

# 論文内容の要旨

## 論文題目

吸着金属によって誘起された半導体表面二次元電子系の輸送特性

(Transport properties of metal-adsorbate-induced two dimensional electron systems on semiconductor surfaces)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

辻 幸秀

化合物半導体の一つである InAs は、表面に電荷を容易に蓄積する性質をもっている。原子一層分にも満たない微量の金属を吸着した場合でも表面におけるフェルミ準位が伝導帯よりも高く位置する現象が観測される。これまで光電子分光などの測定によって、数多くの種類の吸着金属(Ag, Au, Ga, Cu, Cs, Na, Sb, Fe, Nb, Co)に対してこのような現象が確認されている。金属吸着によって誘起された InAs 表面蓄積層（反転層）では、化学反応性の高い表面近傍に電子が存在するため、吸着した金属と電子とが強く相互作用している可能性が高く、その場合、吸着金属の種類を変える事で性質の異なるさまざまな電子状態を作成する事が出来ると期待される。また、デバイス表面から  $0.1 \mu\text{m}$  程度深いところに存在する半導体界面の低次元電子系とは大きく異なり、マイクロプローブ測定法との相性も良い。デバイスの微細化が進みマイクロな構造と伝導性との関係を明らかにする必要性の高まりから、試料中の電流分布電流を調べる研究が現在盛んに行われている。InAs 表面はその点で非常に適した電子系である。

このように InAs 表面の電子系は固体デバイス中で実現されていたこれまでの低次元電子系とは大きく異なった特徴を持ち、非常に魅力的な電子系である。しかし、現段階では光電子分光や STM などの測定方法で、表面構造や表面準位、表面でのフェルミ準位を決めたものに留まり、最も基本的な伝導・磁気特性などの物性を測定するまでには至っていない。電子状態が表面の化学結合性と強く結びついている事は魅力的ではあるが、逆に、界面状態をきちんと制御しながら、その物性を測ることは困難を極めるからである。伝導特性を測定するにしても、界面の物質制御をしながら、面内にどのように端子を接続するのか、伝導チャネルをどのように制限するのかなどの難しさが存在する。

本研究によって、*p* 型 InAs 表面の反転層における面内方向の伝導を精密に測定する実験手法が確立された。高磁場領域においては整数量子ホール効果を観測する事にも成功し、表面反転層内の電子が広い領域で完全な二次元系を形成している事を示した。表面二次元電子系に特有な蒸着金属の自由度を利用し、二次元電子状態に対して吸着金属が及ぼす影響を調べた。Au 吸着によって Elliot-Yafet(EY)機構によるスピン緩和の効果が変化することを示唆する結果が得られた。

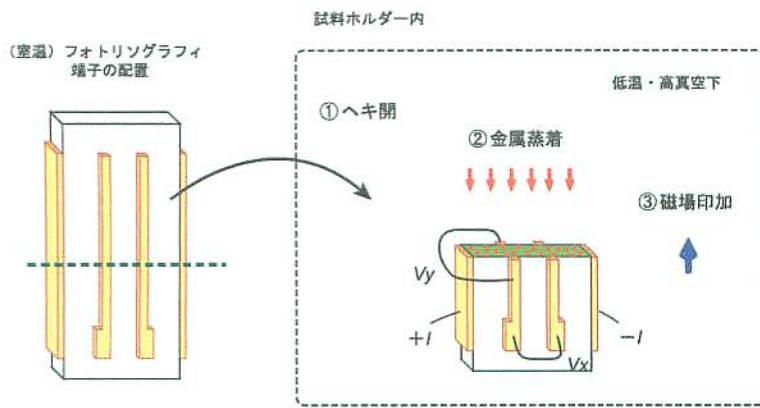


図1: InAs表面反転層の面内磁気伝導測定

図1に測定手法の概略を示す。低温・高真空にされた試料ホルダー内で、「試料のヘキ開」、「蒸着」、「磁気抵抗測定」の一連の操作が行われる。ヘキ開によって得られた清浄表面は汚染されることなく金属のその場蒸着が施され、そのまま磁場中の面内伝導測定を行う事が可能になっている。導電性のないヘキ開表面に、薄膜化するには程

