

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05040

研究課題名(和文) 半導体デバイス中の局所歪みの分光光弾性イメージング

研究課題名(英文) Spectro-photoelastic imaging of local strain fields in semiconductor devices

研究代表者

福澤 理行 (Fukuzawa, Masayuki)

京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・准教授

研究者番号：60293990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：半導体デバイス中の局所歪み場を評価するため、走査型分光偏光計(SSP)と、入射角走査機構を備えた近赤外イメージング偏光系(NIRIP+)を開発した。これらはデバイス作製済みの6インチ径基板に対応する設計で、デバイス内外の局所歪みを、基板のダイシングやスクライピングによる緩和を避けて評価できる。NIRIP+によって、オフ角付き商用SiC基板中の歪み誘起複屈折を選択的に測定することに成功した。この測定結果と、曲げ試験により実測したSiC結晶の光弾性定数を組み合わせ、局所歪み場の選択的定量イメージングが実現した。SSPによって、Siデバイス中の局所歪みのダイシング前定量イメージングも実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、半導体デバイス中の局所歪み場を大面積で可視化した点にある。X線回折やRaman散乱では、測定領域の制限からダイシング後の小片しか評価できず、局所歪みの一部は緩和されていたが、本研究によって、局所歪みを緩和させずに評価できるようになった。デバイス高品質化への貢献が期待でき、プロセスシミュレーションとの直接比較も可能となる。

本研究成果の社会的意義は、光弾性法の応用範囲が大きく拡大した点にある。装置構成が簡便で、X線回折やRaman散乱とは用途が補完関係にあるため、基礎研究だけでなく、商用基板やデバイスの開発・生産における評価・検査装置としての応用も有望である。

研究成果の概要(英文)：A scanning spectro-polariscope (SSP) and a near-infrared imaging polariscope with a scanning mechanism of the light incident angle (NIRIP+) have been developed to quantitatively characterize only local strain fields in semiconductor devices. Since they are designed to be applicable in 6-inch semiconductor substrates as it is even after device fabrication, local strain fields inside and outside the device can be examined without their partial relief by dicing or scraping. The NIRIP+ enabled us to selectively detect strain-induced birefringence in commercial off-axis SiC substrates by eliminating the effect of natural birefringence. By combining the NIRIP+ map with the photo-elastic coefficients of SiC crystal obtained experimentally by a simple load test, selective and quantitative imaging of local strain fields was achieved in commercial SiC substrates and devices. The SSP also enabled us to achieve quantitative imaging of local strain field in the Si devices before its dicing.

研究分野：多次元信号計測・画像化

キーワード：結晶評価 残留歪み デバイス局所歪み 光弾性法

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

MOSFET や太陽電池セルなど、バルク結晶基板上に作製されるデバイスでは、基板中の残留応力や残留歪み、デバイス作製プロセスで誘起される局所歪みが、デバイス特性の劣化だけでなく、ウェハやダイの割れやクラックをも誘発する。そのため、基板やデバイスにおいて歪みの評価と低減は不可欠な課題である。残留歪みや局所歪みは、ダイシングやスクライピングによって緩和してしまうので、本来は、ダイシング前のウェハサイズでの評価が必要である。しかし、X線回折や Raman 散乱による走査測定では、膨大な測定時間や測定領域の制限のため、試料の分割切断が避けられず、ダイシングで応力緩和した後に、ごく狭い領域での分布評価しかなされていないのが現状であった。例えば、パワーデバイス向けバルク SiC, GaN 基板は 6 インチ径が商用化されているが、このサイズでは、デバイスが作り込まれたウェハをそのまま評価する方法はまだ確立されていない。6 インチ角の標準的な太陽電池セルもそのままでは評価できない。

