

SKRIPSI FISIKA

**PENENTUAN SIFAT OPTIK KRISTAL FOTONIK
MULTILAYER DENGAN INDEKS BIAS DAN TEBAL LAPISAN
YANG DIVARIASIKAN**

**OLEH
NETHA SHELLA SABONO
H211 09 013**



**PROGRAM STUDI FISIKA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

**PENENTUAN SIFAT OPTIK KRISTAL FOTONIK *MULTILAYER*
DENGAN INDEKS BIAS DAN TEBAL LAPISAN YANG DIVARIASIKAN**

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Program Studi Fisika Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

OLEH

NETHA SHELLA SABONO

H 211 09 013

**PROGRAM STUDI FISIKA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

MAKASSAR

2013

LEMBAR PENGESAHAN

**PENENTUAN SIFAT OPTIK KRISTAL FOTONIK *MULTILAYER*
DENGAN INDEKS BIAS DAN TEBAL LAPISAN YANG DIVARIASIKAN**

OLEH :

**NETHA SHELLA SABONO
H211 09 013**



Makassar, Agustus 2013

Telahdiperiksadandisetujuioleh :

PembimbingUtama

**DahlangTahir, M.Si. Ph.D
NIP. 197509072000031001**

PembimbingPertama

**Eko Juarlin, S.Si, M.Si
NIP. 197509072000031001**

SARI BACAAN

Dalam penelitian ini, telah ditentukan sifat optik dari Kristal fotonik *multilayer* dengan indeks bias $n_1 = 1,1$ dan $n_2 = 4,2$ menggunakan perbandingan ketebalan lapisan 1:2 sampai 1:10. Sifat optik yang ditentukan yaitu nilai reflektansi dan nilai transmitansi yang dihasilkan dari interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan kristalfotonik. Hasil interaksi ini menentukan kemampuan bahan Kristal fotonik yang ditunjukkan dengan parameter *photonic band gap* yang dihasilkan. Hasil nilai trans mitansi dan reflektansi menunjukkan bahwa perbandingan ketebalan lapisan yang lebih besar memperlihatkan munculnya fenomena *photonic band gap* yang lebih jelas dengan lebar dan posisi *photonic band gap* yang bervariasi. Pada variasi ketebalan lapisan ,nilai transmitansi menunjukkan perubahan kenilai yang lebih kecil atau mendekati nol.

Kata kunci : kristalfotonik, reflektansi, transmitansi, *photonic band gap*

ABSTRACT

In this research, the optical properties of multilayer photonic crystal with a refractive index $n_1 = 1.1$ and $n_2 = 4.2$ using a layer thickness ratio of 1:2 till 1:10 was determined. The optical properties determined is reflectance values and transmittance values resulting from the interaction of electromagnetic waves with photonic crystals. The result of this interaction, determines the ability of the photonic crystal material with parameters of the resulting photonic band gap. Transmittance and reflectance values results showed that the ratio of the larger layer thickness shows the emergence of the phenomenon of photonic band gap is more obvious with the width and position of the photonic band gap are varied. On the layer thickness variation, transmittance values showed smaller changes values or close to zero.

Keywords: photonic crystals, reflectance, transmittance, photonic band gap

KATA PENGANTAR

Syaloom

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yesus Kristus atas segala limpahan kasih dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akademik yang berupa Tugas Akhir dengan judul “Penentuan Sifat Optik Kristal Fotonik *Multilayer* dengan Indeks Bias dan Tebal Lapisan yang Divariasikan” yang merupakan salah satu syarat menyelesaikan jenjang keserjanaan Strata I pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, banyak tantangan dan rintangan yang dihadapi penulis tetapi berkat bantuan, bimbingan dan dukungan serta doa yang penulis terima dari berbagai pihak sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu pada kesempatan ini perkenankan penulis sampaikan ucapan terima kasih terkhusus kepada kedua orang tua tercinta, ayahanda **Wunar Sabono** dan Ibunda **Yospina Kala'lembang** atas semua perhatian, kasih sayang, doa dan kerja kerasnya. Kepada adik-adikku **Ari, Nando, Tias**, dan **Lussy** yang telah mewarnai hidup penulis dengan canda tawa dan senantiasa memberikan bantuan, semangat, motivasi serta doa kepada penulis. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada semua keluarga yang tak dapat ditulis satu persatu. Skripsi ini juga penulis persembahkan kepada seluruh keluarga besar di Masohi, Ambon, dan Toraja.

