課題番号　2013B — E03

放射光X線を用いた太陽電池用III-V族化合物半導体のリアルタイム構造解析

Real-time Structural Analysis of III-V compound semiconductors by synchrotron radiation X-ray

池田　和磨[1)]　鈴木　秀俊[2)]　西　俊明[1)]　小寺　大介[1)]　中村　紘也[1)]
佐々木　拓生[3)]　高橋　正光[3)]　大下　祥雄[1)]

Kazuma IKEDA　Hidetoshi SUZUKI　Toshiaki NISHI　Daisuke KODERA　Hiroya NAKAMURA
Takuo SASAKI　Masamitsu TAKAHASHI　Yoshio OHSHITA

[1)]豊田工業大学　[2)]宮崎大学　[3)]日本原子力開発機構

（概要）
その場3次元逆格子マッピング測定により，InGaAs/GaAs(001)結晶成長中におけるミスフィット転位密度と基板傾斜方向の関係を明らかにした．基板面傾斜が[110]方向である場合，GaAs(001)面に対するInGaAs(001)面の傾斜方向は成長と共に<110>から<-1-10>方向へ変化し，その傾斜角は成長と共に増大した．これは，逆向きのバーガースベクトルを持つ2種類のαミスフィット転位の密度比が成長と共に増加したことを示唆する．またInGaAs(001)回折点の[110]方向の半値全幅が急減期緩和後に減少したことから，αミスフィット転位の対消滅が多く生じたと考えられる．一方，基板面傾斜が[1-10]方向である場合，InGaAs(001)面のGaAs(001)面に対する傾斜方向と角度に明確な傾向は認められなかった．このとき，α，βミスフィット転位密度は共に全過程において増加傾向であり，転位の対消滅は少なかったことが示唆される．

キーワード：X線回折，逆格子マッピング，成長面傾斜，ミスフィット転位，異方性

１．目的

III-V族化合物半導体のヘテロエピタキシャル成長界面には，互いに直交する方向（[110]と[1-10]）に転位線を持つミスフィット転位が生じる．これらの転位密度には異方性があることが報告されている[1]．この異方性は基板面の傾斜方向や角度に起因すると考えられている[2]．基板面傾斜は成長面傾斜に影響を与えることが報告されているが[3]，結晶成長中における成長面傾斜の変化の仕方は明らかとなっていなかった．本研究では，これまで，SPring-8のBL11XUにおいて，2°の傾斜角をもつ基板に対して結晶成長中における成長面傾斜の変化を調べた．その結果，基板傾斜角が2°の場合，基板面傾斜が[110]方向のときに，成長面傾斜が常に[-1-10]方向に生じることを明らかにした．今回は，基板傾斜角の大きさに対する成長面傾斜の依存性を調べることを目的とし，それぞれ[110]，[1-10]方向で，かつ6°の傾斜角を持つ基板に対して，基板傾斜方向と成長面傾斜の関係を調べた．

２．方法

実験はSPring-8，BL11XUにおけるMBE-XRD装置を用いて実施した．面傾斜角2°，6°，傾斜方向がそれぞれ[110]と[1-10]のGaAs(001)，面傾斜無しGaAs(001)基板を用い，InGaAs層を400nm成長した．成長温度を470°C，成長速度を0.2ML/sec，In組成を約8%とした．InGaAs層の成長中における結晶軸の時間変化を測定するため，X線回折測定において(224)および(004)面の回折を測定した．InGaAs層の成長中において，3次元逆格子マップを約60秒ごとに作成した．

３．結果及び考察

微傾斜GaAs(001)基板へのInGaAs成長中におけるInGaAs(001)面のGaAs(001)面に対する傾きの変化を図1に示す．[110]微傾斜GaAs基板を用いた場合（図1a），InGaAs(001)面の傾斜方向は，成長と共に（GaAs基板の）<110>から<-1-10>方向へ変化し，その傾斜角は成長と共に増大した．一方，

[-110]微傾斜 GaAs(001)基板を用いた場合（図 1b），傾斜なし GaAs(001)基板を用いた場合と比較して，InGaAs(001)面の傾斜方向と角度に明確な傾向は認められなかった．<110>方向への InGaAs(001)面の傾斜は，<1-10>と<-110>方向に転位線を持つα_1およびα_2ミスフィット転位の密度が異なるときに生じる．図 1a において，成長開始から終了まで InGaAs(001)面の傾斜変化が常に<-1-10>への一方向であることは，α_1とα_2ミスフィット転位の密度比（α_2/α_1）が常に増加し，β_1とβ_2ミスフィット転位の密度比が常にほぼ 1 であったことを示唆する．

(001)面内逆格子マッピングにおける InGaAs 回折点の[110]と[-110]方向の半値全幅の膜厚依存性を図 2 に示す．[110]と[-110]方向の半値全幅はそれぞれαおよびβミスフィット転位の密度と正の相関を持つと考えられる．そのため，[110]微傾斜基板を用いた場合（図 2a），αミスフィット転位密度は急激緩和の後に緩やかに減少したことが示唆される．一方，このときのβミスフィット転位密度や，[-110]微傾斜基板を用いた場合（図 2b）におけるα，βミスフィット転位密度は，全成長過程において常に増加したことが示唆される．転位密度の減少は，すべり運動による転位の対消滅によるものであり，転位密度の増加は，その対消滅が十分に生じなかったと考えられる．

