

令和 2 年 8 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13665

研究課題名（和文）半導体デバイスの微小ひずみ・残留ひずみ分布の高精度計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of high-accuracy measurement technique for micro/nano-scale strain and residual strain distributions of semiconductor devices

研究代表者

王 慶華（Wang, Qinghua）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：20726856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、半導体デバイスのマイクロ・ナノ領域でのひずみ・残留ひずみ分布を計測するために、微小格子を利用した光学画像処理技術の開発を行った。モアレ法および逆問題の融合により、広視野かつ高精度な2次元微小ひずみ・残留熱ひずみ分布の計測技術を開発し、汚れの影響を受けにくいひずみ測定手法を提案した。開発手法によるフリップチップにおけるアンダーフィル材の残留熱ひずみ分布を測定した。さらに、界面転位を含む結晶欠陥位置の自動検出方法を提案し、任意の方向に配列された原子配列のひずみイメージング法を開発し、Ge/SiとGaN結晶構造の欠陥検出および原子配列のひずみ測定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマートフォンとパソコンなどの製品に広く使われている半導体デバイスの劣化や欠陥を評価するためには、材料内部のひずみと残留ひずみ分布測定手法の開発が喫緊の課題である。本研究で開発した光学画像処理技術によって、ひずみ・残留ひずみ分布計測および原子欠陥検出を行われることができるため、微小領域での応力集中係数と残留応力の定量評価を低コストかつ非破壊で実現可能になる。本研究で得られた成果は、半導体デバイスの壊れにくい材料設計指針および欠陥発生率の少ないプロセスの確立へ貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, an optical image processing technique using a grid was developed to measure the strain and residual strain distributions of semiconductor devices in the micro and nano regions. A wide-field and high accuracy measurement method for two-dimensional micro strain and residual thermal strain distributions was developed by integrating the moire method and the inverse problem. Besides, a strain measurement method that is not easily affected by flaws was also proposed. The residual thermal strain distributions of underfill in flip chips were measured by the developed methods. Furthermore, an automatic detection method of crystal defects including interfacial dislocations, and a strain imaging method of atomic arrays arranged in arbitrary directions were developed. Defect detection and strain measurement of atomic arrays in Ge/Si and GaN crystal structures were performed.

研究分野：実験力学

キーワード：ひずみ計測 変形分布 光学技術 モアレ法 画像処理 結晶欠陥 残留応力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの劣化や寿命には、材料内部のひずみ集中によって形成される破損又は欠陥が重大な影響を及ぼす。高温で動作する電子デバイスの開発にとって、熱ひずみによる破損を防ぐため、マイクロ・ナノサイズの正確なひずみ・残留ひずみ分布計測が極めて重要である。しかし、複合構造の電子デバイスのマイクロスケール変形は非常に複雑であり、ナノ領域でのひずみ測定は非常に困難であるため、これまでの研究は主に有限要素法と分子動力学法を用いたシミュレーションに焦点を当てており、複雑な微小ひずみ分布測定の実験手法は確立されていない状況である。

従来のひずみゲージは、物理的サイズの制限からマイクロ・ナノスケールでのひずみ分布測定には使用できない。ウェハ検査システムなどの商用装置によって微小欠陥の検査ができるが、数百万ドルと非常に高コストである。近年、非接触非破壊の利点を有する光学的手法が多く注目を集めている。しかし、既存の光学的手法を用いて残留ひずみを高精度に測定することができない。さらに、試料表面に無視できない有意な欠陥またはき裂が存在する場合、従来の位相接続アルゴリズムは、欠陥周辺の広い領域に位相誤差をもたらす。換言すれば、マイクロ・ナノスケールでのひずみ・残留ひずみを正確に測定するための光学技術が欠けているのが現状である。

2. 研究の目的

高ノイズ耐性、低コスト、高精度でマイクロ・ナノスケールでの微小ひずみ・残留ひずみ分布測定法を開発することを本研究の目的とする。この技術によって、例えば、1) 試料画像の異なる部分で輝度が劇的に変化する場合、2) 試料格子方向と解析方向が異なる場合、3) 試料表面に無視できない欠陥がある場合、などの厳しい条件下でも、垂直・せん断・主ひずみを含む微小ひずみ・残留ひずみ分布や微小欠陥分布を正確に定量評価することが可能になる。これによって、半導体デバイスの損傷メカニズムの解明、デバイスの不良発生率を低減させるプロセスの改善、さらには壊れにくいデバイスの材料設計指針の確立などへの貢献が期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、マイクロ・ナノスケールでのひずみ・残留ひずみ分布を高精度に測定するための実験技術を提案し、半導体デバイスの微小ひずみ評価に適用する。具体的な研究方法を以下に示す。

