

熱輻射の波動性に基づく新規 熱マネジメントおよび熱利用技術

東北大学 大学院工学研究科 機械機能創成専攻
准教授 清水 信

2021年7月27日

熱輻射のコヒーレンス

コヒーレント光



インコヒーレント光

マイクロ波

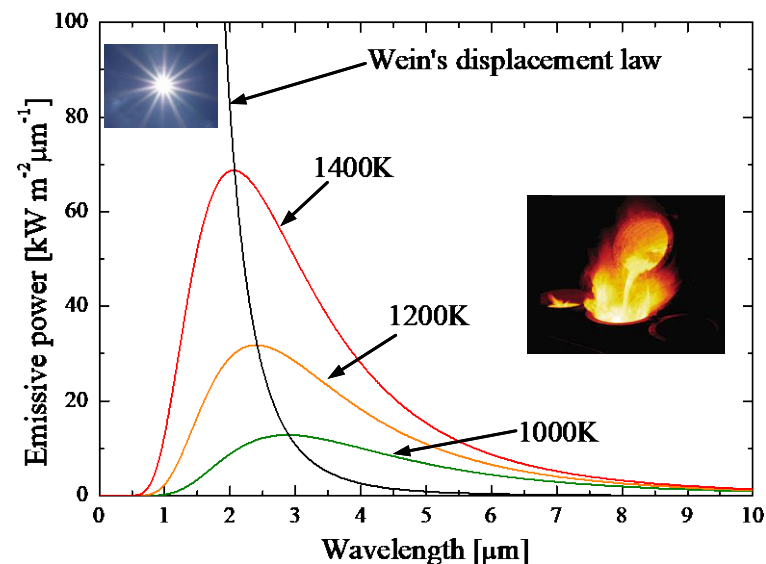
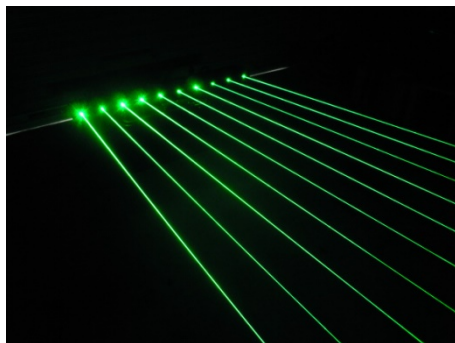


熱ふく射(自然放出光)

熱輻射

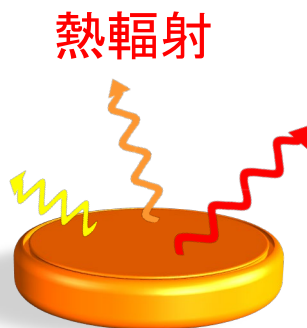


レーザー光線(誘導放出光)



熱輻射の波動性(コヒーレンス)制御により従来にない熱輸送、熱利用方法が実現できないか

熱輻射のコヒーレンス制御



一般的な輻射熱輸送の考え方

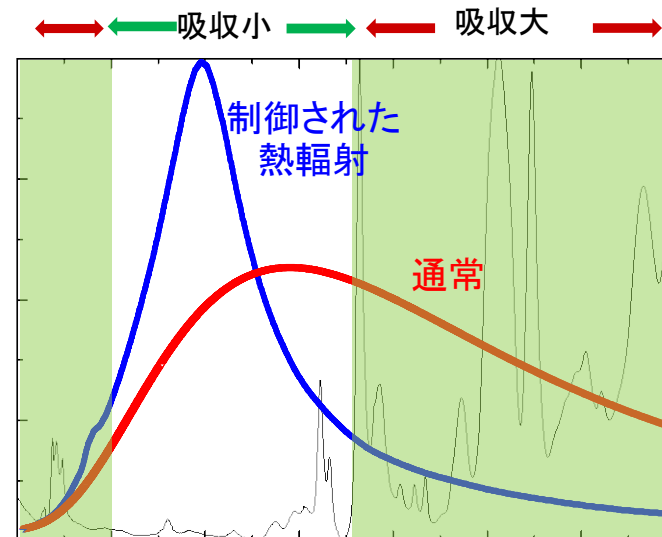
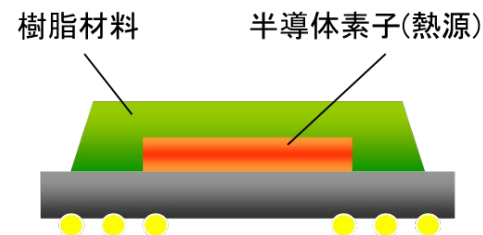
広帯域・等方的熱輻射に基づく

Stefan-Boltzmann law

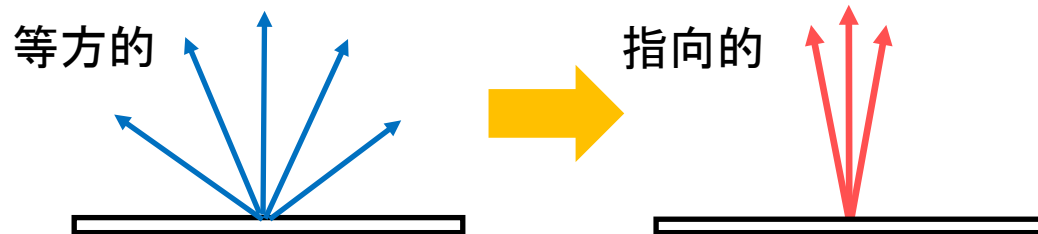
$$q = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

スペクトル的コヒーレンス

(例)



