

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17677

研究課題名(和文) 広帯域波長可変fsレーザーによる時間、空間、エネルギー分解光電子顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Construction of the energy tunable fs laser for time-resolved photoemission electron microscopy with time, space, and energy resolution

研究代表者

福本 恵紀 (FUKUMOTO, Keiki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究員

研究者番号：20443559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、半導体表面の光キャリアダイナミクスを高時空間分解で観察できる時間分解光電子顕微鏡に、エネルギー分解能を付与する目的で光学系の改良を申請した。しかし、想定していなかった成果が得られた。この波長可変システムを利用することで、重大な問題である試料帯電を抑制することが可能であることが分かり、これにより、光電子検出では困難と考えられていたワイドギャップ半導体の光キャリア寿命計測に成功した。ワイドギャップ半導体は、ポストSiとして期待される材料であり、この申請研究で開発した装置が新規半導体評価装置になりうると期待され複数の半導体メーカーと共同研究が始まった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we applied for improvement of the optical system for the purpose of imparting the energy resolution to time-resolved photoemission electron microscopy which can observe the photogenerated carrier dynamics on a semiconductor surface with high spatio-temporal resolution. However, unexpected results has been obtained. Using the constructed energy tunable system ranging from 2.8 to 6 eV, it was possible to suppress sample charging, which is a serious problem on the measurements of photogenerated carrier lifetimes in wide-gap semiconductors. Wide gap semiconductors are expected materials for post Si. The equipment developed in this application research was expected as a novel technique to evaluate semiconductor properties and joint researches with several semiconductor companies have started.

研究分野：半導体光物性

キーワード：半導体 超高速現象 イメージング

1. 研究開始当初の背景

代表者は、JST-CREST プロジェクト(代表：東京工業大学・腰原教授)において、半導体表面に光励起した電子のダイナミクスを 100 fs と 100 nm の高時空間分解能で観察できる時間分解光電子顕微鏡(Time-resolved photoemission electron microscopy: TR-PEEM)を開発している [1,2,3]. これにより、半導体デバイス性能に直接関係するキャリア輸送特性と構造欠陥が密接に関係する結果が得られた[2,3]. 本研究では、そのメカニズム解明を目的とし、エネルギー分解能を付与するためにエネルギー可変システムの構築を目指した。

2. 研究の目的

当初の目的は、広く応用されている典型的な半導体である Si や GaAs のキャリア輸送特性と構造欠陥の関係を明確にすることであったが、研究成果を論文投稿や学会発表で公表していく過程で、材料開発を行っている複数の半導体メーカーや国内外の大学から、新規な半導体評価装置として注目されるに至り、共同研究が始まった。特に、ポスト Si 材料として期待されるワイドギャップ半導体(SiC や GaN)は、応用化され始めているが、構造欠陥がデバイス動作に及ぼす影響が明確でなく、材料開発における重要な課題となっている。ワイドギャップ半導体のキャリアダイナミクス解明に主眼を置き、研究を遂行した。

3. 研究の方法

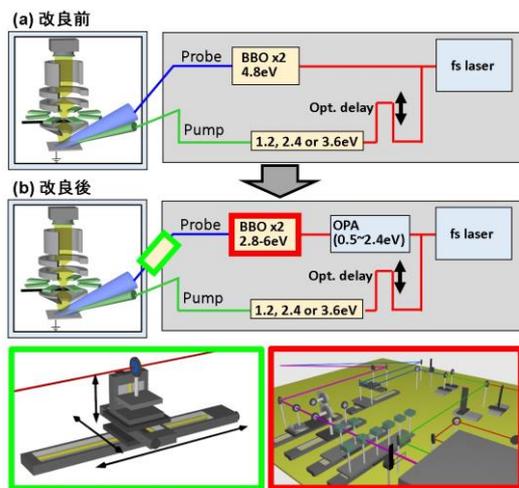


図 1 本研究課題による光学系の改良

計画通り、TR-PEEM の光学系の改良から開始した。既存の OPA 波長変換システムを立ち上げ、その波長に応じて非線形(BBO)結晶の位置・回転角度の自動制御システムを構築した(赤四角)。また、波長により、集光点が変