(1) サンプリングモアレ法、2次元位相同時解析、提案する局部位相接続アルゴリズム、および逆問題解析を融合することで、微小ひずみ・残留ひずみ分布測定法を開発した。また、界面転位を含む結晶欠陥位置の自動検出方法を提案し、任意の方向に配置された原子配列のひずみ測定法を開発した。

(2) マイクロ領域でのひずみ・残留ひずみを測定するために、設計したUVナノインプリント装置に設置するつかみ用治具を用いて、フリップチップ (FC) 断面に $3\mu\text{m}$ ピッチの格子を室温で作製した。設計したレーザー顕微鏡での加熱試験を可能とした加熱チャンバーによって、フリップチップを試料作製温度である 150°C に加熱し、フリップチップのアンダーフィル材のひずみ・残留熱ひずみ分布を測定した。

(3) ナノ領域でのひずみ分布を測定するために、透過電子顕微鏡で Ge/Si と GaN 結晶構造の原子画像を撮影した。原子配列の位相解析に基づいて、転位などの欠陥箇所と結晶界面を自動的に検出し、原子配列のひずみ分布を測定した。

4. 研究成果

(1) 残留熱ひずみ分布計測技術の開発およびフリップチップの残留熱ひずみ分布測定

電子デバイス内部の残留熱応力を評価するために、サンプリングモアレ法、2次元位相同時解析、および逆問題解析を融合することで、残留熱ひずみ分布測定法 (図 1) を新たに開発した。試料生成温度に対して異なる温度での残留熱ひずみ分布の測定が可能となった。従来のモアレ法と比較してせん断と主ひずみ・残留ひずみの測定誤差を大幅に低減させることができた。

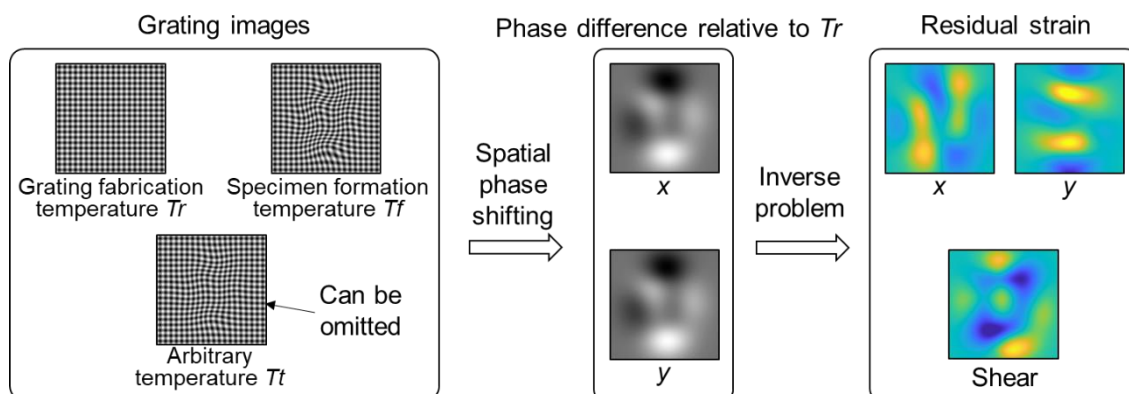


図 1 格子画像の位相解析による残留熱ひずみ分布測定法の原理

さらに、局部位相アンラップアルゴリズムを提案し、欠陥の影響を受けにくいひずみ・残留ひずみ計測法を開発した(図2)。開発手法による、フリップチップ(FC)表面の微小格子の顕微鏡画像の処理から150°Cに対する室温でのアンダーフィル材の垂直とせん断残留熱ひずみおよび最大最小残留熱主ひずみ分布(図3)を測定し、マイクロ領域でのひずみ集中からアンダーフィル材の壊れやすい箇所を特定した。

