

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03692

研究課題名(和文) ゲート生成p-n接合による遠赤外LEDの実現

研究課題名(英文) Realizing far-infrared light emitting diodes based on the gate-induced p-n junction

研究代表者

鈴木 恭一 (Suzuki, Kyoichi)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20393770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：InAs/InGaSbトポロジカル絶縁体に部分的なゲートを形成することで膜面方向にp-n接合を形成し、遠赤外ダイオードの作製を目指した。遠赤外発光の観測までは至らなかったが、電気伝導測定からバンドギャップが43 $\mu$ mの遠赤外光に対応することを確認した。表面側、基板側両方からのゲート電圧によりp-n接合の電位障壁を制御できることを示した。p-n接合の電流-電圧特性を調べた結果、微分コンダクタンスに整流効果とみられる特徴を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のp-n接合は、結晶成長時の不純物混入や成長後のイオン注入により作製されてきた。本研究で用いたゲートにより面内にp-n接合を作る技術はLEDや集積回路作成の可能性を広げるものである。本研究では、表面側と基板側のゲートを独立制御することで、精密にp-n接合の電位障壁を調整できることを示した。Type-IIヘテロ構造およびそのトポロジカル絶縁体は単体の半導体ではなし得ない微小なバンドギャップの実現が可能で、本研究の試みは新たな産業応用につながると考えている。

研究成果の概要(英文)：For the realization of far-infrared LEDs, by depositing a partial gate on the InAs/InGaSb topological insulator, we made the in-plane p-n junction. Although the light emission has not achieved, the band gap of 28.6 eV corresponding to the wavelength of 43 micron meters was confirmed from the electrical transport measurements. By applying the gate voltages from the surface and back sides independently, the energy difference in the p-n junction can be controlled. The current-voltage measurements across the p-n junction show the rectification features in the differential conductance.

研究分野：半導体物理学

キーワード：ゲート生成p-n接合 トポロジカル絶縁体 遠赤外ダイオード

### 1. 研究開始当初の背景

遠赤外光(波長 10  $\mu\text{m}$ ~1 mm 程度)はその周波数からテラヘルツ光とも呼ばれ、センシング、イメージング、ガス分析、透視など様々な分野への利用が進められている。しかしながら、高効率で簡易な光源が存在しないため、可視光や通信波長帯に比べるとまだまだ未開の領域である。従来の光源の例として、熱放射、高圧水銀灯、半導体への超短パルスレーザー照射、レーザーを組み合わせた非線形光学効果、放射光、ガスレーザー等が挙げられるが、いずれも大掛かりで非効率なものである。

半導体素子に限ると、遠赤外領域の発光が実現されている量子カスケードレーザーはコンパクトであるが、複雑な成膜や冷却設備が必要であり、普及にはまだ遠い。最近になり、共鳴トンネル素子において第三高調波による 1.0 THz の発振(発光)が報告されているが、基本周波数や他の高調波も同時に発振するため効率は制限される。一般に高効率の光源として、半導体 p-n 接合を用いた発光ダイオード(LED)が思い浮かぶが、この従来型の LED では、長波長側はせいぜい 12  $\mu\text{m}$  程度しか実現されていない。

近年のゲート絶縁膜作製技術の進歩により、いくつかの直接遷移半導体薄膜で、面内においてゲート電圧による p 型, n 型の極性反転が可能となった。これにより、ゲート直下とそれ以外の領域の境界で p-n 接合が形成され、LED としての発光が確認されている [Sundaram *et al.*, Nano Lett. **13**, 1416 (2013)].

### 2. 研究の目的

本研究ではゲート生成 p-n 接合を、両側を Al(Ga)Sb で挟んだ InAs/GaSb ヘテロ構造(図 1)および InAs/InGaSb ヘテロ構造に適用し、中~遠赤外 LED の実現を目指す[鈴木 他, 特許 5249307]。このヘテロ構造は Type-II Broken Gap 型と呼ばれ、量子閉じ込めが小さい場合には InAs の伝導帯と (In)GaSb の価電子帯がエネルギー的に重複し、バンドギャップ( $E_g$ )が負となる。InAs および (In)GaSb の層厚を変え、量子閉じ込め効果を利用することで、理論的には波長無限大( $E_g = 0$ )から 730 nm (AlSb のバンドギャップ  $E_g = 1.69$  eV)までの範囲で発光波長を制御できる。本研究によって室温発光が実現されれば、従来の遠赤外を利用した装置の小型化、簡略化が進むとともに、遠赤外領域の新たな利用法や需要が開拓されると考えられる。