わるため、緑四角で示したフォーカスレンズの位置も最適化される。当初の目的通り、時間分解能を犠牲にすることなく、2.8 eV から 6 eV までのパルスエネルギーが選択できる装置となった。この装置を利用することで、多くの材料の局所的な仕事関数が簡便に見積もれることが分かった。その一例を図 2 に示す。

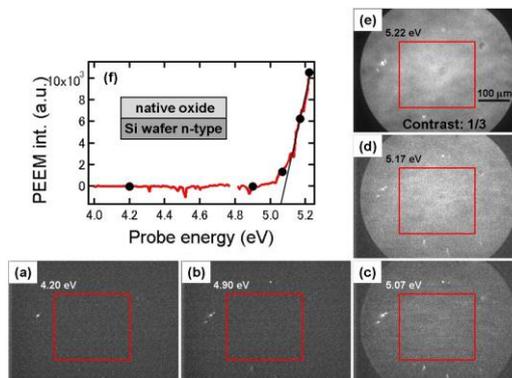


図 2 開発した装置による仕事関数評価

レーザーエネルギーを 4 eV から 5.22 eV まで、約 40 meV ステップで変化させながら、PEEM 像を取得した(a-e)。赤四角内の平均光電子強度の平均値を図 2(f) にプロットした。5 eV 程度で光電子放出が確認でき、文献値と同等の 5 eV の仕事関数が見積もられた。この測定は構築した波長可変システムの動作確認となる。

4. 研究成果

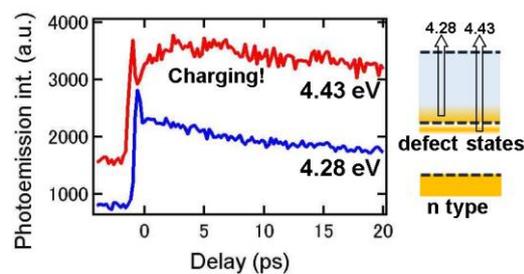


図 3 異なるプローブ光エネルギーによる GaAs の光キャリア寿命計測。

当初の目的は、構築したシステムを利用した時間・空間・エネルギー分解測定であったが、予想していなかった成果が得られた。

図 3 は、GaAs 表面における光キャリアの寿命測定結果である。光励起したキャリア寿命を 2 種類のプローブ光で検出している。GaAs の仕事関数よりわずかに小さいエネルギー(4.28 eV)では、従来通りの寿命が観測できているが、仕事関数より大きなエネルギー(4.43 eV)では、S/N 比が極端に悪くなり、また、緩和プロファイルから試料が帯電していることが分かる。これは、ダイナミクスに寄与しない余計な電子を欠陥準位から放出しているためである。上述した、局所的な仕事

関数を見積もる手法と併せて、局所的な光キャリア寿命を精度よく検出できる装置として、特許出願に至った。

この装置を利用することで、試料の帯電により困難と考えられていたワイドギャップ半導体の光キャリア寿命計測に成功した。試料は、複数の半導体メーカーからの提供であり、ワイドギャップ半導体が抱える欠陥問題を解決する一手になるとメーカー側から期待されている。

SiC に関しては、ナノ秒レーザーを導入することで、フェムト秒からマイクロ秒の幅広い時間スケールで光キャリア寿命計測を行い、期待される結果が得られた(図 4)。GaN においても、ほぼ帯電の影響を受けることなく表面の構造を観察しながら、寿命観察できた。半導体材料開発において、構造欠陥とキャリア寿命の関係は、常に、重要なテーマであり、半導体メーカーから、開発した TR-PEEM が新規半導体評価手法として、大きく期待されており、今後も共同研究が継続することとなった。

