

(様式第5号)

逆格子マッピング測定を用いた、格子不整合 InGaAs 太陽電池の 転位滑り面の面内分布異方性の観察

Observation of in-plane distribution of dislocation glide planes in lattice-mismatched InGaAs solar cells using reciprocal lattice mapping

鈴木秀俊 平川翔太 栗崎阜成

Hidetoshi Suzuki, Shota Hirakawa, Kosei Kurisaki

宮崎大学 工学部

Faculty of Engineering, University of Miyazaki

- ※1 先端創生利用（長期タイプ）課題は、実施課題名の末尾に期を表す（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）を追記してください。
- ※2 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後 2 年以内に研究成果公開（論文（査読付）の発表又は研究センターの研究成果公報で公表）が必要です（トライアル利用を除く）。
- ※3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※4 共著者には実験参加者をご記載ください（各実験参加機関より 1 人以上）。

1. 概要（注：結論を含めて下さい）

一つの GaAs 基板上に作製された複数の 1 cm 角の InGaAs 太陽電池セルのうち特性の悪いセルに関して、格子面傾斜の面内分布とその偏りが発生する位置の評価を、ビームを絞った X 線を用いて試料上 7x7 の点で三次元逆格子測定を行うことで評価した。傾斜方向の偏りの違いはバッファ層の最初期もしくは中期に発生していることが見出された。

(English)

The in-plane distribution of lattice tilt of the poorly performing 1 cm² InGaAs solar cell fabricated on a GaAs substrate was evaluated by three-dimensional reciprocal lattice measurements at 7x7 points on the cell using a focused X-ray beam. It was found that the difference in tilt bias occurred at the beginning or in the middle of the buffer layer.

2. 背景と目的

III-V 族化合物半導体のエピタキシャル薄膜を利用した多接合型太陽電池は 40%を超える超高効率が可能であることから、宇宙用や集光型での利用が行われている。ここで、太陽光に対して最適なバンドギャップエネルギーを持つ半導体材料を組み合わせるため、格子不整合材料の積層が行われている。この際、歪み緩和のための格子不整合転位と、それに付随した貫通転位の発生が問題となり、様々なバッファ層を複数導入することによりデバイス層の貫通転位密度の低減が図られている。本研究で注目したい点は、1 枚の半導体ウェハ上にバッファ層を用いて格子不整合材料の積層を行なった際に、ウェハの場所毎に転位分布と特性にばらつきが現れる点である。これまでの研究により、特性が悪い太陽電池では、格子不整合転位の滑り面の偏りが面内で異なることがわかっている[1,2]。滑り面の偏りは、X 線回折法により格子面の傾斜の偏

りとして測定が可能であるが、大学所有の装置では X 線強度が弱く、X 線ビームサイズを絞って太陽電池面内の偏り分布を測定するには時間がかかる。また、基板と太陽電池層の間に導入されたバッファ層からの回折を検出することができない。

そこで本研究では、輝度の高い放射光を用いた X 線回折法を用い、同一ウェハ上に作製された複数の格子不整合 InGaAs/GaAs 太陽電池の転位滑り面の、セル面内および各バッファ層での偏り分布と評価を目的としている。今回は、同一の GaAs 基板上に作製された複数の 1cm 角 InGaAs 太陽電池セルのうち、特性が悪いに対して、格子面傾斜の面内分布とその偏りが発生する位置の評価を、ビームを絞った X 線を用いて試料上 7x7 の点で三次元逆格子測定を行うことで評価した。

3. 実験内容(試料、実験方法、解析方法の説明)

本研究では、同一の GaAs 基板上に作製された特性の異なる 3 つの 1 cm² 角の InGaAs 太陽電池に関して、面内の 7x7 の 49 箇所での 004 逆格子点近傍の三次元逆格子マッピング測定を行い、転位滑り面の面内分布評価を行った。太陽電池層の貫通転位低減のため、基板と InGaAs 層の間には InGaP 傾斜組成バッファ層とオーバーシューティング層が挿入されている。試料構造の詳細は以前の文献にまとめてある[3,4]。入射スリットにより試料に照射される X 線を 2 x 2 mm² とした。X 線のエネルギーを 15 keV、検出器角度(2 θ)は 34.00° で固定した。試料ステージの x および y 方向位置を調整することによって試料に対する X 線照射位置を変更し、面内 7x7 箇所での逆格子マッピング測定を行なった。検出機は二次元 X 線検出器(Pilatus)を使用し、1 測定点あたり、X 線入射角度(ω)を 14° から 16° まで 0.01° ずつ変化させて 201 枚の二次元 X 線回折パターンを取得した。得られた二次元回折パターンから座標変換を行い、004 逆格子点近傍の三次元逆格子図を作製した。

