



Title	高移動度半導体の超伝導近接効果に関する研究
Author(s)	川上, 剛司
Citation	大阪大学, 1994, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/38651
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed 大阪大学の博士論文について

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名 川上 剛司

博士の専攻分野の名称 博士(工学)

学位記番号 第11092号

学位授与年月日 平成6年2月18日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文名 高移動度半導体の超伝導近接効果に関する研究

論文審査委員 (主査) 教授 小林 猛

(副査) 教授 浜川 圭弘 教授 朝山 邦輔 教授 蒲生 健次

論文内容の要旨

本論文は、化合物半導体を用いた超伝導近接効果の実現、二次元電子ガスにおける超伝導近接効果の実証、およびこれを用いた超伝導三端子素子・トランジスタ動作の実現について述べたものである。

金属が超伝導体と電気的に清浄な状態で接続されたとき、超伝導電子・クーパ対は超伝導体から金属へ遷移し拡散する。この現象は超伝導近接効果といわれ、古くから知られていた。またこの金属部分を半導体に変えた、半導体結合の近接効果も高ドープされたシリコンにより実現されていた。このシリコンは金属とのバリアを低くするためp形が用いられたが、キャリアの移動度が小さいため超伝導のコヒーレンス長が短く、また極低温でキャリアの凍結を避けるため、そのキャリア濃度は $10^{19} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と金属的なものであった。

一方、デバイス面からはトンネル形ジョセフソン素子にかわる安定で制御性のよい超伝導素子として、「超伝導三端子素子・トランジスタ」が切望されていた。半導体と超伝導体を結合させ、半導体素子と同様の制御概念で超伝導電流が制御できる半導体結合超伝導素子はその一つの候補であった。

このような状況のもとで本研究は行なわれ、まずキャリア濃度がいわゆる半導体領域のもので超伝導近接効果を実現すること、次いで量子井戸や変調ドープのような優れた半導体結晶が超伝導素子に適用できるよう二次元電子系における超伝導近接効果を確認することが目的とされた。さらに実際に超伝導電流の電気的制御が可能であるかどうかを確認することであった。

上記の目的のために、半導体として狭エネルギーギャップ・高移動度半導体が検討され、まずn形InAsにおいて超伝導近接効果が確認された。次いでp形InAsの表面反転層を用いた二次元電子系においても超伝導近接効果が起きることが初めて実証され、この系が二次元に修正された近接効果理論に従うことが確認された。さらに電界効果により超伝導電流の制御、即ち超伝導近接効果の制御ができることが本研究により世界で初めて示された。最後に将来への発展形としてエピタキシャル成長層を用いたもの、半導体として最も移動度の大きいn形InSbを用いたもの、超伝導体として転移温度の高いNbNを用いたものが検討された。

本論文はこのような一連の研究について、その結果をまとめたものである。

各章のまとめ

2章では、半導体／超伝導体接合において超伝導近接効果により接合間に超伝導電流の流れる原理を理解し、実際に超伝導電流を確認するための基礎となるべき事象について検討した。近接効果系およびAndreev反射系を取り扱うために、超伝導の微視的理論面から半導体接合系を考察した。実際の半導体結合系では半導体の超伝導体界面、および半導体内自身の両者が関係するため、この両方について半導体材料を比較した。そしてこの系に用いるべき半導体の条件を明らかにした。また超伝導電流の電界及び電流による制御原理とその可能性について述べた。

3章では、化合物半導体を用いた超伝導素子の構造と作製法について述べた。プレーナ形では短チャネル電極の形成、表面ダメージの除去を考慮し、シャローエッティング、表面クリーニング、Nb 斜め蒸着、リフトオフの工程を採用した。この方法により実際に超伝導電流を得ることができるようになった。サンドイッチ形ではヘテロエピ接合の選択エッティングによる作製法を採用した。このタイプでは超伝導電流が得られなかったが、これは GaAs チャネルによるものと考えられる。この作製法は選択エッティングが可能な全てのヘテロ接合系に適用できる。

