

論文内容の要旨

GaAs 劈開表面に形成した金属単原子層膜における

空間反転対称性の破れた超伝導

(Superconductivity with broken inversion symmetry
in one-atomic-layer metal films grown on cleaved GaAs surfaces)

関原 貴之

単原子層の超伝導の研究は魅力的である。絶縁体基板上の金属単原子層膜は、下は基板で上は真空であるため、空間反転対称性が破れている。さらに、完全な2次元系であるため、スピン軌道相互作用が強い場合、Rashba効果が働き、フェルミ面がスピン方向によって分裂することが期待される。Rashbaスピン分裂したフェルミ面上でクーパー対を組む超伝導状態は、スピン一重項と三重項の混成した状態になる。磁場を印加すると、オーダーパラメータが空間変調した特異な超伝導相が現れる。乱れの少ない系では、磁場によって、スピン分裂したフェルミ面が逆方向に動くストライプ相という相が支配的である。系の乱れが大きくなると、スピン分裂したフェルミ面がわずかに同一方向に動くヘリカル相と呼ばれる相が出現する。超伝導オーダーパラメータには、ストライプ相では $\cos(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})$ の、ヘリカル相では $\exp(i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})$ の位相因子がつく。

本研究は、空間反転対称性の破れた2次元超伝導のスピン状態を調べることを目的とした。

回転台による劈開機構を備えた³He蒸発冷却冷凍機を用いて、低温真空中で劈開したGaAs(110)面に、低温蒸着により金属単原子層膜を形成し、その場で電気伝導測定をおこない、超伝導状態を観測した。さらに、平行磁場を印加し、超伝導転移温度の変化量を詳細に調べた。超伝導状態は軌道効果によって簡単に破壊されるが、平行方向に磁場を印加すれば、軌道効果を抑制することができる。

図1にPb単原子層膜の面抵抗の温度依存性をゼロ磁場の場合と平行方向に約14 Tの磁場を印加した場合の結果を示す。平行磁場を印加しても超伝導にほとんど影響を与えないことが分かった。従来のBCS型超伝導体であれば、平行方向の臨界磁場は、パウリ限界で決まるはずである。パウリ限界は、超伝導転移温度に比例し、これらのPb単原子層膜では、4.8 Tと6.1 Tである。しかし、パウリ限界を大きく超える14 Tもの平行磁場を印加しても、超伝導転移温度は2 %程しか減少しなかった。

図2にPb単原子層膜の超伝導転移温度の平行磁場依存性を示す。超伝導転移温度は、平行磁場の2乗に比例して減少する。

スピン軌道散乱が存在すると、臨界磁場がパウリ限界より大きくなることが知られている。超伝導転移温度の平行磁場依存性からスピン軌道散乱時間を見積もった。スピン軌道散乱時間と常伝導状態の抵抗から見積もった散乱時間の比は、Pb単原子層膜で想定される値よりはるかに大きくなった。

GaAs劈開表面上のPb単原子層膜を、空間反転対称性の破れた2次元超伝導体として考えた場合、系の乱れが大きいと、ヘリカル相が出現すると考えられる。ヘリカル相では、臨界磁場は散乱時間によって決まり、実験結果の値を代入すると、巨大な値になる。超伝導転移温度の平行磁場依存性に対して、Rashbaスピン分裂が非常に大きいと仮定したヘリカル相の理論式を適用した。実験結果から見積もった散乱時間と常伝導状態の抵抗から見積もった散乱時間の値がほとんど一致した。理論式の仮定から、Rashbaスピン分裂の大きさは、0.2 eV以上であると見積もれる。光電子分光法によって測定されたGe基板上のPb単原子層膜のRashbaスピン分裂の値と同程度の値である。

比較として、スピン軌道相互作用がPbより弱いIn単原子層膜で、超伝導転移温度の平行磁場依存性も測定した。図3にIn単原子層膜の面抵抗の温度依存性をゼロ磁場の場合と平行方向に14 Tの磁場を印加した場合の結果を示す。In単原子層膜でも、パウリ限界を大きく超える磁場を印加しても超伝導状態が完全に破壊されることはなかった。しかし、Pb単原子層膜では、超伝導転移温度がほとんど変化しなかったのに対し、In単原子層膜では、明らかな減少が見られた。

図4にIn単原子層膜における超伝導転移温度の変化量の平行磁場依存性を示す。In単原子層膜に対しては、ヘリカル相の理論式をRashbaスピン分裂がそれほど大きくない場合まで拡張して、解析した。実験結果から見積もった散乱時間と常伝導状態の抵抗から見積もった散乱時間から、In単原子層膜でのRashbaスピン分裂の大きさを推定した。その大きさは約0.04 eVで、Pb単原子層膜で見積もった値より一桁小さい。Rashbaスピン分裂の大きさは、原子番号の4乗に比例するとされており、その差として理解できる。

