

## Effectiveness of adding ZnO thin films to metamaterial structures as sensors

Saktioto<sup>1,\*</sup>, Yan Soerbakti<sup>1</sup>, Ari Sulisty Rini<sup>1</sup>, Budi Astuti<sup>2</sup>,  
Erman Taer<sup>1</sup>, Rahmondia Nanda Setiadi<sup>1</sup>, Syamsudhuha<sup>3</sup>, Sofia Anita<sup>4</sup>, Yolanda Rati<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

<sup>2</sup>Department of Physics, Universitas Negeri Semarang, Semarang 50229, Indonesia

<sup>3</sup>Department of Mathematics, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

<sup>4</sup>Department of Chemical, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

<sup>5</sup>Department of Physics, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia

\*Corresponding author: [saktioto@lecturer.unri.ac.id](mailto:saktioto@lecturer.unri.ac.id)

### ABSTRACT

Metamaterials are artificial materials with the characteristics of a negative refractive index and high resonance sensitivity. Advanced engineering in metamaterials can realize great potential in combination with zinc oxide (ZnO) semiconductor materials, which can increase the efficiency of sensor technology compared to other conventional material models. This research aims to investigate the optical properties and develop an invention for a hybrid sensor media based on a split ring resonator (SRR) metamaterial structure integrated with a thin layer of ZnO. The research methodology was carried out by simulation by designing and characterizing SRR metamaterials which were designed with variations in SRR patterns, geometry, substrate materials, unit cell configurations, and variations in the thickness of the ZnO thin layer. Geometry characterization of SRR metamaterials was carried out using the Nicolson-Ross-Weir electromagnetic (EM) field function approach, specifically the optical parameters permittivity, permeability, and refractive index. They are optimizing the performance of hybrid sensor components based on metamaterials and ZnO thin films using the GHz scale EM field function approach, especially in the reflection, transmission, and absorption spectrum. Analysis of metamaterial characteristics identifies the optical properties of permittivity, permeability, and negative refractive index which are increased and optimized from the thin layer integration model 200 nm thick ZnO in the SRR metamaterial structure with a 3×3 square pattern configuration at a resonance frequency of 1.889 GHz. The performance of the hybrid sensor media provides a resonant frequency of three equal bandwidths in the frequency range 2.89 – 3.52, 5.28 – 6.54, and 7.57 – 8.46 GHz. In addition, the highest absorption spectrum of 73% is at a frequency of ~8 GHz.

**Keywords:** Metamaterial; refractive index; sensor; ZnO

Received 25-12-2023 | Revised 13-01-2024 | Accepted 14-01-2024 | Published 07-03-2024

### PENDAHULUAN

Perkembangan dan kebutuhan teknologi di era digital modern sekarang ini menjadikan peran ilmuwan semakin dibutuhkan dalam menganalisa dan menciptakan teknologi canggih dengan kualitas kinerja yang tinggi. Teknologi yang sedang dikembangkan saat ini adalah perangkat media sensor berbasis metamaterial dengan pencapaiannya yang sudah meliputi di bidang industri [1], kesehatan [2], pertanian [3], dan kelautan [4]. Teknologi ini berkembang dikarenakan adanya kontribusi dari sifat material yang mampu memanipulasi panjang gelombang pada frekuensi tertentu

sehingga mudah diaplikasikan sebagai sensor. Teknologi sensor berbasis metamaterial terbukti telah menarik minat bagi para peneliti dan industri pada lima tahun terakhir dengan adanya upaya peningkatan kinerja media sensor melalui teknik *hybrid* dengan material terbaru.

Metamaterial merupakan material artifisial dengan karakteristik yang unik dan sensitivitas yang tinggi. Penggunaan metamaterial sebagai terobosan teknologi maju memiliki potensi yang sangat tinggi dan luas karena material dan strukturnya yang terbaru [5]. Struktur metamaterial dasar seperti *split ring resonator* (SRR) telah dilaporkan oleh Saktioto *et al.* (2022), dimana implementasi metamaterial

SRR heksagonal dengan substrat FR-4 dapat meningkatkan profil aplikasi teknologi antena mikrostrip yang rendah dengan lebar pita frekuensi kerja hingga 8 GHz [6]. Namun, metamaterial tersebut dalam aplikasinya saat ini masih dibawah kebutuhan teknologi modern dengan kualitas yang tinggi. Hal tersebut menjadi permasalahan yang perlu diteliti untuk melakukan improvisasi terhadap metamaterial menjadi material yang unggul. Di sisi lain, sifat rekayasa teknik yang tinggi pada metamaterial dapat mewujudkan metamaterial *hybrid* dari kombinasi material lain sebagai substrat dan katalis terbaru [7]. Pada penelitian ini, akan diteliti penggunaan variasi material substrat berupa FR-4, karbon aktif, polimida (PI), kaca *quartz*, dan semikonduktor seng oksida (ZnO) sebagai kombinasi material terbaru yang akan diintegrasikan sebagai substrat metamaterial dan media sensor. Kombinasi material ini memungkinkan dapat meningkatkan sifat resonansi metamaterial menjadi lebih aktif dan responsif. Penelitian sebelumnya yang dilaporkan oleh Tao *et al.* (2020), menjelaskan bahwa media sensor berhasil difabrikasi dengan struktur logam metamaterial di atas substrat dan lapisan tipis ZnO dengan penyerapan atau daya hilang sebesar -65 dB [8].

