



東北大学

この件に関する報道解禁は、Science 誌の規則により**米国時間 1月25日午後2時(日本時間 1月26日午前4時)以降**となりますので
守願います。新聞各紙への掲載は**1月26日付朝刊以降**となります。

報道機関各位

配付先：文部科学省記者クラブ
宮城県政記者会

平成19年1月23日
国立大学法人東北大学
独立行政法人科学技術振興機構

酸化物における量子ホール効果の観測に初めて成功
- 透明エレクトロニクスの実現に道 -

ポイント

- 「透明エレクトロニクス」の実現に向けて各研究機関で透明な酸化物半導体を用いた電子回路技術の開発が進められていますが、従来の半導体に比べて完全な薄膜結晶を得ることが困難なことから、薄膜トランジスタの高性能化に必要な移動度の向上が阻まれてきました。
- 東北大学の研究グループは、透明酸化物半導体である酸化亜鉛の薄膜結晶品質を改善することで紫外発光ダイオードや透明薄膜トランジスタの開発を行ってきましたが、今回高品質な薄膜界面に分極効果を利用して高移動度の2次元電子ガスを形成する技術を開発し、酸化物における量子ホール効果の観測に世界で初めて成功しました。
- 今回の成功は、透明薄膜トランジスタの高性能化を可能にし、「透明エレクトロニクス」の実現に道を開くだけでなく、高温超伝導酸化物をはじめとする多様な物性・材料群と量子ホール効果を組み合わせることで全く新しい物理現象発見への可能性を拓けるものです。

< 概要 >

国立大学法人東北大学【総長：井上明久】(以下「東北大学」という)金属材料研究所【所長：中嶋一雄】(以下「金研」という)の塚崎 敦博士研究員と大友 明助手らは、東北大学電気通信研究所【所長：伊藤弘昌】および独立行政法人科学技術振興機構【理事長：沖村憲樹】(以下「JST」という)と共同で、酸化物における量子ホール効果^{注1}の観測に世界で初めて成功しました。量子ホール効果の観測に用いた試料は、酸化亜鉛 (ZnO) および酸化亜鉛と酸化マグネシウムの混晶 (MgZnO) の積層薄膜からなり、結晶育成技術を工夫し薄膜結晶の品質を高めたことで今回の成功につながりました。

量子ホール効果は、高純度の半導体中に形成された2次元電子ガス^{注2}のホール抵抗^{注3}が

極めて高精度に量子化されることを利用して電気抵抗標準として用いられています。なお、量子ホール効果には、整数量子ホール効果と分数量子ホール効果とがあり、今回観測されたのは整数量子ホール効果です。

東北大学の研究グループは、従来の ZnO 薄膜結晶の品質を著しく改善する成長技術を開発し、紫外発光ダイオードや透明薄膜トランジスタなどの素子を世界に先駆けて開発してきました。今回、この技術を基に作製した ZnO と MgZnO の積層薄膜で、高い[移動度](#)^{注4}を有する 2 次元電子ガスを形成することに成功したので、量子ホール効果の観測に至りました。

今回の成果は、透明エレクトロニクスの中心課題であった透明薄膜トランジスタ高性能化を可能にするだけでなく、高温超伝導酸化物をはじめとする多様な物性・材料群と量子ホール効果を組み合わせることを容易にすることから、新奇な物理現象発見への可能性を拓げるものです。

本研究成果は、米国の科学雑誌「Science (サイエンス)」への掲載に先立ち、1月25日(米国東部時間)付けでオンライン公開されます。

< 研究の背景と経緯 >

透明酸化物半導体は、一般に化学的に安定で構成元素の多くは豊富な鉱石から産出されるため、様々な工業用途に用いられてきました。エレクトロニクス応用では液晶ディスプレイの透明電極として広く用いられていますが、その原料には価格インフラが続いているインジウムが用いられているため、代替材料として ZnO が注目されるようになり、薄膜成長技術の研究開発が行われてきました。

我が国は、透明酸化物半導体の研究で世界の最先端を担っていますが、透明エレクトロニクスを実現するために十分な品質を有する薄膜結晶の成長技術開発が待たれていました。ZnO は、将来白色光源としての発光ダイオードを開発するためにも安価で無害な材料とし

