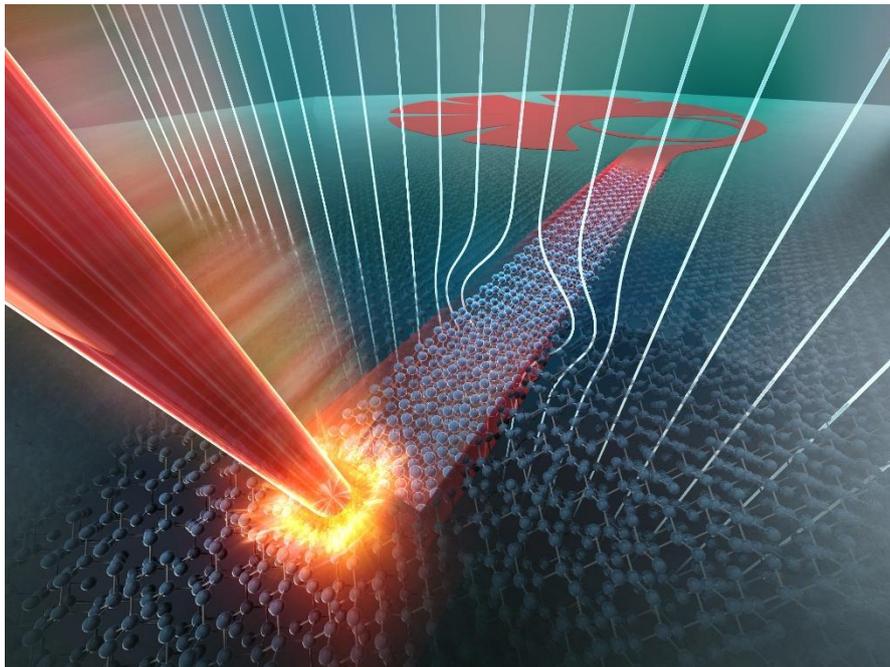


東京大学

レーザー光照射でトポロジカル半金属薄膜上に任意形状の超伝導ナノ構造を作製、無磁場で超伝導ダイオード効果を実証 ——将来の超伝導量子デバイス・量子回路の実現に道——

発表のポイント

- ◆ トポロジカル Dirac 半金属 α -Sn 薄膜に集光レーザーを局所的に照射し、ナノメートルスケールで超伝導金属 β -Sn 領域を任意形状に“描画”する手法を開発しました。これにより、同一薄膜上で α -Sn/ β -Sn 平面ヘテロ構造を高精度に作製できます。
- ◆ 本手法は局所加熱のみで α -Sn から β -Sn への相転移を誘起するため、加工損傷を抑えつつ、 β -Sn 領域は原子レベルで平坦な表面を示し、単結晶に近い高品質を実現しました。
- ◆ 作製した β -Sn ナノ細線では、印加磁場がゼロでも超伝導電流が一方向に流れやすくなる超伝導ダイオード効果を観測し、最大整流率 10.8%を達成しました。本成果は、超伝導回路・量子デバイスに向けた新しいナノ加工基盤技術として期待されます。



局所的なレーザー照射によりトポロジカル α -Sn 薄膜内に超伝導 β -Sn の微細精密パターンを形成

概要

東京大学大学院工学系研究科のレ・デウック・アイン 准教授、田中 雅明 教授、同大学工学部の佐伯 崇寛 学部学生、同研究科の石原 奎太 大学院生（研究当時）、西垣 大輝 大学院生（研究当時）、牧 秀樹 大学院生（研究当時）らの研究グループは、トポロジカル Dirac 半金属 α -Sn（注 1）薄膜の任意の位置に、レーザー照射のみで高品質で任意形状の超伝導金属 β -Sn（注 2）を形成し、原子レベルで平坦な α -Sn/ β -Sn 平面ヘテロ構造を作製する手法を開発しました（図

1)。

集光したレーザー光を照射した α -Sn 領域は熱により β -Sn へと相転移し、臨界温度 3.7 K の超伝導を示します。さらに、 α -Sn 薄膜中に作製した β -Sn ナノ細線構造では、磁場ゼロでも電流の向きによって超伝導状態（電気抵抗ゼロ）と常伝導状態（電気抵抗あり）が切り替わる超伝導ダイオード効果（注 3）を発現し、さらに磁場をかけることにより最大整流率 10.8% を達成しました。

