

# 論文審査の結果の要旨

氏名 中村 友謙

本論文は、超高真空中で Si および Ge 基板上に作製したタリウム鉛 (Tl, Pb) 合金単原子層薄膜の超伝導を調べたものである。近年、超高真空中でのエピタキシャル原子層の成長とその物性測定が盛んに行われるようになってきた。その中の注目されるべき物性として超伝導がある。これまでに知られている単原子層超伝導体はバルクで超伝導を示すインジウムや鉛およびそれらの合金がシリコン基板上で規則超構造を持つ系である。単体元素からなる原子層で観測された超伝導ギャップの温度依存性などの超伝導特性は、単純な BCS 理論で理解できるものであった。そこで、本研究では強いスピン軌道相互作用が期待できる重元素を含み規則超構造をもつ合金の単原子層超伝導に着目した。基板としてもこれまで報告のない Ge 基板を用いることにより超構造とスピン軌道相互作用が Si 基板とは異なることを期待して研究が行われた。その結果、これまで報告のなかった異方的な超伝導ギャップや新規な原子層超伝導をみいだした。

本論文は6つの章から構成されている。第1章では本研究の背景として、超伝導の一般論が概観されたのち、これまで行われてきた単原子層超伝導に関する実験研究を紹介している。そして、本論文で明らかにする超伝導の定量的研究や新規な原子層超伝導探索の意義および研究目的が述べられている。第2章では、超伝導の基礎的事項および本研究で解析に用いる超伝導理論の詳細がまとめられている。そして第3章では、本研究の実験手法である走査トンネル顕微鏡を用いた表面観察

(STM) とトンネル分光 (STS) 手法および電気伝導度測定手法を詳述している。本研究ではこれらが可能なSTM/STS装置および電気伝導度測定装置が用いられた。続く第4、5章に、本論文の主要な成果が以下に詳述するように報告されている。第6章は本論文のまとめであり、本論文で明らかにされた結果とその意義および今後の研究の展望が述べられている

第4章には、これまでに超伝導を示すことが報告されている原子層である Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Tl, Pb) を対象としたSTM/STS 測定による研究結果が述べられている。この系の超伝導転移温度は抵抗測定より 2.25K と報告されており、その再現に成功した試料を用いて、0.5K までの低温で STS 測定が行われた。得られたトンネルスペクトルを異方的な超伝導ギャップがある場合の Dynes 関数でフィッティングすることにより、この系は異方的なフルギャップ超伝導であると結論した。スペクトルの温度依存性から超伝導ギャップの温度依存性を調べると BCS 理論から外れており、強結合の超伝導

となっていることがわかった。また、磁場中のゼロバイアス微分コンダクタンス (ZBC) マッピングやSTS測定から渦糸の形状や分布を調べた。ZBCの分布からGLコヒーレンス長を求めると、40nm程度であり伝導から求めた値よりは少し長い。さらに上部臨界磁場 $H_c$ 直上でのSTS測定では、高いバイアスでの微分コンダクタンスよりZBCが小さいディップ構造が観測された。ただし、その起源は今のところ明確でない。

第5章では、これまで超伝導転移が知られていなかった、 $\text{Ge}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ ,  $\text{Ge}(111)\text{-}3\times 3\text{-(Tl, Pb)}$ および $\text{Si}(111)\text{-}4\times 4\text{-(Tl, Pb)}$ の3つ合金原子層において超伝導転移の有無を電気伝導測定によって調べた結果が述べられている。 $\text{Ge}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ と $\text{Ge}(111)\text{-}3\times 3\text{-(Tl, Pb)}$ は、表面超構造観察やARPES測定が行われており、特に前者は $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ と類似の電子状態を持つことが知られていた。電気伝導を0.9K以下まで測定することにより、 $\text{Ge}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ の超伝導転移温度が、 $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ よりやや低い2K程度であることがわかった。さらに、この系の磁場中電気伝導測定により、 $H_c$ の温度依存性を調べ、温度の低下とともに、GL理論の予想よりも $H_c$ が大きくなることが観測された。これは、 $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ では観測されなかった現象である。そして、この結果は強結合性あるいはマルチバンドに起因していると考えられている。一方、他の二つの系は1 K以下で抵抗の急激な減少が観察され、さらに磁場中ではその減少が抑えられることから、転移温度0.9K以下の超伝導体であると考えられる。

以上のように、論文提出者は、STM/STS および電気伝導測定により、原子層超伝導を実験的に研究した。その結果、 $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ が異方的な超伝導ギャップをもつことや $H_c$ 以上での磁場中において状態密度のディップ構造をみいだした。また、新たに3つの原子層が超伝導を示すことを明らかにし、 $\text{Ge}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Tl, Pb)}$ では、 $H_c$ の温度依存性が従来にない特性を持つことを示した。これらの超伝導特性の発見は原子層超伝導の研究において大きな意義があるものであり、今後の研究の発展に極めて有用な情報を提供している。本研究の物性物理学としての価値と独創性は十分にあると認められる。したがって、本論文は、博士（理学）の学位論文としてふさわしい内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験を遂行し結果を解析したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。