

新博士紹介

1. 氏名 田中仙君
2. 論文提出大学 総合研究大学院大学
3. 学位種類 博士 (理学)
4. 取得年月日 2003年3月
5. 題目 Surface Photovoltage in Semiconductors Studied with Photoelectron Spectroscopy Using Synchrotron Radiation and Laser
6. 使用施設 UVSOR BL5A, BL6A2

7. 要旨

【序】

現在、放射光とレーザーは、基礎研究から応用分野にわたりなくてはならない重要な光源として広く利用されている。この二つの光源を組み合わせる実験手法は、各光源の利点を活かすことによって、これまでにないさまざまな新しい情報を得られることが期待される¹⁾。

本研究の目的のひとつは、放射光とレーザーを組み合わせる新しい内殻光電子分光法の開発である。この手法のユニークな点は、放射光を使うことで表面敏感な内殻光電子を測定することができること、レーザーと放射光のパルス性を活かすことにより光電子スペクトルの時間変化を測定できることである。

この手法を用いて、半導体表面での光誘起現象のひとつである Surface Photovoltage (SPV) のダイナミクスについて明らかにすることも本研究の目的である。バンドギャップ以上のエネルギーを持った光が半導体に吸収されると、生成された電子正孔対は表面バンドベンディング領域におけるポテンシャルの影響で空間的に分離される。その結果生じる起電力が SPV である。SPV は、スピン偏極電子源における電荷制限現象に影響していることが示唆されており²⁾、そのダイナミクスについての理解を深めることは応用の観点からも重要である。本研究では、*p* 型 GaAs (100)、およびスピン偏極電子源として設計された GaAs-GaAsP 超格子表面における SPV 効果を測定した。また、SPV 効果のナノ秒からマイクロ秒にわたる時間変化を測定した。

【実験】

実験は分子研 UVSOR BL5A と BL6A2 において行なった。放射光とレーザーの組み合わせとして、2種類の手法を用いた。ひとつは、放射光とレーザーを同期させ、両者に時間差をつけるポンププローブ法による時間分解光電子測定法である。もうひとつは、マイクロ秒領域での光電子スペクトルの時間変化を直接測定する方法である。本研究では、励起光としてレーザーを、プローブ光として放射光を用いている。Fig. 1 は、レーザーを放射光と同期させた時間分解光電子測定システムの概略図である。レーザーはストレージリングのマスターオシレーターからの信号に

同期して発振する。試料上での放射光とレーザーの入射タイミングを調節することにより、放射光の繰り返し時間内 (UVSOR の場合、マルチバンチにおいて約11ナノ秒) での時間分解測定が可能となる。時間分解能は放射光の時間幅によって制限され、約1.5ナノ秒であった。Fig. 2 は、time-to-amplitude converter (TAC) を用いたマイクロ秒領域での光電子信号の時間変化測定システムの概略図である。光電子アナライザーの測定エネルギーを適当な値で固定し、光電子信号をスタート信号、レーザー光をストップ信号として TAC を駆動させる。二組の TAC と multi-channel analyzer をもちいることで、レーザー照射時と非照射時の光電子強度の時間変化を測定でき、レーザーの繰り返し時間内での SPV の時間変化を測定することが可能となる。この場合、時間分解能は光電子信号の測定装置の応答速度によって制限され、約0.1マイクロ秒であった。

【結果と考察】

Fig. 3 は、レーザー照射時と非照射時における *p*-GaAs (100) の Ga-3*d* 光電子スペクトルである。室温ではレーザー照射時と非照射時においてスペクトルに変化は見られなかったが、温度90 K においてはレーザー照射時に光電子スペクトルが高運動エネルギー側に約0.39 eV シフトすることを観測した。これは、レーザーの照射によって生じ

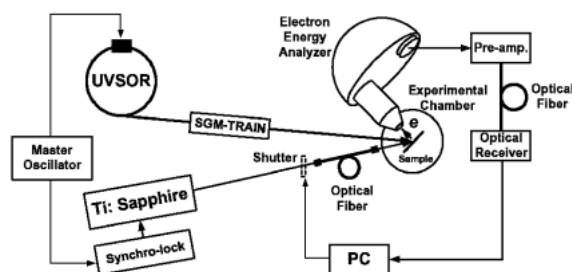


Figure 1. Schematic experimental setup for the pump-probe measurement in the range of 1.5–11 ns at BL 5A.