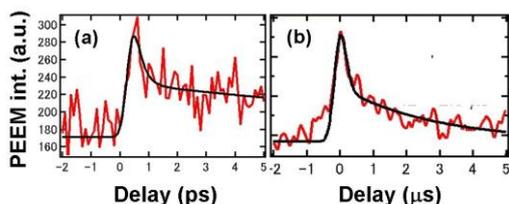


図 4 SiC のキャリア寿命

<引用文献>

[1] Fukumoto et al., Appl. Phys. Lett., 104,

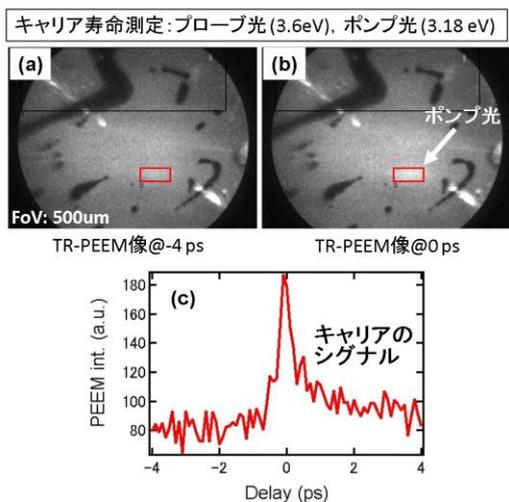


図 5 GaN のキャリア寿命

053117 (2014)

[2] Fukumoto et al., Rev. Sci. Instrum., 85, 083705 (2014).

[3] Fukumoto et al., Appl. Phys. Exp. 8, 101201, 2016

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 2 件)

①福本恵紀, 時間分解光電子顕微鏡による半導体光励起状態の緩和過程, 光学, 査読有, 45 巻 11 号(2016)

②K. Fukumoto, S. Koshihara, K. Onda, Direct imaging of electron recombination and transport on a semiconductor surface by femtosecond time-resolved photoemission electron microscopy, Appl. Phys. Exp., 査読有, vol. 8, 2016, pp. 101201-101204.

[学会発表] (計 6 件)

①福本恵紀, 恩田健, 腰原伸也, フェムト秒時間分解光電子顕微鏡による半導体光キャリアダイナミクスの可視化, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 21 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)

②Keiki Fukumoto, Symposium on Surface and Nano Science 2017, Development of carrier imaging microscopy with spatial, temporal, and spectral resolution, 2017 年 1 月 11 日, 新富良野プリンスホテル (北海道・富良野市)

③K. Fukumoto, M. Boutchich, H. Arezki, K. Sakurai, K. Onda, and S. Koshihara, Spatio-temporal observation of photogenerated electron dynamics in twisted graphene, the 4th Advanced Electromagnetics Symposium, 2016 年 7 月 25 日, Malaga (Spain)

④福本恵紀, 恩田健, 腰原伸也, 半導体ナノスケール構造欠陥中の光キャリア寿命と欠陥準位密度, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 02 日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)

⑤Keiki Fukumoto, Syse, Seyhan, Ken Onda, Shunri Oda, Shin-ya Koshihara, Symposium on Surface and Nano Science 2016, Direct imaging of photogenerated electron dynamics in semiconductor nanostructures using time-resolved photoemission electron microscopy, 2016 年 1 月 13 日, 新富良野プリンスホテル (北海道・富良野市)

⑥Keiki Fukumoto, Ken Sakurai, Ken Onda, and Shin-ya Koshihara, Imaging of

photogenerate carrier dynamics on
semiconductor surfaces by time-resolved
photoemission electron microscopy,
International Workshop on
Nanostructures Characterization &
Nanomaterials, 2015年8月4日, Bangkok
(Thailand)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：時間分解光電子顕微鏡装置および当
該装置によるキャリアダイナミクス画像の

取得方法

発明者：腰原伸也，福本恵紀

権利者：道場

種類：特許

番号：特願 2017-037139

出願年月日：平成 27 年 2 月 28 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福本 恵紀 (FUKUMOTO, Keiki)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造
科学研究所・研究員

研究者番号：20443559

(2) 研究分担者 該当者なし

(3) 連携研究者 該当者なし

(4) 研究協力者 該当者なし