

プラズモニックナノギャップを用いた相変化光変調素子

Phase-change optical modulator using plasmonic nanogaps

(M2)加藤 颯¹, 牧野 孝太郎², 久保 敦¹
¹筑波大学 数理物質, ²産業技術総合研究所

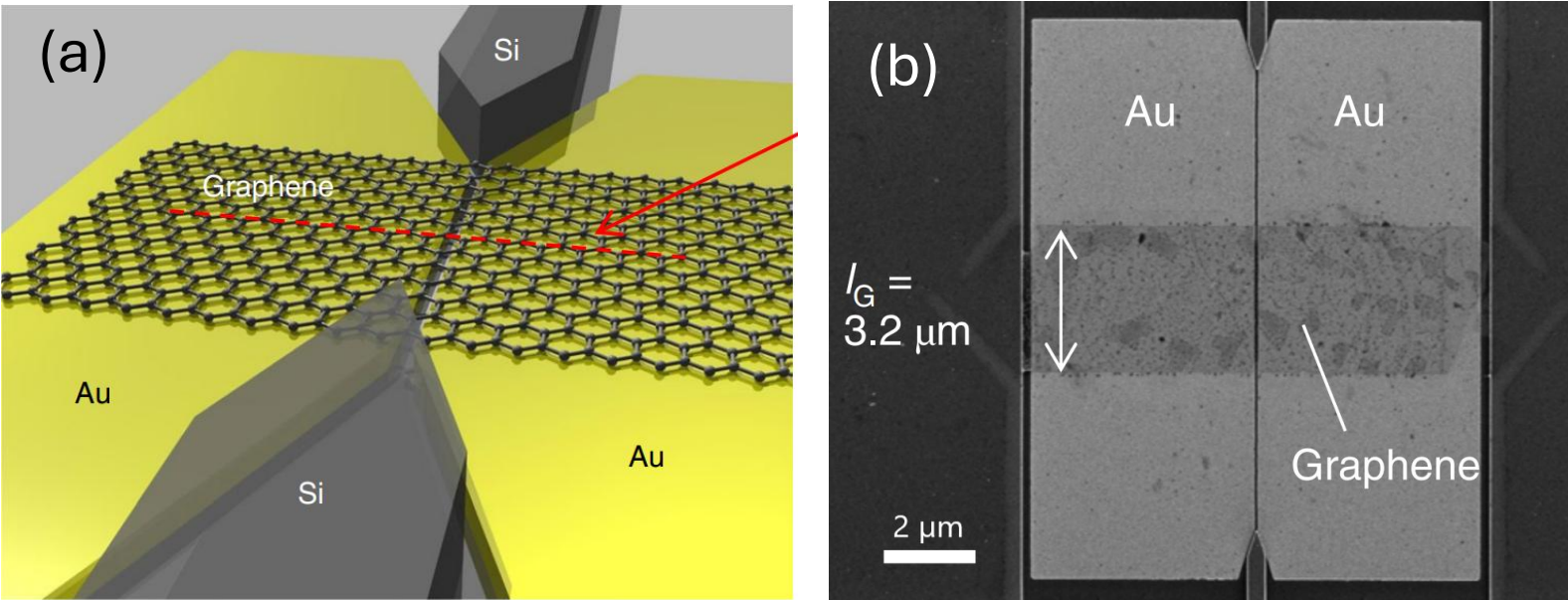
背景

Ge₂Sb₂Te₅

Ge₂Sb₂Te₅(GST)は相変化材料(PCM)の一種で、低屈折率・低消費係数・高抵抗なアモルファス相と、高屈折率・高消費係数・低抵抗の結晶相を有しており、加熱や電気パルス印加、レーザー光照射により相変化を引き起こすことができる。結晶構造が空孔を持った立方晶構造となっており、この空孔の存在により安定した相変化が可能のためBlu-ray等の光ディスクとして広く利用されている[1]。デバイスの高集積化・省エネ化のためにプラズモニックデバイスへの実装も行われている。

プラズモニック変調素子

金属-絶縁体-金属(MIM)導波路とグラフェンを用いたプラズモニック変調器において1スイッチあたりフェムトジュール台の超高速スイッチが報告され、光通信や光集積回路などへの応用が期待される[2,3]。また、この構造を基にPCMの組み込みを行った不揮発性プラズモニック変調素子が複数提案されている。

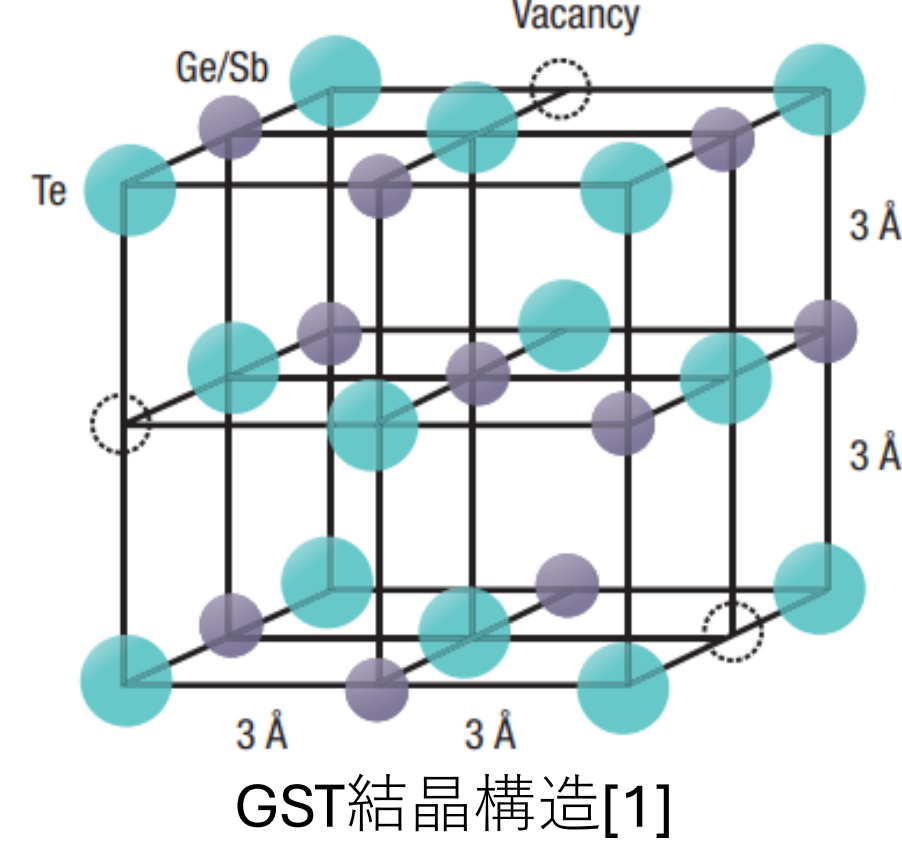


MIM型プラズモニック変調器(a)概形、(b)SEM像[2]

