マイクロ固体フォトニクス研究会
第6回 レーザー学会「小型集積レーザー」専門委員会
第6回 科学技術交流財団「ジャイアント・マイクロフォトニクス」研究
(2022/9/21)

$LiNbO_3$の常温接合と異種材料光集積の展開

九州大学
システム情報科学研究院
情報エレクトロニクス部門
多喜川　良

自己紹介

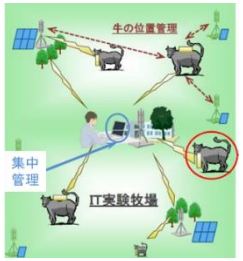
- 2012年3月　東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了
  学位[博士（工学）]取得

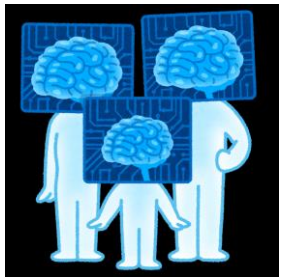
2009年10月～　独・フランフォーファ研究機構IZM研究所　客員研究員

- 2012年4月～2013年3月　産業技術総合研究所　集積マイクロシステム研究センタ
  産総研特別研究員
- 2013年4月～　九州大学　大学院システム情報科学研究院
  情報エレクトロニクス部門　助教
- 2020年4月～　九州大学　大学院システム情報科学研究院
  情報エレクトロニクス部門　准教授　（研究室の立ち上げ）

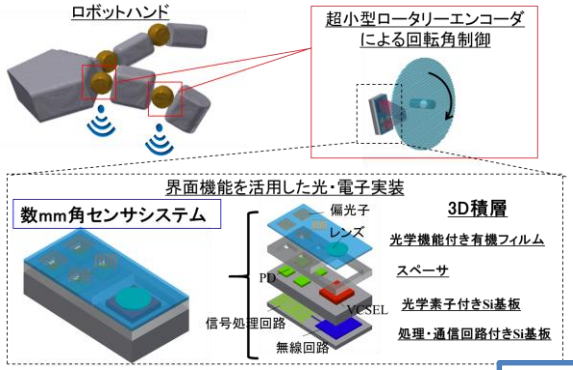
実装工学（多喜川）研究室

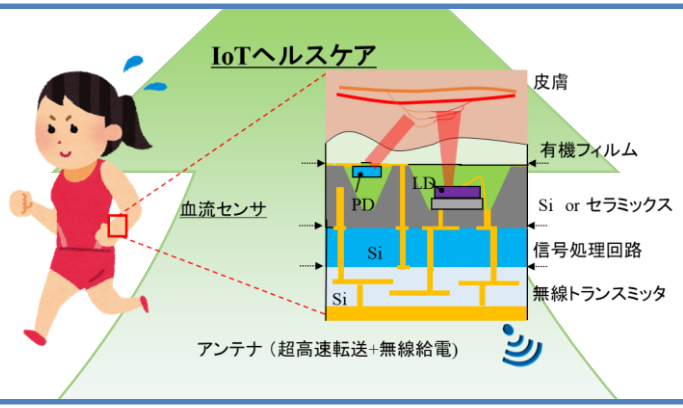
次世代IoT・AI社会を実現する情報デバイス・センサネットワークの具現化へ

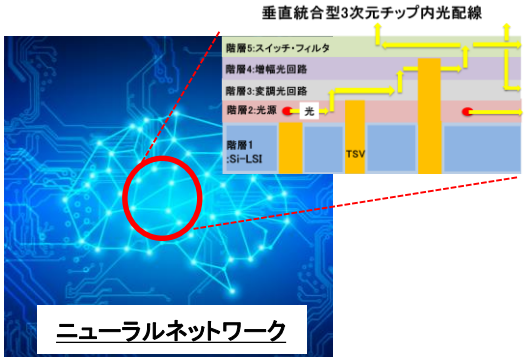




多様なデバイスの3次元積層・異機能統合→超小型・軽量・高性能・低電力化・・・

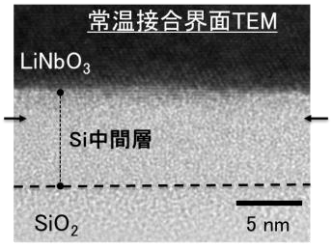






室温の光・電子実装・集積技術へ深化

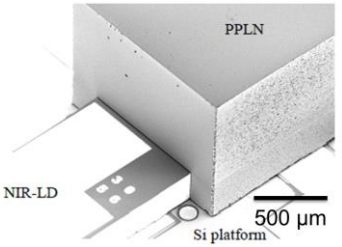
オリジナル基盤技術



・異材の常温接合技術
（界面機能創成等）
・半導体微細加工技術

×

光・電磁波技術



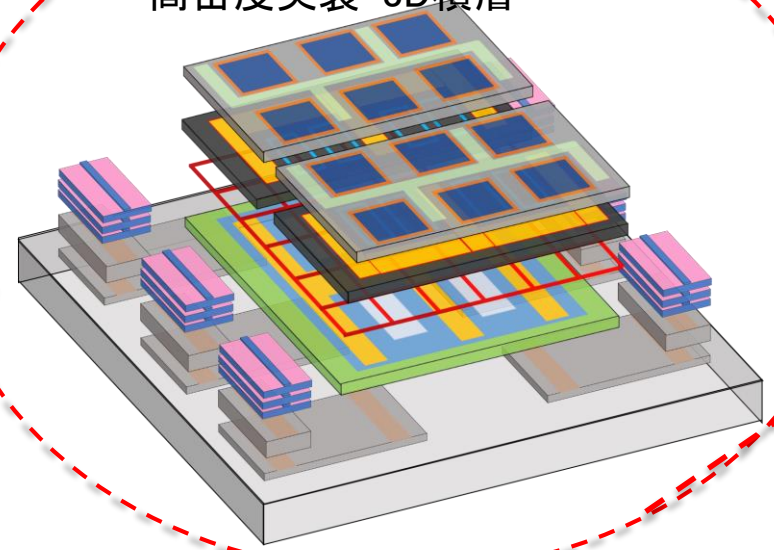
異種材料集積デバイス

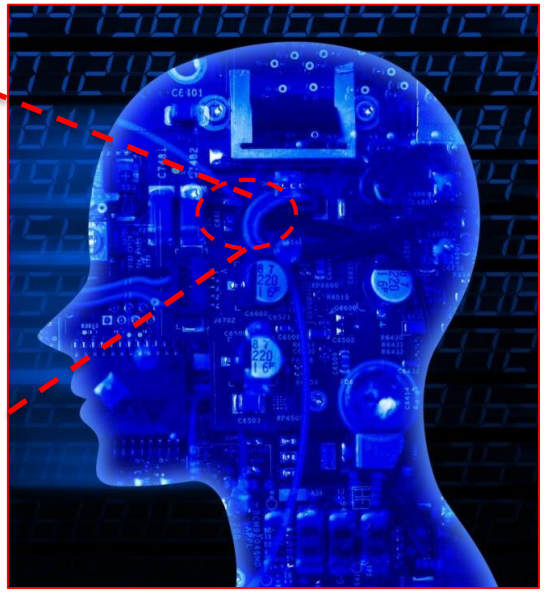
高度情報化社会のキー：　高度IoT、6G通信デバイス、量子コンピュータ、
DX、ニューラルネットワーク・・・・

