

Kestabilan Frekuensi Tera Hertz Gelombang Kontinyu Gap Penghasil Sinyal Untuk Spektroskopi Resolusi Tinggi

**Akbar Haqi Nasrullah¹, Widya Ambarwati², Farhan Muhammad Nabil³,
Dhandy Sabtiandy⁴, Devi Sarmilah Chomariah⁵, Felisia Deswita Silalahi⁶**

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan
Jl. Amal Lama No. 1 Kampus UBT, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia
Akbar Haqi Nasrullah, akbar354hn2002@gmail.com

Received: Maret 2022; Accepted: Mei 2022; Published: Juli 2022
DOI : <https://doi.org/10.30649/je.v4i1.92>

Abstrak

Peningkatan stabilitas daya dan frekuensi dari peralatan GaP CWTHz SG beresolusi tinggi rentang frekuensi lebar. Stabilitas daya jangka panjang menjadi di bawah 0,3% dengan menggunakan kontrol umpan balik daya pada amplifier serat. Resolusi frekuensi ditingkatkan menjadi 15 MHz dengan kontrol umpan balik frekuensi menggunakan pengukur panjang gelombang dua saluran. Nilai ini lebih dari 30 kali lebih baik daripada yang diperoleh oleh GaP THz SGs yang dipompa dengan nanose. Pada penelitian ini dirancang sebuah generator sinyal Terahertz gelombang kontinu GaP (CW-THz) berdasarkan pembangkitan frekuensi berbeda yang dapat menyetel secara otomatis dari 0,15 hingga 6,2 THz tanpa mode-hopping. Kontrol umpan balik frekuensi independen untuk *seed laser* dan kontrol umpan balik daya untuk penguatan daya optik menghasilkan akurasi dan stabilitas yang lebih tinggi dari gelombang THz keluaran pada saat yang sama. Setelah membangun spektrometer THz dengan generator sinyal GaP CW-THz sebagai sumber cahaya, kami telah memastikan resolusi frekuensi menjadi 15 MHz dengan pengukuran lebar Doppler dari penyerapan uap air di ruang vakum, dan reproduktifitas frekuensi berada dalam 5 MHz kemudian dibandingkan dengan data frekuensi penyerapan.

Kata kunci: Terahertz, pembangkit sinyal, spectrometer

Abstract

Improved the power and frequency stability of the high-resolution GaP CWTHz SG over a wide frequency range. The long-term power stability becomes below 0.3% by using the power feedback control in the fiber amplifier. Frequency resolution is increased to 15 MHz by frequency feedback control using a dual channel wavelength meter. This value is more than 30 times better than that obtained by nanose-pumped GaP THz SGs. We built a GaP continuous wave terahertz signal generator (CW-THz) based on different frequency generation which can auto tune from 0.15 to 6.2 THz without mode-hopping. Independent frequency feedback control for the seed laser and power feedback control for the optical power amplifier provide higher accuracy and stability of the output THz waveform at the same time. Having built a THz spectrometer with a CW-THz GaP signal generator as light source, we have confirmed the frequency resolution to be 15 MHz by Doppler width measurement of

the absorption of water vapor in vacuum, and the frequency reproducibility is within 5 MHz by comparing with absorption frequency data.

Key words: Terahertz, signal Generator, spectrometer

I. PENDAHULUAN

Spektroskopi inframerah (IR) adalah salah satu teknik spektroskopi yang paling umum dan banyak digunakan untuk identifikasi dan analisis kuantitatif bahan organik. Garis serapan yang diamati pada kisaran Mid-IR umumnya sesuai dengan mode getaran gugus fungsi dalam molekul. Sebaliknya, garis serapan dalam rentang frekuensi Tera Hertz (THz) atau Far-IR sesuai dengan mode kerangka dalam molekul atau mode antarmolekul dalam kristal.

Karena mode getaran ini unik untuk setiap molekul dan kristal, dimungkinkan untuk mengidentifikasi materi hanya dengan mengamati beberapa garis serapan. Karena mode getaran ini peka terhadap struktur kristal, spektrum serapan THz tersedia untuk membedakan polimorf dan untuk mendeteksi cacat pada kristal misalnya. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan sedikit pergeseran frekuensi garis serapan dalam kisaran THz tergantung pada pengotor doping atau tingkat dosis sinar gamma. Keakuratan frekuensi tinggi dan resolusi spektrometer THz sangat penting untuk deteksi sensitivitas tinggi cacat tersebut [1].