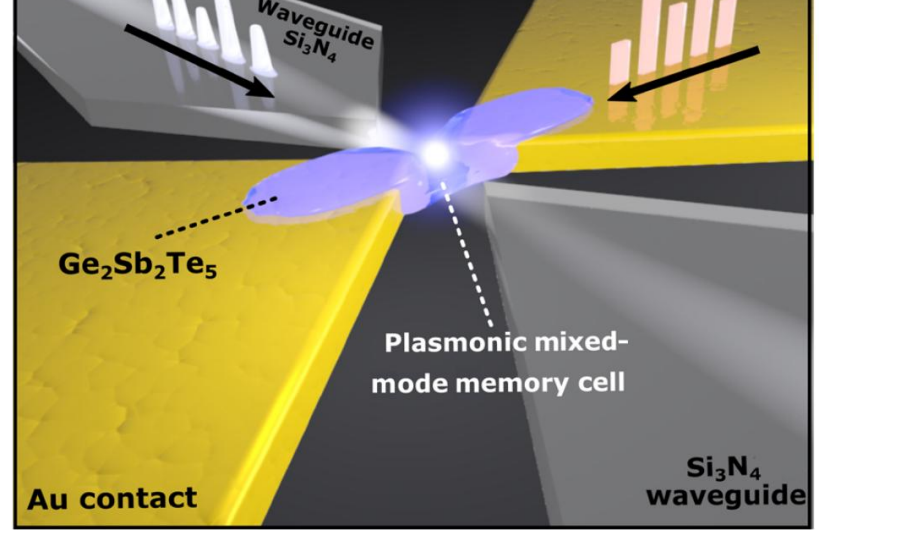
目的

MIM導波路とSi導波路から構成されるプラズモニックコンバーターと、GSTを組み合わせた電氣的に制御可能なプラズモニック変調素子の設計と開発を目的とし、Siフォトニクスとの適合性、情報通信波長帯1.55 μmにおける高い消光比の実現を試みる。

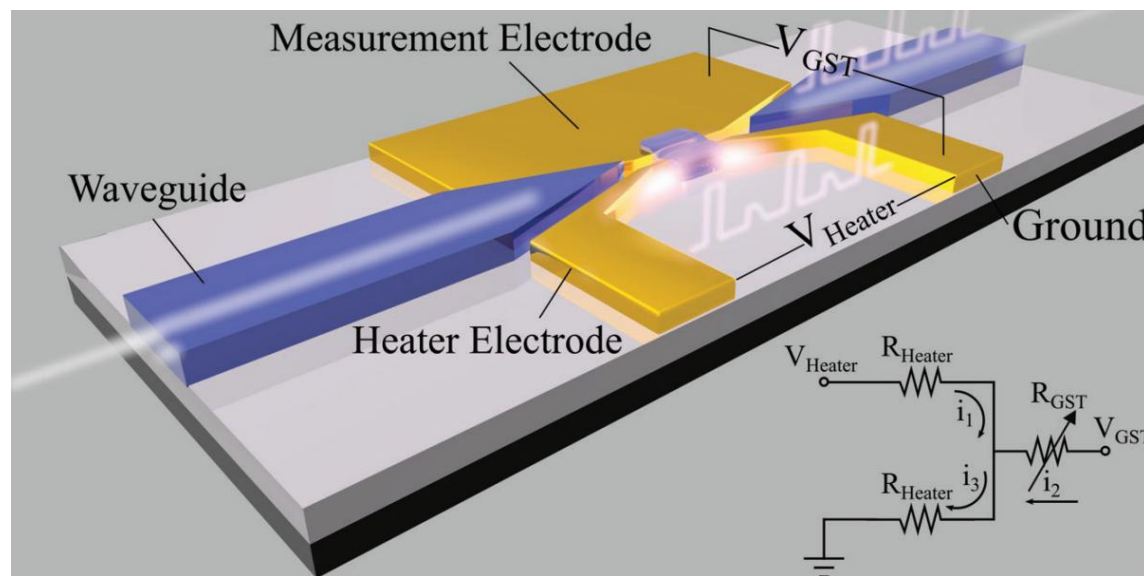
- [1] M. Wuttig, N. Yamada, Nat. Materials 6, 824 (2007) [4] N. Farmakidis, N. Youngblood, et al., Sci. Adv. 5, eaaw2687 (2019)
[2] M. Ono, M. Hata, et al., Nat. Photonics 589, 52 (2020) [5] N. Farmakidis, N. Youngblood, et al., Adv. Sci. 9, 2200383 (2022)
[3] M. Ono, H. Taniyama, et al., Optica. 3, 999 (2016)



GST結晶構造[1]