研究代表者はこれまでに、光弾性法を用いて、半導体基板中の残留歪みを非破壊で定量評価する手法を確立した。本手法は、探査偏光を基板に垂直入射させて歪み誘起複屈折 $\delta, \psi$ を測定し、光弾性定数を既知量として、基板面内の歪み成分 $|S_1 - S_2|$ (主歪みの絶対値)に換算する手法である。独自に開発した、走査型赤外偏光計(SIRP)および、イメージング偏光計(NIRIP, VIP)の測定感度は歪み換算で  $10^{-7}$  で、高額な 2 結晶 X 線回折装置と同等以上である。SIRP/NIRIP は実用化され、GaAs, InP, GaP 基板の評価手法としてデファクトスタンダードとなっている。また、平成 25 ~ 27 年科研費の採択を受けて、六方晶バルク基板(GaN, SiC)や、大型鋳造 Si(600mm 角)に対応した偏光計(SCIP, IRIP+)も開発し、主要な半導体材料については、バルク結晶基板の歪み評価手法を確立できた。しかし、デバイスに対応することは依然できなかった。これまでも、デバイス中の局所歪みを評価できないか、多くの研究者から相談を受けていたが、従来のバルク基板向け装置での評価は困難であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体デバイス中の局所歪み場を選択的かつ高感度にイメージングすることにある。解決すべき課題は、最適光源波長の選択と、歪み誘起複屈折の選択的イメージング、であるが、本研究では、走査型分光偏光計(scanning spectropolariscope; SSP)と、入射角走査機構を備えた近赤外イメージング偏光系(near-infrared imaging polariscope with a scanning mechanism of the light incident angle; NIRIP+)を新たに構築し、光弾性定数を実験的に推定することで、これらの課題を解決する。

## 3. 研究の方法

### (1) SSP および NIRIP+の開発

SSP は SIRP の基本構造を元に、補償光学系と分光光源を付加することで開発する(図 1(a))。また、NIRIP+は、試料への偏光の入射角を走査する機構を備えた近赤外イメージング偏光系であり、NIRIP を元に試料回転ステージを組み込むことで開発する(図 1(b))。

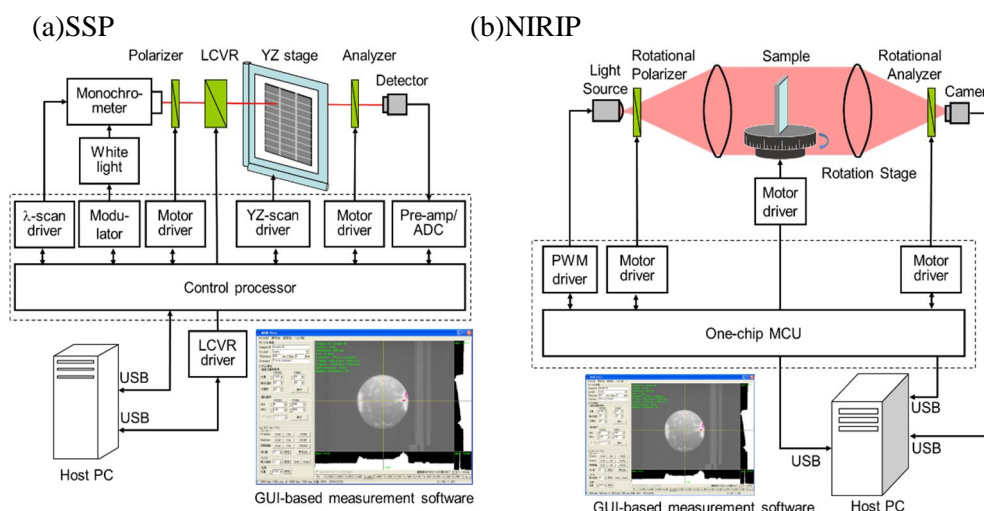


図 1 (a)SSP, (b)NIRIP+のブロック図

### (2) 歪み誘起複屈折の選択的イメージング手法の確立

六方晶系結晶では、偏光が C 軸からずれて伝播すると自然複屈折が生じて歪み誘起複屈折

に重畳されてしまう。歪み誘起複屈折を選択的にイメージングするため、試料中を偏光がC軸に沿って伝播し、自然複屈折が最も低減される入射角を最適入射角として推定する。個別の試料毎に最適入射角を推定するため、NIRIP+を用いて、偏光の入射角を走査しながら複屈折イメージングを繰り返し、最適入射角を事後推定するアルゴリズムを開発する。オフ角付き商用SiC基板を実際に測定して検証する。

