

# Pembangkitan Terahertz pada Metamaterial Chiral Menggunakan Spektroskopi Emisi Terahertz

Juliasih Partini<sup>1\*</sup>, dan Restu Widiatmono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta

<sup>2</sup>Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA UNY, Yogyakarta

\*juliasih@ugm.ac.id

## ABSTRACT

Metamaterial is an artificial material which has a negative refractive index. Both of permittivity and permeability have a negative value to possess negative refraction. The breakthrough of metamaterial development was present as the invention of chiral structure metamaterial, especially as a terahertz (THz) source. THz emission was measured using a femtosecond Ti:Sapphire pumped terahertz emission spectroscopy system. The chiral metamaterial samples have physical size as follows: length 1,2  $\mu\text{m}$ , width 0,3  $\mu\text{m}$ , and depth 0,3  $\mu\text{m}$ . It has been produced two chiral metamaterial samples, which are 300 periodic square pattern samples which consist of a clock-wise as a right-hand sample and a counter clock-wise as a left-hand sample. The all of samples were capable to generate a THz emission over a frequency range of 0 – 2,24 THz. THz signal was occurred due to the optical rectification process as a result of an intense femtosecond laser pulses radiation on a chiral metamaterial sample. The experiment result showed that the relation between the pumping laser energy and the generated THz amplitude was a second-order function. It can be concluded that chiral metamaterial with different depth has been successfully generate elliptic polarized THz emission.

Keywords : Terahertz, chiral metamaterials, terahertz emission

## ABSTRAK

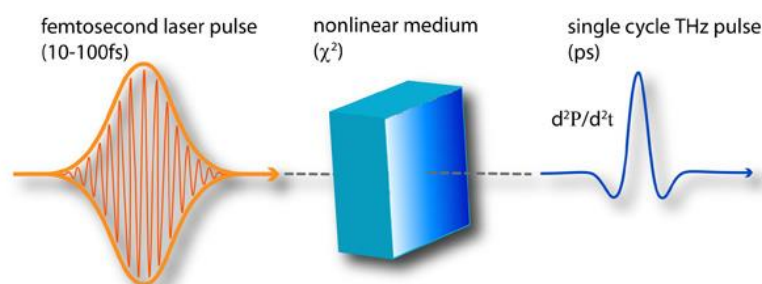
Metamaterial adalah material buatan dengan indeks bias negatif dan secara simultan memiliki permitivitas elektrik dan permeabilitas magnetik bernilai negatif. Pengembangan metamaterial mengalami terobosan dengan munculnya struktur metamaterial baru yang disebut sebagai metamaterial struktur *chiral* sebagai sumber radiasi terahertz (THz). Pengukuran sinyal emisi THz dilakukan menggunakan sistem spektroskopi emisi terahertz dengan sistem laser Ti:Sapphire femtosekon sebagai sumber radiasi. Sampel metamaterial *chiral* dengan ukuran panjang 1,2  $\mu\text{m}$ , lebar 0,3  $\mu\text{m}$  dan kedalaman 0,3  $\mu\text{m}$  susunan 300 struktur dengan arah putar kanan dan putar kiri. Kedua sampel mampu membangkitkan emisi gelombang THz dalam jangkauan frekuensi 0 – 2,24 THz. Proses rektifikasi optik diperlihatkan oleh adanya pembangkitan gelombang THz pada sampel metamaterial *chiral* oleh laser femtosekon. Hasil eksperimen memperoleh hubungan kuadrat antara energi laser pemompa dengan amplitudo gelombang THz. Hal ini dapat disimpulkan bahwa metamaterial *chiral* persegi dengan kedalaman berbeda telah berhasil membangkitkan emisi gelombang THz yang terpolarisasi eliptik.

