

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19860010
 研究課題名(和文) 2次元プラズモン共鳴を利用した超高感度テラヘルツ検出デバイスの研究
 研究課題名(英文) The research on ultrahigh-sensitivity terahertz detector utilizing 2 dimensional plasmon resonance
 研究代表者
 メジアニ ヤーヤ ムバラク (MEZIANI Yahya Moubarak)
 東北大学・電気通信研究所・助教
 研究者番号：80436162

研究成果の概要：トランジスタ内に生じるプラズモン共鳴を利用したテラヘルツ(THz)帯動作デバイスの研究開発が活発化している。プラズモンの共鳴周波数は電子密度、ドリフト速度、およびゲート長によって定まる。プラズモン共鳴は、THz 帯電磁波 (THz 波) 放射源となるとともに、プラズモンの非線形性によって、注入 THz 波によるプラズモン励起によって整流効果が得られることが理論的に示されている。本研究では、小型集積化プロセス技術が利用可能な半導体材料を用いて開発した回折格子状 HEMT を THz 帯電磁波の検出器として利用し、実験的に THz 波検出とその構造・材料依存性を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,240,000	372,000	1,612,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	372,000	2,972,000

研究分野：テラヘルツ電子工学分野

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス、電子機器、プラズモン共鳴、テラヘルツ、電磁波、検出

1. 研究開始当初の背景

(1) THz 帯とは、周波数帯で言えば赤外線とマイクロ波との中間領域にあり、主に 100GHz から 10THz を指す領域であり、近年、非常に高い関心が集まっているテーマである。今日、THz 技術の応用は、情報通信・化学バイオ・食料の品質管理・地球環境モニタリング・セキュリティなど、多種多様な分野に拡大している。具体的には、紙や靴に隠された刃物、粉末(コデイン、コカイン、砂糖)や指紋などを探し出すことが可能なテラヘルツイメージング技術等がある。このよう

な工業的応用への基本的な要求性能としては、室温動作や高感度、広帯域な検出などが挙げられる。私が提案する検出器はナノサイズのトランジスタ内部で起きるプラズマ波に起因する物である。最近のナノテクノロジーの進歩により、チャンネル長がナノメートルサイズ (GaInAs の HEMT で言えば 60nm 程度) の新世代トランジスタの構築が可能となり、Dyakonov と Shur によって、2次元電子システム (2DES) 内部での電荷密度集合体の振動 (プラズモン) で THz 波を検出できることが理論的に証明されている。

2DES 内のプラズモンが外部からの電磁波によって励起されると、照射された電界は非線形変換メカニズムによって検知可能な直流信号に変換される。このことから、テラヘルツ帯における、室温動作可能で周波数が可変な新世代の検出器が実現可能であることがわかる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の主な目的は、セキュリティや医療等の分野に応用できる、新しいナノエレクトロニクスである THz 波検出器の開発である。すでに高電子移動度トランジスタ (HEMT) と電界効果型トランジスタ (FET) を用いた THz 波検出器の可能性は実証されており、Si-MOSFET を使った非共鳴型の検出器についての報告もある。また、以前所属していたフランス国立科学研究所のグループではシリコントランジスタを用いた THz 波検出において極小の等価雑音電力性能を立証している。今後、これらのデバイスには、小型、室温動作、発振周波数の可変性、さらには低コストといった要求が必要とされてくる。そのため、高感度・広帯域な THz 検出器を実現するためのデバイス構造・材料を追求していく。

3. 研究の方法

(1) 会津大学の Rhyzhii 教授らによってキャップ層領域の影響によって共鳴振動が減衰されてしまうために、共鳴周波数の周波数可変性能は検証できていなかった。これらの諸問題を解決する為に、感度と等価雑音電力を大幅に向上可能な回折格子状ゲートの新構造 GaN 系デバイスを提案している。GaN/AlGaIn 系は高熱や化学的に厳しい条件下でも動作するという特長があり、キャップ層が存在しない。また、ゲート電極を量子細線の格子状にすることで2次元 (2D) プラズモンを 100nm 程度の領域内に局在させることができ、プラズマ不安定性によるプラズモン増強効果を誘発することが可能である。その結果、良好な感度とノイズの低減化を実現することが可能である。現在の HEMT の感度は約 $1 \mu\text{V}/\text{mW}$ であるが、これが mV/mW 程度まで向上すると期待される。理論的な研究においても、回折格子状ゲート電極構造の導入による周波数可変型テラヘルツ検出器の性能向上が見込まれている。

