

令和元年6月25日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05001

研究課題名(和文)電荷敏感型赤外検出器(CSIP)の量子効率に資するプラズモン効果の研究

研究課題名(英文)Study of plasmon effect on quantum efficiency of CSIP

研究代表者

金 鮮美 (Kim, Sunmi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・研究員

研究者番号：90585697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高感度 THz 検出素子(CSIP と呼ばれる電荷敏感型赤外検出器)における特異な量子井戸構造に着目し、ナノ Gap を含む金属のナノ・マイクロ構造を CSIP に導入し、量子効率に資するプラズモン効果を研究し量子効率を26%まで向上させた。さらに量子効率向上だけでなく、プラズモニクアンテナ構造による選択的な光検出およびゲートバイアスによる検出波長 Tuning への可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ Gap を含む金属ナノ構造でのプラズモン研究は高感度計測への応用が世界中で検討されている中、CSIP 素子の検出波長領域でも有る10 μm ~50 μm 領域では研究が少ないため、本研究では、これを CSIP に導入することによって、この波長領域でのプラズモン特性の理解を深めると共に CSIP の量子効率向上に大きな進展をもたらした。さらに、基礎物理 のみならず、物理、バイオ、天文など広範な分野へ適用可能な計測法が提供されるため、学術的・産業的に非常に有意義である。

研究成果の概要(英文)：Charge-sensitive infrared phototransistor (CSIP) is a highly sensitive semiconductor terahertz (THz) detector with single-photon sensitivity. Due to the excitation mechanism via intersubband transition in a quantum well, the CSIP requires careful design of the photo-coupler and proper light illumination method to achieve high quantum efficiency. We have improved the quantum efficiency up to 26% by optimizing plasmonic antenna structure (such as nanogap and cross-hole array antenna) and introducing the radiation from the backside of the CSIP substrate, which leads to efficient surface plasmon excitation in the photo-coupler. In addition to the improvement of quantum efficiency, the possibility of the selective detection with plasmonic antenna structure and the tuning of detection wavelength with gate bias was clarified.

研究分野：低温物理

キーワード：センサー 量子効率 量子井戸 プラズモニクアンテナ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

遠赤外・テラヘルツ(THz)電磁波領域は多くの重要な物質のスペクトルが含まれているため、超微弱光をより高感度でより効率的に検出することは非常に重要である。しかしこの電磁波領域(波長 $10\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$)には、可視領域と比べて1光子のエネルギーが桁違いに小さいため、超微弱光を検出することは非常に困難であった。

今まで我々は半導体 GaAs/AlGaAs の2重量子井戸構造を利用して、新たな機構の電荷敏感型赤外検出器(CSIP: Charge Sensitive Infrared Phototransistor)を構築し、単一光子検出[1]までの超高感度を実現した。しかし(i)光吸収をたった一つの量子井戸で行っている事と、さらに(ii)量子井戸中サブバンド間の光励起のため量子井戸面に垂直な電場成分が必要であることから、量子効率(全入射光子数に対する信号に寄与する光子数の比率)の面では7%程度に止まり[2]、応用可能性を拡大するため量子効率の向上が望ましい。近年ナノ Gap を含む金属ナノ構造での表面プラズモン(ナノ物質中で起る自由電子の集団電子運動)による大きな光電場増強効果を実証されており[3]、強力な光カプラとして注目を集めている中、CSIPの量子効率向上に大きな進展が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、超高感度 THz 検出素子(CSIP と呼ばれる)における特異な量子井戸構造に着目し、ナノ Gap を含む金属のナノ・マイクロ構造を CSIP に導入し、量子効率に資するプラズモン効果を研究し量子効率の向上を目指す。特に入射光子と量子井戸のサブバンド間遷移との結合を強くする事に焦点を当て、光カプラ効果やプラズモニックキャビティー効果などを研究し有望な構造を探索すると共に、背景サイエンスの着実な理解を進めることを目標とした。これによってさらに自由に入射光との結合を操る技術への展開を拓く礎となるものであり、量子効率向上だけでなく検出波長 Tuning への展開を含む新たな可能性を拓くことが期待される。

