

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25年6月10日現在

機関番号：10103

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656070

研究課題名（和文） 量子情報通信用のInGaSb系正孔局在型量子ドット構造の開発

研究課題名（英文） Development of InGaSb hole localized quantum dot structure for quantum communication

研究代表者

植杉 克弘 (UESUGI KATSUHIRO)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70261352

研究成果の概要（和文）：有機金属分子線エピタキシ法（MOMBE）を用いてGaAs(001)基板の上にType II 正孔局在型量子ドット構造を作製した。原料分子との表面反応を制御した成長法により、 10^6 cm^{-2} の低密度でサブミクロンサイズのGaAsSbドットを自己組織的に作製できた。TDMASbを用いた選択エッチングにより、頂点は円形の(001)ファセット(直径120nm)、側面は{111}と{110}のファセット構造が形成できた。また、高さが6nmで直径が400nmのリング状GaAsナノ構造を自己組織的に形成でき、その上に2個の量子ドットを対で選択的に成長することができた。これは量子ドットの生成が(411)Bファセット上で優先的に生じることを示唆している。本研究で開発した新しい作製プロセスにより、密度および生成位置を制御して正孔局在型量子ドット構造を作製することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：Type II hole localized quantum dot structures were successfully grown on GaAs(001) substrates by metal-organic molecular beam epitaxy (MOMBE). Submicron-sized GaAsSb dots with low density of 10^6 cm^{-2} were fabricated by the reaction between MO precursors and surface atoms. The facet structures can be fabricated by the selective surface etching using TDMASb. They were found to be laterally surrounded by {111} and {110} facets together with circular (001) facet (120nm in diameter) at a convex curved region. On the other hand, GaAs nano-ring structures with $\sim 6 \text{ nm}$ in height and $\sim 400 \text{ nm}$ in diameter were fabricated by the etching of the submicron-sized dots. Quantum dot pair was grown selectively on the facet of nano-ring structure. This result suggests that the quantum dots were produced preferentially on the (411)B facet. We demonstrate new fabrication processes of hole localized quantum dot structures through control of dot densities and generation positions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	540,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子・電気材料工学

キーワード：薄膜・量子構造

1. 研究開始当初の背景

量子情報通信や量子情報処理ネットワークを実現するには、光ファイバ通信波長帯において2つの互いに区別することができない量子もつれ状態の光子を発生させる技術が重要である。半導体量子ドットを用いたもつれあい光子対発生の研究は世界中で盛んに進められているが、ドット形状の異方性により励起子分子発光で生じる2つの光子を量子もつれさせることが難しい問題がある。そこでスピニングレット状態にある電子クーパー対を用いれば形状異方性による交換相互作用は生じないため、量子ドットに局在させた正孔対とクーパー対の再結合により量子もつれ状態の光子対を発生させる手法が提案されている。超伝導 InGaAs 量子井戸発光ダイオードの超放射効果による発光増大現象が実証されたが、もつれあい光子対を生成するには正孔対を局在できる光ファイバ通信帯の量子ドット構造作製技術の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、量子情報通信用光子源を実現するために、低密度で Type II 正孔局在型の量子ドット構造を自己組織的に作製する技術の開発を目的とする。ドット構造の低密度化は、有機金属原料ガスと試料表面原子との反応を制御することにより、サブミクロンサイズのメサ構造を低密度で自己組織的に作製する。その表面構造を制御し、Type II 量子ドットを選択的に成長することによりドット光源を作製する。

3. 研究の方法

有機金属分子線エピタキシー(MOMBE)法を用い、p-GaAs (001) 基板上にドット構造を成長した。用いたMO材料は、トリエチルガリウム(TEGa), トリエチルインジウム(TEIn), トリスジメチルアミノアンチモン(TDMASb), トリスジメチルアミノヒ素(TDMAAs)である。基板表面にTDMAAsを照射しながら600°Cで清浄化した後、基板温度480~600°CでサブミクロンサイズのGaAsSbメサ構造を自己形成した。さらにGaAsSbドットを選択エッチングすることによりリング状ナノ構造を作製し、そのファセット面上に量子ドットを選択的に成長した。

4. 研究成果

TDMAAs や TDMASb の分解により生成したメチル基は試料表面の III 族原子との反応により揮発性分子を形成するため、表面の平坦化やエッチングが可能である。本研究では、原料供給量と基板温度で表面反応を制御することにより、低密度でドット構造を作製する