これまではトポロジカル物質と超伝導体からなる高品質界面を形成することが量子デバイスを開発する上で困難な課題でしたが、本研究成果はこの問題を解決し、大面積化・量産展開にも適したシンプルかつ低コストの加工プロセス技術を提供するものです。

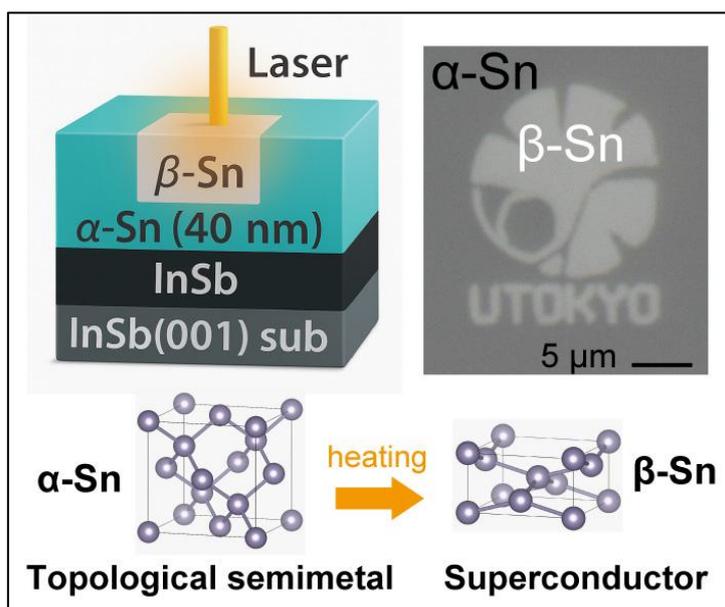


図 1：レーザー照射によるトポロジカル半金属 α -Sn 薄膜中の任意形状の超伝導 β -Sn ナノパターンニング
InSb(001)基板上にエピタキシャル成長した α -Sn 薄膜（厚さ 40 nm）に集光したレーザーを照射することで、照射領域のみを原子レベルで平坦な超伝導体 β -Sn へと相転移させ、任意形状の α -Sn/ β -Sn 平面ナノ構造を非破壊で作製した（左上）。右上は作製したパターンの例（ロゴを表す白い部分がレーザー照射により作製した超伝導 β -Sn、灰色部分がトポロジカル半金属 α -Sn、スケールバーは 5 μm ）。相転移後の β -Sn は臨界温度 $T_c = 3.7$ K の超伝導を示す。量子デバイス応用に向け、超伝導／トポロジカル材料ヘテロ構造の高精度ナノ加工を簡便な手法で可能にする作製技術である。

発表内容

トポロジカル超伝導体（注 4）は、マヨラナ準粒子（注 5）の実現を通じて誤り耐性をもつ量子コンピュータの基盤技術になると期待され、近年その候補材料の研究が活発になされています。従来の多くの研究では、超伝導体とトポロジカル材料（注 6）を接合したヘテロ構造によってトポロジカル超伝導状態の実現を目指してきました。しかし従来の作製方法では、界面を原子レベルで清浄かつ平坦に保つことが難しい上、ナノ加工工程で結晶が損傷しやすいことが大きな問題でした。

研究グループはこれまで、集束イオンビーム（FIB）照射（注 7）によってトポロジカル半金属 α -Sn 薄膜内に超伝導 β -Sn を形成し、 α -Sn/ β -Sn 界面を用いた超伝導デバイスを実証してきました。しかし、FIB 法ではイオン衝突により β -Sn の内部に損傷が入り得るため、量子デバイス性能に悪影響を及ぼすという懸念がありました。

本研究では、レーザー光照射による「加熱のみ」を用いて α -Sn から β -Sn への相転移を誘起し、損傷を抑え良質の結晶性を保ったままナノスケールのパターンニングを実現しました。原子間

力顕微鏡 (AFM) 測定により、レーザ照射で作製した β -Sn 領域の表面粗さ (rms) が 0.75 nm であり、FIB 照射で作製した β -Sn (1.96 nm) よりも平坦であることを確認しました (図 2a)。さらに β -Sn 領域の 80%以上が単結晶ドメイン (平均約 8 μm) となり、FIB 法 (平均粒径約 230 nm) に比べて結晶性が大幅に向上しました。電気伝導測定により、レーザ照射部のみが臨界温度 3.7 K でゼロ抵抗となる超伝導を示すことを確認しました。

