

Studi Saklar Optik Kristal Fotonik Nonlinier 2 Dimensi dengan Variasi Cacat

O. Nurhilal, M.Si

Jurusan Fisika Universitas Padjadjaran
Alamat email : o.nurhilal@unpad.ac.id

Abstrak

Pada artikel ini telah dikaji saklar optik kristal fotonik non linier dua dimensi (2D) dengan variasi cacat (*defect*). Simulasi menggunakan algoritma *Finite Difference Time Domain* (FDTD). Hasil simulasi saklar optik menunjukkan bahwa pemberian variasi cacat akan memberikan pengaruh pada sifat saklar. Demikian pula nilai batas ambang (*threshold*) saklar dan kemiringan (*slope*) fungsi transfer yang berubah secara kuat terhadap posisi cacat dan banyaknya lapisan cacat. Dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi cacat (jumlah cacat, posisi dan jarak antara cacat) memiliki pengaruh kritis pada karakteristik saklar. Fenomena ini akan memberikan peluang bagi kristal fotonik untuk diaplikasikan sebagai divais optik terintegrasi.

Kata kunci : Saklar optik, cacat, kristal fotonik, fungsi transfer.

Abstract

In this paper a novel all-optical switch using two dimensional nonlinear photonic crystal including some twin defects is investigated. For illustration of the capability and simulation of behavior of the proposed structure, Finite Difference Time Domain (FDTD) algorithm is used. Our simulations show that inserting a various defects has serious effect on switching behavior. Also, the switching threshold value and slope of transfer function are changed strongly with position of defects and number of defect layers respectively. It is shown that the number, position and distance between defects have critical effect on switching characteristics. This phenomena can be used as optical that is used in digital optical integrated circuits.

Key words : Optical switch, defect, photonic crystals, transfer function

1. Pendahuluan

Kristal fotonik telah banyak dikaji sebagai bahan optik yang dapat diaplikasikan dalam sistem komputasi, informasi dan komunikasi. Kristal fotonik adalah susunan periodic dari dielektrik atau indeks bias bahan optik. Di dalam kristal fotonik terdapat *photonic band gap* (PBG) dimana cahaya tidak ditransmisikan melainkan dilokalisasi. Lokalisasi cahaya tersebut merupakan sifat yang sangat penting dalam aplikasi divais optik terintegrasi[1].

Saklar optik merupakan salah satu aplikasi dari kristal fotonik. Didalam saklar optik intensitas cahaya bergantung pada perubahan indeks bias[2]. Dalam mekanisme kerjanya sinyal optik pada awalnya dikonversi menjadi sinyal listrik kemudian dilakukan penguatan (*amplifier*) dalam domain listrik selanjutnya dikonversi kembali menjadi sinyal optik sebelum akhirnya ditransmisikan.

Konversi dalam domain listrik membutuhkan waktu *delay* yang lebih banyak dan akhirnya proses saklar menjadi lambat dan laju transmisinya kecil. Jika tugas tersebut dikerjakan dalam domain optik maka kecepatan data transmisi dapat ditingkatkan. Untuk tujuan tersebut maka metode optik merupakan salah satu alternatif yang sesuai.

Pada artikel ini akan dibahas hasil kajian tentang aplikasi kristal fotonik yang dibuat dari bahan non linier. Selain itu akan dijelaskan pula pengenalan cacat (defect) pada kristal fotonik dengan berbagai variasi yang digunakan untuk karakteristik optik dengan menggunakan model matematik.

2. Kristal Fotonik Non Linier

Sifat optik nonlinier suatu bahan diungkapkan melalui hubungan antara polarisasi listrik terinduksi dalam bahan dengan medan listrik cahaya yang melalui bahan tersebut. Sifat optik nonlinier suatu bahan akan nampak jika intensitas cahaya yang melalui bahan cukup tinggi. Sifat nonlinieritas bahan tersebut diungkapkan dengan suseptibilitas non linier ($\chi^{(n)}$) dengan $n = 2$ dan 3 masing-masing untuk suseptibilitas nonlinier orde kedua dan ketiga berturut-turut[3].

