

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740219

研究課題名 (和文) 走査トンネル顕微鏡による半導体中のナノスケール核スピン偏極と検出

研究課題名 (英文) Nuclear spin polarization and detection at nanometer scale by scanning tunneling microscope

研究代表者

橋本 克之 (HASHIMOTO KATSUSHI)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30451511

研究成果の概要 (和文)：極低温 100 mK、強磁場 8 T で動作する走査ゲート顕微鏡を用いて、4  $\mu$ m 幅のホールバー内で生じた核スピン偏極の分布を測定する手法を開発した。これは、ナノスケールでの核スピン偏極の分布の測定、さらにはナノスケールでの核スピン偏極の実現につながる大きな成果である。

研究成果の概要 (英文)：We developed a methodology to measure a distribution of nuclear spins polarized within the 4  $\mu$ m Hall bar. This may be extended to the nano-scale nuclear spin polarization and detection.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：(1)走査プローブ顕微鏡 (2)半導体物性 (3)量子閉じ込め

## 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体中に閉じ込めた二次元電子ガス (2DEG) を強磁場下、極低温下に置いた際生じる量子ホール状態で、核スピン偏極およびその検出を電氣的に行うことが可能であることが報告されている。これらの実験は主に電気抵抗測定で行われており、通常数十ミクロンの広い領域で核スピン偏極・検出を行うものでありナノメートルスケールでの実験は行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、走査プローブ顕微鏡を用いて、量子ホール状態にある二次元電子系においてナノスケール領域の核スピンの偏極およ

び検出を行う。また、電子系を介した核スピン偏極・検出の実験のため、同スケールでの量子ホール状態の電子系の空間分布を明らかにする。

## 3. 研究の方法

①走査プローブ顕微鏡で観察可能な二次元電子系を作成する。②量子ホール状態で電流誘起核スピン偏極をマクロ的に行い、その分布を走査プローブ顕微鏡で観測する。③走査プローブ顕微鏡を用いてナノスケールの領域で核スピン偏極を誘起する。④過去に行った表面二次元電子系上での走査トンネル分光マッピングのデータを解析し、電子系を介した核スピン偏極・検出に必要な補足情報を

得る。

#### 4. 研究成果

走査トンネル顕微鏡で測定可能な吸着原子/ $n$ -InSb(110)を作成するため、硫黄分子を含むアルカリ溶液中でInSbのウェハをへきかいすることで、清浄表面に硫黄分子を吸着させた。この吸着過程時は水溶液の温度を一定に保つ必要があるため、恒温槽内ですべての過程を行った。その後、二次元電子系が実際に誘起されているかどうか確認するため、フォトリソグラフ技術と電子ビーム蒸着機を用いて数個の電極を試料表面に取り付け、電気抵抗測定を行った。その結果、100mKの極低温で、量子ホール効果に類似した磁気抵抗の振動を観測した。しかしながら、作成した表面のSTM測定においては、安定なSTM像が得られなかった。これらの結果より、硫黄分子を吸着したInSb上に大気中で安定な表面二次元電子系を作成することが困難であることが分かった。

そこで、プローブで2DEGを測定するための他の手法として、GaAs/AlGaAsヘテロ構造中の二次元電子系に原子間力顕微鏡測定を組み合わせ、探針から二次元電子ガスに局所電界を印加しながら抵抗測定を行う、いわゆる走査ゲート顕微鏡 (SGM) 測定を行った。この実験のために、約100 mKで動作する希釈冷凍機走査原子間力顕微鏡 (AFM) を開発した。さらにSGM測定を行うために、幅約  $4 \mu\text{m}$  の

