



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



NANOFOTONIKA Sains dan Teknologi Berbasis Cahaya pada Ukuran Sepemiliar Meter

Profesor Alexander Agustinus Popo Iskandar
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
17 Februari 2024

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

NANOFOTONIKA

SAINS DAN TEKNOLOGI BERBASIS CAHAYA
PADA UKURAN SEPERMILIAR METER

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

NANOFOTONIKA

SAINS DAN TEKNOLOGI BERBASIS CAHAYA PADA UKURAN SEPERMILIAR METER

Prof. Alexander A.P. Iskandar

17 Februari 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**NANOFOTONIKA: SAINS DAN TEKNOLOGI BERBASIS CAHAYA
PADA UKURAN SEPERMILIAR METER**

Penulis : Prof. Alexander A.P. Iskandar

Reviewer : Prof. A. Agung Nugroho

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-400-5

e-ISBN : 978-623-297-403-6 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Ketika struktur Kristal Fotonik (*Photonics Crystals*) mulai dikembangkan pada tahun 1990-an, cita-cita para Fisikawan untuk mewujudkan komputer optik menjadi selangkah lebih dekat. Kristal Fotonik ini menjadi kandidat semikonduktor untuk cahaya. Dibayangkan bahwa komunikasi optik yang mempergunakan gelombang soliton optik dapat langsung diolah dengan prosesor optik, tanpa melalui konversi optik ke elektronik. Pada saat yang sama, dipertengahan dekade tersebut, kami menyelesaikan pendidikan doctoral dalam bidang Fisika Teori Partikel Elementer, dengan topik disertasi adalah solusi soliton terikat yang berosilasi (*breather*). Melihat fenomena fisika dari cahaya dan luasnya potensi aplikasi dari teknologi berbasis cahaya, kami mengambil keputusan untuk berpindah ke bidang optika.

Sejak awal milenium kedua ini, kami menceburkan diri sepenuhnya dalam bidang optika, khususnya teori dan *modeling* fenomena optika pada skala panjang nanometer; 1 nanometer adalah sepemiliar dari 1 meter. Oleh karenanya bidang ini dikenal dengan nama Nanofotonika (*Nanophotonics*). Setelah lebih dari 2 dekade sejak dikenalnya Kristal Fotonik, saat ini para fisikawan menyadari bahwa impian untuk dapat mewujudkan komputer yang seluruhnya bekerja berdasarkan cahaya masih belum dapat tercapai. Namun demikian, perjalanan pengembangan keilmuan kami dalam bidang Nanofotonika yang terinspirasi dari Kristal Fotonik tersebut, telah membawa banyak penemuan baru. Khususnya adalah penemuan pemahaman ilmiah baru mengenai fenomena interaksi cahaya pada struktur berukuran nanometer, dan pengusulan aplikasi-aplikasi baru sebagai devais pengindra (*sensing device*) dan devais pencitra (*imaging device*).

Pada dasarnya kami adalah seorang Ilmuwan (*Scientist*) atau lebih tepatnya seorang Fisikawan (*Physicist*) teori. Sebagai fisikawan teori, premis kami adalah bahwa sebelum rancangan suatu devais dapat diwujudkan, diperlukan proses desain dan optimasi. Untuk menghindari biaya besar dalam sistem *trial-and-error* pada eksperimen, pemodelan dan simulasi menjadi sangat penting. Untuk itu kami mengedepankan pemodelan dan simulasi menggunakan pendekatan pemahaman teoritis analitik. Artinya perhitungan yang kami lakukan, selalu diusahakan sebagai perhitungan analitik. Dalam

perumusan analitik ini, semua permasalahan diselesaikan dalam bentuk fungsi matematika yang dikenal, atau setidaknya dalam perumusan semi-analitik, di mana hanya pada bagian akhir, kami menggunakan komputasi untuk mendapatkan hasil yang dicari. Melalui perumusan analitik ini, pemahaman atas perilaku dan sifat karakteristik suatu fenomena dapat lebih mudah dilakukan melalui bagian-bagian rumusan eksplisit fungsi yang terkait.

Kami menuliskan buku ini sebagai tanggung jawab akademik pengembangan bidang keilmuan yang kami tekuni. Di pihak lain, tulisan ini juga bertujuan agar masyarakat umum dapat memahami dan mengapresiasi keindahan Fisika, khususnya fenomena cahaya pada ukuran yang sangat kecil, Nanofotonika, oleh karenanya kami berusaha memaparkan temuan-temuan dan usulan aplikasi yang kami hasilkan, dalam bahasa yang mudah dimengerti. Besar harapan kami bahwa buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat luas.

Bandung, 17 Februari 2024

Penulis

SINOPSIS

Sejak jaman purbakala, manusia telah berupaya meningkatkan kesejahteraan dan kenyamanan hidupnya dengan menggunakan berbagai sarana, termasuk menggunakan cahaya. Dalam 70 tahun terakhir, terutama sejak penemuan LASER (*light amplification by stimulated emission radiation*), terjadi kemajuan pesat dalam pemanfaatan cahaya untuk kepentingan manusia. Teknologi berbasis cahaya telah merambah berbagai bidang yang berkaitan dengan kehidupan kita, termasuk komunikasi, kedokteran dan biologi, serta pertahanan.

Tuntutan teknologi masa depan terus meningkat dengan karakteristiknya: miniaturisasi, efisiensi, dan fungsionalitas tinggi, menyebabkan desain devais berbasis cahaya saat ini telah mencapai tingkat ukuran nanometer. Skala ukuran satu nanometer adalah sepemiliar meter. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan cahaya pada skala ini, pemahaman ilmiah yang mendalam sangat diperlukan. Sebagai seorang fisikawan, kami berkontribusi dalam menguasai ilmu pengetahuan dan menggali pemanfaatan fenomena cahaya pada skala ukuran nanometer ini yang dikenal sebagai bidang keilmuan nanofotonik.

Mengingat pengembangan ilmu fisika yang selalu dimulai dari prinsip dasar, demikian pula eksplorasi kami tentang perilaku cahaya pada skala nanometer dimulai dari memahami sifat dan respons dari bangun dasar berbentuk sistem periodik yang dikenal sebagai Kristal Fotonik. Di samping itu, secara khusus, kami juga mempelajari interaksi gelombang elektromagnetik dengan logam, yang memiliki sifat khas dalam bentuk resonansi Plasmon Permukaan (*Surface Plasmon Resonance*, SPR). Resonansi Plasmon Permukaan ini memiliki sifat karakteristik berupa spektrum dan ukuran spatial yang tajam. Karena respons karakteristik ini sangat dipengaruhi oleh sifat fisis lingkungan, berbagai pemahaman baru dan aplikasi berbasis resonansi Plasmon Permukaan telah kami dikembangkan. Cabang ilmu ini dinamakan Plasmonik.

Dalam perjalanan perancangan berbagai devais nanofotonik berbasiskan Kristal Fotonik dan logam di atas, kami telah memperkaya ilmu pengetahuan nanofotonik ini. Di antaranya adalah memberikan pemahaman yang lebih

baik atas peristiwa pembendungan energi pada suatu rongga dan kaitannya dengan perumusan gelombang Bloch, serta pengusulan sebuah skema penggabungan keadaan optik (*photonic state mixing*) yang lebih kaya daripada teori hibridisasi resonansi Plasmon (*Plasmon Hybridization*) yang telah dikenal.

Interaksi gelombang elektromagnetik dengan suatu struktur devais tidak lain adalah sebuah peristiwa hamburan. Dalam hal ini, ada dua cara perumusan. Pertama sebagai perumusan eksplisit gelombang hambur dalam analisis Hamburan Mie. Kedua sebagai rumusan hamburan implisit, menggunakan matriks hamburan. Melalui analisis hamburan Mie berbagai aplikasi kami temukan, mulai dari sistem pengindera (*sensor*) sampai sistem pencitra (*imaging*) dan sistem layar (*display*). Sedangkan rumusan matriks hamburan dipergunakan dalam analisis sistem terintegrasi.

Untuk meningkatkan fungsionalitas dari devais yang dirancang, beberapa hal telah kami lakukan. Pertama, menambahkan cacat atau merusak simetri dari sistem; kedua, mempergunakan sifat nonlinieritas dari materi yang dipakai; dan ketiga, menggandengkan satu devais dengan devais lainnya menjadi devais terintegrasi. Dalam kaitan peningkatan fungsionalitas ini, kami menghasilkan beberapa rancangan komponen dasar devais berbasis optik. Di antaranya adalah devais penapis (*filtering*), devais pengindera (*sensing*) non-konvensional, devais saklar optik serta devais terintegrasi untuk komunikasi.

Beberapa metode telah kami gunakan dan kembangkan untuk penambahan ilmu dan perancangan aplikasi baru yang diuraikan di atas. Metode-metode tersebut di antaranya adalah metode transfer matriks, metode tensor Green dengan perumusan Dyson dan fungsi Green skalar, metode hamburan Mie dengan basis fungsi harmonik bola vektor, serta metode algoritma genetik.

DAFTAR ISI

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PRAKATA..... | v |
| SINOPSIS | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Dari Euclid ke Al-Haytham sampai Maxwell dan Einstein..... | 2 |
| 1.2 Sains Cahaya serta Teknologi dan Aplikasi Berbasis Cahaya | 4 |
| 1.3 Nanofotonika untuk Kemaslahatan Manusia..... | 6 |
| 2. BANGUN DASAR NANOFOTONIK | 9 |
| 2.1 Kristal Fotonik | 9 |
| 2.2 Struktur Nano Berbasis Logam | 20 |
| 3. HAMBURAN | 29 |
| 3.1 Teori Hamburan Gelombang Elektromagnetik..... | 29 |
| 3.2 Penginderaan Menggunakan Hamburan | 32 |
| 3.3 Rekayasa Hamburan | 35 |
| 3.4 Sistem Pencitra dan Sistem Layar | 41 |
| 3.5 Identifikasi Agregat melalui Hamburan..... | 46 |
| 4. OPTIKA NONLINIER DAN NANOFOTONIK TERINTEGRASI | 49 |
| 4.1 Saklar Optik..... | 49 |
| 4.2 <i>Optical Limiter</i> | 53 |
| 4.3 Meningkatkan <i>Magneto-Optic Kerr Effect</i> dengan Merusak Simetri Objek..... | 54 |
| 4.4 <i>Optical Add-Drop Multiplexer</i> | 57 |
| 4.5 Sumber Foton untuk Aplikasi Kuantum | 59 |
| 5. KESIMPULAN DAN PROSPEK MASA DEPAN | 63 |
| 6. UCAPAN TERIMA KASIH | 65 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 69 |
| CURRICULUM VITAE..... | 77 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1.1 | Garis besar lingkup bahasan Sains, Teknologi dan Aplikasi Nanofotonika dalam buku ini. | 8 |
| Gambar 2.1 | Kristal Fotonik yang merupakan struktur periodik dalam (a) 1D, (b) 2D atau (c) 3D. | 9 |
| Gambar 2.2 | Struktur Pita Fotonik (<i>Photonic Band Structure</i>) yang menunjukkan adanya rentang Pita Fotonik Terlarang (<i>Photonic Band Gap</i>) untuk Kristal Fotonik (a) 1D dan (b) 2D. | 10 |
| Gambar 2.3 | Kurva Transmisi karakteristik dari sebuah Kristal Fotonik 1D yang tersusun dari 10 sel satuan dua lapisan dielektrik indeks bias n_1 dan n_2 dengan ketebalan masing-masing d_1 dan d_2 | 11 |
| Gambar 2.4 | Cara kerja saklar optik, di mana pada (a) keadaan <i>off</i> , sinyal penyelidik (<i>probe signal</i>) berada di dalam rentang Pita Fotonik Terlarang, dan (b) keadaan <i>on</i> , sinyal penyelidik berada pada rentang Pita Transmisi yang homogen. (c) Melalui optimasi ketebalan, diperoleh rentang Pita Transmisi homogen dengan transmisi hampir 100%. | 12 |
| Gambar 2.5 | Spektrum transmisi dari sistem Kristal Fotonik 1D untuk 2 keadaan, pada suhu kamar (T) dan ($T + \Delta T$). Kristal Fotonik tersusun dari 20 sel satuan dua lapisan dielektrik indeks bias n_1 dan n_2 dengan ketebalan masing-masing d_1 dan d_2 serta koefisien termooptik α | 14 |
| Gambar 2.6 | Pemanduan cahaya yang berada di dalam rentang Pita Fotonik Terlarang dari struktur Kristal 2D dengan sel satuan berbentuk bujursangkar dan memiliki cacat garis. | 15 |
| Gambar 2.7 | (a) Struktur Pita Fotonik dengan modus cacat (<i>defect mode</i>) yang terletak di dalam rentang Pita Terlarang. (b) Iluminasi dengan frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.4$, (c) frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.375$, dan (d) frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.373$ | 16 |

- Gambar 2.8 (a) Struktur Kristal Fotonik 2D dengan sel satuan berbentuk triangular yang memiliki sebuah cacat titik. (b) Sketsa spektrum Rapat Keadaan Optik Lokal (*Local Density of Optical States*, LDOS), spektrum merah yang memiliki selektivitas tinggi dan dikuantifikasi dengan faktor kualitas yang lebih tinggi dari spektrum biru. (c) Hasil perhitungan LDOS dengan metode Tensor Green, terlihat LDOS yang besar didapatkan pada lokasi cacat. 17
- Gambar 2.9 (a) Peningkatan Faktor Kualitas (Q) dari rongga L3 akibat modifikasi komponen Kristal di sekitar rongga. (b) Pembendungan energi pada rongga tanpa modifikasi. (c) Pembendungan energi yang lebih besar karena modifikasi dua komponen ujung dari rongga L3. 18
- Gambar 2.10 (a) Faktor Kualitas (Q) dan Faktor Penguatan (F) dari cacat titik pada struktur Kristal Fotonik dengan sel satuan triangular terhadap variasi banyaknya jumlah lapisan komponen Kristal yang melingkupi cacat [direproduksi dari (Putra, 2011) atas izin *American Physical Society*]. (b) Struktur Kristal Fotonik 2D dengan cacat yang dimodifikasi, yaitu berupa silinder yang memiliki ukuran ataupun bahan yang berbeda dari komponen silinder Kristal Fotonik lainnya. 20
- Gambar 2.11 Osilasi awan elektron pada bola nano logam emas yang diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik dengan medan listrik yang berosilasi. Pada kondisi resonansi plasmon permukaan yang terlihat melalui peningkatan energi (intensitas) di permukaan bola logam. 21
- Gambar 2.12 (a) Skema Hibridisasi Plasmon Permukaan dari sistem dimer bola logam berukuran nanometer. Interaksi Plasmon Permukaan pada kedua nanopartikel bola membentuk keadaan Hibrid dengan energi ikat tertentu yang bergantung dari ukuran nanopartikel dan jarak kedua nanopartikel. Dari perhitungan menggunakan teori Mie, diperoleh rumusan empiris yang berlaku umum untuk energi ikatan tersebut. (b) Variasi energi ikatan sebagai fungsi dari jarak antar nanopartikel dan

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | ukuran dari nanopartikel [direproduksi dari (Stephanie, 2018) atas izin <i>World Scientific Publishing</i>]. | 23 |
| Gambar 2.13 | Spektrum LDOS dari sebuah silinder Perak yang berbatasan dengan bahan berpermittivitas (a) $\epsilon_3 = 1$ dan (b) $\epsilon_3 = 4$. (c) Spektrum penampang potongan dari nilai LDOS ternormalisasi yang bersangkutan [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin <i>AIP Publishing</i>]. | 24 |
| Gambar 2.14 | Spektrum LDOS dari sebuah rongga pada <i>bulk</i> Perak dengan permittivitas medium rongga adalah (a) $\epsilon_1 = 1$, (b) $\epsilon_1 = 4$ dan (c) $\epsilon_1 = 13.4$. (d) Spektrum penampang potongan dari nilai DOS yang bersangkutan yang menunjukkan adanya eksitasi Plasmon Permukaan dan eksitasi modus resonansi rongga yang diskrit, khususnya pada (b) dan (c) [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin <i>AIP Publishing</i>]. | 25 |
| Gambar 2.15 | (a) Spektrum nilai DOS dari modus-modus yang tereksitasi dalam rongga silinder logam Perak dengan variasi bahan dielektrik di dalam rongga. (b) Spektrum nilai DOS dari modus-modus yang tereksitasi dalam rongga silinder logam perak dengan variasi ketebalan silinder perak [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin <i>AIP Publishing</i>]. | 25 |
| Gambar 2.16 | Model Pencampuran Keadaan Fotonik (<i>Photonic States Mixing</i>) yang lebih umum dari model Hibridisasi Plasmon Permukaan dan rumusan empiris dari energi ikatan pencampuran. | 26 |
| Gambar 2.17 | (a) Super-sel satuan dengan sebuah cacat titik yang merupakan silinder dielektrik yang dibungkus oleh lapisan logam. (b) Peningkatan energi yang terbandung pada silinder cacat yang bertumbuh bersama ketebalan dari lapisan logam. (c) Variasi faktor atenuasi amplitudo medan pada permukaan dalam lapisan logam sebagai fungsi dari ketebalan lapisan logam [direproduksi dari (Suryadharma, 2014), atas izin <i>IOP Publishing</i>]. | 27 |

Gambar 3.1 Beberapa contoh objek penghambur, silinder dan bola merupakan objek penghambur dengan simetri yang cukup tinggi, kubus memiliki simetri diskrit dan agregat tidak memiliki simetri. 30

Gambar 3.2 (a) Sebuah agregat rantai dari nanopartikel diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik dengan vektor propagasi dan medan listrik E seperti pada gambar. (b) Pola intensitas radiasi total. (c) Pola intensitas radiasi kontribusi dipol listrik. (d) Pola intensitas radiasi kontribusi dipol magnet. (e) Pola intensitas radiasi kontribusi kuadropol listrik. (f) Pola intensitas radiasi kontribusi kuadropol magnet. (g) Pola intensitas radiasi kontribusi oktopol listrik. (h) Pola intensitas radiasi kontribusi oktopol magnet. (i) Pola intensitas radiasi kontribusi heksadekapol listrik. (j) Pola intensitas radiasi kontribusi heksadekapol magnet. 31

Gambar 3.3 (a) Konfigurasi penginderaan zat yang terletak di luar tabung Perak, (b) konfigurasi penginderaan zat cair yang terletak di dalam tabung Perak. (c) Variasi FOM dari setiap zat yang diletakkan di luar tabung Perak sebagai fungsi ketebalan tabung, (d) Variasi FOM dari setiap zat yang diletakkan di dalam tabung Perak sebagai fungsi ketebalan tabung [direproduksi dari (Isro, 2017), atas izin *IOP Publishing*]. 33

Gambar 3.4 (a) Geometri tabung Perak dengan lubang non-konsentrik yang tergeser sejauh d . (b) Melalui variasi pergeseran d , tampak bahwa resonansi dengan panjang gelombang terendah (frekuensi tinggi) tidak bergeser, resonansi ini diasosiasikan dengan modus rongga pada struktur, sedangkan resonansi berpanjang gelombang tinggi (frekuensi atau energi lebih rendah) yang diasosiasikan dengan hibridisasi Plasmon Permukaan mengalami pergeseran merah. (c) Akibat lain dari lubang yang non-konsentrik adalah radiasi terarah [direproduksi dari (Isro 2019), atas izin *OPTICA*]. 34

Gambar 3.5 (a) Variasi sudut datang gelombang iluminasi memberikan radiasi hambur yang kurang lebih tidak

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | berubah, yaitu ke depan, dan nilai intensitas arah ke depan ini berkorelasi dengan arah datang gelombang iluminasi tersebut. (b) Relasi antara intensitas arah ke depan dengan sudut datang gelombang iluminasi [direproduksi dari (Isro, 2019), atas izin <i>OPTICA</i>]..... 34 | 34 |
| Gambar 3.6 | (a) Konfigurasi iluminasi sebuah kubus dielektrik. (b) Penampang lintang hamburan dan dekomposisinya ke dalam kontribusi multipol elektromagnetiknya [direproduksi dari (Perdana, 2021), atas izin <i>OPTICA</i>]. 36 | 36 |
| Gambar 3.7 | (a) Konfigurasi dua buah kubus dielektrik yang diiluminasi sebuah gelombang elektromagnetik. (b) Penampang lintang hamburan interaksi dari hanya kubus pertama, terlihat bahwa muncul dua multipol baru, yaitu kuadrupol listrik dan kuadrupol magnetik pada frekuensi 581 THz. (c) Penampang hambur dari hanya kontribusi kuadrupol magnetik pada resonansi 581 THz dan 666 THz sebagai fungsi dari jarak antar penghambur [direproduksi dari (Perdana, 2021) atas izin <i>OPTICA</i>]. 36 | 36 |
| Gambar 3.8 | Resonansi Fano yang memiliki spektrum asimetrik merupakan hasil interferensi dari resonan yang bersifat tajam (diskrit) dengan latar belakang yang kontinu. 37 | 37 |
| Gambar 3.9 | (a) Penampang lintang hamburan dari sebuah nanopartikel Emas yang didominasi oleh eksitasi dipol listrik, (b) penampang lintang hamburan sistem dimer nanopartikel Emas yang memiliki kontribusi dari eksitasi dipol magnet dan kuadrupol listrik. (c) Penampang lintang hamburan sebuah nanopartikel Silikon dengan eksitasi dipol magnet pada rentang panjang gelombang yang ditinjau [direproduksi dari (Natanael, 2021), atas izin <i>OPTICA</i>]..... 38 | 38 |
| Gambar 3.10 | (a) Sistem trimer yang dirancang untuk menghasilkan respons resonansi asimetrik Fano yang tersusun dari sebuah nanopartikel Silikon dan sistem dimer nanopartikel Emas. (b) Salah satu respons resonansi asimetrik Fano yang terjadi karena interferensi dari | |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | modus-modus eigen yang tidak ortogonal [direproduksi dari (Natanael, 2021), atas izin <i>OPTICA</i>]..... | 38 |
| Gambar 3.11 | (a) Sebuah silinder dielektrik yang diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik. (b) Spektrum efisiensi hamburan dan resonansi multipol elektromagnetik yang terjadi pada penghambur silinder dielektrik yang bersangkutan. | 39 |
| Gambar 3.12 | (a) Silinder dielektrik yang berlubang memberikan sebuah derajat kebebasan baru dalam eksitasi resonan multipol elektromagnetik, dalam hal ini jari-jari lubang mengatur posisi resonan dipol listrik. Pada (b) dan (c) terlihat bahwa posisi resonan lainnya kurang-lebih relatif tidak berubah. (d) Resonan dipol listrik bertumpang tindih dengan resonan kuadropol listrik..... | 40 |
| Gambar 3.13 | Interferensi dari modus resonansi dipol listrik dan kuadropol listrik yang saling bertumpang-tindih menghasilkan radiasi yang terarah (Isro, 2018). | 40 |
| Gambar 3.14 | (a) Dekomposisi kontribusi multipol elektromagnetik untuk sistem yang simetrik (silinder berlubang), kontribusi multipol tersebut berdegenerasi. (b) Ketika simetri dirusak, radiasi terarah dapat dibelokkan. (c) Pembelokan radiasi terarah ini terjadi karena degenerasi kontribusi multipol elektromagnetik menjadi terpecah [direproduksi dari (Isro, 2018), atas izin <i>OPTICA</i>]..... | 41 |
| Gambar 3.15 | Pembiasan pada medium berindeks bias positif mengikuti aturan Hukum Snell, sedangkan pembiasan pada medium berindeks bias negatif terjadi kebalikan dari Hukum Snell..... | 42 |
| Gambar 3.16 | (a) Sistem lensa konvensional merupakan sistem yang mentransformasi informasi dari objek, berupa informasi frekuensi-frekuensi ruang, ke bidang bayangan. Bayangan yang erjadi tidak sempurna karena sebagian informasi frekuensi ruang yang besar (artinya resolusi spatial yang kecil) mengalami propagasi yang meluruh. (b) Menggunakan lensa dari sistem berindeks bias negatif, informasi frekuensi ruang yang mengalami | |

| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | peluruhan ini justru diperkuat oleh lensa, sehingga dapat sampai ke bidang bayangan untuk membuat bayangan yang sempurna. | 43 |
| Gambar 3.17 | (a) Sistem lensa Perak yang berbentuk lapisan Perak setebal 5 nm memiliki fungsi transmisi seperti fungsi Delta Dirac. (b) Bayangan dari dua buah celah berukuran lebar 20 nm dan berjarak 80 nm di antaranya dapat tertransformasikan secara hampir sempurna [direproduksi dari (Karnadi, 2010) atas izin <i>OPTICA</i>]. | 44 |
| Gambar 3.18 | (a) Geometri sistem <i>metallattice</i> yang terbuat dari silinder dielektrik dan konfigurasi iluminasinya. (b) Respons reflektansi yang tajam didapatkan, dan respons tajam ini terjadi bukan karena rekayasa multipol elektromagnetik yang tereksitasi pada masing-masing silinder yang tidak memiliki resonansi tajam. (c) Respons tajam ini terutama akibat respons dipol dari sistem (Isro 2023). | 45 |
| Gambar 3.19 | (a) Melalui perubahan indeks bias dari medium latar belakang, respons reflektansi yang tajam menjadi hilang. (b) Melalui perubahan ukuran geometri dari sistem, respons reflektansi yang tajam dapat digeser kepada panjang gelombang yang berbeda (Isro, 2023). | 45 |
| Gambar 3.20 | Rancangan cara kerja sel satuan dari layar transflektif yang terbuat dari sistem <i>metalattice</i> silinder dielektrik. (a) Menggunakan cahaya latar belakang (<i>ambient light</i>) sebagai sumber, sel satuan akan memantulkan cahaya warna dasar khusus dari sel satuan ini. (b) Saat tidak ada cahaya latar belakang sebagai sumber, sumber khusus untuk menghasilkan pemancaran panjang gelombang cahaya warna dasar dipergunakan (Isro, 2023). | 46 |
| Gambar 3.21 | Agregat nanopartikel yang ditinjau. (a) rantai linier, (b) rantai acak planar, (c) rantai acak 3D dan (d) bergerombol. | 47 |
| Gambar 3.22 | Penampang lintang hamburan total dan kontribusi dari multipol elektromagnetiknya dari keempat konfigurasi agregat nanopartikel yang diiluminasi dengan arah | |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | vektor propagasi yang sejajar sumbu dari agregat dan yang tegak lurus terhadap sumbu agregat. | 48 |
| Gambar 4.1 | (a) Sistem Kisi Periodik 1D nonlinier dengan sumber cahaya disalah satu ujung kisi dan cermin diujung lainnya. (b) Diagram fasa solusi yang mungkin dari formalisme sistem Hamiltonian. (c) Dari diagram fasa dapat diidentifikasi 3 jenis solusi soliton: <i>dark soliton</i> , <i>grey soliton</i> dan <i>bright soliton</i> | 50 |
| Gambar 4.2 | Sistem hibrid nanopartikel logam dan <i>Quantum Dot</i> dengan 2 tingkat keadaan. Kedua konstituen saling memengaruhi satu sama lain sehingga diperoleh proses umpan balik non-linier pada populasi keadaan dari <i>Quantum Dot</i> | 51 |
| Gambar 4.3 | Sistem hibrid nanopartikel logam dan <i>Quantum Dot</i> dengan 2 tingkat keadaan memiliki respons yang bistabil. Perpindahan keadaan QD dari satu keadaan stabil ke keadaan stabil lainnya dikendalikan oleh intensitas medan luar yang mengiluminasi sistem. Waktu pensaklaran (<i>switching time</i>) dapat ditentukan dari perturbasi keadaan stasioner tersebut dan didapatkan waktu pensaklaran yang sangat pendek dalam orde nanosekon. | 52 |
| Gambar 4.4 | Konfigurasi nanopartikel komposit (a) nanopartikel Emas dibungkus oleh bahan dielektrik dan (b) kebalikannya..... | 53 |
| Gambar 4.5 | Nilai laju perubahan absorpsi terhadap intensitas, biru berarti negatif, sedangkan merah berarti positif. Ketika nilai laju perubahan absorpsi ini negatif, berarti nanopartikel komposit memiliki sifat <i>Saturable Absorption</i> (SA) dan ketika nilai laju ini positif, nanopartikel komposit memiliki sifat <i>Reverse Saturable Absorption</i> (RSA). Nanopartikel komposit yang diteliti adalah (a) Au@SiO ₂ , (b) Au@Al ₂ O ₃ , (c) Au@Si ₃ N ₄ , (d) SiO ₂ @Au, (e) Al ₂ O ₃ @Au dan (f) Si ₃ N ₄ @Au [direproduksi dari (Fitriana, 2019), atas izin <i>OPTICA</i>]...... | 54 |
| Gambar 4.6 | (a) Sebuah partikel dengan konfigurasi Magnetisasi polar diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik | |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | polarisasi linier arah sumbu-y. (b) Akibat dari fenomena nonlinier MOKE, pada gelombang hambur tidak saja terpolarisasi semula yang dihamburkan, melainkan polarisasi yang tegak lurus terhadap arah polarisasi gelombang datang juga terbangkitkan. 55 | 55 |
| Gambar 4.7 | (a) Penghambur semula yang memiliki simetri bola dirusak menjadi <i>oblate spheroid</i> . (b) Akibat simetri yang rusak ini, komponen amplitudo gelombang hambur yang sejajar polarisasi gelombang datang mengalami supresi sehingga nilai parameter MOKE meningkat..... 55 | 55 |
| Gambar 4.8 | Pengrusakan simetri dari bola penghambur menjadi <i>prolate spheroid</i> sampai <i>oblate spheroid</i> . Hasil terbaik didapatkan untuk bentuk <i>oblate spheroid</i> , di mana nilai parameter MOKE ϕ_k dapat mencapai orde 1.288 radian yang terjadi karena supresi amplitudo komponen medan yang sejajar arah polarisasi medan datang (f_{non-MO}). 56 | 56 |
| Gambar 4.9 | (a) Plot komponen-komponen medan dari multipol elektromagnetik yang tereksitasi saat terjadi resonansi MOKE terbesar. (b) Hasil interferensi destruktif pada arah polarisasi gelombang datang, dari semua komponen-komponen multipol elektromagnetik pantul pada arah gelombang datang (<i>forward</i>). 57 | 57 |
| Gambar 4.10 | Sistem komunikasi optik dengan teknologi <i>Wave Division Multiplexing</i> (WDM) di mana satu kabel fiber dapat membawa banyak sekali data yang dikirim menggunakan beberapa panjang gelombang sekaligus. 57 | 57 |
| Gambar 4.11 | Devais <i>Add-Drop Multiplexer</i> (ADM) diperlukan untuk mengambil (<i>drop</i>) dan menambahkan (<i>add</i>) suatu rentetan data tertentu dari jalur utama data (<i>bus</i>). 58 | 58 |
| Gambar 4.12 | Devais <i>Add-Drop Multiplexer</i> (ADM) dengan mempergunakan hanya sebuah kisi Bragg sebagai reflektor [direproduksi dari (Muldarisnur, 2008), atas izin <i>AIP Publishing</i>]..... 59 | 59 |
| Gambar 4.13 | (a) Proses penggabungan empat gelombang (<i>four wave mixing</i> , FWM) adalah proses nonlinier orde 3, di mana dua cahaya pemompa masuk ke dalam sistem, dan | |

dihasilkan gelombang *signal* dan *idler*. (b) Diagram energi dari proses FWM dengan kekekalan energinya. 60

Gambar 4.14 Desain penggabungan pandu gelombang *bus* dan resonator cincin. Gelombang pompa dan sinyal dari pandu gelombang bus terdang dengan resonator 60

1. PENDAHULUAN

Optika berasal dari kata Yunani *ta optika* (τα ὀπτικά) (Hoad, 2002), yaitu bentuk jamak dari optikos (ὀπτικός) yang secara lepas berarti “terlihat”. Optika yang dianggap salah satu cabang ilmu pengetahuan tertua (Southall, 1922), muncul karena keingintahuan manusia. Dimulai dari pertanyaan paling dasar bagaimana menjelaskan fenomena “melihat”, bagaimana menghasilkan cahaya, sampai bagaimana memanipulasi cahaya.