Kristal fotonik nonlinier adalah susunan periodic dielektrik atau indeks bias dari bahan optik nonlinier. Pandang suatu bahan dengan indeks bias yang tinggi dengan Kerr nonlinieritas ($n_H c \epsilon_0 n_2 |E(r)|^2$ dengan n_2 adalah koefisien Kerr). Untuk indeks bias rendah n_2 diabaikan. Parameter yang akan dihitung adalah perbandingan antara daya input dan daya output. Hubungan daya masukan dan daya keluaran dinyatakan dengan persamaan berikut[3]

$$\frac{I_{out}^S}{I_{in}^S} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{out}^S}{P_0} - \delta\right)^2} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{1}{[\kappa Q^2 (\omega_{res} / c)^{d-1} n_2(\vec{r})]_{\max}} \quad (2)$$

Q adalah faktor kualitas dan δ adalah *detuning*. Dengan κ adalah *feedback* nonlinier (parameter skala-invarian tanpa dimensi) dihitung dengan persamaan

$$\kappa = \left(\frac{c}{\omega_{res}}\right)^d \frac{\int_{vol} d^d \vec{r} [|\vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r})|^2 + 2|\vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{E}^*(\vec{r})|^2] n^2(\vec{r}) n_2(\vec{r})}{[\int_{vol} d^d \vec{r} |\vec{E}(\vec{r})|^2 n^2(\vec{r})]_{\max}^2 n_2(\vec{r})} \quad (3)$$

d adalah dimensionalitas sistem.

3. Analisa Numerik

Analisa secara numeric untuk menggambarkan sifat dari divais dilakukan dengan menyelesaikan persamaan Maxwell dengan metode FDTD (Finite Difference Time Domain) untuk 2D kristal fotonik nonlinier. Untuk modus *Transfer Electric* (TE) persamaan Maxwell untuk medan magnet dan medan listrik dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{E} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0} [\nabla \times \vec{H} - \vec{P}_t] \quad (5)$$

Dengan \vec{H} adalah medan magnet, \vec{E} adalah medan listrik dan \vec{P} adalah polarisasi. Hubungan masing-masing besaran diungkapkan juga dengan persamaan berikut

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{P} = -\varepsilon \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \vec{E}$$

$$\frac{\partial \vec{P}_t}{\partial t} = \varepsilon_0 \omega_p^0 \vec{E} \quad (7)$$

Dimana ω_p adalah frekuensi plasma dan ε_0 adalah permitivitas ruang hampa. Bentuk diskrit persamaan Maxwell dalam domain waktu dan ruang menggunakan algoritme Yee [4] dapat diperluas sebagai berikut :

$$\vec{H}_x \Big|_{t,j+0.5}^{n+0.5} = \vec{H}_x \Big|_{t,j+0.5}^{n-0.5} - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left[\frac{\vec{E}_z \Big|_{i,j+1}^n - \vec{E}_z \Big|_{i,j}^n}{\Delta y} \right] \quad (8)$$

$$\vec{H}_y \Big|_{t+0.5,j}^{n+0.5} = \vec{H}_y \Big|_{t+0.5,j}^{n-0.5} + \frac{\Delta t}{\mu_0} \left[\frac{\vec{E}_z \Big|_{i+1,j}^n - \vec{E}_z \Big|_{i,j}^n}{\Delta x} \right]$$

$$\vec{E}_z \Big|_{i,j}^{n+1} = \vec{E}_z \Big|_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \vec{P}_{t_z} \Big|_{i,j}^{n+0.5} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0} \left[\frac{\vec{H}_y \Big|_{i+0.5,j}^{n+0.5} - \vec{H}_y \Big|_{i-0.5,j}^{n+0.5}}{\Delta x} - \frac{\vec{H}_x \Big|_{i,j+0.5}^{n+0.5} - \vec{H}_x \Big|_{i,j-0.5}^{n+0.5}}{\Delta y} \right] \quad (9)$$

$$\vec{P}_{t_z} \Big|_{i,j}^{n+0.5} = \vec{P}_{t_z} \Big|_{i,j}^{n-0.5} + \Delta t \varepsilon_0 \omega_p^2 \Big|_{i,j} \vec{E} \Big|_{i,j}^n \quad (10)$$

