

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18K04681
研究課題名(和文) 変調光照射ケルビンフォース顕微鏡による半導体光励起キャリアの動的挙動マッピング

研究課題名(英文) Photo-induced carrier mapping by Kelvin force microscope under modulated light illumination

研究代表者
有田 誠 (Arita, Makoto)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：30284540
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、走査型プローブ顕微鏡の一種で材料表面の電位や仕事関数をナノスケールで観察できるケルビンフォース顕微鏡(KFM)に強度変調した光照射を組み合わせることで、半導体材料におけるキャリアの光励起状態のマッピングを試みた。変調光照射と光応答成分抽出回路を既存のKFM装置と組み合わせ、試料の表面電位信号の中から変調光に対応した周波数成分を抽出・描画する構成でシステムを試作した。酸化チタン薄膜上に金のパターンを蒸着した試料に対して検証を行ったところ、酸化チタンのバンドギャップ値より大きな光子エネルギーに対応した波長の光に対して光応答が観察され、形状、表面電位と同時に2次元描画することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、試料の測定部位付近への比較的広範囲の変調光照射機構を普及したKFM装置に組込むといった手法で、半導体材料におけるキャリアの光励起状態のマッピングを試みた。本研究により得られた成果は、走査型プローブ顕微鏡(PSM)への機能付与の試みとして、エネルギーや環境分野で求められる半導体デバイスのさらなる高性能化に貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A system that can visualize 2-dimensional mapping of photo-induced carriers in semiconductors have been developed. The system consists of a conventional Kelvin probe force microscope (KFM) equipped with a modulated monochromatic light source and a lock-in amplifier which extract a surface potential change induced by photo illumination. Applying the system to TiO₂ thin film with Au dots deposited on the surface, A photo response was observed at the exposed TiO₂ surface when the illuminated photon energy was larger than the band gap energy of TiO₂. The mapping of photo-induced surface potential change was successfully obtained by the system.

研究分野：薄膜・表面工学、 材料工学

キーワード：KFM 光励起 薄膜 半導体

1. 研究開始当初の背景

紫外光～可視光付近に対応するバンドギャップエネルギーを持つ多くのワイドギャップ半導体材料は、対応する波長の光照射により光起電力や光電流といった光応答を外部回路から観測することで、内部の電子状態やキャリアの挙動に関する情報を得ることができる。しかし、観測パラメータである電位や電流がデバイス全体から外部電極を通して収集されたものとなっており、局所的な情報は空間的に平均化されて消失している。多くの半導体デバイスにおいて、その表面、界面、バルクは各々異なる役割を持って機能しており、それぞれの場所において、空間分解能を持った評価・解析ができれば、統合されたデバイスの最終的な性能向上のための強力な手段になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、材料の表面電位をナノスケールで観察できる KFM 法に着目し、光照射に対する応答をプローブの走査と同時にモニタすることで、半導体材料内部における光励起キャリアのマッピングを試みた。半導体内の光励起挙動を空間分解能をもって解析するには、照射光を掃引する方法もあるが、本研究では、試料の測定部位付近への比較的広範囲の変調光照射機構を普及した市販の KFM 装置に組み込むことで、強度変調光を用いたキャリアの光励起挙動をマッピングするシステムを構築し、動作の検証を行った。

3. 研究の方法

本研究では、従来型の KFM 装置をベースとして機能付加を行い、システムの構成と動作確認を行った。既存の SPM 装置に、新たな付加機構として①強度変調した単色光照射機構、②KFM モードにおける表面電位信号から照射光変調周波数に同期した成分を抽出・増幅するためのロックインアンプを設置・接続した。光照射は、各種半導体のバンド構造に対応した波長の光を選択照射するため、可変波長のモノクロ光源を使用した。光ファイバ光学系により、試料の測定部位付近の範囲に光を照射できるようにした。

