

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18861

研究課題名(和文) 極限高速トランジスタ開発に向けた原子層ヘテロ接合型ホットエレクトロンエミッタ

研究課題名(英文) Development of atomic-layer heterojunction based hot electron emitters toward ultra-high speed transistors

研究代表者

斗内 政吉 (Masayoshi, Tonouchi)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：40207593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：原子層ヘテロ構造の例としてInGaN層の厚さが1.5nm、2.4nmおよび3.0nmのGaN/InGaNヘテロ接合を作製し、ヘテロ接合にフェムト秒レーザーを照射し、放射されるテラヘルツ波から、量子井戸構造への光励起が、ヘテロ接合面における歪を解消すると同時にテラヘルツ帯音響フォノンパルス生成され、そのGaN中の伝搬と電荷ダイナミクスの関係を明らかにした。(現在論文執筆中)
またグラフェン半導体接合面における電荷注入を光励起で行うことで、半導体表面での高速電荷を記述する理論式を新たに導き、現在投稿中である。
またベース材料として、カーボンナノチューブを想定し、その高速電荷ダイナミクスを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層ヘテロ接合極限高速トランジスタ開発に向けて、光励起による電荷注入について検討した。GaN/InGaN超格子を作製し、電荷注入により、ヘテロ接合内の歪が解放されると同時にテラヘルツ帯音調フォノンが生成伝搬し、表面で強いテラヘルツ波を放射することを見出した。また、エミッター開発に不可欠な高速光電荷の振る舞いを記述する新しい理論式を提案し、高速トランジスタベース材料として、グラフェン・ナノチューブの利用も検討した。その結果、ナノチューブの高速エキシトン解離のメカニズムを明らかにするなど、今後の高速デバイス開発に資するホットエレクトロンエミッターの基礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：InGaN/InGaN heterostructures with thicknesses of 1.5, 2.4 and 3.0 nm in the InGaN layer were fabricated as an example of atomic layer heterostructures. The heterojunction was irradiated with a femtosecond laser, and the relationship between propagation and charge dynamics in the GaN was studied, where optical carrier injection in InGaN quantum wells resolves the distortion in the heterojunction surface stress and simultaneously generates terahertz acoustic phonon pulses. (Currently writing a paper.)

We have also developed a new theoretical equations to describe the fast electron dynamics near the surface of a graphene/semiconductor by means of photo-excitation of the carrier injection at the junction surface. We also studied the photo excitation of the excitons in carbon nanotubes, which are good candidates as a base material of the hot electron emitting junctions, and reveal their ultrafast fast carrier dynamics.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツデバイス ホットエレクトロン 超格子 歪緩和 テラヘルツ帯音響フォノン カーボンナノチューブ エキシトン 半導体表面高速電荷

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インターネットにおける莫大な情報量の増加の中、ワイヤレス情報伝達の重要性が認識されている。現在、テラヘルツ無線技術は、500GHz・100Gbps を目指して研究開発が世界中で進められている。一方、新しい電子材料のもめまぐるしく誕生している。その中で、注目を集めているのが、単原子層電子材料などナノ材料である。日々様々な材料が発見・開発され、様々なデバイス応用研究がなされて、フレキシブルデバイス応用も重要なターゲットである。それら新規材料は、超高速デバイス動作が期待され、テラヘルツ応用への期待が高まっている。しかしながら、現在取り組みられているのは、横方向電荷移動を用いる電界効果トランジスタ(FET)構造がほとんどである。FET 構造は簡単であるが、横方向を用いる点で、最終的な動作は、デバイスサイズに大きく依存することになる。そこで、ナノ材料の本質的能力を最大限利用するため、縦方向の電荷移動)を用いた究極デバイス開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究目的は、究極の高速ホットエレクトロントランジスタ構造の開発への扉を開くため、新しい「原子層ヘテロ構造テラヘルツトランジスタ開発」に向けた原子層ヘテロ接合型ホットエレクトロンエミッタ開発の基盤を築くことにある。その目的を達成するため、新しいナノ材料を中心として、超高速動作のためのホットエレクトロン注入構造・材料開発を目指し、ホットエレクトロン注入のダイナミクスの光速物性を科学する。