加えて、幅 750 nm の β -Sn ナノ細線において、超伝導ダイオード効果を観測し、その性質を系統的に評価しました。超伝導ダイオード効果とは、磁場を印加した状態で電流の向きによって臨界電流が異なる非相対的な超伝導現象であり、一方向に電流を流した時には超伝導となりゼロ抵抗を示すが、反対方向に電流を流すと常伝導となり抵抗が生じる、という大きな整流特性を示す現象です。本研究では、外部磁場ゼロでも超伝導ダイオード効果が現れ、磁場角度を変えることで最大 10.8%の整流比率に達しました (図 2b)。これは、成長方向 (膜厚方向) における上下界面の非対称性により空間反転対称性が破れることや、超伝導チャンネル中の渦 (ボルテックス) のピン止め/脱ピン止め過程が電流方向に対して非対称になることが一因と考えられます。

本手法では、マスク不要で任意形状の β -Sn を描画できるだけでなく、トップダウン加工と高い結晶品質の両立を実現します。さらに、スズ (Sn) という単一の元素を用いて、トポロジカル物質 α -Sn と超伝導金属 β -Sn からなる任意形状の高品質ヘテロ接合を作製できるため、トポロジカル量子物理の検証という基礎研究から、超伝導論理素子・量子回路に至る幅広い応用が期待されます。

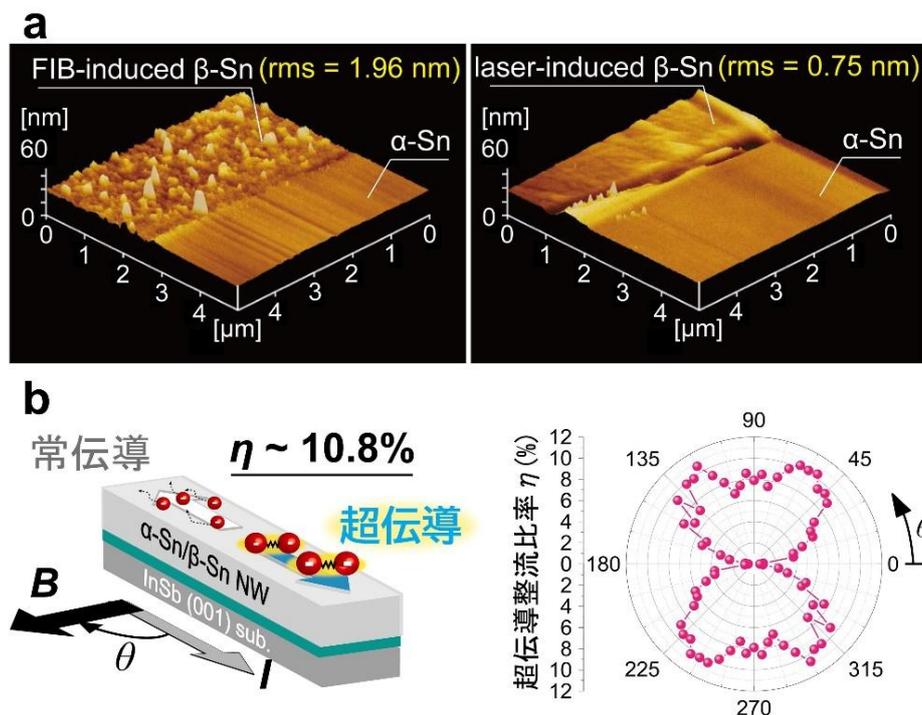


図 2 : レーザー誘起 β -Sn の原子レベル平坦化と、 β -Sn ナノ細線における超伝導ダイオード効果
 (a) α -Sn 薄膜上に形成した β -Sn 領域の表面形状 (AFM 像) の比較。従来の FIB 加工で作製した β -Sn は表面粗さが大きい (rms = 1.96 nm) のに対し、本研究の集光レーザ照射で誘起した β -Sn は、照射領域が原子レベルで平坦 (rms = 0.75 nm) となり、 α -Sn/ β -Sn 界面も滑らかに形成される。(b) α -Sn/ β -Sn ナノ細線 (NW) デバイスの模式図と、超伝導ダイオード効果における磁場の角度依存性。面内磁場 B の方向 (角度 θ) を変えると、電流の向きが順方向と逆方向で超伝導電流の流れやすさが非対称となり、その整流率 η は最大約 10.8%に達す

