

Title	半導体極微リングにおけるアハラノフーボーム効果
Author(s)	石田, 修一
Citation	大阪大学低温センターだより. 1987, 60, p. 13-16
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7108
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

半導体極微リングにおける

アハラノフーボーム効果

理学部 石 田 修 - (豊中4162)

1. はじめに

半導体デバイスの微小化は、超LSIの開発を目ざした微細加工技術の発展によって、近年、飛躍的 に進歩した。LSIのパターンの線幅は、今では、わずか1μm程度となり、さらに、光露光による微 細加工に代わるものとして、X線露光や電子ビーム、イオンビーム露光法のような新しい技術が研究さ れ、線幅が0.02μm程度のパターンの加工も可能になった。

このようなデバイスのプロセス技術を用いて作られた半導体や金属の徴細素子では、マクロな系では 見られなかった様々な量子現象が現れる。金属や半導体の実験結果によれば、電子の平均自由行程より 十分大きな試料でも、電子の波動性に起因する量子干渉効果が伝導現象に現れることが分って来た。こ のような系では、電子は不純物などによる弾性散乱と電子-電子相互作用や電子-格子相互作用などに よる非弾性散乱を受けるが、後者は磁気散乱などと共に、電子の位相干渉性をこわす原因のひとつであ る。したがって、これらの散乱に対する電子の位相緩和長(コヒーレンス長)こそが、量子干渉効果に 対する特徴的な長さを与える。しかも、このコヒーレンス長は、最近の徴細加工技術により作成可能な サイズにあたる0.1 ~1 µm程度であるから、この程度のサイズの試料を製作することにより、電子の 干渉効果に伴う多様な現象を観測することができる。こうした事実を背景にして、現在、金属の細線や 極徴リング、Si 一次元 MOS、GaAs 極微細線および GaAs・AlGaAs ヘテロ構造の細線や極微リン グなどの研究が急速に発展し、ここに、巨視的な系と微視的な系との中間領域として、"メソスコピッ ク (mesoscopic) 領域"という物理学の新しい分野が誕生することとなり、その成果はまた、微細素 子自体の評価の上でも欠くことのできないものとなっている。

われわれは、これまでに理学部邑瀬研と基礎工学部難波研との共同研究により、金属や半導体の極微 細線のアンダーソン局在や磁気抵抗のゆらぎの研究"を行って来た。本稿では、われわれが最近行った GaAs/AlGaAsヘテロ構造極微リングでのAharonov-Bohm効果(以下、略してAB効果)の実験" について述べる。

A B 効果と伝導度のゆらぎ

ここで述べるのは、物質中の電気伝導に現れるAB効果^{3,4}であるが、電子波の干渉効果を明確にす るために、はじめに真空中のAB効果にふれてみたい。いま、電子波が図1のような真空中の導波路に 沿って経路1および2のように分かれて進み、反対側で再び出会って一つの波になるとき、その地点で の電子の存在確率は、電子の位相差が二つの経路で囲まれた磁束に比例することから、干渉効果により、 リングを貫く磁束に対して $\Phi_0 = h / e$ (hはプランク定数、eは電子電荷)を周期として振動する。 これが、外村によって実証された真空中の電子線のAB効果⁹である。 金属や半導体で作られたリングでは、電子は不純物 や表面の粗さなどの弾性散乱や前述の非弾性散乱を受 けるために、果してAB効果が観測できるか自明では なかったが、IBMのWebb等は金属リングの実験に より"図1のリング内の経路で10⁴回もの弾性衝突が 起っている試料でも、そのサイズが非弾性散乱長より も小さければ、 Φ_0 や Φ_0 /2の周期の振動が明瞭に 観測されることを示した。ここで、 Φ_0 一振動は本来 のAB効果であるが、 Φ_0 /2一振動は図1で2つの 経路に分れて進む波が右まわりと左まわりとで一周し てもとの位置にもどって干渉し合う"弱局在"効果に Aharonov-Bohm Effect



図1:リング状導波路における電子波の千 渉、実線の矢印は、リングに磁束を 通したときのAB効果に対応した過 程を示す。

よるものである。従って、 $\Phi_0/2$ –振動が局在効果が抑制されるような高磁場域で消えるのに対して、 Φ_0 –振動は高磁場域まで減衰することなく持続する。また、これらの周期的振動が、非周期的ではあ るが再現性のあるゆらぎに重なっていることが分かった。この非周期なゆらぎは、リングを構成する細 線が完全な一次元ではなく、幅や厚み持ち、細線内で前述のAB効果と同様な干渉効果がランダムに起 こることに起因し、"伝導度の普遍的ゆらぎ"と呼ばれその大きさは、ほぼ δ G~e²/h=(25.8k Ω)⁻¹ となることが知られている。このような微細素子では、電子波の伝播する経路の数が限られてくること により、"メソスコピック領域"特有の現象として、ランダムな干渉効果が平均化されずに残ってしま うのである。"

