

機関番号：17102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760011

研究課題名 (和文) 高性能バイポーラトランジスタのための高精度・局所歪み評価

研究課題名 (英文) Precise strain evaluation for high-performance bipolar transistor

研究代表者

王 冬 (Wang Dong)

九州大学・産学連携センター・特任准教授

研究者番号：10419616

研究成果の概要 (和文)：

局所ひずみ評価用試料の面積は $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 以下と小さい。これに対応できるフォトルミネッセンス (PL) 測定系を構築した。自立Si薄膜構造 (Si-On-Nothing構造) 形成後にSiN膜を成膜した試料を試作し、Si薄膜に印加されるひずみをPLシステムを用いて評価した。その結果、200 nm-SiN/200 nm-Si膜では約1%の圧縮ひずみが導入できること、 $\langle 100 \rangle$ 方向ひずみが $\langle 110 \rangle$ 方向より大きいことを示した。また、深さ方向に対して「均一ひずみ」あるいは「不均一ひずみ」であるかの評価手法として、PL信号強度とSi膜厚依存性から判断する方法を提案した。

研究成果の概要 (英文)：

The geometry of test sample for local strain evaluation was as small as  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ . We established photoluminescence measurement system for such a sample. We fabricated freestanding Si membranes structure (Si-On-Nothing structure), followed by deposition of SiN film. We evaluated strains in these samples using the PL system. As results, a compressive strain of approximately 1% was induced in the 200-nm-thick Si film by 200-nm-thick SiN film; the strain along  $\langle 100 \rangle$  direction was much larger than that along  $\langle 110 \rangle$  direction. Also, we proposed a method for judging uniform or ununiform strain from dependence of PL signal peak position and its intensity on Si film thickness.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：解析・評価、半導体物性、電子・電気材料、先端機能デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

無線通信の急速な成長により、ラジオ周波数 (RF : radiofrequency) 帯域でのパワートランジスタの更なる高性能化 (高速・低消費電力化) が強く求められている。一般に、RF パワートランジスタにはバイポーラー接合トランジスタ (BJT) が用いられる。このため、BJT の性能向上は RF パワートランジスタの性能向上に繋がり、それに向けた技術開発は重要な課題と言える。

一方、大規模集積回路 (LSI : large scale integrated circuit) の構成デバイスである相補形電界効果形トランジスタ (CMOS) には、高性能化のために、「ひずみ技術」が用いられる。ひずみ技術とは、Si 結晶に横方向引張りひずみを加えて Si のバンド構造を変調し、電子の走行速度を向上させる手法である。この手法を用いれば、通常のひずみ無し Si に比べて、電子の移動速度が約 2 倍向上することが報告され、ひずみ Si を電子のチャンネル層とする CMOS デバイスは国内外で精力的開発が進められている。この場合、チャンネル層厚は 2-3 nm であるため、ひずみを加える Si 層は 10 nm 厚程度で十分となる。

このひずみ Si 技術を BJT に導入すれば、従来プロセスを大きく変えることなく RF 用の BJT の高性能化が図れると期待できる。しかし、BJT は、CMOS と異なりデバイス構造が縦方向であること、デバイスサイズが大きいこと等により、ひずみの印加手法は CMOS とはまったく異なるものとなる。このため、ひずみ技術を使って BJT の高速・低消費電力化を図った報告は、現時点でも国内外を通じて皆無である。

本研究では、BJT に導入したひずみ、それに伴い導入される結晶欠陥等を詳細に調べ、ひずみの制御と適正化を行うことを目的とした。

## 2. 研究の目的

本研究では、高性能 BJT を実現するためのひずみ制御を効率良く実現するために、局所ひずみを高精度で評価する手法として、マイクロ・フォトルミネッセンス ( $\mu$ -PL) を開発することを目的とした。その上で、ひずみ印加した Si 薄膜のひずみ量と欠陥を調査し、ひずみの適正化と精密制御のための指針を得ることを目的とした。以下、本研究で得られた結果を述べる。

