

氏名 糸 賀 賢 二

学位（専攻分野） 博士（理学）

学 位 記 番 号 総研大甲第40号

学位授与の日付 平成5年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 AlGaAs-GaAs超格子半導体を用いたフォトカソードに
よる偏極電子源の開発

論文審査委員 主 査 教 授 小早川 久

教 授 高 田 耕 治

助教授 吉 岡 正 和

助教授 横 谷 馨

助教授 森 義 治

教 授 小 方 厚

(高エネルギー物理学研究所)

助教授 柿 崎 明 人 (東京大学)

助教授 中 西 彊 (名古屋大学)

論文内容の要旨

本編で述べる偏極電子源は Japan Linear Collider (JLC) の電子源の一つとして開発されている。JLCとは全長25km, 重心系のエネルギーは500GeV (第1期計画) の電子陽電子線形衝突型加速器である。

偏極電子源を得る方法として光電子放出、電界放射、イオンの光電離等がある。電界放射やイオンの光電離は高い偏極度が得られるが電流値はせいぜい100nA程度しか得られない。それに対してGaAsを用いた光電子放出による方法は電流値が20 μ Aと大きいこと、偏極の反転が円偏光の左右の反転で切り換えられること、電子ビームのエネルギー幅が0.1eV以下であること、室温での動作が可能であること等電子銃への応用として利点が多い。ただ欠点は偏極度が最大50%と低いことであるが、これは価電子帯の縮退のためであり縮退を解くことにより100%の偏極度を得ることが期待される。

縮退を解く方法として1970代から歪み結晶、超格子、カルコパイライトの3種類の方法が考えられるが、我々の場合AlGaAs-GaAs超格子を選んだ。

我々の目標はJLCの偏極電子源として用いることで、高偏極度ばかりでなく量子効率も高くなければならない。現在の計画では電流は1Aで50nsのパルスで取り出し、サブハーモニックバンチャーで短パルス化する。この時のレーザーの波長を750nmとすると、量子効率が 1×10^{-2} であれば200Wのレーザーパワーで済む。我々の実験でもバルクのGaAsで 2×10^{-1} の量子効率を得られているので量子効率 1×10^{-2} は到達できる範囲であろう。

より高い偏極度と量子効率を得るために、まず超格子全体の厚さに対する依存性について調べた。1次元拡散モデルを適用し、厚さ0での偏極度を外挿すると75.5%という結果を得た。これは表面のバンドベンディング領域で大きく減偏極しているか、光励起された時点ですでに100%になっていないことを意味している。

そこで表面状態をいろいろ変えて、偏極度の測定を行った。しかし最大偏極度は表面の状態にはほとんど影響されないことが分かった。残る可能性はバンドミキシングにより光励起時に100%偏極していないことである。これを調べるためには超格子の円偏光フォトルミネッセンスを測定するのが直接観測なるが今回は円偏光フォトルミネッセンス実験の結果と良い一致を示す計算方法を用いて見積ることにした。

不純物ドーピングは本来電子を取り出し易くするため、表面の NEA 処理によるバンドベンディングを作り出すという目的に使われていた。しかし 10^{18}cm^{-3} というドーピング量はキャリアの移動度を考えた場合多すぎる。そのため我々は表面のみ高ドーピングで中を低ドーピングにするという変調ドーピングを試みた。その結果不純物準位からの遷移がなくなり、偏極度の短波長シフトという現象が起こることが分かった。これは最大偏極度は変えないが量子効率を大幅に良くするという効果がある。

またカソードの質を比較するために、figure of merit $F=(\text{偏極度})^2 \times (\text{量子効率})$ という量を定義した。そして figure of merit は超格子の厚さにはほとんど依存せず、内部のドーピング密度に大きく依存、低密度にするほど良いことが分かった。このように半導体内部のドーピングを下げた figure of merit を良くする方法は我々のオリジナルのアイデアである。

結果として一番よい figure of merit を示したのは厚さ $0.4\mu\text{m}$, 10^{-16} ドーピングのサンプルで $755\text{-}766\text{ nm}$ の波長に対し 63.8% であった。この時の量子効率は 1.2×10^{-3} で、目標値の約 10 分の 1 である。最大偏極度を与えたのは厚さ $0.1\mu\text{m}$, 10^{-17} ドーピングのサンプルで $765\text{-}800\text{ nm}$ の波長に対し 74.8% であった。

論文の審査結果の要旨

高エネルギー物理学実験あるいは物性研究において高いスピン偏極度の電子源は非常に重要な役割をはたす。糸賀賢二君が博士論文として行った研究は、偏極電子源の素材としてGaAs系超格子半導体（AlGaAs-GaAs）を用い、従来50%を超えられなかった偏極度が、75%という高い値を初めて得たというものである。この論文では高いスピン偏極度を得た方法とその理由、さらに100%にならない理由すなわち超格子内部での減偏極の原因を探るため、①超格子厚さの効果、②表面構造の効果、③不純物の効果について実験的に調べ、それらのデータをもとに理論的に分析したものである。

実験は円偏光のレーザー光線を条件を変えて製作した超格子半導体素材に照射して偏極電子を取り出し、その偏極度と量子効率を測定したものである。入射光用レーザーとしてはチタンサファイア系を用い、700-800nmの範囲で波長を変えて測定した。表面での減偏極については表面不純物ドーピング量による違い、および最表面層の種類とその厚さによる違いを調べた。また超格子全体の厚さ、不純物ドーピングの量による量子効率、偏極度についてそれぞれレーザー光の波長を変えて測定した。

これまでにこのような高い偏極度を得た例はなく、したがってこのように系統的に測定した実験データも当然皆無であった。糸賀君はこれらのデータをもとに理論的な分析を行い、超格子半導体内部での電子の光励起、スピン偏極度の低下の過程などを明確にした。これらのデータおよび分析によると、励起された電子の偏極度は最初から100%以下であること、そして超格子半導体の最大の利点、諸条件を微細に制御できるということを生かして最適化をはかることで、さらに高い偏極度を得る余地があることを示唆した。

以上のように糸賀賢二君は、GaAs系超格子半導体による偏極電子源により、従来得られなかった高い偏極度の電子を得ることに成功した。そして、超格子の厚さ、不純物の影響等を系統的に調べてそのデータをもとに種々の分析を行った。この研究は、さらに高偏極度・高強度の電子源の実現のための貴重な材料であるとともに、半導体内部の偏極電子の振る舞いなど物性研究にとっても重要な知見を得たことになる。本論文は以上の研究をまとめたものであり、数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として相応しい内容を有していると判断した。さらに糸賀賢二君に対する博士論文にかかわる専門分野ならびに基礎となる分野の学識を口述により試験した。たとえば、半導体内部での光励起、偏極度低下の過程、不純物の影響など半導体物性の基礎的な事柄についての質問、電子源から取り出され加速された電子ビームの軌道およびスピンの振

舞い、偏極度の測定方法などの基礎的および専門的事項その他について種々の質問を行ったが、同君はそれらに的確に答えた。また糸賀君はこの研究と並行して、実用型の偏極電子源を設計・構築しており、優れた実験技能を発揮してきたことが伺われた。大規模かつ複雑な装置を構築し実験を成功させるには広い学識が必要であるが、一般物理学ならびに加速器物理学についても十分な理解と知識があることを示した。さらに超格子半導体による偏極電子源の研究の今後の展開に関しても深く考察しており、貴重な指針を示していた。また、糸賀賢二君は公開発表会による最終審査にも合格した。