

状態と考えられてきたSDW相が「温度-圧力」相図上で、3つ以上のSubphaseに分割されていることが示唆される。この相図を図5に示す。一方(TMTSF)₂PF₆のSDW状態は、山地のフェルミ面のネスティング機構⁴⁾で説明されており、通常のSDW転移の圧力依存性は、よく説明できる。しかし、図5に示した通りSDW相に内部構造があることは説明されてはおらず、原因は明かではない。

文献

- 1) D. Jerome and H. J. Shultz; Adv. in Phys. 31(1982)299
- 2) D. Jerome, A. Mazaud, M. Ribault, K. Bechgaard; J. Phys. Lett. (Paris), 41(1980)95
- 3) D. Jerome; Chem. Scr. (Swed.), 17(1981)13
- 4) K. Yamaji; J. Phys. Soc. Jpn. 51(1982)2787

7. 低電子濃度 GaAs/Al_xGa_{1-x}As ヘテロ接合試料における 分数量子ホール効果の測定

深 野 敦 之

— 要旨 —

MBE (Molecular Beam Epitaxy) 等の化合物半導体の結晶成長技術が単原子層のオーダーで制御できるようになったため、ほぼ理想的な半導体界面ができるようになった。その結果、半導体ヘテロ接合界面で、高移動度をもつ二次元電子系が得られるようになった。

強磁場下の界面二次元電子系では量子ホール効果という現象がある。^{1) 2)} 界面二次元電子系では、半導体界面で電流を運ぶ伝導電子の界面に垂直な方向の運動が量子化されている。更にこの界面の垂直方向に磁場を加えると、界面内でサイクロトロン運動している電子の周期が電子の散乱時間に比べ十分長いとき、電子のサイクロトロン運動は量子化され、ランダウ準位と呼ばれる離散的なエネルギー準位が形成される。各ランダウ準位間のエネルギー差は $\hbar\omega_c$ で、 $\hbar = h/2\pi$ 、 h はプランク定数、 ω_c はサイクロトロン角振動数である。このとき、系の性質はランダウ準位の充填率 $\nu = N_s/(eB/h)$ で特徴づけられる。 N_s は電子密度、 eh/B は一つのランダウ準位に入り得る単位面積当たりの電子数、

e は電荷素量、 B は磁束密度である。

ランダウ準位のエネルギーは、電子の散乱により幅を持ち、この幅の両端には、電子の伝導に寄与しない状態（局在状態）が現われる。量子ホール効果は、充填率 ν が整数（ N ）の近傍の有限の領域で伝導度の対角成分 σ_{xx} は0となり、ホール伝導度 σ_{xy} は $N \cdot (e^2/h)$ に量子化される現象である。また、このとき抵抗率の対角成分 ρ_{xx} は0となり、ホール抵抗率 ρ_{xy} は (h/Ne^2) になる。

この量子ホール効果が発見されたほぼ一年後の1982年に $\nu = 1/3$ の近傍でホール抵抗率 ρ_{xy} が $3 \cdot (h/e^2)$ に量子化される現象がGaAs/AlGaAs ヘテロ接合の試料で発見された。

³⁾ $\nu = 1/3$ 以外に $\nu = 2/3, 4/3, 5/3, 7/3, 8/3, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 7/5, 8/5, 2/7, 3/7, 4/7, 10/7, 11/7, 4/9, 5/9$ でもホール抵抗率 ρ_{xy} が $(1/\nu) \cdot (h/e^2)$ に量子化されることより、この現象は分数量子ホール効果と呼ばれる。^{4) ~ 9)} また、この現象と区別するために、ホール伝導度 σ_{xy} が e^2/h の整数倍に、ホール抵抗率 ρ_{xy} が h/e^2 の整数分の一に量子化される現象を整数量子ホール効果と呼んでいる。

理論的には、1983年、吉岡らは相互作用する小粒子系の基底状態のエネルギーを計算することにより、基底エネルギーは ν が $1/3$ で特に低くなることを明らかにした。¹⁰⁾

また、ほぼ同時期に、Laughlinは $\nu = 1/q$ （ q は奇数）の場合に対する多電子系の基底状態を表す波動関数を導入した。¹¹⁾ また、この $\nu = 1/q$ における基底状態の波動関数は液体的な状態を示すことを明らかにした。

