

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	革新的な欠陥低減技術を用いたシリコン量子ドット超格子構造太陽電池
Title(English)	Silicon Quantum Dot Superlattice Solar Cells Using Advanced Defect Reduction Techniques
著者(和文)	山田繁
Author(English)	Shigeru Yamada
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9458号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別: 審査員:小長井 誠,岩本 光正,山田 明,中川 茂樹,宮島 晋介,田中 誠
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9458号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:., Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

博士論文 論文要約

**Silicon Quantum Dot Superlattice Solar Cells
Using Advanced Defect Reduction Techniques**

February, 2014

Directed by Professor Makoto Konagai

Presented by Shigeru Yamada

Department of Physical Electronics
Graduated School of Science and Engineering
Tokyo Institute of Technology

図 1 に本論文の構成を示す。本論文は、英文 7 章より構成されている。

第 1 章「Overview and Objectives of This Research」では、本研究の背景である地球温暖化問題やエネルギー問題について紹介し、太陽電池の重要性について述べている。また、太陽電池の現状について、その概要を紹介し、更なる普及のために現在求められている技術を列挙している。そして、低コスト化と高効率化を同時に達成し得る第三世代太陽電池について述べ、その一つとして有望であるシリコン量子ドット超格子構造(Si-QDSL)を用いた太陽電池の特性改善の必要性を述べている。