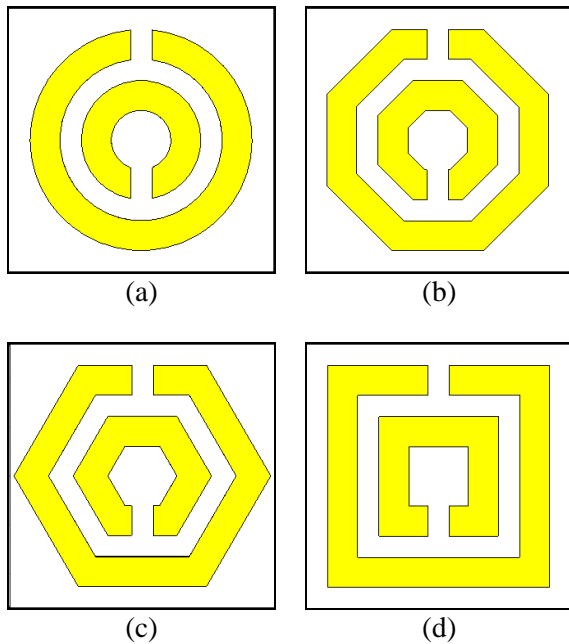
Material ZnO merupakan semikonduktor tipe-n yang memiliki energi celah pita 3,37 eV dan energi ikat eksiton 60 meV. ZnO merupakan material yang mudah didapatkan, murah dan tidak beracun [9]. Selain itu, ZnO dapat diaplikasikan sebagai *transparent conductive oxide* (TCO) dalam bentuk lapisan tipis. TCO merupakan material dengan tranparansi optik tinggi yang bersifat konduktif. Hal ini karena adanya ikatan ionik pada ZnO dan memungkinkan elektron untuk terlepas dan mampu menghantarkan muatan listrik [10]. Material *quartz* dapat dijadikan sebagai substrat lapisan tipis ZnO karena ketahanan terhadap suhu yang panas [9]. Kaca *quartz* memiliki stabilitas dimensi dan manufaktur yang tinggi, serta mudah untuk difabrikasi sebagai sensor [11]. Kaca *quartz* yang terbuat dari silikon oksida (SiO<sub>2</sub>) memiliki

biaya produksi yang murah, tipis, serta aplikatif sebagai komponen semikonduktor [12]. Penelitian sebelumnya oleh Chang *et al.* (2021), melaporkan penumbuhan lapisan tipis indium *titanium zinc oxide* pada substrat kaca *quartz* sebagai aplikasi sensor gas dapat menghasilkan tranmitansi 80% dan peningkatan efisiensi 10% [13]. Pengaruh positif atas dasar potensi metamaterial *hybrid* dalam penggunaan substrat terbaru memberikan peluang dalam penelitian ini untuk mewujudkan media sensor berkualitas tinggi dengan material maju yang terbaru. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengembangan metamaterial *hybrid* secara simulasi dengan bahan substrat terbaru yang diintegrasikan sebagai media sensor. Penelitian ini bersifat *novelty* karena penggunaan struktur metamaterial SRR belum pernah diterapkan pada lapisan tipis ZnO sebagai media sensor.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam pendekatan secara simulasi dengan perancangan dan identifikasi media sensor *hybrid* berbasis lapisan tipis ZnO dan metamaterial. Tahapan merancang metamaterial dengan struktur SRR yang berbeda dilakukan dalam bentuk lingkaran, oktagon, heksagonal, dan persegi seperti pada Gambar 1. Struktur metamaterial konvensional tersebut terdiri dari substrat dielektrik berbahan FR-4 ( $\epsilon = 4,3$ ) [14] dan inklusi logam SRR dari tembaga. Struktur tersebut masing-masing memiliki ketebalan 1 mm dan 0,05 mm. Tahap awal pada variasi struktur SRR menggunakan jari-jari cincin tetap sebesar 2,6 mm.

Metamaterial SRR memiliki karakteristik geometri yang bergantung pada frekuensi atau lebih kecil dari panjang gelombang yang diberikan [15]. Pada penelitian ini, digunakan frekuensi sumber maksimum sebesar 9 GHz. Salah satu struktur metamaterial SRR dari pola lingkaran, oktagon, heksagonal, dan persegi yang memiliki karakteristik terbaik akan dipilih dan divariasikan geometri jari-jari cincin SRR sebesar 2,2 mm, 2,4 mm, 2,6 mm, dan 2,8 mm.



**Gambar 1.** Metamaterial struktur SRR variasi pola: (a) lingkaran; (b) oktagon; (c) heksagonal; dan (d) persegi.

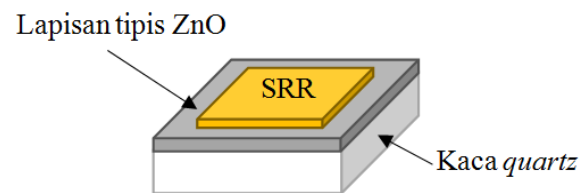
Material dielektrik sebagai substrat memiliki konstanta permitivitas yang dapat mempengaruhi dan dipengaruhi oleh medan listrik dari struktur logam metamaterial [3]. Pada penelitian ini, substrat yang digunakan selain FR-4 terdiri dari tiga bahan dengan konstanta dielektrik berbeda yaitu PI ( $\epsilon = 3,5$ ) [16], karbon aktif ( $\epsilon = 8,0$ ) [17], dan kaca *quartz* ( $\epsilon = 3,8$ ) [18].

Terdapat tiga model substrat metamaterial tambahan selain menggunakan FR-4 yang dikembangkan berdasarkan pada jenis material yang digunakan. Model substrat metamaterial dirancang dengan beberapa jenis material dan ketebalan yaitu PI, PI-karbon aktif, dan kaca *quartz*.

Semikonduktor memiliki karakteristik *band gap* yang terletak diantara pita valensi dan konduksi. Material ini akan aktif jika diberikan energi atau arus listrik. Salah satu material semikonduktor berupa lapisan tipis ZnO ( $\epsilon = 8,5$ ) [19], akan diintegrasikan terhadap model substrat metamaterial dengan karakteristik terbaik. Selain itu, variasi ketebalan ZnO memiliki sifat konduktif yang berbeda. Oleh karena itu, lapisan tipis ZnO pada metamaterial akan divariasikan dengan ketebalan 50 nm, 100

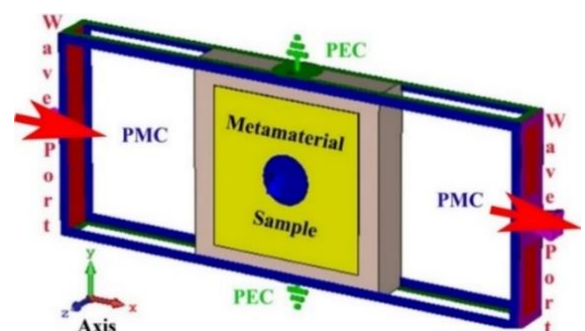
nm, dan 200 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Metamaterial merupakan material artifisial yang terdiri dari berbagai macam struktur yang tersusun dari satu hingga lebih secara periodik, sehingga karakteristik yang diperoleh berbeda-beda [20]. Pada penelitian ini, struktur metamaterial terintegrasi lapisan tipis ZnO dengan karakteristik terbaik akan dipilih dan divariasikan jumlah susunan SRR secara *array*  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ , dan  $3 \times 3$ .