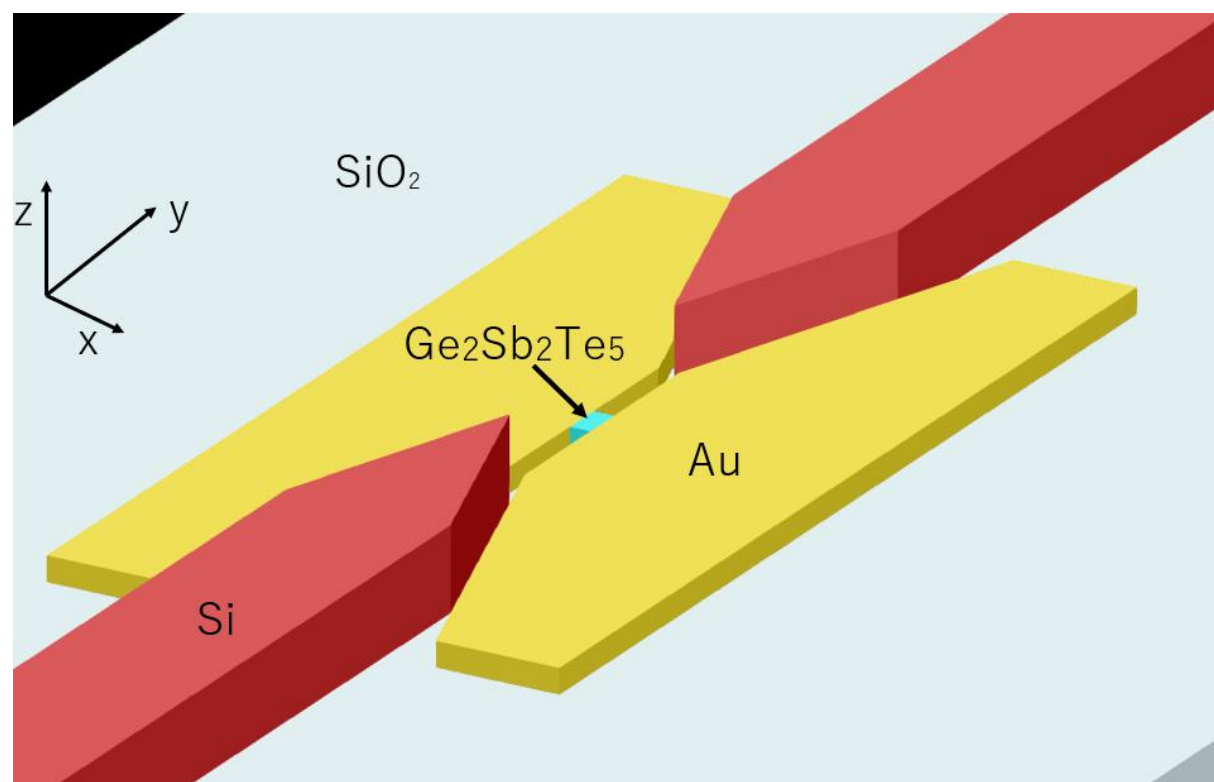
不揮発性プラズモニック変調素子[4]
GSTサイズ 50×50×75 (nm³)



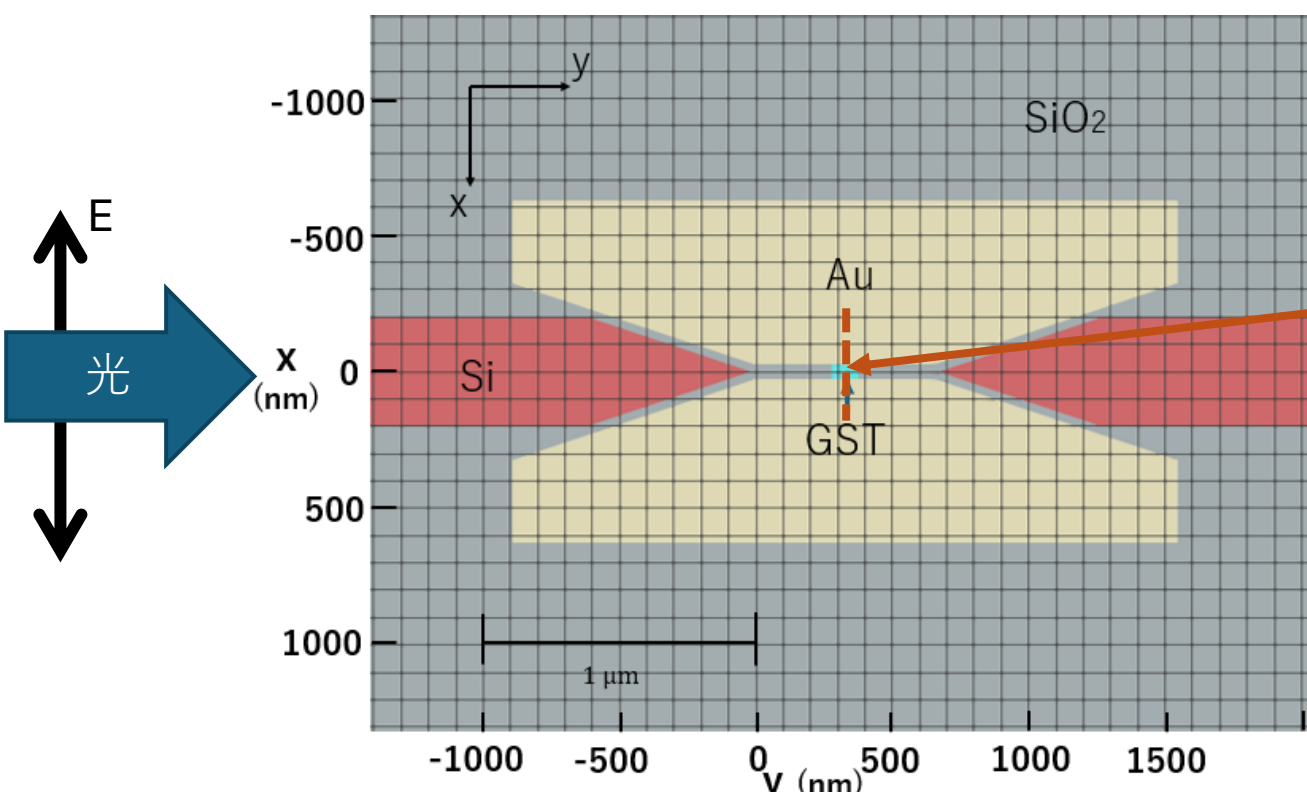
不揮発性プラズモニック変調素子[5]
GSTサイズ 200×70×75 (nm³)