て期待されており、紫外発光ダイオードの研究開発では東北大学が激しい競争をリードしてきました（文末の[関連記事](#)参照）。

一方、量子ホール効果は、半導体エレクトロニクス材料として広く用いられている高純度のシリコンや砒化ガリウム（GaAs）等の積層薄膜を極低温に冷却し、高い磁場を印加することで観測される物理現象です。シリコンなどの社会にありふれた半導体が用いられたにも係わらず、ホール抵抗が驚異的な精度で計測されるという顕著な量子効果が発見されたことで、実際の応用とはかけ離れた物理学の興味から盛んに研究が進められてきました。量子ホール効果を実現するためには、移動度が十分に高い希薄な2次元電子ガスを形成することが必要ですが、これまで量子ホール効果が観測された半導体材料ではいずれも基盤となる結晶育成技術が確立されていません。

透明酸化物半導体の研究は、従来の半導体とは異なる新しい産業ニーズの高まりとともに進展してきました。透明酸化物半導体の成長技術を一段と高めて不純物や結晶欠陥が少ない薄膜結晶を得ることは、電子回路技術に欠かせない薄膜トランジスタの高品質化につながり、透明エレクトロニクスの喫緊の課題でした。

本研究は、東北大学が JST の戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）「ナノ界面技術の基盤構築」研究領域（研究総括：新海征治）の研究テーマ「酸化物・有機分子の界面科学とデバイス学理の構築」【研究代表者：川崎雅司】、同事業個人型研究（さきがけ）「ナノと物性」研究領域（研究総括：神谷武志）の研究テーマ「酸化物量子井戸構造を用いた発光素子及び光非線形性素子の開発」【研究者：大友 明】、同事業（ERATO 型研究）の「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」【研究総括：大野英男】、および日本学術振興会学術創成研究「非平衡透明酸化物の平行合成による光・電子・磁気機能の高効率探索とデバイス実証」【研究代表者：川崎雅司】等の研究協力・支援を受けて行ったものです。

< 研究成果の内容 >

東北大学の研究グループは、パルスレーザ堆積法と呼ばれる薄膜成長装置を用いて基板上に高品質な ZnO 薄膜を成長する実験を行ってきました。2005 年には、基板と ZnO 薄膜の間に MgZnO 薄膜を挿入する方法を発明し、世界で初めて ZnO 紫外発光ダイオードを実現しました。今回の研究を開始した当初、薄膜結晶品質のさらなる向上を目的として様々な条件で成長した ZnO 薄膜の移動度を低温で測定する実験を繰り返し行っていました。測定には基板上に作製した ZnO と MgZnO の積層薄膜に金属電極を取り付けたホール素子構造を用いました (図 1 参照)。

高品質薄膜を成長する際に基板を 1000 度程度の高温に加熱する必要がありますが、加熱源としてスポット状に絞った赤外レーザを採用しました。効率よく実験を進める工夫として、基板の横方向に温度の勾配をつけながら薄膜成長を行いました。このように成長した薄膜に数十個の微細なホール素子を作製することで成長温度に依存した電気特性のデータを一括に得ることができます。

量子ホール効果は、結晶中の不純物や欠陥が少なくかつ希薄な 2 次元電子ガスが存在する状況で、電子が不純物に散乱されず磁場中で円軌道を描いて運動することによって生じる現象です (図 2 参照)。

研究グループは、特定の温度で成長した試料の移動度が特に高いことを見出しました。さらに実験を続け、より高い移動度を示すとともに密度が希薄な 2 次元電子ガスを得ることに成功しました。得られた電気特性は、シリコンや GaAs を用いた研究の初期段階で報告された値と類似していたため、1 ケルビン (ケルビンは絶対温度を示す単位で 0 ケルビンは摂氏 -273.16 度) 以下という極低温で強い磁場を印加して測定したところホール抵抗に平坦部が現れ、量子ホール効果が確認されました (図 3 参照)。つまり、本薄膜成長方法によれば、不純物や結晶欠陥が少ない透明酸化物半導体が成長できることを証明しました。

本研究を進める過程で、当初の目標であった薄膜結晶品質の向上も達成されました。す

なわち、従来の ZnO 薄膜結晶の電子密度を一桁低くし、移動度を約 4 倍に高めることに成功しました（図 4 参照）。これは、原料の高純度化、積層構造の改良、成長条件の最適化という改善点を順次クリアーした結果もたらされたものです。