4. 実験結果と考察

3 つの太陽電池試料を測定したところ、これまでの宮崎大学での測定と同様に、特性が悪い資料では面内で滑り面の傾きが異なっている様子が観察された。三次元逆格子マッピング図を [110] 方向に投影した際の典型的なパターンを図 1 に示す。いずれにおいても基板ピークの下方にバッファ層と InGaAs 太陽電池層、オーバーシュート層のピークが確認できる。バッファ層は基板から InGaAs 層の格子定数まで徐々に格子定数を変化させた傾斜組成となっているため、弱い信号が連続して変化している。[$\bar{1}10$] 方向のピーク位置に注目すると、(a) と (b) では InGaAs 太陽電池層ピークが基板のピークに対して逆の方向にシフトしており、支配的な転位滑り面が異なることで InGaAs 格子面の傾斜が異なっていることを示している。(c) では InGaAs 層のピークが複数観察され、X 線が照射されている 2x2 mm² の範囲内でも支配的な滑り面が混在している様子が見出された。

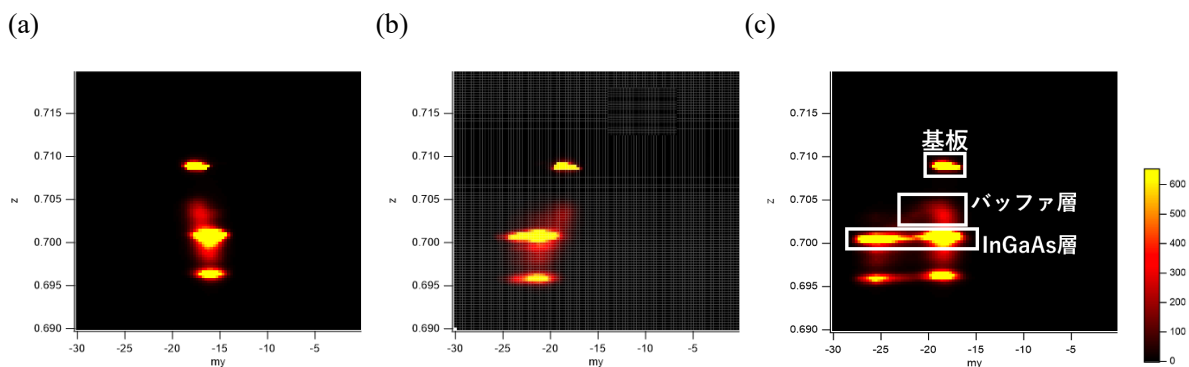


図 1: 特性が悪い 1cm² 角の InGaAs 太陽電池の異なる 2x2 mm² の測定箇所得られた 004 点近傍の逆格子マッピング測定例。

特性が悪い太陽電池試料の 7x7 の測定点での $[\bar{1}10]$ 方向の InGaAs ピーク位置をまとめた結果を図2(a)に示す。ここで、赤と青はそれぞれ GaAs 基板の格子面に対して反対方向に傾斜していることを示しており、色が濃いほど傾斜が大きいことを示している。また、複数の InGaAs ピークが観察された点は1マスで2色で表示した。大きく図中の右と左で傾斜方向が異なる領域が分かれており、中央部付近には傾斜方向が混ざった領域が存在する。中央部は傾斜方向が大きい点の特徴であった。この傾斜方向の違いがバッファ層のどの領域から発生するかを明らかにするため、基板に近い点、基板と InGaAs 層の中間、InGaAs 層に近い点の3箇所で、バッファ層の $[\bar{1}10]$ 方向ピーク位置の面内分布をまとめた(図2(b)~(c))。バッファ層初期(b)では全体的に傾斜が小さいものの中央部の傾斜が比較的大きく、InGaAs 層の結果と対応している。しかし、左右両端の差は小さく、InGaAs 層の傾斜とは対応していない。バッファ層中期(c)では左右両端の傾斜方向が変化しており、InGaAs 層と同方向への傾斜が確認できる。この結果は、InGaAs 層の傾斜の違いがバッファ層のごく初期から始まっている場合と、中期ごろから始まっている場合があることを示している。