Proses “melihat” suatu objek tidak lain adalah pendeteksian gelombang cahaya, dari suatu sumber, yang terhambur dari objek tersebut. Berdasarkan gelombang hambur tersebut, kita mendapatkan informasi dari objek yang menghamburkan tersebut. Kita dapat membedakan sebuah apel dari sebuah jeruk ataupun dari sebuah bola biliar karena informasi yang dibawa gelombang hambur. Gelombang hambur ini sendiri adalah hasil interaksi gelombang datang dengan objek penghambur. Oleh karenanya beberapa hal dapat dipelajari dari proses hamburan ini. Pertama, adalah bagaimana merekayasa gelombang hambur menggunakan objek penghamburnya. Kedua, kurang lebih merupakan kebalikan dari proses pertama di atas, yaitu bagaimana mengekstrak informasi objek penghambur dari gelombang hambur yang diamati.

Gelombang cahaya yang dibicarakan di atas adalah sebagian kecil dari spektrum gelombang Elektromagnetik yang sangat lebar. Mulai dari gelombang sangat pendek, dikenal sebagai sinar gamma, sampai yang gelombang yang sangat panjang, dikenal sebagai gelombang radio. Cahaya adalah bagian dari gelombang elektromagnetik yang dapat dilihat dalam persepsi warna, itulah sebabnya disebut Cahaya Tampak.

Dalam Bab Pertama ini, dipaparkan secara ringkas eksplorasi yang dilalui oleh peradaban manusia dalam proses pemahamannya terhadap cahaya dan fenomena melihat di atas. Mula-mula dipaparkan secara umum tonggak-tonggak penting pemahaman sains dari cahaya. Kemudian dibahas secara garis besar aplikasi serta teknologi yang berbasiskan cahaya. Akhirnya dijelaskan secara garis besar mengenai bidang nanofotonika, arah pengembangan pemahaman dan aplikasinya yang dilakukan oleh penulis.

1.1 Dari Euclid ke Al-Haytham sampai Maxwell dan Einstein

Sejak era Yunani, pemikir-pemikir Yunani di mana salah satunya adalah Euclid pada sekitar 300 SM telah mulai mencoba menjelaskan proses “melihat”. Konsepsi yang diusulkan Euclid untuk proses melihat didasarkan pada perumusan geometri dan asumsi bahwa mata memancarkan cahaya yang menyinari objek yang kita lihat tersebut (Burton, 1945). Pemahaman ini bertahan cukup lama karena pada masa tersebut konsepsi-konsepsi yang diusulkan tidak disertai dengan bukti pengamatan yang saintifik.

Baru di sekitar tahun 1000 M mulailah beberapa perintis ilmu pengetahuan muncul menggunakan Metodologi Saintifik. Langkah-langkah metodologi sains ini dimulai dari pengamatan, perumusan hipotesis, perancangan dan pelaksanaan eksperimen untuk menguji hipotesis tersebut dan pengambilan kesimpulan. Salah satu pionir di bidang Optika adalah seorang ilmuwan dari Timur Tengah yang bernama Ibn Al-Haytham. Ibn Al-Haytham melakukan eksperimen ilmiah untuk mempelajari mata manusia dan proses melihat. Berdasarkan percobaan yang dilakukannya (percobaan ini hampir membuat Ibn Al-Haytham buta), beliau menyimpulkan bahwa mata tidak lain adalah sebuah detektor bagi gelombang cahaya yang dipantulkan oleh sebuah objek. Berbagai pengetahuan yang terkait dengan anatomi mata, proses melihat, warna dan teori mengenai cahaya termasuk pemantulan dan pembiasan dituliskan secara ilmiah oleh Ibn Al-Haytham dalam beberapa seri bukunya yang berjudul *Books of Optics* atau *Kitāb al-Manāẓir* (Ibn Al-Haytham, circa 1015).

Tradisi melakukan pengamatan mempergunakan metodologi saintifik terus berkembang dan sampai ke daratan Eropa, di mana sejak tahun 1300-an mulai muncul ilmuwan-ilmuwan terkemuka di Eropa. Di antaranya adalah Isaac Newton yang memiliki peninggalan ilmiah yang sangat banyak dan salah satunya adalah teori korpuskular dari cahaya (Newton, 1704). Menggunakan teori korpuskuler ini Newton menganggap bahwa cahaya terdiri atas partikel-partikel yang sangat kecil. Sesuai prinsip mekanika, karena tidak adanya gaya yang bekerja pada korpuskular tersebut menyebabkan cahaya jalannya lurus. Selain itu, bukti lain bahwa cahaya adalah korpuskular dapat dilihat saat terjadinya bayangan di mana terdapat batas yang jelas antara bagian gelap dan bagian terang. Teori ini dapat bertahan cukup lama, salah satunya karena Newton adalah seorang raksasa

ilmuwan pada zamannya. Teori korpuscular mendapatkan tantangan yang sangat besar dari komunitas ilmuwan di antaranya oleh Christian Huygens dari Belanda (yang memulai studinya pada tahun 1678), dan pada awal abad ke-19 oleh Thomas Young dari Inggris, Joseph von Fraunhofer dari Jerman, Augustine-Jean Fresnel dan Francois Arago dari Perancis (Al-Amri, 2016). Para ilmuwan ini membuktikan secara eksperimen bahwa cahaya itu adalah sebuah gelombang melalui peristiwa interferensi dan difraksi. Melimpahnya bukti-bukti eksperimen bahwa cahaya adalah sebuah gelombang menyebabkan teori korpuskular dari Newton runtuh. Namun demikian, masih banyak kontribusi Newton dalam bidang Optika yang sampai saat ini diakui, di antaranya adalah bahwa cahaya putih sebenarnya terdiri atas berbagai komponen gelombang, khususnya komponen warna-warna pelangi yang dapat dilihat.

Di akhir abad ke-19 Maxwell menunjukkan bahwa cahaya tidak lain adalah bagian dari gelombang elektromagnetik yang terdiri atas medan listrik dan medan magnetik yang bersilasi (Maxwell, 1861). Di pihak lain, Heindrich Hertz menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik ini dapat dihasilkan oleh muatan listrik yang dipercepat (Hertz, 1893). Lebih jauh, beberapa konsekuensi yang terkait gelombang elektromagnetik diperoleh secara langsung dari persamaan Maxwell. Di antaranya adalah bahwa kecepatan rambat cahaya yang merupakan konstanta alam dan sifat transversalitas gelombang elektromagnetik yang jauh dari sumber, keduanya sudah terkandung dalam Persamaan Maxwell.

Tahun 1905 merupakan tahun yang fantastis untuk Einstein. Saat bekerja sebagai seorang karyawan pada kantor paten Swiss, dalam waktu satu tahun tersebut beliau menerbitkan 5 makalah yang mengguncangkan dunia Fisika saat itu (Stachel, 1998). Salah satu karyanya tersebut adalah mengenai teori relativitas khusus yang sangat terkenal. Namun yang hendak saya angkat di sini adalah makalahnya yang menjelaskan peristiwa efek fotolistrik secara sangat sederhana dan intuitif. Einstein mengatakan bahwa cahaya merupakan paket-paket energi yang terkuantisasi. Paket-paket energi cahaya yang terkuantisasi ini disebutnya sebagai **foton**. Lebih jauh, pada tahun 1913, Niels Bohr, seorang fisikawan Denmark, mengusulkan cikal bakal dari teori kuantum, di mana dalam teorinya ini, foton dapat diciptakan dan diserap dalam proses transisi elektron dalam atom (Bohr, 1913). Dari Einstein dan Bohr inilah, istilah **foton** sekarang dipakai juga untuk merujuk pada cahaya.

Saat ini istilah **Optika** dan **Fotonika** dipakai untuk mengklasifikasikan pengetahuan kita terhadap fenomena cahaya. Optika secara konvensional digunakan untuk ilmu pengetahuan umum tentang cahaya. Sedangkan Fotonika awalnya diperkenalkan sebagai pasangan dari istilah elektronika – menggunakan foton sebagai pengganti elektron untuk memproses dan mentransfer sinyal dan informasi – namun kini makna fotonik secara bertahap memiliki makna yang lebih luas (optics.org, 2008).

1.2 Sains Cahaya serta Teknologi dan Aplikasi Berbasis Cahaya

Setelah perumusan Maxwell yang menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik maka bermunculan berbagai ilmu pengetahuan baru yang mempergunakan cahaya ini sebagai alat untuk meningkatkan kesejahteraan manusia. Di sini dapat disebutkan beberapa aplikasi tersebut. Mulai dari fenomena sederhana hamburan, penjumlahan gelombang yang juga dikenal sebagai interferensi, penyampaian informasi menggunakan cahaya, penambahan energi cahaya matahari, penggunaan cahaya sebagai sensor sampai dengan komputer berbasis optika kuantum.

Karena berbagai teknologi yang diciptakan berbasis cahaya tidak salah bahwa *National Science Foundation* (NSF) dari Amerika Serikat dan Uni Eropa mencanangkan cahaya sebagai teknologi kunci yang memungkinkan (*Key enabling technology*) (NSF, 2015; European Commission – Photonics; European Commission – Key Enabling Technologies; Photonics21; Willner, 2012). Karena penetapan bahwa optika dan fotonika adalah teknologi yang memungkinkan, miliaran Dolar dan Euro dikucurkan untuk penelitian pada bidang ini.

Untuk mengapresiasi penetapan fotonika sebagai teknologi kunci yang memungkinkan serta mengapresiasi luasnya teknologi berbasis cahaya, badan dunia UNESCO menetapkan tanggal 16 Mei setiap tahunnya sebagai Hari Cahaya Internasional (*International Day of Light*, IDL) (lightday.org). Berbagai komunitas dunia setiap tahunnya, memperingati IDL untuk mengapresiasi sains dan teknologi yang berbasis cahaya yang telah membuat kehidupan manusia yang lebih nyaman. Dipilihnya tanggal 16 Mei sebagai peringatan saat pertama kalinya Theodore Maiman di tahun 1960 berhasil menciptakan sinar laser yang saat dipakai untuk kemaslahatan umat

manusia, mulai dari teknologi informasi sampai dengan kedokteran (Rawicz, 2014).

Sejak 1842, Jean-Daniel Colladon telah menemukan bahwa cahaya dapat dipandu dengan prinsip pemantulan internal total (*total internal reflection*) (Colladon, 1842). Namun baru pada dekade 1960-an, Charles Kao mengusulkan sistem kabel fiber optik yang terbuat dari Silica murni dengan pelemahan daya yang cukup kecil, sebagai media pengantar informasi yang dibawa oleh cahaya ini (Hecth, 1999). Dengan tersedianya komponen utama, yaitu sumber cahaya yang koheren dan media transmisi, pada dekade 1970-an dikembangkan teknologi komunikasi optik. Media transmisi kabel fiber ini dapat membawa informasi cahaya sampai dengan ribuan kilometer tanpa memerlukan penguatan dan pembentukan ulang pulsa informasi yang dikirimkan tersebut. Ukuran dari kabel fiber ini adalah sekitar sepersepuluh dari ukuran sehelai rambut.

Pada dekade yang kurang lebih sama pula dalam bidang elektronika telah dicapai kemajuan yang sangat besar dengan diciptakannya sirkuit terintegrasi (Kuo, 2013). Di dalam sebuah sirkuit terintegrasi berukuran sebesar setengah kali setengah cm², terdapat jutaan bahkan sampai beberapa miliar transistor. Hal inilah yang membuat revolusi komputer yang terjadi setiap tahun, di mana kecepatan proses dan minitualisasi dari peranti elektronika tersebut meningkat dua kali lipat setiap tahun, ini dikenal sebagai Hukum Moore (Moore, 1975). Namun upaya minituarisasi dari devais elektronik ini mulai dari mikro elektronika sampai dengan nanoelektronika hampir mencapai limitnya, baik dari sisi ukuran maupun kecepatan proses (Meindl, 2001; nano.gov).

Pada akhir dekade 1980-an dua orang ilmuwan, yaitu Eli Yablonovich, ketika itu bekerja di Bell Communication Research, dan Sajeve John dari Universitas Toronto secara independen menemukan bahwa kita dapat mengontrol cahaya menggunakan struktur periodik yaitu kristal fotonik (Yablonovitch, 1987; John, 1987). Pengontrolan perilaku cahaya dalam kristal fotonik tersebut adalah seperti pengontrolan jalannya elektron pada semikonduktor, yaitu keberadaan pita energi transmisi dan pita terlarang bagi keadaan elektron. Karena temuan ini maka pada dekade 1990-an para ilmuwan memiliki sebuah mimpi besar, di mana kita dapat menggantikan komputer elektronik dengan komputer optik. Namun ternyata hal ini tidak

tercapai karena beberapa hal (Pshenichnyuk, 2019). Di antaranya adalah terdapat ketidakcocokan ukuran dari devais elektronika yang sudah mencapai ukuran nanometer, yaitu ukuran seper-sejuta dari 1 mm terhadap kabel pembawa informasi optik yang berukuran seper-seribu dari 1 mm. Di samping itu, tuntutan kompatibilitas dari bahan dan teknologi fabrikasi devais fotonik yang masih berkembang, dengan devais elektronik yang sudah mapan. Di awal millenium ini disadari bahwa teknologi Optika hanya dapat berperan mendukung teknologi elektronika bukan menggantikannya. Karena perbedaan 1000 kali antara devais elektronika dan fotonika, maka diperlukanlah suatu terobosan baru. Bersamaan dengan itu, disadari pula bahwa sinyal optika dapat dipergunakan untuk berbagai aplikasi lain, bukan saja dalam hal komunikasi, namun juga dalam bidang pencitraan (*imaging*) dan penginderaan (*sensing*). Dari uraian di atas, jelaslah bahwa aplikasi dan teknologi berbasis cahaya masih akan terus berkembang dan menyahterakan kehidupan manusia.

1.3 Nanofotonika untuk Kemaslahatan Manusia

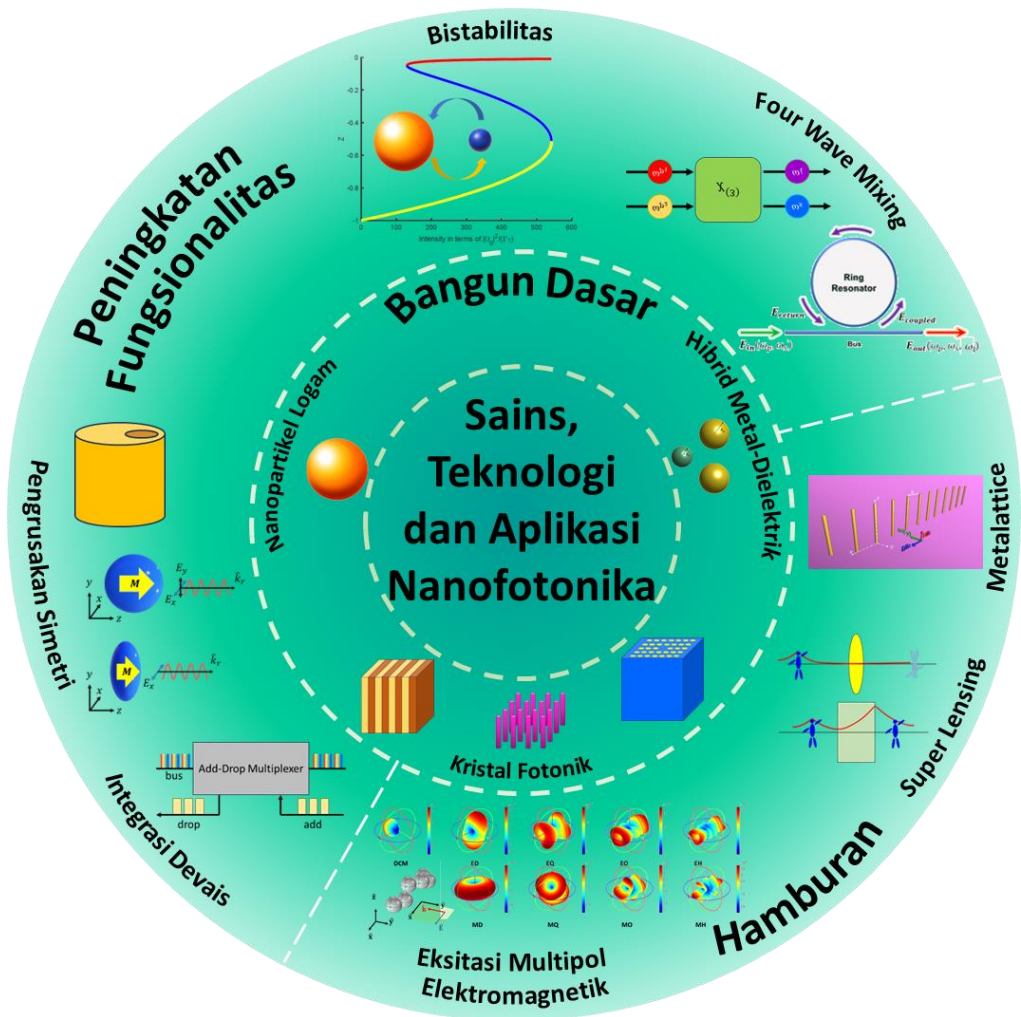
Salah satu cita-cita dalam teknologi untuk kemaslahatan umat manusia adalah devais atau piranti yang semakin kecil (miniatur) yang memiliki beberapa fungsi serta efisien dalam energi. Untuk mencapai cita-cita ini, diperlukan terobosan dalam pemahaman dan pengendalian cahaya dalam ukuran nanometer. Bidang ini sekarang dinamai Nanofotonik. Dibandingkan dengan teknologi optika yang telah lebih dahulu berkembang, hal utama yang sangat mencolok dari teknologi nanofotonik ini adalah bahwa ukuran nanometer ini lebih pendek atau lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya tampak dan bahkan seperseribu lebih kecil dari panjang gelombang cahaya yang dipakai dalam komunikasi.

Dalam ukuran yang sangat kecil ini, beberapa fenomena fisika menjadi dominan. Di antaranya adalah interaksi gelombang dekat (*near field*) dan fenomena gelombang permukaan (resonansi plasmon permukaan atau *surface plasmon resonance*, SPR) serta eksitasi momen multipolar elektromagnetik. Pengendalian dan manipulasi fenomena-fenomena ini yang memungkinkan penggunaan cahaya dalam aplikasi teknologi mutakhir.

Melalui pengaturan cahaya dalam dimensi nanometer ini, berbagai teknologi dan aplikasi bagi kemaslahatan manusia dapat dirancang dan

direalisasi. Beberapa di antaranya adalah sistem sensor dan sistem layar (*display*) menggunakan teknologi nanofotonik, sistem devais terintegrasi dan aktif yang tidak lagi berfungsi melalui pengaturan menggunakan elektronik, tetapi seluruhnya diatur oleh cahaya (*all optical active device*).

Untuk itulah, maka kami mulai merintis dan mengembangkan keilmuan kami dalam bidang Nanofotonika teori dan modeling, yang menjadi dasar dari seluruh perancangan aplikasi penggunaan cahaya pada ukuran nanometer ini. Premis kami adalah bahwa semua rancangan devais selalu dimulai dari pemahaman teoritik dan perhitungan simulasi serta optimasi untuk dapat menghemat dan menghindari biaya mahal yang didasarkan pada proses *trial and error*. Dalam mengembangkan bidang keilmuan Nanofotonika ini, kami mulai dari bangun dasar suatu devais Nanofotonika yaitu sistem kristal fotonik dan nano partikel berbahan logam dan dielektrik serta sistem gabungan keduanya yang dikenal juga sebagai sistem hibrid metal-dielektrik. Interaksi gelombang elektromagnetik dengan struktur dasar ini adalah sebuah fenomena hamburan. Pengaturan fenomena hamburan ini dapat dipakai untuk merancang sistem sensor serta rekayasa bentuk hamburan tertentu dan sistem pencitra dan layar. Beberapa langkah kami lakukan untuk meningkatkan fungsionalitas dari devais yang dirancang. Pertama adalah pemberian cacat dan pengrusakan simetri dari sistem, kedua memasukkan sifat nonlinearitas dari bahan serta yang ketiga adalah menggabungkan beberapa devais dasar. Berdasarkan ketiga hal ini, kami mengusulkan beberapa rancangan devais, di antaranya: saklar optik, *add-drop multiplexer* dan sistem yang berbasiskan penggabungan 4 gelombang yang berpotensi menjadi sebagai sumber foton bagi aplikasi Kuantum.



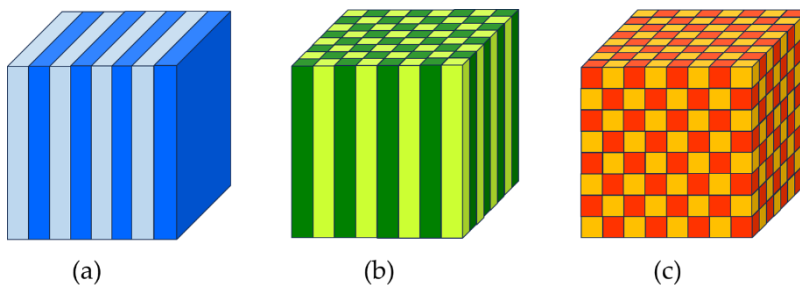
Gambar 1.1 Garis besar lingkup bahasan Sains, Teknologi dan Aplikasi Nanofotonika dalam buku ini.

2. BANGUN DASAR NANOFOTONIK

Perancangan devais untuk suatu aplikasi pemanfaatan cahaya, dimulai dari perancangan bangun dasar (*building block*) yang memiliki fungsionalitas tertentu. Dalam perjalanan pengembangan keilmuan nanofotonik, kontribusi kami dimulai dari pengembangan bangun dasar sistem periodik atau yang dinamakan Kristal Fotonik (*Photonic Crystals*) serta sistem nanopartikel. Untuk kedua sistem bangun dasar ini, ditinjau bangun dasar berbahan dielektrik, logam serta sistem hibrid logam dielektrik.

2.1 Kristal Fotonik

Struktur kristal, karena sifat periodisitasnya, memberikan respons yang khas terhadap gangguan yang datang padanya. Struktur kristal semikonduktor pada devais elektronika, memberikan respons karakteristik berupa struktur pita energi terlarang, sehingga arus elektron dalam devais semikonduktor dapat diatur melalui rekayasa pita energi terlarang. Hal yang sama dapat dilakukan untuk cahaya pada struktur periodik dari bahan dielektrik (Joannopoulos, 2008), seperti pada Gambar 2.1. Struktur periodik ini dapat berupa struktur dengan periodisitas hanya pada satu arah saja, disebut periodik 1 dimensi (1D), atau memiliki pengulangan pada 2 arah (periodik 2D) ataupun periodik dalam 3 dimensi (3D), seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.1. Struktur periodik dengan beda indeks bias yang cukup besar dari antara komponen-komponennya kini dinamakan Kristal Fotonik.

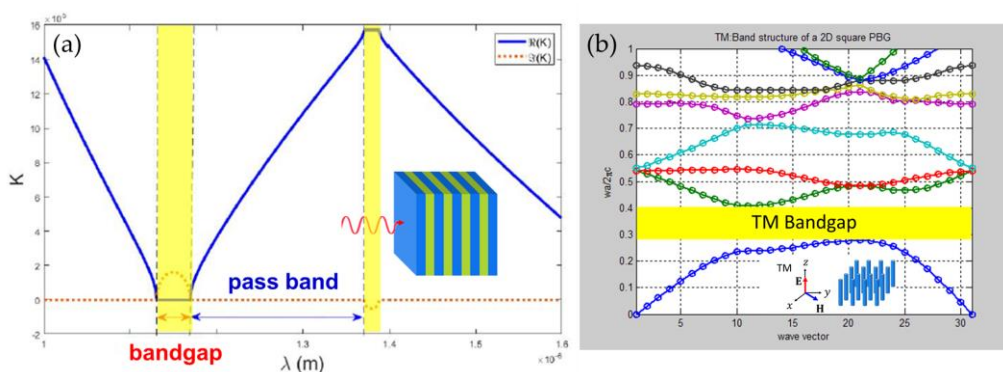


Gambar 2.1 Kristal Fotonik yang merupakan struktur periodik dalam (a) 1D, (b) 2D atau (c) 3D.

2.1.1 Celah Pita Terlarang

Karena adanya perbedaan medium pada setiap bagian dari struktur periodik ini, maka gelombang cahaya akan mendapatkan penambahan fasa yang tidak sama. Selain itu, di perbatasan antarmedium dielektrik yang berbeda akan terjadi pemantulan gelombang. Untuk geometri tertentu, dapat saja terjadi bahwa semua gelombang pantul akan sefasa sehingga terjadi interferensi konstruktif dari gelombang pantul. Hal ini berarti bahwa terdapat rentang panjang gelombang atau frekuensi tertentu di mana seluruh atau sebagian besar energi gelombang tersebut tidak dapat menembus sistem. Rentang panjang gelombang atau frekuensi ini dikenal sebagai Pita Fotonik Terlarang (*Photonic Band Gap*).

Sebagai contoh, pada Gambar 2.2 ditampilkan Struktur Pita Fotonik dari sistem periodik 1D dan 2D. Kurva garis tebal di Gambar 2.2 (a) dan kurva berwarna pada Gambar 2.2 (b) merupakan solusi konstanta propagasi gelombang bagian riil yang merambat dalam struktur. Terlihat adanya rentang panjang gelombang atau frekuensi di mana tidak ada solusi dari konstanta propagasi ini, inilah yang disebut Pita Fotonik Terlarang (*Photonic Band Gap*). Gambar 2.2 (a) adalah stuktur Pita Fotonik untuk sistem Kristal Fotonik 1D yang diiluminasi secara tegak lurus sistem. Sedangkan Gambar 2.2 (b) adalah struktur Pita Fotonik dari sistem Kristal Fotonik 2D yang terbuat dari silinder dielektrik dalam konfigurasi sel satuan bujursangkar. Sistem 2D ini diiluminasi gelombang elektromagnetik dengan medan listrik (E) sejajar silinder-silinder tersebut, polarisasi ini disebut sebagai polarisasi *Transverse Magnetic* (TM).

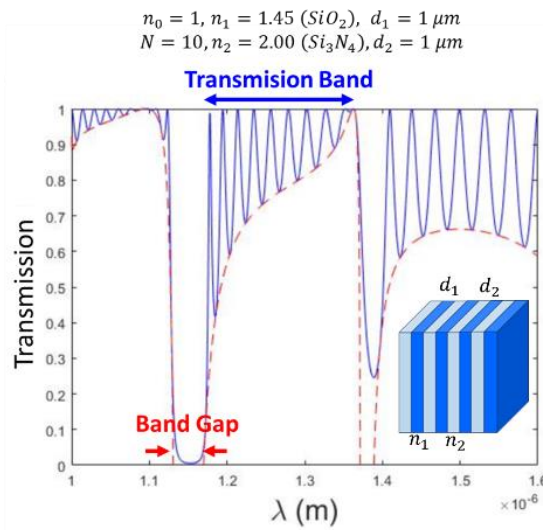


Gambar 2.2 Struktur Pita Fotonik (*Photonic Band Structure*) yang menunjukkan adanya rentang Pita Fotonik Terlarang (*Photonic Band Gap*) untuk Kristal Fotonik (a) 1D dan (b) 2D.

Karena adanya rentang frekuensi atau panjang gelombang terlarang ini, maka sebuah aplikasi devais dapat langsung dibuat, yaitu devais reflektor.

2.1.2 Kristal Fotonik 1D dan Aplikasinya

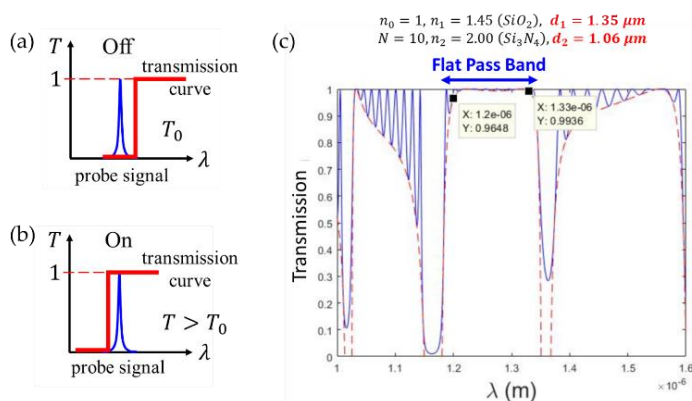
Umumnya cermin (reflektor) terbuat dari logam, namun meskipun fabrikasi dari cermin logam relatif lebih mudah, tetapi cermin logam juga membawa masalah, di antaranya absorpsi energi yang pada gilirannya berakibat pada pemanasan (Fink, 1998). Hal ini menjadi faktor yang perlu diperhitungkan dalam upaya minituarisasi dan efisiensi devais reflektor. Berkaitan dengan hal ini, salah satu kontribusi kami dalam pemanfaatan sistem Kristal Fotonik 1D, adalah perancangan cermin sempurna dari bahan dielektrik yang dapat memantulkan semua jenis polarisasi cahaya (*omni directional reflector*) (Prawiharjo, 2003). Perumusan persoalan ini dilakukan secara analitik menggunakan Metode Transfer Matriks (Yeh, 2005). Dalam analisis yang dilakukan, kami berhasil memberikan rumusan aproksimasi bagi lebar pita terlarang yang paling besar dari masukan parameter fisis bahan dielektrik dan ketebalannya. Dengan demikian, untuk merancang sebuah reflektor sempurna dari bahan tertentu, maka ketebalan dari masing-masing komponen Kristal Fotonik 1D ini dapat ditentukan untuk memberikan Pita Fotonik Terlarang yang terbesar pada rentang frekuensi yang diinginkan.