そこで、 $\nu = 1/q$ の量子ホール効果は、 q のどの値まで測定できるのだろうかということに興味を持たれる。これまで、 $\nu < 1/3$ の電子濃度では、1983年に $\nu = 1/5$ で分数量子ホール効果が確認され⁵⁾、1988年の時点でも分数量子ホール効果が確認されているのは $\nu = 1/5$ までであった。¹²⁾

$\nu < 1/5$ で分数量子ホール効果の発見を難しくしている要因は

○磁場の条件として $\omega_c \tau_0 \gg 1$ （ τ_0 は散乱時間）

○温度の条件として $\Delta \geq k_B T$ 、 $\Delta \simeq (Ce^2/2\kappa) \cdot n^{1/2}$ または、 $\Delta \geq \langle (V)^2 \rangle^{1/2} \approx \hbar/\tau_0$ なる強磁場極低温の条件が必要となるためである。このとき、 Δ は基底状態と電流を運ぶ励起状態を分離するエネルギーギャップ、 κ は誘電率、 $n^{1/2}$ は平均粒子間隔、 C は定数、 $\langle (V)^2 \rangle^{1/2}$ は不規則ポテンシャルの揺らぎを表している。

分数量子ホール効果は、GaAs/AlGaAsヘテロ接合試料のみならず、Si-MOSやInGaAs/InP超格子でも発見されている。しかし、GaAs/AlGaAsヘテロ接合では、移動度は 2×10^2 $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上で、電子濃度は 2.1×10^{15} m^{-3} 以下の試料も得られ、分数量子ホール効果の最も優れた研究対象となっている。¹³⁾

本研究は、 $\nu < 1/5$ で分数量子ホール効果が存在するか否かを実験的に調べることを目的に行なった。試料として、GaAs/AlGaAsヘテロ接合試料（ $\mu = 31$ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $N_s = 6.2 \times 10^{14}$ m^{-3} ）で、このGaAs/AlGaAsヘテロ接合試料はゲート電圧をかけることにより移動度 μ と電子濃度 N_s を $\mu = 8 \sim 82$ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $N_s = 3 \times 10^{14} \sim 8.3 \times 10^{14}$ m^{-3} の範囲で変えられ、光を当てることにより $\mu = 31 \sim 82$ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $N_s = 6.2 \times 10^{14} \sim 8.3 \times 10^{14}$ m^{-3} の範囲で変えられる。また実験は、東北大学金属材料研究所超伝導材料開発施設のハイブリッドマグネット

HM-1b（最大磁場27 T）¹⁴⁾と希釈冷凍機（最低温度20 mK）を用いて行なった。

実験は、縦長のホール素子に一定電流を流し、磁場を変化させながら電流と平行な方向の電圧 V_{xx} と電流に垂直方向のホール電圧 V_H を測定する方法を用いた。

1988年6月に $\nu = 1/7$ においてホール抵抗率 ρ_{xy} に分数量子ホール効果を示すと考えられる構造を発見した。¹⁵⁾ このときの電子濃度は $6.2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2}$ 、移動度は $35 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ だった。この電子濃度では、 $\nu = 1/9$ も測定の範囲内だったが、 $\nu = 1/9$ では、ホール抵抗率 ρ_{xy} の磁場依存性に構造は発見できなかった。こののち、1988年12月と、1989年5月にも同様な測定を行なったが $\nu = 1/9$ に対応する磁場でホール抵抗率 ρ_{xy} に構造は発見できなかった。また、 $\nu = 1/7$ での分数量子ホール効果は、ほぼ同時期にプリンストン大学のグループも抵抗率の対角成分 ρ_{xx} の測定で確認している。¹⁶⁾

そこで、 $\nu = 1/9$ の基底状態が分数量子ホール効果を示す量子液体状態であるか、またはウィグナー結晶状態になっているかを調べることで試料を作ることにした。試料を作るために、まずホール素子の形と大きさを決め、マスクを設計した。マスクは、石英ガラスにクロムを蒸着したもので、オーミック（電極形状）、メサ（ホール素子形状）、ゲートの三パターンから成る。

つぎに、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合試料を作ることに取りかかった。この試料は、CBE（Chemical Beam Epitaxy）によって作成した。CBE¹⁷⁾ は、MBEの長所と MOCVD（Metal-Organic Chemical Vapor Deposition）の長所を持ち合わせたもので、成長室の構造はMBE、ソース源には MOCVD に用いている AsH_3 、TEGa、TEAl 等のガスを用いている。成長は、GaAs に Cr をドーブした semi-insulating 基板に un-doped GaAs、undoped AlGaAs、Si-doped AlGaAs、Si-doped GaAs の順でエピタキシャル成長させる。