3. 研究の方法

CSIPの量子効率に資するプラズモン効果の研究を基に、下記の方法で本研究を遂行した。

(1) 有効的な光入射方向の確立

CSIPの量子効率向上の一環として、有効的な光入射方向として、GaAs基板側から光を入射する裏面入射を検討した。裏面入射を行う理由は、異なる屈折率を持つ物質界面での反射波の性質にある。つまり、裏面入射で起きる屈折率の高いGaAsから屈折率が低い空気に入射した光が、界面で波形が自由端で反射することから、より強い表面プラズモン共鳴が得られるのではないかと期待される[4]。その効果を確かめるため、図1のように裏面入射測定系を構築した。具体的には裏面入射時表面反射率を最小に抑えるため、無反射コーティング(ARC)したゲルマニウム(Ge)板をサンプル裏面に貼り付け、サンプル表面には透過した光をサンプル側に戻すように金でコーティングされたゲルマニウム半球レンズを設置する構造である。このような測定系を構築し、CSIPの表面/裏面入射により光応答特性を評価した。

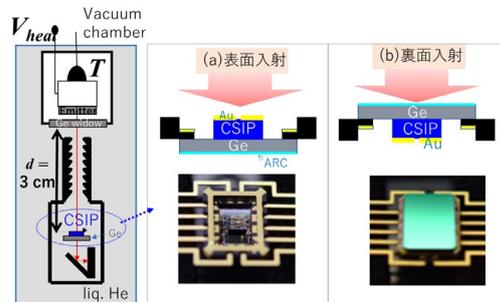


図1. 構築した (a) 表面入射、(b) 裏面入射の測定系 Setup。

(2) 新たなプラズモニックナノ・マイクロ構造を導入し、量子効率向上に最適なアンテナ構造を研究

量子効率向上に関しては、量子井戸中サブバンド間の光励起のために量子井戸面に垂直な電場成分への変換機構が必要であるため、いままで我々は光カプラとして、十字窓のアレーを持つ金属膜格子を利用し、伝播表面プラズモンによる光の有効電場を増強することで7%まで量子効率を上げることに成功した[2]。

量子効率の更なる向上のため、ナノ Gap 構造を含む新しいプラズモニックナノ構造を導入してFDTD法によるシミュレーションを通して最適な光カプラ構造を研究した。プラズモニックナノ Gap アンテナを含む金属ナノ構造を、実際に電子ビームリソグラフィによりCSIP上に作成し、分光特性及び量子効率の測定を行い、シミュレーションによる解析と共に入射光子と量子井戸中の電子を有効的に結合させるプラズモン効果を確立する。さらに長波長側まで拡大し、アンテナ効果及びキャビティー効果を実証し、理解を深めながら量子効率向上を確立する。

4. 研究成果

(1) 光入射方向の検討：裏面入射によって量子効率が向上するというシミュレーション結果が得られている。それを実験的に検証するため、Cross-hole array 構造の光カプラを持つ CSIP を作製し、表面/裏面入射による光応答特性を評価した (図 2)。その結果、量子効率は表面入射で 12% であったのに対し、裏面入射では 26% と表面入射より 2.1 倍高い量子効率が確認でき、裏面入射が量子効率向上に有効である事が分かった。

(2) ナノギャップアンテナの導入：新たな光カプラ構造として、表面プラズモンによる顕著な電場増強効果が期待されるナノギャップアンテナ構造を新たに導入した。作製したナノギャップアンテナ構造は、幅 $10\ \mu\text{m}$ で $2\sim 15\ \mu\text{m}$ のさまざまな長さを持つ形で、CSIP の Mesa 構造の段差を利用して Au の斜め蒸着により最小 $25\ \text{nm}$ のギャップを作製した。量子効率を計測した結果、16% にいたる向上を示し (図 3 参考)、従来のアンテナより高量子効率を得ることができることを示した。

その他、表面プラズモン共鳴が起きる波長に近い長さを持つナノギャップアンテナ構造が最大光信号を示すこと、ナノギャップが短いサンプルがより大きい光信号を表すことから、強い電場増強効果をもたらすギャップの寸法や配置が実験的に確認できた。さらに、ナノギャップアンテナの有効電場がサンプル Edge に集中しているため、CSIP のソースドレイン (SD) チャンネル幅が広いサンプルでは従来の Cross-hole array アンテナが優勢で、幅が小さい場合はナノギャップアンテナが優勢な信号をもたらす結果が得られ、サンプルの構造に適したアンテナ選択の必要が有ることが分かった。

