

# 逆格子マッピングによる成長初期の InGaAs/GaAs(001) 界面のミスフィット転位の解析

松下 卓哉<sup>a)</sup>・高比良 潤<sup>b)</sup>・境 健太郎<sup>c)</sup>・前田 幸治<sup>d)</sup>・鈴木 秀俊<sup>e)</sup>

## Analysis of Misfit Dislocations at the Interface of (001) InGaAs/GaAs by Reciprocal Space Mapping

Takuya MATSUSHITA, Jun TAKAHIRA, Kentarou SAKAI,  
Kouji MAEDA, Hidetoshi SUZUKI

### Abstract

Distribution of misfit dislocations (MDs) formed at the interface of InGaAs/GaAs(001) structure with different InGaAs thickness was investigated by X-ray reciprocal space mapping (RSM) techniques. Satellite peaks (Ps) were observed at the side of InGaAs 004 Bragg peak in RSM. Ps peaks were originated from scattering by lattices deformed by MDs. Peak position and full width at half maximum of Ps represented the mean tilt angle of crystal lattices caused by MDs and variation of them. These results were agreement with the results of X-ray topography. Based on these results, the same analysis were performed on the films with different In composition.

**Keywords:** GaAs, lattice mismatched solar cell, reciprocal space mapping, misfit dislocation

### 1. はじめに

格子不整合の III-V 族化合物半導体のヘテロエピタキシャル技術は超高効率多接合太陽電池に使われている。この構造では、エネルギーギャップが基板の格子定数に制限されないため、太陽光のスペクトルと最適なバンドギャップの組み合わせを選択することができる。しかし、この構造では格子定数の違いからミスフィット転位がヘテロ界面に形成される。ミスフィット転位は貫通転位の原因となり、再結合中心になり変換効率を低下させる。

ミスフィット転位には III-V 族半導体の結晶構造により 2 つの種類がある。III 族中心の転位( $\alpha$  転位)は $[\bar{1}10]$ 方向に入り、V 族中心の転位( $\beta$  転位)は $[110]$ 方向に入りそれぞれは直行している。 $\alpha$  転位と  $\beta$  転位の導入位置と滑り面を図 1 に示す。

これまでに転位分布の異方性及びその膜厚依存性を調べるために X 線トポグラフィ(XRT)での実空間の測定が行われており、 $\alpha$  転位の方が薄い膜厚で導入されること、 $\alpha$  転位の方が  $\beta$  転位よりも均一に分布することなどが明らかになっている<sup>1)</sup>。

本研究では、III-V 族ヘテロエピタキシャル膜における  $\alpha$  転位と  $\beta$  転位の膜厚依存性及び異方性を理解することを目的として InGaAs/GaAs(001)の界面におけるミスフィット転位を逆格子マッピング(RSM)によって測定した。実空間の XRT 像に見られる転位分布の特長<sup>1)</sup>と RSM 上に現れる回折強度の比較を行い、RSM が実空間の転位をどう反映しているかを明らかにした。In 組成を変化させた試料の RSM 測定を行い、転位分布の異方性を観察した。

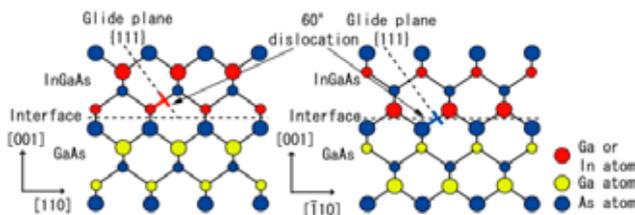


図 1 各転位の導入位置と滑り面

### 2. 試料作成と測定

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  層は半絶縁性 GaAs(001)基板の上に分子線エピタキシー法(MBE)法で作成した。Gaセルと Asセルの温度は一定にし、Inセルの温度を変化させることで In 組成を 4%、7%、9%、13%と変化させた。膜厚は転位が導入