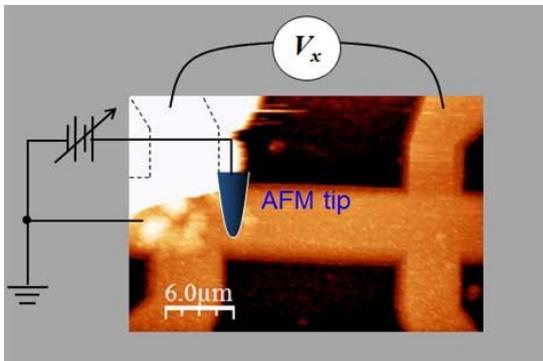


図1：幅約  $4 \mu\text{m}$  のホールバーの AFM 像。抵抗測定ライン、探針への電圧印加ラインを模式的に示す。

ホールバーを作成した。図1に作成したホールバーのAFM像と、模式的な配線図を示す。図に示すように、探針への電圧印加ラインと抵抗測定ラインを接続し、走査する探針で局所電界を与えながら抵抗測定を行った。

図2は  $T = 110 \text{ mK}$  で同時測定したAFM像 (上部パネル) とSGM像 (下部パネル) を示している。AFM像は、水平方向に延びる幅約  $4 \mu\text{m}$  のホールバーとそれに垂直に交わる電圧端子の形状を示している。探針電圧  $V_{\text{tip}} = 0 \text{ V}$  におけるSGM像を見ると、ホールバー付近で抵抗値が上昇していることがわかる。それぞれの像中に示してある直線に沿ってとった

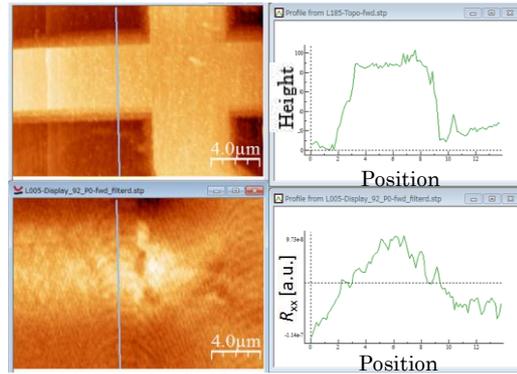


図2：  $B = 0 \text{ T}$  における二次元電子ガスの走査ゲート顕微鏡観察。上部パネル：AFM像 (左)；断面カーブ (右)。下部パネル：SGM像 (左)；断面カーブ (右)； $V_{\text{tip}} = 0 \text{ V}$ 。

断面カーブ (右パネル) を比較すると、確かにホールバー中央付近に向かい、なだらかに抵抗が増大している事がわかる。これは、探針の局所電界によりホールバー直下の電子が散乱された結果生じた抵抗変化であることを示している。このことは、 $V_{\text{tip}} = 0 \text{ V}$  であっても、探針が2DEGと同電位ではないことを意味している。この電位差は、探針と試料の材料であるWとGaAsの仕事関数の違いつまりコンタクトポテンシャルによるものと考えられる。

次に、磁場  $B = 8 \text{ T}$  を2DEG面に垂直に印加し、量子ホール効果を示す電子充填率  $\nu = 1$  と

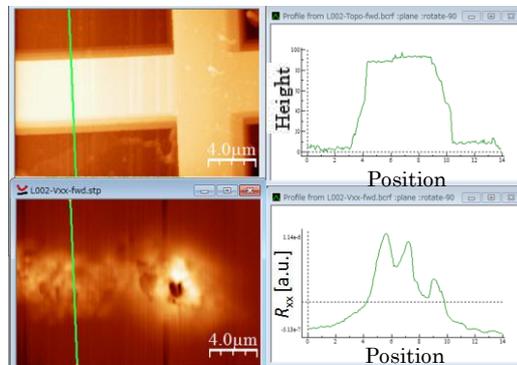


図3：  $B = 8 \text{ T}$  量子ホール状態における二次元電子ガスの走査ゲート顕微鏡観察。上部パネル：AFM像 (左)；断面カーブ (右)。下部パネル：SGM像 (左)；断面カーブ (右)； $V_{\text{tip}} = 0 \text{ V}$ 。

