

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：54101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02895

研究課題名(和文)工学教育への展開を目指したバイポーラトランジスタ作製教材の開発

研究課題名(英文) Development of an educational resource of bipolar transistor fabrication for engineering education

研究代表者

辻 琢人(TSUJI, Takuto)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：70321502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：バイポーラトランジスタの作製技術と動作原理を理論と実践の両面から習得することに繋がる作製教材の開発を試みた。

バイポーラトランジスタは、p型半導体の両側を伝導型の異なるn型半導体で挟んだnpn構造を形成しなければならない。本研究では、フォトリソグラフィを使って μm オーダーのp型領域の両側にn型拡散層を形成したnpn構造のバイポーラトランジスタを作製し、良好な電流・電圧特性を有するnpnバイポーラトランジスタが作製できた。さらに、比較的少ない工程で作製できたことから、工学教育活動などに応用が可能な実践的なバイポーラトランジスタ作製教材が構築できたのではないかとと思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者がこれまでに開発してきた様々な半導体デバイス作製教材と合わせて、このバイポーラトランジスタ作製教材が開発されることで、半導体工学で学習する代表的な半導体デバイスの作製教材が全て整備されることになるため、大学や高専などの教育機関で半導体デバイスの作製技術と動作原理を講義及び実験・実習を通して、より効果的に習得できる環境が整備されるようになる。さらに、これまで研究代表者がSi太陽電池作製教材を使って行ってきたように、中学生などを対象にした科学技術啓蒙活動へ応用できる可能性があることから、将来の科学者・技術者の育成に有用な教材が開発できたのではないかとと思われる。

研究成果の概要(英文)：A lot of manufacturing equipment and processes must be generally required for fabrication of semiconductor devices, and it is difficult for many educational institutions to make the semiconductor devices in engineering experiments which are regarded as important for engineering education. It is expected that students effectively acquire expertise in semiconductor engineering through the practical experience of experiments. Thus, we attempted to develop an educational resource of bipolar transistor fabrication that could lead to learning its manufacturing technology and also studying theoretically principles of a typical semiconductor electronic devices. In this study, we attempted to fabricate a lateral type npn bipolar transistor by using simplified process. As a result, it was confirmed that the npn bipolar transistor showed typical current-voltage characteristics. Therefore, we could fabricate the npn bipolar transistor by using this educational resource developed in this study.

研究分野：半導体工学

キーワード：半導体デバイス バイポーラトランジスタ 作製教材

1. 研究開始当初の背景

高専は、実践的及び創造的な技術者の養成を目的として、「ものづくり」に特化した技術者教育を5年間一貫教育で行っている。学生の学習意欲を継続的に刺激しながら、理論と実践の両面から専門的な知識・技術を効果的に習得させるため、専門科目に関係する実験で魅力的なテーマを実施することは極めて重要である。

また、現在の高度情報化社会は、集積回路や様々な半導体デバイスの高速化及び高機能化によって実現されており、今後も様々な技術革新に半導体デバイスは必要不可欠である。そのため、大学及び高専の電気電子工学系の学科で、半導体工学は重要な科目の一つとなっている。しかし、半導体デバイスの作製には一般に高価な装置と多くの作製工程が必要であることから、高専では半導体デバイスのものづくり教育の実施は容易ではなく、講義による知識の習得だけとなっていることが多い。

研究代表者は、半導体工学の基礎を理論と実践の両面から理解することに役立てられるように、これまでシリコン(Si)太陽電池及びMOS電界効果トランジスタ(MOSFET)、及び発光ダイオード(LED)を作製する教材を開発し工学教育活動などで活用してきた。開発したこれらの作製教材は、制限のある環境でも実現できるように、必要最低限の簡易な手法を使って半導体デバイスを作製できる。

このように開発した教材によって、太陽電池、MOSFET、及びLEDを作製できるようになったが、代表的な半導体デバイスの一つであるバイポーラトランジスタの作製教材は開発できていない。バイポーラトランジスタ作製教材が確立できれば、半導体工学で学習する代表的な半導体デバイスを作製する全ての教材が整備されることになるため、半導体デバイスの作製工程及び動作原理を講義と実験を通して、より効果的に習得できるようになる。さらに、これまで研究代表者がSi太陽電池作製教材を使って行ってきたように、科学技術啓蒙活動への応用も期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、代表的な半導体デバイスの一つであるバイポーラトランジスタを作製する教材を開発し、学生が理論と実践の両面から半導体工学をより良く理解するための一助とする。そして、開発を試みる半導体発光デバイス作製教材の科学技術啓蒙活動などへの応用を目指す。