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電気電子工学科学部生

c)産学・地域連絡センター教授

d)電気電子工学科教授

e) IR 推進機構特任助教

され始める膜厚(臨界膜厚)で規格化することで決定し、In組成は X 線回折の 004 反射から計算して求めた。InGaAs004 の RSM は宮崎大学機器分析センターの高分解能 XRD を用いて測定した。X 線の入射方向を基板の[110]方向と $[\bar{1}10]$ 方向の 2 種類の方法で行うことで、異方性を求めた。1 回の測定は約 4 時間かけて行った。

### 3. 結果・考察

#### 3.1 In 組成 9% の試料

図 2(上)に膜厚 88nm、In 組成 9% の試料に[110]方向から X 線を入射した 004RSM 測定結果を示す。中心の InGaAs004 のブラッグピーク(Pb)の左右に 2 つのサテライトピーク (Ps)が観察された。Ps は転位起因の回折であり、シミュレーションと実験結果がほぼ一致するという報告がなされている<sup>2)</sup>が転位の異方性や膜厚依存性、組成依存性についての精密な解析は行われていない。そこで本研究では Ps の詳細な解析を試みた。Pb を通る[110]に平行な直線上の強度プロファイルを図 2(下)に示す。中心の Pb に加え、Pb と同じ場所でやや広がった diffuse peak(Pd)、Pb の左右に 2 つの Ps という 4 つのピークがある。これらのピークにガウス関数によるフィッティングを行い、Ps のピーク位置、Ps 間の距離及び半値幅に関して、より定量的な比較を行った。

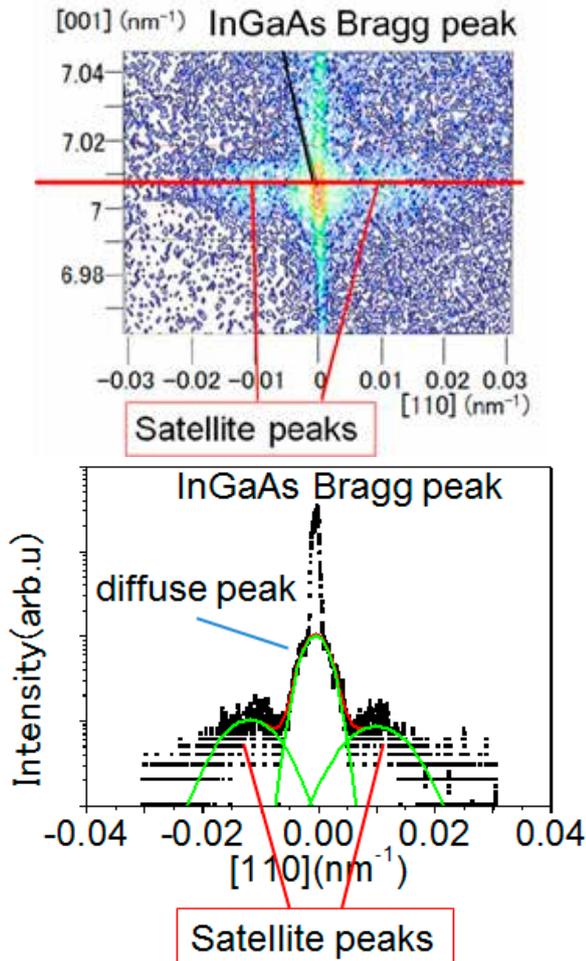


図 2 逆格子マッピングと強度プロファイル

フィッティングによって得られたパラメータについて述べる。まず、図 3 に In 組成 9% の試料の膜厚の変化に伴う Ps の面積強度の変化を示す。面積強度は膜厚の増加に伴い増加した。また、X 線の入射方向による依存性は見られなかった。

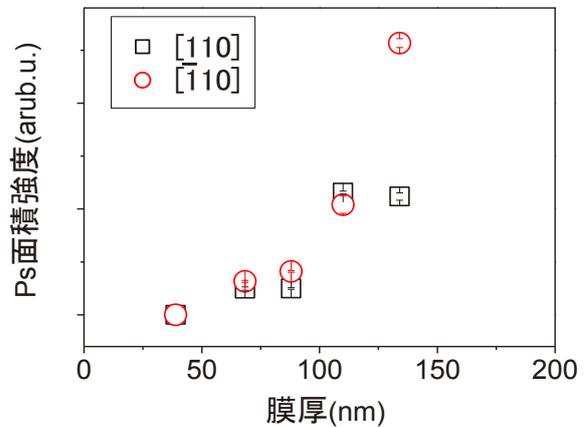


図 3 Satellite peaks の面積強度の変化(In 組成 9%)