## 3. 研究の方法

### 3-1 ひずみ印加 Si 薄膜の作製

局所ひずみ評価用試料のパターン 1 およびパターン 2 の平面図を Fig. 1(a-1) および Fig. 1(a-2) に、その詳細な幾何学的形状を Fig. 1(b) および Fig. 1(c) に示す。Fig. 1 に示した構造の作成フローは、以下のプロセスに従って作製した。SOI 層 : 200、250、300 nm、BOX 層 : 1  $\mu$ m、支持基板 : 675  $\mu$ m の SOI ウェーハをリソグラフィ及び反応性イオンエッチング工程により、SOI 層をパターン 1 および 2 の形状に加工した。その後、ウェットエッチングにより SiO<sub>2</sub> (BOX) 層をエッチングし、試料の中央部分が両端で固定された自立構造を作製した。ここで、中央部分 SOI 層の下の SiO<sub>2</sub> が完全に除去されるように、SiO<sub>2</sub> エッチング深さは約 3  $\mu$ m とした。従って、中央部分は Si-On-Nothing 構造となっている。この構造の Si 薄膜に対して、圧縮ひずみを印加するストレッチャである LP (Low Pressure)-SiN 膜を CVD 成膜した。LP-SiN 膜の成膜温度は 700°C である。CVD 成膜であるため、Si 層の下面にも SiN 膜が成膜できる点は注意を要する。その応力は 1.2 GPa 程度である。

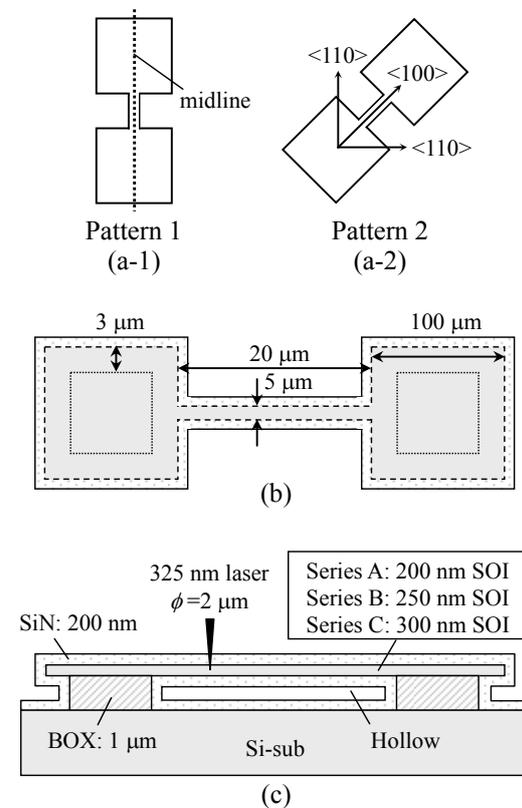


Fig. 1 局所ひずみ評価用試料の構造。

ひずみ量は、SOI 膜厚、ストレッサ膜厚およびパターン形状に依存する。ここでは、ストレッサ膜厚は 200 nm 一定とし、SOI 膜厚が 200、250、300 nm 試料をそれぞれ A、B および C シリーズと呼ぶことにする。従って、A シリーズのパターン 1 には、200 nm の Si 層の両面に対して SiN ストレッサでひずみが印加されている。ひずみの方向は  $\langle 110 \rangle$  で、長さ方向と垂直な方向に 1 軸の圧縮ひずみが増えられたことになる。一方、A シリーズのパターン 2 では、1 軸の圧縮ひずみが  $\langle 100 \rangle$  方向に加えられたことになる。

### 3-2 マイクロフォトルミネッセンス ( $\mu$ -PL) システムの構築

絶縁膜上の微小単結晶領域の PL 評価には、微小領域のみを光励起し、再結合時に放射される僅かな光を高感度に検出する必要がある。保有する PL 評価システムを微小領域に適用するためには、① 励起光源のビーム径の微小化が必要であった。本研究では、これらの課題に取り組み、① ビームスポット径  $2 \mu\text{m}$  までの微小化を実現した。構築したマイクロ PL システムの構成を Fig. 2 に示す。

