

**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 μm jika intensitas sebesar 15 GW/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 μm 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 μm . 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 κL	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 GW/cm^2 (kanan).	31
Gambar 18	Transmitansi struktur kital 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	Trasmitansi 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]:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{H} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{H} &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

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:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{H} &= -i\omega \epsilon \vec{E} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= i\omega \mu_0 \vec{H}\end{aligned}\tag{2}$$

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

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\vec{r}) \vec{E} = 0\tag{3}$$

dimana $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ adalah kecepatan gelombang elektromagnetik dalam vakum dan $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ 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:

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

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):

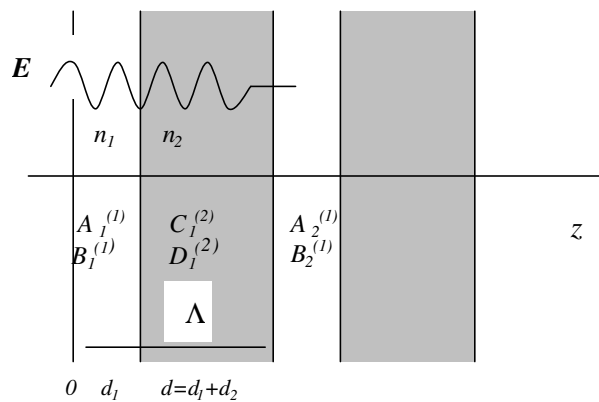
$$n = n_0 + n_{nl}I \quad (5)$$

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:

$$\begin{aligned}
M(1,1) &= e^{ik_1 d_1} \left[\cos(k_2 d_2) + \frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
M(1,2) &= e^{-ik_1 d_1} \left[\frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
M(2,1) &= e^{ik_1 d_1} \left[-\frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\
M(2,2) &= e^{-ik_1 d_1} \left[\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right]
\end{aligned} \tag{11}$$

Matriks M disebut sebagai Matriks Transfer dari sebuah unit kisi. Matriks M bergantung kepada frekuensi ω dan bersifat unimodular. Karena pada setiap ω , 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 ω 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:

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

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

dengan M adalah persamaan (11).

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

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

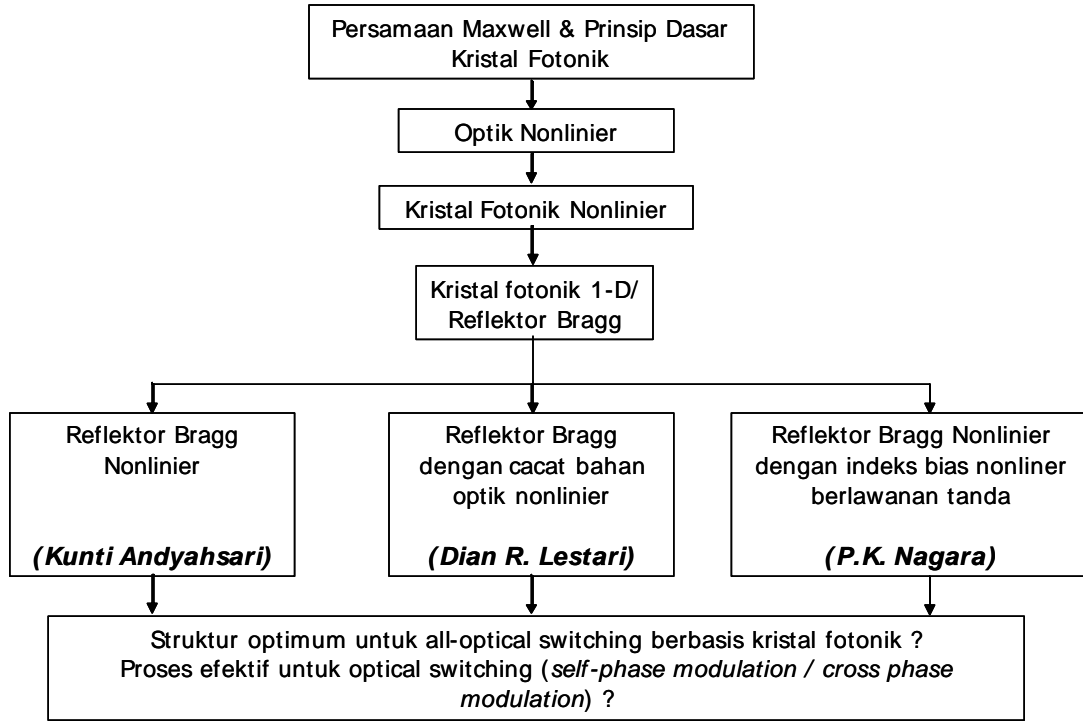
III. PENDEKATAN MODEL/METODE PENELITIAN

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:

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

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 $\kappa = \omega n_l / 2c$. Persamaan (19) disebut sebagai persamaan terkopel (persamaan tergendeng) 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 :