次に図 4 に膜厚の増加に伴う Ps の半値幅の変化について示す。半値幅は膜厚 88nm の試料を除けば膜厚の増加に伴い減少する。この試料ではサンプルが割れてしまったため X 線の強度にも影響を及ぼし他の試料との単純な比較が難しい。また、X 線入射方向による依存性については膜厚が厚い試料では $[\bar{1}10]$ 方向から入射した方が明らかに大きくなった。

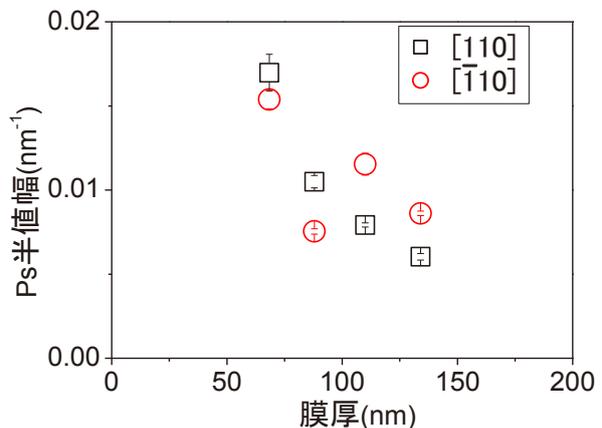


図 4 Satellite peaks の半値幅の変化(In 組成 9%)

図 5 に Ps 間の距離の膜厚増加に伴う変化について示す。Ps 間の距離は膜厚の増加に伴い減少した。また X 線の入射方向による依存性は Ps の面積強度と同様に見られなかった。

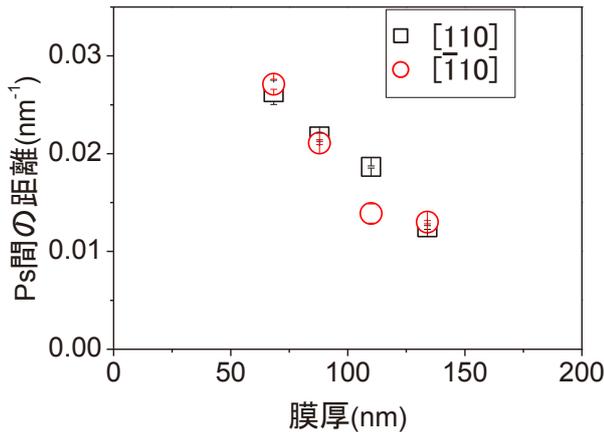


図5 Satellite peaks 間の距離の変化(In 組成 9%)

これらの結果を XRT による実空間での転位の観察と比較して考察する。面積強度は、膜厚の増加に伴い転位密度が増加する<sup>1)</sup>ため転位密度と対応すると考えられる。

Ps 間の距離は転位間の周期又は転移による軸の傾きの平均値と対応する可能性がある。しかし、転位間の距離は実空間に変換した際、予想される数値(約 1 $\mu$ m)と一致しない。従って、距離は転位による局所的な結晶軸の傾きの平均値を表していると考えられる。膜厚増加に伴う距離の減少は、転位間距離が近くなることにより傾きが減少したためだと考えられる。

半値幅は上記の転位による結晶軸の傾きの均一性を反映している。従って、半値幅が狭いほうがより転位分布が均一であることから[110]から X 線を入射した方が軸の傾きは均一であることが分かる。これは XRT 測定による  $\alpha$  転位の方が  $\beta$  転位より均一であるという結果<sup>1)</sup>と一致する。

### 3.2 In 組成を変化させた試料

In 組成 9%の試料の結果を踏まえて図 6~8 に In 組成を 4~13%変化させた試料のフィッティングパラメータを示す。まず図 6 に In 組成を変化させた試料の面積強度の膜厚/臨界膜厚による変化を示す。全ての In 組成で面積強度は膜厚の増加に伴い増加した。これは In 組成 9%の結果と一致している。