励起光源には、波長 532 nm : YAG レーザ、波長 514 nm : Ar<sup>+</sup> レーザ、波長 325 nm : HeCd レーザが使用可能である。YAG および Ar<sup>+</sup> レーザ光の侵入波長は  $2 \mu\text{m}$  程度なので、絶縁膜上の薄膜結晶層評価にこれらの光源を用いた場合、薄膜結晶層と共に基板からの PL 信号が観測される。一方、HeCd レーザ光の侵入波長は 10 nm 程度なので、薄膜結晶層からの信号

のみが観測される。

このような利点からビーム径の微小化に取り組んだ。まず、近紫外光を透過し、且つ近赤外領域の光もある程度透過できる近紫外用対物レンズ (NUV 対物レンズ : 50 倍) を選んだ。このレンズでは、近赤外領域 (1000 nm ~ 1800 nm) でも 20% の透過率を持つ。しかし、HeCd レーザ光をこのレンズを通すとパワーの大幅な低下が起こること、近赤外領域の PL 信号強度が大幅に低下すること、は避けられない。このことは犠牲にしても、その他の光学部品を最適化することによりパワーと信号強度の低下を可能な限り押さえよう、部品の選定を行った。具体的には、ビームスプリッターからエッジフィルターの変更により、試料照射面で  $0.16 \rightarrow 0.8 \text{ mW}$  への増強ができた。また、HeCd レーザの反射に用いていた 4 枚の金属ミラーを誘電体ミラーへ変更し、 $0.8 \rightarrow 1.0 \text{ mW}$  の増強が達成できた。以上の改良により、試料照射面への最大パワー  $P_{\text{MAX}}$  および照射ビームスポット径  $\phi$  として、 $P_{\text{MAX}} = 1 \text{ mW}$ 、 $\phi = 2 \mu\text{m}$  を満足する照射系が実現できた。

## 4. 研究成果

### 4-1 PL スペクトルの位置依存性

A シリーズパターン 1 試料の長さ方向に HeCd レーザを照射し、PL 発光スペクトルを観測した。ここで、測定温度は 8K である。得られた結果を Fig. 3 に示す。同様の測定を全ての試料に対して行った。Fig. 3 に於いて FE は free exciton、EHP は electron hole plasma、

