

高温超伝導体を使った連続可変な小型テラヘルツ光源

辻本 学*, 掛谷 一弘 京都大学工学研究科 電子工学専攻 集積機能工学講座

*tsujimoto@sk.kuee.kyoto-u.ac.jp

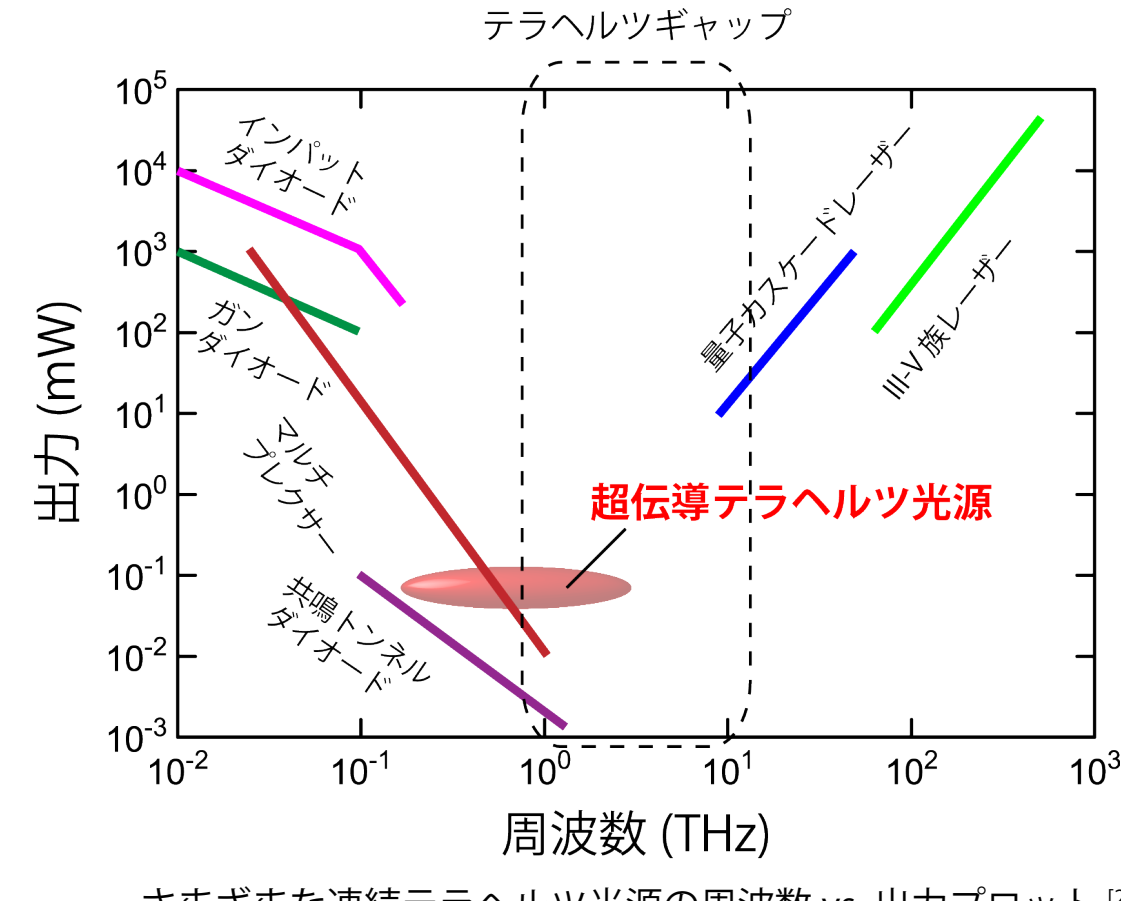
研究背景

テラヘルツ技術

次世代の産業・研究の発展に重要な役割を果たすことが期待されている新しい技術



(上) エビのテラヘルツ非破壊透過像
(右) 郵便物の麻薬検査^[1]



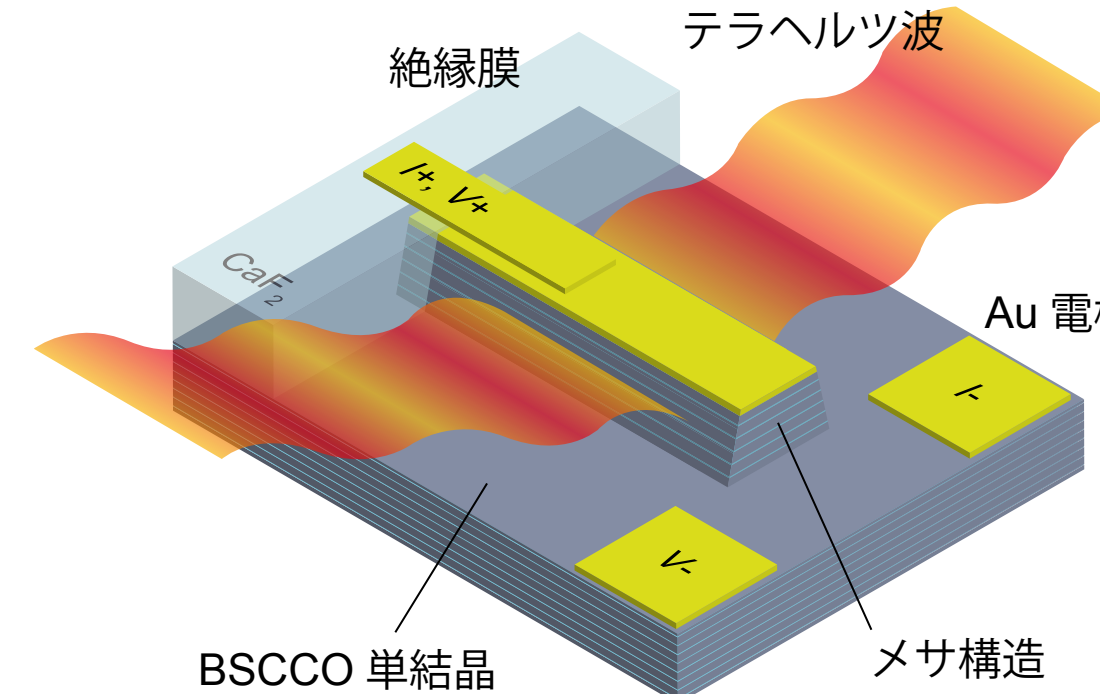
さまざまな連続テラヘルツ光源の周波数 vs. 出力プロット^[2]

小型・省電力かつ固体で安定な連続テラヘルツ光源が不足している^[2].

研究目的・・・超伝導体を使った小型テラヘルツ光源の開発

私たちは、高温超伝導体のナノ構造における連続テラヘルツ発振現象^[3]を利用した新しい小型テラヘルツ光源を開発しています。

[3] レビュー論文: U. Welp *et al.*, Nat. Photonics 7, 702 (2013).

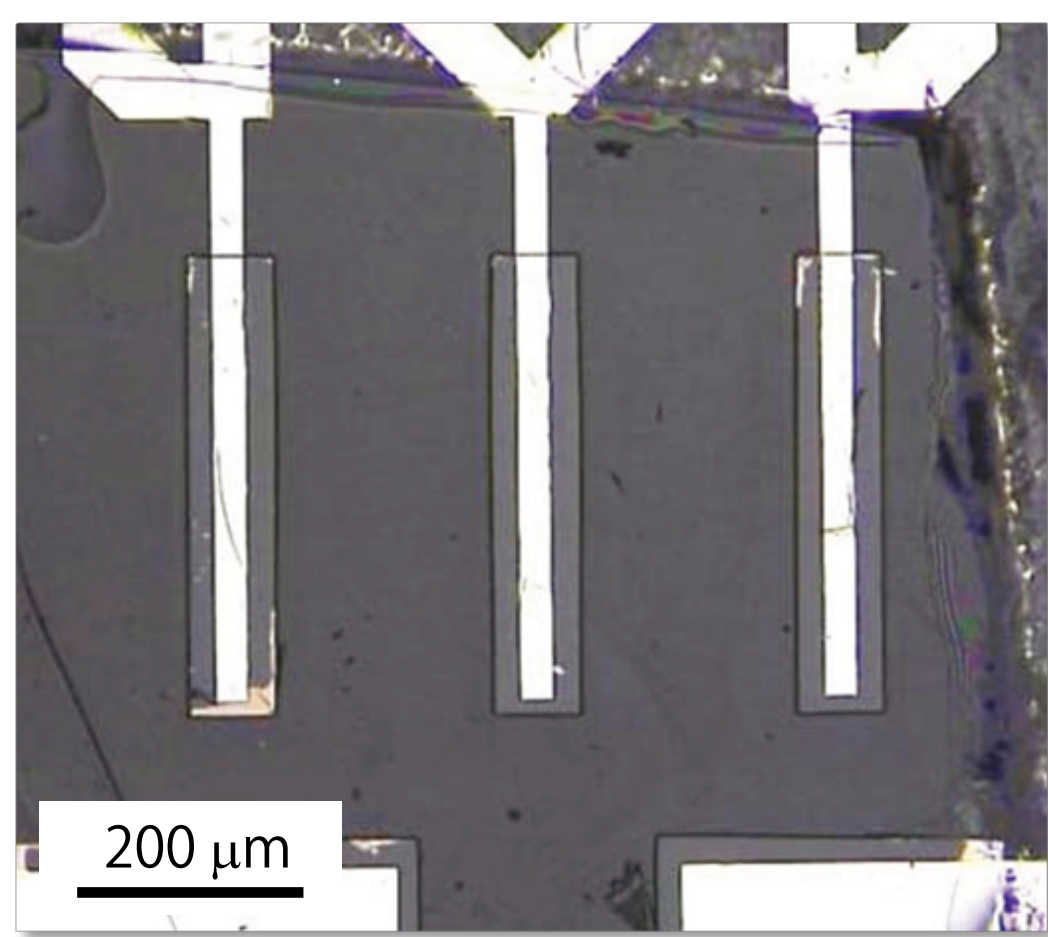


- 固体で安定な省電力の小型デバイス
- 大型単結晶の育成が容易な材料を使用
- 作製手法がシンプル = 量産性に優れる
- 幅広い周波数可変性: 0.2 THz ~ 1.6 THz

応用には 1 mW 級の出力が求められますが、現状は 0.1 mW レベルです。光源の高出力化をめざして さまざまな角度から研究を進めています。

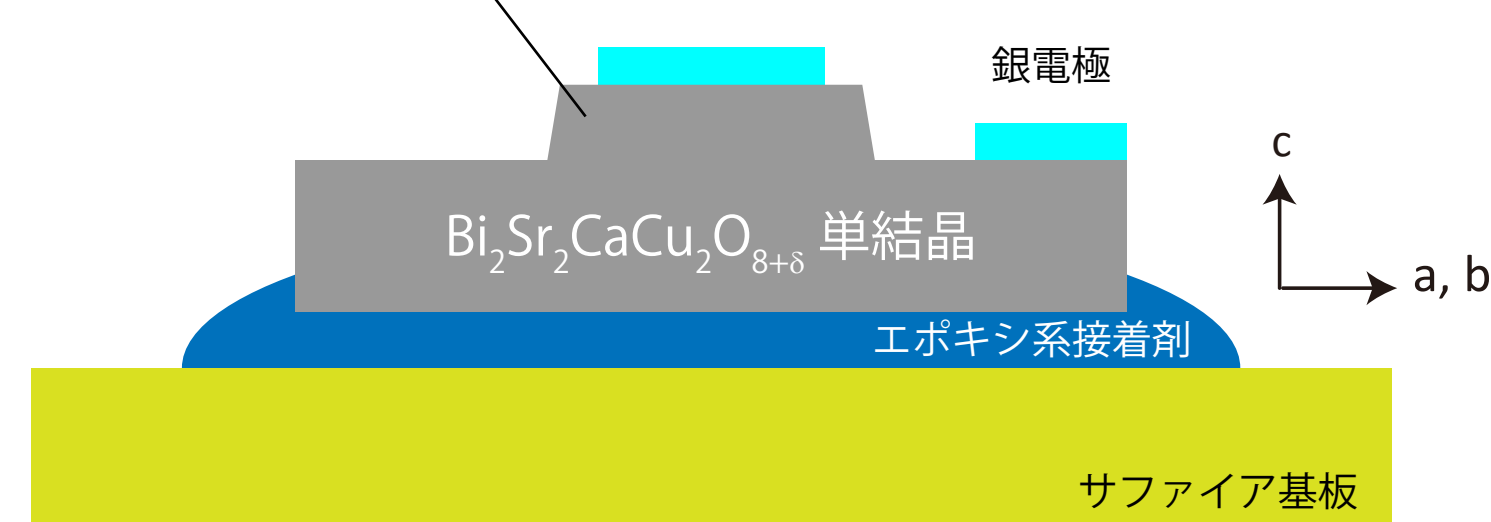
デバイス作製

- (1) 単結晶の育成・・・浮遊帯域溶融法
- (2) 単結晶のアニール処理
- (3) パターニング・・・フォトリソグラフィ
- (4) エッチング・・・アルゴンイオンミリング
- (5) 寸法測定・・・触針式表面形状測定器



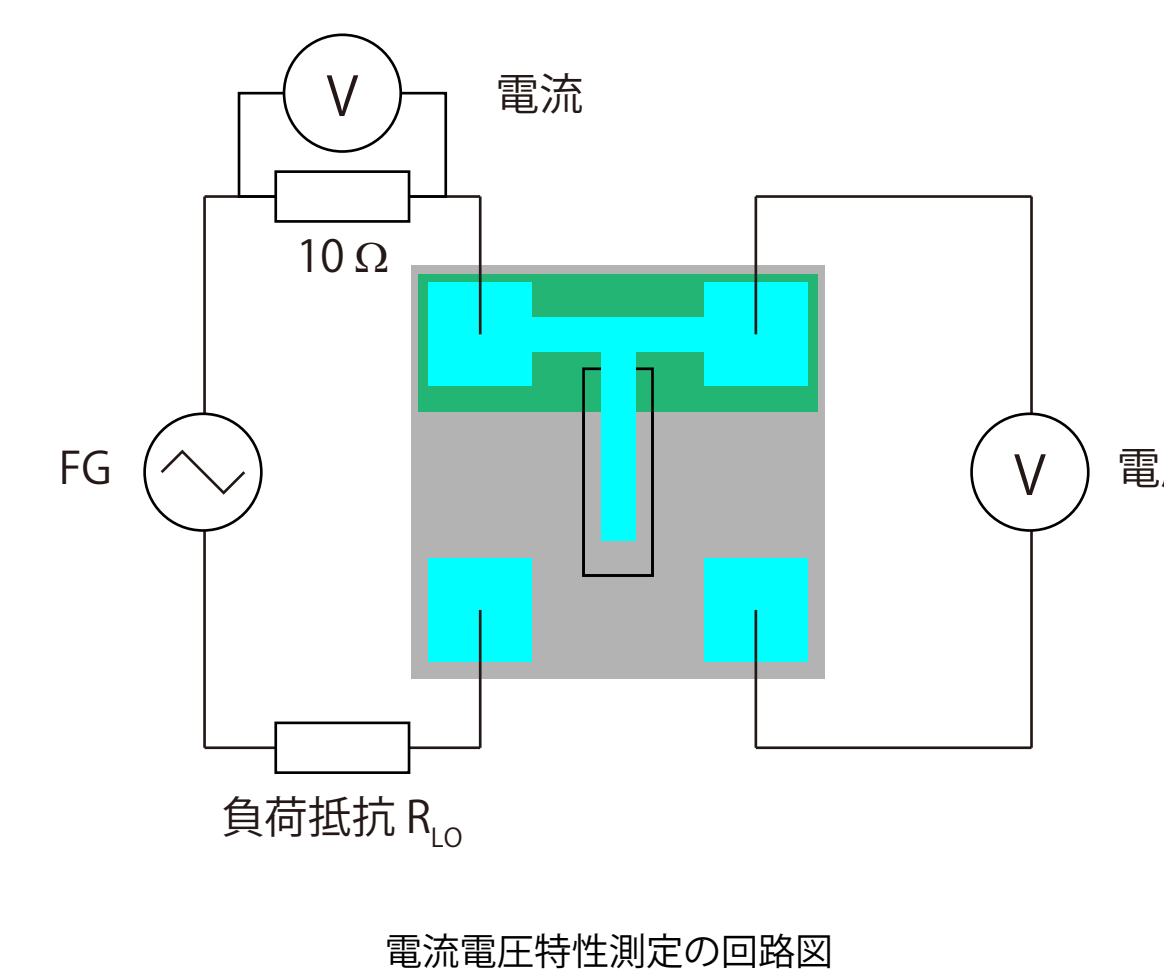
光学顕微鏡写真

メサ (台地) 構造 高さ: 1 ~ 2 μm, 幅: 60 ~ 100 μm

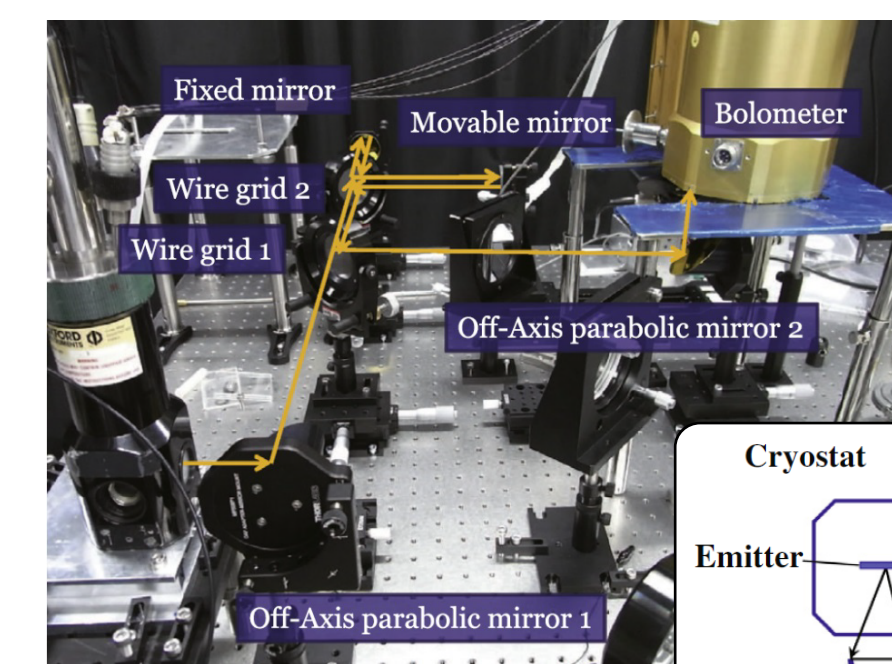


測定装置

- ・検出・・・シリコンボロメーター
- ・分光・・・フーリエ変換型遠赤外 (FT-IR) 分光器
- ・低温冷却・・・液体 He 連続フロー型クライオスタット

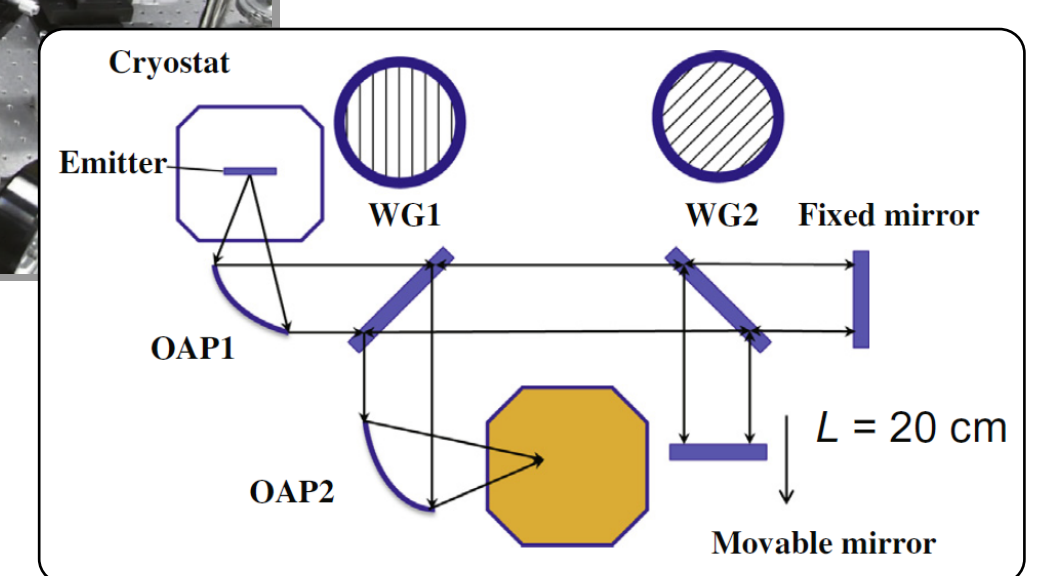


電流電圧特性測定回路図



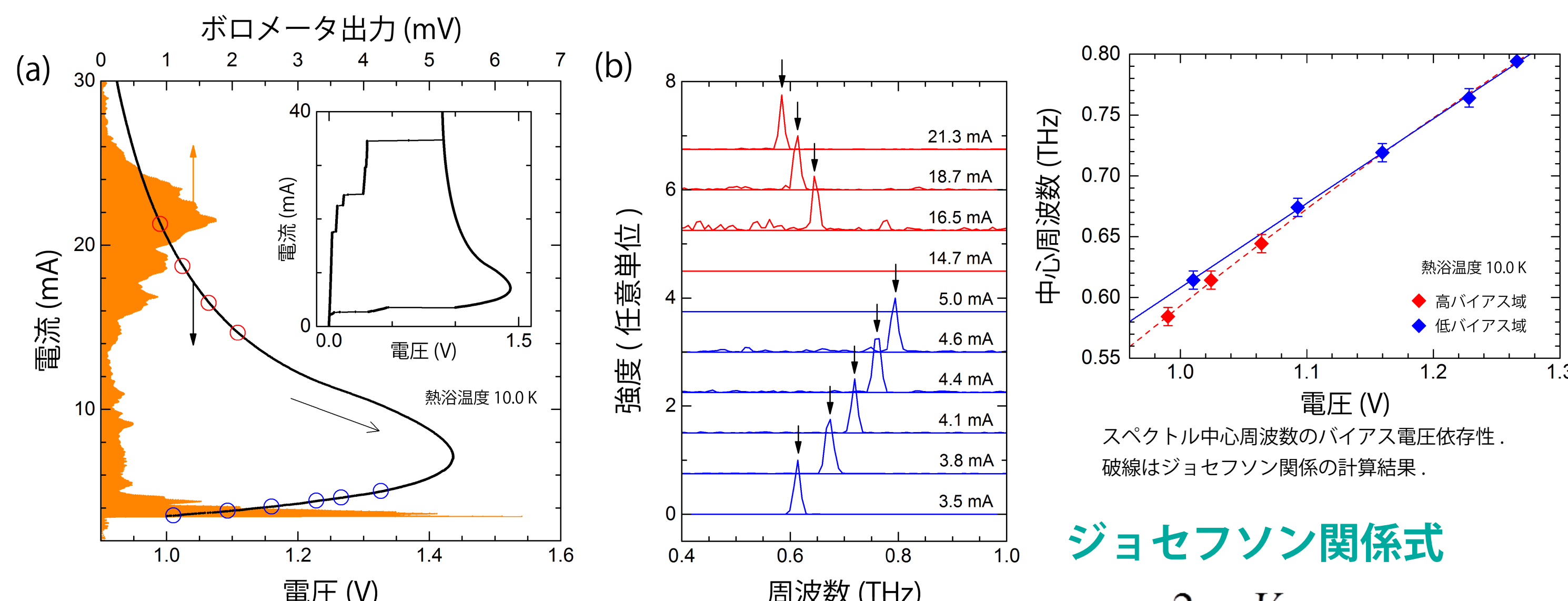
(左) 自作した FT-IR 分光器

(下) 光学系の概略図



実験結果

◆ 基本的なテラヘルツ発振特性



(a) 電流電圧特性 (黒) とボロメーター検出強度 (橙). 挿入図は電流電圧特性の全体図.
(b) 丸で示されたバイアス点における FT-IR 分光スペクトル.

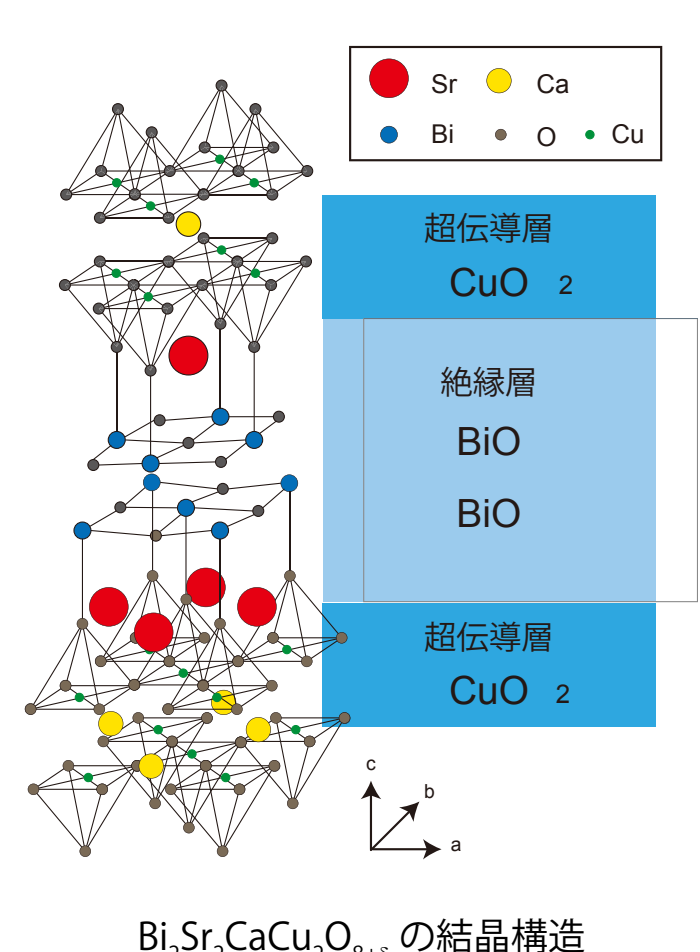
ジョセフソン関係式

$$f_J = \frac{2e}{h} \cdot \frac{V}{N}$$

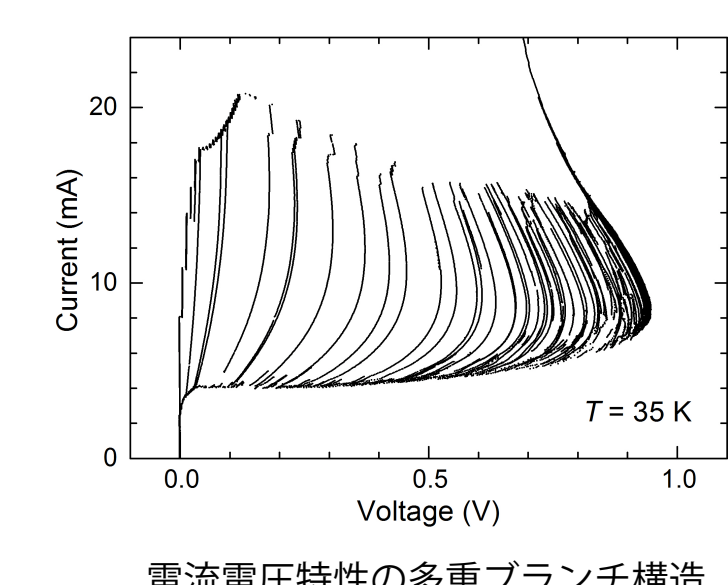
e: 素電荷
h: プランク定数
N: 固有ジョセフソン接合数

固有ジョセフソン接合

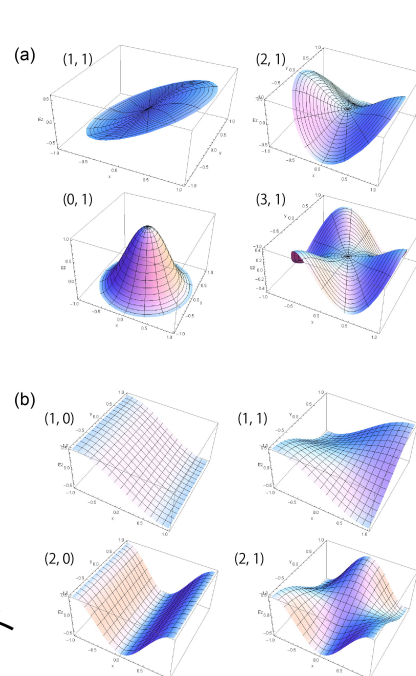
原子スケールで高密度かつ均一に積層したジョセフソン接合



Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} の結晶構造



電流電圧特性の多重ブランチ構造



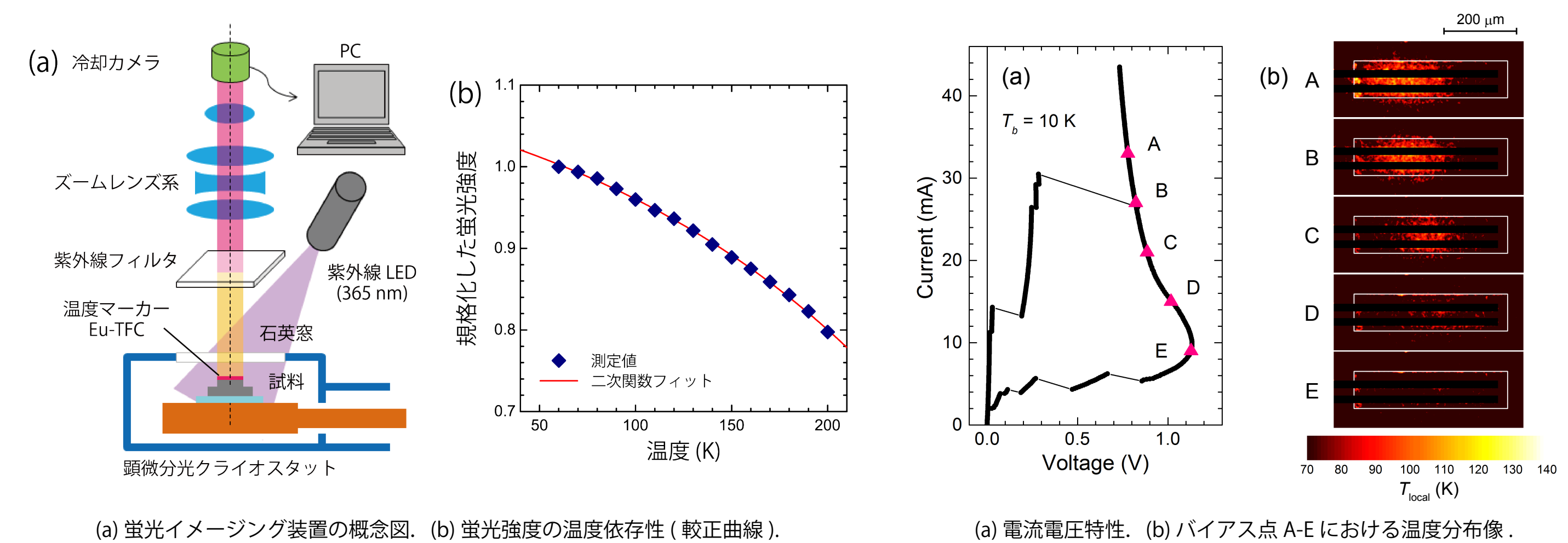
内部電場のスナップショット

幾何学的空洞共振効果

メサ構造がパッチアンテナとして動作し電磁定在波を励起

◆ 極低温環境における温度分布計測装置の構築

出力を低下させる原因として指摘されている局所的な温度上昇を実験的に検証。

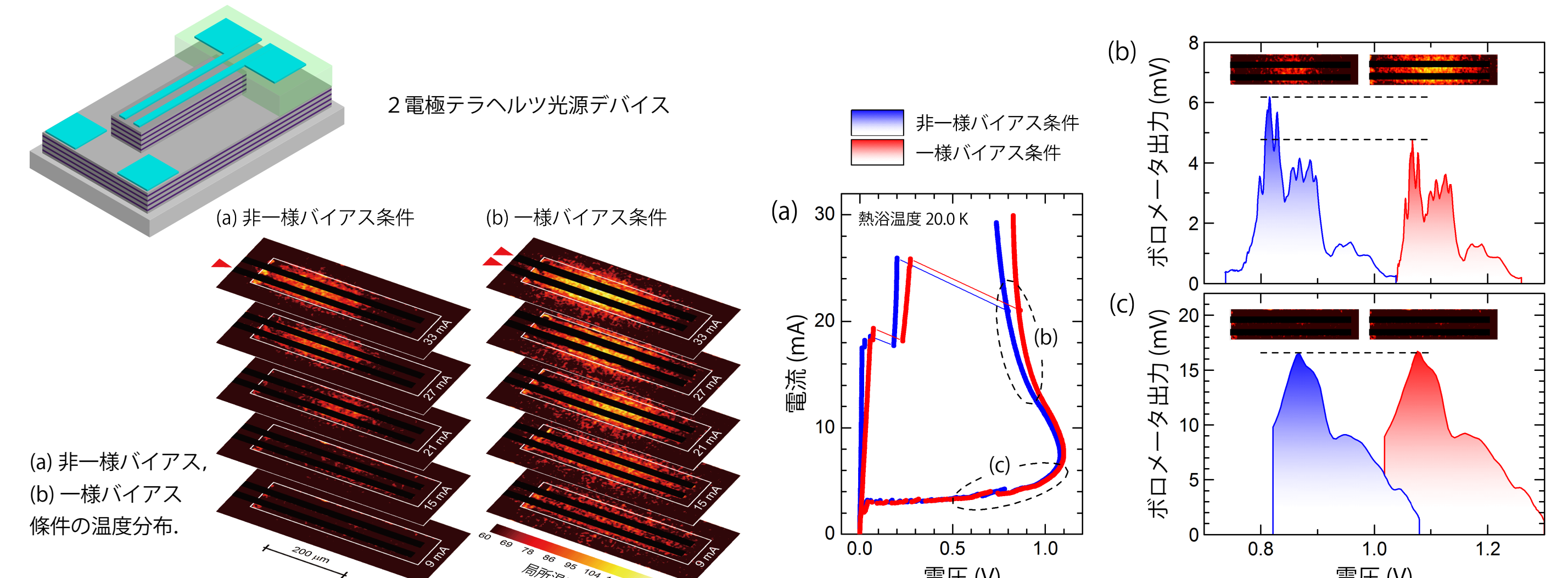


(a) 蛍光イメージング装置の概念図. (b) 蛍光強度の温度依存性 (校正曲線).

(a) 電流電圧特性. (b) バイアス点 A-E における温度分布像.

◆ 温度分布の動的制御とテラヘルツ発振の同時観測

特殊な構造を有するデバイスを作製し、温度分布を制御しながら発振を観測。



この実験によって、発振強度と超伝導領域の面積に正の相関があることを見出しました。排熱構造を工夫することで高出力テラヘルツ光源の設計が可能となります。

まとめ

- 高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を使った省電力な小型テラヘルツ光源は、他の光源にはない優れた特性を有している。
- 蛍光イメージング法を応用した温度分布計測装置を構築し、極低温環境における微小領域の温度分布を可視化する手法を確立した。
- 発熱による過剰な温度上昇を抑制することで高出力なテラヘルツ発振が達成できる。
- 超伝導テラヘルツ光源が実用化されれば、これまで半導体素子を中心に発展してきたテラヘルツ技術に革命的な進歩をもたらし、さまざまな分野の発展に貢献することが期待される。

謝辞

本研究は科研費「特別研究員奨励費」(研究代表者: 辻本学, 課題番号: 13J04811), 「若手研究 (B)」(研究代表者: 辻本学, 課題番号: 26790032), 「若手研究 (A)」(研究代表者: 掛谷一弘, 課題番号: 23681030) によるものです。



京都大学
KYOTO UNIVERSITY