3. 研究の方法

まず、ベース電極にナローギャップ半導体を想定し、ホットエレクトロン注入時の高速電荷ダイナミクスを、単純な原理と、テラヘルツ波放射により確認する。

次いで、ワイドギャップ半導体の表面での電荷ダイナミクスをテラヘルツ波放射により確認し、ホットエレクトロンエミッターとしての可能性を検討する。

さらに、具体的なヘテロ接合として、ナローギャップ半導体である Bi₂T₃/Te 接合、ワイドギャップ半導体である GaN/InGaN 超格子、およびグラフェン (Gr) /InP 接合について、光キャリア注入による高速電荷ダイナミクスを明らかにする。また、ベース電極として、ナノチューブを仮定して、ホットエレクトロン注入時の電荷ダイナミクスを、テラヘルツ波放射特性により議論する。

4. 研究成果

a) テラヘルツ帯動作ホットエレクトロンエミッタは、テラヘルツ周波数に応答する高速動作が必須である。そこで、まず、半導体表面における電荷移動の高速性を議論するために、光励起により放射されるテラヘルツ波を半導体物性と関連付ける単純化された記述式を提案した。半導体表面での電荷は、近傍の電界で加速されるか拡散によって移動する。その高速移動は、テラヘルツ波 E_{THz} によって観測され、加速および拡散では、それぞれ、以下のように記述できることを明らかにした。

$$E_{THz} \propto \pm \mu \sqrt{\frac{N_i V_D}{\epsilon_r}} I_p, \quad E_{THz} \propto I_p \sqrt{\frac{\Delta E}{m^*}}$$

ここで、 μ 、 V_D 、 N_i 、 ϵ_r 、 I_p 、 ΔE 、 m^* はそれぞれ、電荷の移動度、拡散電位、不純物密度、注入電荷、ホットエレクトロンエネルギー、有効質量である。これによりホットエレクトロン論が高速となり、表面近傍のバンドの向きにより、電子をベースに注入できることがわかる。電荷速度と過剰エネルギーの関係を設定した例を図1に示す。[1]

b) いくつかのワイドギャップ半導体に、光キャリアを注入し、どのような方向にどのように電荷が移動するかをテラヘルツ放射分光により評価した。図2に p 型 GaN のバンド構造を放射されるテラヘルツ