した。その際のAFM像とSGM像を図3に示す。0磁場とは異なり、ホールバー内で数百ナノメートルから数マイクロメートルのスケールで抵抗値が振動していることがわかる。例えば、それぞれの像中の直線に沿った断面カーブ (右パネル) を見ると3つの明確なピークを含む振動が現れている。このことは、0磁場に対して量子ホール状態では、探針電界によ

る電子散乱が空間的に変化しやすくなっていると言える。

最後に、 $\nu=1$  で電流を450 nAまで大きくし、核スピン偏極が生じる量子ホール効果のブレイクダウン領域で抵抗検出核磁気共鳴 RD-NMRを行った。まず、試料の周りにまいたコイルにラジオ周波数の電流を流すことで試料全体に電磁場を照射しAsの核磁気共鳴周波数を57.854 MHzと決定した。この周波数をOn resonance、これより0.3 MHz高い周波数をOff resonanceとして、これら二つの周波数のRFを探針バイアスに交互に加え抵抗変化を測定した [図4 (a)参照]。まず、ホールバーから3  $\mu$ m程度離れた位置Position (a)と(d)に探針をセットし、On/Off resonanceのRFを探針に交互に印加した場合は、On/Offの切り替え前後で顕著な抵抗変化は生じていないことがわかる[図4 (b)]。ところが、ホールバーの中央付近であるPosition (b)に探針をセットし同様の実験をすると、明らかにOn

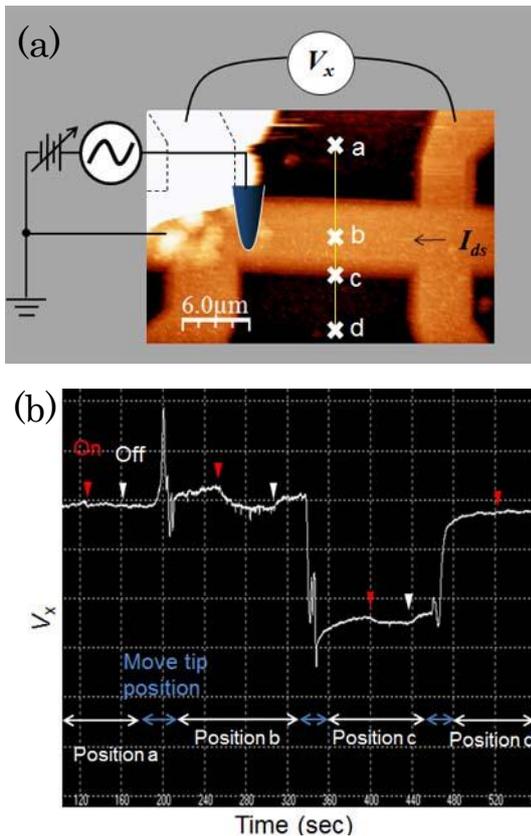


図4：局所 RD-NMR 測定。(a)測定系の模式図。測定点を×印で示す。(b) (a)に示した a-d の場所で測定した、On/Off resonance 時の抵抗の時間変化。

resonance RF印加時に抵抗が減少し、On resonance RF印加時に抵抗が元の値に戻っていることがわかる。また、ホールバーの端であるPosition (c)でも、わずかながら同様の

抵抗の減少が観測された。核スピン偏極はブレイクダウンが生じているホールバー内で生じることから、上記の実験結果はその核スピンの空間分布をとらえたものと考えられる。このことは、今後、量子ホール状態におけるナノスケールでの核スピン偏極およびその観察の実現につながる大きな成果といえる。

上述の現象のように核スピン偏極は量子ホール状態である電子系を通して測定を行うため、電子系のナノスケールでの振る舞いを詳細に調べることは重要である。そこで、過去に行った表面二次元電子系を用いた走査トンネル分光実空間マッピングのデータを用い、量子ホール状態のナノスケール構造の解析を行った。図5 (a)-(g)にランダウレベルLL0からLL3で得られた同領域での走査トンネル分光 (STS) 像を示す。これらはそれぞれエネルギーにおける局所状態密度 (LDOS) 像と等価である。それぞれのエネルギー位置は