FDTDシミュレーション

- 設定条件(n, k はそれぞれ波長1.55 μm付近での屈折率、消費係数)
 - Au^[6] : $n=0.52, k=10.74$
 - Ti^[7] : $n=4.04, k=3.82$
 - Si^[7] : $n=3.48, k=0$
 - SiO₂^[7] : $n=1.44, k=0$
 - GST : 実測値(Tauc-Lorentzモデル)
 - アモルファス相 : $n=3.97, k=0.49$
 - 結晶相 : $n=5.89, k=1.59$
- 境界条件 : 全方位完全吸収層(PML)
- 使用ソフト : Ansys Lumerical FDTD (Ansys社)
- 入射光
 - 中心波長1.54 μm、パルス幅5 fs
 - TE偏光(図中x軸方向に振動する電場を有する)
 - x = 0, y = -9.5 μm位置のSi導波路中心に光源を設置
- 計算時間 : 500 fs

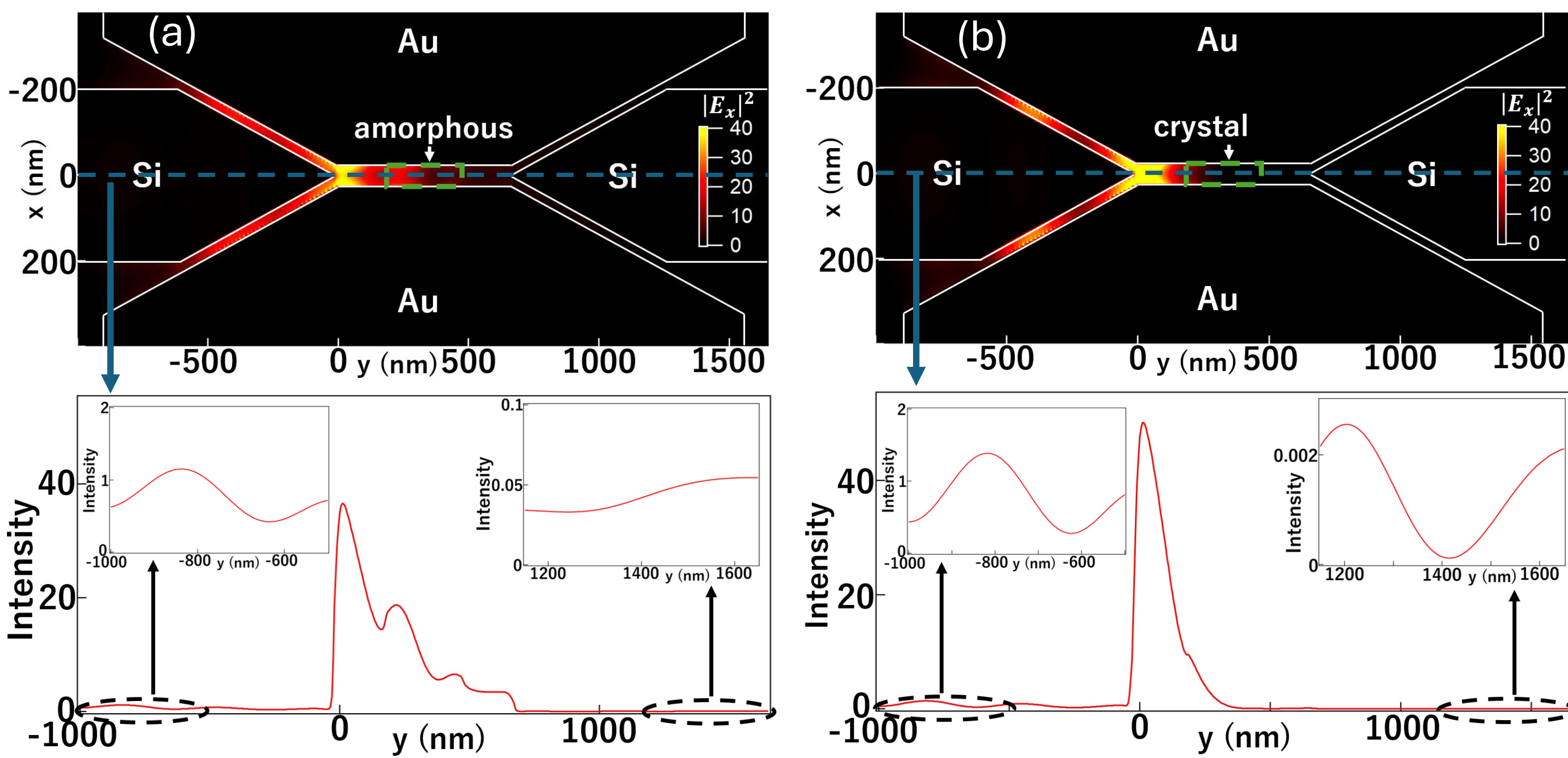


シミュレーションデバイスの概形



- 構造条件
 - Si導波路 : 厚さ200 nm、幅400 nm、600 nmのテーパ構造
 - Au板 : 厚さ60 nm、Au板間隔50 nm、導波路長650 nm
 - GST : 長さ290 nm、幅50 nm、厚さ25 nm

