



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



東北大学  
TOHOKU UNIVERSITY



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

## 酸化亜鉛界面を最高品質半導体レベルに向上させ、新たな量子相を観測 —トポロジカル量子コンピューターの研究に新たな風—

### 1. 発表者：

Joseph Falson（東京大学大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 博士課程 3年）

Denis Maryenko（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関界面研究グループ 特別研究員）

Benedikt Friess（マックスプランク固体研究所 研究員）

Ding Zhang（マックスプランク固体研究所 研究員）

小塚 裕介（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻 特任講師）

塚崎 敦（東北大学 金属材料研究所 教授）

Jurgen H. Smet（マックスプランク固体研究所 グループリーダー）

川崎 雅司（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関界面研究グループ グループディレクター）

### 2. 発表のポイント：

- ◆酸化亜鉛を用いた高品質ヘテロ界面（注1）を作製し、添加元素を用いず、結晶内部の電場を利用することで、極めて高品質な電子系を形成した。
- ◆発見からおよそ30年来、砒化（ひか）ガリウム（注2）を用いたヘテロ界面でのみ研究されてきた、理論的に未解決の量子相（注3）が、酸化亜鉛のヘテロ界面で観測された。
- ◆この量子相はエラーが起りにくい強いトポロジカル量子計算（注4）に用いられる可能性があり、砒化ガリウムには無い特性を用い、より多角的な研究を可能にする。

### 3. 発表概要：

異なる物質を組み合わせたヘテロ界面は、トランジスタや発光ダイオードなどの機能性デバイスとして応用されてきた。特に、砒化ガリウムのヘテロ界面では最も品質のよい電子が形成され、約30年前に低温で特殊な量子相が発見された。この量子相は、トポロジカル量子コンピューターと呼ばれる、計算エラーを低く保ちつつ飛躍的な計算速度の向上が期待できる、新たなコンピューターへ応用が可能であると考えられているが、その特性は長らく不明であった。

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター・物理工学専攻の川崎雅司教授が率いるグループは、マックスプランク固体研究所のJurgen Smet（ヨルゲン・シメット）博士のグループと共同で、世界に類を見ない極めて高品質な酸化亜鉛ヘテロ界面を作製し、砒化ガリウム以外のヘテロ界面でこの特殊な量子相の観測に初めて成功した。今回の発見では、酸化亜鉛には砒化ガリウムにはない制御性があることが明らかとなり、酸化亜鉛がこの量子相の理解を進展させるのに非常に重要な材料であることを示した。

本研究成果は、英国科学雑誌『Nature Physics』の電子版（平成27年3月23日版）に掲載される。なお、本成果は東京大学大学院新領域創成科学研究科のJoseph Falson（ジョセフ・フォルソン）大学院生、理化学研究所創発物性科学研究センターのDenis Maryenko（デ

ニス・マリエンコ) 特別研究員、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の小塚裕介特任講師、東北大学金属材料研究所の塚崎敦教授との共同研究により得られたものです。

#### 4. 発表内容：

##### ① 背景

酸化亜鉛は可視光を透過するが紫外線を吸収する性質を持つため、白色顔料や日焼け止めとして、古くから用いられてきた物質であり、安価で無毒であることが特徴である。近年では、窒化ガリウムと並び、青色・紫外発光ダイオードの応用へ向けた研究が盛んに行われてきた。さらに、トランジスタの研究も精力的に行われており、電子が非常に速く動くことのできるヘテロ界面の作製が可能となってきた。このような電子は高移動度（注5）電子と呼ばれ、電気的な応答が速いため無線通信など高周波用途に応用されている。材料としては、砒化ガリウムなどの化合物半導体を用いられ、ヘテロ界面に電子が形成されている。

高移動度電子の応用は高周波用途のみならず、量子コンピューター応用が期待されている。高移動度電子は強磁場を加えると円軌道を周回し、その結果「量子ホール効果」（注6）と呼ばれる、集団的な挙動を示す。量子ホール効果はさまざまな種類が存在するが、その中でもある特殊な状態がエラーの起こりにくい量子コンピューターへ応用可能であると理論的に予測されている。この特殊な量子相は約30年前に最高品質の砒化ガリウムを用いたヘテロ界面（図1(a)）で発見されて以来、その素性を検証すべく研究が行われているが、理論的にも実験的にも未だ完全には明らかでない。その問題点の一つは、砒化ガリウム以外の半導体では十分な品質のヘテロ界面を作製できないため、この現象が観測されておらず、多角的な検証ができない点にある。