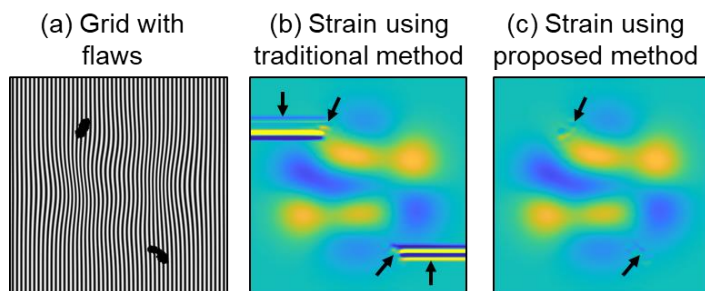


図2 欠陥の影響を受けにくいひずみ分布測定の概略図

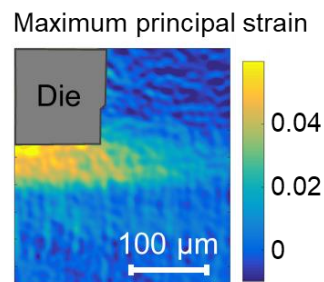


図3 FCの残留熱主ひずみ

(2) 任意の方向に配置された原子構造の欠陥検出とひずみ測定法の開発

結晶欠陥を非破壊かつ低コストで検出するために、フーリエ変換とサンプリングモアレ技術に基づいた欠陥検出係数を定義し、界面転位を含む結晶欠陥位置座標の自動検出法(図4a, b)を開発した。欠陥と界面転位を可視化しやすくするために、原子配列から計算されたサンプリングモアレ位相分布を、精度を失うことなくデジタルモアレ位相分布に変換されることができた。さらに、斜め格子の角度を考慮した位相分布の解析によって、任意の方向に配置された原子配列のひずみイメージング法(図4c)を開発し、界面の位置を可視化することを明らかにできた。

(3) Ge/Si と GaN 結晶構造の転位分布検出とひずみ分布測定

開発した欠陥検出法を用いて、半導体の代表的な結晶構造である Ge/Si 構造の透過型電子顕微鏡(TEM)画像の処理によって欠陥検出係数を計算し、界面転位を含む欠陥位置を自動的に検出した(図5)。モアレ縞の位相分布から広視野での原子配列の分布特徴と欠陥箇所を in-situ 拡大して可視化された。また、斜め方向に配置された原子配列のひずみ分布を測定し、界面位置を可視化した。TEM画像の拡大図から Ge および Si 原子配列のすべての欠陥と界面位置を特定され、開発された欠陥検出手法の有効性を検証された。検出された転位は、 n (2以上の整数) 列と $n-1$ 列または $n+1$ 列の同種または異種の原子間の不一致によって引き起こされたことが確認された。

さらに、フーリエ変換フィルターされたサンプリングモアレ法によって、ドライとウエットエッチング処理前後の GaN 結晶構造の転位分布検出とひずみ分布測定を行い、結晶構造の異なる処理プロセスの効果を評価した。

