

円偏光クロスニコル測定を用いた半絶縁性 6H-SiC ウェハ内歪のマッピングとそのラマン散乱スペクトルとの関係

竹内 日出雄

滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科

Mapping of strains in a semi-insulating 6H-SiC wafer with use of circular cross-Nicol measurement and its relation with Raman spectra

Hideo Takeuchi

Department of Electronic Engineering Systems, The University of Shiga Prefecture, Shiga, Japan

Abstract

We have explored the effectiveness of applying the circular cross-Nicol measurement to the mapping of the strains in a semi-insulating 6H-SiC wafer. Initially, x-ray topography, which is regarded as a fundamental evaluation technique for wafers in the developmental stage, is applied. In the x-ray topographic wafer map, the disappearance of the images is found in various areas, which suggests that the x-ray topographic measurement is not almighty. Next, we apply the circular cross-Nicol measurement, which is sensitive to strains through the photoelastic effect. The circular cross-Nicol wafer map reveals that the disappearance of the x-ray topographic images results from the strains. The observed strains as brightness of the wafer map indicate that the magnitude of the crystal-plane distortion is too strong to apply x-ray topography. We also measure the Raman spectra of the several region of the wafer to evaluate the stress from the phonon frequency shift. The maximum stress is estimated to be ~490 MPa.

1. 序論

ワイドバンドギャップ半導体である SiC は、高電圧耐性を有する。この特性故に、小型化が要求される電力デバイスへの適用が進んでいる。事実、ショットキーバリアダイオードは、量産段階にある。かつ SiC は、高熱伝導率物質であるため、放熱性が重要となる高出力高周波 GaN 系トランジスタの基板材料としても利用されている [1]。

SiC を利用した上記デバイスの量産性を確保するためには、大口径ウェハの安定供給が必須である。しかしながら現段階では、上記必須事項が達成されていない。これは、SiC ウェハの成長方法が GaAs および Si ウェハと異なることに由来する。GaAs および Si ウェハの製造過程では、技術的に十分成

熟した融液状態からの引き上げ法が用いられる。一方、SiC ウェハの場合、粉末状 SiC を 2000°C 以上で種結晶上に成長させる昇華法が用いられる [1]。SiC 結晶では、成長温度に依存した様々なポリタイプが存在するため、温度制御など技術的課題が残存している。従って、ウェハ開発では、段階に応じた適切な評価手法を適用する必要がある。

通常半導体ウェハの評価技術として、X 線トポグラフィーが最も基本的な手法として適用される [2]。しかしながら原理的に、X 線トポグラフィーは、ある程度十分な結晶性を有するウェハに適用されるべき技術である。事実、ウェハ内歪が比較的大きい場合、X 線トポグラフィックマップでは、面内に関する画像情報が一部消失する。こ

の現象は、ウェハ内歪が結晶面を X 線トポグラフィック測定が適用できないほど極度に変形させることに起因する。

本研究では、光弾性効果を介して歪検出に敏感な円偏光クロスニコル測定を用いた半絶縁性 6H-SiC ウェハ内歪のマッピングの有用性を、X 線トポグラフィックウェハマップとの比較することで検証した。さらに円偏光クロスニコルマップで得られた歪に関する情報と Raman 散乱スペクトルにおける折り返し横光学 (FTO) フォノンバンドのピーク周波数シフトの対応を検証し、残留応力を定量的に評価した。

2. 試料および実験方法

本研究で用いた試料は、直径 2 インチ・厚さ 390 μm の(0001)面方位半絶縁性 6H-SiC ウェハであった。本試料の半絶縁性は、高純度化と内因的欠陥の補償機構に由来する[1]。図 1 の光学写真が示すように、本試料は、光学的に均一な透明性を有する。

X 線トポグラフィック測定は、リング法を適用して、[10-10]反射線配置で行われた。用いた X 線は、Mo $K\alpha_1$ 線(波長: 7.093×10^{-2} nm)であった。スリット幅、スキャン速度、スキャン回数と測定時間は、それぞれ 1.0 mm, 1.0 mm/s, 2 回および 18 分であった。

クロスニコル像測定には、光源として、照度 2700 lx の均一性を有する白色発光ダイオードパネルを使用した。偏光素子には、右円偏光子と左円検光子を用いた。ここで直線偏光板を適用しなかった理由を簡単に説明する。6H-SiC 結晶は、六方晶であるため、1 軸性結晶に分類される。一般に、自由空間を進む直線偏光光波の振幅の振動方向は、時間的に変化しない。歪が存在する場合、試料透過後、振幅の振動方向が変化

する。結果として振動方向が変化した光波は、クロスニコル配置された検光子を透過する。しかしながら、非等方な 1 軸性結晶および 2 軸性の場合、複屈折性によって決まる特定の光路を通過した光波は、歪に関わりなく結晶入射前の直線振幅の方向を保持する [3-5]。結果、1 軸性結晶の場合、ウェハマップ上に黒い十字パターン、いわゆるアイソジャイアが出現する [3-5]。上記現象は、入射光線の振幅振動が直線的で時間変化しないことに起因する。一方、時間的に振幅の振動方向が回転する円偏光光波を用いる場合、観測されるウェハマップは、光波振幅の回転が光速と等しいため積算像に相当する。結果として、アイソジャイアは、出現しない。この点に着目し、本研究では、円偏光クロスニコル測定を用いた。試料は、偏光子と検光子の間に挿入された。