- GSTによる伝搬変調

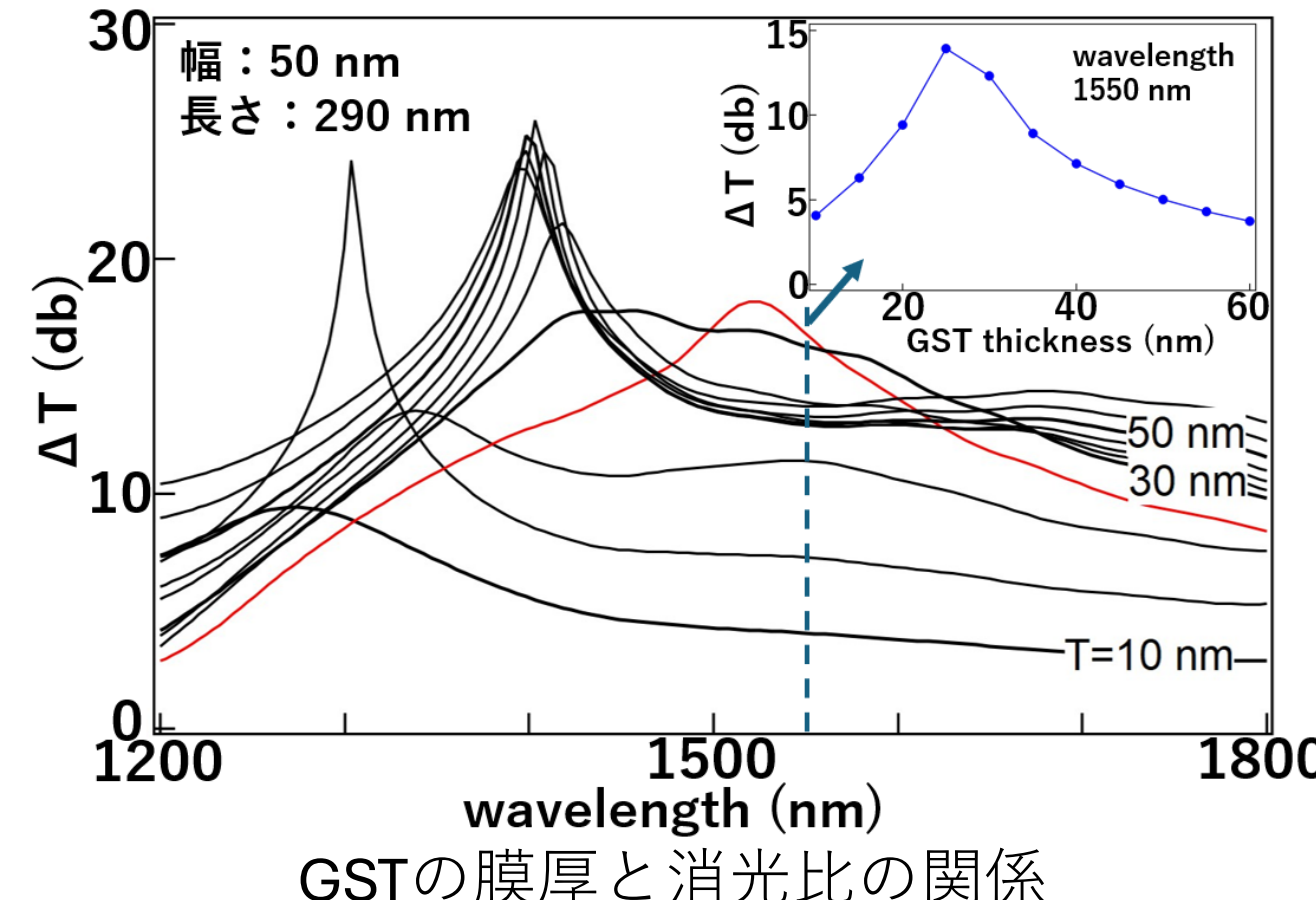


MIM構造周辺での電場強度分布 (a)アモルファス相 (b)結晶相

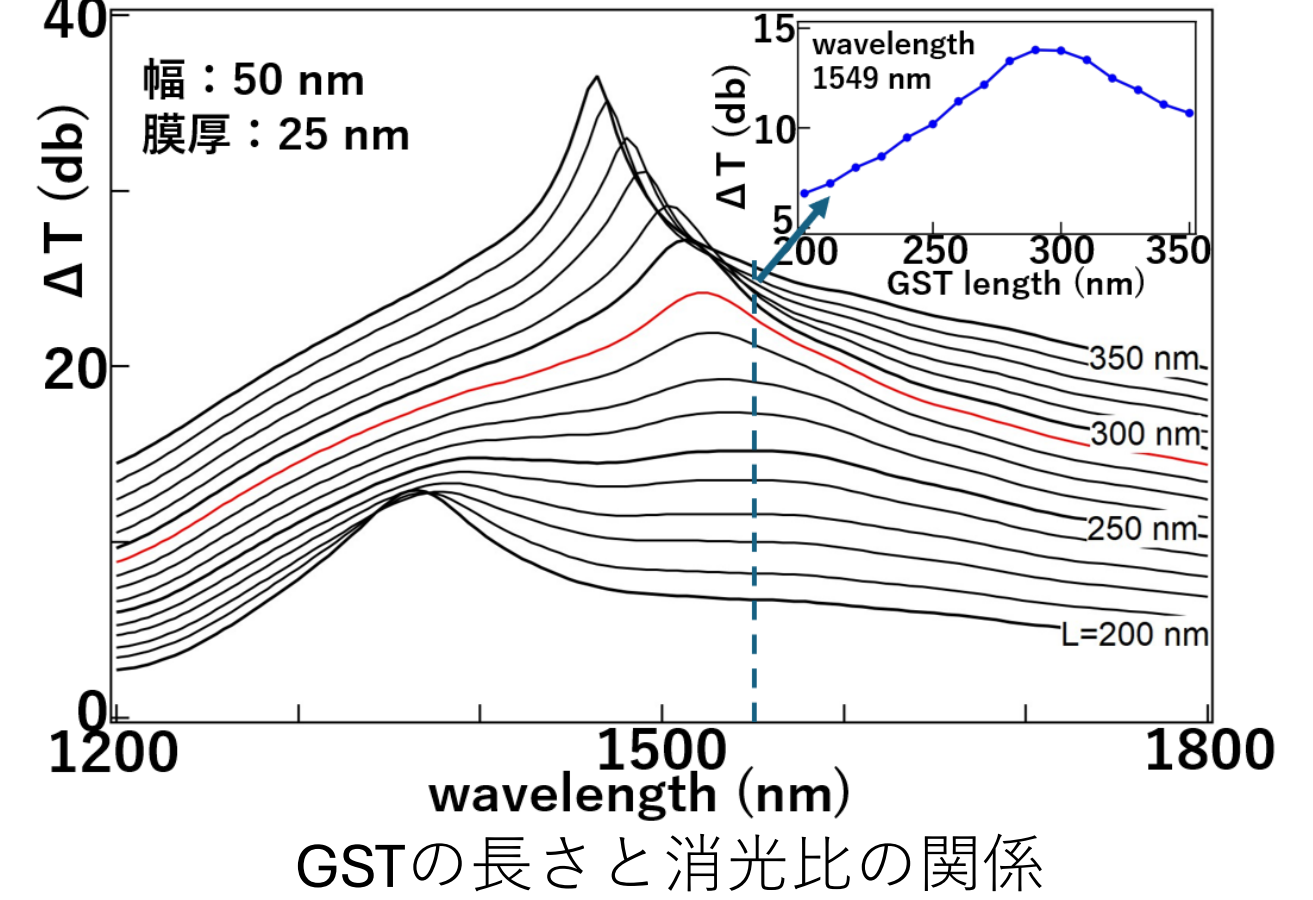
- GSTの相変化により、MIM構造内の電場強度分布や出力側のSi導波路内の電場振幅が変化
- 結晶相はアモルファス相と比べ高屈折率・高消費係数により反射が大きくなることで、減衰が大きくなっている
- この相と透過率変化の関係性は先行研究[4,5]と一致している