4章では n 形 InAs を用いた半導体結合超伝導素子について、半導体／超伝導体界面の問題点を明らかにし、その対策を行なうことにより実際に超伝導電流を得ることができることを示す。また素子長依存性、温度特性等を明らかにするとともに、基板キャリア濃度依存性を確認した。これらの結果からコヒーレンス長、Nb/InAs 界面での境界条件についてのいくつかを決定することができた。Nb/InAs/Nb 接合は、化合物半導体を用いて実現された最初の超伝導素子で、以後二次元電子系、MD 系、QW 系へ発展し、また超伝導三端子素子実現への出発点ともなった。本素子は高融点金属 Nb を超伝導体として使用した最初の半導体結合超伝導素子でもあり、以後超伝導体 Nb と化合物半導体 InAs およびその混晶の組合せからなる半導体結合超伝導素子は、広く作製され研究されるに至った。

5章では p 形 InAs 表面に形成されている、表面反転層を用いた半導体結合超伝導系についての結果について述べる。本系は二次元電子の近接効果としては初めて確認されたものである。極低温・低次元系でおきる局在とこの超伝導性は正反対の性質ともいべきもので、この点からも興味あるものであった。結局、二次元系においても超伝導近接効果理論が適用できることができることが示された。本素子ではチャネルが表面の pn 接合により電気的に分離されており基板への常伝導リーケ電流がないため、n 形 InAs 基板素子にくらべ $I_c R_n$ 積が大きく特性上有利なものであった。従ってエピタキシャル成長による p 形 InAs 上の n 形 InAs が使用できるまで、以後の三端子素子の研究にはこの系が用いられた。

6章では半導体結合の近接効果系において、MIS 電界効果形の三端子動作を確認した。これは超伝導現象が電界により制御できることを表しており、半導体デバイス制御の概念がそのまま超伝導にも適用できることを示した最初のものである。この結果は半導体材料、超伝導材料によらないものと考えられ、従ってこれらの条件を改善し最適化していくことができる。InAs を用いた現在の制御性は非常に悪いが、これは MIS 形では化合物半導体の表面特性の悪さを直接反映しているためである。準粒子注入形についても超伝導電流の制御を確認した。

7章では、将来への発展形として InAs ホモエピタキシャル層を用いたもの、化合物半導体中最も移動度の大きい InSb を用いたもの、超伝導電極 Nb に変えて NbN としたもの等を検討した。

8章では全体のまとめがなされる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、世界に先駆けて行われた高移動度 III-V 族化合物半導体の超伝導近接効果現象に関する理論および実験的検証等、一連の基礎的研究成果をまとめたものである。

超伝導近接効果のコヒーレンス長に対する理論検討において、半導体キャリヤの高移動度性の有効性を指摘、さらに表面反転層の低次元（2 次元）キャリヤに対する近接効果理論を樹立させて、“化合物半導体の超伝導近接効果”という新しい領域に先鞭をつけた。

実験的検証において、化合物半導体に p 形、n 形 InAs を選択したことが成功の鍵につながった。高度なプロセス技術の確立により、従来から困難視されてきた Nb/InAs の超伝導コンタクトを見事に成功させた。この報告に刺激されて国内外の多くの研究機関で追試実験が開始されたことは、まだ記憶にあたらしい。極めて高い実験再現性に支えられて研究は大きく前進し、基礎理論研究グループにデータ提供するとともに、近接効果理論に関する旧来モデル概念の修正の必要性を指摘した。

2 次元電子系の超伝導近接効果の成功は更に大きなインパクトを与える結果であった。p 形 InAs の表面には自然反転層ができており、そこには理想的な 2 次元電子ガスが存在している。Nb コンタクトにより、この電子ガスの超伝導転移に成功し、理論予測との良い対応を得た。この成果に基づき、現在では HEMT 構造量子井戸内 2 次元電子ガスの超伝導近接効果が各所で確認されるようになった。

上記の新しい超伝導近接効果に MOS 形電界効果を加えた画期的なトランジスタ構造を試作し、近接効果超伝導電流の変調実験も併せて行った。

以上の研究成果は半導体／超伝導体複合エレクトロニクスの基礎研究および応用研究に貢献するところが多大であり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。