

高純度半導体における電子の結晶化の観測に成功 ——核磁気共鳴を用いて電子結晶のミクロな構造を探る

NTTと独立行政法人 科学技術振興機構（JST）は、核磁気共鳴（NMR）^{*1}を用い、半導体ヘテロ構造^{*2}において、低温かつ強磁場で電子が結晶化する様子を観測することに成功しました。これは、電子が結晶のように整列することにより電子スピンの核スピンに及ぼす有効磁場^{*3}が空間的に変化することを利用したもので、高純度の半導体ヘテロ構造と高感度の抵抗検出NMR法を用いることで初めて可能になりました。

80年前に理論的に予言された「ウィグナー結晶」と呼ばれるこの電子の結晶状態については、これまで電磁波の共鳴吸収など間接的な情報しか得られていませんでしたが、今回の実験により、そのミクロな構造が初めて明らかにな

りました。この成果は、NMRが半導体中の電子のスピンだけでなく、電荷や軌道の状態を調べるのに有力な手法であることを示しており、今後、ウィグナー結晶以外のさまざまな電子状態の解明や、新たな物性の開拓につながるものと期待されます。また、不純物によって生じる電子分布の変化をナノメートルスケールで調べるなど、電子デバイスをナノレベルで評価する手法として有用な技術になると考えられます。

■研究の成果

NTT物性科学基礎研究所とJSTの研究チームは、砒化（ひか）ガリウム（GaAs）と砒化アルミニウムガリウム（AlGaAs）のヘテロ構造中の高移動度2次元電子に対して、GaAs層を構成する砒素（ひそ）（As）原子のNMR測定によって、電子系が低温・強磁場で結晶化していることを直接的に示す結果を得ました。核スピンの共鳴周波数は電子スピンがつくる有効磁場によってわずかに変化します。この変化はナイトシフトと呼ばれ、NMRはこのナイトシフトを測定することで電子スピンに関する情報を得ます。今回の実験では、ナイトシフトが電子の局所密度に比例することを利用して、電子の結晶化によって局所密度が

- * 1 核磁気共鳴（NMR）：磁場中で原子核が固有の周波数で電磁波を共鳴吸収する現象。原子核の化学結合や周囲の電子の状態によって共鳴周波数がわずかに変化するため、分析や物性測定に使われます。
- * 2 半導体ヘテロ構造：GaAsとAlGaAsなど異なる半導体を接合させた層構造。半導体はそれぞれ固有のエネルギーバンド構造を持っていますが、異なる半導体を接合させることで、元の半導体やその混晶にはない特性が得られます。半導体レーザーや高電子移動度トランジスタなどで使われています。
- * 3 有効磁場：電子や原子核など量子力学的粒子の間に働く相互作用が粒子のスピンの状態に依存する場合、その相互作用を一方が他方に及ぼす有効磁場として考えると便利なが多々あります。電子スピンと核スピンの間には相互作用が働いており、NMRの場合、それを電子スピンが核スピンに及ぼす有効磁場として考えることができます。

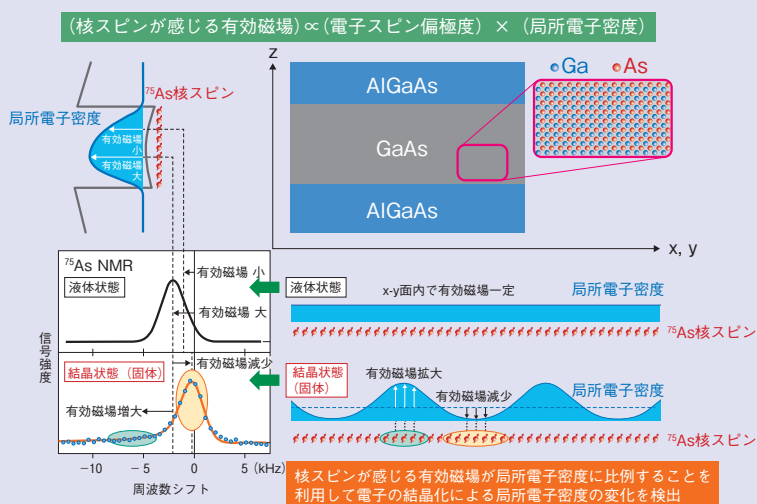


図 NMRによる電子の結晶化の観測

2次元面内で変化する様子を調べました(図)。さらに電子結晶の波動関数^{*4}を用いたシミュレーションと実験の比較により、電子結晶のミクロな構造が初めて明らかになりました。