Tidak lupa juga penulis sampaikan rasa syukur dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Dahlang Tahir, M.Si, Ph.D** selaku pembimbing utama dan Bapak **Eko Juarlin, S.Si, M.Si** selaku pembimbing pertama yang dengan tulus dan ikhlas memberikan bimbingan, ilmu, dan arahan kepada penulis untuk selalu memberikan yang terbaik demi terselesainya skripsi ini.
2. Bapak **Prof. Dr. Rer-nat H. Wira Bahari Nurdin, Drs. Bansawang BJ, M.Si** dan Ibu **Sri Dewi Astuty Ilyas, S.Si, M.Si** sebagai tim penguji skripsi fisika yang telah banyak memberikan masukan dan saran yang sangat membantu dalam penyempurnaan penyusunan skripsi ini.
3. Ibu **Dr. Sri Suryani, DEA** sebagai penasehat akademik yang senantiasa memberikan nasehat, motivasi, dan ilmu kepada penulis selama menjadi mahasiswa.
4. Bapak **Prof. Dr. H. Halmar Halide, M.Sc** sebagai ketua Jurusan Fisika dan ketua program studi Fisika serta Bapak dan Ibu dosen Jurusan Fisika yang telah memberikan bimbingan, arahan dan ilmu selama penulis menjalani studi hingga menyelesaikan skripsi ini.
5. Para Staf Jurusan Fisika **Pak Aji, kak Latif, Pak Ali, Pak Syukur, Pak Mus, Pak Syahrir** dan staf Fakultas MIPA **Pak Iswan, Pak Anwar, Pak Rahmat, Pak Sangkala, Pak Bachtiar, Bu Ratna** serta staf lain yang belum dapat disebutkan namanya satu persatu.

6. Saudariku **Irene Devi Damayanti** yang terus memberikan semangat dan motivasi serta doa. Terima kasih tetap menjadi motivator walaupun telah lebih dulu menjadi wanita karir.
7. Saudari-saudariku yang telah menjadi sahabat terbaik (tapi sebenarnya tidak juga) : **One, miss Uni** yang rempong , **Irene, Yuli'anto, Ani''tukang download''**, **mbak Sari** , dan si nona ''tisyu'' **Mia** .
8. Saudara-saudaraku **Fisika 2009** : mantan anissa's grup *Ara dan Potter, Tari'jo, Rawa, Dian, Ulvy, Awi, Punyu, Yadi, Darti, cub'Aida, Yuyu, Amzar, Fahrul, Arbi, Hendri, Djun, Akmal, Sidik, Hadi, Ga', Andri, Aldi, Yusuf, Indra, Alfred, Cak Nur, dan Mas Yoko* (ketua angkatan yang telah banyak membantu saat 'Sidang'). Terima kasih atas semangat, motivasi, doa, canda tawa, bantuan, serta kebersamaanya yang telah memberikan warna tersendiri dalam perjalanan hidup penulis dikampus. Terima kasih juga untuk *Rara, Tira, Azwar, Ariesna, Rian, dan Ivon* atas kebaikannya selama ini. "*Tetap Semangat*".
9. Teman - teman **Geofisika 2009** : *Kiki, Hasni, Rixs, Momo, Eno, Putri, Ani, Ayu, Debi, Nanank, Roswita, Innah, Ippank, Yudi, Dayat, Eto, Iwank, Fauzy, Maknun, dan Sabo'*. Terima kasih untuk motivasinya.
10. Saudara-saudariku di SMAN Siwalima Ambon, terkhusus untuk *the First Generation Of 95*. Terima kasih untuk motivasi dan doanya, walaupun hanya lewat sms ataupun media sosial tapi sangat membantu.
11. Teman - teman **Mipa 2009** terima kasih atas kebersamaan dan kebaikannya dan kanda-kanda **Fisika 2008, 2007, 2006, 2005, dan 2004** terima kasih

atas segala saran dan bantuannya. Serta adik-adik *Fisika 2010, 2011, dan 2012* terima kasih atas motivasinya.

12. *Corps Asisten Laboratorium Fisika Dasar* Jurusan Fisika FMIPA Unhas terima kasih atas kerja samanya.

13. Teman-teman *KKN UNHAS Gel. 82* terutama *posko Desa Lakessy, Kec. Maritenggae, Sidrap*. Terima kasih atas doa dan motivasinya.

14. Semua pihak yang telah membantu sehingga karya sederhana ini dapat terwujud penulis ucapkan terima kasih.

Akhirnya, hanya kepada Tuhan kita memohon bimbingan, kemudahan, dan keselamatan dalam menapaki "kerasnya" kehidupan. Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat buat para pembaca, khususnya bagi penulis sendiri. Amin.

Makassar, Agustus 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
SARI BACAAN	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang Penelitian	1
I.2 Ruang Lingkup	2
I.3 Tujuan Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
II.1 Kristal Fotonik	4

II.2 Persamaan Maxwell	5
II.2.1 Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Datar	6
II.3 <i>Crystal Photonic Band Gap</i>	11
II.3 Reflektansi dan Transmittansi pada Kristal Fotonik 1-D	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
III.1 Alat dan Bahan	18
III.2 Prosedur Penelitian	18
III.2.1 Tahapan Penelitian	18
III.2.2 Tahapan Program Simulasi	19
III.3 Bagan Alur Penelitian	21
III.4 <i>Flowchart</i> Program Simulasi	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
IV.1 Nilai Transmittansi dengan Sudut datang $0^0, 20^0, 40^0, 60^0$	25
IV.2 Nilai Transmittansi dengan Sudut datang $0^0, 20^0, 40^0, 60^0$ dengan Variasi Ketebalan Lapisan	30
IV.1 Nilai Transmittansi dengan Sudut datang $0^0, 20^0, 40^0, 60^0$	33
BAB V PENUTUP	38