本研究の実験結果は、GaAs劈開表面に形成した金属単原子層膜の超伝導において、ヘリカル相が出現した可能性を示唆している。

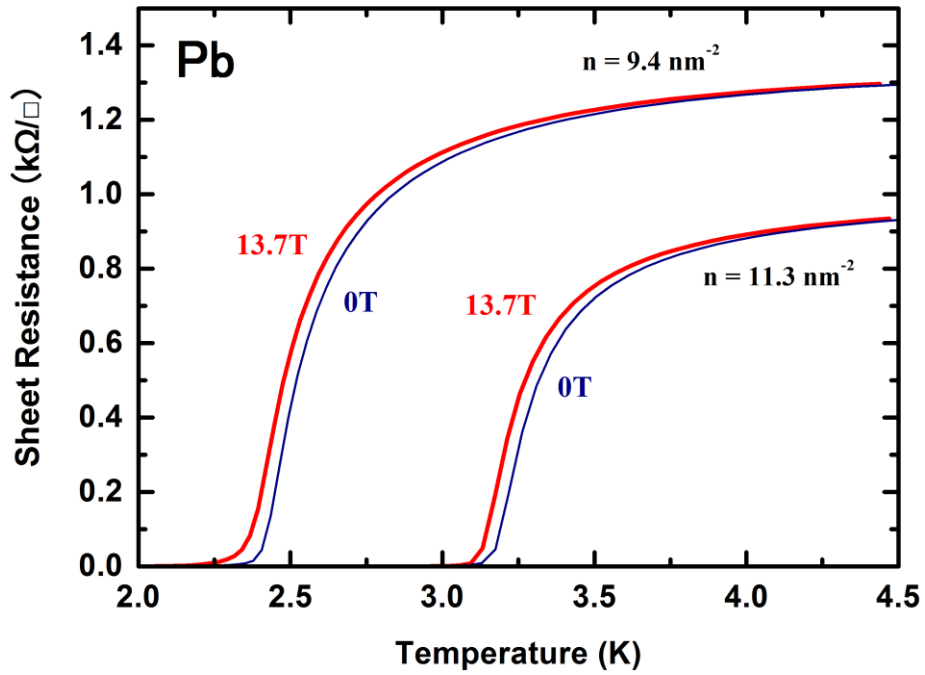


図 1：面密度 9.4 nm^{-2} と 11.3 nm^{-2} の Pb 単原子層膜の面抵抗の温度依存性 (ゼロ磁場の場合と平行磁場 14 T を印加した場合)