研究グループは、さらに 2 次元電子ガスの密度が分極効果^{注5}を通して広範囲に制御できる新しい機構を明らかにしました（文末の囲み記事参照）。今回得られた結果では、2 次元電子ガスの密度を下げることによって、整数量子ホール効果の“整数”に相当するランダウ準位占有数が 2 まで到達することを確認しました。この値が 1 より小さくなると分数量子ホール効果発現の可能性が高まるため、酸化物における分数量子ホール効果の観測も視野に入れた研究を現在進めております。

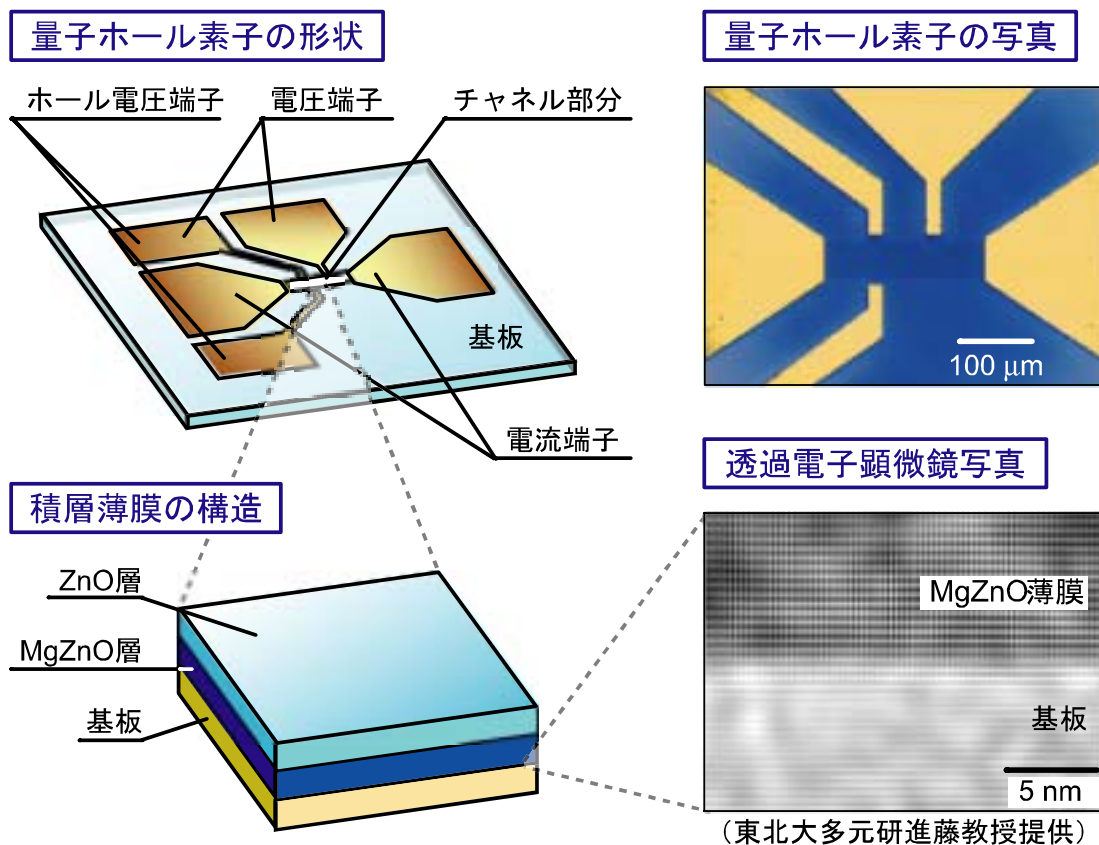
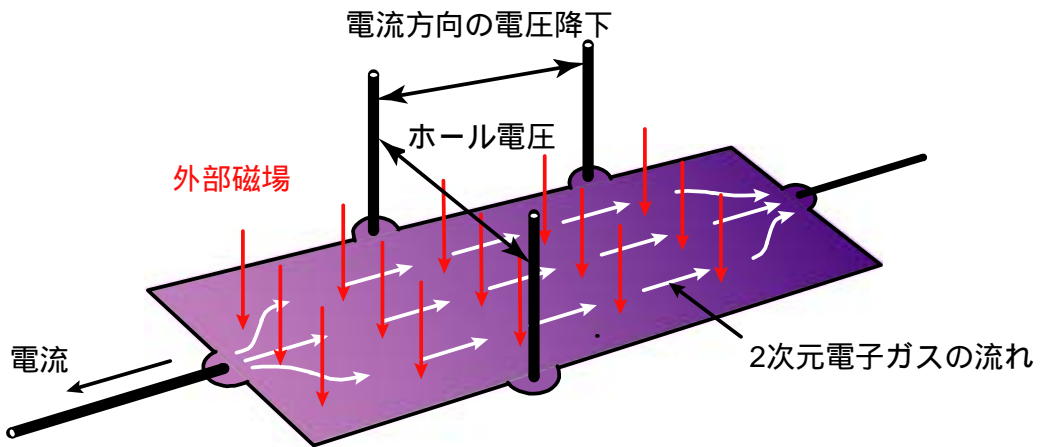
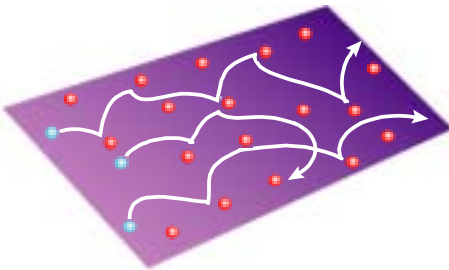