**Gambar 2.** Integrasi struktur lapisan tipis ZnO terhadap metamaterial.

Identifikasi sifat fisis optik metamaterial dilakukan secara simulasi menggunakan *waveguide* yang dirancang berdasarkan panjang gelombang sumber seperti pada Gambar 3 [21]. Rancangan *waveguide* terdiri dari *waveport*, bidang batas konduktor elektrik sempurna (*perfect electric conductor*, PEC), dan konduktor magnetik sempurna (*perfect magnetic conductor*, PMC) yang masing-masing terletak pada sumbu x, y, dan z [22]. Karakteristik metamaterial ditentukan dengan pengolahan data parameter S (spektrum) berupa S12 (refleksi) dan S21 (transmisi).



**Gambar 3.** Ilustrasi *waveguide* karakterisasi metamaterial.

Data parameter S yang ditampilkan berupa nilai mutlak dan fasa untuk masing-masing jenis spektrum. Kedua data tersebut kemudian

ditransformasi menjadi bilangan kompleks dengan Persamaan (1) dan (2) berikut [6]:

$$S_{11} = |S_{11}|e^{i\theta_{11}} \quad (1)$$

$$S_{21} = |S_{21}|e^{i\theta_{21}} \quad (2)$$

dimana,  $|S_{11}|$  dan  $|S_{21}|$  merupakan spektrum dalam bilangan mutlak, sedangkan  $\theta_{11}$  dan  $\theta_{21}$  merupakan spektrum dalam bilangan fasa.

Karakteristik metamaterial memiliki konstanta relatif dari perbandingan antara rapat elektrostatik bahan oleh medan listrik terhadap keadaan vakum [23]. Karakteristik metamaterial juga memiliki konstanta relatif lain dari perbandingan antara respon magnetik bahan oleh medan magnet dari gelombang EM terhadap keadaan vakum [24]. Permittivitas relatif dan permeabilitas relatif dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) dan (4) model NRW berikut [25]:

$$\epsilon_r = \frac{2c}{j2\pi ft_m} \frac{1 - (S_{21} + S_{11})}{1 + (S_{21} + S_{11})} \quad (3)$$

$$\mu_r = \frac{2c}{j2\pi ft_m} \frac{1 - (S_{21} - S_{11})}{1 + (S_{21} - S_{11})} \quad (4)$$

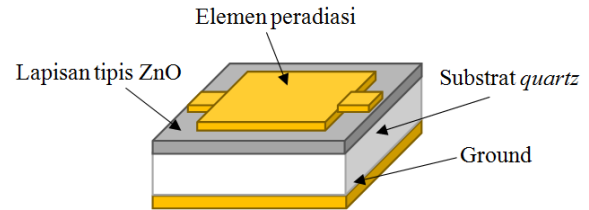
dimana,  $\epsilon_r$  adalah permitivitas relatif,  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif,  $c$  adalah kecepatan cahaya,  $f$  adalah frekuensi sumber, dan  $t_m$  adalah jarak waveport.

Konstanta medium metamaterial memiliki pengaruh terhadap pembiasan propagasi gelombang EM. Indeks bias tersebut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) model NRW berikut [25]:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (5)$$

Rancangan media sensor yang diusulkan merupakan jenis sensor mikrostrip yang terdiri dari elemen peradiasi, dielektrik, dan petanahan seperti pada Gambar 4. Elemen peradiasi dan pentanahan berupa logam tembaga dengan ketebalan 0,05 mm, sedangkan substrat

menggunakan material *quartz* dengan ketebalan 1 mm. Model tersebut akan diterapkan pada metamaterial yang telah terintegrasi dengan lapisan tipis ZnO dengan karakteristik terbaik. Terdapat konektor penghubung antara elemen peradiasi terhadap catu daya (*port*) sebesar 0,5 Watt. Pada tahap simulasi diperlukan langkah karakterisasi dan optimasi untuk mendapatkan kinerja sensor yang baik dan lebih efektif.



**Gambar 4.** Geometri struktur media sensor *hybrid* berbasis lapisan tipis ZnO dan metamaterial.

Karakteristik kinerja sensor dapat diidentifikasi melalui beberapa parameter seperti rugi daya (*return loss*) dan lebar pita (*bandwidth*). Return loss merupakan koefisien refleksi dalam bentuk logaritmik yang menunjukkan daya yang hilang karena antena dan saluran transmisi tidak matching atau tidak sesuai [26]. Hasil simulasi memperoleh grafik return loss berupa rugi daya (dB) terhadap frekuensi.

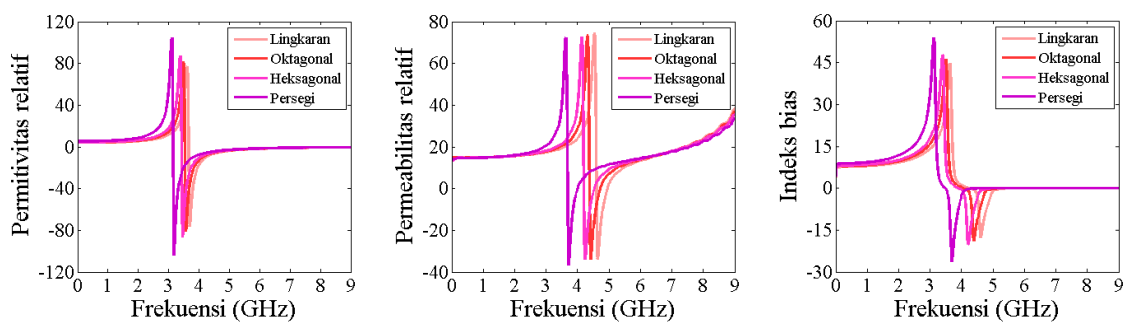
*Bandwidth* (lebar pita) dari antena didefinisikan sebagai rentang frekuensi kinerja antena, dengan beberapa karakteristik, sesuai dengan yang ditentukan oleh nilai standart, di mana karakteristik antena berada dalam nilai yang dapat diterima pada frekuensi tengah [27]. Kategori kinerja sensor metamaterial yang diinginkan berdasarkan kriteria sensor pita lebar dengan ketentuan standar minimum yaitu *return loss*  $\leq -10$  dB dan *bandwidth*  $\geq 500$  MHz.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbedaan pola SRR dari satu unit sel struktur metamaterial memberikan frekuensi resonansi sifat optik material yang berbeda-beda seperti yang terlihat pada Gambar 5. Indeks bias setiap pola SRR memiliki perbedaan yang lebih signifikan terutama pada

