超格子太陽電池におけるシュタルクラダー状態下でのキャリア輸送特性

Carrier Transport Property under Stark Ladder State in Superlattice Solar Cells

宮大工¹, 東大先端研² ⁰中村 翼¹, 鈴木 秀俊¹, 碇 哲雄¹, 杉山 正和², 福山 敦彦¹

Univ. of Miyazaki¹, The Univ. of Tokyo², °Tsubasa Nakamura¹, Hidetoshi Suzuki¹,

Tetsuo Ikari¹, Masakazu Sugiyama², Atsuhiko Fukuyama¹

E-mail: ha11028@student.miyazaki-u.ac.jp

1. はじめに

従来の量子井戸(quantum well: QW)太陽電池は光吸収波長や格子定数を任意に制御できるが、 QW 内での再結合によるキャリア収集効率低下が問題であった。一方、薄い障壁層をもつ超格子 (superlattice: SL)構造では、トンネル効果によってキャリアは井戸外へ移動するため再結合の抑制 が期待できる[1]。一般に、無電界時の SL では共鳴トンネル効果によってキャリアは井戸外へ脱 出するが、光吸収層内の SL では内部電界による静電ポテンシャル差が波動関数の重なりを妨げ るため、そのキャリア輸送は無電界時とは異なる。そこで本研究では、SL を挿入した太陽電池構 造試料に対してレーザー変調反射分光(photoreflectance: PR)測定を行い、電子状態の理論計算との 比較から光吸収層内の SL におけるキャリア輸送について考察した。

2. 実験方法

本研究で用いた試料は p-i-n GaAs の i 層内に SL を 10 層挿入した太陽電池である。InGaAs 井戸 層は 5.0 nm に固定し、GaAsP 障壁層は 1.9 から 5.9 nm まで変化させた。光吸収層内の内部電界は 補償ドーピングによって 12 kV/cm に固定した[2]。PR 測定はハロゲン光を p-GaAs 膜側表面に照 射し、断続化された Ar⁺レーザー光(488 nm、3 mW)により変調された反射光を Si フォトダイオー ドで検出した。状態密度の特異点エネルギー(Ecri)はKramers-Kronigの関係式を用いて絶対値スペ クトルに変換し、Lorentz 関数のフィッティングから算出した。測定は室温で行った。電子状態の 理論計算は nextnano ソフトウェアを用い、内部電界や歪によるバンドギャップの変化を考慮した。

3. 実験結果と考察

Figure 1 に得られた Ecri を示す。障壁層幅 3.6 nm 以上の試料では1.29 eV と算出され、単一量子井戸モ デルで計算した電子の基底状態と重い正孔の基底状 態(el-hh1)間の遷移エネルギー(1.30 eV)と一致した。 一方、2.7 と 1.9 nm の試料ではそれぞれ 1.29 と 1.31、 1.27 と 1.31 eV の 2 つの Ecri が算出され、そのエネ ルギー差は障壁層幅の減少に伴い増加した。理論計 算から 2.7 と 1.9 nm 試料の el 中電子の存在確率はそ れぞれ3と5個のQWの範囲まで広がり、トンネル していることが分かった。このようなエネルギー状 態をシュタルクラダーとよび、m周期離れたQW で の遷移エネルギーは次式で表される[3]。

$$E_m = E_0 - meFD \tag{1}$$



ここで、Eoは単一量子井戸モデルでの遷移エネルギ ー、eは素電荷、Fは内部電界、Dは超格子周期である。 計算結果を Fig. 1 内に破線で示す。Fig. 1 より、2.7 と 1.9 nm 試料の Ecri はそれぞれ±1 と±2 周 期離れた QW での遷移エネルギーに対応していた。したがって、光吸収層内の SL ではシュタル クラダー状態を形成し、その局在範囲の中で電子はトンネリングし輸送されることが判明した。 本研究の一部は、NEDO 委託研究および科研費基盤(B)16H04648の支援を受けて実施された。

Fig. 1 Ecri obtained from PR modulus spectra and transition energies calculated by Eq. (1)

参考文献

- [1] K. Toprasertpong et al., IEEE J. Photovoltaics 4, 607 (2014).
- [2] H. Fujii et al., J. Appl. Phys. 114, 103101 (2013).
- [3] J. Bleuse et al., Phys. Rev. Lett. 60, 220 (1988).