従来ハードウェアの桁違いな性能向上が必須

異種材料集積・異種機能統合型デバイス

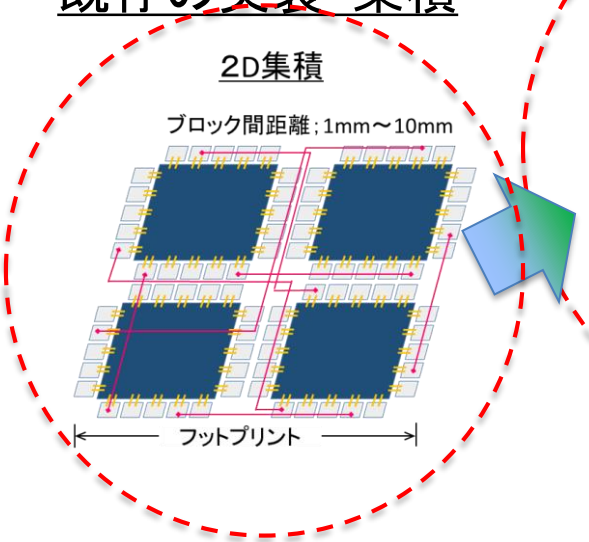
光電子素子の
高密度実装・3D積層





既存の実装・集積

2D集積



$LiNbO_3$の異種材料（ヘテロ）集積

本発表では・・・

・表面活性化接合法

金属を介する常温接合

→　高密度実装・ハイブリッド集積

金属を介さない常温接合

→　高機能素子創成（LNOI等）

研究内容

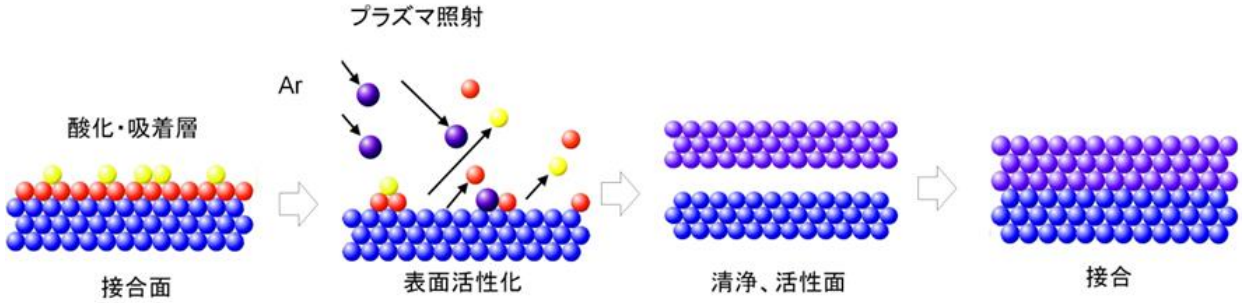
1. **異種材料常温接合技術**
2. 半導体微細加工技術
3. 光・電磁波技術

上記を駆使し、広範な光・電子実装技術の
研究を推進

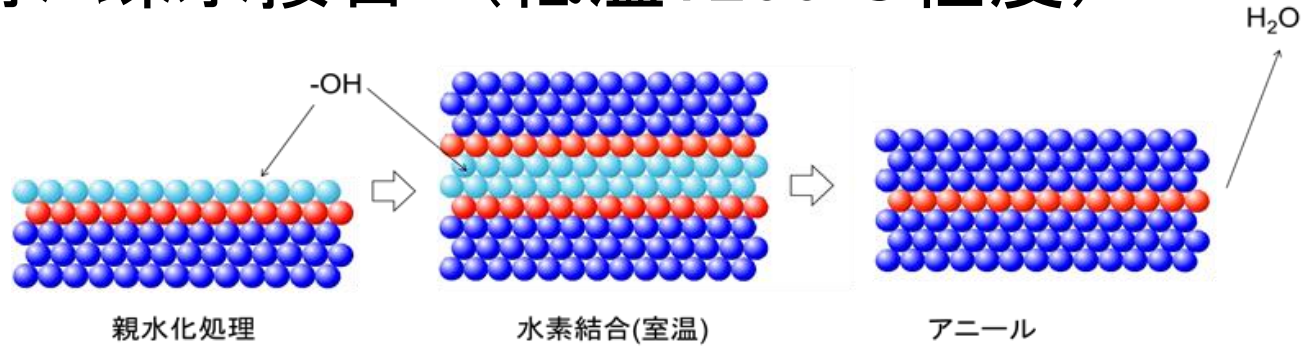
接合界面における機能創成・発現という観点から
異種材料常温接合技術・デバイス応用の研究を推進

異種材料光集積のための接合技術

①表面活性化接合 （室温～100 ℃）（本発表）

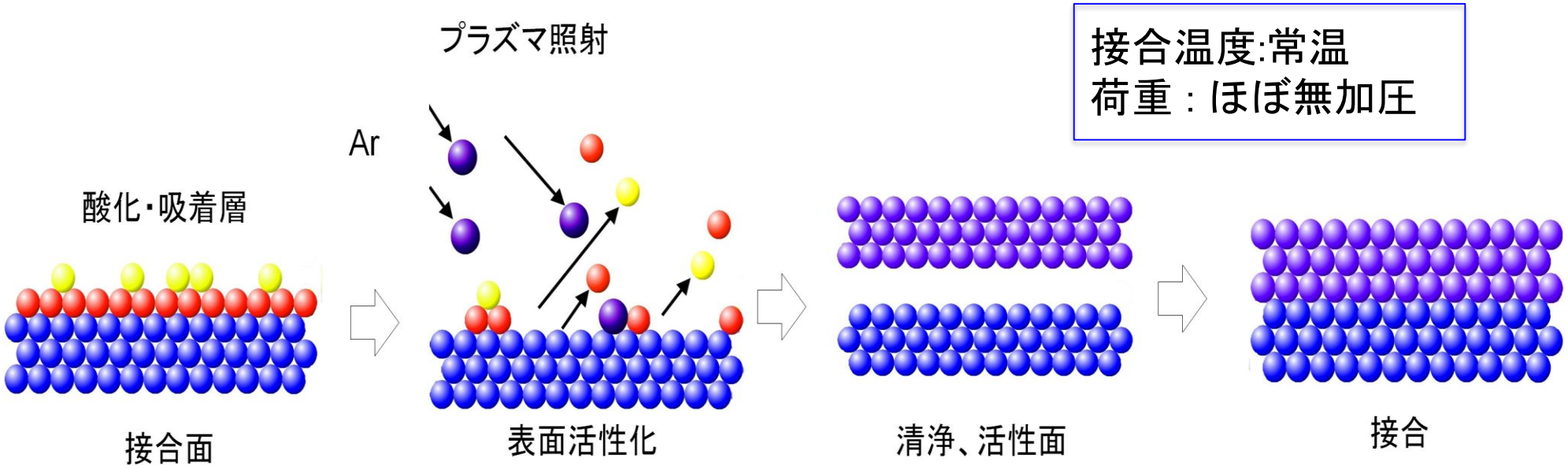


②親水・疎水接合 （低温：200℃程度）



常温接合法

表面活性化接合法 (Surface Activated Bonding： SAB)