Gambar 2.3 Kurva Transmisi karakteristik dari sebuah Kristal Fotonik 1D yang tersusun dari 10 sel satuan dua lapisan dielektrik indeks bias n_1 dan n_2 dengan ketebalan masing-masing d_1 dan d_2 .

Gambar 2.3 menampilkan respons karakteristik energi yang ditransmisikan (Transmitansi) oleh sebuah sistem Kristal Fotonik 1D yang memiliki jumlah sel satuan 2 lapis berhingga dari bahan dielektrik non-absorptif (tidak menyerap energi). Terlihat beberapa sifat karakteristik dari respons Transmitansi ini. Pertama, terdapat beberapa rentang Pita Fotonik Terlarang, namun tidak semua rentang Pita Fotonik Terlarang ini memiliki transmitansi yang minimum (mendekati 0%), dengan kata lain energi yang dipantulkan (Reflektansi) mendekati 100%. Tentu saja, secara logika penambahan sel satuan yang digunakan akan meningkatkan Reflektansi. Tetapi untuk keperluan miniturisasi, jumlah sel satuan yang dipakai menjadi kendala optimasi. Sifat umum kedua adalah adanya rentang Pita Transmisi, namun umumnya Pita Transmisi ini tidak memiliki rentang transmisi yang homogen, seperti yang ditunjukkan oleh respons umum suatu Kristal Fotonik 1D pada Gambar 2.3.

Untuk aplikasi tertentu, misalnya saklar optik, diperlukan rentang Pita Transmisi yang homogen dan cukup lebar serta tidak mudah terpengaruh oleh efek eksternal. Suatu sistem skalar optik bekerja sebagai berikut. Pada keadaan *off*, sinyal dengan panjang gelombang tertentu, berada pada rentang Pita Fotonik Terlarang. Melalui kontrol eksternal, misalnya dengan menaikkan suhu sistem, struktur Pita Fotonik secara keseluruhan bergeser, sehingga sinyal dengan panjang gelombang tertentu tersebut sekarang berada pada Pita Transmisi yang homogen, dan sistem berada pada keadaan *on*. Secara skematik proses ini ditunjukkan pada Gambar 2.4 (a) dan (b).



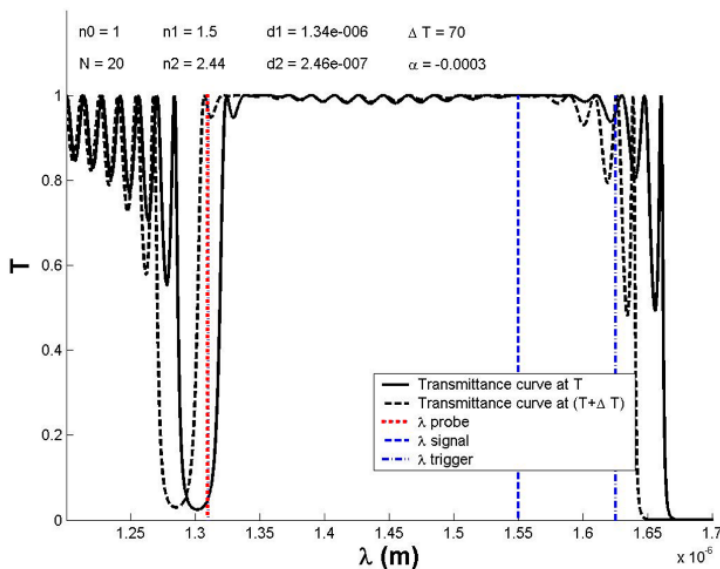
Gambar 2.4 Cara kerja saklar optik, di mana pada (a) keadaan *off*, sinyal penyelidik (*probe signal*) berada di dalam rentang Pita Fotonik Terlarang, dan (b) keadaan *on*, sinyal penyelidik berada pada rentang Pita Transmisi yang homogen. (c) Melalui optimasi ketebalan, diperoleh rentang Pita Transmisi homogen dengan transmisi hampir 100%.

Permasalahan pertama yang harus diatasi adalah membuat pita transmisi pada suatu rentang pilihan menjadi homogen. Untuk tujuan minituarisasi, maka jumlah sel satuan yang digunakan diusahakan sesedikit mungkin, tetapi masih memiliki rentang Pita Fotonik Terlarang yang cukup dalam. Melalui telaah analitik, kami menemukan prosedur optimasi parameter sistem. Dengan kendala bahwa bahan dielektrik yang dipakai sudah tertentu, artinya parameter indeks biasanya tidak bisa diubah, maka parameter yang dapat dioptimasi adalah ketebalan masing-masing lapisan dielektrik (Iskandar, 2007). Hasil optimasi ini memberikan pita transmisi yang homogen pada rentang pilihan tertentu seperti yang dicontohkan pada Gambar 2.4 (c). Bahan dielektrik sistem Kristal Fotonik yang ketebalannya dioptimasi ini adalah sama dengan yang dipakai pada Gambar 2.3.

Kegagalan utama dari transmisi data melalui kabel fiber optik adalah ketika kabel tersebut putus. Untuk mengetahui dan kemudian menyambung kabel fiber optik yang putus tersebut, seorang teknisi harus dikirim untuk memeriksa dari unit kontrol di lapangan. Hal ini sangat tidak efisien karena unit kontrol kabel fiber optik memiliki konfigurasi serial. Oleh karenanya, melalui bekerja sama dengan divisi RisTi PT Telkom, kami mengusulkan sistem pemeriksaan kabel fiber optik menggunakan *Optical Time Domain Reflectometer* (OTDR) dari jarak jauh dan dalam kondisi saluran komunikasi tidak terputus (*in-operation service*) (Tjia, 2005). Untuk keperluan ini, dibutuhkan sebuah devais reflektor yang memiliki Pita Fotonik Terlarang yang dapat digeser dengan kontrol eksternal, dan di pihak lain sistem memiliki Pita Transmisi yang datar dan tak terpengaruh efek eksternal tersebut.

Rancangan devais reflektor ini memakai bahan dielektrik alam dengan indeks bias yang tertentu dan memiliki koefisien termooptik yang cukup besar. Dalam rancangan ini, kontrol eksternal dilakukan melalui menaikkan suhu sistem sehingga indeks bias dan ketebalan berubah. Agar seluruh sistem bekerja dengan sinyal optik, maka sinyal untuk mengontrol rangkaian pemanas ini juga harus menggunakan pulsa cahaya sebagai sinyal pemantik (*trigger*). Di pihak lain, untuk menguji kabel fiber optik tertentu menggunakan OTDR, diperlukan pengiriman sinyal penyelidik (*probe*) pada kabel yang sama. Sehingga untuk memenuhi semua persyaratan ini: *in-operation service*, sinyal *probe* yang transmisinya dapat dikendalikan *on* dan *off*, serta sinyal *trigger* yang memiliki transmisi baik dan tidak terpengaruh oleh perubahan indeks bias

dan ketebalan akibat pemanasan, maka diperlukan Pita Transmisi yang baik dan cukup lebar. Dalam rancangan yang diusulkan, panjang gelombang operasi sistem komunikasi adalah 1550 nm, panjang gelombang sinyal *trigger* adalah 1625 nm dan panjang gelombang sinyal *probe* adalah 1310 nm. Hasil optimasi yang kami lakukan memberikan respons Transmittansi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.5. Terlihat bahwa untuk 2 keadaan suhu (T) dan ($T + \Delta T$), sinyal penyelidik (*probe*) dapat diatur untuk diteruskan atau tidak, sedangkan sinyal-sinyal lainnya tidak mengalami gangguan transmisi.



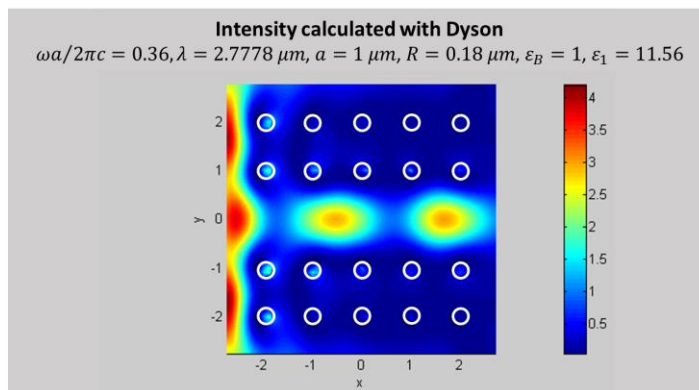
Gambar 2.5 Spektrum transmisi dari sistem Kristal Fotonik 1D untuk 2 keadaan, pada suhu kamar (T) dan ($T + \Delta T$). Kristal Fotonik tersusun dari 20 sel satuan dua lapisan dielektrik indeks bias n_1 dan n_2 dengan ketebalan masing-masing d_1 dan d_2 serta koefisien termooptik α .

2.1.3 Kristal Fotonik 2D dan Aplikasinya

Untuk kasus Kristal Fotonik dengan periodisitas dalam 2 dan 3 dimensi, kompleksitas perhitungan menjadi lebih tinggi. Oleh karenanya, untuk analisis sistem 2 dan 3 dimensi ini, kami memilih menggunakan metode semi-analitik formulasi tensor Green yang diselesaikan secara numerik dengan formulasi Dyson (Martin, 1998) ataupun menggunakan fungsi ortogonal dalam konteks Teori Mie (Asatryan, 2001a; Asatryan, 2001b; Asatryan, 2003). Di awal perkembangannya, Kristal Fotonik ini dibayangkan menjadi bahan semikonduktor untuk cahaya. Kristal Fotonik murni memiliki satu fungsionalitas, yaitu reflektor (seperti kasus Kristal Fotonik 1D yang dibahas

terdahulu). Namun, seperti yang juga diketahui umum, salah satu cara meningkatkan fungsionalitas adalah memberikan gangguan atau cacat. Berbagai fungsionalitas baru dapat dibuat dengan bangun dasar Kristal Fotonik yang diberi cacat, contohnya adalah pandu gelombang dan rongga resonator.

Sebuah pandu gelombang dapat dibuat melalui pemberian cacat baris pada suatu sistem Kristal Fotonik 2D seperti ditampilkan pada Gambar 2.6. Konsep pemanduan gelombang cahaya dalam Kristal Fotonik ini sangat berbeda dengan pemanduan pada kabel fiber optik. Dalam kabel fiber optik, pemanduan terjadi berdasarkan peristiwa Pemantulan Internal Total. Pada pandu gelombang Kristal Fotonik, pemanduan didasarkan pada rekayasa Pita Terlarang, dengan kata lain, panjang gelombang yang dipandu, justru berada di dalam Pita Terlarang. Pada Gambar 2.6, Kristal Fotonik 2D yang terdiri atas silinder-silinder dalam konfigurasi bujursangkar memiliki struktur Pita Fotonik seperti yang diberikan pada Gambar 2.2 (b). Terlihat bahwa cahaya dengan frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.36$ yang berada di dalam rentang Pita Fotonik Terlarang dalam Gambar 2.2 (b), dapat dipandu pada cacat baris seperti yang tampak pada Gambar 2.6.

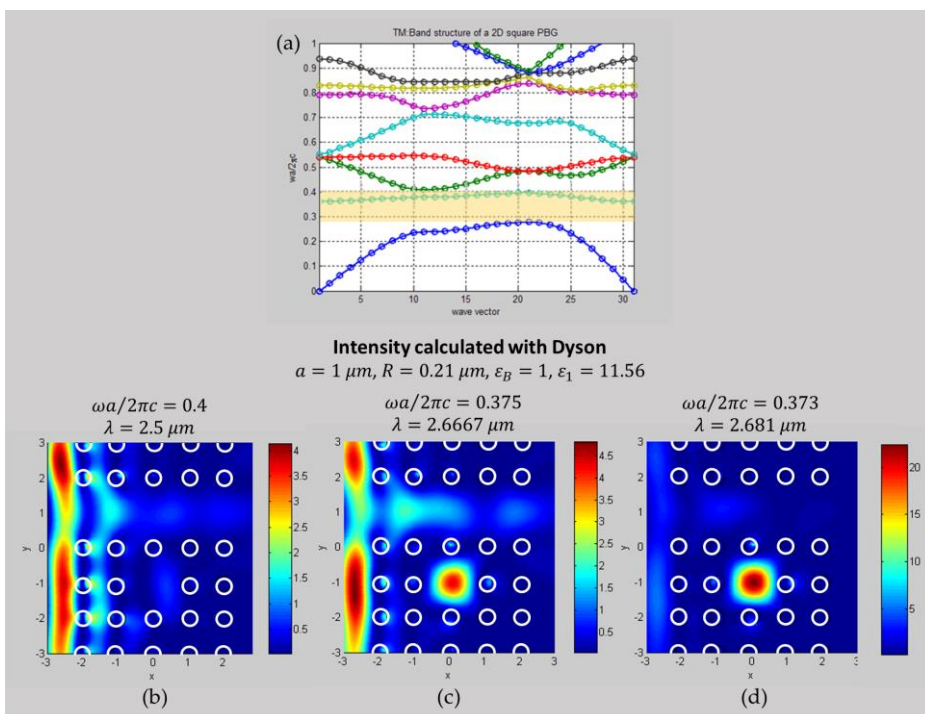


Gambar 2.6 Pemanduan cahaya yang berada di dalam rentang Pita Fotonik Terlarang dari struktur Kristal 2D dengan sel satuan berbentuk bujursangkar dan memiliki cacat garis.

Sebuah cacat titik tidak lain adalah rongga resonansi, sehingga gelombang berfrekuensi yang sama dengan frekuensi resonansi rongga ini akan berinterferensi konstruktif dan terjadi penguatan energi yang terbungkus dalam rongga. Penambahan cacat titik pada pandu gelombang Kristal Fotonik

2D seperti pada contoh di atas akan membuat devais ini berfungsi sebagai sebuah penapis (*filter*) untuk frekuensi yang sangat tajam.

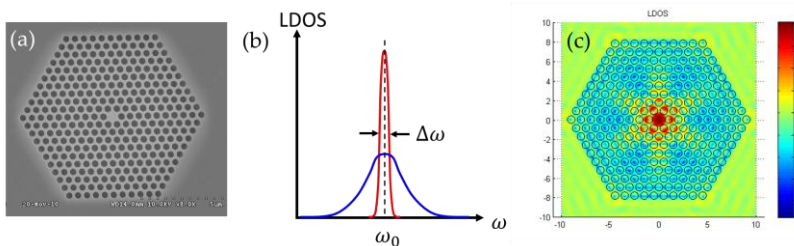
Sebagai contoh, Kristal Fotonik 2D bersel satuan bujursangkar dengan struktur Pita Fotonik pada Gambar 2.2 (b), diberi cacat titik, maka akan modus cacat (*defect mode*) dengan frekuensi yang terletak di dalam rentang Pita Terlarang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (a). Pada Gambar 2.7 (b), cahaya berfrekuensi $\omega a/2\pi c = 0.4$ diiluminasikan dan mulai mengeksitasi modus resonansi cacat, namun energi yang terbendung masih sangat kecil (lihat skala warna), sebagian energi diteruskan dalam pandu gelombang. Pada Gambar 2.7 (c) iluminasi dengan frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.375$ akan eksitasi modus resonansi cacat yang semakin membesar. Sedangkan ketika frekuensi cahaya yang diiluminasikan adalah sama dengan frekuensi resonansi cacat, $\omega a/2\pi c = 0.373$, maka terlihat eksitasi modus resonansi yang sempurna (perhatikan nilai pada skala warna).



Gambar 2.7 (a) Struktur Pita Fotonik dengan modus cacat (*defect mode*) yang terletak di dalam rentang Pita Terlarang. (b) Iluminasi dengan frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.4$, (c) frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.375$, dan (d) frekuensi $\omega a/2\pi c = 0.373$.

Melihat hasil yang tergambarakan di atas, karena adanya cacat titik, maka energi dari gelombang iluminasi yang frekuensi bersesuaian dengan frekuensi resonansi rongga akan terbandung di dalam rongga tersebut. Banyaknya energi yang terbandung ini dapat dipresentasikan juga melalui besaran Rapat Keadaan Optik Lokal (*Local Density of Optical States*, LDOS) yang menyatakan seberapa banyak solusi foton yang dapat disimpan pada suatu lokasi dalam cacat tersebut. Untuk suatu sistem cacat, spektrum LDOS dapat dihitung menggunakan metode Tensor Green (Asatryan, 2001a; Asatryan, 2001b; Asatryan, 2003).

Faktor Kualitas adalah ukuran atas mutu penapisan (*filtering*) dari sebuah rongga resonansi. Faktor Kualitas ini secara umum bergantung terbalik terhadap lebar pita modus resonansi rongga, $Q \sim \frac{1}{\Delta\omega}$. Jadi, sebuah rongga dengan kualitas yang baik memiliki respons spektrum yang tajam, yang berarti frekuensi penapisan yang terjadi sangat spesifik, atau dengan kata lain rongga resonansi ini memiliki **selektivitas yang tinggi**. Pada Gambar 2.8 (a) ditampilkan sistem rongga pada Kristal Fotonik 2D. Gambar 2.8 (b) menampilkan sketsa spektrum Rapat Keadaan Optik Lokal (*Local Density of Optical States*, LDOS) untuk kasus rongga yang baik (kurva warna merah) dan yang buruk (kurva warna biru). Gambar 2.8 (c) adalah contoh hasil perhitungan LDOS dari sistem rongga yang ditinjau dengan metode Tensor Green, terlihat LDOS yang besar didapatkan pada lokasi cacat.

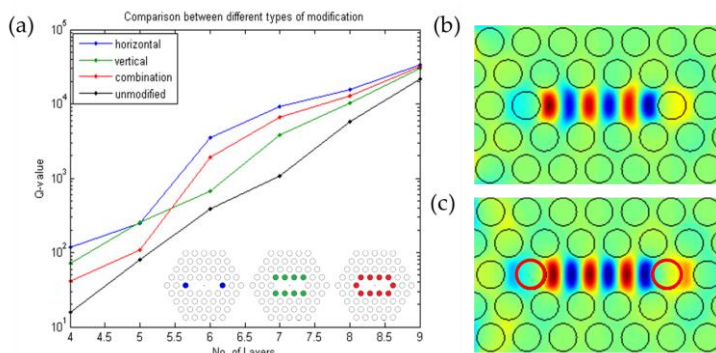


Gambar 2.8 (a) Struktur Kristal Fotonik 2D dengan sel satuan berbentuk triangular yang memiliki sebuah cacat titik. (b) Sketsa spektrum Rapat Keadaan Optik Lokal (*Local Density of Optical States*, LDOS), spektrum merah yang memiliki selektivitas tinggi dan dikuantifikasi dengan faktor kualitas yang lebih tinggi dari spektrum biru. (c) Hasil perhitungan LDOS dengan metode Tensor Green, terlihat LDOS yang besar didapatkan pada lokasi cacat.

Karena pembendungan energi yang sangat besar serta selektivitas yang sangat tinggi dari sistem rongga ini, maka terbuka berbagai peluang aplikasi yang mempergunakan sistem rongga ini. Misalnya sistem penginderaan

(*sensing*) yang presisi memerlukan selektivitas yang sangat tinggi. Contoh lain lagi adalah aplikasi untuk eksitasi fenomena nonlinier yang memerlukan energi besar, misalnya eksitasi Laser menggunakan struktur Kristal Fotonik. Jadi jelaslah bahwa, untuk keperluan contoh aplikasi-aplikasi di atas, dibutuhkan rongga yang memiliki Faktor Kualitas Q yang tinggi.

Dari sisi eksperimen, kelompok dari Universitas Osaka, Jepang, mempelajari suatu rongga Kristal Fotonik 2D yang dibuat dengan menghilangkan 3 komponen kristal, struktur ini disebut cacat L3. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa untuk meningkatkan Faktor Kualitas cacat Kristal Fotonik L3 dapat dilakukan dengan menggeser posisi dari komponen Kristal di kiri dan kanan cacat (Akahane, 2003; Noda, 2006; dan Noda, 2007). Untuk memvalidasi hasil eksperimen ini, kami melakukan perhitungan menggunakan algoritma genetik terhadap berbagai kemungkinan modifikasi dari cacat L3, hasilnya ditampilkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 (a) Peningkatan Faktor Kualitas (Q) dari rongga L3 akibat modifikasi komponen Kristal di sekitar rongga. (b) Pembendungan energi pada rongga tanpa modifikasi. (c) Pembendungan energi yang lebih besar karena modifikasi dua komponen ujung dari rongga L3.

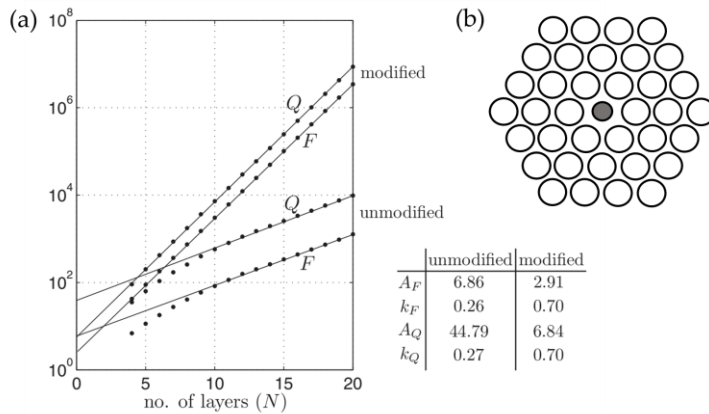
Dari hasil simulasi Algoritma Genetik yang dilakukan (Pramudita, 2011), kami memvalidasi bahwa untuk meningkatkan Faktor Kualitas dari rongga L3, cukup dilakukan melalui modifikasi dua komponen Kristal diujung rongga L3 tersebut. Hasil simulasi Algoritma Genetik ini sesuai dengan hasil eksperimen dari kelompok Noda. Melihat hasil pada Gambar 2.9 (a), modifikasi komponen Kristal lainnya di sekitar rongga tidak memberikan peningkatan Faktor Kualitas yang lebih baik.

Cara paling sederhana untuk meningkatkan Faktor Kualitas suatu rongga adalah melingkupi rongga tersebut dengan sistem Kristal Fotonik yang besar.

Keadaan resonansi cacat yang berada di dalam rentang Pita Terlarang memiliki perluruhan yang sangat lambat, karena pembendungan yang diberikan oleh Kristal Fotonik makin kuat. Dengan kata lain, hal ini berarti makin kecil kemungkinan energi untuk bocor dari rongga cacat tersebut. Namun penambahan lapisan Kristal Fotonik yang membendung cacat tersebut akan membuat rancangan devais menjadi besar dan tujuan minituarisasi tidak terpenuhi.

Oleh karenanya, kami mempelajari secara detil perilaku pembendungan dan sifat peluruhan dari energi yang terkungkung dalam suatu cacat titik Kristal Fotonik. Dari analisis yang dilakukan, didapatkan bahwa Faktor Kualitas (Q) dari cacat tersebut dapat dihitung dari faktor penguatan (F) dari perbandingan laju peluruhan Fermi (Koenderink, 2010). Sedangkan laju peluruhan tersebut dirumuskan melalui Aturan Emas Fermi (*Fermi's Golden Rule*) (Glauber, 1991; Sprik, 1996; Fussel, 2004), yang bergantung pada LDOS. Lebih lanjut, LDOS ini dapat dihitung menggunakan metode tensor Green (Rao, 2007). Didapatkan bahwa kekuatan pembendungan yang direpresentasikan oleh Faktor Kualitas atau Faktor Penguatan dapat dirumuskan sebagai suatu fungsi eksponensial dengan parameter amplitudo A_Q dan A_F serta besaran eksponen k_Q dan k_F yang memiliki hubungan linier terhadap bagian imajiner bilangan gelombang Bloch dari sistem (Putra, 2011). Hal ini merupakan suatu temuan baru dan merupakan rumusan yang berlaku umum untuk berbagai cacat titik pada sistem Kristal Fotonik.

Menggunakan pengetahuan mengenai Faktor Kualitas dan relasinya pada bilangan gelombang Bloch, kami menunjukkan bahwa cacat pada suatu struktur Kristal Fotonik dengan ukuran struktur Kristal Fotonik yang tidak terlalu besar, sehingga dapat memenuhi kriteria minituarisasi, dapat dioptimasi untuk mendapatkan Faktor Kualitas yang tinggi. Dari eksperimen, kunci dari modifikasi struktur untuk mendapatkan Faktor Kualitas yang tinggi adalah melakukan perubahan di daerah sekitar cacat saja. Modifikasi di sekitar cacat tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara, pertama mengubah ukuran geometri dari komponen cacat, atau yang kedua mengubah parameter fisis dari cacat yang bersangkutan, atau yang ketiga adalah gabungan kedua modifikasi sebelumnya. Hasil ini ditampilkan pada Gambar 2.10. Temuan ini merupakan hasil yang sangat berguna bagi minituarisasi devais rongga dengan Faktor Kualitas yang sangat besar.



Gambar 2.10 (a) Faktor Kualitas (Q) dan Faktor Penguatan (F) dari cacat titik pada struktur Kristal Fotonik dengan sel satuan triangular terhadap variasi banyaknya jumlah lapisan komponen Kristal yang melingkupi cacat [direproduksi dari (Putra, 2011) atas izin *American Physical Society*]. (b) Struktur Kristal Fotonik 2D dengan cacat yang dimodifikasi, yaitu berupa silinder yang memiliki ukuran ataupun bahan yang berbeda dari komponen silinder Kristal Fotonik lainnya.

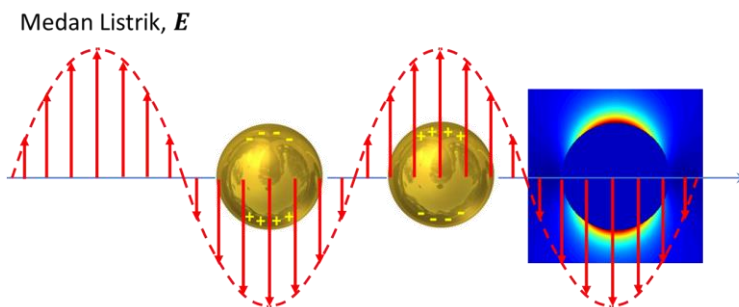
2.2 Struktur Nano Berbasis Logam

Meskipun sistem logam memiliki disipasi daya yang jauh lebih besar dari pada bahan dielektrik (Maier, 2007), tetapi struktur berbasis logam memberikan kelebihan tersendiri. Pada bahan dielektrik, keberadaan muatan negatif (elektron) dalam susunan atom atau molekul cukup kaku, sehingga gangguan medan listrik yang datang bersama gelombang elektromagnetik tidak dapat langsung menghasilkan deformasi distribusi muatan. Berbeda halnya dengan awan elektron pada logam yang dapat dianggap seperti gas. Karena keleluasaan gerak dari awan elektron ini, sistem logam memberikan respons yang khusus terhadap gangguan medan listrik yang datang dari gelombang elektromagnetik yang menyinarinya. Respons ini dikenal sebagai eksitasi gelombang plasmon permukaan yang merupakan gelombang dekat (*near field*) dengan penguatan intensitas pada permukaan logam yang sangat dipengaruhi oleh faktor geometri dan lingkungan. Oleh karenanya, struktur berbasis logam ini sangat diminati antara lain untuk devais pengindera (*sensor*).

2.2.1 Resonansi Gelombang Plasmon Permukaan

Telah diungkapkan di atas, pada logam, elektron konduksi dapat dianggap bebas bergerak seperti gas (inilah yang mendasari penamaan model gas

elektron untuk respons elektromagnetik dari logam) atau lebih tepatnya disebut plasma. Oleh karenanya, ketika logam diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik, maka medan listrik yang beresilasi akan membuat awan elektron konduksi tersebut ikut beresilasi. Khususnya, akibat dari osilasi awan elektron ini secara dominan teramati pada permukaan perbatasan logam. Tentu saja frekuensi resonansi ini akan bergantung pada jenis logam yang ditinjau dan medium dielektrik yang berbatasan dengan logam tersebut. Untuk permukaan logam planar, osilasi dari awan elektron ini hanya terjadi untuk polarisasi tertentu dari gelombang elektromagnetik yang datang serta bergantung terhadap arah datang gelombang tersebut. Untuk nanopartikel logam, frekuensi osilasi awan elektron ini bergantung pada ukuran atau jari-jari dari nanopartikel tersebut. Osilasi dari awan elektron ini, pada gilirannya menciptakan radiasi gelombang elektromagnetik yang baru dengan sifat karakteristik yang meluruh cepat dalam arah tegak lurus permukaan logam, ini disebut gelombang *evanescent*. Oleh karenanya gelombang yang tercipta ini dikenal sebagai gelombang Resonansi Plasmon Permukaan (*Surface Plasmon Resonance*, SPR) (Maier, 2007). Pada Gambar 2.11, ditampilkan secara skematik osilasi dari awan elektron pada bola logam Emas akibat teriluminasi oleh gelombang elektromagnetik dengan medan listrik yang beresilasi serta penguatan medan (intensitas) pada permukaan bola.



Gambar 2.11 Osilasi awan elektron pada bola nano logam emas yang diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik dengan medan listrik yang beresilasi. Pada kondisi resonansi plasmon permukaan yang terlihat melalui peningkatan energi (intensitas) di permukaan bola logam.

Meskipun gelombang SPR ini hanya memiliki jangkauan yang tidak jauh, tetapi salah satu karakteristiknya adalah terjadinya penguatan energi yang sangat besar pada permukaan batas logam tersebut. Penguatan energi ini sangat bergantung pada lingkungan di luar logam tersebut. Inilah yang menyebabkan sistem logam dengan peristiwa SPR nya menjadi primadona

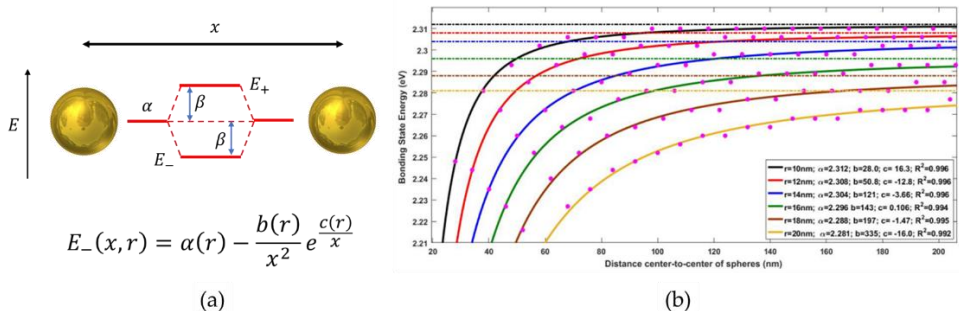
dalam penginderaan. Sains dan aplikasi menggunakan SPR ini sekarang dikenal sebagai Plasmonik.

