

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ~ 2011

課題番号：21360157

研究課題名（和文）：多重チャネリングイオン注入により配向制御した単結晶 Si ナノワイヤーの創出

研究課題名（英文）：Orientation-Aligned Si Nano-wires Formed by Multiple-Channeling Ion-Implantation

研究代表者：伊藤 隆司 (ITO TAKASHI)

東京工業大学・ソリューション研究機構・特任教授

研究者番号：20374952

研究成果の概要（和文）：コンケーブ状に整形したダブルライン CW レーザビーム照射により非晶質絶縁膜上に 3 軸配向性を大幅に改善した多結晶 Si ナノワイヤー成長させ、さらに 2 方向からの Si<sup>+</sup>イオン注入によるチャネリング効果とアニールにより優先的な配向の結晶子を増長させた結晶粒界のほとんどない Si ナノワイヤー実現の可能性を実証した。

研究成果の概要（英文）：Highly orientation-aligned poly-Si nano-wires were formed by double-line-beam CW laser crystallization. The predominant orientations of the nano-wires were further enhanced by multiple Si<sup>+</sup> ion-implantations with channeling effect and annealing, resulting in semi-single crystal Si nano-wires.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：Si ナノワイヤー、結晶配向制御、イオン注入、チャネリング

## 1. 研究開始当初の背景

ガラス基板にバルク Si デバイスに匹敵する高性能 TFT（薄膜トランジスタ）が製造できれば液晶ドライバーに限らず各種デジタル回路やメモリ等を搭載できるため、高性能なシステムパネルが安価に実現できる。従来のエキシマレーザにより再結晶化した多結晶 Si 膜はキャリア移動度が小さく、TFT しきい値のばらつきが大きい、大きなリーク電流発生等の問題がある。これらは多結晶 Si 膜の結晶方位が制御できないこと及びチャネルに不均一に結晶粒界が存在することに起因する。微細化するほど特性ばらつきは大

きくなるため、活性領域に多数の微小結晶粒を敷き詰めて使われている。そのため、SiTFT のゲート長は数  $\mu\text{m}$  と長く、性能はバルク Si FET に遥かに及ばない。特性ばらつきのない高性能 SiTFT の製造技術が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の SiTFT の特性ばらつきを低減し、性能を飛躍的に向上させる単結晶 Si 膜による TFT デバイス技術の確立である。実現を目指す高性能 TFT は各種ディスプレイの搭載回路ばかりでなく、微細化に頼らない高性能ユビキタスチップへの応用展開が可能

である。究極の目標は非晶質絶縁層上に成長させた単結晶Si TFTを積層可能とし、真の3次元LSIの基本技術を構築することによる人間の脳機能に近い3次元情報処理システムの実現である。

### 3. 研究の方法

非晶質絶縁膜上多結晶 Si 膜の優勢結晶配向を増長させるチャネリング条件を最適化し、Si<sup>+</sup>注入を異方向から複数回行う。電子ビーム露光によって形成した非晶質 Si ナノワイヤーを CW グリーンレーザ照射条件の最適化によって結晶粒の大きな多結晶を成長させる。チャネリング Si<sup>+</sup>注入とアニールによって結晶を成長させ、3次元的に配向を制御した結晶粒界のない Si ナノワイヤーを形成する。実現した Si ナノワイヤーの結晶性を解析し、SiTFT を試作・評価することによって3次元 LSI デバイスへの応用可能性を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 多重チャネリング効果の実証

シミュレーションで Si<sup>+</sup>注入によるチャネリングが効果的に起こる結晶方位を求め、その有効性を Si 単結晶で実験的に確認した。求めた最適なイオン注入条件を用い多結晶 Si 膜の2重イオン注入実験を行い XRD、TEM、EBSD などにより結晶性を評価した。ブラッグ角 28.4° の(111)面、及び 47.3° の(220)面の両方向チャネリングを狙い、Si<sup>+</sup>注入チルト角 0 度および 45 度の2段階 Si<sup>+</sup>注入を行った結果、多結晶 Si 膜の結晶配向性が大きく改善されることが Out-of-plane XRD 測定により確認できた(図1)。2段階 Si<sup>+</sup>注入を行った多結晶 Si 膜の(220)のピーク強度が1段階の場合と比べ約 5 倍強くなっており、(110)面方位をもつ大型 Si 結晶粒を優先的に成長させることができた。EBSD の解析では Si 結晶粒径は 1.5~1 μm であり、一般的な多結晶 Si より約 1 桁大きい値が得られた。さらなるチャネリングの効率化を目指し、チルト角 0 度および 60 度のダブル Si<sup>+</sup>注入により両方向とも効果的な(110)ダブルチャネリングを発生させ、イオン注入投影面内方向が(111)に規定される傾向を実験的に確認した。