[6] P. B. Johnson, R. W. Christy, Phys. Rev. B 6, 4370 (1972). [7] E. D. Palik, ed., "Handbook of Optical Constants of Solids" (1997)

- 消光比のGSTサイズへの依存性



GSTの膜厚と消光比の関係



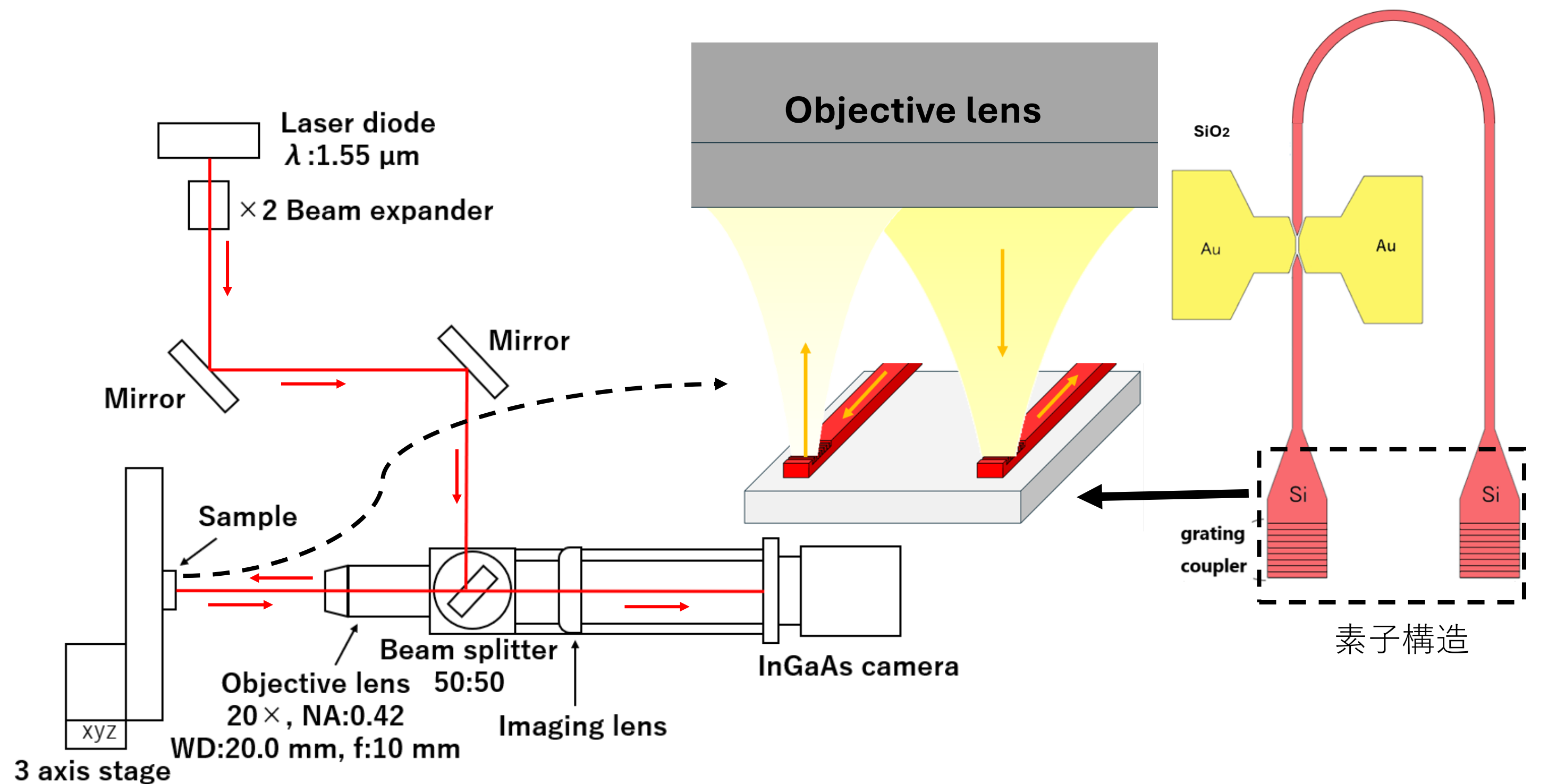
GSTの長さで消光比の関係

- GSTのサイズを変化させると消光比のピークが移動

増加するパラメータ	膜厚 T	長さ L
範囲	$T < 25$ nm	$T > 25$ nm
