

多接合太陽電池応用を目指したInGaAs/GaAs 格子緩和初期過程のX線トポグラフィ観察

宮崎大学 工学教育部 鈴木秀俊



多接合太陽電池応用を目指した InGaAs/GaAs格子緩和初期過程の X線トポグラフィ観察

宮崎大学 •

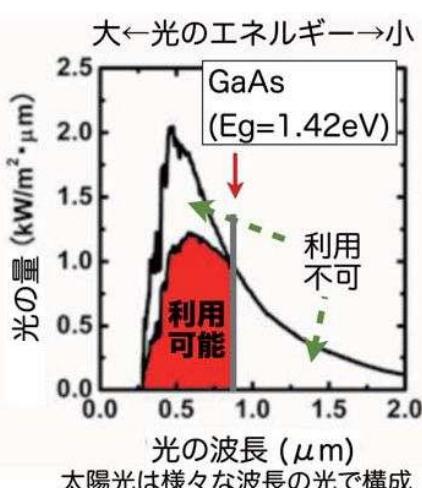
鈴木秀俊

1

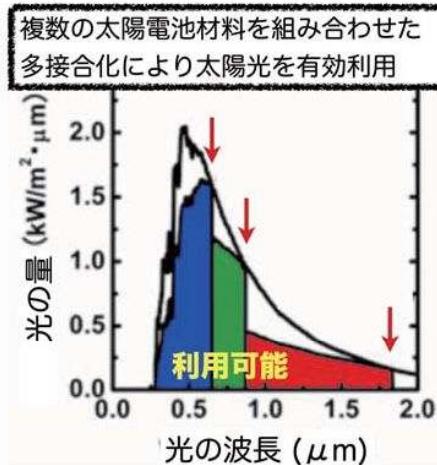


変換効率の理論限界、多接合太陽電池

平成26年10月24日
SAGA-LS
技術セミナー



太陽電池材料(半導体)固有の値である
バンドギャップエネルギー(E_g)により
効率限界が決定 (30%程度が限界)



→変換効率60%以上も可能
コストが上がる原因是
集光により抑制可能

2

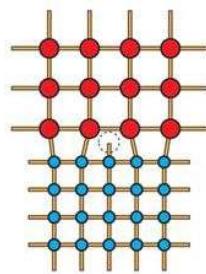


太陽電池特性低下の要因(結晶欠陥)

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

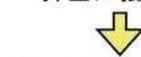
多接合型太陽電池の材料選定に
重要な材料固有の物理量

- ・バンドギャップエネルギー
- ・格子定数

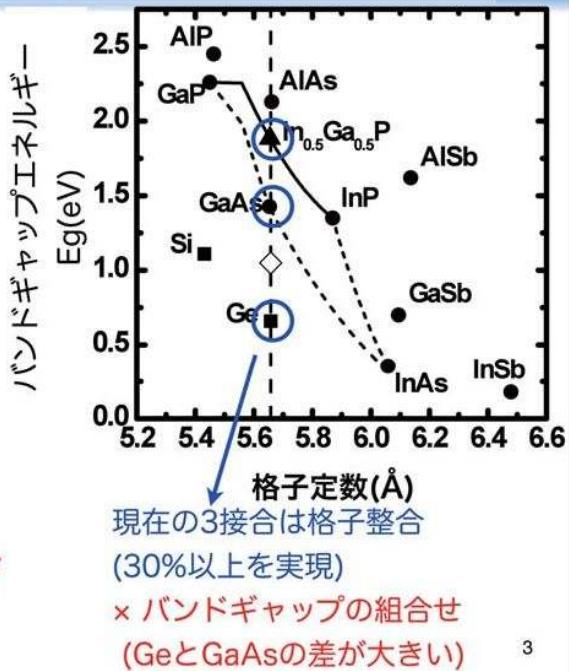


半導体結晶は
固有の原子間隔
(格子定数)を持つ

格子不整合
→界面に転位発生



太陽電池の効率低下



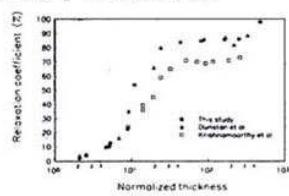
3次元逆格子測定による緩和の評価

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

Ex situ測定

[緩和率、結晶性] XRD, Raman...

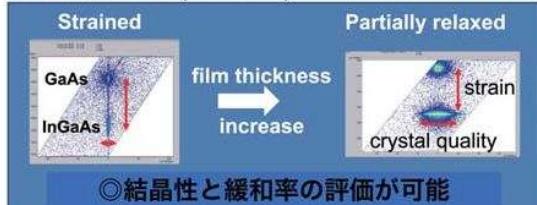
[転位の構造] TEM, XRT...