Pada bagian berikutnya, akan dibahas temuan-temuan kami dalam kaitannya dengan eksitasi gelombang SPR pada sistem logam berukuran nano serta sistem Kristal Fotonik hibrid metal-dielektrik. Kemudian, pembahasan aplikasi peristiwa SPR sebagai sistem pengindera akan dilakukan pada bab berikutnya bersamaan dengan pembahasan peristiwa hamburan yang menjadi alat utama dari berbagai studi interaksi gelombang elektromagnetik dengan struktur nano.

2.2.2 Interaksi Gelombang Plasmon Permukaan

Meskipun eksitasi dari gelombang Plasmon Permukaan adalah peristiwa elektromagnetik, tetapi dalam beberapa hal, fenomena ini memiliki analogi dengan peristiwa kuantum. Yang pertama adalah kuantisasi dari energi Resonansi Plasmon Permukaan ini serupa dengan kuantisasi pada Teori Kuantum. Yang kedua adalah interaksi dari eksitasi Plasmon permukaan ini dapat berinteraksi satu sama lain seperti halnya sistem kuantum. Interaksi dari eksitasi Plasmon Permukaan ini dapat dipahami dalam konteks hibridisasi keadaan Kuantum, seperti halnya hibridisasi kombinasi linier orbital atom (*Linear Combination of Atomic Orbital*, LCAO). Interaksi dari Plasmon Permukaan yang sekarang dinamai Hibridisasi Plasmon (*Plasmon Hybridization*, PH) pertama diusulkan oleh kelompok Peter Nordlander dari Rice University, USA (Prodan, 2003a; Prodan, 2003b).

Kami memvalidasi mekanisme Hibridisasi Plasmon Permukaan antara dua bola logam identik (sistem dimer) dengan mempergunakan modus interaksi dipol dalam formulasi teori Hamiltonian perturbasi. Frekuensi (atau energi) absorpsi cahaya pada sistem dimer ditentukan dari spektrum absorpsi yang dihitung menggunakan teori Mie (Xu, 1995; Mackowski, 1991) dengan mengikutsertakan interaksi timbal balik dari kedua konstituen dimer. Interaksi antar Plasmon Permukaan ini dimodelkan sebagai Hibridisasi Plasmon keadaan terikat (*bonding*) dan keadaan tak terikat (*antibonding*) dengan energi masing-masing sebesar E_- dan E_+ . Skema Hibridisasi Plasmon Permukaan dari sistem dimer ini ditampilkan pada Gambar 2.12 (a).

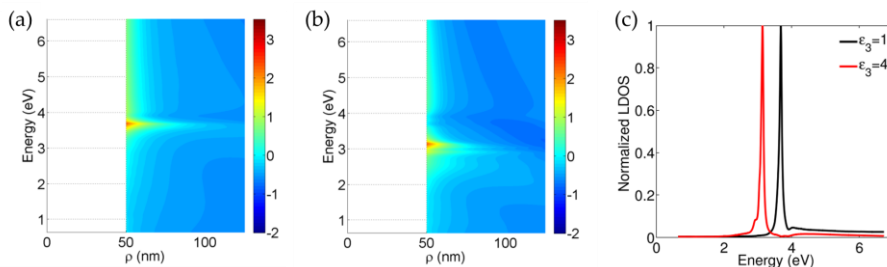


Gambar 2.12 (a) Skema Hibridisasi Plasmon Permukaan dari sistem dimer bola logam berukuran nanometer. Interaksi Plasmon Permukaan pada kedua nanopartikel bola membentuk keadaan Hibrid dengan energi ikat tertentu yang bergantung dari ukuran nanopartikel dan jarak kedua nanopartikel. Dari perhitungan mempergunakan teori Mie, diperoleh rumusan empiris yang berlaku umum untuk energi ikatan tersebut. (b) Variasi energi ikatan sebagai fungsi dari jarak antar nanopartikel dan ukuran dari nanopartikel [direproduksi dari (Stephanie, 2018) atas izin *World Scientific Publishing*].

Secara fisis, energi ikat kedua Plasmon Permukaan dari masing-masing nanopartikel, akan bergantung pada ukuran nanopartikel dan jarak kedua nanopartikel. Dari perhitungan teori Mie mempergunakan data energi resonansi Plasmon Permukaan terisolasi, didapatkan sebuah rumusan empiris universal untuk energi keadaan terikat seperti yang tertulis pada Gambar 2.12 (a). Gambar 2.12 (b) yang menunjukkan variasi energi ikatan yang berubah menuju ke nilai asimptotik energi resonansi Plasmon Permukaan pada masing-masing individu nanopartikel sesuai seperti pengertian umum. Bentuk fungsi energi ikat ini adalah seperti yang tertulis dengan nilai parameter dari rumusan tersebut ditampilkan pada legenda di dalam Gambar 2.12 (b).

Lebih jauh, kami memperluas model Hibridisasi Plasmon di atas dengan meninjau kasus pencampuran keadaan fotonik (*Photonic states mixing*) dari Plasmon Permukaan dengan modus rongga (*Cavity Mode*) (Suryadharma, 2016). Telah diperkenalkan di bagian terdahulu, pada permukaan batas antara logam dengan medium dielektrik dapat tereksitasi resonansi Plasmon Permukaan. Hal ini terlihat jelas pada permukaan batas silinder logam, misalnya silinder Perak, dengan medium udara maupun dielektrik. Sifat fisis dari medium dielektrik ini (permittivitas medium) menentukan frekuensi resonansi Plasmon Permukaan yang terjadi. Eksitasi Plasmon Permukaan ini dapat ditunjukkan dari perhitungan LDOS. Sebagai contoh, pada Gambar 2.13 ditunjukkan LDOS dari perbatasan permukaan silinder Perak ke dalam daerah

udara $\epsilon_3 = 1$, Gambar 2.13 (a); dan bahan dielektrik $\epsilon_3 = 4$, Gambar 2.13 (b). Untuk lebih energi eksitasi Plasmon Permukaan yang bergantung pada bahan dielektrik, pada Gambar 2.13 (c) ditampilkan spektrum LDOS ternormalisasi yang menunjukkan puncak LDOS berada pada energi 3.67 eV untuk udara ($\epsilon_3 = 1$) dan energi 3.14 eV untuk dielektrik $\epsilon_3 = 4$.

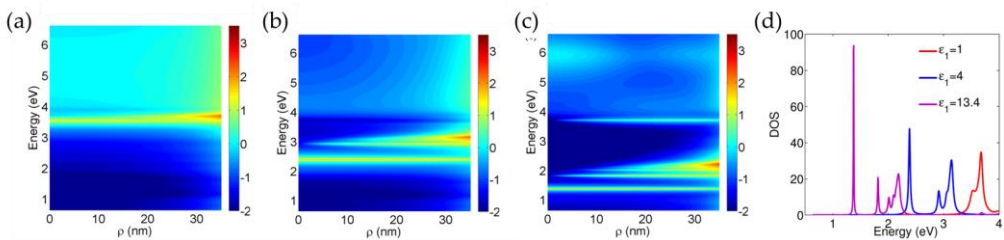


Gambar 2.13 Spektrum LDOS dari sebuah silinder Perak yang berbatasan dengan bahan berpermittivitas (a) $\epsilon_3 = 1$ dan (b) $\epsilon_3 = 4$. (c) Spektrum penampang potongan dari nilai LDOS ternormalisasi yang bersangkutan [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin *AIP Publishing*].

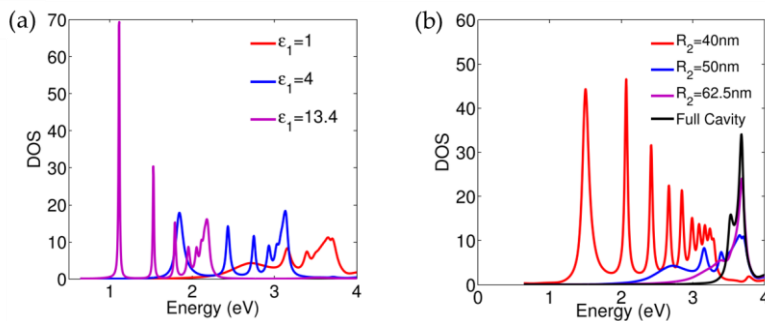
Di pihak lain, pada permukaan dari suatu sistem rongga pada *bulk* logam akan terjadi eksitasi Plasmon Permukaan, selain itu sistem rongga ini juga menghadirkan eksitasi modus resonansi rongga seperti pada kasus bahan dielektrik. Hal ini divalidasi dengan perhitungan LDOS dari suatu rongga pada *bulk* logam Perak. Pada Gambar 2.14 (a-c) ditampilkan perhitungan LDOS dalam dielektrik yang mengisi sebuah rongga pada *bulk* Perak. Secara berturut-turut bahan pengisi rongga tersebut adalah udara ($\epsilon_1 = 1$), bahan dielektrik $\epsilon_1 = 4$ dan bahan dielektrik $\epsilon_1 = 13.4$. Untuk dapat menunjukkan modus-modus yang tereksitasi di dalam rongga secara lebih jelas, maka pada Gambar 2.14 (d) ditampilkan spektrum dari jumlah dari LDOS untuk setiap kasus. Didapatkan nilai DOS terbesar untuk masing-masing bahan dielektrik adalah secara berturut-turut pada energi 3.67 eV, 3.14 eV dan 2.3 eV. Energi-energi ini bersesuaian dengan energi eksitasi Plasmon Permukaan. Di samping DOS yang berseuaian dengan eksitasi Plasmon Permukaan tersebut, jelas terlihat pula adanya modus resonansi rongga yang diskrit, khususnya pada Gambar 2.14 (b) dan Gambar 2.14 (c).

Bila kedua kasus ini digabung pada sistem silinder logam Perak yang berlubang, terjadi pencampuran keadaan fotonik yang lebih kaya. Pertama akan terjadi interaksi antar Plasmon Permukaan pada permukaan luar dan permukaan dalam silinder Perak. Kedua terjadi juga interaksi antara Plasmon

Permukaan pada permukaan luar silinder dengan modulus resonansi rongga. Hasil perhitungan LDOS dari modulus-modus yang tereksitasi dalam rongga untuk variasi dielektrik pengisi rongga serta variasi dari ketebalan silinder Perak berlubang ditampilkan pada Gambar 2.15. Beberapa hal dapat disimpulkan dari hasil di atas. Pertama dengan membesarnya permittivitas bahan dielektrik, jumlah modulus-modus hibridisasi yang terjadi di rongga akan bertambah. Kedua, sesuai dengan intuisi, semakin tebal dinding logam, interaksi antar-Plasmon Permukaan di kedua permukaannya akan melemah dan mengakibatkan berkurangnya modulus hibridisasi keadaan fotonik dalam rongga.



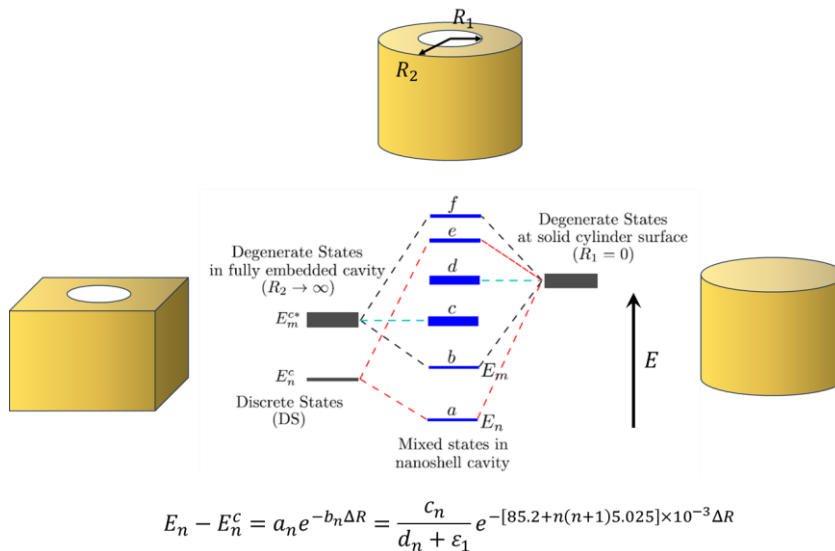
Gambar 2.14 Spektrum LDOS dari sebuah rongga pada *bulk* Perak dengan permittivitas medium rongga adalah (a) $\epsilon_1 = 1$, (b) $\epsilon_1 = 4$ dan (c) $\epsilon_1 = 13.4$. (d) Spektrum penampang potongan dari nilai DOS yang bersangkutan yang menunjukkan adanya eksitasi Plasmon Permukaan dan eksitasi modulus resonansi rongga yang diskrit, khususnya pada (b) dan (c) [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin *AIP Publishing*].



Gambar 2.15 (a) Spektrum nilai DOS dari modulus-modus yang tereksitasi dalam rongga silinder logam Perak dengan variasi bahan dielektrik di dalam rongga. (b) Spektrum nilai DOS dari modulus-modus yang tereksitasi dalam rongga silinder logam perak dengan variasi ketebalan silinder perak [direproduksi dari (Suryadharma, 2016), atas izin *AIP Publishing*].

Untuk memodelkan pencampuran keadaan fotonik yang lebih umum dari sekedar model Hibridisasi Plasmon, kami mengusulkan sebuah rumusan empiris universal untuk energi ikatan (*binding energy*) yang terjadi antara

komponen-komponen eksitasi pada masing-masing kasus, yaitu modus eksitasi Plasmon Permukaan pada permukaan silinder pejal dan modus-modus yang tereksitasi dalam rongga pada logam berbentuk *bulk*. Mekanisme pencampuran ini secara skematik ditampilkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Model Pencampuran Keadaan Fotonik (*Photonic States Mixing*) yang lebih umum dari model Hibridisasi Plasmon Permukaan dan rumusan empiris dari energi ikatan pencampuran.

Rumusan empiris universal yang ditampilkan pada Gambar 2.16 di atas, berlaku dengan baik untuk berbagai bahan dielektrik (ϵ_1) yang ditempatkan dalam rongga silinder Perak tersebut. Nilai parameter c_n dan d_n adalah universal untuk setiap modus pencampuran yang tereksitasi dalam rongga yang diparametrisasi oleh indeks n (Suryadharma, 2016).

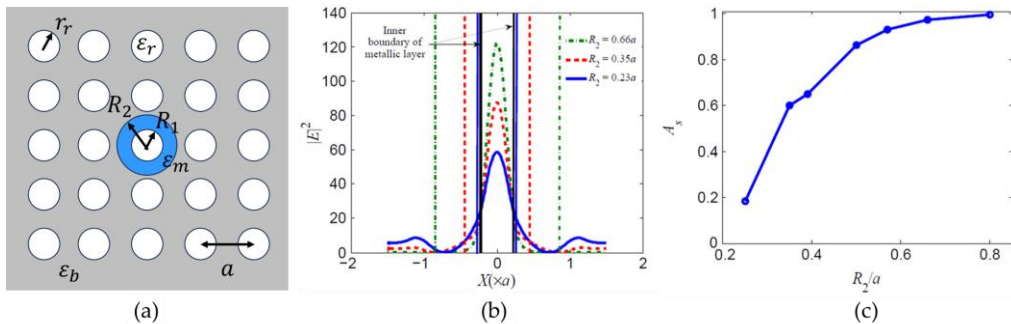
2.2.3 Kristal Fotonik Hibrid

Pada bagian terdahulu, telah dibahas upaya-upaya yang telah kami lakukan untuk meningkatkan Faktor Kualitas dari sebuah cacat titik pada sistem Kristal Fotonik berbahan dielektrik. Dari hasil terdahulu tersebut, telah didapatkan bahwa pembendungan energi pada cacat rongga dapat dikuantifikasi melalui bagian imajiner dari bilangan gelombang Bloch. Mengingat sifat absorptif dari logam tersebut, diharapkan membungkus cacat rongga dari sebuah sistem Kristal Fotonik yang ditinjau dengan logam dapat

meningkatkan bagian imajiner dari bilangan gelombang Bloch. Sehingga dengan kata lain, meningkatkan pembendungan energi dalam cacat tersebut.

Untuk membuktikan intuisi di atas, kami meninjau sistem Kristal Fotonik 2D berunit sel bujursangkar dengan cacat berupa pemberian lapisan logam pada salah satu silinder dielektriknya (Suryadharma, 2014). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Ekspansi Gelombang Bidang (*Planewave Expansion Method*) pada super-sel satuan (*unit super-cell*) yang mengikutsertakan cacat yang ditinjau. Struktur super-sel satuan yang ditinjau ditampilkan pada Gambar 2.17 (a).

Dari studi profil energi (intensitas) pada silinder cacat sistem Kristal Fotonik ini, didapatkan bahwa terjadi peningkatan energi yang terbungung pada silinder cacat. Peningkatan energi ini bertambah seiring dengan bertambahnya ketebalan dari lapisan logam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 (b), hal ini adalah sesuai intuisi umum. Untuk lebih menyakinkan validasi eksperimen numerik yang dilakukan ini, maka dihitung pula besarnya medan listrik pada permukaan silinder dielektrik cacat, dengan kata lain, besarnya medan pada permukaan dalam lapisan logam. Besarnya medan pada batas ini dikarakterisasi dengan faktor atenuasi amplitudo, A_s . Didapatkan bahwa dengan bertambah tebalnya lapisan logam, faktor atenuasi amplitudo menjadi hampir sempurna.



Gambar 2.17 (a) Super-sel satuan dengan sebuah cacat titik yang merupakan silinder dielektrik yang dibungkus oleh lapisan logam. (b) Peningkatan energi yang terbungung pada silinder cacat yang bertumbuh bersama ketebalan dari lapisan logam. (c) Variasi faktor atenuasi amplitudo medan pada permukaan dalam lapisan logam sebagai fungsi dari ketebalan lapisan logam [direproduksi dari (Suryadharma, 2014), atas izin *IOP Publishing*].

3. HAMBURAN

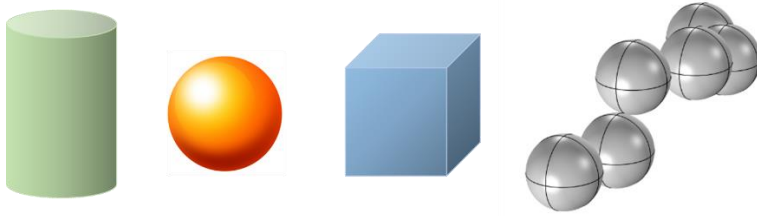
Setelah pada bab sebelumnya dibahas bangun dasar (*building block*) dari devais nanofotonik yang memiliki fungsionalitas dasar tertentu. Lebih jauh, telah ditunjukkan bahwa kita dapat meningkatkan fungsionalitas dari bangun dasar tersebut dengan memberikan cacat. Pada bagian ketiga ini kita akan meninjau peristiwa hamburan. Mengingat dijelaskan pada Bab Pendahuluan, peristiwa hamburan adalah dasar dari persepsi kita terhadap lingkungan di sekitar kita.

Gelombang cahaya yang berasal dari suatu sumber, baik sumber khusus seperti Laser ataupun sumber tidak langsung (sumber cahaya latar belakang, *ambient light*), yang datang dengan polarisasi dan arah iluminasi yang spesifik, akan berinteraksi dengan objek penghambur dan menghasilkan gelombang hambur ke segala arah. Karena interaksi gelombang datang dengan objek penghambur tersebut, maka sebenarnya gelombang hambur mengandung informasi mengenai objek penghambur yang bersangkutan. Sebagai contoh, pada siang hari kita melihat daun berwarna hijau karena daun tersebut menghamburkan gelombang cahaya putih matahari ke mata kita. Cahaya putih matahari berinteraksi dengan *chlorophyll* pada daun yang menyerap gelombang cahaya merah dan biru, sedangkan warna hijau yang tidak serap dipantulkan, dan inilah yang menyebabkan kita melihat daun berwarna hijau. Oleh sebab itu, memahami dan mampu memanipulasi peristiwa hamburan akan memberikan banyak kemungkinan aplikasi yang berguna.

3.1 Teori Hamburan Gelombang Elektromagnetik

Solusi gelombang hambur dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan Maxwell dengan syarat batas yang sesuai untuk objek penghambur yang ditinjau. Untuk kasus penghambur yang memiliki simetri cukup tinggi, seperti simetri silinder atau simetri bola yang sempurna, solusi gelombang hambur dapat dituliskan sebagai kombinasi linier dari fungsi-fungsi khusus yang ortogonal. Sedangkan untuk kasus penghambur yang tidak memiliki simetri, solusi gelombang hambur harus dihitung melalui pemecahan persamaan Maxwell secara numerik. Bentuk penghambur silinder dan bola dibawah ini memiliki solusi analitik fungsi khusus, sedangkan solusi

gelombang hambur untuk bentuk kubus atau agregat beberapa buah bola merupakan solusi numerik.



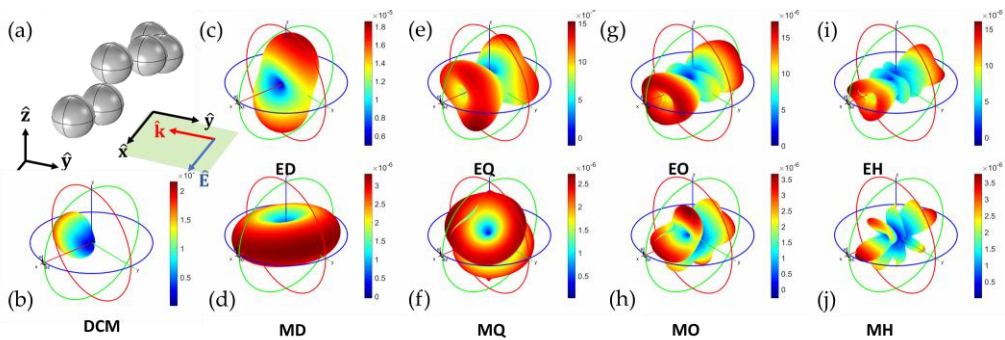
Gambar 3.1 Beberapa contoh objek penghambur, silinder dan bola merupakan objek penghambur dengan simetri yang cukup tinggi, kubus memiliki simetri diskrit dan agregat tidak memiliki simetri.

Teori Hamburan gelombang elektromagnetik secara analitis dikenal dengan nama Teori Hamburan Mie (Bohren, 1998), di mana solusi dari persamaan Maxwell dinyatakan sebagai kombinasi linier dari fungsi-fungsi yang ortogonal. Untuk sistem bersimetri silinder, solusi dari gelombang hambur diberikan oleh kombinasi dari fungsi Bessel dan fungsi Hankel. Untuk sistem bersimetri bola, solusi dari gelombang hambur diberikan oleh fungsi harmonik bola vektor (*vector spherical harmonics*), yang tidak lain tersusun dari fungsi Bessel bola untuk variabel jari-jari dan fungsi harmonik bola (yaitu fungsi Legendre Terasosiasi dan fungsi eksponen) untuk variabel-variabel sudut. Koefisien kombinasi dapat ditentukan dengan mempergunakan sifat ortogonalitas dari fungsi-fungsi khusus ini.

Untuk mendapatkan solusi gelombang hambur dari bentuk penghambur yang lebih kompleks atau tidak memiliki simetri, kami mempergunakan formulasi perhitungan integral permukaan (Kern, 2009; Gallinet, 2010) yang dilakukan secara numerik. Agar hasil numerik ini dapat dianalisis dan dimanipulasi lebih lanjut, hasil numerik ini diproyeksikan ke dalam basis fungsi harmonik bola vektor sehingga solusi numerik tersebut dapat dituliskan secara analitik.

Dari koefisien-koefisien komponen fungsi ortogonal yang bersangkutan, dikenal sebagai koefisien Mie, berbagai informasi dapat diperoleh. Dari koefisien Mie ini, dapat dihitung spektrum penampang lintang hamburan yang menggambarkan tingkat efisiensi hamburan sebagai fungsi dari panjang gelombang cahaya penghambur. Di samping itu, dapat juga ditentukan

momen multipol elektromagnetik yang tereksitasi pada objek penghambur serta kontribusi dari masing-masing komponen momen multipol ini pada penampang hamburan total (Raab, 2005). Pola radiasi dari gelombang hambur dapat juga ditentukan. Sebagai contoh, pada Gambar 3.1 ditunjukkan pola radiasi hamburan total dari penghambur agregat rantai nanopartikel. Ditampilkan pula pola radiasi dari multipol-multipol elektromagnetik yang tereksitasi pada penghambur. Multipol elektromagnetik tersebut adalah dipol listrik (*electric dipole*, ED), dipol magnetik (*magnetic dipole*, MD), kuadrupol listrik (*electric quadrupole*, EQ), kuadrupol magnetik (*magnetic quadrupole*, MQ), oktopol listrik (*electric octopole*, EO), oktopol magnetik (*magnetic octopole*, MO), heksadekapol listrik (*electric hexadecapole*, EH), heksadekapole magnetik (*magnetic hexadecapole*, MH) dan masih banyak lagi yang lainnya. Umumnya, untuk setiap multipol yang dibangkitkan tersebut, makin tinggi orde multipol yang bersangkutan, makin lemah kontribusinya.



Gambar 3.2 (a) Sebuah agregat rantai dari nanopartikel diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik dengan vektor propagasi dan medan listrik E seperti pada gambar. (b) Pola intensitas radiasi total. (c) Pola intensitas radiasi kontribusi dipol listrik. (d) Pola intensitas radiasi kontribusi dipol magnet. (e) Pola intensitas radiasi kontribusi kuadrupol listrik. (f) Pola intensitas radiasi kontribusi kuadrupol magnet. (g) Pola intensitas radiasi kontribusi oktopol listrik. (h) Pola intensitas radiasi kontribusi oktopol magnet. (i) Pola intensitas radiasi kontribusi heksadekapol listrik. (j) Pola intensitas radiasi kontribusi heksadekapol magnet.

Jadi, dengan kata lain, semua informasi dari gelombang hambur ini, khususnya koefisien Mie dari gelombang hambur ini, mengandung informasi dari objek penghambur dan interaksinya dengan gelombang datang. Oleh karenanya dengan memahami bagaimana bentuk gelombang hambur, atau koefisien Mie dari gelombang hambur, kita dapat memanfaatkan peristiwa hamburan ini untuk berbagai aplikasi.

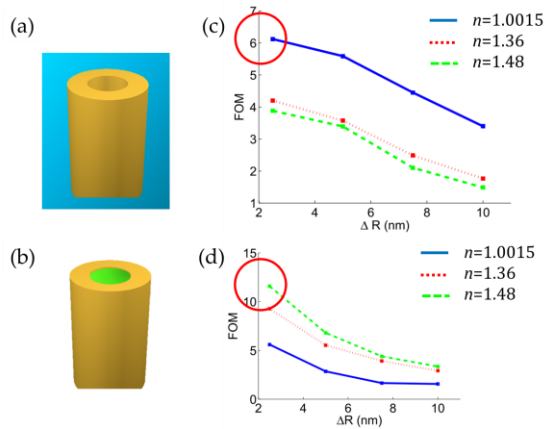
3.2 Penginderaan Menggunakan Hamburan

Salah satu kriteria suatu devais adalah fungsionalitasnya yang tinggi. Sehingga, akan sangat menguntungkan jika satu buah devais yang dapat dirancang untuk memiliki 2 atau lebih fungsi.

3.2.1 Tabung Perak sebagai Pengindera Komplementer untuk Gas dan Cairan

Indeks bias adalah besaran fisis dari suatu bahan yang memengaruhi perilaku gelombang elektromagnetik yang diiluminasikan padanya. Oleh karenanya, devais pengindera keberadaan suatu zat dapat dirancang berdasarkan penginderaan indeks bias ini. Suatu devais pengindera harus memiliki sensitivitas dan selektivitas yang tinggi. Sensitivitas pengindera yang tinggi berarti terdapat perubahan panjang gelombang resonansi yang besar untuk perubahan indeks bias yang kecil, $S = \frac{d\lambda_p}{dn}$. Selektivitas didefinisikan melalui besar *figure of merit* (FOM), dengan rumusan $\frac{S}{\Delta\lambda}$, di mana $\Delta\lambda$ adalah lebar spektrum resonansi. Jadi untuk mendapatkan FOM yang besar, tidak saja sensitivitas harus besar, namun spektrum resonansi juga harus sempit.

Sebuah sistem tabung yang terbuat dari logam Perak merupakan kandidat pengindera indeks bias yang baik, karena seperti yang telah ditemukan terdahulu, interaksi kopling antar Plasmon Permukaan membuat spektrum resonansi yang tajam dan lebih sensitif terhadap perubahan sifat fisis medium latar belakangnya (Suryadharma, 2016). Berdasarkan hasil ini, kami mengusulkan **satu buah** sistem pengindera untuk zat berbentuk gas dan cair (Isro, 2017). Perhitungan melalui Teori Hamburan Mie memberikan FOM terbaik untuk gas yang terletak di luar tabung Perak berketebalan tabung yang kecil, hal ini sesuai dengan kesimpulan bahwa interaksi antar Plasmon Permukaan menjadi semakin kuat ketika ketebalan logam mengecil. Untuk zat berbentuk cair, FOM terbaik didapatkan bila zat yang ingin diketahui diletakkan di dalam tabung. Sama seperti kasus penginderaan gas, FOM terbaik didapat untuk ketebalan tabung Perak yang kecil. Hasil ini ditampilkan pada Gambar 3.3.

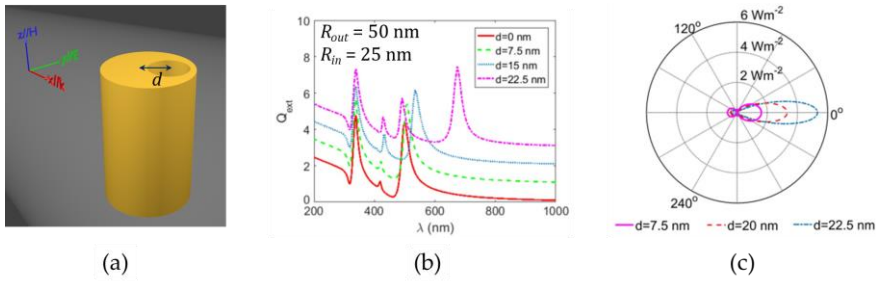


Gambar 3.3 (a) Konfigurasi penginderaan zat yang terletak di luar tabung Perak, (b) konfigurasi penginderaan zat cair yang terletak di dalam tabung Perak. (c) Variasi FOM dari setiap zat yang diletakkan di luar tabung Perak sebagai fungsi ketebalan tabung, (d) Variasi FOM dari setiap zat yang diletakkan di dalam tabung Perak sebagai fungsi ketebalan tabung [direproduksi dari (Isro, 2017), atas izin *IOP Publishing*].