空間的コヒーレンス



樹脂の吸収が小さい波長域に熱輻射を制御することで高効率に放熱

高分子薄膜を用いた熱輻射のコヒーレンス制御

高分子材料

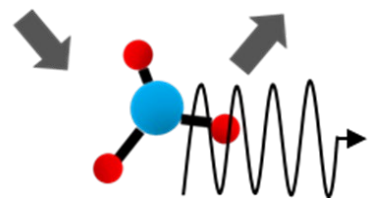
高分子材料

- 経済性・スケーラビリティに優れる
- 加工性が高い
- 分子振動モードを有する



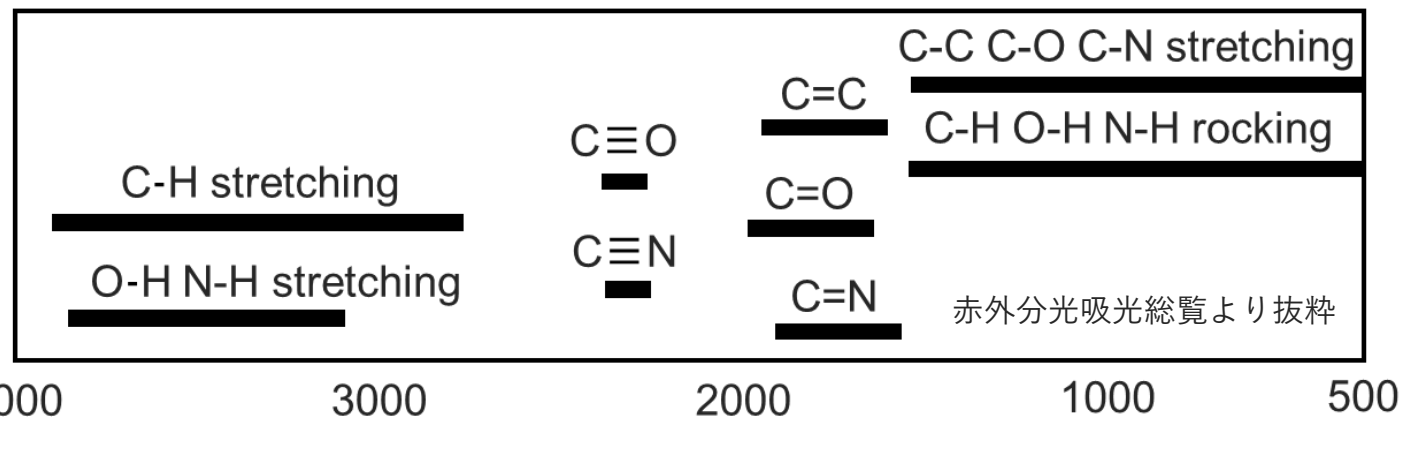
分子振動の波長域

Infrared light Absorption (Radiation)



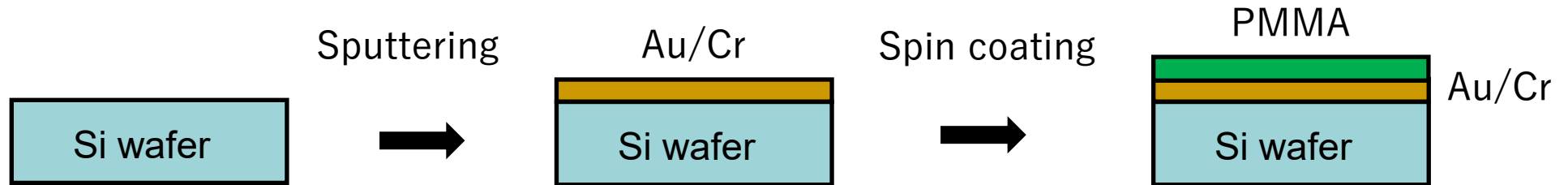
振動周期が一致したとき光吸収・放射

波数
(cm^{-1})



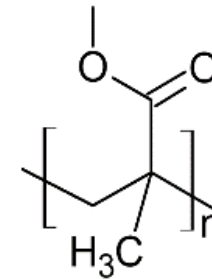
高分子の分子振動モードを用いた赤外熱輻射特性制御

サンプル作製



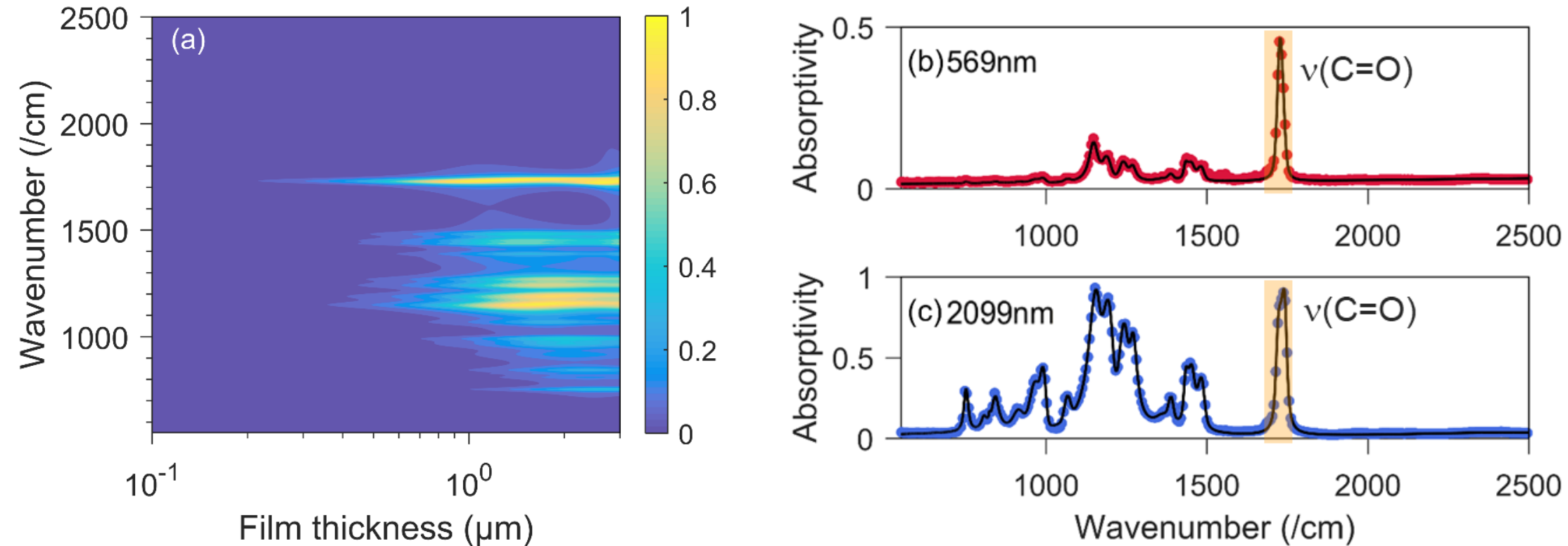
■ 高分子

Poly(methyl methacrylate) (PMMA)