遠い0.003 ML (1 monolayer =  $7.75 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ )というごく少量の銀を蒸着しただけで、数 MΩ以上だった端子間抵抗が1~10 kΩまで小さくなる。金属の蒸着量を考えると金属薄膜による伝導が生じたとは考えにくく、また、表面に吸着した微量の金属がバルクの伝導を大きく変化させたというのも考えにくい。従って、このような急激な抵抗の変化は、

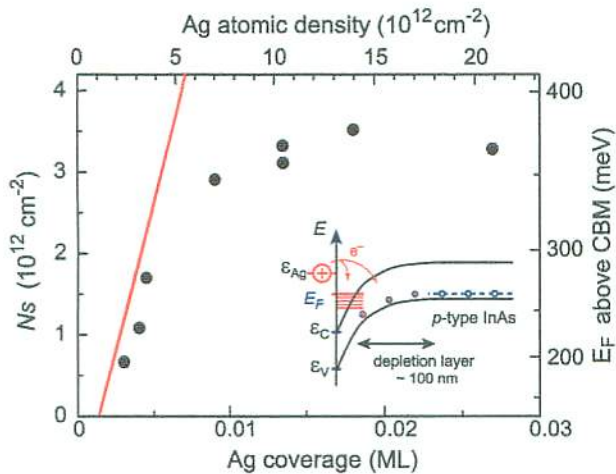


図2: 電子濃度の銀蒸着量依存性 (低蒸着量領域)

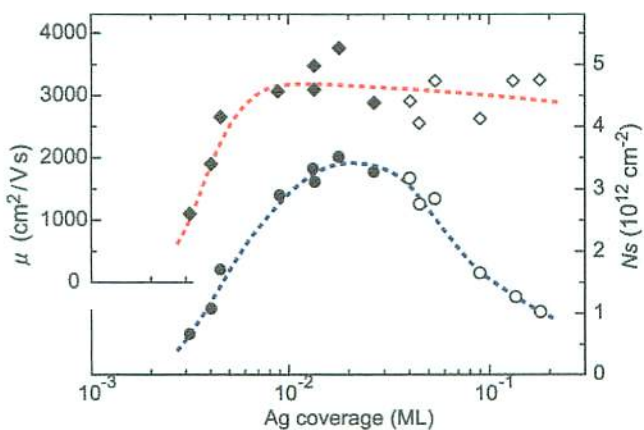


図3: 電子濃度と移動度の銀蒸着量依存性

金属蒸着によって誘起された InAs の表面伝導を測定している事を示している。試料端子は、ヘキ開面に対してホールバー型になっているため、磁場中での磁気伝導を測定することで、蒸着によって誘起された表面電子系の電子濃度と電子移動度を求めることが出来る。

図2に Ag 蒸着量が  $0 < \Theta < 0.3$  ML までの低蒸着量領域の電子濃度と蒸着量の関係を示す。電子濃度  $N_s$  は、蒸着量  $\Theta \sim 0.002$  ML から蒸着量と共に増加した後、ほぼ一定 ( $\sim 3.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) となる。実線は、挿入図で示すように一つの蒸着金属原子が一つの電子を放出する事を仮定した場合に予想される蒸着量に対する反転層中の電子濃度依存性を示したものである。正の閾値を持っている理由は、反転層を作るためにはバンドを曲げる必要があり、空乏層のアクセプターをイオン化するために蒸着金属から放出された電子が使われたからである。これらの計算結果は、今回の実験結果をよく再現していることがわかる。電子濃度が増加するとフェルミエネルギーが増加し、蒸着金属が作る表面ドナー準位に達すると、それ以上電子は供給されなくなると考えている。飽和に達する前に実線から徐々に蒸着量が増加するに従って直線からずれてくるのは、すでにイオン化している



蒸着金属原子のクーロンポテンシャルによって、後から表面吸着した金属原子はイオン化しにくくなるためだと考えられる。電子濃度の最大値からフェルミエネルギーを見積もると伝導帯の底から 380 meV となり、Aristov らの光電子分光で得られた結果[1]とも良い一致を示した。