このヘテロ接合試料作製に当たっては、2 インチのウェハーの 1/4 を二枚ずつホルダーにインジウムで張り付けてエピタキシャル成長させた。

エピタキシャル成長させた GaAs/AlGaAs ヘテロ接合試料に、紫外線を当てると当たった部分の GaAs 表面が現われ、他の部分はコーティングされるホトレジストと、マスクを用いることによりホール素子を作製した。このとき、電極には Au-Ge (Ge が 12 %) を蒸着した。¹⁸⁾

このようにして、ホール素子を数種類作成したが、測定可能なものはできなかった。これは、CBE がまだまだ確立されたものではないため、ウェハーのできが悪かったためと思われる。

1989年11月の東北大金研での実験では、以前 $\nu = 1/7$ を発見した GaAs/AlGaAs ヘテロ接合試料を用いてもう一度 $\nu = 1/9$ の構造の発見を試みた。しかし、このときの電子濃度は $6.9 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2}$ となり、 $\nu = 1/9$ は 27 T 以上となり、目的を達成することはできなかった。

しかし、16 T 以上の磁場で、異常な磁気抵抗を見出し、その温度依存性や電流依存性を測定した。16 T から 27 T の磁場で、1 nA の電流で、40 mK から 1 K の温度領域で測定を行なった結果、対角抵抗率 ρ_{xx} は温度の高い領域では活性型の温度依存性を示した。活性化エネルギーは、20 T で 1.24 K、18 T で 1.11 K、16 T で 0.99 K というように磁場の

強さとともに増加している。また、40 mKの温度で1 nAから 20 nAまで電流を変化させて測定した結果、対角抵抗率 ρ_{xx} が電流の増加とともに急激に減少することが見出された。しかし、対角抵抗率 ρ_{xx} の電流変化は電界効果や、ジュール熱の効果で説明することはできなかった。この磁気抵抗の原因を明らかにするためには、さらに詳細な測定が必要である。

— 参考文献 —

- 1) S. Kawaji and J. Wakabayashi in "Springer Series in Solid State Sciences", Vol. 24(Springer, 1981)p. 284.
- 2) K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper: Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 494.
- 3) D. C. Tsui, H. L. Stormer and A. C. Gossard: Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 1559.
- 4) H. L. Störmer, A. M. Chang, D. C. Tsui, J. C. M. Hwang, A. C. Gossard and W. Wiegmann : Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 1953.
- 5) E. E. Mendez, M. Heiblum, L. L. Chang and L. Esaki: Phys. Rev. Lett. B28 (1983) 4886.
- 6) A. M. Chang, P. Berglund, D. C. Tsui, H. L. Störmer and J. C. M. Hwang: Phys. Rev. Lett 53 (1984) 997.
- 7) E. E. Mendez, W. I. Wang, L. L. Chang and L. Esaki: Phys. Rev. Lett. B30 (1984) 1087.
- 8) G. Ebert, K. Klitzing, J. C. Maan, G. Remenyi, C. Probst, G. Weimann and W. Schlapp: J. Phys. C17 (1984) L775.
- 9) R. G. Clark, R. J. Nicholas, A. Usher, C. T. Foxon and J. J. Harris: *Proceeding of Int Conf on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems V* (1985) [Surface Science 170 (1986) 141.]
- 10) D. Yoshioka, B. I. Halperin and P. A. Lee: Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 1219.
- 11) R. B. Laughlin: Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 1395.
- 12) R. Willet, H. L. Stormer, D. C. Tsui, A. C. Gossard, J. H. English and K. W. Baldwin : Surface Science 196 (1988) 257.
- 13) C. T. Foxon, J. J. Harris, R. G. Wheeler, D. E. Lacklison: unpublished
- 14) 武藤 芳雄、中川 康昭: 日本物理学会誌 37 (1982) 813.
- 15) J. Wakabayashi, A. Fukano, S. Kawaji, K. hirakawa, H. Sakaki, Y. Koike and T. Fukase: J. Phys. Soc. Jap. 57 (1988) 3678.
- 16) V. J. Goldman, M. Shayegan and D. C. Tsui: Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 881.
- 17) 小長井 誠: 応用物理 57 (1988) 1666.
- 18) 平川 一彦、榑 裕之: 東京大学生産技術研究所報告 34 (1988) 59.