次に、いくつかの材料の表面電位光応答マッピングを行いシステムの動作検証を行った。スパッタリング法で作製した酸化チタン (TiO₂) 薄膜、金のパターンを表面に蒸着した TiO₂ 薄膜などについて光応答のマッピングを試みた。

4. 研究成果

試作した光応答マッピングシステムのブロックダイアグラムを図 1 に、装置の構成および測定試料付近の写真を図 2 に示す。ベースとした SPM 装置は、Agilent 社製 SPM5400 で、試料への光照射には、500W の Xe ランプと回折格子型モノクロメータから構成される光源に試料の測定部位に光を導く光ファイバ光学系を組み合わせ用いた。照射光の波長範囲は 250nm～近赤外となっている。また、照射光を変調するために周波数可変のメカニカルチョップを使用した。変調周波数は最高で 1kHz となっている。照射光強度のスペクトルの一例を図 2 中に挿入図で示している。光の変調周波数に対応した表面電位信号の取り出しと処理について検討した結果、KFM システムにて静電気力による振動の零点を得るようサーボをかけた DC オフセット

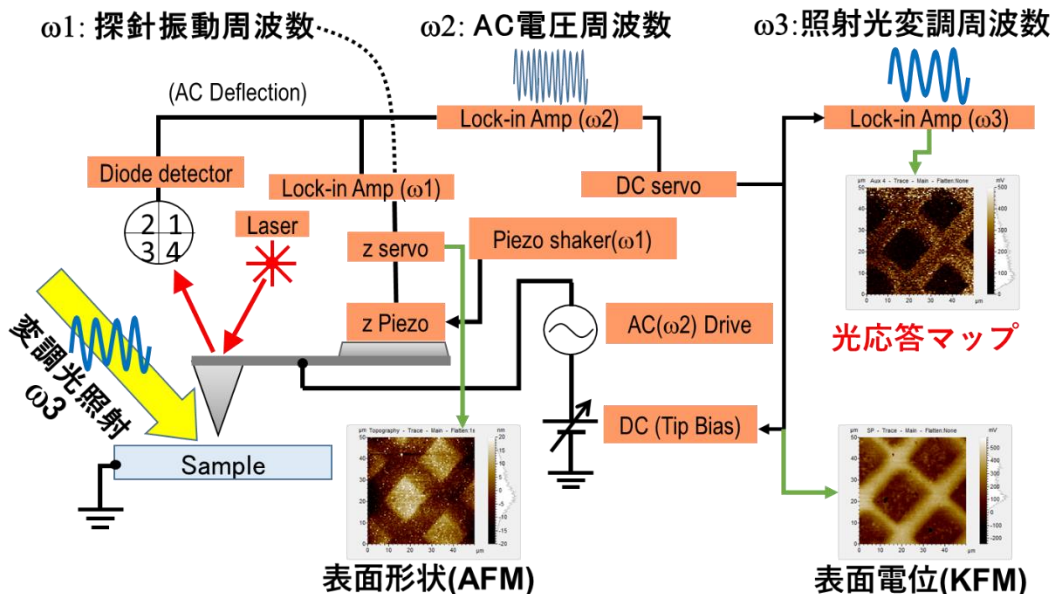


図 1 光応答マッピングシステムのブロックダイアグラム

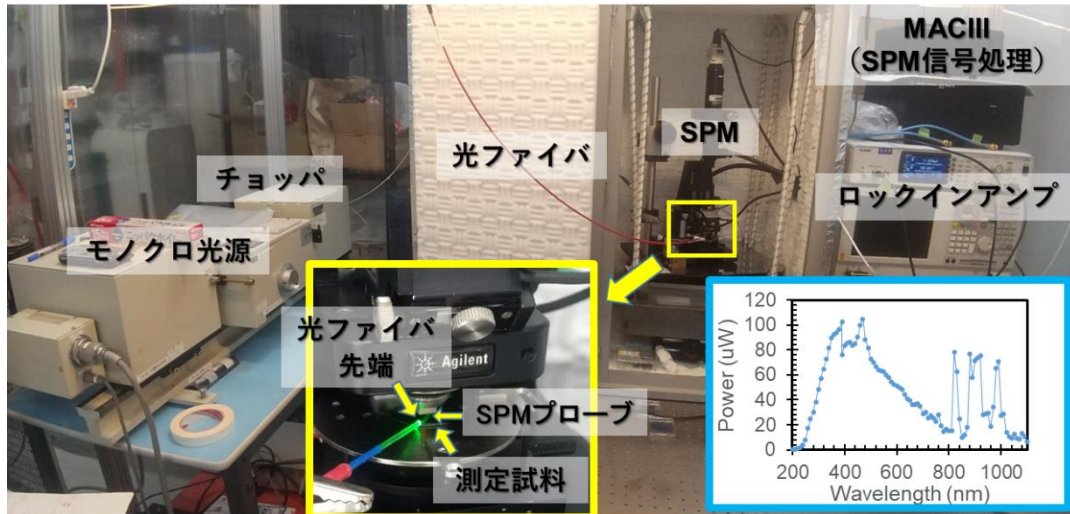


