

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤優樹
論文題目	化合物半導体 InSb を用いた放射線検出器の動作特性に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は化合物半導体InSbを母材とした放射線検出器の動作特性を把握することを目的として実施した研究において、得られた成果をまとめたものであり、6章からなっている。 はじめに第1章では、InSbの持つ放射線検出器母材としての利点、及び研究遂行の意義を述べた。 第2章では、現在市販されているチョクラルスキー法（Czochralski method: CZ）で育成されたInSb結晶を上回る高品質結晶の育成を目的とした、ゾーンメルト法（Zone melting method: ZM）、及び液相エピタキシャル成長法（Liquid phase epitaxial method: LPE）によるInSb結晶の育成について述べた。加えて、各々の電気的特性（キャリア密度、比抵抗、キャリアのHall移動度）を測定して市販CZ結晶と比較した。LPE結晶はキャリアの移動度が小さいことを除けば、市販のCZ結晶に比べて比抵抗が大きく、加えてキャリア密度が小さいという利点が示された。一方で、ZM結晶はキャリア密度が大きく、また、結晶性が良くないことが示唆された。 第3章では、第2章で育成したInSb結晶を用いた検出器の製作プロセスを記述した。製作した検出器は、金属 - 半導体接触を採用したショットキー型であり、金属 - 半導体接触についても簡単に説明した。また、CZ結晶、ZM結晶、及びLPE結晶より製作した検出器の電流-電圧特性から、検出器のダイオードとしての抵抗値を算出した結果、LPE結晶とZM結晶より製作した検出器では、共にCZ結晶を用いた検出器よりも抵抗値が大きかった。 第4章では、製作したInSb検出器の動作特性を把握するために、²⁴¹Amからのα粒子と、¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ²⁴¹Amからのγ線を検出器に入射し、得られた実験結果の比較を行った。比抵抗が大きく、加えて不純物密度が小さいLPE結晶で製作した検出器は、ZM結晶、CZ結晶で製作した検出器に比べてエネルギー分解能が優れており、²⁴¹Amのα粒子に対して3%（@ 4.3 K）であった。 さらにこの検出器において、漏れ電流を低下させるために検出器構造の改良を行った結果、²⁴¹Amのα粒子に対するエネルギー分解能が1.8%（@ 42 K）に向上した。一方で、市販のCZ結晶より製作した検出器のエネルギー分解能は5%（@ 4.3 K）であり、結晶の多結晶化が示唆されたZM結晶では分解能が悪く24%（@ 4.3 K）であった。ZM結晶とCZ結晶は、検出器の出力パルス波形に電子の寄与のみが観測されたのに対し、LPE結晶は電子と正孔、両方の寄与が観測されており、正孔の消失が少なく良好な結晶性が窺えた。 このLPE-InSb検出器を用いて、²⁴¹Amのα粒子入射に対する動作特性の温度依存性を測定した。その結果、検出器の出力波高は動作温度40 K以上において急激に低下した。この現象について、α粒子入射によって空乏層内に生成された電子と正孔が、結晶内に熱励起するキャリアと再結合すること、および捕獲により減少することのモデル式を			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤優樹
作り，実験結果を再現した．また，モデル式によると温度上昇に伴う出力波高減少の主な原因は，結晶内に熱励起するキャリアとの再結合による損失であることが明らかとなり，結晶中の不純物密度を一桁低減できれば，77 Kにおいて，10 K以下における出力波高の90%程度の出力波高で動作することが示された． 一方で，α粒子と異なり，透過力の高いγ線に対する出力波高は，空乏層のみでのエネルギー付与では説明できなかった．そこで，空乏層を含むLPE-InSb結晶全体を有感層とし，結晶内の各位置における電荷収集効率を計算して出力波高を見積もった．その結果，γ線入射により検出器電極に誘起される電荷量と，検出器の出力波高との間に比例性を見出した．加えて，LPE-InSb結晶のように結晶性に優れ，かつ不純物密度が小さい高品質結晶では，空乏層だけでなく空乏層の外部に生成した電子・正孔対も出力波高に寄与することを明らかとした．しかし，結晶内における電荷収集効率が一定でないために，γ線の光電ピークが形成されないことも明らかとなった． 第5章は，今後の展開について記載した．光電ピークが観測できない理由は結晶内における電荷収集効率が一定でないことが原因であるため，解決策として，空乏層以外の領域を除去して電荷収集効率が一定な領域（空乏層）のみを残すことが考えられる．しかし，現状の信号雑音比（S/N）では，特性X線のエネルギー領域のX線による出力信号を，ノイズと識別することが難しい．そこで，検出器のS/Nの向上のために，複数のInSb検出器を直列に接続することを検討した．検出器の直列接続は超電導トンネル接合検出器において実施例があり，検出器の実効的な静電容量を低減してS/Nを向上でき，加えて有効面積を大きくできるという利点がある． しかし，半導体検出器を直列に接続して使用した前例がないため，はじめに2個のInSb検出器を直列接続したものにα粒子を入射し，動作テストを実施した．その結果，α粒子の検出が可能であり検出器として動作することを確認した．また，検出器の総面積に応じて検出効率も向上できることがわかった．この直列接続型InSb検出器に関しては，現在，検出器としての動作が確認された段階であり，今後S/Nに関する議論を要する． 最後に，第6章において各章の結果を総括した．InSbを母材とした放射線検出器の動作特性についてまとめた文献は本論文を除いて他になく，これに記した知見は，既存の検出器性能を上回る性能を持つInSb放射線検出器の開発を行う上で，有益な情報であると考えられる． なお，冗長を避けるため，放射線（測定），及び半導体に関する基礎知識に関しては本文中での説明を省略し，論文末尾の付録A，付録Bにそれぞれ記載した．			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は化合物半導体 InSb を母材とした放射線検出器の実用化を目指し、その動作特性を把握することを目的として実施した研究において、得られた成果をまとめたものである。本研究によって得られた主な成果は次のとおりである。

