuhi adalah nilai n_1 dan n_3 lebih kecil daripada n_2 . Bentuk umum gelombang elektromagnetik harmonik yang berpropagasi ke arah sumbu z di dalam struktur ini dapat dituliskan sebagai

$$\begin{Bmatrix} E(x, y, z, t) \\ H(x, y, z, t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E(x, y) \\ H(x, y) \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (6)$$

dengan ω adalah frekuensi gelombang dan β adalah konstanta propagasinya. Dengan menggunakan persamaan (6) pada persamaan Maxwell serta menerapkan syarat batas akan diperoleh bentuk

Disampaikan pada Semirata BKS-PTN 2009 di UNSYIAH, tanggal 4-5 Mei 2009

$$2\gamma \frac{d}{2} - \phi_1^{TE} - \phi_3^{TE} = 2m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

Persamaan ini adalah persamaan transenden dan dapat dipecahkan secara grafis untuk memperoleh nilai β yang diskrit. Untuk menggambarkan grafik persamaan (7) diperkenalkan besaran-besaran baru yang merupakan kombinasi dari parameter-parameter pandu gelombang. Pertama kita definisikan indeks bias efektif, yaitu :

$$(N_{eff})_m = \frac{\beta_m}{k_0} \quad \text{dengan} \quad k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (8)$$

Selanjutnya didefinisikan tiga parameter yang memuat unsur geometri dan indeks bias pandu gelombang yaitu a^{TE} , V dan b_m , yang berturut-turut disebut dengan derajat asimetrisitas pandu gelombang, ketebalan ternormalisasi dan indeks bias ternormalisasi. Ketiganya dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$a^{TE} = \frac{(n_3^2 - n_1^2)}{(n_2^2 - n_3^2)} \quad (9)$$

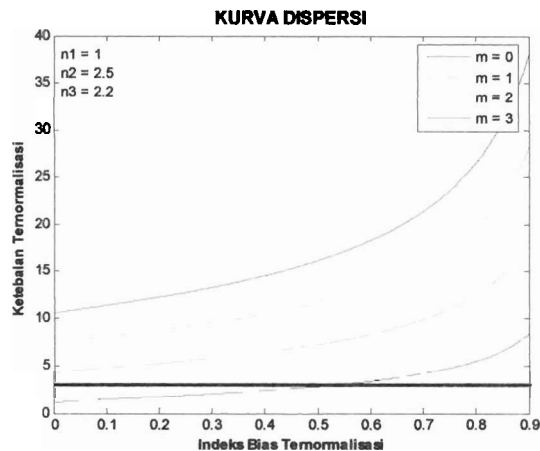
$$V = k_0 d (n_2^2 - n_3^2) \quad (10)$$

$$b_m = \frac{((N_{eff})_m^2 - n_3^2)}{(n_2^2 - n_3^2)} \quad (11)$$

Selanjutnya, persamaan (10) yang dituliskan dalam besaran-besaran V , b_m dan a^{TE} . yaitu

$$V_m = \frac{\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{b_m}{1-b_m}} \right) + \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{b_m + a^{TE}}{1-b_m}} \right) + m\pi}{\sqrt{1-b_m}} \quad (12)$$

Nilai $N_{eff\ m}$ dihitung dengan menggunakan solusi grafik yaitu nilai titik potong grafik antara persamaan (11) dan persamaan (12), seperti Gambar 4.

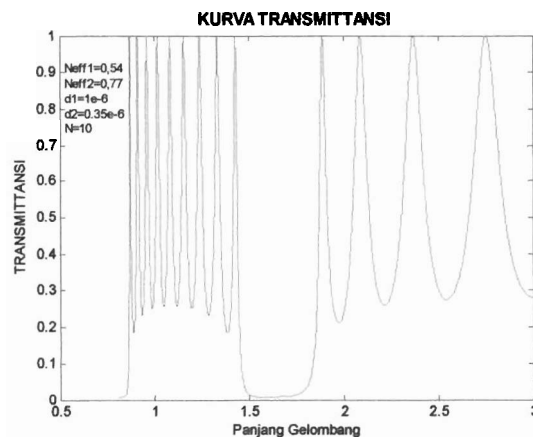


Gambar 4. Kurva Dispersi Untuk Menghitung Nilai Indeks Bias Efektif

Berdasarkan grafik pada Gambar 4 ini dapat dibaca bahwa nilai $N_{eff\ m}$ adalah 0,54.

Untuk spesifikasi desain sebuah piranti fotonik dengan fungsi penapisan dilakukan melalui telaah respons sistem. Berdasarkan nilai indeks bias efektif yang telah diperoleh melalui grafik, persamaan (5) yaitu rumusan transmittansi dibuat kurva *spektrum pola transmisi/refleksi* sistem kisi optik periodik menggunakan program simulasi berbasis perangkat lunak MatLab®

Berikut ditinjau hubungan antara panjang gelombang dengan nilai Transmittansi. Melalui simulasi numerik dengan parameter indeks bias $n_1 = 1$, $n_2 = 2,5$, $n_3 = 2,2$; sehingga diperoleh indeks bias efektif, $N_{eff1} = 0,54$, dan untuk lapisan kedua digunakan parameter indeks bias $n_1 = 1$, $n_2 = 2,0$, $n_3 = 1,45$ sehingga indeks bias efektif $N_{eff2} = 0,77$ jumlah lapisan $N = 10$; serta ketebalan $d_1 = 1 \times 10^{-6} \text{m}$ dan $d_2 = 0,5 \times 10^{-6} \text{m}$ diperoleh kurva Transmittansi pada Gambar 5 berikut :