図 1：量子ホール素子の構造

ホール効果の測定原理

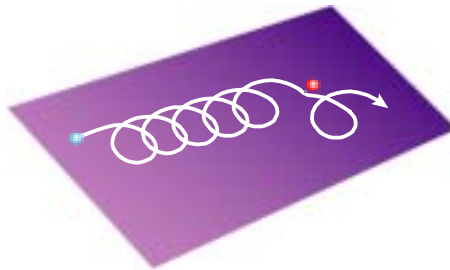


従来の薄膜結晶



不純物や欠陥が多く電子密度が高い

改善後の薄膜結晶



不純物や欠陥が少なく電子密度が低い

図2：量子ホール効果の測定原理

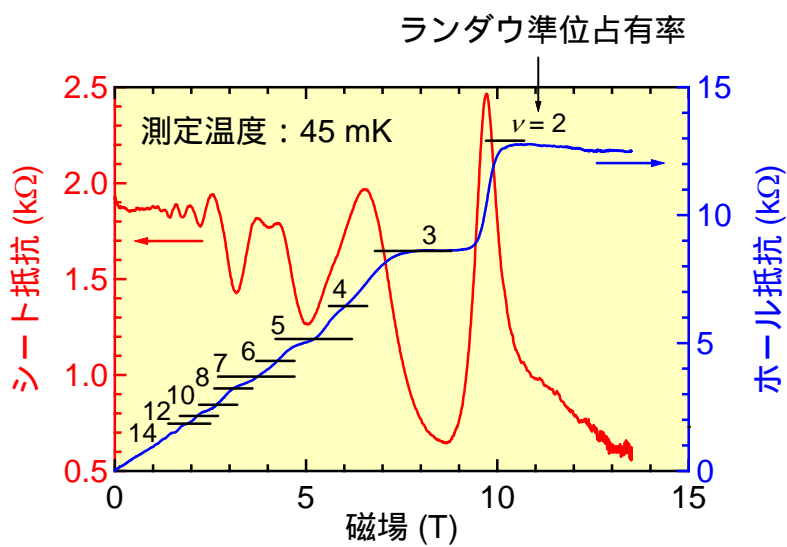


図3：酸化物 (ZnO/MgZnO 薄膜結晶) における量子ホール効果の測定例。

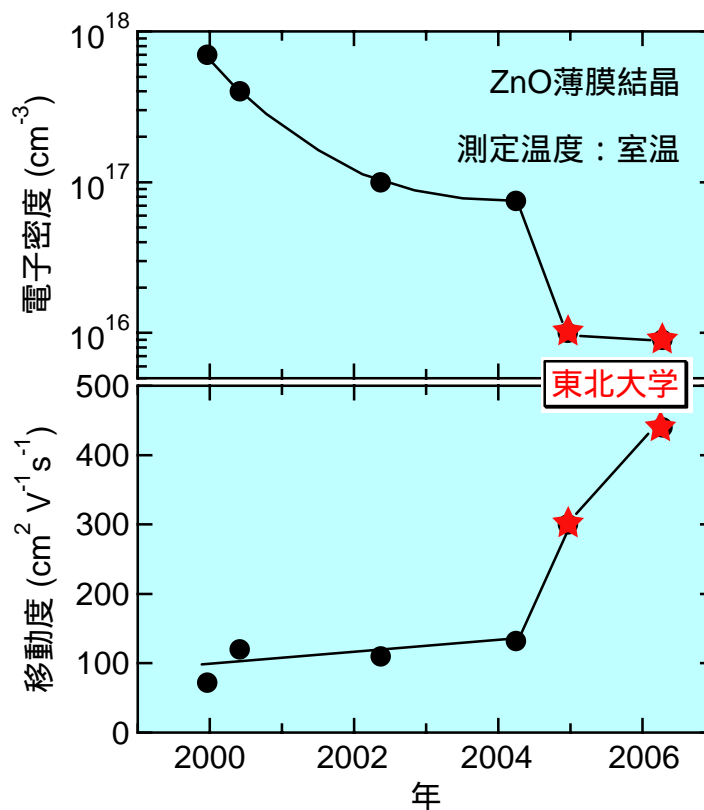


図 4：各研究機関が報告している ZnO 薄膜結晶の電子密度と移動度の最良値。

< 研究成果の意義と今後の予定 >

本研究の意義は次のように考えることができます。近年、透明なプラスチックで外装された“スケルトン”構造の携帯型機器が多く見られるようになりましたが、「透明エレクトロニクス」で実現できることを端的に言えば、機能の根幹である電子回路も透明にしてみようことです。そのためには、透明薄膜トランジスタの高性能化、すなわち電子移動度の向上が必要でした。酸化物半導体でも従来の半導体並みに高いトランジスタ特性を実現できる可能性を示した点で、本研究は「透明エレクトロニクス」の実現に可能性を切り拓いたといえます。また、今回開発した薄膜結晶成長技術は、ZnOに限らず他の透明酸化物半導体にも適用可能であることが実証され始めています。化学的に安定で資源が豊富な透明酸化物半導体に材料選択の幅が広がることでさらなる応用の展開が期待できます。

量子ホール効果は、その発現機構が完全に解明されていない高温超伝導と並び現代物理学における最もホットなトピックスとして世界中で盛んに研究されています。今回の成果