V.1 Kesimpulan	38
V.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN	41

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Salah satu divais optik yang menarik untuk diteliti adalah kristal fotonik, karena kemampuannya untuk menghalangi propagasi gelombang elektromagnetik dalam rentang frekuensi tertentu yang disebut celah pita fotonik atau *Photonic Band Gap* (PBG). Bahan yang memiliki PBG, memiliki banyak potensi yang dapat diaplikasikan dalam bidang optoelektronika dan komunikasi optik.^[1]

Kemampuan bahan kristal fotonik dapat diukur dengan menentukan sifat optiknya. Besarnya reflektansi dan transmitansi yang dihasilkan dari interaksi gelombang elektromagnetik dan sebuah bahan kristal fotonik akan menentukan kemampuan bahan tersebut dengan parameter PBG yang dihasilkan.

Dari berbagai jenisnya, kristal fotonik satu dimensi menarik diproduksi karena dapat bekerja pada setiap skala panjang gelombang dan dapat dihitung secara analisis maupun numerik secara sederhana.^[1]

Pengkajian terhadap kristal fotonik telah berkembang pesat, maka dalam penelitian ini dilakukan penentuan sifat optik terhadap bahan kristal fotonik satu dimensi dengan susunan *multilayer* menggunakan persamaan Maxwell. Adapun metode yang dipakai adalah metode matriks transfer dan perangkat lunak matlab 2009b sebagai simulatornya.

I.2 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada perhitungan nilai reflektansi dan transmitansi dari kristal fotonik *multilayer* dengan variasi indeks bias dan ketebalan lapisan dengan sudut datang yang berbeda-beda pada selang panjang gelombang 0.4 – 1 nm.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah

1. Menghitung nilai reflektansi dari bahan kristal fotonik *multilayer* dengan variasi indeks bias dan ketebalan lapisan dengan sudut datang yang berbeda-beda pada selang panjang gelombang 0.4 – 1 nm.
2. Menghitung nilai Transmitansi dari bahan kristal fotonik *multilayer* dengan variasi indeks bias dan ketebalan lapisan dengan sudut datang yang berbeda-beda pada selang panjang gelombang 0.4 – 1 nm.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

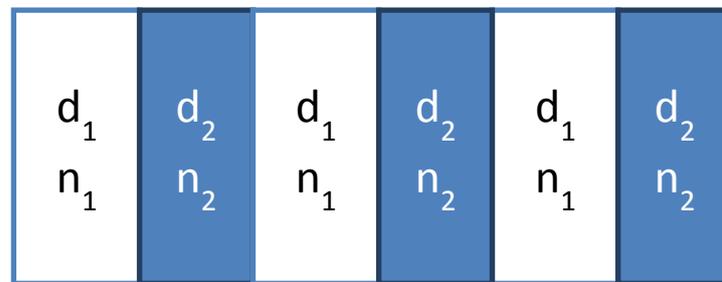
II.1 Kristal Fotonik

Istilah kristal fotonik berasal dari kata “kristal” yang berarti periodisitas bahan dielektik dalam struktur dan “fotonik” yang berarti bahwa foton yang bekerja pada struktur. Kristal fotonik merupakan struktur periodik dari material dielektrik yang memiliki indeks bias berbeda-beda. Keunggulan utama dari kristal fotonik adalah kemampuannya menghalangi propagasi gelombang elektromagnetik dalam rentang frekuensi tertentu yang disebut *Photonic Band Gaps* (PBG). Kristal fotonik banyak digunakan dalam berbagai industri optik untuk komunikasi. PBG adalah suatu rentang frekuensi dimana cahaya tidak dapat merambat melalui struktur kristal fotonik tersebut.^[2]

Kristal fotonik menarik bagi desainer perangkat optoelektronik karena wilayah kerja energi dan panjang gelombang dapat dibatasi sesuai kebutuhan aplikasinya. Kristal fotonik menyajikan sebuah alternatif yang luar biasa untuk masa depan, karena volume divais berkurang, efisiensi meningkat dan proses produksinya yang sederhana.^[3]

Secara umum, kristal fotonik dikelompokkan kedalam tiga kategori berdasarkan dimensi dari susunan periodik material dielektriknya yaitu: satu-dimensi (1D), dua-dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D). Berbagai divais telah dibuat dengan menggunakan struktur kristal fotonik, seperti laser tanpa ambang (*thresholdless*

laser) dan dioda optik nonlinier.^[3] Kristal fotonik satu dimensi menarik untuk dipahami sifatnya karena dapat diproduksi pada setiap skala panjang gelombang tertentu dan secara teoritis sifat-sifatnya dapat dianalisis secara sederhana. Hal ini telah terbukti bahwa kristal fotonik satu dimensi dapat merefleksikan secara berubah-ubah polarisasi total, *transverse electric* (TE), dan *transverse magnetic* (TM).^[3]



Gambar II.1 Struktur dari kristal fotonik satu dimensi.