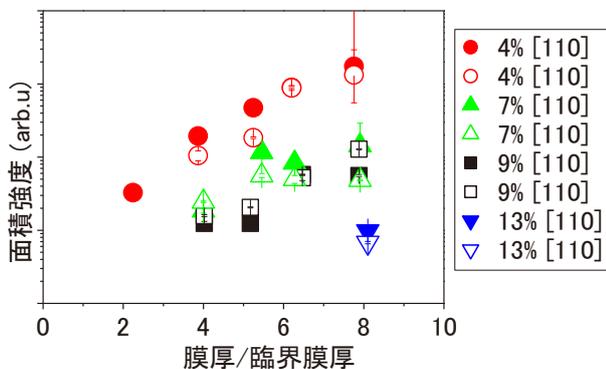


図6 Satellites peaks 面積強度の組成依存性

次に図 7 に In 組成を変化させた試料の Ps 半値幅の膜厚

/臨界膜厚による変化を示す。半値幅についても膜厚が増加すると減少するという In 組成 9%の試料の結果と同様の傾向を示した。また In 組成 9%の試料では異方性は見られなかったが、In 組成 4%、7%の試料では[110]の方が大きくなった。これは XRT で得られた  $\alpha$  転位の方が導入が早いという結果と一致している。また In 組成 4%では[110]の半値幅が[110]に比べて小さく、In 組成 9%と同様に  $\alpha$  転位の方が均一に分布していると予測できる。しかし In 組成 7%ではいずれの方向の半値幅もほぼ等しく異方性は見られない。つまり  $\alpha$  転位及び  $\beta$  転位の分布の均一性はほぼ等しかった。4%および 9%では転位分布に異方性が見られ、7%では見られなかった理由に関しては今後の検討が必要であることがわかった。

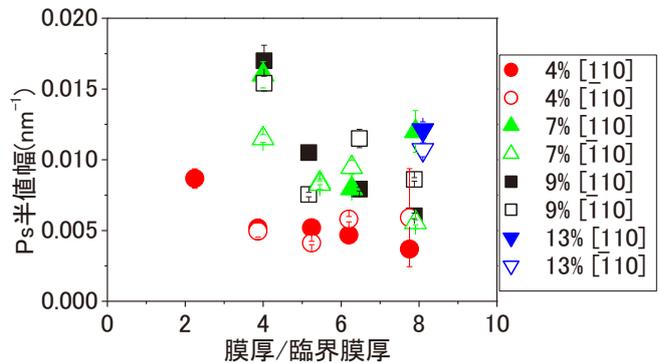


図7 Satellites peaks 半値幅の In 組成依存性

図 8 に In 組成を変化させた試料の Ps 間の距離の膜厚/臨界膜厚による変化を示す。距離についても膜厚が増加すると減少するという In 組成 9%の試料の結果と同様の傾向を示した。また、異方性についても、In 組成 9%の試料と同様に見られなかった。

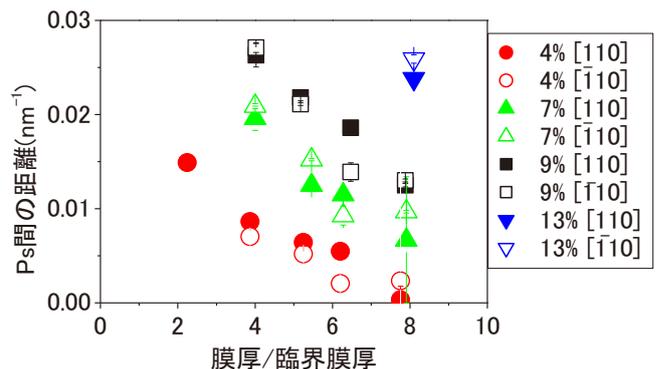


図8 Satellites peaks 距離の組成依存性

次に組成依存性について考える。今回の試料では膜厚を臨界膜厚によって規格化することで歪みの緩和率を一定にすることを目標とした。しかし、図 6~8 を見ると明らかに組成ごとに差があり、In 組成が低い試料、すなわち膜厚が厚い試料で In 組成 9%の試料の転位が多い試料と同様の傾向を示している。そこで図 6~8 の結果を臨界膜厚に

