

## 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5月18日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560327

研究課題名（和文）

FIBマスクレス選択成長による極微半導体デバイス構造のその場形成に関する研究

研究課題名（英文） In-situ micro-structure fabrication of semiconductor device using maskless selective growth with FIB

研究代表者

朴 康司 (PAK KANGSA)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10124736

研究成果の概要（和文）：III-V族化合物半導体のマスクレス選択成長技術は、光・電子集積回路などの次世代デバイス開発に有用であると考えられる。本研究では、Snのドーピング濃度を増やした Sn high doped-Ga LMIS（液体金属イオン源）を用い GaAs 選択成長を行い、抵抗率、ホール効果測定などによりドーピング濃度やキャリアタイプがどのようになるかを詳細に調べた。その結果、実験条件により、p型やn型の GaAs が成長できることが分かった。これを用い、GaAs の pn 接合デバイスを世界で初めて、リソグラフィ技術なしに、マスクレスで形成できた。

研究成果の概要（英文）：The maskless selective epitaxy (MLSE) of III-V semiconductor compounds could become an important technique in the preparation of complex integrated device structures such as optoelectronic integrated circuits (OEICs). Focused ion beam (FIB) technology is useful for semiconductor maskless processes such as doping, ion beam assisted etching and deposition in high vacuum. Recently, we investigated on Sn high doped-GaAs, and we successfully fabricated MLSE growth layers of n- and p-GaAs. Using the result, we attempted in fabricating selective p-n junctions and succeeded in-situ pn junction device formation.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,700,000 | 810,000   | 3,510,000 |
| 2010年度 | 600,000   | 180,000   | 780,000   |
| 2011年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：選択成長、化合物半導体、ガリウムヒ素、集束イオンビーム、FIB、不純物ドー

ピング、両性不純物

### 1. 研究開始当初の背景

次世代半導体集積回路デバイスの開発は、日本の電子産業の命運を握っている。このためには、電子回路のみならず、光回路も取り込んだ、光・電子集積回路 (OEIC) などの超機能集積回路の開発が不可欠となる。これを実現するため、任意形状の極微細領域への化合物半導体・選択エピタキシャル成長技術の開発が重要となる。しかし、従来のリソグラフィ技術を用いた選択成長では、複雑なプロセスが必要となるばかりでなく、これによる界面・表面の汚染が問題となる。これらの問題を克服するためには、リソグラフィを使わず超微細領域にマスクレスで直接選択成長を行う技術の開発が切望されてきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、まず、低加速の集束イオンビーム (FIB) を用いることにより、マスクレスで一筆書きのごとく超微細領域に化合物半導体結晶を超高真空下でエピタキシー技術により形成し、その形成機構及び選択成長膜の電子・光学的性質を明らかにする。とりわけ、pn 接合デバイスなどを“その場”形成し集積化することで、次世代光・電子集積回路プロセスを実現することを主目的とする。

### 3. 研究の方法

我々の研究室では FIB のもつ低エネルギー堆積作用を用いて、単結晶 GaAs 膜の選択成長の実現、FIB 技術とドーピング技術の一体化に成功している。特に、Sn をドーパントとした n-GaAs については電気的特性や結晶性、またドーピング濃度の変化による効果などの詳細な調査を行ってきた。そして、Sn のドーパ量を従来より増やした Sn high

doped-GaAs の研究を行い、n 型および p 型 GaAs の形成に成功した。そこで本研究では、Sn high doped-GaAs のマスクレス選択成長を行い、更なる電気的特性と光学的特性を評価することを目的とした。最後に選択的な pn 接合の作製を試みた。