は、高温超伝導と量子ホール効果を結びつけることで全く新しい物理現象発見につながる重要なステップといえます。なぜならば、化学的性質が似ている高温超伝導酸化物との積層薄膜が容易に形成できるからです。これは、酸化物薄膜と製造工程を全く異にする従来の半導体では不可能でした。酸化物は、高温超伝導に限らず電子間の強い相互作用に基づく広範囲の物理的性質を有するので、様々な組み合わせの積層薄膜を形成することによって新奇な物理現象発見に向けて大きな展開が期待できます。

基礎研究進展の観点からは分数量子ホール効果の観測が望まれます。今後は、結晶成長技術をさらに一段高めることによって、これまで以上に高い移動度と低い電子密度の実現を目指します。また本研究で得られた知見を基に薄膜トランジスタの高性能化に取り組む予定です。

<用語の説明>

注1：量子ホール効果

2次元電子ガス（次項参照）の運動方向に垂直に強い磁場をかけると電子の軌道運動が量子化され、エネルギーがとびとびの値となるランダウ準位が形成されます。このランダウ準位を磁場の強度で変化させたとき、電子のエネルギーがちょうどランダウ準位のエネルギーと一致するとホール抵抗（次々項参照）に平坦部が現れます。ホール効果が量子化されるこの現象を量子ホール効果と呼びます。なお、量子ホール効果には整数量子ホール効果と分数量子ホール効果とがあり、それぞれを明らかにした功績により発見者には1985年と1998年にノーベル物理学賞が贈られました。

注2：2次元電子ガス

半導体と絶縁体あるいは異種半導体どうしの接合界面で界面に沿って運動する電子、すなわち、2次元平面にのみ運動量を持つ希薄な電子のことを2次元電子ガスと呼びます。

注3：ホール抵抗

固体中を流れる電流に垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に電圧（ホール電圧）が生じる現象をホール効果と呼び、ホール電圧を電流で割った値がホール抵抗です（図2上図参照）。

注4：[移動度](#)

