

**KARAKTERITIK STRUKTUR KISI PERIODIK BERHINGGA
UNTUK SPESIFIKASI FUNGSI PENAPIS FOTONIK**



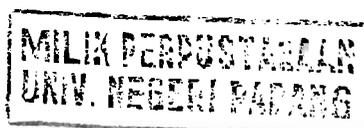
*Disampaikan pada Seminar Nasional Fisika 2008
Di Universitas Negeri Padang
Tanggal 24 Agustus 2008*

MILIK PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
DI TERIMA TEL	11-3-2014
SUMBER/HARGA	Gd
LOKASI	Li
INVENTARIS	SB2 (hd/2014 - k, (r)
KLASIFIKASI	

oleh

Dra. Hidayati, M.Si. dkk

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
AGUSTUS 2008**



KARAKTERITIK STRUKTUR KISI PERIODIK BERHINGGA UNTUK SPESIFIKASI FUNGSI PENAPIS FOTONIK

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

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang

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



ABSTRAK

Perkembangan teknologi fotonik pada dekade terakhir ini telah menunjukkan kemajuan penting dalam aplikasinya pada industri telekomunikasi dan pengolahan informasi optik. Pada sistem optik terintegrasi (*integrated optics*), diperlukan sejumlah piranti fotonik yang memiliki fungsi khusus, salah satunya sebagai penapisan. Suatu struktur sistem dielektrik periodik merupakan sebuah sistem penapis optik. Dalam fungsinya sebagai penapis, respons karakteristik sistem kisi optik ini dinyatakan oleh pola spektrum transmisi dan refleksi. Pada penelitian ini dilakukan studi pola spektrum transmisi/refleksi dari sistem dielektrik periodik 1 dimensi melalui metoda matriks transfer yang menghubungkan amplitudo medan listrik pada setiap lapisan dielektrik. Sebuah program simulasi berbasis perangkat lunak MatLab® telah dibuat untuk perhitungan respons sistem kisi 1D bethingga. Melalui program ini, studi pengaruh variasi parameter geometri (tebal dan jumlah lapisan) serta parameter fisis (indeks bias) pada pola spektrum transmisi dari sistem dielektrik periodik 1 dimensi telah dilakukan.

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

PENDAHULUAN

Teknologi telekomunikasi dan informasi, menjadi bagian yang tak terpisahkan dalam kehidupan sehari-hari. Perkembangan yang terjadi di dunia telekomunikasi adalah tuntutan tersedianya pita frekuensi untuk menyalurkan data yang semakin lebar. Pada masa awalnya, radio memiliki lebar pita 15 kHz, berikutnya TV membutuhkan lebar pita sekitar 6 MHz dengan frekuensi pembawa sekitar 100 MHz. Frekuensi yang dipakai ini masih dikenal sebagai daerah frekuensi gelombang radio. Kelahiran laser pada dekade 1960-an membuka peluang tersedianya pita yang sangat lebar untuk telekomunikasi di daerah frekuensi gelombang cahaya, yang semuanya merupakan bagian dari spektrum frekuensi gelombang elektromagnetik.

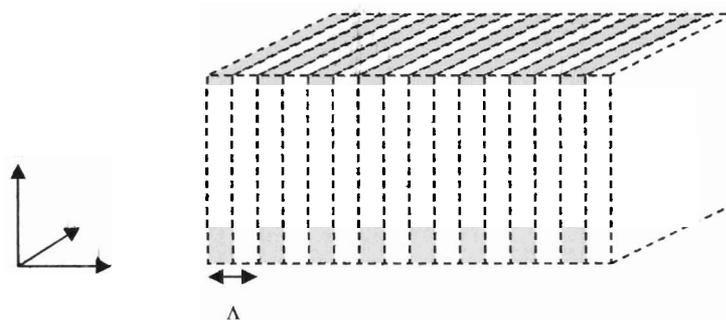
Potensi yang luar biasa pada penggunaan cahaya guna menyalurkan informasi ini menuntut penggunaan komponen pemroses. Walaupun kecepatan komponen elektronik saat ini sedemikian tinggi, banyak yang menduga bahwa batas kecepatan tertinggi untuk komponen elektronik sudah sangat dekat, sehingga diperlukan terobosan

Makalah pada Seminar Nasional Fisika 2008 di UNP, tanggal 24 Agustus 2008

teknologi baru yang mampu bekerja dengan respons yang lebih tinggi lagi. Kemungkinan ini terbuka dengan mempergunakan cahaya sebagai pembawa informasi sekaligus sebagai pengendalinya. Bidang yang mempelajari hal ini dikenal dengan nama Integrated Optics (IO).