Kata kunci : Terahertz, metamaterial chiral, emisi terahertz

## PENDAHULUAN

Ranah frekuensi terahertz (THz) baik mengenai sumber radiasi, detektor, antena, spektroskopi, pencitraan dan lain-lain, merupakan salah satu topik riset yang cukup banyak menarik perhatian pada saat ini. Frekuensi sumber radiasi ini berada di antara 300 GHz sampai 3 THz atau pada panjang gelombang 0,1 mm sampai 1 mm. Sumber-sumber yang tersedia saat ini baik dari kelompok elektronik maupun dari fotonik masih memiliki keluaran pada level *microwatt*<sup>[1]</sup>. Hal ini memunculkan agresivitas penelitian karena letak frekuensi THz ini berada belum banyak dijangkau oleh sumber gelombang lain yang dibuat oleh manusia. Frekuensi THz memberi kemungkinan untuk mendeteksi material yang tersimpan di dalam suatu obyek. Gelombang THz dapat menembus berbagai material seperti tembok, pakaian, pembungkus paket, dan lainnya dari jarak ratusan meter, tetapi tidak akan menembus jaringan tubuh manusia. Radiasi THz dengan demikian mampu menjadi sumber yang ideal untuk mendeteksi benda-benda yang tersembunyi di balik baju.<sup>[2]</sup> Gelombang THz juga dapat digunakan untuk mendeteksi komposisi kimia sebuah material<sup>[3]</sup>. Pada bidang komunikasi, ranah frekuensi THz menjanjikan *super-broadband* atau transfer data yang berlipat-lipat dari capaian yang ada pada saat ini<sup>[4]</sup>. Penelitian terkini menunjukkan ranah frekuensi ini mulai banyak digunakan untuk deteksi, sensor, maupun pencitraan biomedis<sup>[5]</sup>. Perkembangan terbaru penggunaan sumber gelombang THz telah membuka kesempatan untuk memunculkan efek non linier pada material-material baru, seperti semikonduktor<sup>[6]</sup>, sumur kuantum<sup>[7]</sup>, *ferroelectric*<sup>[8]</sup> maupun metamaterial konvensional<sup>[9]</sup>.

Rektifikasi optik merupakan salah satu proses yang terjadi dalam optika non linier orde dua yang dijelaskan dari sifat simetri medium non linier yang menghasilkan polarisasi dc pada gelombang sinusoidal<sup>[10]</sup>. Rektifikasi optik mampu mengubah medan listrik sinusoidal menjadi polarisasi searah. Perubahan polarisasi ini terjadi jika terjadi cahaya datang dengan intensitas yang meningkat<sup>[11]</sup>. Gambar 1 menunjukkan mekanisme pembangkitan gelombang THz pada proses rektifikasi optik. Cahaya dengan intensitas tinggi, dalam hal ini laser pulsa femtosekon, ditembakkan pada suatu bahan non linier. Interaksi laser pulsa dengan medium akan menghasilkan polarisasi non linier pada bahan.



**Gambar 1.** Mekanisme pembangkitan gelombang THz

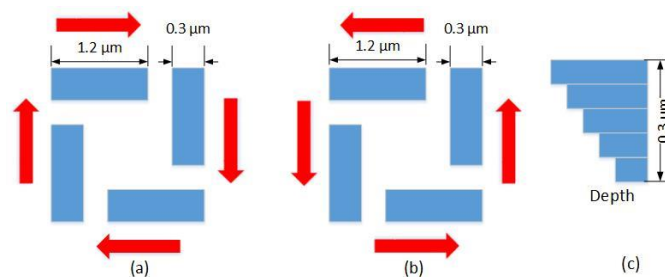
Pada proses rektifikasi optik, berlangsung proses percepatan/perlambatan muatan (yang terikat dalam bentuk dipol) serta pembangkitan gelombang THz yang bergantung pada suseptibilitas orde dua ( $\chi$ ) dari bahan non linier optik yang digunakan. Bahan yang umum digunakan pada detektor pembangkitan radiasi jangkau 0,5 – 3 THz adalah ZnTe (*Zinc telluride*). Seperti halnya pada proses optika non linier yang lain, maka pada rektifikasi optik juga didapatkan penguatan (*enhanced*) saat *surface plasmon* tereksitasi pada permukaan metal yang digunakan. Pada rektifikasi optik juga berlangsung proses pengepasan fase

optika di bahan nonsentrosimetrik seperti ZnTe dan LiNbO<sub>3</sub> [12]. Koefisien konversi dari energi gelombang cahaya tampak menjadi energi gelombang THz masih sangat terbatas nilainya yaitu  $10^{-6}$  sampai  $10^{-9}$ . Selain itu, penelitian rektifikasi optik yang merupakan salah satu tanggap non linier pada suatu material menjadi sangat menantang, karena masih minimnya sumber bahan non linier yang dapat digunakan dalam ranah THz [13].