Salah satu aplikasi dari kristal fotonik adalah *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 *crossphasemodulation*. Dengan menggunakan struktur dari kristal fotonik berdimensi satu, dapat diperoleh suatu struktur dan mekanisme yang efisien dalam proses *switching* (keadaan ON dan OFF yang sepenuhnya dapat dibedakan).^[2]

II.2 Persamaan Maxwell

Interaksi antara gelombang elektromagnetik / cahaya dan materi dideskripsikan oleh vektor medan listrik dan medan magnet. Propagasi dari kedua vektor medan tersebut ditentukan oleh persamaan maxwell. Sebelum membahas persamaan Maxwell, akan dibahas tentang kelistrikan dan kemagnetan yang mencakup empat persamaan penting dan dinyatakan dalam bentuk divergensi dan *curl*. Keempat persamaan yang dimaksud adalah sebagai berikut :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (2.1a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.1b)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1c)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 J \quad (2.1d)$$

Gelombang elektromagnetik merupakan konsekuensi logis dari persamaan Maxwell. Persamaan gelombang EM bebas atau persamaan gelombang tanpa sumber yaitu $\rho = 0$ dan $J=0$, maka persamaan Maxwell dapat ditulis menjadi :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.2a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2b)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2c)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.2d)$$

Persamaan (2.2c) dan (2.2d) menunjukkan hubungan yang terdangeng E dan B (E di ruas kiri dan B di ruas kanan atau sebaliknya). Untuk membuat hubungan tersebut tidak terdangeng, yaitu kedua ruas dinyatakan dalam E saja atau B saja, dapat dilakukan dengan menerapkan operator *curl* pada persamaan tersebut.^[6]

Hasilnya jika $\rho = 0$ dan $J = 0$, maka

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.3a)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.3b)$$

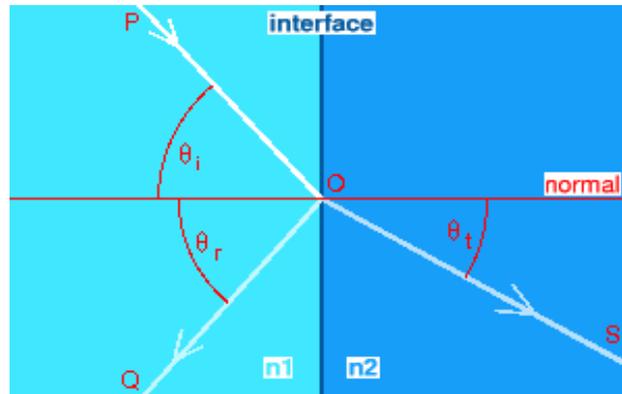
Solusi umum dari persamaan (2.3a) dan (2.3b) sebagai berikut :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.4a)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.4b)$$

II.2.1 Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Datar

Gelombang P yang tiba pada bidang batas, akan terbagi menjadi dua, yakni gelombang bias S yang terus bergerak ke dalam medium dua dengan indeks bias n_2 dan gelombang pantul Q yang bergerak kembali kedalam medium 1 dengan indeks bias n_1 .^[7]



Gambar II.2 Pemantulan dan Pembiasan pada Gelombang Datar.

Dari gambar II.2, syarat kontinuitas akan berlaku setiap saat, dan pada setiap titik di permukaan batas. Maka berlaku hubungan hubungan di bawah ini :

1. Untuk setiap t , $\omega_i t = \omega_r t = \omega_t t$ sehingga $\omega_i = \omega_r = \omega_t$
2. $k_i \cdot r = k_r \cdot r = k_t \cdot r$

Kondisi batas pada $z = 0$ yang memenuhi semua titik pada bidang pada setiap waktu mengimplikasikan bahwa ruang dan waktu bervariasi terhadap medan harus memenuhi $z = 0$. Konsekuensinya faktor fase harus sama pada $z = 0$. $(k \cdot x)_{z=0} = (k' \cdot x)_{z=0} = (k'' \cdot x)_{z=0}$. Persamaan ini mengandung aspek kinematika dari refleksi dan refraksi. Tiga vektor ruang yang terletak pada bidang harus memenuhi :

$$k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r = k_t \sin \theta_t \quad (2.5)$$

karena $\theta_i = \theta_r$ dan $k = \frac{n\omega}{c}$, maka persamaan (2.5) menjadi :