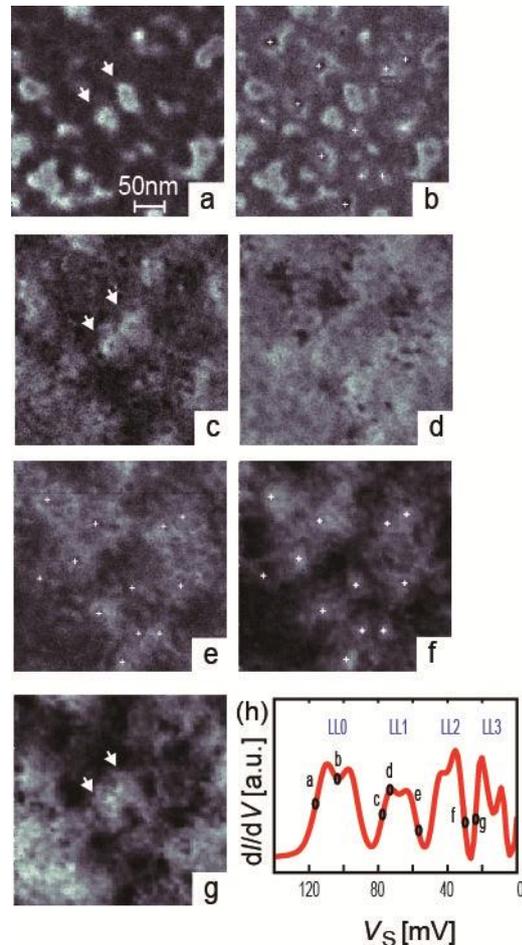


図5：走査トンネル分光 (STS) 測定。(a)-(g) STS マッピングにより得られた LL0-LL3 の局所状態密度像。(h) 空間平均した状態密度カーブ。(a)-(g) のエネルギー位置を丸印で示す。