よる規格化を行わずに単純な膜厚による比較を行った。その面積強度の膜厚依存性を図9に示す。面積強度から、組成によらず膜厚が増加することで転位密度が増加していることがわかる。このことから今回の試料においては組成依存性よりも膜厚依存性の方が大きいことがわかった。その理由についても今後の検討が必要である。

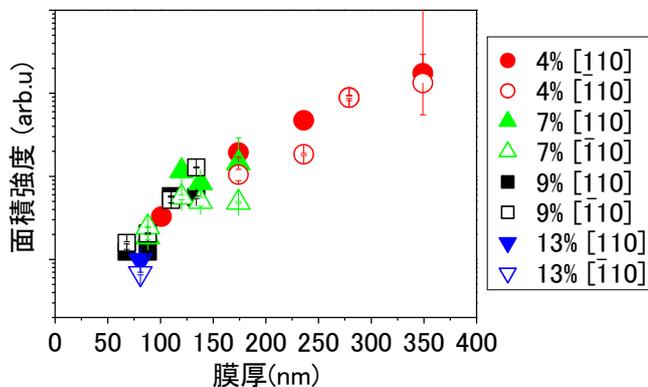


図9 Satellite peaks 面積強度の組成依存性

#### 4. まとめ

本研究では、膜厚の異なる InGaAs/GaAs 試料の RSM 測定とそのプロファイルのより詳細な解析により、転位密度及び分布とその異方性に関して明らかにした。サテライトピーク(Ps)の面積強度は転位密度と対応しており、膜厚増加に伴い増加するという膜厚依存性がある。これは実空間における X 線トポグラフィの結果と一致している。Ps の半値幅は構造的には軸の傾きの均一性を表しており、膜厚増加に伴い減少するという膜厚依存性があることがわかった。また、半値幅の異方性については $[\bar{1}10]$ の方が大きいという結果が得られた。この結果は実空間における  $\alpha$  転位のほうが  $\beta$  転位より均一性が高いという結果とよく一致している。Ps 間の距離は転位による軸の傾きを表しており、膜厚の増加に伴い減少するという膜厚依存性がある。

これらの結果を踏まえ、異なる In 組成の試料に関しても同様の解析を行ない、転位分布の異方性の有無を明らかにした。組成によって異方性に差が生じた理由については今後の検討が必要である。

また組成依存性についても比較を行った。臨界膜厚による規格化を行うことで膜厚/臨界膜厚ごとの歪みの緩和率を一定にすることを目標としたが、転位の分布に関しては一定でないことがわかった。また、臨界膜厚による規格化を行わずに比較した場合、組成に関わらず膜厚の増加による一様な変化を示した。このことから組成依存性よりも膜厚依存性のほうが強いことがわかり、その理由についても今後の検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 片山真宏、「平成 23 年度修士論文」宮崎大学
- 2) V. M. Kaganer, R. Köhler, M. Schmidbauer, R. Opitz, B. Jenichen, Phys. Rev. B, 55 (1997) 1793.
- 3) H.Suzuki, T.Sasaki, A.Sai, Y.Ohshita, I.Kamiya, M.Yamaguchi, M.Takahasi, S.Fujikawa, Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 041906.
- 4) K. Ishiji, S. Kawado, Y.Hirai, Phys. Stat. Sol. (a) to be published.
- 5) C. Ferrari, G. Rossetto, E. A Fitzgerald, Master. Sci. Technol. B91-92 (2002) 437.
- 6) H. Suzuki, T. Sasaki, K. Synchrotron Light Research Center, Report available prefectural beamline, 1101140N (2010).
- 7) H. Suzuki, T. Sasaki, S. Yamamoto, Y. Ohshita, A.Fukuyama, M. Yamaguchi, Materials Science Forum, 725 (2012) 85.
- 8) A. Jasik, J. Sass, K. Mazur, M. Wesolowski, Optica Applicata, 37 (2007) 237.