図2 光応答マッピングシステムの構成と試料付近の拡大図

値である表面電位に対応した電圧信号を外部に取り出し、その中から変調光と同じ周波数成分を外付けのロックインアンプで増幅・抽出する構成とした。具体的には、SPM5400の信号処理モジュールであるMACIIIのBNC1出力に表面電位信号を出力し、これをNF回路設計ブロック社製ロックインアンプLI5655に接続し、メカニカルチョッパより得た参照信号を用いてロックイン増幅を行い、その出力をMACIIIのLock-in3 AUX Inputに入力し、パススルーして装置付属のソフトウェアPicoView_1.14上でX-Y平面に描画した。

まず、スパッタリング法を用いて作製した酸化チタン薄膜を試料として、変調照射光に対する表面電位応答の検出ができていないかの検証実験を行った。酸化チタンはバンドギャップが約3 eVの酸化物半導体であり、その値より大きな光子エネルギーに対応した紫外線照射で光応答を確認した。

次に、酸化チタン薄膜上に金のパターンを蒸着した光触媒デバイスに対しての検証を行った結果を示す。酸化チタンのバンドギャップ値より大きな光子エネルギーに対応した波長320 nmの光をチョッパにより変調して照射しながら、試料の表面電位の光応答成分を、形状、表面電位と同時に2次元描画した。照射光の変調周波数は43 Hzとした。