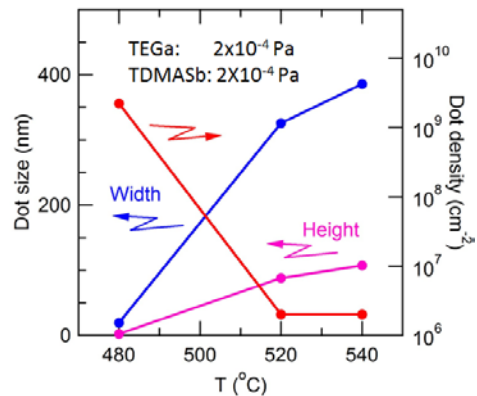


図1 GaSb ドットサイズと密度の成長温度依存性

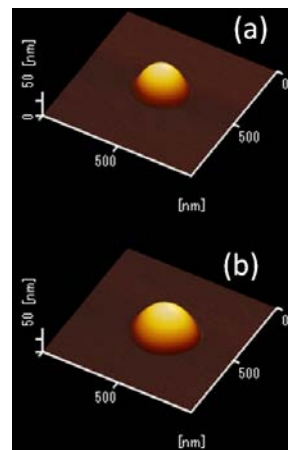


図2 GaAsSb ドットの AFM 像. TDMAAs : TDMASb の供給比は(a) 2 : 5, (b) 1 : 1.

ことが可能となった。

図1はドットのサイズと密度の成長温度依存性を示す。480°Cでは高さが8nm程度の量子ドットがS-Kモードで形成されるが、高温ではサブミクロンサイズでドーム状のドットとなることを見出した。520°Cで作製したドットは、直径350nm、高さ100nmで、密度は $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ である。ドットサイズはリミッティング効果により均一性が高く、成長時間で密度制御が可能である。図2は520°CにおいてV族原料供給比を変えて成長したGaAsSbドットのAFM像を示す。等方的なドットが形成でき、As供給比率の増加によりドットサイズが増大し、ドットサイズのリミッティングはヘテロ界面での格子不整合とファセット形成により生じていると考えられる。

図3は450°CでTDMASbを照射してドットをエッチングした際のサイズ変化を示す。30秒照射ではほとんど形状変化がないが、それ以上になると(001)面が優先的にエッチングされた。ドット高さはほぼ直線的に減少してい

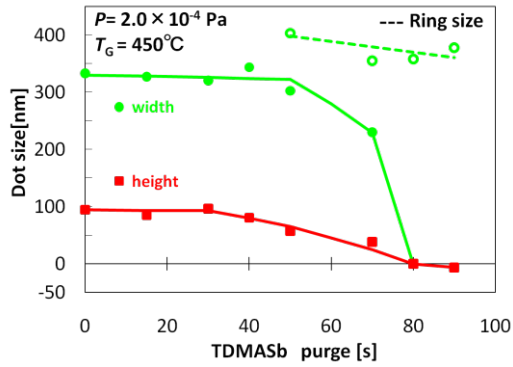


図3 ドットサイズの TDMASb エッチング時間依存性. 基板温度は 450°C.

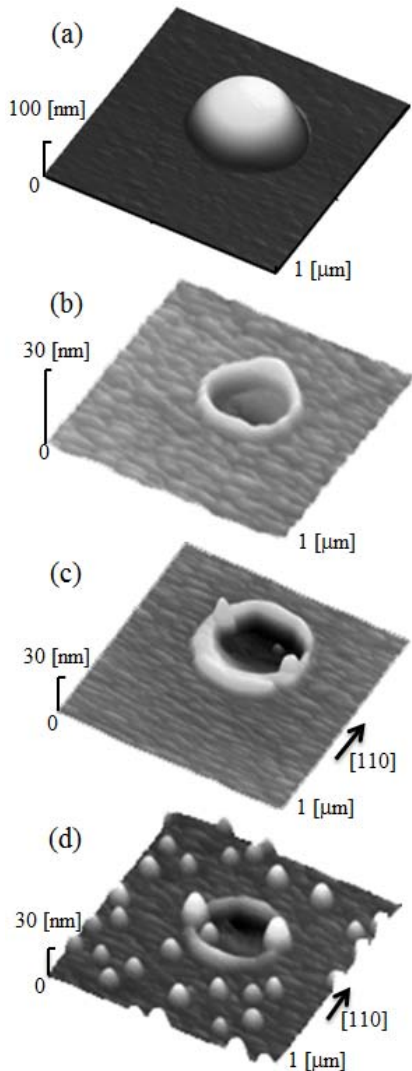


図4 試料表面の AFM 像. (a) GaSb サブマイクロドット, (b) TDMASb エッチングした後, (c) 量子ドットを 30 秒成長した後, (d) さらに 60 秒成長した後の表面.