Si同士の接合では，条件によって**母材並みの接合強度**が実現

本発表では・・・

・表面活性化接合法

金属（Au電極）を介する常温接合

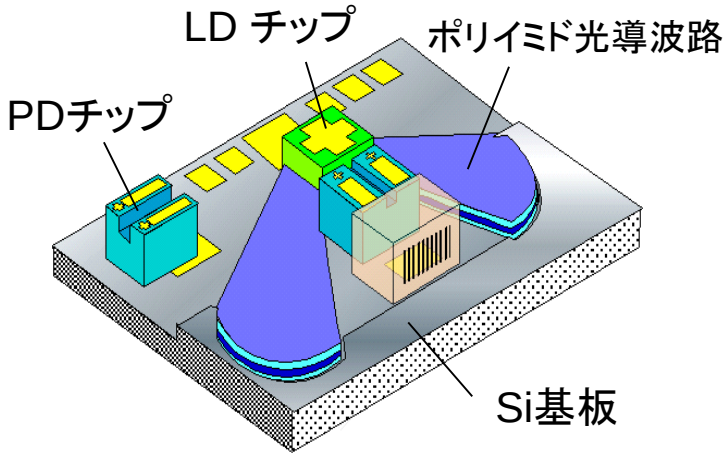
→　高密度実装・ハイブリッド集積

金属を介さない常温接合

→　高機能素子創成（LNOI等）

従来の光素子実装

次世代の小型・高機能デバイス
→ Si上に機能ごとに優れた
異種材光素子を高精度・高密度実装

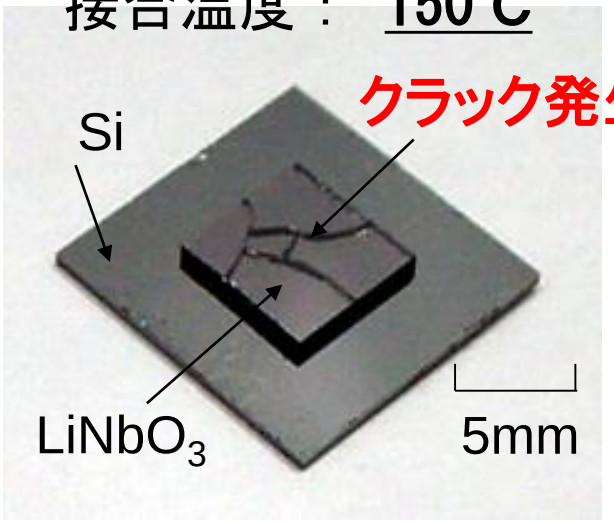


従来の高温プロセス（300℃程度）を要する
AuSnはんだ接合等では限界！

（課題）

① 熱膨張係数差による残留応力
→ 素子劣化・集積材料に制限
② 位置精度劣化（光接続）
③ 耐熱性の低い材料の集積困難

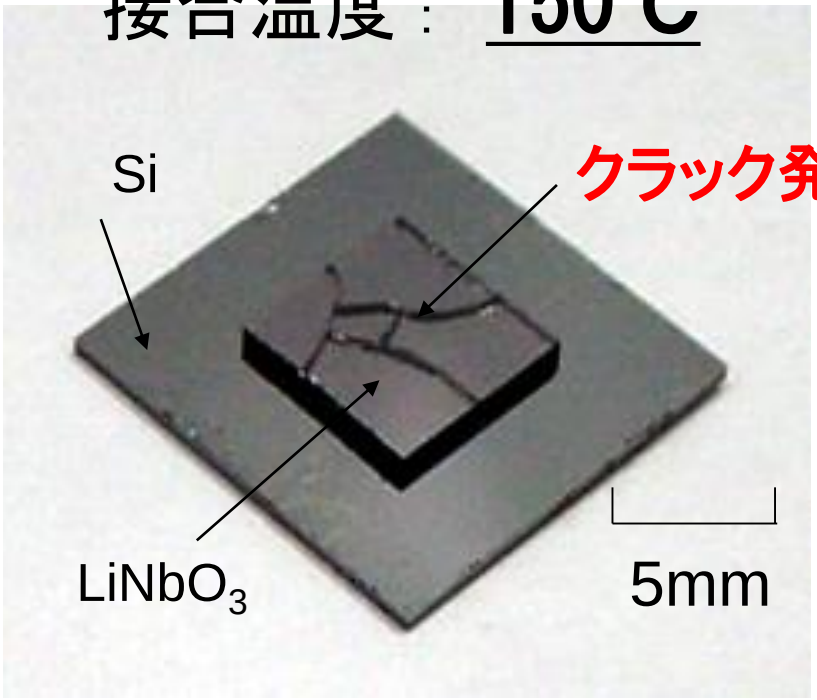
接合温度： 150℃



新しい異種材料光素子の高密度実装・集積技術が必須！

LiNbO3とSi接合の課題

接合温度： 150℃



熱膨張係数

$LiNbO_3$ ：14.4(a,b 軸)-7.5(c 軸) ×10^{-6} /K

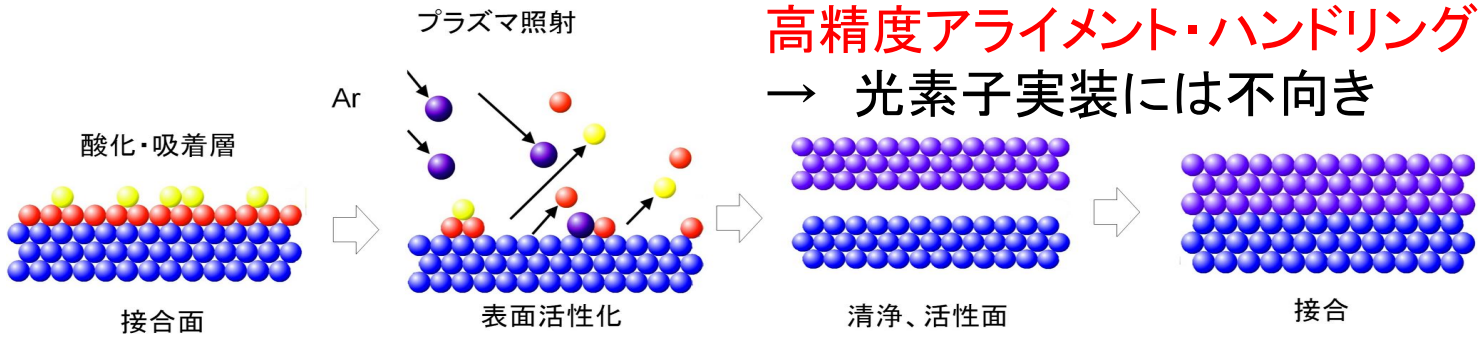
Si ： 2.6×10^{-6} /K

新しい大気中常温接合技術の提案

・従来の超真空中常温接合（表面活性化接合）
Si-Si:平滑な接合面接合（RMS: 0.3 nm ）

H. Takagi et al., JJAP,**37** (1998) 4197-4203.

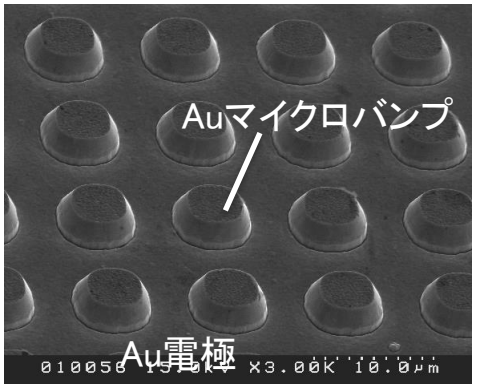
接合温度:常温
荷重：無加圧



高精度アライメント・ハンドリングが困難！！
→ 光素子実装には不向き

・本研究：大気中常温接合
→大気中で酸化しづらく電極利用可能なAu

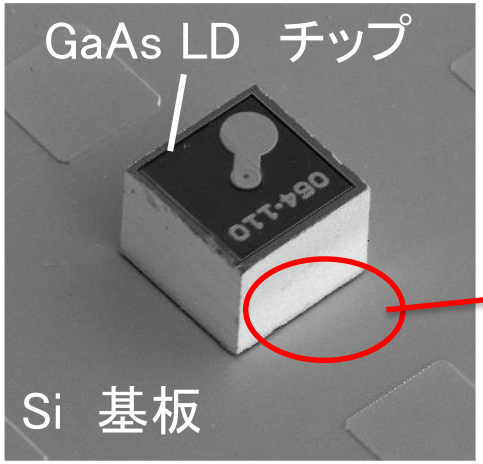
平滑な表面を有し塑性変形しやすい
蒸着膜からなるAuマイクロバンプの提案

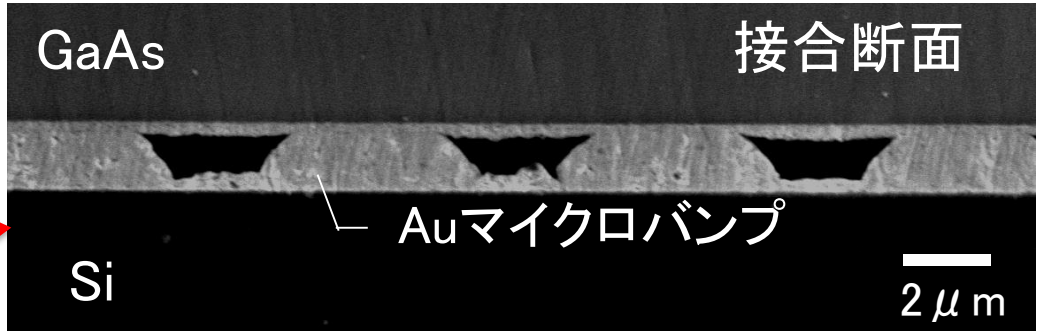


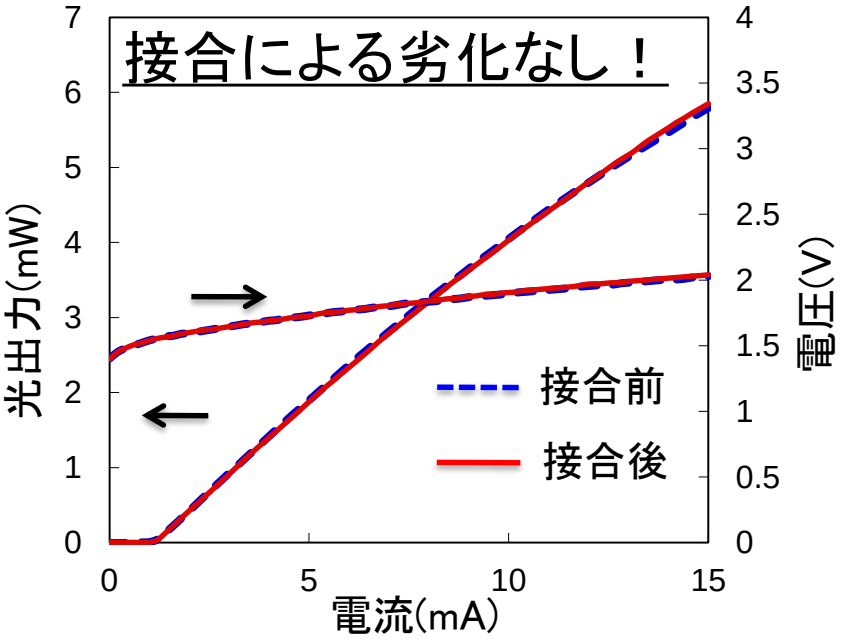
作製手順:
1. EB蒸着(Au薄膜)
2. フォトリソグラフィ
3. イオンミリング