作製は単純かつ簡便

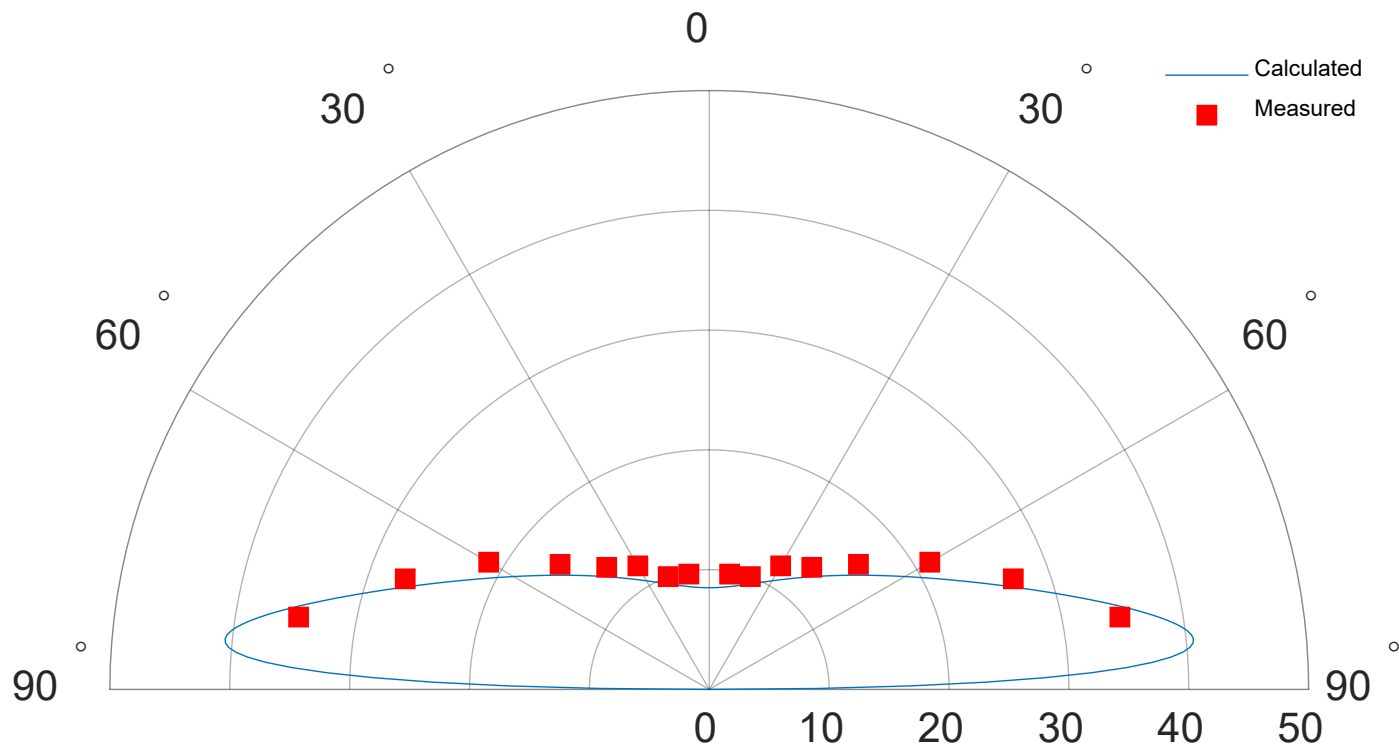
サンプル光学特性 —スペクトル制御—



S. Tsuda et al., *Optics Express*, 26 (6), 6906 (2018)
<https://doi.org/10.1364/OE.26.006899>

高分子薄膜の膜厚を制御することによって吸収ピーク幅の制御可能

サンプル光学特性 —放射角度制御—



高分子膜を薄膜化 (<500nm) することで放射指向性が変化
 等方性 → 角度選択性熱放射の実現

新技術の特徴・従来技術との比較

- 高分子成膜のみの単純・簡便な方法で放射スペクトル特性および放射角度特性の制御が可能
- 高分子の分子振動により放射(吸収)ピーク発現
→高分子の選択により放射スペクトル特性の制御可能
- 放射角度制御によって指向性熱放射が実現可能
→物体間のギャップ大でも形態係数大、狭小領域への選択的
輻射熱伝達

