

高温超伝導体単結晶を用いた テラヘルツ波発生技術とその応用

筑波大学 数理物質系 物質工学域
講師 柏木 隆成

2024年11月12日

テラヘルツ波

1 THz - 300 μm - 4 meV - 50 K

周波数

γ -ray X-ray Ultraviolet Radiant Infrared **Terahertz** Micro-waves
~1 nm ~1 μm ~0.3 mm ~3 cm

物質の同定

指紋スペクトル

物質の透過性

透過

表面情報

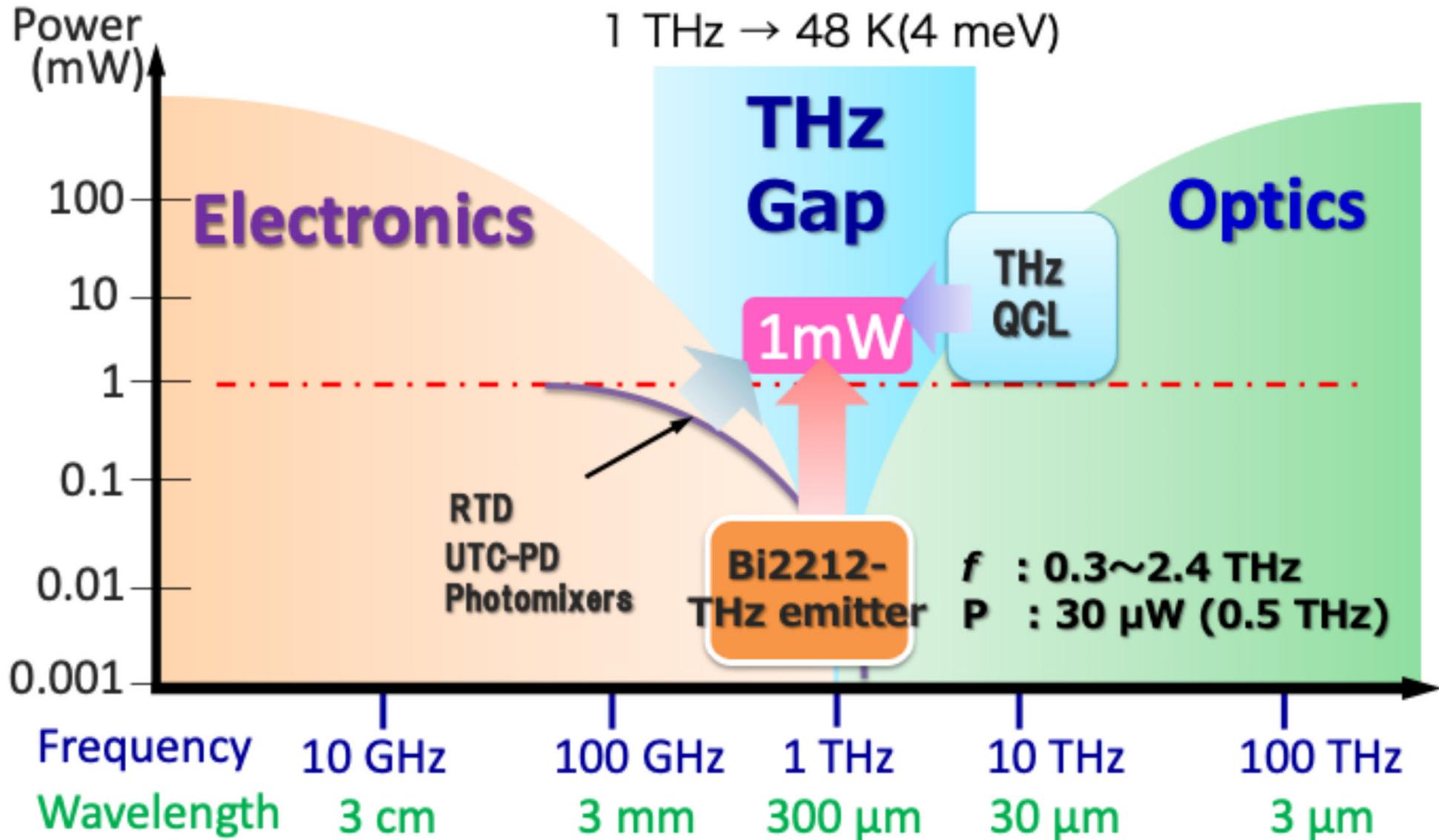
