

氏 名	あれつさんどろ あらん ぼるばらてい Alessandro Alan Porporati
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 乙 第 1 6 1 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 20 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 3 条第 4 項該当
学 位 論 文 題 目	Experimental nanomechanics of low-dimensional semiconductor materials and devices by cathodoluminescence piezospectroscopy (カソードルミネッセンス分光分析法による超微細半導体デバイスにおける高分解能解析) (主査)
審 査 委 員	教授 PEZZOTTI Giuseppe 教授 一ノ瀬暢之 教授 遠藤久満

### 論文内容の要旨

ここ数十年にわたり、多くの電子デバイスの小型化が進められてきた。今日では市場向けの量産デバイスや電気回路の側方寸法が一辺当たりおよそ 100nm 程にまで小さくなっている。そして次の 10 年には、高速電子技術と同様に光通信の分野において個々の寸法が 50nm 以下の電子デバイスが使われることになるであろう。場合によっては、量子素子などは 1~10nm の能動素子を用いることもあるだろう。他の特性同様に、デバイスの寸法が小さくなると物質の機械的特性がバルクのスケーリング則からそれてしまう。他の物理特性がただ原子長さレベルにおいてのみ連続モデルからそれているというものは違って、機械的特性は驚くほど大きな長さスケールでバルクスケーリング挙動からそれているということはしばしば観察されている。これら微細化デバイスにとって従来の解析方法に代わる高分解能キャリブレーション方法の確立が必要なことは明らかである。この高分解能キャリブレーション方法は電子デバイスの解析において非破壊かつシンプルに解析するために重要な光学手段であることを示すものもある。実際のところ、測定にはキャリアーの再結合によるルミネッセンスを利用しており、半導体分野においては極めて重要な手段である。技術的に裏付けされたルミネッセンスの固有強度は半導体材料がそれぞれ持っているバンド幅と、不純物準位の有無にも依存するそれらのバンド幅において光学遷移が効果的に起こるという現象による。

従来の分光分析法の欠点としては、測定に比較的多くの試料を必要とし、特性を平均化したものであるということである。巨視的に一様な半導体材料においては、スケールの違いによる特性解析の観察結果が殆ど等しいために、それほど重要ではない。しかし、1 ミクロンの 1 以下のスケールで物質の特性が変化する材料については、ナノスケールでの高分解能解析方法というものが明らかに必要である。解析技術の進化の遅れを取り戻すべく多くの技術が考案されているが、ナノスケールの解析技術においては、信頼性、柔軟性、再現性を有する有効な手段がまだ確立されていない。他方、この解析理論においては発光バンドの構造解析と深い知識が、現代のデバイスにおいて力学量を測定することの主な障害となっているのであろう。本論文では、カソードルミネッセンス検出器を搭載した走査型電子顕微鏡が、現時点では最も信頼性が高く柔軟性を持ったツールであることを実証する。この解析法を用いると実験に要する試料を最小限に抑える

ことが出来るだけでなく、再結合由来の発光のバンド構造の解読や理論付けを行うことが出来る。また現代の微細デバイスに対応する微小領域での歪み・応力解析を行うことも出来る。本文では超微小領域における応力の定量解析によるIII-V族半導体の変形ポテンシャル解析方法の確立と他の解析手段により見積もられた値や理論値との比較を行った。

## 論文審査の結果の要旨

電子デバイスの小型化はとどまることなく進んでいる。デバイスの寸法が小さくなると物質の機械的特性がバルクのスケーリング則からずれてしまう。他の物理特性と違い、機械的特性は驚くほど大きな長さスケールでずれていることはしばしば観察されており、従来の解析方法に代わる高分解能キャリブレーション方法の確立が必要である。従来の分光分析法では、測定に比較的多くの試料を必要とするが、100nm以下のスケールで物質の特性が変化する材料については、ナノスケールの高分解能が望ましいが、信頼性、柔軟性、再現性を有する手段がまだ確立されていない。本論文では、カソードルミネッセンス検出器を搭載した走査型電子顕微鏡が、現時点で最も信頼性が高く柔軟性を持ったツールであることを実証する。キャリア再結合による発光を利用して、半導体分野においては極めて重要な手段である。発光の固有強度は半導体材料がそれぞれ持っているバンド幅と、不純物準位の有無にも依存するそれらのバンド幅における光学遷移に起因する。実験に要する試料数を最小限に抑えられ、再結合由来の発光のバンド構造の解読や理論付けを行え、微小領域での歪み・応力解析を行える。本文では超微小領域における応力の定量解析によるIII-V族半導体の変形ポテンシャル解析方法の確立と他の解析手段により見積もられた値や理論値との比較を行った。本論文の基礎となった10編の学術論文のうち8編はレフェリ一制度を有する学術論文に掲載または掲載予定である。また10編中6編は申請者が筆頭著者である。