Dimana $\vec{E}_z \Big|_{i,j}^n = \vec{E}_z(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t)$. Hubungan antara medium linier dan nonlinier diungkapkan dalam persamaan berikut

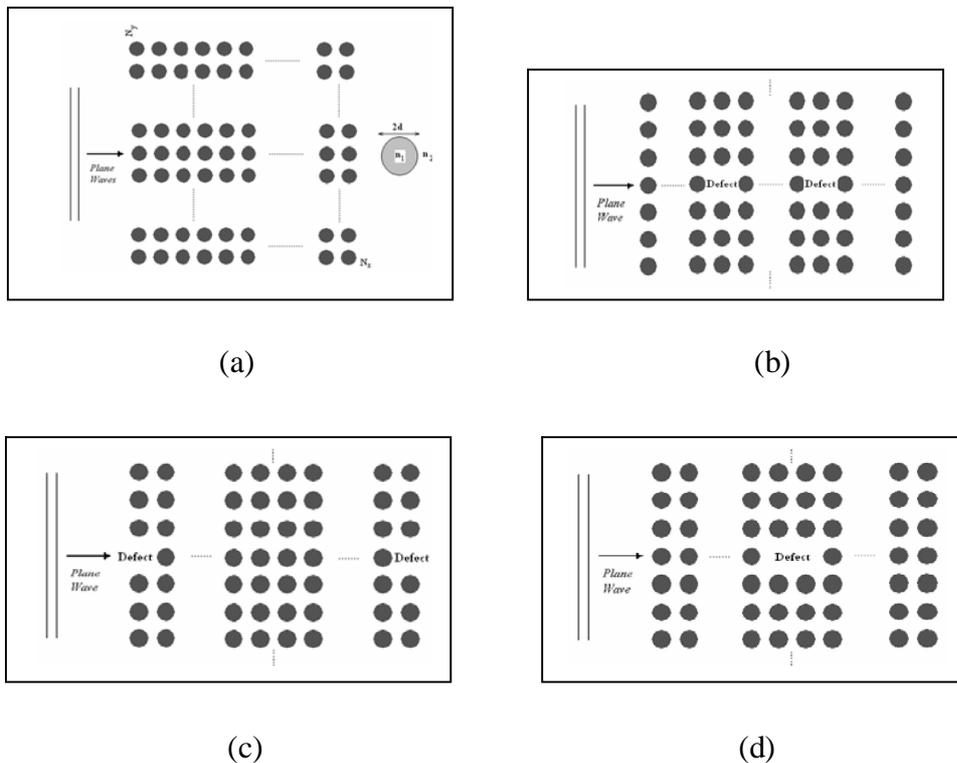
$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \varepsilon_{rL} + \varepsilon_{rNL} \\ \varepsilon_{rL}(x) &= \left[n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \right]^2 \\ \varepsilon_{rNL} &= \chi^{(3)} |\vec{E}|^2\end{aligned}\tag{12}$$

Untuk stabilisasi digunakan konvergensi algoritma numerik berikut :

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{\max}} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}\tag{13}$$

