

**LAPORAN AKHIR RESEARCH GRANT  
(REVISI)**

**KRISTAL FOTONIK NONLINIER UNTUK  
APLIKASI ALL-OPTICAL SWITCHING**

Dibiayai oleh Hibah Research Grant Tahun ke-2  
Technological and Professional Skills Development Sector Project  
(TPSDP) Batch III  
ADB Loan No: 1792-INO

Peneliti Utama : Dr. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.  
NIP : 132 169 935  
Program Studi : Fisika  
Batch/Tahun : III/2005

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS PADJADJARAN  
APRIL 2007**

## RINGKASAN

Divais switching optik merupakan suatu komponen yang sangat krusial dalam telekomunikasi untuk pengiriman dan pengolahan data dengan kecepatan tinggi. Divais ini membutuhkan material optik nonlinier, dimana indeks biasnya bergantung pada intensitas cahaya. Kristal fotonik merupakan susunan periodik dari material dengan indeks bias yang berbeda, sehingga membentuk celah pita fotonik; suatu rentang frekuensi dimana cahaya tidak dapat merambat melalui struktur.

Dalam penelitian ini, dipelajari tiga struktur kristal fotonik nonlinier satu-dimensi (1D) untuk aplikasi switching optik. *Pertama*, struktur distributed Bragg Reflector nonlinier yang merupakan struktur kristal fotonik dengan material optik nonlinier. *Kedua*, struktur kristal fotonik yang disisipi lapisan cacat baik cacat geometris maupun cacat indeks bias. Lapisan cacat diletakkan ditengah-tengah struktur. *Ketiga*, kristal fotonik nonlinier yang terbuat dari material dengan indeks bias linier yang sama, namun indeks bias nonliniernya berlawanan tanda. Dari seluruh struktur yang dipelajari, celah pita fotonik dihitung dengan menggunakan metoda matriks transfer.

Dalam struktur pertama, kombinasi indeks bias 1,6 dan 1,8 serta menggunakan material optik nonlinier dengan indeks bias nonlinier  $n_{nl} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{GW}$ , diperoleh kondisi *switching* (perubahan transmitansi 80%) terjadi untuk panjang gelombang 1,555  $\mu\text{m}$  jika intensitas sebesar 15  $\text{GW}/\text{cm}^2$ . Dalam struktur kedua, penyisipan lapisan cacat mengakibatkan munculnya puncak transmitansi pada panjang gelombang tertentu (*defect mode*). Kondisi *switching* pada panjang gelombang 1,55  $\mu\text{m}$  diperoleh dengan kombinasi indeks bias linier 1,7 dan 2,1 serta indeks bias lapisan cacat  $3,7 + 0,0022 I$ . Sedangkan pada struktur yang terakhir, dengan kombinasi indeks bias  $1,5 \pm 0,01 I$ , diperoleh kondisi *switching* sempurna ( $\sim 100\%$ ) untuk panjang gelombang 0,995  $\mu\text{m}$ . Struktur ini dapat juga digunakan sebagai divais optical limiter, suatu divais untuk menyerap laser dengan intensitas sangat tinggi.

Dari ketiga struktur kristal fotonik nonlinier 1D yang dipelajari, reflektor Bragg nonlinier dan kristal fotonik yang disisipi oleh material optik nonlinier (lapisan cacat) sangat cocok untuk aplikasi *switching* optik dalam telekomunikasi. Mekanisme yang efisien untuk *switching* optik adalah *self-phase modulation* karena hanya memerlukan satu sumber cahaya laser.

## LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN

Title : KRISTAL FOTONIK NONLINIER UNTUK APLIKASI  
ALL-OPTICAL SWITCHING

Peneliti Utama : Dr. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.

Anggota Peneliti : Dra. Yayah Yuliah, M.S.

Mahasiswa 1 : Kunti Andyahsari

Mahasiswa 2 : Dian Rahayu Lestari

Mahasiswa 3 : Puspa Kusuna Nagara

Total Biaya : Rp. 27.608.000

Waktu penelitian : Agustus 2005 - Februari 2006

Menyetujui

Ketua Program Studi Fisika

Peneliti Utama

Dr. Hariadi, M.S.

NIP.131409667

Dr. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.

NIP. 132169935

Menyetujui

Direktur SPMU

Drs. Cukup Mulyana, M.S.

NIP. 131567021

# DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	
RINGKASAN	1
LEMBAR IDENSITAS DAN PENGESAHAN	2
DAFTAR ISI	3
DAFTAR GAMBAR	4
I PENDAHULUAN	6
1.1. Latar Belakang	6
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Matriks Transfer pada Kristal Fotonik 1 Dimensi	9
2.2. Transmittansi pada Kristal Fotonik 1 Dimensi	11
III PENDEKATAN MODEL/METODE PENELITIAN	12
3.1. Distributed Bragg Reflector Nonlinier	13
3.2. Kristal Fotonik 1D dengan Lapisan Cacat	16
3.3. Reflektor Bragg Nonlinier dengan indeks bias linier yang sama namun indeks bias nonlinier yang berlawanan tanda	21
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Distributed Bragg Reflector Nonlinier	24
4.2. Kristal Fotonik 1D dengan Lapisan Cacat	27
4.3. Reflektor Bragg Nonlinier dengan indeks bias linier yang sama namun indeks bias nonlinier yang berlawanan tanda	31
V KESIMPULAN DAN SARAN	36
VI PUSTAKA	37
LAMPIRAN	38

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Struktur kristal fotonik 1D dengan arah perambatan cahaya sejajar sumbu-z	9
Gambar 2	Metodologi dan alur penelitian	14
Gambar 3	Struktur kristal fotonik 1D cacat geometris dengan lebar $d_3$	17
Gambar 4	Transmitansi kristal fotonik 1D untuk variasi indeks bias $n_1=1,7$ dan $n_2=2,1$ tanpa cacat (kiri) dan dengan cacat geometris dengan $d_3 = 0,45$ mikrometer (kanan). Jumlah lapisan M dan N masing-masing adalah 10 lapisan	19
Gambar 5	Unit sel kristal fotonik 1D dengan cacat indeks bias $n_3$ .	19
Gambar 6	Transmitansi kristal fotonik 1D dengan cacat indeks bias untuk variasi indeks bias $n_1=1,7$ $n_2=2,1$ dan $n_3 = 3,5$ . Jumlah lapisan M dan N masing-masing adalah 10.	20
Gambar 7	Struktur Reflektor Bragg Nonlinier dengan indeks bias linier sama namun indeks bias nonlinier berlawanan tanda.	21
Gambar 8	Transmitansi sebagai fungsi dari panjang gelombang untuk struktur kristal fotonik 1D linier dengan kombinasi indeks bias 1,8 dan 1,6 dan variasi kedalaman indeks bias 0,008.	24
Gambar 9	Transmitansi struktur untuk beberapa nilai intensitas cahaya datang. Garis vertikal yang memotong panjang gelombang $1,555 \mu\text{m}$ digunakan sebagai acuan untuk proses <i>switching</i> optik.	25
Gambar 10	Perubahan transmitansi panjang gelombang $1,555 \mu\text{m}$ terhadap intensitas cahaya datang (input).	25
Gambar 11	Bistabilitas optik untuk struktur Bragg Reflektor nonlinier dengan berbagai harga $\kappa L$	26
Gambar 12	Proses <i>switching</i> optik dengan cara pengontrolan <i>probe</i> oleh <i>pump</i> ( <i>cross-phase modulation</i> )	27
Gambar 13	Transmitansi kristal fotonik dengan cacat geometris sebagai fungsi dari panjang gelombang dengan jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan	28

Gambar 14	Hubungan ketebalan lapisan cacat dengan panjang gelombang cacat	28
Gambar 15	Transmitansi kristal fotonik dengan cacat indeks bias. Jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan	29
Gambar 16	Hubungan antara indeks bias lapisan cacat dengan panjang gelombang cacat	30
Gambar 17	Transmitansi kristal fotonik dengan cacat indeks bias nonlinier dengan variasi intensitas. Jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan (kiri). Transmitansi puncak <i>defect modes</i> untuk intensitas cahaya $I = 1 \text{ GW/cm}^2$ dan $20 \text{ GW/cm}^2$ (kanan).	31
Gambar 18	Transmitansi struktur kristal fotonik 1D dengan indeks bias $n_0 = 1,5$ dan $n_{nl} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$ untuk jumlah lapisan 10, 200 dan 600. Intensitas input yang digunakan adalah $0,5 \text{ GW/cm}^2$ .	32
Gambar 19	Transmitansi untuk beberapa harga intensitas cahaya datang. Garis vertikal menunjukkan terjadi perubahan transmitansi pada panjang gelombang $0,995 \mu\text{m}$ yang diakibatkan perubahan intensitas cahaya.	33
Gambar 20	Transmitansi panjang gelombang $0,995 \mu\text{m}$ sebagai fungsi dari intensitas cahaya datang (input)	33
Gambar 21	Grafik intensitas output terhadap intensitas input dari struktur Bragg Nonlinier dengan $n_0 = 1,5$ ; $n_{nl} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$ untuk variasi jumlah lapisan	34
Gambar 22	Hubungan antara intensitas limiter terhadap jumlah lapisan N untuk dua nilai indeks bias nonlinier ( $0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$ dan $0,02 \text{ cm}^2/\text{GW}$ ).	35

# I. PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Dalam telekomunikasi, data-data ditransmisikan dengan menggunakan serat optik. Serat optik dapat mengirimkan data dengan lebar pita (*bandwidth*) yang sangat bedar dan kecepatan tinggi. Namun, pemrosesan dan pengaturan (*switching*) data masih menggunakan rangkaian elektronik, sehingga diperlukan konversi data elektronik/optik (E/O) and optik/elektronik. Dengan demikian kecepatan seluruh sistem dibatasi oleh kecepatan rangkaian elektronik. Karena itu, sangat penting untuk dikembangkan divais-divais *switching* optik yang terintegrasi (*all-optical switching devices*) untuk mempercepat pemrosesan data. Berbagai konsep untuk divais *switching* optik terintegrasi (*integrated all-optical switching devices*) telah dipelajari, seperti *nonlinear directional coupler*, *Mach-Zender interferometer*, *Nonlinear X-switch* [1], *nonlinear microcavities* [2] dan *nonlinear Bragg waveguide* [3]. Namun, divais-divais tersebut membutuhkan material optik nonlinier dengan indeks bias nonlinier yang sangat besar agar diperoleh kondisi *switching* yang sempurna (keadaan ON dan OFF yang sepenuhnya dapat dibedakan). Persyaratan tersebut sangat sulit untuk dicapai. Karenanya, sepengetahuan penulis, belum ada divais *switching* optik yang direalisasi sampai saat ini.

Baru-baru ini, kristal fotonik telah banyak menarik perhatian peneliti, baik secara teoritis maupun secara eksperimen. Kristal fotonik adalah struktur periodik dari material dielektrik yang memiliki indeks bias yang berbeda, sehingga memiliki celah pita fotonik (*photonic band gaps, PBG*): yaitu suatu rentang frekuensi dimana cahaya tidak dapat merambat melalui struktur kristal fotonik [4,5]. Secara umum, kristal fotonik dikelompokkan kedalam tiga kategori berdasarkan dimesi dari susunan periodik material dielektriknya: satu-dimensi (1D), dua-dimensi (2D) dan tiga-dimensi (3D). Struktur kristal fotonik diharapkan merupakan suatu kunci untuk divais optik/fotonik dimasa depan. Berbagai divais telah dibuat dengan menggunakan struktur kristal fotonik, seperti laser tanpa ambang (*thresholdless laser*) [6], dioda optik nonlinier [7].

Dalam penelitian ini, telah dipelajari potensi aplikasi kristal fotonik nonlinier 1D untuk *all-optical switching*. *Switching* optik dapat dilakukan melalui dua cara. Pertama, dengan mengkodekan informasi/sinyal input didalam sinyal itu sendiri (*self-*

*phase modulation or self switching*). Kedua, melalui pengontrolan sinyal dengan memberikan dua sinyal masukan ke dalam struktur, yaitu sinyal yang kuat (pump) dan sinyal lemah (probe). Proses yang terakhir disebut *switching* optik melalui *cross-phase modulation*.