pola persegi yang memberikan kedalaman resonansi lebih tinggi -27,54 pada frekuensi 3,77 GHz. Sedangkan pola lainnya memiliki sedikit perubahan kedalaman resonansi indeks bias dengan selisih -4,5 dalam lebar frekuensi 0,49 GHz. Disisi lain, permeabilitas memiliki kedalaman resonansi hampir sama dengan selisih -0,01 untuk setiap pola SRR lingkaran, oktagonal, dan heksagonal. Hal ini menjelaskan bahwa respon struktur metamaterial memiliki pengaruh yang lemah terhadap induksi medan magnet [28]. Selain itu, perbedaan kedalaman

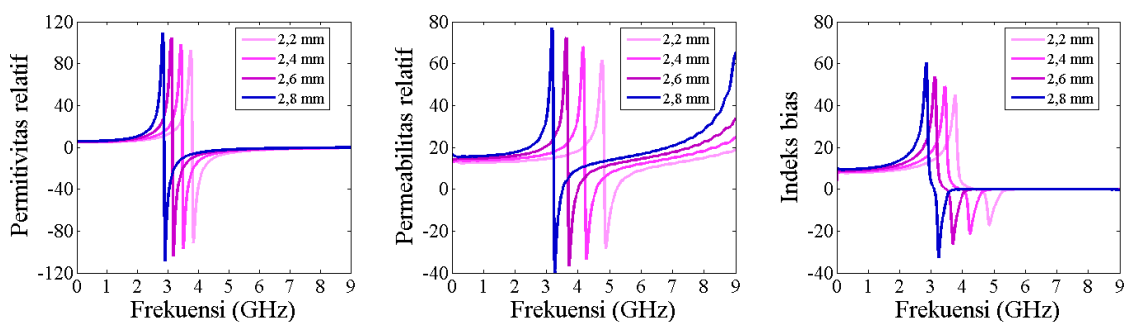
resonansi permitivitas terlihat cukup signifikan dengan selisih -4,4 untuk setiap pola SRR. Hal ini terjadi disebabkan karena ukuran dimensi inklusi logam SRR memiliki pengaruh yang besar terhadap induksi medan listrik [29]. Terlihat jelas bahwa pola SRR persegi memiliki dimensi logam yang lebih besar dibandingkan dengan lingkaran. Diikuti juga oleh pola SRR oktagonal dan heksagonal yang memiliki perubahan resonansi kedalaman permitivitas lebih sedikit dari pola SRR lingkaran.



**Gambar 5.** Karakteristik metamaterial tunggal berjari-jari 2,4 mm dengan variasi pola SRR.

**Tabel 1.** Kedalaman resonansi variasi pola SRR metamaterial.

Struktur	$\epsilon_r$	$f_0$ (GHz)	$\mu_r$	$f_0$ (GHz)	n	$f_0$ (GHz)
Lingkaran	-79,92	3,82	-34,45	4,68	-16,89	4,71
Oktagonal	-84,32	3,79	-34,46	4,47	-17,95	4,45
Heksagonal	-88,89	3,77	-34,47	4,25	-19,24	4,22
Persegi	-105,67	3,18	-36,97	3,71	-27,54	3,77



**Gambar 6.** Karakteristik metamaterial tunggal pola persegi dengan variasi jari-jari SRR.

Ukuran dimensi struktur SRR ternyata juga mempengaruhi pergeseran frekuensi resonansi yang cukup signifikan dengan batas-batas parameter sifat optik seperti yang dirangkum pada Tabel 1. Hal ini dapat dibuktikan dari hubungan frekuensi dan panjang gelombang. Pola persegi yang memiliki dimensi besar

cenderung berada pada frekuensi yang lebih rendah dari pola lainnya. Ini artinya posisi frekuensi resonansi rendah yang terjadi pada pola SRR persegi mempresentasikan ukuran panjang gelombang yang besar terhadap ukuran dimensi inklusi logam yang lebih luas. Sedangkan frekuensi resonansi yang tinggi

memiliki panjang gelombang yang lebih kecil berdasarkan luas inklusi logam yang sedikit [30]. Penjelasan ini juga berlaku untuk faktor

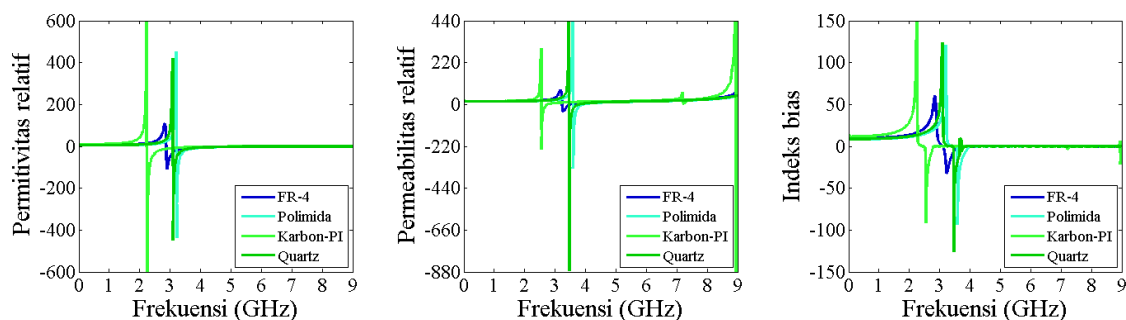
geometri dari variasi jari-jari cincin pola SRR persegi seperti yang terlihat pada Gambar 6.