Berbeda dengan IC (Integrated Circuit) di mana komponen yang terlibat adalah elektronik, pada IO dipergunakan cahaya untuk mengendalikan cahaya sehingga batas kecepatan respons bisa diatasi. Persamaan antara IC dan IO adalah keduanya mengendalikan dan memroses data. Bedanya, pada IC yang diproses adalah sinyal elektronik, sedangkan pada IO yang diproses adalah sinyal cahaya atau foton.

Komponen-komponen pengolahan yang diperlukan antara lain seperti pemanduan (*guiding*), 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. Pada sistem berlapis jamak 1 dimensi, variasi perubahan medium dielektrik hanya terjadi pada satu arah ruang saja. Kristal fotonik 1 dimensi yang merupakan sistem paling sederhana ini (*1 dimensional photonic crystal*) 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 .

Respons sistem ini terhadap gelombang optik dinyatakan oleh pola spektrum transmisi/refleksi. 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

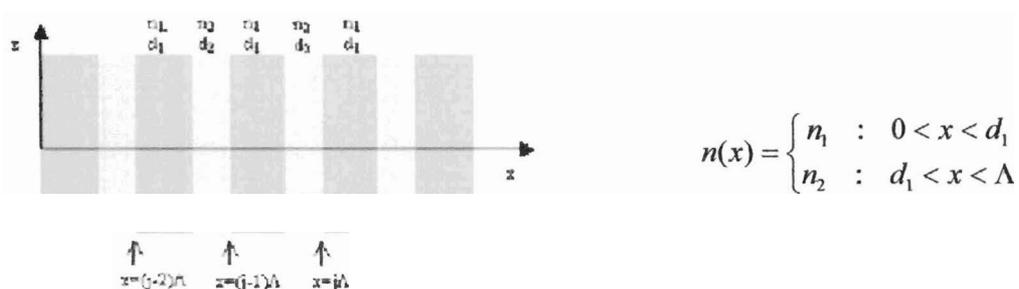
pada arah y membuat sistem kisi ini menjadi *Bragg* reflektor bagi suatu gelombang elektromagnetik yang masuk pada sistem kisi ini dengan arah perambatan efektif dalam arah sumbu y . Lebih lanjut, karena adanya perbatasan medium, gelombang elektromagnetik tersebut akan mengalami peristiwa pembiasan dan 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. 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).

METODOLOGI

Pelaksanaan penelitian diawali dengan menelaah perumusan soal *syarat batas* bagi gelombang dalam sistem periodik satu dimensi, sehingga hubungan antara amplitudo medan-medan dalam setiap medium dinyatakan melalui *matriks transfer karakteristik*. Selanjutnya matriks transfer tersebut dievaluasi dengan menggunakan *model gelombang Bloch* sehingga didapat hubungan dispersi dari sistem periodik ini. 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 menggunakan program Matlab@.

HASIL

Tinjau sistim berlapis jamak yang memiliki profil indeks bias untuk 1 unit blok dasar dari kristal seperti gambar 2 berikut :



Gambar 2. Sistim Gelombang Berlapis Jamak dengan Struktur Kisi Periodik

d_1 dan d_2 adalah lebar lapisan, dengan $d_2 = \Lambda - d_1$ dan Λ perioda. Untuk sistem medium yang periodik ini berlaku : $n(x) = n(x + \Lambda)$ dengan Λ : lebar 1 unit sel.