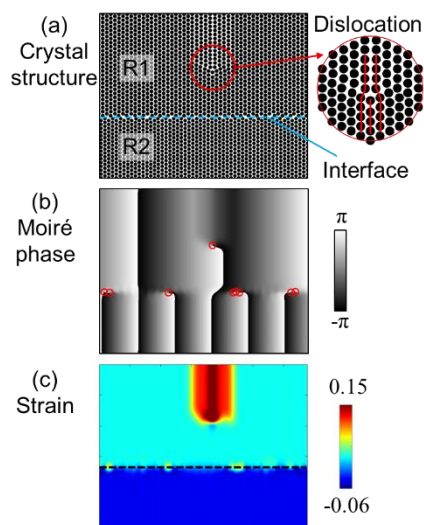


図4 シミュレートされた原子構造の転位検出とひずみ分布計測の概略図

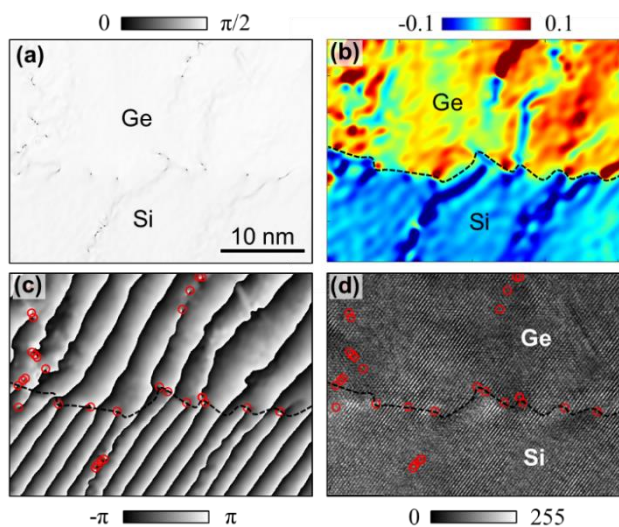


図5 Ge/Si 結晶構造の(a)欠陥検出係数, (b)ひずみ分布と界面位置, (c)モアレ位相, (d)TEM画像での欠陥と界面位置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 6件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Xia Peng, Liu Zhanwei | 4. 巻 129 |
| 2. 論文標題 Automatic detection of defect positions including interface dislocations and strain measurement in Ge/Si heterostructure from moire phase processing of TEM image | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering | 6. 最初と最後の頁 106077 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2020.106077 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Enomoto Toshiaki | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Residual Thermal Strain Distribution Measurement of Underfills in Flip Chip Electronic Packages by an Inverse Approach Based on the Sampling Moir? Method | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Experimental Mechanics | 6. 最初と最後の頁 611-626 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11340-019-00571-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Wang Qinghua, Okumura Shigesato, Ri Shien, Xia Peng, Tsuda Hiroshi, Ogihara Shinji | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Second-order moire method for accurate deformation measurement with a large field of view | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 7498 ~ 7514 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.387997 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Maenosono Akira, Tanaka Yoshihisa, Koyama Motomichi | 4. 巻 133 |
| 2. 論文標題 1-second-resolved strain mapping in Ti-6Al-4V alloys during dwell fatigue in SEM by video sampling moire | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Mechanics of Materials | 6. 最初と最後の頁 63 ~ 70 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mechmat.2019.03.002 | 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 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Tsuda Hiroshi, Koyama Motomichi | 4. 巻 110 |
| 2. 論文標題 Optical full-field strain measurement method from wrapped sampling Moire phase to minimize the influence of defects and its applications | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering | 6. 最初と最後の頁 155 ~ 162 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2018.05.020 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Ri Shien, Agarwal Nimisha, Wang Qinghua, Kemao Qian | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Comparative study of sampling moire and windowed Fourier transform techniques for demodulation of a single-fringe pattern | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 10402 ~ 10411 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.57.010402 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、津田 浩 |
| 2. 発表標題 Full-field defect detection and strain mapping at the nanoscale and atomic scale using Moire phase analysis |
| 3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、津田 浩 |
| 2. 発表標題 Crystal defect detection and strain imaging in semiconductor structures |
| 3. 学会等名 International Conference on Optical and Photonic Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 S. Ri, Q. Wang, Ni. Agarwal, Q. Kemao |
| 2. 発表標題 Sampling moire method meets windowed Fourier transform: the comparison and linkage of two methods for demodulation of carrier fringe pattern |
| 3. 学会等名 International Conference on Optical and Photonic Engineering (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、夏 鵬、津田 浩 |
| 2. 発表標題 二次元位相解析法による垂直ひずみとせん断ひずみ分布の高精度計測 |
| 3. 学会等名 日本実験力学学会講演論文集 (2019年度年次講演会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 李 志遠、王 慶華、Nimisha Agarwal, Qian Kemao |
| 2. 発表標題 縞画像の位相解析におけるサンプリングモアレ法と窓付きフーリエ変換法の精度比較 |
| 3. 学会等名 日本実験力学学会講演論文集 (2019年度年次講演会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、夏 鵬、津田 浩 |
| 2. 発表標題 微小ひずみ分布測定のための局部位相接続アルゴリズムの開発と応用 |
| 3. 学会等名 日本実験力学学会2018年度年次講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、津田 浩 |
| 2. 発表標題 微小格子を用いたマイクロスケールでのひずみ分布測定技術の開発 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会第50回応力・ひずみ測定と評価シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、夏 鵬、津田 浩 |
| 2. 発表標題 格子画像の位相解析による微小ひずみ分布計測と原子欠陥検出 |
| 3. 学会等名 光学的手法分科会(JSEM)・実験力学先端技術研究会(JSME)合同研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計1件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 2019年4月 日本機械学会奨励賞（研究）受賞 受賞テーマ：構造材料の微小領域でのひずみ分布の高精度計測法の研究 |
|---|

| 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 |
| | | |