**Tabel 2.** Kedalaman resonansi variasi jari-jari SRR metamaterial.

Jari-jari (mm)	$\epsilon_r$	$f_0$ (GHz)	$\mu_r$	$f_0$ (GHz)	n	$f_0$ (GHz)
2,2	-96,92	3,91	-29,85	4,96	-18,79	4,97
2,4	-99,42	3,52	-33,42	4,31	-22,92	4,21
2,6	-105,67	3,18	-36,97	3,71	-27,54	3,77
2,8	-108,49	2,90	-39,75	3,26	-32,62	3,24

Perbedaan jari-jari cincin SRR pola persegi menyebabkan pergeseran frekuensi resonansi pada permitivitas, permeabilitas, dan indeks bias sekitar 0,3 – 0,7 GHz lebih lebar dibandingkan dengan akibat dari faktor variasi pola SRR sebelumnya. Dimensi metamaterial yang besar disebabkan karena strukturnya proporsional terhadap jari-jari cincin SRR yang ditetapkan. Oleh sebab itu, pergeseran frekuensi resonansi untuk jari-jari cincin SRR yang lebih besar terjadi pada frekuensi lebih rendah atau sesuai pada panjang gelombang strukturnya. Selain itu, jari-jari cincin SRR yang semakin besar menyebabkan kedalaman resonansi permivitas, permeabilitas, dan indeks bias semakin tinggi seperti yang dirangkum pada

Tabel 2. Hal ini tentunya tidak dapat dihindarkan dari faktor perubahan dimensi struktur metamaterial yang relatif berubah berdasarkan jari-jari cincin SRR. Resonator yang dibangun dari pola SRR bertujuan untuk membangkitkan resonansi pada frekuensi tertentu. Kedalaman frekuensi resonansi yang optimal harus dibangun pada frekuensi yang sesuai dengan dimensi panjang gelombang struktur metamaterial [31]. Sehingga jika dimensi mikro metamaterial dioperasikan pada rentang panjang gelombang lebih besar atau pada frekuensi rendah, maka struktur metamaterial tidak mengalami resonansi secara optimal.



**Gambar 7.** Karakteristik metamaterial tunggal persegi berjari-jari 2,8 mm dengan variasi substrat.

**Tabel 3.** Kedalaman resonansi variasi substrat metamaterial.

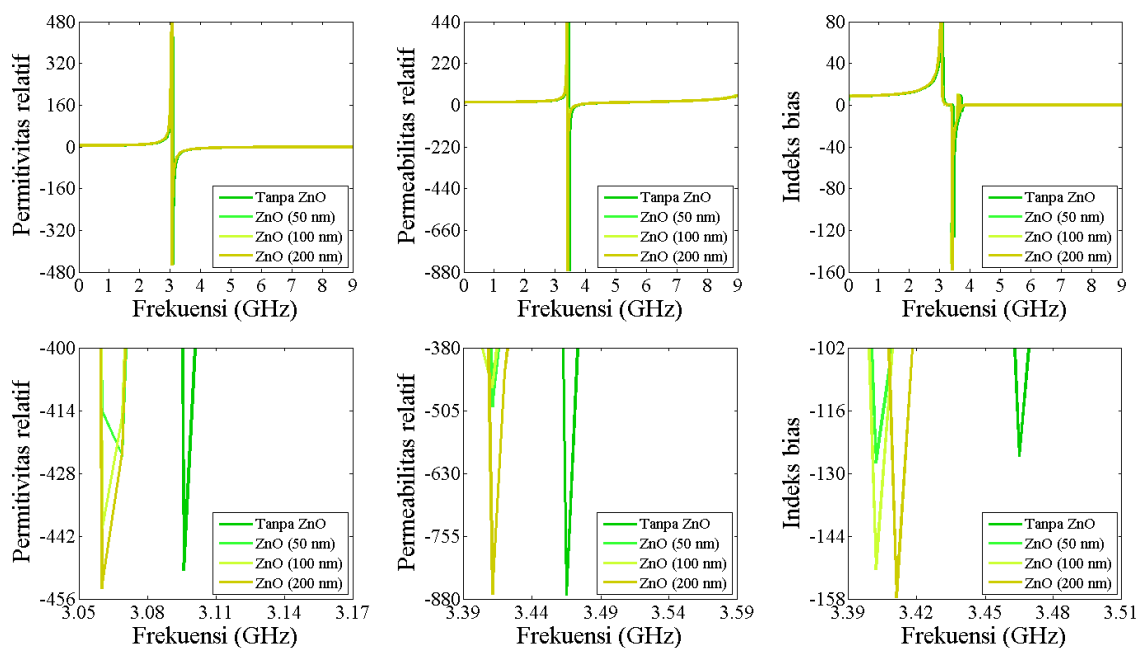
Substrat	$\epsilon_r$	$f_0$ (GHz)	$\mu_r$	$f_0$ (GHz)	n	$f_0$ (GHz)
FR-4	-108,49	2,90	-39,75	3,26	-32,62	3,24
Polimida	-598,95	3,15	-113,26	3,57	-98,63	3,58
Karbon-PI	-445,85	2,21	-225,74	2,65	-97,45	2,69
Quartz	-451,56	3,09	-878,67	3,46	-126,52	3,47

Variasi material substrat yang digunakan memiliki pengaruh yang besar terhadap

parameter sifat optik metamaterial seperti pada Gambar 7. Penggunaan bahan polimida,

karbon-PI, dan *quartz* mengalami peningkatan yang sangat drastis hingga kedalaman resonansi permitivitas maksimum -598,95. Hal ini dikarenakan karakteristik substrat berkaitan dengan permitivitas atau konstanta dielektrik. Material dengan permitivitas lebih tinggi memiliki respons yang lebih kuat terhadap medan listrik [32]. Selain itu, perubahan material substrat juga mempengaruhi sifat permeabilitas terutama pada kaca *quartz* yang mengalami kedalaman resonansi yang sangat jauh sebesar -878,67. Permeabilitas ini mencirikan material merespons kuat terhadap

induksi medan magnet yang diberikan [33]. Interaksi antara permeabilitas relatif dan permitivitas relatif menentukan indeks bias metamaterial yang semakin optimal seperti yang dirangkum pada Tabel 3. Tampak bahwa indeks bias *quartz* memiliki nilai tertinggi sebesar -126,52 dibandingkan dengan bahan substrat lain. Dengan meningkatnya permitivitas dan permeabilitas suatu bahan, indeks bias juga meningkat. Ini berarti bahwa gelombang elektromagnetik umumnya akan merambat lebih lambat melalui bahan, sehingga indeks refraksinya lebih tinggi [34].



