

338 レーザ光弾性法によるGaAsウエハの残留応力測定とその応用

Evaluation of Residual Stress in (100)GaAs Wafers and the Applications

○正 五味 健二 (東電大工) 学 牧野 智彦 (東電大院) 正 新津 靖 (東電大工) 正 一瀬 謙輔 (東電大工)

Kenji Gomi, Tomohiko MAKINO, Yasushi Niitsu and Kensuke Ichinose, Dept. of Mech. Eng., Tokyo Denki Univ.,
2-2 Kanda-Nishikicho, Chiyodaku, Tokyo 101-8457 JAPAN**Key Words :** Laser Photoelasticity, Nondestructive Inspection, Experimental Stress Analysis, process-induced stress, crystal gliding, translation gliding, critical resolved shear stress

1. 緒言

ヒ化ガリウム (GaAs) は直接遷移型半導体の代表的なものである。シリコン (Si) に代表される間接遷移型半導体では実現が一般的に困難な発光デバイスにGaAsは適している。しかしGaAsは化合物半導体であるがために、元素半導体であるSiと比較して欠陥の抑制が困難である。

欠陥にも種々あるがここではGaAs単結晶ウエハによくみられる結晶すべり(crystal gliding)に限定し、その発生原因と合理的な回避方法を報告する。

GaAsの場合は主にエピタキシャル成長工程における高温で結晶すべりが発生しやすいことが報告されている。エピタキシャル成長工程では700°C程度までGaAs単結晶ウエハを加熱する。この際、温度むらによる熱応力の発生を抑制するために、ウエハ全体の温度が常に均一になるよう制御する必要がある。しかし、製造コストとの兼ね合いが肝要であるために、ウエハの残留応力場と熱応力場を考慮した合理的な熱処理条件が求められている。

著者らはGaAsウエハの残留応力場を従来よりも高速かつ高精度に測定するため、光弾性実験法に赤外線偏光レーザと光弾性変調器を採り入れた高精度かつ高感度な複屈折位相差測定装置を開発してきた。そして、その装置を用いてLEC-grown (100)GaAsウエハの常温における残留応力測定に成功し、エピタキシャル成長工程で結晶すべりを誘起するウエハを確実に選別する方法を示してきた。本報告では、この応用として高温におけるGaAs単結晶のヤング率の低下を考慮し、エピタキシャル成長工程で許容される熱応力を正確に予測することで、更に合理的な温度管理が可能となったことを報告する。

2. 装置および測定原理

図1に複屈折位相差測定装置の構成を示す。図中に各素子の主軸の方向を示した。光源には8mW出力のHe-Neレーザ(中心波長 $\lambda=1150\text{nm}$)を使用した。光弾性変調器(PEM)は横型光変調素子(1)の一種であり変調周波数は42kHzである。フォトディテクタの出力電圧を調和解析し、その直流成分電圧を I_{DC} 、第一高調波成分の実効電圧を I_{AC1} 、同じく第二高調波成分の実効電圧を I_{AC2} とあれば、以下に示す2つの測定量を導くことができる(2)。

$$\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} = A \cdot \sin \gamma \cdot \cos 2\theta_n \quad (1)$$

$$\frac{I_{AC2}}{I_{DC}} = B \cdot \sin \gamma \cdot \sin 2\theta_n \quad (2)$$

ここで、AおよびBは試験片の力学的な状態や、透明度に依存しない定数である。これらは、1/4波長板の複屈折位相差を測定することで決定できる。式(1),(2)より、複屈折位相差 γ および主誘電軸 n の方向と図1に示す[010]結晶方位とのなす角 θ_n が得られる。

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\sqrt{\left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC} \cdot A} \right)^2 + \left(\frac{I_{AC2}}{I_{DC} \cdot B} \right)^2} \right] \quad (3)$$

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{A \cdot I_{AC2}}{B \cdot I_{AC1}} \right] + H \left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} \right) \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ 1 & x < 0 \end{cases}$$