### 【学位論文の基礎となった論文リスト】

1. Alessandro Alan Porporati, Naohide Furukawa, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti, "Deformation potentials of the direct band gap of Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As from controlled microscopic stress fields" accepted for publication in *J. Appl. Phys.*.
2. Wenliang Zhu, Alessandro Alan Porporati, Atsuo Matsutani, Nicola Lama, and Giuseppe Pezzotti, "Spatially resolved crack-tip stress analysis in semiconductor by cathodoluminescence piezospectroscopy" *J. Appl. Phys.* 101, 103531 (2007).
3. Alessandro Alan Porporati, Naohide Furukawa, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti, "Deformation potentials of Si-doped GaAs from microscopic residual stress fields" *J. Appl. Phys.* 102, 083102 (2007).
4. Alessandro Alan Porporati, Yoshitomo Tanaka, Atsuo Matsutani, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti, "Stress dependence of the near-band-gap cathodoluminescence spectrum of GaN determined by spatially resolved indentation method" *J. Appl. Phys.* 100, 083515 (2006).
5. Giuseppe Pezzotti, Wenliang Zhu, Andrea Leto, Atsuo Matsutani, and Alessandro Alan Porporati, "Electron probe response function and piezo-spectroscopic behaviour of semiconductor materials in presence of highly graded stress fields" *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39, 4975 (2006).
6. Alessandro Alan Porporati, Koichiro Hosokawa, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti, "Stress dependence of the cathodoluminescence spectrum of N-doped 3C-SiC" *J. Appl. Phys.* 100, 093508 (2006).
7. Keshu Wan, Alessandro Alan Porporati, Gan Feng, Hui Yang, and Giuseppe Pezzotti, "Biaxial stress dependence of the electrostimulated near-band-gap spectrum of GaN epitaxial film grown on (0001) sapphire substrate" *Appl. Phys. Lett.* 88, 251910 (2006).
8. Alessandro Alan Porporati, Wenliang Zhu, Junichi Aoyama, and Giuseppe Pezzotti, "A method to interpret nano-scale cathodoluminescence experiments made to measure non-uniform stresses at GaAs interfaces" *International Workshop on Designing of Interfacial Structures in Advanced Materials and their Joints (Osaka-DIS '06)*, edited by M. Naka and T. Shibayanagi, pp.29-34 (2006).
9. Giuseppe Pezzotti, Alessandro Alan Porporati, Andrea Leto, and Wenliang Zhu, "Spatially resolved residual stress assessments in GaN film on sapphire substrate by cathodoluminescence piezo-spectroscopy" submitted to *J. Appl. Phys.*.
10. Alessandro Alan Porporati, Naohide Furukawa, Wenliang Zhu, and Giuseppe Pezzotti, "Direct determination

of intrinsic  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  ( $x=0.49$ ) band-gap deformation potentials by cathodoluminescence piezo-spectroscopy” submitted to *Phys. Rev. Lett.*.

【参考論文】

1. Andrea Leto, Alessandro Alan Porporati, Wenliang Zhu, Martin Green, and Giuseppe Pezzotti “High-resolution stress assessments of interconnect/dielectric electronic patterns using optically active point defects of silica glass as a stress sensor” *Journal of Applied Physics* 101, 093514 (2007).
2. Giuseppe Pezzotti and Alessandro Alan Porporati “Raman spectroscopic analysis of phase-transformation and stress patterns in zirconia hip joints” *J. Biomedical Optics* 9, 372-384 (2004).
3. Alessandro Alan Porporati, S. Roitti, and O. Sbaizer “Metallorganic chemical vapor deposition of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  films” *J. Europ. Ceram. Soc.* 23, 247-251 (2003).