Auマイクロバンプと表面活性化接合法を融合させた新接合法

Si上への半導体レーザ常温実装





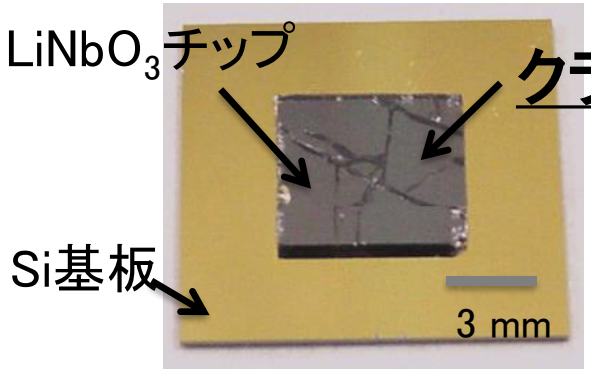


AuSnはんだ接合（330度）
：残留応力により光出力6割ダウン！
→常温接合により回避

Ⅲ－Ⅴ化合物半導体(GaAs, InP)レーザ素子の常温実装
→Si上に高品質光源集積を実証！
R. Takigawa et al., Applied Physics Express, 1, 112201 (2008)

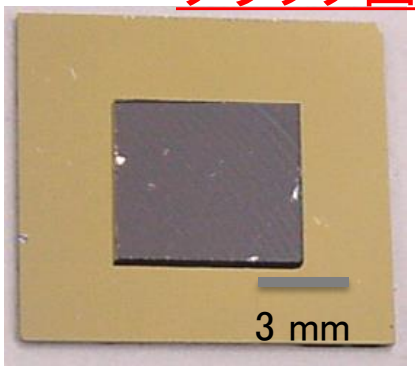
$LiNbO_3$/Si実装

150 ℃以上接合
→従来手法では不可



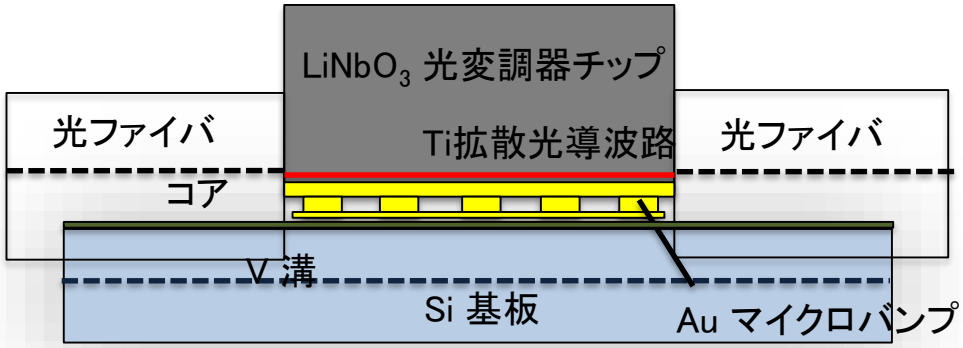
熱膨張係数(×10^{-6} /K)
$LiNbO_3$: 14.4
Si : 2.6

本研究:大気中常温接合
→ クラック回避

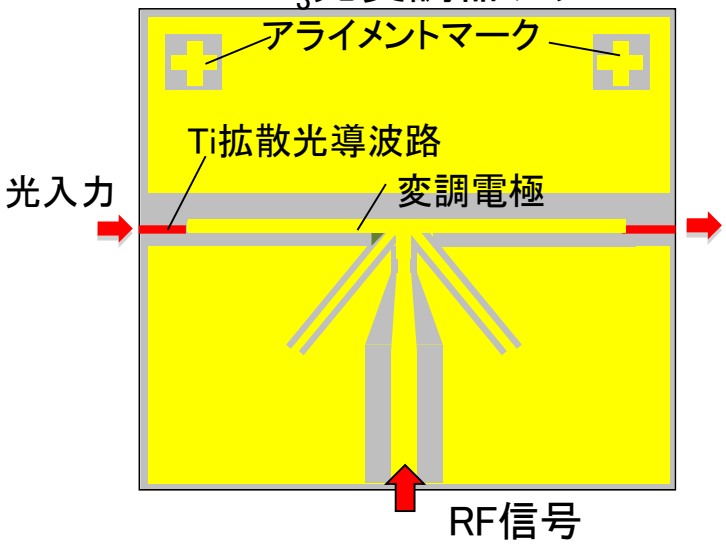


$LiNbO_3$光デバイス実装に挑戦！

Si基板上に高精度接合！
→パッシブアライメント実装による低ロス光接続



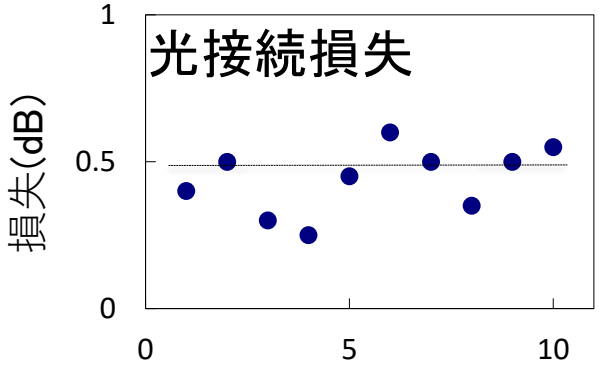
$LiNbO_3$光変調器チップ



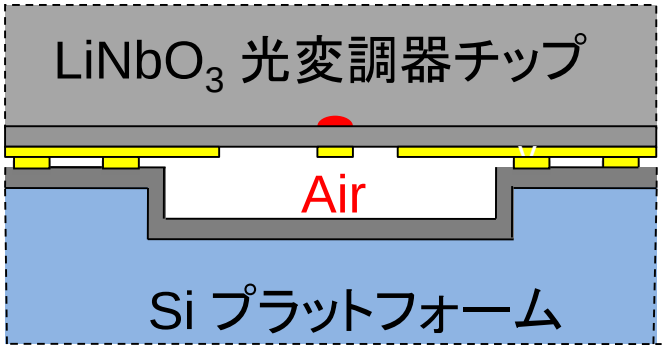
$LiNbO_3$光変調器実装と高効率光接続

常温接合により以下を初めて達成

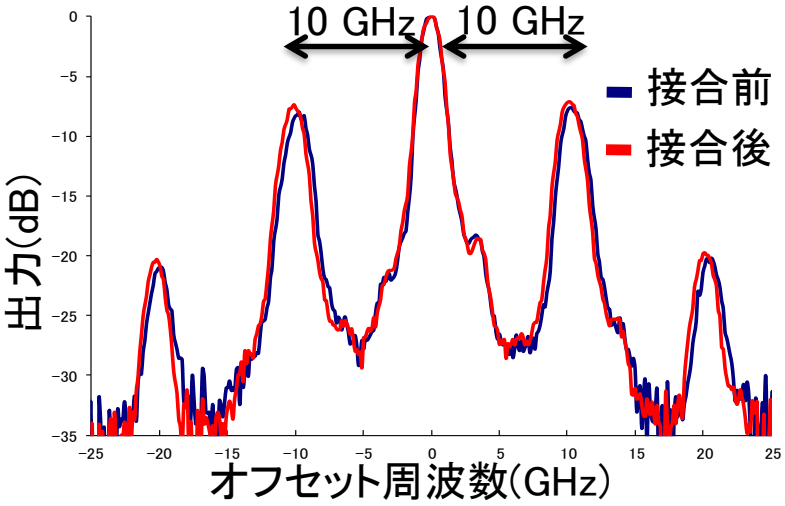
1） Si上へのLN光変調動作実証
2）高精度$LiNbO_3$/Si接合
　3σ: 0.8 μm
3）高効率光接続 （約0.5 dB）
　→LN光導波路と光ファイバ接続



