



Title	量子リング中の磁気誘起局在電子状態のマイクロ波伝導
Author(s)	藤井, 研一
Citation	大阪大学低温センターだより. 2008, 141, p. 16-20
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/8119
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

量子リング中の磁気誘起局在電子状態の マイクロ波伝導

理学研究科 藤井 研一

(現 大阪工大)

1 はじめに

量子リング構造は電子波の干渉が観測可能な系として注目を集めてきた。リング構造の2本のアームを通過する電子波の干渉条件はリング径内をよぎる磁束に依存し振動する。これはAharonov-Bohm(AB)効果として良く知られている^[1]。Webb^[2]による半導体での初めての観測以来、半導体の低次元電子系でのAB効果は、電子波の性質を理解する上で格好の研究対象ととらえられ、実験および理論両面から非常に多くの研究がなされてきた。

一方、孤立した量子リング構造もまた電子状態の新奇性で興味の対象となってきた^[3]。閉じた量子リング中の電子状態は円弧にそった長さ方向に量子化されるため、リング半径 R により量子化される。ここに磁場印加を行うと、電子の波動関数にはベクトルポテンシャルの影響による位相シフトが起こり、AB効果と同様に電子軌道が囲む面積をよぎる磁束 ϕ に依存して量子化される。このため、電子の量子化エネルギーは次の様に与えられる。

$$E_l = \frac{\hbar^2}{2m^*R^2} \left(l + \frac{\phi}{\phi_0} \right)^2 \quad (l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

ここで ϕ_0 は磁束量子である。このエネルギースペクトルは磁場により最低エネルギーを持つ状態が変化する。このため、基底状態でも角運動量 l が有限となり、リング中を電流が流れることになる。Lorke^[4]はInAs中の自己組織化量子リング構造の遠赤外吸収測定より、量子リングの最低エネルギーの移り変わりを実験的に観測した。このように、閉じた量子リングでは、リングの周回方向に回転する電子状態が存在することになる。一方最初に述べたように入り口と出口を持つ開いた量子リング構造では波動関数はリング中に局在することなく、リード部分に接続されたものとして考えることが出来る。それでは、リードに接続された量子リング構造中には、リングに局在した電子状態は存在できないのであろうか。またリードの大きさや形によって、リング中の電子状態はどのように局在した電子状態から乱されて行くのか。このような疑問を考えるために、我々は以下に述べる実験を行っている。

2 量子リング構造とマイクロ波伝導

量子リング構造はGaAsヘテロ構造試料上に電子線および紫外線リソグラフィとウェットエッチング法により作成した。図2に紫外線リソグラフィにより作成したホールバー構造を示してある。この中央に直径1-2 μm の量子リング構造を電子線リソグラフィにした。図には作成した量子リング構造のAFM像も示した。用いたGaAsヘテロ構造試料の移動度 μ および電子濃度はそれぞれ $\mu = 60\text{--}100\text{ m}^2/\text{Vs}$ 、 $n_s = 4.0 \times 10^{15}\text{ m}^{-2}$ であった。この移動度および電子濃度はLEDによる赤外光照射によりそれぞれ120 m^2/Vs 、 $5.0 \times 10^{15}\text{ m}^{-2}$ まで変化させることが可能で、電子濃度依存性などを同一の試料で調べることが可能であった。作成したリング構造のいずれにおいても、AB効果の観測を確認し、2本のアームの双方を電子が通過できる事を確かめてマイクロ波伝導測定を行った。測定にはリングサイズの異なる3種類の量子リング構造を用いた。リング半径は電子顕微鏡像から評価し、それぞれ710, 520, 360 nmであることを確かめた。

これらはまたAB効果による磁気振動の振動周期の磁場値からも評価することが可能であり、すべて電子顕微鏡像から得られた半径と良い一致を示す事を確認した。

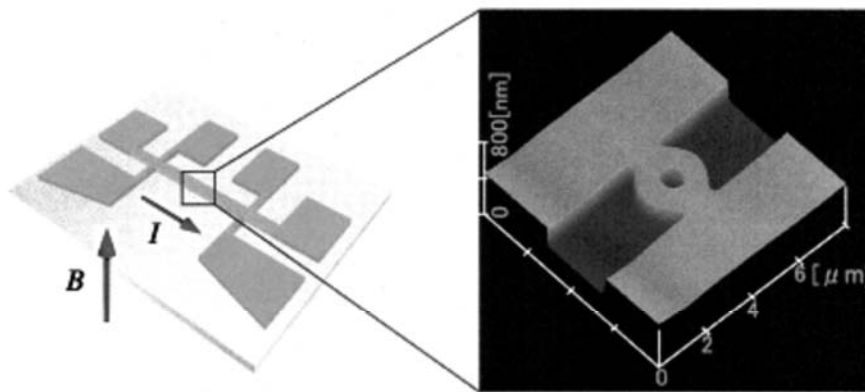


図1：測定配置と量子リング構造のAFM像

測定温度は1.6 Kから4.2 K、引加最大磁場5 Tの下で、リング構造の抵抗の磁場変化を測定した。マイクロ波による効果を見るため、マイクロ波変調下での抵抗変化を定電流のもとにダブルロックイン法により測定した。