Raman 散乱測定は、室温下後方散乱配置で行った。励起光のフォトンエネルギーと強度は、それぞれ 2.707 eV および 2.0 mW であった。試料表面でのビームスポット径は、0.7 μm であった。Raman シフトを精密に求めるため、周波数に関しては、Ar イオンプラズマ線で較正された。周波数精度は、 $\pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$ であった。後述するように、円偏光クロスニコルウェハマップの特徴的な 3 箇所領域内 5 点を測定した。

3. 実験結果と考察

図 2 は、本試料の X 線トポグラフィックウェハマップを示す。X 線トポグラフィックウェハマップは、明らかに不均一である。X 線トポグラフィックマップでは、通常、輝度が高い領域は、転位などの高欠陥密度領域に対応し、低い領域は結晶性がよい領域とみなされる。図 2 が示すように、比較

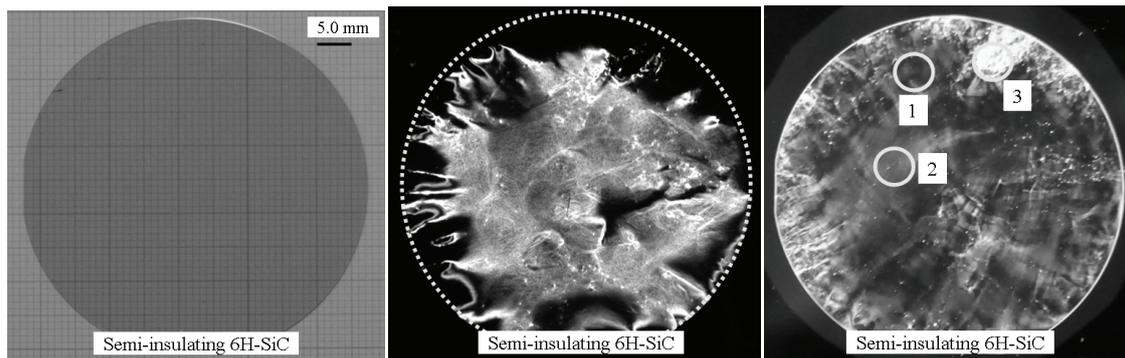


図 1

図 2

図 3

図 1: 本研究に用いた 6H-SiC ウェハ試料の光学写真。背景は、方眼紙。

図 2: 本試料の X 線トポグラフィックウェハマップ。破線は、ウェハ端を示す。像の明暗は、転位など様々な欠陥密度に対応する。

図 3: 本試料の円偏光クロスニコルウェハマップ。像の明暗は、歪の強度と対応。

的明るい領域は、ウェハ周辺よりウェハ中心部に出現する。一般的に、ウェハでは、中心部の方がより結晶性が高い。従って、序論で述べた画像情報の消失が生じていると推測される。

上記画像情報消失の起因を調べるため、円偏光クロスニコル測定を行った。得られたウェハマップを図 3 に示す。図 3 の灰色の円で囲まれた領域 3 は、最も高い輝度を示す。従って、この領域に相当する X 線トポグラフィック画像消失は、ウェハ内歪が結晶面を極度に歪ませることに起因すると結論される。この結果は、円偏光クロスニコル測定と X 線トポグラフィック測定を相補的に利用することの重要性を示す。

次に、歪による応力を調べるため Raman 散乱測定を行った。測定箇所として、ウェハマップの輝度を考慮して、図 3 に示される 3 つの領域を選択した。領域 1, 2 と 3 における Raman 散乱スペクトルを、それぞれ図 4(a), 4(b) および 4(c) に示す。周波数 788.8cm^{-1} にピークを有するバンドが存在する。ピーク周波数から、観測されたバンドは、第 2 FTO フォノンバンド [FTO(2/6)] に帰属される [6]。図 4(a) に示すように、各測定点における FTO(2/6) フォノンバンドのピー

ク周波数は、ほぼ同じ値である。一方、図 4(c) に示される領域 3 の FTO(2/6) フォノンバンドのピーク周波数は、分布を示している。周波数 788.8cm^{-1} に対する最大のシフト値は、 -0.4cm^{-1} である。本研究の測定対象が 1 mm 厚以下のウェハであることを考慮し、フォノン周波数シフトが面内 2 軸性応力に起因すると仮定すると、フォノン周波数シフト $\Delta\omega$ は、次式で与えられる [7]:

$$\Delta\omega = 2a\sigma_{\text{in-plane}} \quad (1)$$

ここで、 a と $\sigma_{\text{in-plane}}$ は、それぞれフォノン変形ポテンシャルおよび面内応力である [6]。ここで、 $\sigma_{\text{in-plane}}$ の符号は、引張応力を正とする。6H-SiC における一軸性応力に対するフォノン変形ポテンシャルは、Grodecki らにより報告がなされており、[11-20] 方向と [11-10] 方向に対して、それぞれ -0.44 および $-0.38\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$ である [8]。これらの平均値と最大フォノン周波数シフトから、最大引張応力は、約 490 MP と見積もられる。ここで注目すべき点は、円偏光クロスニコルウェハマップでは領域 1 と明確に輝度の異なる領域 2 で、フォノン振動数に顕著な分布が観測されないことである。これは、円偏光クロスニコル測定が Raman 散乱測定より歪に対する敏感性を有することを示唆す