4. 研究成果

(1) 回折格子状ゲート HEMT の高感度、広帯域 THz 波検出動作を調査するため、以下の実験を行った。

i) HEMT にフェムト秒パルス照射した場合の光応答特性評価実験を行った。

ii) 回折格子状ゲート HEMT にフェムト秒パ

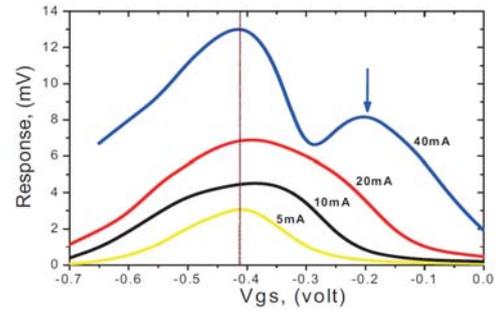


図 1. HEMT にフェムト秒パルス照射時の光応答特性 (矢印: プラズマ不安定性によるプラズモン増強効果が顕著に表れ、THz 波の検出感度が最も優れているポイント)

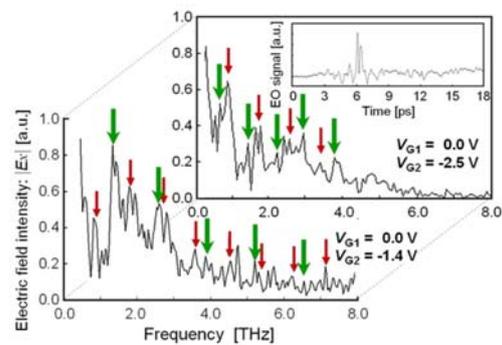


図 2. 回折格子状 HEMT にフェムト秒パルス入力時の電界放射特性

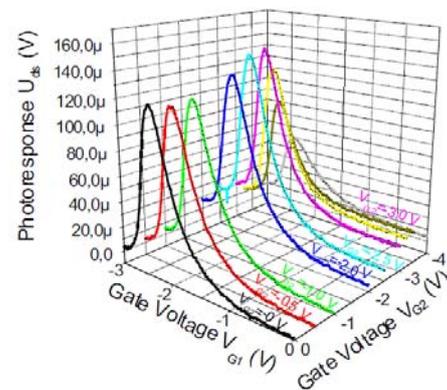


図 3. 回折格子状 HEMT に THz 波照射時の光応答特性

ルス照射した場合の電気光学サンプリング (EOS) システムを用いた THz 波観測実験 (EOS とは、時系列で THz 波を計測可能なシステム)

iii) 回折格子状ゲート HEMT に直接 THz 波を照射した場合の THz 波検出実験

i)より得られた結果 (図 1) から、フェムト秒

パルス中の THz 波成分を検出できていることが分かる。また、プラズマ不安定性が起きる条件では、良好な検出感度を示しており、回折格子状ゲート HEMT においてプラズマ不安定性による THz 波検出感度の向上が期待できる。

(2) ii)より得られた結果(図 2)から、プラズモンの基本波成分、並びに、高調波成分が観測できた。また、ゲートバイアス変調による周波数可制御性を確認した。この結果から、回折格子状 HEMT の THz 帯電磁波検出時においても、周波数可変性が保障されることが期待できる。

(3) iii)より得られた結果(図 3)から、回折格子状ゲート HEMT が THz 波を感度良く検出できた。1)、2)、3)より、高感度、広帯域な検出器の開発を押し進めることができた。得られた結果は国際会議で発表され、著名な論文誌に出版されている[雑誌論文、学会発表参照]。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Y. M. Meziani, H. Handa, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano and V. V. Popov, "Room temperature terahertz emission from grating coupled two-dimensional plasmons," *Applied Physics Letters*, 92, 201108-1-3, 2008, 有
- ② T. Otsuji, Y. M. Meziani, T. Nishimura, T. Suemitsu, W. Knap, E. Sano, T. Asano and V. V. Popov, "Emission of terahertz radiation from dual-grating-gates plasmon-resonant emitters fabricated with InGaP/InGaAs/GaAs material systems," *J. Phys. Condensed*, 20, 384206, 2008, 有
- ③ Y. M. Meziani, M. Hanabe, T. Otsuji and E. Sano, "Bolometric detection of terahertz radiation from new grating gates device," *Physica Status Solidi (c)*, 5, 282-285, 2008, 有
- ④ A. El Fatimy, R. Tauk, S. Boubanga, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, J. Lyonnet, Y. M. Meziani, T. Otsuji, M. A. poisson, E. Morvan, S. Bollaert, A. Shchepetov, Y. Ooelens, Ch. Gaquiere, D. Theron and A. Cappy, "Plasma oscillation in nanotransistors for room temperature detection and emission of terahertz radiation," *Physica Status Solidi (c)*, 5, 244-285, 2008, 有
- ⑤ T. Otsuji, Y. M. Meziani, M. Hanabe, T.