Riset metamaterial telah diawali dengan kajian teoritis sifat-sifat elektrodinamika bahan berindeks bias negatif dan visualisasi grafisnya. Riset teoritis ini kemudian dilanjutkan dengan kajian yang lebih spesifik tentang *magnetic surface plasmon resonance* pada bahan metamaterial. Secara khusus riset metamaterial *chiral* diawali pengusul dengan melakukan kajian teoritis gejala non linear pada bahan metamaterial dan gejala *circular dichroism* pada metamaterial *chiral* [14]. Hasil yang diperoleh memperlihatkan adanya perubahan polaritas dan eliptisitas pada struktur *chiral* yang digunakan. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan penelitian yang difokuskan pada struktur *chiral* yang dibuat di atas suatu lapisan tipis perak menggunakan sistem *Focused Ion Beam* (FIB). Spektroskopi Emisi Terahertz digunakan untuk menyelidiki munculnya pancaran sinyal THz yang merupakan gejala optika non linier pada struktur metamaterial *chiral*. Hal ini dilakukan untuk melihat performa bahan metamaterial yang dikembangkan sebagai alternatif sumber radiasi terahertz [15].

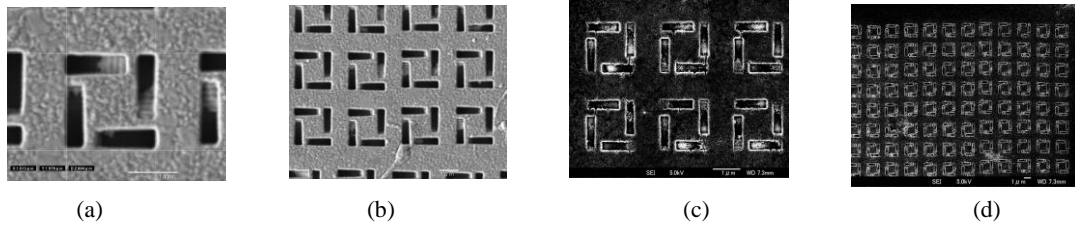
## METODE

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian adalah metamaterial *chiral* struktur persegi berbahan dasar perak (Ag) dengan dua arah putaran yang berbeda. Gambar 2 memperlihatkan pola desain *chiral* dengan ukuran struktur *chiral* persegi dengan panjang  $1,2 \mu\text{m}$ , lebar  $0,3 \mu\text{m}$ , dan kedalaman  $0,3 \mu\text{m}$ . Arah panah yang membentuk arah putar kanan atau putar kiri menunjukkan kedalaman yang berbeda pada tiap pola persegi yang dibentuk di atas lapisan tipis perak.



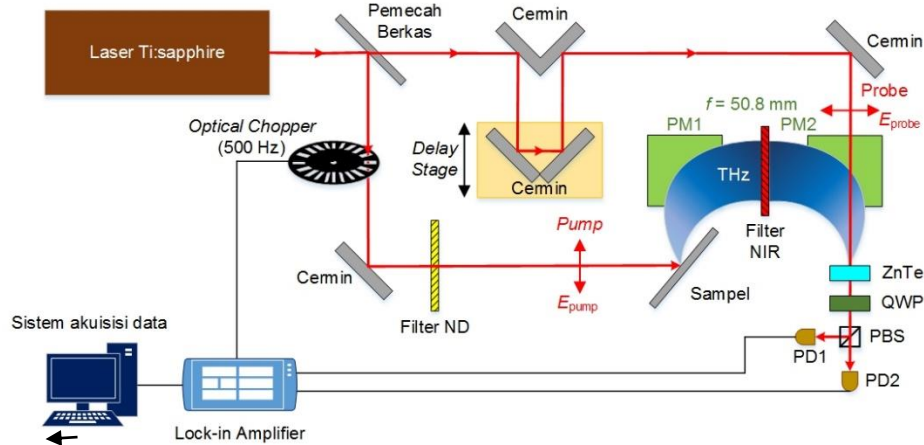
**Gambar 2.** Desain Metamaterial *Chiral* (a) sampel 1 (arah ) (b) sampel 2 (arah putar kiri) (c) kedalaman pola sampel