3.2.2 Tabung Perak dengan Lubang Non-konsentrik sebagai Pengindera Arah

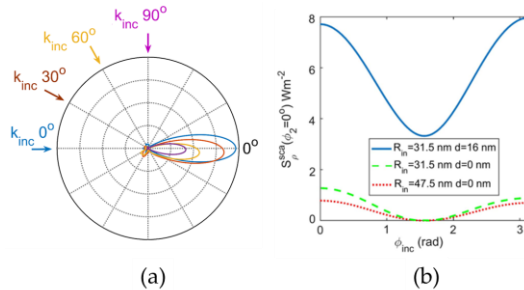
Pengrusakan simetri dari suatu sistem memberikan efek yang kurang lebih hampir sama seperti pemberian cacat pada suatu sistem, yaitu fungsionalitas yang bertambah. Demikian pula untuk sistem silinder berlubang dalam pembahasan terdahulu, bila posisi lubang digeser, ditemukan fungsionalitas baru.

Ketika lubang pada silinder Perak digeser, beberapa hal terjadi, pertama keadaan terikat (*bonding*) dari pencampuran keadaan fotonik dari sistem bergeser ke energi yang lebih rendah. Pergeseran posisi lubang, berarti pada satu bagian, interaksi antar modus resonansi Plasmon Permukaan di dinding luar dan dinding dalam menjadi semakin kuat, dan kebalikannya pada sisi yang berlawanan. Interaksi yang makin kuat berarti energi ikatnya semakin rendah. Akibat interaksi ini, hal yang kedua terjadi adalah adanya radiasi terarah pada sisi arah pergeseran lubang (Isro, 2019). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 (a) Geometri tabung Perak dengan lubang non-konsentrik yang tergeser sejauh d . (b) Melalui variasi pergeseran d , tampak bahwa resonansi dengan panjang gelombang terendah (frekuensi tinggi) tidak bergeser, resonansi ini diasosiasikan dengan modus rongga pada struktur, sedangkan resonansi berpanjang gelombang tinggi (frekuensi atau energi lebih rendah) yang diasosiasikan dengan hibridisasi Plasmon Permukaan mengalami pergeseran merah. (c) Akibat lain dari lubang yang non-konsentrik adalah radiasi terarah [direproduksi dari (Isro 2019), atas izin OPTICA].

Selanjutnya, kami temukan bahwa variasi arah datang gelombang iluminasi selalu memberikan gelombang hambur pada arah hambur yang kurang lebih sama, yaitu ke depan. Lebih jauh, didapatkan bahwa variasi dari sudut datang ini memiliki korelasi dengan intensitas radiasi ke arah depan tersebut. Hasil ini ditampilkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 (a) Variasi sudut datang gelombang iluminasi memberikan radiasi hambur yang kurang lebih tidak berubah, yaitu ke depan, dan nilai intensitas arah ke depan ini berkorelasi dengan arah datang gelombang iluminasi tersebut. (b) Relasi antara intensitas arah ke depan dengan sudut datang gelombang iluminasi [direproduksi dari (Isro, 2019), atas izin OPTICA].

Dari hasil ini, sebuah sistem penginderaan baru didapatkan. Dan penginderaan ini bukanlah penginderaan konvensional seperti penginderaan zat melalui indeks biasnya, melainkan penginderaan arah datangnya gelombang iluminasi. Aplikasi dari sistem penginderaan ini akan sangat berguna untuk misalnya keperluan militer di mana penginderaan ini berperilaku seperti radar yang dapat menentukan posisi.

3.3 Rekayasa Hamburan

Bila pada kasus yang dibahas dalam subbab terdahulu, kita mempergunakan peristiwa hamburan untuk mendapatkan informasi mengenai sistem penghambur (zat yang ingin diindera) ataupun informasi mengenai gelombang datang yang bersangkutan, pada sub-bab ini, akan dibahas rekayasa gelombang hambur dengan merancang secara khusus penghambur yang bersangkutan. Untuk dapat merekayasa gelombang hambur ini, pertama perlu dipahami bagaimana interaksi gelombang hambur dari sebuah objek berinteraksi dengan objek lainnya. Yang kedua adalah pemahaman atas pengaruh perubahan geometri penghambur pada radiasi gelombang hambur yang bersangkutan. Hal-hal ini dibahas satu demi satu pada bagian-bagian berikut ini dan ditunjukkan aplikasi yang dapat dilakukan untuk rekayasa gelombang hambur tersebut.

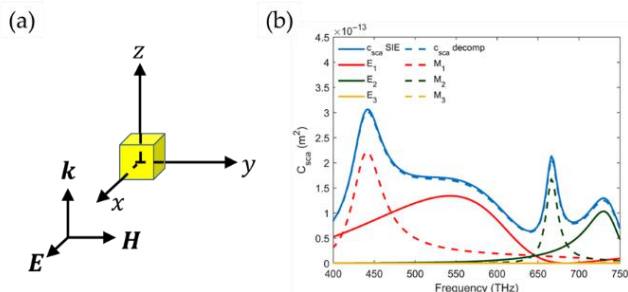
3.3.1 Pembangkitan Multipol Tinggi akibat Interaksi Antarpenghambur

Telah dijelaskan pada bagian terdahulu, gelombang elektromagnetik yang datang pada sebuah objek, berinteraksi dengan objek melalui rekonfigurasi distribusi muatan objek. Pada logam, karena keberadaan awan elektron konduksi, rekonfigurasi muatan ini didominasi oleh distribusi muatan dipol saja. Namun untuk kasus dielektrik, karena konfigurasi muatan tidak bebas bergerak, maka multipol orde tinggi dapat dieksitasi dalam objek penghambur (Raab, 2005).

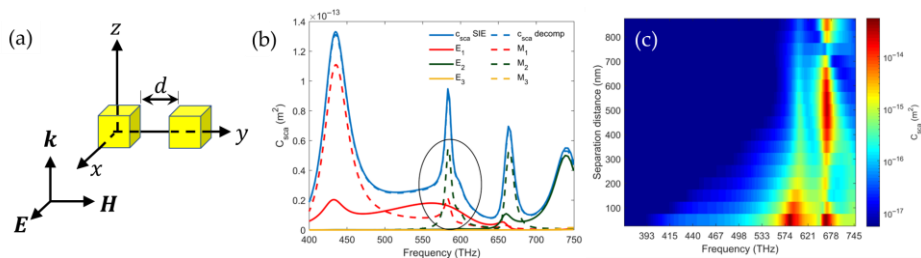
Jika sebuah kubus berukuran nanometer dari bahan dielektrik yang diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik maka dari informasi gelombang hamburnya, dapat diidentifikasi eksitasi multipolar elektromagnetik yang terjadi. Tidak saja terdapat kontribusi sistem dipol listrik (E_1) dan dipol magnetik (M_1), tetapi dalam rentang cahaya tampak terdapat juga kontribusi kuadrupol listrik (E_2) dan magnetik (M_2), seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.6.

Bila dua kubus yang identik diiluminasi, maka jelas terlihat interaksi antara kedua penghambur tersebut. Masing-masing penghambur mendapatkan iluminasi dari gelombang datang yang sama, dan juga masing-masing penghambur mendapatkan iluminasi dari gelombang hambur pasangannya. Akibat dari interaksi ini dapat diamati dari terbangkitkannya

modus multipolar baru pada penghambur. Kontribusi dari multipolar baru ini dapat dilihat dari penampang lintang hamburan medan interaksi antarkedua kubus dan dekomposisinya, seperti yang pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 (a) Konfigurasi iluminasi sebuah kubus dielektrik. (b) Penampang lintang hamburan dan dekomposisinya ke dalam kontribusi multipol elektromagnetiknya [direproduksi dari (Perdana, 2021), atas izin *OPTICA*].



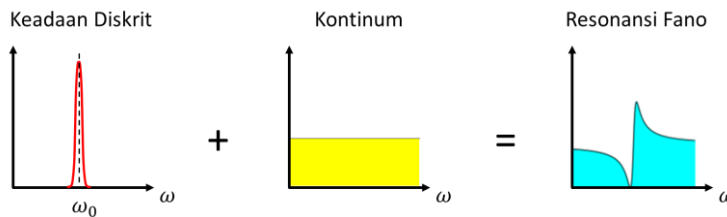
Gambar 3.7 (a) Konfigurasi dua buah kubus dielektrik yang diiluminasi sebuah gelombang elektromagnetik. (b) Penampang lintang hamburan interaksi dari hanya kubus pertama, terlihat bahwa muncul dua multipol baru, yaitu kuadrupol listrik dan kuadrupol magnetik pada frekuensi 581 THz. (c) Penampang hambur dari hanya kontribusi kuadrupol magnetik pada resonansi 581 THz dan 666 THz sebagai fungsi dari jarak antar penghambur [direproduksi dari (Perdana, 2021) atas izin *OPTICA*].

Dari hasil di atas, pada Gambar 3.7 (b), terlihat bahwa akibat interaksi kedua penghambur, dua multipol baru muncul, yaitu kuadrupol listrik dan magnetik pada frekuensi 581 THz. Pada Gambar 3.7 (c), seperti yang diduga sebelumnya, kuadrupol magnetik pada 581 THz merupakan multipol yang terinduksi, karena dengan bertambahnya jarak antarpenghambur, penampang lintang hamburan resonan ini meluruh secara eksponensial, karena interaksi antarpenghambur menjadi melemah. Di pihak lain, terlihat bahwa walaupun kuadrupol magnetik pada frekuensi 666 THz yang merupakan eksitasi dari masing-masing individu penghambur, namun mereka beresonansi satu sama lain secara periodik bergantung pada jarak antara kedua penghambur.

Melalui pemahaman bagaimana sebuah multipol dapat dieksitasi pada penghambur seperti pada contoh di atas, aplikasi dengan respons hamburan tertentu dapat dirancang dari konstituen-konstituen yang sengaja dipilih untuk menghasilkan respons tersebut. Pada bagian berikut ini, ditampilkan salah satu hasil perancangan sistem penghambur yang memiliki respons resonansi Fano.

3.3.2 Merancang Penghambur dengan Respons Resonansi Fano

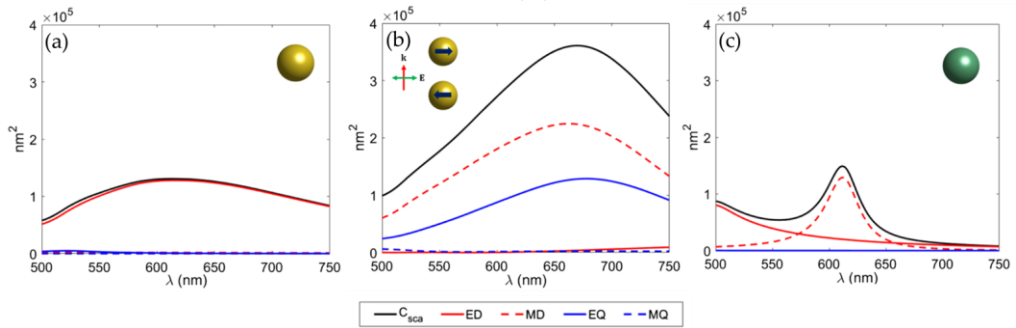
Resonansi Fano adalah respons hamburan resonan yang memiliki spektrum asimetrik. Resonansi ini banyak ditemui dalam berbagai sistem, mulai dari sistem atom sampai dengan sistem optik. Bentuk spektrum yang asimetrik ini dijelaskan secara teoritis oleh Ugo Fano pada tahun 1961 (Fano, 1961) sebagai interferensi dari dua resonan, yang pertama adalah resonan diskrit (yang kadang disebut juga *bright mode*) dengan resonan yang lebih melebar atau kontinum (disebut juga *dark mode*) (Miroshnichenko, 2010). Interferensi ini secara skematik ditampilkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Resonansi Fano yang memiliki spektrum asimetrik merupakan hasil interferensi dari resonan yang bersifat tajam (diskrit) dengan latar belakang yang kontinu.

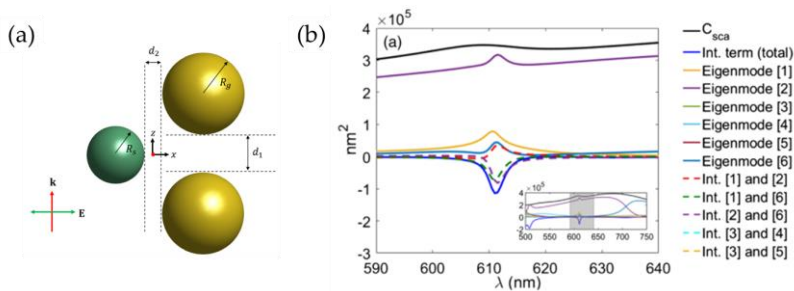
Berdasarkan pengetahuan mengenai komponen yang diperlukan untuk membentuk eksitasi resonansi Fano tersebut, kami mengambil sistem dimer dari nanopartikel logam Emas dan sebuah nanopartikel Silikon (Natanael, 2021). Untuk daerah panjang gelombang yang ditinjau, sebuah nanopartikel emas, seperti umumnya nanopartikel logam lainnya, akan memiliki eksitasi dipol listrik yang dominan, Gambar 3.9 (a). Di pihak lain, nanopartikel Silikon memiliki respons dominan dari dipol magnetiknya, Gambar 3.9 (c). Sehingga jika diharapkan terjadi interferensi asimetrik Fano dari sistem hibrid nanopartikel Emas dan Silikon ini, maka perlu dipastikan bahwa modus multipol elektromagnetik yang berinteraksi adalah dari jenis yang sama. Oleh karenanya, ditinjau sistem dimer nanopartikel Emas, karena sistem ini dapat

dirancang sehingga memiliki resonansi dipol magnetik dan kuadrupol listrik yang dominan dan lebar, Gambar 3.9 (b).



Gambar 3.9 (a) Penampang lintang hamburan dari sebuah nanopartikel Emas yang didominasi oleh eksitasi dipol listrik, (b) penampang lintang hamburan sistem dimer nanopartikel Emas yang memiliki kontribusi dari eksitasi dipol magnet dan kuadrupol listrik. (c) Penampang lintang hamburan sebuah nanopartikel Silikon dengan eksitasi dipol magnet pada rentang panjang gelombang yang ditinjau [direproduksi dari (Natanael, 2021), atas izin *OPTICA*].

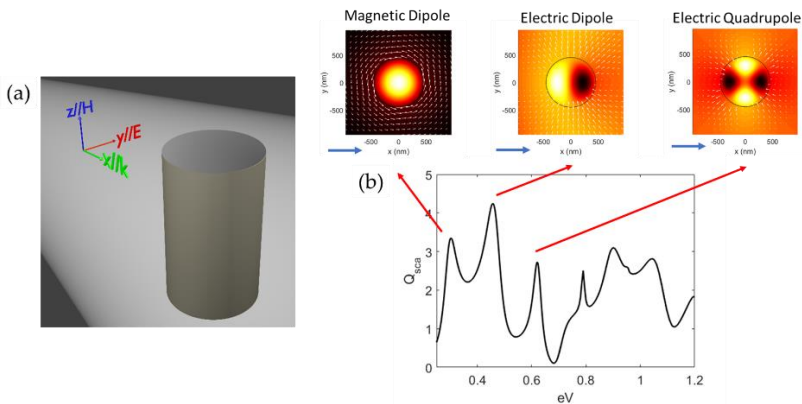
Struktur *trimer* yang merupakan gabungan dari sistem dimer nanopartikel Emas dan nanopartikel Silikon menghasilkan respons resonansi Fano. Hal ini diperkuat oleh pembuktian bahwa resonansi Fano yang terjadi berasal dari interferensi modus-modus eigen dari sistem yang tidak saling ortogonal. Menggunakan analisis dekomposisi nilai eigen (Suryadharma, 2017), didapatkan 6 modus eigen dari struktur trimer ini. Keenam modus eigen ini tidak saling ortogonal satu sama lain, sehingga interferensi di antara modus eigen ini menghasilkan bentuk respons asimetrik Fano. Hasil ini ditampilkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 (a) Sistem trimer yang dirancang untuk menghasilkan respons resonansi asimetrik Fano yang tersusun dari sebuah nanopartikel Silikon dan sistem dimer nanopartikel Emas. (b) Salah satu respons resonansi asimetrik Fano terjadi karena interferensi dari modus-modus eigen yang tidak ortogonal [direproduksi dari (Natanael, 2021), atas izin *OPTICA*].

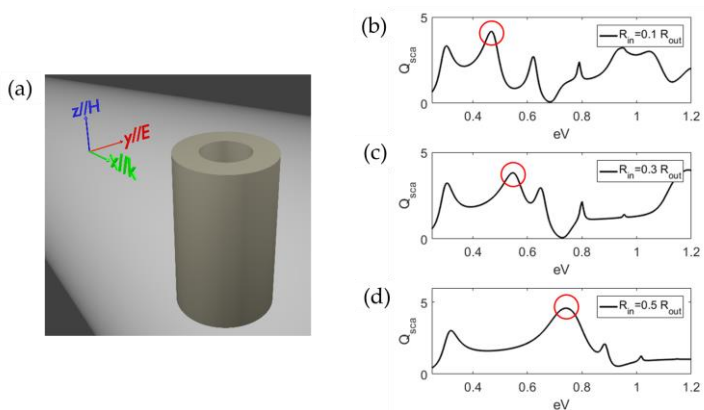
3.3.3 Rekayasa Radiasi Hambur

Sama seperti hamburan pada sebuah nanopartikel berbentuk bola, hamburan gelombang elektromagnetik pada sebuah silinder juga mengeksitasi modus-modus resonan multipol elektromagnetik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Spektrum efisiensi hamburan, Gambar 3.11 (b), menunjukkan kehadiran resonan multipol elektro magnetik yang pola medannya ditunjukkan juga pada gambar. Pada gambar pola medan tersebut, panah menyatakan medan listrik, sedangkan warna menyatakan medan magnetik. Untuk tiga resonan dari spektrum efisiensi hamburan ditampilkan bentuk distribusi medan hamburnya yang dapat diidentifikasi secara-berturut-turut sebagai dipol magnet, dipol listrik dan kuadropol listrik.



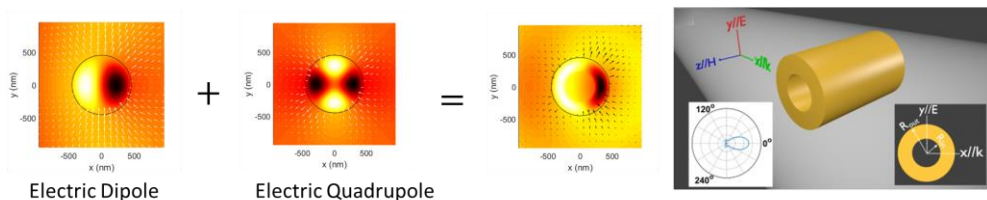
Gambar 3.11 (a) Sebuah silinder dielektrik yang diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik. (b) Spektrum efisiensi hamburan dan resonansi multipol elektromagnetik yang terjadi pada penghambur silinder dielektrik yang bersangkutan.

Melalui pemberian lubang pada silinder, sistem memiliki sebuah derajat kebebasan baru, yaitu jari-jari dari lubang. Derajat kebebasan baru ini mengatur resonansi multipol elektromagnetik yang terjadi. Dalam kasus yang ditinjau, memperbesar ukuran lubang berakibat pada pergeseran posisi resonan multipol elektromagnetik. Terlihat pada Gambar 3.12, pergeseran paling dominan terjadi untuk dipol listrik.



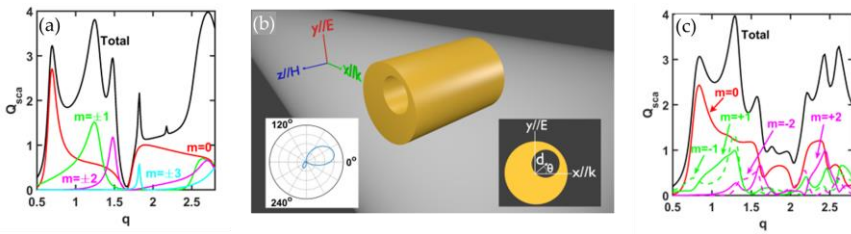
Gambar 3.12 (a) Silinder dielektrik yang berlubang memberikan sebuah derajat kebebasan baru dalam eksitasi resonan multipol elektromagnetik, dalam hal ini jari-jari lubang mengatur posisi resonan dipol listrik. Pada (b) dan (c) terlihat bahwa posisi resonan lainnya kurang-lebih relatif tidak berubah. (d) Resonansi dipol listrik bertumpang tindih dengan resonansi kuadrupol listrik.

Pada ukuran jari-jari lubang tertentu, posisi resonansi dipol listrik bertumpang tindih dengan resonansi kuadrupol listrik. Sebagai akibat tumpang tindih resonansi dipol listrik dan kuadrupol listrik tersebut, interferensi keduanya menghasilkan radiasi terarah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Interferensi dari modus resonansi dipol listrik dan kuadrupol listrik yang saling bertumpang-tindih menghasilkan radiasi yang terarah (Isro, 2018).

Untuk lebih memahami rekayasa hamburan ini, dilakukan juga dekomposisi kontribusi multipol elektromagnetik yang terjadi. Untuk sistem yang memiliki simetri, kontribusi multipol ini bersifat berdegenerasi, artinya komponen momen multipol yang berbeda yang menghasilkan sebuah modus resonansi memiliki frekuensi yang sama. Namun, jika seperti kasus yang terdahulu, simetri ini sengaja dirusak, degenerasi ini akan terpecah dan sebagai akibatnya interferensi yang terjadi lebih kaya sehingga dapat dilakukan pembelokan berkas radiasi hamburan (Isro, 2018). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.14 (a) Dekomposisi kontribusi multipol elektromagnetik untuk sistem yang simetrik (silinder berlubang), kontribusi multipol tersebut berdegenerasi. (b) Ketika simetri dirusak, radiasi terarah dapat dibelokkan. (c) Pembelokan radiasi terarah ini terjadi karena degenerasi kontribusi multipol elektromagnetik menjadi terpecah [direproduksi dari (Isro, 2018), atas izin *OPTICA*].

3.4 Sistem Pencitra dan Sistem Layar

Menggunakan peristiwa hamburan, kita dapat juga melakukan analisis dari suatu sistem pencitra (*imaging*) dan sistem pembentukan bayangan pada layar (*display*). Pada dasarnya, pencitraan adalah memindahkan informasi dari suatu objek pada bidang objek menjadi bayangannya pada bidang bayangan. Lensa adalah instrumen untuk mentransformasi informasi tersebut. Di pihak lain, sistem layar adalah respons kolektif gelombang hampur pada unit-unit sel yang dirancang secara khusus. Dalam bagian ini, akan diuraikan kontribusi kami pada dua sistem ini, yaitu sistem Lensa Super (*super lens*) dan sistem Layar Transflektil (*transflective display*).

3.4.1 Sistem Pencitra Lensa Super

Kita ketahui, bahwa secara umum respons materi terhadap gelombang elektromagnetik dinyatakan oleh sebuah nilai indeks bias yang positif. Namun pada tahun 1968, Viktor Vaseleto melakukan studi teoritik dari suatu sistem dengan indeks bias negatif beserta konsekuensinya (Vaseleto, 1968). Akibat dari indeks bias yang negatif ini, maka peristiwa pembiasan tidak lagi mengikuti Hukum Snell biasa, melainkan menjadi terbalik, seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.15.

Tentu saja, ketika teori medium dengan indeks bias negatif ini diusulkan pertama kali, tidak ada yang menanggapi secara serius, karena pada masa itu tidak ada bahan alam yang memiliki nilai permittivitas ϵ dan permeabilitas μ yang secara bersama-sama negatif sehingga berakibat pada nilai indeks bias yang negatif. Namun pada tahun 2000, John Pendry menunjukkan bahwa jika

kita memiliki sistem berindeks bias negatif, maka kita dapat membuat sebuah lensa sempurna. (Pendry, 2000). Pada tahun 2004, sebuah metamaterial berindeks bias negatif berhasil dibuat oleh kelompok David R. Smith dari *University of Calidornia, San Diego* (Smith, 2004).

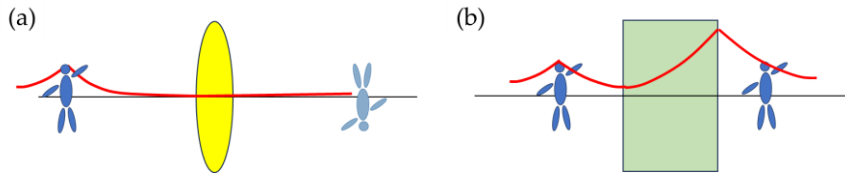


Gambar 3.15 Pembiasan pada medium berindeks bias positif mengikuti aturan Hukum Snell, sedangkan pembiasan pada medium berindeks bias negatif terjadi kebalikan dari Hukum Snell.

Sebuah lensa pada dasarnya adalah pentransformasi informasi dari bidang objek ke bidang bayangan. Informasi dari objek ini dikandung dalam rentang yang lebar dari frekuensi ruang. Namun karena sifat penjalaran gelombang, komponen frekuensi ruang yang besar tidak dapat dipropagasikan pada jarak yang jauh karena sifat atenuatifnya. Karena sifat keterbalikan frekuensi ruang dengan ukuran spatial, maka ini artinya gambaran (*feature*) ukuran bentuk objek yang kecil tidak dapat ditransformasikan ke bidang bayangan. Artinya sistem lensa yang biasa dipakai tidak akan menghasilkan bayangan yang sempurna, karena tidak semua informasi objek dapat direproduksi pada bayangan. Namun, Pendry mengusulkan bahwa jika dipergunakan lensa dari bahan dengan indeks bias yang negatif (Pendry, 2000), karena sifat bahan tersebut, komponen frekuensi ruang yang mengalami atenuasi dalam medium biasa justru mendapatkan penguatan dalam medium berindeks bias negatif. Oleh karenanya informasi lengkap dapat diperoleh untuk membuat bayangan yang sempurna. Secara skematik, perbandingan pembentukan bayangan oleh kedua jenis lensa ini ditampilkan pada Gambar 3.16.

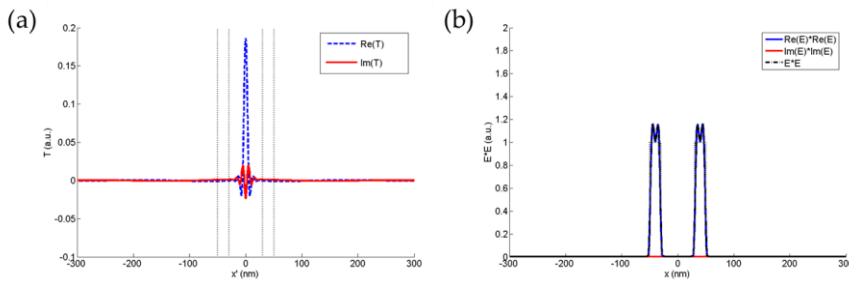
Dalam optika pembentukan bayangan oleh sebuah lensa konvensional, terdapat batasan ukuran terkecil dari objek yang dapat diresolusikan oleh suatu sistem pencitraan dengan panjang gelombang tertentu. Batasan ini disebut limit Abbe (Born, 1997), yang menyatakan bahwa ukuran spatial dari objek terkecil yang dapat diresolusikan adalah setengah dari panjang gelombang cahaya yang dipakai untuk “melihatnya”. Menggunakan lensa super, batasan ini dapat dilampaui karena informasi yang dibawa oleh

frekuensi ruang besar (resolusi spatial kecil) tetap ditransformasikan ke bayangan. Jadi objek dengan ukuran spatial yang lebih kecil dari panjang gelombang cahaya yang dipergunakan untuk “melihatnya” dapat diresolusikan. Hal ini tidak mungkin dicapai oleh lensa konvensional.



Gambar 3.16 (a) Sistem lensa konvensional merupakan sistem yang mentransformasi informasi dari objek, berupa informasi frekuensi-frekuensi ruang, ke bidang bayangan. Bayangan yang terjadi tidak sempurna karena sebagian informasi frekuensi ruang yang besar (artinya resolusi spatial yang kecil) mengalami propagasi yang meluruh. (b) Menggunakan lensa dari sistem berindeks bias negatif, informasi frekuensi ruang yang mengalami peluruhan ini justru diperkuat oleh lensa, sehingga dapat sampai ke bidang bayangan untuk membuat bayangan yang sempurna.

Pendry mengusulkan bahwa untuk keperluan praktis, kita dapat membuat lensa sempurna dari sebuah lapisan logam Perak saja. Berdasarkan usulan ini, para ahli mulai merealisasikan lensa Perak super ini (Fang, 2005; Melville, 2005; Ramakrishna, 2005). Namun demikian, analisis yang umumnya dipakai yaitu fungsi transfer dalam ruang momentum tidak bisa dipakai untuk memperdiksi kualitas dari bayangan. Oleh karenanya, kami mengusulkan analisis menggunakan fungsi transmisi yang didefinisikan sebagai transformasi Fourier dari fungsi transfer sistem (Karnadi, 2010). Didapatkan bahwa fungsi transmisi yang baik adalah berbentuk seperti fungsi delta Dirac. Menggunakan analisis fungsi transmisi ini, dapat dikaitkan langsung geometri dari sistem lensa Perak dengan bentuk bayangan hampir sempurna yang didapatkan. Sebagai contoh, pada Gambar 3.17 ditampilkan fungsi transmisi dari sebuah lensa Perak setebal 5 nm yang memiliki fungsi transmisi seperti fungsi Delta Dirac. Karena sifat fungsi transmisi yang mendekati sempurna ini, maka bayangan dari dua buah celah berukuran lebar 20 nm dan berjarak 80 nm di antaranya dapat tertransformasikan dengan hampir sempurna.



Gambar 3.17 (a) Sistem lensa Perak yang berbentuk lapisan Perak setebal 5 nm memiliki fungsi transmisi seperti fungsi Delta Dirac. (b) Bayangan dari dua buah celah berukuran lebar 20 nm dan berjarak 80 nm di antaranya dapat tertransformasikan secara hampir sempurna [direproduksi dari (Karnadi, 2010) atas izin *OPTICA*].