**Gambar 8.** Karakteristik metamaterial persegi 2,8 mm pada *quartz* dengan variasi ketebalan ZnO.

**Tabel 4.** Kedalaman resonansi variasi ketebalan ZnO.

Tebal ZnO (nm)	$\epsilon_r$	$f_0$ (GHz)	$\mu_r$	$f_0$ (GHz)	n	$f_0$ (GHz)
0	-451,56	3,094	-878,67	3,464	-126,52	3,468
50	-422,43	3,069	-499,54	3,407	-127,63	3,402
100	-440,98	3,059	-470,39	3,408	-151,56	3,403
200	-453,25	3,059	-878,89	3,411	-157,95	3,412

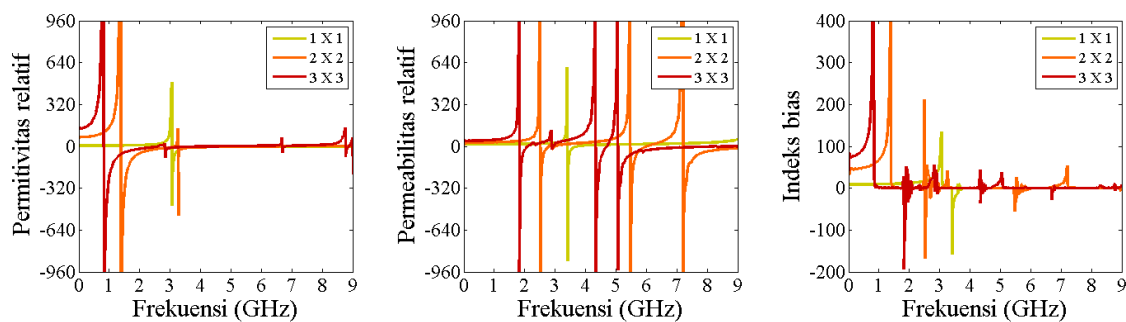
Penambahan lapisan tipis ZnO pada struktur metamaterial tidak mengalami perubahan sifat optik berdasarkan pergeseran frekuensi resonansinya. Namun setelah diteliti lebih dalam, adanya peningkatan kedalaman resonansi permitivitas, permeabilitas, dan indeks bias yang cukup signifikan seperti tampak pada Gambar 8. Tampak bahwa

kedalaman resonansi permeabilitas pada ketebalan 200 nm lebih dominan yang nilainya relatif sama dengan tanpa ZnO dengan selisih 0,22. Disisi lain, kedalaman resonansi permitivitas tanpa ZnO mengalami penurunan pada penambahan ketebalan ZnO 50 nm sebesar ~29. Namun naik secara signifikan sebesar -440,98 pada ketebalan 100 nm dan -



453,25 pada ketebalan 200 nm. Selain itu, penambahan ketebalan ZnO 200 nm pada struktur metamaterial juga mengalami hasil positif peningkatan indeks bias sebesar -157,95. Diikuti juga oleh ketebalan ZnO 50 nm dan 100 nm yang lebih rendah namun lebih tinggi dari tanpa ZnO. Hal ini membuktikan bahwa lapisan tipis ZnO menawarkan keuntungan dari sifat elektronik, optik, dan magnetnya yang memungkinkan sifat-sifat metamaterial untuk merespon secara konstruktif [35]. Pergeseran frekuensi resonansi juga terjadi dengan

penambahan ketebalan ZnO pada posisi frekuensi yang relatif sama pada 3,059, 3,408, dan 3,402 masing-masing untuk permitivitas, permeabilitas, dan indeks bias seperti yang dirangkum pada Tabel 4. Substrat *quartz* sebagai fungsi dielektrik dengan sifat transmisi yang tinggi juga membantu lapisan tipis ZnO untuk berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik seperti mentransmisikan, memantulkan, dan menyerap gelombang pada frekuensi tertentu [36].



**Gambar 9.** Karakteristik metamaterial variasi konfigurasi array dengan pola persegi berjari-jari 2,8 mm pada kaca *quartz* dan ketebalan ZnO 200 nm.

Kombinasi atau susunan SRR pola persegi secara array pada struktur metamaterial memberikan respon frekuensi resonansi yang beragam seperti pada Gambar 9. Ditemukan sejumlah frekuensi resonansi tambahan disamping resonansi yang dominan disetiap parameter optik permitivitas, permeabilitas, dan indeks bias. Metamaterial dengan susunan array SRR 2×2 memiliki frekuensi resonansi permitivitas dan permeabilitas lebih dominan dan lebar dibandingkan dengan 1×1. Namun jika dibandingkan dengan susunan 3×3 SRR lebih optimal dengan kedalaman resonansi

tertinggi pada indeks bias sebesar -193,95 pada frekuensi 1,889 GHz atau dapat dilihat pada Tabel 5. Hal ini membuktikan bahwa penambahan struktur SRR dengan konfigurasi array mengalami resonansi konstruktif [37]. Selain itu, tampak frekuensi resonansi indeks bias susunan 1×1 mengalami pergeseran sebesar ~1.6 ke arah frekuensi lebih rendah ketika susunan array diubah menjadi 3×3. Hal ini juga telah dijelaskan sebelumnya bahwa frekuensi resonansi bergantung pada dimensi panjang gelombang struktur metamaterial [38].

**Tabel 5.** Kedalaman resonansi variasi konfigurasi array.

Array	$\epsilon_r$	$f_0$ (GHz)	$\mu_r$	$f_0$ (GHz)	n	$f_0$ (GHz)
1×1	-453,25	3,059	-878,89	3,411	-157,95	3,412
2×2	-958,75	1,425	-958,73	2,495	-173,34	2,497
3×3	-959,85	0,857	-959,93	1,887	-193,95	1,889

