

機関番号： 11301
 研究種目： 基盤研究（S）
 研究期間： 2006～2010
 課題番号： 18106006
 研究課題名（和文） 低次元プラズモンの分散特性を利用した電磁波
 伝搬モード型回路の研究
 研究課題名（英文） Exploring Novel Electromagnetic Circuits Based on
 Management of Low-Dimensional Plasmonic Dispersion
 研究代表者
 尾辻 泰一（OTSUJI TAIICHI）
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号： 40315172

研究成果の概要（和文）：本研究は、ミリ波からテラヘルツ波領域において超ブロードバンドな信号処理機能を可能とする集積型のデバイス・回路・システムの実現を目的として、低次元プラズモンの分散制御を利用したテラヘルツ領域で常温動作が可能な新規な電磁波伝搬モード型回路を創出した。具体的には、回路機能として本質的に重要な、「特異伝送」、「増幅」、「周波数変換」、「時間論理」の要素機能をグラフェンを含む半導体ヘテロ接合材料システムとナノ加工メタマテリアルプロセス技術によって創出した。

研究成果の概要（英文）：This research explored new conceptual electromagnetic devices, circuits, and systems based on management of low-dimensional plasmonic dispersion in the millimeter-wave to terahertz-wave domain for the purpose of realization of room-temperature operating integrated circuits/systems which enables ultra-broadband signal-processing functions. Study was essentially focused on the four primarily important circuit functions: 'extraordinary transmission', 'amplification', 'frequency conversion', and 'temporal logic', which has been created in semiconductor heterostructure material systems including graphene by using nanometer-metamaterial processing technology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	29,100,000	8,730,000	37,830,000
2007年度	18,100,000	5,430,000	23,530,000
2008年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2009年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
総計	86,700,000	26,010,000	112,710,000

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：低次元プラズモン、分散制御、電磁波伝搬モード型回路、電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) トランジスタやレーザダイオードをはじめとする半導体デバイスの世界では、光と電波の融合域であるテラヘルツ領域は長らく未開拓領域であった。また、当該周波数領域における超ブロードバンドな「伝送」、「周波数変換」等の視点に立ったデバイス・回路システムの研究は皆無であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、ミリ波からテラヘルツ波領域において、発振、増幅、周波数変換、論理処理等の超ブロードバンド信号処理機能を可能とする集積型の回路・システムの実現を目的として、低次元プラズモンの分散制御を利用した新規電磁波伝搬モード型回路を創出するものである。特に、分散特性の異なる複数

の低次元プラズモンモードを電磁波と選択的に結合させるというアイデアを機能実現の方法論として導入する。

3. 研究の方法

(1) 全5ヵ年の研究計画は、1) 低次元プラズモンの局在性と分散特性の関係解明とモデル化、2) プラズモン分散制御機構の実験的検証とモデル化、3) プラズモン分散制御による電磁波伝搬モード型回路機能の検証、4) 各種要素回路の構造検討・試作評価、5) 新概念回路設計論の体系化、を主要課題として構成された。これらの5つの研究計画を適材適所と有機的な相互連携によって推進された。デバイス試作は東北大電気通信研究所ナノ・スピン実験施設等で行われた。

4. 研究成果

(1) 低次元プラズモンの局在性と分散特性の関係解明とモデル化： アンゲート型プラズモン領域が系全体のプラズモン共鳴周波数を大きく抑圧することを初めて見出した。(図 1) また、電気パルス入力に対してソリトンのような極短孤立パルスが生成可能であることを初めて見出した。(図 2) グラフェン内二次元プラズモンの特異な分散特性は、標準の半導体ヘテロ接合構造における二次元プラズモンのものとは根本的に異なることを初めて明らかにした。(図 3)

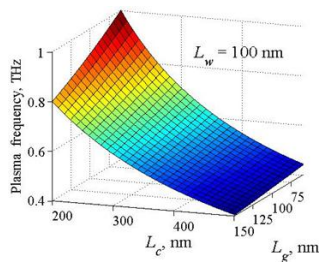


図 1. HEMT プラズモン共鳴周波数の真性ゲート長 L_g と Cap 層 L_c 依存性.

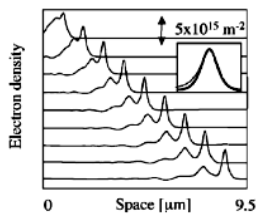


図 2. 二次元プラズモンによるソリトンパルス成長.