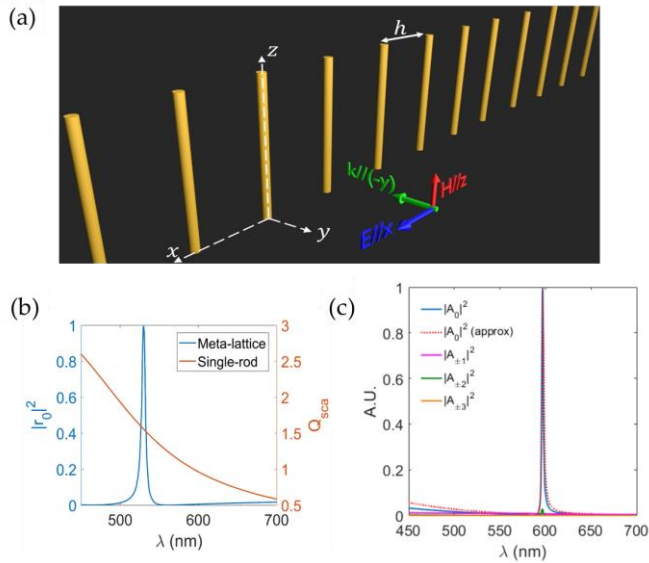
3.4.2 Sistem Layar Transflektil

Sebuah aplikasi yang berbasiskan peristiwa hamburan dan respons kolektif dari sistem adalah layar yang dibuat dari struktur *metasurface* atau lebih tepat *metalattice*. Struktur *metasurface* adalah struktur yang dibuat secara khusus untuk menghasilkan respons yang tidak didapat di alam, salah satunya adalah bahan dengan indeks bias negatif yang telah dibahas terdahulu. Sebuah respons lain yang diinginkan dari sebuah struktur adalah hamburan dengan spektrum resonansi yang sangat tajam serta dapat diatur (*tunable*).

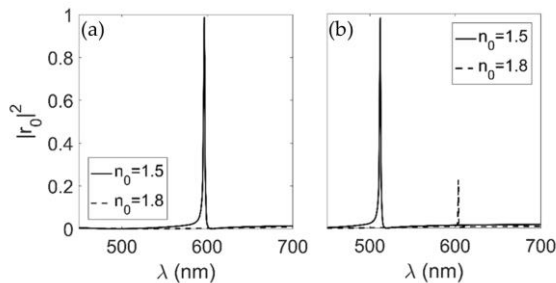
Melalui analisis hamburan, kami meninjau sistem silinder dielektrik seperti pada Gambar 3.18 (a). Sistem ini memiliki respons reflektansi yang sangat tajam (Isro, 2023). Respons tajam ini bukanlah diakibatkan oleh interferensi dari multipol elektromagnetik yang tereksitasi pada silinder-silinder dielektrik tersebut, karena respons dari sebuah silinder tidak menghasilkan respons yang tajam, Gambar 3.18 (b). Oleh karenanya sistem ini menarik untuk diteliti lebih jauh dan ditemukan bahwa adalah modus dipol yang tereksitasi pada masing-masing silinder inilah yang berinterferensi konstruktif, Gambar 3.13 (c).

Lebih jauh, ditunjukkan bahwa dengan mengubah indeks bias dari medium latar belakang reflektansi yang tajam tersebut menjadi hilang. Perubahan indeks bias dari medium latar belakang ini dapat dilakukan, misalnya menggunakan medium kristal cair (*liquid crystal*) yang indeks biasnya dapat diatur menggunakan medan listrik luar. Terlebih lagi, dengan mengubah geometri dari sistem, respons reflektansi yang tajam tersebut dapat dibuat terjadi pada panjang gelombang yang lainnya dengan sifat yang

sama, yaitu respons tajam ini hilang ketika medium latar belakang diganti. Perubahan respons ini ditampilkan pada Gambar 3.19.



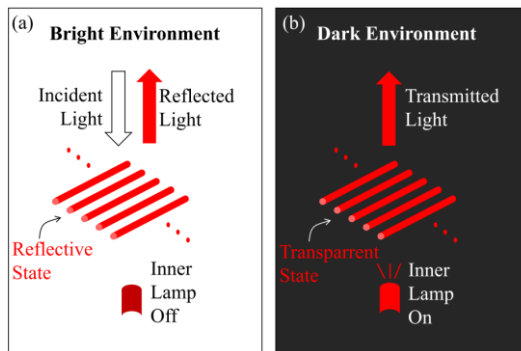
Gambar 3.18 (a) Geometri sistem *metallattice* yang terbuat dari silinder dielektrik dan konfigurasi iluminasinya. (b) Respons reflektansi yang tajam didapatkan, dan respons tajam ini terjadi bukan karena rekayasa multipol elektromagnetik yang tereksitasi pada masing-masing silinder yang tidak memiliki resonansi tajam. (c) Respons tajam ini terutama akibat respons dipol dari sistem (Isro 2023).



Gambar 3.19 (a) Melalui perubahan indeks bias dari medium latar belakang, respons reflektans yang tajam menjadi hilang. (b) Melalui perubahan ukuran geometri dari sistem, respons reflektans yang tajam dapat digeser kepada panjang gelombang yang berbeda (Isro, 2023).

Menggunakan kemampuan untuk dapat mengubah reflektans dari semula bernilai besar menjadi bernilai nol sesuai keperluan, serta kemampuan merancang reflektans tajam pada panjang gelombang yang lainnya, sistem ini menjadi kandidat digunakan sebagai unit sel dari sebuah sistem layar. Sistem layar yang dimaksud adalah sistem yang menggunakan cahaya latar belakang

(*ambient light*) sebagai sumber cahaya, misalnya cahaya matahari pada siang hari. Karena respons yang tajam tersebut, maka meskipun dipergunakan cahaya latar belakang sebagai sumber, kontras yang didapatkan pada layar sangat tinggi. Ketika cahaya latar belakang tidak tersedia, misalnya malam hari, dipergunakan sumber cahaya khusus. Jadi dengan sistem *metalattice* ini, dapat dirancang sistem layar yang transflektif dan hemat energi. Secara skematik, cara kerja sistem ini ditampilkan pada Gambar 3.20.



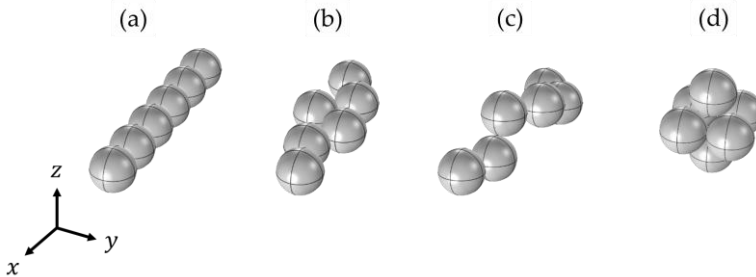
Gambar 3.20 Rancangan cara kerja sel satuan dari layar transflektif yang terbuat dari sistem *metalattice* silinder dielektrik. (a) Menggunakan cahaya latar belakang (*ambient light*) sebagai sumber, sel satuan akan memantulkan cahaya warna dasar khusus dari sel satuan ini. (b) Saat tidak ada cahaya latar belakang sebagai sumber, sumber khusus untuk menghasilkan pemancaran panjang gelombang cahaya warna dasar dipergunakan (Isro, 2023).

3.5 Identifikasi Agregat melalui Hamburan

Dalam sintesis nanopartikel di laboratorium, penggerombolan (agregasi) dari nanopartikel tersebut mungkin saja terjadi, baik agregasi menjadi bentuk rantai maupun agregasi bergerombol. Namun demikian, belum tentu agregasi yang terjadi tersebut, diinginkan dalam eksperimen. Oleh karenanya, diperlukan suatu cara untuk bisa mengidentifikasi agregasi yang terjadi tanpa pengukuran yang rumit.

Telah dipahami bahwa, gelombang hambur dari suatu peristiwa hamburan, membawa informasi dari objek penghambur. Oleh karenanya, kami mencoba melakukan studi analisis penampang hambur dari beberapa buah agregat dan melihat keterkaitannya dengan bentuk agregat yang ditinjau. Sehingga harapannya, dari informasi penampang lintang hamburan dapat diperoleh informasi mengenai agregat yang terjadi. Dalam studi ini, ditinjau 4 bentuk agregat berikut: rantai linier, rantai acak planar, rantai acak

3D, dan penggerombolan, secara skematik keempat konfigurasi ini ditampilkan pada Gambar 3.21.

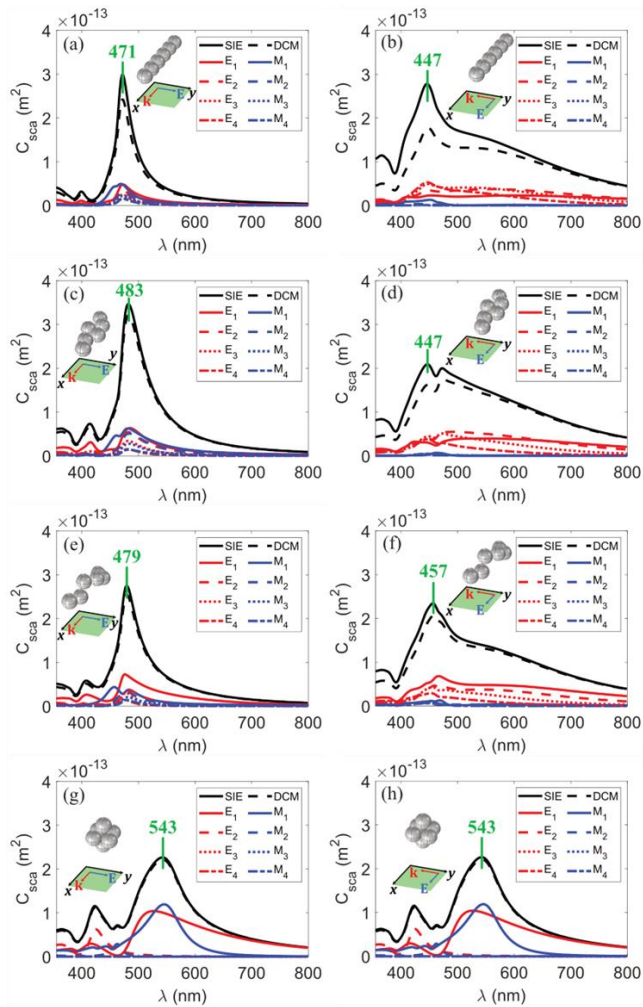


Gambar 3.21 Agregat nanopartikel yang ditinjau. (a) rantai linier, (b) rantai acak planar, (c) rantai acak 3D dan (d) bergerombol.

Gelombang hambur dari sistem ini dihitung menggunakan perhitungan numerik integral permukaan (Gallinet, 2010; Kern, 2013). Hasil yang diperoleh diprojektasikan kepada fungsi basis harmonik bola vektor sehingga diperoleh koefisien-koefisien Mie yang bersangkutan. Dari koefisien Mie tersebut, dapat dihitung penampang lintang hambur total serta kontribusi masing-masing multipol yang tereksitasi dalam sistem agregat yang ditinjau. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih menyeluruh, arah iluminasi gelombang datang juga divariasikan. Beberapa hasil yang memberikan gambaran representatif respons agregat terhadap iluminasi gelombang elektromagnetik ditampilkan pada Gambar 3.22. Secara representatif, dipilih dua arah iluminasi, yang pertama arah datang gelombang sejajar terhadap sumbu efektif agregat, dan kedua arah datang gelombang tegak lurus terhadap sumbu efektif agregat.

Terlihat bahwa ketika gelombang iluminasi memiliki arah vektor propagasi (k) sejajar sumbu efektif agregat rantai, baik rantai linier, Gambar 3.22 (a), rantai acak planar, Gambar 3.22 (c), maupun rantai acak 3D, Gambar 3.22 (e), kesemuanya memiliki respons penampang lintang hambur yang tajam dengan kontribusi dari berbagai multipol elektromagnetik yang tereksitasi di dalamnya. Ketika arah vektor propagasi (k) gelombang iluminasi adalah tegak lurus terhadap sumbu simetri dari agregat rantai, baik rantai linier, Gambar 3.22 (b), rantai acak planar, Gambar 3.22 (d), maupun rantai acak 3D, Gambar 3.22 (f), karena arah medan listrik adalah sejajar sumbu agregat, maka respons penampang lintang hamburan total lebih melebar. Respons yang melebar ini juga merupakan kontribusi dari semua multipol elektromagnetik

yang tereksitasi dalam agregat. Sedangkan untuk agregat yang menggerombol, simetri dari agregat ini cukup tinggi, dan hal ini berakibat pada respons penampang lintang hamburan total yang bentuknya lebih gemuk dan jika diperiksa, bentuk penampang lintang hamburan total ini terjadi akibat kontribusi **hanya dari dua multipol yang dominan**, yaitu dipol listrik dan dipol magnet, Gambar 3.22 (i) dan Gambar 3.22 (j). Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa dari melihat penampang lintang hamburan dan kontribusi multipolnya dapat ditentukan jenis agregasi yang terjadi.



Gambar 3.22 Penampang lintang hamburan total dan kontribusi dari multipol elektromagnetiknya dari keempat konfigurasi agregat nanopartikel yang diiluminasi dengan arah vektor propagasi yang sejajar sumbu dari agregat dan yang tegak lurus terhadap sumbu agregat.

4. OPTIKA NONLINIER DAN NANOFOTONIK TERINTEGRASI

Dalam bab-bab terdahulu telah dibahas berbagai upaya menggunakan gelombang cahaya pada struktur berukuran nanometer untuk meningkatkan kenyamanan kehidupan manusia melalui devais-devais yang kecil (miniatur), multi-fungsi, tidak menghilangkan/menyerap energi dan hemat energi serta lebih cepat. Guna lebih meningkatkan kenyamanan, kita terus mencari perbaikan dari devais-devais tersebut.

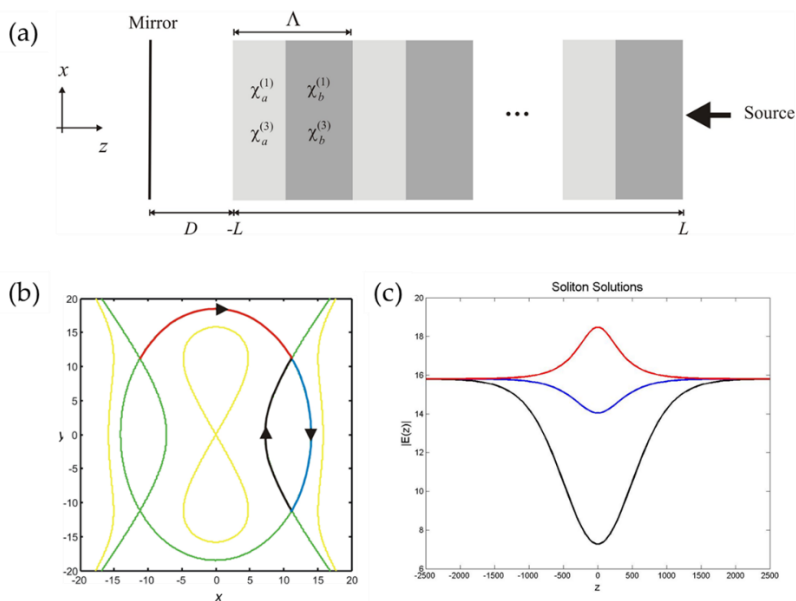
Dua arah pengembangan yang kami lakukan untuk meningkatkan fungsionalitas dari devais fotonik akan dipaparkan pada bab ini. Pertama, adalah membuat devais menjadi devais aktif dengan pengontrolan menggunakan cahaya itu sendiri. Untuk hal ini kita perlu mempergunakan bahan yang memiliki respons nonlinier terhadap gelombang cahaya yang datang padanya. Beberapa devais telah kami teliti dalam konteks optika nonlinier ini, yaitu saklar optik, pembatas optik (*optical limiter*), interaksi magneto-optik. Arah pengembangan peningkatan fungsionalitas devais fotonik kedua yang kami lakukan adalah membuat devais terintegrasi. Dua devais akan dibahas, yaitu devais multiplexer penambah dan pengambil data pada sebuah saluran transmisi data, serta devais pembangkit foton untuk aplikasi kuantum menggunakan fenomena penggabungan 4 gelombang pada sistem terintegrasi.

4.1 Saklar Optik

Suatu saklar adalah devais yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, mulai dari fungsi penanda sampai devais penyimpanan (*memory*). Sebuah saklar optik adalah saklar yang bekerja sepenuhnya menggunakan cahaya itu sendiri. Dua keadaan harus dimiliki oleh sistem saklar ini, yaitu untuk menyatakan keadaan *off* dan *on*. Dua contoh saklar optik akan dibahas berikut ini, yang pertama adalah keadaan *off* dan *on* ini diberikan oleh soliton spatial, dan yang kedua, keadaan *off* dan *on* ini terkait populasi dari model *Quantum Dot* dengan 2 tingkat energi.

4.1.1 Sistem Kisi Periodik 1D Nonlinier dan Soliton Spatial

Kami meninjau suatu sistem kisi periodik 1D yang terbuat dari bahan optik nonlinier orde 3, yang dinamai bahan optik nonlinier Kerr. Salah satu karakteristik dari bahan optik nonlinier orde 3 adalah bahwa indeks bias dari bahan dapat berubah terhadap intensitas cahaya yang diiluminasikan kepada bahan tersebut (Boyd, 2003). Sistem kisi periodik 1D yang ditinjau ini diiluminasi oleh suatu sumber monokromatik laser dari satu sisi, dan di depan sisi lain dari sistem kisi periodik ini dipasang cermin yang dapat digerakkan (Alatas, 2005). Cermin akan memantulkan kembali gelombang cahaya ke dalam sistem kisi periodik. Secara skematik, sistem kisi periodik ini ditampilkan pada Gambar 4.1 (a).



Gambar 4.1 (a) Sistem Kisi Periodik 1D nonlinier dengan sumber cahaya disalah satu ujung kisi dan cermin diujung lainnya. (b) Diagram fasa solusi yang mungkin dari formalisme sistem Hamiltonian. (c) Dari diagram fasa dapat diidentifikasi 3 jenis solusi soliton: *dark soliton*, *grey soliton* dan *bright soliton*.

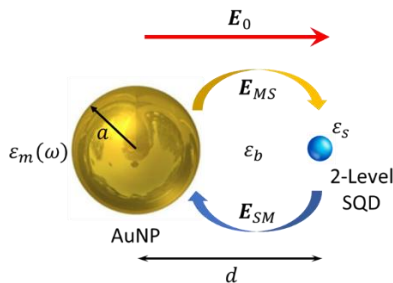
Perumusan dinamika dari sistem ini dilakukan dengan meninjaunya sebagai sistem Hamiltonian, diagram fasa solusi sistem Hamiltonian ini ditampilkan pada Gambar 4.1 (b). Dari diagram fasa ini dapat diidentifikasi trajektori *heteroclinic* yang merupakan solusi soliton spatial yang dimiliki oleh sistem. Secara fisis, soliton spatial ini terbentuk karena interferensi cahaya laser yang datang kepada kisi dengan yang dipantulkan dari cermin.

Bergantung dari nilai parameter fisis kedua gelombang cahaya laser yang saling berinterferensi (intensitas atau fasa propagasi akibat pemantulan), terdapat 3 macam solusi soliton spatial: *dark soliton*, *grey soliton* dan *bright soliton*, Gambar 4.1 (c).

Mengubah parameter kontrol, yaitu intensitas cahaya atau penambahan fasa akibat pemantulan pada cermin, sebuah solusi soliton jenis tertentu dapat bertransformasi menjadi solusi soliton jenis lainnya. Karena transformasi antar jenis soliton ini, maka sistem ini dapat dipakai sebagai saklar optik yang diatur oleh besaran optik itu sendiri: intensitas atau fasa. Salah satu aplikasi yang dirancang untuk sistem ini adalah sebagai pengindera (*sensor*) posisi menggunakan perubahan posisi cermin.

4.1.2 Sistem Hibrid Nanopartikel Logam dan *Quantum Dot*

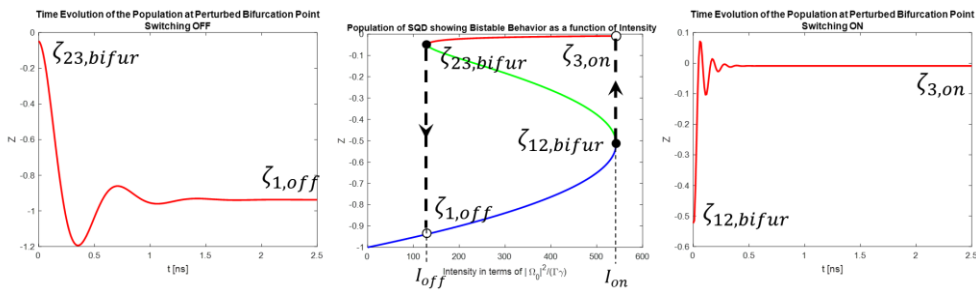
Salah satu penggunaan saklar optik adalah sebagai media untuk penyimpanan (*memory*). Oleh karenanya, untuk kebutuhan ini diperlukan sistem yang sangat kecil agar didapatkan miniturisasi devais penyimpanan. Untuk aplikasi ini, kami meninjau sistem hibrid nanopartikel logam dan *Quantum Dot* (QD) (Nugroho, 2013). Kedua bagian dari sistem ini saling berinteraksi satu sama lain. Nanopartikel logam bukan saja menerima gangguan dari medan listrik luar (E_0) melainkan juga dari medan radiasi dari transisi elektron pada sistem 2 tingkat dari QD (E_{SM}). Di pihak lain, selain dari medan luar, QD juga mendapatkan umpan balik dari medan radiasi nanopartikel logam (E_{MS}). Secara skematik, sistem hibrid ini ditampilkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Sistem hibrid nanopartikel logam dan *Quantum Dot* dengan 2 tingkat keadaan. Kedua konstituen saling memengaruhi satu sama lain sehingga diperoleh proses umpan balik non-linier pada populasi keadaan dari *Quantum Dot*.

Interaksi antara kedua medan ini dimodelkan sebagai interaksi dipol-dipol, yaitu radiasi dipol dari nanopartikel logam menjadi medan yang

berinteraksi dengan sistem QD melalui operator transisi dipol. Umpan balik dari medan nanopartikel logam kepada sistem QD membuat persamaan evolusi dari keadaan QD merupakan persamaan yang nonlinier (Nugroho, 2012). Untuk parameter sistem tertentu, persamaan evolusi dari keadaan QD ini menghasilkan solusi yang bistabil. Solusi bistabil ini dikarakterisasi oleh grafik bistabil seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.3. Masing-masing solusi stabil pada daerah bistabil ini dapat dijangkau melalui dua jalan yang berbeda. Dengan menaikkan intensitas medan luar yang mengiluminasi sistem hibrid ini sampai melewati suatu batas kritis (I_{on}), populasi QD dari keadaan stabil pertama akan tiba-tiba meloncat menjadi populasi QD dari keadaan stabil kedua. Sebaliknya, dengan menurun intensitas medan luar yang mengiluminasi sistem hibrid ini sampai lebih kecil dari suatu batas kritis (I_{off}), populasi QD meloncat dari keadaan stabil ke dua turun ke keadaan stabil pertama. Perubahan keadaan stabil dari QD yang dapat diatur oleh medan luar inilah yang menjadikan sistem hibrid nanopartikel logam dan QD ini sebagai saklar optik.



Gambar 4.3 Sistem hibrid nanopartikel logam dan *Quantum Dot* dengan 2 tingkat keadaan memiliki respons yang bistabil. Perpindahan keadaan QD dari satu keadaan stabil ke keadaan stabil lainnya dikendalikan oleh intensitas medan luar yang mengiluminasi sistem. Waktu pensaklaran (*switching time*) dapat ditentukan dari perturbasi keadaan stasioner tersebut dan didapatkan waktu pensaklaran yang sangat pendek dalam orde nanosekon.

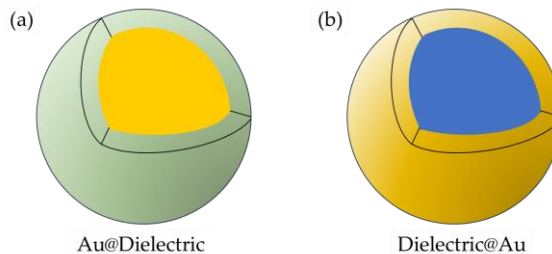
Sebagai sebuah saklar, salah satu karakteristik penting adalah waktu pensaklaran (*switching time*). Melalui analisa perturbatif titik kritis dari solusi keadaan bistabil di atas (Iskandar, 2021), dapat diperkirakan waktu perpindahan dari sistem hibrid ini. Didapatkan waktu pensaklaran *on* dan *off* keduanya cukup pendek, yaitu dalam orde nanosekon seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

4.2 Optical Limiter

Setiap materi pasti menyerap energi, khususnya energi gelombang elektromagnetik yang menyinari objek tersebut. Iluminasi terus menerus, akan menyebabkan penyerapan energi ini terus terjadi sampai suatu saat energi yang diserap dapat merusak objek yang bersangkutan. Oleh karenanya dalam kebutuhan praktis, diperlukan devais yang bekerja sebagai pembatas penyerapan energi ini. Devais ini disebut sebagai *optical limiter*.

Efek pembatas absorpsi ini dapat dicapai dalam bahan yang memiliki absorpsi nonlinier yang bergantung pada intensitas cahaya yang mengiluminasinya (Boyd, 2003). Artinya, laju absorpsi bergantung pada intensitas cahaya. Jika laju perubahan absorpsi adalah negatif terhadap bertambahnya intensitas menyatakan bahwa sistem ini memiliki sifat *Saturable Absorption* (SA) sedangkan bila laju perubahan absorpsi adalah positif dengan bertambahnya intensitas, sistem dikatakan memiliki sifat *Reverse Saturable Absorption* (RSA). Tentunya, sebagai pembatas absorpsi dibutuhkan sebuah sistem dengan sifat *Saturable Absorption* (SA).

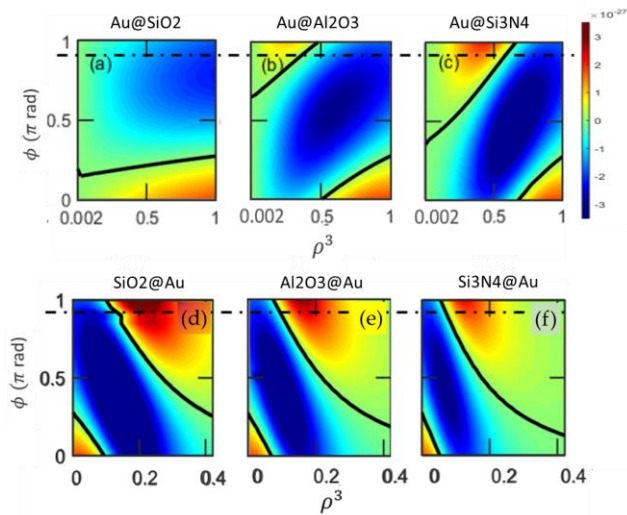
Kami meninjau nanopartikel komposit dari Emas dan bahan dielektrik dengan dua macam konfigurasi yang berbeda, pertama adalah nanopartikel Emas dibungkus oleh bahan dielektrik dan kedua adalah nanopartikel bahan dielektrik dibungkus oleh lapisan emas. Skematik dari kedua konfigurasi ini ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Konfigurasi nanopartikel komposit (a) nanopartikel Emas dibungkus oleh bahan dielektrik dan (b) kebalikannya.

Melalui perhitungan kuasi statik ditunjukkan bahwa laju perubahan absorpsi terhadap intensitas cahaya yang mengiluminasi ditentukan oleh susceptibilitas efektif dari komposit nanopartikel yang ditinjau. Khususnya menggunakan data susceptibilitas nonlinier dari Emas dan bahan dielektrik, dapat ditentukan susceptibilitas efektif dari sistem komposit ini yang

bergantung pada rasio volum dari sistem komposit yang bersangkutan. Sehingga, dengan mengubah rasio volum sistem, kita dapat mengubah sifat komposit dari SA menjadi RSA dan sebaliknya. Pada Gambar 4.5 ditampilkan peta nilai koefisien laju perubahan absorpsi terhadap variasi rasio volum. Daerah berwarna biru berarti koefisien laju perubahan absorpsi yang bernilai negatif dan warna merah adalah positif (Fitriana, 2019).



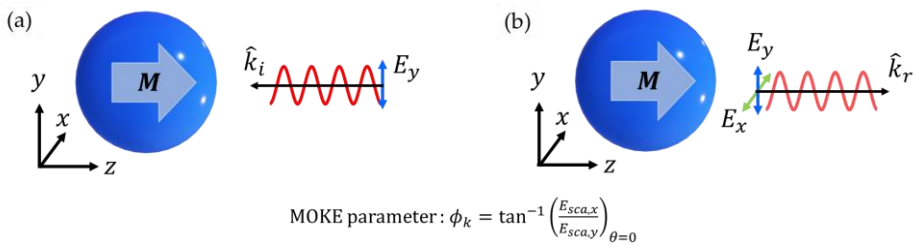
Gambar 4.5 Nilai laju perubahan absorpsi terhadap intensitas, biru berarti negatif, sedangkan merah berarti positif. Ketika nilai laju perubahan absorpsi ini negatif, berarti nanopartikel komposit memiliki sifat *Saturable Absorption* (SA) dan ketika nilai laju ini positif, nanopartikel komposit memiliki sifat *Reverse Saturable Absorption* (RSA). Nanopartikel komposit yang diteliti adalah (a) Au@SiO₂, (b) Au@Al₂O₃, (c) Au@Si₃N₄, (d) SiO₂@Au, (e) Al₂O₃@Au dan (f) Si₃N₄@Au [direproduksi dari (Fitriana, 2019), atas izin OPTICA].

Dari hasil ini terlihat bahwa kita dapat merancang suatu sistem pembatas optik (*optical limiter*) menggunakan nanopartikel komposit, melalui rasio volum bagian inti terhadap keseluruhan nanopartikel komposit.

4.3 Meningkatkan *Magneto-Optic Kerr Effect* dengan Merusak Simetri Objek

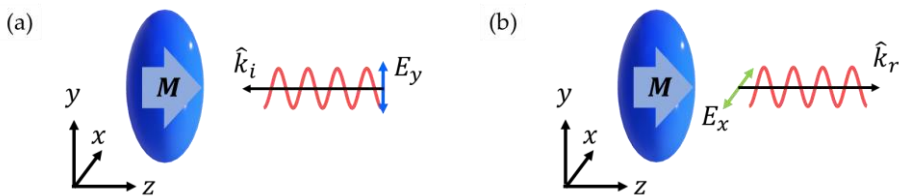
Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) adalah suatu respons nonlinier dari materi yang memiliki Magnetisasi M yang permanen di dalamnya (Weinberger, 2008), sehingga dapat membangkitkan gelombang hambur polarisasi baru dari iluminasi gelombang terpolarisasi linier. Berbagai aplikasi dapat dipikirkan untuk menggunakan efek Kerr Magneto-Optik ini, misalnya sebagai pengindera (*sensor*) (Donolato, 2010) dan media penyimpanan data

(McDaniel, 1995; Zvezdin, 1997). Fenomena ini terjadi karena permittivitas objek adalah suatu besaran tensor yang komponennya bergantung pada medan magnetisasi dari objek penghambur. Fenomena ini dikuantifikasi oleh parameter (sudut) MOKE yang dinyatakan oleh rasio amplitudo medan yang polarisasinya terbangkitkan terhadap amplitudo medan hambur arah polarisasi linier medan datang. Secara skematik, konfigurasi gelombang datang dan gelombang hambur pada sebuah objek yang memiliki sifat MOKE ditampilkan pada Gambar 4.6.