Nishimura and E. Sano, "Emission of terahertz radiation from InGaP/InGaAs/GaAs grating-bicoupled plasmon-resonant emitter Solid State Electronics," 51, 1319-1327, 2007, 有

- ⑥ Y. M. Meziani, T. Otsuji, M. Hanabe, T. Ishibashi, T. Uno and E. Sano, "Room Temperature Generation of Terahertz Radiation from a New Grating-Bicoupled HEMT Device: Size Effect," *Applied Physics Letters*, 90, 061105 1-3, 2007, 有
- ⑦ M. Hanabe, Y. M. Meziani, T. Otsuji, E. Sano and T. Asano, "Possibility of Terahertz injection-locked oscillation in an InGaP/InGaAs/GaAs two-dimensional plasmon-resonant photomixer," *IEICE Transactions on Electronics*, E90-C, 985-992, 2007, 有
- ⑧ Y. M. Meziani, T. Otsuji, M. Hanabe and E. Sano, "Threshold behavior of photo-induced plasmon-resonant self oscillation in a new interdigitated grating gate HEMT device," *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, 2409-2412, 2007, 有

[学会発表] (計 21 件)

- ① T. Otsuji, T. Nishimura, Y. Tsuda, T. Komori, A. El Fatimy, Y. M. Meziani, T. Suemitsu and E. Sano, "Plasmon-Resonant Microchip Emitters and their Applications to Terahertz Spectroscopy," *PIERS: Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, 2009.3.25.*
- ② T. Otsuji, Y. Tsuda, T. Komori, T. Nishimura, Y. M. Meziani, A. El Fatimy, T. Suemitsu and E. Sano, "Emission of terahertz radiation for spectroscopic applications utilizing two-dimensional plasmons in semiconductor eterostructures," *13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop, Hawaii, USA, 2008.12.10.*
- ③ A. El Fatimy, J. C. Delagnes, E. Abraham, E. Nguema, P. Mounaix, W. Knap, Y. M. Meziani and T. Otsuji, "Terahertz imaging based on a plasma-wave resonant detection of pulsed terahertz radiation by nanometric transistors," *European Optical Society Topical Meeting on Terahertz Science and Technology as a part of the 2008 EOS Annual Meeting, Park Expo Convention Center, Paris,*