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.6)$$

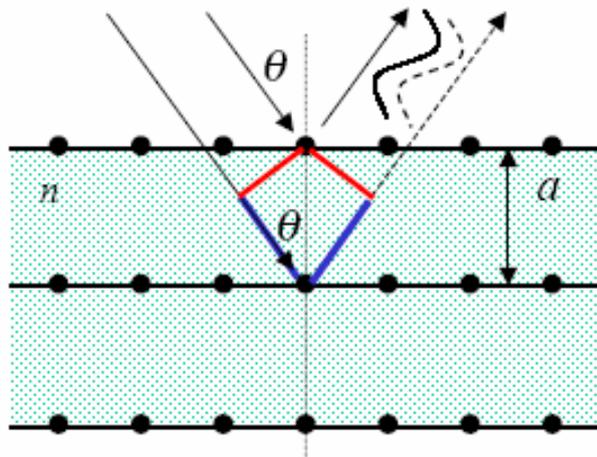
Persamaan (2.6) inilah yang dikenal dengan hukum Snellius.^[7]

Hukum Snellius berbunyi :

1. Sinar datang, sinar bias, dan garis normal terletak pada sebuah bidang datar.
2. Sinar datang dari medium kurang rapat ke medium lebih rapat, dibiaskan mendekati garis normal. Sebaliknya, bila sinar datang dari medium lebih rapat ke medium lebih renggang maka dibiaskan menjauhi garis normal

Sesuai hukum Bragg, untuk dua gelombang yang datang sefase dan membentuk sudut terhadap arah normal bidang dapat dituliskan:

$$\frac{\lambda}{n} = 2a \cos \theta \quad (2.7)$$



Gambar II.3 Pemantulan pada Hukum Bragg

Besarnya panjang gelombang dalam medium kristal akan berubah secara periodik sesuai dengan indeks biasnya.

$$\lambda_1 = 2 \frac{a}{2} \cos \theta_1 n_1 = a n_1 \cos \theta_1 \quad (2.8a)$$

$$\lambda_2 = 2 \frac{a}{2} \cos \theta_2 n_2 = a n_2 \cos \theta_2 \quad (2.8b)$$

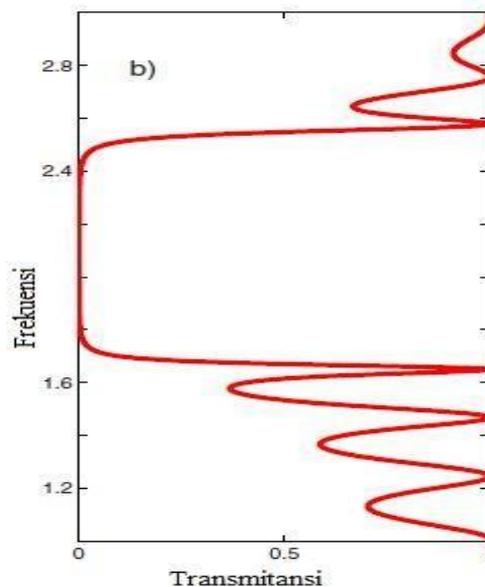
Jika $n_1 < n_2$ maka $\lambda_1 < \lambda_2$

$$\omega_1 - \omega_2 = 2\pi c \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{2\pi c}{a} \left(\frac{n_2 \cos \theta_2 - n_1 \cos \theta_1}{n_1 n_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) \quad (2.9a)$$

Untuk kasus normal (θ_1 dan $\theta_2 = 0$) maka $\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = 1$, sehingga persamaan (2.9a) menjadi

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{2\pi c}{a} \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 n_2} \right) \sim (n_2 - n_1) = \Delta n \quad (2.9b)$$

Makna fisis persamaan (2.9b) adalah lebar frekuensi terjadinya *band gap* tergantung pada selisih indeks bias antara medium satu dengan medium dua.^[7]

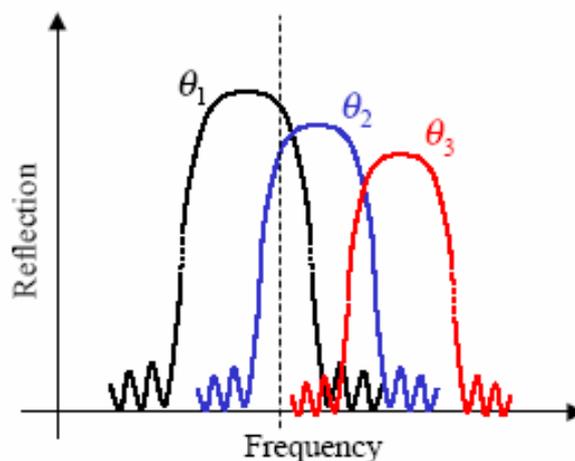


Gambar II.4 Hubungan antara transmitansi dengan frekuensi.^[8]

Perbedaan indeks refraksi yang kontras memiliki peranan penting terhadap pembentukan PBG, terdapat dua alasan. Pertama, setiap lapisan batas kristal fotonik dengan indeks refraksi kontras, lebih cenderung untuk menghamburkan gelombang

yang datang dari segala arah, sehingga PBG lebih mudah terbentuk. Kedua, semakin tinggi perbedaan indeks refraksi, semakin sedikit jumlah lapisan kristal fotonik yang dibutuhkan untuk menghasilkan efek PBG.^[8]