P. Maigne et al., J. Appl. Phys. 76 (1994) 1962.

- *熱膨張係数差→成長中と測定時の誤差
- *サンプル間誤差

X線逆格子測定(2D-RSM)



*面内異方性は検出出来ない

In situ測定

RHEED *表面のみ

MOSS *緩和率のみで結晶性評価不可

3次元逆格子(3D-RSM)+リアルタイム測定

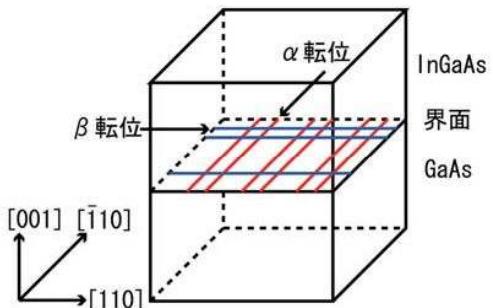
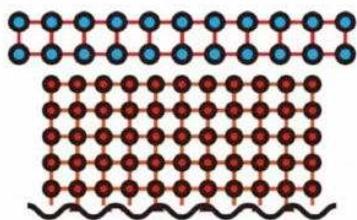
4



InGaAs/GaAs(001)における格子緩和

結晶成長中に転位がどのようにできて動くか？

→ 理解を目指した基礎研究

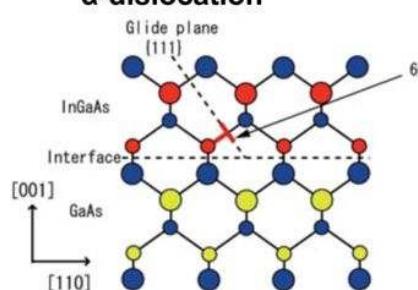


転位は膜厚増加と共に生成、増加
→ X線回折リアルタイム測定

5

緩和の異方性

α -dislocation



β -dislocation

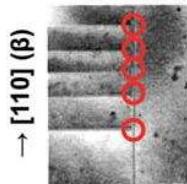
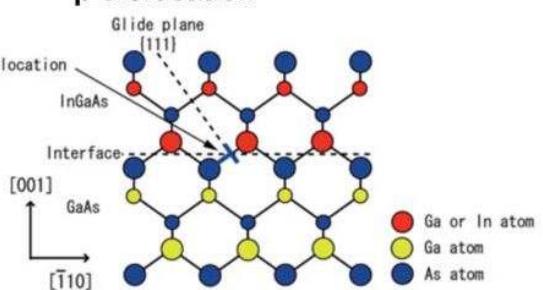


Fig. 3. X-ray diffraction intensity increase along the $\bar{1}00$ reflection. As clearly indicated above, it shows that the plane of the dislocation bending indicates the plane of the dislocation bending indicated by the arrow in the figure.

L.B. Freund, J. Appl. Phys. 68, (1990) 2073.

III-V族化合物半導体

転位中心元素2種類→2種類の転位

伝搬速度等が異なる

それぞれの転位は直交

お互いの伝搬を阻害して貫通転位化

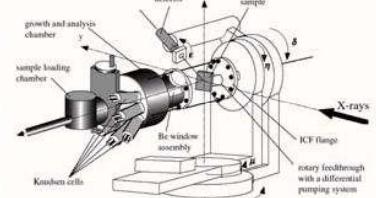
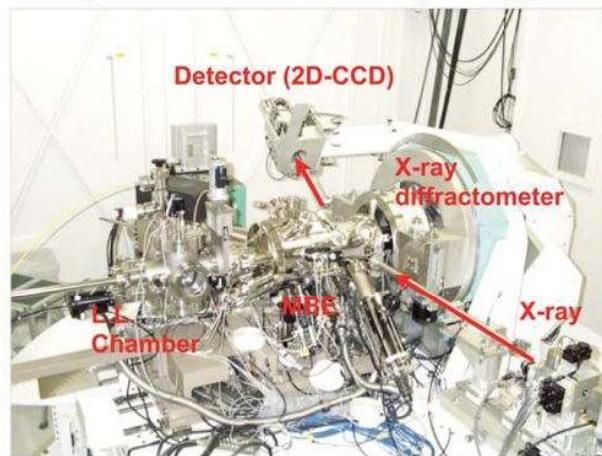
6



MBE-XRD装置

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

MBE (Molecular Beam Epitaxy) - XRD (X-Ray Diffraction) @SPring-8, BL11XU



M. Takahasi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 6427.

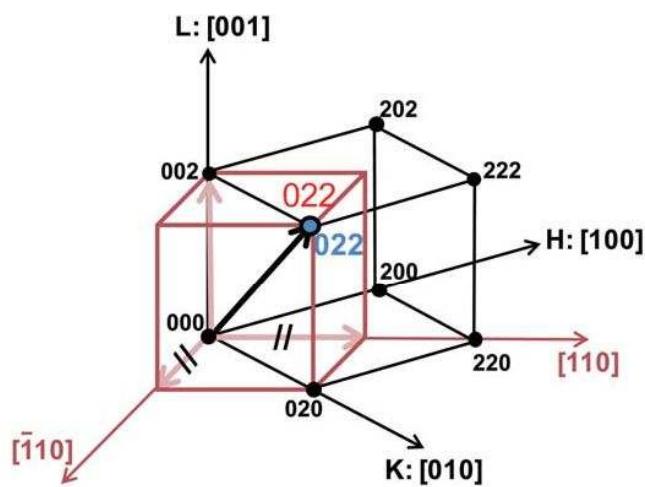
$\lambda = 0.8270 \text{ \AA}$,
Spot size: 0.3(horizontal) x 0.1(vertical) mm²
Detector: Two-dimensional CCD camera