R. Takigawa et al., IEEE JSTQE 17, 652 (2011)



Si基板影響回避のため
Airギャップ構造導入

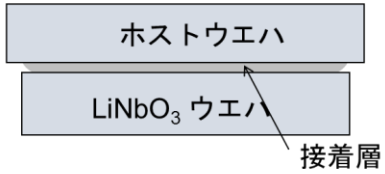


高速変調
動作実証！

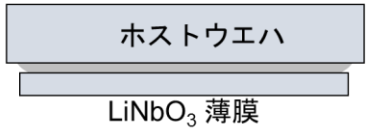
R. Takigawa et al., Optics Express, 22, 15739 (2011)
R. Takigawa et al., Sens. Actuators A, 264, 274 (2017)

薄膜チップ実装

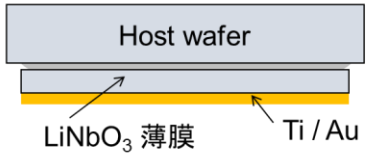
1. 仮接合



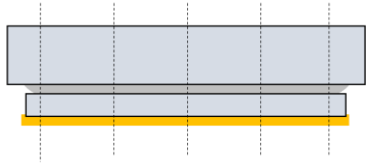
2. $LiNbO_3$ウエハの研磨



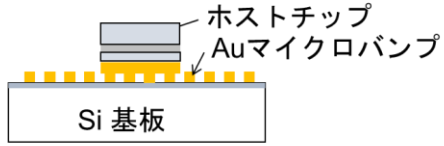
3. Ａｕ蒸着



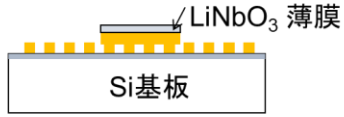
4. ダイシング

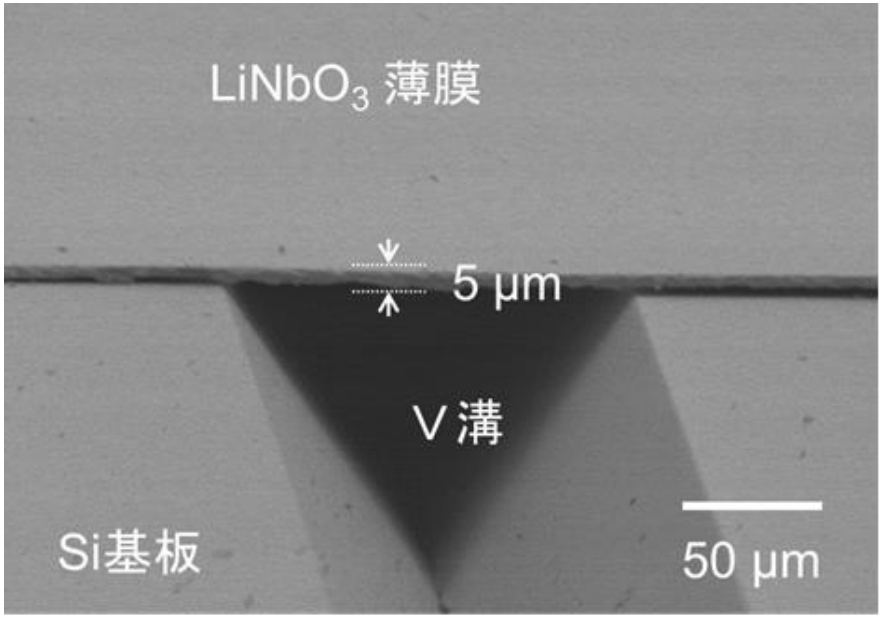


5. 大気中常温接合



6. Removal of host chips





Ryo Takigawa et al., Sensors and Actuators A: Physical, 264, 274 (2017).