Sumber cahaya THz koheren monokromatik yang dapat disapu dengan frekuensi luas harus ideal untuk spektrometer semacam itu. Spektroskopi Domain Waktu THz (TDS) paling umum digunakan untuk men-dapatkan spektrum serapan THz [4]. Ini adalah sistem yang sangat baik dan nyaman yang disusun hanya dengan perangkat operasi suhu kamar. Namun sulit untuk mendapatkan resolusi tinggi, karena membutuhkan waktu gerbang yang lama untuk pemrosesan sinyal dari sistem tipe Fourier tersebut.

Gelombang THz CW monokromatik juga dapat dicapai dengan menggunakan GaAs suhu rendah (LTG) sebagai photomixer menggunakan dua laser semikonduktor dan terbukti berguna untuk spektroskopi THz reso-lusi tinggi. Namun, rentang frekuensi terbatas karena daya keluaran sistem photomixer memiliki maksimum sekitar 100 GHz dan menunjukkan pelemahan eksponensial dengan peningkatan frekuensi.

Pada penelitian ini telah dikembangkan rentang frekuensi yang luas, generator sinyal gelombang THz daya tinggi (THz-SG) menggunakan kristal Gallium Phosphide (GaP). Prinsipnya didasarkan pada pembangkitan frekuensi yang berbeda (DFG) antara dua pancaran pulsa inframerah melalui eksitasi fonon

Mode polariton di bawah kondisi pencocokan fase noncollinear sudut kecil. Pada tahap pertama, laser pulsa nanodetik digunakan untuk menye-diakan pancaran pompa untuk DFG. Meskipun rentang lebar tunable frequency (0,3 - 7,5 THz) dan daya tinggi (1,5 W, daya puncak maksimum) dapat dicapai, resolusi frekuensi dibatasi hingga 500 MHz oleh batas transformasi Fourier [2].

Pada penelitian ini telah berhasil dikembangkan GaP Continuous Wave (CW)-THz SG dengan metode DFG yang sama. Gelombang THz CW lebih unggul daripada gelombang THz berdenyut terutama dalam hal resolusi frekuensi. Namun, akurasi frekuensi gelombang CW THz tidak tinggi karena sinar laser pompa berada dalam mode *free running*. Dan masih banyak kekuatan sinar pompa yang diperkuat oleh penguat serat optik tidak memiliki stabilitas yang cukup terhadap sapuan frekuensi halus terutama karena gangguan pada detektor daya. Peningkatan

resolusi GaP CW-THz SG dengan stabilisasi frekuensi dan daya laser pompa.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan mempersiapkan skema spektrometer THz yang menggunakan GaP CW-THz SG sebagai sumber cahaya. Konfigurasi dasar untuk THz DFG dalam GaP telah dijelaskan sebelumnya. Balok pompa tetap frekuensi dan berkas sinyal variabel frekuensi dikirim dari laser umpan balik terdistribusi (DFB, Toptica DLDFB) dan dioda laser rongga eksternal (ECLD, NewFocus Velocity).

Panjang gelombang ECLD dapat dikontrol dari 1050 hingga 1074 nm (279,1 hingga 285,5 THz) tanpa mode melompat dengan memutar kisi difraksi secara kasar dengan aktuator motor (resolusi 20 pm) dan tepatnya dengan aktuator piezoelektrik (resolusi lebih baik dari 10 FM). Penyetelan frekuensi bebas *mode-hopping* jangkauan luas seperti itu diperoleh terutama dengan lapisan anti refleksi yang sangat baik pada kristal laser semikonduktor dan dengan menerapkan geometri Harvey-Myatt di mana panjang rongga dikendalikan umpan balik terus menerus pada setiap frekuensi [3].

Panjang gelombang laser DFB dapat disetel melalui arus operasi dan suhu dari 1071,7 hingga 1074,4 nm (279,0 hingga 289,7 THz). Setiap berkas diperkuat oleh penguat serat optik yang didoping ytterbium yang dipelihara dengan polarisasi (FA, FITEL HPU-60217).

