

III-V-on-insulator 構造を用いた超高速メタ表面光変調器

福井太一郎¹, 隅田圭²

¹東京大学工学系研究科電気系工学専攻 中野・種村研究室

²東京大学工学系研究科電気系工学専攻 高木・竹中・トープラサートボン研究室

【著者紹介】

福井太一郎: 専門は集積フォトニクスであり, シリコンフォトニクス技術などを活用し, 光集積フェーズドアレイを用いた光センシングに関する研究を行っている. 本研究では主に素子設計, 特性の数値解析, 及び光学特性の評価を主導した.

隅田圭: 専門は半導体電子デバイスであり, III-V 族半導体, Ge 等の次世代材料を用いた CMOS 技術に関する研究を行っている. 本研究においては主に素子作製と電気特性の評価を主導した.

【概要】

二次元アレイ化が容易な垂直入射型光変調器は, 光波面形成など様々な応用が期待される一方で, 変調材料と光の短い相互作用時間のために高速・高効率な素子の実現は困難だった. 本研究では高移動度・低光損失の理想的な特性を持つ III-V 族化合物半導体材料の薄膜を用いた高速な垂直入射型光変調器を提案, 設計, 及び作製した. 提案する素子は, III-V 族化合物半導体薄膜を用いて光共振器と透明電極の役割を担う櫛歯構造を形成し, 電気光学ポリマーを活性材料としてその櫛歯に埋め込むことで実現される. 数値解析により, 提案素子が光通信などにも適用可能な超高速な動作特性を持つことを明らかにしたほか, 素子を作製し, 光共振が確認された.

【背景】

垂直入射型光変調器は二次元アレイ化が容易であることから, 大容量光通信, 光波面形成, 光センシング等への応用が期待されている. 一方, 従来の垂直入射型光変調器は液晶式, MEMS 式などに限定されており, 高速化に課題があった. 上記状況を踏まえ, 種村らは高速動作可能な変調材料である電気光学ポリマー[1]と, 変調を高効率化させるためのシリコン櫛歯構造[2]を組み合わせた垂直入射型光変調器を提案し, 実証している[3,4]. シリコン櫛歯構造は高効率な変調を実現するための光共振器としての役割と, 電気光学ポリマーの屈折率を変調するために電界を印加するための透明電極としての役割を果たす. これまで, 500 MHz での高速動作を実証しているが, 光通信などより広範な応用の開拓のためにはさらなる高速化が必要だった.

素子の動作帯域は, 櫛歯構造の RC 時定数により律速されている. シリコンのドーピング濃度を上げることで帯域は改善するが, ドーピング濃度を一定以上高くすると自由キャリア吸収により櫛歯構造が光共振器として機能なくなり, 素子の特性が損なわれるため, ドーピング濃度を無制限に高くすることはできない.

InP をはじめとする化合物半導体はシリコンに比べ移動度が高く、同じドーピング濃度の時により低い抵抗率を実現できる。さらには、自由キャリアの散乱時定数が長いために、ドーピング濃度が等しいときにより低い自由キャリア吸収を実現できる[5]。このため、従来のシリコンを InP に置き換えた素子を実現することで、ドーピング濃度の移動度が同時に改善でき、シリコン型の素子から大幅な変調帯域の改善が見込まれる。

シリコンを InP で置き換えた素子の作製には、絶縁体基板上に InP の薄膜を形成した InP-on-insulator 構造が必須であるが、このような基板構造は一般的ではなく、作製及び入手は困難である。他方、高木らは長年にわたり III-V 族半導体の集積回路応用に向け、直接ウエハ接合技術等を活用して様々な III-V-on-insulator 構造を実現し、MOSFET などの電子デバイスを実現してきている[6]。この技術は、InP 型垂直入射型光変調器の実現に活用できると考えられる。

【研究目的】

本研究では、種村らの垂直入射型光変調器に関する技術と、高木らの III-V-on-insulator 構造を中心と素子作製技術を融合することで、新たに超高速垂直入射型光変調器を創出することを目標とする。両学生の技術を融合し、数値計算による詳細な検討と素子の作製を行い高速性の実証を目指す。

【数値解析と素子設計】

まず、Ansys 社のソフトウェア Lumerical を用いて、有限差分時間領域法（FDTD 法）により電磁界解析を行い、InP 櫛歯構造の設計を行った。まず、光損失を無視し、構造の周期、厚みを変化させ