移動度は、一定の電界が与えられた固体中を電子が移動する速さを示す物性値であり、1センチメートル当り1ボルトの電界中で1秒間に移動する距離として定義されます。純粋な半導体結晶中では材料固有の値をとりますが、実際の半導体結晶では必ず結晶欠陥が存在し、それらに電子が散乱されるので、固有値よりは小さな値となります。したがって、半導体結晶の品質を高めることで移動度は固有値に近づきます。結晶欠陥が少ない半導体でも電気抵抗を測定するためには、不純物を添加して電子（あるいは正孔）を生成しなければなりません。この不純物によっても電子は散乱されますが、異種半導体どうしの界面で電子が散乱されにくい構造を形成すると移動度は固有値を超えてさらに大きな値となることが知られています（文末の囲み記事参照）。

注5：[分極効果](#)

コンデンサでは絶縁体の両端に電圧をかけたときだけ電荷が蓄積されますが、絶縁体を強誘電体に置き換えると電圧を切っても蓄積された電荷は失われないため、不揮発性メモリとして動作し実用されています。このとき強誘電体中では相反する電荷を担う原子または分子の位置がわずかにずれており、これを分極した状態にあるといいます。ある種の結晶は電圧をかけなくても特定の結晶方位にわずかに分極した状態にあります。分極の大きさが異なる異種材料を接合するとその差に比例した電荷が界面に蓄積されるようになります。このことを分極効果と呼び、本研究で用いたZnOとMgZnOの接合では、この分極効果を用いて正の電荷を界面に蓄積した結果、電子が界面に引き寄せられて2次元電子ガスが形成されました（文末の囲み記事参照）。

< 掲載論文名 >

Quantum Hall-effect in polar oxide heterostructures

(分極した酸化物ヘテロ構造における量子ホール効果)

< 研究領域等 >

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域: 「ナノ界面技術の基盤構築」(研究総括: 新海征治)

研究課題名: 酸化物・有機分子の界面科学とデバイス学理の構築

研究代表者: 川崎 雅司 (東北大学金属材料研究所 教授)

研究実施期間: 平成18年度～平成23年度

戦略的創造研究推進事業 個人型研究 (さきがけ)

研究領域: 「ナノと物性」(研究総括: 神谷武志)

研究課題名: 酸化物量子井戸構造を用いた発光素子及び光非線形性素子の開発

研究代表者: 大友 明 (東北大学金属材料研究所 助手)

研究実施期間: 平成15年度～平成18年度

戦略的創造研究推進事業 ERATO 型研究

研究領域: 「大野半導体スピントロニクス」(研究総括: 大野 英男)

研究実施期間: 平成14年度～平成19年度

(お問い合わせ先)