1. 液相エピタキシャル (LPE) 成長法により育成した InSb 結晶は、市販品やゾーンメルト育成結晶に比べて高品質であり、この LPE 結晶より製作した放射線検出器は他の結晶から製作したものに比べて漏れ電流が少なかった。加えて、 ^{241}Am の α 粒子に対するエネルギー分解能も他と比較して優れていた。これらの結果より、LPE 法が放射線検出器母材としての InSb 結晶の育成に有用であることが示された。
2. この LPE- InSb 検出器を用いた ^{241}Am の α 粒子入射実験において、空乏層内に生成された電子と正孔が、結晶内に熱励起するキャリアと再結合すること、および捕獲により減少することのモデル式を作り、出力波高の温度依存性を説明した。また、結晶中の不純物密度の低減が、出力波高の温度依存性を小さくするために必要であることを明らかにした。
3. γ 線入射に対して、空乏層を含む LPE- InSb 結晶全体を有感層とする電荷収集モデルを考案し、 γ 線入射により検出器電極に誘起される電荷量と、検出器の出力波高との間に比例性を見出した。加えて、空乏層だけでなく、空乏層の外部も有感層として動作することを明らかにした。しかし、空乏層外における電荷収集効率が一定でないために、 γ 線の光電ピークが形成されないことも明らかとなった。
4. 複数の検出器の直列接続は超電導トンネル接合検出器において実施例があり、検出器の実効的な静電容量を低減して信号雑音比を向上でき、加えて有効面積を大きくできる。これに倣い、直列接続型 InSb 検出器の製作を検討した。本研究では、実際に 2 個の InSb 放射線検出器を直列に接続し、 ^{241}Am の α 粒子を用いて動作テストを行い、直列接続型 InSb 検出器が動作することを確認した。

InSb を母材とした放射線検出器の動作特性について本論文に記した知見は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。