実用化に向けた課題

- 薄膜化した際の全放射量が小さく熱輸送量が小さい
- 高分子薄膜化の際の不均一性制御

企業への期待

- 多数の分子振動モードを有する高分子膜形成により全放射量の向上可能
- 成膜条件の最適化により均一膜形成可能

高分子合成技術、高分子薄膜形成の技術を持つ
企業との共同研究を希望

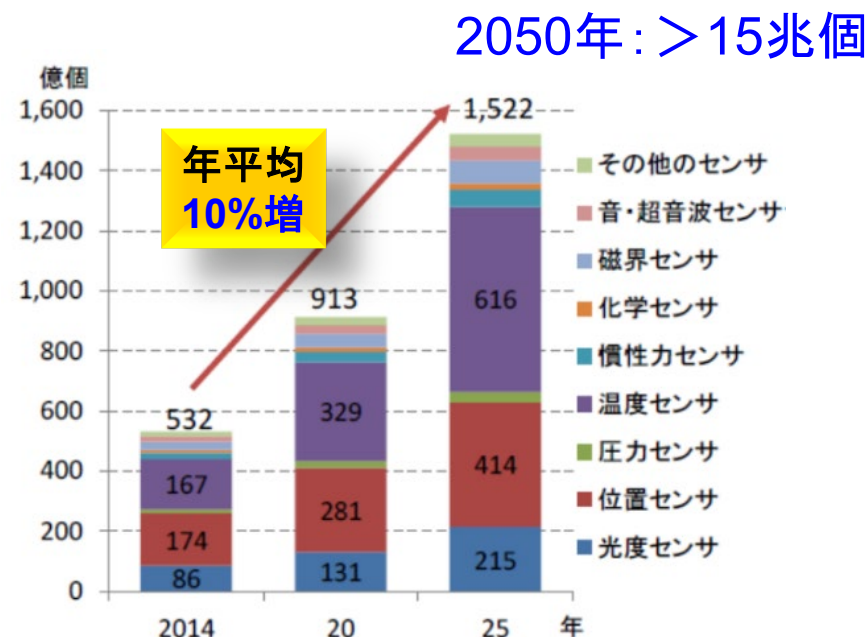
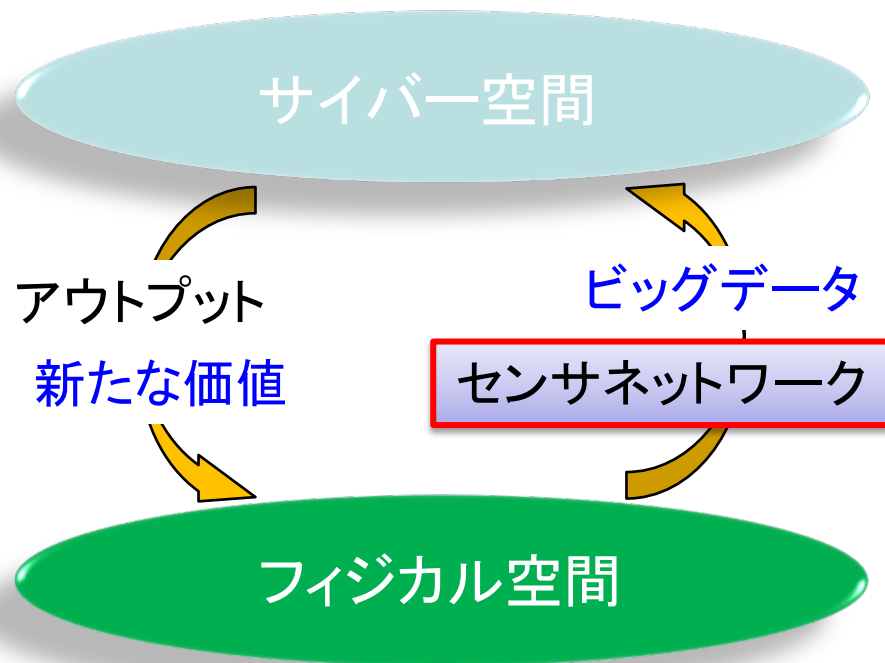
本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 構造体、光透過窓
- 出願番号 : 特願2020-100337
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 清水信、湯上浩雄、山口周平

熱輻射の波動性に基づく電力変換

センサ駆動における エネルギーハーベスティング技術の必要性

Society5.0: “サイバー空間”と“フィジカル空間”の高度な融合社会



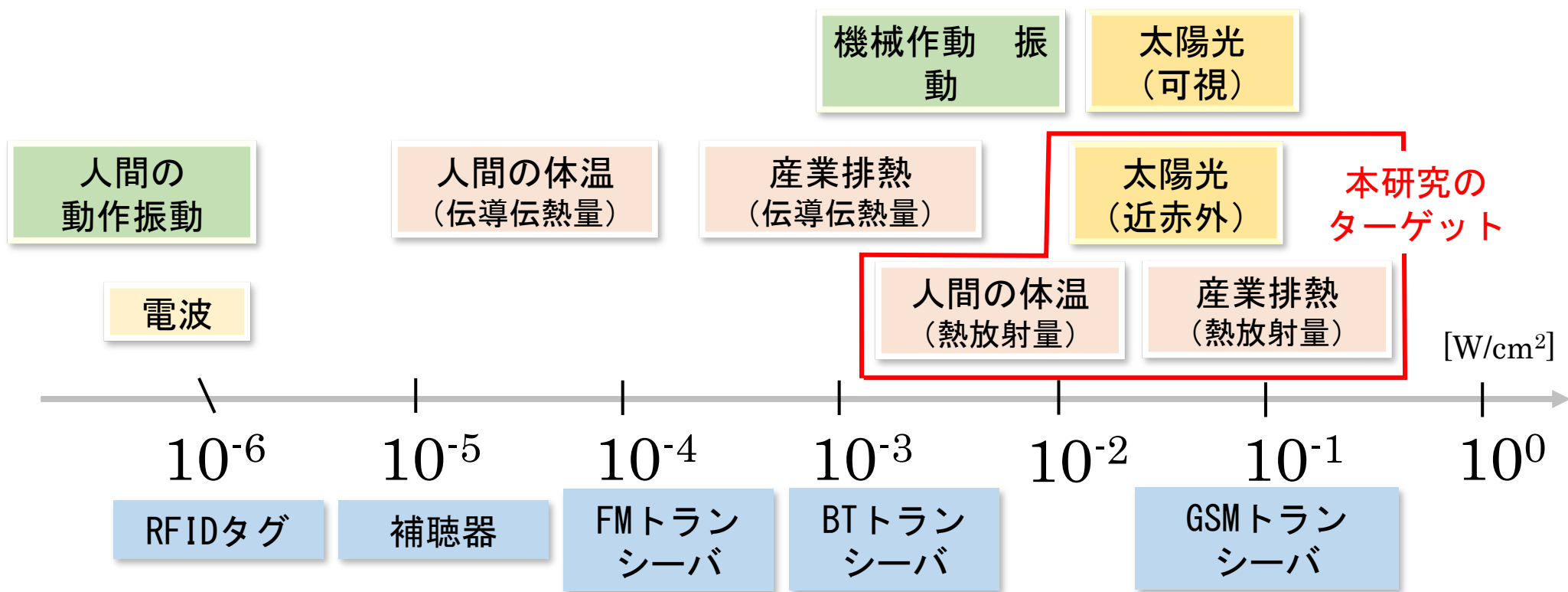
(一財)電子技術産業協会(2015)「注目分野に関する動向調査」

センサ駆動電源の技術的課題

- 膨大量のセンサ駆動のための無給電、メンテナンスフリー、高安定出力電源の確保
- 多様化するセンサシステム(設置環境、設置形状)に対応し得る電源の確保
- 膨大量のセンサ駆動電源産出に伴うCO₂排出量の増加