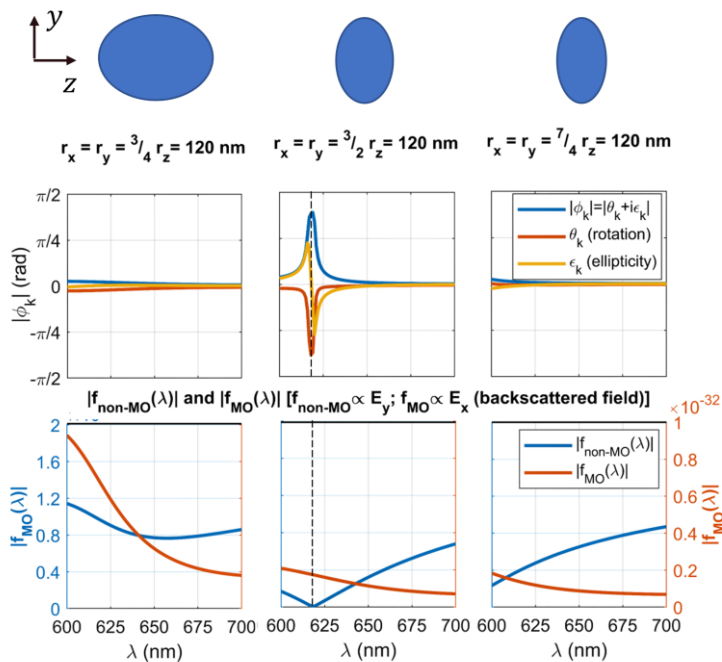
Gambar 4.6 (a) Sebuah partikel dengan konfigurasi Magnetisasi polar diiluminasi oleh gelombang elektromagnetik polarisasi linier arah sumbu-y. (b) Akibat dari fenomena nonlinier MOKE, pada gelombang hambur tidak saja terpolarisasi semula yang dihamburkan, melainkan polarisasi yang tegak lurus terhadap arah polarisasi gelombang datang juga terbangkitkan.

Berbagai cara diupayakan untuk meningkatkan nilai parameter MOKE ini. Dalam penelitian kami (Iskandar, 2020; Nurrahman, 2024), simetri dari objek penghambur sengaja dirusak untuk mendapatkan interferensi destruktif dari komponen-komponen multipol elektromagnetik yang dieksitasi dalam penghambur. Sehingga amplitudo komponen medan yang sejajar polarisasi medan datang mengalami supresi. Secara skematik, pengrusakan simetri dari penghambur ini adalah seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.7.



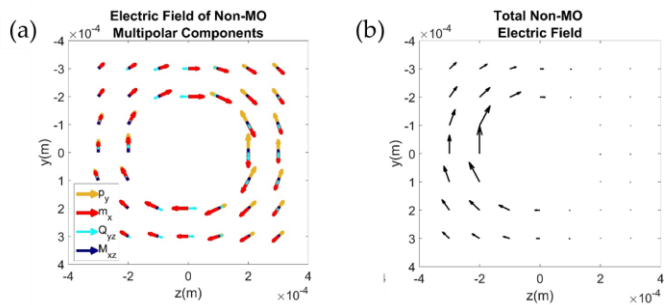
Gambar 4.7 (a) Penghambur semula yang memiliki simetri bola dirusak menjadi *oblate spheroid*. (b) Akibat simetri yang rusak ini, komponen amplitudo gelombang hambur yang sejajar polarisasi gelombang datang mengalami supresi sehingga nilai parameter MOKE meningkat.

Didapatkan bahwa bentuk penghambur *oblate spheroid* memberikan nilai MOKE sebesar 1.288 rad, nilai ini jauh lebih besar dari pada yang pernah dilaporkan sebelumnya, yaitu dalam orde miliradian. Hal ini terjadi bukan saja karena peningkatan amplitudo medan yang tegak lurus terhadap arah polarisasi medan datang (f_{MO}), melainkan karena supresi amplitudo komponen medan yang sejajar arah polarisasi medan datang (f_{non-MO}). Hasil ini ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengrusakan simetri dari bola penghambur menjadi *prolate spheroid* sampai *oblate spheroid*. Hasil terbaik didapatkan untuk bentuk *oblate spheroid*, di mana nilai parameter MOKE ϕ_k dapat mencapai orde 1.288 radian yang terjadi karena supresi amplitudo komponen medan yang sejajar arah polarisasi medan datang (f_{non-MO}).

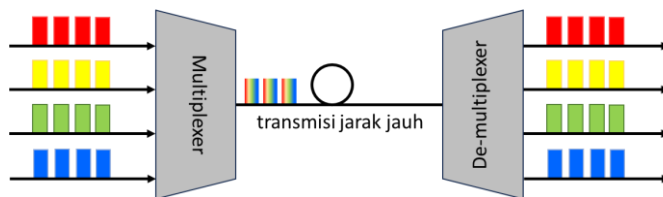
Telaah lebih lanjut menunjukkan bahwa supresi dari amplitudo komponen medan yang sejajar arah polarisasi medan datang ini terjadi karena interferensi destruktif ke arah gelombang datang dari semua komponen radiasi multipol elektromagnetik yang tereksitasi dalam penghambur. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 (a) Plot komponen-komponen medan dari multipol elektromagnetik yang tereksitasi saat terjadi resonansi MOKE terbesar. (b) Hasil interferensi destruktif pada arah polarisasi gelombang datang, dari semua komponen-komponen multipol elektromagnetik pantul pada arah gelombang datang (*forward*).

4.4 Optical Add-Drop Multiplexer

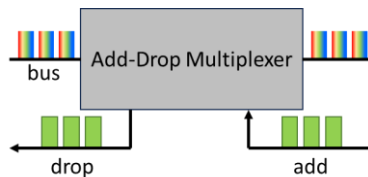
Dalam teknologi komunikasi, informasi ditransmisikan menggunakan jalur/kabel secara efisien dalam arti tidak boros energi dan jumlah informasi yang dibawa sekaligus sangat besar. Ketika komunikasi masih menggunakan kabel tembaga, akibat dari hambatan tembaga tersebut, informasi yang dikirim dalam bentuk digital perlu mendapatkan perbaikan dan penguatan bentuk pulsa untuk setiap beberapa ratus meter.



Gambar 4.10 Sistem komunikasi optik dengan teknologi *Wave Division Multiplexing* (WDM) di mana satu kabel fiber dapat membawa banyak sekali data yang dikirim menggunakan beberapa panjang gelombang sekaligus.

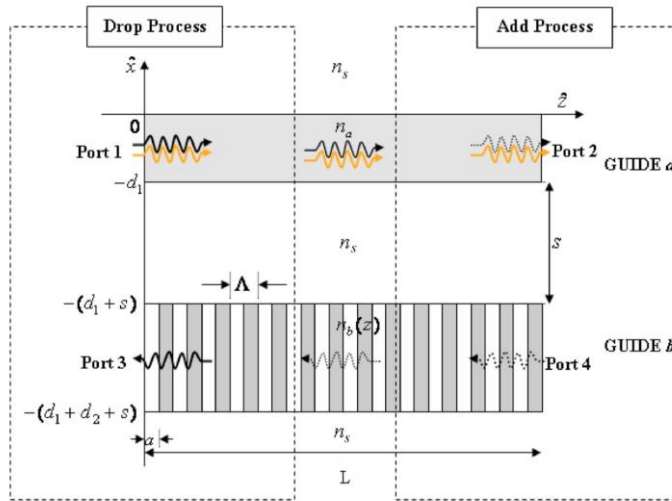
Namun menggunakan teknologi komunikasi optik, melalui teknik data digital dan pengiriman data menggunakan beberapa panjang gelombang (dikenal sebagai *wave division multiplexing*, WDM), pada saat yang sama sebuah kabel fiber optik dapat membawa informasi 90.000 kanal siaran TV dan 3.000.000 pembicaraan telpon dan tidak perlu penguatan dan perbaikan pulsa sampai dengan beberapa ratus km (Mukherjee, 2006; Woodward, 2010). Secara skematik, teknologi komunikasi optik WDM ini ditampilkan pada Gambar 4.10.

Untuk dapat memanipulasi data yang dibawa oleh sebuah kabel fiber optik diperlukan devais khusus yang dapat mengambil satu rentetan data dari banyak sekali data yang dibawa oleh jalur data utama (*bus*) pada sebuah kabel fiber optik. Di samping mengambil satu rentetan data, devais yang dirancang ini juga harus dapat juga memasukkan rentetan data baru ke dalam jalur data utama (*bus*) (Mukherjee, 2006). Devais ini dinamai *Add-Drop Multiplexer* (ADM) yang secara skematik disajikan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Devais *Add-Drop Multiplexer* (ADM) diperlukan untuk mengambil (*drop*) dan menambahkan (*add*) suatu rentetan data tertentu dari jalur utama data (*bus*).

Devais dengan fungsi ADM ini harus dirancang sebagai suatu **devais terintegrasi** yang tersusun dari beberapa pandu gelombang dan penapis (*filter*). Beberapa rancangan devais ADM umumnya menggunakan 2 buah kisi Bragg yang berfungsi sebagai reflektor (penapis). Namun penempatan kedua kisi Bragg sebagai reflektor ini sangatlah membutuhkan presisi tinggi. Untuk mengatasi permasalahan penempatan yang presisi ini, kami mengusulkan desain sebuah devais ADM yang hanya memerlukan sebuah kisi Bragg sebagai reflektor (Muldarisnur, 2008). Secara skematik, konfigurasi pandu gelombang *bus* dan sebuah kisi Bragg yang digandengkan kepadanya dan membentuk **rangkaian terintegrasi** adalah seperti pada Gambar 4.12. Dari hasil desain dan simulasi yang dilakukan, didapatkan bahwa devais ADM rancangan kami ini dapat berfungsi baik dengan 99% *drop reflectance*, 1% *input insertion loss* dan *cross-talk* yang dapat diabaikan.



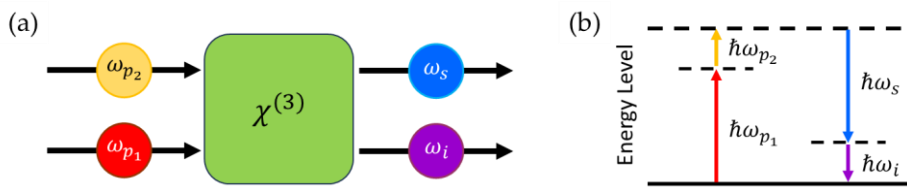
Gambar 4.12 Devais *Add-Drop Multiplexer* (ADM) dengan mempergunakan hanya sebuah kisi Bragg sebagai reflektor [direproduksi dari (Muldarisnur, 2008), atas izin *AIP Publishing*].

4.5 Sumber Foton untuk Aplikasi Kuantum

Dalam beberapa tahun belakangan, para ahli telah mulai merealisasikan algoritma baru dalam pemrosesan informasi, yaitu algoritma kuantum dalam aplikasi komputer kuantum. Komputer kuantum adalah jenis komputer yang menggunakan prinsip-prinsip mekanika kuantum untuk melakukan komputasi. Suatu komputer klasik mengandalkan bit klasik untuk menyimpan dan memanipulasi informasi dalam bentuk angka nol atau satu. Sedangkan komputer kuantum menggunakan *qubit* (*quantum bit*) sebagai unit dasar informasi. *Qubit* memiliki sifat kuantum yang unik, yang memungkinkannya berada dalam keadaan campuran nol dan satu secara bersamaan, yang disebut superposisi (Sutor, 2019). Lebih jauh, *qubit-qubit* ini dapat terkait satu sama lain melalui fenomena yang disebut *entanglement* (terbelit). *Entanglement* memungkinkan perubahan keadaan satu *qubit* secara instan memengaruhi keadaan *qubit* lainnya yang terkait dengannya, hal ini dapat terjadi meskipun mereka terpisah oleh jarak yang jauh. Foton adalah kandidat untuk merealisasikan *qubit* dengan sifat *entanglement*-nya ini, dan oleh karenanya, foton adalah kandidat pembawa informasi pada komputer kuantum.

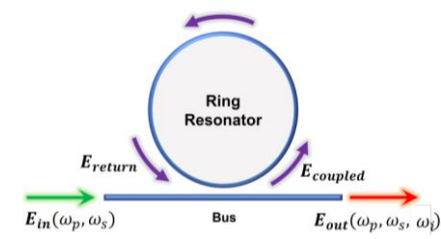
Oleh karenanya, devais yang diperlukan untuk aplikasi kuantum ini adalah sumber foton *entangled*. Salah satu fenomena yang dapat

menghasilkan pasangan foton *entangled* adalah fenomena penggabungan empat gelombang (*four wave mixing*, FWM) (Boyd, 2003), yang secara skematik ditunjukkan dalam Gambar 4.13.



Gambar 4.13 (a) Proses penggabungan empat gelombang (*four wave mixing*, FWM) adalah proses nonlinier orde 3, di mana dua cahaya pemompa masuk ke dalam sistem, dan dihasilkan gelombang *signal* dan *idler*. (b) Diagram energi dari proses FWM dengan kekekalan energinya.

Proses FWM adalah suatu proses nonlinier orde 3 yang membutuhkan energi besar untuk membangkitkannya. Oleh karenanya perlu dirancang sebuah devais untuk membangun energi yang besar ini. Salah satunya adalah melalui penggandengan (kopling) antara sebuah pandu gelombang dengan sebuah resonator cincin dalam sebuah **rangkaian terintegrasi**. Gelombang sinyal dan pompa dimasukkan ke dalam pandu gelombang *bus*, kemudian kedua gelombang akan terganggu masuk ke dalam resonator cincin. Gelombang berjalan di dalam resonator cincin dan bersuperposisi sehingga terjadi interferensi konstruktif. Karena interferensi yang konstruktif ini maka energi meningkat sehingga memungkinkan proses nonlinier FWM terjadi. Secara skematik konfigurasi kopling pandu gelombang bus dan resonator cincin ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Desain penggandengan pandu gelombang *bus* dan resonator cincin. Gelombang pompa dan sinyal dari pandu gelombang bus terganggu dengan resonator .

Hal pertama perlu dilakukan untuk simulasi proses FWM ini adalah perhitungan parameter nonlinieritas dari sistem. Kemudian, dari parameter

ini dapat dihitung parameter utama dari desain yang bersangkutan, yaitu efisiensi konversi FWM. Dari hasil simulasi yang dilakukan, didapatkan nilai efisiensi konversi yang cukup tinggi -17.3602 dB untuk energi pompa yang kecil 1 mW (Permana, 2024). Beberapa keuntungan dari pemilihan bahan dan hasil yang cukup baik ini, membuat desain ini berpotensi untuk dipergunakan dalam aplikasi teknologi. Penelitian ini dilakukan dalam kerangka kerja sama yang kami rintis bersama kelompok David Marpaung dari Universitas Twente, Belanda. Dalam waktu dekat, hasil simulasi ini akan divalidasi melalui eksperimen.

5. KESIMPULAN DAN PROSPEK MASA DEPAN

Perkembangan ilmu nanofotonika yang telah kami dijalani selama kurang lebih dua dekade terakhir, menandai pencapaian signifikan dalam pemahaman fenomena cahaya pada skala nanometer. Buku ini melaporkan sebagian dari hasil-hasil penelitian kami yang mencerminkan perjalanan panjang penelitian kami dalam menggali kearifan (*wisdom*) ilmu pengetahuan nanofotonika, yang membawa dampak positif terhadap berbagai aspek kehidupan manusia.

Fokus utama kami sebagai seorang fisikawan adalah pemahaman mendasar Fisika dari fenomena cahaya pada skala nano dan kemungkinan penggunaannya dalam aplikasi dan teknologi yang berbasis cahaya. Tujuan utama penggunaan fenomena cahaya dalam aplikasi devais teknologi adalah minituarisasi, efisiensi, dan peningkatan fungsionalitas perangkat nanofotonika. Dari kedua arah penelitian kami, yaitu pemahaman fenomena Fisika dari cahaya dan pemanfaatannya, berbagai hasil penelitian mutakhir telah kami buatkan sampai saat ini. Di antaranya adalah penemuan mekasisme fisis baru, pertama adalah kaitan penguatan medan dalam rongga dan gelombang *evanescent*, dan kedua adalah pencampuran keadaan fotonik (*photonic state mixing*) yang lebih luas dari hibridisasi plasmon. Dalam bidang inovasi struktur baru, kami mengusulkan pengrusakan simetri untuk meningkatkan performansi devais dan eksplorasi aplikasi baru berupa detektor arah datangnya gelombang.

Dari hasil-hasil yang kami peroleh ini, pelajaran utama yang dapat kami sarikan adalah bahwa penting untuk memahami bangun dasar dalam perancangan devais nanofotonika. Hal ini menjadi landasan bagi kemajuan dalam merancang perangkat yang lebih kompleks. Fenomena sederhana seperti hamburan membuka pintu bagi pemahaman dan aplikasi baru, khususnya dalam meningkatkan fungsionalitas perangkat. Dalam konteks ini, penerapan fenomena nonlinier, pengenalan cacat dan pengrusakan simetri, serta penyusunan struktur terintegrasi menjadi strategi untuk meningkatkan fungsionalitas.

Prospek ke depan dari bidang nanofotonika ini adalah peran yang lebih besar untuk kemandirian bangsa dan negara dalam berbagai sektor, termasuk teknologi informasi, material maju, biologi, medis, dan pertahanan. Dalam

kaitan ini, fokus penelitian kami ke depan akan berkonsentrasi pada tiga bidang, yaitu *Plasmonics*, Sistem Hibrid Metal-Dielektrik, dan *Metamaterials/Metasurface*.

Dalam bidang *Plasmonics*, aplikasi dalam biosensor akan menjadi area unggulan. Tantangan berikutnya adalah pengembangan sensor berbasis sistem 2D dengan sistem hibrid metal-dielektrik. Analisis interaksi antar tetangga dan representasi efektif dari sistem secara keseluruhan menjadi fokus penelitian mendatang.

Pada bidang *Metamaterials/Metasurface*, rekayasa hamburan dan rekayasa balik merupakan dua tantangan utama. Rekayasa fasa hamburan melalui analisis hamburan Mie dan interaksi antarmultipol menjadi fokus untuk mencapai hasil yang diinginkan. Desain balik (*reverse design*) menggunakan metode seperti algoritma genetik (*genetic algorithm*), kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan pembelajaran mesin (*machine learning*) diharapkan dapat mengatasi kompleksitas dalam penciptaan devais *metasurface*.

Karena pertimbangan aplikasi modern yang semakin kompleks, multi-fungsi dan miniatur, maka integrasi sub-sistem menjadi krusial. Sehingga, bidang nanofotonik terintegrasi juga akan menjadi fokus pengembangan keilmuan dan rancangan aplikasi yang kami lakukan.

Kolaborasi dalam dunia riset saat ini diakui sebagai kunci kemajuan. Kerja sama yang telah terjalin dan akan terus dilakukan bersama kolaborator yang memiliki minat serupa, menunjukkan komitmen kami untuk terus berinovasi dan berkontribusi pada perkembangan ilmu nanofotonika. Khususnya, kerja sama dengan kelompok keilmuan lainnya dan kelompok internasional akan menjadi strategi utama bagi perkembangan keilmuan dan penelitian kami.

Dengan demikian, buku ini bukan hanya menjadi laporan temuan, tetapi juga menyiratkan semangat untuk terus mengeksplorasi, berkolaborasi, dan mendorong batas-batas pengetahuan nanofotonika.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Allah Yang Maha Pengasih dan Penyayang atas karunia dan rahmat yang diberikan-Nya kepada kami untuk mengemban amanah Guru Besar Institut Teknologi Bandung di Bidang Nanofotonika (*Nanophotonics*).

Ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kami sampaikan kepada Pimpinan, Forum Guru Besar, Senat Akademik dan Civitas Academica Institut Teknologi Bandung atas kesempatan, kepercayaan, dan dukungan yang diberikan untuk melaksanakan tugas Tri Dharma sejak tahun 1990.

Kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Dekanat, Senat, kolega Dosen dan Tenaga Kependidikan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB, yang memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengajuan jabatan Guru Besar ini dari awal hingga akhir. Khususnya kami sangat menghargai kerja sama dan kekeluargaan yang selama ini telah terjalin.

Terima kasih dan penghargaan yang mendalam kami sampaikan juga kepada Ketua-ketua Prodi, rekan sejawat dosen, para tenaga kependidikan, para asisten dan mahasiswa di lingkungan Fisika, ITB, atas dukungan dan suasana kebersamaan yang menyenangkan selama ini.

Ucapan terima kasih dan apresiasi yang luar biasa kami sampaikan kepada rekan-rekan dosen dan mahasiswa Kelompok Keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik (KK FMF), ITB, untuk dukungan keilmuan, kepercayaan, kerja sama, kebersamaan, kekeluargaan serta persahabatan yang terjalin selama ini.

Kami juga menyampaikan terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada para alumni dan mahasiswa kelompok *Nanophotonics* KK FMF bukan saja untuk kerja sama dan dedikasi yang tinggi, namun juga yang berlanjut kepada persahabatan dan kekeluargaan yang terjalin sampai saat ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kami sampaikan kepada para kolaborator luar negeri dan dalam negeri atas kerja sama yang membuahkan hasil yang mutahir, serta kolega dalam bidang optika dan fotonika, khususnya yang tergabung dalam Himpunan Optika Indonesia, yang telah memberikan dukungan moral, kepercayaan, kerja sama dan persahabatan selama ini, khususnya untuk usaha-usaha yang telah dilakukan

bersama-sama dalam memperkenalkan sains dan teknologi optika ke masyarakat luas.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang besar kami sampaikan kepada Prof. A. Agung Nugroho atas bantuannya menelaah buku orasi ini.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi kami sampaikan kepada Prof. A. Agung Nugroho (KK Fisika Magnetik dan Fotonik, FMIPA ITB), Prof. Doddy Sutarno (KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, FMIPA ITB), Prof. Hendra Gunawan (KK Analisis dan Geometri, FMIPA ITB), Prof. Taufiq Hidayat (KK Astronomi, FMIPA ITB), Prof. Satria Bijaksana (KK Geofisika Global, FTSM ITB), Prof. Rustam Siregar (Fisika, Universitas Padjadjaran), Prof. Darminto (Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember), Prof. B.M. Azizur Rahman (School of Mathematics, Computer Science and Engineering, City University of London, UK) dan Prof. Xianfeng Chen (School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, China), untuk dukungan rekomendasi bagi pengusulan Guru Besar kami.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi kami sampaikan kepada para guru kami dari jenjang dasar sampai dengan perguruan tinggi untuk semua ilmu yang telah diberikan. Secara khusus kami mengucapkan terima kasih dan hormat yang setinggi-tingginya kepada para guru dan mentor kami, (mendiang) Prof. Pantur Silaban, Prof. Edward Corrigan, FRS dan yang teristimewa (mendiang) Prof. May-On Tjia, untuk pengajaran, bimbingan dan persahabatan, kekeluargaan dan yang terutama panutan yang telah diberikan kepada kami.

Kepada para kerabat dan keluarga serta sahabat yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu, terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan untuk dukungan dan persahabatan serta kekeluargaan yang terjalin selama ini.

Ucapan syukur dan terima kasih yang tak terkira kami sampaikan kepada orang tua kami, (mendiang) Letkol (purn) drg. Paulus Iskandar dan (mendiang) Ibu Mariam Winarsih untuk kasih dan cinta serta pendidikan yang diberikan kepada kami sehingga kami dapat sampai pada posisi ini. Terima kasih pula untuk dukungan dan cinta dari keluarga besar Iskandar dan keluarga besar Wilianto Hadi Purnomo tidak mungkin terlupakan.

Secara khusus ucapan terima kasih yang tak terkira, kami sampaikan kepada istri, Ir. Shierly Megawati Purnomo, serta anak dan menantu, Maria Alexandra Iskandar, S.Farm. dan Leonardo Mugi Santoso, M.Phil. serta Benedict Rafael Iskandar, S.Si. untuk dukungan, pengertian, pengorbanan dan khususnya cinta yang tulus.

Semoga Tuhan yang Maha Kuasa membalas semua kebaikan yang telah diberikan kepada kami.

DAFTAR PUSTAKA

- Akahane, Y., Asano, T., Song, B.S., dan Noda, S. (2003). *High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal*. *Nature*. **425**: 944.
- Alatas, H., Iskandar, A. A., Tjia, M.O., dan Valkering, T.P. (2005). *Optical Sensing and Switching Devices Based on a Finite Deep Nonlinear Bragg Grating with a Mirror*. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*. **14**(2): 259-272.
- Asatryan, A.A. et al. (2001a). *Two-dimensional local density of states in two-dimensional photonic crystals*. *Optics Express*. **8**(3):191-196.
- Asatryan, A.A. et al. (2001b). *Two-dimensional Green's function and local density of states in photonic crystals consisting of a finite number of cylinders of infinite length*. *Physical Review*. **E63**: 046612.
- Asatryan, A.A. et al. (2003). *Two-dimensional Green tensor and local density of states in finite-sized two-dimensional photonic crystals*. *Waves in Random Media*. **13**(1): 9-25.
- Al-Amri, M.D., Zubairy, M.S., dan El-Gomati, M.M. (eds). (2016). *Optics in Our Time*. Springer.
- Bohr, N. (1913). *I. On the constitution of atoms and molecules*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. **26**(151): 1-25.
- Bohren, C.F., dan Huffman, D.R. (1998). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons.
- Born, M., Wolf E. (1997). *Principles of Optics*. Cambridge University Press.
- Boyd, R.W. (2003). *Nonlinear Optics*. Academic Press.
- Colladon, Jean-Daniel (1842). *On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream*. *Comptes Rendus*.
- Donolato, M., et al. (2010). *On-chip manipulation of protein-coated magnetic beads via domain-wall conduits*. *Advanced Materials*. **22**(24): 2706-2710.

- European Commission. *Key Enabling Technologies Policy*, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/key-enabling-technologies_en (diakses 16 Feb. 2024).
- European Commission. *Photonics*, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/photonics> (diakses 16 Feb. 2024).
- Fang, N., Lee, H., Sun, C., dan Zhang, X. (2005) *Sub-diffractionlimited optical imaging with a silver superlens*. *Science*. **308**: 534–537.
- Fano, U. (1961). *Effects of Configuration Interaction on Intensities and Phase Shifts*. *Physical Review*. **124**(6): 1866–1878.
- Fink, Y., et al. (1998), *A dielectric Omnidirectional Reflector*. *Science*. **282**: 1679.
- Fitriana, A., de Sterke, C.M., dan Iskandar, A.A. (2019). *Nonlinear absorption in media with composite gold nanoparticles*. *Journal of the Optical Society of America*. **B36**(11): 2946-2953.
- Fussell, D.P., McPhedran, R.C., dan de Sterke, C.M. (2004). *Three-dimensional Green's tensor, local density of states, and spontaneous emission in finite two-dimensional photonic crystals composed of cylinders*. *Physical Review*. **E70**: 066608.
- Gallinet, B., Kern, A.M., dan Martin, O.J.F. (2010). *Accurate and versatile modeling of electromagnetic scattering on periodic nanostructures with a surface integral approach*. *Journal of the Optical Society of America*. **A27**(10): 2261-2271.
- Glauber, R.J., dan Lewenstein, M. (1991). *Quantum Optics of Dielectric Media*. *Physical Review*. **A43**: 467.
- Hecht, Jeff (1999). *City of Light, The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press.
- Hertz, H. (1893). *Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity Through Space*. Dover Publication.
- Hoad, T.F. (2002). *Concise Oxford Dictionary of English Etymology*. Oxford University Press.
- Ibn Al-Haytham. (circa 1015). *Book of Optics*.

- Iskandar, A.A., Yonan, W. Tjia, May-On, van de Voorde, I., dan van Groesen, E. (2007). *Effective Medium Formulation for Band Structure Design of a Finite One-Dimensional Optical Grating*. *Japanese Journal of Applied Physics*. **46**(1): 187-193.
- Iskandar, A.A., dan Nurrahman, M.R. (2020). *Enhancement of Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) by Backscattering Suppression*. *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2020)*.
- Iskandar, A.A (2021). *Bistability Switching Behaviour of Nonlinear Composite Nanoparticle System*. *13th International Symposium on Modern Optics and Its Applications*.
- Isro, S.D., Iskandar, A.A., dan Tjia, M.O. (2017). *Complementary high performance sensing of gases and liquids using silver nanotube*. *Journal of Optics*. **19**(11): 115003.
- Isro, S.D., Iskandar, A.A., Kivshar, Y. dan Shadrivov, I. (2018). *Engineering scattering patterns with asymmetric dielectric nanorods*. *Optics Express*. **26**(25): 32624-32630
- Isro, S.D., Iskandar, A.A., dan Tjia, M.O. (2019). *Core size and axial offset dependent extinction characteristics for silver nanotube and its application to directional sensing*. *Journal of Optical Society of America*. **B36**(6): 1637-1644.
- Isro, S.D., Iskandar, A.A., dan Tjia, M.O. (2019). *Core size and axial offset dependent extinction characteristics for silver nanotube and its application to directional sensing*. *Journal of Optical Society of America*. **B36**(6): 1637-1644.
- Isro, S.D., Soehanie, A., dan Iskandar, A.A. (2023). *Scattered-fields-induced tunable narrow resonance in low-index dielectric meta-lattices for transfective display*. *Dalam proses submit*.
- Joannopoulos, J.D., Johnson, S.G., Winn, J.N., dan Meade, R.D. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press.
- John, Sajeev (1987). *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*. *Physical Review Letters*. **58**(23): 2486-9.
- Karnadi, I., Iskandar, A.A., dan Tjia, M.O. (2010). *Analysis of Ag-Superlens Performances using Spatial Convolution Formulation*. *Journal of the Optical Society of America*. **A27**(2): 268-275.