国立大学法人東北大学

金属材料研究所超構造薄膜化学研究部門

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

助手 大友 明

電話番号：022-215-2088 ファックス：022-215-2086

電子メール：aohtomo@imr.tohoku.ac.jp

教授 川崎雅司

電話番号：022-215-2085 ファックス：022-215-2086

電子メール：kawasaki@imr.tohoku.ac.jp

独立行政法人科学技術振興機構

戦略的創造事業本部研究領域総合運営室 金子博之

〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

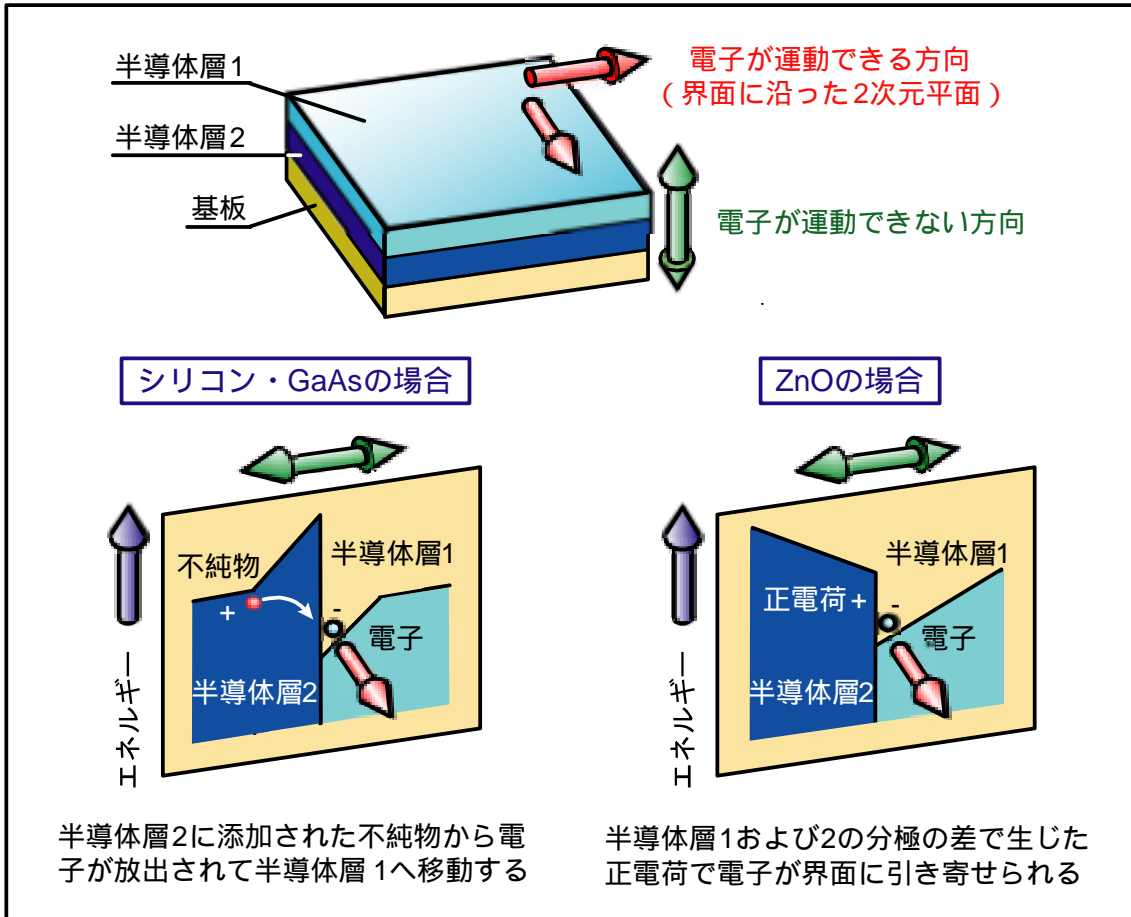
電話番号：048-226-5904 ファックス：048-222-1437

関連記事

- 平成 16 年 12 月 20 日付 河北新報「青色発光ダイオード 東北大金研 酸化亜鉛素材に開発」
- 平成 16 年 12 月 20 日付 朝日新聞（東京本社）「化粧原料で青色 LED 東北大など 抵コスト化の可能性」
- 平成 16 年 12 月 29 日付 読売新聞「東北大 化粧品成分の酸化亜鉛で青色 LED 開発成功」
- 平成 17 年 2 月 4 日 クローズアップみやぎ(NHK) 「世界初 夢の光誕生 - 東北大学の挑戦 - 」
- 平成 17 年 2 月 14 日 クローズアップ現代(NHK) 「夢の光が未来をひらく～新・発光ダイオードの衝撃～」

など

なお、リストは、<http://www.kawasaki.imr.tohoku.ac.jp/Report/index.htm>にも掲載されています。



シリコンや GaAs では、異種半導体どうしの接合界面で 2 次元電子ガスを形成する方法として、通常「変調ドーピング」という手法がとられます。これは、バンドギャップが大きい半導体層 2 (たとえば AlGaAs) に微量の不純物 (たとえば Si) を添加することでバンドギャップが小さく純粋な半導体層 1 (GaAs) との界面に電子を導入するものです。この場合、不純物から放出された電子は、不純物とは空間的に離れているため、不純物に散乱されずに運動することができます。負電荷を帯びた電子は正電荷を帯びた不純物から電気的な引力を受けて界面に引き寄せられるので高い移動度を有する 2 次元電子ガスが形成されます。

一方、本研究で明らかになった「分極効果」による 2 次元電子ガス形成機構は、以下のように説明されます。上記と同様にバンドギャップが大小異なる半導体層 2 (MgZnO) および 1 (ZnO) の界面に電子が引き寄せられて 2 次元電子ガスが形成されます。但し、各層は薄膜面内に垂直な方向 (緑色の矢印) に分極した状態にあります。各層における分極の大きさが若干異なるため、接合界面は、その差に相当する正電荷 (構造や材料を変えれば負電荷にもできます) を帯びます。半導体層 1 中の電子は、この正電荷によって界面に引き寄せられます。2 次元電子ガスの密度は、「分極効果」で生じた正電荷の密度と等しくなるので、分極の大きさを変えれば 2 次元電子ガスの密度が制御できます。本研究では、MgZnO 層 (半導体層 2) の Mg 組成を変化させることによって、2 次元電子ガスの密度を一桁近く制御することに成功しました。