7



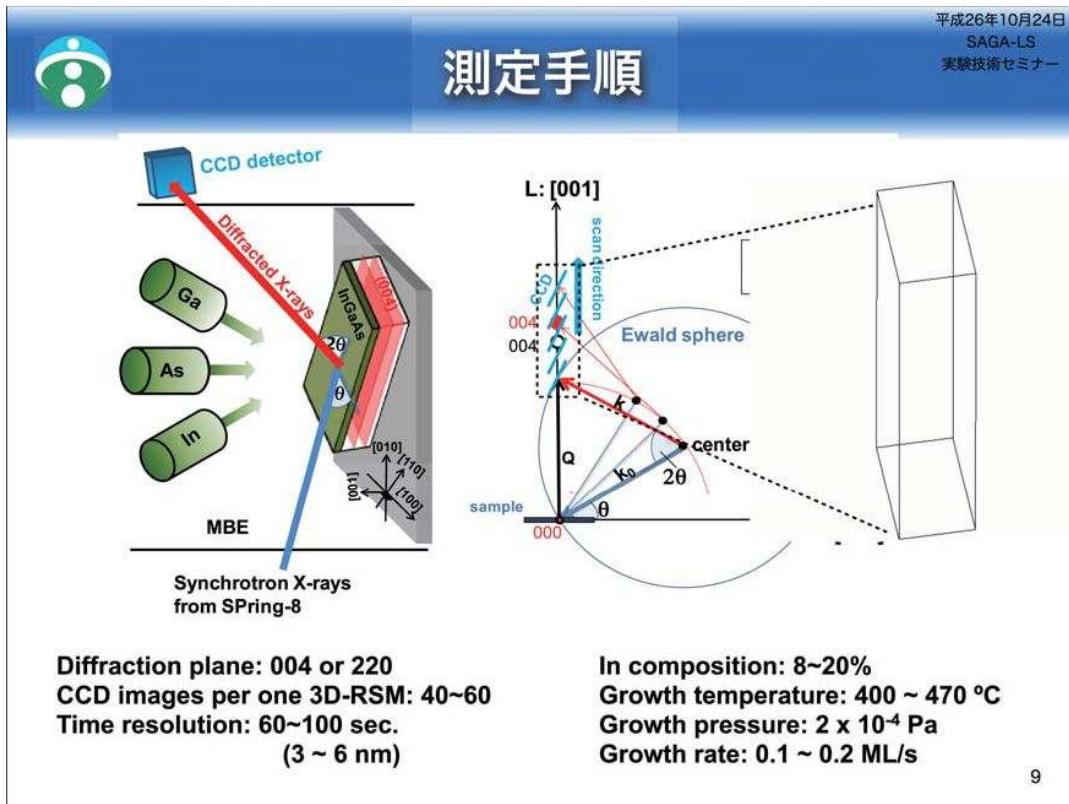
測定に注目した逆格子点

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

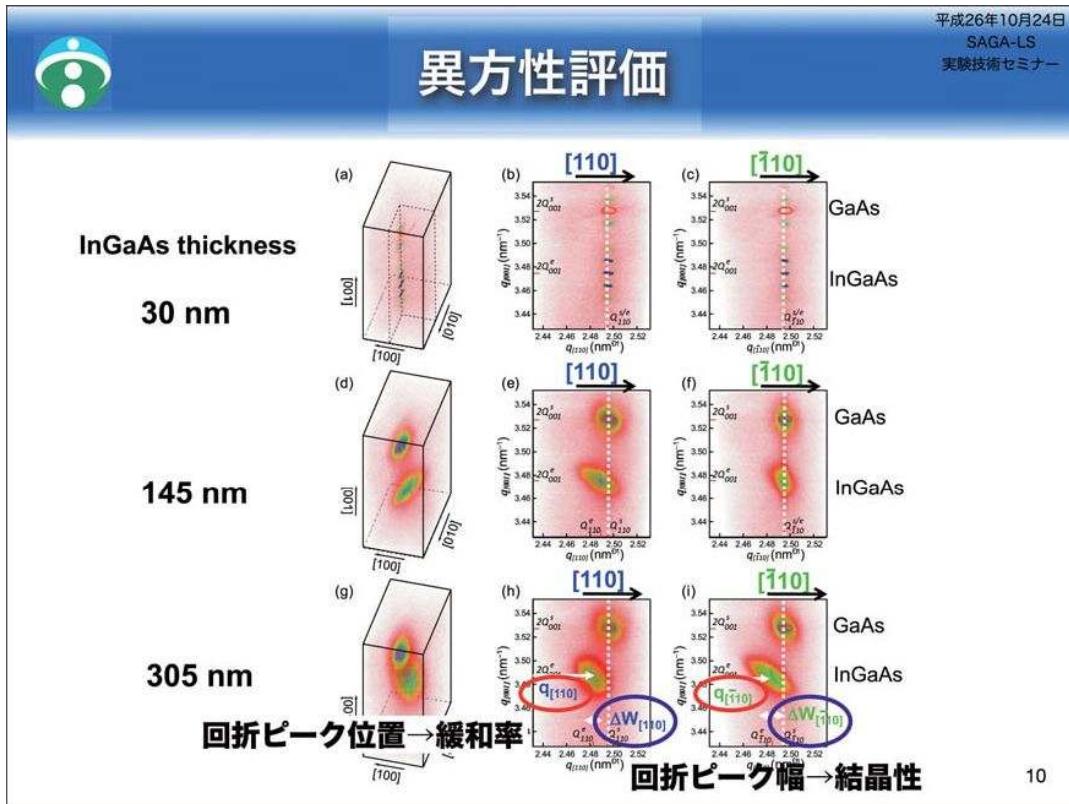