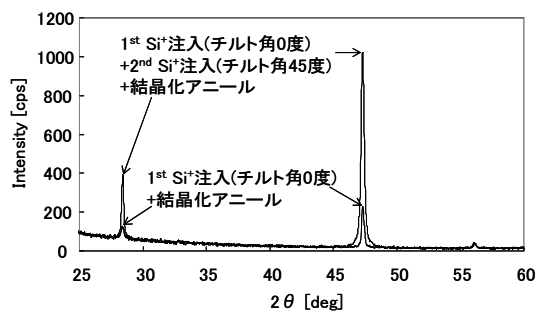


図1. 多重チャネリング Si<sup>+</sup>注入の効果

#### (2) ダブルビーム CW レーザ光学系の開発

一般的なガウシアン状レーザビームをコンケープ状に整形した平行な 2 本のライン状ビームを開発し、ダブルラインビーム照射により非晶質 Si を結晶化させた。Si 結晶粒の3軸配向性が大幅に改善でき、100 μm を超える長さをもつ線状の Si 結晶粒を得た。レーザスキャン方向結晶面が(110)、これに垂直な面が(111)、表面が(211)に優先配向した。X線回折(XRD)による Si 薄膜の各面における結晶子の割合は、レーザ出力 9.0 W、スキャン速度 0.1cm/s の条件において、それぞれ 96.5%、85.6%、83.5%と従来にない高配向性をもつ Si 多結晶膜を実現した(図2)。

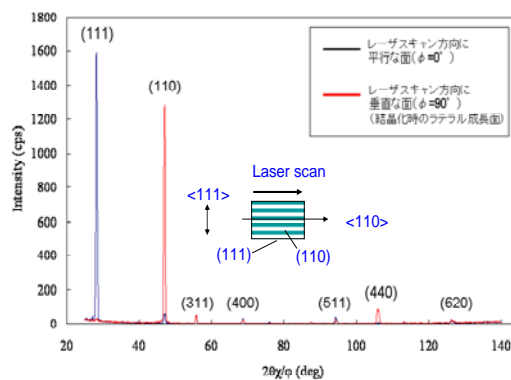


図2. In-plane XRD による配向性の測定

#### (3) 結晶性 Si ナノワイヤーの実現

電子ビーム露光により 100-800nm 幅にパターン形成した非晶質 Si 膜を用い Si ナノワイヤーを作成した。CW グリーンレーザ照射により、ナノワイヤー幅が 200nm 以下では側面が(111)に強く規定される Si 結晶粒が支配的になり、他の結晶面は低減する細線効果があることを見出した。CW グリーンレーザ結晶化によれば、スキャン方向の結晶面が(110)、これに垂直な側面が(111)、表面が(211)に優先配向することを踏まえて、±30 度の<110>チルト角方向からのダブル Si<sup>+</sup>注入が効果的なチャネリングであることを見出した。このダブルチャネリング Si<sup>+</sup>注入を施した Si ナノワイヤーにおいても端面効果は顕著であり、Si ナノワイヤーの幅の縮小とともに高次の結晶面が低減することを確認した。Out-of-plane XRD および直行する 2 方向から

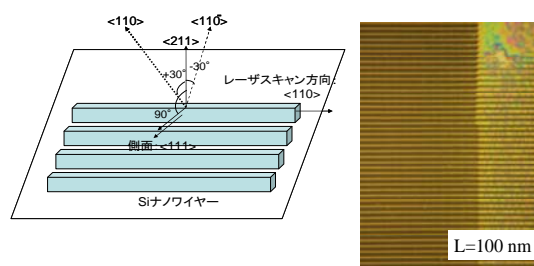


図3. 擬似単結晶 Si ナノワイヤー

らの In-plane XRD により上記の方法により結晶化した Si 膜を解析し、ダブルチャネリングにより規定される配向を持つ結晶核から固相成長する速度は(110)が他の結晶面より速いため、この面方位に向かって約 0.4%の引張り歪が発生することを明らかにした。