(3) ドーム型キャビティー構造の導入：ドーム型キャビティーを金コーティングされた直径 $1\ \text{mm}$ のゲルマニウム半球レンズで作製し、裏面入射測定系で光検出特性評価実験を行った (図 4 参考)。裏面からの入射光はサンプルを透過してもキャビティー構造によりサンプルに戻る仕組みになっているため光検出効率の向上が予想されるが、実験結果では CSIP 内量子井戸の移動度が下がり光検出効率の顕著な向上は見られなかった。これはドーム型キャビティーの固定に使ったフォトレジストがサンプル表面まで広がり移動度の低下をもたらす事が原因で、キャビティー配置に改善余地が有ることが分かった。

(4) 多色 CSIP 検出器におけるプラズモニックアンテナ効果：3 色 CSIP のアンテナとして Cross-hole array 構造を採択し、FDTD 法によるシミュレーション解析で三つの検出波長に対して CSIP の有効電場が最大になるようにアンテナ周期を決めて、サンプルを作製した。その分光特性を測った結果、プラズモン共鳴周波数が異なるアンテナ周期を使うことによって、選択的な光検出が可能になったことが分かった。さらにアンテナにバイアス電圧を印加して量子井戸の電子密度を調節することによって、分光特性の Tuning の可能性を明らかにした (図 5)。

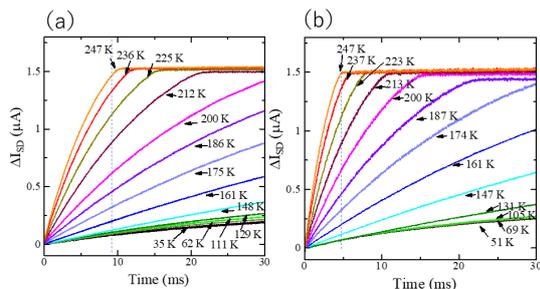


図 2. (a) 表面入射、(b) 裏面入射による光応答：Emitter 温度による検出電流 (ソースドレイン電流 ΔI_{SD}) の時間トレース。量子効率は (a) 表面入射 12%、(b) 裏面入射 26%。

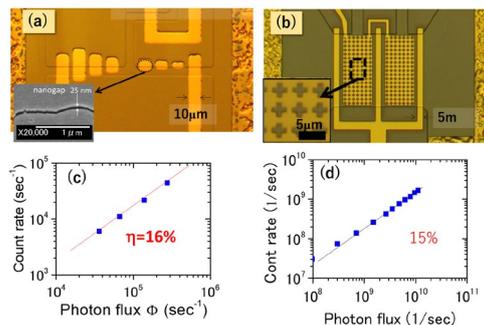


図 3. (a) ナノギャップアンテナと (b) Cross-hole array アンテナをもつ CSIP の光学顕微鏡写真。(c) ナノギャップアンテナと (d) Cross-hole array アンテナをもつ CSIP における量子効率 η の測定結果。

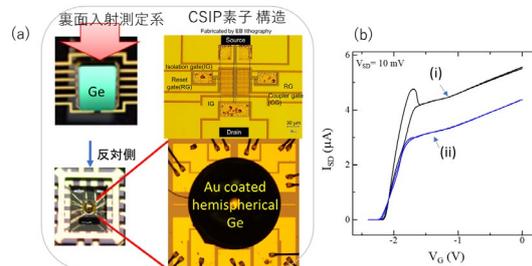


図 4. (a) ドーム型キャビティー構造と CSIP 素子の写真、(b) 4.2 K で測定した CSIP のゲート電圧によるソースドレイン電流 I_{SD} の I-V 特性：ドーム型キャビティー装着前 (i) と装着後 (ii)。

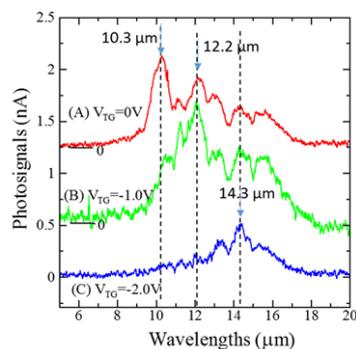


図 5. 3 色 CSIP の Top ゲート電圧 ((A) $V_{TG}=0\text{V}$, (B) -1.0V , (C) -2.0V) による分光特性。

