

半導体量子構造の伝導特性制御と超高感度 NMR(核磁気共鳴)

研究概要

半導体二次元量子構造やナノ構造の伝導特性を制御することで、核スピンを GaAs ならびに InSb 量子構造中で偏極するとともに、偏極した核スピン状態を高感度に抵抗で検出することに成功した。これらを用いることで、これまでの NMR の常識を超えた一層の二次元量子井戸、さらには量子細線など低次元構造での高感度 NMR が実現でき、量子構造の電子スピン状態や歪など、ほかの技術では明確にできない様々な特性を NMR スペクトルや核スピン縦緩和時間(T_1)を利用して明らかにすることができる。

高感度 NMR 測定ではゲート制御により様々な状態の NMR スペクトルや T_1 時間を測定することが大変重要になる。GaAs 量子構造ではすでにゲート制御技術が確立されているが、InSb ではこれが確立されていなかったため、原子層堆積 (ALD) 技術を用いて高品質 Al_2O_3 絶縁膜を形成することを試みた。InSb/AlInSb ヘテロ構造にも工夫を加えることで、極めて小さな界面準位密度を実現し、完全空位化を含む広範囲での InSb 量子井戸の電子密度制御に成功した。これは Si に次ぐ次世代半導体やスピントロニクス材料として期待されている InSb で良好なゲート制御を世界に先駆け実現したものであり、デバイスへの応用面からも重要である。さらに、表面層と絶縁膜の組み合わせによりメモリー効果が出現することも確認した。

核スピンはその長い緩和時間から量子情報処理への応用が期待されており、その制御には様々な多重パルスが必要になる。また、多重パルスは NMR 技術としても重要である。そこで、スピン (核スピン) 系 (広い意味で量子ビット全般) に多重 π パルスを連続的に印加した際の振る舞いを調べた。特に、十分に多数回のパルス印加後に表れる信号の減衰に着目し、その減衰定数が、丁度パルス間隔の 2 倍の逆数に対応した周波数の雑音スペクトルと 1 対 1 に対応することを理論的に示した。さらに、通常の室温 NMR を用いて、確かに多重 π パルス印加時にパルス間隔に対応した核スピンの横緩和時間 (一般化したコヒーレント時間、 T_2^L) が測定できることを実験的に実証した。これらは T_2^L の特性から核スピンの感じる雑音特性をその周波数依存性までも含めて測定する技術を確立するものである。得られた成果はこれまで用いられて来た一般的なハーンエコーなどによる T_2 時間測定とは質的に異なるものであり、核スピンを利用した様々な測定に画期的な変化をもたらすことが期待される。

以下に各図の説明を加える。

図 1 は高感度 NMR とその応用分野を示している。高感度 NMR は量子構造のスピン物性の解明など基礎的な分野への応用が中心であるが、固体中でのナノスケールの核スピン制御はナノスケール MRI (核磁気イメージング) に繋がる技術としても注目される。核スピン

はそのコヒーレント時間が長いこと将来の量子情報処理への応用も期待されている。

図2は InSb 量子構造で高感度 NMR、特にポンプ・プローブ測定を実現するために開発したゲート制御手法である。ALD（原子層堆積）したアルミナ絶縁膜を用い、InSb ヘテロ構造にも工夫を加えることで、界面準位が小さく、ゲート制御性に優れた絶縁体-半導体構造を実現することができた。現在、良好な特性は 100K 以下の温度で実現されているが、パラメータを変えることにより、良好なゲート動作をより高温まで実現することができる可能性がある。さらに、構造を工夫することでメモリー効果が発現することも見出した。

図3はスピン（核スピン）に加える多重 π パルス列の一例とその時に予想される信号強度の減衰を示している。 2τ 間隔の π パルス列を印加した時の信号減衰率は、特に十分に長い時間領域で周波数 $1/4\tau$ における雑音スペクトル $S(1/4\tau)$ を 1対1に反映することが理論的に確認されている。この減衰時定数を一般的なコヒーレント時間 T_2^L と呼んでいるが、この T_2^L はパルス間隔 2τ の関数となる。通常のハーンエコー信号とことなり、 τ を変えることで、核スピンが感じる雑音を周波数分解して測定できることを示しており、核スピンをベースにした多くの計測に変革をもたらす可能性がある。実際に通常の NMR 装置を用いて、多重 π パルス列を加えることで、理論的に予想された信号減衰特性が得られることが実験的に確認されている。