Daya keluaran dipantau oleh fotodiode dan dapat dikontrol umpan balik agar konstan hingga 5 W melalui arus untuk laser pompa dalam FA. Masing-masing dari dua berkas difokuskan ke titik berdiameter 300 μm di permukaan kristal GaP dengan lensa kolimator di ujung serat keluaran FA. Juga masing-masing panjang gelombang dipantau oleh pengukur panjang gelombang dua saluran

(HighFinesse, WS7) dan umpan balik dikendalikan melalui aktuator piezoelektrik untuk ECLD, dan melalui arus untuk laser DFB.

Keakuratan absolut dari pengukur gelombang dijamin hingga 60 MHz dengan kalibrasi yang sering dengan panjang gelombang standar. Namun akurasi frekuensi THz yang dihasilkan tidak bergantung pada akurasi absolut tetapi pada akurasi relatif untuk pengukuran panjang gelombang dua sinar IR, yang umumnya lebih mudah diperoleh dan diperkirakan beberapa MHz. Polarisasi dua balok disesuaikan tegak lurus satu sama lain dengan memiringkan output serat, dan keduanya digabungkan dengan polarizer planer.

Untuk mendapatkan daya keluaran gelombang THz tinggi dengan kondisi pencocokan fase nonlinear yang diinginkan, diperlukan kontrol yang tepat dari *overlap* sudut kecil antara dua balok di dalam kristal GaP diperlukan pada setiap frekuensi. Pada penelitian ini dapat dengan mudah mencapai kondisi pencocokan fase optimal dengan hanya memutar satu tahap dengan menempatkan salah satu keluaran serat pada tahap goniometer dan menempatkan kristal GaP di pusat rotasi seperti yang ditunjukkan pada kontrol yang tepat dari *overlap* sudut kecil antara dua balok di dalam kristal GaP diperlukan pada setiap frekuensi [1].

Pada penelitian ini dengan mudah mencapai kondisi pencocokan fase optimal dengan hanya memutar satu tahap dengan menempatkan salah satu keluaran serat pada tahap goniometer dan menempatkan kristal GaP di pusat rotasi. Kristal GaP harus diputar untuk mencegah refleksi total terjadi di permukaan belakang terutama pada frekuensi yang lebih tinggi. Gelombang THz yang dihasilkan berjalan melalui empat reflektor parabola off-axis dan terdeteksi oleh bolometer Si berpendingin 4-K. Salah satu sinar insiden dipotong pada 187 Hz, dan penguat pengunci digunakan untuk pengurangan

kebisingan untuk mendeteksi gelombang THz.

Karena jalur gelombang THz bergantung pada frekuensinya, sampel ditetapkan pada titik silang gelombang THz. Seluruh jalur gelombang THz dibersihkan oleh udara kering dari titik embunnya kurang dari -50°C untuk menghindari efek penyerapan uap air. Lembar polietilen hitam digunakan sebagai filter potongan IR.

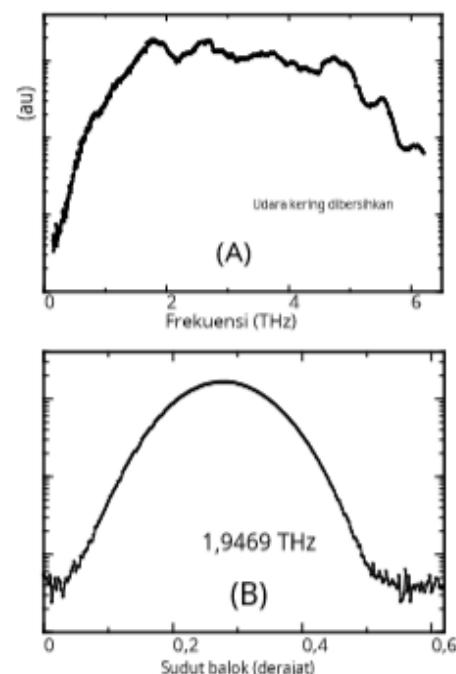
Dari Gambar 1 memungkinkan adanya divergensi berkas lebih besar karena diameter berkas yang lebih kecil terfokus pada kristal GaP. Dibandingkan daya maksimum dengan tingkat kebisingan lantai, rasio S/N maksimum lebih baik dari 500 dengan menggunakan bolometer Si sebagai pendeksi. Kami juga dapat mengamati daya THz bahkan dengan detektor L-alanin triglisin sulfat (DLATGS) piro-listrik yang beroperasi pada suhu kamar.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik untuk Generator Sinyal GaP CW-THz