き, 側面は 40 秒を超えると $\{111\}$ と $\{110\}$ ファセットのメサ構造となった. サブマイクロサイズの GaAsSb ドット表面を選択エッチングすることにより, その上部に $\phi 120\text{nm}$ 程度の (001) 面を作製することができ, そこに量子ドットを選択成長させることにより 10^6cm^{-2} と低密度で位置を制御して量子ドット構造を作製することが可能となった.

また, 図 4(a) に示すサブマイクロドット表面を 450°C で TDMASb を用いて選択エッチングすると, 高さ 6nm, 直径 400nm 程度のリング状構造が形成できた (図 4(b)). リングの内側は外側より 4nm 程度低くなることから, ドット直下では格子歪を低減するために Sb-As 置換反応が生じていることを示唆する. ドット側面の裾に As が多く分布することで, エッチング後にナノメートル高さのリング状構造が形成されたと考えられる.

ナノリングを低密度で形成した表面に, 480°C の S-K 成長条件で量子ドットを成長した. 図 4(c) (d) に示すように, はじめにリング上に 2 個だけ量子ドットが形成され, さらに成長すると平面上に量子ドットが成長することがわかる. リング上の量子ドットは $[1-10]$ 方向に対になっており, これは $(411)B$ が量子ドットの生成に寄与することを示唆する. 量子ドットの埋め込みは, 2 段階の成長温度で行うことにより急峻なヘテロ界面が形成され, 界面での原子置換による発光波長の短波長化を低減することが, 可能となった. これより, Type II 正孔局在型量子ドットを 10^6cm^{-2} の低密度で選択的に作製することが可能となった.

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)

[学会発表] (計 6 件)

- ① Katsuhiro Uesugi, Masataka Sato, Kohei Miyazawa, Takanari Yumi and Hisashi Fukuda, "Hetero-epitaxial growth process of type-II GaSb/GaAs quantum dot system by metal-organic molecular beam epitaxy", 2012 Material Research Society Fall Meeting & Exhibit, 2012 年 11 月 27 日, ハイネズコンベンションセンター(アメリカ, ボストン).
- ② Takanari Yumi, Kohei Miyazawa, Masataka Sato, and Katsuhiro Uesugi, "Growth of self-organized GaAsSb submicron dots on GaAs by metal-organic molecular beam epitaxy", International Union of Material Research Society - International Conference in Asia 2012, 2012 年 8 月 28 日, BEXCO(韓国, プサン).

- ③ Katsuhiro Uesugi, Takanari Yumi, Tsuyoshi Usui, and Afishah Alias, “Selective Growth of GaSb Quantum Dots on GaAs Nano-ring Structures by Metalorganic Molecular Beam Epitaxy”, 12th IUMRS International Conference in Asia, 2011年9月20日,台北世界貿易中心南港展覽館(台湾)
- ④ Katsuhiro Uesugi, Tsuyoshi Usui, Takanari Yumi and Afishah Alias, “Fabrication of GaSb submicron islands on GaAs using trisdimethylaminoantimony”, International Conference on Materials for Advanced Technologies 2011, 2011年6月28日, サンテックシンガポール国際会議場(シンガポール)
- ⑤ 白井強志, 弓 貴成, 植杉克弘, “MOMBE法によるサブミクロンサイズの GaSb メサ構造の作製”, 第46回応用物理学会北海道支部学術講演会, 2011年1月8日, 室蘭工業大学(北海道)
- ⑥ Katsuhiro Uesugi, Tsuyoshi Usui and Afishah Alias, “Self-limiting growth of submicron-sized GaSb dots on GaAs(001) surface by metalorganic molecular-beam epitaxy”, The 16th International Conference on Crystal Growth, 2010年8月12日, 北京国際会議場(中国,北京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植杉 克弘 (UESUGI KATSUHIRO)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号：70261352

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：