本発表では・・・

・表面活性化接合法

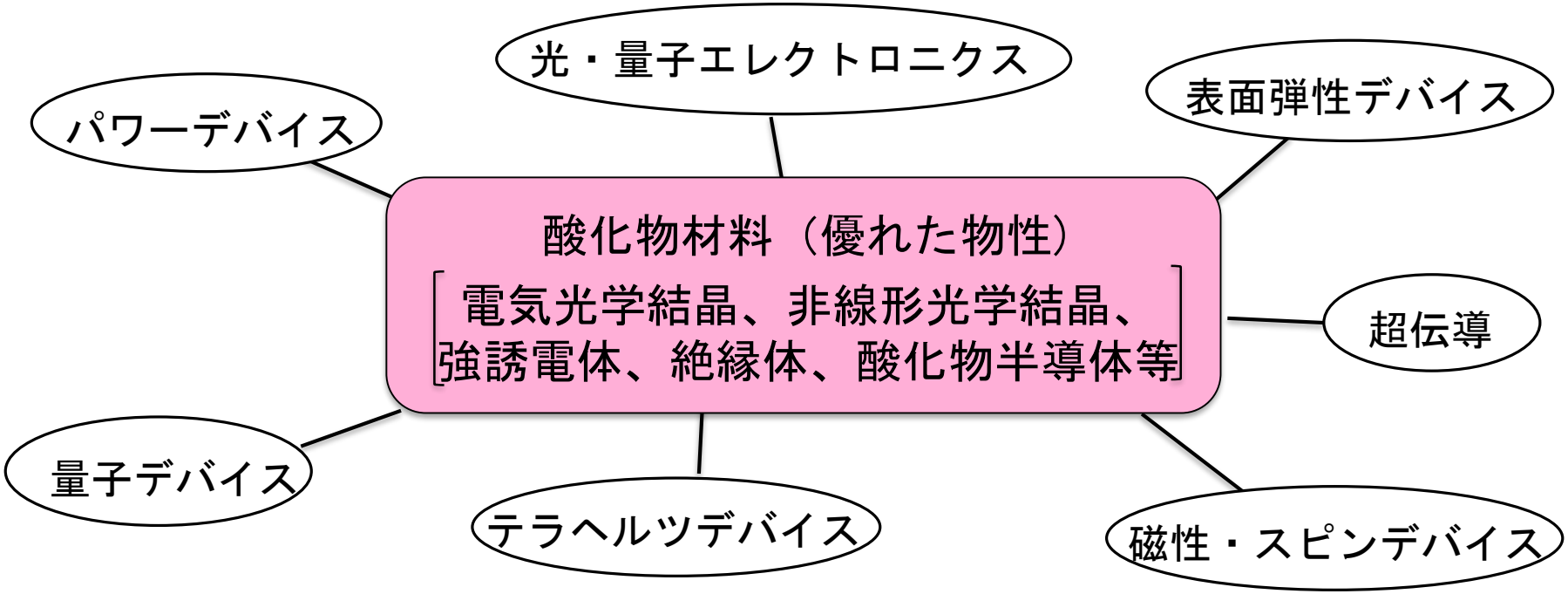
金属を介する常温接合

→　高密度実装・ハイブリッド集積

金属を介さない常温接合

→　高機能素子創成（LNOI等）

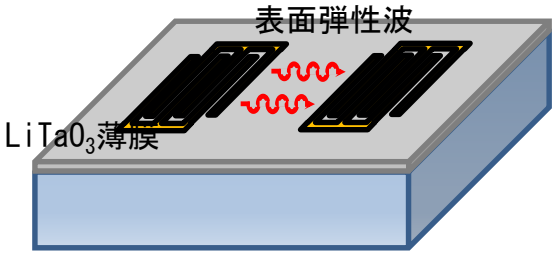
酸化物材料の広がる世界



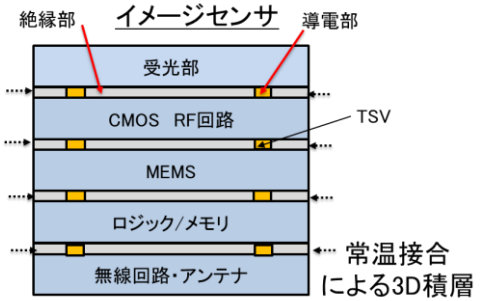
課題：酸化物系材料の常温直接接合が困難

光デバイス（光変調器）

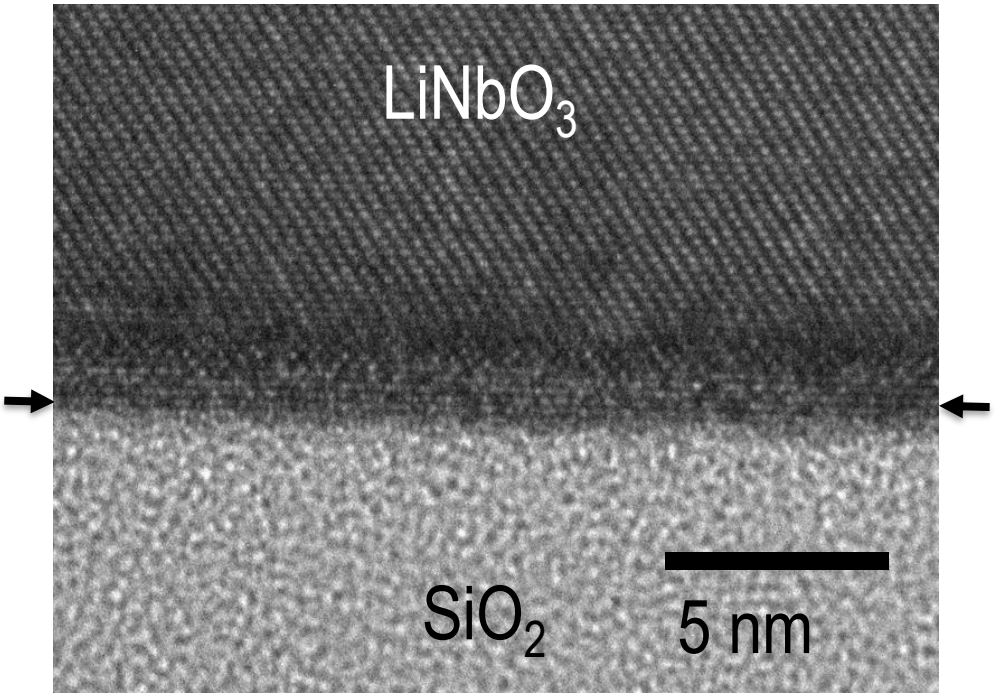
RFデバイス（SAW）



3D積層デバイス



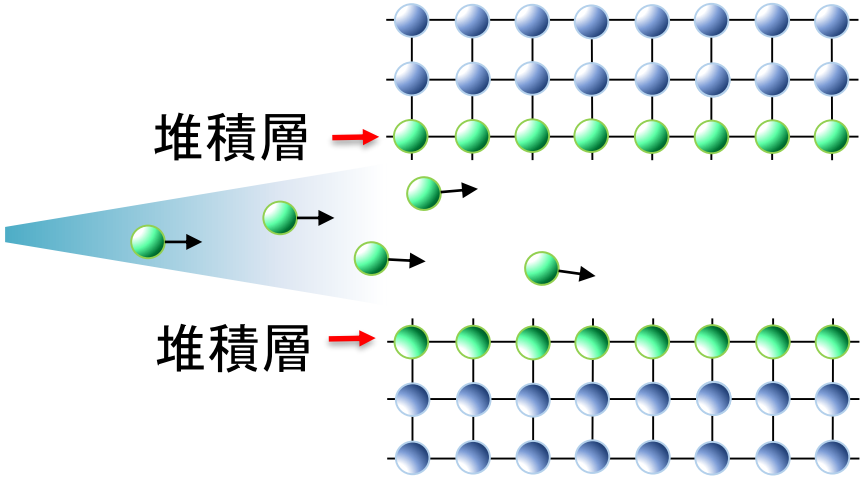
$LiNbO_3/SiO_2$の常温接合界面



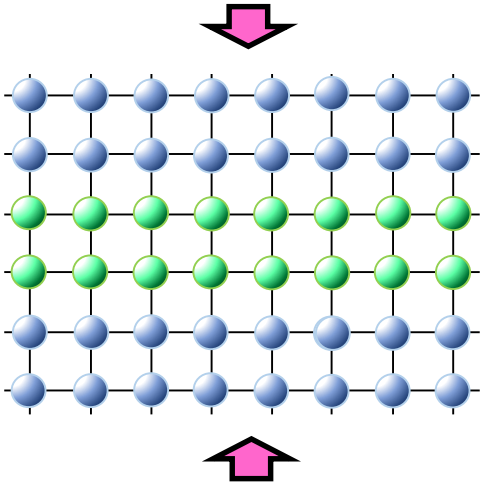
界面にボイド等は見られないが
接合強度は弱い(接合エネルギー:0.3~0.4 J/m^2)