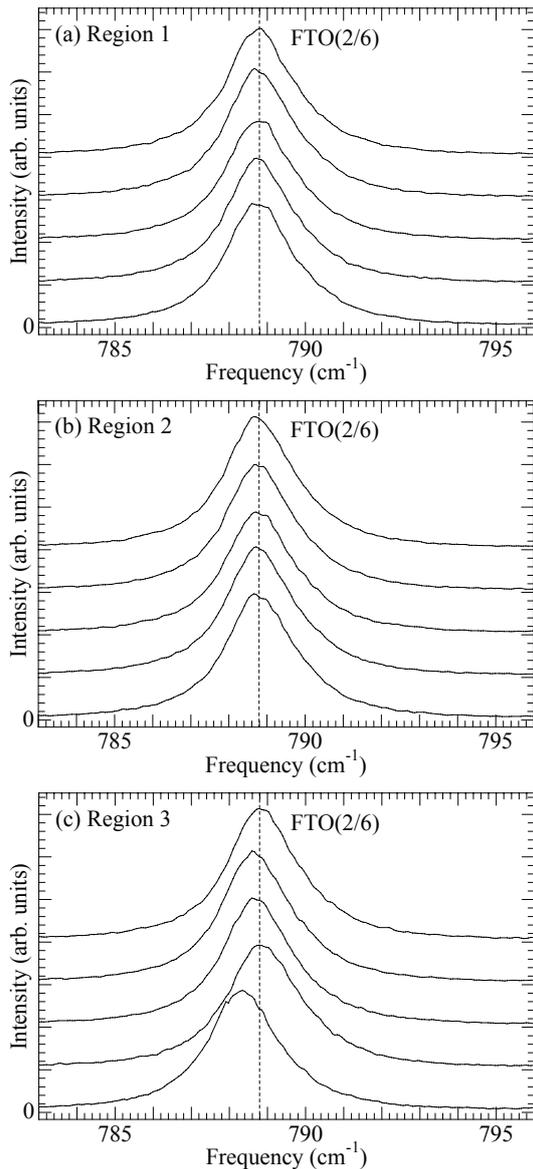


図4: 図3に示される領域1,2および3におけるRaman散乱スペクトル。一領域あたり5点測定。(a)領域1。(b)領域2。(c)領域3。

る。従って、円偏光クロスニコル測定は、残留応力評価に対して、有効かつ簡便な手法であると結論される。

4. まとめ

我々は、2インチ半絶縁性6H-SiCウェハを試料として、歪検出に敏感な円偏光クロスニコルウェハマップを有用性を検証した。X線トポグラフィックウェハマップと比較し、円偏光クロスニコルウェハマップは、画像

消失なくウェハ全面の歪状態を示すことが判明した。Raman散乱測定を行い、フォノン周波数シフトから、最大引張応力を約490MPaと見積られた。さらに円偏光クロスニコルウェハマップは、フォノン周波数シフトでの検出限界である歪を反映することが明らかとなった。従って、円偏光クロスニコル測定は、残留応力評価に対して、有効かつ簡便な手法であると結論した。

謝辞

実験結果に関して、大阪市立大学大学院/工学研究科/応用物理学講座/中山正昭教授から有益な議論を頂きました。本研究は、科学技術振興機構フィジビリティスタディ No. AS221Z02197Bの支援を受けた。

[参考文献]

- [1] “SiC Power Materials” ed. by Z.-C. Feng (Springer, Berlin 2004).
- [2] D.K. Bowen and B.K. Tanner, “High Resolution X-ray Diffractometry and Topography” (Taylor & Francis, 1998).
- [3] E.E. Wahlstrom, “Optical Crystallography (2nd edition)” (John Wiley & Sons, 1951).
- [4] G. Cloud, “Optical Methods of Engineering Analysis” (Cambridge, 1994).
- [5] V.P. Kompaneïtsev, *Crystallogr. Rep.* **51**, 640 (2006).
- [6] For a review paper, S. Nakashima and H. Harima, *phys. stat. sol. (a)* **162**, 39 (1997).
- [7] F. Cerdina, C.J. Buchenauer, F.H. Pollak, and M. Cardona, *Phys. Rev. B* **5**, 580 (1972).
- [8] K. Grodecki, A. Wyszomolek, P. Stępniewski, J.M. Baranowski, W. Hofman, E. Tymicki and K. Graszka, *Acta Phys. Pol. A* **116**, 947 (2009).