- Kern, A.M., dan Martin, O.J.F. (2009). *Surface integral formulation for 3D simulations of plasmonic and high permittivity nanostructures*. *Journal of the Optical Society of Amerika*. **A26**(4): 732-740.
- Koenderink, A.F. (2010). *On the use of Purcell factors for plasmon antennas*. *Optics Letters*. **35**: 4208.
- Kuo, Yue. (2013). *Thin Film Transistor Technology—Past, Present, and Future*. *The Electrochemical Society Interface*. **22**(1): 55–61.
- Mackowski, D.W. (1991). *Analysis of radiative scattering for multiple sphere configurations*. *Proceeding of Royal Society London* **A433**: 599–614.
- Maier, S.A. (2007). *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer.
- Martin, O.J.F., dan Piller, N.B. (1998). *Electromagnetic Scattering in Polarizable Background*. *Physical Review*. **E58**: 3909.
- Maxwell, J.C. (1861). *On the Physical Lines of Forces*. *Philosophical Magazine*. **90**: 11–23.
- McDaniel, T.W., dan Victora, R. (1995). *Handbook of Magneto-Optical Data Recording: Materials, Subsystems, Techniques*. Elsevier Science.
- Meindl, J.D., Chen. Q., dan Davis, D.A. (2021). *Limits on silicon nanoelectronics for terascale integration*. *Science*. **293**(5537): 2044-9.
- Melville, D. O. S., dan Blaikie, R. J. (2005). *Super-resolution imaging through a planar silver lens*. *Optics Express*. **13**: 2127–2134.
- Miroshnichenko, A.E., Flach, S., dan Kivshar, Y. (2010). *Fano Resonances in Nanoscale Structures*. *Reviews of Modern Physics*. **82**: 2257.
- Moore, Gordon. (1975). *IEEE Technical Digest 1975*. Intel Corp.
- Mukherjee, B. (2006). *Optical WDM Networks*. Springer.
- Muldarisnur, Soehanie, A., Iskandar, A., dan Tjia, M. O. (2008). *Analysis of Asymmetric Bragg Coupler Based Optical Add-Drop Multiplexer Operating on certain Phase Matching Conditions*. *Journal of Applied Physics*. **103**: 123110.
- Natanael, M., Iskandar, A.A., dan Suryadharma, R.N.S. (2021). *Emergence of Fano response in trimer structure with asymmetric permittivity*. *Journal of the Optical Society of Amerika*. **B38**(2): 392-400.

- nano.gov. *Highlights from the Nanoelectronics for 2020 and Beyond (Nanoelectronics) NSI*. <https://www.nano.gov/node/1932> (diakses 17 Feb 2024).
- Newton, Isaac. (1704). *Opticks*.
- Noda, S. (2006). *Seeking the Ultimate Nanolaser*. *Science*. **314**: 260.
- Noda, S., Fujita, M., dan Asano, T. (2007). *Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities*. *Nature Photonics*. **1**: 449.
- Nugroho, B.S., Iskandar, A.A., Malyshev, V.A., dan Knoester, J. (2013). *Bistable optical response of a nanoparticle heterodimer: Mechanism, phase diagram, and switching time*. *Journal of Chemical Physics*. **139**: 014303
- Nurrahman, M.R., dan Iskandar, A.A. (2024). *Enhancement of Magneto optic Kerr Effect (MOKE) of an Oblate Spheroid Bi:YIG Nanoparticle*. Akan disubmisi untuk publikasi.
- NSF 16-004. (2015). *Dear Colleague Letter: Optics and Photonics (OP)*. <https://www.nsf.gov/pubs/2016/nsf16004/nsf16004.jsp> (diakses 16 Feb. 2024).
- Optics.org. (2008). *Optics or Photonics: what's in a name?*. <https://optics.org/article/32348> (diakses 16 Feb. 2024).
- Pendry, J.B. (2000). *Negative refraction makes a perfect lens*. *Physical Review Letters*. **85**: 3966–3969.
- Perdana, N., Rockstuhl, C., dan Iskandar, AA. (2021). *Induced higher order multipolar resonances from interacting scatterers*. *Journal of the Optical Society of America*. **B38**(1): 241-248.
- Permana, D.P., Klaver, Y., Marpaung, D., dan Iskandar, A.A. (2024). *Four Wave Mixing in Asymmetric Double Stripe Silicon Nitride Ring Resonator for Quantum Applications*. Akan disubmisi untuk publikasi.
- Photonics21. <https://www.photonics21.org/> (diakses 16 Feb. 2024).
- Pramudita, P.E. (2011). *Structural Optimization for Performance Enhancement of Photonic Crystal Device using a Genetic Algorithm*. Bachelor's Final Project, Physics Study Program, Institut Teknologi Bandung.

- Prawiharjo, J., Iskandar, A.A., dan Tjia, May-On. (2003). *Second Order Approximation for Band Gap Characterization of One-Dimensional Dielectric Omnidirectional Reflector*. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*. **12**(2): 263-275.
- Prodan, E., Radloff, C., Halas, N.J., dan Nordlander, P. (2003a). *A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures*. *Science*. **302**: 419.
- Prodan, E., dan Nordlander, P. (2003b). *Structural Tunability of the Plasmon Resonances in Metallic Nanoshells*. *Nano Letters*. **3**: 543.
- Putra, A., Iskandar, A.A., dan Tjia, M.O. (2011). *Performance Enhancement of Single Defect Microcavity and Related Localization of Evanescent Bloch Waves*. *Physical Review*. **B84**: 075159.
- Pshenichnyuk, I.A., Kosolobov, S.S., dan Drachev, V.P. (2019). *Towards Deep Integration of Electronics and Photonics*. *Applied Sciences*. **9**(22): 4834.
- Raab, R.E. dan de Lange, O.L. (2005). *Multipole Theory in Electromagnetism*. *Oxford University Press*.
- Ramakrishna, S. A. (2005). *Physics of negative refractive index materials*. *Report Progress in Physics*. **68**: 449–521.
- Rao, V.S.C.M., dan Hughes, S. (2007). *Single Quantum Dot Spontaneous Emission in a Finite-Size Photonic Crystal Waveguide: Proposal for an Efficient “On Chip” Single Photon Gun*. *Physical Review Letters*. **99**: 193901.
- Rawicz, A.H., dan Holonyak, N. (2014). *Biographical Memoirs of Theodore Maiman*. *National Academy of Sciences*.
- Smith, D.R., Pendry, J.B., dan Wiltshire, M.C.K. (2004). *Metamaterials and Negative Refractive Index*. *Science*. **304**: 788.
- Southall, J.P.C. (1922). *The Beginning of Optical Science*. *Journal of the Optical Society of America*. **6**(4): 293-311.
- Sprink, R., van Tiggelen, B.A., dan Lagendijk, A. (1996). *Optical Emission in Periodic Dielectrics*. *Europhysics Letters* **35**: 265.
- Stachel, J. (1998). *Einstein’s Miraculous Year*. *Princeton University Press*.

- Stephanie, M.V., Iskandar, A.A., Tjia, M.O. (2018). *Bonding state energy of metal nanoparticle dimer and its dependence on nanosphere size and interparticle separation. Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials.* **27**(2):1850018.
- Suryadharma, R.N.S., Iskandar, A.A., Tjia, M.O. (2014). *Enhanced energy confinement induced by metallic coating of central rod in square array photonic crystal of dielectric rods for TM light. Journal of Optics.* **16**: 075102.
- Suryadharma, R.N.S., Iskandar, A.A., Tjia, M.O. (2016). *Photonic States Mixing Beyond the Plasmon Hybridization Model. Journal of Applied Physics.* **120**: 043105.
- Suryadharma, R.N.S., Fruhnert, M, Rockstuhl, C., dan Fernandez-Corbaton, I. (2017). *Singular-value decomposition for electromagnetic-scattering analysis. Physical Review.* **A95**: 053834.
- Sutor, R.S. (2019). *Dancing with Qubits.* Packt Publishing.
- Tjia, M.O., et al. (2005). *Application of Thermo-Optic Effect in Bragg Grating for Remote Operation of OTDR. Laporan Small Facility Project European Union.*
- Vaselago, Viktor G. (1968). *The Electrodynamics of Substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Soviet Physics Uspekhi.* **10**: 509.
- Weinberger, P. (2008). *John Kerr and his effects found in 1877 and 1878. Philosophical Magazine Letters.* **88**(12): 897–907.
- Willner, A.E. et al. (2012). *Optics and Photonics: Key Enabling Technologies. Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. Special Centennial Issue, 1604-1643.*
- Woodward, B. (2010). *Cabling: The Complete Guide to Copper and Fiber Optic Networking.* Sybex.
- Xu, Y. L. (1995). *Electromagnetic scattering by an aggregate of spheres. Appl. Opt.* **34**(21): 4573–4588.
- Yablonovitch, Eli (1987). *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Physical Review Letters.* **58**(20): 2059–62.
- Yeh, P. (2005). *Optical Waves in Layered Media.* John Wiley.

Zvezdin, A.K., dan Kotov, V.A. (1997). *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*. CRC Press.

CURRICULUM VITAE



Nama : Alexander Agustinus Popo Iskandar
Tempat/tgl lahir : Makassar, 8 Agustus 1964
Kel. Keahlian : Fisika Magnetik dan Fotonik
Alamat Kantor : Gedung Fisika, Jl. Ganesa 10, Bandung
Nama Istri : Ir. Shierly Megawati Purnomo
Nama Anak : Maria Alexandra Iskandar, S.Farm.
Benedict Rafael Iskandar, S.Si.

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

| No. | Jenjang Pendidikan | Perguruan Tinggi | Tahun Lulus | Gelar | Bidang |
|-----|--------------------|---------------------------|-------------|-------|-----------------|
| 1. | S1 | Insitut Teknologi Bandung | 1989 | Drs | Fisika |
| 2. | S3 | University of Durham, UK | 1995 | Ph.D. | Fisika Teoretik |

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

| No. | Nama Jabatan | Tahun |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | Anggota Tim Perumus Kurikulum Fisika tahun 2003 | 2002-2003 |
| 2. | Anggota Satuan Tugas dari Satuan Penjaminan Mutu | 2006 |
| 3. | Anggota Senat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam | 2010-2014 |
| 4. | Ketua Kelompok Keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik | 2011-2013 |
| 5. | Anggot Tim Perumus Kurikulum Fisika tahun 2013 | 2012-2013 |
| 6. | Anggota Satuan Tugas Penyiapan Akreditasi Internasional Program Studi Fisika | 2014-2015 |
| 7. | Anggota Majelis Keilmuan Fisika FMIPA | 2015-2020 |
| 8. | Ketua Gugus Kendali Mutu Program Studi Fisika | 2015-2018 |
| 9. | Ketua Gugus Kendali Mutu FMIPA | 2018-2021 |
| 10. | Anggota Tim Perumus Kurikulum Fisika tahun 2019 | 2019 |
| 11. | Ketua Tim Re-Akreditasi Internasional Program Studi Fisika | 2020-2021 |
| 12. | Ketua Kelompok Keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik | 2023-2028 |

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

| No. | Pangkat | Golongan | TMT |
|-----|-----------------------|----------|----------------|
| 1. | Penata Muda | III/a | 1 Januari 1990 |
| 2. | Penata Muda Tingkat I | III/b | 1 April 1997 |
| 3. | Penata | III/c | 1 Oktober 1999 |
| 4. | Penata Tingkat I | III/d | 1 Oktober 2005 |
| 5. | Pembina | IV/a | 1 April 2008 |
| 6. | Pembina Tingkat I | IV/b | 1 Oktober 2023 |

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

| No. | Nama Jabatan | TMT |
|-----|--------------------|----------------|
| 1. | Asisten Ahli Madya | 1 Juli 1991 |
| 2. | Asisten Ahli | 1 Oktober 1996 |
| 3. | Lektor Muda | 1 April 1999 |
| 4. | Lektor | 1 Januari 2001 |
| 5. | Lektor Kepala | 1 Juli 2005 |
| 6. | Guru Besar | 1 Mei 2023 |

V. KEGIATAN PENELITIAN

| No. | Judul Penelitian (Posisi) | Sumber dana; Tahun |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Struktur Kisi Optik Linier untuk Aplikasi Devais Fotonik (Ketua Peneliti) | Hibah Bersaing IX DIKTI; 2002-2003 |
| 2. | Study of Wave Propagation in (Optically Linear) Photonic Crystals with Defect using Green Tensor Methods (Ketua Peneliti) | Riset Internasional ITB; 2007 |
| 3. | Kajian dan Pemodelan Devais Fotonik Berbasis Meta-Material untuk Aplikasi Sistem Komunikasi dan Penginderaan Optik (Ketua Peneliti) | Hibah Kompetensi; 2008 |
| 4. | <i>Density of optical states modeling of highly resonant Photonic Crystal based cavities (Supervisor Postdoc)</i> | SPIN KNAW Postdoc, Royal Dutch Academy of Arts and Sciences (KNAW); 2008-2010 |
| 5. | Kajian dan Pemodelan Devais Nano Fotonik Berbasis Kristal Fotonik dan Pandu Gelombang Plasmon Permukaan (Ketua Peneliti) | Hibah Kompetensi; 2009 |
| 6. | Kristal Fotonik dengan Sistem Hibrid Metal-Dielektrik (Ketua Peneliti) | Program Riset Desentralisasi Dikti; 2012 |
| 7. | Pita Fotonik Terlarang Sempurna dari Struktur Periodik 2 Dimensi (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2012 |
| 8. | Pengaruh Substrat terhadap Resonansi Plasmon Permukaan pada Nanopartikel Logam (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2014 |

| No. | Judul Penelitian (Posisi) | Sumber dana; Tahun |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 9. | Resonansi Plasmon Permukaan dalam Hamburan Gelombang Elektromagnetik pada Struktur Nano (Ketua Peneliti) | Program Riset Desentralisasi Dikti; 2014 |
| 10. | Pengaturan Resonansi Fano dari Struktur Plasmonik Nano (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2015 |
| 11. | Resonansi Fano dari Struktur Plasmonik (Ketua Peneliti) | Program Desentralisasi Unggulan Perguruan Tinggi; 2015-2016 |
| 12. | Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Struktur Nano Berlapis Logam (Ketua Peneliti) | Program Desentralisasi Unggulan Perguruan Tinggi; 2016 |
| 13. | Interaksi Gelombang Hambur dari Struktur Nano untuk Aplikasi Fotonik (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2017 |
| 14. | Gelombang Elektromagnetik dan Plasmon Permukaan pada Sistem Silinder Berselubung Logam Non-Koaksial (Ketua Peneliti) | P3MI ITB; 2017 |
| 15. | Hamburan Gelombang Elektromagnetik pada Logam Nano Berstruktur Sembarang (Ketua Peneliti) | Program Desentralisasi Unggulan Perguruan Tinggi; 2017-2018 |
| 16. | Nonlinear absorption in media with composite gold nanoparticles (Ketua Peneliti) | P3MI ITB; 2018 |
| 17. | Studi Efek Pemanasan pada Nano Partikel Logam terhadap Sifat Optik dan Kimianya (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2019 |
| 18. | Rekayasa Resonansi Mie Penghambur untuk Desain Bangun Dasar Metamaterial (Ketua Peneliti) | P3MI ITB; 2019 |
| 19. | Biosensor Berbasis Metasurface Dielektrik (Ketua Peneliti) | Penelitian Kompetitif Nasional – PDD; 2020-2021 |
| 20. | Bistabilitas dalam sistem nanopartikel nonlinear komposit (Ketua Peneliti) | P3MI ITB; 2020 |
| 21. | Karakteristik Optik dari Agregat Partikel Nano dan Aplikasinya (Ketua Peneliti) | Program Desentralisasi Unggulan Perguruan Tinggi; 2021-2022 |
| 22. | Pengrusakan Simetri Struktur Nano untuk Penguatan Efek Kerr Magnetooptik (Ketua Peneliti) | Program Riset dan Inovasi ITB; 2021 |
| 23. | Sistem Metalattice sebagai Devais Layar Hemat Energi dan Ramah Lingkungan (Ketua Peneliti) | Penelitian Kompetitif Nasional – Penelitian Fundamental; 2023 |

VI. PUBLIKASI

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | U. Harder, A.A. Iskandar , W.A. McGhee; On the Breathers of | International Journal of Modern Physics A; Vol. 10, No. 13, p. 1879-1903, 1995; ISSN (print): |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | $a_n^{(1)}$ Affine Toda Field Theory (sebagai penulis korespondensi) | 0217-751X ISSN (online): 1793-656X; Singapore; 10.1142/S0217751X95000917 |
| 2. | H. Alatas, A.A. Iskandar dan M.O. Tjia; Bright and Dark Solitary Wave in Kerr Medium with the Presence of Higher Order Linear and Nonlinear Dispersion | Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (Q2); Vol 10, No. 2, p. 223-231, Juni 2001; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863501000565 |
| 3. | J. Prawiharjo, A.A. Iskandar , M.O. Tjia and E. van Groesen, Second Order Approximation for Band Gap Characterization of One Dimensional Dielectric Omnidirectional Reflector (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (Q2); Vol 12, No. 2, p. 263-275, Juni 2003; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863503001407 |
| 4. | H. Alatas, A.A. Iskandar , M.O. Tjia and T.P. Valkering, Analytic Study on Stationary Gap Soliton in Deep Nonlinear Bragg Grating | Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (Q2); Vol 12, No. 2, p. 157-173, Juni 2003; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863503001304 |
| 5. | H. Alatas, A.A. Iskandar , M.O. Tjia and T.P. Valkering, Dark, Antidark Soliton-like Solutions and Their Connection in a Finite Deep Nonlinear Bragg Grating with a Mirror | Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (Q2); Vol 13, No. 2, p. 259-274, Juni 2004; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863504001827 |
| 6. | H. Alatas, A. A. Iskandar , M. O. Tjia, T. P. Valkering; Optical Sensing and Switching Devices Based on a Finite Deep Nonlinear Bragg Grating with a Mirror | Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (Q2); Vol 14, No. 2, p. 259-272, Juni 2005; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863505002694 |
| 7. | H. Alatas, A. A. Iskandar , M. O. Tjia, T. P. Valkering; Rational Solitons in Deep Nonlinear Bragg Gratings | Physical Review E (Q1); Vol. 73, p. 066606-1 – 066606-9, 6 Juni 2006; ISSN (online) 2470-0053, ISSN (print) 2470-0045 (print); USA; 10.1103/PhysRevE.73.066606 |
| 8. | H. Alatas, H. Mayditia, H. Hardhienata, A. A. Iskandar and M. O. Tjia; Single-Frequency Refractive Index Sensor Based on Finite One Dimensional Photonic Crystals with Two Defects | Japanese Journal of Applied Physics (Q1); Vol. 45, No. 8B, p. 6754–6758, 22 August 2006; ISSN (online): 1347-4065, ISSN (print): 0021-4922; Japan; 10.1143/JJAP.45.6754 |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9. | H. Alatas, A. A. Iskandar and M. O. Tjia; In-Gap Optical Bistabilities of Deep Nonlinear Bragg Grating with Symmetric Three-Layer Unit Cells | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 15, No. 3, p. 345–354, September 2006; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S021886350600330X |
| 10. | A.A. Iskandar , W. Yonan, M.O. Tjia, I. van de Voorde, Embrecht W.C. van Groesen; Effective Medium Formulation for Band Structure Design of a Finite 1D Optical Grating | Japanese Journal of Applied Physics (Q1); Vol. 46, No. 1, p. 187–193, 10 January 2007; ISSN (online): 1347-4065, ISSN (print): 0021-4922; Japan; 10.1143/JJAP.46.187 |
| 11. | Muldarisnur, A. Soehanie, A. Iskandar , and M. O. Tjia; Analysis of Asymmetric Bragg Coupler Based Optical Add-Drop Multiplexer Operating on certain Phase Matching Conditions | Journal of Applied Physics (Q1); Vol. 103, p. 123110-1–123110-11, 24 Juni 2008; ISSN (online) 1089-7550, ISSN (print) 0021-8979; USA; 10.1063/1.2939634 |
| 12. | H. Alatas, A. A. Kandi, A. A. Iskandar and M. O. Tjia; New Class of Bright Spatial Solitons obtained by Hirota’s Method from Generalized Coupled Mode Equations of Nonlinear Optical Bragg Grating | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q2); Vol 17, No. 2, p. 225–233, Juni 2008; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S021886350800410X |
| 13. | H. Alatas, Alexander A. Iskandar and M. O. Tjia; Tailoring spatial soliton characteristics and its dynamical behaviors in nonlinear reflection gratings | Journal of the Optical Society of America B (Q1); Vol. 27, No. 2, p. 238-245, 12 Januari 2010; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.27.000238 |
| 14. | Indra Karnadi, Alexander A Iskandar , May-On Tjia; Analysis of Ag-Superlens Performances using Spatial Convolution Formulation (sebagai penulis korespondensi) | Journal of the Optical Society of America A (Q1); Vol. 27, No. 2, p. 268-275, 25 Januari 2010; ISSN (print): 1084-7529, ISSN (online): 1520-8532; USA; 10.1364/JOSAA.27.000268 |
| 15. | Husin Alatas, Alexander A. Iskandar , Hugo J. W. M. Hoekstra, and May-On Tjia; Performance changes of a grated waveguide at resonance wavelengths next to | Journal of the Optical Society of America B (Q1); Vol. 27, No. 12, p. 2743-2749, 18 November 2010; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.27.002743 |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | its band-edges due to modified edge sections | |
| 16. | Husin Alatas, Hugo J. W. M. Hoekstra, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Group-Index and Resonant Field Enhancement in Symmetric Double-Sided Grated Waveguide | Journal of the Optical Society of America A (Q1); Vol. 28, No. 6, p. 1197-1203, 24 Mei 2011; ISSN (print): 1084-7529, ISSN (online): 1520-8532; USA; 10.1364/JOSAA.28.001197 |
| 17. | Andika Putra, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Performance Enhancement of Single Defect Microcavity and Related Localization of Evanescent Bloch Waves | Physical Review B (Q1); Vol. 84, p. 075159-1 – 075159-9, 16 Agustus 2011; ISSN (online) 2469-9969, ISSN (print) 2469-9950; USA; 10.1103/PhysRevB.84.075159 |
| 18. | Husin Alatas, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Structure Dependent Variations of Group Velocity, Energy Loss and Confinement in a Regular Grated Waveguide | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 21, No. 1, p. 1250009-1 – 1250009-11, 23 April 2012; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863512500099 |
| 19. | Radius N. S. Suryadharma, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Overlapping TE and TM Band Gaps in Square Lattice Photonic Crystal of Hollow Dielectric Rods (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 21, No. 1, p. 1250008-1 – 1250008-10, 23 April 2012; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863512500087 |
| 20. | Bintoro S. Nugroho, Alexander A. Iskandar , Victor A. Malyshev, and Jasper Knoester; Bistable optical response of a nanoparticle heterodimer: Mechanism, phase diagram, and switching time | Journal of Chemical Physics (Q1); Vol. 139, p. 014303-1 – 014303-8, 1 Juli 2013; ISSN (print): 0021-9606, ISSN (online): 1089-7690; USA; 10.1063/1.4811181 |
| 21. | G. Wesley Putra Data, Alexander A. Iskandar and May-On Tjia; Numerical study of anomalous TE-polarized light scattering by metallic nanowires using realistic data (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 23, No. 1, p. 1450005-1 – 1450005-10, Maret 2014; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863514500052 |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 22. | R N S Suryadharma, Alexander A Iskandar and M O Tjia; Enhanced Energy Confinement Induced by Metallic Coating of Central Rod in Square Array Photonic Crystal of Dielectric Rods for TM Light (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Optics (Q1); Vol. 16, No. 7, p. 075102-1 – 075102-8, 11 Juni 2014; ISSN (print): 2040-8978, ISSN (online): 2040-8986; UK; 10.1088/2040-8978/16/7/075102 |
| 23. | Azrul Azwar, Agoes Soehianie, Alexander A. Iskandar and May-On Tjia; Fano-like spectral profile in TE wave scattering by nanowire of dissipative and dispersive materials (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 25, No. 1, p. 1650005-1 – 1650005-11, Maret 2016; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863516500053 |
| 24. | Fransiska R. Widiyari, Alexander A. Iskandar and May-On Tjia; Validity of classical coupled oscillators model for elucidating surface plasmon effects on optical scattering by silver nanocylinders (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 25, No. 1, p. 1650006-1 – 1650006-12, Maret 2016; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863516500065 |
| 25. | Radius N. S. Suryadharmaa, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Photonic States Mixing Beyond the Plasmon Hybridization Model (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Applied Physics (Q1); Vol. 120, p. 043105-1 – 043105-9, 27 Juli 2016; ISSN (online) 1089-7550, ISSN (print) 0021-8979; USA; 10.1063/1.4959258 |
| 26. | Bintoro S Nugroho, Alexander A Iskandar , Victor A Malyshev and Jasper Knoester, Instabilities in the optical response of a semiconductor quantum dot–metal nano particle heterodimer: self-oscillations and chaos | Journal of Optics (Q1); Vol. 19, No. 1, p. 015004-1–115003-10, 12 Desember 2016; ISSN (print): 2040-8978, ISSN (online): 2040-8986; UK; 10.1088/2040-8986/19/1/015004 |
| 27. | Suhandoko D Isro, Alexander A Iskandar and May-On Tjia; Complementary high performance sensing of gases and liquids using silver nanotube (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Optics (Q1); Vol. 19, No. 11, p. 115003-1 – 115003-9, 18 Oktober 2017; ISSN (print): 2040-8978, ISSN (online): 2040-8986; UK; 10.1088/2040-8986/aa8f0d |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 28. | Margareta Vania Stephanie, Alexander A. Iskandar and May-On Tjia; Bonding state energy of metal nanoparticle dimer and its dependence on nanosphere size and interparticle separation (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q2); Vol. 27, No. 2, p. 1850018-1 – 1850018-11, 11 Juli 2018; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863518500182 |
| 29. | Suhandoko D Isro, Alexander A Iskandar , Yuri S Kivshar, Ilya V Shadrivov; Engineering scattering patterns with asymmetric dielectric nanorods | Optics Express (Q1); Vol. 26, No. 25, p. 32624-32630, 10 Desember 2018; ISSN (online): 1094-4087; USA; 10.1364/OE.26.032624 |
| 30. | Bintoro S. Nugroho, Alexander A. Iskandar , Victor A. Malyshev, and Jasper Knoester; Plasmon-assisted two-photon Rabi oscillations in a semiconductor quantum dot –metal nanoparticle heterodimer | Physical Review B (Q1); Vol. 99, p. 075302-1 – 075302-9, 11 Februari 2019; ISSN (online) 2469-9969, ISSN (print) 2469-9950; USA; 10.1103/PhysRevB.99.075302 |
| 31. | Suhandoko D. Isro, Alexander A. Iskandar , and May-On Tjia; Core size and axial offset dependent extinction characteristics for silver nanotube and its application to directional sensing (sebagai penulis korespondensi) | Journal of the Optical Society of America B (Q1); Vol. 36, No. 6, p. 1637-1644, 28 Mei 2019; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.36.001637 |
| 32. | Anna Fitriana, Alexander A. Iskandar , and C. M. de Sterke; Nonlinear absorption in media with composite gold nanoparticles (sebagai penulis korespondensi) | Journal of the Optical Society of America B (Q1); Vol. 36, No. 11, p. 2946-2953, 7 Oktober 2019; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.36.002946 |
| 33. | Mohamad Reza Nurrahman, Dongha Kim, Min-Kyo Seo and Alexander A. Iskandar ; Enhancement of Magneto-optic Kerr effect of YIG nanoparticle by backscattering suppression (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 28, No. 3, p. 1950043-1 – 1950043-14, 14 April 2020; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863519500437 |

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; Vol., No., Hal., Tahun; ISSN; Tempat publikasi; DOI |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 34. | Suhandoko D. Isro, Alexander A. Iskandar and May On Tjia; Polarization property of light scattered on dielectric nanorods at oblique incident angle (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials (Q3); Vol. 28, No. 4, p. 1950041-1 – 1950041-9, 11 Mei 2020, 14 April 2020; ISSN (print): 0218-8635, ISSN (online): 1793-6624; Singapore; 10.1142/S0218863519500413 |
| 35. | Bintoro S. Nugroho, Alexander A. Iskandar , Victor A. Malyshev, and Jasper Knoester; Plasmon-assisted two-photon absorption in a semiconductor quantum dot–metallic nanoshell composite | Physical Review B (Q1); Vol. 102, p. 045405-1 – 045405-8, 2 Juli 2020; ISSN (online) 2469-9969, ISSN (print) 2469-9950; USA; 10.1103/PhysRevB.102.045405 |
| 36. | Nanda Perdana, Carsten Rockstuhl, and Alexander A. Iskandar ; Induced higher order multipolar resonances from interacting scatterers (sebagai penulis korespondensi) | Journal of the Optical Society of America B (Q2); Vol. 38, No. 1, p. 241-248, Januari 2021; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.410860 |
| 37. | Misael Natanael, Alexander A. Iskandar , Radius N. S. Suryadharma; Emergence of Fano response in trimer structure with asymmetric permittivity (sebagai penulis korespondensi) | Journal of the Optical Society of America B (Q2); Vol. 38, No. 2, p. 392-400, Februari 2021; ISSN (print): 0740-3224, ISSN (online): 1520-8540; USA; 10.1364/JOSAB.410680 |
| 38. | Suhandoko D. Isro, Agoes Soehanie, Alexander A. Iskandar ; Dielectric Metalattice with Tunable Reflectivity (sebagai penulis korespondensi) | Journal of Mathematical and Fundamental Sciences (Q2); Vol. 54, No. 1, p. 1-10, Februari 2022; ISSN: 2337-5760; E-ISSN: 2338-5510; Indonesia; 10.5614/j.math.fund.sci.2022.54.1.1 |
| 39. | Muhammad Tegar Pambudi, Priastuti Wulandari and Alexander A. Iskandar ; Effective Medium Analysis of Stacked-Nanoparticles Array's Optical Responses (sebagai penulis korespondensi) | Material Science Forum (Q3); Vol. 1060, p. 135-140; Mei 2022; ISSN: 1662-9752; Switzerland; 10.4028/p-2r65bd |

VII. PENGHARGAAN

| No. | Nama Penghargaan | Pemberi penghargaan | Tahun |
|-----|------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 1. | Satya Lencana Karya Satya X | Pemerintah Republik Indonesia | 2003 |
| 2. | Satya Lencana Karya Satya XX | Pemerintah Republik Indonesia | 2013 |
| 3. | Pengabdian 25 Tahun Institut Teknologi Bandung | Institut Teknologi Bandung | 2015 |
| 4. | Senior Member | Optica (formerly the Optical Society) | 2017 |
| 5. | Satya Lencana Karya Satya XXX | Pemerintah Republik Indonesia | 2022 |

VIII. SERTIFIKASI


| No. | Jenis Sertifikasi | Tahun |
|-----|----------------------------|-------|
| 1. | Sertifikasi Dosen Nasional | 2009 |
| 2. | Sertifikasi Asesor BKD | 2022 |

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)  [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)
 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)  [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-623-297-400-5