さらにアンテナにバイアス電圧を印加して量子井戸の電子密度を調節することによって、分光特性の Tuning の可能性を明らかにした (図 5)。

(5) $20\ \mu\text{m}$ 以上の長波長側 CSIP に拡大：間遷移確率を計算して、検出波長を $20\ \mu\text{m}$ 以上になるように設計した。Si 基板上に設計した構造を分子ビームエピタキシャル法で成膜し、ナノギャップアンテナを持つ CSIP 素子を作製して光特性を評価した。分光特性の測定結果、検出波長が $20.3\ \mu\text{m}$ から $24.5\ \mu\text{m}$ まで設計された多くの CSIP 素子が $18.5\ \mu\text{m}$ 付近でディップ構造をもつ二つのピーク ($17.5\ \mu\text{m}$ と $19.6\ \mu\text{m}$ もしくは $17.5\ \mu\text{m}$ と $20.5\ \mu\text{m}$) が測定され、設計よりかなり短波長側にピークが移動及び、ピーク分離が見られた。これは短波長側にピークシフトを起こす量子井戸内の Depolarization 効果以外に、 $18.5\ \mu\text{m}$ 近傍に GaAs の 2LO フォノン吸収により影響も考える必要が有ることが分かった。

<引用文献>

- [1] Z. An, J.-C. Chen, T. Ueda, S. Komiyama and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett. 86, 2005 p.172106; S. Komiyama, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.17, 2011, p.54
- [2] P. Nickels et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 46, 2010, p.384
- [3] D. R. Ward et al., Nature nanotechnology 5, 2010, p.732
- [4] 松田 慎平、量子井戸中電子系と赤外光との結合方法の研究、東京大学博士論文、2012

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Qianchun Weng, Kuanting Lin, Kenji Yoshida, Hirofumi Nema, Susumu Komiyama, Sunmi Kim, Kazuhiko Hirakawa, Yusuke Kajihara, “Near-field radiative nano-thermal imaging of non-uniform Joule heating in narrow metal wires”, Nano Letters, Vol 18(7), 2018, pp. 4220-4225
DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01178
- ② D. Nakagawa, K. Takizawa, K. Ikushima, S. Kim, M. Patrashin, I. Hosako, and S. Komiyama, “Terahertz response in the quantum Hall effect regime of a quantum-well based charge sensitive phototransistor” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 57, 2018, pp. 04FK04-1~5
<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FK04>
- ③ K.-T. Lin, S. Komiyama, S. Kim, K. Kawamura, and Y. Kajihara, “A high signal-to-noise ratio passive near-field microscope equipped with a helium-free cryostat” Review of Scientific Instruments Vol.88, 2017, pp. 013706-1~013706-5
<https://doi.org/10.1063/1.4973985>
- ④ 金鮮美, 梶原優介, 小宮山進「電荷敏感型赤外光トランジスタ (CSIP)」レーザー学会誌“レーザー研究”, 2017 年 12 月特集号 Vol. : 45 No.12, 2017, pp.762-767
<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021431237/>
- ⑤ S. Kim, S. Komiyama, M. Patrashin, and Y. Kajihara, “An Efficient Nanogap Antenna for Charge-Sensitive Infrared Phototransistors”, Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) IEEE, 2016
<https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758954>
- ⑥ S. Kim, S. Komiyama, S. Matsuda, M. Patrashin, and Y. Kajihara, “Improved Performance of Ultrahigh-Sensitive charge sensitive infrared phototransistors (CSIP)”, International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 25, 2016, p.1640021
<https://doi.org/10.1142/S0129156416400218>

[学会発表] (計 16 件)