透過

安全対策

必要

※非破壊検査を想定した場合

小型THz波発振素子の状況

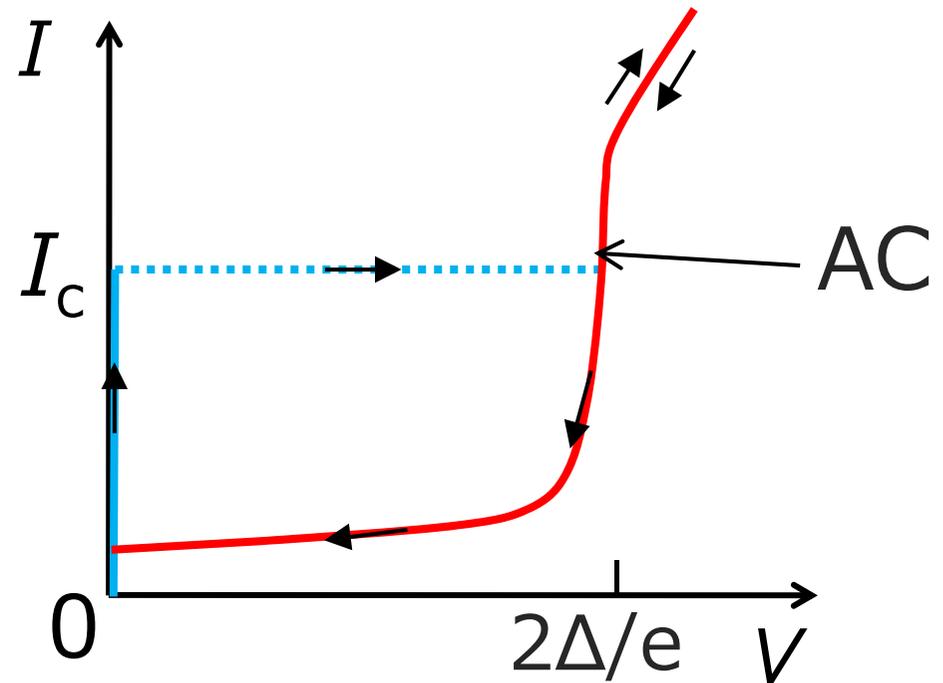
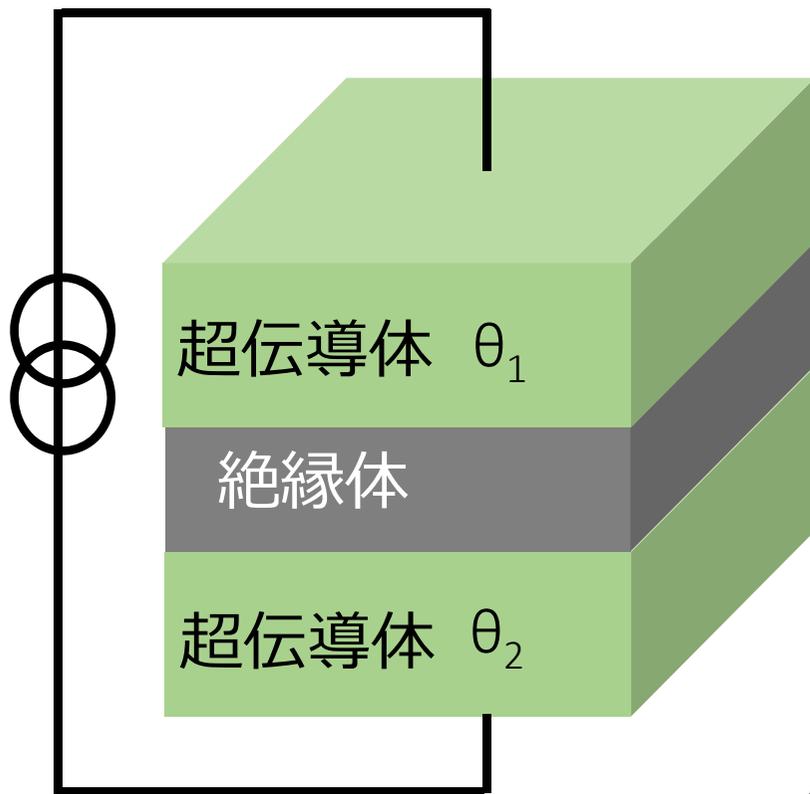


想定される適用先

- **非破壊，非接触のイメージング，物質同定**
塗装膜の厚みの確認や下地の確認
細胞組織の水分量のマッピング
食品梱包などの混入物チェック 等
- **次世代無線技術**
大容量無線通信（近距離通信）
車載レーダー等