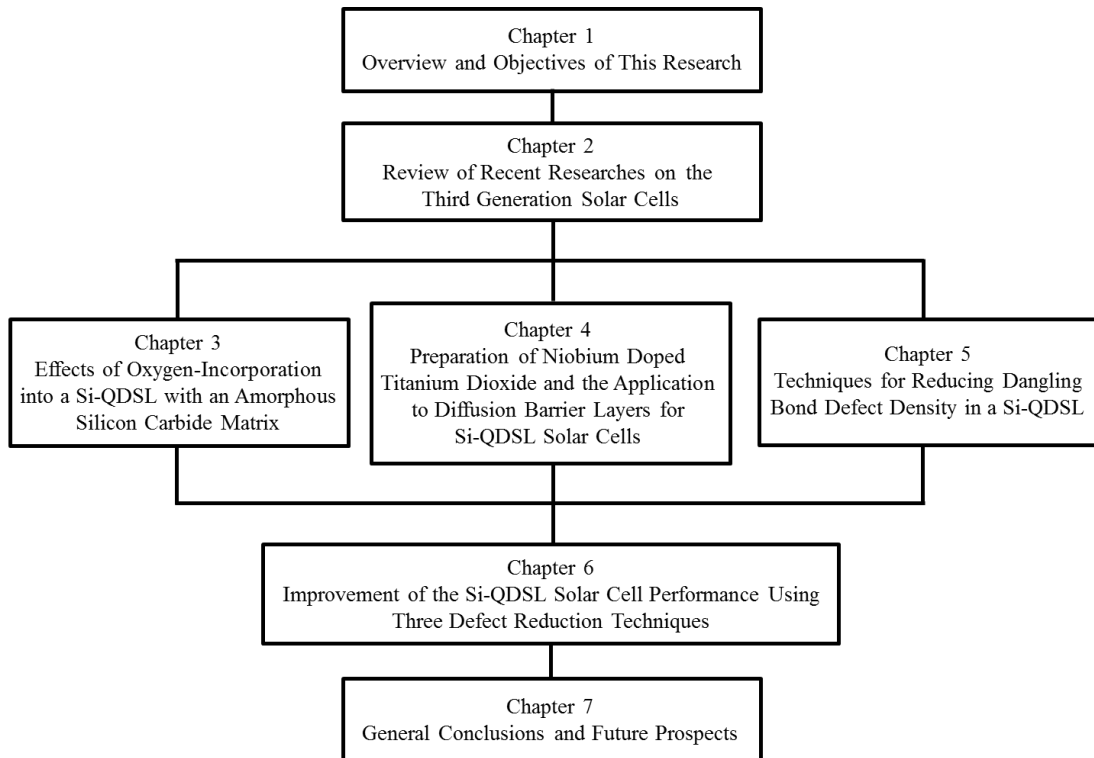


図 1 本論文の構成

第 2 章「Review of Recent Researches on the Third Generation Solar Cells」

では、はじめに太陽電池の損失と理論限界効率について述べ、第三世代太陽電池の可能性について述べている。また、第三世代太陽電池の最近の研究動向について、その概要を紹介している。特に本研究で扱う Si-QDSL について重点的に述べ、本研究の世界の研究の中での位置づけについて述べている。また、量子効果を考慮することが可能なボーム量子ポテンシャル(BQP)法を用いた太陽電池特性の解析を行い、量子ドット粒径を小さくすることによるバンドギャップの増大とともに、太陽電池の開放電圧が上昇するという特性を明らかにしている。また、Si-QDSL 太陽電池の量子サイズ効果の可能性についても述べている。

第 3 章「Effects of Oxygen-Incorporation into a Si-QDSL with an Amorphous Silicon Carbide Matrix」では、母材であるアモルファス炭化シリコン(a-SiC) への酸素添加により、900 °C という高温アニール時におけるリークパスの形成が抑制されることについて述べている。そして、適切な量の酸素の導入によってシリコン量子ドットの形成を抑制することなく、リークパスの形成が抑制されることを示している。さらに、シリコン量子ドットの形成によってフォトンエネルギー2.0 eV 以下において吸収係数の増大が確認されたことについても述べている。この吸収はシリコン量子ドットの結晶化率の傾向と一致しており、また、その吸収端が 1.4 eV から 1.5 eV 付近にあるため、シリコン量子ドットによる吸収の寄与であることを述べている。また、酸素添加した a-SiC を発電層として用いた Si-QDSL 太陽電池を作製し、逆方向飽和電流が大きく低減されることを明らかにし、さらに、518 mV という開放電圧を達成したことについて述べている。

第 4 章「Preparation of Niobium Doped Titanium Dioxide and the Application to Diffusion Barrier Layers for Si-QDSL Solar Cells」では、ニオブドープ酸化チタン($\text{TiO}_2\text{:Nb}$)をドーピング層と Si-QDSL 層の間に挿入することにより、ドーパントの Si-QDSL 層への拡散が抑制されることを世界で初めて見出したことについて述べている。薄く堆積した $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ が $900\text{ }^\circ\text{C}$ のアニール処理によって n 型の導電性をもつことについても述べている。そして、 10 nm の $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ を挿入することによって $900\text{ }^\circ\text{C}$ のアニール処理後の Si-QDSL 層中のリン原子の濃度が $4 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ から $4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 以下にまで低減されることを確認したこと (図 2)、さらに、 $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ に含まれる Ti 原子、および Nb 原子が Si-QDSL 層中にほとんど拡散していかないことを明らかにし、 $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ が Si-QDSL 太陽電池のドーパント拡散防止層として有望であることを述べている。

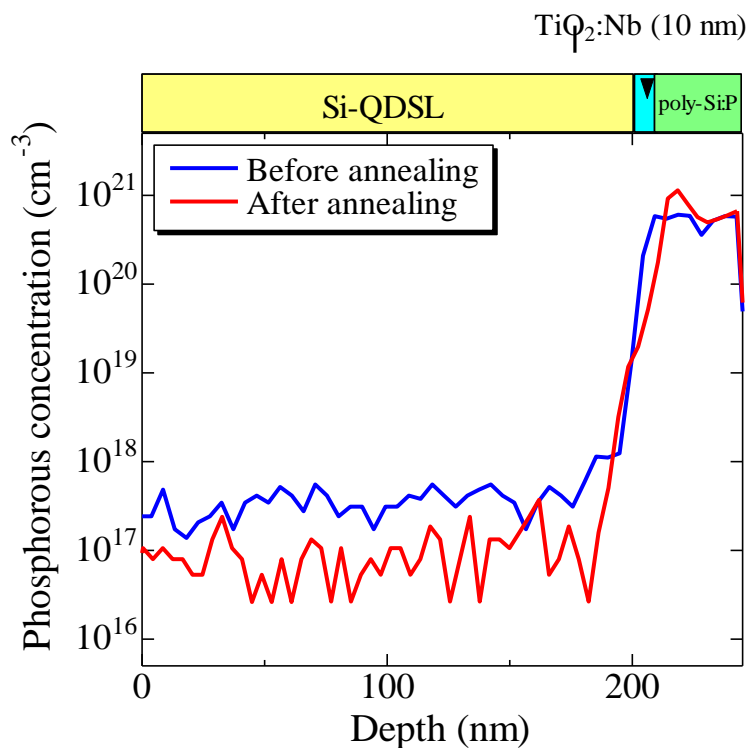


図 2 $\text{TiO}_2\text{:Nb}$ のドーパント拡散防止効果[1]

第5章「Techniques for Reducing Dangling Bond Defects in a Si-QDSL」では、水素プラズマ処理によるダングリングボンド欠陥の低減技術について述べている。Si-QDSL 中における水素の拡散定数の処理温度依存性から、この水素拡散は格子間の拡散が支配的であり、さらに、a-SiC バリア層によって水素拡散がほとんど妨げられないことについて述べている。また、Si-QDSL 中におけるダングリングボンド欠陥の処理温度依存性から、シリコンのダングリングボンド欠陥密度が 300 °C 以上から、炭素のダングリングボンド欠陥密度が 400 °C 以上から増大し、その結果、400 °C の処理で欠陥濃度を $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ まで低減できることを明らかにしている (図 3)。

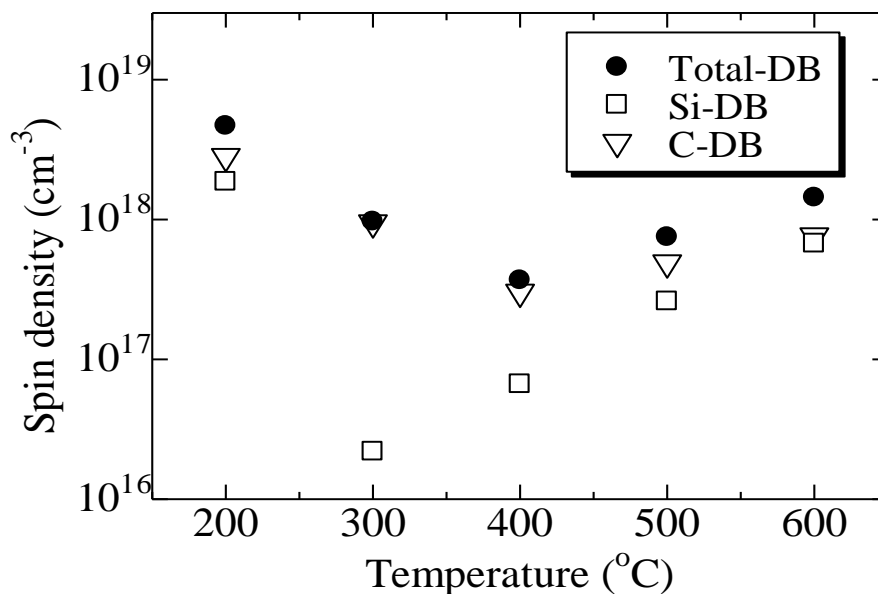


図 3 Si-QDSL 中の欠陥密度の水素プラズマ処理温度依存性[2]

第6章「Improvement of Si-QDSL Solar Cell Performance Using Three Defect Reduction Techniques」では、第3章から第5章で述べた3つの欠陥低減技術を組み合わせることにより、Si-QDSL 太陽電池の大きな特性の改善に成功したことについて述べている。開放電圧 529 mV、短絡電流 1.60 mA/cm²、曲線因子 0.46、変換効率 0.39 %という Si-QDSL 太陽電池を得ることに成功している (図 4)。この変換効率は現在、絶縁性基板上に作製した Si-QDSL 太陽電池の中では世界最高効率となっている。また、集光下においてこの太陽電池の電気的特性を測定し、集光倍率 19.7 sun のとき 649 mV という高い開放電圧を実現したことについて述べ、Si-QDSL 太陽電池の更なる改善の可能性を示したことについて述べている。

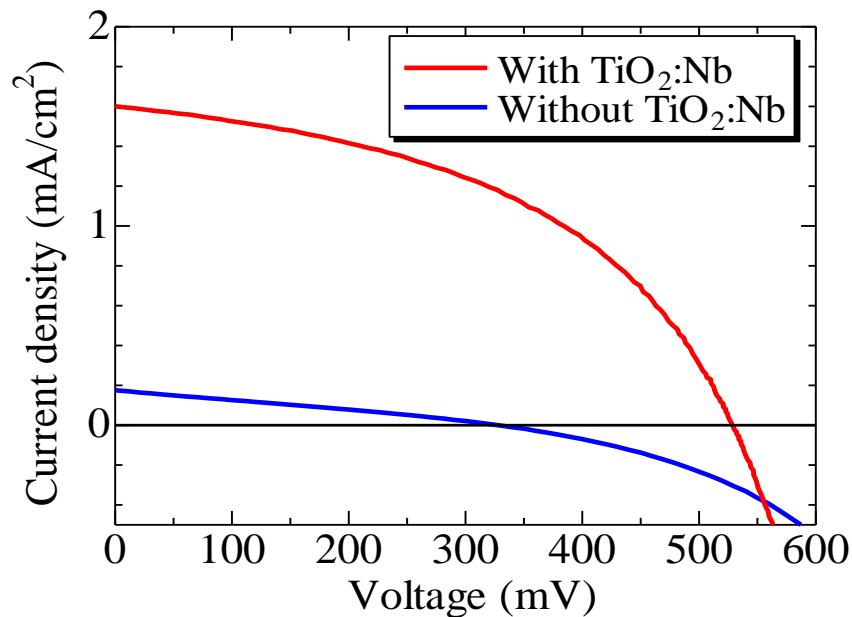


図 4 Si-QDSL 太陽電池の電気的特性の改善[3]

第7章「General Conclusions and Future Prospects」では、本研究で達成された成果を要約し、今後の更なる改善のために考えられる技術について述べている。

以上を要約すると、本論文は a-SiC への酸素添加、TiO₂:Nb ドーパント拡散防止層の挿入、そして、水素プラズマ処理技術が Si-QDSL 太陽電池の電気的特性改善に非常に有効な手法であることを示し、また、Si-QDSL 太陽電池が第三世代太陽電池の候補としての大きな可能性を有するという非常に重要な成果を述べたものである。

References

- [1] Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, and Makoto Konagai, “High thermostable conductive niobium doped titanium oxide for the application to a diffusion barrier layer of silicon quantum dot superlattice solar cell structure”, *Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 19-24 June 2011, Seattle, WA, USA*, p 2113.
- [2] Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, and Makoto Konagai, “Investigation of hydrogen plasma treatment for reducing defects in silicon quantum dot superlattice structure with amorphous silicon carbide matrix”, *Nanoscale Res. Lett.* **9** (2014) 72.
- [3] Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, and Makoto Konagai, “Improvement of Electrical Properties of Silicon Quantum Dots Superlattice Solar Cells with Diffusion Barrier Layers”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** (2013) 04CR02.