最初に、Sn : Ga を  $1.5 \times 10^{-4} : 1$  のモル比で混合し、III 族源となる Sn-Ga LMIS (Liquid Metal Ion Source) の作製を行って、FIB 装置に装填した。次に、作製した LMIS を用いて、砒素背圧  $P_{As4} = 2 \times 10^{-6}$  Torr、 $T_s = 450 \sim 600$  °C で入射エネルギー  $E_i = 50 \sim 200$  eV の Sn-Ga FIB によって S.I.GaAs (100) 基板上に約  $50 \times 800$   $\mu\text{m}$  の領域に成長させた場合について抵抗率の調査を行った。次に成長温度  $T_s = 600$  °C において、砒素背圧  $P_{As4}$ 、入射エネルギー  $E_i$  を変え、膜のホール効果特性を評価した。更に、この結果をふまえ、本研究では2つの方法により選択的な pn 接合の作製を試みた。まず、pn 接合①では、n-GaAs (100) 基板上に p-GaAs 層を選択的に成長させることで選択的に pn 接合を作製した。また、pn 接合②では、S.I.GaAs (100) 基板上に n-GaAs 層を選択成長させ、その上に p-GaAs 層を成長させることで、選択的に pn 接合を作製し、特性の評価を行った。

### 4. 研究成果

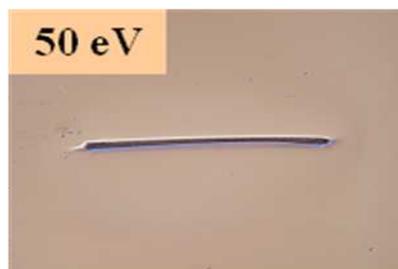


図1 抵抗率測定用に選択成長させた GaAs 成長層 ( $50 \times 800$   $\mu\text{m}$ )

まず、抵抗率の測定結果について述べる。図1に抵抗率測定用に成長させた GaAs 成長層の顕微鏡写真を示す。これは、S. I. GaAs (100) 基板上に約  $50 \times 800 \mu\text{m}$  の領域に選択成長させたものである。図2は、LMIS に対する Sn ドープを変化させたときの抵抗率を示す（成長温度はすべて  $600^\circ\text{C}$ ）。結果として、全ての成長層において、抵抗率は undoped GaAs 成長層よりも大幅に低減し Sn ドーピングの効果が確認できた。ただ、Sn のドープ量が多い時、入射エネルギーが増加すると抵抗率は減少した。原因はロックオン効果により表面層の原子が成長時のイオン衝突で成長層の下に叩き込まれ、Sn が成長層内に多く取り込まれ、その結果、欠陥に Sn 原子が入り、抵抗率が改善されたためだと考えられる。

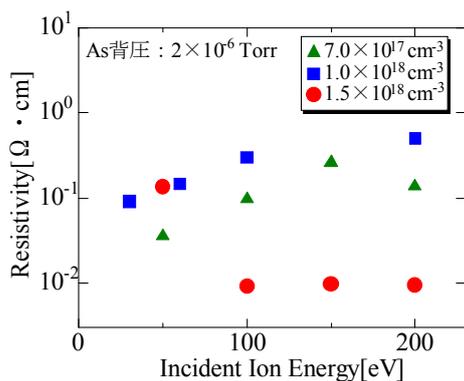


図2 Sn(スズ)ドープ量の変化に対する GaAs の抵抗率

また、成長温度が低下すると抵抗率は増加した。これは、空格子や格子間原子の拡散速度が低下し再結合やマイグレーションなどができなくなったことで成長層内に多くの欠陥が残ったことが原因と考えられる。

成長温度  $T_s=600^\circ\text{C}$  において、砒素背圧  $P_{As4}$ 、入射エネルギー  $E_i$  を変え、ホール効果特性を評価した（図3参照）。その結果、 $P_{As4} =$

$0.7 \sim 4 \times 10^{-6}$  Torr の範囲で、 $E_i=50\text{eV}$  のとき GaAs の選択成長層は p 型を示した。一方、砒素背圧  $P_{As4}=2 \times 10^{-6}$  Torr 以上で、 $E_i=100\text{eV}$  のとき n 型の GaAs 成長層が得られた。したがって、同一の LMIS を用い、実験条件を少し変えることで、p 型 n 型制御が可能となることが分かった。