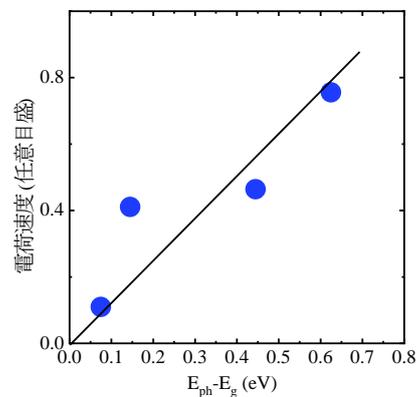


図1. 電荷速度の過剰エネルギー依存性。

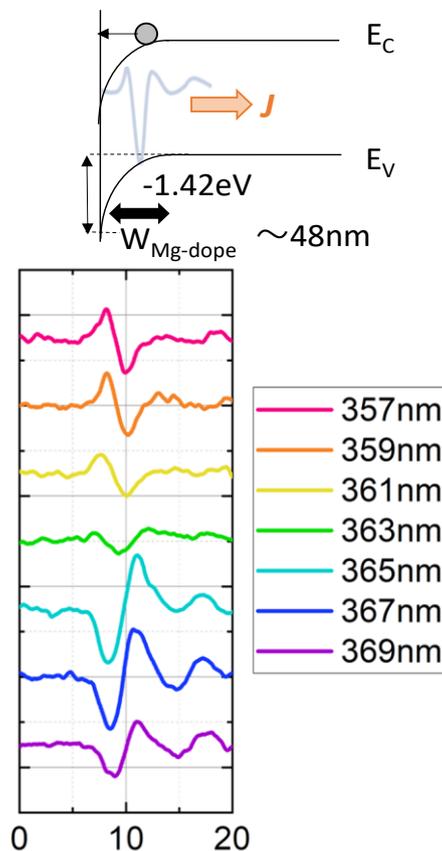


図2. p 型 GaN と THz 放射の波長依存性。

波の波形を示す。光子エネルギーがバンドギャップより小さいところでは、光励起により奥方向に電荷が拡散し、以上では表面に向かって、電子が運動することが観測され、表面近傍に、電子を注入することで、2-3eV のエネルギーを持つホットエレクトロンが注入可能であると示唆された [2]

3) 次に具体的な $\text{Bi}_2\text{T}_3/\text{Te}$ 接合、 GaN/InGaN 超格子、 Gr/InP などの系における電荷移動を観測した。その一例として、 GaN/InGaN 超格子の InGaN 中に光電荷を注入することで、どのような振る舞いを見せるのかについて調べた。この超格子には大きな内部ひずみと自発分極が存在している。 InGaN 井戸に自由電荷が生成されると、まず、電荷移動により自発分極がスクリーニングされ、井戸の中を振動する現象が捕らえられた。また、このスクリーニングより、ひずみが解放され、音響フォノン束が励起され、さらに表面に達した音響フォノンが、テラヘルツ波自由空間に放射させることが判明した。その時の、テラヘルツ波の波形を図3に示す。上はこの超格子のバンド構造で、下が時間波形である。この現象は、直接エミッタ開発に関連しないが、新しい物理現象として注目に値する発見で、本研究の意外な副産物となった。

[3] 今後はこの現象も科学したいと考えている。その他、 $\text{Bi}_2\text{T}_3/\text{Te}$ 接合界面に pn 接合が形成され、空乏層電界により高速移動 (テラヘルツ波放射) することも確認され、ホットエレクトロントランジスタ候補となる結果も得られている。

D) 先に p 型 GaN が 2-3eV のホットエレクトロンエミッタとなりえることを示したが、ベース材料として、カーボンナノチューブについても検討した。半導体ナノチューブ (CNT) では、一方向への移動度が高く、ユニークなデバイスとなりえる材料である。しかしながら、エキシトンが容易に形成されるなど、ダイナミクスに不明な点が多い。そこで、約 2eV のエネルギーを持つ光子により、CNT の E22 (第 2 エキシトンレベル) にエキシトンを形成したのち、外部電界中でどのような電荷の動きをするのかを調べた。その結果、そのエキシトンは、電界で容易に解離し、自由電荷となり高速で移動し、第 1 エキシトンレベルに緩和するが、それらもアバランシェ的に解離し、電流を運ぶことを明らかにし、電極材料としての可能性を示した。図 4 に開発した CNT-THz 光スイッチと放射波形を示す。この波形と、様々な放射特性から、図 5 に示しように、E22 に励起されたエキシトンが、外部電界により、すぐさま解離し、電流を運ぶことで、テラヘルツ波が発生し、衝突電離などにより、その後のダイナミクスが説明されると解釈している。

