赤外光弾性法を用いた半導体ウェハ・デバイス中のひずみ分布測定†

福澤理行* 儲

涛** 山田正良*

Nondestructive Measurement of Strain Distribution in Semiconductor Wafers and Devices by a Scanning Infrared Polariscopes

by

Masayuki FUKUZAWA*, Tao CHU** and Masayoshi YAMADA*

Key words : GaAs, Si, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, LiNbO_3 , Residual strain, Photoelastic method, Infrared polariscopes

1 緒言

光・電子デバイス基板として用いられる Si, GaAs などの半導体結晶は、結晶中の欠陥やひずみによって、結晶中の格子定数、格子振動、バンド構造などが変動するので、デバイスの動作に影響を及ぼす。したがって、半導体ウェハの製造やデバイスの作製時には、結晶欠陥やひずみの抑制や均一化が不可欠であり、その評価手法は産業上重要である。欠陥やひずみの評価手法のうち、光弾性法は、光学等方な結晶にひずみがあると複屈折を示す性質（光弾性効果）を利用したひずみの測定法であり、機械工学分野等で古くから用いられている。複屈折量は、誘電率テンソルの変動成分である光弾性テンソルによってひずみテンソルと関係づけられるので、偏光光学系を用いて試料の複屈折量を測定し、既知の光弾性テンソルの値を用いれば、ひずみテンソル成分が求められる。一般に、光弾性測定には直線偏光計や円偏光計が用いられている。このとき、複屈折の大きさは、位相差が 2π の整数倍になった場合に生じる等色線の縞次数を観察することによって推定されるので、等色線の縞を得るためには、特別に厚い半導体試料を用意する必要があり、厚さ数 $100\mu\text{m}$ の市販 Si, GaAs ウェハの評価には感度不足であった^{1), 2)}

我々は、直線偏光計の感度不足を克服して市販ウェハ中のひずみを測定するため、走査型赤外光弾性装置 (Scanning Infrared Polariscopes, SIRP) を独自に開発し^{3), 4)}、半導体結晶^{4)~10)}や光学結晶¹¹⁾のひずみ分布測定を行っている。本報告では、SIRP の構成と測定原理を述べ、市販 GaAs, Si ウェハのひずみ測定結果を示して赤外光弾性法が半導体ウェハ・デバイス評価に有用であることを示す。また、最近、均一組成バルク結晶成長が試みられている $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶や、光導波路基板材料である LiNbO_3 (LN) 結晶への SIRP の応用例も示す。

2 走査型赤外光弾性装置

図 1 に開発した SIRP のブロック図を示す。光学系は偏光子と検光子を試料の前後に配置した直線偏光計がベースとなっているが、偏光子と検光子をパルスモータで制御して同期回転させ、透過光強度を偏光角 ϕ の関数として収集できる構造になっている。光源は波長 $1.3\mu\text{m}$ の赤外半導体レーザであり、試料ステージ上でのビーム径は $100\mu\text{m}$ 未満である。偏光子と検光子の方位が直交状態および平行状態での試料の透過光強度をそれぞれ $I_{\perp}(\phi)$ と $I_{\parallel}(\phi)$ とすると、試料の複屈折の位相差 δ と主軸方位 ψ に対して次の関係が成り立つ³⁾

$$I_r(\phi) = \frac{I_{\perp}(\phi)}{I_{\perp}(\phi) + I_{\parallel}(\phi)} = \sin^2 2(\phi - \psi) \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (1)$$

式 (1) に基づいて、測定した $I_r(\phi)$ を sine, cosine 変換することによって複屈折量 δ と ψ が得られる。

図 1 走査型赤外光弾性装置のブロック図

† 原稿受理 平成 13 年 12 月 11 日 Received Dec. 11, 2001

* 正会員 京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Dept. of Electronics and Information Sci., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

** 京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Dept. of Electronics and Information Sci., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

Si や GaAs など光学等方の試料では、面内ひずみ成分は次式によって求められる。

$$|S_{yy} - S_{zz}| = \frac{\lambda \delta}{\pi d n_0^3} \left| \frac{\cos 2\phi}{p_{11} - p_{12}} \right| \quad (2)$$

$$2|S_{yz}| = \frac{\lambda \delta}{\pi d n_0^3} \left| \frac{\sin 2\phi}{p_{44}} \right| \quad (3)$$

$$|S_r - S_t| = \left[(S_{yy} - S_{zz})^2 + (2S_{yz})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 S_{ij} 、 p_{ij} 、 λ 、 d 、 n_0 はそれぞれひずみテンソル成分、光弾性定数、光源波長、試料厚さ、無ひずみ屈折率である。ひずみの評価値となる $|S_{yy} - S_{zz}|$ と $2|S_{yz}|$ はそれぞれ、結晶軸方向の伸縮ひずみ差と結晶軸間のせん断ひずみとを意味する。 $|S_r - S_t|$ は円柱座標系での半径方向と接線方向の伸縮ひずみ差を表し、円板状ウェハのひずみ評価値として標準的に用いている。