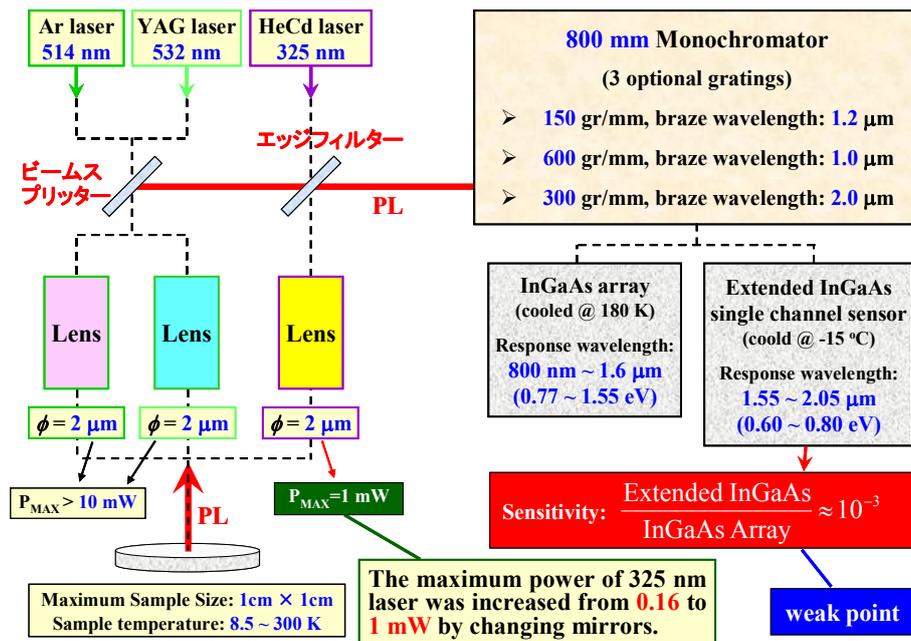


Fig. 2 マイクロ PL システムの構成。

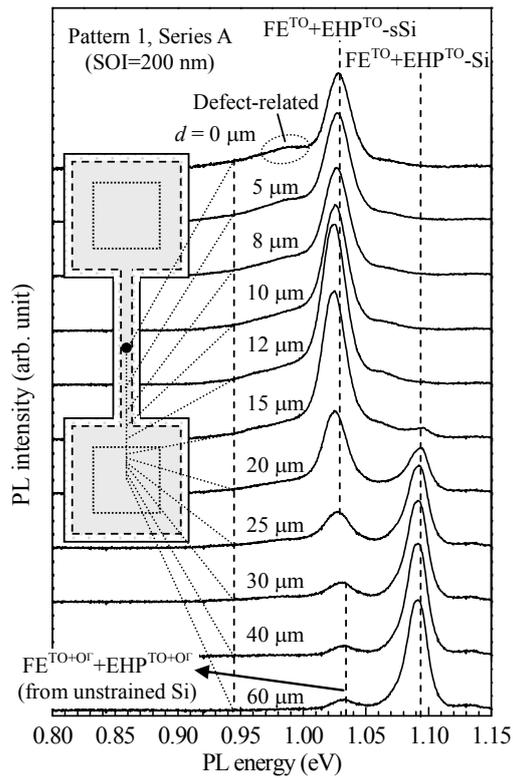


Fig. 3 Aシリーズパターン1試料のPL発光スペクトル。

TOはtransverse optical phononを表す。観測されたPLスペクトルは場所に依存して変化していることが分かる。距離 $d$ が $0\sim 12\mu\text{m}$ の範囲では、 $1.09\text{eV}$ の無ひずみSiのバンド間遷移に対応するPL信号は観測されない。一方、 $1.03\text{eV}$ の位置にひずみSiに対応するPL信号が明確に観測される。距離 $d$ が $12\sim 30\mu\text{m}$ の範囲では、ひずみSiの $\text{FE}^{\text{TO}}+\text{EHP}^{\text{TO}}$ の信号が徐々に減少していると同時に、無ひずみSiの $\text{FE}^{\text{TO}}+\text{EHP}^{\text{TO}}$ の信号が現れ、徐々に増加していることが分かる。距離 $d$ が $30\sim 60\mu\text{m}$ の範囲で

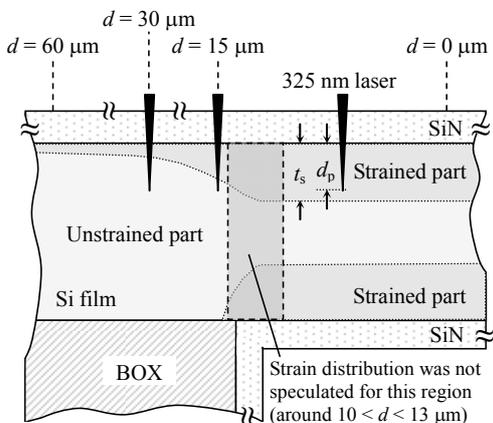


Fig. 4 ひずみの深さ方向分布のイメージ図。

は、ひずみSiの $\text{FE}^{\text{TO}}+\text{EHP}^{\text{TO}}$ の信号が完全に消失し、観測PL信号は無ひずみSi信号のみとなっている。