図 3 に、より広い範囲の Ag 蒸着量に対する電子濃度の依存性を示す。0.04 ML 以上の蒸着量から電子濃度は減少し始めることがわかる。これは、先ほど低電子濃度領域で仮定した単一銀原子によるドナーモデルでは説明出来ないため、クラスター形成が大きく関与しているのではないかと考えている。クラスター内の電子は原子間を移動出来る分だけ単一原子内に存在するよりもエネルギー的に得をしており、表面準位もその分だけ下がっていることが考えられる。また、一つのクラスターで複数の電子を出す事は非常に大きなクーロンエネルギーを必要とするために、一つのクラスターからは構成している原子数ほど電子が出てこないはずである。表面上でクラスターの成長と結合が進む事によるクラスター数の減少は、InAs の伝導帯に電子を供給するドナー数(表面ドナー準位の状態密度)の減少を引き起こす。従って、クラスター形成による表面ドナー準位と、その準位の状態密度の両方の低下が反転層の電子濃度を減少させた原因であると考えられる。

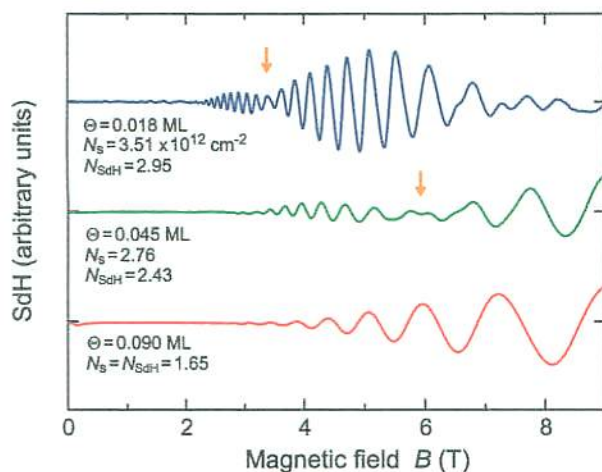


図 4 : Shubnikov-de Haas振動のビートパターンを観測

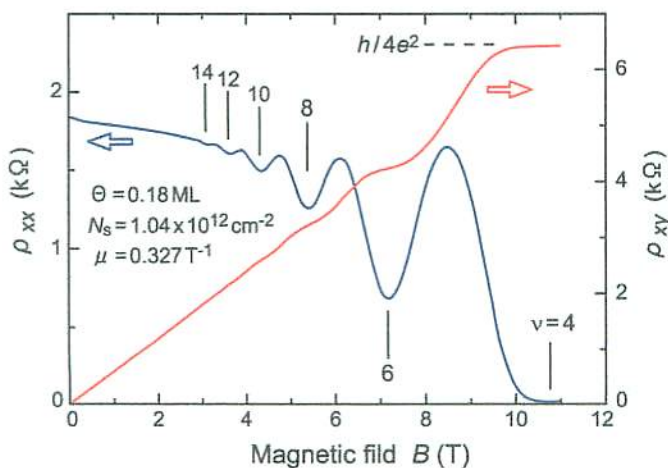


図 5 : InAs表面反転層における量子ホール効果

また、移動度の Ag 蒸着量に対する依存性を見てみると、図 3 に示すように必ずしも電子濃度の変化と対応していないことがわかる。低蒸着量領域 ( $\Theta < 0.01$  ML)においては、電子濃度と同様、移動度も急速に増大しているのに対して、高蒸着量領域 ( $\Theta > 0.04$  ML)では、電子濃度が減少し始めるのに対して移動度はほとんど変化しない。スクリーニング効果や散乱の波数依存性など電子濃度の変化による影響だけではなく、蒸着金属が作る不規則ポテンシャルの影響も現れていると考えられる。従って、蒸着金属は、単に反転層中の電子を供給するだけでなく、散乱体として二次元電子系の電気伝導に影響を与えている事が明らかになった。高蒸着領域で移動度が高いのは、一原子あたりの蒸着金属が電子を供給するイオン化率が低下しているためであろう。イオン化率が 1 に近い低蒸着領域に比べて蒸着原子が作る表面ポテンシャルの凹凸が小さくなっていると考えられる。

図 4 では高磁場中での Shubnikov-de Haas 振動の様子を示している。各 Ag 蒸着量によって、InAs 反転層の電子濃度が異なるため、SdH 振動の振る舞いも大きく異なる。図中の矢印で示すように、InAs 反転層では Rashba 効果によるスピンスプリットオフバンドが形成されたことを示す SdH 振動