3 ひずみ分布の測定結果

3・1 GaAs ウェハ中のスリップ誘起ひずみ

LEC 法成長ウェハは、転位密度が約 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 程度存在し、デバイス作製中の熱処理によって、 $\langle 011 \rangle$ 方向に揃った転位（スリップ線）の発生がしばしば問題となる。スリップ線は透過 X 線トポグラフで観察できるが、ウェハの反りの影響を受けてコントラストが低くなるという問題があった。図 2 に GaAs (100) ウェハの (a), (b) SIRP マップおよび (c) 透過 X 線トポグラフ像を示す。⁶⁾ このウェハは Liquid encapsulated Czochralski (LEC) 法成長の 4 インチ市販ウェハで、ウェハ熱処理によってスリップ線が発生したものである。SIRP マップからは、スリップ線およびその境界に沿ったひずみの異常増加が特にせん断ひずみ成分 $2|S_{yz}|$ のマップに明瞭に観察でき、その発生位置は X 線トポグラフ像の結果とよく一致した。スリップに伴うひずみの値は 5×10^{-5} 程度であった。また、このウェハには反りがあるので、図 2 (c) にはその影響でコントラストが低くなっている部分が見られるが、SIRP マップによる評価では、ウェハの反り等があっても測定には悪影響していない。したがって、SIRP による欠陥観察によって X 線トポグラフの問題点を克服できることがわかった。また、透過 X 線トポグラフの撮影には 10 時間以上の時間を要したが、SIRP は 2 時間程度で測定でき、測定時間の点でも SIRP が有利であった。

3・2 GaAs ダイボンディング誘起ひずみ

デバイス作製プロセスであるダイボンディング誘起ひずみの評価例を示す。⁸⁾ 本プロセスは、GaAs チップを銅ヒートシンクに AuSn 半田付けするプロセスであり、その概要を図 3 (a) に示す。GaAs、半田、銅の線膨張係数の違いや半田付け時の温度の不均一などによって、半田付け後に室温になったヒートシンク付き GaAs チップにはひずみが誘起すると考えられる。銅ヒートシンクは光を透過しないので、測定には、図 3 (b) に示す構造の反射型光弾性装置を構築して行った。図 4 に、反射型光弾性装置を用いて測定したひずみ分布図を示す。図 4 (a) に示す伸縮ひずみ差成分 $|S_{yy} - S_{zz}|$ は、主にチップの中央に分布しており、図 4 (b) に示すせん断ひずみ成分 $2|S_{yz}|$

図 2 2"φGaAs ウェハの (a) $|S_{yy} - S_{zz}|$ マップ、(b) $2|S_{yz}|$ マップ、(c) 透過 X 線トポグラフ像

は、チップの 4 辺に分布していることが観察できた。ひずみの値は約 5×10^{-4} 程度であり、図 2 の GaAs ウェハ中のひずみの約 10 倍程度の値を示した。したがって、プロセス誘起ひずみは GaAs ウェハ自体のひずみに比べてデバイスに及ぼす影響が大きく、プロセスの最適化にはひずみの評価が重要であることをこの実験結果は示唆している。

3・3 Si ウェハ

SIRP を Si ウェハの評価に応用した例を示す。⁹⁾ Si はマクロな転位のない無転位結晶が実用化されているが、最近では、300mm ウェハの実用化に伴って、ウェハ作製時

図3 (a) GaAs ダイボンディングプロセス, (b) 反射型光弾性装置

図4 ダイボンディングプロセス誘起ひずみの SIRP マップ, (a) $|S_{yy} - S_{zz}|$ 成分, (b) $2|S_{yz}|$ 成分

の表面加工プロセスや、デバイス作製時の熱処理プロセスによる欠陥やひずみの発生が問題となっている。

図5 (a) は、熱処理を施した3"φSi (100) ウェハの SIRP マップである。ウェハの周辺部から発生したスリップ線と、その周囲のひずみの異常増加が明瞭に観察できた。スリップに伴うひずみの大きさは約 4×10^{-6} 程度で、

図5 Si ウェハの SIRP マップ, (a) 熱処理誘起スリップを有する3"φウェハ, (b) 熱処理誘起ひずみおよび OSF を有する4"φウェハ, (c) ウェハの支持構造例と支持点付近の拡大 SIRP マップ

図2のGaAsウェハ中のひずみの1/10未満であった。

図5(b)は、ウェハの熱処理によってホルダとの支持位置にひずみが発生した4"φSi(100)ウェハのSIRPマップである。ウェハ周辺部の上部2ヶ所、下部1ヶ所にひずみの異常増加が観察できた。この位置は熱処理時にウェハを支持するホルダとの接触位置と一致し、ひずみの増分はおよそ 8×10^{-7} 程度であった。また、この結晶はOSFを含んでおり、OSFリングに対応した同心円状パターンも観察できた。