- ① D H. Murano, K. Ikushima, K. Takizawa, M. Otsuji, G. Ueda, S. Kim, M. Patrashin, I. Hosako, and S. Komiyama, “Nonequilibrium electron dynamics and Landau-level radiative transition in current-injected graphene”, The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON21), Nara, Japan, July 14-19, 2019
- ② 林冠廷, 翁銭春, 金鮮美, 小宮山進, 梶原優介「高感度検出器を利用した低温 THz 近接場顕微鏡の開発」第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 10p-W621-7, Mar. 10, 2019
- ③ 村野裕一, 滝沢和宏, 西村明, 生嶋健司, 金鮮美, Mikahail Patrashin, 寶迫巖, 小宮山進, 「グラフェン・ランダウ準位発光を利用したテラヘルツ光源の検討」, 日本物理学会第 73 回 2018 年春季大会, 東京理科大学, 23pPSA-29, Mar. 23, 2018
- ④ 滝沢和宏, 村野裕一, 西村明, 生嶋健司, 金鮮美, Mikahail Patrashin, 寶迫巖, 小宮山進, 「グラフェンにおけるランダウ準位発光」, 日本物理学会第 73 回 2018 年春季大会, 東京理科大学, 23pB402-7, Mar. 23, 2018
- ⑤ K. Takizawa, A. Nishimura, H. Murano, D. Nakagawa, K. Ikushima, S. Kim, M. Patrashin, I. Hosako, S. Komiyama, “Observation of current-injected Landau-level emission in graphene using a quantum-well based infrared phototransistor”, 2017 International

Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai International Center, Japan, Sep. 19-22, 2017

- ⑥ D. Nakagawa, K. Takizawa, K. Ikushima, S. Kim, M. Patrashin, I. Hosako, S. Komiyama, “Terahertz response in the quantum Hall effect regime of a quantum-well based charge sensitive phototransistor”, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai International Center, Japan, Sep. 19-22, 2017
- ⑦ Akira Kikuchi, Kuan-Ting Lin, Hirofumi Nema, Sunmi Kim, Yusuke Kajihara, “Nano-probing of Spontaneous Evanescent Waves on Thin Layer Films Derived from Local Noises”, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2017), Seoul, Korea, Nov. 14-17, 2017
- ⑧ Kazuyuki Yamanaka, Sunmi Kim, Fuminobu Kimura, Yusuke Kajihara, “Improving Quantum Efficiency of Quantum Well-based Sensitive Terahertz Detector”, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2017), Seoul, Korea, Nov. 14-17, 2017
- ⑨ K.-T. Lin, Q. Weng, H. Nema, S. Kim, K. Sugawara, T. Otsuji, S. Komiyama, and Y. Kajihara, “Near-field nanoscopy of shot noise in bilayer graphene”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-22), 2D0-9, Penn state, USA, Jul 31-Aug 4, 2017
- ⑩ K.-T. Lin, Q. Weng, H. Nema, S. Kim, K. Sugawara, T. Otsuji, S. Komiyama, and Y. Kajihara, “Nano-imaging of Excess Noise in Graphene with THz Near-field Microscopy”, The 25th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM25), S4-37, Atagawa, Japan, Dec. 7-9, 2017
- ⑪ 山中和之, 金鮮美, 木村文信, 松田誠平, 梶原優介, 「量子井戸型 THz 検出器 CSIP の量子効率改善に向けた基礎検証」2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 慶應義塾大学 (横浜市), G06, Mar. 13, 2017
- ⑫ 金鮮美, 小宮山 進, パトラシン ミハイル, 寶迫 巖, 梶原優介, 「電荷敏感型赤外光子検出器(CSIP)による多色光検出」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会場, 6a-C14-5, Sep. 6, 2017
- ⑬ S. Kim, S. Komiyama, M. Patrashin, I. Hosako, and Y. Kajihara, “Multicolor Charge-Sensitive Infrared Phototransistors (CSIP)”, 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2017), Cancun, Mexico, Aug. 27-Sep. 1, 2017
- ⑭ 金鮮美, 小宮山 進, パトラシン ミハイル, 林冠廷, 根間 裕史, 山中和之, 梶原 優介, 「裏面入射による電荷敏感型赤外光子検出器(CSIP)の量子効率向上」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟朱鷺メッセ, 16a-A35-9, Sep. 16, 2016
- ⑮ S. Kim, S. Komiyama, M. Patrashin, and Y. Kajihara, “An Efficient Nanogap Antenna for Charge-Sensitive Infrared Phototransistors”, 41st International Conference of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Copenhagen, Denmark, Sep. 25-30, 2016
- ⑯ S. Kim, S. Komiyama, M. Patrashin, and Y. Kajihara, “Improved Performance of Ultrahigh-sensitive Charge-Sensitive Infrared Phototransistors (CSIP)”, 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Device & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), Sendai, Japan, Oct. 31-Nov. 4, 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。