る。右の極座標プロットは、整流率（超伝導整流比）の θ 依存性を示し、磁場方向に応じて効果が強く現れることを示している。超伝導ダイオード効果は磁場をかけない場合（無磁場）でも観測される。

○関連情報：

「プレスリリース：トポロジカル量子回路・量子演算の実現に向けた新しい材料プラットフォームを実現 ートポロジカル材料薄膜内に超伝導ナノ構造を形成する新手法の開発と超伝導ダイオード効果の発現ー」（2024/10/01）

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2024-10-01-002>

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院工学系研究科 電気系工学専攻

レ デュック アイン (Le Duc Anh) 准教授

兼：附属スピントロニクス学術連携研究教育センター (CSRN)

石原 奎太 研究当時：大学院生（博士課程）

西垣 大輝 研究当時：大学院生（修士課程）

牧 秀樹 研究当時：大学院生（修士課程）

田中 雅明 教授

兼：附属スピントロニクス学術連携研究教育センター (CSRN)

工学部 電気電子工学科

佐伯 崇寛 研究当時：学部4年生

論文情報

雑誌名：Advanced Materials

題名：Non-Destructive Laser Nanopatterning of Superconducting Heterostructures in Topological Sn Thin Films

著者名：Le Duc Anh, Takahiro Saeki, Keita Ishihara, Daiki Nishigaki, Hideki Maki, Masaaki Tanaka

DOI：10.1002/adma.202512571

URL：https://doi.org/10.1002/adma.202512571

研究助成

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (JP19K21961、JP20H05650、JP22K18293、JP23K17324、JP24H00018、JP25H00840)、科学技術振興機構 (JST) の ERATO (JPMJER2202) と NEXUS プログラム、MEXT の ARIM (JPMXP24UT0121)、Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ) の支援により実施されました。

用語解説

(注1) トポロジカル Dirac 半金属 α -Sn：ダイヤモンド型結晶構造をもつスズ (Sn) の同素体。歪みなどによりトポロジカル Dirac 半金属 (TDS) になる。TDS はバルク電子状態で Dirac 方程式で記述される線形分散の電子状態が存在し、その電子キャリアが高移動度およびスピン・軌道・運動量の強い結合をもつ材料で、近年スピントロニクスおよび量子科学分野で注目されている。

(注 2) 超伝導金属 β -Sn : 正方晶構造をもつ金属スズの同素体。約 3.7 K 以下で電気抵抗がゼロになる BCS 型超伝導を示す。 β -Sn は金属スズとして広く使われている。

(注 3) 超伝導ダイオード効果 : 電流の向きによって超伝導状態が失う臨界電流が異なり、その結果、超伝導状態のまま電流が一方向に流れやすくなる (整流が生じる) 現象。正と負の電流方向の場合の臨界電流 (I_{C+}, I_{C-}) によって整流比率が $\eta = (I_{C+} - I_{C-}) / (I_{C+} + I_{C-})$ で定義される。

(注 4) トポロジカル超伝導体 : 表面や端に特別な量子状態を持ち、欠陥に強い超伝導状態を実現し得る物質 (または状態)。マヨラナ準粒子を実現するための舞台として注目される。

(注 5) マヨラナ準粒子 : 自分自身が反粒子に等しい性質をもつとされる準粒子。実現すれば、誤りに強い量子情報処理・量子コンピュータの担い手になる可能性がある。

(注 6) トポロジカル材料 : 電子状態の「位相 (トポロジー)」により、内部は絶縁的でも表面や端では電流が流れやすいなど、通常と異なる性質を示す材料の総称。

(注 7) 集束イオンビーム (FIB) 照射 : イオンビームをナノスケールに絞って照射し、微細加工や局所的な構造改変を行う技術 (加工と同時に損傷が入り得る)。

問合せ先

<研究内容について>

東京大学大学院工学系研究科

准教授 Le Duc Anh (レ デウック アイン)

教授 田中 雅明 (たなか まさあき)

<機関窓口>

東京大学大学院工学系研究科 広報室