#### 4-2 PLに於けるエキシトンの拡散の影響

Fig. 3で示した結果を基に、長さ方向でのひずみの深さを推測した。その結果がFig. 4である。 $d=0\sim 10\mu\text{m}$ の範囲では、 $325\text{nm}$ 光の侵入長 $d_p$ は $10\text{nm}$ 程度と小さく、ひずみSi層の厚さ $t_s$ より短いため、観測されるPL信号はひずみSi層からの信号のみが観測される。 $d=10\sim 13\mu\text{m}$ の範囲は、ひずみ分布が複雑で推論できない領域である。 $d=13\sim 30\mu\text{m}$ の範囲は、ひずみSiの信号と無ひずみSiの信号が観測される領域である。これは、Si層のBOX層への束縛が次第に強くなり、それに伴いひずみの深さが浅くなっていることで説明できる。そして、 $d=30\sim 60\mu\text{m}$ の領域では、ひずみの深さが極めて浅くなり、表面再結合が支配的となり、観測できるPL信号は、無ひずみSiの信号のみとなる。

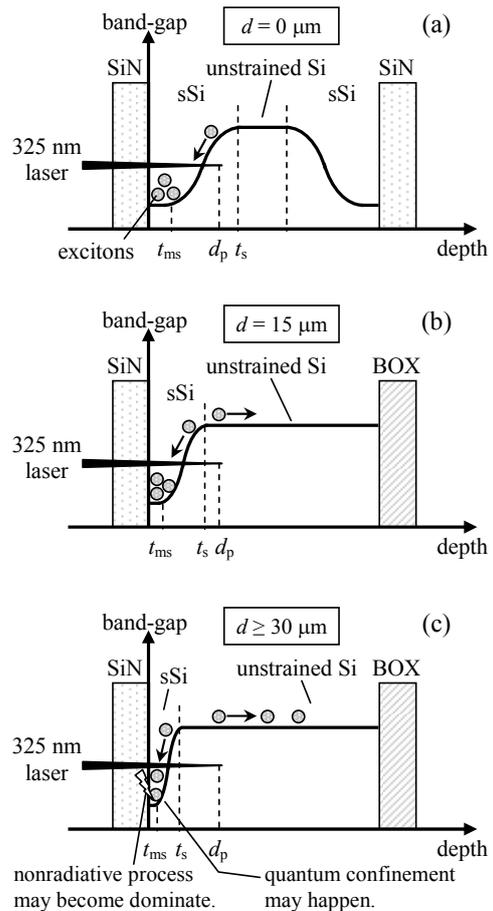


Fig. 5 バンドギャップの深さ方向分布とエキシトンの拡散の影響。

以上の状況は、Fig. 5 のバンドギャップの深さ方向分布でより明確に説明できる。Fig. 5(a)は  $d=0$  の状況で、 $d_p$  が  $t_s$  より小さいため、325 nm での励起で発生した電子-正孔対はバンドギャップの狭小化領域に拡散し、そこで再結合して発光する。Fig. 5(b)は  $d=15 \mu\text{m}$  付近の状況で、 $d_p$  が  $t_s$  より大きいため、325 nm 励起で発生した電子-正孔対はバンドギャップの狭小化領域に拡散するものと無ひずみ領域を拡散して再結合する成分が混在する。その結果、ひずみ Si と無ひずみ Si に対応する信号が観測される。Fig. 5(c)は  $d>30 \mu\text{m}$  の状況で、 $t_s$  が極めて小さくなり、325 nm での励起で発生した電子-正孔対は安定に存在することができず、非発光な表面再結合で消失すると解釈できる。

#### 4-3 均一ひずみ分布の時の判断基準

以上、ひずみ Si 層からの PL 信号とその物理的描像を示した。これを基に、Si 層へのひずみが均一であるか、不均一であるかの判断基準を明確にすることは重要である。ひずみ印加 BJT を想定した場合、均一ひずみが必須の要件となるためである。