エネルギーハーベスティング技術の発展が必要不可欠

赤外熱輻射エネルギーのハーベスティング



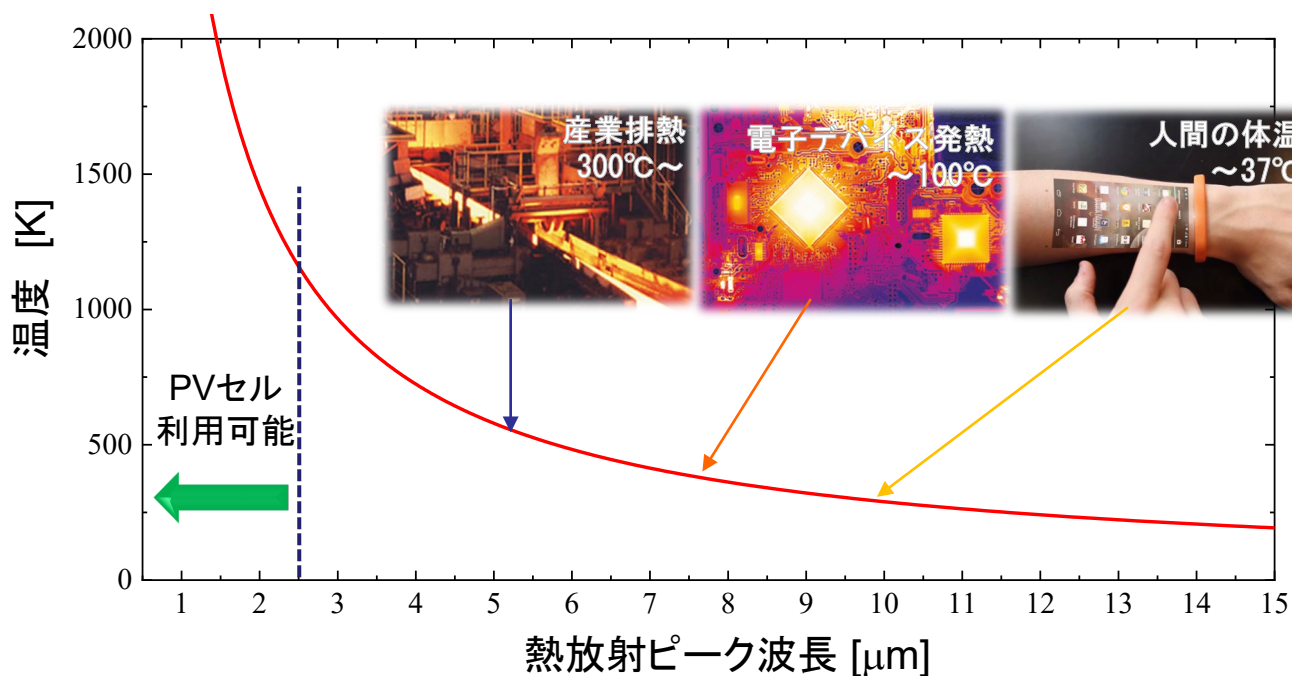
F. Dostal, *Analog Dialogue*, 49-09 (2015)

赤外熱輻射を用いた新規エネルギーハーベスティング技術創出

有限温度のあらゆる物体から放射媒質を必要とせず
空間を伝搬

➡ 高安定出力化、および設置環境、形状に依存しない電源

新技術の特徴・従来技術との比較

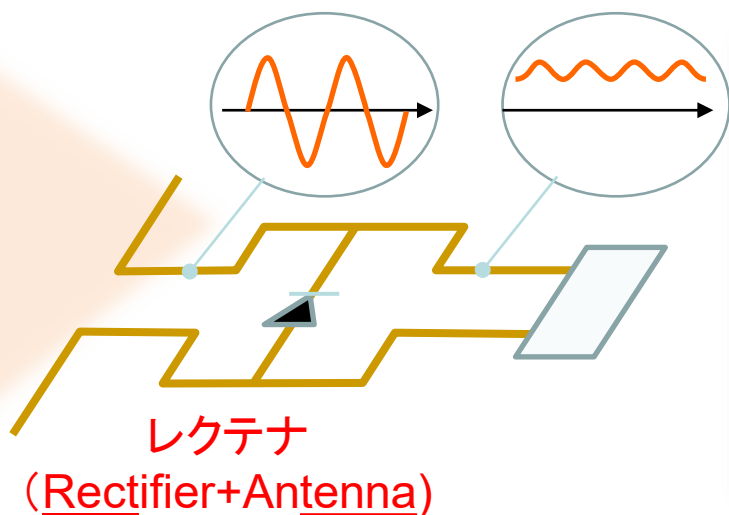


光起電力セルによる赤外光
電力変換のためには**小さな
バンドギャップ**必要



熱励起キャリアの影響が大きい
ため本質的に**応用不可**

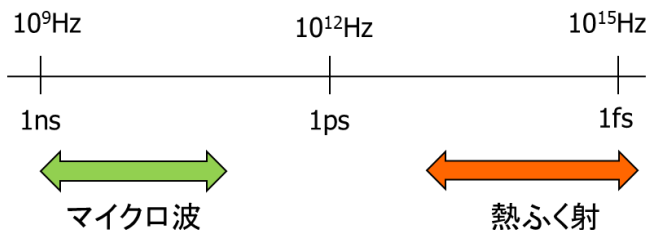
熱輻射の波動性に基づく光波発電を応用



- ・ **幅広い温度域**利用可能
- ・ 太陽電池と同様に**電流電源**として機能
→ 過電圧を考慮した回路補償必要なし
→ キャパシタによる効率的な電荷蓄積可能
- ・ 熱源と**非接触** ・ **フレキシブル化**可能