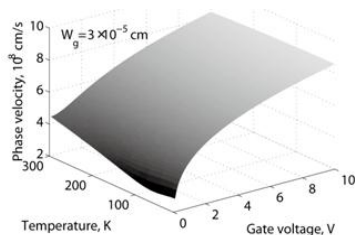


図 3. グラフェン中のプラズモン速度.

(2) プラズモン分散制御機構の実験的検証とモデル化： 室温動作で $0.5 \sim 6.5$ THz、 $1 \mu\text{W}$ 以上の高強度放射に初めて成功した(図 4)。また、周期二次元プラズモンの分散制御機構は、プラズモンモードと電磁波モードの結合姿態が電子ドリフト速度および電子濃度によって明瞭に変調できることを初めて解析的に実証した。(図 5)

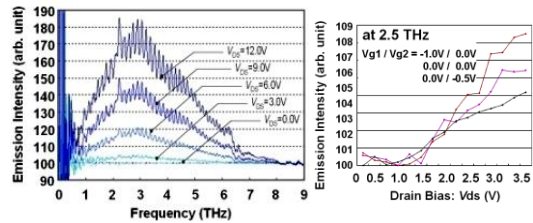


図 4. プラズモン共鳴エミッターの放射特性(左)としきい値特性(右).

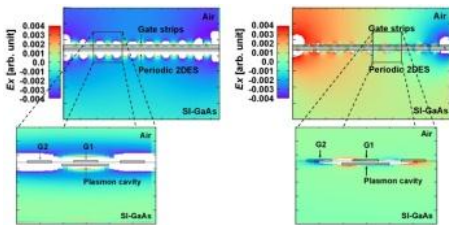


図 5. プラズモン-電磁波結合の電子濃度依存性. 左: 放射, 右: 非放射.

(3) プラズモンの分散制御による電磁波伝搬モード型回路機能の検証： プラズモニックメタマテリアルによる「特異伝送」「増幅」「周波数変換」「時間論理」の実現性を初めて見出した。

(4) プラズモン分散制御を端緒とする新たな知の創出： 世界初の光励起グラフェンからのテラヘルツ誘導放射に成功した。(図 6) 完全二次元プラズモンを利得増強媒質として利用するアイデアから理論発見が生まれ、自ら実験実証に成功した。

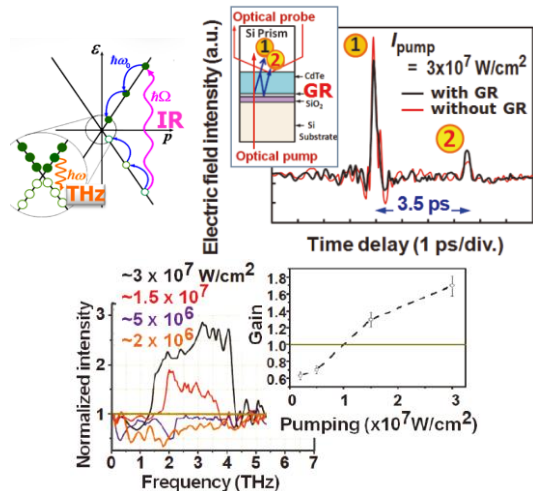


図 6. 光励起グラフェンのキャリア緩和とテラヘルツ誘導放射.

(5) プラズモニックメタマテリアルによる「時間論理」：非線形能動プラズモニックメタマテリアル導波路の伝搬特性を非線形シュレディンガー方程式によって解析した結果、電気的分散制御による反射特性の変調効果により、広帯域パルス信号に対する時間遅延回路の実現性を初めて見出した。(図7)

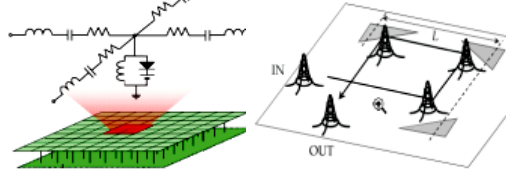


図7. 2次元左手・右手複合回路による反射制御を利用した時間遅延回路.

(6) グラフェン内二次元プラズモン・ポラリトンのテラヘルツ増幅作用の発見：光学励起もしくは電流注入で反転分布状態にあるグラフェンでは、テラヘルツ帯電磁波がグラフェン内プラズモンと結合すると、プラズモンポラリトンの伝搬によって利得増強作用が生じることを発見した。(図8)

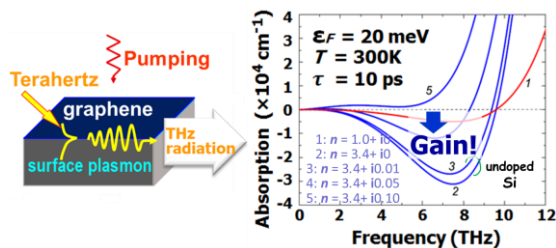


図8. グラフェン内二次元プラズモン・ポラリトンのテラヘルツ増幅作用の発見.