8

測定手順



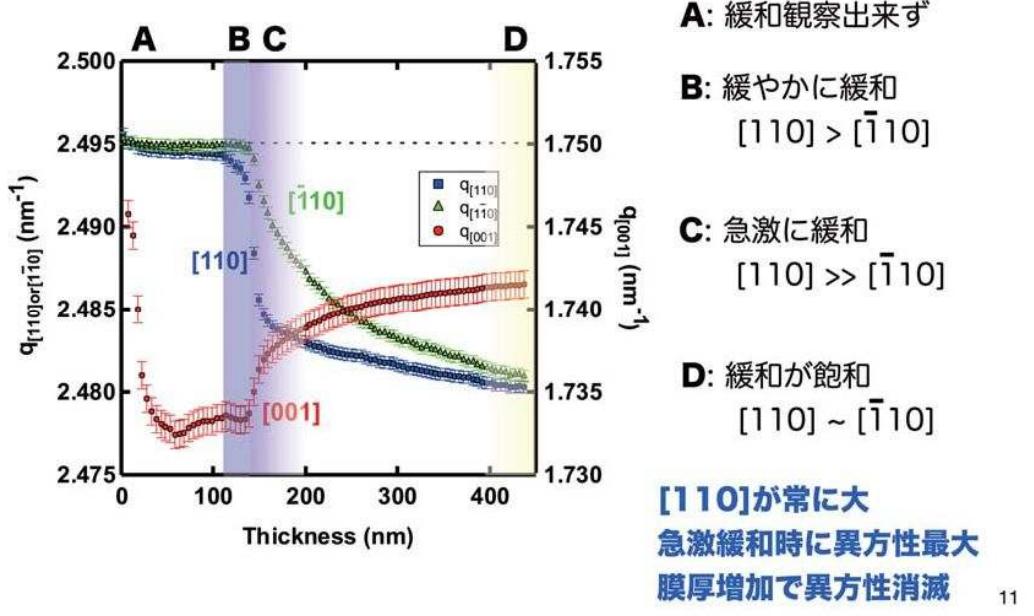
異方性評価





緩和率の異方性

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