#### (4)擬似単結晶 SiTFT 特性

CW レーザ結晶化 Si を用いて試作した TFT は単結晶 SiFET に匹敵する約  $350\text{cm}^2/\text{Vs}$  の実効移動度を持つことが確認された。また、TFT 特性ばらつきは結晶粒の数に依存するが、キャリア走行は多結晶粒界の影響をほとんど受けず、フォノン散乱に支配されることが分かった。CW レーザ結晶化した多結晶 Si 薄膜の上下にゲートを設けたダブルゲート構造 TFT により Si 膜厚方向の歪を In-plane XRD の X 線入射角を変化させ調べた。基板近傍では 0.43%の引張り歪が存在するが、表面近傍では 0.32%に緩和されることが分かった(図 4)。このため、基板界面近傍の電子移動度は表面より 1.2 倍大きいことが明らかにされた。これらの知見は擬似単結晶 Si ナノワイヤの 3 次元 LSI への応用において重要である。

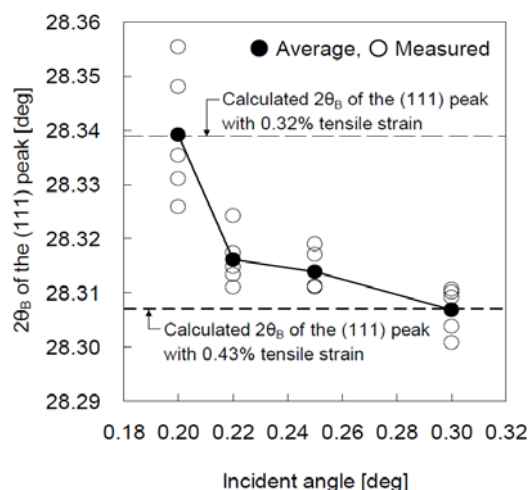


図 4. Si 膜厚方向の引張り歪の解析

#### 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 9 件)

Anri Nakajima, Shin-Ichiro Kuroki, Shuntaro Fujii, and Takashi Ito, "In-Plane Grain Orientation Alignment of Polycrystalline Si Films by Normal and Oblique-Angle Ion-Implantations", Jpn. J. Appl. Phys., 51, pp.04DH03-1-4, (2012).

S.-I.Kuroki, S.Fujii, K.Kotani, and T.Ito, "Carrier transport and its variation of laser-lateral crystallized poly-Si TFTs", Elec.

Lett., 47, 24, pp.130.34.198.5.1-2 (2011).

Shin-Ichiro Kuroki, Yuya Kawasaki, Shuntaro Fujii, Koji Kotani, and Takashi Ito, "Seed-Free Fabrication of Highly Bi-Axially Oriented Poly-Si Thin Films by Continuous-Wave Laser Crystallization with Double-Line Beams", J. Electrochem. Soc., 158, 9, pp.H924-H930, (2011).

Anri Nakajima, Takashi Kudo, Takashi Ito. "Functional gate metal-oxide semiconductor field-effect transistors using tunnel injection/ejection of trap charges enabling self-adjustable threshold voltage for ultralow power operation", Appl. Phys. Lett., Vol. 98, Issue 5, pp.053501-1-3, (2011).

Shuntaro Fujii, Shin-Ichiro Kuroki, Koji Kotani, Takashi Ito.

"Strain-Induced Back Channel Electron Mobility Enhancement in Polycrystalline Silicon Thin-Film Transistors Fabricated by Continuous-Wave Laser Lateral Crystallization", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, pp.04DH10-1 - 04DH10-5, (2011).

Shuntaro Fujii, Shin-Ichiro Kuroki, Masayuki Numata, Koji Kotani, Takashi Ito, "Roughness Reduction in Polycrystalline Silicon Thin Films Formed by Continuous-Wave Laser Lateral Crystallization with Cap SiO<sub>2</sub> Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, pp.04C129-1-4, (2010).

Takashi ITO, Xiaoli ZHU, Shin-Ichiro KUROKI, Koji KOTANI. "Highly Reliable and Drivability-Enhanced MOS Transistors with Rounded Nanograting Channels", IEICE TRANSC. ELECTRON., Vol. E93-C, No. 11, pp.1638-1644, (2010).

