

(様式第5号)

X線トポグラフィー法を用いた
微傾斜 GaAs(001)基板上 InGaAs 薄膜中の格子不整合転位の観察
Observation of misfit dislocations in InGaAs layer grown on vicinal GaAs(001)
substrate by X-ray topography

鈴木 秀俊¹, 高比良 潤¹, 小寺 大介²
Hidetoshi Suzuki¹, Jun Takahira¹, Daisuke Kodera²

¹宮崎大学工学部、²豊田工業大学
¹Faculty of Engineering University of Miyazaki,
²Toyota Technological Institute

- ※1 先端創生利用（長期タイプ、長期トライアルユース、長期産学連携ユース）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 利用情報の開示が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後二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。（トライアルユース、及び産学連携ユースを除く）

1. 概要（注：結論を含めて下さい）

多接合太陽電池用への応用が期待されている格子不整合系 InGaAs/GaAs(001)ヘテロエピタキシャル膜に関して、基板面方位が格子不整合転位の分布および構造に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行った。今回は[110]方向に2°傾いた(001)基板上に作製した InGaAs 膜に対して異なる回折点における X 線トポグラフィーを測定し、格子不整合転位のバーガースベクトルを同定し、その分布に関する知見を得た。

(English)

Lattice mismatched hetero-epitaxial systems have been used to improve multi-junction solar cells. To understand the effects of substrate orientations on relaxation mechanisms due to lattice mismatch is important to reduce threading dislocation penetrating into solar cell layer from interfaces. In this study, we investigated Burger's vector of misfit dislocations at the InGaAs/GaAs(001) 2 off toward [110] interface.

2. 背景と目的

次世代の超高効率多接合太陽電池として、格子不整合系 III-V 族混晶が期待されており、集光下では40%以上の変換効率が実現されている。しかし、格子不整合に起因した格子不整合転位に伴う貫通転位が太陽電池層に残留する事により変換効率向上の妨げとなっている。様々な結晶成長手法の工夫により貫通転位の低減が図られており、現在の所 10^6 cm^{-2} の転移密度が達成されているが、変換効率に影響を与えないためには 10^5 cm^{-2} 以下の転移密度が必要と考えられている。より転移密度を低減し、格子不整合系多接合太陽電池をより高品質化する為には、転位形成による歪み緩和過程の理解が必要不可欠である。

我々はこれまでに、歪み緩和過程の理解を目指し、結晶成長装置と X 線回折装置を複合した装置を用いて結晶成長中のリアルタイム測定を試み、InGaAs/GaAs(001)において数 nm 成長毎に転移挙動を逆空間測定により観察する事に成功している [1-4]。この際、転移形成初期の転移分布の異方性が最終的な結晶性に大きく影響する事[3]や、基板の面方位を変化させる事により転移形成に異方性を

生じる事[4]を見いだしている。また、初期の分布異方性に関しては、佐賀シンクロトン光研究センターBL09AにおけるX線トポグラフィー測定による実空間での転移観察による補完実験も行っている[5]。

我々はこれまでにInGaAs/GaAsのMBE成長中リアルタイムでX線回折測定により、基板の面方位を変化させる事(微傾斜)により歪み緩和に異方性を生じる事を見いだしている。これは、格子不整合転移の中で、III族中心の転移(α 転移)とV族中心の転移(β 転移)の中で異なるバーガースベクトル(b)を持つ転位の形成割合に偏りが生じていると考えている。ここで、 α と β 転移の b がちょうど打ち消し合う組合せであれば、それぞれ対消滅で転移線は終端される。つまり、微傾斜基板等により形成される転移の b が制御できれば、対消滅の促進が可能であり転移密度低減に有効である。しかし、歪み緩和の異方性が実際の転移の b の分布に対応しているかどうかは、実空間での観察が必要である。