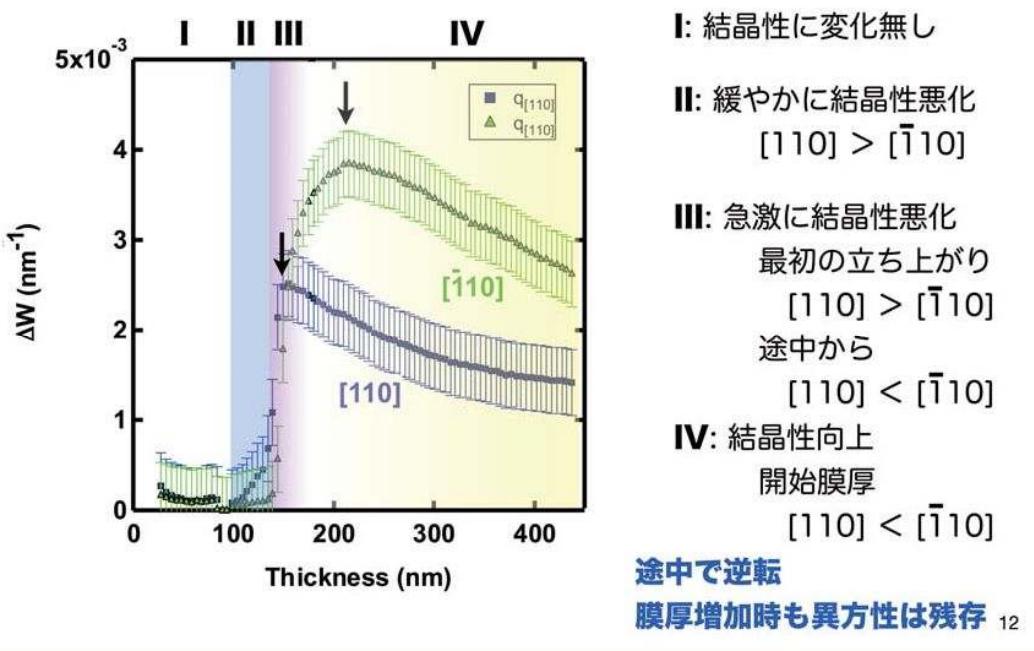


11

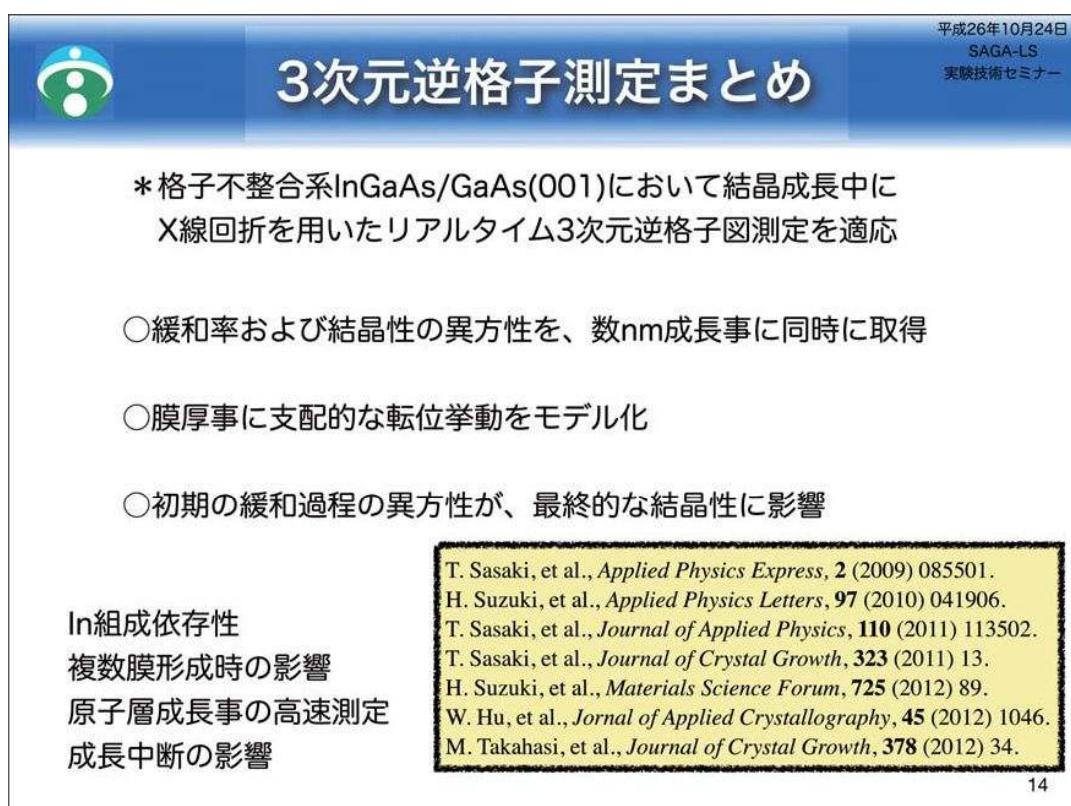
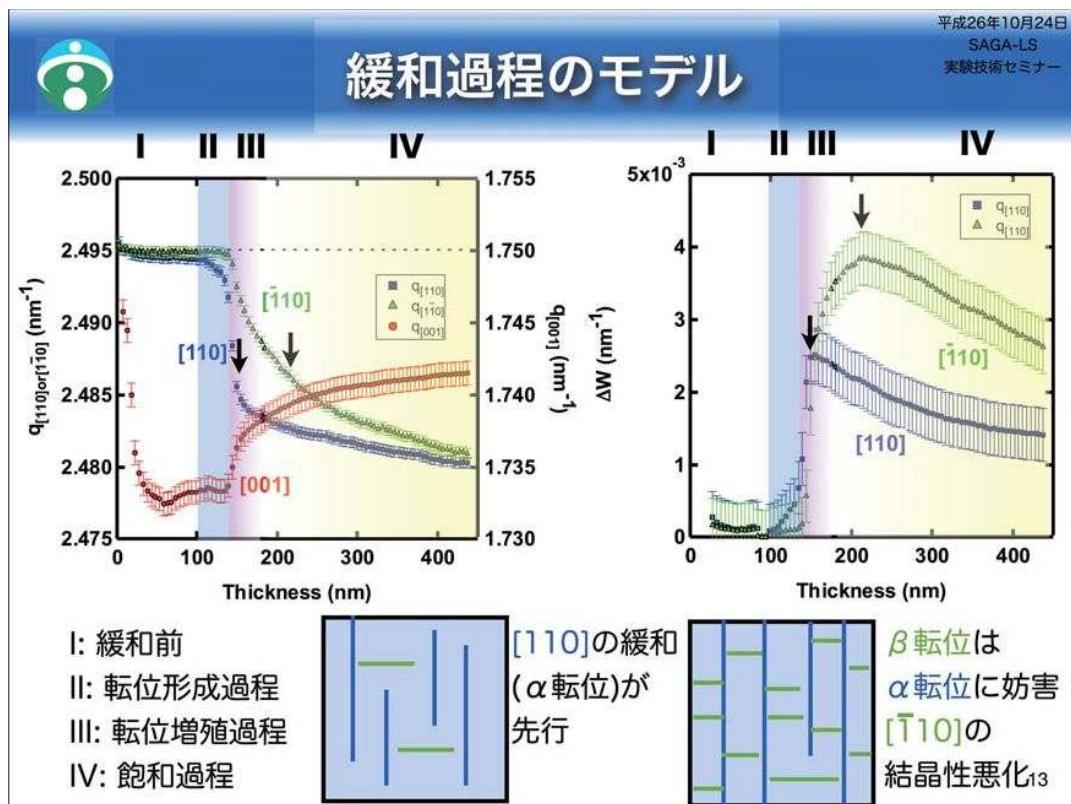


