

卒業論文

GaAs二次元電子系への超伝導接合の作製

指導教員：大岩 顕 教授

2018年2月17日

学籍番号 08D14160

氏名 吉原 拓哉

大阪大学工学部電子情報工学科
量子電子デバイスコース
量子システム創成研究分野

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	研究背景	3
2.1	超電導接合	3
2.1.1	超伝導基礎	3
2.1.2	ジョセフソン効果	3
2.1.3	Andreev反射	3
2.1.4	近接効果	4
2.2	半導体メゾスコピック系と超伝導体接合	4
2.2.1	ナノワイヤと量子ドットとの接合	4
2.2.2	2次元電子系との接合	4
2.2.3	GaAs2次元電子系との接合	4
2.3	二次元電子系/超伝導接合の先行研究	4
第3章	実験手法	5
3.1	試料作製	5
3.1.1	GaAsHEMT基板構造	5
3.1.2	試料のデザイン	5
3.1.3	微細加工プロセス	5
3.2	測定系	9
	謝辞	10
	参考文献	11

第1章

序論

1.1 はじめに

近年、量子物性分野ではトポロジカルな量子現象が注目されており、研究が盛んに行われている。歴史的背景としては1980年にvon Klitzingらによって量子ホール効果[1]から始まっており、これは2次元電子系において磁場中で測定されるホール伝導率が量子化される現象であるが、これがトポロジカルな量を持っている。そして2007年にKaneらによってトポロジカル絶縁体[2]が提唱され、発見までに至っている。トポロジカル絶縁体とはバルク部が絶縁体であるが、表面では金属的な性質を持っている物質であり、表面での電子の伝導状態は不純物の影響を受けないことから次世代の低電力デバイスとして開発が期待されている。このトポロジーの理論的な発見が引金となり、量子ホール系にとどまらずトポロジカル量子状態の研究が多く行われるようになった。また、2011年には安藤陽一教授らによってトポロジカル超伝導体[3]が確認され、こちらも同様に内部では超伝導状態であるが、表面ではギャップレスな状態をとる。また、表面での電子がマヨラナ粒子として振舞うことが理論的に予測されているが、発見までには至っていない。マヨラナ粒子とは粒子の反粒子が自身であるという特徴をもっており、擾乱によって量子情報が損失しないため、実現すれば量子コンピュータとしての応用が期待されている。このような背景から、古くからジョセフソン効果を軸に半導体中の近接効果や2次元電子中の臨界電流の電氣的操作などの研究が行われ、SQUID等で応用されてきたが、最近では、マヨラナ粒子の探求を目的とした、2次元電子系の超伝導を伴う量子ホール状態などの接合特性を解明を行い、高磁場に耐えうる高速操作可能な良好な超伝導接合の開発を目指した研究が多く行われている。

1.2 研究目的

最近では、GaAs量子井戸における近接効果の研究で、アンドレーエフ反射が多くのグループで確認されており、注目されている。GaAsはInAsに比べてバンドギャップの中心付近にフェルミエネルギーが分布しているため、高いショットキー障壁を構築しやすく、またInAs臨界磁場が数十mTであるのに対して、GaAsが十数Tと大きく異なり、高磁場でははっきりとした超伝導と量子ホール効果の相関が確認された。

[4] 今回行う研究ではこの先行研究に基づいて、実際に、新たに超伝導電磁石で使われているNbTiをGaAs二次元電子系と接合し、その接合特性の評価を行うことで今後、超伝導を接合したデバイスを作製する上で有用になると考えている。超伝導を接合したデバイスの作製において、まず接合界面を良好以上を踏まえて、本研究では以下の2つの課題に取り組んだ。

- 四端子測定用のサンプルを作成し、超伝導そのものの電気伝導特性を評価した。
- 超伝導間の距離が $1\mu\text{m}$ 程度のジョセフソン接合を作製し、GaAs二次元電子系における超伝導接合の電気伝導特性を評価した。

1.3 本論文の構成

本論文は全6章で構成されている。第2章では、超伝導接合の基本的な理論からそれに関する先行研究について述べる。第3章では、GaAs二次元電子系の超伝導接合の試料作製や、測定系や測定方法について述べた。第4章ではNbTiの四端子測定を行い、その結果と考察を述べた。第5章ではGaAs二次元電子系における超伝導接合の試料について測定を行い、その結果と考察を述べた。第6章では、本研究を総括し課題について述べた。