そこで本研究では、微傾斜GaAs基板上に作製したInGaAs薄膜中の転移の分布および b の同定をX線トポグラフィー法により実空間で行い、傾斜の方向および角度に対する依存性を明らかにする事を目的としている。前回の課題(1404019R)において、基板傾斜の無いGaAs(001)ジャスト基板上に作製したInGaAs薄膜中のX線トポグラフィーを測定し、格子不整合転移のバーガースベクトルを同定している。本課題では、[110]方向に 2° 傾いたGaAs(001)基板上に作製したInGaAs薄膜における転移分布および b 同定を目的として実験を行った。

3. 実験内容 (試料、実験方法、解析方法の説明)

[110]方向に 2° 傾いた半絶縁性GaAs(001)基板上に分子線エピタキシー(MBE)法を用いてエピタキシャル成長を行った $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 薄膜を測定試料として用いた。

X線トポグラフィー測定を九州シンクロトン光研究センターBL09Aにておこなった。基本的な装置配置および手順は、以前の課題(1101140Nおよび1104032N)における測定と同様である。配置模式図を図1に示す。

まず、白色X線トポグラフィー測定にて観察する回折点近傍にX線入射角度および検出器角度を調整し、その後にモノクロメーターによりX線の単色化を行って薄膜InGaAsあるいは基板GaAsそれぞれの回折が観察されるX線エネルギーに調整し、X線フィルムにてトポグラフィー像を得た。さらに、転移の b を同定するため、404、 $\bar{4}$ 04、044、0 $\bar{4}$ 4の4つの回折点に注目した。これらの回折点を測定するため、試料を 90° ずつ回転させて入射方位を変化させた。試料をステージに設置したときの、回転方向および結晶方位の模式図を図2に示す。