3. 研究の方法

バイポーラトランジスタには、npn型とpnp型があるが、本研究ではトランジスタ内を電子が移動するnpnバイポーラトランジスタ(npn BPT)を作製する教材の開発を試みた。

npn BPTは2つのn型半導体とp型半導体で構成される。n型半導体は電子が多く、p型半導体は正の電荷を帯びた正孔が多い半導体で、n型半導体(エミッタ)ともう一つのn型半導体(コレクタ)で薄いp型半導体(ベース)を挟んだ構造になっている。

npn BPTは、エミッタからベースに電子が注入され、その電子が薄いベースを通り抜け、コレクタに到達することで動作することから、npn BPTの作製には良好な電気的特性を有するnpn構造の形成が必要不可欠となる。本作製教材では、このnpn構造の形成をSi太陽電池及びMOSFET作製教材の開発で確立したスピノングラス(SOG)を使った不純物拡散層形成技術による簡易な方法で試みた。SOGは液状のSOG剤を基板に塗布し焼結することで得られるガラス薄膜である。IV族のSiにIII族のホウ素を含んだSOGであるホウケイ酸ガラスを塗布し熱処理することでSi中に正孔の素になるホウ素が拡散してp型不純物拡散層を、同様に、V族のリンを含んだSOGであるリンケイ酸ガラスを塗布し熱処理してSi中に電子の素になるリンが拡散しn型不純物拡散層を形成できる。これまでに作製してきたSi太陽電池やMOSFETは、pn接合を1つ形成するだけで作製できたが、npn BPTはpn接合が2つ必要なため、コレクタとなるn型Si基板上にベースとなるp型不純物拡散層を形成し、更にその上にエミッタとなるn型不純物拡散層を形成してnpn構造を形成することによって、電流が縦方向に流れるサブストレート型のnpn BPTの作製を試み評価した。

4. 研究成果

npn BPTの作製には、n型Siに形成したp型不純物拡散層内にもう一つのn型不純物拡散層を形成する必要があるため、n型Si内にp型不純物拡散層を形成し、その中にもう一方のn型不純物拡散層の形成を試みた。その結果、p型不純物拡散層内にn型不純物拡散層が形成できることが確認できた。また、p型不純物拡散層内に形成するn型不純物拡散層は、p型不純物拡散層内に選択的に形成する必要があるため、その工程の確立も試み、p型不純物拡散層内に選択的にn型不純物拡散層が形成できるようになり、npn BPTを作製する基本的な技術が確立できた。しかし、p型不純物拡散層の上に形成したn型不純物拡散層を有するpn接合の電気的特性を評価したところ、整流性ではなく線形性を示した。そして、このpn接合を有するサブストレート型npn BPTエミッタ接地回路のコレクタ電流-コレクタ電圧特性は、コレクタ電流がコレクタ電圧

の変化に対してほぼ一定となったが、コレクタ電流はベース電流に対して非常に小さかった。このようにバイポーラトランジスタの典型的な電流-電圧特性が得られなかった要因は、エミッタのpn接合が線形性を示したためではないかと考えられる。

以上の結果、p型不純物拡散層の上にn型不純物拡散層は形成できるものの、そのpn接合でnpn BPTの作製に必要な良好な電流-電圧特性を得ることは容易でないことが見込まれたことから、npn BPTで一般的なサブストレート型ではなく、電流が横方向に流れる、図1に示す断面構造のラテラル型npn BPTの作製を試みた。

図2に作製したラテラル型npn BPTの表面顕微鏡写真を示す。図2に示すように、エミッタ(E)、コレクタ(C)、及びベース(B)領域が形成されており、矩形のエミッタの周りの三辺をベース、コレクタがレイアウトされた構造になっている。

ラテラル型npn BPTのエミッタのpn接合の電流-電圧特性を図3に示す。順バイアス印加時は、良く電流が流れ、逆バイアス印加時は、ほとんど電流が流れない、良好な整流性が得られていることが確認できた。また、コレクタのpn接合についても同様に良好な整流性を示した。

次に、図4に作製したラテラル型npn BPTのベース接地回路の電流-電圧特性を示す。コレクタ電圧の変化に対してコレクタ電流はほとんど変化せず、エミッタ電流とほぼ同程度のコレクタ電流が流れたことから、典型的なベース接地回路の電流-電圧特性が得られることが確認できた。