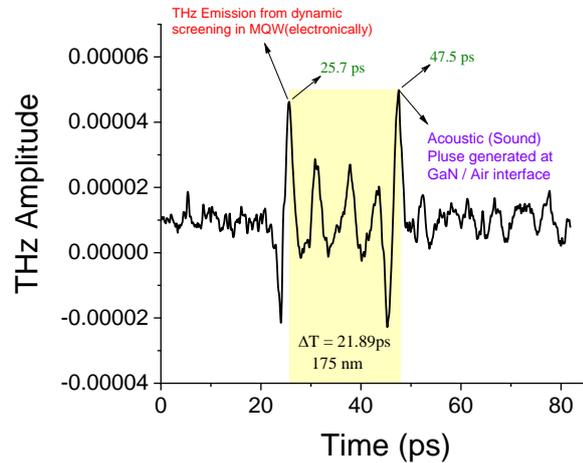
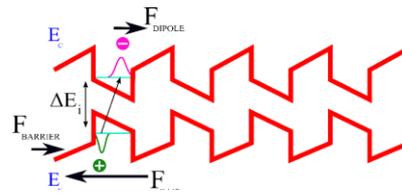
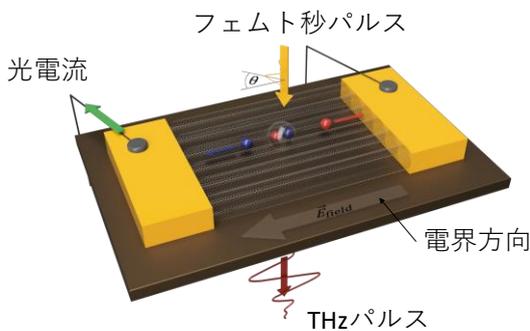
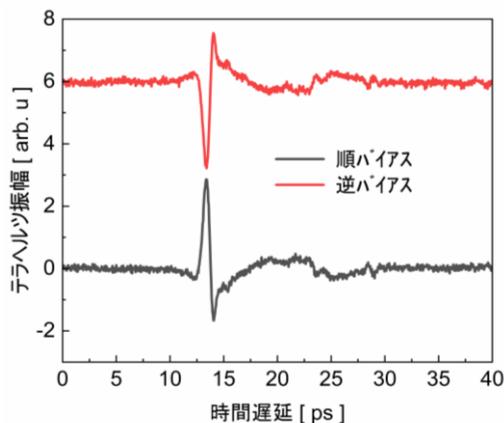


図 3. GaN/InGaN からの THz 放射。



(a)



(b)