さて、(100)ウエハの面内に平面座標系を考え[010]結晶方位をx軸、[001]方位をy軸と定義すれば主応力差およびx軸と σ_1 方向のなす角 θ_{σ_1} は次式により導かれる(3)-(5)。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2} \quad (5)$$

$$= \frac{\gamma \lambda}{\pi d n_o^3} \sqrt{\left[\frac{c_{11} - c_{12}}{p_{11} - p_{12}} \cos 2\theta_n \right]^2 + \left[\frac{c_{44}}{p_{44}} \sin 2\theta_n \right]^2}$$

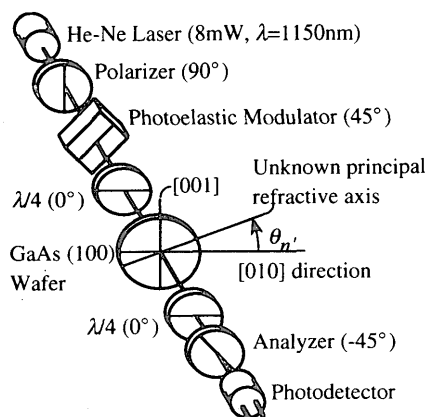


Fig. 1 Schematic figure of the birefringence measurement apparatus.

$$\theta_{\sigma} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \right] \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{p_{11} - p_{12}}{p_{44}} \frac{c_{44}}{c_{11} - c_{12}} \tan 2\theta_n \right]$$

ここで、 λ は光源の波長、 d はGaAsウエハの厚さ、 n_0 はひずみが生じていない時のGaAsの屈折率、 c_{ij} は弾性スティフネス(stiffness)定数⁽⁶⁾、 p_{ij} はひずみ-光学定数(elasto-optic coefficients)⁽⁷⁾⁽⁸⁾である。

3. 実験に用いたウエハ

残留応力の大小を除けば市販品と同等の、厚さ62.5 μ m、直径4"のドーパント無添加(undoped) LEC-grown (100)GaAsウエハを実験に用いた。ウエハの残留応力分布とエピタキシャル成長時の結晶すべりの関係を明らかにするため、次に列挙する3種類の品質のウエハを用意した。

- 品質A：現在の熱処理条件でもエピタキシャル成長工程で結晶すべりが発生しないウエハ
- 品質B：エピタキシャル成長工程で結晶すべりが発生しないよう熱処理条件を現在よりも厳密に管理する必要があるウエハ
- 品質C：品質Bに適用した熱処理条件でも結晶すべりが発生するウエハ

品質AおよびCのウエハはそれぞれ同一インゴットのtail側および最front側(seed側)からスライスした。各品質ごと3枚とし、特性を揃えるため互いに隣り合うスライス位置のウエハとした。品質Bは、別々のインゴットの最front位置から10~20mmだけtailよりの位置より1枚ずつ計2枚スライスした。3本のインゴットは全て同一の条件で育成されている。

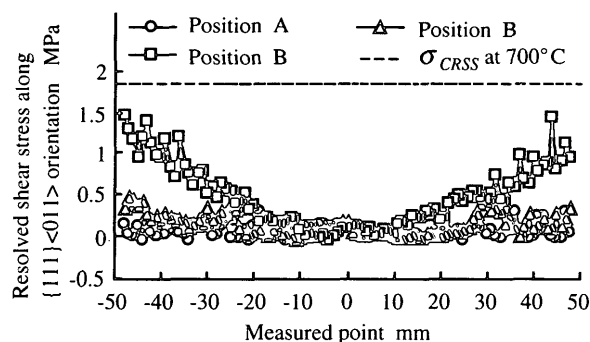


Fig.2 The measured shear stress distributions and the critical resolved shear stress at high temperature.