第2章

研究背景

2.1 超電導接合

2.1.1 超伝導基礎

超伝導は臨界温度以下で抵抗が零になる完全導電性と外部磁場中の超伝導体の内部において磁束密度が零になる完全反磁性(マイスナー効果)がある。この現象は、1911年にH.K.Onnesによって実験的に発見され、1957年にはBardeen,Cooper,Schriefferによって提出されたBCS理論により理論的な説明がされた。この理論はフォノンを媒介とした電子間引力が働くことでクーパー対が形成され、それらが凝縮することで超伝導としての性質が現れることが示された。また、凝縮したクーパー対は巨視的位相が揃っており、これを反映する重要な効果が以下に示すジョセフソン効果である。

2.1.2 ジョセフソン効果

ジョセフソン効果とは2つの超伝導体の間に絶縁体の薄膜を挟み込むことで、クーパー対がトンネル効果によって他の超伝導体に流れる現象であり、この電流をジョセフソン電流という。またこの効果を示すトンネル接合をジョセフソン接合という。この接合系ではそれぞれの超伝導体が巨視的な位相を持っており、位相を ϕ_1, ϕ_2 とするとジョセフソン電流 j は次式(2.1)のような関係がある。

$$j \propto \sin(\phi_2 - \phi_1) \quad (2.1)$$

また、一般的なジョセフソン接合では絶縁体が用いられるが、常伝導金属、半導体においても基本的には成り立つ。

2.1.3 Andreev反射

超伝導体(S)に常伝導体(N)を接合させたSN接合においてAndreev反射がみられる。これは超伝導ギャップよりも低いエネルギーで常伝導側から入射した電子が超伝導体の中にクーパー対となって入り、代わりに常伝導体側に正孔が反射される現象である。それぞれの部材でBogoliubov-de Gennes方程式^[1]を解くことで分散関係が得られ、波動関数にポテンシャル障壁等の境界条件を与えることで、反射率を求めること

ができる。また、Blonder,Tinkham,Klapwijk (BTK)理論に当てはめることで伝導度等の輸送特性が得られる。

2.1.4 近接効果

2.2 半導体メゾスコピック系と超伝導体接合

2.2.1 ナノワイヤと量子ドットとの接合

2.2.2 2次元電子系との接合

2.2.3 GaAs2次元電子系との接合

2.3 二次元電子系/超伝導接合の先行研究

第3章

実験手法

3.1 試料作製

3.1.1 GaAsHEMT基板構造

本研究で使用した基板は住友電気工業株式会社製のGaAsAlGaAs高移動度二次元電子(No.501672HEMT)基板を用いた。特性表は以下の通りである。また、四端子測定で用いたダミー基板はバルクのGaAs基板である。

表3.1: 本研究に用いた基板の特性表

構造	ドーピング濃度(cm^{-3})	ドーパント	膜厚(\AA)	Al組成
GaAs	—	—	50	—
N-AlGaAs	1.0E18	Si	650	0.265
AlGaAs	—	—	300	0.265
GaAs	—	—	8000	—
GaAs基板	3^n GaAs 導電型:半絶縁 厚さ:600 μm 直径:76mm 面方位:(100) $\pm 0.5^\circ$			

3.1.2 試料のデザイン

2次元電子系での超伝導を調べるための適切な試料構造を設計した。図3.1のようにメサ上に数 μ の間隔をもった2つの超伝導体を蒸着させ、オーミック接触により2次元電子へコンタクトをとることができ、SNS接合を形成できる。これにより、超伝導ギャップ内外に多重反射等に起因する特徴的な電流電圧特性が現れ、様々な情報が得られる。

3.1.3 微細加工プロセス

基本的にCAD図形ソフトを用いてナノスケールの電極パターンを設計し、電子線リソグラフィー、フォトリソグラフィーの技術を用いて露光し、現像後に、ウェットエッチングまたは電子線蒸着装置を用いて金属電極を蒸着させるプロセスを繰り返すことで試料作製を行った。