Karakteristik sinyal GaP menunjukkan spektrum daya THz mengukur berbagai panjang gelombang ECLD dari 1050 hingga 1072,72 nm dalam langkah 20 pm. Frekuensi dihitung dari panjang gelombang yang ditetapkan dan dikontrol pada setiap titik pengambilan sampel. Bentuk umum spektrum hampir sama dengan THz SG, karena bentuknya didominasi terutama oleh spektrum serapan kristal GaP. Pada penelitian ini menggunakan pembangkitan daya THz dari 0,15 hingga 6,2 THz, saat panjang gelombang DFB disetel ke 1073,3 nm. Frekuensi terendah dibatasi oleh pengurangan daya keluaran THz yang mendekati tingkat kebisingan. Dan frekuensi tertinggi (6,2 THz) dibatasi oleh rentang ECLD yang dapat ditala yang dapat memasok daya yang cukup untuk pengoperasian FA yang aman.

Disarankan sangat berhati-hati dalam mengoperasikan FA pada jarak aman, hal ini menunjukkan hubungan daya keluaran THz dan sudut sinar antara dua sinar IR pada 1,9469 THz. Sudut pencocokan fase untuk frekuensi ini adalah 0,2775 deg, dan bandwidth pencocokan fase, yang didefinisikan sebagai lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM), adalah 0,165 deg. Bandwidth pencocokan fase lebih besar dari itu.



Gambar 1. (a) Spektrum daya GaP CW-THz SG. (b) Daya output THz di dekat sudut pencocokan fase pada 1,9469 THz.

Namun, itu tidak tersedia untuk penggunaan praktis, karena rasio S/N maksimum tidak melebihi 10. Hal ini menunjukkan ketergantungan pada frekuensi untuk laser DFB dan ECLD tanpa kontrol umpan balik frekuensi. Meskipun laser DFB memiliki hubungan pendek yang besar fluktuasi jangka (deviasi standar $\sigma \sim 80$ MHz), penyimpangan jangka panjang sedikit. Sebaliknya, fluktuasi jangka pendek untuk ECLD adalah beberapa MHz, meskipun

penyimpangan jangka panjang sebesar 100 MHz selama 1 jam.

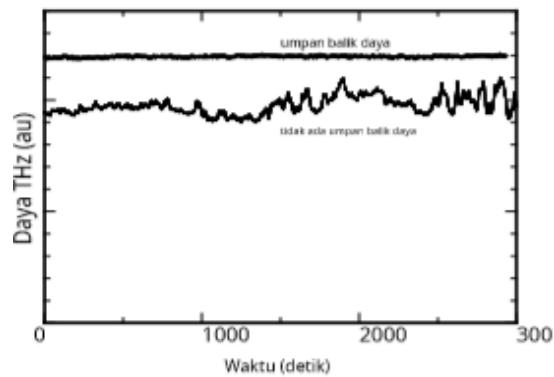
Gambar 3(c) dan (d) menunjukkan ketergantungan waktu frekuensi untuk laser DFB dan ECLD dengan kontrol umpan balik panjang gelombang. Periode umpan balik adalah 100 ms yang merupakan kecepatan perpindahan untuk mengukur panjang gelombang dua saluran. Standar deviasi fluktuasi untuk ECLD dan DFB adalah 1,34 dan 5,84 MHz, dan tidak ada pergeseran jangka panjang sama sekali [4].

Dalam kasus tanpa kontrol umpan balik daya, laser pompa di dalam FA digerakkan dengan arus konstan. Fluktuasi daya THz berada di bawah 0,3% dan lebih dari 20% untuk dengan dan tanpa kontrol umpan balik daya. Karena amplitudo fluktuasi dengan kontrol umpan balik adalah tingkat yang sama dengan derau gelap, derau itu terutama disebabkan oleh sistem deteksi daripada fluktuasi dalam kekuatan pancaran kejadian. Kontrol independen pada laser benih untuk panjang gelombang dan pada FA untuk daya memungkinkan stabilitas dan reproduktifitas tinggi untuk pengukuran spektral.

Pengukuran Penyerapan Uap Air dalam Vakum

Pengukuran spektral akurat tinggi tanpa kalibrasi yang rumit dicapai dengan pengambilan sampel frekuensi akurat di setiap titik. Gambar 2 menunjukkan diagram skematis pengukuran penyerapan uap air dalam ruang vakum.