図5(c)は、4本の指状突起でウェハを水平に支持する構造のリング状ホルダとの構造と、そのホルダにウェハを載せたときの、支持点付近での拡大SIRPマップを示す。このようなウェハの支持を行った場合、ウェハの自重によって支持点周辺に応力集中が発生すると考えられる。SIRPマップからは支持点付近での応力集中が観察でき、その値は 2×10^{-7} 程度であった。自重によるひずみの値は、図5(a)、(b)で観察されたひずみに比べて1けた小さく、SIRPがSiウェハの評価に十分な感度を備えていることが実証できた。

3・4 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 結晶

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶半導体は、 InGaAs エピタキシャル層との格子不整合を抑制して、発光効率が高くや寿命が長い次世代半導体レーザの基板として有望な材料であり、組成が均一なバルク単結晶の開発が試みられている。¹⁰⁾

図6に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 結晶の(a) SIRPマップ、(b) 赤外透過率、(c) ABエッチング後の表面写真をそれぞれ示す。試料は垂直ブリッジマン法で成長させた円柱単結晶から切り出したもので、In組成 x は約0.2である。試料の面内組成が均一でないため、ここでは、SIRPマップの評価値には既知の光弾性定数を用いて換算したひずみ成分ではなく、複屈折による位相差 δ を用いている。

SIRPマップは面内で不均一な分布を示し、表面写真で比較的良好な結晶状態を示す部分や、赤外透過率の均一な領域にもひずみが残留している様子が観察できた。

3・5 LiNbO_3 ウェハ中の結晶欠陥

光導波路や電気光学デバイス材料として広く用いられるLN結晶の欠陥観察例を示す。¹¹⁾ 図7はz-cutの4"φLNウェハの(a) SIRPマップと(b) 透過X線トポグラフ像である。LNは光学異方性があるので一般に自然複屈折が存在するが、このウェハはz-cutであり、c軸に平行に光が入射しているので、自然複屈折がSIRPマップに及ぼす影響は少ないと考えられる。評価値には図6と同様に δ を用いている。SIRPマップには、筋状にひずみパターンが明瞭に観察でき、この位置と形状は、透過X線トポグラフ中に観察されるマクロな結晶欠陥とよく一致した。

したがって、SIRPを用いてLNウェハ中の結晶欠陥の観察が可能であることがわかった。

4 む す び

赤外光弾性装置(SIRP)を用いて、GaAs, Si, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, LiNbO_3 (LN) 結晶中のひずみ分布の測定を行った結果、結晶欠陥誘起ひずみ、熱処理誘起ひずみ、デバイス作製プロセス誘起ひずみ等の特徴あるひずみ分

図6 InGaAs 結晶の (a) SIRP マップ, (b) 赤外透過率, (c) 表面の AB エッチング写真

図7 4"φ z-cut LN ウェハの (a) SIRP マップと (b) 透過X線トポグラフ像

布が得られた。特に、市販 GaAs, Si ウェハ中のスリップ等の結晶欠陥, プロセス誘起ひずみが観察できること, また, 結晶成長実験中の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶や, 光導波路基板の LN ウェハにも SIRP は適用可能であることが実証され, SIRP によるひずみ測定が半導体ウェハの製造プロセスやデバイス作製プロセスの評価に有用であることを示した。

参 考 文 献

- 1) S. F. Nygren, J. Cryst. Growth, **19**, 21 (1973).
- 2) R. O. Denicola and R. N. Tauber, J. Appl. Phys., **42**, 4262 (1971).
- 3) M. Yamada, Rev. Sci. Instrum, **64**, 1815 (1993).
- 4) M. Yamada, K. Ito and M. Fukuzawa, "9th Conf. Semiconducting and Insulating Materials, Toulouse, France, April 1996. IEEE. Cat No. #96CH35881", p.177 (1996) IEEE.
- 5) M. Yamada, K. Ito and M. Fukuzawa, "Proc. of 9th Int. Conf. on InP and Related Materials, Hyannis, Massachusetts, IEEE Cat.No. #97CH36058", p.209 (1997), IEEE.
- 6) P. Mock, M. Fukuzawa, Z. Laczik, G. W. Smith, G. R. Booker, M. Yamada, M. Herms and B. K. Tanner, "Microsc. Semicond. Mater. Conf., Oxford, 22-25 March 1999, IOP Conference Series No.164.", p.67 (1999) IOP Publishing Ltd.
- 7) M. Herms, M. Fukuzawa, M. Yamada, J. Klöber, G. Zychowitz and J. R. Niklas, Mat. Sci. and Eng., **B66**, 7 (1999).
- 8) T. Chu and M. Yamada, Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 1153 (1999).
- 9) M. Fukuzawa and M. Yamada, J. Cryst. Growth, **229**, 22 (2001).
- 10) K. Kinoshita, H. Kato, M. Iwai, T. Tsuru, Y. Muramatsu and S. Yoda, J. Cryst. Growth, **225**, 59 (2001).
- 11) M. Yamada, M. Matsumura, M. Fukuzawa, K. Higuma and H. Nagata, SPIE Proceedings, **3936**, 101 (2000).