Untuk kasus ini digunakan asumsi bahwa dimensi dalam arah-z dan arah-y jauh lebih besar dari pada ukuran dalam arah-x. Sehingga medan tidak mengalami gangguan dalam arah-z dan arah-y, berarti distribusi medan dapat dianggap hanya bergantung pada variabel-x. Medan vektor $\vec{E}(r,t)$ dapat dituliskan dalam bentuk :

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

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. Karena periodik, persamaan E_K ditulis sebagai $E_K(x) = E_K(x + \Lambda)$.

Berdasarkan hal di atas dapat dituliskan hubungan antar lapisan dalam bentuk matrik, yaitu berupa persamaan nilai eigen :

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

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:

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

dengan

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

Berdasarkan rumusan matriks M , selanjutnya dapat ditentukan besarnya nilai Transmittansi dan Reflektansi. Nilai ini dapat ditentukan dengan mengasumsikan tidak ada gelombang yang datang dari medium akhir ke medium sebelumnya, sehingga dapat diperoleh :

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

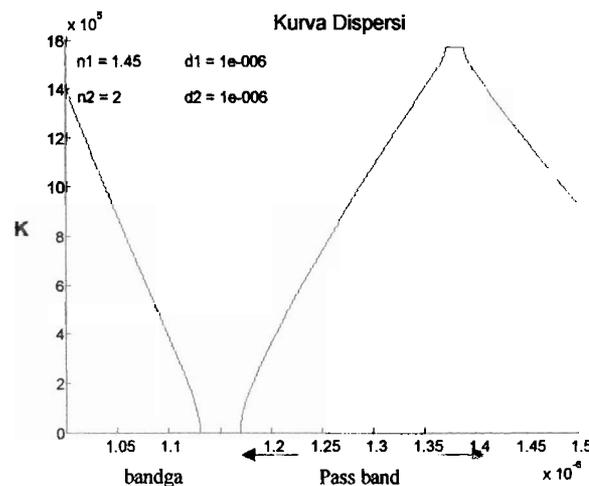
Menggunakan persamaan (5) dapat dilihat bahwa nilai transmittansi ditentukan oleh indeks bias medium dan lebar medium, sudut datang sinar serta periodisitas. Melalui pengaturan sifat medium, piranti optik dapat diatur secara pasif guna mendapatkan fungsi penapis yang tepat dan bagus sesuai yang dikehendaki oleh fabrikasi.

PEMBAHASAN

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

1. Transmittansi Karakteristik dari Struktur Kisi Periodik Berhingga

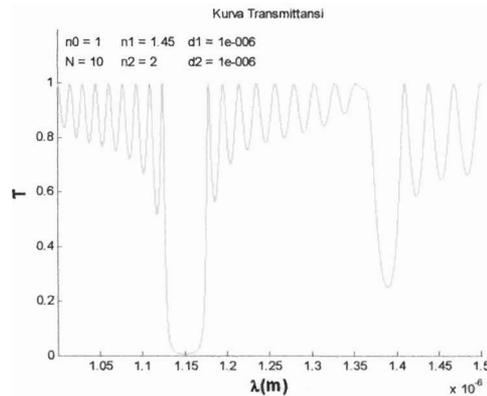
Kurva dispersi untuk melihat hubungan antara panjang gelombang dengan bilangan gelombang Bloch, seperti pada dalam gambar 3 berikut :



Gambar 3. Kurva hubungan antara bilangan gelombang Bloch dengan panjang gelombang. Bila bilangan gelombang Bloch, K , bernilai riil, maka gelombang Bloch dapat berpropagasi. Daerah ini disebut *photonic passband*. Dari kurva dispersi juga dapat dilihat, ada daerah panjang gelombang yang tidak memiliki solusi gelombang Bloch

yang riil. Hal ini mengakibatkan gelombang Bloch tidak dapat berpropagasi (*evanescent*) Pada bagian inilah yang disebut '*photonic bandgaps*' dari medium periodik.