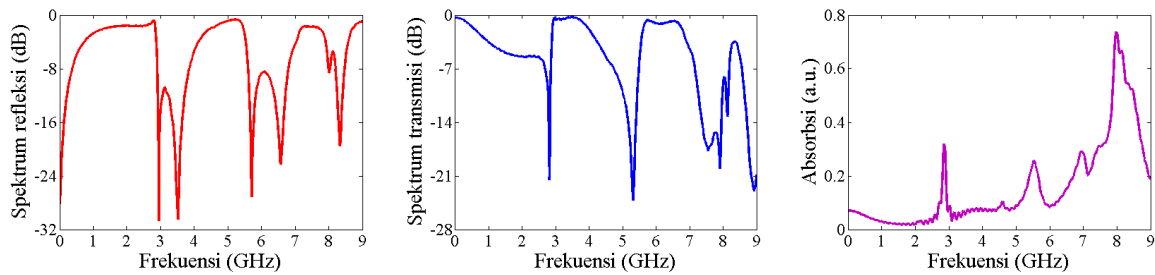
Rancangan sensor yang dimodelkan memiliki dua sambungan port daya sebagai masukan dan keluaran. Kinerja sensor dapat

diamati melalui spektrum daya keluaran yang dihasilkan. Gambar 10 menunjukkan spektrum refleksi, transmisi, dan absorpsi dari rancangan



sensor dalam keadaan tanpa sampel. Spektrum refleksi yang dihasilkan menggambarkan daya yang dipantulkan atau tidak diserap melalui struktur sensor. Berdasarkan pada spektrum refleksi, struktur sensor memiliki dua kedalaman resonansi pada lebar pita yang sama. Daya pantulan tertinggi berada pada frekuensi resonansi 2,95 – 3,55 GHz sebesar -30 dB. Sedangkan pada frekuensi tinggi 8,45 GHz

daya yang direfleksikan mengalami penurunan sebesar 4,5 dB. Hal ini menandakan bahwa distribusi daya lebih banyak dipantulkan pada struktur sensor dengan panjang gelombang yang lebih besar. Selain itu, spektrum transmisi juga menggambarkan distribusi daya yang diteruskan melewati struktur sensor tanpa diserap atau dipantulkan [39].



**Gambar 10.** Kinerja media sensor *hybrid*.

Berdasarkan pada spektrum transmisi, kedalaman resonansi -21,8 dB pada frekuensi rendah 2,85 GHz cenderung meningkat ke arah frekuensi lebih tinggi 5,36 GHz sebesar -24,6 dB. Namun pada frekuensi tinggi 8 – 9 GHz spektrum transmisi memiliki resonansi yang cacat banyak dengan kedalaman yang relatif menurun. Hal ini dibuktikan dengan adanya puncak spektrum absorpsi pada frekuensi tinggi, dimana distribusi daya diserap lebih tinggi 73% pada frekuensi tinggi ~8 GHz oleh struktur sensor pada panjang gelombang yang kecil.

## KESIMPULAN

Struktur metamaterial pola SRR persegi telah dirancang dan disimulasikan dengan karakteristik indeks bias negatif lebih tinggi -27,54 dibandingkan pola SRR lingkaran, oktagon, dan heksagonal. Perubahan jari-jari cincin logam SRR menyebabkan pergeseran merah (*red-shift*) frekuensi resonansi dari 3,77 GHz untuk  $R = 2,6$  mm menjadi 3,24 GHz untuk  $R = 2,8$  mm. Model lapisan tipis ZnO dalam struktur metamaterial menghasilkan peningkatan kedalaman resonansi permitivitas, permeabilitas dan indeks bias seiring bertambahnya ketebalan lapisan ZnO. Selain

itu, faktor konfigurasi array SRR pola persegi memberikan jumlah frekuensi resonansi yang banyak dan konstruktif dengan bertambahnya susunan array menjadi  $3 \times 3$ . Kinerja media sensor *hybrid* memberikan frekuensi resonansi yang beragam pada spektrum refleksi dan transmisi. Namun memiliki jumlah 3 lebar pita yang sama pada rentang frekuensi 2,89 – 3,52 GHz, 5,28 – 6,54 GHz, dan 7,57 – 8,46 GHz. Selain itu, spektrum absorpsi tertinggi sebesar 73% berada pada frekuensi ~8 GHz.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia dan BRIN atas dukungan dana hibah penelitian tahun 2023. Selanjutnya penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Riau dan Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

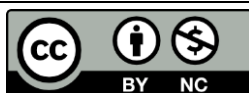
## REFERENSI

1. Vafapour, Z. (2019). Polarization-independent perfect optical metamaterial

- absorber as a glucose sensor in food industry applications. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, **18**(4), 622–627.
2. Geng, Z., Zhang, X., Fan, Z., Lv, X., & Chen, H. (2017). A route to terahertz metamaterial biosensor integrated with microfluidics for liver cancer biomarker testing in early stage. *Scientific Reports*, **7**(1), 1–11.
  3. Bakir, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave metamaterial absorber for sensing applications. *Opto-Electronics Review*, **25**(4), 318–325.
  4. Asad, M., Al Neyadi, S., Al Aidaros, O., Khalil, M., & Hussein, M. (2016). Single port bio-sensor design using metamaterial split ring resonator. *2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, 1–4.
  5. Wu, X., Su, Y., & Shi, J. (2019). Perspective of additive manufacturing for metamaterials development. *Smart Materials and Structures*, **28**(9), 093001.
  6. Saktioto, Soerbakti, Y., Syahputra, R. F., Gamal, M. D. H., Irawan, D., Putra, E. H., Darwis, R. S., & Okfalisa. (2022). Improvement of low-profile microstrip antenna performance by hexagonal-shaped SRR structure with DNG metamaterial characteristic as UWB application. *Alexandria Engineering Journal*, **61**(6), 4241–4252.
  7. Choudhury, B., Menon, A., & Jha, R. M. (2016). Active terahertz metamaterial for biomedical applications. *Active Terahertz Metamaterial for Biomedical Applications*, 1–41.
  8. Tao, R., Zahertar, S., Torun, H., Liu, Y. R., Wang, M., Lu, Y., ... & Fu, Y. Q. (2020). Flexible and integrated sensing platform of acoustic waves and metamaterials based on polyimide-coated woven carbon fibers. *ACS Sensors*, **5**(8), 2563–2569.
  9. Ivanova, T., Harizanova, A., Koutzarova, T., & Vertruyen, B. (2015). Optical characterization of sol-gel ZnO: Al thin films. *Superlattices and Microstructures*, **85**, 101–111.
  10. Liu, Y., Li, Y., & Zeng, H. (2013). ZnO-based transparent conductive thin films: doping, performance, and processing. *Journal of Nanomaterials*, **2013**.
  11. Karlsson, K. S. R., & Wondraczek, L. (2021). Strengthening of oxide glasses. *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, **1**, 391–404.
  12. Lou, C., Liu, X., Wang, Y., Li, R., Huang, L., & Liu, X. (2022). Miniature quartz tuning fork-based broad spectral coverage and high detectivity infrared spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*, **126**, 104322.
  13. Chang, S. P., Yang, R. H., & Lin, C. H. (2021). Development of indium titanium zinc oxide thin films used as sensing layer in gas sensor applications. *Coatings*, **11**(7), 807.
  14. Ali, E. M., Yahaya, N. Z., Perumal, N., & Zakariya, M. A. (2017a). Design of microstrip patch antenna at 900 MHz for charging mobile applications. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **12**(4), 988–993.
  15. Salim, A., & Lim, S. (2018). Review of recent metamaterial microfluidic sensors. *Sensors*, **18**(1), 232.
  16. Dhillon, A. S., Mittal, D., & Sidhu, E. (2017). THz rectangular microstrip patch antenna employing polyimide substrate for video rate imaging and homeland defence applications. *Optik*, **144**, 634–641.
  17. Xie, X., Wu, D., Wu, H., Hou, C., Sun, X., Zhang, Y., ... & Du, W. (2020). Dielectric parameters of activated carbon derived from rosewood and corncob. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31**(20), 18077–18084.
  18. Peimyoo, N., Wu, H. Y., Escolar, J., De Sanctis, A., Prando, G., Vollmer, F., Withers, F., Riis-Jensen, A. C., Craciun, M. F., Thygesen, K. S., & Russo, S. (2020). Engineering dielectric screening for potential-well arrays of excitons in 2D