4. Hasil Simulasi dan Diskusi

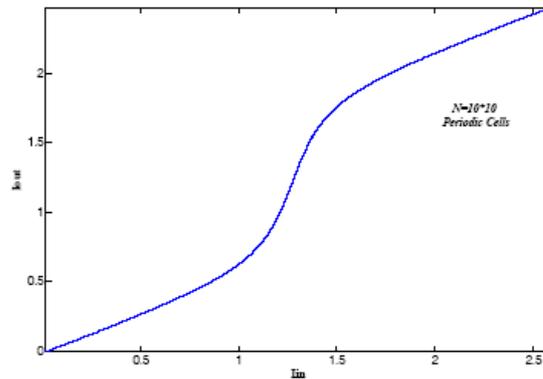
Hasil simulasi yang telah dilaporkan berkaitan dengan saklar optik antara lain, aplikasi fotonik kristal nonlinier mikrodivais untuk optik terintegrasi [Marin soljadic et al, 2003], optimal bistabilitas saklar didalam kristal fotonik nonlinier [Marin soljadic et al, 2002], saklar optik-optic fotonik kristal 2 dimensi dengan cacat ganda [Ali Rostami et al, 2006]. Ali Rostami et al membuat disain variasi cacat ganda pada kristal fotonik sebagai berikut.



Gambar 1. Struktur kristal fotonik, (a) struktur tanpa cacat, (b), (c), (d) struktur dengan variasi cacat.

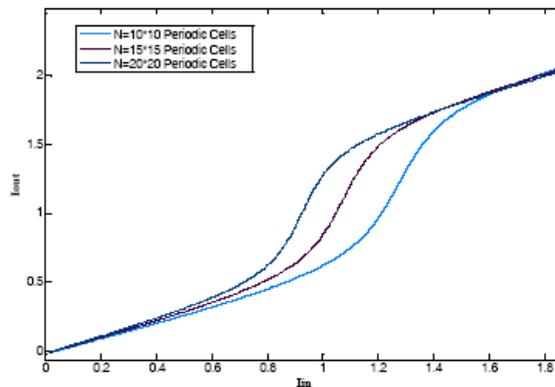
Gambar 1-(a) adalah kristal fotonik dengan sel dielektrik silinder tanpa cacat, (b) adalah kristal fotonik dengan cacat identik dari kiri dan kanan, (c) adalah kristal fotonik dengan cacat identik dengan jarak yang sama dan (d) cacat pada pusat kristal fotonik.

Hasil perhitungan dan simulasi untuk struktur kristal fotonik tanpa cacat diperoleh kurva fungsi transfer seperti pada gambar 2. Untuk kristal fotonik dengan variasi cacat pada gambar 4 balok dielektrik silinder dicancang 10×10 . Untuk simulasi tersebut tipe indeks bias linier dan non linier masing-masing $n_{rod} = 1.87$ dan $n_{medium} = 1.25$ dan $\chi^{(3)} = 0.0015$.



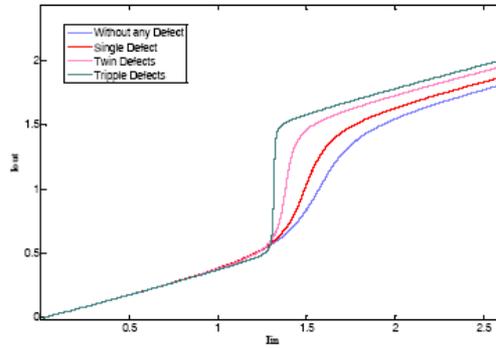
Gambar 3. Kurva simulasi kristal fotonik tanpa cacat

Pengaruh dari jumlah sel silinder digambarkan pada gambar 4. Pada gambar tersebut kemiringan dari fungsi transfer dan nilai batas ambang meningkat dengan meningkatnya jumlah lapisan. Dalam simulasi ini untuk menyimpan waktu kerja digunakan balok dielektrik kecil dan kemiringan fungsi transfer yang kecil. Tetapi dalam praktek sejumlah besar sel dapat digunakan dan fungsi tahapan untuk fungsi transfer dapat ditentukan.