(3) 光弾性定数の実験的推定

文献値の乏しいSiC結晶について、NIRIP+を用いて短冊試料をターゲットとして曲げ試験下での複屈折マップを多数取得し、応力-複屈折曲線から光弾性定数を推計する。

(4) デバイス構造中の局所歪みイメージング

複数のデバイスが作り込まれたウェハをダイシング前に評価し、デバイスプロセス誘起の局所歪みを、ダイシングによる緩和や再分布を避けて評価する。

4. 研究成果

(1) NIRIP+を用いた商用オフ角付きSiC基板中の局所歪み定量イメージング

図2に、NIRIP+を用いて評価した、4°オフの商用SiC基板における複屈折分布のC軸入射角依存性を示す。C軸入射角とは、偏光の試料への入射角ではなく、試料中の偏光の伝播方向とC軸とのなす角であり、試料の屈折率からスネルの法則に則って換算した値である。C軸入射角が0°付近の複屈折マップでは自然複屈折が最も低減しており、歪み誘起複屈折が選択的にイメージングされていることが明らかとなった。

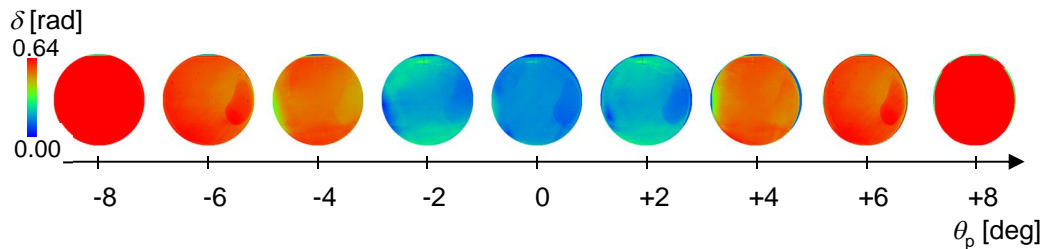


図2 4°オフ商用SiC基板における複屈折分布のC軸入射角依存性

図3に、NIRIP+を用いて評価した、(a)オフ角付き商用SiC基板、(b)SiC高欠陥密度結晶片の局所歪みの選択的イメージング例を示す。図中の表には、別途実施した、SiC短冊試料の曲げ試験から推定した光弾性定数を用いて、複屈折量δのスケールを、主歪み $|S_1 - S_2|$ および主応力 $|\sigma_1 - \sigma_2|$ に換算した値も示す。NIRIP+マップからは、商用SiC基板および高欠陥密度結晶片のどちらにも、局所的な歪み集中が明瞭に観察され、NIRIP+を用いた局所歪み場の選択的定量イメージングが可能であることが明らかとなった。