3 マイクロ波による抵抗変化とリング局在電子

図3にマイクロ波照射下での抵抗の磁場変化を $\nu = 140, 70\text{ GHz}$ の周波数に対して示している。 $\nu = 140\text{ GHz}$ の場合、2次元電子系のサイクロトロン共鳴吸収に起因した抵抗ピークが0.5 Tに現れている。さらに高磁場側にはShubnikov-de Haas 振動が観測できる。これらの抵抗変化はマイクロ波周波数依存性を示す。また、加工を施さずリング構造を有しない試料でも全く同様に出現するため、リード部分の2次元電子系のマイクロ波応答と考えることができる。

一方、0.2 Tには共鳴的な抵抗減少を示すディップが現れており、2次元電子のみの系には出現しないため、量子リング固有の信号と考えることが出来る。このディップ位置は35から140 GHzの周

波数の範囲で出現する磁場位置は変化せず、 に独立であることが分かった。

同様の実験をサイズのみ異なる 3 種類のリング構造試料に対して行い、得られた抵抗変化出現位置の結果を図 3 に示す。

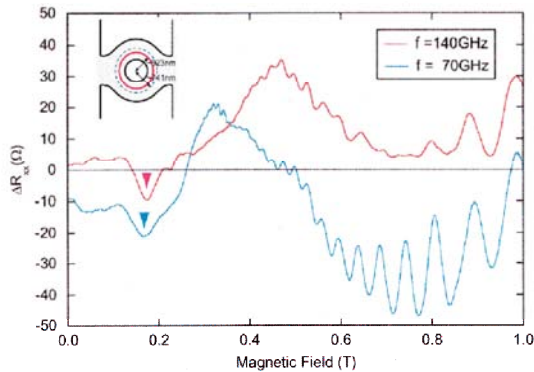


図 2：量子リングの磁気抵抗変調信号のマイクロ波周波数依存性

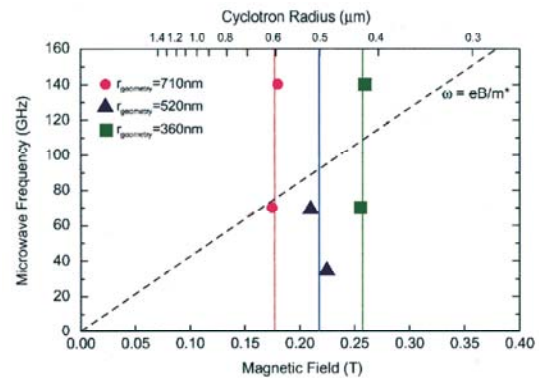


図 3：抵抗変化位置のマイクロ波周波数依存性

実験から、各リング構造でサイズにのみ依存して異なる磁場位置に鋭いディップまたはピークの形の抵抗変化が現れ、いずれも照射するマイクロ波の周波数には依存していないことが明らかになった。図より、変化が現れる磁場位置はサイズが小さいほど高磁場に現れていることが分かる。

ここで、磁場中での 2 次元電子の軌道を考えるならば、フェルミ波数を持つ電子の古典的なサイクロトロン軌道を描くと考えられる、このサイクロトロン半径 r_{CR} は 2 次元電子濃度 n_s に依存し次式で与えられる。

$$r_{CR} = \frac{\hbar}{eB_{dip}} \sqrt{2\pi n_s} \quad (2)$$

今、ディップの出現する磁場位置 B_{dip} での電子軌道を考える。図 2 の 140 GHz でのデータから $B_{dip} = 0.196$ T となり、サイクロトロン軌道半径は 623 nm となる。この軌道半径は電子顕微鏡像より求めた中心リング半径値 710 nm と良い一致を示す。同様に他の 2 種類のリング全てに対して、抵抗変化の生じている磁場位置から求めたサイクロトロン軌道半径はそれぞれ 500 nm と 420 nm になった。それぞれの幾何学的な中心リング径は 520 nm と 360 nm とであるので、いずれも良い一致を示していると考えられる。以上より抵抗変化の出現する磁場位置はリングサイズに強く依存し、幾何学的なリング径に一致している事が分かった。既に述べた様に AB 振動の振動周期から見積もった値も良い一致をしていることになる。この結果より、低磁場に現れる抵抗変化ディップは量子リング内の電子に関係したマイクロ波効果と考えることができる。ところで、電子系によるマイクロ波吸収のためには、マイクロ波の一周期程度の照射時間が必要となる。しかし作成したリングで、フェルミ速度よりリングを電子が通過する時間 (escape time) を見積もると、今回作成した最大のリング径のものでようやく 1 周期程度となり、サイズの小さなリングの場合は通過時間は 1 周期より短くなる。このことを考慮するならば、リング内電子がマイクロ波を光子として吸収することは困難と考えられる。しかし、磁場印加時には、2 次元電子の電子軌道は古典的なサイクロトロン軌