Hubungan antara panjang gelombang dengan nilai Transmittansi seperti gambar 4



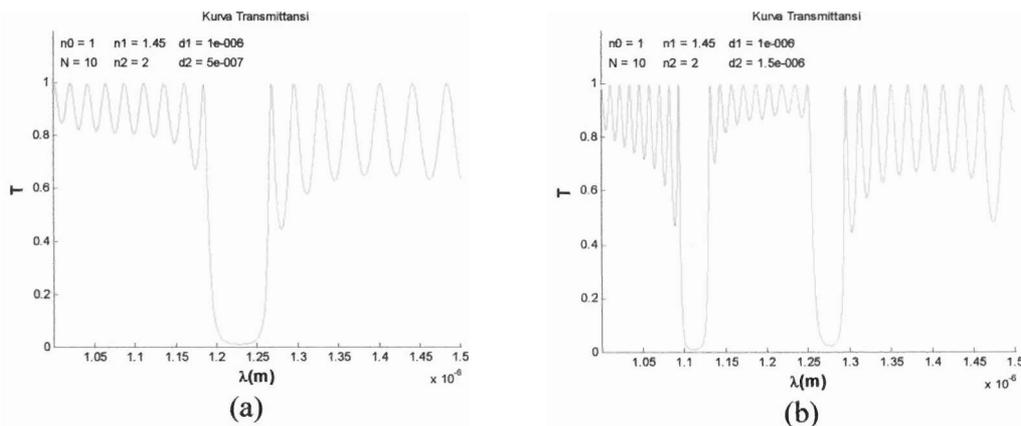
Gambar 4. Kurva Hubungan antara nilai Transmittansi dengan panjang gelombang

Terdapat daerah bandgap yaitu kurva yang paling curam, pada daerah panjang gelombang, λ , sekitar 1.15×10^{-6} m. Ada juga 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.

2. Kurva Transmittansi atas Variasi Parameter Struktur Kisi Periodik Berhingga

Hasil kajian ini nantinya diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar perancangan sistim penapis gelombang untuk aplikasi tertentu. Untuk itu akan ditelaah perubahan kurva transmittansi terhadap variasi beberapa parameter fisis dari struktur kisi periodik berhingga, khususnya yang akan diperhatikan adalah posisi dari bandgap.

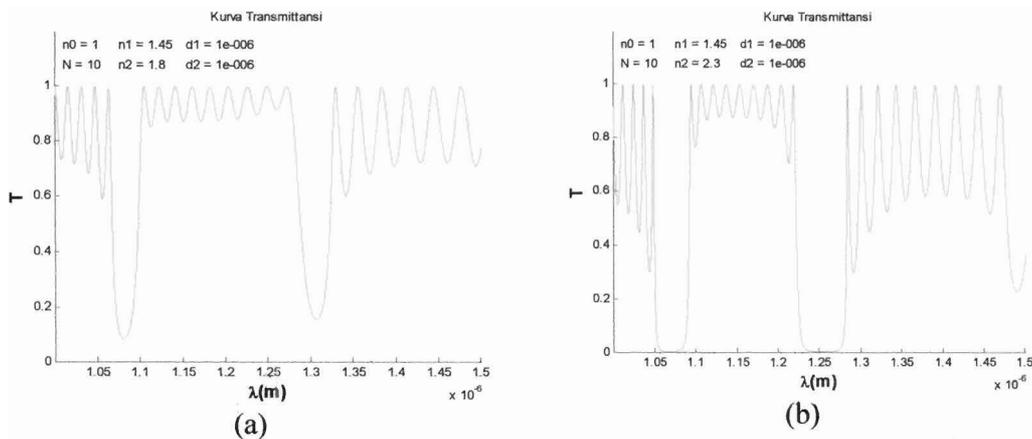
a. Variasi Tebal Struktur Kisi Periodik Berhingga terhadap Bandgap



Gambar 5. Kurva Hubungan antara Nilai Transmittansi dengan Panjang Gelombang Berdasarkan Variasi dari Tebal Struktur Kisi Periodik Berhingga d_2

Variasi ketebalan struktur kristal menggeser daerah *bandgap*. Makin besar nilai ketebalan struktur kristal, daerah *bandgap* akan bergeser ke arah kiri yaitu ke daerah yang panjang gelombangnya pendek. Untuk keadaan resonan Semakin besar nilai ketebalan struktur kristal jumlah keadaan resonans (transmisi 100%) juga semakin banyak.