Fabrikasi sampel menggunakan *Focus Ion Beam* (FIB) menghasilkan sampel yang mewakili perbedaan putaran *chiral* dan perbedaan jumlah struktur, yakni sampel 1 yang merupakan metamaterial *chiral* persegi yang terdiri dari 300 struktur putar kanan (searah jarum jam) dan Sampel 2 berupa metamaterial *chiral* persegi yang terdiri dari 300 struktur putar kiri (berlawanan arah jarum jam). Gambar 3 memperlihatkan beberapa citra SEM yang diperoleh, yakni (a) Sampel 1 (LEI) dengan perbesaran 17.000 (b) Sampel 1 (LEI) dengan perbesaran 9.000 (c) Sampel 2 (SEI) dengan perbesaran 12.000 dan (d) Sampel 2 (SEI) dengan perbesaran 5.000.



**Gambar 3.** Pengamatan SEM metamaterial *chiral*

Citra SEM metamaterial pada Gambar 3 menunjukkan gradasi warna hitam pada setiap persegi yang ada di struktur *chiral*, baik untuk sampel dengan putar kiri maupun putar kanan. Gradasi warna hitam menunjukkan kedalaman sampel yang berbeda, yang menjadi dasar adanya *chirality* pada struktur *chiral*. Hasil pengamatan SEM secara keseluruhan memperlihatkan bahwa metamaterial *chiral* persegi yang dihasilkan memiliki permukaan planar dan tidak memiliki cacat pada struktur maupun permukaan material. Pengukuran tanggap non linear pada sampel metamaterial *chiral* persegi menggunakan spektroskopi emisi terahertz. Gambar 4 menunjukkan susunan sistem spektroskopi emisi terahertz yang digunakan dalam eksperimen ini.



**Gambar 4.** Skema Spektroskopi Emisi Terahertz

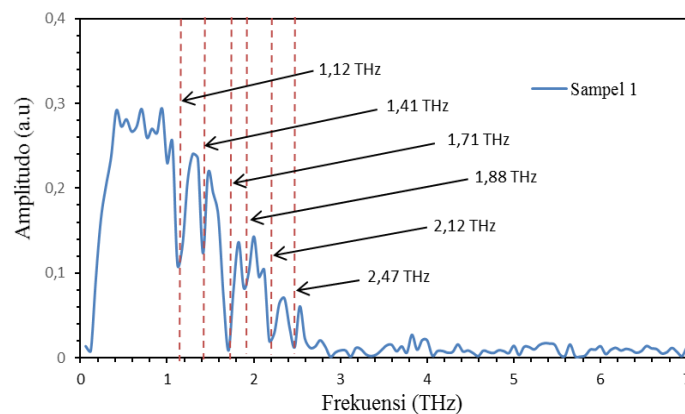
Sistem spektroskopi ini menggunakan sumber radiasi berupa laser Ti:Sapphire amplified regeneratif 100 fs dengan panjang gelombang sentral 800 nm. Laser ini, dalam pengukuran sinyal Terahertz, menggunakan mode signal pulsa. Berkas laser Ti:Sapphire kemudian terbagi menjadi dua, yakni berkas laser *probe* dan berkas laser pemompa, dengan menggunakan sebuah *Beam Splitter* (BS). Berkas laser pemompa melewati *chopper* yang diatur pada frekuensi 500 Hz dan kemudian mengenai sampel metamaterial *chiral* yang ditempatkan pada posisi  $45^\circ$  terhadap arah datangnya berkas. Serapan energi laser oleh sampel metamaterial *chiral* akan menyebabkan proses non-linear di dalam matamaterial dan menghasilkan emisi THz. Setelah sampel mampu menghasilkan emisi THz, digunakan *NIR filter* (berupa gabus *polystyrene* yang dilengkapi dengan *polyethylene* hitam) untuk mengantisipasi kemungkinan kebocoran berkas NIR yang menyertai gelombang THz. Emisi THz yang diperoleh kemudian digabungkan dengan berkas laser *probe* yang menuju ke detektor elektro optik ZnTe. *Parabolic mirror* (PM) digunakan untuk mengarahkan emisi THz tersebut agar emisi yang dihasilkan bertemu dengan berkas laser probe dan menuju ke detektor. Sinyal keluaran dari fotodetektor kemudian dimasukkan ke sebuah *lock-in amplifier*. Berkas laser probe pada saat bersamaan diarahkan melalui sebuah *delay stage* yang diatur menggunakan program Labview 210. Perangkat yang digunakan dalam