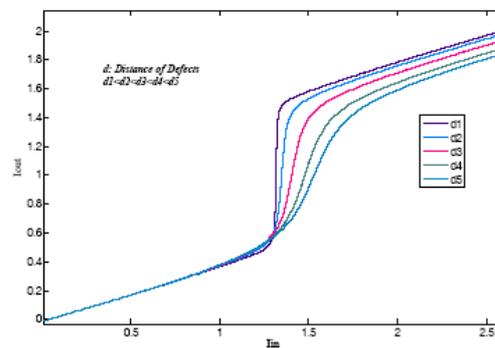
Gambar 4. Kurva hasil simulasi kristal fotonik tanpa cacat dengan jumlah lapisan yang berbeda pada kedua arah (Output Intensity (mW)-Input Intensity (mW))

Pengaruh lapisan cacat kembar pada fungsi transfer diteliti dan digambarkan pada gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan kenaikan jumlah lapisan cacat, kemiringan dari fungsi transfer meningkat.



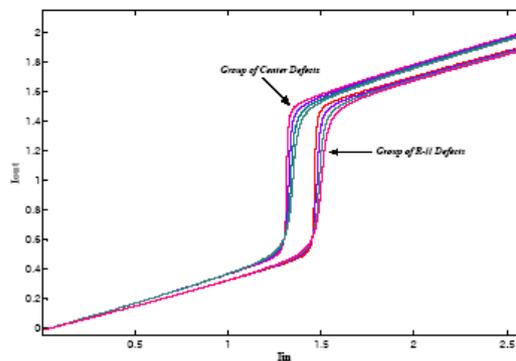
Gambar 5. Kurva kristal fotonik dengan cacat (Output Intensity (mW)-Input Intensity (mW))

Pengaruh dari jarak antara cacat kembar digambarkan pada gambar 6. Pada gambar 6 ditunjukkan bahwa dengan penurunan jarak antar cacat, kemiringan fungsi transfer meningkat. Jadi, dengan penurunan jarak antar cacat fungsi transfer dapat disetel.



Gambar 6. Kurva kristal fotonik dengan cacat yang dipengaruhi oleh jarak antar cacat (Output Intensity (mW)-Input Intensity (mW))

Pengaruh posisi lapisan cacat didalam kristal fotonik digambarkan pada gambar 7. Jika posisi cacat kembar disisi kanan kristal (referensi terhadap pusat kristal) maka nilai ambang untuk switching meningkat. Jadi, dengan mengontrol posisi cacat-cacat ambang switching dapat disetel. Juga, pengaruh dari jumlah cacat pada situasi seperti ini adalah sama dengan kasus yang digambarkan sebelumnya.



Gambar 7. Kurva kristal fotonik dengan perbedaan posisi cacat (Output Intensity (mW)-Input Intensity (mW))

Pada bagian ini, kami akan menganalisis pengaruh dari cacat kembar pada kristal fotonik nonlinier untuk melihat fungsi transfer. Dari hasil analisis dapat kami katakan bahwa kristal fotonik dapat dioperasikan sebagai saklar optik. Juga dapat kami tunjukkan bahwa dengan meningkatkan jumlah cacat kembar kemiringan dari fungsi transfer dapat dikontrol. Kemudian posisi dari lapisan cacat dapat digunakan untuk menyetel ambang saklar.

Kesimpulan

Dalam metode ini diperkenalkan pengaruh cacat kembar baik tunggal maupun ganda. Diperkenalkan juga struktur yang dapat dikontrol untuk menyetel nilai ambang dan kemiringan input-output fungsi transfer.

Referensi

- [1] Ali Rostami, Hamed Alipour, "All-optical Switch and Hard Limited device using a Twin Defect in Two-dimensional Nonlinear Photonic Crystal". IJCSNS, vol. 6. No. 7B, 2006.
- [2] T. Suhara, M. Fujimura, "Waveguide Nonlinear-Optic Devices", Springer, 2003.
- [3] R.W. Boyd, *Nonlinear Photonics*. Academic Press, 1992.
- [4] A. Taflov and S. Haghefs, "*Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method*," Artech House, 2005.