Sebuah ruang vakum, yang panjang jalur cahaya adalah 50 mm, digunakan untuk pengukuran penyerapan gas. Jendela terbuat dari polimer sikloolefin (COP), memiliki transmisi tinggi untuk cahaya tampak dan gelombang terahertz. Setiap permukaan dari dua jendela tidak sejajar untuk menghindari pinggiran interferometri.



Gambar 2. Stabilitas jangka panjang tipikal dari daya output THz pada 1,9469 THz dengan dan tanpa kontrol umpan balik daya untuk FA

Tekanan yang dipantau oleh pengukur Pirani dikendalikan oleh evakuasi dengan pompa molekuler turbo dan injeksi uap air melalui katup jarum yang terhubung ke bejana berisi air murni. Tekanan latar belakang sebelum pengenalan uap air di bawah 10–3Pa dipantau oleh pengukur Penning. Gambar 6 menunjukkan spektrum transmitansi untuk penyerapan uap air pada 5,107285 THz dalam kisaran tekanan dari 3 hingga 2 kPa. Periode pengukuran adalah 10 fm, setara dengan ~2,7 MHz, yang merupakan resolusi tampilan minimum untuk mengukur panjang gelombang.

Perbedaan antara pengukuran kami dan database JPL (5,107281 THz) untuk garis serapan adalah sekitar 4 MHz. Meskipun lebar garis penyerapan menurun dengan penurunan tekanan pada awalnya, kemudian lebar garis mendekati nilai konstan (~20 MHz) dan hanya intensitas penyerapan yang menurun di bawah 80 Pa [2]. Pada prosedur yang sama, spektrum transmitansi untuk penyerapan uap air pada 2.773985 dan 1.097370 THz diukur dengan parameter tekanan ketergantungan tekanan FWHM dari tiga penyerapan uap air.

FWHM dievaluasi dengan pemasangan Gaussian setelah mengubah transmisi menjadi absorbansi. Pada tekanan rendah di bawah 100 Pa,

perhitungan cocok untuk mengukur spektrum. Ini pasti karena lebar Lorentzian tidak efektif pada tekanan rendah seperti itu. Perbedaan antara pengukuran kami dan data JPL (2,773977 THz dan 1,097365 THz) untuk garis serapan adalah sekitar 8 dan 5 MHz. Nilai FWHM untuk setiap penyerapan menurun dengan penurunan tekanan dan mencapai konstan pada tekanan rendah kurang dari 100 Pa. Nilai konvergen untuk penyerapan pada 1,097370 THz tidak jelas tetapi di bawah 16 MHz, dan untuk penyerapan pada 2,773985 THz dan 5,107285 THz adalah 15 MHz dan 21 MHz.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatkan stabilitas daya dan frekuensi dari GaP CWTHz SG beresolusi tinggi rentang frekuensi lebar. Stabilitas daya jangka panjang menjadi di bawah 0,3% dengan menggunakan kontrol umpan balik daya pada amplifier serat. Resolusi frekuensi ditingkatkan menjadi 15 MHz dengan kontrol umpan balik frekuensi menggunakan pengukur panjang gelombang dua saluran.

Nilai ini lebih dari 30 kali lebih baik daripada yang diperoleh oleh GaP THz SGs yang dipompa dengan nanosec laser berdenyut cond. Rentang frekuensi kontinu untuk GaP CWTHz SG diperluas dari 0,15 menjadi 6,2 THz. Kemampuan reproduksi yang tinggi baik dalam rentang frekuensi

maupun daya memungkinkan spektroskopi THz beresolusi tinggi. Spektroskopi akurasi tinggi seperti itu sekarang siap untuk mengamati sedikit pergeseran frekuensi garis serapan yang disebabkan oleh cacat pada krista.

V. RUJUKAN

- [1] J. d. Arief, "Chirality Analysis on a Square Chiral," *Materials Science Forum*, Vol. 901, 2017.
- [2] R. d. Planken, "Percolation-enhanced generation of terahertz pulses by optical rectification on ultrathin gold film," *Optics Letters*, Vol. 36, 2011.
- [3] J. dkk, "Terahertz Signal Measurement on a Chiral Metamaterial Using Terahertz Emission Spectroscopy," *Applied Mechanics and Materials.*, Vol. 771, 2015.
- [4] J. Partini, "Pembangkitan Terahertz pada Metamaterial Chiral Menggunakan Spektroskopi Emisi Terahertz," *Indonesian Journal of Applied Physics*, Vol. 9, 2019.