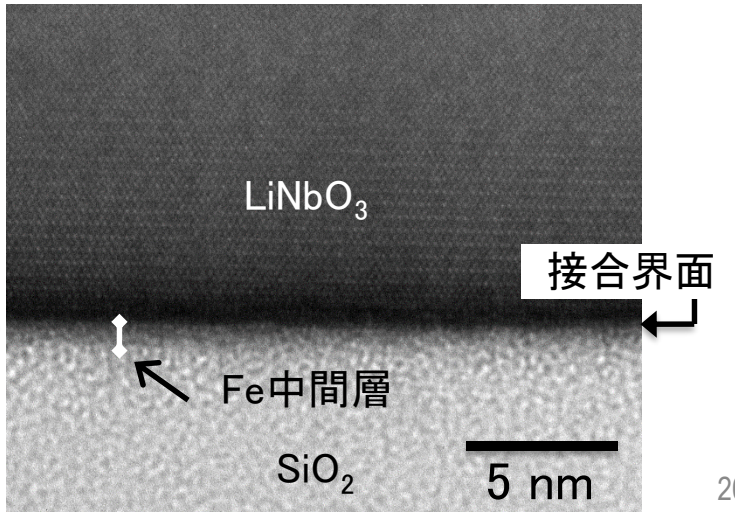
金属活性原子層を介した常温接合

1．表面活性化+中間層金属堆積



2．接触（常温）



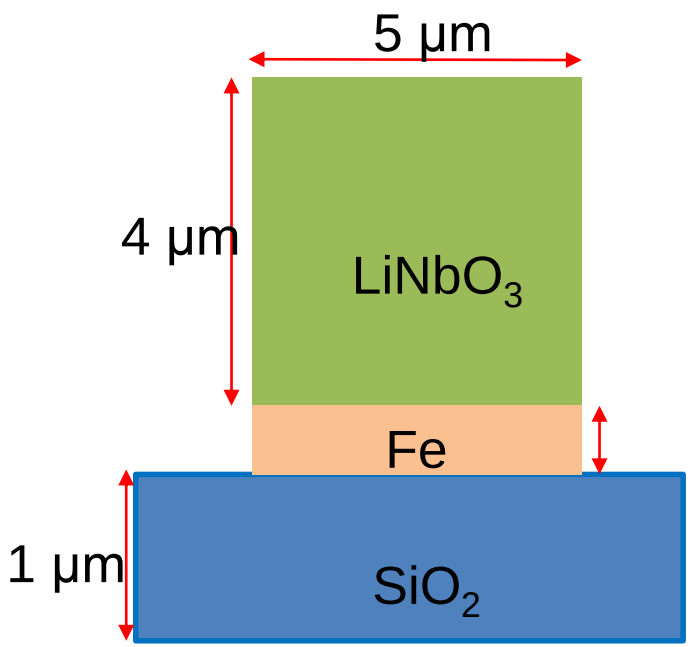


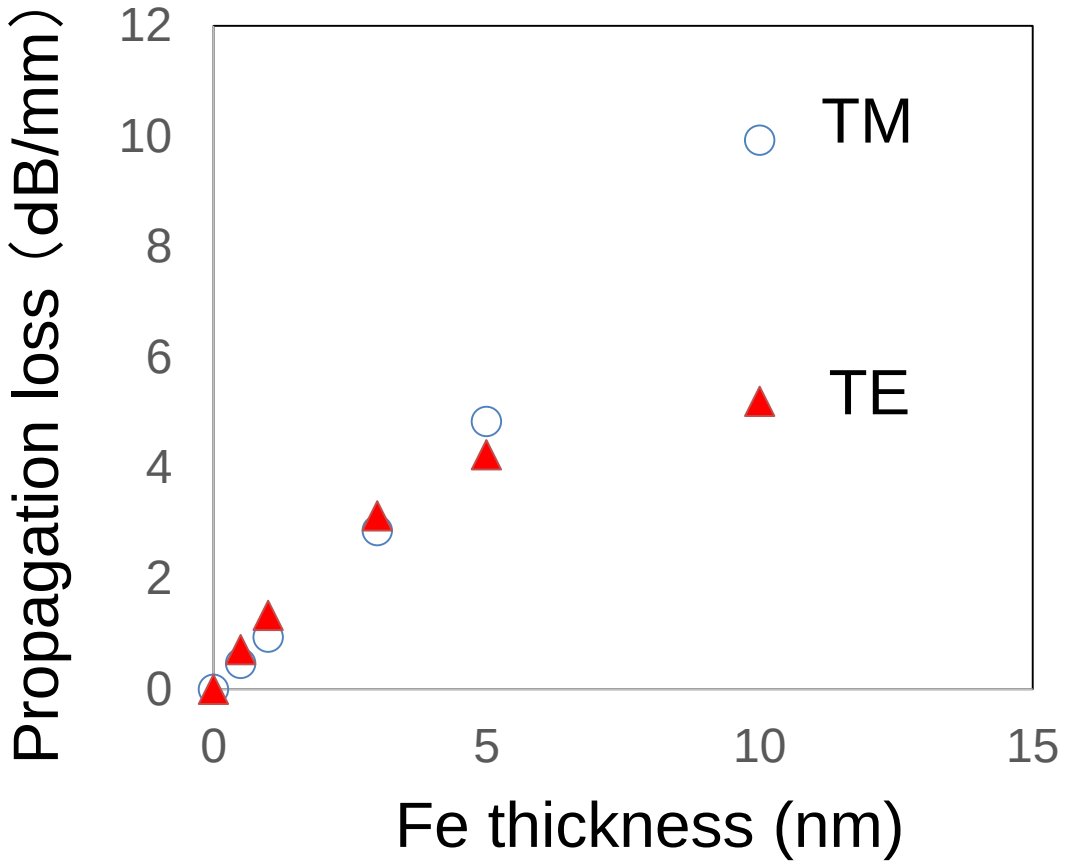
ポイント：接合性の高い金属ナノ中間層
を介した常温接合法
→　疑似的なLNとSiO2直接接合！