3. GaAs/AlGaAs ヘテロ構造リングのA B効果

上記の金属リングでは、チャネル長Lがl。よりも十分長く、輸送現象は拡散型(diffusive)伝導によるが、GaAs/AlGaAsへテロ構造のような高易動度の半導体では、L≤l。となるような試料も作られるようになった。このような系では、伝導が弾道型(ballistic)に近づくために、新しい現象が期待される。

我々が微細加工に用いた薄膜は、半絶縁性GaAs基板上 にMBE(分子線エピタキシー法)により作成した、図 2のような厚さ600ÅのSiドープAlGaAs障壁層によ りサンドイッチされた膜厚100ÅのGaAsの二重ヘテ ロ構造である。この薄膜のキャリア濃度と易動度はそ れぞれ、 $n_s \sim 1.6 \times 10^{12}$ cm⁻²、 $\mu \sim 1.7 \times 10^4$ cm⁻⁷/V·sec であり、平均自由行程は $l_e \sim 3600$ Å、またド・ブロ イ波長は $\lambda_e \sim 200$ Åである。液体He温度での磁気抵 抗の2次元アンダーソン局在による解析"から得られ た l_{in} は $\sim 0.8 \mu$ mである。この薄膜の微細加工"によ り、外径約1 μ m、チャネル幅0.3 $\sim 0.4 \mu$ mのリング を作成した。細線の加工側面には、表面準位に起因す



GaAs-AlGaAs double heterostructure

図2:GaAs/AlGaAsヘテロ構造組線 の断面図。

斜線部はチャネルの部分を示す。



図3:極微リングの1.5Kにおける磁気抵抗。

R02:リングの一方の枝を切断した試料、R08:外径1.0μm、内径0.2μm のリング、R05:外径 0.9μm、内径 0.3μmのリング。

応して1/ Δ B~0、h/eを周期とするAB効果に対応 して1/ Δ B~ π r²/ Φ 。のところにピークが現れる (rはリング半径)。また、アスペクト比の小さなR08 の試料では、リングの半径方向の波のモード増えて電 子波同志のコヒーレンスが失われてくるために、 Φ 。 一振動の近傍に複雑な構造が現れている。R05につ いては、 Δ B~394Gより、リングの内径(0.15 μ m)に 近いr~0.18 μ mとなり(外径~0.5 μ m)、平均半径 には一致していない。この理由は明らかではないが、le が比較的長く(~0.36 μ m)、伝導が弾道型に近づいて いることに関係しているのではなかろうか。また、金 属リングと異なり、 Φ 。/2 –振動は未だ見つかって いない。

GaAs/AlGaAs系におけるAB効果の研究は今始

-15-

るキャリアの空乏層(幅~500Å)ができるので、実効 的チャネル幅は、さらに狭い。"図3に、三つの試料 の低温での磁気抵抗を示す。試料R02はリングの一 方の枝をわざと切断したもので、AB効果は現れず、弱 局在による負の磁気抵抗に非周期的ゆらぎのみが重なっ て見えている。試料R08とR05は、後者のアスペ クト比(リングの面積/穴の面積)が前者より大きい。 R05では、磁場依存性を詳細に見ると、Ф。=h/eを 周期とする振動がさらに重なっていることが分る。こ のことは、磁気抵抗のデータを図4のようにフーリエ 変換してみるとはっきりする。非周期的なゆらぎに対



図4:図3の磁気抵抗のフーリエ変換。 下の図の矢印のピークに対応する 周期はΔB~394Gであり、この 値に相当するリング半径はr~ 0.18μmである。

まったばかりであり、未だ未知の要素が多く、これからの進展が待たれる。とくにGaAs/AlGaAs系の徴細素子における量子効果の研究は、高速の量子効果デバイスの研究とあいまって、これから急速に 発展することが期待される分野である。

参考文献

- 1) 石田修一:固体物理 22(1987) 483.
- K, Ishibashi, Y.Takagaki, S.Ishida, K.Gamo, Y.Aoyagi, M.Kawabe, K.Murase and S.Namba:Abstracts of the 19th Conf. on Solid State Devices and Materials, Tokyo (1987)
 p, 363. ; ibid : to be published in Solid State Commun..
- 3) 前川禎通:固体物理 21 (1986) 25.
- 4) 伊沢義雅:応用物理 56 (1987) 741.
- 5) 外村 彰:科学 52 (1982) 552.
- 6) R.A.Webb, S.Washburn, C.P.Umbach and R.B. Laibowitz : Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 2696.; C.P.Umbach, C.Van Haesendonck, R.B.Laibowitz, S.Washburn and R.A.Webb : Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 386.
- 7) 蒲生健次:低温センターだより No.60 (1987)

*現 在:東京理科大学山口短期大学