図 4. CNT 光伝導アンテナスイッチと実験装置の概略図。順方向バイアスと逆方向バイアスで実験的に観測された THz 放射波形。

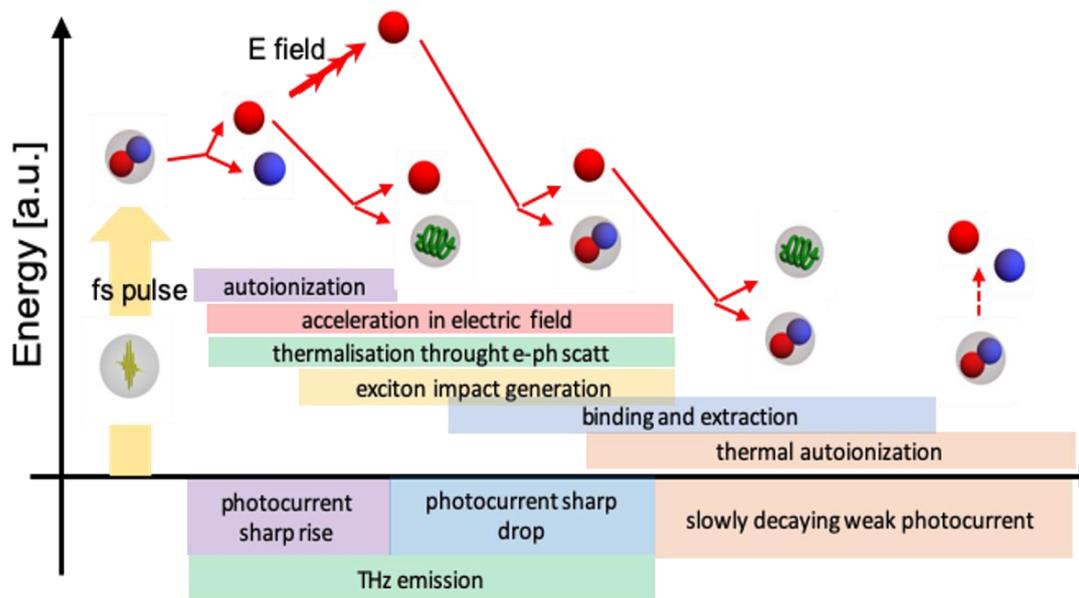


図5. E22 エキトン励起後に想定される電荷ダイナミクス。

以上、本研究では、究極の高速ホットエレクトロントランジスタ開発への扉を開くため、ホットエレクトロン注入構造・材料開発の基礎を築く、ホットエレクトロン注入のダイナミクスの光速物性を調べた。その結果、半導体表面での高速電荷ダイナミクスを記述する関係式を明らかにし、テラヘルツ放射スペクトルスコーピーにより妥当性を検証した。また、様々な材料における高速電荷ダイナミクスから、ホットエレクトロンエミッタ開発の基礎となる、多くのデータが得られた。まだ、エミッタ開発には至っていないが、その基盤を築くことができた。

参考文献

- [1] M. Tonouchi, “Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser,” *Journal of Applied Physics* 2020 (in press)
- [2] H. Jiang, C. Gong, T. Nishimura, H. Murakami, I. Kawayama, H. Nakanishi, M. Tonouchi, “Terahertz emission study of ultrafast photocarrier dynamics in β -Ga₂O₃ crystals” submitted to *Applied Physics Letters*.
- [3] A. Mannan 他、投稿準備中。
- [4] F. Murakami 他、投稿準備中。
- [5] FRG Bagsican 他、 “Terahertz Excitonics in Carbon Nanotubes: Exciton Autoionization and Multiplication,” *Nano Lett.* 2020, 20, 5, 3098-3105.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Filchito Renee G. Bagsican, Michael Wais, Natsumi Komatsu, Weilu Gao, Lincoln W. Weber, Kazunori Serita, Hironaru Murakami, Karsten Held, Frank A. Hegmann, Masayoshi Tonouchi, Junichiro Kono, Iwao Kawayama and Marco Battiato	4. 巻 20, 5
2. 論文標題 Terahertz Excitonics in Carbon Nanotubes: Exciton Autoionization and Multiplication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Lett. 2020	6. 最初と最後の頁 3098,03105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b05082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Masayoshi Tonouchi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 村上史和, 芹田和則, 村上博成, R. Dalipi, A. M. Urbas, A. Materna, M. Buza, D. A. Pawlak, 斗内政吉, 川山巖
2. 発表標題 Bi ₂ Te ₃ /Teストライプ構造を有する試料からのテラヘルツ放射特性
3. 学会等名 2019年春季 第66回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Abdul Mannan, I. Kawayama, K. Yamahara, F.R. Bagsican, H. Murakami, T. Langer, H. Bremers, U. Rossow, D. Turchinovich, A. Hangleiter, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Contact-free THz nano-seismology in InGaN/GaN Multiple Quantum Wells
3. 学会等名 Global Nonophotonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Near surface built-in field of wide gap semiconductors studied by LTEM
3. 学会等名 Global Nonophotonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Opto-science and engineering using nanomaterials for fundamentals and applications
3. 学会等名 The 3rd IMS-INSD Joint Workshop on Frontier Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Filchito Renee G. Bagsican, Iwao Kawayama, Michael Wais, Natsumi Komatsu, Kazunori Serita, Weilu Gao, Lincoln Weber, Marco Battiato, Hironaru Murakami, Frank A. Hegmann, Junichiro Kono, and Masayoshi Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz Emission from a Photoconductive Antenna Switch Based on Aligned Single-Chirality Semiconducting Carbon Nanotubes
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Murakami, K. Serita, H. Murakami, R. Dalipi, A. M. Urbas, A. Materna, M. Buza, D. A. Pawlak, M. Tonouchi, and I. Kawayama
2. 発表標題 Characteristics of THz emissions from Bi ₂ Te ₃ /Te striped structure
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abdul Mannan, I. Kawayama, K. Yamahara, F.R. Bogsican, H. Murakami, T. Langer, H. Bremers, U. Rossow, D. Turchinovich, A. Hangleiter, and M. Tonouchi
2. 発表標題 Terahertz radiation from InGaN/GaN Multiple Quantum Wells
3. 学会等名 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----