

九州シンクロトロン光研究センター 県有ビームライン利用報告書

課題番号：2405018P

BL 番号：BL07

(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、栗崎阜成、古藤隼人

Hidetoshi Suzuki, Kosei Kurisaki, Hayato, Koto

宮崎大学 工学部

Faculty of Engineering, University of Miyazaki

- ※ 1 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）。
- ※ 2 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※ 3 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）

本研究では、放射光を用いた逆格子マッピング測定により、格子不整合 InGaAs 太陽電池のステップグレーデッドバッファ (SGB) 層における傾斜の不均一が発生する位置の解明を目的とした。SGB 層のピーク位置変化から、原子面の傾斜変化を複数のグループに分け、傾斜の不均一が発生する箇所の違いを考察した。

SGB 層の格子面傾斜の動きには 7 つのパターンがあった。バッファ層の中盤から傾斜変化するパターンの場合に特性が悪い傾向が見出された。中盤から変化するパターンの領域は In 組成が高い 30% の試料でのみ観察された。

(English)

In this study, we used synchrotron radiation-based reciprocal lattice mapping measurements to clarify the position where nonuniformity in the inclination of the step-graded buffer (SBG) layers occurs in lattice-mismatched InGaAs solar cells. We divided the changes in the peak position of the SGB layer into several groups based on changes in the inclination of the atomic plane and examined the differences in the locations where nonuniformity in the inclination occurs.

Seven patterns of lattice plane tilt were observed in the SGB layer. The pattern where the tilt changed from the middle of the buffer layer tended toward poor characteristics. This region was observed only in samples with a high In composition of 30%.

2. 背景と目的

近年、発電効率が高い III-V 族化合物太陽電池として、逆積み式太陽電池 (Inverted Metamorphic Multi Junction solar cells: IMM MJ solar cells) である、格子不整合系 3 接合 InGaP/GaAs/InGaAs 太陽電池が注目されている。従来の格子整合系よりも最適なバンドギャップ (Eg) の組み合わせにより、高効率化を実現しており、人工衛星への搭載や移動体への応用も検討されている。しかし、InGaP/GaAs/InGaAs においては、ウェハ面内で電気特性がばらつくという問題点が存在する [1-4]。この原因として、格子不整合となる GaAs/InGaAs の間に挿入されている InGaP 傾斜組成バッファ (Step Graded Buffer Layers: SGB) 層において、転位すべり面の分布が不均一となっている点が指摘されている [1]。この転位すべり面の分布不均一とは、異なるすべり面をもつ転位が支配的になる領

域が、一つの太陽電池セル内に混在している状態である。変換効率向上には、この転位すべり面の不均一の原因を究明する必要がある。InGaP-SGB層は組成が異なる複数層から形成されているため、起源解明には、すべり面の不均一が発生する位置を解明する必要がある。過去の研究において、転位すべり面の不均一がSGB層成長初期から始まっていることが示唆されている。

3. 実験内容（試料、実験方法、解析方法の説明）

本研究では、試料として微傾斜GaAs(001)基板上に作製された格子不整合系InGaAs太陽電池から1 cm角に切り出された太陽電池セルを評価した。SGB層のすべり面の不均一性を評価するため、X線回折(X-ray diffraction: XRD)装置を用いて、セル面内の7x7の箇所、逆格子マッピング(Reciprocal Space Mapping: RSM)測定を行った。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エ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[1]。入射スリットにより試料に照射されるX線を $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$ とした。X線のエネルギーを15 keV、検出器角度(2θ)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。

面内で支配的な転位すべり面が異なることにより、成長層の格子面が異なる方向に傾斜することになる。RSMではSGB層も含めた各層の傾斜が評価できる。そのため、SGB層の傾斜の推移を観察することによりすべり面の不均一がどこから発生しているかを詳細に見ることが可能である。各測定箇所のSGB層のピーク位置変化から、原子面の傾斜変化を複数のグループに分け、傾斜の不均一が発生する箇所の違いを考察した。

4. 実験結果と考察

RSMの測定例を図1(a)に示す。縦軸が基板成長方向、横軸が面内方向を表している。一番上が基板、白い四角で囲んであるピークがSGB層、その下にあるのがInGaAs層に起因するピークである。SGB層はIn組成を変えることで格子定数を基板の値からInGaAsの値に徐々に近づけているため、基板のピークに近いほど基板側のSGB層の状態を反映している。ここでは、InGaAs層のピークは基板に対して左側に傾斜しているが、SGB層は一旦右方向に傾斜してから途中で左側に変化している。SGB層の変化は試料や測定点によりいくつかのパターンが見られ、図1(b)に示す7グループに分類することができた。なお、図1(a)の結果はグループ1に分類される。

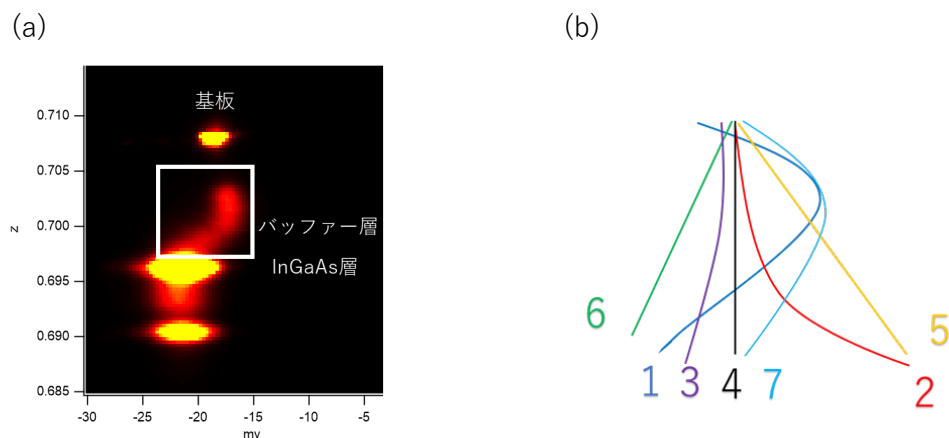


図1: (a)RSMの測定例。(b)