## 1.2. Perumusan Masalah

Seperti yang dijelaskan diatas, ada dua mekanisme *switching* optik dengan menggunakan struktur kristal fotonik 1D. Untuk memperoleh suatu struktur dan mekanisme yang efisien dalam proses *switching* (keadaan ON dan OFF yang sepenuhnya dapat dibedakan), maka dipelajari tiga kemungkinan struktur kristal fotonik:

- (i). *Distributed Bragg Reflector Nonlinear*. Dalam struktur ini, material dengan indeks bias yang lebih besar dibuat dari material optik nonlinier, sehingga intensitas cahaya datang akan merubah indeks bias struktur secara keseluruhan. Ada dua mekanisme *switching* yang dipelajari: *self-phase modulation* dan *cross phase modulation*.
- (ii) Struktur kristal fotonik 1D, yang disisipi oleh lapisan cacat di tengah-tengah struktur. Lapisan cacat dapat berbentuk cacat geometris atau cacat indeks bias. Untuk kasus cacat indeks bias, digunakan material optik nonlinier.
- (iii) Struktur kristal fotonik 1D, terdiri dari dua material dengan indeks bias linier yang sama, namun indeks bias nonliniernya berlawanan tanda.

## 1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mencari suatu struktur kristal fotonik yang optimum untuk aplikasi *switching* optik. Dari ketiga struktur yang dipelajari, akan dipilih salah satu struktur dan mekanisme yang terbaik untuk proses *switching*, apakah *self-phase modulation* atau *cross-phase modulation*.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi yang signifikan bagi perkembangan telekomunikasi, khususnya untuk transmisi dan pengolahan data dengan kecepatan yang tinggi. Disamping itu, penelitian ini juga ditujukan sebagai proyek tugas akhir mahasiswa dalam menyelesaikan studi di Jurusan Fisika UNPAD.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Studi kristal fotonik berdasarkan interaksi antara cahaya/gelombang elektromagnetik dengan materi, yang diungkapkan persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell untuk bahan dielektrik yang tidak memiliki sumber muatan bebas dan sumber arus dan tak bersifat magnetik diungkapkan sebagai [8]:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla}_x \vec{H} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$$

Jika medan listrik  $E$  dan medan magnet  $H$  adalah gelombang harmonik  $E = E(r)e^{-i\omega t}$  dan  $H = H(r)e^{-i\omega t}$ , maka persamaan (1) dapat diungkapkan menjadi:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla}_x \vec{H} &= -i\omega \epsilon \vec{E} \\ \vec{\nabla}_x \vec{E} &= i\omega \mu_0 \vec{H}\end{aligned}\quad (2)$$

Dengan menggunakan sifat  $\nabla_x \nabla_x E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ , maka diperoleh persamaan gelombang elektromagnetik :

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{e}_r(\vec{r}) \vec{E} = 0 \quad (3)$$

dimana  $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$  adalah kecepatan gelombang elektromagnetik dalam vakum dan  $\mathbf{e}_r = \mathbf{e}/\epsilon_0$  adalah permitivitas relatif dari bahan.

Dalam penelitian ini, struktur kristal fotonik yang dipelajari adalah struktur 1D, sehingga gelombang elektromagnetik hanya merambat dalam satu arah, misalnya searah sumbu-z. Dengan demikian persamaan (3) menjadi:

$$\left. \begin{aligned}\frac{d^2 E}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(z) E &= 0 \\ \frac{d^2 E}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} n^2(z) E &= 0\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

dengan  $n^2(z) = \epsilon_r(z)$  adalah indeks bias bahan.

Dalam penelitian ini, dipelajari struktur kristal fotonik dengan menggunakan material optik nonlinier, dimana indeks biasanya bergantung pada intensitas cahaya datang  $I$ , seperti yang diungkapkan oleh persamaan (5):

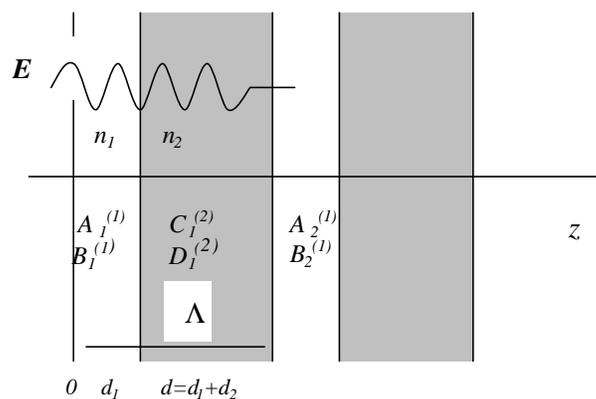
$$n = n_0 + n_{nl}I \quad (5)$$

dimana  $n_0$  adalah indeks bias linier dan  $n_{nl}$  adalah indeks bias nonlinier. Nilai indeks bias nonlinier ini dapat berharga positif atau negatif.

## 2.1. Matriks Transfer pada Kristal Fotonik 1 Dimensi

Kristal fotonik adalah struktur kristal buatan yang tersusun secara periodik dari material optik dengan indeks bias yang berbeda. Dalam keadaan tertentu kristal ini menunjukkan kehadiran celah pita fotonik (*photonic bandgap*) dimana tidak terdapat *photon states*. Keadaan ini menyebabkan cahaya (dengan frekuensi di dalam celah pita) tak dapat menjalar dan akan dipantulkan oleh kristal. Struktur kristal fotonik 1-D terdiri dari lapisan-lapisan material dielektrik dengan indeks bias dan ketebalan yang bervariasi secara periodik, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.1. Variasi indeks bias ini dapat diungkapkan dalam bentuk:

$$n(z) = \begin{cases} n_1; & 0 < z < a \\ n_2; & a < z < \Lambda \end{cases} \quad (6)$$



Gambar 1. Struktur kristal fotonik 1D dengan arah perambatan cahaya sejajar sumbu-z

Untuk memahami perambatan gelombang elektromagnetik dan pembentukan celah pita fotonik pada kristal fotonik 1-D adalah dengan menggunakan metoda **Matriks Transfer**. Solusi persamaan (6) adalah superposisi dari perambatan gelombang dari kanan dan dari kiri. Untuk lapisan dengan indeks bias  $n_1$ , gelombang ke kanan dan ke kiri memiliki amplitudo  $A_1$  dan  $B_1$ , dan untuk lapisan dengan indeks bias  $n_2$  gelombang ke kanan dan ke kiri memiliki amplitudo  $C_1$  dan  $D_1$ . Sehingga untuk lapisan dengan indeks bias  $n_1$  dan  $n_2$  solusi dari persamaan (6) adalah [9]:

$$E(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z} \quad (7)$$

$$E(z) = C_1 e^{ik_2(z-d_1)} + D_1 e^{-ik_2(z-d_1)}$$

Parameter  $k_1$  dan  $k_2$  disebut bilangan gelombang, yang didefinisikan oleh  $k_1 = \omega n_1$  dan  $k_2 = \omega n_2$ . Pada batas antara lapisan ( $z = d_1$ ), solusi dan diferensialnya harus kontinu, sehingga hubungan antara amplitudo panjang gelombang [9] :

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = M_{12} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_1}{k_2} \right) e^{ik_1 d_1} & \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_1}{k_2} \right) e^{-ik_1 d_1} \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_1}{k_2} \right) e^{ik_1 d_1} & \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_1}{k_2} \right) e^{-ik_1 d_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pada  $z = d$ , juga berlaku persyaratan kontinuitas, sehingga:

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M_{21} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

dimana matriks  $M_{21}$  hampir sama dengan persamaan  $M_{12}$  hanya bertukar indeks bias. Penggabungan dari persamaan (8) dan (9) memberikan:

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

dengan  $M = M_{21} M_{12}$ , dengan komponen-komponennya adalah:

$$\begin{aligned}
M(1,1) &= e^{ik_1d_1} \left[ \cos(k_2d_2) + \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\
M(1,2) &= e^{-ik_1d_1} \left[ \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\
M(2,1) &= e^{ik_1d_1} \left[ -\frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\
M(2,2) &= e^{-ik_1d_1} \left[ \cos(k_2d_2) - \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right]
\end{aligned} \tag{11}$$

Matriks  $M$  disebut sebagai Matriks Transfer dari sebuah unit kisi. Matriks  $M$  bergantung kepada frekuensi  $\omega$  dan bersifat unimodular. Karena pada setiap  $\omega$ , matriks  $M$  menggambarkan pola yang unik untuk amplitudo gelombang datar dari lapisan  $n_1$  ke lapisan berikutnya dengan indeks bias  $n_2$ .

## 2.2. Transmittansi pada Kristal Fotonik 1 Dimensi

Diasumsikan susunan periodik dari film multilayer memiliki indeks bias  $n_1$  dan  $n_2$ , dan terdiri dari  $N$  unit sel. Cahaya datang yang memiliki amplitudo dan frekuensi  $\omega$  datang dari sebelah kiri. Kemudian cahaya ini akan berinteraksi dengan struktur ini, menghasilkan gelombang datar yang menjalar ke kanan dengan amplitudo  $t$  pada bagian luar sebelah kanan, dan gelombang datar pantulan dengan amplitudo  $r$  ke sebelah kiri.

Dengan menggunakan teknik transfer matriks, dapat dilihat bahwa hubungan antara amplitudo gelombang datar pada bagian kiri dan kanan diluar kristal adalah:

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = M_t \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$M_t = \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_0}{k_1} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_0}{k_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_0}{k_1} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_0}{k_1} \right) \end{array} \right] M \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_2}{k_1} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) \end{array} \right]^{-1} \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_2}{k_0} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_2}{k_0} \right) \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_2}{k_0} \right) & \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_2}{k_0} \right) \end{array} \right]$$

dengan  $M$  adalah persamaan (11).

Daya transfer dari cahaya datang pada kisi ini pada setiap frekuensi  $\omega$ , diberikan sebagai kuantitas dari transmitansi:

$$T = |t|^2 \quad (13)$$

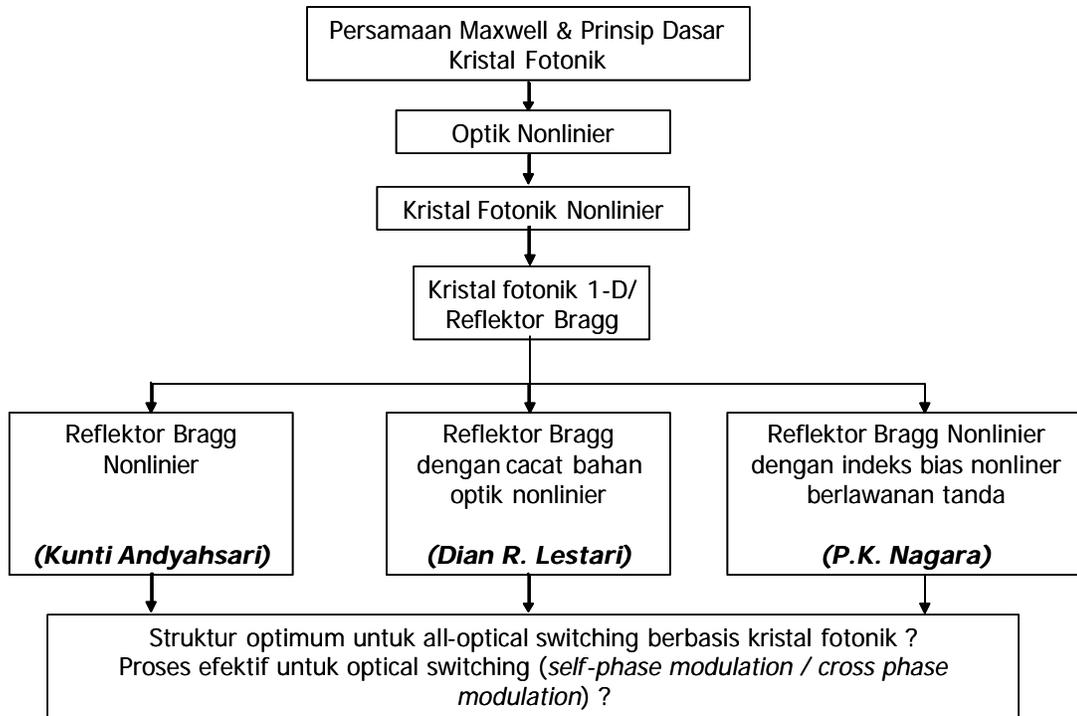
### III. PENDEKATAN MODEL/METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini terdapat tiga struktur kristal fotonik nonlinier 1-dimensi yang dipelajari, yaitu :

- a. *Distributed Bragg Reflector Nonlinear*, dimana material dengan indeks bias yang lebih besar dalam struktur kristal fotonik 1-D dibuat dari material optik nonlinier.
- b. Struktur kristal fotonik 1D yang disisipi oleh lapisan cacat di tengah-tengah struktur, dimana lapisan cacat berbentuk cacat geometris (ketebalan lapisannya berbeda) atau cacat indeks bias (material optik nonlinier).
- c. Struktur kristal fotonik 1D yang terdiri dari dua material dengan indeks bias linier yang sama, namun indeks bias nonliniernya berlawanan tanda.