道を描くようになる、この軌道がリングの障壁との衝突を繰り返すことで、リングの通過時間は長くなることが簡単な古典軌道の計算から予想できる。とくにサイクロトロン半径がリング半径と一致した場合、リングへの入射角度によっては、通過時間が非常に長くなる。このため、リング内に局在する電子状態が予測できる。実験結果は、サイクロトロン磁場位置において、リング内に局在する電子状態が明瞭になったため、リング内電子によるフォトン吸収が可能になり、抵抗変化が生じたものと解釈できる。

さらに、実験ではこのサイクロトロン共鳴位置での抵抗変化がディップの場合とピークの場合の双方が観測できた。これを系統的に調べるために、マイクロ波照射下での抵抗変化の電流値依存性を調べた。図3に4.2 K、 $\nu=140$ GHzのマイクロ波照射下での測定結果を示す。電流値は100 nAから50 μ Aまでの範囲で測定した。弱電流値では抵抗減少を示すディップ構造が電流値増大とともにその変化量を減じ、ついには抵抗増大ピークとなることが分かった。細かい構造を無視するならば変化が出現する磁場位置は電流値には依存せず、変化の大きさのみ変化することが分かった。この結果は測定した温度によらず同一であった。

ポイントコンタクトや量子ドットなどの微小領域が伝導パスの一部に存在する場合、微小領域では電子状態がさらに量子化されていると考えられ、2次元リードの電子状態と微小領域の電子状態は連続的に繋がるチャンネルを形成すると考えられる。この場合、伝導はこのチャンネルを通して行われる。ポテンシャルの揺らぎによりチャンネル間の量子化エネルギーが幅を持つ系では、フォトン吸収が後方散乱を増大させるという理論予測がなされている^[5]。この場合は、マイクロ波吸収により抵抗が増大する。

一方、形成されるチャンネルの内、エネルギーの高いものは微小領域の入り口で微小領域の電子状態とは切りはなされた状態にあると考えられる。このようなチャンネル間をマイクロ波吸収によるエネルギーによりホッピングが可能であれば、このチャンネルも伝導に寄与し抵抗の減少を生じると思われる^[6]。

観測した抵抗変化は、チャンネル間の伝導にマイクロ波吸収が関与して起こっていると考えられるが、ピークになるかデップになるかの詳細な機構はまだ十分には解明できていない。今後は、リングの形や入り口の大きさを変えた量子リング構造を用いて測定を行いリング内電子によるマイクロ波吸収の機構を明らかにしたいと考えている。なお、本研究は理学研究科博士前期課程の学生であった田才邦彦氏、八柄篤史氏、および現在博士前期課程の学生である松岡哲平氏によるものである。

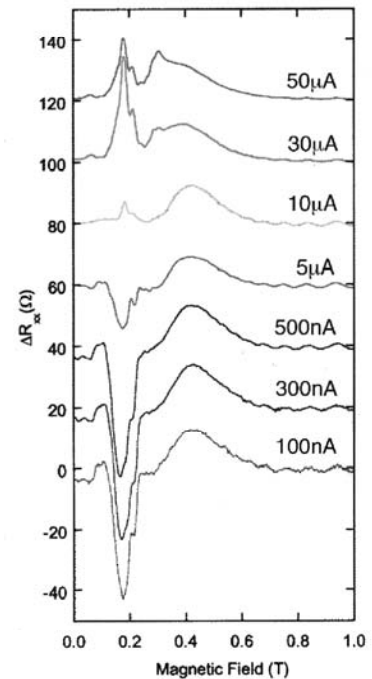


図4：量子リングの磁気抵抗変動信号のマイクロ波周波数依存性

参考文献

- [1] Y. Aharonov and D. Bohm, Phys. Rev. 115, 485 (1959)
- [2] R.A. Webb, Phys. Rev. Lett. 54, 2696 (1985)
- [3] S. Viefers, P. Koskinen, P. Singha Deo, M. Manninen, Physica E21, 1 (2004)
- [4] A. Lorke, R. Johannes Luyken, A. O. Govorov, J. Kotthaus, J.M. Garcia, and P.M. Petroff, Phys. Rev. Lett. 84, 2223 (2000)
- [5] L.Y. Gorelik, Anna Grincwajg, V.Z. Kleiner, R.I. Shekhter and M. Johnson, Phys. Rev. Lett. 73, 2260 (1994)
- [6] C. Bruder and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 72, 1076 (1994)