##### ② 研究内容

酸化亜鉛ヘテロ界面においてこの量子相を観測することを目指して、電子移動度を向上させるために作製手法の改善を試みた。分子線エピタキシー法（注7）を用い、高純度の亜鉛金属、マグネシウム金属および、蒸留したオゾン(O<sub>3</sub>)を酸素源として使用した。構造は図1(b)に示すように、酸化亜鉛(ZnO)上にマグネシウムを少量置換した酸化亜鉛(MgZnO)を堆積した。砒化ガリウムに比べ酸化亜鉛の二次元電子には次の利点がある。砒化ガリウムでは電子を導入する際、価数（注8）の異なる添加元素を置換する必要があるが（砒化ガリウムではGa（3価）に対してSi（4価）を置換）、電子はイオン化した置換元素から電気的な力を受けるため散乱される（図1(a)）。しかしながら、酸化亜鉛では、結晶構造により内部電場（分極）が存在するため、マグネシウムを置換した層としていない層の分極の差を利用して電子を形成することができ、添加元素の導入を必要としない（図1(b)）。さらに、砒化ガリウムでは真空装置内に残留する空気中の酸素が不純物となるが、酸化亜鉛では構成元素にすでに酸素が含まれており、酸素が不純物とならないことも利点である。以上の作製法改善と酸化亜鉛の特徴を生かすことで、世界に類を見ない極めて高品質な高移動度電子の形成に成功した。試料の写真を図2に示す。

このような酸化亜鉛ヘテロ界面における高移動度電子系に対して磁場を加えると、図3に示されるように、縦抵抗が振動し、ホール抵抗が階段状の変化を示し、上述の量子ホール効果が観測された。特に、電子の数と磁束量子（注9）の数の比を $\nu_e$ という指標で表すが、従来の電子系では $\nu_e = 3/2$ となる磁場付近では量子ホール状態とならない（例えば、

図3の結果)。しかし今回、図4の模式図で表す特殊な状態が安定になり、量子ホール状態になっていることが観測された。詳細を図5に示す。試料を水平に置いたときには量子ホール状態ではないが、試料を40度ほど傾けると縦抵抗がゼロに近くなり、ホール抵抗が平坦になる量子ホール状態を示した。これは、30年ほど前に砒化ガリウムのヘテロ界面において $\nu_e = 5/2$ となる磁場付近で観測されたものと同様の状態であると考えられ、2つの複合粒子(注10)が引力で引き合う(図4)ときに発現すると理論的に予測されている。しかしながら、砒化ガリウムでは試料の回転でこの状態のオン・オフを切り替えることはできず、これは酸化亜鉛に特徴的な性質である。この特徴は、酸化亜鉛中の電子が持つ円運動のエネルギー( $E_{cyc} : N=0, 1, 2, \dots$ で表される)と磁気的なエネルギー( $E_L : \uparrow, \downarrow$ の2つで表される)が同程度の大きさであり、試料回転でこの2つのエネルギーの大小を変化させられることに起因する。

### ③ 今後の展望

今回、酸化亜鉛のヘテロ界面で観測された特殊な量子ホール効果は、エラー耐性の強いトポロジカル量子コンピューター応用が可能であると予想されている。これは、図6に示されるように、全体の状態が複合粒子の交換の順番によって変化する、非可換性と呼ばれる特殊な性質を利用している。他の原理による量子コンピューターに比べ、温度や不均一性などから生じるゆらぎに対して非常に強いことが特徴である。特殊な量子相を制御する自由度が高い可能性をも示した酸化亜鉛ヘテロ界面研究によって、特殊な量子相のより深い知見とこの量子相の位相制御などの研究発展が期待される。

### 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Physics」（平成27年3月23日電子版）

論文タイトル：Even-denominator fractional quantum Hall physics in ZnO

著者：J. Falson, D. Maryenko, B. Friess, D. Zhang, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet, M. Kawasaki

