

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. 60 P.13-P.16
Issue Date	1987-10
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/7108
DOI	
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 修一* (豊中4162)

1. はじめに

半導体デバイスの微小化は、超LSIの開発を旨と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 $1\mu\text{m}$ 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 $0.02\mu\text{m}$ 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微細素子では、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、最近の微細加工技術により作成可能なサイズにあたる $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 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、金属の細線や極微リング、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¹⁾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²⁾について述べる。

2. AB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⁵⁾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⁹⁾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 $\Phi_0/2$ 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 -振動は本来のAB効果であるが、 $\Phi_0/2$ -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。この非周期的ゆらぎは、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 $\delta\sigma \sim e^2/h = (25.8k\Omega)^{-1}$ 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。”

Aharonov-Bohm Effect

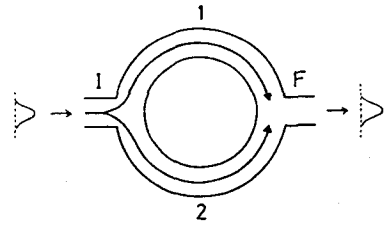


図1：リング状導波路における電子波の干渉、実線の矢印は、リングに磁束を通したときのAB効果に対応した過程を示す。

3. GaAs/AlGaAs ヘテロ構造リングのAB効果

上記の金属リングでは、チャンネル長Lが l_0 よりも十分長く、輸送現象は拡散型(diffusive)伝導によるが、GaAs/AlGaAsヘテロ構造のような高易動度の半導体では、 $L \leq l_0$ 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、 $n_s \sim 1.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 、 $\mu \sim 1.7 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ であり、平均自由行程は $l_0 \sim 3600 \text{Å}$ 、またド・ブロイ波長は $\lambda_0 \sim 200 \text{Å}$ 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¹¹⁾から得られた l_{in} は $\sim 0.8 \mu\text{m}$ である。この薄膜の微細加工¹²⁾により、外径約 $1 \mu\text{m}$ 、チャンネル幅 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 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

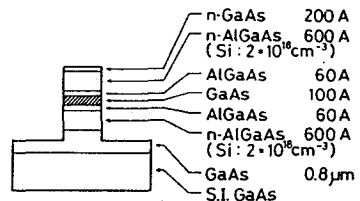


図2：GaAs/AlGaAsヘテロ構造細線の断面図。

斜線部はチャンネルの部分を示す。

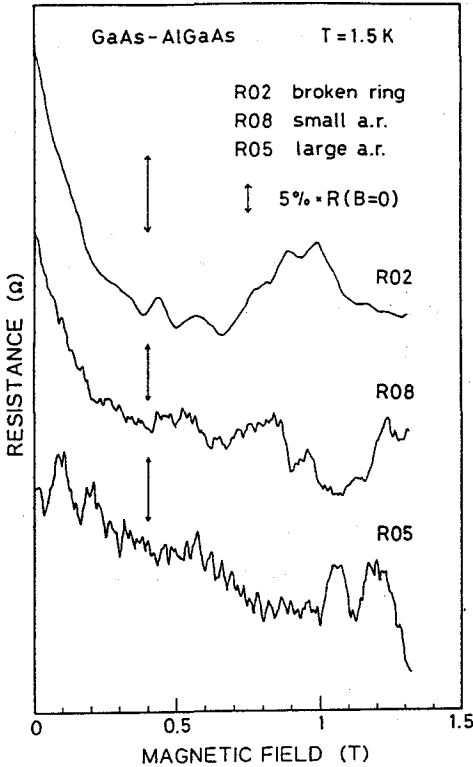


図3：極微リングの1.5Kにおける磁気抵抗。

R02：リングの一方の枝を切断した試料、R08：外径 $1.0\mu\text{m}$ 、内径 $0.2\mu\text{m}$ のリング、R05：外径 $0.9\mu\text{m}$ 、内径 $0.3\mu\text{m}$ のリング。

応して $1/\Delta B \sim 0$ 、 h/e を周期とするAB効果に対応して $1/\Delta B \sim \pi r^2/\Phi_0$ 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が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_0 一振動の近傍に複雑な構造が現れている。R05については、 $\Delta B \sim 394\text{G}$ より、リングの内径($0.15\mu\text{m}$)に近い $r \sim 0.18\mu\text{m}$ となり(外径 $\sim 0.5\mu\text{m}$)、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、 l_0 が比較的長く($\sim 0.36\mu\text{m}$)、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らうか。また、金属リングと異なり、 $\Phi_0/2$ 一振動は未だ見つからない。

GaAs/AlGaAs系におけるAB効果の研究は今始

るキャリアの空乏層(幅 $\sim 500\text{\AA}$)ができるので、実効的チャンネル幅は、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、 $\Phi_0 = h/e$ 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

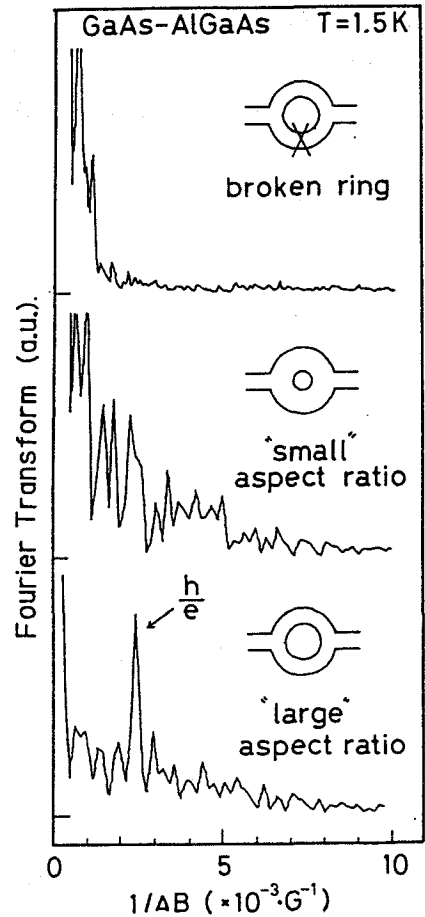


図4：図3の磁気抵抗のフーリエ変換。下の図の矢印のピークに対応する周期は $\Delta B \sim 394\text{G}$ であり、この値に相当するリング半径は $r \sim 0.18\mu\text{m}$ である。

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系の微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.
- 2) 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) 浦生健次：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