R. Takigawa et al., JJAP, 57, 06HJ12 (2018)

金属中間層が及ぼす影響（光導波路）

光導波路構造

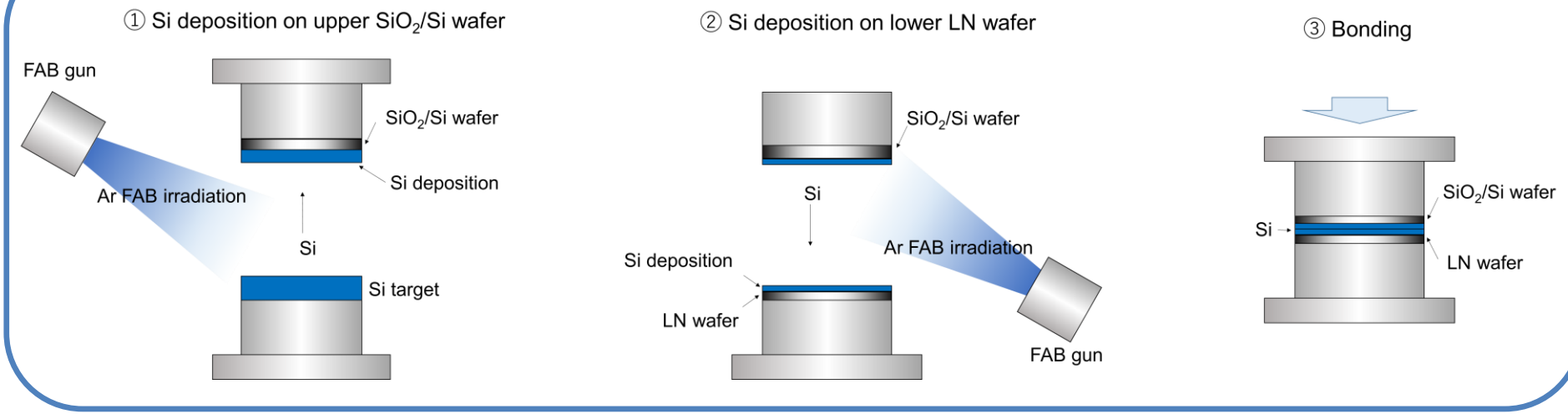


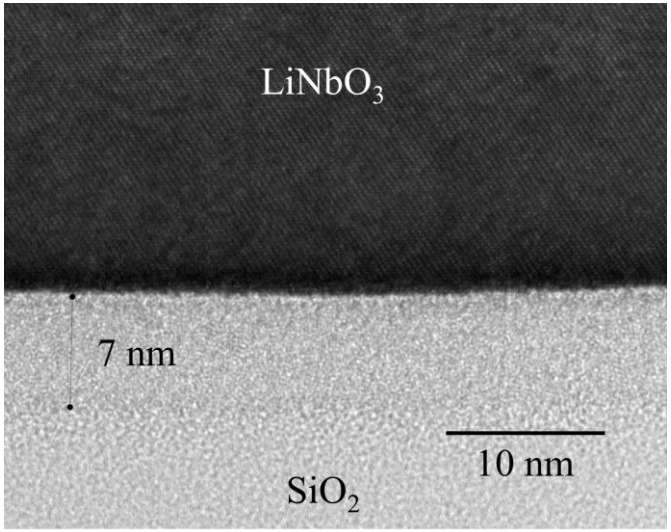


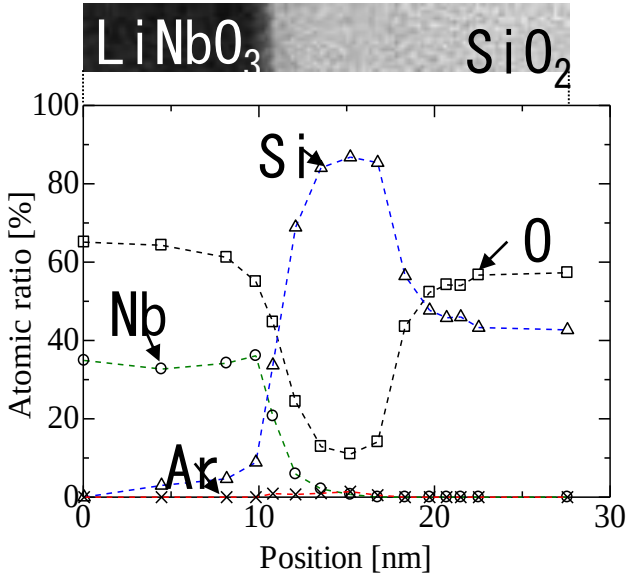
光吸収大なため光導波路応用には不適！

R. Takigawa et al., JJAP, 58, SJJE06 (2019)

透明ナノ中間層による常温接合



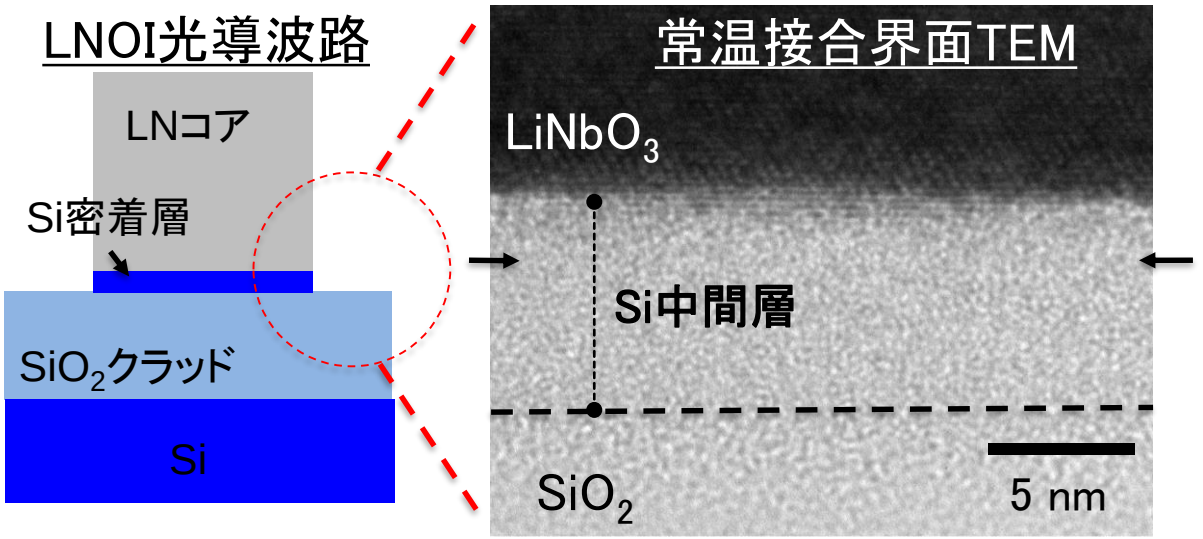


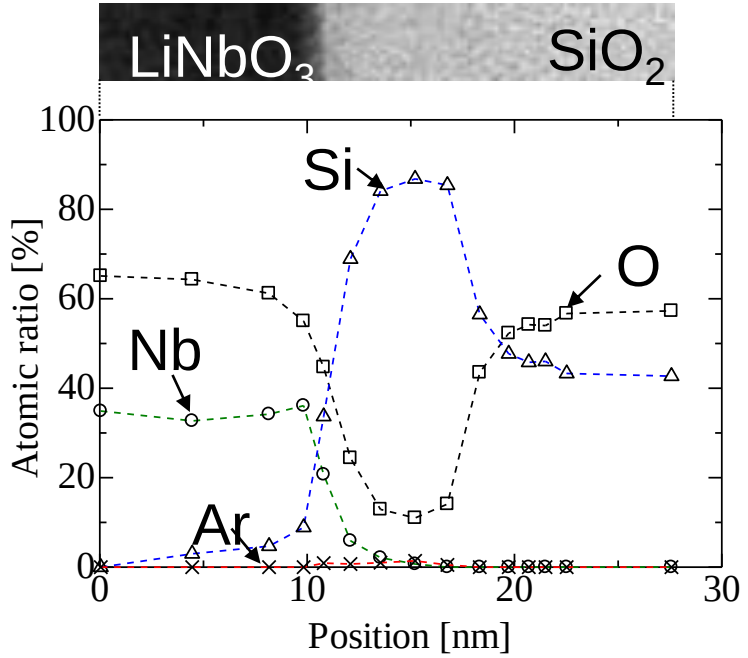


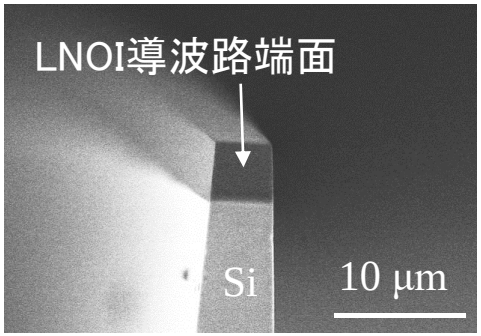
R. Takigawa et al., Optics Express, 26, 24413 (2018)

Si(透明)中間層の導入と光導波路応用

Siナノ中間層で常温接合を実証





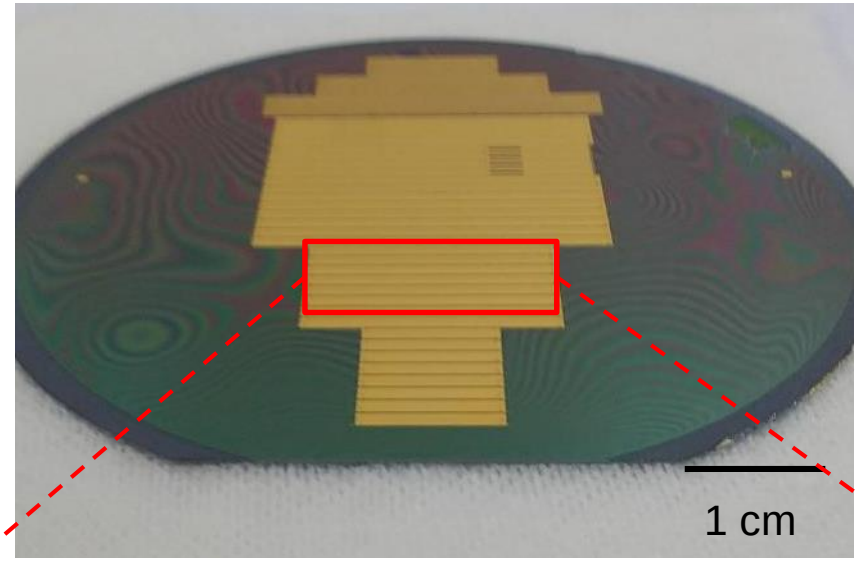


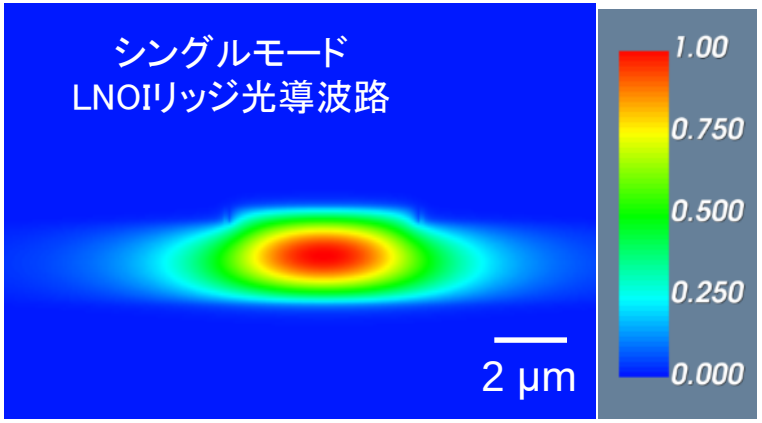
低損失LNOI光導波路をSi上で実現！
（金属接合：15 dB/cm→Si接合: 約2 dB/cm）

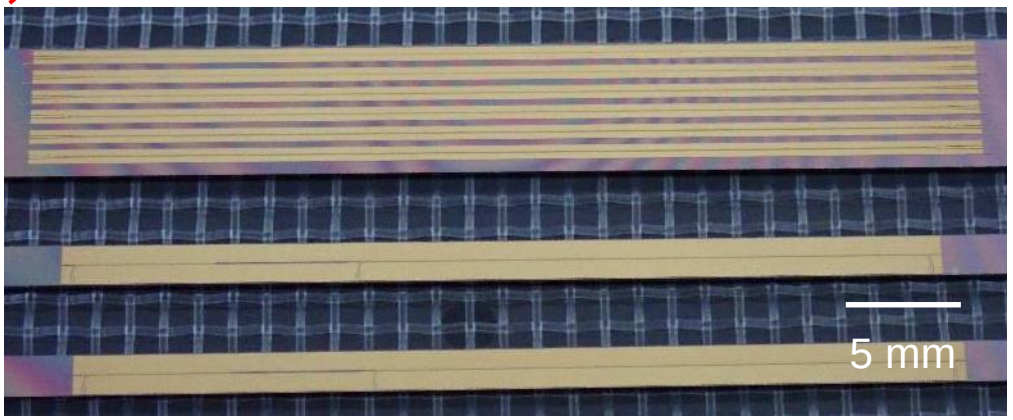
R. Takigawa et al., Optics Express, 26, 24413 (2018)
R. Takigawa et al., JJAP, 59, SBBD03 (2020)　など

光通信波長で透明な極薄Siにより低損失なLNOI導波路実現

常温ウェハ接合によるSi上LNOI光変調器







駆動電圧(Vπ): 約1 V

まとめ

1．金属を介した表面活性化接合

→Si基板上に$LiNbO_3$光変調器チップのヘテロ集積
（パッシブアライメントによる超高効光接続）

2．金属を介さない表面活性化接合

→ ナノSi中間層を利用した常温ウェハ接合法の開発
Si上LNOI光変調器実証

本常温接合によるはんだ接合から脱却と集積不可とされた異種材料光素子（$LiNbO_3$等）の高密度・高精度実装の道が拓かれた！

→広範な光・電子素子、有機材との一体化、異機能統合への展開