DOI番号：10.1038/nphys3259

アブストラクト URL：<http://dx.doi.org/10.1038/nphys3259>

### 6. 注意事項：

日本時間3月24日(火)午前1時(イギリス時間：23日(月)午後4時)以前の公表は禁じられています。

### 7. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター  
教授 川崎雅司(かわさき まさし)

TEL: 03-5841-6866

FAX: 03-5841-6869

Email: [kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

### 8. 用語解説：

注1：ヘテロ界面

2つの異種物質が接合されている面。母物質が同じでも元素の置換量が異なる界面もヘテロ界面と呼ぶ。トランジスタや発光ダイオードなど多くの機能性デバイスはヘテロ界面を作製することで実現されている。

注2：砒化（ひか）ガリウム

砒素（ひそ）とガリウムから成る化合物で、赤色発光ダイオードやレーザーに用いられている。図1の構造を持つヘテロ界面を作製すると、不純物や欠陥による散乱頻度が極めて少ない電子を形成することができ、衛星通信や移動体通信の高周波増幅器などに用いられる。

注3：量子相

物質を構成する原子は陽子、中性子、電子から成り立っているが、これらのミクロな粒子の性質を説明する法則は大きなボールの動きなどを説明する法則とは全く異なる。例えば、位置と速度を同時に決めることができない、波のように干渉するなどである。この法則（量子論）を用いなければ説明できない相を量子相という。

注4：トポロジカル量子計算

量子論の原理を用いて構成される計算法則を量子計算と呼ぶ。通常、粒子の量子的性質は熱擾乱や粒子間の散乱などの外乱で簡単に変更されてしまうため、環境を極めて精密に整えなければ、量子計算を実行し終わる前に、計算途中の状態が崩されてしまう。しかし、電子系の幾何学的な性質（トポロジー）を用いることで、少々外乱があっても計算途中の状態が保存できる可能性が理論的に示唆されている。

注5：移動度

試料に電圧を加えた時の電子の応答性を示す物理量。電子の応答性は、電子がどれほど頻繁に散乱されるかによるため、移動度は電子の散乱の少なさを示し、半導体では清浄さを表す指標として用いられる。世界最高の電子移動度は砒化ガリウムのヘテロ界面で得られており、 $30,000,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  程度。一方、酸化亜鉛では  $700,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を超える値を記録した。

注6：量子ホール効果

半導体中の高移動度電子に強い磁場を加えると、電子が円運動して干渉するため、ある位置に留まる。その時でも、試料の端では電子は伝導しているが、磁場によって一方通行に制限されるため、量子論によれば電子は全く散乱されない。そのため、縦抵抗はゼロとなる。一方、横方向のホール抵抗は一定の決まった値を取る。この状態は、トポロジカルな性質を持ち、磁場を少し変更しても全く影響を受けない。

注7：分子線エピタキシー法

高品質の薄膜を、真空装置を用いて作製する手法。各々の元素の高純度原料を加熱により蒸発（または昇華）させ、加熱された基板上で反応させる。作製したい物質の化合物を原料に用いるスパッタリング法などに比べ、原料の純度をはるかに高くできるため、不純物濃度を低減できる。

注8：価数

原子は同数の陽子と電子から成るが、化合物中では、他の原子と電子のやりとりをして結合したり、電子をいくつか離したり、引きついたりして、電気を帯びたイオンの状態になったりしている。その状態の原子が離したり、引きついたりする電子の数を価数と呼ぶ。

注9：磁束量子

量子論によれば、電子の干渉により円運動の半径が飛び飛びの値に制限されるため、それに伴って発生する磁場の値も飛び飛びの値のみを取る。その飛び飛びの値の最小単位を磁束量子と呼び、 $h/2e = 2.1 \times 10^{-15} \text{ Wb}$  (ウェーバ) で示される ( $h$ : プランク定数、 $e$ : 電気素量)。

注10：複合粒子

固体中の電子は、お互い静電気力を及ぼしながら伝導し、非常に複雑な動きをするため、理論的解析が困難である。そこで、電子とは異なる質量や電荷などを持つ粒子の伝導においては、それらの粒子間ではお互いに相関しないと考えることで、現象を理解できることがある。そこで考える仮想的な粒子を準粒子と呼び、特に量子ホール効果のときに現れる準粒子を、電子に磁束量子がくっついた状態と捉え、複合粒子と呼ぶ。