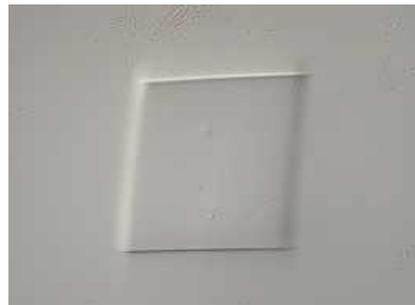


図3 ホール効果測定用サンプル  
(一辺が約 400 ミクロン)

図4は pn 接合① (n-GaAs (100) 基板上に p-GaAs 層を選択的に成長させることで選択的に pn 接合を作製) および pn 接合② (S.I.GaAs (100) 基板上に n-GaAs 層を選択成長させ、その上に p-GaAs 層を成長させることで、選択的に pn 接合を作製) に対する電圧電流特性の測定結果である。

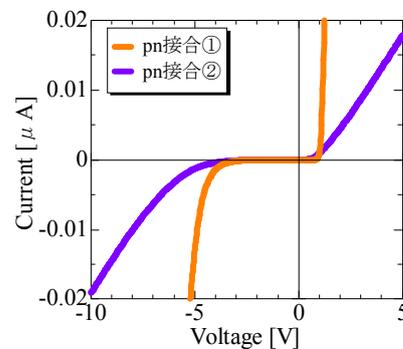


図4 2種類のpn接合の特性

図4からわかるように、pn 接合①では、比較的良好なダイオード特性を示すのに対し、pn 接合②では、順方向に対する特性の悪化が見られる。更に詳細にダイオード特性を調べるため、図5のように順方向バイアスについて対数プロットを実施したところ、ダイオード特性に顕著な差がみられた。すなわち、pn

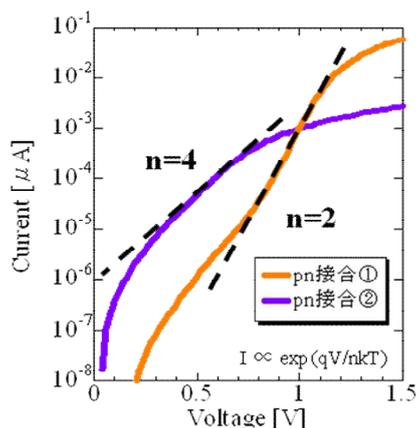


図5 順方向バイアス特性

接合①は、ダイオードの  $n$  値が 2 であるのに対し、接合②では、4 となる。これは、pn 接合界面での欠陥などによる再結合電流が多いことを示しており、良くない特性となる。これは、p 型から n 型 GaAs に切り替えるとき、入射エネルギーを高くしたために欠陥が導入されたためだと考えられる。この問題を克服するため、両性不純物として、より可能性のある Ge を不純物ドーパントとして実験を試みた。その結果、今のところ、低入射エネルギーで n 型 GaAs は得られていないが、ドーパントの量や、実験条件を工夫することで、実現できると考えている。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

① M.Mokhtar, M.Ishikawa, M.Hisada and K. Pak, “ Study of maskless selective growth and evaluation of GaAs using a low energy Sn-Ga focused ion beam “, 30<sup>th</sup> Electronic Material Symposium, Extended abstracts pp. 93-94, June 30<sup>th</sup>, 2011 Laforet Biwako, Shiga, Japan

② H. Takeda, M. Mokhtar, M. Ishikawa, and Pak, “ A study of in-situ doping on maskless selective growth of GaAs using a low energy Sn-Ga focused ion beam“, 29<sup>th</sup> Electronic Material Symposium, Extended abstracts pp. 113-114, July 14<sup>th</sup>, 2010, Laforet Shuzenji, Shizuoka, Japan

③ T.Suzuki, K.Nobuhara, H.Takeda, M.Mokhtar and K.Pak, “Maskless selective growth and doping of n-GaAs using a low energy Sn-Ga focused ion beam”, 28<sup>th</sup> Electronic Material Symposium, Extended abstracts pp. 139-140, July 9<sup>th</sup>, 2009, Laforet Biwako, Shiga, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.int.ee.tut.ac.jp/paklab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

朴 康司 (PAK KANGSA)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准  
教授  
研究者番号：10124736

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：