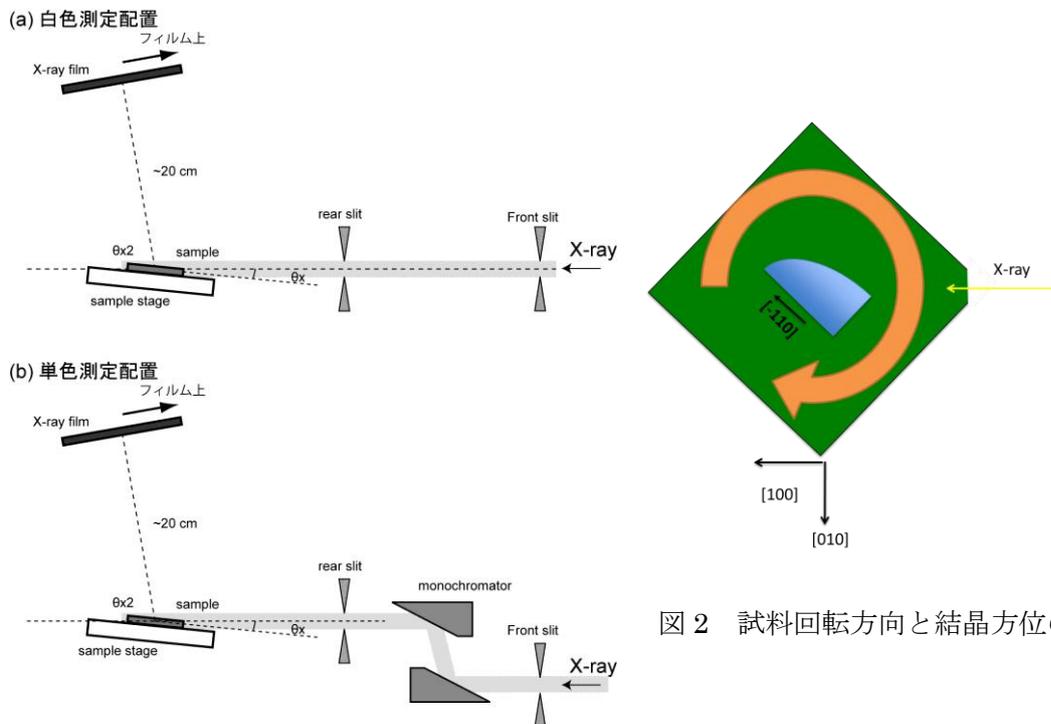


図2 試料回転方向と結晶方位の模式図。

図1 白色(a)および単色(b)トポグラフィー測定の装置および試料配置模式図。

4. 実験結果と考察

今回測定するにあたり、トポグラフィー像を得るためのスキャンの方法を、エネルギースキャンと上下スキャンの2種類で行っている。図3に2 $\bar{2}$ 4回折での(a)エネルギースキャンと(b)上下スキャンの測定結果を示す。我々はこれまでの実験で、主に上下スキャンを用いて測定を行っていた。しかし、今回用いる試料のサイズが大きかったため、上下スキャンでは試料の端の方を測定する事が出来なかった。そのため、次にエネルギースキャンでの測定を試みた。その結果、試料全体のトポグラフィー像を得ることに成功したが、試料が歪んでいることが原因で、はっきりとした像を観察出来なかった。そこで、転移線が発生していると思われる部分に絞って上下スキャンをかけることにより、鮮明な像を得ることに成功した。また、露光時間の違いはコントラストの差につながるため、比較的転移線がよく見えている値を探し、なるべく同じ時間で揃えるように調整した。

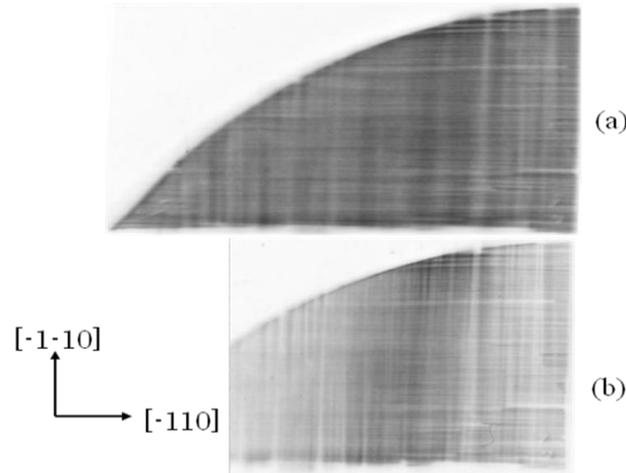


図3 微傾斜 GaAs(001)基板上に作製した InGaAs 薄膜の X 線トポグラフィー像。(a) エネルギースキャン、(b) 上下スキャン。回折点は2 $\bar{2}$ 4。

InGaAs 薄膜の異なる回折点で測定した X 線トポグラフィー像を図4に示す。なお、見やすさのため、X 線フィルムにて測定したトポグラフィー画像をデジタルデータ化し白黒反転させた画像を示している。[110]および $\bar{1}\bar{1}0$ 方向に InGaAs と GaAs 基板の界面に発生したミスフィット転移に起因する線状のコントラストが観察される。線状のコントラストに強弱および太さの違いが存在するのは、一本だけでなく複数のミスフィット転移が束状になっており、その集まり具合に差があるためだと考えられる。また、点状のコントラストは貫通転移に起因すると考えられる。

四角の枠で囲んだ中の $\bar{1}\bar{1}0$ 方向に平行なミスフィット転移起因のコントラストに注目する。404以外の回折点で測定したトポグラフィー像では3本の転移線が見られるが、404では真ん中の転移線が見られない。したがって[101]方向に垂直な \mathbf{b} を持った転移であると考えられる。InGaAs/GaAs(001)におけるミスフィット転移は60°転移が主である事を踏まえると、この転移は $\mathbf{b} = a/2 (\bar{1} 0 1)$ だと同定される。

以上のように、いくつかの転移に関しては \mathbf{b} を同定し、分布に関する知見を得る事が出来た。しかし、本試料には多くの転移が存在し、また各画像間でコントラスト差が小さい転移も観察されるため、試料全体の転移で \mathbf{b} を同定するには至っていない。