9. 添付資料：

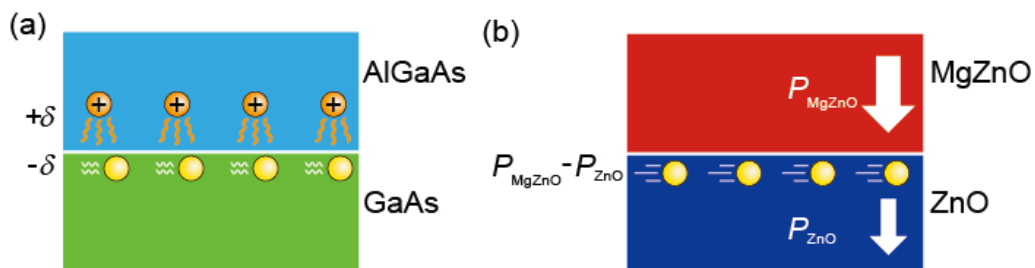


図1. 砒化ガリウムを用いたヘテロ構造(a)と酸化亜鉛を用いたヘテロ構造(b)

砒化ガリウムでは、価数の異なる添加元素(⊕で表示)を導入することで二次元電子系を形成するため、イオン化した添加元素からの静電気力で散乱される。一方、酸化亜鉛では、結晶内部の電場(分極、 $P$ 矢印で表示)の差を利用して二次元電子系を形成するため散乱要因が無く、より高移動度が期待できる。

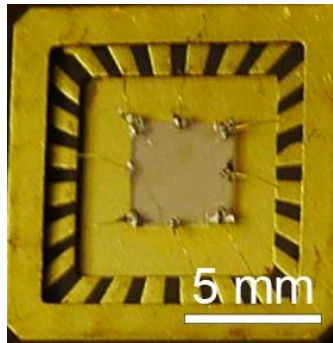


図2. 今回使用した試料

4mm 角の試料の端に電極を形成し、配線用の端子台に固定した。

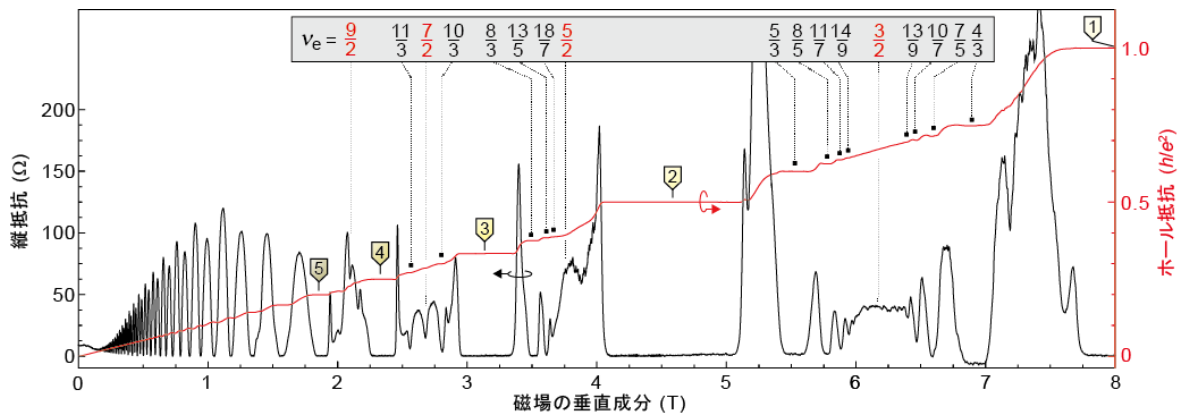


図3. 酸化亜鉛ヘテロ界面における、量子ホール効果の観測

高移動度の二次元電子系に磁場を加えると、縦抵抗は振動しゼロ抵抗に達する。一方、ホール抵抗は、抵抗がゼロの領域で一定値を取り、量子ホール状態に入る。ホール抵抗は量子抵抗  $h/e^2 \approx 25.8\text{k}\Omega$  (オーム) を単位としている ( $h$ : プランク定数、 $e$ : 電気素量)。