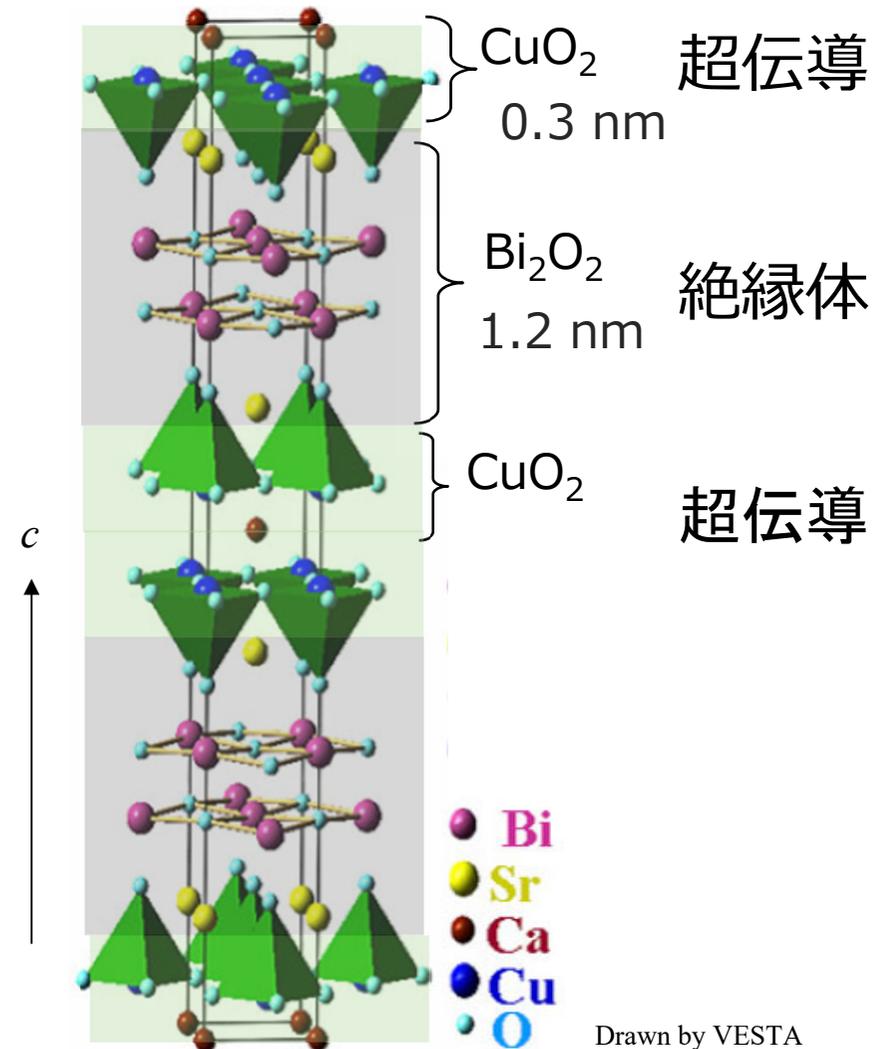
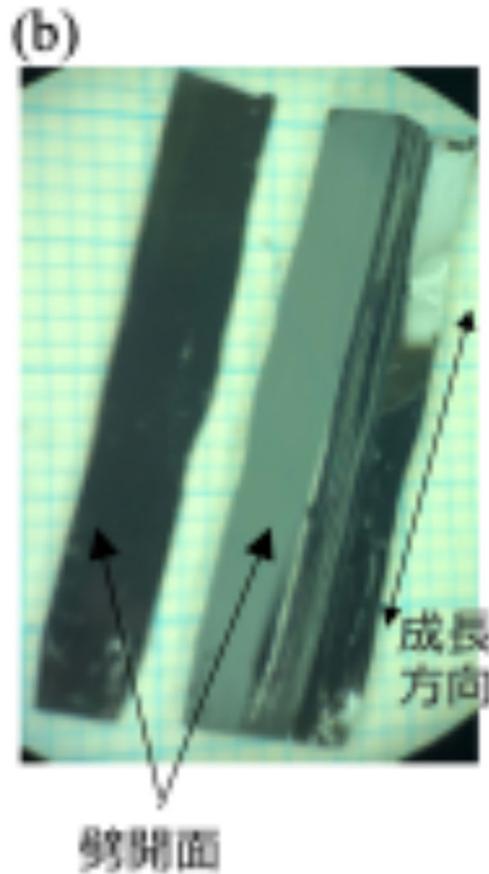
我々の技術：基本原理

ジョセフソン接合（交流ジョセフソン効果）



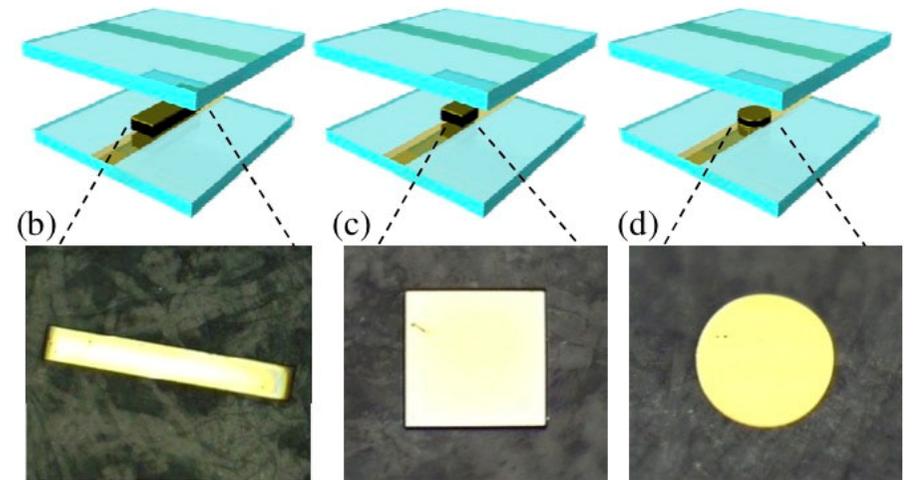
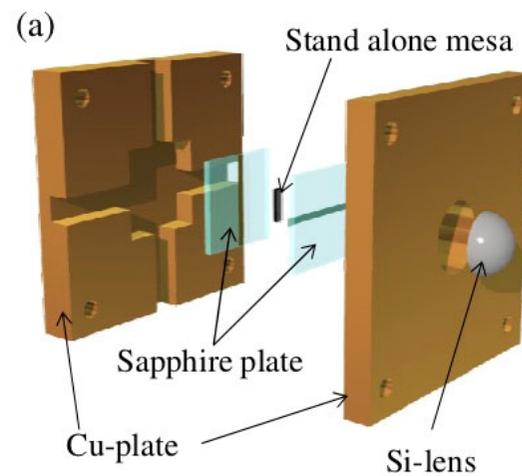
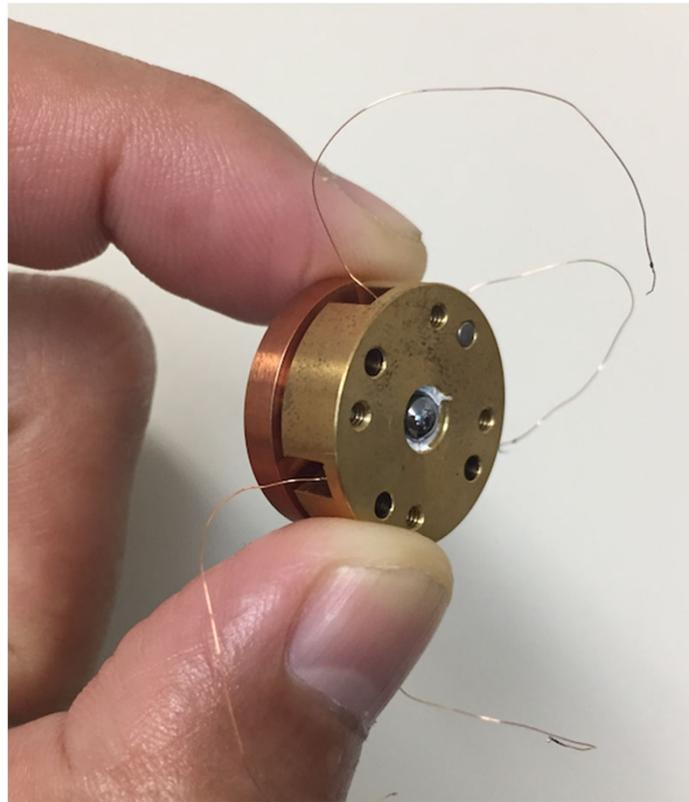
$$f = \frac{2|e|\hbar}{h} V = K_J V \quad \sim 484 \text{ GHz/mV}$$

我々の技術：単結晶育成



柏木隆成, 電子スピンスイェンス 21, 107 (2023).

我々の技術：素子構造



58-66 x 350 x 4.7 μm^3 \square 80 x 3.0 μm^3 d80 x 3.5 μm^3

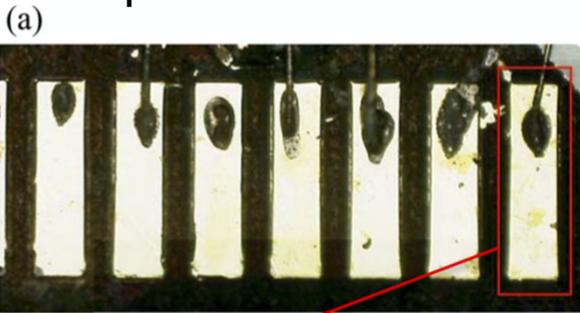
T. K. *et al.* SUST **30**, 074008 (2017).

J. Appl. Phys. **124**, 033901 (2018).

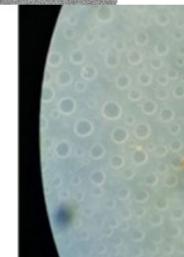
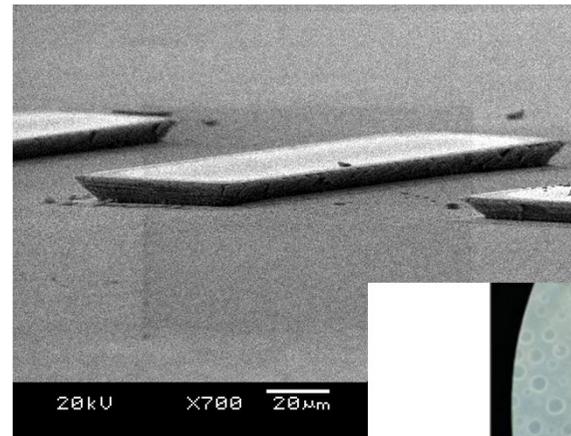
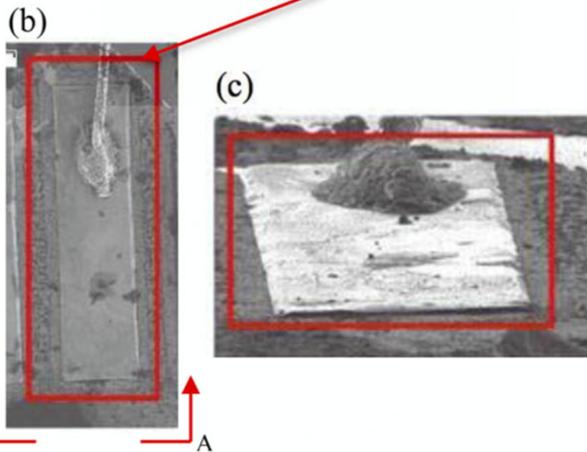
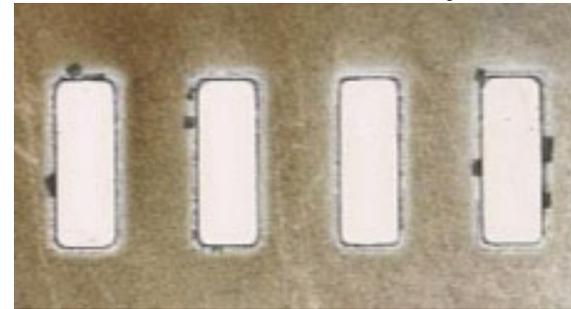
- Rectangular : $\sim 30\mu\text{W}$, 0.3 ~ 1.6 THz
- Square, Cylinder : $\sim \mu\text{W}$, 0.4 ~ 2.4 THz

背景：我々の技術（素子加工技術）

HCl + HNO₃
aqueous solution



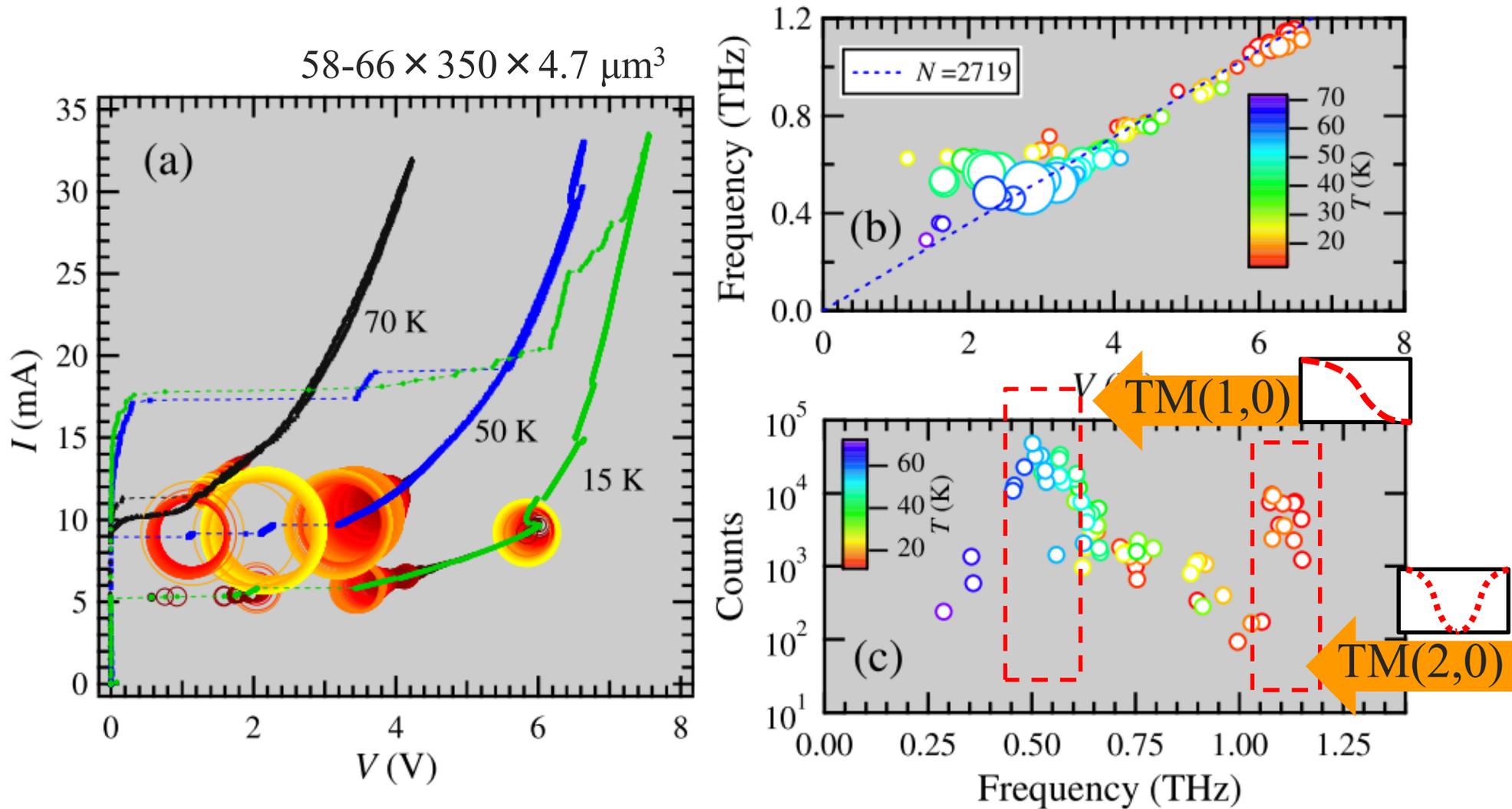
厚み : 3~10 μm



Y. Shibano *et al.*, AIP Advances **9**, 015116 (2019).

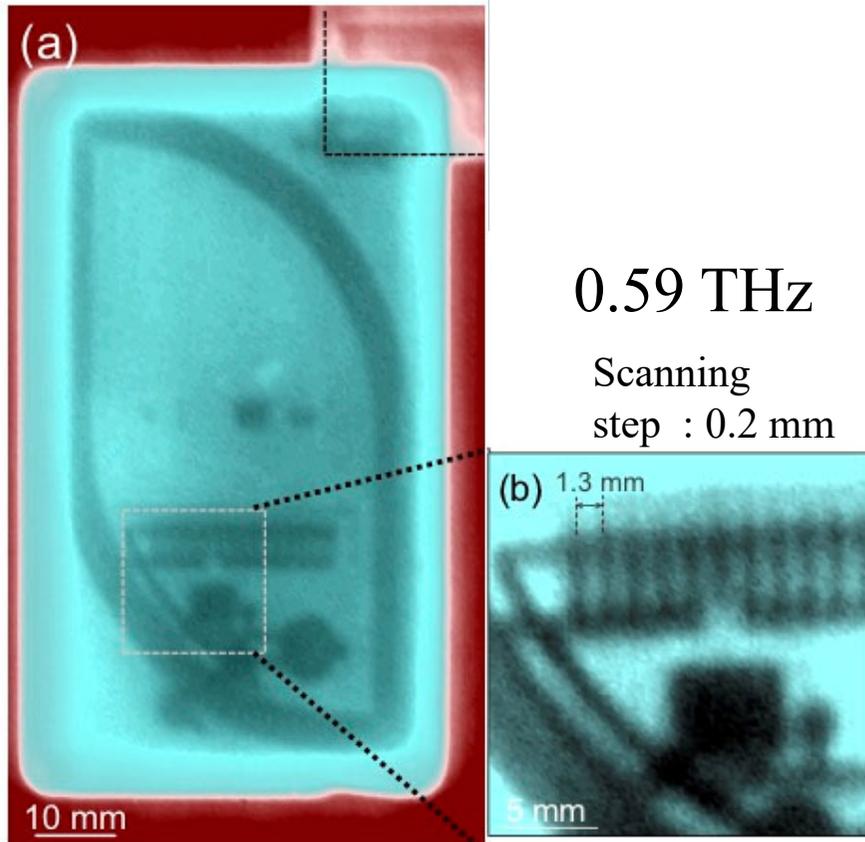
T. Imai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 126501 (2021).

我々の技術：素子特性の一例



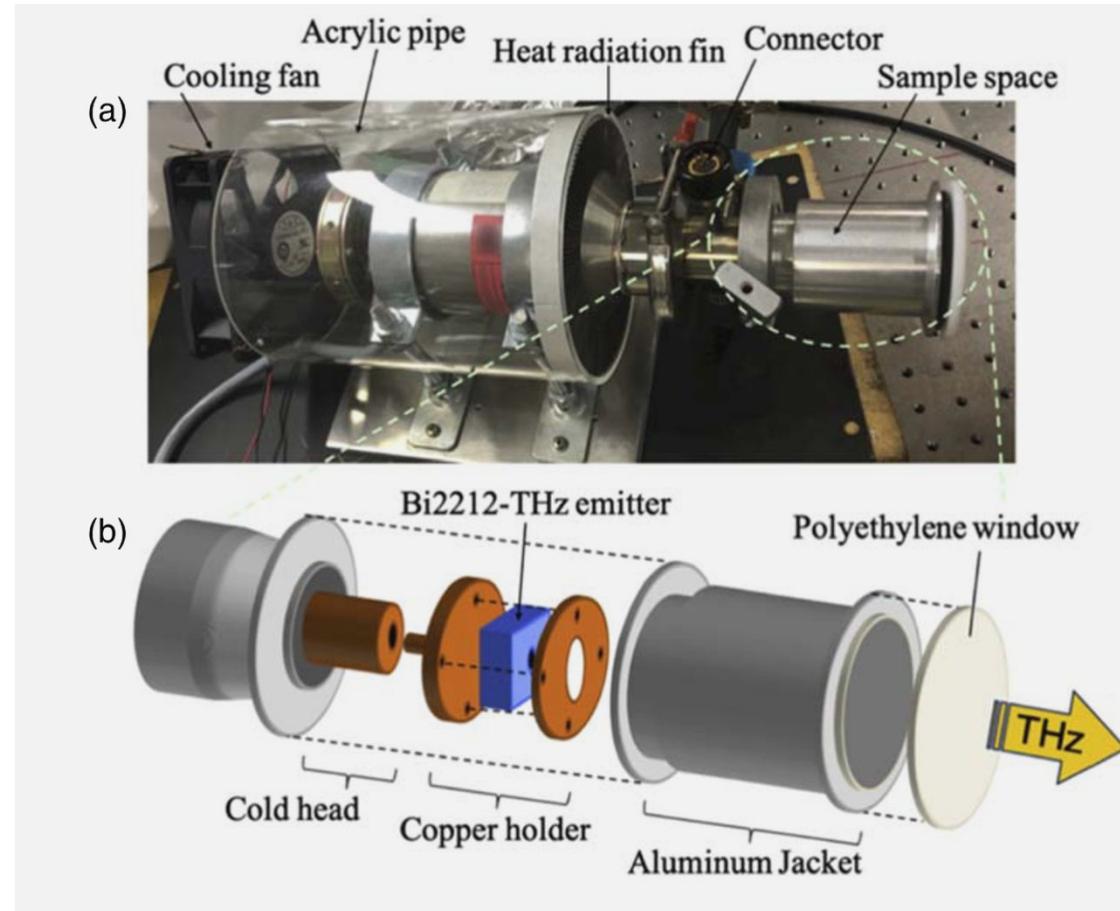
T.K. *et al.* APL **106**, 092601 (2015).

我々の技術：アプリケーション例



K. Nakade *et al.*, Scientific Rep. 6, 23178 (2016).

プラスチックカード内の金属配線



Saiwai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 105004 (2020).

小型冷凍機を用いたシステム

背景：我々の技術のまとめ

発振器のための結晶材料から 素子作製までの技術を確立済み

- 単結晶の育成技術（フローティングゾーン法）
- フォトリソグラフィを用いた微細加工技術
- テラヘルツ帯の電磁波の評価技術
- テラヘルツ帯のアプリケーションシステム
- 材料とデバイス特性に関する知見
- 発振素子特性に関する知見と技術
- 冷却環境を用いた物性測定技術

従来技術とその問題点（課題）

「既に実用化(市販)されているテラヘルツ技術」

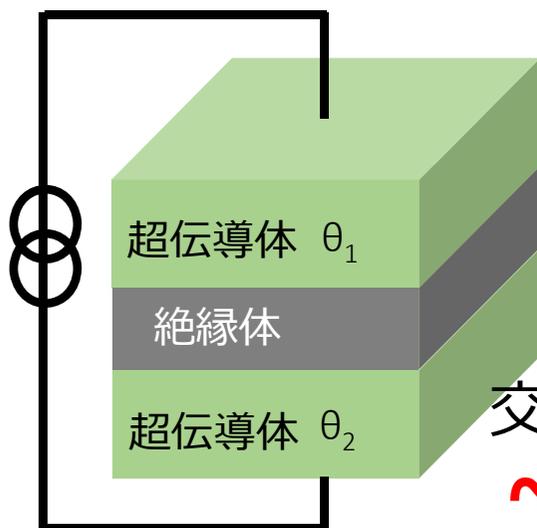
- ・ 時間領域テラヘルツ分光技術
- ・ 大型ガスレーザー
- ・ 非線形素子を用いた逡倍器技術
- ・ いくつかの半導体素子

「問題点（課題）」

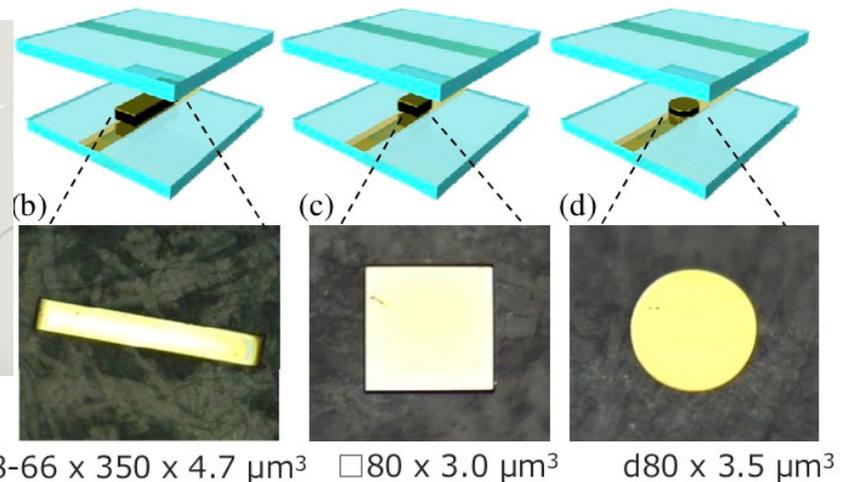
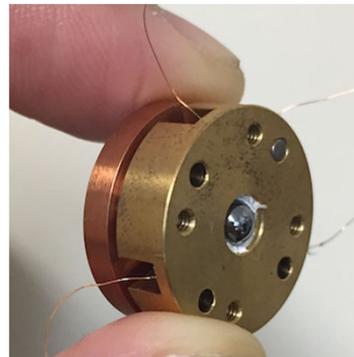
- ・ キラーアプリケーションの創出。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 電圧のみで発生周波数が制御可能。
- 発振器は $\sim\text{cm}^3$ サイズで取り扱いが容易。
- 高温超伝導体のため，小型冷凍機で動作可能。
- バルク結晶を削り出すだけで，素子作製が可能。
(設備費の抑制。)



交流ジョセフソン効果
 $\sim 484 \text{ GHz/mV}$



T. K. *et al.* SUST **30**, 074008 (2017).

本技術の想定される用途例

- 非接触での物質同定, イメージング
- 食品の異物検査ラインへの導入
(ex. 低密度・密度差が小さい異物の検出)



本技術の想定される用途例

要求性能

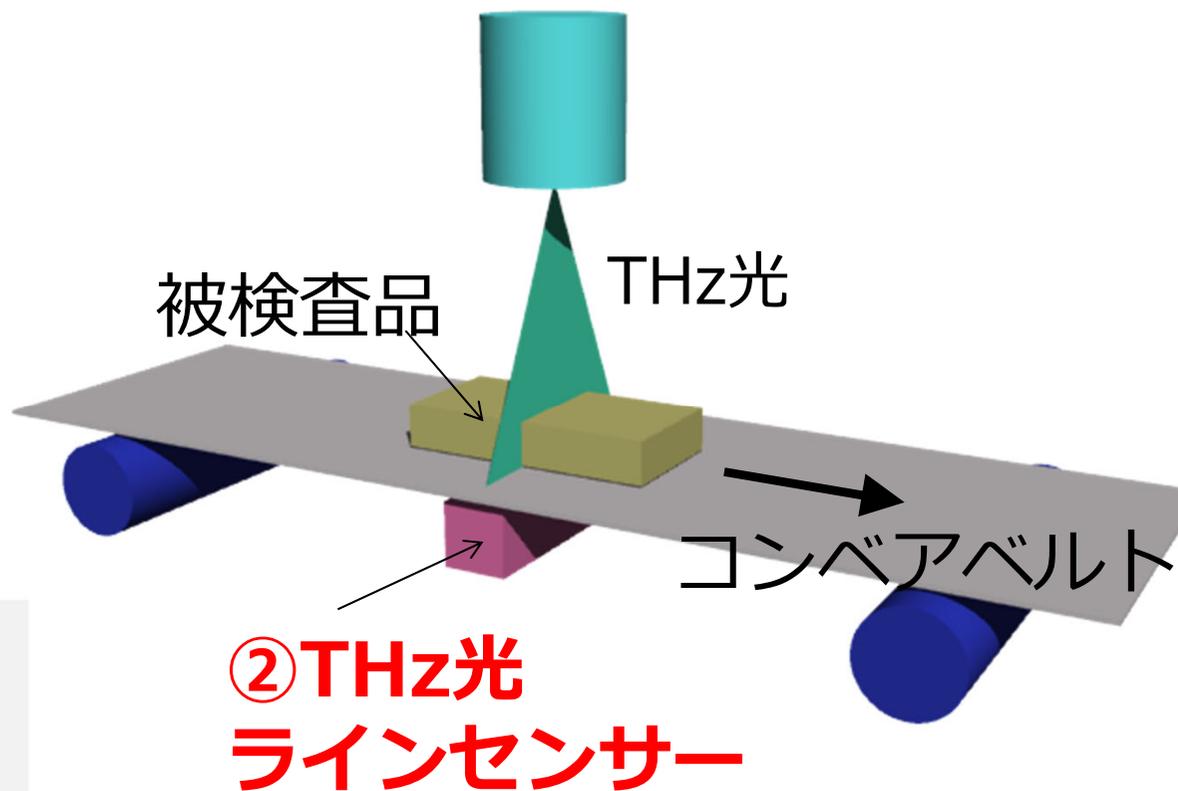
評価速度

300~500個/min

解決のために

- ① 高出力発振器の開発
- ② ラインセンサーの開発

① 高出力THz光源



実用化に向けた課題

- 現在、発振周波数としては、0.3~2.4 THzの発生が可能のところまで開発済み。しかし、**発振出力($\sim 10 \mu\text{W}$)**の点が未解決である。
- 実用化に向けて、テラヘルツ波の発生だけではなく、検出する技術とセットにすることができれば、適用先を拡大することが期待できる。よって、**検出技術の確立**も必要である。

企業への期待

- 未解決の発振出力向上については、発振素子のアレイ化技術により克服できると考えている。検出技術は新たな取り組みになる。
- 希望する共同研究企業
 - 微細構造の組み立て・加工技術を持つ企業
 - 微小配線加工技術を持つ企業
 - 食品・製薬関係の品質管理装置に知見のある企業
- また、6G以降の高周波デバイスを開発中の企業、及び関連材料の展開を考えている企業にも、本技術の導入は有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- テラヘルツ波を用いたアプリケーションの創出を一緒になって考えていきます。
- 具体的な適用先の調査から検証実験などを共同研究を通じて実施いたします。
- 必要に応じて技術講習などを適宜行います。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : **テラヘルツ帯域電磁波発振素子の発振方法、テラヘルツ帯域電磁波発振素子の発振装置及び分光器**
- 出願番号 : 特願2018-32280
- 出願人 : 筑波大学
- 発明者 : 柏木隆成、門脇和男, 南英俊

産学連携の経歴

- 2013年-2014年
JST A-STEP 探索タイプ事業に採択
- 2019-2022年
A社と委託研究実施
- 2022年-現在
B社と委託研究実施中

お問い合わせ先



筑波大学 国際産学連携本部

T E L 029-859-1659

e-mail event-sanren@un.tsukuba.ac.jp