Shin-Ichiro Kuroki, Xiaoli Zhu, Koji Kotani, and Takashi Ito, "Enhancement of Current Drivability of Nanograting Polycrystalline Silicon Thin-Film Transistors", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.49, pp.04DJ11-1-5, (2010).

Sunichiro Fujii, Shin-Ichiro Kuroki, Masaki Numata, Koji Kotani, and Takashi Ito, "Roughness Reduction in Polycrystalline Silicon Thin Films Formed by Continuous-Wave Laser Lateral Crystallization with Cap SiO<sub>2</sub> Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48,

pp.04C129-1-4, (2009).

[学会発表](計 10 件)

黒木伸一郎, 川崎雄也, 藤井俊太郎, 小谷光司, 伊藤隆司, “レーザラテラル結晶化 Poly-Si TFT における膜中歪みの効果”, 第 8 回薄膜材料デバイス研究会資料, 2011 年 11 月 4 日, 京都.

黒木伸一郎, 川崎雄也, 藤井俊太郎, 小谷光司, 伊藤隆司, “ダブルラインビーム CLC による 3 軸配向性の高い Poly Si 薄膜形成”, 第 7 回薄膜材料デバイス研究会, 2010 年 11 月 6 日, 奈良.

Anri Nakajima, Shin-Ichiro Kuroki, Shuntaro Fujii, and Takashi Ito, “Alignment of In-plane Crystallographic Grain Orientations in Polycrystalline Si Films by Normal and Oblique-Angle Ion-Implantations”, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2011 年 9 月 28 日, 名古屋.

Shin-Ichiro Kuroki, “Crystal Growth of Highly Biaxially-Oriented Poly-Si Thin Films by W-Line Beam Continuous Wave Laser Lateral Crystallization”, The 18th International Workshop on Active Matrix Flat Panel Displays and Devices(招待講演), 2011 年 7 月 13 日, 横浜.

Shin-Ichiro Kuroki, Yuya Kawasaki, Shuntaro Fujii, Koji Kotani, and Takashi Ito. “Bi-Axially Orientation-Controlled Si Thin Films on Glass Substrates by Double-Line Beam CW Laser Annealing”, th Workshop of the Thematic Network on Silicon On Insulator Technology, Devices and Materials, 2011 年 1 月 20 日, Spain.

黒木伸一郎, 川崎雄也, 藤井俊太郎, 小谷光司, 伊藤隆司, “高性能 LTPS - TFT のための Double-Line-Beam CLC による高結晶配向 Poly-Si 薄膜形成”, 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会, 2010 年 10 月 22 日, 仙台.

Suntaro Fujii, Shin-Ichiro Kuroki, Koji Kotani, and Takashi Ito, “Strain-Induced Back Channel Electron Mobility Enhancement in Poly-Si TFTs Formed by Continuous-Wave Laser Lateral Crystallization”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010 年 9 月 30 日, 東京.

Suntaro Fujii, Shin-Ichiro Kuroki, Koji Kotani, and Takashi Ito,

“Enlargement of Crystal-Grains in Thin Silicon Films Using Continuous Wave Laser Irradiation”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010 年 9 月 31 日, 東京.

藤井俊太郎, 黒木伸一郎, 小谷光司, 伊藤隆司, “石英基板上に作製した Vth 可変ラテラル結晶化 poly-Si TFT”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2010 年 3 月 17 日, 平塚.

Shin-Ichiro Kuroki, Xiaoli Zhu, Koji Kotani, and Takashi Ito, “The Drivability Enhancement of Poly-Si TFTs by use of Nanograting Substrate”, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2009 年 10 月 7 日, 仙台.

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称: 電界効果型半導体装置

発明者: 伊藤隆司

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-246788

出願年月日: 2009 年 10 月 27 日

国内外の別: 国内

名称: 結晶性半導体薄膜の製造方法

発明者: 伊藤隆司

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-231139

出願年月日: 2009 年 10 月 5 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sse.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 隆司(ITO TAKASHI)

東京工業大学・ソリューション研究機構

特任教授

研究者番号: 20374952

(2) 研究分担者

黒木 伸一郎(KUROKI SHIN-ICHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70400281

中島 安理(NAKAJIMA ANRI)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学

研究所・准教授

研究者番号: 70304459

(3) 連携研究者

なし