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

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

dan

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:

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

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

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

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

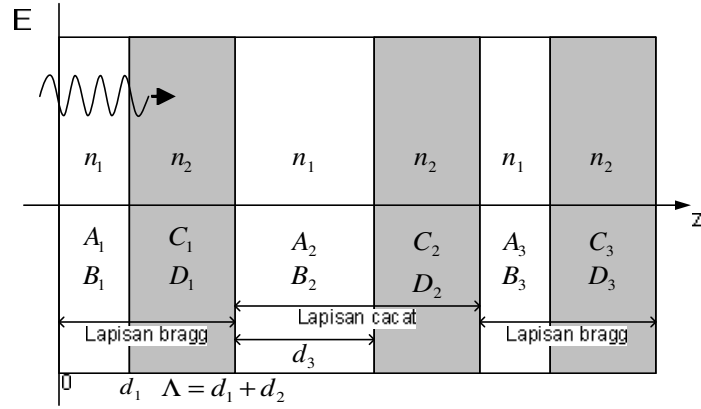
Intensitas masukan ternormalisasi diperoleh dari syarat batas pada $x = 0$ [li = y ($x = 0$)], maka hubungan antara intensitas keluaran dan intensitas masukan adalah :

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

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_i , 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:

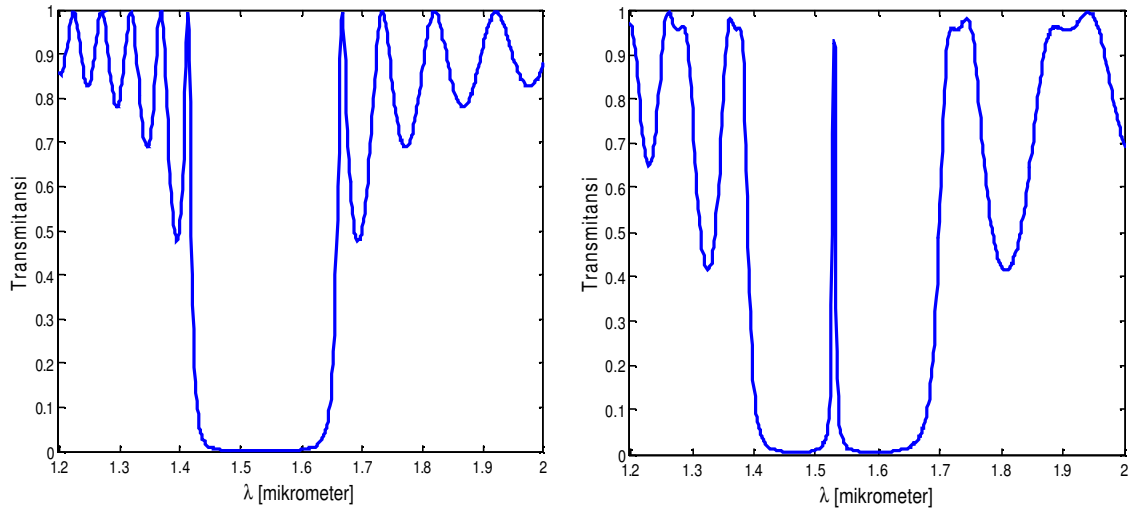
$$\begin{aligned} M(1,1) &= e^{ik_1j} \left[\cos(k_2 d_2) + \frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\ M(1,2) &= e^{-ik_1j} \left[\frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\ M(2,1) &= e^{ik_1j} \left[-\frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \\ M(2,2) &= e^{-ik_1j} \left[\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2} i \left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(k_2 d_2) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

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).

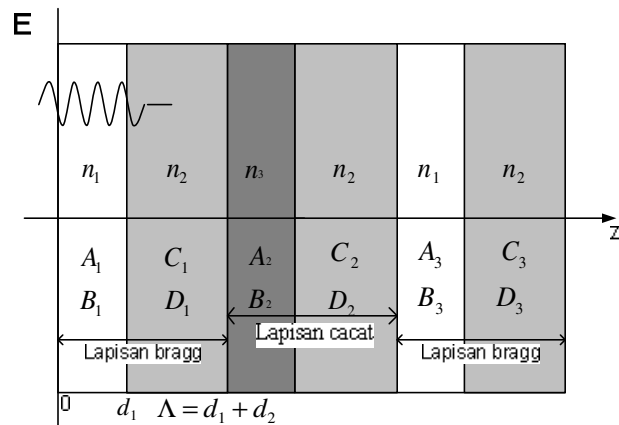
Transmittansi kristal fotonik 1D untuk variasi indeks bias $n_1=1,7$ dan $n_2=2,1$ tanpa dan dengan cacat geometris (ketebalan $d_3 = 0,45$ mikrometer) dengan jumlah lapisan 10 ditunjukkan pada gambar 4. Dengan adanya lapisan cacat geometris, maka muncul moda pada celah pita terlarang (*defect mode*)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