Metode penelitian yang dilakukan adalah kajian teoritik. Dari masing-masing struktur diatas, celah pita fotonik (*photonic bandgap*) dihitung dengan menggunakan metoda matriks transfer, sedangkan proses perambatan gelombang elektromagnetik didalam struktur digunakan persamaan gelombang. Potensi ketiga struktur kristal fotonik nonlinier 1-D untuk aplikasi *all-optical switching* dan *signal processing (optical limiter)* dipelajari dengan kedua metoda diatas yaitu matriks transfer dan persamaan gelombang. Dalam struktur *distributed bragg reflector nonlinier*, potensi untuk aplikasi *all-optical switching* dipelajari dengan persamaan gelombang elektromagnetik. Sedangkan untuk struktur kristal fotonik 1D dengan lapisan cacat digunakan metoda matriks transfer. Struktur yang ketiga, dipelajari dengan menggunakan metoda matriks transfer dan persamaan gelombang.

Proses studi kristal fotonik nonlinier 1-D untuk aplikasi *all-optical switching* ditunjukkan dalam Gambar 2. Dari ketiga struktur diatas akan dicari struktur optimum untuk aplikasi *all-optical switching* dan juga proses *switching* yang efektif, apakah *self-phase modulation* atau *cross-phase modulation*.



Gambar 2. Metodologi dan alur penelitian

### 3.1. Distributed Bragg Reflektor Nonlinier

#### 3.1.1. Persamaan terkopel nonlinier

Bragg reflektor nonlinier (kristal fotonik 1D nonlinier) pada prinsipnya sama seperti yang ditunjukkan dalam gambar 1, namun materialnya adalah material optik nonlinier, dimana indeks biasnya bergantung pada intensitas cahaya yang masuk ke dalam material [persamaan (5)]. Untuk mengetahui proses perambatan gelombang dan pembentukan celah pita fotonik, maka digunakan persamaan gelombang [persamaan (4)] dengan profil indeks bias :

$$n(z) = n_0 + n_1 \cos Gz + n_{nl} |E(z)|^2 \quad (14)$$

Substitusi persamaan (14) ke dalam persamaan gelombang (4) diperoleh:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left( n_0^2 E(z) + 2n_0 n_1 \cos Gz E(z) + 2n_0 n_{nl} |E(z)|^2 E(z) \right) = 0 \quad (15)$$

Dengan mendefinisikan medan listrik dan intensitas:

$$E(z) = Ae^{i\beta z} + Be^{-i\beta z}$$

$$|E(z)|^2 = (Ae^{i\beta z} + Be^{-i\beta z})(A^*e^{-i\beta z} + B^*e^{i\beta z}) \quad (16)$$

maka persamaan (15) menjadi:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{d^2 A}{dz^2} + 2i\beta \frac{dA}{dz} \right] e^{i\beta z} + \left[ \frac{d^2 B}{dz^2} - 2i\beta \frac{dB}{dz} \right] e^{-i\beta z} + \\ & \left[ 4\beta \kappa A \cos Gz + 2n_0 n_{nl} k_0^2 (|A|^2 + |B|^2) \right] e^{i\beta z} + \\ & \left[ 4\beta \kappa B \cos Gz + 2n_0 n_{nl} k_0^2 (2|B|^2 + |A|^2) \right] e^{-i\beta z} - 2n_0 n_{nl} k_0^2 [A^2 B^* e^{3i\beta z} + B^2 A^* e^{-3i\beta z}] \end{aligned} \quad (17)$$

Dengan menggunakan pendekatan SVA (*slowly varying amplitude approximation*):

$$\left| \frac{d^2 A}{dz^2} \right| \ll \left| \beta \frac{dA}{dz} \right| \quad \text{dan} \quad \left| \frac{d^2 B}{dz^2} \right| \ll \left| \beta \frac{dB}{dz} \right| \quad (18)$$

dan dengan mengelompokkan eksponensial  $-2i\delta z$  dan  $+2i\delta z$ , maka persamaan (17) menjadi :

$$\left. \begin{aligned} i \frac{dA}{dz} &= -n_2 k_0 [ |A|^2 + 2|B|^2 ] A + \kappa B e^{-2i\delta z} \\ i \frac{dB}{dz} &= n_2 k_0 [ 2|A|^2 + |B|^2 ] B + \kappa A e^{2i\delta z} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

dimana  $n_2 k_0 = \alpha$  dan  $\kappa = \omega n_1 / 2c$ . Persamaan (19) disebut sebagai persamaan terkopel (persamaan terdangeng) nonlinier untuk kristal fotonik 1D nonlinier.

### 3.1.2. Bistabilitas Optik

Untuk mempelajari potensi struktur Bragg Reflektor nonlinier untuk *switching* optik, akan ditentukan hubungan antara intensitas masukan (*input*) dan intensitas keluaran (*output*). Proses *switching* dapat dipahami dari grafik bistabilitas optik. Dengan mendefinisikan :

$$\begin{aligned}
A &= |A|e^{i\phi_A(z)} \\
B &= |B|e^{i\phi_B(z)} \\
\psi(z) &= \phi_A(z) - \phi_B(z)
\end{aligned}
\tag{20}$$

dan mensubtitusikan ke dalam persamaan (19) dengan memisahkan bagian yang riil dan imajiner, maka akan diperoleh :

$$\begin{aligned}
\frac{d|A|}{dz} &= \kappa|B|\sin \psi \\
\frac{d|B|}{dz} &= \kappa|A|\sin \psi
\end{aligned}
\tag{21}$$

dan

$$\begin{aligned}
\frac{d\phi_A}{dz} &= \kappa \frac{|B|}{|A|} \cos \psi + \alpha(|A|^2 + 2|B|^2)A \\
\frac{d\phi_B}{dz} &= \kappa \frac{|A|}{|B|} \cos \psi + \alpha(|B|^2 + 2|A|^2)B
\end{aligned}
\tag{22}$$

Dari persamaan (21) dan (22) diperoleh :

$$\cos \psi = -\frac{3\alpha}{\kappa}|A||B|
\tag{23}$$

Transmitansi cahaya yang melewati struktur didefinisikan sebagai :

$$|T|^2 = |A|^2 - |B|^2
\tag{24}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (23) dan (24) ke (22) maka diperoleh:

$$\left( \frac{d|A|^2}{dz} \right)^2 = 4\kappa^2|A|^2(|A|^2 - |T|^2) \left[ 1 - \left( \frac{3\alpha}{\kappa} \right)^2 |A|^2 (|A|^2 - |T|^2) \right]
\tag{25}$$

Selanjutnya dengan mendefinisikan:

$$\begin{aligned}
x &= \frac{2z}{L} \\
|C|^2 &= \frac{2}{3\alpha L} \\
y &= \frac{|A|^2}{|B|^2} \\
I_o &= \frac{|T|^2}{|C|^2}
\end{aligned}
\tag{26}$$

dimana  $L$  adalah panjang struktur kristal fotonik 1D dan  $I_0$  adalah intensitas keluaran yang ternormalisasi terhadap  $|T|^2$ . Dengan batuan persamaan (26), maka persamaan (25) menjadi:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = (y - I_0)\{(\kappa L)^2 y - 4(y - I_0)y^2\} \quad (27)$$

Solusi persamaan (27) adalah fungsi *elliptik Jacobi*, yaitu :

$$y(x) = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + nd \left[ 2Q \left( 1 - \frac{x}{2} \right) m \right] \right\} \quad (28)$$

dimana

$$m = \sqrt{\frac{(\kappa L)^2}{(I_0^2 + (\kappa L)^2)}} \quad (29)$$

$$Q = \sqrt{I_0^2 + (\kappa L)^2}$$

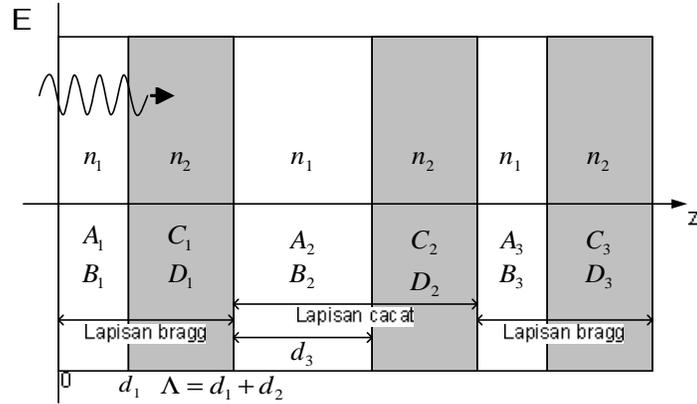
Intensitas masukan ternormalisasi diperoleh dari syarat batas pada  $x = 0$  [ $i = y$  ( $x = 0$ )], maka hubungan antara intensitas keluaran dan intensitas masukan adalah :

$$I_0 = \frac{2I_i}{1 + nd(2Q|m)} \quad (30)$$

## 3.2. Kristal Fotonik 1D dengan Lapisan Cacat

### 3.2.1 Matriks Transfer Unit Sel Cacat Geometris Tunggal

Cacat geometris di dalam struktur kristal fotonik 1D dibuat dengan merubah ketebalan lapisan material dengan indeks bias  $n_j$ , seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3. Untuk mengetahui transmitansi dari struktur diatas, diperlukan susunan matriks transfer persamaan (8). Secara umum terdapat beberapa lapisan Bragg (periodik sederhana) di sebelah kanan maupun kiri lapisan cacat, namun cukup ditinjau sebuah unit sel kristal fotonik satu dimensi dengan cacat yang diapit oleh satu lapisan Bragg dikanan maupun kirinya.



Gambar 3. Struktur kristal fotonik 1D cacat geometris dengan lebar  $d_3$

Matriks transfer diperoleh dengan cara meninjau syarat kontinuitas dan periodisitas medan listrik yang menjalar dalam kristal fotonik. Pada kasus ini, kontinuitas ditinjau pada 5 titik yaitu pada  $z = d_1$  sampai  $z = 2(d_1 + d_2) + d_3$ . Jika semua matriks digabungkan, maka akan diperoleh matriks transfer total:

$$\begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Jika dianggap keseluruhan matriks merupakan satu unit sel maka:

$$\begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_{N-1} \\ B_{N-1} \end{pmatrix} \quad (32)$$

Matriks transfer total merupakan perkalian matriks-matriks yang diperoleh dari syarat kontinuitas dan periodisitas. Jika dicermati lebih jauh, matriks transfer juga dapat diperoleh dari perkalian tiga matriks Bragg, dimana matriks Bragg dengan tebal  $d_1$  dan  $d_2$  terdapat pada lapisan ke-1 dan ke-3, sedangkan matriks Bragg dengan tebal  $d_3$  dan  $d_2$  disebut matriks cacat. Dengan asumsi tersebut, maka:

$$M = \begin{pmatrix} A_B & B_B \\ C_B & D_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_B & B_B \\ C_B & D_B \end{pmatrix} \quad (33)$$

Indeks B menunjukkan komponen matriks Bragg dan D menunjukkan komponen matriks cacat. Ketiga matriks (Bragg-Cacat-Bragg) pada persamaan tidak komut satu sama lain akan tetapi trace (perkalian diagonal komponen A dan C) dari ketiga

matriks sama. Karena itu relasi dispersi tidak bisa diperoleh dengan mengalikan nilai eigennya.