図 5 (h)に示した空間平均したSTSカーブに示している。LL0[図 5 (a)]ではリングのよう

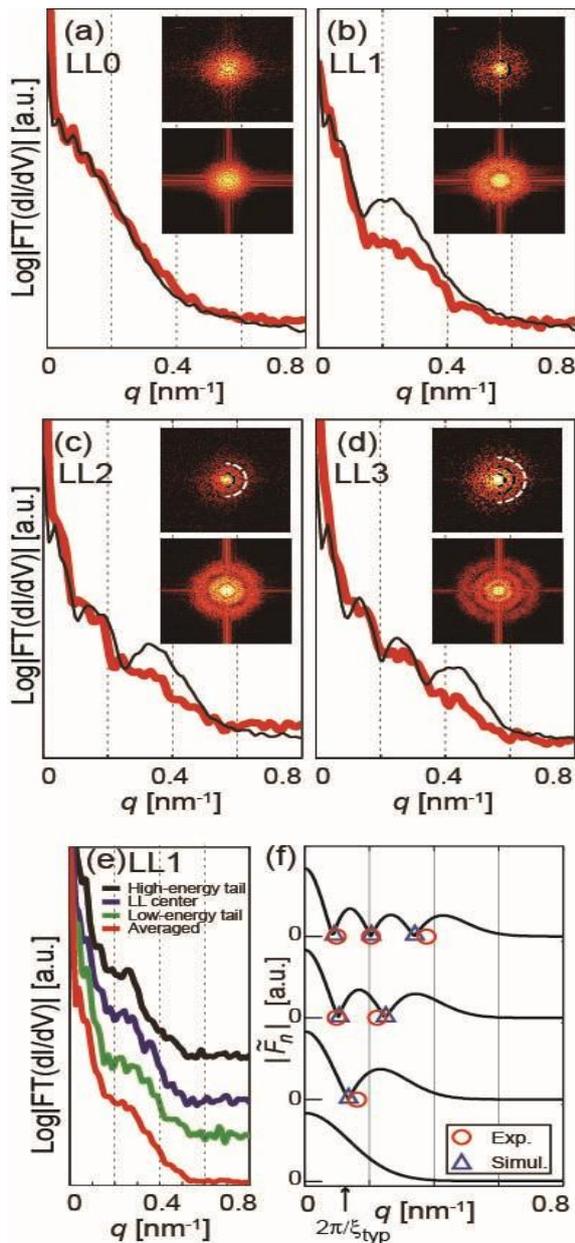


図 6 : フーリエ変換解析。(a)-(d) 図 5 (a),(c),(f),(g)のフーリエ変換(FT)解析により得られた FT 像 (挿入図上部パネル) とその全角度平均したカーブ (赤)。比較のためシミュレーションにより得られた FT 像 (挿入図下部パネル) と平均化したカーブ (黒)を示す。(e) 図 5 (e)(f)(d)の FT カーブ。それぞれ高エネルギー側 LL 1 裾野 (黒)、LL 1 中央 (紫)、低エネルギー側 LL 1 裾野 (緑)、LL1 内での平均化した (赤) FT カーブである。(f) 計算で求めた量子ホール状態の量子数に特有な構造因子カーブに(a)-(d)から得られた FT カーブの最小値の波数位置を丸印 (実験) と三角印 (シミュレーション) でプロットしている。

な局在状態パターンが見られるが、高次のLLに行くに従い、複雑なLDOSパターンに変化していくことがわかる。これらの実空間LDOS像をフーリエ変換 (FT) し得られたFT像 (図 6 挿入図上部パネル) とその全角度で平均したFTカーブを図 6 に示す。LL0[図 6(a)]ではFT強度が波数と共に単調に減少している。しかし、LL1のFTカーブでは $q = 0.16 \text{ nm}^{-1}$ でいったんくぼみその後緩やかなカーブが現れている。これはFT像におけるデスク状パターンの周囲に現れているリング状のパターンに相当する。LL2、LL3ではFTカーブ上のくぼみの数とFT像上のリングの数が2個、3個と増えていることがわかる。無秩序ポテンシャルを考慮に入れたシミュレーションで得られたFTカーブ (黒線) およびFT像 (挿入図上部パネル) と比較すると、n次のランダウレベルにおいてn個の極小値が現れる傾向だけではなく、その極小値の波数位置も再現していることがわかる。また、このFTカーブは、指数が同じランダウレベルにおいて、局在・非局在状態であっても同様に生じる[図 6 (e)]。さらに、観測されたFTカーブは量子ホール状態の状態密度の構造因子と呼ばれる関数[図 6 (f)黒線]で示す事が可能である。この構造因子中には、極小値が磁気長の逆数程度の決まった波数で現れ、実験 (赤丸) とシミュレーション (三角) で得られた極小値の波数位置もそれらに一致することが分かった。これらの波数空間で現れる極小値は、n次のLLに依存した量子力学的なノード構造がナノスケールで実空間に現れていることを意味している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

K Hashimoto, J Wiebe, T Inaoka, Y Hirayama, R Wiesendanger and M Morgenstern, Journal of Physics: Conference Series, 査読あり, 334巻, 2011年, 012008-1-6頁

[学会発表] (計 6 件)

1. 橋本克之, "Real-Space mapping of Landau quantization in a two dimensional disordered system", 7th International Workshop on Disordered Systems, 2010年9月21日, メキシコ・プエブラ

2. 橋本克之, "Real-Space Observation of Quantum Hall Transition", The Horiba-19th International Conference on "The Application of High Magnetic Fields in

Semiconductor Physics and Nanotechnology、  
2010年9月2日、福岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 克之 (HASHIMOTO KATSUSHI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30451511

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：