グループ 2,5 は最終的に右方向に傾斜しており、ステップ起因のすべり面が支配的となる。5 は SGB 層の初期層から単調にステップ起因のすべり面の傾斜が現れているが、2 は途中から影響が現れる。一方で、グループ 3,6 は最終的に左方向に傾斜しており、InGaP 自然超格子の影響が支配的となる。6 は SGB 層の初期層から単調に InGaP 自然超格子起因のすべり面の傾斜が現れているが、3 は途中から影響が現れる。

グループ 4 は傾斜がほとんど見られない。つまり、InGaP 自然超格子とステップ起因の影響が相殺していると考えられる。

グループ 1,7 は、まず右方向に傾斜してから、左方向に傾斜している。つまり、初期はステップ起因の滑り面の偏りが強く、SGB 層の成長に伴い後半から InGaP 自然超格子起因の影響が強くなっていくグループである。最終的には、1 はステップ起因の傾斜が InGaP 自然超格子起因の傾斜によりほぼ相殺される。7 はさらに InGaP 自然超格子による傾斜が支配的に変化している。

以上を踏まえて、今回測定した InGaAs 太陽電池の面内の SGB 層の傾斜変化をグループ分けした。ただし、いくつかの測定点では成長層からのピークが二つに分離していたため、それぞれをグループ分けして両方を示している。

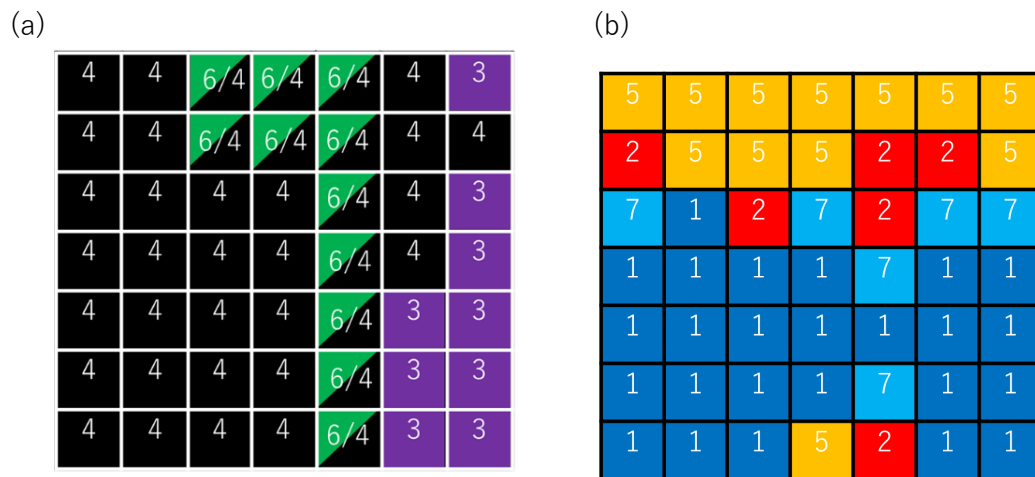


図 3 InGaAs 太陽電池の SGB 層の格子面傾斜パターンの面内分布。(a)In=20%、(b)In=30%。面内の数字は図 2 の傾斜パターンに対応している。

In 組成 20%の試料に対して面内グループ分けした結果の一例を図 2(a)に示す。グループ 3、4、6/4 混在の領域がそれぞれ縦に存在している。これらはいずれも変化が直線的で、InGaP の影響が小さい。他に測定した In 組成 20%の試料においても、同様に直線的な変化が多い分布が見られた。

次に In 組成 30%の試料に対して面内グループ分けした結果例を図 2(b)に示す。上部はグループ 5、下側の領域はグループ 1 が多く、その境界にグループ 2,7 が見られる。グループ 5 は単調にステップ起因で傾斜する領域である一方、グループ 1,2,7 は途中から変化が大きくなる領域であり、直線的な変化の領域から曲線的な変化へとグラデーションのような分布が見られた。これは、単調な変化が多い 20%の場合と異なっていた。他に測定した In 組成 30%の試料においても、グループ 5 の領域の隣には、グループ 2,7 の領域が存在している場合が多く見られた。

以上のグループ分けの分布と、電気特性と比較を行った。まず、グループ 1,7 のような、傾斜が急激に変化するものがない試料は電気特性が良い傾向にあった。また、面内でグループの種類が少なく、統一された領域が大きいほど、電気特性が良い傾向にあった。

以上の結果より、不均一の発生地点としては、グループ 4~6 のような SGB 層初期に発生し、そのまま単調に変化する場合、グループ 2,3 のように初期の変化は小さいが、中盤から不均一が現れる場合、グループ 1,7 のように初期の傾向が中盤になって逆の傾向に変化する場合が存在することが見出

された。特に 1,7 が存在する場合に特性が悪い傾向がある。

5. 今後の課題

今回の測定により、SGB 層の格子面傾斜として 7 つのパターンを見出した。特に、バッファ層の中盤から傾斜変化するパターンの場合に特性が悪い傾向が見出された。今後は、同一基板上に成長したにもかかわらず場所ごとに傾斜傾向が変化する原因究明が課題である。

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（2025 年秋の応用物理学会で口頭発表予定であり、論文投稿準備中である）

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

① 論文（査読付）発表の報告 （報告時期： 2026 年 3 月）