Gambar 5. Kurva Hubungan antara Nilai Transmittansi dengan Panjang Gelombang

Disampaikan pada Semirata BKS-PTN 2009 di UNSYIAH, tanggal 4-5 Mei 2009

Karakteristik dari kurva transmitansi ini dapat dipelajari berdasarkan pada Gambar 5. Terdapat daerah bandgap yaitu kurva yang paling curam, pada daerah panjang gelombang, λ , sekitar 1.6×10^{-6} m. Disamping itu terlihat pula adanya daerah bandpass dimana daerah bandpass ini tidak homogen. Untuk nilai transmittansi, pada kurva terlihat ada sejumlah berhingga panjang gelombang yang memiliki transmittansi 100%. Keadaan ini disebut dengan keadaan resonans.

Selanjutnya ditelaah respon sistim melalui telaah *respons celah pita fotonik (photonic band gap)* terhadap variasi parameter fisis dari sistem. Adapun parameter fisis yang divariasikan adalah antara lain tebal lapisan, indek bias medium yaitu variasi dari indeks bias efektif dan jumlah layer/lapisan dari struktur kisi periodik berhingga.

Variasi ketebalan struktur kristal menggeser daerah *bandgap*. Makin besar nilai ketebalan struktur kristal, daerah *bandgap* akan bergeser ke daerah yang panjang gelombangnya pendek. Untuk keadaan resonan Semakin besar nilai ketebalan struktur kristal jumlah keadaan resonans juga semakin banyak.

Untuk variasi indeks bias mengakibatkan pegeseran dari daerah bandgap makin besarnya nilai indeks bias, daerah *bandgap* akan bergeser ke daerah yang panjang gelombangnya panjang. Sedangkan jumlah keadaan resonansi untuk setiap kurva adalah tetap. Berarti perubahan besar nilai indeks bias kristal, mempengaruhi daerah bandgap, tetapi tidak mempengaruhi keadaan resonan.

Selanjutnya variasikan parameter jumlah lapisan struktur kristal tidak mengakibatkan pegeseran dari daerah bandgap, tetapi semakin besar jumlah lapisan akan semakin banyak pula keadaan resonan. Berarti perubahan jumlah lapisan tidak berpengaruh terhadap daerah *bandgap*, tetapi berpengaruh terhadap keadaan resonan.

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas terlihat bahwa melalui variasi parameter struktur kisi periodik berhingga dapat mempengaruhi daerah *bandgap*. Berarti parameter geometri (tebal lapisan dan jumlah lapisan) serta parameter fisis (indeks bias), rentang panjang gelombang celah pita fotonik ini dapat diatur, sehingga perancangan piranti untuk keperluan penapisan panjang gelombang tertentu dapat dilakukan dengan mengatur besaran parameter tersebut.

KESIMPULAN

Metoda indeks efektif yaitu dengan melakukan aproksimasi geometri dari struktur dielektrik, sehingga sistem dua dimensi ini dipandang sebagai dua buah struktur satu dimensi secara bergantian. Perancangan piranti fotonik 2 dimensi untuk keperluan penapisan panjang gelombang tertentu dapat dilakukan dengan mengatur besaran parameter geometri dan parameter fisis. Melalui variasi parameter geometri (tebal lapisan dan jumlah lapisan) serta parameter fisis (indeks bias), dapat menentukan rentang panjang gelombang celah pita fotonik.

DAFTAR PUSTAKA

- Hasegawa, A dan Y. Kodama (1995), *Solitons in Optical Communications*, Oxford Univ. Press.
- Hidayati** (2007), *Struktur Optik Linier Periodik 1 Dimensi untuk Aplikasi Divais Fotonik*, Prosiding Seminar Nasional Fisika UNAND, Padang .pp.252-262 ISBN 978-979-25-1951-8
- Hidayati** Yulia Jamal, Alexander A. Iskandar, Agoes Soehianie, (2007), *Struktur Optik Linier Periodik untuk Aplikasi Divais Fotonik*, Laporan Penelitian Hibah Pekerti (Tahun Pertama) UNP Padang
- Hidayati** Yulia Jamal, Alexander A. Iskandar, Agoes Soehianie, (2008), *Struktur Optik Linier Periodik untuk Aplikasi Divais Fotonik*, Laporan Penelitian Hibah Pekerti (Tahun Kedua) UNP Padang
- Kittel, C (1996), *Introduction to Solid State Physics 7th ed.*, John Wiley.
- Lee, D.L. (1986), *Electromagnetic Principle of Integrated Optics*, John Wiley & Sons.
- Prawiharjo, J. , A.A. Iskandar, M.O. Tjia and E. van Groesen, *Second Order Approximation for Band Gap Characterization of One Dimensional Dielectric Omnidirectional Reflector*, *J. Nonlin. Opt. Phys. and Mat.* **12**, 263, (2003).
- T. Tamir, ed. (1985), *Integrated Optics*, Springer-Verlag.
- Yablonovitch, E. (2001), *Photonic Crystals: Semiconductor of Light*, Scientific American, **12**.
- Yeh, P. (1988), *Optical Waves in Layered Media*, John Wiley & Sons.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada DIPA DP2M Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional yang telah mendanai penelitian ini, dalam bentuk penelitian Hibah Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi (Hibah Pekerti) tahun 2008.

Disampaikan pada Semirata BKS-PTN 2009 di UNSYIAH, tanggal 4-5 Mei 2009

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG