

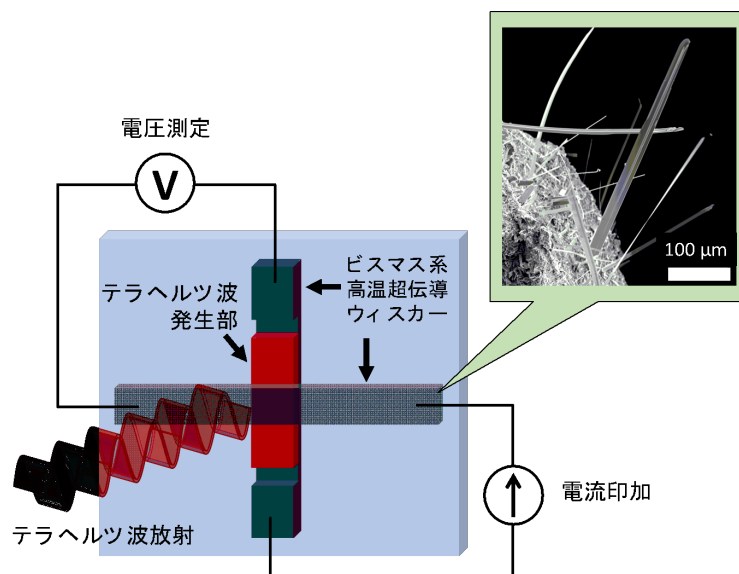
超伝導針状結晶からのテラヘルツ波放射に成功 —超伝導テラヘルツ光源の機能開発を加速—

概要

京都大学大学院工学研究科の掛谷一弘准教授、物質材料研究機構(NIMS)の齋藤嘉人 NIMS ジュニア研究員および高野義彦 MANA 主任研究者の研究グループは、ビスマス系高温超伝導ウィスカー（針状）結晶を用いたテラヘルツ光源の製作に成功しました。同時に、その放射原理を偏波解析により明らかにしました。

高精細 8 K 動画などの大容量データの高速通信のために、現行の 5 G 通信に用いられているマイクロ波帯よりも十分に高い周波数を持つテラヘルツ波帯が関心を集めています。その中で、ビスマス系高温超伝導体から作られる超伝導テラヘルツ光源が注目されています。今回、グループは短時間で育成できるビスマス系高温超伝導ウィスカー結晶を用いたテラヘルツ発振デバイスの開発に成功しました。超伝導テラヘルツ光源にはこれまで平板状単結晶が用いられてきましたが、ウィスカー結晶を用いることにより、素子作製時間の短縮と多機能化が見込まれ、研究開発の加速が期待できます。本研究成果ではウィスカー結晶の発振特性が初めて解明されたことから、光源の発振周波数などの設計が可能になりました。また、電磁界シミュレーションから、超伝導テラヘルツ光源が持つ広い発振周波数範囲を説明するカギを発見しました。

研究成果は、2022 年 11 月 21 日に米国の国際学術誌 Applied Physics Letters 誌に Editors' pick としてオンライン公開されました。



図：ビスマス系超伝導体ウィスカー結晶を用いた超伝導テラヘルツ光源のイメージ図。右上の電子顕微鏡写真に見える針状の超伝導体結晶を取り出し、交差させて作成する。赤色の部分でテラヘルツ波が発生する。

1. 背景

テラヘルツ波帯の電磁波は化学分析や生体イメージング、とりわけ次世代高速無線通信（Beyond 5 G）応用への期待が持たれており、小型のテラヘルツ光源のひとつとして超伝導テラヘルツ光源が注目されています。しかし、このような光源素子は高品質平板状単結晶の育成技術と微細加工技術を必要とするため、いままでは単結晶育成からデバイス完成まで1週間以上の時間がかかっていました。今回我々が着目したウィスカー結晶は良質な結晶性を持ち、簡単な実験装置で育成できるだけでなく、その形状から高強度発振を目指したアレイ化、偏波制御のためのデバイスを短期間で作製することに有利です。研究グループはすでにウィスカー結晶を用いたテラヘルツ発振を発見していますが、発振周波数を決定するうえで重要な物質定数である屈折率が明らかでないために放射特性を予測することが困難でした。

2. 研究手法・成果

研究グループは、ウィスカー結晶に固有な屈折率を求めるために、素子の発振モードを特定する必要があることに着目しました。放射された電磁波の電場は発振モードによって振動方向が異なるため、直線偏光子を用いた偏波測定を行うことで発振モードを推定したことが本研究の新しい点です。この結果、ウィスカー結晶の屈折率を特定し、これまで使用されていた平板状単結晶と異なることが明らかになりました。これはウィスカー結晶を用いたテラヘルツ発振素子の設計が可能になったことを意味します。さらに、素子の空洞共振周波数から少しずれた周波数でも比較的強い電磁波の放射が起きることを三次元電磁場シミュレーションによって示しました。これは、超伝導テラヘルツ発振素子が持つ、単一の素子が単色かつコヒーレントなテラヘルツ波を広い周波数範囲で発振するという、最大の特徴を説明するカギとなる、重要な発見と言えます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は、超伝導テラヘルツ光源の作製プロセスを大幅に短縮化できます。さらに、超伝導テラヘルツ光源に適した材料開発に大きく寄与できます。化学組成の違いによって結晶の屈折率が異なることが示されたことから、適切な材料を選ぶことによってテラヘルツ発振の周波数を大幅に拡大することができます。また、今回新しく見出した超伝導テラヘルツ光源の発振機構は、ウィスカー結晶特有の形状から得られる新たな機能性とあわせて、例えば偏波制御、高密度アレイ化による高強度放射が可能な超伝導テラヘルツ光源の社会実装を促進すると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（20H02606, 20H05644, 19H02177）及び二国間交流事業（JPJSBP120214602）、科学技術振興機構（JST）未来社会創造事業（JPMJMI17A2）の支援を受けて行われました。

<用語解説>

1. テラヘルツ波

電磁波のうち、電磁場が1秒間に振動する回数（周波数）が 10^{11} から 10^{13} 回、波長が3ミリから0.03ミリのもの。情報通信に用いた場合、原理的にはマイクロ波の1000倍程度の密度の情報を送ることができる。また、新たな化学分析手法として期待され、水分に対する吸収が強いことから生体イメージングに適する。

2. ビスマス系高温超伝導体

1988年に現在の物質材料研究機構で発見された、常圧において最大 110 ケルビン（-160 °C）で超伝導（電気抵抗がゼロ）を示す化合物。超伝導線として数社より市販されており、国内外で研究・試験用設備に実装されている。

3. ウィスカー結晶

針状に細長い形状を持つ結晶。ビスマス系超伝導体では、一定の条件下高い結晶性で急速に成長し、そのテープ状の外形から結晶方位が容易に特定できる。

4. 偏波

電磁波の電界が振動する方向・状態のこと。電磁波の電界は進行方向に対して垂直な面の中で振動する。垂直面内で電界が水平方向に振動している場合は水平偏波、鉛直方向に振動している場合は垂直偏波、回転している場合は円偏波と呼ばれる。実用電波では用途ごとに管理されており、地上放送には水平偏波、携帯電話には垂直偏波、衛星放送、ETC などの移動体間の通信には円偏波が利用されている。

5. 屈折率

光などの電磁波が真空中と物質中を進む速さの比の値。大きな屈折率を有する物質に電磁波を通すことによる波長短縮効果でアンテナの小型化が可能となる。屈折率の異なる物質の境界で電磁波は屈折や反射を起こす。

<研究者のコメント>

（掛谷）この成果でウィスカー結晶デバイスに関する機能設計が可能になりました。すでに機能が設計できるところまで到達しているバルク結晶と合わせて超伝導テラヘルツ光源材料の選択肢と可能性が増えたので、今後の研究の進展がとても楽しみです。

（齋藤）ウィスカー結晶は、簡便に育成できかつバルク単結晶に劣らない結晶性を備えているため、マイクロエレクトロニクス分野への応用に非常に適しているといえます。今回、テラヘルツ発振を実証したことで更に重要性が高まったのではないのでしょうか。また、超伝導テラヘルツ光源の開発における裾野を広げられたと考えています。

（高野）本デバイスの基礎となる、ウィスカー十字接合は、ウィスカー結晶を用いることにより、簡便に作製できる固有ジョセフソン接合として開発したものです。これに、スリット状の凹みを加工するだけで、テラヘルツ光源を作製できる事が分かりました。さらに、細長いウィスカーの形状と屈折率を利用して、発振周波数や偏光特性等を設計することが出来るようになったので、素子の応用に向け一歩進んだと思います。

<論文タイトルと著者>

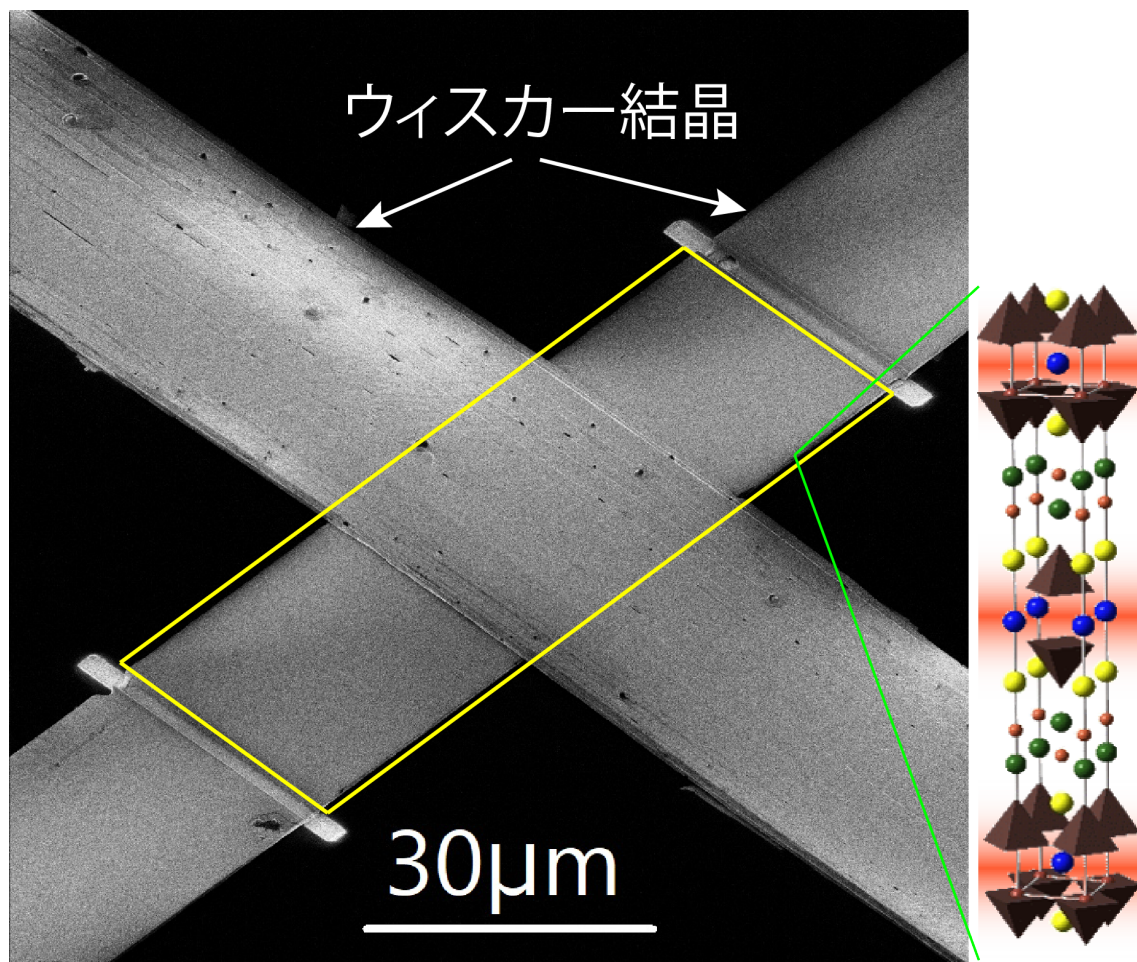
タイトル: "Polarization analysis of the terahertz emission from Bi-2212 cross-whisker intrinsic Josephson junctions and its refractive index"

著者: Y. Saito, I. Kakeya, Y. Takano

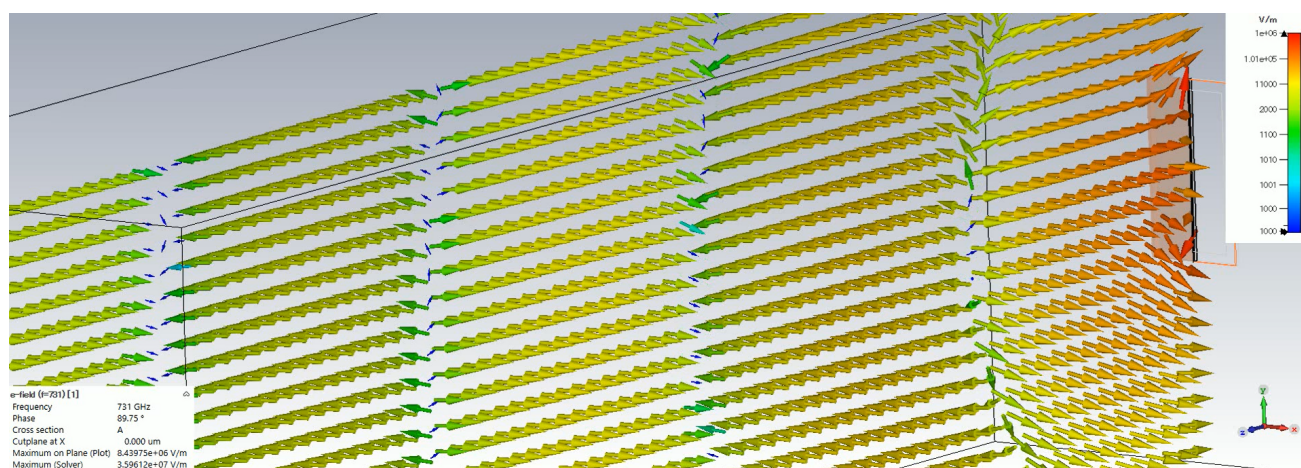
掲載誌: Applied Physics Letters

DOI: 10.1063/5.0123290

<参考図表>



2 枚のビスマス系高温超伝導体ウィスカー結晶から作成したデバイスの電子顕微鏡像。下側のウィスカー結晶の赤枠で囲まれた部分でテラヘルツ波が生じ、空間に放射されます。右図は、デバイスに集積されたビスマス系高温超伝導体の結晶構造と超伝導の強さを概念的に示しています。



本研究の高温超伝導ウィスカーデバイスからテラヘルツ波が放射されることを示した偏波解析計算結果のスナップショット。矢印は電界の大きさと方向を示し、発振周波数 0.73 テラヘルツの半周期、-0.68 ピコ (10^{-12}) 秒ごとに反転する。