■技術のポイント

- (1) 高移動度2次元電子試料を用いてウィグナー結晶を明瞭に観測

電子の結晶化は電子間のクーロン相互作用に起因します。試料に含まれる不純物が多いと、電子は他の電子との相互作用よりも不純物ポテンシャルの影響をより強く受けるため、ウィグナー結晶状態の観測には不純物の濃度を最小限に抑える必要があります。今回の実験ではNTT物性科学基礎研究所の結晶成長技術を活かし、高電子移動度を有するGaAs/AlGaAsヘテロ構造試料を用いることで、不純物の影響を最小限に抑え、ウィグナー結晶状態を明瞭に観測することに成功しました。

- (2) 抵抗検出NMR法を用いた局所電子密度の測定

NMRでは電子スピンがつくる有効磁場による核スピンの共鳴周波数のわずかな変化を測定します。しかし、通常

*4 波動関数：量子力学的な粒子である電子は、その位置と運動量を同時に定めることができません。電子の状態は量子力学を記述するシュレーディンガー方程式を解くことで得られる波動関数と呼ばれる座標と時間の関数によって記述されます。ある位置における電子の存在確率はその点における波動関数の絶対値の2乗によって与えられます。強磁場中の半導体2次元電子系のウィグナー結晶では、結晶化した電子の存在確率は格子点の周りに有限の広がりを持って分布しており、そのミクロな構造は波動関数によって記述されます。

の方法では信号強度が弱いため、2次元電子一層に対する測定は困難です。今回の実験では、研究チームが独自に発展させた抵抗検出NMR法を用いました。抵抗検出NMR法は、核スピンの共鳴を2次元電子系の抵抗の変化として検出することにより、基板や他の層に含まれる同種原子の影響を取り除き、測定対象である2次元電子と相互作用している核スピンからの信号を選択的かつ高感度で検出することを可能にします。これにより、結晶化した電子の局所電子密度の変化を表す特異なNMRスペクトルを明瞭に観測することが可能になりました。

本研究は、NTTとJSTの共同研究として行われました。本研究における理論モデルおよび結果の考察は、東北大学大学院理学研究科 柴田尚和 准教授との議論により得られたものです。

■参考文献

- (1) L. Tiemann, T. D. Rhone, N. Shibata, and K. Muraki: "NMR profiling of quantum electron solids in high magnetic fields," Nature Physics, doi:10.1038/nphys3031, 2014.

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail a-info@lab.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2014/1407/140718a.html>

昔思い描いた電子の結晶に偶然出会う

村木 康二

NTT物性科学基礎研究所

量子電子物性研究部 量子固体物性研究グループ

グループリーダー(主幹研究員/上席特別研究員)

今回の成果は「電子の結晶化を核磁気共鳴(NMR)によって観測した」というものですが、もともと電子の結晶化を見ようとしていたわけではなく、電子のスピン偏極度を調べていたときに、ある条件でNMRスペクトルが特異な形になることを偶然見つけたのがきっかけです。実は、電子が結晶化したらNMRスペクトルに異常が現れるはずだというアイデアは2005年ぐらいから持っていました。当時、ある論文を査読していたときに思いついたのですが、そのころは自分でそれを測定する技術はまだなかったので頭の片隅に留着していました。また入社して間もないころ、「所長ファンド」で提案したテーマは、強磁場中の電子結晶の実験的検証に関するものでした(そのとき提案したのは別の方法でしたが)。普段の研究ではそんな感じで、自分がそのとき行っている研究と直接関係なくても「こうしたらあなるのではないかと」、自分なりに仮説を立てて考えるようにしています。

電子結晶の研究は歴史が古く、最初の理論が発表されたのが1934年、強磁場中の電子結晶の理論も1970年代までさかのぼります。そういった歴史のある論文を読むと、実験で検証する方法も明らかでないところに精密な理論を構築している研究者たちの想像力のたくましさや畏敬の念を抱かすにはいられません。電子結晶はそのままでは役に立たないのですが、想像力を働かせて、基礎的な研究から新しく役に立つ技術につなげたいと考えています。

研究者紹介