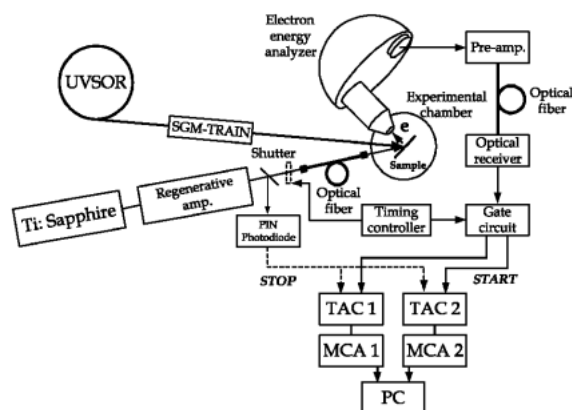


Figure 2. Schematic experimental setup for the measurement of temporal structure in the range of 0.1–100 μ s at BL 5A. TAC: time-to-amplitude converter. MCA: multi-channel analyzer.

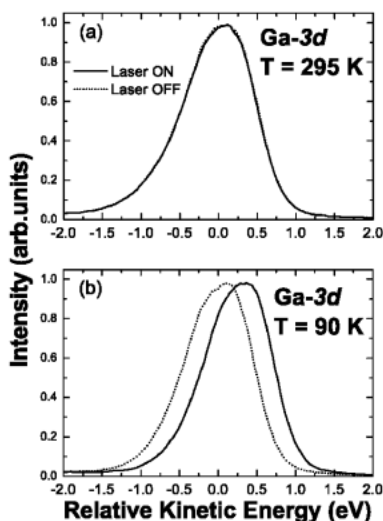


Figure 3. The Ga-3d core-level photoelectron spectra at (a) 295 K and (b) 90 K in the clean surface of *p*-GaAs (100). Solid and dotted lines represent the spectra with and without laser excitation, respectively.

た SPV が、半導体表面に存在するバンドベンディングを緩和する方向に働いたためであるということを確認した。さらに、SPV のレーザーパワー依存性と温度依存性を測定した結果、SPV の大きさは、熱平衡状態でのバンドベンディングの大きさ、光励起キャリア密度、試料温度をパラメータとした近似式で表わせることを明らかにした³⁾。

また、11ナノ秒内での SPV の時間分解光電子スペクトルの測定からは、SPV の消滅過程には、1 ナノ秒以内に減衰する過程と、11ナノ秒以上の寿命を持つ過程があることがわかった。マイクロ秒領域での SPV のダイナミクスは、繰り返し周波数10 kHz のレーザーを用いて測定した。その結果、室温では約1.5マイクロ秒で SPV が消滅するのに対して、90 K では時定数15マイクロ秒程度で減衰する成分と、100マイクロ秒以上の寿命をもつことを示すバックグラウンド成分を観測した (Fig. 4)。この結果を3段階の SPV 生成消滅過程モデルを使って説明を試みた。3段階モデルは、ステップ1として電子正孔対の生成、ステップ2として光励起キャリアの移動、ステップ3として表面とバルクキャリアの再結合を考えた。本実験装置の時間分解および測定時間範囲から、観測しているダイナミ

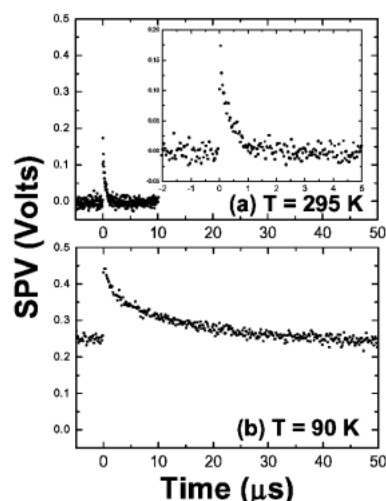


Figure 4. (a) Temporal profile of SPV in the *p*-type GaAs at 295 K. (b) Temporal profile of SPV in the *p*-type GaAs at 90 K.

クスは、ほとんど3段階目の表面とバルクキャリアの再結合である。この再結合による SPV の消滅過程としては、ショットキーバリアモデルや WKB 近似に基づく検討により、室温においては熱的再結合過程が支配的であり、90 K においてはトンネル過程が支配的であることを明らかにした。

最後に、放射光とレーザーを組み合わせてもちいる時間分解内殻光電子分光法は、半導体表面での非平衡電子状態に対する非常に強力な測定方法であり、また、ナノ秒からマイクロ秒にわたるダイナミクスについての情報が得られるという点で非常にユニークな手法であるということを強調したい。

参考文献

- 1) M. Kamada, S. Hirose, S. Asaka, T. Tsujibayashi, M. Watanabe, O. Arimoto, S. Fujiwara, S. Nakanishi, H. Itoh and M. Itoh: *J. Synchrotron Radiation* **5**, 1035 (1998).
- 2) A. Herrera-Gómez, G. Vergara and W. E. Spicer: *J. Appl. Phys.* **79**, 7318 (1996).
- 3) S. Tanaka, S. D. More, J. Murakami, Y. Fujii and M. Kamada: *Phys. Rev. B* **64**, 155308 (2001).

(受付番号01072)