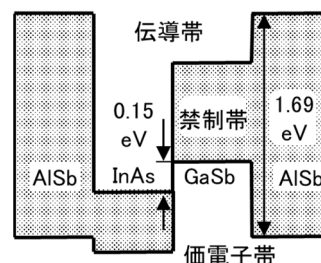


図 1. InAs/GaSb ヘテロ構造のエネルギーバンド構造。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料作製

##### ・ InAs/InGaSb ヘテロ構造ウエハ

InAs/(In)GaSb ヘテロ構造は結晶成長条件が厳しく、良質な試料を作製・入手することが難しい。本研究では信頼性を重視して、これまで鈴木がトポロジカル絶縁体の研究で使用してきた Broken-Gap 型 InAs/InGaSb ヘテロ構造エピタキシャルウエハを用いた。構造を図 2 に示す。

InAs/InGaSb を挟む障壁層としては AlSb が理想であるが、酸化による試料劣化を防ぐため、 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$  が障壁層の物を採用した。InAs の伝導帯と InGaSb の価電子帯がスピン-軌道相互作用を伴い混成することで、遠赤外領域に対応するトポロジカル絶縁体としてのバンドギャップが開く。最近の報告では、AlSb を障壁層として使用した InAs/InGaSb ヘテロ構造において最大 35.0 meV のバンドギャップが報告されており、これは温度で 406 K、波長で 35.4  $\mu\text{m}$  の光に対応する [Irie *et al.*, Phys. Rev. Materials. **4**, 04201(2020)]. 伝導性の GaSb 基板上に成長されており、チャンネル層である InAs/InGaSb に対して基板に電圧を印加することで、基板がバックゲートとして作用する。

##### ・ 半導体プロセス

トポロジカル絶縁体は、試料端が存在するとエッジチャンネルが形成されるため p-n 接合に関わらず電流が流れてしまう。それを避けるため、オーミック電極(内側, 外側), およびフロントゲートが同心円構造となるようにパターンを設計した(図 3)。提供されたウエハに半導体プロセスを行い、測定用試料を作製した。フォトリソグラフィーには、福岡工

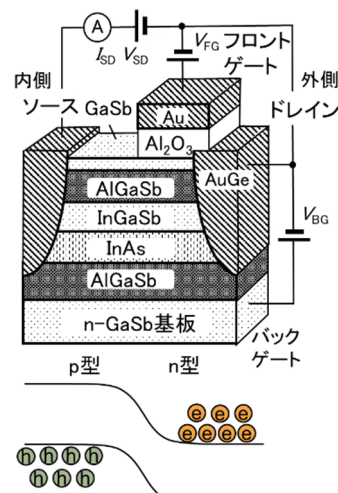


図 2. 試料の構造と対応するエネルギーバンド。

業大学に導入されたばかりのマスキング露光装置を用いた。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ゲート絶縁膜は、NTTにて原子層堆積法で成膜した。電極およびフロントゲートは一般的な真空蒸着により作製した。

## (2) 電気伝導測定

今回使用したウエハは、室温よりもバンドギャップが小さいことが予想されたことから、1.4 Kまで冷却可能なクライオスタットを用いて、主に低温において電気伝導測定を行った。

### (2a) バンドギャップの同定

フロントゲート電圧を掃引すると、フロントゲート直下のフェルミレベルがバンドギャップを通過する時にチャネルの抵抗がピークとなる。この抵抗ピークの温度変化から、バンドギャップの大きさを求め、バンドギャップが遠赤外光の領域にあることを確かめた。

### (2b) 最適な p-n 接合条件の探索

一般的な半導体に比べてバンドギャップが小さいため、p 側と n 側のエネルギーバンドのずれである電位障壁が大きいと、発光を伴う電子-正孔再結合よりも、p 側の伝導帯-n 側の価電子帯間の Zener トンネリングが支配的になってしまう。これを防止するために、バックゲートとフロントゲートの電圧 ( $V_{BG}$ ,  $V_{FG}$ ) を独立に制御し、p-n 接合が実現されながらも電位障壁が小さくなる条件を探索した。

### (2c) 整流特性の確認

上記で最適化した  $V_{BG}$ ,  $V_{FG}$  において、内側、外側のオーミック電極間 (便宜上ソース、ドレインとする。) で電圧を変えて電流を測定し、整流特性を調べた。

## (3) 発光測定

InSb の光伝導ディテクタを利用した遠赤外発光の検出 [Suzuki *et al.*, J. Cryst. Growth **150**, 1266 (1996)] および学内のフーリエ分光器を利用し分光測定を行う予定であったが、本研究期間ではそこまで至らなかった。

## 4. 研究成果

### (1) 作製試料

露光条件および蒸着条件の最適化を行い、試料を作製した。図 3 に試料の顕微鏡像と回路図を示す。未達成であるが、フロントゲートとこのゲートの覆っていない領域の境界から発光が得られることになる。