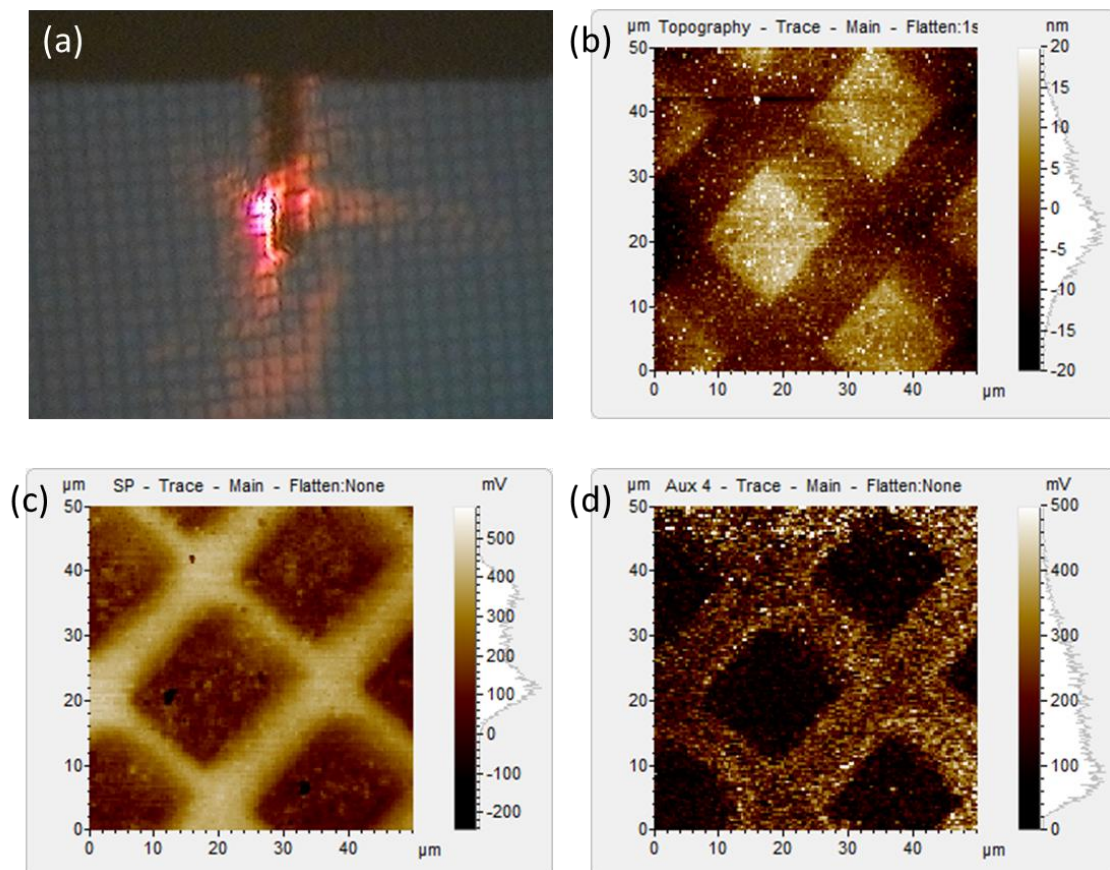


図3 金のパターンを蒸着したTiO₂薄膜の、光学顕微鏡像(a)、表面形状像(b)、表面電位像(c)、および、光応答像(d)

図3 (a)は、試料表面の光学顕微鏡像であり、1辺がおよそ $15\ \mu\text{m}$ の金のパターンが下地である TiO_2 薄膜上に蒸着されている。KFMモードのSPM測定により得られた表面形状像と表面電位像をそれぞれ、図3 (b)、(c)に示す。金の膜厚はおよそ $20\ \text{nm}$ 程度で、金と露出した TiO_2 の領域にて異なる表面電位が観察されている。一方、照射した紫外光の変調周波数に対応した電位変化の大きさをマッピングしたのが図3 (d)となっており、 TiO_2 が露出した領域にて光応答が認められた。また、金のパターンから近い所において光応答が大きいように見受けられる。これは、光励起により蓄積したキャリアが暗時に速やかに他の場所へ移動、あるいは再結合するほど、変調光に対する電位の変化が大きく観察されることに関係しているものと考えられる。また、蒸着された金の領域においては、光応答の強度は小さく、金が蒸着された領域においては光照射に対する電位の変化がほとんど起こらないことを示している。なお、本研究で試みた光応答のマッピング手法では、走査プローブが表面電位を感知する領域に比較して、かなり広い領域に対して光照射を行っているため、比較的遠い場所にて励起されたキャリアの情報も含まれていることを解析時に考慮する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fabi Zhang, Congyu Hu, Makoto Arita, Katsuhiko Saito, Tooru Tanakaa, Qixin Guo	4. 巻 22
2. 論文標題 Low temperature growth of (AlGa)2O3 films by oxygen radical assisted pulsed laser deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 142-146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/c9ce01541h	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0件

〔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
連携研究者	郭 其新 (Guo Qixin) (60243995)	佐賀大学・シンクロトロン光応用研究センター・教授 (17201)	
連携研究者	エダラティ カベ (Edalati Kaveh) (60709608)	九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------