Besar sudut datang θ_i dapat mempengaruhi posisi *band gap*, yakni selang panjang gelombang yang tidak dapat menembus struktur kristal. Pengaruh sudut datang yang dibentuk oleh gelombang EM terhadap arah normal kristal adalah berubahnya posisi *band gap*. Pada sudut $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ *band gap* akan semakin bergeser ke arah kanan (kearah frekuensi yang lebih besar) untuk polarisasi *Transverse Electric* dan *Transverse Magnetic*. Pada kasus *omnidirectional*, terdapat suatu selang frekuensi dimana gelombang EM tidak dapat menembus struktur kristal untuk setiap sudut datang yaitu diantara frekuensi diantara gap saat *normal incidence* dan gap pada TM pada sudut 90° Selang frekuensi tersebut dinamakan *total omnidirectional reflection* yang dimanfaatkan sebagai alat penyekat atau bahan isolasi fotonik.^[7]

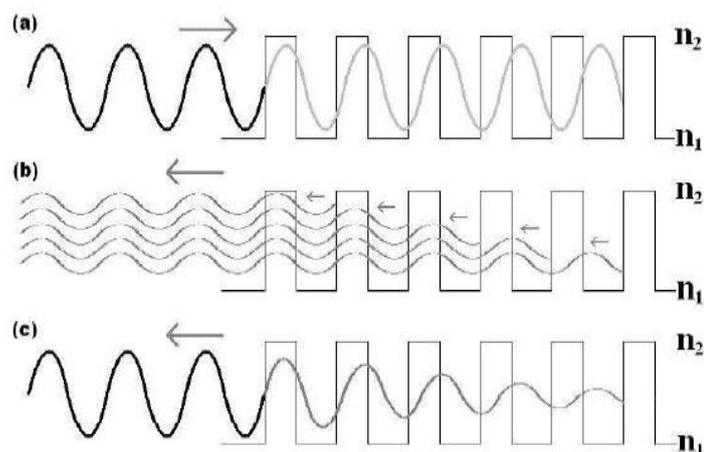


Gambar II.5 Hubungan frekuensi dengan variasi sudut terhadap reflektansi

II.3 Crystal Photonic Band Gap

Ketika Gelombang EM datang memasuki susunan periodik (misalnya n_1 dan n_2), sebagian gelombang tersebut akan direfleksikan oleh setiap permukaan batas lapisan n_1 - n_2 . Jika seluruh gelombang yang direfleksikan sebagian tersebut sefase, maka akan terjadi interferensi konstruktif pada refleksi sehingga gelombang datang tidak dapat menembus struktur kristal seperti pada gambar II.6. Selang panjang gelombang datang yang terefleksi total disebut *photonic bandgap* (PBG).^[7]

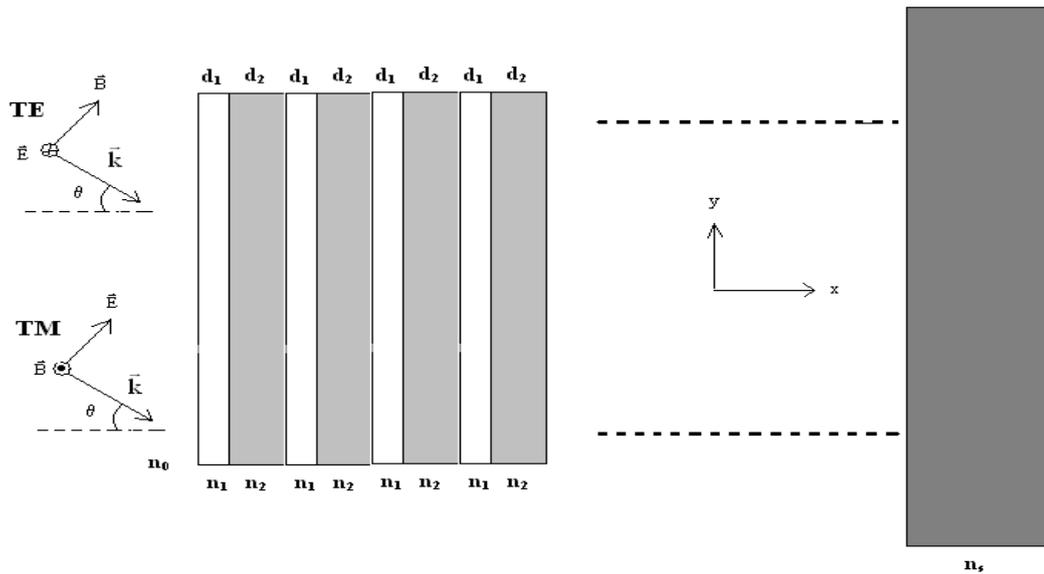
Gambar II.6 memperlihatkan proses terjadinya PBG dalam kristal fotonik satu dimensi. (a) Gelombang datang dengan nilai λ dalam selang PBG memasuki struktur periodik n_1 - n_2 .(b) Gelombang datang direfleksikan oleh tiap permukaan batas. (c) Jika setiap gelombang refleksi sefase, maka gelombang tersebut terefleksi total dan tidak dapat menembus struktur kristal.^[7]



Gambar II.6 Mekanisme terjadinya PBG dalam kristal fotonik 1-dimensi.