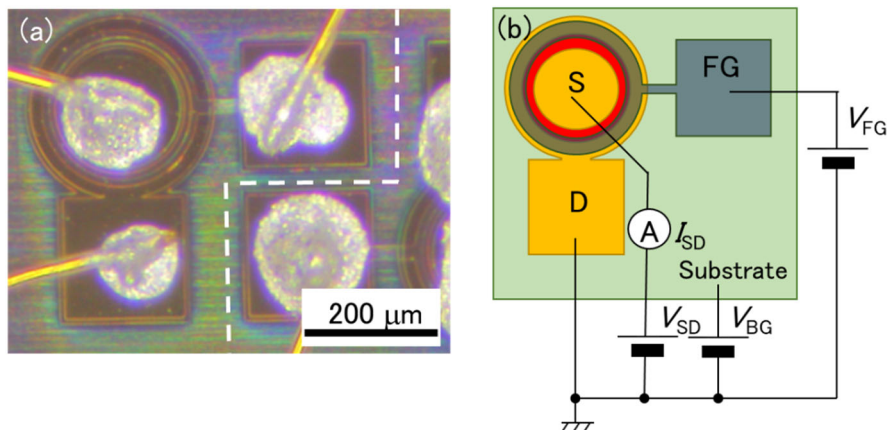


図 3. (a) 作製した試料と (b) 回路図 (FG: フロントゲート, S: ソース, D: ドレイン). 赤で示した領域が、ゲートが覆っていない GaSb が露出した部分。

### (2) 電気伝導

(2-a) 全面にフロントゲートを持つ Hall bar 型試料を用い、 $V_{BG} = 0$  V に固定し、 $V_{FG}$  を掃引した時の縦抵抗の測定結果を図 4(a) に示す。温度は 1.4 K から 70 K まで変化させた。この抵抗ピークを温度の逆数に対してプロットしたグラフを図 4(b) に示す。アレニウスプロットのフィッティングより、 $E_g = 28.6$  meV と求めた。これは波長 43.2  $\mu$ m の遠赤外光に対応する。

(2-b)  $V_{FG}$ ,  $V_{BG}$  を独立に変化させ、ソース (S)-ドレイン (D) 間に微小電流 (1.0  $\mu$ A) を流し抵抗 ( $R_{SD}$ ) を測定した結果を図 5 に示す。 $V_{FG}$  を増大させるとフロントゲート直下においてフェルミレベルが価電子帯 (p 型) から伝導帯 (n 型) に移動する。その途中でバンドギャップを通過する時に抵抗が極大をもつ。同様に  $V_{BG}$  を増大させるとフロントゲートが覆っていない領域で p 型から n 型に転換するとき抵抗がピークを持つ。A, B, C, D で示した領域は、ソース-ドレイン間がそれぞれ p-p, p-n, n-p, n-n 接合となっている。フロントゲートは基板 (バックゲート) に比べてチャネル層に近いので、直下の極性 (p か n か) は  $V_{BG}$  の影響をほとんど受けていない。

(2-c) ソース側とドレイン側でフェルミレベルの位置が大きく異なると、p-n 接合時の電位障壁がバンドギャップよりも大きくなり、Zener トンネリングによる電流が支配的になる。それを

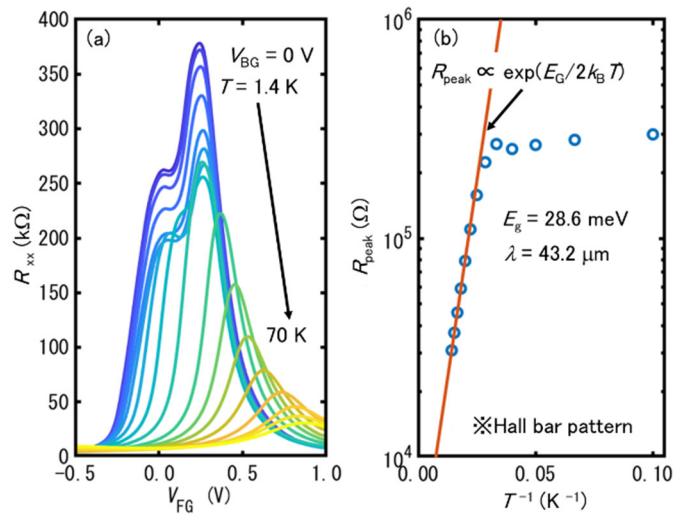


図 4. (a)  $V_{FG}$  を掃引した時の縦抵抗の温度変化(※Hall bar 型試料). (b) 温度 ( $T$ ) の逆数に対する縦抵抗ピーク.