pengaturan ini adalah Labview 210, SR830 *lock-in amplifier* dan Mark-204 *Storage Controller*.

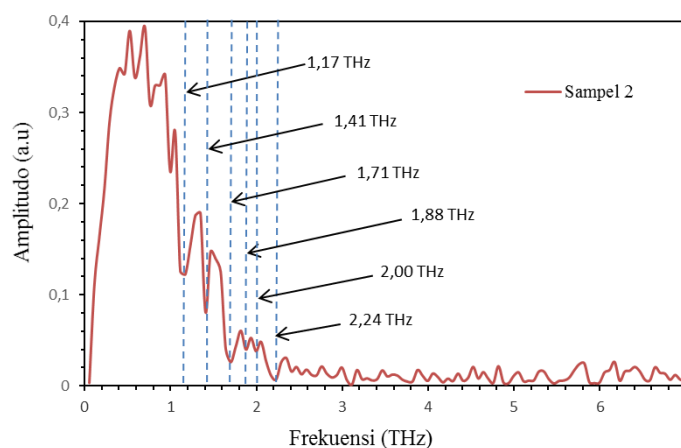
Sinyal THz diperoleh melalui *scanning delay stage* berkas probe serta mencatat respon fotodiode pada tiap-tiap waktu. Transformasi fourier digunakan untuk mendapatkan spektrum sinyal THz dalam fungsi frekuensi. Analisa hasil sinyal THz digunakan untuk memahami mekanisme pembangkitan gelombang THz sebagai salah satu hasil proses interaksi non linier antara gelombang elektromagnetik dengan medium *chiral*. Analisa rektifikasi optik didasarkan pada pengukuran amplitudo sinyal THz terhadap input daya laser femtosekon yang digunakan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis gejala optika non linear pada metamaterial *chiral* dilakukan dengan spektrum emisi yang terbentuk pada masing-masing sampel. Hasil ini digunakan untuk menguji kemampuan sampel untuk memancarkan gelombang THz. *Waveform* THz diperoleh berdasarkan *scanning* pada *delay stage* berkas probe serta respon fotodiode untuk tiap satuan waktu tunda. Spektrum emisi THz pada metamaterial *chiral* persegi yang tersusun atas 300 struktur memiliki bentuk sinyal seperti yang nampak pada Gambar 5 dan Gambar 6.