Bahan yang digunakan untuk membuat sebuah *Photonic Band Gap* : Silikon, Germanium, Gallium Arsenat, dan Indium Fosfit.^[9]

Struktur kristalfotonik 1-D terdiri dari lapisan -lapisan material dielektrik dengan indeks bias dan ketebalan yang bervariasi secara periodik, seperti yang ditunjukkan dalam gambar II.7.^[3]



Gambar II.7 Skema sistem *multilayer* dengan vektor gelombang datang \vec{k} .^[3]

Sistem *multilayer* yang dibuat pada gambar II.7 dalam penelitian ini terdiri dari dua bahan kristal fotonik yang memiliki indeks bias berbeda beda yaitu n_1 dan n_2 , dengan ketebalan d_1 dan d_2 yang disusun menjadi empat lapisan. Ketebalan dari setiap lapisan pada sistem *multilayer* ini divariasikan dengan ukuran berbeda beda. Ketika ketebalan d_1 divariasikan, maka d_2 konstan dan sebaliknya ketika ketebalan d_2 divariasikan maka d_1 konstan.

Untuk memahami perambatan gelombang elektromagnetik dan pembentukan celah pita fotonik pada kristal fotonik 1-D dapat dijelaskan secara teoritis, salah satunya dengan menggunakan metoda Matriks Transfer.^[3]

Gelombang *transverse electric* (TE) datar stasioner merambat melalui kristal fotonik, akan direfleksikan dan direfraksikan pada tiap permukaan indeks modulasi periodik ($n_1 - n_2$). Dimana untuk kasus yang ditinjau gelombang TE datang pada arah x normal terhadap bidang permukaan fotonik sehingga sudut $\theta = 90^\circ$, yang berarti tidak ada gelombang yang akan direfraksikan, gelombang datang akan ditransmisikan atau direfleksikan sebagian ataupun seluruhnya. d adalah periodisitas kristal ($d_1 + d_2$) yang nilainya setengah dari panjang lintasan optiknya.^[7]

Perambatan Gelombang TE dalam kristal fotonik satu dimensi direpresentasikan oleh persamaan gelombang untuk medan E sebagai berikut :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r \mu_r \vec{E} = 0 \quad (2.10)$$

dimana c merupakan kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang vakum ($c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$) , ϵ_r merupakan permitivitas relatif bahan ($\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$) dan $\epsilon(x)\mu(x) = n^2(x)$, dengan $n(x)$ adalah indeks bias. Digambarkan bahwa propagasi gelombang elektromagnetik berada pada sumbu- x dan polarisasi linear. Dengan mengambil sumbu- y sebagai arah polarisasi. Medan listrik dari propagasi gelombang dilambangkan oleh fungsi kompleks $E(x,y)$, yaitu :

$$E(x,y) = E(x)e^{iby} \quad (2.11)$$

Vektor medan magnet \vec{H} dapat diperoleh sepanjang sumbu- y :

$$\vec{H} = \frac{i}{\omega\mu} \vec{\nabla}_x \vec{E} \quad (2.12)$$

Solusi persamaan (2.10) adalah superposisi dari perambatan gelombang. 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 solusi persamaan (2.11) untuk lapisan dengan indeks bias n_1 dan n_2 adalah

$$E(x) = A_1 e^{ik_{1x}x} + B_1 e^{-ik_{1x}x} \quad (2.13a)$$

dan

$$E(x) = C_1 e^{ik_{2x}(x-d_1)} + D_1 e^{-ik_{2x}(x-d_1)} \quad (2.13b)$$

Parameter k_{1x} dan k_{2x} merupakan bilangan gelombang, dan didefinisikan sebagai

$$k_{1x} = \frac{\omega}{c} n_1 \cos\theta_1 \quad \text{dan} \quad k_{2x} = \frac{\omega}{c} n_2 \cos\theta_2.$$

Pada batas antar lapisan ($x=d_1$), persamaan (2.11) dan (2.12) harus kontinu, sehingga hubungan antar amplitudo panjang gelombang :

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = M_{12} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Dengan

$$M_{12} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_{1x}}{k_{2x}}\right) e^{ik_{1x}d_1} & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_{1x}}{k_{2x}}\right) e^{-ik_{1x}d_1} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_{1x}}{k_{2x}}\right) e^{ik_{1x}d_1} & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_{1x}}{k_{2x}}\right) e^{-ik_{1x}d_1} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Pada $x = d$, batas antara lapisan dengan indeks n_2 dan n_1 berlaku pula syarat kontinuitas dari persamaan (2.11) dan (2.12), sehingga :