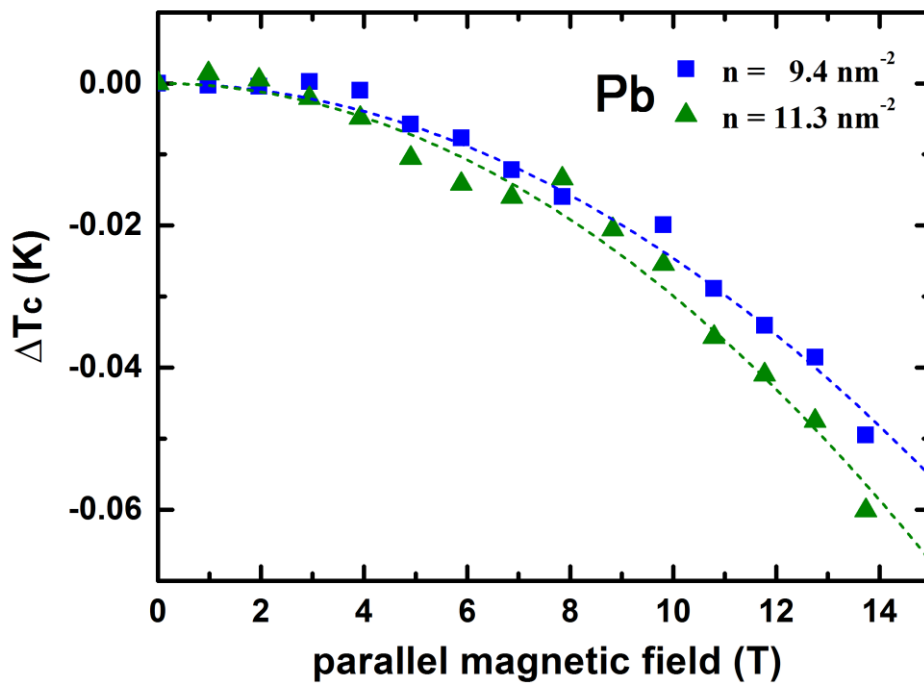


図 2：Pb 単原子層膜の超伝導転移温度の変化量の平行磁場依存性

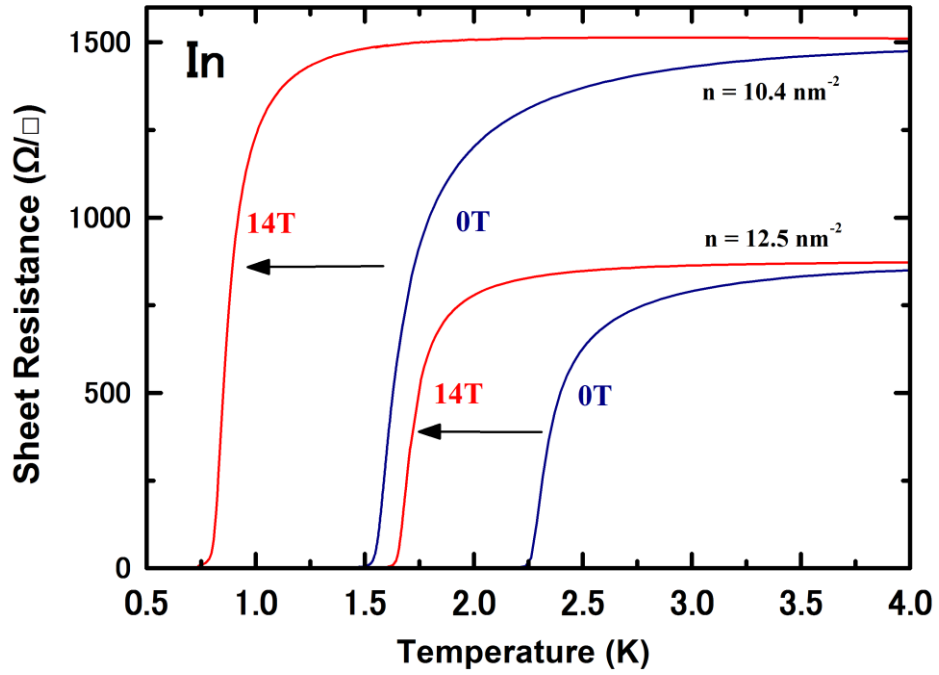


図 3：面密度 10.4 nm^{-2} と 12.5 nm^{-2} の In 単原子層膜の面抵抗の温度依存性 (ゼロ磁場の場合と平行磁場 14 T を印加した場合)

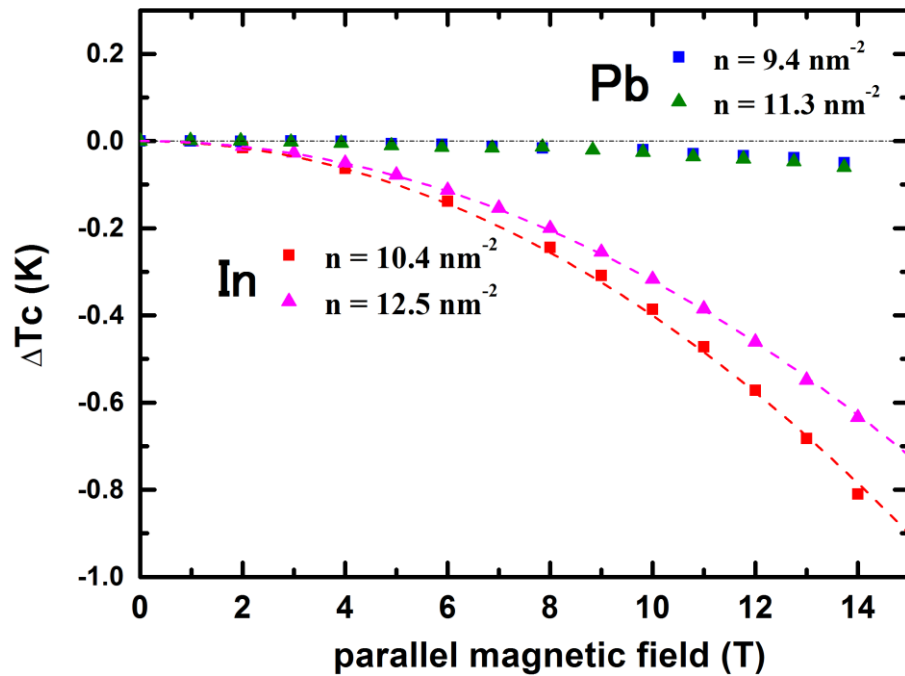


図 4：In 単原子層膜の超伝導転移温度の変化量の平行磁場依存性