[110]微傾斜基板を用いた場合にα_1とα_2ミスフィット転位の密度比が常に増加した理由として，転位生成速度の違いと対消滅が関係すると考えられる．α_1，α_2ミスフィット転位のバーガースベクトルと基板面ステップの向きの関係は等価でないため，これらの生成速度は異なる．また一般に III-V 化合物では，αミスフィット転位がβミスフィット転位に比べ高い生成速度を持つ．[110]微傾斜基板におけるαミスフィット転位は，ステップ境界線やβミスフィット転位と干渉することなく先に生成され（図 3），すべり運動により対消滅を生じる．対消滅の数が増えるほど，αミスフィット転位の密度比は大きくなる．一方，[-110]微傾斜基板を用いた場合，β_1とβ_2ミスフィット転位の生成速度は異なるが，先に生成されたαミスフィット転位により，その生成とすべり運動はブロックされやすい．αミスフィット転位の生成もまたステップによりブロックされやすく，密度は増加しにくいと考えられる．

以上より，基板面傾斜方向が[110]の場合，2 種類のαミスフィット転位の対消滅によりその密度の和は減少するが，密度比は増大すると考えられる．また，基板面傾斜方向が[-110]の場合，ブロッキングによりミスフィット転位の対消滅が生じにくく，転位密度は成長と共に増大すると考えられる．

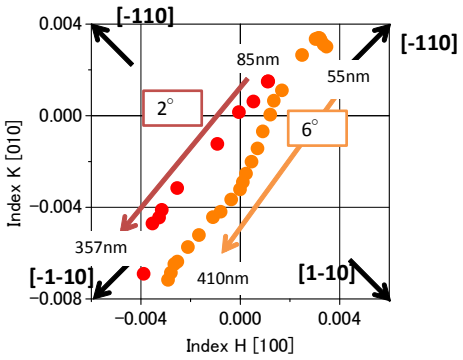

図 1 a.　[110]微傾斜 GaAs(001)基板上への成長中における InGaAs(001)の変化. GaAs(001)を原点とした.

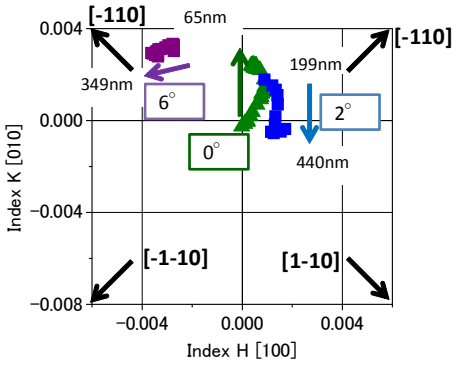

図 1 b.　[1-10]微傾斜 GaAs(001)基板上への成長中における InGaAs(001)の変化.

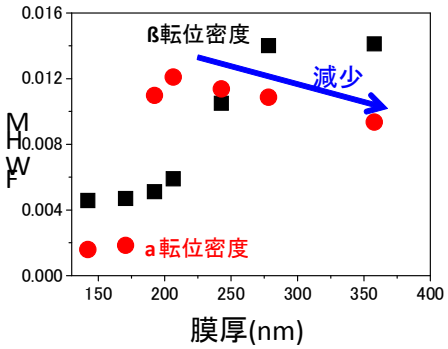

図 2a. [110]微傾斜 GaAs(001)基板上に成長した InGaAs の(001)面傾斜方向. GaAs(001)を原点とした.

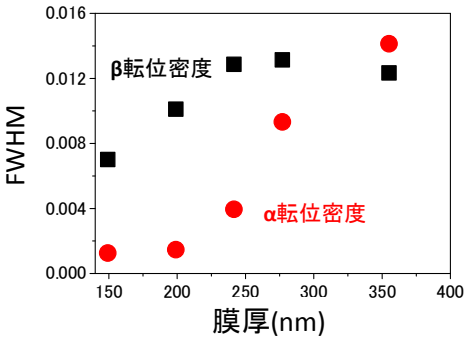

図 2b. [110]微傾斜 GaAs(001)基板上に成長した InGaAs の(001)面傾斜方向. GaAs(001)を原点とした.

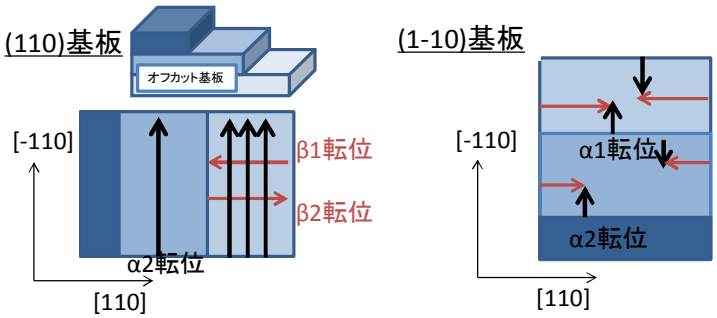

図 3. [110]および[1-10]微傾斜 GaAs(001)基板上のステップとミスフィット転位線の関係.

4. 引用(参照)文献等

[1] M. S. Abrahams et al., Appl. Phys. Lett. 21, 185 (1972).
[2] P. Werner et al., Appl. Phys. Lett. 62, 2798 (1993).
[3] J. W. Eldredge et al., J. Vac. Sci. Technol. B 13, 689 (1995).