結晶性の異方性

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー



12





格子緩和過程初期の転位分布観察

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

○初期の緩和過程の異方性が、最終的な結晶性に影響

X線回折による逆格子観察では無く、
実空間での格子不整合転位分布観察が必要

薄膜試料の転位観察、、

断面TEM: 観察視野が狭く、低転位密度領域には×

平面TEM: 貫通転位観察には良いが、格子不整合転位には×

X線トポグラフィー法:

試料全体(数～数十mm角)の観察が可能

低空間分解能、、低転位密度では十分

格子緩和初期～薄膜(<100 nm)→高輝度X線が必要

放射光を用いたX線トポグラフィー法を用いた転位分布観察

15



X線トポグラフィー観察：実験条件

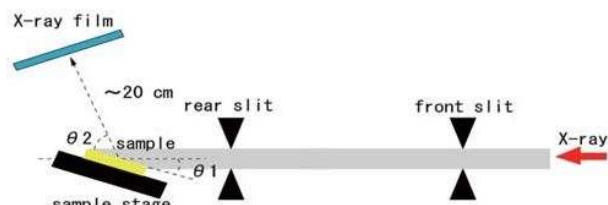
平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

測定試料 : InGaAs/GaAs(001), In組成: 9%, 膜厚: 39 ~ 134 nm

測定ビームライン : SAGA-LS, BL09A

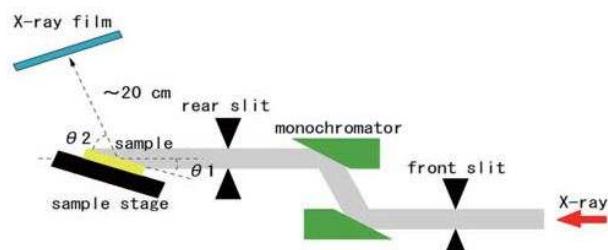
測定手順 :