各シリーズに対してパターン 1 の  $d=0$  に於

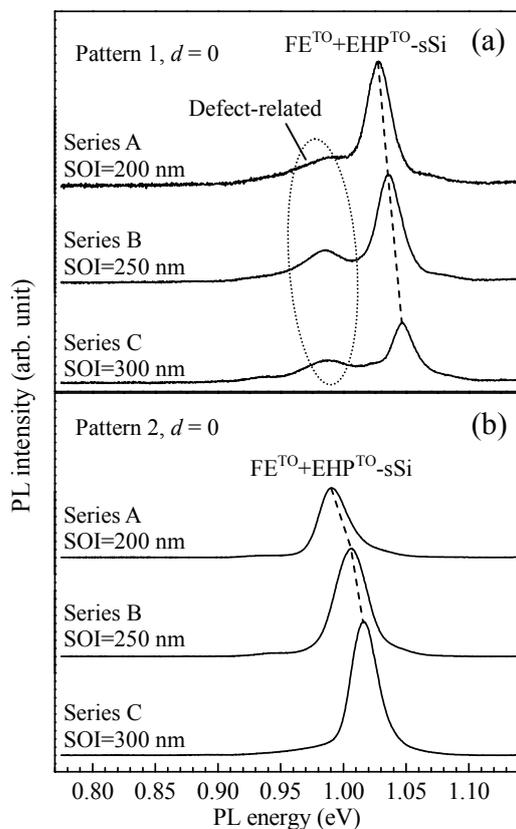


Fig. 6  $d=0$  に於ける各シリーズの PL 信号。(a) パターン 1、(b) パターン 2。

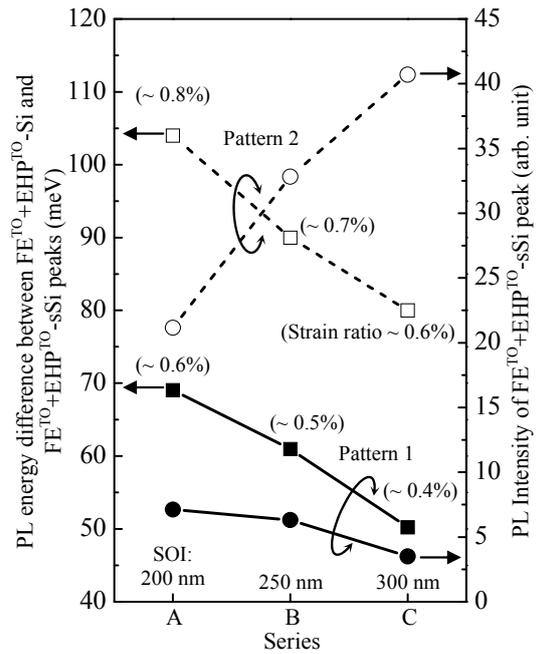


Fig. 7 各シリーズで観測されたひずみ Si-PL 信号のシフト量と PL 信号強度。

ける PL 信号を Fig. 6(a) に、パターン 2 の  $d=0$  に於ける PL 信号を Fig. 6(b) に示す。パターン 2 の信号位置はパターン 1 の信号位置と比べて低エネルギー側にシフトしている。これは、 $\langle 100 \rangle$  方向ひずみが  $\langle 110 \rangle$  方向ひずみより大きいことを意味する。無ひずみ Si-PL 信号を基準に取り、ひずみ Si-PL 信号のシフト量を各シリーズに対してプロットしたものを Fig. 7 に示す。併せて、PL 信号強度も Fig. 7 に示す。この図から均一ひずみの場合に得られる結果が明確に理解できる。

パターン 1 の場合、ひずみ量は小さい。この場合、SOI 層の厚さが薄くなるに伴い、PL 信号のシフト量は大きくなっている。同様に、信号強度も SOI 層の厚さが薄くなるに伴い、増加傾向を示す。この傾向が不均一ひずみの場合の傾向である。

パターン 2 の結果が均一ひずみの場合の傾向である。SOI 層の厚さが薄くなるに伴い、PL 信号のシフト量は大きくなるが、信号強度は低化傾向を示している。均一ひずみの場合、SOI の厚さに対して正の相関がなければならぬからである。