図5に、エミッタ接地回路の電流-電圧特性を示す。図5に示すように、コレクタ電圧の変化に対してコレクタ電流は大きく変化せず、ベース電流が増幅されたコレクタ電流が流れたことから、典型的なエミッタ接地回路の電流-電圧特性を有するnpn BPTを作製できる見通しが得られた。

以上の結果、npn BPTを作製する教材を開発できる見通しが得られた。

さらに、本教材でnpn BPTを比較的少ない工程で作製できることも実証されたことから、工学教育活動などへの応用が可能な実践的なバイポーラトランジスタ作製教材を構築することができたのではないかとと思われる。

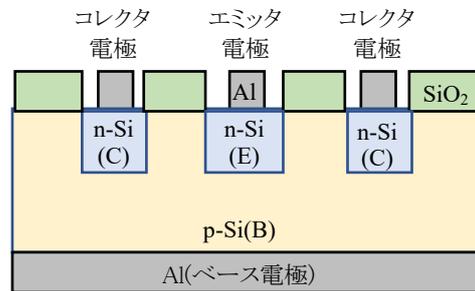


図1 npnバイポーラトランジスタの断面図

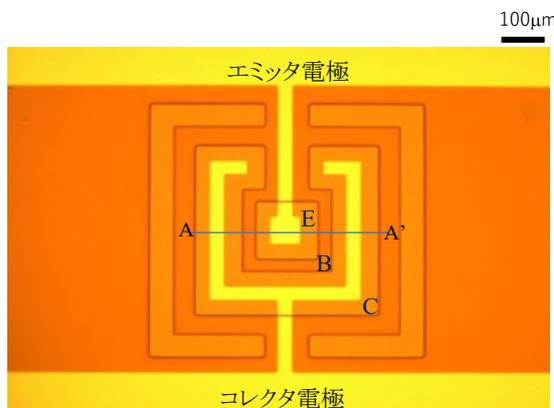


図2 npnバイポーラトランジスタの表面顕微鏡写真

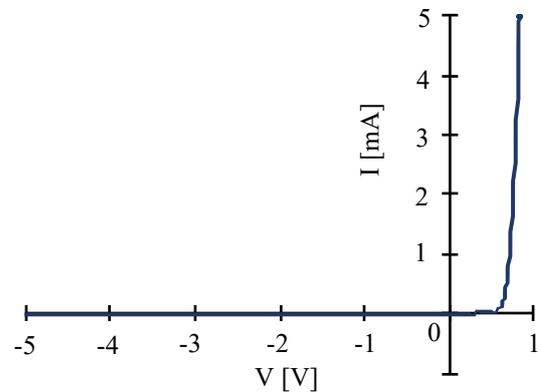


図3 エミッタのpn接合の電流-電圧特性

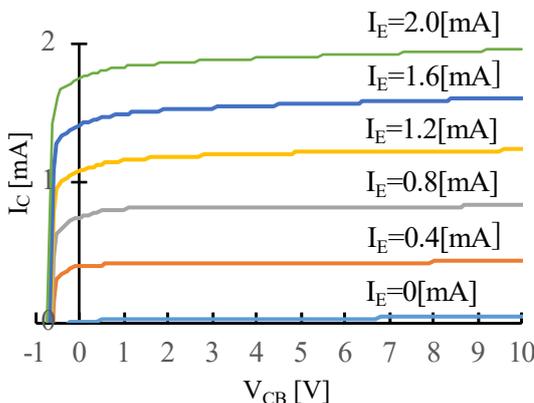


図4 ベース接地回路のコレクタ電流-コレクタ電圧特性

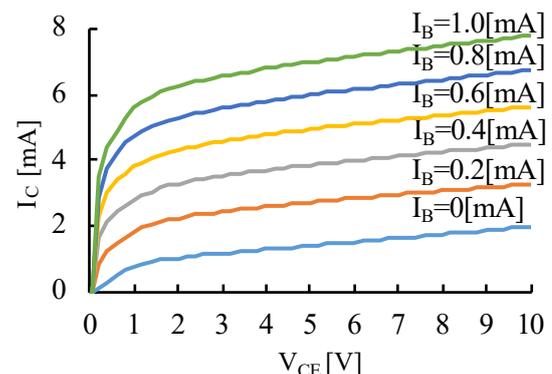


図5 エミッタ接地回路のコレクタ電流-コレクタ電圧特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 玉川碧海(指導教員：辻琢人)
2. 発表標題 nprnバイポーラトランジスタ作製教材の開発
3. 学会等名 令和3年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻琢人, 長岡史郎, 若原昭浩
2. 発表標題 バイポーラトランジスタ作製教材の開発
3. 学会等名 第71回年次大会工学教育研究講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------