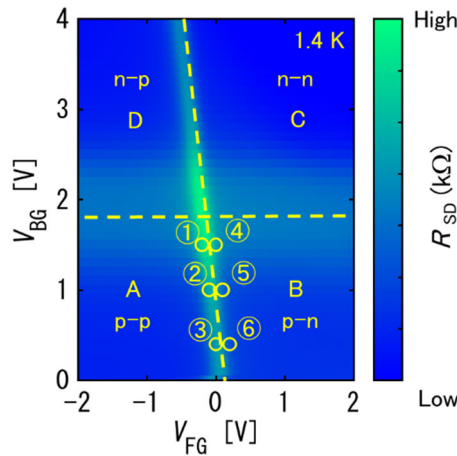


図 5.  $V_{FG}$ ,  $V_{BG}$  を変化させたときのソース-ドレイン抵抗 ( $R_{SD}$ ) のカラープロット. A, B, C, D はソース-ドレインの極性を示す.

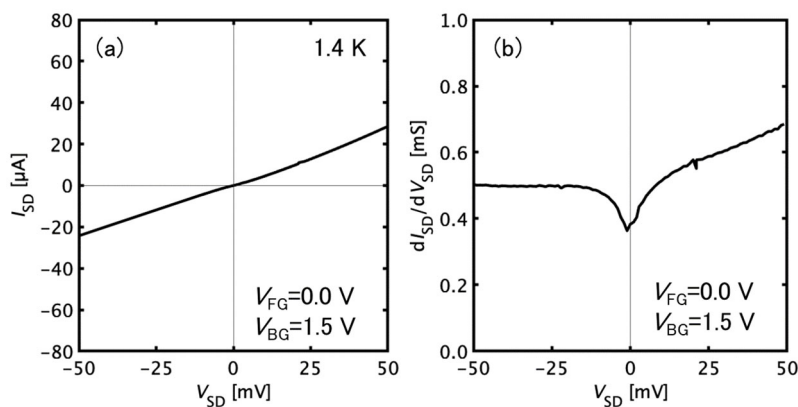


図 6. 電位障壁が小さい p-n 接合状態[図 5 の①]における (a) 電流-電圧特性と (b) 微分コンダクタンス.  $V_{SD} = 0$  V におけるコンダクタンスの低下は、オーミック電極と半導体のショットキー接合の影響と考えている.

避けるため、電位障壁が小さい p-n 接合領域[図 5①]において、S-D 間の電流-電圧特性を測定した[図 6(a)].  $V_{SD} < 0$  V の逆方向電圧印加時にも電流が流れている. これは、不純物等のポテンシャル揺らぎにより発生する電子、正孔溜まりを介したホッピング伝導や非弾性トンネリングの影響と考えている. 図 6(b) を見ると、 $V_{SD} > 0$  V の順方向電圧印加時の方が微分コンダクタンスが高くなっており、整流効果が現れていると考えている.

装置の制約で  $V_{FG}$  と  $V_{BG}$  のグラウンドが共通になっているため[図 3(b)], p-n 接合の特性が正確に

測定できていない可能性がある。電氣的に独立した定電流源を作製したので、今後ソースを基準に  $V_{BG}$  を印加し、詳細な電気伝導測定を行っていく。

以上、本研究期間では、発光の確認までは至らなかったが、同心円構造試料を作製し、フロントゲートとバックゲートの制御により、ソースドレイン間の接合を p-n, p-p, n-p, n-n と変化させることができた。ソースドレイン間の微分コンダクタンスには、ダイオードの特徴である整流特性とみられる非対称性が観測された。発光検出用に InSb 結晶も用意したので、今後発光の測定を目指す。

本研究の関連として、InAs の p-n 接合についてポテンシャルプロファイルの計算を行った。計算結果を断面走査トンネル分光の測定結果と比較し、不純物のイオン化率や空乏層幅について考察し、学会および論文として発表した [Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61** 065001 (2022)].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Kyoichi, Onomitsu Koji, Kanisawa Kiyoshi	4. 巻 61
2. 論文標題 Cross-sectional low-temperature scanning tunneling spectroscopy of an InAs p-n junction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065001 ~ 065001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac518b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木恭一	4. 巻 2
2. 論文標題 無冷媒14 T 超伝導磁石内蔵1.5 K クライオスタットの導入と電気抵抗標準の実測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 福岡工業大学総合研究機構研究所報	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木 恭一、小野満 恒二、蟹澤 聖
2. 発表標題 低温STMによるInAs p-n接合の空乏層解析
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木恭一
2. 発表標題 無冷媒 14 T, 1.5 K クライオスタットの導入と電気抵抗標準の測定
3. 学会等名 日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木ノ原佑真、秋保貴史、入江宏、小野満恒二、村木康二、鈴木恭一
2. 発表標題 InGaSb/InAsトポロジカル絶縁体を用いたゲート生成p-n接合の電気伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2022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