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240件)

- ① Taiichi Otsuji(1番目), Victor Ryzhii(6番目), 他4名, PIERs Online, 査読有, Vol. 7, pp. 308-310, 2011.
- ② Taiichi Otsuji(4番目), Victor Ryzhii(5番目), 他3名, J. Phys. : Condens. Matter, 査読有, Vol. 23, pp. 145302-1-8, 2011.
- ③ Tetsuya Suemitsu(2番目), Taiichi Otsuji(3番目), 他5名, 査読有, Phys. Stat. Solidi., Vol. 8, No. 2, pp. 346-348, 2011.
- ④ Taiichi Otsuji(14番目), 他15名, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 97, pp. 262108-1-3, 2010.
- ⑤ Taiichi Otsuji(1番目), Tetsuya Suemitsu(4番目), Eiichi Sano(6番目), Victor Ryzhii(8番目), 他4名, Comptes Rendus Physique, 査読有, Vol. 11, pp. 421-432, 2010.
- ⑥ T. Nishimura, N. Magome, Taiichi Otsuji, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, pp. 054301-1-7, 2010.
- ⑦ Taiichi Otsuji(8番目), Yahya M. Meziani(9番目), 他9名, Opt. Express, 査読有, Vol. 18, pp. 6024-6032, 2010.
- ⑧ Victor Ryzhii(1番目), Taiichi Otsuji(3番目), 他3名, J. Appl. Phys. 査読有, Vol. 107, iss. 5, pp. 054505-1-5, 2010.
- ⑨ V. V. Popov, T. Yu. Bagaeva, Taiichi Otsuji, Victor Ryzhii, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 81, pp. 073404-1-4, 2010.
- ⑩ Yahya Meziani(3番目), Taiichi Otsuji(3番目), 他11名, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 107, pp. 024504-1-4, 2010.
- ⑪ Victor Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, Taiichi Otsuji, A. A. Dubinov, V. Y. Aleshkin, J. Appl. Phys. 査読有, Vol. 106, pp. 084507-1-6, 2009.
- ⑫ A. A. Dubinov, V. Y. Aleshkin, M. Ryzhii, Taiichi Otsuji, Victor Ryzhii, Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 2, pp. 092301-1-3, 2009.
- ⑬ Y. Tsuda, T. Komori, A. El Fatimy, Tetsuya Suemitsu, Taiichi Otsuji, J. Opt. Soc. Am. B, 査読有, Vol. 26, pp. A52-A57, 2009.
- ⑭ Tetsuya Suemitsu(4番目), Taiichi Otsuji(6番目), 他4名, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, Vol. 48, pp. 04C096-1-4, 2009.
- ⑮ Victor Ryzhii, A. Satou, M. Ryzhii, Taiichi Otsuji, and M. S. Shur, J. Phys. : Condens. Matters, 査読有, Vol. 20, 384207, 2008.
- ⑯ Taiichi Otsuji, Yahya M. Meziani, T. Nishimura, Tetsuya Suemitsu, W. Knap, Eiichi Sano, T. Asano, V.V. Popov, J. Phys. : Condens. Matters, 査読有, Vol. 20, 384206, 2008.
- ⑰ Koichi Narahara, Y. Suzuki, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 103, pp. 023301-1-4, 2008.
- ⑱ Y. Suzuki, S. Nakagawa, Koichi Narahara, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 47, pp. 8756-8760, 2008.
- ⑲ Eiichi Sano, S. Taga, and K. Inafune, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 47, pp. 6359-6360, 2008.
- ⑳ Yahya M. Meziani, Taiichi Otsuji, M. Hanabe, T. Ishibashi, T. Uno, Eiichi Sano, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 90, pp.