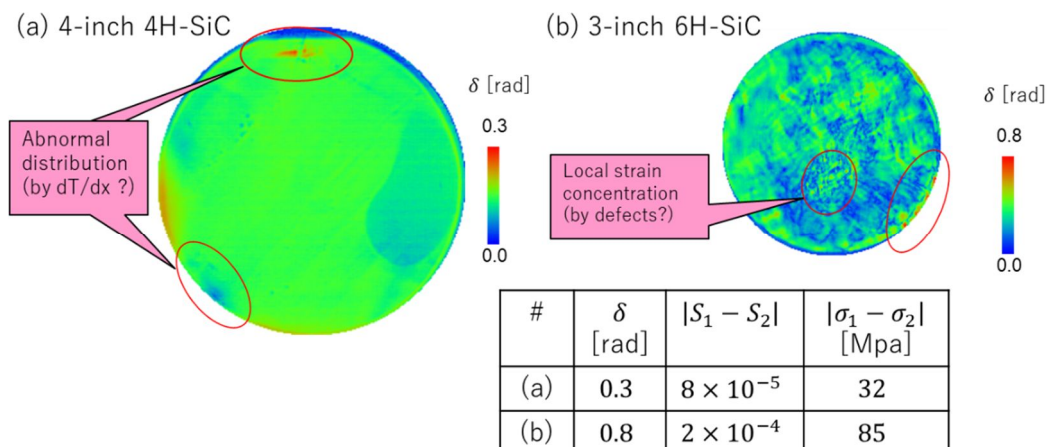


図3 (a)オフ角付き商用SiC基板、(b)SiC高欠陥密度結晶片の局所歪みの選択的イメージング例

(2) SSPを用いたSiデバイス中の局所歪みのダイシング前イメージング

図4に、SSPを用いて評価した、Siデバイス中の局所歪み場のダイシング前イメージング例を示す。図4(b)の主歪み $|S_1 - S_2|$ マップからは、デバイス構造に起因する局所的な歪み集中

が明瞭に観察された。したがって、SSP や NIRIP+を用いれば、デバイス中の局所歪みを選択的に定量イメージング可能であることが明らかとなった。また、局所歪み分布は、図 4(a)の赤外透過率分布とは異なること、また、各デバイスの局所歪み分布は、デバイスのウェハ中の位置によっても異なること、を示しており、デバイス中の局所歪み分布をダイシング前にイメージングすることの重要性が示唆された。



図 4 Si デバイス中の局所歪みのダイシング前イメージング例

(3) 研究成果の位置づけと学術的・社会的意義

SSP および NIRIP+の開発によって、デバイス中の局所歪みの選択的定量イメージングが実現できた。ダイシング前試料の提供が滞ったため、SiC デバイスの評価には至らなかったものの、オフ角付き商用 SiC 基板には対応できたので、Si および SiC デバイス中の局所歪みイメージング手法は確立できた(表 1 の網かけ部分が本研究の成果)。

本研究成果の学術的意義は、半導体デバイス中の局所歪み場を大面積で可視化した点にある。X 線回折や Raman 散乱では、測定領域の制限からダイシング後の小片しか評価できず、局所歪みの一部は緩和されていたが、本研究によって、局所歪みを緩和させずに評価できるようになった。デバイス高品質化への貢献が期待でき、プロセスシミュレーションとの直接比較も可能となる。

本研究成果の社会的意義は、光弾性法の応用範囲が大きく拡大した点にある。装置構成が簡便で、X 線回折や Raman 散乱とは用途が補完関係にあるため、基礎研究だけでなく、商用基板やデバイスの開発・生産における評価・検査装置としての応用も有望である。今後も、光弾性法を用いて結晶工学に貢献していきたい。

表 1 結晶歪み評価手法の比較

評価手法	X 線回折	Raman	光弾性法					
			走査型			イメージング型		
			SIRD	SIRP	SSP	SCIP/IRIP+	NIRIP+	
感度								
定量性			×					
六方晶			×	×	×			
大面積イメージング	バルク	×	×					
	デバイス	×	×	×	×	×	×	×

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukuzawa Masayuki, Kanamoto Kazuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Photoelastic Characterization of Residual Strain Distribution in Commercial Off-Axis SiC Substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 5161 - 5166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11664-020-08211-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福澤理行
2. 発表標題 Photoelastic characterization of residual strain distribution in commercial off-axis SiC substrates
3. 学会等名 18th conference on defects - recognition, imaging and physics in semiconductors (DRIP XVIII) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------