Matriks transfer total untuk cacat diapit oleh matriks Bragg sejumlah  $N$  lapisan disebelah kiri dan  $M$  lapisan disebelah kanan adalah :

$$M = \begin{pmatrix} A_B & B_B \\ C_B & D_B \end{pmatrix}^N \cdot \begin{pmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_B & B_B \\ C_B & D_B \end{pmatrix}^M \quad (34)$$

dengan komponen-komponennya adalah:

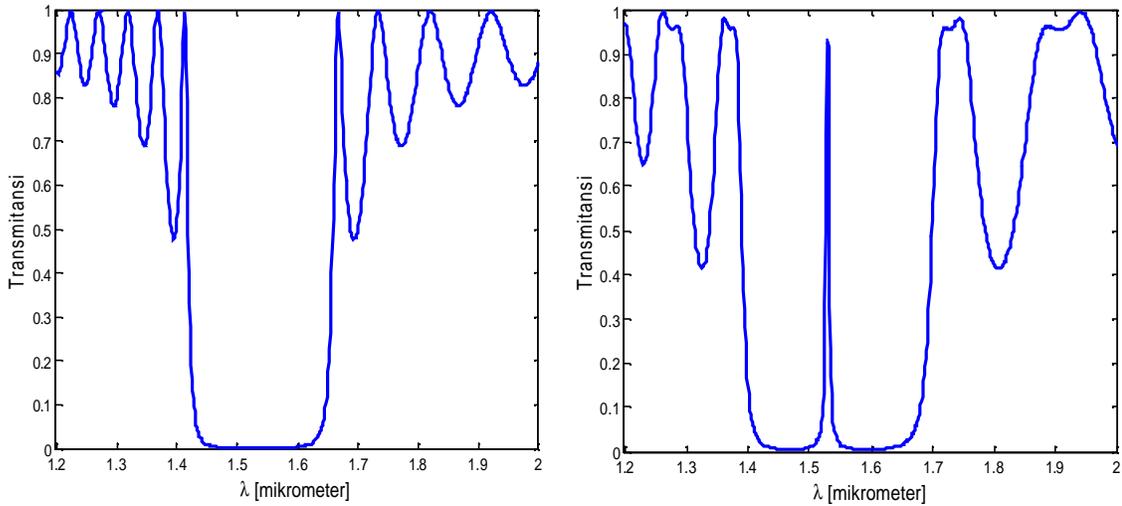
$$\begin{aligned} M(1,1) &= e^{ik_1j} \left[ \cos(k_2d_2) + \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\ M(1,2) &= e^{-ik_1j} \left[ \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\ M(2,1) &= e^{ik_1j} \left[ -\frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \\ M(2,2) &= e^{-ik_1j} \left[ \cos(k_2d_2) - \frac{1}{2}i \left( \frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2d_2) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

dimana  $j$  memenuhi:

$$j = \begin{cases} d_1 : \text{untuk komponen Bragg} \\ d_3 : \text{untuk komponen cacat} \end{cases}$$

Matriks dalam persamaan (34) adalah matriks translasi unit sel yang berhubungan dengan amplitudo kompleks dari gelombang datang  $A_{N-1}$  dan gelombang pantul  $B_{N-1}$  dalam satu lapisan dari sebuah unit sel yang ekuivalen dengan lapisan selanjutnya. Transmittansi dihitung dengan menggunakan persamaan (12) dan (13).

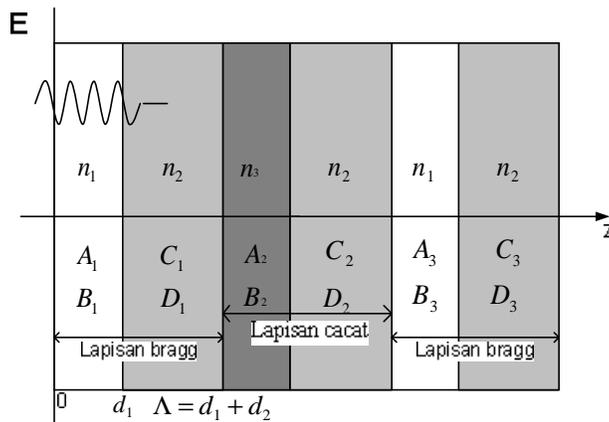
Transmittansi kristal fotonik 1D untuk variasi indeks bias  $n_1=1,7$  dan  $n_2=2,1$  tanpa dan dengan cacat geometris (ketebalan  $d_3 = 0,45$  mikrometer) dengan jumlah lapisan 10 ditunjukkan pada gambar 4. Dengan adanya lapisan cacat geometris, maka muncul moda pada celah pita terlarang (*defect mode*) dengan panjang gelombang cacat  $\lambda_C = 1,53 \mu\text{m}$ .



Gambar 4. Transmittansi kristal fotonik 1D untuk variasi indeks bias  $n_1=1,7$  dan  $n_2=2,1$  tanpa cacat (kiri) dan dengan cacat geometris dengan  $d_3 = 0,45$  mikrometer (kanan). Jumlah lapisan M dan N masing-masing adalah 10 lapisan

### 3.2.2. Matriks Transfer Unit Sel Cacat Indeks Bias Tunggal

Pada cacat indeks bias tunggal setiap lapisan memiliki lebar yang sama yakni  $\Lambda = d_1 + d_2$ . Indeks bias pada lapisan pertama cacat menjadi  $n_3$ . Struktur kristal fotonik 1D dengan cacat indeks bias ditunjukkan dalam gambar 5.



Gambar 5. Unit sel kristal fotonik 1D dengan cacat indeks bias  $n_3$ .

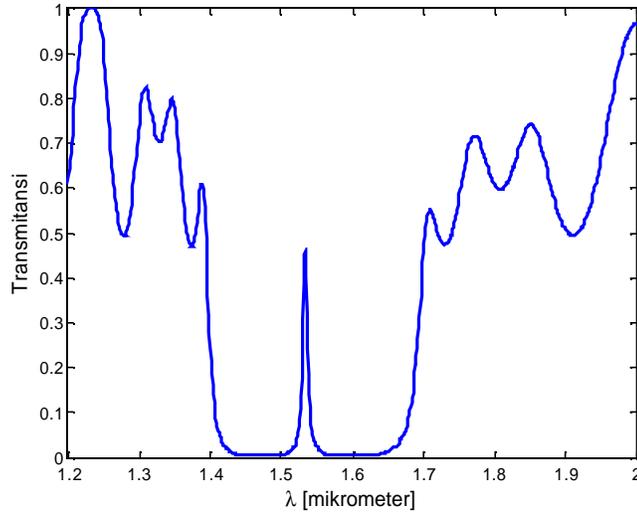
Komponen matriks  $A, B, C,$  dan  $D$  hampir serupa dengan defek geometris yakni:

$$\begin{aligned}
 M(1,1) &= e^{ik_j d_1} \left[ \cos(k_2 d_2) + \frac{1}{2} i \left( \frac{k_2}{k_j} + \frac{k_j}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
 M(1,2) &= e^{-ik_j d_1} \left[ \frac{1}{2} i \left( \frac{k_2}{k_j} - \frac{k_j}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
 M(2,1) &= e^{ik_j d_1} \left[ -\frac{1}{2} i \left( \frac{k_2}{k_j} - \frac{k_j}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
 M(2,2) &= e^{-ik_j d_1} \left[ \cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2} i \left( \frac{k_2}{k_j} + \frac{k_j}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right]
 \end{aligned} \tag{36}$$

dimana  $j$  memenuhi:

$$j = \begin{cases} 1: & \text{untuk komponen Bragg} \\ 3: & \text{untuk komponen cacat} \end{cases}$$

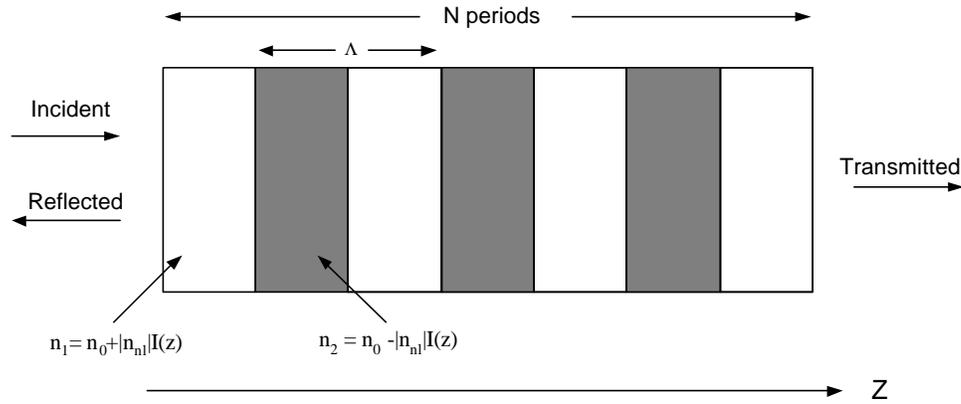
Transmitansi dengan penyisipan lapisan tunggal dengan indeks bias  $n_3 = 3,5$  ditunjukkan pada gambar 6. Lapisan ini menghasilkan moda pada celah pita terlarang dengan  $I_C = 1,53 \mu\text{m}$ .



Gambar 6. Transmitansi kristal fotonik 1D dengan cacat indeks bias untuk variasi indeks bias  $n_1=1,7$  ;  $n_2=2,1$  dan  $n_3 = 3,5$ . Jumlah lapisan M dan N masing-masing adalah 10.

### 3.3. Reflektor Bragg Nonlinier dengan indeks bias linier yang sama namun indeks bias nonlinier yang berlawanan tanda

Struktur Reflektor Bragg Nonlinier yang dipelajari untuk kasus ketiga diilustrasikan dalam gambar 8 :



Gambar 8. Struktur reflektor Bragg nonlinier dengan indeks bias linier sama namun indeks bias nonlinier berlawanan tanda.

Struktur di atas disusun dari dua material berbeda yang mempunyai indeks bias nonlinier berlawanan. Indeks bias dari struktur di atas dapat dinyatakan sebagai :

$$n = n_0 \pm n_{nl} I \quad (37)$$

dengan  $n_0$  merupakan indeks bias linier dan  $n_{nl}$  adalah indeks bias nonlinier yang dapat bernilai positif atau negatif. Untuk mengetahui penjalaran gelombang, baik yang ditransmisikan atau yang dipantulkan, disamping menggunakan matriks transfer [persamaan (11)], digunakan juga persamaan gelombang [persamaan (4)] untuk propagasi gelombang *forward* dan *backward* dengan asumsi bahwa absorpsi material diabaikan [10]:

$$i \frac{dA_1(z)}{dz} = \frac{\omega}{c} \left\{ \left[ (n_{01} - n_{02}) + (n_{n1} - n_{n2}) I(z) \right] \exp \left( -i \frac{\pi d_2}{\Lambda} \right) \frac{\sin \frac{\pi d_2}{\Lambda}}{\pi} \times A_2(z) \exp \left[ i \left( \frac{2\omega n_0}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) z \right] \right\} - \frac{\omega}{c} \left[ \bar{n}_{nl} I(z) \times A_1(z) \right]$$

$$i \frac{dA_2(z)}{dz} = -\frac{\omega}{c} \left\{ [(n_{01} - n_{02}) + (n_{nl1} - n_{nl2})I(z)] \exp\left(-i \frac{\pi d_2}{\Lambda}\right) \frac{\sin \frac{\pi d_2}{\Lambda}}{\pi} \times A_1(z) \exp\left[i \left(\frac{2\omega n_0}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right)z\right] \right\} + \frac{\omega}{c} [\bar{n}_{nl} I(z) \times A_2(z)] \quad (38)$$

dimana  $A_1$  adalah koefisien dari propagasi gelombang *forward* dan  $A_2$  adalah koefisien dari propagasi gelombang *backward*,  $\omega$  adalah frekuensi dari radiasi,  $c$  adalah kecepatan cahaya dalam vakum. Intensitas cahaya datang didefinisikan sebagai

$$I(z) = |A_1(z)|^2 + |A_2(z)|^2 \quad (39)$$

dimana  $k$  adalah bilangan gelombang dari cahaya dan  $\Lambda$  adalah perioda dari grating.

$$n_0 = \frac{n_{01}d_1 + n_{02}d_2}{\Lambda},$$

$$\bar{n}_{nl} = \frac{n_{nl1}d_1 + n_{nl2}d_2}{\Lambda} \quad (40)$$

adalah berturut-turut indeks bias linier rata-rata dan indeks bias nonlinier rata-rata dari medium, sedangkan  $d_1$  dan  $d_2$  merupakan ketebalan dari masing-masing lapisan dalam medium. Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa  $n_{01} = n_{02}$  dan  $n_{nl1} = n_{nl2}$ , maka persamaan (38) menjadi :

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -\frac{\omega}{c} \frac{2n_{nl}}{\pi} [|A_1(z)|^2 + |A_2(z)|^2] A_2(z) \exp\left[i \left(\frac{2\omega n_0}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right)z\right]$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -\frac{\omega}{c} \frac{2n_{nl}}{\pi} [|A_1(z)|^2 + |A_2(z)|^2] A_1(z) \exp\left[-i \left(\frac{2\omega n_0}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right)z\right] \quad (41)$$

Solusi pada keadaan *resonansi* ( $2\omega n_0 / c = 2\pi / \Lambda$ ), diperoleh dengan menerapkan syarat batas pada  $z = L$ , dimana  $L$  merupakan panjang dari struktur:  $A_2(L) = 0$ , artinya tidak ada radiasi yang masuk pada struktur dari sebelah kanan, dan  $A_1(L) = A_{1,out}$  sehingga:

$$A_1(z) = \left\{ \frac{1 + 2 \exp\left[\frac{-4iI_{\text{out}}n_{\text{nl}}(L-z)}{\Lambda n_0}\right] + \exp\left[\frac{-8iI_{\text{out}}n_{\text{nl}}(L-z)}{\Lambda n_0}\right]}{2 + 2 \exp\left[\frac{-8iI_{\text{out}}n_{\text{nl}}(L-z)}{\Lambda n_0}\right]} \right\}^{1/2} A_{1\text{out}} \quad (42)$$

Intensitas di dalam struktur didefinisikan sebagai :

$$I(z) = |A_1(z)|^2 = \frac{\left| 1 + \cos\left(\frac{4I_{\text{out}}n_{\text{nl}}(L-z)}{\Lambda n_0}\right) \right|}{\left| 2 \cos\left(\frac{4I_{\text{out}}n_{\text{nl}}(L-z)}{\Lambda n_0}\right) \right|} I_{\text{out}} \quad (43)$$

dimana  $I_{\text{out}} = |A_{1\text{out}}|^2$ .