白色X線を用いて
回折斑点を確認



224回折点に合わせて
X線入射角および
検出器位置を調整

モノクロメーターを
光路に挿入し単色化
エネルギーを調整
X線フィルムにて観察

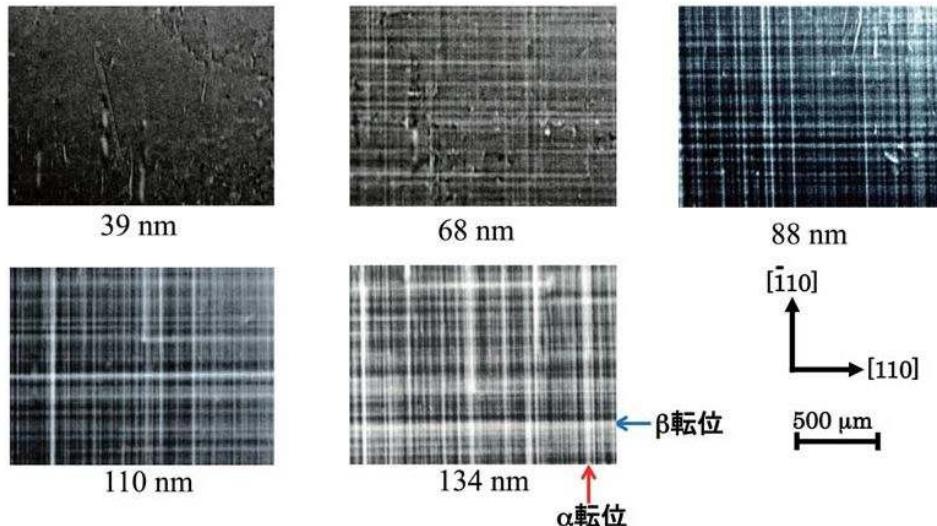


16



膜厚依存性

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー



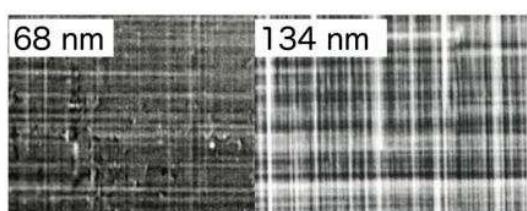
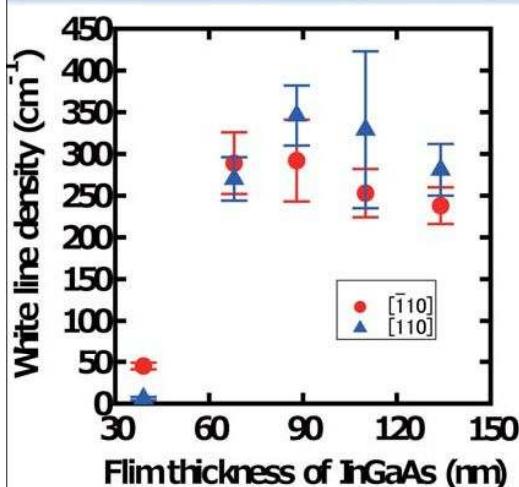
膜厚40 nmからInGaAs膜のXRT像を取得 (露光時間 $10^3\sim 10^4$ s程度)
68 nm以上の膜厚で[110]方向と[−110]方向の白線を確認、転位？

17

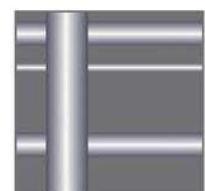
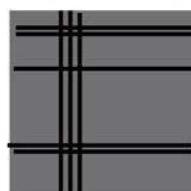


白線数の変化

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー



太さ(幅)の異なる白線を観察
膜厚増加で幅広の白線が増加



実際の転位
複数の転位(転位束)を
一つの白線として観察

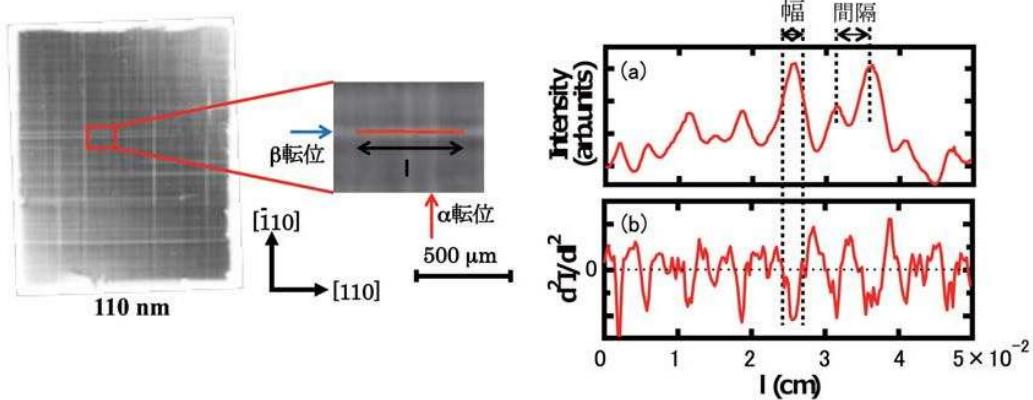
60 nm以上では白線数は飽和
ただし、XRD測定等では転位数は単調増加

18



転位分布の評価手法

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー



- ・ 白線幅 : 2階微分の結果、負で連続する範囲
 \Leftrightarrow ひとつあたりの白線に含まれる転位線の数
- ・ 白線間隔 : 隣り合った2つの白線の中心から中心の間隔
 \Leftrightarrow 転位線の束の分布(均一or不均一)