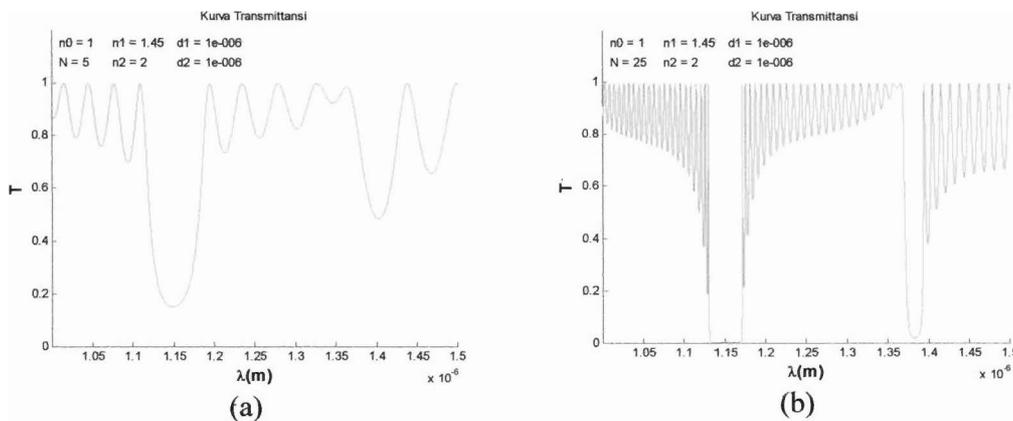
b. Variasi Indeks Bias Struktur Kisi Periodik Berhingga



Gambar 6. Kurva Hubungan antara Nilai Transmittansi Dengan Panjang Gelombang Berdasarkan Variasi Indeks Bias Struktur Kisi Periodik Berhingga n_2

Variasi indeks bias mengakibatkan pegeseran dari daerah bandgap makin besarnya nilai indeks bias, daerah *bandgap* akan bergeser ke arah kanan yaitu 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 (transmisi 100%).

c. Variasi Jumlah Lapisan Struktur Kisi Periodik Berhingga



Gambar 7. Kurva Hubungan antara Nilai Transmittansi dengan Panjang Gelombang Berdasarkan Variasi Jumlah Lapisan Struktur Kisi Periodik Berhingga N

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 (transmisi 100%)

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

Perambatan gelombang elektromagnetik dalam struktur kisi periodik 1 dimensi dapat ditelaah melalui formulasi matriks yang menghubungkan amplitudo-amplitudo gelombang pada setiap lapisan dengan amplitudo gelombang datang dan amplitudo gelombang transmisi. Respons karakteristik dari struktur terhadap gelombang elektromagnetik yang datang, dinyatakan oleh kurva transmitansi dari kisi periodik ini.

Melalui kurva transmitansi tersebut, terlihat respons karakteristik dari struktur kisi periodik 1 dimensi ini. Khususnya, terdapat rentang panjang gelombang tertentu dimana gelombang elektromagnetik yang datang pada struktur kisi periodik ini tidak dapat diteruskan. Rentang panjang gelombang ini disebut Celah Pita Fotonik (*Photonic Bandgap*). Hal ini memungkinkan penggunaan struktur kisi periodik ini sebagai suatu piranti penapis (*filter*).

Melalui variasi parameter geometri (tebal lapisan dan jumlah lapisan) serta parameter fisis (indeks bias), rentang panjang gelombang celah pita fotonik ini dapat diatur. Dengan demikian, perancangan piranti untuk keperluan penapisan panjang gelombang tertentu dapat dilakukan dengan mengatur besaran parameter tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Griffiths, D.J. (1989), *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall
- 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 Jamall, Alexander A. Iskandar, Agoes Soehanie, (2007), *Struktur Optik Linier Periodik untuk Aplikasi Divais Fotonik*, Laporan Penelitian UNP Padang
- Iskandar, A.A, W. Yonan, M.O. Tjia, I. van de Voorde and E. van Groesen, *Effective Medium Formulation for Band Structure Design of a Finite 1D Optical Grating*, submitted to *Jap. Journ. of Appl. Phys.* (2006).
- 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).