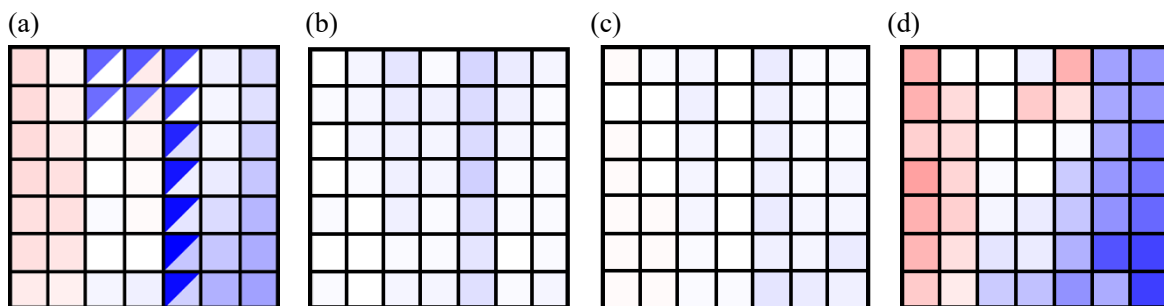


図2: 特性の悪い 1cm 角の太陽電池試料に対して面内の逆格子マッピングのピーク位置から算出した各層の傾斜分布。赤と青は GaAs 基板に対してそれぞれ逆方向に傾斜していることを示し、色が濃く傾斜量が大きさを示す。(a)InGaAs 太陽電池層、(b)基板に近いバッファ層、(c)InGaAs と基板の中間のバッファ層、(d) InGaAs 太陽電池に近いバッファ層。

5. 今後の課題

今回は特性の悪い GaAs 基板上的 InGaAs 太陽電池に対して、InGaAs 太陽電池と傾斜組成バッファ層の傾斜の面内分布を評価し、バッファ層の初期もしくは中期で傾斜の偏りの違いが発生することを見出した。今回はピーク位置のみに注目して解析したが、実際はピークの広がりにも違いが見られている。偏りの違いの発生起源を明らかにするためには、ピーク位置だけでなく形状も含めた解析が必要である。また、格子不整合度および基板が異なる太陽電池セルに関しても同様の解析を行い、統計的な解析を行う必要がある。

6. 参考文献

- (1) “Inhomogeneous in-plane distribution of preferential glide planes of β dislocations in a metamorphic InGaAs solar cell”, A. Ogura, H. Suzuki, et al., Appl. Phys. Express., **14**, 011001 (2021).
- (2) “Relationships between the distribution of dislocation glide planes and electrical properties of lattice-mismatched InGaAs solar cells”, J. Okubo, H. Suzuki, et al., PVSEC-33, TuP-32-52. (2022, 11 月)
- (3) “Correlation between the Distributions of the Preferential Glide Plane and the Electrical characteristics in InGaAs Single-Junction Solar Cells”, A. Ogura, H. Suzuki, M. Imaizumi, DRIP-XIX, TuP-21 (2022, 9 月発表)
- (4) “Correlation between open-circuit voltages and preferential glide planes of misfit dislocations of metamorphic InGaAs single junction solar cells grown on GaAs”, A. Ogura, H. Suzuki, M. Imaizumi, J. Cryst. Growth, **533**, 125432 (2020).

7. 論文発表・特許 (注: 本課題に関連するこれまでの代表的な成果)

なし（データ解析を追加し、2024年の夏以降の論文発表を目指している。）

8. キーワード（注：試料及び実験方法を特定する用語を2～3）

多接合太陽電池、逆格子マッピング、転位

9. 研究成果公開について（注：※2に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文（査読付）発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください（2018年度実施課題は2020年度末が期限となります）。

長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

① 論文（査読付）発表の報告 （報告時期： 2024年 10月）