Dengan menerapkan syarat batas pada  $z = 0$ , maka diperoleh intensitas input sebagai:

$$\begin{aligned} I_{\text{in}} = I(z)|_{z=0} &= \frac{1}{2} \left| \frac{1}{\cos\left(\frac{4I_{\text{out}}n_{\text{nl}}L}{\Lambda n_0}\right)} + 1 \right| I_{\text{out}} \\ &= \frac{1}{2} \left| \frac{1}{\cos\left(\frac{4I_{\text{out}}}{a}\right)} + 1 \right| I_{\text{out}} \end{aligned} \quad (44)$$

dengan  $a = \frac{2n_0}{Nn_{\text{nl}}}$  dan  $N = \frac{2L}{\Lambda}$  adalah banyaknya lapisan. Struktur kristal fotonik ini juga dapat menunjukkan karakteristik *optical limiter*, dimana intensitas output berharga konstan untuk nilai intensitas input yang besar.

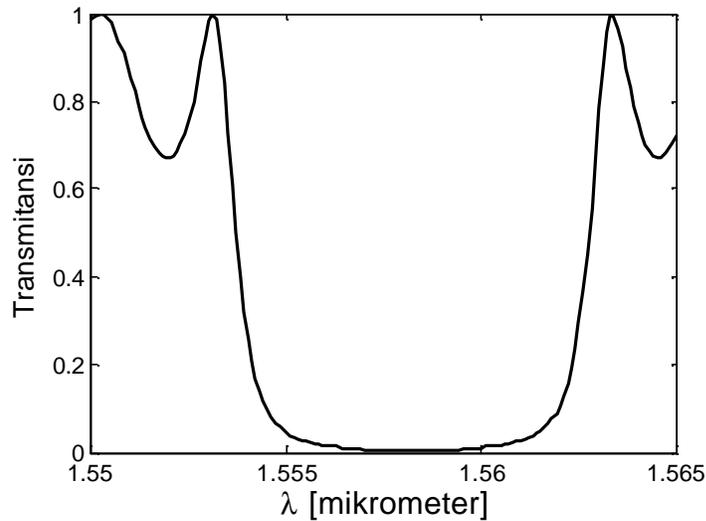
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Distributed Bragg Reflector Nonlinier

Dengan menggunakan material dengan indeks bias lapisan A,  $n_A = 1,8$  dan lapisan B,  $n_B = 1,6$ , maka indeks bias efektif dari medium adalah  $n_o = (n_A + n_B)/2$ . Variasi kedalaman indeks bias diasumsikan  $n_1 = 0,008$ . Dengan menggunakan persamaan (19) untuk kasus material optik linier ( $n_{nl} = 0$ ) dan dengan menerapkan syarat batas pada  $z = 0$  dan  $z = L$ , diperoleh persamaan [11]:

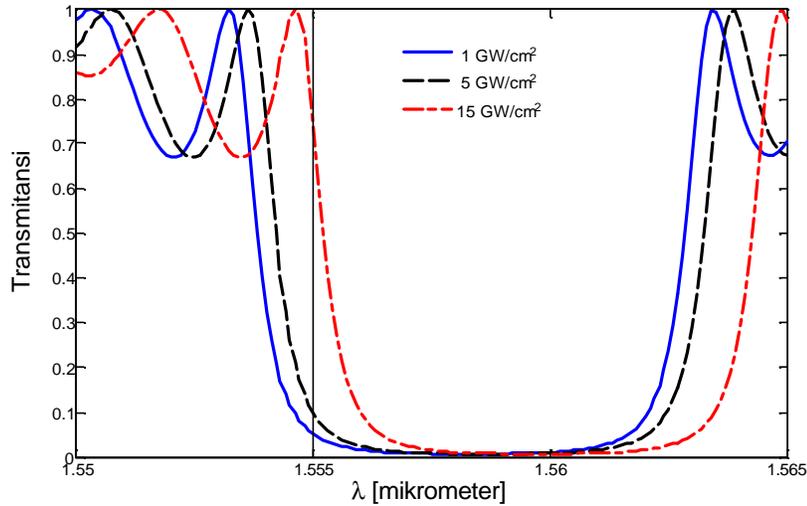
$$T = \frac{s^2(\cosh^2 sL - \sinh^2 sL)}{s^2 \cosh^2 sL + \delta^2 \sinh^2 sL} \quad (45)$$

dimana besaran-besaran  $s$ ,  $L$  dan  $d$  telah didefinisikan dalam referensi [11]. Grafik transmitansi sebagai fungsi dari panjang gelombang untuk struktur tersebut ditunjukkan dalam gambar 8.



Gambar 8 Transmitansi sebagai fungsi dari panjang gelombang untuk struktur kristal fotonik 1D linier dengan kombinasi indeks bias 1,8 dan 1,6 dan variasi kedalaman indeks bias 0,008.

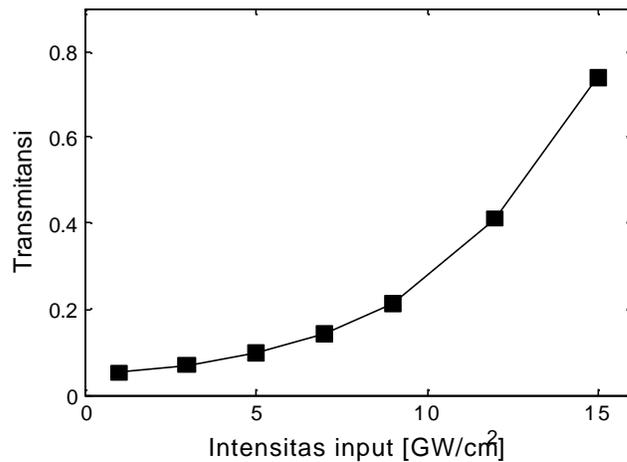
Jika kristal fotonik dibuat dari material optik nonlinier dengan indeks bias nonlinier  $n_{nl} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{GW}$ , maka intensitas cahaya datang akan merubah nilai indeks bias struktur secara keseluruhan, sehingga celah pita fotonik akan bergeser, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 9. Dengan bertambahnya intensitas cahaya, maka bandgap bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar.



Gambar 9 Transmittansi struktur untuk beberapa nilai intensitas cahaya datang. Garis vertikal yang memotong panjang gelombang 1,555  $\mu\text{m}$  digunakan sebagai acuan untuk proses *switching* optik.

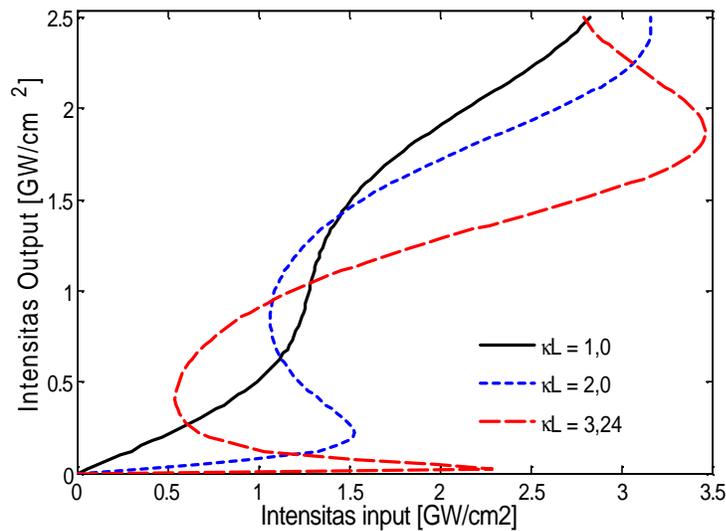
#### 4.1.1. Switching Optik

Proses *switching* optik yang menggunakan struktur distributed Bragg Reflector nonlinier, ditunjukkan oleh garis vertikal pada gambar 8. Transmittansi pada panjang gelombang 1,555  $\mu\text{m}$  meningkan dengan bertambahnya intensitas cahaya datang. Perubahan transmittansi oleh intensitas cahaya disebut *switching* optik melalui *self-phase modulation*. Secara rinci proses *switching* untuk panjang gelombang 1,555  $\mu\text{m}$  ditunjukkan dalam gambar 10.



Gambar 10. Perubahan transmittansi panjang gelombang 1,555  $\mu\text{m}$  terhadap intensitas cahaya datang (input).

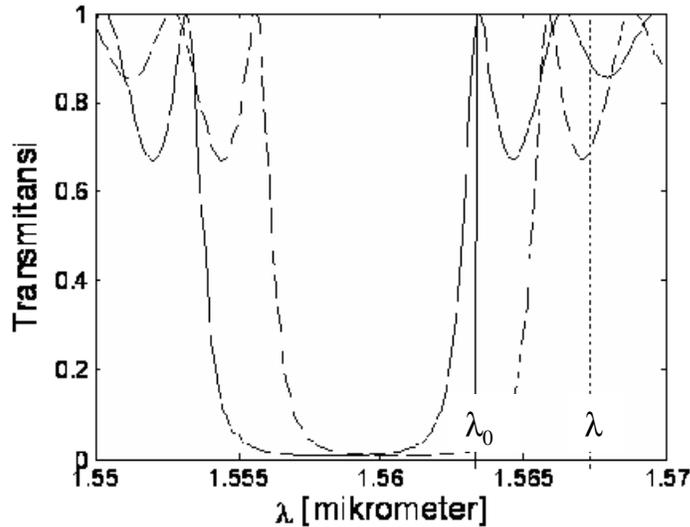
Untuk mempelajari apakah dalam struktur diatas terjadi bistabilitas optik, maka digunakan persamaan (30), dengan menggunakan parameter-parameter seperti yang dicantumkan diatas, dimana solusinya adalah fungsi eliptik Jacobi. Grafik bistabilitas optik untuk beberapa harga  $\kappa L$  ditunjukkan dalam gambar 11. Tampak bahwa proses bistabilitas optik terjadi untuk nilai  $\kappa L$  yang besar, artinya variasi kedalaman indeks bias yang besar ( $n_1$ ), berdasarkan  $\kappa = \omega n_1 / 2c$ .