- 061105-1-3, 2007.
- ②1 E. Vostrikova, A. Ivanov, I. Semenikhin, Victor Ryzhii, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 76, pp. 035401-1-8, 2007.
- ②2 Taiichi Otsuji, Yahya M. Meziani, M. Hanabe, T. Nishimura, Eiichi Sano, Solid State Electron., 査読有, Vol. 51, pp. 1319-1327, 2007.
- ②3 Victor Ryzhii, M. Ryzhii, Taiichi Otsuji, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 101, pp. 083114-1-4, 2007.
- ②4 Victor Ryzhii, A. Satou, Taiichi Otsuji, J. Appl. Phys., 査読有, Vol.101, pp. 024509-1-5, 2007.
- ②5 M. Ryzhii and Victor Ryzhii, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 46, pp. L151-L153, 2007.
- ②6 Taiichi Otsuji, M. Hanabe, T. Ishibashi, T. Uno, Yahya M. Meziani, Eiichi Sano, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 89, pp. 263502-1-3, 2006.
- ②7 Koichi Narahara, J. Appl. Phys. 査読有, Vol.100, pp. 064908-1-5, 2006.
- ②8 Taiichi Otsuji, M. Hanabe, T. Nishimura and Eiichi Sano, Opt. Express, 査読有, Vol. 14, pp. 4815-4825, 2006.
- ②9 Victor Ryzhii, A. Satou, W. Knap, M. S. Shur, J. Appl. Phys. 査読有, Vol. 99, pp. 084507-1-5, 2006.
- ③0 Victor Ryzhii, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 45, pp.L923-L925, 2006.

[学会発表] (計 202 件)

- ① Taiichi Otsuji, "Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano-heterostructures," 35th Int. Conf. on Infrared, Milli. THz Waves, Rome, Sept. 9, 2010.
- ② Hiromi Karasawa, Taiichi Otsuji (3 番目), Victor Ryzhii (6 番目), 他 3 名, "Observation of amplified stimulated terahertz emission in optically pumped epitaxial graphene heterostructures," CLEO: Conf. on Lasers and Electrooptics., San Jose, May 18, 2010.
- ③ Taiichi Otsuji, "Terahertz plasmon-resonant microchip emitters and their possible sensing and spectroscopic applications," IEEE SENSORS Conf., Christchurch, Oct. 28, 2009.
- ④ Hiromi Karasawa, Victor Ryzhii(5 番目), Taiichi Otsuji(6 番目), 他 3 名, "Observation of Carrier Relaxation and

- Recombination Dynamics in Optically Pumped Epitaxial Graphene Heterostructures Using Terahertz Emission Spectroscopy," CLEO-Europe: European Conference on Lasers and Electrooptics, Munich, June 19, 2009.
- ⑤ T. Nishimura, H. Hanabe, H. Tsuda, Tetsuya Suemitsu, Yahya M. Meziani, Taiichi Otsuji, W. Knap, Eiichi Sano, "Broadband Terahertz Emission from Dual-Grating Gate HEMT's -Mechanism and Emission Spectral Profile," DRC: 66th Device Research Conf., Santa Barbara, June 24, 2008.
- ⑥ Taiichi Otsuji, M. Hanabe, Yahya M. Meziani, Eiichi Sano, "Terahertz emission of radiation from InGaP/ InGaAs/GaAs grating bi-coupled plasmon-resonant photomixer," DRC: 64th Device Research Conf., Pennsylvania, June 27, 2006.

[図書] (計 4 件)

Victor Ryzhii(編著), M. Ryzhii(編著), Taiichi Otsuji, Eiichi Sano, Koichi Narahara, 他 20 名, Physics and Modeling of Tera and Nano Devices, World Scientific Publishing, 2008, 192 pages.

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: テラヘルツ電磁波変換装置
 発明者: 尾辻泰一, 他 8 名
 権利者: 東北大学, 仏 CNRS, 西アラバマ大学
 種類: 特許
 番号: PCT/JP2010/007074
 出願年月日: 2010/12/3
 国内外の別: 内外 (PCT 全加盟国)

○取得状況 (計 1 件)

名称: テラヘルツ電磁波放射素子及びその製造方法
 発明者: 尾辻泰一, 佐野栄一
 権利者: 九州工業大学, 北海道大学
 種類: 特許
 番号: 特許第 4423429 号, US-11575102, EU-2005774908
 取得年月日: 2009/12/18, 2008/12/25, 2007/7/4
 国内外の別: 国内、米国、欧州

[その他]

ホームページ等
<http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾辻 泰一 (OTSUJI TAIICHI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：40315172

(2) 研究分担者

RYZHII VICTOR (RYZHII VICTOR)
会津大学・コンピュータ理工学部・教授
研究者番号：90254078

(3) 研究分担者

佐野 栄一 (SANO EIICHI)
北海道大学・量子集積エレクトロニクス研
究センター・教授
研究者番号：10333650

(4) 研究分担者

檜原 浩一 (NARAHARA KOICHI)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00422171

(5) 研究分担者

MEZIANI YAHYA MOUBARAK
(MEZIANI YAHYA MOUBARAK)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号：80436162

(6) 研究分担者

末光 哲也 (SUEMITSU TETSUYA)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：90447186