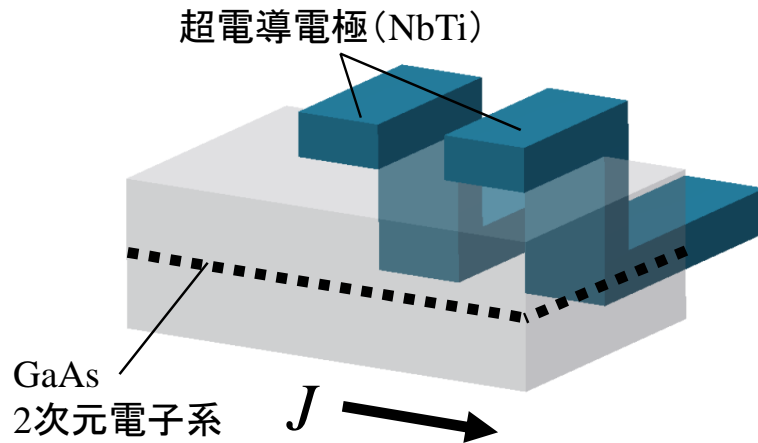


図3.1: 作成したSNS接合の概略図

以下に各プロセスに共通する基本的な工程を述べたのち、試料作製の工程を説明する。

基本的な工程

1. 基板洗浄

アセトン2回、IPA1回各5分ずつ入れ、窒素ガスで乾燥させ、110℃のホットプレートで10分間乾燥させる。

2. レジスト塗布

レジストを基板に滴下し、スピncerを用いてレジストの厚さを均一にする。スピncerの条件は次の通り。(500rpm 5秒、slope 5秒、4000rpm 50秒、slope 5秒、end) その後、基板の裏についたレジストをアセトンで拭きとる。

3. プリベーキング

レジストを固化させるためにホットプレートで加熱する。各レジストにおける条件は以下の通り。(PMMA 180℃ 3分、S1813 115℃ 3分、LOR 180℃ 5分)

4. 露光

超電導電極等の細かいパターンは電子線描画装置(以下EB)で露光し、それ以外の大きなパターンはLED描画装置(以下LED)で描画を行った。

5. 現像

露光されたレジストを現像液に浸けることにより分解して取り除いた。本研究では、PMMAの現像にはメチルイソブチルケトン(MIBK) とIPAを1対2の割合で薄めたものを10度に冷やし、2分程度入れ、その後、

IPAに1分入れ、現像を止める。またLORとS1813の2層レジストではNMDに90～120秒間入れた後、純水の入ったビーカーにくぐらせ、ある程度洗い流した後、別の純水の入ったビーカーに1分入れ、現像を止める。

6. 蒸着

まず、表面に有機物が付いている可能性があるので、10%の希硫酸に30秒入れ、その後純水で3～5分程度洗浄した。真空状態の蒸着装置中で原料に電子線を当て、膜厚計で所望の膜厚になるまで原料を蒸着した。

7. エッチング

基板のエッチングは全てウェットエッチングを用いた。ウェットエッチングでは基板をエッチング液($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:160$)に入れ、恒温槽で 10°C に保ちながらエッチングを行う。適当な時間で基板を取り出し、接触式の段差計でレジスト表面からの深さを計測しながらレートを出し、再度エッチングを行う。所望の深さになるまで繰り返す。これにより、レジストの無い部分のみ化学的に溶解していく。

8. リフトオフ

110°C に加熱したN-メチル-2-ピロリドン(NMP)に15分入れた後、アセトンのスプレーを4方向から数回吹き付け、残った金属を取り除く。

試料作製の工程

1. 位置調整用マーカー作製

PMMAを塗布し、EBで図3.2のパターンを描画後現像を行った。電子線蒸着装置を用いてTi(20nm),Au(180nm)の蒸着を行った。このパターンを四隅に配置することで以降での工程で描画装置との位置調整でナノオーダーの精度を出すことができる。

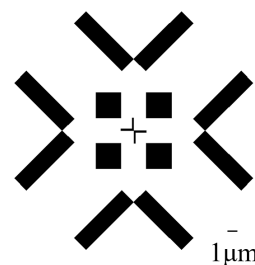


図3.2: 位置調整マーカー

2. メサエッチング

S1813一層のレジストにし、LEDで図3.3のパターンを描画後、現像を行った。エッチング液に浸し、深さが300nmになるようにエッチングを行った。リフトオフ後、再度測定すると約270nmだった。

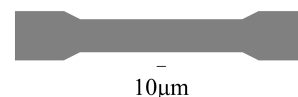


図3.3: メサ

3. ブリッジの作製

ブリッジとは図3.4の(a)図のように超伝導電極とボンディングパッドを繋ぐ部分である。レジストは2層のPMMAであり、EBでパターンを描画後、現像を行った。電子線蒸着装置を用いてTi(10nm),Au(90nm)の蒸着を行った。

4. オーミックコンタクトの作製

これは図3.4の(a)図のようにメサとのコンタクトをとる部分である。LORとS1813の二層のレジストにし、LEDでパターンを描画後、現像を行った。希硫酸処理はせずに抵抗加熱式蒸着装置を用いてAuGe(200nm),Ni(30nm)の蒸着を行った。

5. ボンディングパッドの作成

LORとS1813の二層のレジストにし、LEDで図3.4の(a)図のようにパターンを描画後、現像を行った。希硫酸処理はせずに電子線蒸着装置を用いてTi(20nm),Au(200nm)の蒸着を行った。

