

MgZnO/ZnO 界面に形成した高移動度二次元電子ガスの低温・強磁場中における分数量子ホール効果

Fractional quantum Hall effect of high mobility two-dimensional electrons formed at MgZnO/ZnO interfaces at low temperature under strong magnetic field

小塚 裕介¹, 塚崎 敦², デニス マリエンコ³, ジョセフ フォルソン¹, 中村 慎太郎¹, 淡路 智¹, 上野 和紀³, 川崎 雅司^{1,2,3}

¹ 東北大・金研, ² 東大・量子相, ³ 東北大・WPI

Y. Kozuka¹, A. Tsukazaki², D. Maryenko³, J. Falson¹, S. Nakamura¹, S. Awaji¹, K. Ueno³, M. Kawasaki^{1,2,3}

¹ Institute for Materials Research, Tohoku University

² Quantum-Phase Electronics Center and Department of Applied Physics, University of Tokyo

³ WPI-Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

高移動度二次元電子系の研究はSiの表面反転層で量子ホール効果が発見されて以来、盛んに研究されている。さらに、非常に清浄なGaAs二次元界面ではホール電圧が量子抵抗の分数倍で量子化する分数量子ホール効果が発見され、電子間相互作用に基づく多体効果の重要性が議論されるようになった。近年では、この多体効果により形成された複合粒子が、一電子近似では帰結できない新たな物理現象を示すことが次々と発見されている。

本研究では近年の作製技術の向上により高移動度電子の形成が可能となったMgZnO/ZnO界面に注目し、低温・強磁場中における輸送特性を測定した。我々の研究グループでは試料の移動度を年々更新しており、低温で明瞭な分数量子ホール効果を観測するに至っている[1]。今回用いた試料は、低温における電子濃度が $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、移動度が $300,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、従来の報告に比べて低キャリア濃度かつ高移動度である。そのため、強磁場中でより低いフィリングの分数量子ホール効果を明瞭に観測できたので報告する。

2. 実験方法

2-1. 薄膜作製

分子線エピタキシー法を用いてMgZnO/ZnOヘテロ構造を作製した。基板はZn極性のZnO(0001)を用い、成膜前に表面処理として酸によるエッチングと真空チャンバー内における加熱処理を施した。成膜には非常に高純度なZnとMgの金属を用いるとともに、100%液化オゾンを経験源として使用することで、極限まで不純物を低減させた。

2-2. デバイス構造形成

MgZnO/ZnO二次元電子ガスへのオーミック電極を形成した。まず、フォトリソグラフィとイオンミリングを用いてホールバー構造のメサを形成し、さらに電子線ビーム蒸着によりオーミック電極としてTiを蒸着した。

2-3. ハイブリッド磁石による磁気抵抗測定

測定には無冷媒ハイブリッド磁石(28T)と21年度に強磁場施設に設置されたハイブリッド磁石用希釈冷凍機を

使用した(Fig.1 参照)。ハイブリッド磁石では水冷磁石の水流による振動で発生する磁場の振動による渦電流による発熱をいかに抑えるかが、極低温下の測定を可能にする条件となる。無冷媒ハイブリッド磁石用に設置された希釈冷凍機はLeiden社製で、渦電流を抑えるため混合器がプラスチックでできている。また、渦電流による発熱があっても大きな温度上昇を起こさないような大きな冷凍能力の仕様となっている。通常、ハイブリッド磁石用に希釈冷凍機を設計すると、磁石が大型であるため希釈冷凍機のテイルが長くなり、もっとも冷える混合器から試料までの距離が長くなるため、試料の温度が高くなってしまふ。しかし、当該希釈冷凍機では混合器が希釈冷凍機の最下部にあり、冷却能力を有する混合器内に試料を置けるため、この問題を避けることができる。Fig. 2に示すように熱交換器から混合器内に流れ込んだ³Heはc相からd相に溶解し、融解熱によって混合液を冷却し、しきり管に開けられた穴から流れ出して蒸留器へと上昇する。試料は混合液によって直接冷却される。実際の測定では、5日間のマシンタイムの間、35-40 mKの温度で26 Tの磁場まで安定的に測定することができた。測定に用いた無冷媒ハイブリッド磁石は通常27 Tまで磁場を印可することができるが、今回は磁石の不調で26 Tまでの磁場しか印可できなかった。



Fig. 1. Sliding seal type dilution refrigerator for the cryogen-free hybrid magnet. The gas handling system can be controlled from an operation room.

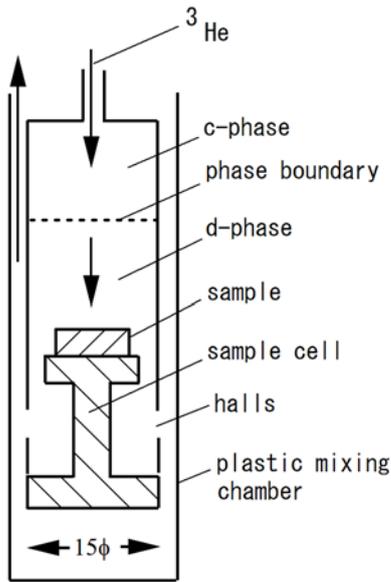


Fig. 2. Schematic drawing of the inside of plastic mixing chamber.

3. 実験結果

上述の試料について、温度を 40 mK まで冷却し、26 T までの強磁場を印加して磁気抵抗測定を行った結果を Fig. 3 に示す。低磁場から明瞭なシュブニコフ・ドハース振動が観測でき、試料が高品質であることを示している。高磁場では、整数量子ホール効果に続いて $\nu = 2/3, 3/5, 3/7, 2/5, 1/3$ など多くの分数量子ホール効果を観測した。特に $B = 25.5$ T で観測された $\nu = 1/3$ は最も基本的な分数量子ホール状態であり、酸化亜鉛は GaAs、SiGe、グラフェンに続き、第4番目のこの分数量態を観測した例である。

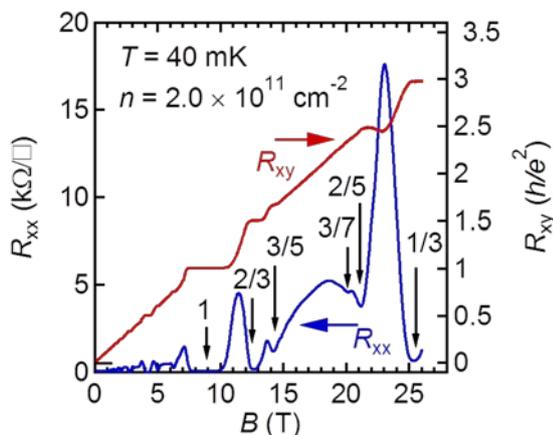


Fig. 3. High-field magnetotransport properties measured at 40 mK for a high-mobility electron gas at a MgZnO/ZnO interface with a carrier density of $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and a mobility of $300,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

3. 結論

本研究では、酸化亜鉛の高移動度二次元電子ガスに注目し、低温・強磁場中において磁気輸送特性を測定した。今回の測定で $\nu = 1/3$ の量子ホール状態が観測できたことは、単に酸化亜鉛の電子移動度もそのレベルに高まっただけでなく、新たな材料に固有な新物理現象探求の端緒となると期待している。特に、酸化亜鉛の大きな有効質量に基づく強い電子相関は、量子ホール系の物理に新しい潮流をもたらすであろう[2]。

参考文献

- [1] A. Tsukazaki *et al.*, Nature Mater. **9**, 889 (2010).
- [2] A. Tsukazaki *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 233308 (2008).