Gambar 11 Bistabilitas optik untuk struktur Bragg Reflektor nonlinier dengan berbagai harga  $\kappa L$

Proses *switching* kedua yang dapat dilakukan dengan menggunakan struktur ini adalah melalui *cross-phase modulation*. Dalam proses ini diperlukan dua berkas cahaya input dengan intensitas yang berbeda: intensitas yang kuat disebut *pump* dan intensitas yang lemah disebut *probe*. Diasumsikan bahwa panjang gelombang *pump* adalah  $\lambda$  dan panjang gelombang *probe* adalah  $\lambda_0$ . Jika  $\lambda_0$  dan  $\lambda$  keduanya terletak pada daerah di luar celah pita (*bandgap*), namun  $\lambda_0$  terletak di dekat celah pita sedangkan  $\lambda$  berada jauh dari celah pita, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 12. Jika intensitas *pump* dinaikkan, indeks bias medium berubah, maka posisi  $\lambda_0$  menjadi berada di dalam celah pita sedangkan  $\lambda$  tetap terletak di luar celah pita. Dengan demikian intensitas *probe* dipantulkan total dan terjadi perubahan transmitansi *probe* dari transmitansi tinggi menjadi rendah. Proses *switching* optik yang dilakukan

dengan cara mengontrol cahaya *probe* dengan *pump* disebut *cross-phase modulation*. Sehingga, proses switching dalam struktur ini dapat dilakukan dengan dua cara yakni *self-phase modulation* dan *cross-phase modulation*. Namun secara praktis, cara *cross-phase modulation* kurang efisien karena memerlukan dua sumber cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda.

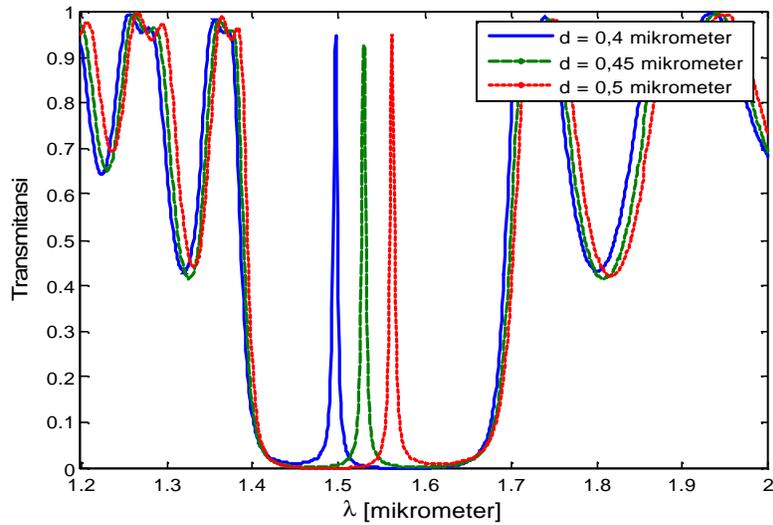


Gambar 12. Proses *switching* optik dengan cara pengontrolan *probe* oleh *pump* (*cross-phase modulation*)

## 4.2. Kristal Fotonik 1D dengan Lapisan Cacat

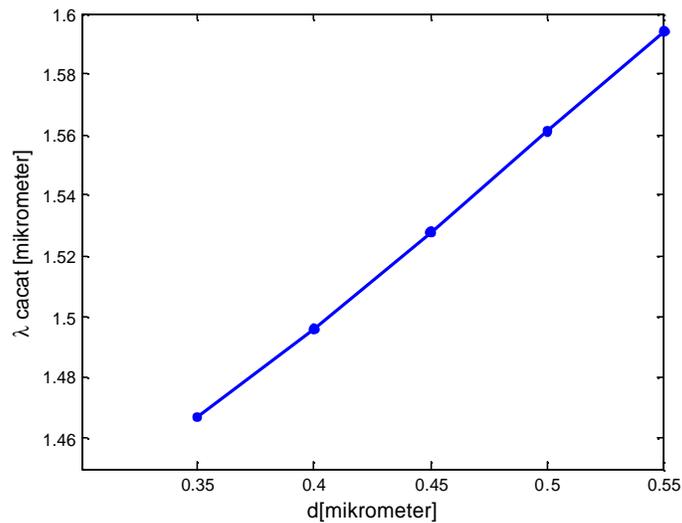
### 4.2.1 Kristal Fotonik 1D dengan Cacat Geometris Tunggal

Perhitungan transmittansi sebagai fungsi dari panjang gelombang ( $\lambda$ ) untuk struktur ini digunakan tiga nilai lebar lapisan cacat,  $d_3$ , yang berbeda. Indeks bias struktur ini adalah  $n_1 = 1,7$  dan  $n_2 = 2,1$ . Lebar lapisan  $d_1 = 0,225 \mu\text{m}$  dan  $d_2 = 0,182 \mu\text{m}$ , sedangkan lebar lapisan cacat,  $d_3$  adalah berturut-turut 0,4; 0,45 dan  $0,5 \mu\text{m}$ . Jumlah lapisan Bragg disebelah kiri lapisan cacat dan sebelah kanan lapisan cacat masing-masing adalah 10 lapisan. Grafik transmisi untuk cacat geometris tunggal untuk berbagai harga lebar lapisan cacat ditunjukkan dalam gambar 13. Tampak bahwa jika lebar lapisan cacat bertambah, maka posisi puncak transmittansi pada celah pita (*defect mode*) bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar.



Gambar 13. Transmittansi kristal fotonik dengan cacat geometris sebagai fungsi dari panjang gelombang dengan jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan

Gambar 14 menunjukkan hubungan antara lebar lapisan cacat dengan panjang gelombang cacat. Untuk telekomunikasi, panjang gelombang transmisi yang dibutuhkan adalah sekitar 1,55  $\mu m$ .

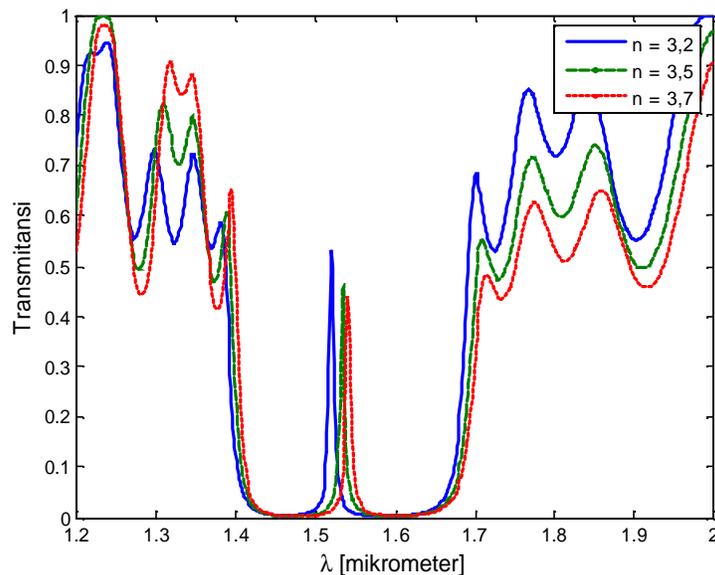


Gambar 14. Hubungan ketebalan lapisan cacat dengan panjang gelombang cacat

Dari grafik transmitansi diatas dapat dilihat untuk  $d_3 = 0,4 \text{ } \mu\text{m}$  diperoleh  $I_c = 1,496 \text{ } \mu\text{m}$ , untuk  $d_3 = 0,45 \text{ } \mu\text{m}$  diperoleh  $I_c = 1,529 \text{ } \mu\text{m}$ , dan untuk  $d_3 = 0,5 \text{ } \mu\text{m}$  diperoleh  $I_c = 1,561 \text{ } \mu\text{m}$ . Harga  $d_3$  yang paling mendekati kebutuhan panjang gelombang transmitansi telekomunikasi adalah  $d_3 = 0,5 \text{ } \mu\text{m}$ . Dengan demikian, maka semakin besar lebar struktur cacat, panjang gelombang cacat yang dihasilkan akan semakin besar, sehingga transmitansi panjang gelombang  $I_c = 1,55 \text{ } \mu\text{m}$  dapat diubah dengan merubah lebar lapisan cacat.

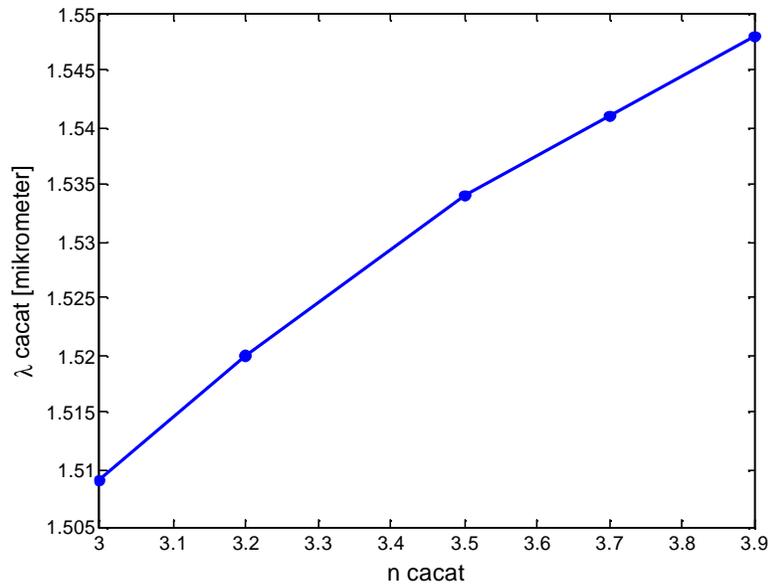
#### 4.22 Kristal Fotonik 1D dengan Cacat Indeks Bias Tunggal

Transmitansi untuk lapisan Bragg dengan  $n_1 = 1,7$  dan  $n_2 = 2,1$  ditunjukkan dalam Gambar 15. Lebar lapisan Bragg  $d_1$  dan  $d_2$  adalah  $d_1 = 0,225$  mikrometer dan  $d_2 = 0,182$  mikrometer. Indeks bias lapisan cacat,  $n_3$  adalah berturut-turut 3,2; 3,5 dan 3,7. Sedangkan lebar lapisan cacat adalah  $d_3 = d_1 = 0,225 \text{ } \mu\text{m}$  dan  $d_2 = 0,182 \text{ } \mu\text{m}$ .



Gambar 15 Transmitansi kristal fotonik dengan cacat indeks bias. Jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan

Dari grafik transmitansi diatas untuk nilai  $n_3 = 3,2$  diperoleh  $I_D = 1,52 \text{ mm}$ , untuk  $n_3 = 3,5$  diperoleh  $I_D = 1,534 \text{ mm}$ , dan untuk  $n_3 = 3,7$  diperoleh  $I_D = 1,541 \text{ mm}$ . Harga  $d_3$  yang paling mendekati kebutuhan panjang gelombang transmitansi telekomunikasi adalah  $n_3 = 3,7$ . Semakin besar indeks bias lapisan cacat, maka panjang gelombang cacat yang dihasilkan akan semakin besar pula, seperti yang digambarkan oleh gambar 16.

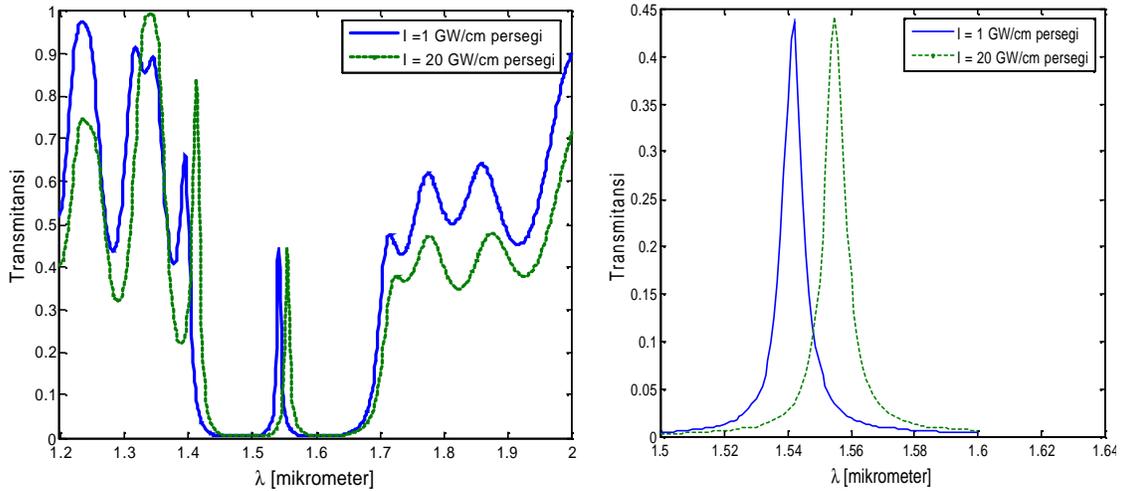


Gambar 16. Hubungan antara indeks bias lapisan cacat dengan panjang gelombang cacat

