



Title	固体表面上に作製したタリウム原子層結晶の電子状態
Author(s)	戸市, 裕一郎
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105432
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (戸 市 裕 一 朗)

論文題名

固体表面上に作製したタリウム原子層結晶の電子状態

論文内容の要旨

現代社会において爆発的に増加している情報量とその処理に対応するため、従来のエレクトロニクスデバイスに代わるより高速・低エネルギー消費な量子デバイスの実現が求められている。特に、スピントロニクスデバイスはこれまで主に強磁性体を舞台に研究されてきたが、固体表面上に作製した重元素原子層結晶は強いスピン軌道相互作用 (SOC) と空間反転対称性の破れによって非磁性体でもスピン偏極電子バンドを有することから、次世代のスピントロニクスデバイスの材料候補として期待できる。さらに、原子層結晶が超伝導体となれば、超伝導と電子スピンの組み合わせにより新奇物性が発現し得ることから、同結晶の電子状態を理解することでトポロジカル超伝導体をはじめとした次世代量子材料の創出に繋がる可能性がある。本博士論文では、重元素であるタリウム (Tl) 原子に着目し、Si (111) 表面上に作製したTl島状構造とTl薄膜の電子状態、Ag (111) 表面上にTl原子を2原子層吸着させて作製した2原子層Tlのスピン偏極電子状態について述べた。

第1章では、本研究で対象としている固体表面上に作製した原子層物質と、そこに発現する特異な電子状態について説明した。特に、Tl原子からなる原子層結晶に着目し、SOCと空間・時間反転対称性の観点から従来のラッシュバ効果とは異なる特殊なスピン偏極電子状態について説明した。さらに、本研究で用いた測定手法である低速電子線回折とスピン・角度分解光電子分光の測定原理について説明した。これらを踏まえ、本章の最後に本研究の目的および意義について述べた。

第2章では、Si (111) 表面上に島状に成長したTlの電子状態について述べた。Si (111) 表面上にTl原子を1原子層吸着させたTl/Si (111)-(1×1) 上にTl原子を追蒸着すると、電子構造が測定可能な十分大きなサイズの表面が平坦な島状Tlが形成されることが過去に報告されている。本章では、面内方向の単位ベクトルが異なる2つのドメインの島状Tlの電子構造を角度分解光電子分光を用いて測定した結果を述べた。高品質な膜の形成を示唆する量子井戸状態を観測したことに加え、実験結果を理論計算で得られたバンド構造と比較することにより、島状Tlがバルク固体と同様の電子構造を有し、最表面層原子の電子軌道に由来する金属的な表面状態が存在することを明らかにした。

第3章では、Si (111) 表面上に形成されたシングルドメインのTl薄膜の電子状態について述べた。固体表面上に作製した1原子層および2原子層Tlのバンド構造はこれまで実験的にも理論的にも調べられてきたのに対して、Tlは十分な大きさの単結晶を作製することが困難であるため、そのバルクバンド構造は理論計算でしかこれまでに報告されていない。本章ではSi (111) 表面上にTl原子を低温で吸着させることによって第2章で述べた2つのドメインを有する試料と異なる、単一のドメインのみが存在するシングルドメインのTl薄膜を作製した。励起光のエネルギーを変化させながら角度分解光電子分光を行うことにより、Tlの3次元バルクバンド構造を初めて実験的に明らかにしたとともに、2次元的な分散を示す表面状態の起源が表面最外層の原子が表面垂直方向にわずかに変位したことに由来すると結論した。

第4章では、Ag (111) 表面上に作製した2原子層Tlのフェルミ準位における特異なスピン偏極電子状態について述べた。Ag (111) 表面上の2原子層Tlはフリースタンディングに近い状態で形成されており、約0.9 Kで超伝導転移を示す2次元超伝導体であることが報告されている。フェルミ準位でのスピン偏極電子状態を測定した結果、グローバルな空間反転対称性の存在によりスピン縮退するはずのスピン偏極電子バンドが縮退せず、2つ存在するフェルミ面のうち1つが渦型のスピン構造を形成していることを明らかにした。新奇な超伝導状態の発現が期待できるこの実験結果の起源を理解するため理論計算を行い、この特異な単一のスピン偏極フェルミ面が界面のTl層と最表面のTl層の軌道角運動量の差異に由来することを明らかにした。

第5章では、上記のTl原子層結晶の電子状態についてまとめ、本博士論文全体の結論を述べるとともに、本研究結果からTl原子層結晶に発現することが期待される新奇量子物性と今後の展望について述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (戸 市 裕 一 朗)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	坂本 一之
	副 査	教授	小野 寛太
	副 査	准教授	李 艶君
	副 査	教授	松井 文彦(自然科学研究機構・分子科学研究所)

論文審査の結果の要旨

固体表面に作製した重元素原子層結晶は、非磁性体であってもその強いスピン軌道相互作用と空間反転対称性の破れに起因したスピン偏極電子状態を有する。また、原子層結晶が超伝導性を示せば、超伝導とスピンの絡み合う新奇物性の発現と、それを応用した量子デバイスの実現が期待される。

本学位申請論文は、超伝導となる重元素タリウムを固体表面上に蒸着して異なる構造を有する原子層結晶を作製し、それらに発現する特異な電子状態に関する研究をまとめたものである。その主な成果は以下の通りである。

- ・Si (111) 表面上に Tl 原子を 1 原子層吸着させた不活性な Tl/Si (111)-(1×1) の上に Tl 原子を追蒸着することで作製した、面内方向の単位ベクトルの向きが異なる 2 つのドメインが存在する島状の Tl 結晶の電子状態を報告している。厚さが揃った高品質な膜の形成を示す量子井戸状態に加え、3 次元的なバンド構造とともに最表面層原子の電子軌道に由来する 2 次元的なバンド構造の存在を明らかにしている。
- ・タリウム結晶の電子状態のさらに詳細な知見を得るために不可欠であるシングルドメインの Tl 原子層結晶の作製を、Electronic Growth と呼ばれる 2 段階成長により成功したことを報告している。このシングルドメインの Tl 原子層結晶の電子状態を励起光のエネルギーを変化させながら測定した結果、3 次元な分散を有する Tl のバルクバンド構造を実験的に明らかにするとともに、2 次元的な分散を示す表面状態の起源が表面最外層の原子が表面垂直方向にわずかに変位したことに由来することを明らかにしている。また、バルクバンドの実験的観測は、理論的に予測されているバルク Tl のトポロジカル物性の検証に不可欠な結果である。
- ・フリースタンディングに近い状態と報告されている Ag (111) 表面上の 2 原子層 Tl は約 0.9 K で超伝導転移を示す 2 次元超伝導体である。2 原子層 Tl の局所的な空間反転対称性の破れにより発現する 2 つのスピン偏極バンドは、系のグローバルな空間反転対称性の存在で縮退するはずだが、2 つのうちの 1 つがフェルミ準位で縮退せずに渦型のスピン構造を形成していることを報告している。また、その原因がスピン偏極バンドがバンドのスピン分裂と空間的な分裂によって生じた特異なものであることと、界面の Tl 層と最表面の Tl 層の軌道角運動量の差異に由来することを明らかにしている。

以上のように、本学位申請論文は固体表面上に作製した重元素原子層結晶における電子状態の観測と、その起源として新たなモデルを提唱したものであり、応用物理学、特に超伝導スピントロニクスをはじめとした量子デバイスの開拓に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。