移動方向	長波長側	短波長側

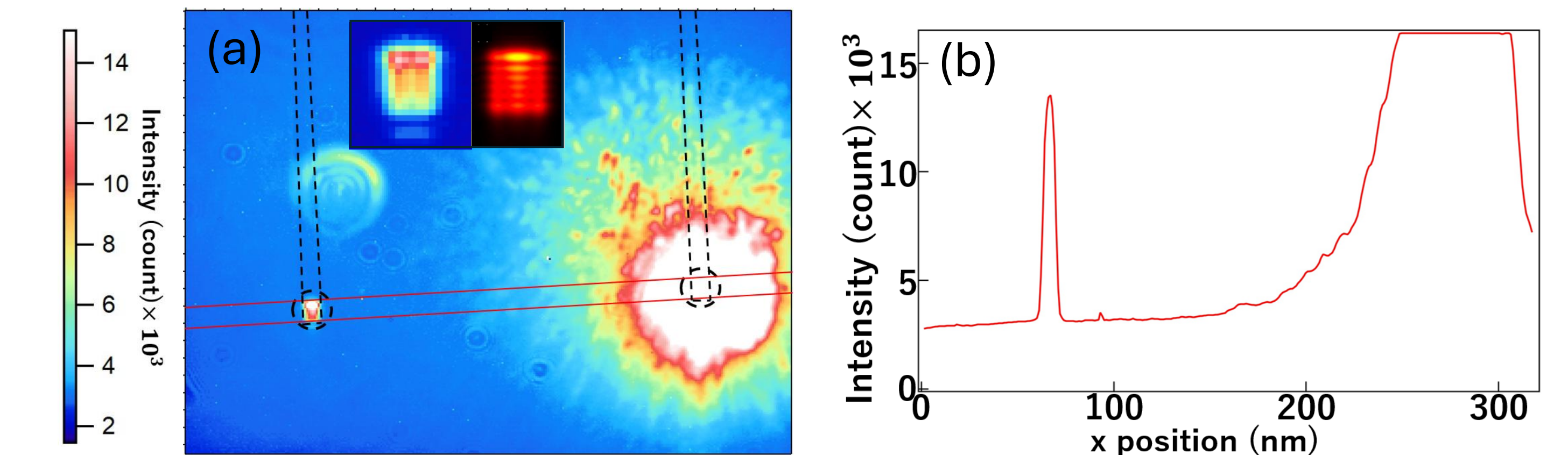
- 長さ $L = 290$ nm、膜厚 $T = 25$ nmにおいて波長1.55 μmで13.9 dBの消光比を獲得

実験



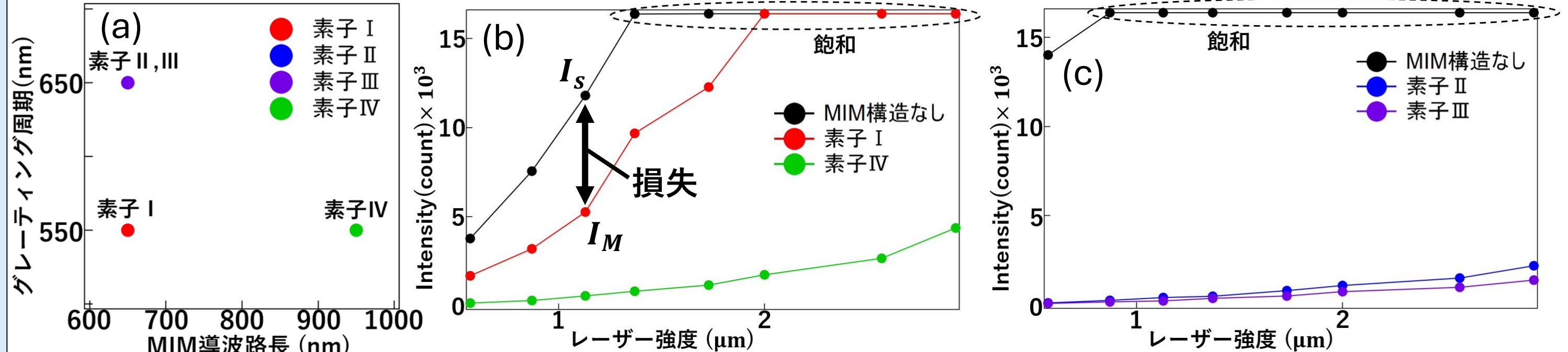
実験結果

- プラズモニックコンバーター(MIM導波路+Si導波路)における実験結果



(a)入出力カプラー部のInGaAsカメラ顕微像(挿入図:出力カプラー部の拡大像(左) [別試料]、および、対応するFDTDシミュレーション(右)) (b)顕微像(a)の赤線領域における強度断面