#### 4.2.3. Aplikasi Switching Optik

Untuk *switching* optik, lapisan cacat tunggal kristal fotonik digunakan material yang memiliki indeks bias nonlinier, yaitu indeks biasnya bergantung pada intensitas cahaya input. Gambar 17 (kiri) menunjukkan transmitansi kristal fotonik dengan  $n_1 = 1,7$ ;  $n_2 = 2,1$  ;  $n_3 = 3,7$  dan indeks bias nonlinier yang digunakan adalah  $2,2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{GW}$ , untuk dua nilai intensitas cahaya datang. Tampak bahwa panjang gelombang cacat  $\lambda_c = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$  dapat bergeser menjadi  $1,555 \text{ }\mu\text{m}$  dengan merubah intensitas cahaya datang dari  $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$  menjadi  $20 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . Dengan demikian terjadi perubahan transmitansi untuk panjang gelombang  $1,55 \text{ }\mu\text{m}$  dari tinggi (keadaan ON) ke transmitansi rendah (keadaan OFF) dengan merubah intensitas cahaya datang. Perubahan transmitansi ini disebut dengan *all-optical switching* melalui *self-phase*

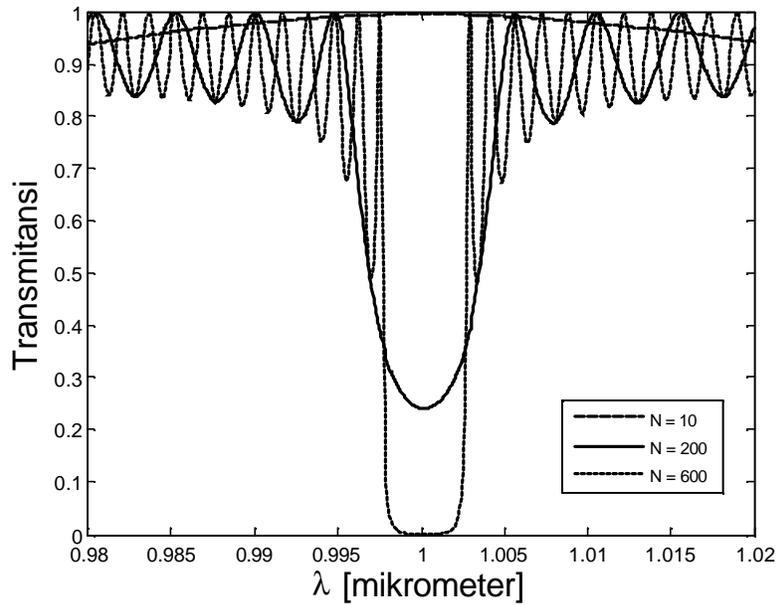
*modulation*. Struktur dengan variasi indeks bias diatas dapat digunakan untuk telekomunikasi, karena panjang gelombang dimana terjadi *switching* sama dengan panjang gelombang telekomunikasi, yaitu  $1,55 \mu\text{m}$ .



Gambar 17 Transmittansi kristal fotonik dengan cacat indeks bias nonlinier dengan variasi intensitas. Jumlah lapisan Bragg disebelah kiri dan kanan lapisan cacat masing-masing 10 lapisan (kiri). Transmittansi puncak *defect modes* untuk intensitas cahaya  $I = 1 \text{ GW/cm}^2$  dan  $20 \text{ GW/cm}^2$  (kanan).

#### 4.3. Reflektor Bragg Nonlinier dengan indeks bias linier yang sama namun indeks bias nonlinier yang berlawanan tanda

Dalam struktur ini, indeks bias material untuk adalah  $n_1 = 1,5 + 0,01I$  dan  $n_2 = 1,5 - 0,01I$ . Transmittansi struktur ini sebagai fungsi dari panjang gelombang untuk jumlah lapisan 10, 200 dan 600 ditunjukkan dalam Gambar 18. Ketebalan dari tiap-tiap lapisan disesuaikan dengan struktur  $\lambda/4$  (*quarter-wave structure*). Dengan asumsi panjang gelombang cahaya datang adalah  $1 \mu\text{m}$  dan  $n_0 = 1,5$ , diperoleh ketebalan  $d_1 = d_2 = 0,1667 \text{ nm}$ .



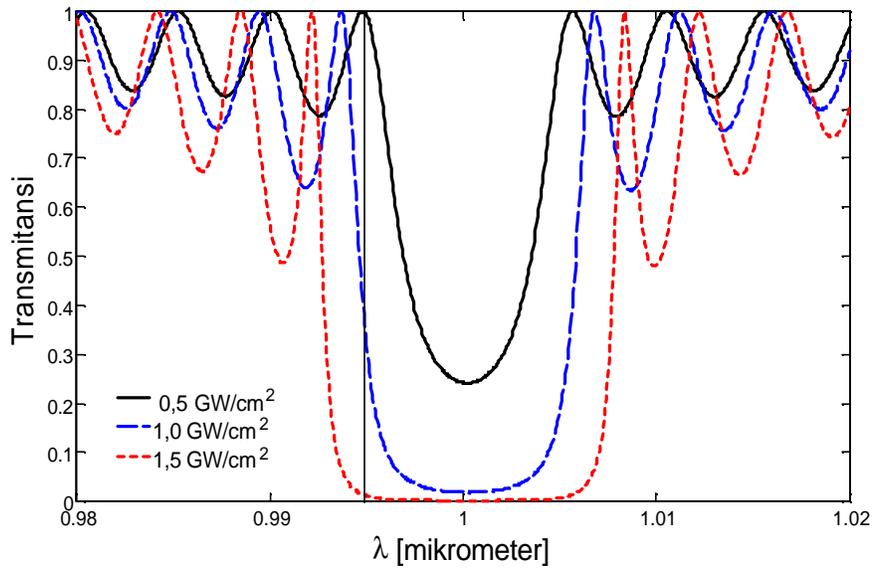
Gambar 18 Transmittansi struktur kristal fotonik 1D dengan indeks bias  $n_0 = 1,5$  dan  $n_{nl} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$  untuk jumlah lapisan 10, 200 dan 600. Intensitas input yang digunakan adalah  $0,5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ .

Untuk jumlah lapisan ( $N = 10$ ) tampak bahwa transmittansi bernilai 1 dan tidak terbentuk celah pita fotonik (*photonic bandgap*). Jika jumlah lapisan  $N$  besar, maka terbentuk celah pita, dan *celah pita* menjadi lebih dalam dan tajam, dengan meningkatnya jumlah lapisan  $N$ . Hal ini dapat dipahami, bahwa meningkatnya jumlah lapisan  $N$ , maka jumlah cahaya yang ditransmisikan dan dipantulkan tiap-tiap lapisan akan semakin banyak.

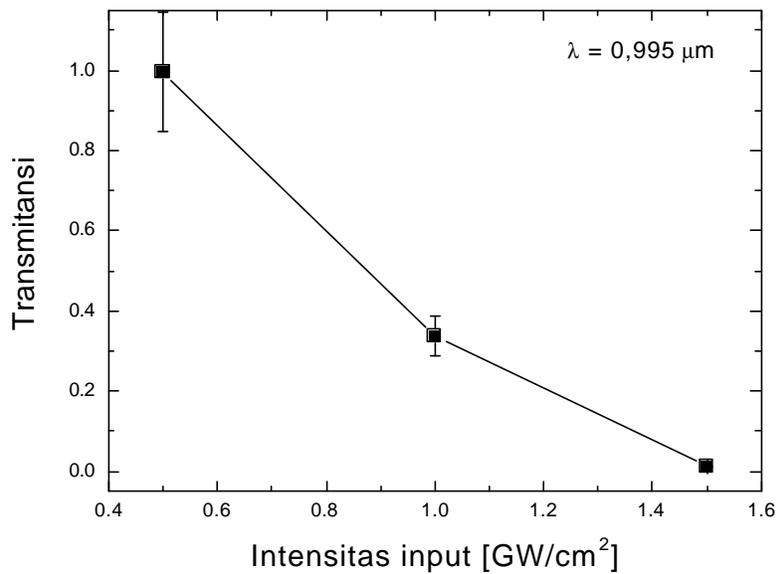
#### 4.3.2. Aplikasi Switching Optik

Untuk aplikasi *switching*, struktur disinari laser dengan intensitas yang berbeda. Grafik transmittansi untuk jumlah lapisan 200 dengan nilai intensitas cahaya yang berbeda ditunjukkan dalam Gambar 19. Garis vertikal lurus digunakan sebagai panjang gelombang dimana *switching* optik terjadi. Tampak bahwa transmittansi panjang gelombang meningkat dengan bertambahnya nilai intensitas cahaya datang. Hal ini terjadi akibat bertambahnya nilai  $\Delta n (n_1 - n_2)$  yang disebabkan meningkatnya nilai intensitas menurut persamaan (5). Dengan demikian maka lebar bandgap juga bertambah sesuai dengan  $\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta I}{I}$ . *Switching* optik terjadi karena perubahan

transmitansi pada panjang gelombang 0,995 $\mu\text{m}$  akibat perubahan intensitas cahaya datang (*self-phase modulation*), ditunjukkan dalam gambar 20.



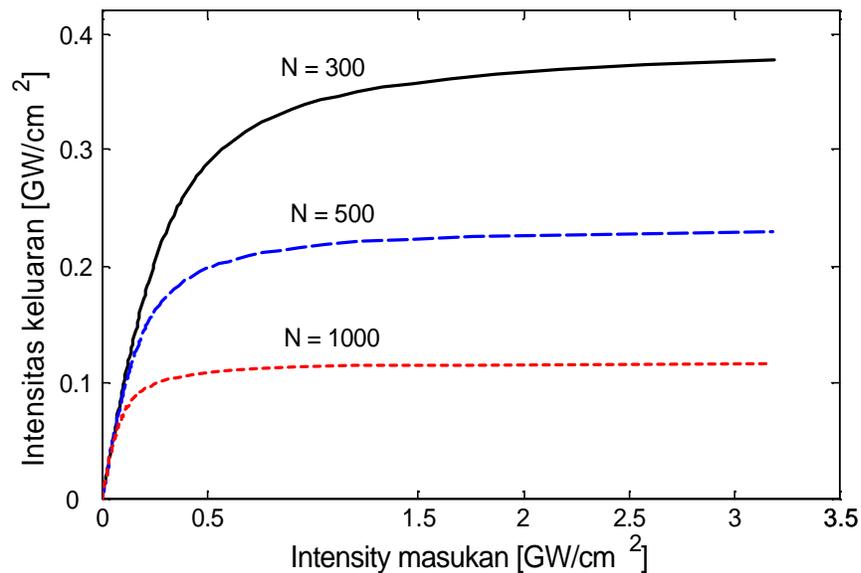
Gambar 19 Transmitansi untuk beberapa harga intensitas cahaya datang. Garis vertikal menunjukkan terjadi perubahan transmitansi pada panjang gelombang 0,995  $\mu\text{m}$  yang diakibatkan perubahan intensitas cahaya.



Gambar 20 Trasmitansi panjang gelombang 0,995  $\mu\text{m}$  sebagai fungsi dari intensitas cahaya datang (input)

### 4.3.3. Aplikasi Optical Limiter

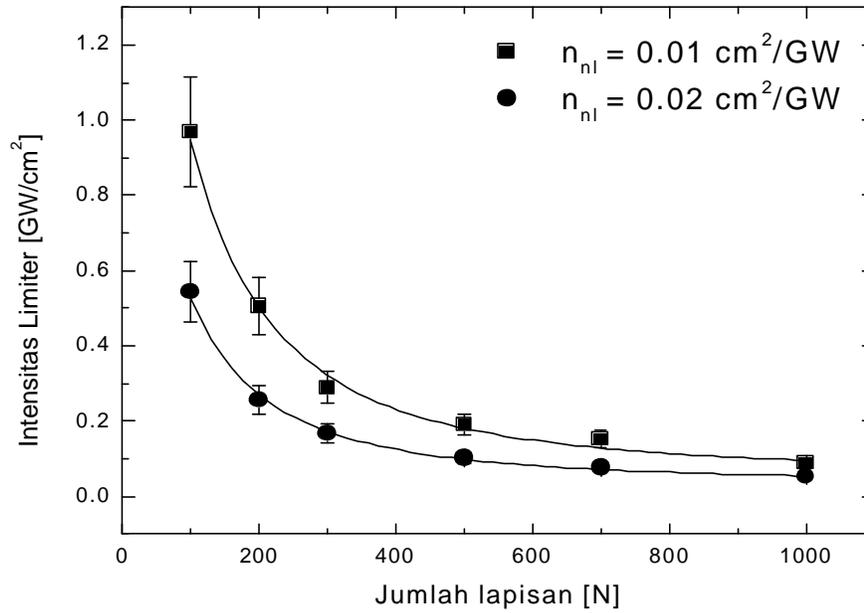
Struktur ini disamping dapat digunakan untuk *all-optical switching* melalui proses *self-phase modulation* pada panjang gelombang  $0,995 \mu\text{m}$ , juga dapat dikaji untuk aplikasi *optical limiter*. *Optical limiter* adalah suatu divais optik, dimana intensitas keluaran (*output*) bernilai konstan untuk nilai intensitas cahaya masukan (*input*) yang besar. Gambar 21 menunjukkan karakteristik optical limiter dengan memplot persamaan (44). Nilai-nilai yang digunakan dalam persamaan (44) adalah dengan indeks bias linier kedua material sama ( $n_{01} = n_{02} = 1,5$ ), namun indeks bias nonliniernya berlawanan tanda ( $n_{nl1} = - n_{nl2} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$ ) dan jumlah lapisan adalah 300, 500 dan 1000.