以上示した様に、1 つの試料 PL 評価だけではひずみが均一か、あるいは不均一か、の判断はできないが、SOI 層の膜厚を変える、あるいはストレッサの膜厚を変えた試料を作製し、PL 信号のシフト量と信号強度の依存性からひずみ分布を推定できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- 1) D. Wang, K. Yamamoto, H. Gao, H. Yang, H. Nakashima, "Defect Evaluation by Photoluminescence for Uniaxially Strained Si-On-Insulator", The Electrochemical Society Transactions, Vol. 34, pp.1117-1122 (2011). 査読有り
- 2) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, and H. Nakashima, "Measurement of strain and strain relaxation in free-standing Si membranes by convergent beam electron diffraction and finite element method", Acta Materialia, Vol. 59, pp.2882-2890(2011). 査読有り
- 3) D. Wang, H. Yang, H. Nakashima, "Microphotoluminescence evaluation of local for freestanding Si membranes with SiN deposition", Proceeding of The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2010, pp. 411-420. 査読無し
- 4) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, H. Nakashima, "Measurement of Strain in Freestanding Si/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> Membrane by Convergent Beam Electron Diffraction and Finite Element Method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.49, pp.090208-1-3(2010). 査読有り
- 5) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, H. Nakashima, "Strain distribution in freestanding Si/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> membranes studied by transmission electron microscopy", Thin Solid Films, Vol.518, pp.6787-6791(2010). 査読有り
- 6) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, H. Nakashima, "Microstructure and strain distribution in freestanding Si membrane strained by Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> deposition" Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp.6633-6637(2010). 査読有り
- 7) D. Wang, H. Yang, T. Kitamura, H. Nakashima, "325 nm-laser-excited micro-photoluminescence for strained Si film", Thin Solid Films, Vol.518, pp.2470-2473(2010). 査読有り
- 8) D. Wang, H. Yang, T. Kitamura, H. Nakashima, "Influence of freely diffusing excitons on the photoluminescence spectrum of Si thick films with depth distribution of strain" Journal of Applied Physics, Vol.117, pp.033511-1-5(2010). 査読有り

[学会発表] (計 6 件)

- 1) D. Wang, K. Yamamoto, H. Gao, H. Yang, H. Nakashima, "Defect Evaluation by

Photoluminescence for Uniaxially Strained Si and Strained Si-on-insulator", China Semiconductor Technology International Conference 2011, Shanghai, China, 2011.3.14.

2) 原田健司、山本圭介、王冬、中島寛, "SiN膜堆積によるSi基板への局所ひずみ導入と移動度評価手法の構築", 2010年応用物理学会九州支部学術講演会, 九州大学, 2010.11.27.

3) D. Wang, H. Yang, H. Nakashima, "Micro photoluminescence evaluation of local for freestanding Si membranes with SiN deposition", The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2010, 岡山大学, 2010.11.15.

4) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, H. Nakashima, "Microstructure and strain distribution in strained freestanding Si membrane", The 17<sup>th</sup> International Microscopy Congress, Brazil, 2010.9.22.

5) H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, D. Wang, H. Nakashima, "Microstructures and defects in freestanding Si membranes in Strained Freestanding Si Membranes", 第52回日本顕微鏡学会九州支部総会, 九州大学, 2010.12.24.

6) D. Wang, H. Gao, K. Ikeda, S. Hata, H. Nakashima, T. Kitamura, H. Yang, H. Nakashima, "325 nm-Laser Excited Micro-Photoluminescence for Strained Si Films", European Materials Research Society 2009 Spring Meeting, Strasbourg, France, 2009.6.11.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

[http://astec.kyushu-u.ac.jp/nakasima/naka\\_home.htm](http://astec.kyushu-u.ac.jp/nakasima/naka_home.htm)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

王冬 (WANG DONG)

研究者番号: 10419616