6. 超伝導電極の作製

HEMT基板のレジストは2層のPMMAであり、ダミー基板はLORとS1813の二層のレジストにし、EBでパターンの描画後、現像を行った。希硫酸処理はせずに電子線蒸着装置を用いてそれぞれの基板の半分のパターンのみAuGe(40nm)の蒸着を行い、理化学研究所でAl,NbTiの蒸着を行った。この超伝導パターンは一つのメサに対して3組の2対の超伝導電極を配置し、合計で6組の超伝導電極を作製した。図3.4の(b),(c)は全ての超伝導パターンを表しており、超伝導間の距離は(b)の左から2,0.3,0.6 μm ,(c)の左から0.6,2,2 μm である。

7. アニール

アニールすることで、メサのバイアス部の電極と超伝導電極が2次元電子系とのオーミックなコンタクトをとることができる。

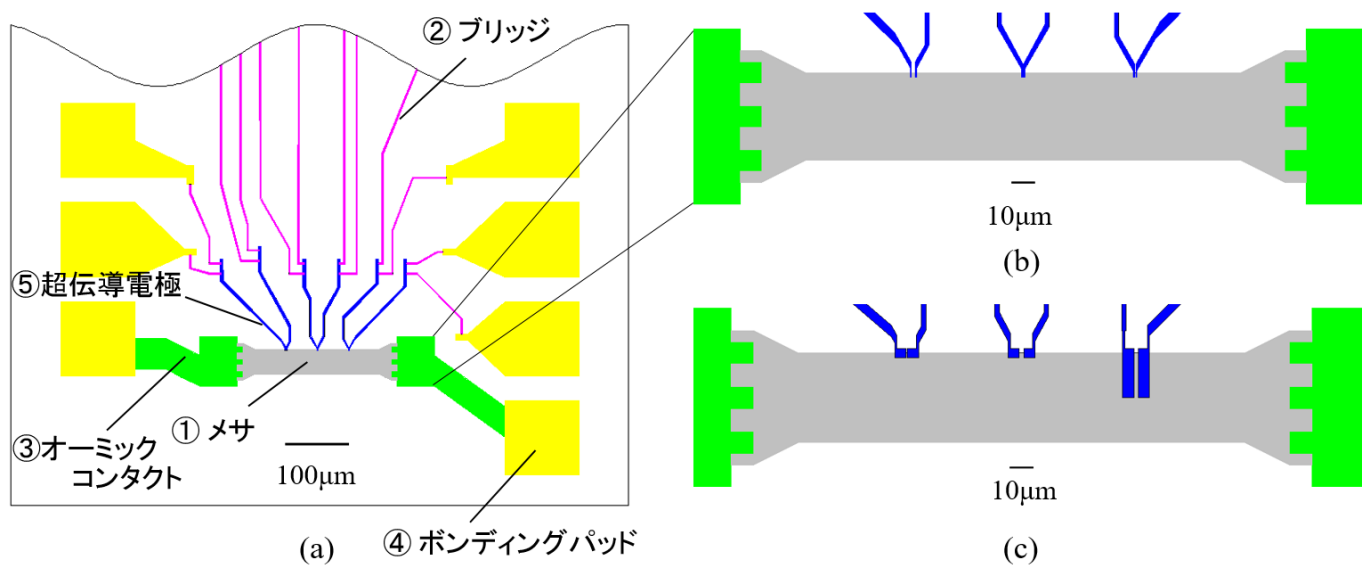


図3.4: 超伝導電極

3.2 測定系

謝辞

本研究は大阪大学工学部電子情報工学科量子電子デバイスコースの卒業研究として行われたものです。本研究を行うにあたり多くの方々のご協力を賜りましたことを深く感謝申し上げます。本研究は大岩顕教授、木山助教授の指導のもと行われました。大岩教授からは研究の進捗状況を見て、適切にご指導を頂きました。また木山助教授からは基本的な作製プロセス、測定を含め、全体を通してご指導を頂きました。また、サンプル作製においても様々な方にお世話になりました。特に産業科学研究所の松本研究室、大阪大学ナノテクノロジー設備供用拠点の装置を使用させていただきました。また、超伝導電極の蒸着をしていただいた理化学研究所のDEACON Russell Stewart研究員にも感謝申し上げます。最後に日々の研究生活でお世話になった大岩研究室の方々にも感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K.v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 494
- [2] Liang Fu and C. L. Kane Phys. Rev. B 76 (2007) 045302
- [3] Satoshi Sasaki, M. Kriener, Kouji Segawa, Keiji Yada, Yukio Tanaka, Masatoshi Sato, and Yoichi Ando Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 217001
- [4] Zhong Wan, Aleksandr Kazakov, Michael J. Manfra, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West Leonid P. Rokhinson Nature Communications 6 7426 (2015)