4. 残留応力測定結果と結晶すべりの可能性の評価

各品質におけるGaAsウエハの[010]結晶方位に沿ってウエハのセンターライン上の複屈折位相差を常温で測定し、式(5)より主応力差を求めた。これがウエハの常温における残留応力に対応する。ここで、ウエハが700°Cに昇温された際のヤング率の低下に伴う残留応力の変化を考察する。GaAs単結晶のヤング率に及ぼす温度の影響は次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$c_{11} [\text{MPa}] = 12.16 \times 10^4 - 13.97 [K] \quad (7)$$

$$c_{12} [\text{MPa}] = 5.43 \times 10^4 - 5.767 [K] \quad (8)$$

また、[001]結晶方位のヤング率は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$E_{[001]} = \frac{(c_{11} + 2c_{12})(c_{11} - c_{12})}{c_{11} + c_{12}} \quad (9)$$

式(7)-(9)より、20°Cのヤング率は85.0MPaであり、700°Cのヤング率は77.9MPaであることがわかる。この計算結果と、常温における実験結果から700°CにおけるGaAsウエハの残留応力分布を推測することができる。

ところで、GaAsの主すべり系(slip system)⁽¹¹⁾は{111}面の<011>結晶方位である。上述までは(100)面内における残留応力分布について検討したものであり、GaAsの主すべり系に直接作用する分解せん断応力(resolved shear stress; σ_{rss})ではない。そこでこの σ_{rss} を求め⁽¹²⁾⁽¹³⁾それを縦軸とし、横軸に[010]結晶方位に沿ったウエハのセンターライン上における複屈折位相差測定位置をとった結果を図2に示す。図2は各品質における σ_{rss} の平均値をであり、常温における複屈折位相差から700°Cにおける σ_{rss} を求めた結果である。また、半径が50mmのウエハであるから、横軸の0はウエハの中心を50は縁を意味する。図2中の破線はGaAs単結晶の700°Cにおける臨界せん断応力(critical resolved shear stress; σ_{crss})である。この σ_{crss} は次式⁽⁹⁾で計算した値を用いた。

$$\log_{10} \sigma_{crss} [\text{dyn/cm}^2] = 5.83 + 1382 / T [K] \quad (10)$$

図2のグラフで品質Cのウエハは外縁近傍で σ_{rss} が σ_{crss} に近く、このため品質Cはエピタキシャル成長中に熱応力の重畳によって結晶すべりを誘起し易いことがわかる。

5. 結言

GaAsウエハの残留応力分布を定量的に測定した。そして、高温におけるGaAs単結晶のヤング率の低下を考慮し、エピタキシャル成長工程で許容される熱応力を正確に予測することで、更に合理的な温度管理が可能となったことを明らかにした。

参考文献

- (1) 応用物理学会光学懇話会編、結晶光学(1975)、244、森北出版(株)。
- (2) Y. Niitsu, K. Gomi and K. Ichinose, *JSME Int. J.*, **40-2**, A, 143-148 (1997)。
- (3) M. Yamada, *Rev. Sci. Instrum.*, **64-7**, 1815-1821 (1993)。
- (4) M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics 6th Ed.*, (1997), 665-718, Cambridge Univ. Press.
- (5) J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (1995), 235-259, Clarendon Press Oxford.
- (6) T. B. Bateman, H.J. McSkimin and J. M. Whelan, *J. Appl. Phys.*, **30-4**, 544-545 (1959)。
- (7) N. Suzuki and K. Tada, *Jpn J. Appl. Phys.*, **23-8**, 1011-1016 (1984)。
- (8) R. W. Dixon, *J. Appl. Phys.*, **38-13**, 5149-5153 (1967)。
- (9) A. S. Jordan, *J. Crystal Growth*, **49** (1980), 631-642。
- (10) UCS半導体基盤技術研究会、シリコンの科学(1996)、989、(株)リアライズ社。
- (11) 志村、半導体シリコン結晶光学(1993)、251、丸善(株)。
- (12) P. Xin, *Ext. Abstr. 68th Meet. 145th Committee (Japanese Society for Promotion of Science, Tokyo)* (1994), 36-44 [in Japanese]。
- (13) T. Fukuda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996), 3799-3806。