- materials, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**(49), 55134–55140.
19. Singh, C. A., Ngangbam, C., Ranjan, A., Kumari, I., & Singh, K. J. (2017). Simulation and experimental study of ZnO thin film deposited over p-Si with Al contact. *2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE)*, 1–4.
  20. Mahmud, M., Islam, M. T., Misran, N., Singh, M. J., & Mat, K. (2017). A negative index metamaterial to enhance the performance of miniaturized UWB antenna for microwave imaging applications. *Applied Sciences*, **7**(11), 1149.
  21. Tyszka-Zawadzka, A., Janaszek, B., & Szczepański, P. (2017). Tunable slow light in graphene-based hyperbolic metamaterial waveguide operating in SCLU telecom bands. *Optics Express*, **25**(7), 7263–7272.
  22. Ali, T., Mohammad, S. A., & Biradar, R. C. (2017b, May). A novel metamaterial rectangular CSRR with pass band characteristics at 2.95 and 5.23 GHz. *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 256–260.
  23. Zhang, Q., Ma, Q., Yan, S., Wu, F., He, X., & Jiang, J. (2015). Tunable terahertz absorption in graphene-based metamaterial. *Optics Communications*, **353**, 70–75.
  24. Rybin, O., & Shulga, S. (2017). Magnetically tuned two-component microwave metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research M*, **56**, 63–70.
  25. Zarrabi, F. B., Pirooj, A., & Pedram, K. (2019). Metamaterial loads used in microstrip antenna for circular polarization. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **29**(10), e21869.
  26. Kumar, S. A., & Shanmuganatham, T. (2014). Design and analysis of implantable CPW fed bowtie antenna for ISM band applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, **68**(2), 158–165.
  27. Cismasu, M., & Gustafsson, M. (2013). Antenna bandwidth optimization with single frequency simulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62**(3), 1304–1311.
  28. Armelles, G., Bergamini, L., Zabala, N., García, F., Dotor, M. L., Torné, L., ... & Cebollada, A. (2018). Metamaterial platforms for spintronic modulation of mid-infrared response under very weak magnetic field. *ACS Photonics*, **5**(10), 3956–3961.
  29. Monticone, F., & Alù, A. (2014). The quest for optical magnetism: from splitting resonators to plasmonic nanoparticles and nanoclusters. *Journal of Materials Chemistry C*, **2**(43), 9059–9072.
  30. Krzysztofik, W. J., & Brambila, F. (2017). Fractals in antennas and metamaterials applications. *Fractal Analysis: Applications in Physics, Engineering and Technology*, 953–978.
  31. Yang, F., Wang, E., Shen, X., Zhang, X., Yin, Q., Wang, X., ... & Peng, W. (2022). Optimal Design of Acoustic Metamaterial of Multiple Parallel Hexagonal Helmholtz Resonators by Combination of Finite Element Simulation and Cuckoo Search Algorithm. *Materials*, **15**(18), 6450.
  32. Dang, Z. M., Yuan, J. K., Yao, S. H., & Liao, R. J. (2013). Flexible nanodielectric materials with high permittivity for power energy storage. *Advanced Materials*, **25**(44), 6334–6365.
  33. Thévenot, J., Oliveira, H., Sandre, O., & Lecommandoux, S. (2013). Magnetic responsive polymer composite materials. *Chemical Society Reviews*, **42**(17), 7099–7116.
  34. Jing, X., Xu, Y., Gan, H., He, Y., & Hong, Z. (2019). High refractive index metamaterials by using higher order modes

- resonances of hollow cylindrical nanostructure in visible region. *IEEE Access*, **7**, 144945–144956.
35. Roy, A. B., Das, S., Kundu, A., Banerjee, C., & Mukherjee, N. (2017). c-Si/n-ZnO-based flexible solar cells with silica nanoparticles as a light trapping metamaterial. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **19**(20), 12838–12844.
36. Zhao, Y., Hao, L., Zhang, X., Tan, S., Li, H., Zheng, J., & Ji, G. (2022). A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect. *Small Science*, **2**(2), 2100077.
37. Liu, Z., Liu, Z., Li, J., Li, W., Li, J., Gu, C., & Li, Z. Y. (2016). 3D conductive coupling for efficient generation of prominent Fano resonances in metamaterials. *Scientific Reports*, **6**(1), 27817.
38. Abdulkarim, Y. I., Deng, L., Altıntaş, O., Ünal, E., & Karaaslan, M. (2019). Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. *Physica E: Low-dimensional systems and Nanostructures*, **114**, 113593.
39. Ademgil, H., & Haxha, S. (2015). PCF based sensor with high sensitivity, high birefringence and low confinement losses for liquid analyte sensing applications. *Sensors*, **15**(12), 31833–31842.



Artikel ini menggunakan lisensi  
[Creative Commons Attribution  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)