- France, 2008.9.30.
- ④ D. Coquillat, T. Nishimura, Y. M. Mezziani, S. Nadar, F. Teppe, N. Dyakonova, S. Boubanga-Tombet, W. Knap and T. Otsuji, "Room temperature terahertz detection from a new doubly interdigitated grating gate transistor," European Optical Society Topical Meeting on Terahertz Science and Technology as a part of the 2008 EOS Annual Meeting, Park Expo Convention Center, Paris, France, 2008.9.30.
 - ⑤ Y. M. Mezziani, T. Nishimura, H. Handa, H. Tsuda, T. Suemitsu, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano, V. Ryzhii, A. Satou, D. Coquillat and F. Teppe, "Dual grating gate HEMT as a new broadband source of terahertz radiation at room temperature," European Optical Society Topical Meeting on Terahertz Science and Technology as a part of the 2008 EOS Annual Meeting, Park Expo Convention Center, Paris, France, 2008.9.30.
 - ⑥ Y. M. Mezziani, T. Nishimura, H. Handa, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano, V. V. Popov, D. Coquillat and F. Teppe, "Room temperature generation of terahertz radiation from dual grating gate HEMT's," 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, M5-D12, CalTech, Pasadena, CA, USA, 2008.9.15.
 - ⑦ T. Nishimura, H. Handa, H. Tsuda, T. Suemitsu, Y. M. Mezziani, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano, V. Ryzhii, A. Satou, V. Popov, D. Coquillat, and F. Teppe, "Broadband Terahertz Emission from Dual-Grating Gate HEMT's -Mechanism and Emission Spectral Profile," Device Research Conference, Santa Barbara, CA, 2008.6.24.
 - ⑧ T. Otsuji, Y. M. Mezziani, H. Handa, W. Knap and V. V. Popov, "Room temperature 0.5-to-6.5 THz emission from two-dimensional hot plasmons in doubly interdigitated grating-gate HEMT's," 32nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE) Abstract book, Louven, Belgium, 2008.5.19.
 - ⑨ Y. M. Mezziani, H. Handa, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano and V. V. Popov, "Room temperature terahertz emission from two-dimensional plasmons in doubly interdigitated grating gate heterostructure transistor," Conference on Lasers and Electro-Optics 2008, San Jose, CA, 2008.5.9.
 - ⑩ Y. M. Mezziani, T. Suemitsu, T. Otsuji and E. Sano, "Terahertz Emission from Two-dimensional Plasmons in High-electron-mobility Transistors Stimulated by Optical Signals," Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China, 2008.3.27.
 - ⑪ T. Otsuji, T. Suemitsu, Y. M. Mezziani and E. Sano, "Terahertz emission from high electron mobility transistors stimulated by photo-induced Plasmon instability," Virtual Conference on Nanoscale Science and Technology (VC-NST), Fayetteville AR, 2007.10.23.
 - ⑫ T. Otsuji, T. Suemitsu, Y. M. Mezziani and E. Sano, "Terahertz Emission from 2-dimensional plasmons in HEMT's stimulated by optical signals," Proc. Int. Symp. On Compound Semiconductors (ISCS), Kyoto, Japan, 2007.10.16.
 - ⑬ T. Otsuji, Y. M. Mezziani, M. Hanabe, T. Nishimura and E. Sano, "Room temperature terahertz emission from plasmonresonant high-electron mobility transistors stimulated by optical signals," Proc. SPIE, Boston, 2007.9.26.
 - ⑭ Y. M. Mezziani, T. Otsuji and E. Sano, "Emission of terahertz radiation from an interdigitated grating gates HEMT," Dig. IRMMW/THz 2007, Cardiff, UK, 2007.9.5.
 - ⑮ H. Handa, Y. M. Mezziani, M. Hanabe, T. Otsuji and E. Sano, "Generation of terahertz radiation from a dual grating gates HEMT," 7th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM), Chiba, Japan, 2007.8.23.
 - ⑯ A. El Fatimy, R. Tauk, S. Boubanga, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, Y. M. Mezziani, T. Otsuji, M.-A. Poisson and E. Morvan, "Plasma oscillation in nanotransistors for room temperature detection and emission of terahertz radiation," The 15th Int. Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIC-15), Tokyo, Japan, 2007.7.26.
 - ⑰ Y. M. Mezziani, M. Hanabe, T. Otsuji and E. Sano, "Bolometer detection of terahertz radiation from new grating

gate device,” The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, Japan, 2007.7.24.

- ⑱ T. Suemitsu, Y. M. Meziani, Y. Hosono, M. Hanabe, T. Otsuji and E. Sano, “Novel Plasmon-resonant terahertz-wave emitter using a double-decked HEMT structure,” 65th Device Research Conference (DRC), Notre Dame, IN, USA, 2007.6.19.
- ⑲ Y. M. Meziani, M. Hanabe, A. Koizumi, T. Otsuji and E. Sano, “Self oscillation of the plasma waves in a dual grating gates HEMT device,” the 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Matsue, Japan, 2007.5.14.
- ⑳ Y. M. Meziani, M. Hanabe, A. Koizumi, T. Ishibashi, T. Uno, T. Otsuji and E. Sano, “Generation of terahertz radiations from a new InGaP/InGaAs/GaAs Double Grating Gate HEMT Device,” 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science, Baltimore, Maryland, USA, 2007.5.6.

[その他]

<http://www.riec.tohoku.ac.jp/~yahya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

メジアニヤムバラク (MEZIANI Yahya Moubarak)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号 80436162

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし