

■原 著■ 2021 年度神奈川大学総合理学研究所共同研究助成論文

## IV 族半導体量子ドットの基盤研究

水野智久<sup>1,2</sup> 青木 孝<sup>1</sup>

Experimental Study of Group-IV Semiconductor Quantum Dots

Tomohisa Mizuno<sup>1,2</sup> and Takashi Aoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematics and Physics, Faculty of Science, Kanagawa University, Hiratsuka City, Kanagawa 259-1293, Japan

<sup>2</sup> To whom correspondence should be addressed, E-mail: mizuno@kanagawa-u.ac.jp

**Abstract:** We experimentally studied three types of group-IV-semiconductor quantum-dots (IV-QDs) of Si<sup>-</sup>, SiC<sup>-</sup>, and C-QDs in a thermal SiO<sub>2</sub> layer that were fabricated using a very simple hot-ion implantation technique for Si<sup>+</sup>, double Si<sup>+</sup>/C<sup>+</sup>, and C<sup>+</sup> into the SiO<sub>2</sub> layer, respectively, to realize a different wavelength photoluminescence (PL) emission from near-IR to near-UV ranges. TEM analyses newly confirmed both Si<sup>-</sup> and C-QDs with a diameter of approximately 2-4 nm in addition to SiC-QDs in SiO<sub>2</sub>. We successfully demonstrated very strong PL emission from three IV-QDs, and the peak photon energies ( $E_{PH}$ ) (peak PL-wavelength) of Si<sup>-</sup>, SiC<sup>-</sup>, C-QDs were approximately 1.56 eV (800 nm), 2.5 eV (500 nm), and 3.3 eV (380 nm), respectively. IV-QDs showed that the PL properties markedly depend on the hot-ion doses of Si and C atoms and post N<sub>2</sub> annealing processes. Consequently, it is straightforward to design peak PL wavelengths by controlling the ion doses of Si<sup>+</sup> and C<sup>+</sup> implanted into the SiO<sub>2</sub> layer.

**Keywords:** IV-group-semiconductor, quantum-dot, Si, SiC, C, photoluminescence, Si-based photonics, quantum confinement, hot-ion implantation, oxide

### 序論

2次元 Si (2D-Si) 構造は、極微細 SOI (silicon-on-insulator)、FinFET<sup>1)</sup> などの CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 素子、及び Si 光子素子<sup>2)</sup> に広く応用されている。SOI 素子においては、Si 膜厚  $d_s = L_{EFF}/3$  ( $L_{EFF}$  は素子のチャネル長) に従って薄膜化するだけで短チャネル効果を抑制でき、その結果、SOI 素子は将来素子としても非常に有望と言われている<sup>1)</sup>。しかし、 $d_s$  の薄膜化を続けると Si 格子定数程度まで薄膜化が進み、SOI は 2D-Si 構造となり、現在の 3D-Si とは物性が異なってくる<sup>3-10)</sup>。従って、将来素子の特性を予測するには、2D-Si 構造の物性を解明する必要がある。また、高速 CMOS 素子実現には、(110) 面 CMOS や歪み Si 構造などの研究も進められている<sup>1)</sup>。

2D-Si 層においては、電子の量子力学的閉じ込め効果により、電子移動度劣化の議論がされている<sup>3)</sup>。更に、2D-Si を含めた低次元 Si においては、電子の量子力学的閉じ込め効果によりバンド構造が変調され、バンドギャップ  $E_G$  の増大も報告されている<sup>4)</sup>。

一方、低次元 Si 構造 (Si ナノワイヤー、Si ドットなど) においては、量子的な閉じ込め効果による第一次近似以外のフォノンも活性化される<sup>5)</sup>。これがフォノン閉じ込め効果である。その結果、半導体素子におけるキャリアのフォノン散乱確率が増えキャリア速度の劣化も予想されている<sup>5)</sup>。

以上のように、2D-Si を含めた低次元 Si 研究は、微細素子実現のための実用的な目的のみならず、種々の量子的閉じ込め効果の実証という物性研究にとっても非常に重要である。我々は、2D 化による間接遷移型から直接遷移型への変調効果による PL (Photoluminescence) 発光を利用して、2D-Si における量子閉じ込め効果を Raman 分光及び PL 法により、大きなフォノン閉じ込め効果及び EG 増大効果を実験的に実証してきた<sup>6-14)</sup>。

しかし、この PL 発光を利用した可視域から近紫外までの発光素子を目指すには、更なる半導体の  $E_G$  の増大が必須である。そこで、単結晶 Si (c-Si) からアモルファス Si (a-Si) までの基板に C ホットイ

オン注入法を用いて SiC ドットを作製し、その大きな PL 発光を実証してきた<sup>15-22)</sup>。しかし、 $E_G$  の小さい Si 層 ( $E_G \approx 1.1$  eV) 中の大きな  $E_G$  を持つ SiC ドット ( $E_G \geq 2.4$  eV) は量子ドットではないため、励起電子の量子閉じ込め効果による寿命増大が期待できず PL 発光効率低下の原因となる。従って、 $E_G$  の大きな Si 酸化膜 ( $E_G \approx 9$  eV) へのダブルホット  $\text{Si}^+/\text{C}^+$  により SiC 量子ドット (QD) を実現し、その励起電子の閉じ込め効果による PL 発光効率の増大化を実現してきた<sup>23-24)</sup>。QD からの広帯域の PL 発光を実現するには、SiC-QD 以外の  $E_G$  を持つ QD の形成が必要となる。

本報告においては、Si 酸化膜への各種ホットイオン注入を行い、Si-QD から C-QD までの IV 族半導体 QD (IV-QD) 作成し、高帯域 PL 発光を実現したので報告する<sup>25-26)</sup>。

## 材料と方法

### IV-QD 形成法

本研究において、IV 族半導体の  $E_G$  より大きい Si 酸化膜中での IV-QD 形成を目指した。IV-QD での PL 発光時に、励起電子の大きな量子閉じ込め効果により、励起電子の拡散を抑制しその寿命の増大化が起これ、PL 発光効率の改善が期待できる。

図 1 と表 1 に三種の IV-QD (Si-QD、SiC-QD、C-QD) 作製法とそのプロセス条件を示す。Si 基板に形成した熱酸化膜層 (OX) (約 150 nm) (図 1(a)) へのホットイオン注入法 (図 1(b)、表 1) により、IV-QD の形成を行った<sup>25)</sup>。その後、図 1(c) に示すように、IV-QD 形成促進とイオン注入後の結晶性回復のため、 $\text{N}_2$  アニールを行った (アニール温度  $T_N = 1000^\circ\text{C}$ )。ホットイオン注入温度  $T$ 、及び Si ドーズ量  $D_S$ 、C ドーズ量  $D_C$  は表 1 に示す。

PL 特性は波長 325 nm レーザー光を用いて室温で測定した。レーザービーム径は  $1 \mu\text{m}$ 、レーザーパワーは約 0.6 mW である。更に、広帯域 PL 発光強度は、標準光により補正を行った。

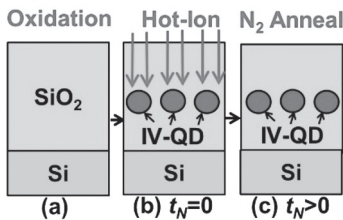


図 1. OX へのホットイオン注入法を用いた IV-QD の製造方法。

表 1. IV-QD のプロセス条件

QD-Type	Hot-ions	$D_S$ ( $\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ )	$D_C$ ( $\times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )
Si	$\text{Si}^+$	6–10		600
SiC	$\text{Si}^+/\text{C}^+$	4–8	4	200–900
C	$\text{C}^+$		4–10	400–600

## 結果及び討論

### IV-QD の構造解析

最初に、XPS (X 線光電子分光) 解析による酸化膜中の Si 及び C 濃度深さ分布を図 2 に示す。予想通り、Si 及び C 濃度は酸化膜中央付近にピークを持ち、本

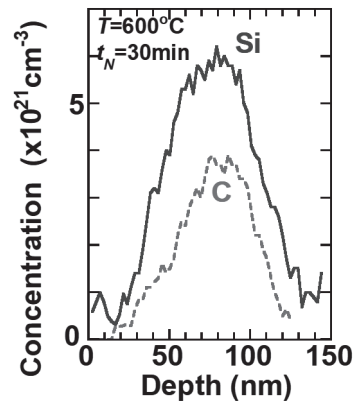


図 2. XPS 分析による酸化膜中 Si (実線), 及び C 濃度 (破線) の深さ分布. なお  $T = 600^\circ\text{C}$ ,  $T_N = 1000^\circ\text{C}$ ,  $D_S = 6 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $D_C = 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $t_N = 30$  分.

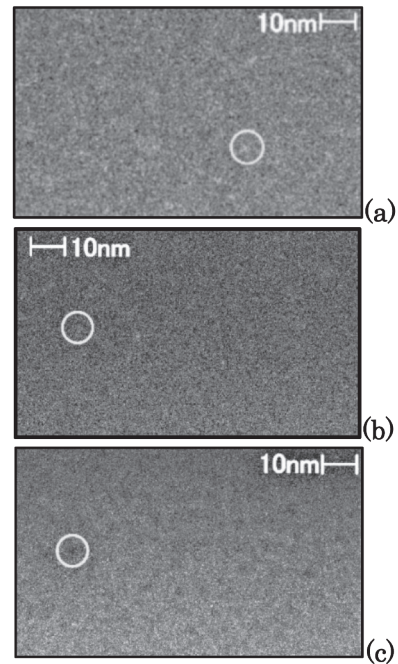


図 3. HAADF-STEM による OX 中 (a)Si-QD ( $D_S = 6 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $T = 400^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 60$  分) (b) SiC-QD ( $T = 400^\circ\text{C}$ ,  $D_S = 6 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $D_C = 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $t_N = 60$  分), 及び (c) C-QD ( $T = 400^\circ\text{C}$ ,  $D_C = 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ,  $t_N = 30$  分) 断面図. なお,  $t_N = 30$  分.

実験においてはそれぞれ約  $6\cdot 10 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  及び  $4\cdot 10 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  の範囲であった。また、SiC-QD においては、C1s スペクトルより、C 原子の約 80 % は Si 原子と結合し、SiC 形成を確認できた。C 原子の残りの 20 % は酸化膜中で析出していることが判明した。

次に、図 3(a)-3(c) は、それぞれ Si-QD、SiC-QD 及び C-QD の HAADF-STEM (高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡) 観察結果である。図 3(a)-3 (b) 中の多数ある白色のドット及び図 3(c) の黒色ドットがそれぞれの QD である。

図 3 の結果から IV-QD の長径の平均値  $\Phi$  及び密度  $N$  を図 4(a) に示す。  $\Phi$  及び  $N$  のエラーバーは、それぞれ、  $\Phi$  の測定標準偏差及び観測視野中のドット個数  $n$  の統計的バラツキ  $N/\sqrt{n}$  より求めた<sup>25)</sup>。  $\Phi$  は約 2-4 nm、  $N$  は約  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  であり、IV-QD の種類に依存している。  $\Phi$  は Si-QD が一番小さく、反対に  $N$  は Si-QD は一番大きいのがわかる。ここで、PL 強度  $I_{PL}$  は式(1)のように、視野中の IV-QD トータル面積比  $S$  に比例する<sup>25)</sup>。  $\eta$  及び  $I_0$  は、それぞれ PL 量子効率及び入射光強度である。

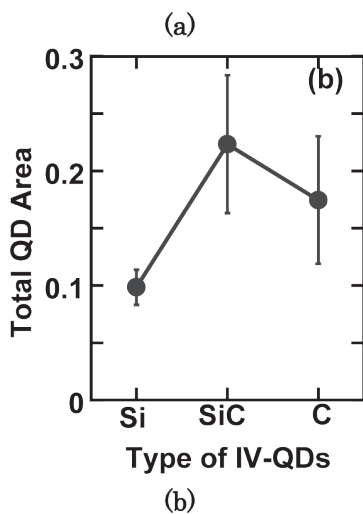
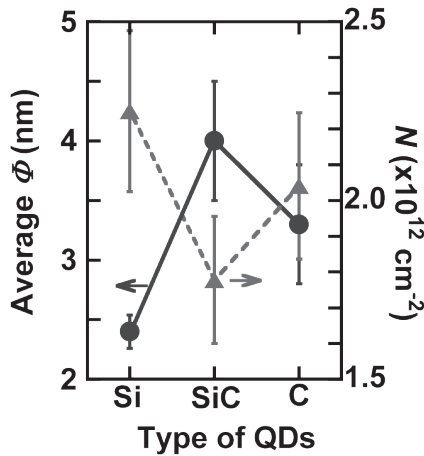


図 4. (a)IV-QD における平均  $\Phi$  (丸印) 及び  $N$  (四角印). (b)IV-QD でのトータル面積. プロセス条件は図 3 に同じ. 誤差棒はそれぞれの標準偏差である.

$$I_{PL} = \eta I_0 S, \quad (1)$$

図 4(a) のデータを使用し  $S (\equiv N\pi(\Phi/2)^2)$  を求め、その結果を図 4(b) に示す。  $S$  は  $0.1 \leq S < 0.25$  であることがわかり、しかも IV-QD の種類に依存している。

図 5 は CSTEM (球面収差補正走査透過型電子顕微鏡) 観察による IV-QD 格子像である。全ての IV-QD において格子像が観測され、数 nm の半導体ドットが形成されているのが確認された。しかも、格子パターンにより、SiC-QD では立方晶と六方晶のポリタイプを確認し、C-QD の格子スペース値 0.36 nm からグラファイト構造の可能性もわかってきている。

### IV-QD からの PL 発光

次に、IV-QD からの PL 発光について議論する。

図 6 は、三種の IV-QD の PL スペクトルである。全ての IV-QD からの近赤外から近紫外までの高帯域 PL 発光を実現することができた。しかも、Si、SiC、及び C-QD のピーク  $I_{PL}$  ( $I_{MAX}$ ) での光子エネルギー値  $E_{PH}$  は、それぞれ約 1.5、2.4、及び 3.3

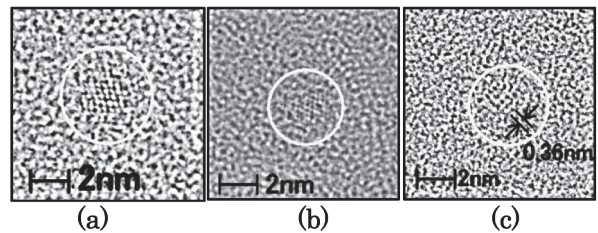


図 5. CSTEM による IV-QD の格子像. (a) Si-QD、(b) SiC-QD、(c) C-QD. プロセス条件は図 3 に同じ.

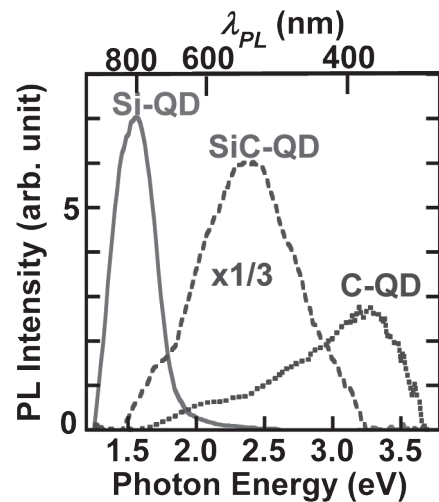


図 6. 三種の IV-QD の PL スペクトル比較. Si-QD (実線:  $t_N = 90$  分), SiC-QD (破線:  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 30$  分), C-QD (点線:  $T = 600^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 30$  分). イオンドーズは図 3 に同じ.

eVとなり、各半導体の $E_G$ により制御されている。Si-QDでは、電子の量子閉じ込め効果による $E_G \propto \Phi^{-2}$ に従いQDの微細化とともに $E_G$ は増大し、 $\Phi \approx 3$  nmで $E_G \approx 1.5$  eVと報告されている結果<sup>27)</sup>と本研究での $\Phi \approx 2.5$  nmで $E_{PH} \approx 1.5$  eVはほぼ一致し、量子効果による $E_G$ は増大効果を確認した。一方、SiC-QDにおいては、量子効果による $E_G$ の増大は $\Phi < 3$  nmの条件のため<sup>28)</sup>、本SiC-QDの $\Phi \approx 4$  nmでは $E_G$ の増大はないと考えられる。

更に、図7はIV-QDのPLスペクトルの $N_2$ アニール時間 $t_N$ 依存性である。 $I_{PL}$ は $N_2$ アニール後、全

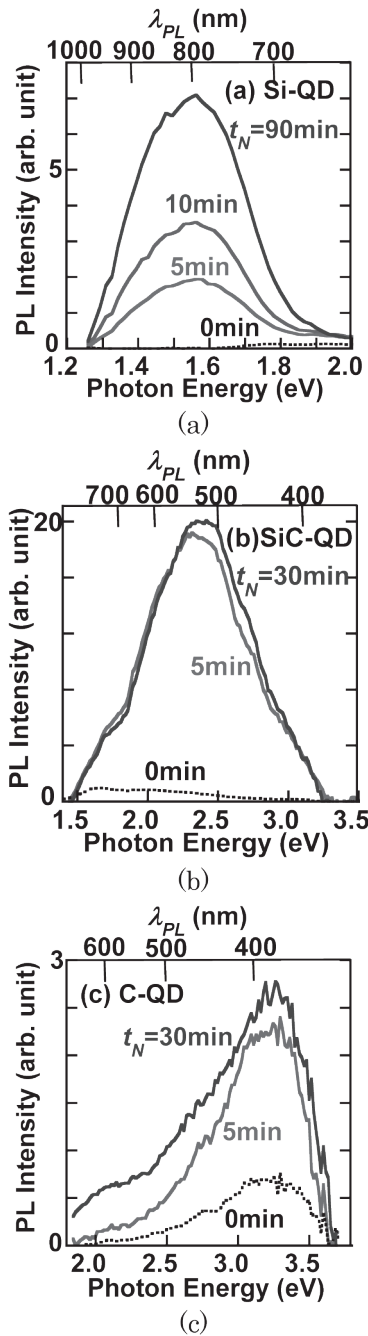


図7. IV-QDにおけるPLスペクトルの $t_N$ 依存性. (a) Si-QD, (b) SiC-QD, (c) C-QD. プロセス条件は図6に同じ.

てのIV-QDにおいて飛躍的に増大しているのがわかる。

更に、図8(a)及び8(b)は、それぞれ $I_{MAX}$ 及び $E_{PH}$ の $t_N$ 依存性である。どのIV-QDも $t_N = 5$ 分で飛躍的に $I_{MAX}$ は増大し数十倍に達する。これは、QDの結晶性の向上によると思われる。一方、 $E_{PH}$ の $t_N$ 依

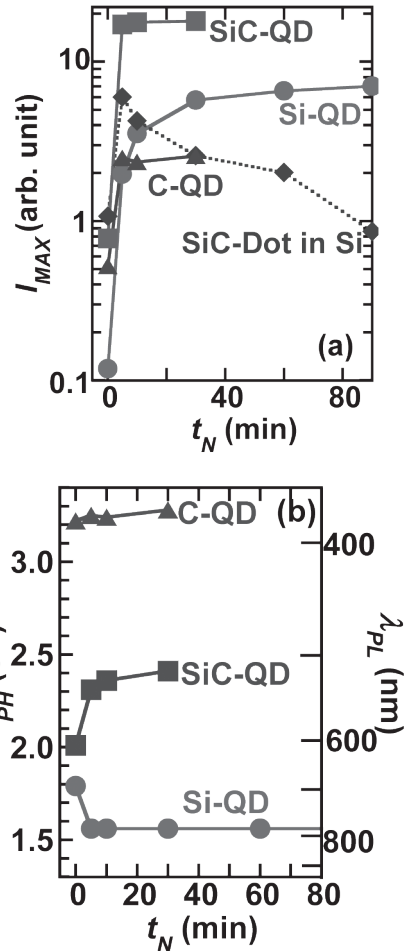


図8. (a)  $I_{MAX}$ , 及び(b)  $E_{PH}$ の $t_N$ 依存性. Si-QD (丸), SiC-QD (四角), (c) C-QD (三角). プロセス条件は図6に同じ.

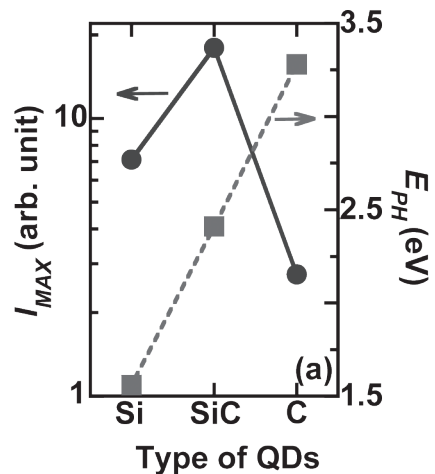


図9.  $I_{MAX}$  (●), 及び $E_{PH}$  (■)のIV-QD構造依存性.



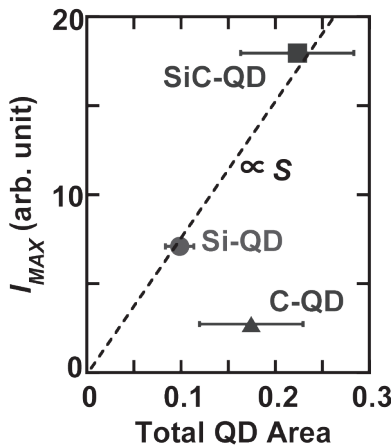
存性はIV-QD種類により異なる。Si-QDでは、N<sub>2</sub>アニール後、急激に低下しており、高温N<sub>2</sub>アニールによるΦの増加に起因していると思われる。また、SiC-QDではN<sub>2</sub>アニール前後でE<sub>PH</sub>は約2 eVから2.4 eVに増大している。これは、N<sub>2</sub>アニール後、Si-Cの混晶状態が3C-SiC形成に変化したためと思われる<sup>26)</sup>。

図9でのI<sub>MAX</sub>、及びE<sub>PH</sub>のIV-QD構造依存性を示すように、PL特性は大きく構造に依存している。I<sub>MAX</sub>はSiC-QDが一番大きく、E<sub>PH</sub>は各半導体のE<sub>G</sub>に依存して大きく変わることがわかる。

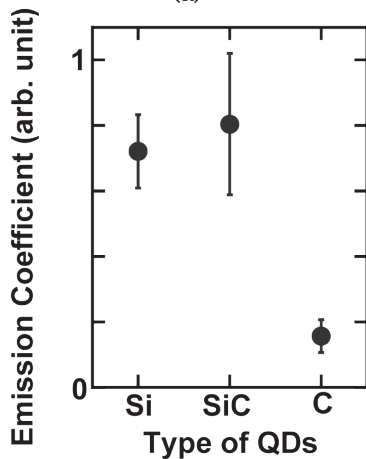
#### IV-QDのPL発光効率

式(1)に従って、IV-QDの発光効率ηの構造依存性を議論する。

図10(a)はI<sub>MAX</sub>のS(図4(b))依存性である。Si-QDとSiC-QDにおいては、式(1)に示すように、I<sub>MAX</sub>は同じS依存性(破線)を示している。その結果、Si-QDとSiC-QDでのI<sub>MAX</sub>の違いは各Sの違い



(a)



(b)

図10. (a) I<sub>MAX</sub>のS(式(1))依存性。(b) IV-QDにおけるη. プロセス条件は図6に同じ。

によって説明でき、従って、ηは両構造とも同じと結論できる。一方、C-QDのI<sub>MAX</sub>は破線から大きくずれ、ηが小さいことを示している。図10(b)に式(1)より求めた各IV-QDのηを示す。C-QDのηは他の2構造の約1/4しかないことがわかった。この原因の詳細はわかっていないが、C-QDの結晶性に問題がある可能性がある。

#### 結論

Si酸化膜中への各種ホットイオン注入法を用いてIV-QDの形成に成功し、大きなPL発光も実現した。

Si-QD、SiC-QD、及びC-QDは、それぞれ、ホットSi、Si/C、およびCイオン注入により作製し、STEM観察によりΦ≈2-4 nm、N≈2×10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>であることがわかった。さらにCSTEMにより、QDの格子像も観察でき、結晶性も確認できた。

IV-QDからのPL発光は近赤外から近紫外までの高帯域をカバーできた。各QD半導体により大きくピークPL波長は変化し、Si-QD、SiC-QD、及びC-QDのピーク波長は、それぞれ、約830 nm(近赤外)、520 nm(緑色)、及び380 nm(近紫外)であった。

Φ≈2.5 nmのSi-QDの場合、QD内の電子の量子閉じ込め効果によるE<sub>G</sub>増大効果がPL発光より確認できた。

また、Si-QDとSiC-QDのPL発光効率はほぼ同じであったが、C-QDのηは、前者の約1/4であった。

今後、IV-QDの発光素子への応用には、その結晶性の向上、Φの微細化、Nの増大化が必要となる。

#### 謝辞

本研究の一部は、総合理学研究所共同研究助成金(RIIS202101)の援助を受けた。

#### 文献

- 1) Nazarov A, Colinge JP, Balestra F, Raskin JP, Gamiz F and Lysenko VS (2011) *Semiconductor-on-insulator materials for nanoelectronics applications*. Springer, Berlin.
- 2) Saito S, Sakuma N, Suwa Y, Arimoto H, Hisamoto D, Uchiyama H, Yamamoto J, Sakamizu T, Mine T, Kimura S, Sugawara T, Aoki M and Onai T (2008) Observation of optical gain in ultra-thin silicon resonant cavity light-emitting diode. In: *IEDM Tech. Dig.*, Paper 19.5., pp.1-4.
- 3) Uchida K, Koga J and Takagi S (2007) Experimental study on electron mobility in ultrathin-body silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. In: *J. Appl. Phys.* **102**: 074510 pp.1-8.
- 4) Agrawal BK and Agrawal S (2000) First-principles study of one-dimensional quantum-confined H-passivated ultrathin Si films. In: *Appl. Phys. Lett.* **77**: pp. 3039-3041.

- 5) Kumar V (2008) *Nanosilicon*. elsevier, amsterdam.
- 6) Mizuno T, Tobe K, Maruyama Y and Sameshima T (2012) Experimental study of silicon monolayers for future extremely thin silicon-on-insulator devices: phonon/band structures modulation due to quantum confinement effects. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**: 02BC03 pp.1-8.
- 7) Mizuno T, Aoki T, Nagata Y, Nakahara Y and Sameshima T (2013) Experimental study on surface-orientation/strain dependence of phonon confinement effects and band structure modulation in two-dimensional Si layers. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**: 04CC13 pp.1-8.
- 8) 水野智久, 青木 孝, 鮫島俊之 (2013) 低次元シリコン半導体構造の研究. *神奈川大学理学誌* **24**: 17-24.
- 9) 水野智久, 青木 孝, 鮫島俊之 (2014) 二次元シリコン半導体基板の物性研究, *神奈川大学理学誌* **25**: 23-30.
- 10) 水野智久, 前田辰郎, 多田哲也, 青木 孝 (2015) 二次元半導体デバイスの研究, *神奈川大学理学誌* **26**: 33-39.
- 11) Mizuno T, Nagata Y, Suzuki Y, Nakahara Y, Aoki T and Sameshima T (2014) Crystal direction dependence of quantum confinement effects of two-dimensional Si layers fabricated on silicon-on-quartz substrates: modulation of phonon spectra and energy-band structures. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**: 04EC08 pp.1-6.
- 12) Mizuno T, Nakahara Y, Nagata Y, Suzuki Y, Aoki T and Sameshima T (2014) Quantum confinement effects in doped two-dimensional Si layers: novel device design for two-dimensional pn-junction structures, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**: 04EC09 pp.1-7.
- 13) Mizuno T, Nagamine Y, Suzuki Y, Nakahara Y, Nagata Y, Aoki T and Sameshima T (2015) Impurity doping effects on impurity band structure modulation in two dimensional n+ and p+ Si layers for future CMOS, In: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**: 04DC05 pp.1-6.
- 14) Mizuno T, Suzuki Y, Nagamine Y, Nakahara Y, Nagata Y, Aoki T and Maeda T (2015) Surface-oxide stress induced band-structure modulation in two-dimensional Si layers, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**: 04DC02 pp.1-6.
- 15) Mizuno T, Nagamine Y, Omata Y, Suzuki Y, Urayama W, Aoki T and Sameshima T (2016) C-atom-induced bandgap modulation in two-dimensional (100) silicon carbon alloys, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**: 04EB02 pp.1-8.
- 16) 水野智久, 前田辰郎, 青木 孝, 鮫島俊之 (2016) 可視域シリコン発光素子の開発, *神奈川大学理学誌* **27**: 15-21.
- 17) Mizuno T, Omata Y, Nagamine Y, Aoki T and Sameshima T (2017) Material structure of two-/three-dimensional Si-C layers fabricated by hot-C<sup>+</sup>-ion implantation into Si-on-insulator substrate, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**: 04CB03 pp.1-8.
- 18) Mizuno T, Nakada S, Yamamoto M, Irie S, Omata Y, Aoki T and Sameshima T (2017) SiC nano-dots in bulk-Si substrate fabricated by Hot-C<sup>+</sup>-Ion implantation technique, In: *Ext. Abstr. Solid State Devices and Materials*, pp.597-598.
- 19) Mizuno T, Omata Y, Kanazawa R, Iguchi Y, Nakada S, Aoki T and Sasaki T (2018) Nano-SiC region formation in (100)Si-on-insulator substrate: optimization of hot-C<sup>+</sup>-ion implantation process to improve photoluminescence intensity, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**: 04FB03 pp.1-9.
- 20) Mizuno T, Kanazawa R, Aoki T and Sameshima T (2019) SiC nano-dot formation in amorphous-Si and poly-Si substrates using hot-C<sup>+</sup>-ion implantation technique, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**: SBBJ01 pp.1-10.
- 21) Mizuno T, Yamamoto M, Nakada S, Irie S, Aoki T and Sameshima T (2019) SiC nano-dot formation in bulk-Si substrate using hot-C<sup>+</sup>-ion implantation process, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**: 081004 pp.1-12.
- 22) Mizuno T, Aoki T and Sameshima T (2022) Si surface-orientation dependence of SiC-dot formation in bulk-Si substrate using hot-C<sup>+</sup>-ion implantation technique, In: *J. Appl. Phys.* **131**: 074301 pp.1-13.
- 23) Mizuno T, Kanazawa R, Aoki T and Sameshima T (2020) SiC quantum dot formation in SiO<sub>2</sub> layer using double Hot-Si<sup>+</sup>/C<sup>+</sup>-Ion implantation technique, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**: SGGH-02 pp.1-12.
- 24) 水野智久, 鮫島俊之, 青木 孝 (2020) 低次元シリコンカーバイドのSi結晶構造依存性, *神奈川大学理学誌* **31**: 33-39.
- 25) Mizuno T, Kanazawa R, Yamamoto K, Murakawa K, Yoshimizu K, Tanaka M, Aoki T and Sameshima T (2021) Group-IV-semiconductor quantum-dots in thermal SiO<sub>2</sub> layer fabricated by hot-ion implantation technique: different wavelength photon emissions, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**: SBBK08 pp.1-11.
- 26) Mizuno T, Murakawa K, Yoshimizu K, Aoki T and Sameshima T (2022) Physical mechanism for photon emissions from group-IV-semiconductor quantum-dots in quartz-glass and thermal-oxide layers, In: *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**: SC1014 pp.1-10.
- 27) Binns C, Bakar S.H, Louch S, Sirotti F, Cruguel H, Prieto P, Thornton S.C and Bellier JD (2003) Building high-performance magnetic materials out of gas-phase nanoclusters, In: *Appl. Surf. Sci.* **226**: pp. 249-260.
- 28) Fan J and Chu P.K (2014) Silicon carbide nanostructure, springer, *cham*, Chap. 4.