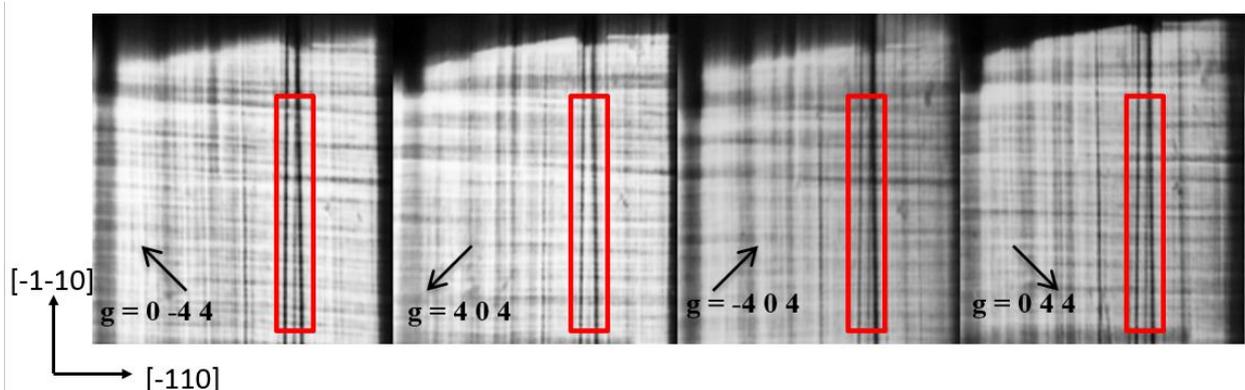


図4 微傾斜 GaAs(001)基板上に作製した InGaAs 薄膜の異なる回折点で測定した X 線トポグラフィ

一像。図中の矢印および数値は回折ベクトルを示す。

5. 今後の課題

今回は[110]方向に2°傾いた GaAs(001)基板上に作製した InGaAs 薄膜における転移分布および b の同定を行った。今後さらに詳細な解析を進めるには、傾斜方向が異なる試料に関しても同様の測定を行い、比較する必要がある。

また、本試料では α 転移($\bar{1}10$)および β 転移([110])から微小にずれている転移線や、転移線が枝分かれして発生している部分が観察された。何故このような事が起こったかについては、解明するに至っていない。今後異なる傾斜方向の試料を測定するときも、同様な現象が起こるのか、確認を行い検証する必要がある。

6. 参考文献

- [1] In situ real-time x-ray reciprocal space mapping during InGaAs/GaAs growth for understanding strain relaxation mechanisms, T. Sasaki, H. Suzuki, et al., Appl. Phys. Express 2, 085501 (2009).
- [2] X-ray Reciprocal Space Mapping of Dislocation-Mediated Strain Relaxation During InGaAs/GaAs(001) Epitaxial Growth, T. Sasaki, H. Suzuki, et al., J. Appl. Phys., 110, 113502 (2011).
- [3] Real-time observation of anisotropic strain relaxation by three-dimensional reciprocal space mapping during InGaAs/GaAs (001) growth, H. Suzuki, T. Sasaki, et al., Appl. Phys. Lett. 97, 041906 (2010).
- [4] Real-time observation of crystallographic tilting InGaAs layers on GaAs offcut substrates, T. Nishi, T. Sasaki, et al., AIP Conf. Proc., 1556, 14 (2013).
- [5] Misfit dislocation anisotropies in the InGaAs/GaAs(001) interface measured using X-ray topography and reciprocal space mapping, H. Suzuki, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 53, 018001 (2014).

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)

現時点では発表を予定していない。

今回の結果の詳細な解析を行い、続けて行った課題の成果を含めて発表を検討する。

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)

InGaAs/GaAs, ヘテロエピタキシー, X線トポグラフィ

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(2014年度実施課題は2016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： 2017年 3月) |
| ② 研究成果公報の原稿提出 | (提出時期： 2017年 3月) |