**Gambar 5.** Spektrum THz metamaterial *chiral* struktur putar kanan (Sampel 1)

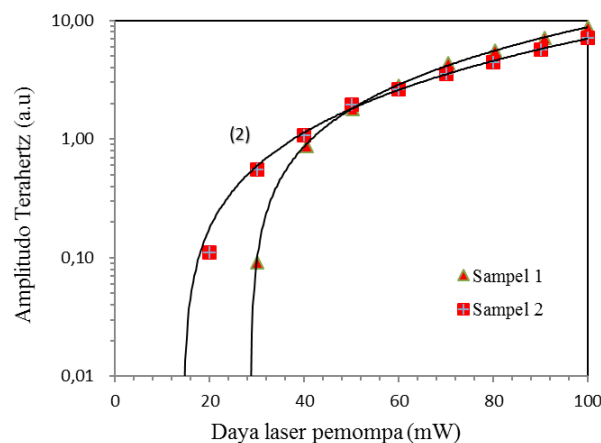


**Gambar 6.** Spektrum THz metamaterial *chiral* struktur putar kiri (Sampel 2)

Sampel 1 dan sampel 2 dalam masing-masing gambar adalah sampel metamaterial *chiral* yang memiliki susunan 300 struktur dengan arah putaran yang berbeda. Sinyal yang terukur merupakan amplitudo medan listrik gelombang THz yang sebanding dengan intensitas

gelombang THznya. Spektrum THz untuk sampel metamaterial *chiral*, baik untuk arah putaran maupun putaran kiri, menunjukkan bahwa emisi THz berlangsung dalam frekuensi 0 – 2,24 THz. Amplitudo pada spektrum THz metamaterial *chiral* persegi putaran kiri nampak sedikit lebih tinggi dibanding dengan amplitudo pada sampel metamaterial *chiral* persegi putaran kanan. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan *surface plasmon* pada permukaan sampel metamaterial *chiral* persegi putaran kiri yang bersesuaian dengan frekuensi emisi gelombang THz. Garis-garis serapan dengan besar frekuensi yang hampir sama pada spektrum THz di kedua sampel menunjukkan gejala yang sama menyertai proses emisi THz. Garis-garis serapan ini muncul karena adanya serapan molekul uap air pada frekuensi THz di sekitar sampel. Hal ini menegaskan bahwa ketidakhalusan spektrum emisi THz yang dihasilkan oleh sampel metamaterial *chiral* memang disebabkan oleh serapan uap air di sekitar sampel. Beberapa penelitian yang mengimplementasikan box vakum udara pada *setup* spektroskopi terahertz mampu mengurangi pengaruh serapan uap air di sekitar sampel. Spektrum kontinu yang diperoleh menjadi lebih halus tanpa kehadiran garis-garis serapan dalam jangkauan frekuensi emisi tersebut<sup>[16]</sup>.

Proses rektifikasi optik pada sampel metamaterial dapat diamati dengan melakukan variasi energi laser pemompa dan melihat pengaruhnya terhadap sinyal emisi THz yang dihasilkan. Hasil pengukuran variasi daya laser pemompa (*pump power*) terhadap amplitudo gelombang THz pada sampel metamaterial *chiral* ditunjukkan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut, keterangan angka dalam tanda kurung menunjukkan hubungan pangkat antara gelombang THz dengan laser pemompa yang digunakan.



**Gambar 6.** Grafik logaritmik rektifikasi optik sampel metamaterial chiral

Hasil *fitting* data kedua grafik logaritmik rektifikasi optik menyatakan bahwa sinyal emisi THz yang diperoleh sebanding dengan pangkat dua energi laser yang digunakan. Karakteristik optika non linier suatu material dijabarkan dengan menguraikan polarisasi non linier  $P_{NL}$  dalam fungsi pangkat medan listrik  $E$ . Dapat disimpulkan bahwa polarisasi non linier tersebut sebanding dengan pangkat dua dari medan listriknya. Polarisasi non linier mewakili gelombang THz sedangkan medan listrik mewakili energi laser pemompa, sehingga dapat dinyatakan bahwa gelombang THz yang muncul pada proses rektifikasi optik sebanding dengan pangkat dua laser pemompunya.

## KESIMPULAN

Kedua sampel mampu membangkitkan emisi gelombang THz dalam jangkauan frekuensi 0 – 2,24 THz. Respon non linear pada sampel metamaterial ditinjau dari proses rektifikasi optik.