光波発電効率向上のための因子 —ダイオード性能—

必要応答速度



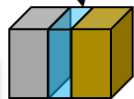
ピコ秒以下のキャリア移動時間必要

従来型ダイオード限界応答周波数

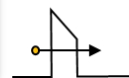
pn接合型: $< 10^6$ Hz

ショットキー型: $< 10^{13}$ Hz

トンネル層(数nm)



金属(M)—誘電体(I)—金属(M)トンネルダイオード

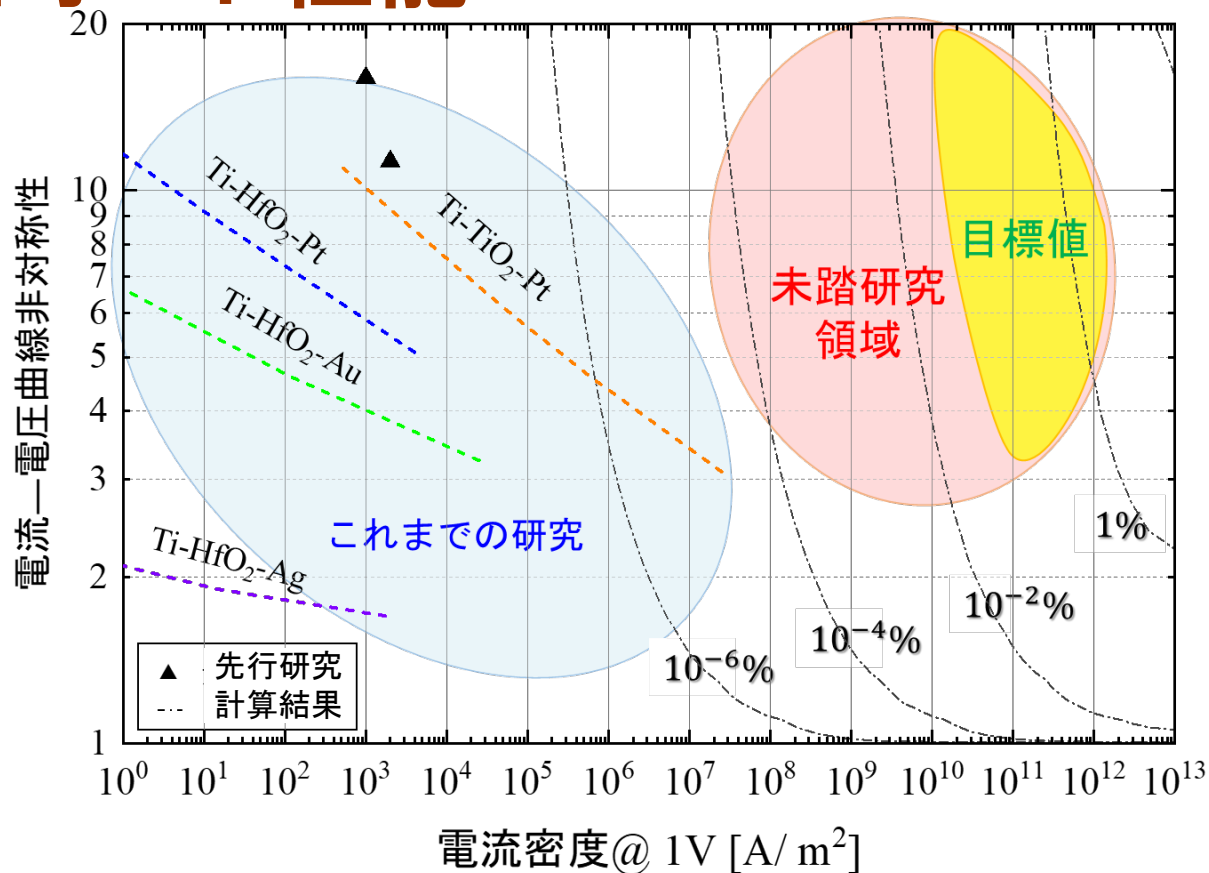


→動作原理的に高速応答可能

中赤外熱輻射変換のためには

- 小さなRC時定数 → 高電流密度
- 高い量子変換効率 → 高整流性能 (I-V曲線非対称性)