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M_{21} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Dimana matriks M_{21} adalah sama dengan persamaan (2.15) tetapi bertukar indeks. Dengan menggunakan persamaan (2.15) dan (2.16), C_I dan D_I dieliminasi, sehingga muncul matriks untuk stuktur biner :

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M_{21} M_{12} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2.17a)$$

Atau

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = M_{i,j} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2.17b)$$

Dimana $M_{i,j} = M_{21} M_{12}$. Matriks $M_{i,j}$ disebut sebagai Matriks Transfer dari sebuah unit kisi. Matriks $M_{i,j}$ bergantung kepada frekuensi ω dan bersifat unimodular. Karena pada setiap ω , matriks $M_{i,j}$ menggambarkan pola yang unik untuk amplitudo gelombang datar dari lapisan n_1 ke lapisan berikutnya dengan indeks bias n_2 . Komponen dari matriks $M_{i,j}$ adalah :

$$M_{1,1} = e^{ik_{1x}d_1} [\cos(k_{2x}d_2) + \frac{1}{2}i \left(\gamma + \frac{1}{\gamma} \right) \sin(k_{2x}d_2)] \quad (2.18a)$$

$$M_{1,2} = e^{-ik_{1x}d_1} \left[+\frac{1}{2}i \left(\gamma - \frac{1}{\gamma} \right) \sin(k_{2x}d_2) \right] \quad (2.18b)$$

$$M_{2,2} = M_{1,1} \quad (2.18c)$$

dan

$$M_{2,1} = M_{1,2} \quad (2.18d)$$

dengan $\gamma = \frac{k_{1x}}{k_{2x}}$ untuk *transverse electric mode* dan $\gamma = \frac{k_{1x} X n_2^2}{k_{2x} X n_1^2}$ untuk *transverse magnetic mode*.^[1]

II.4 Reflektansi dan Transmittansi pada Kristal Fotonik 1-D

Diasumsikan susunan periodik dari film multilayer memiliki indeks bias n_1 dan n_2 , serta ketebalan d_1 dan d_2 dan terdiri dari N unit sel. Dengan menggunakan metode matriks transfer, yang mengalikan transfer matriks setiap bagian, dapat dihitung koefisien dari keadaan propagasi yang menyebar disisi kanan dan kiri.

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = (M_{i,j})_1 (M_{i,j})_2 (M_{i,j})_3 \dots (M_{i,j})_N \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Koefisien refleksi diberikan oleh :

$$r_N = \left(\frac{B_0}{A_0} \right)_{B_N=0} \quad (2.20)$$

Reflektansi diperoleh dengan mengambil nilai absolut dari koefisien refleksi, yaitu :

$$R = (|r_N|)^2 \quad (2.21)$$

Transmittansi (T) merupakan nilai kuadrat rasio antara amplitudo medan yang diteruskan (A_{tr}) melalui kristal fotonik dengan amplitudo yang datang (A_{in}), maka :

$$T = \left| \frac{A_{tr}}{A_{in}} \right|^2 \quad (2.22)$$

Jika ditinjau suatu sistem kristal fotonik sempurna seperti pada gambar 2.8 dengan mengabaikan pengaruh translasi medan pada medium n_0 , maka perambatan medan TE dalam strukturnya dapat dituliskan kembali dari persamaan 2.19,

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = (M_{i,j})_1 (M_{i,j})_2 (M_{i,j})_3 \dots (M_{i,j})_N \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Dengan A_0 menyatakan amplitudo medan TE yang datang dari lapisan pertama (A_{in}), B_0 menyatakan amplitudo medan TE total yang direfleksikan oleh struktur fotonik menuju lapisan pertama, A_N menyatakan amplitudo medan TE yang diteruskan oleh struktur kital fotonik dan B_N sama dengan nol. Dengan membagi kedua ruas persamaan 2.21 dengan A_N maka diperoleh :

$$\begin{pmatrix} \frac{A_0}{A_N} \\ \frac{B_0}{A_N} \end{pmatrix} = [\mathbf{M}]_{2 \times 2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}(1,1) \\ \mathbf{M}(2,1) \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Dengan membandingkan persamaan 2.23 dengan persamaan 2.24 diperoleh :

$$T(\omega) = \left| \frac{A_{tr}}{A_{in}} \right|^2 = \left| \frac{A_N}{A_0} \right|^2 = \frac{1}{[\mathbf{M}(1,1)]^2} \quad (2.25)$$

Transmitansi sebagai fungsi frekuensi ω , dengan $\mathbf{M}(1,1)$ merupakan komponen matriks \mathbf{M} baris ke-1 dan kolom ke-1. Persamaan 2.23 inilah yang digunakan untuk mendapatkan grafik hubungan transmitansi terhadap frekuensi pada kristal fotonik (grafik tersebut ditunjukkan pada gambar II.4).^[8]