

レーザーテラヘルツ顕微鏡によるシリコン表面電場の評価

望月敏光¹・伊藤明²・中西英俊²・棚橋克人¹・川山巖³・斗内政吉³・白澤勝彦¹・高遠秀尚¹

¹産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

²SCREENホールディングス

³大阪大学レーザー研究所

研究の目的: パッシベーション膜を始めとした内部電界評価

太陽電池表面のパッシベーション

良い表面 | 悪い表面

表面 Si | 表面再結合

汚れや欠陥による意図しない内部電界
↓
表面再結合による光起電キャリアの損失
↓
電流・電圧共に低下

内部電界の制御とその診断が重要

レーザー起電THz放射による評価

光起電キャリアの生成 (-fs) | 内部電場による加速 (-ps) | THz放射

レーザーパルス | 透過電流 | THz放射

内部電界の異質をもつデバイスの実験を、THz振幅から定性的に捉えている

(上) Si本線電圧の評価例(2) | (右) MOSFETアレイの評価例(3)

欠陥の原因の特定や程度の評価のために、より具体的に内部電界がどうなっているのかを知りたい

THzの振幅や波形と、内部電界の定量的な関係は？

内部電界 ⇒ 透過電流 j ⇒ THz放射 $E \propto dj/dt$

光学的に内部電界を評価できる現象[1]

実験: 内部電界を電気的に定量制御できる系を評価

実験装置の概略図

パルス光 | THz発生機 | 試料 | 検出器 | PC

THz振幅 (E) | 時間 $t = 2cx$

(左) THzの時間波形をマッピングする。レーザーテラヘルツ顕微鏡(LTEM)の試作機。デバイス評価への応用のため、測定自動化や測定スループットの向上を重視した設計となっている。

(中) LTEMの光学系の概略。試料とGaAsセンサーを向かい合わせ、時間差をつけてフェムト秒パルスを照射する。

(右) 時間波形の抽出。遅延ステージの位置に応じてセンサーの光電流が変化し、それをTHzの時間波形に読み替えることができる。試料位置の移動によりマッピングも可能。

容量・電圧測定で、各バイアス電圧での内部電界を評価

結果: C-V曲線と似たTHzの振幅のバイアス依存性を観測。フラットバンド付近での極性反転も観測。

n型試料

Amplitude (arb. units) vs Time (ps)

Bias Voltage: 10 V, -0.8 V, 0.0 V, -1.0 V, -0.2 V, -1.2 V, -0.4 V, -2.0 V, -0.6 V, -10 V

Amplitude at 10.5 ps vs DC Bias Voltage (V)

電荷蓄積層 | 空乏層 | 反転層 | Flatband at -0.98 V

● C-V | ● THz Amplitude

p型試料

THz Amplitude (arb. units) vs Time (ps)

Bias Voltage: +10 V, -1.6 V, 0 V, -1.8 V, -1.0 V, -2.0 V, +1.2 V, -3.0 V, -1.4 V, -10 V

THz Amplitude at 10.5 nm vs External Voltage (V)

電荷蓄積層 | 空乏層 | 反転層 | Flatband at -1.56 V

- 10 V ~ -2 V, 0 V ~ 10 Vの間ではLTEM波形は殆どバイアスに依存しない
- C-V曲線は表面に形成されるのが電化蓄積層から空乏層、反転層へと移るバイアス電圧で急激に変化するが、THz振幅もそれに似た変化をする
- この試料のフラットバンド電圧は-0.98 Vで、そこでは殆どTHz信号が出ず、またここを境に極性反転する
- やはり容量が変化する電圧でのみTHz振幅が急に变化する
- フラットバンド付近でのTHz波形の極性反転も見えた
- LTEMのシグナルに界面での電界加速が支配的な影響を与えている強い証拠である

考察: 表面ポテンシャルとの比例関係。強く反転、あるいは強く電荷蓄積する領域では飽和。

Capacitance (nF) vs Bias Voltage (V)

ITO 1kHz | Experiment | Calculation, Deeply Depressed, $D_0 = 0$, $N_A = 8.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 300 K | Flatband at -0.98 V

(上) 測定されたC-V曲線(黒丸)と計算値(赤点線)の対応の一例。この対応により各バイアス電圧における内部電界を評価することができ、その空間分布である表面ポテンシャルも求めることができる。[4]

(右) n型試料とp型試料における表面ポテンシャルとTHz振幅の比較。強い正の相関が見られる。また、ドープ濃度の違いから、p型試料の方が表面ポテンシャルが緩やかに変化しているが、THzの振幅の変化も緩やかである。

ϕ_s 対 THz ピーク振幅

Drudeモデルによる dj/dt の計算

散乱時間 (0.3 ps) で加速。面積は $q_e \rho_{exc} H_c \phi_s$

ドープ濃度やドープの極性、キャリア寿命等の影響は小さい

積分値は0

表面での初期減速。 $e \rho \mu_c^2 E_s^2$

両試料でよく似た、表面ポテンシャルとの比例関係
⇒ ある程度の表面電場までDrudeモデルで説明可

◎ 最も単純な近似としてDrudeモデルの範囲内[5]で考察すると、THz振幅の大きさは表面ポテンシャルに比例する。

◎ 表面ポテンシャル ϕ_s は太陽電池表面のパッシベーションの良しあしを決めるパラメータで、特にこれが0に近いと良くないため、 ϕ_s を直接評価出来るLTEMはデバイス評価手法として非常に有望であると言える。特願2016-026113

結論

- 実験結果のまとめ
- ◎ 透明電極Si-MOS構造の試料でLTEM観測をし、内部電界の強さとTHz波振幅の関係が得られた。特にフラットバンド付近ではn-Siとp-Siでほぼ同じ比例関係を得た
- 考えられる応用
- ◎ 半導体表面や界面の内部電圧が非接触で得られる。MOS構造や太陽電池パッシベーション膜の診断法として期待
- 今後の展望
- 今の研究の拡大発展として...
- ◎ より定量的な一致を得て、内部電場の定量比較法を確立したい
 - ◎ pn接合面の診断
 - ◎ 表面電荷の制御の診断は発展途上のデバイスで特に有用であるから...
 - ◎ 開発中の多結晶HIT (アモルファスSiとSiの界面)の診断: Mitchell博士と共同
 - ◎ CIG系、CZTS等の化合物薄膜系等への応用

参考文献

- [1] Masayoshi Tonouchi, "Cutting Edge Terahertz Technology", Nature Photonics 1(2) 97-105 (2007)
- [2] Hidetoshi Nakanishi, Akira Ito, Kazuhisa Takayama, Iwao Kawayama, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi, "Comparison between laser terahertz emission microscope and conventional methods for analysis of polycrystalline silicon solar cell", AIP Advances 5(11) 117129 (2015)
- [3] Masatsugu Yamashita, Chiko Otani, Kodo Kawase, Kiyoshi Nikawa, Masayoshi Tonouchi, "Noncontact inspection technique for electrical failures in semiconductor devices using a laser terahertz emission microscope", Applied Physics Letters 93(4) 041117 (2008)
- [4] Simon Min Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Wiley & Sons (1981)
- [5] Ronald Ulbricht, Euan Hendry, Jie Shan, Tony F. Heinz, and Mischa Bonn, "Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy", Reviews of Modern Physics 83(2), 543-586 (2011)