Gambar 21 Grafik intensitas output terhadap intensitas input dari struktur Bragg Nonlinier dengan  $n_0 = 1,5$ ;  $n_{nl} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$  untuk variasi jumlah lapisan

Dalam gambar 21, tampak bahwa untuk intensitas input yang kecil, intensitas output berbanding lurus dengan intensitas input (linier), namun untuk intensitas input yang besar, intensitas output bernilai konstan. Dengan demikian struktur ini dapat digunakan sebagai *optical limiter*. Nilai output yang konstan untuk nilai input yang berbeda disebut disebut dengan intensitas limiter. Intensitas limiter ini berbanding

terbalik dengan jumlah lapisan  $N$  dan indeks bias nonlinier  $n_{nl}$ , seperti yang ditunjukkan dalam gambar 22. Dengan demikian untuk aplikasi optical limiter yang optimum, diperlukan nilai indeks bias nonlinier dan jumlah lapisan yang besar.



Gambar 22 Hubungan antara intensitas limiter terhadap jumlah lapisan  $N$  untuk dua nilai indeks bias nonlinier ( $0,01 \text{ cm}^2/\text{GW}$  dan  $0,02 \text{ cm}^2/\text{GW}$ ).

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari struktur kristal fotonik nonlinier yang dikaji untuk aplikasi *all-optical switching*, dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Bragg reflektor nonlinier dengan kombinasi indeks bias  $n_A = 1,8$  dan  $n_B = 1,6$  dan indeks nonlinier  $n_{nl} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{GW}$ , *switching* terjadi pada  $\lambda = 1,555 \mu\text{m}$  jika intensitas *input* meningkat menjadi  $15 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . Mekanisme *switching* dapat dilakukan dengan *self-phase modulation* dan *cross-phase modulation*. Mekanisme *switching* dengan *self-phase modulation* secara praktis lebih efektif karena hanya memerlukan satu sumber laser.
- b. Penyisipan lapisan cacat, baik geometris maupun cacat indeks bias mengakibatkan munculnya puncak transmitansi didalam celah pita (*defect mode*). Dengan kombinasi indeks bias 1,7 dan 2,1 serta lapisan cacat dengan indeks bias  $(3,7 + 0,0022 \text{ cm}^2/\text{GW})$ , *switching* terjadi pada  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  dengan mengubah intensitas cahaya input menjadi  $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$  (mekanisme *self-phase modulation*).
- c. Kombinasi material dengan indeks bias linier  $n_{01} = n_{02} = 1,5$  dan indeks bias nonlinier  $n_{nl1} = -n_{nl2} = 0,001 \text{ cm}^2/\text{GW}$ , *switching* optik terjadi pada  $\lambda = 0,995 \mu\text{m}$  dengan merubah intensitas menjadi  $1,5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . Struktur ini juga dapat digunakan sebagai *optical limiter*; pada  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ . Intensitas limiter berbanding terbalik dengan jumlah lapisan Bragg (N) dan nilai indeks bias nonlinier ( $n_{nl}$ ).
- d. Dari ketiga struktur kristal fotonik nonlinier 1D yang dipelajari, reflektor Bragg nonlinier dan kristal fotonik yang disisipi oleh lapisan cacat dari material optik nonlinier sangat cocok untuk aplikasi *switching* optik dalam telekomunikasi melalui mekanisme yang efisien yaitu *self-phase modulation*.

Sebagai sarana dari kelanjutan penelitian ini perlu dikaji secara eksperimen agar piranti *all-optical switching* dapat direalisasikan. Disamping itu perlu dilakukan kerjasama secara internasional untuk membangun *network* dan *linkage* dalam penelitian ini.

## VI. PUSTAKA

- [1] G. I. Stegeman in “*Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers*”, H. S. Nalwa and S. Miyata (Eds.), CRC Press Inc. 1997, 799.
- [2] U. Gubler, “*Third-Order Nonlinear Effects in Organic Materials*”, PhD Dissertation, Zurich Swiss, 2000.
- [3] M. A. Bader, G. Marowsky, A. Bahtiar, K. Koynov, C. Bubeck, H. Tillmann, H.-H. Hörhold, S. Pereira, “*PPV-Derivatives: New Promising Materials for Nonlinear All-Optical Waveguide Switching*”, *J. Opt. Soc. Am. B* **19** (2002), 2250.
- [4] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, “*Photonic Crystals; Molding the Flow of Light*”, Princeton University Press, 1995.
- [5] K. Sakoda, “*Optical Properties of Photonic Crystals*”, Springer Verlag Berlin, 2001.
- [6] C. M. Soukoulis, ed., “*Photonic Band Gaps and Localization*”, Plenum, New York, 1993.
- [7] M. D. Tocci, M. J. Bloemer, M. Scalora, J. P. Dowling, and C. M. Bowden, “*Thin-film nonlinear optical diode*,” *Appl. Phys. Lett.* **66** (1995), pp. 2324–2326.
- [8] J. D. Jackson, “*Klassische Elektrodynamik*“, Walter de Gruyter, Berlin, 1983.
- [9] P. Yeh, *Optical wave in layered media*, John Wiley & Son, New York, 1988.
- [10] L. Brzozowski and E. H. Sargent,” *Optical Signal Processing Using Nonlinear Distributed Feedback Structures*”, *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 36, 2000.
- [11] Abrar, “*Filter ADD-DROP Berbasis Directional Coupler dengan Kisi Bragg Tunggal*“, Skripsi, Jurusan Fisika Universitas Padjadjaran Bandung, 2005.

## **LAMPIRAN**

JUDUL : STUDI DISTRIBUTED BRAGG REFLECTOR (DBR)  
NONLINIER UNTUK OPTICAL SWITCHING

NAMA : KUNTI ANDYAHSARI

N P M : D1C01009

Diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing Utama

DR. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.  
NIP. 132 169 935

Mengetahui  
Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Padjadjaran

DR. H. M. Qomarudin, MS.  
NIP. 131 409 667

## ABSTRAK

*Optical switching* merupakan suatu divais yang dibutuhkan untuk merealisasikan teknologi fotonik, yaitu pengolahan sata/sinyal optik secara cepat dalam orde *femtosecond* ( $fs = 10^{-15}$  detik). Dalam skripsi ini, dipelajari potensi kristal fotonik nonlinier 1-dimensi atau struktur Distributed Bragg Reflector (DBR) nonlinier untuk aplikasi switching.

DBR nonlinier adalah struktur periodik material optik nonlinier, yaitu material yang indeks biasanya bergantung pada intensitas cahaya datang. Perubahan intensitas cahaya datang akan menggeser celah pita fotonik (*photonic bandgap*), sehingga akan merubah transmitansi pada panjang gelombang tertentu. Perubahan transmitansi oleh intensitas cahaya disebut *optical switching*. Dalam studi ini, *optical switching* terjadi pada panjang gelombang  $1,555 \mu\text{m}$ . Juga dilakukan perhitungan bistabilitas optik dengan menyelesaikan persamaan terkopel nonlinier yang solusinya adalah fungsi eliptik Jacobi.

*Optical switching* dari struktur DBR nonlinier dapat dilakukan dengan dua mekanisme: *self-phase modulation* dan *cross-phase modulation*. Hasil studi menunjukkan bahwa mekanisme yang efektif adalah *self-phase modulation*, karena hanya memerlukan satu sumber cahaya, sedangkan *cross-phase modulation* memerlukan dua sumber cahaya laser.

JUDUL : STUDI KRISTAL FOTONIK 1-DIMENSI DENGAN  
LAPISAN CACAT MATERIAL OPTIK NONLINIER  
UNTUK APLIKASI OPTICAL SWITCHING

NAMA : DIAN RAHAYU LESTARI

N P M : D1C01015

Diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing Utama

DR. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.  
NIP. 132 169 935

Mengetahui  
Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Padjadjaran

DR. H. M. Qomarudin, MS.  
NIP. 131 409 667

## ABSTRAK

Divais *switching* optik (*all-optical switching*) merupakan suatu komponen krusial dalam realisasi suatu komputer optik dan pengolahan sinyal informasi atau data telekomunikasi berkecepatan tinggi. Kristal fotonik yaitu susunan periodik dari material dielektrik dengan indeks bias yang berbeda, banyak dipelajari baik secara teoritis maupun ekeperimen untuk aplikasi *switching* optik. Kristal fotonik menimbulkan suatu celah pita (*bandgap*); dimana cahaya dengan rentang panjang gelombang tertentu tidak dapat merambat ke dalam kristal.

Dalam skripsi ini, dilakukan studi teoritis tentang kristal fotonik dengan penyisipan lapisan cacat, baik cacat tunggal maupun cacat ganda. lapisan cacat yang digunakan adalah cacat geometris dan indeks bias. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penyisipan lapisan cacat menimbulkan suatu *defect mode*, dimana panjang gelombang tertentu di dalam *bandgap* dapat ditransmisikan oleh struktur. Perubahan lapisan cacat, baik cacat geometris ataupun cacat indeks bias mengakibatkan pergeseran panjang gelombang cacat (*defect mode*).

*Switching* optik dilakukan dengan mengganti lapisan cacat dengan material optik nonlinier (GaAs), sehingga terjadi perubahan transmitansi panjang gelombang cacat ( $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$ ) akibat berubahnya harga intensitas cahaya datang. Hasil studi ini dapat digunakan sebagai acuan divasi *switching* optik dalam telekomunikasi.

JUDUL : KRISTAL FOTONIK NONLINIER 1-DIMENSI  
UNTUK APLIKASI OPTICAL SWITCHING DAN  
OPTICAL LIMITER

NAMA : PUSPA KUSUMA NAGARA

N P M : D1C01031

Diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing Utama

DR. rer.nat. Ayi Bahtiar, M.Si.  
NIP. 132 169 935

Mengetahui  
Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Padjadjaran

DR. H. M. Qomarudin, MS.  
NIP. 131 409 667

## ABSTRAK

Kristal fotonik adalah susunan periodik material-material dielektrik dengan indeks bias yang berbeda, sehingga menimbulkan suatu celah pita fotonik (*photonic bandgap*). Kristal fotonik banyak dipelajari baik secara teori maupun eksperimen karena potensinya untuk aplikasi divais optik. Dalam skripsi ini, dilakukan studi teoritis pada struktur kristal fotonik nonlinier 1-dimensi untuk aplikasi *optical switching* dan *optical limiter*. Kedua divais tersebut merupakan komponen dasar untuk pengolahan sinyal optik berkecepatan tinggi. Struktur yang dipelajari dalam skripsi ini terbuat dari material dengan indeks bias linier yang sama, namun indeks bias nonliniernya berlawanan tanda.

Dengan menggunakan teknik matriks transfer, *bandgap* dihitung secara numerik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *optical limiter* terjadi pada panjang gelombang 1,0  $\mu\text{m}$ , dimana transmisi tidak bergantung pada intensitas cahaya input. Sedangkan *optical switching* dapat dilakukan pada panjang gelombang 0,995  $\mu\text{m}$ . *Optical switching* adalah perubahan transmitansi akibat intensitas cahaya datang/input. Hal ini terjadi akibat perubahan indeks bias material optik nonlinier oleh intensitas cahaya. Oleh karena itu, struktur yang dipelajari dalam skripsi ini dapat digunakan untuk *optical switching* dan *optical limiter*.