のビートパターンの節が観測された。

図5に、電子濃度は低く、シングルサブバンド状態にあると考えられる Ag 吸着された InAs 反転層の縦抵抗とホール抵抗の磁場依存性を示している。磁場を強くすると SdH 振動はより大きくなり、11 T で縦抵抗は完全に零になり、ホール抵抗が一定値を取るランダウ準位充填率  $\nu=4$  の量子ホール効果状態が観測された。これはヘキ開表面電子系における初めての量子ホール効果の観測であると同時に、この系が完全な二次元である事を証明するものである。

次に Mg 金属薄膜に Au 不純物を導入した実験[2]からヒントを得て、InAs 表面でも吸着金属によって EY 機構によるスピン軌道相互作用の大きさが変化しないのではないかと考えた。ただし、InAs 表面反転層は D'yakonov-Perel(DP)機構によるスピン緩和の効果が強いと考えられており、新たに導入された EY 機構の効果とすでに存在する DP 機構の効果を区別する必要がある。そこで、Au および Ge をそれぞれ吸着させた電子濃度の等しい2つの InAs 二次元電子系を用いて比較を行うことにした。電子濃度が等しい場合、閉じ込めポテンシャルおよびフェルミ波数が等しくなるため、Rashba 項の係数は等しくなる。

図6に、Ge および Au を蒸着した場合の InAs 表面反転層の磁気抵抗を示す。DP 機構によるスピン軌道相互作用の効果を考慮した Iordanskii, Lyada-Geller, Pikus (ILP)による反弱反局在理論を用いてフィッティングを行ったところ、Ge を吸着させた場合に対して非常によく再現出来ることがわかった。また、フィッティングによって得られた値を用いて、DP 機構によるスピン緩和時間と EY 機構によるスピン緩和時間の比( $\tau_{s DP} / \tau_{s EY}$ )を求めたところ $\sim 0.1$ であり DP 機構が EY 機構よりも優勢であることがわかった。これは DP 機構によるスピン軌道相互作用を前提となっている ILP 理論で解析したと矛盾しない結果である。Au を蒸着した InAs 反転層では、負の磁気伝導が最大になる磁場が高磁場側に大きくシフトしていることがわかる。これは、スピン緩和時間  $\tau_s$  が減少していることに対応するが、DP 機構では、 $\tau_s \propto \tau_1^{-1}$  ( $\tau_1$  は弾性散乱時間)であり、Ge より Au の方が  $\tau_1$  は小さいので  $\tau_s$  の違いの原因を  $\tau_1$  の違いに帰着させることは出来ない。Au が吸着した InAs 反転層においては、スピン軌道散乱時間  $\tau_2$  で特徴付けられる

EY 機構のスピン相互作用の効果が強まり、DP 機構に比べて無視出来ないほど大きくなったためであると考えられる。これにより、高磁場側にシフトする負の磁気伝導ピークを定性的な説明することに成功し、Au によってスピン軌道散乱が大きくなったことを示唆する結果を得た。

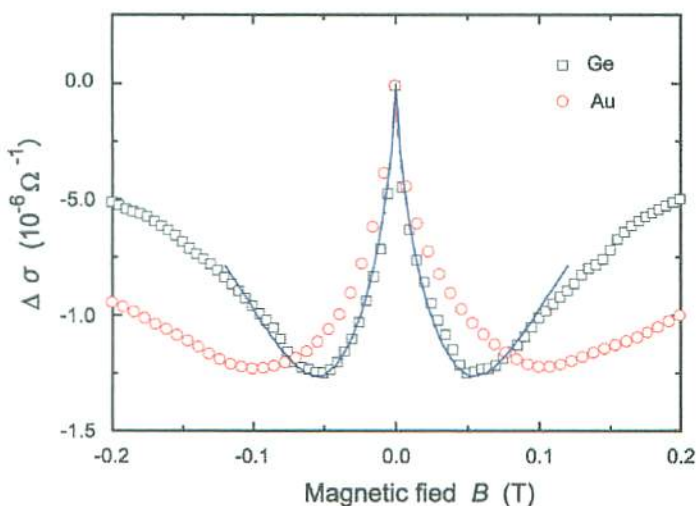


図6 : Ge または Au -InAs表面反転層の磁気コンダクタンス

[1] V. Y. Aristov, et al., Phys. Rev. B 47, 2138 (1993).

[2] G. Bergmann, Phys. Rep. 107, 1 (1984).