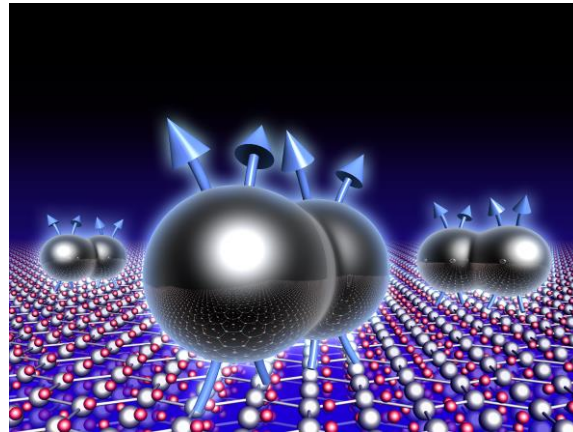


図4. 複合粒子2つがペアリングした状態の模式図

2 を分母に持つ分数を指標とする状態で量子ホール状態になっているものは、複合粒子 2 つが引力で引き合っていると考えられている。1 つの複合粒子は、電子(球)が 1 つと量子磁束(矢印)が 2 本で構成されている。

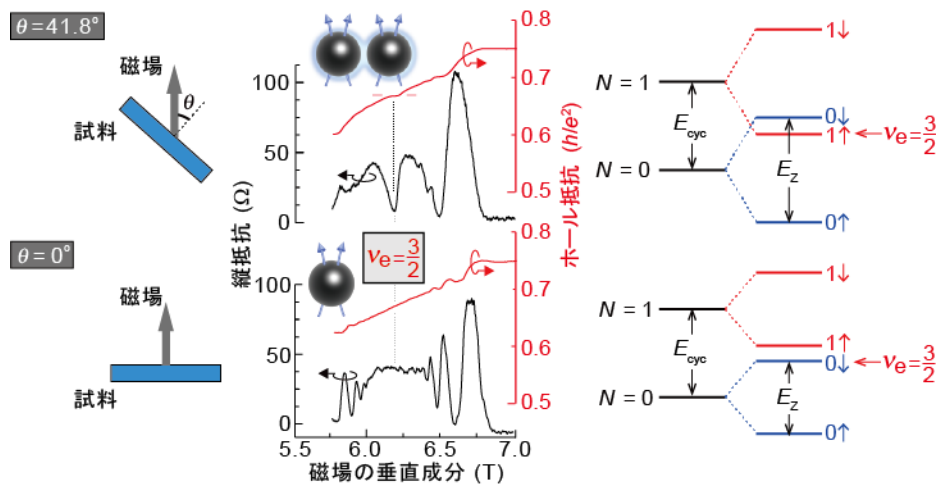
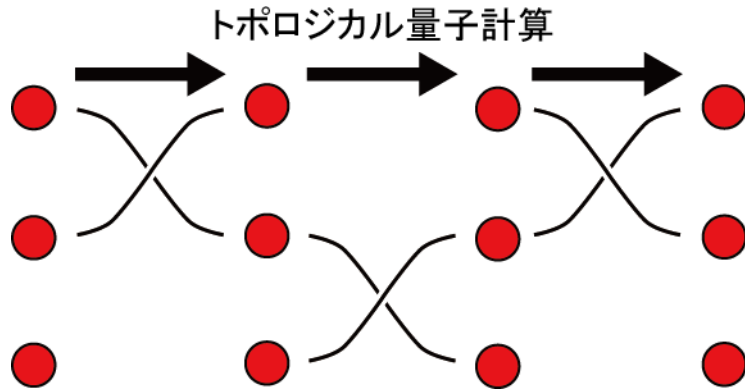


図5. 酸化亜鉛ヘテロ界面における、量子ホール効果の観測

磁場と試料面直方向の角度  $\theta$  を変化させることで、磁場中での縦抵抗とホール抵抗の現れ方が変化する。 $\theta = 41.8^\circ$  における、 $\nu_e = 3/2$  で表される磁場付近では、縦抵抗の減少とホール抵抗が一定値になることが観測され、量子ホール状態に入った証拠である。右図は角度による電子の円運動のエネルギー ( $E_{cyc}$ ) とスピンのエネルギー ( $E_z$ ) の相対関係を示している。



**図6. 複合粒子の交換による量子計算の概念図**

図5の  $\nu_e = 3/2$  で表される状態では、複合粒子の交換の順序によって全体の状態が変更する。この交換を網目のように繰り返すことで、演算が行われる。 $\nu_e = 3/2$  の状態が保たれていれば、外乱があっても影響を受けないため、エラーが起こりにくい量子コンピューターが構成可能である。