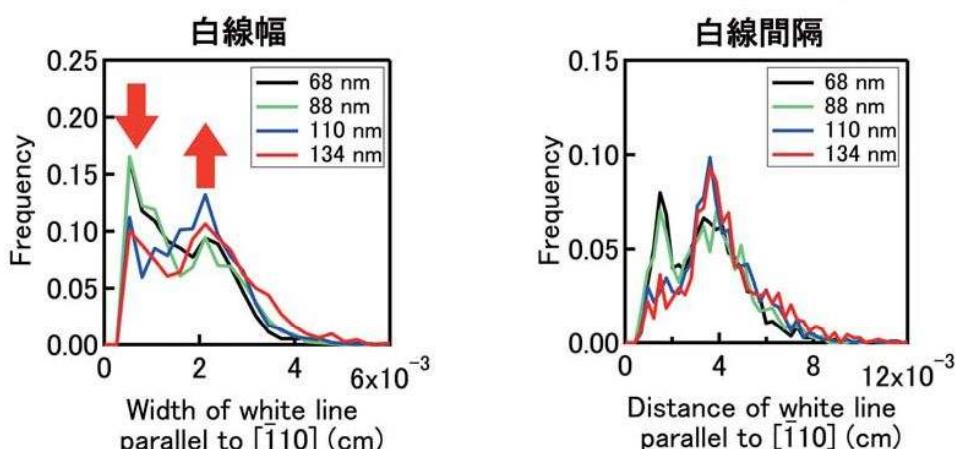
19



膜厚増加に伴う転位分布の変化

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

一方の転位(α 転位)を膜厚で比較



白線幅：狭い幅の白線数が減少、幅広の線数が増加

\rightarrow ひとつの転位束に含まれる転位数が増加

白線間隔：複数のピークから単一ピークに変化

\rightarrow 転位束の分布が均一に

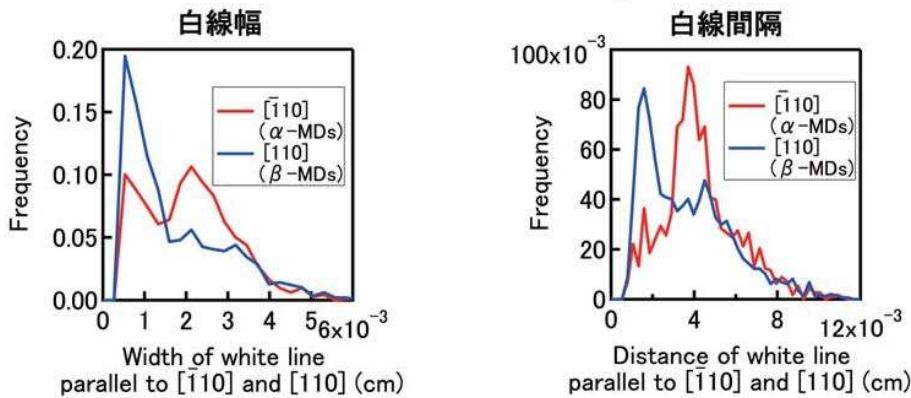
20



転位分布の異方性

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

ある膜厚(134nm)で α 、 β 転位を比較



白線幅： α 転位の方が幅広い白線幅が多い。

→ α 転位の方が、転位数が密集した転位束が多い

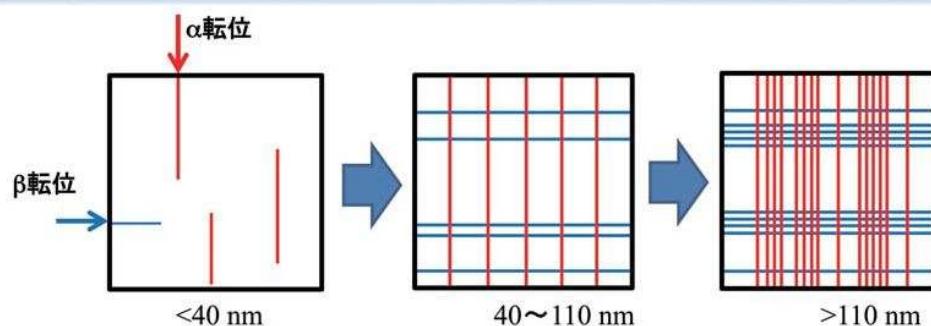
白線間隔： α 転位はシングルピーク、 β 転位は広い範囲に分布

→ α 転位の転位束分布は、 β 転位より均一

21



格子緩和初期の転位分布変化のモデル



40 nm以下 : α 転位のほうが転位の形成・滑りが速いため
ほぼ α 転位しか導入されない

40~110 nm : α 転位は均一に β 転位は不均一に導入

110nm以上 : α 転位・ β 転位共に、転位の側に新たな転位導入

H. Suzuki, et al., Materials Science Forum, 725 (2012) 85.
H. Suzuki, et al., Japanese Journal of Applied Physics, 53 (2014) 018001.

22



まとめ

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

- InGaAs/GaAs(001) X線回折リアルタイム測定
 - 結晶性および緩和率の異方性をリアルタイムで観察
 - 緩和過程初期の異方性が、最終的な結晶性に影響
- InGaAs/GaAs(001)格子緩和初期過程のX線トポグラフィー測定
 - 緩和過程初期(40~140 nm)の分布を実空間観察
 - 白線(転位束)の分布を評価
 - 初期の転位形成過程をモデル化

23



Acknowledgement

平成26年10月24日
SAGA-LS
実験技術セミナー

- 本研究は以下の機関の先生方、研究員、学生の皆様との共同研究で行なわれました。
 - 豊田工業大学: 山口真史、大下祥雄、池田和磨、小寺大介、西俊明
 - 原子力機構: 高橋正光、佐々木拓生、Hu Wen、藤川誠司
 - 宮崎大学: 片山真弘、原田一徹、高比良潤
- This work was financially supported by the Program to Disseminate Tenure Tracking System funded by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT), and by a grant for Scientific Research on Priority Areas from the University of Miyazaki. A portion of this work was supported by the New Energy Development Organization (NEDO), under the Ministry of Economy, Trade, and Industry, Japan.
- The synchrotron radiation experiments were performed at BL09A in SAGA-LS with the approval of a Nano-Technology Network Project and Strategic Research Infrastructure Project, supported by the MEXT.

24