Proses ini juga diperlihatkan oleh adanya pembangkitan gelombang THz pada sampel metamaterial *chiral* oleh laser femtosekon. Pada gelombang THz, energi laser pemompa akan sebanding dengan medan listrik dan amplitudo sebanding dengan polarisasi non liniernya. Hasil penelitian menunjukkan hubungan kuadratik antara energi laser pemompa dengan amplitudo gelombang THz.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 Peter, H., & Siegel, P.H. 2002. Terahertz technology. *IEEE Microwave Theory*, 50, 910 – 928
- 2 Parthasarathy, R., Globus, T., Khromova, T., Swami, N., & Woolard, D. 2005. Dielectric properties of biological molecules in the Terahertz gap. *Applied Physics Letters*, 87, 11, 113901
- 3 Davies, A. G., Burnett, A. D., Fan, W., Linfield, E H., & Cunningham, J. E. 2008. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*, 11, 3, 18 – 26
- 4 Dragoman, D. 2004. Terahertz Fields and Applications. *Progress in Quantum Electronics*, 28, 1, 1 – 66
- 5 Sigh, R., Plum, E., Zhang, W., & Zheludev, N. 2010. Highly tunable optical activity in planar achiral terahertz metamaterials. *Optics Express*, Vol. 18, No. 13, 13425 – 13430
- 6 Fan, K., Hwang, H.Y., Liu M., Strikwerda, A.C., Sternbach, A., Zhang, J., Zhao, X., Zhang, X., Nelson, K.A., & Averitt, R.D. 2013. Nonlinear terahertz metamaterials via field-enhanced carrier dynamics in GaAs. *Physical Review Letters*, 110, 217404
- 7 Hirori, H., Nagai, M., & Tanaka, K. 2010. Excitonic interactions with intense terahertz pulses in ZnSe/ZnMgSSe multiple quantum wells. *Physical Review B*, 81, 081305
- 8 Katayama, I., Aoki, H., Takeda, J., Shimosato, H., Ashida, M., Kinjo, R., Kawayama, I., Tonouchi, M., Nagai, M., & Tanaka, K. 2012. Ferroelectric soft mode in a SrTiO<sub>3</sub> thin film impulsively driven to the anharmonic regime using intense picosecond terahertz pulses. *Physical Review Letters*, 108, 097401
- 9 Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., & Soukoulis, C.M. 2009. Nonplanar Chiral Metamaterials with Negative Index. *Applied Physics Letters*, 94, 151112
- 10 Kadlec, F., Kuzel, P., & Countaz, J.L. 2005. Study of terahertz radiation generated by optical rectification on thin gold films. *Optics Letters*, Vol. 30, No. 11, 1402 – 1404
- 11 Hatano, T., Nishikawa, B., Iwanaga, M., & Ishihara, T. 2008. Optical rectification effect in 1D metallic photonic crystal slabs with asymmetric unit cell. *Optics Express*, Vol. 16, No. 11, 8236 – 8241
- 12 Kanda, N., Konishi, & Kuwata-Gonokami, M. 2007. Terahertz wave polarization rotation with double layered metal grating of complimentary chiral patterns. *Optics Express*, Vol. 15, No 18, 11117 – 11125
- 13 Liu, H., Li, G.X., Li, K.F., Chen, S.M., Zhu, S.N, Chan, C.T., & Cheah, K.W. 2011. Linear and nonlinear Fanoresonance on two-dimensional magnetic metamaterials. *Physical Review B*, 84, 235437
- 14 Juliasih, P., Kamsul, A., & Arief, H. 2017. Chirality Analysis on a Square Chiral Metamaterial. *Materials Science Forum*, Vol 901, 65-68
- 15 Juliasih, P., Kamsul, A., Arief, H., Satoshi, T., & Matsui, T. 2015. Terahertz Signal Measurement on a Chiral Metamaterial Using Terahertz Emission Spectroscopy. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 771, 125 – 128
- 16 Ramakrishnan, G., & Planken, C.M. 2011. Percolation-enhanced generation of terahertz pulses by optical rectification on ultrathin gold film. *Optics Letters*, Vol. 36, No. 13, 2572 - 2574