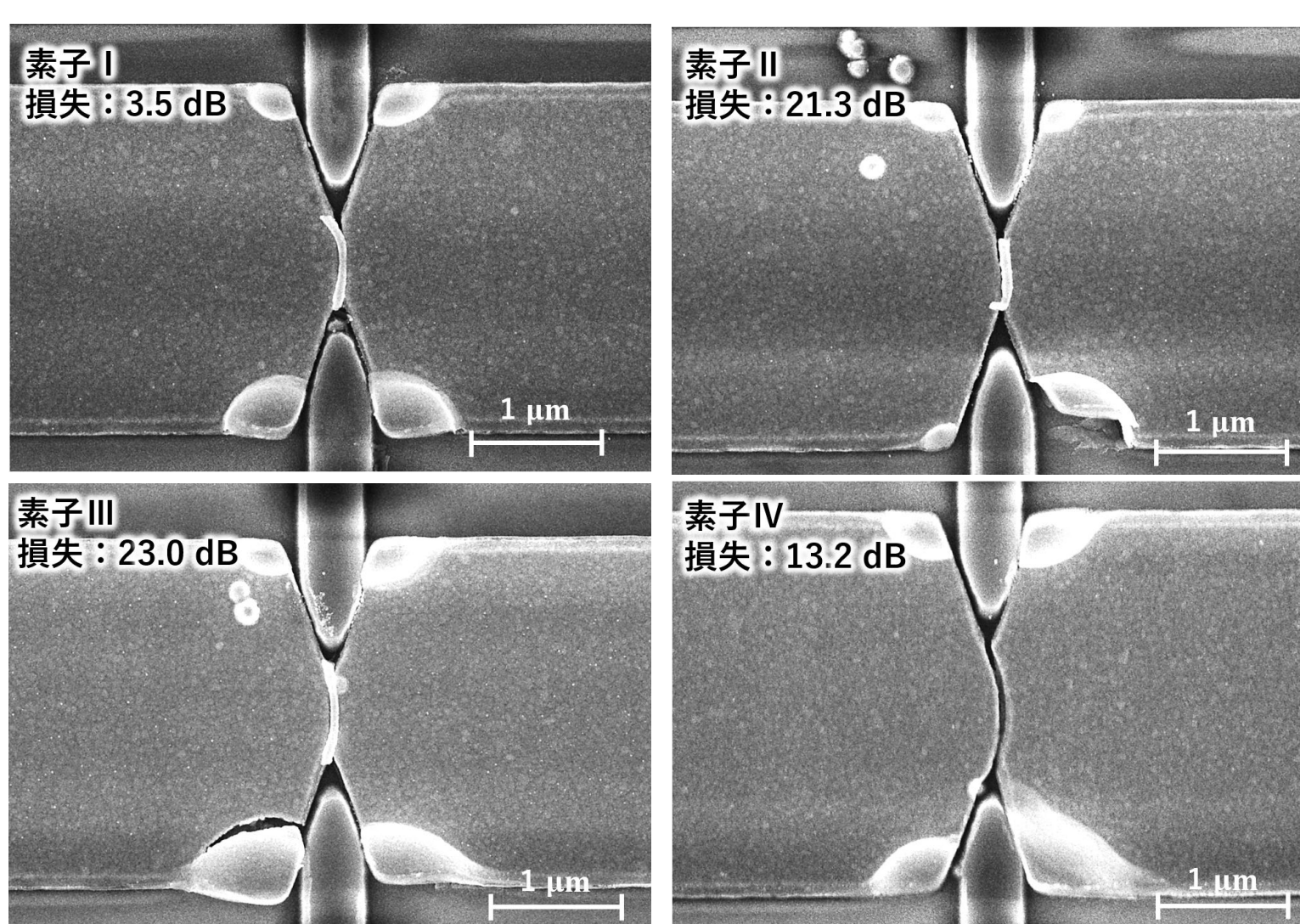
- グレーティングカプラーからの出力信号が確認できる
- MIM導波路による伝搬、Si導波路とMIM導波路の接続が示される



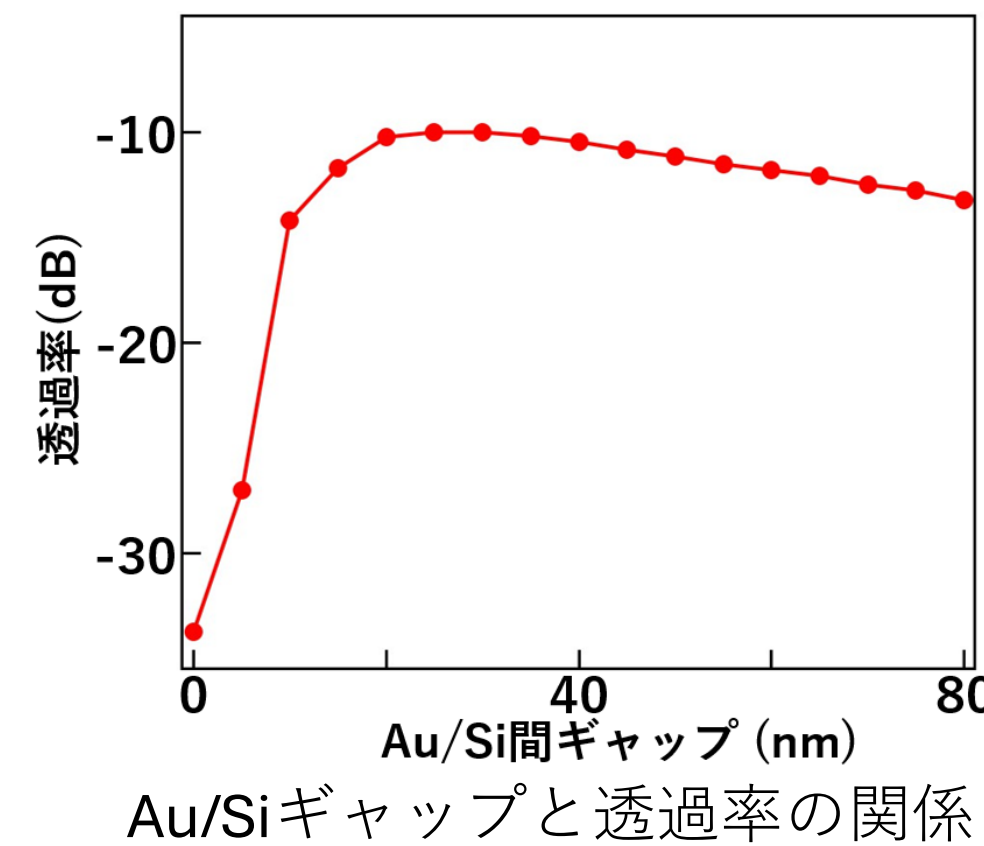
MIM導波路による損失(a)構造パラメータ (b)グレーティング周期550 nm (c)グレーティング周期650 nm

	素子 I $l = 650$ nm	素子 II $l = 650$ nm	素子 III $l = 650$ nm	素子 IV $l = 950$ nm	FDTD $l = 650$ nm	FDTD $l = 950$ nm
MIM構造による損失 η_{MIM} (dB)	3.5	21.3	23.0	13.2	2.1	2.4

- MIM導波路により出力信号は小さくなっている
- 素子ごとで損失にばらつきが生じており、素子II~IVはFDTDシミュレーションと比較して非常に大きい



MIM導波路周辺観察SEM像



Au/Siギャップと透過率の関係

- FDTDシミュレーションよりAu/Siギャップが<10 nmで結合効率が著しく低減しており、素子ごとで損失にばらつき生じた原因と考えられる

まとめ

FDTDシミュレーションによりGSTの相変化を利用したMIM型素子の光変調が確認された。過去の報告例に比べGSTのサイズを長軸化、薄膜化することによって、体積を大幅に増やすことなく高い消光比を得られることが示された。

作製したプラズモニックコンバーターは損失が3.5 dBと高効率結合を示しており、GSTチップを包埋した試料でも高効率な出力信号(16.05 %/0.03 %)が期待できる。