高い整流性能を維持した中での電流密度向上が必要



従来のMIMトンネルダイオード

トンネル層厚さ、障壁高さ減少により高電流密度化

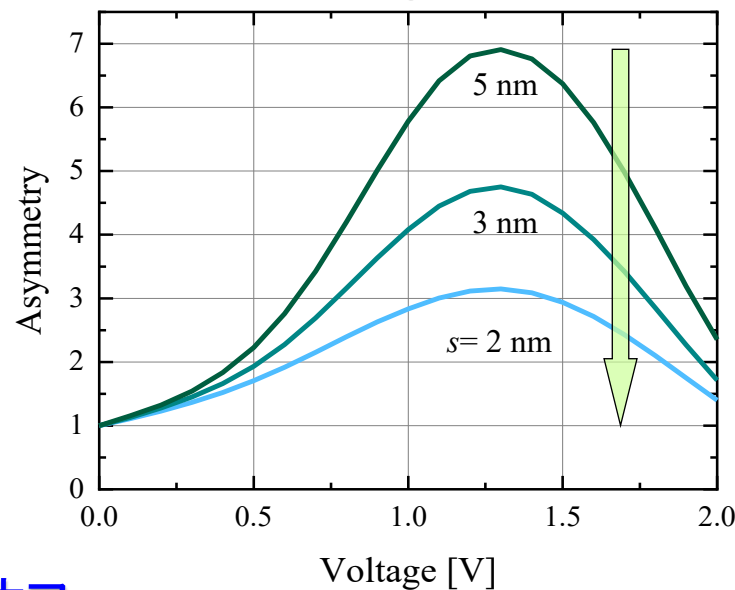
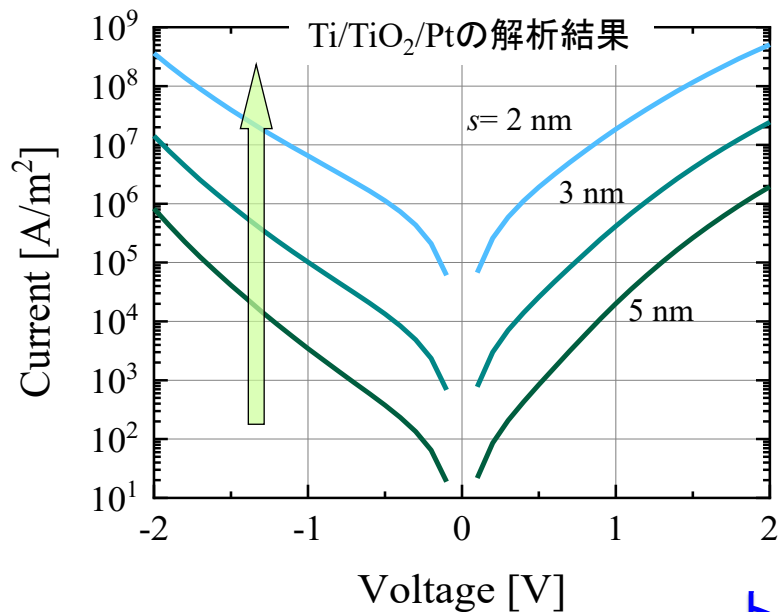
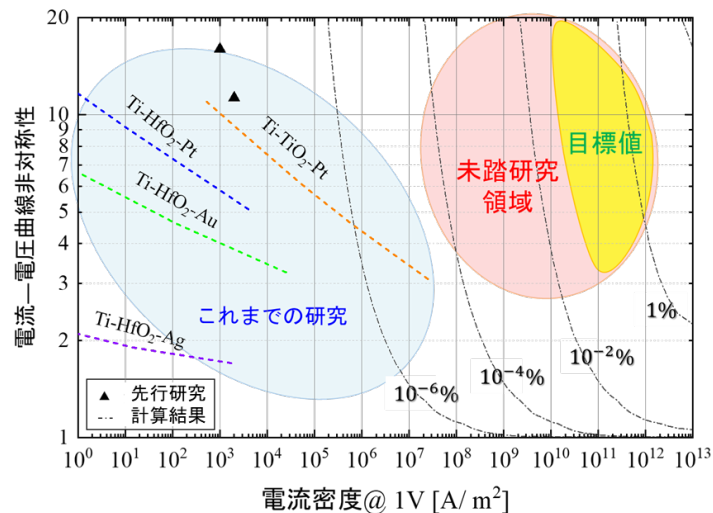
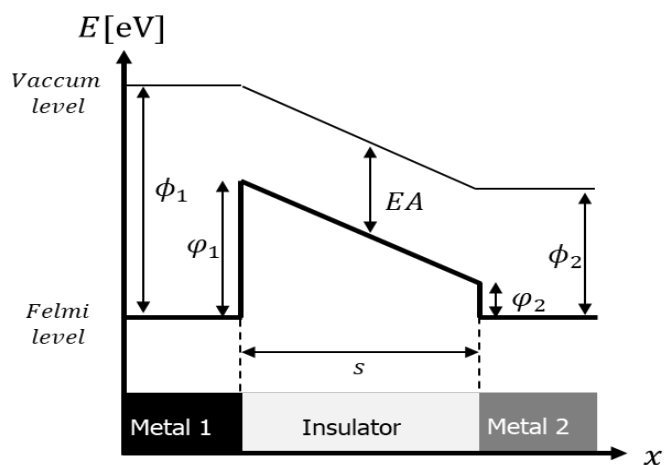
トレードオフ

逆電流の増加による整流性能低下



トンネル障壁形状の制御

MIMトンネルダイオードにおける高効率化の課題



トレードオフ

トンネル層厚さ、障壁高さの減少による高電流密度化

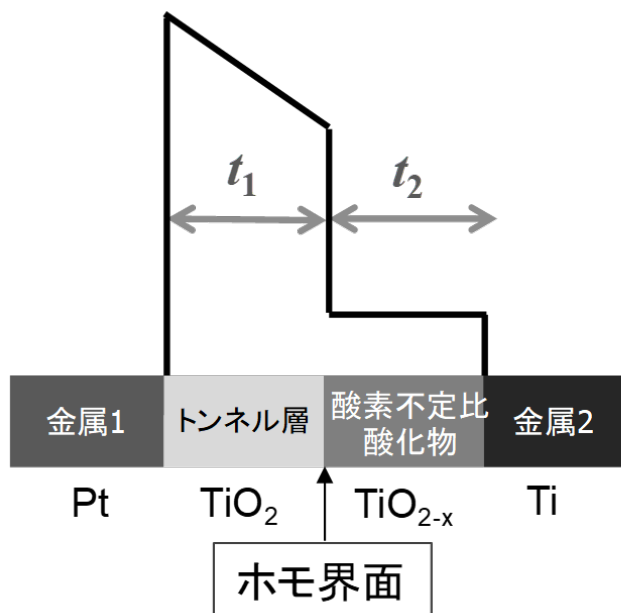


逆電流の増加による整流性能低下

高い整流性能を維持した中での電流密度向上が必要

酸化物誘電体の酸素不定比性制御によるトンネル障壁形状制御

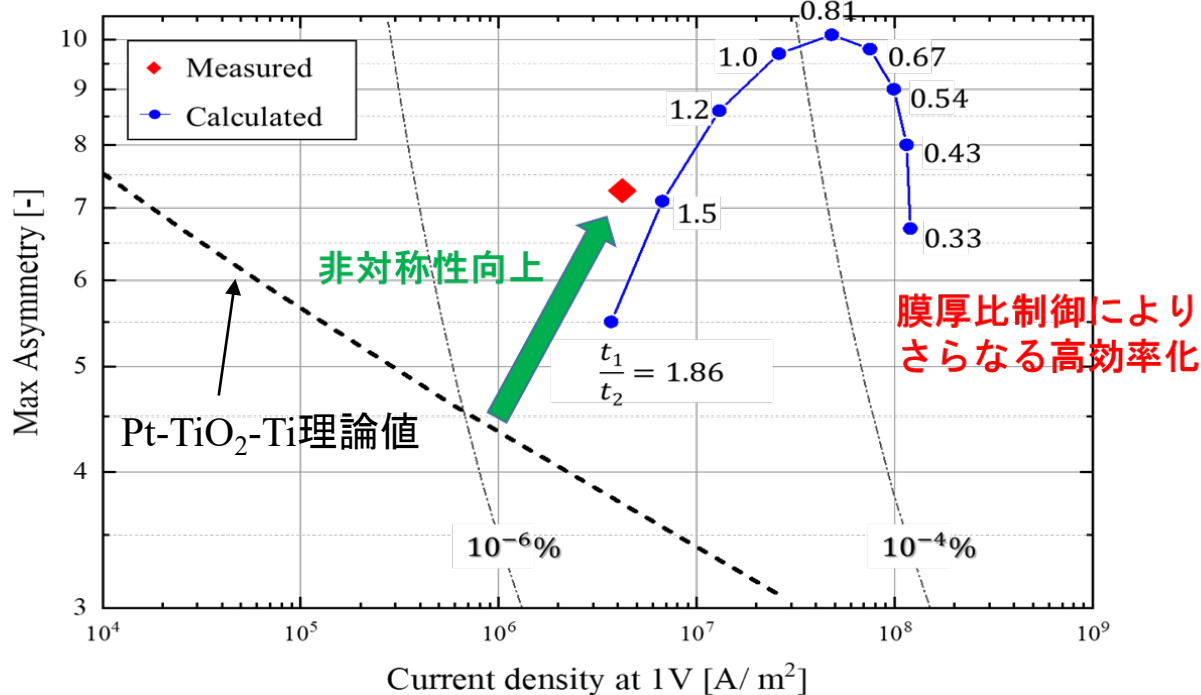
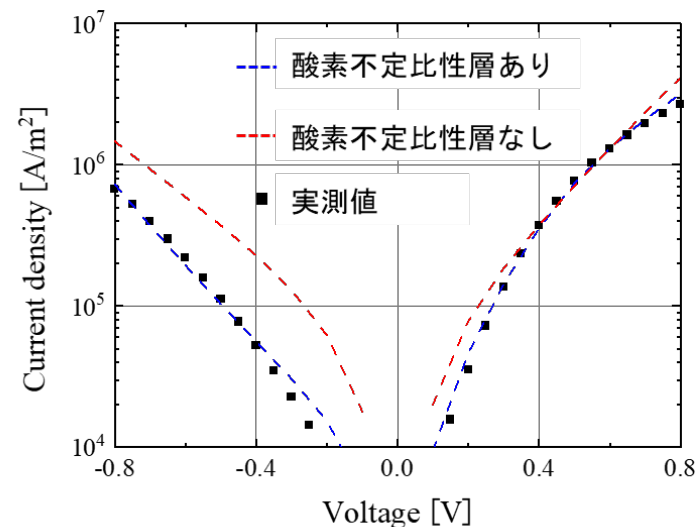
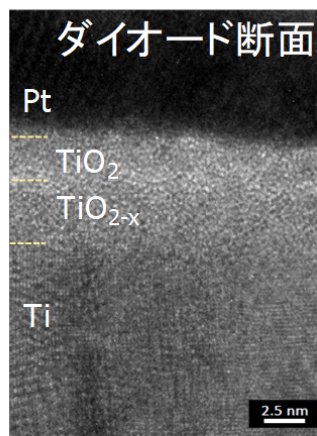
ホモ界面を有するトンネルダイオード構造



トンネル層と電極間への
酸素不定比性酸化物層導入



I - V 曲線非対称性の向上



光波発電効率向上のための因子 —レクテナ構造設計—

設計上の制約

- 熱輻射のコヒーレンスエリア長 \approx 熱放射ピーク波長 \rightarrow 個々のアンテナにダイオードを結合
- 回路RC時定数低減が必要 \rightarrow 静電容量はダイオード面積に比例 小面積化必要(サブ μm 四方)
- トンネル層厚さ=数nm

従来手法

ダイオード小面積化のため個々のアンテナ電場集中部へダイオード形成

アンテナ面内方向における数nmトンネル層形成

\rightarrow 現状技術では信頼性の高い作製方法なし

従来設計思想と異なるレクテナ構造を開発 \rightarrow 世界最高レベル短絡電流密度実現
($2.9\text{A}/\text{m}^2$ @ 532nm レーザー光)

実用化に向けた課題

- 現在、開発中のレクテナ構造における発電効率はまだ低い(発電原理は実証)
- 応答可能波長域の赤外域への拡張必要
(現構造は可視光領域において発電)
- 構造の大面積化

企業への期待

- 製品化のために昇圧回路等の電源制御回路と蓄電デバイス等とのアセンブリが必要
- 素子性能最大化のためのパッケージデザインが必要

電子部品や電装系企業との共同研究を希望

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 光電変換装置
- 出願番号 : 特願2020-003738
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 松浦大輔、清水信、湯上浩雄

問い合わせ先

東北大学

産学連携機構 総合連携推進部

Website <https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/>

TEL 022-795-5274

FAX 022-795-5286

E-mail souren@grp.tohoku.ac.jp