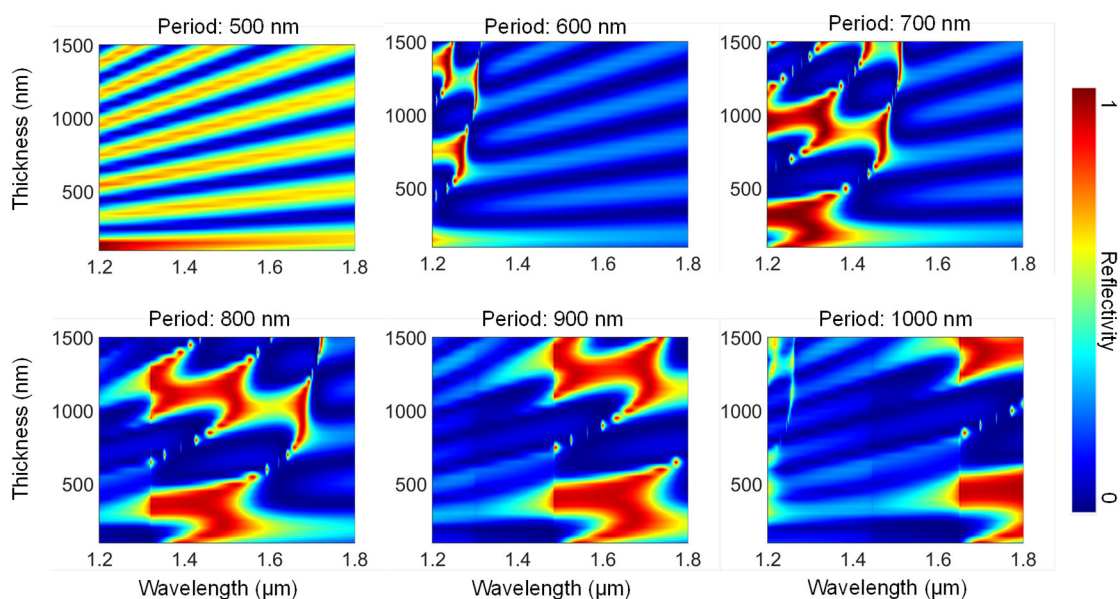


図 1 反射率スペクトルの構造周期及び厚みに対する依存性。

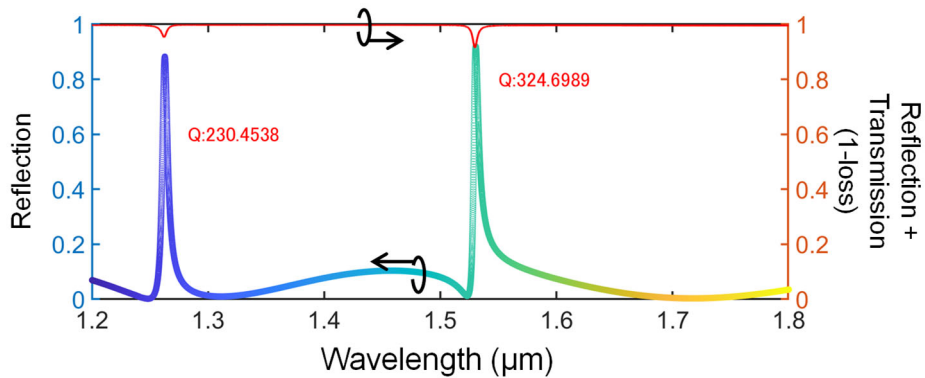


図2 ドーピング濃度 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ を仮定したときの反射率スペクトル. ここで, 1550 nm 付近の基本共振モード, 1250 nm 付近の高次共振モードが存在するが, 今回の素子では基本共振モードを活用する.

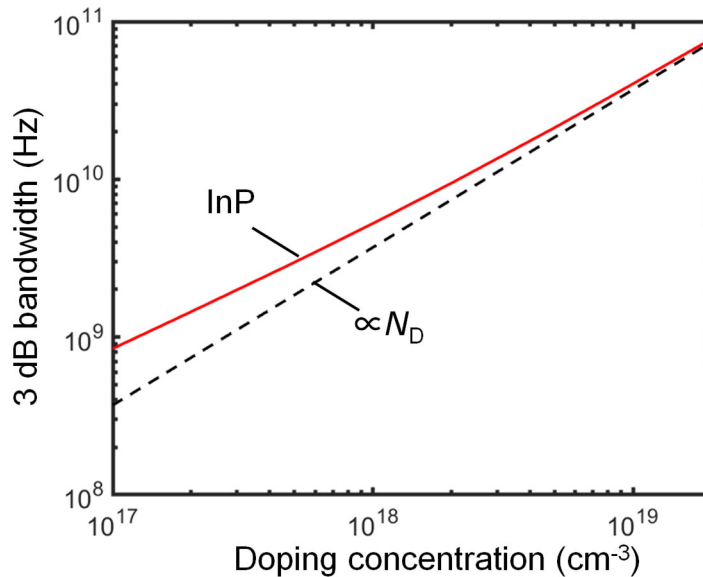


図3 動作帯域の数値解析結果.

ながら反射率スペクトルを計算することで, 設計中心を決定した. 求めた反射率スペクトルのカラーマップを図1に示す. 光通信応用や, それに関連して実験インフラが充実していることから, 1550 nm を動作波長の目標とすることとした. 今回は, 図1を元に, 更に細かく条件を振った結果, 周期 750 nm, InP 層厚みを 600 nm と決定した.

次に, 光損失の影響を計算した. 網羅的に数値計算を行ったところ, $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ までドーピング濃度を高めても十分な光共振器としての性能が得られることが分かった. 一例として図2にドーピング濃度が $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ としたときの反射率スペクトルを示す. ここで, 数値計算上, 設計中心においては Q 値が非常に高くなってしまい ($Q > 3,000$), 光吸収の影響が甚大になってしまうが, 現実の系においては不完全性や設計中心からの作製誤差により数百程度の Q 値となることを踏まえ, InP 厚みを 650 nm としたことに注意されたい. 図2からは, $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ という非常に高い

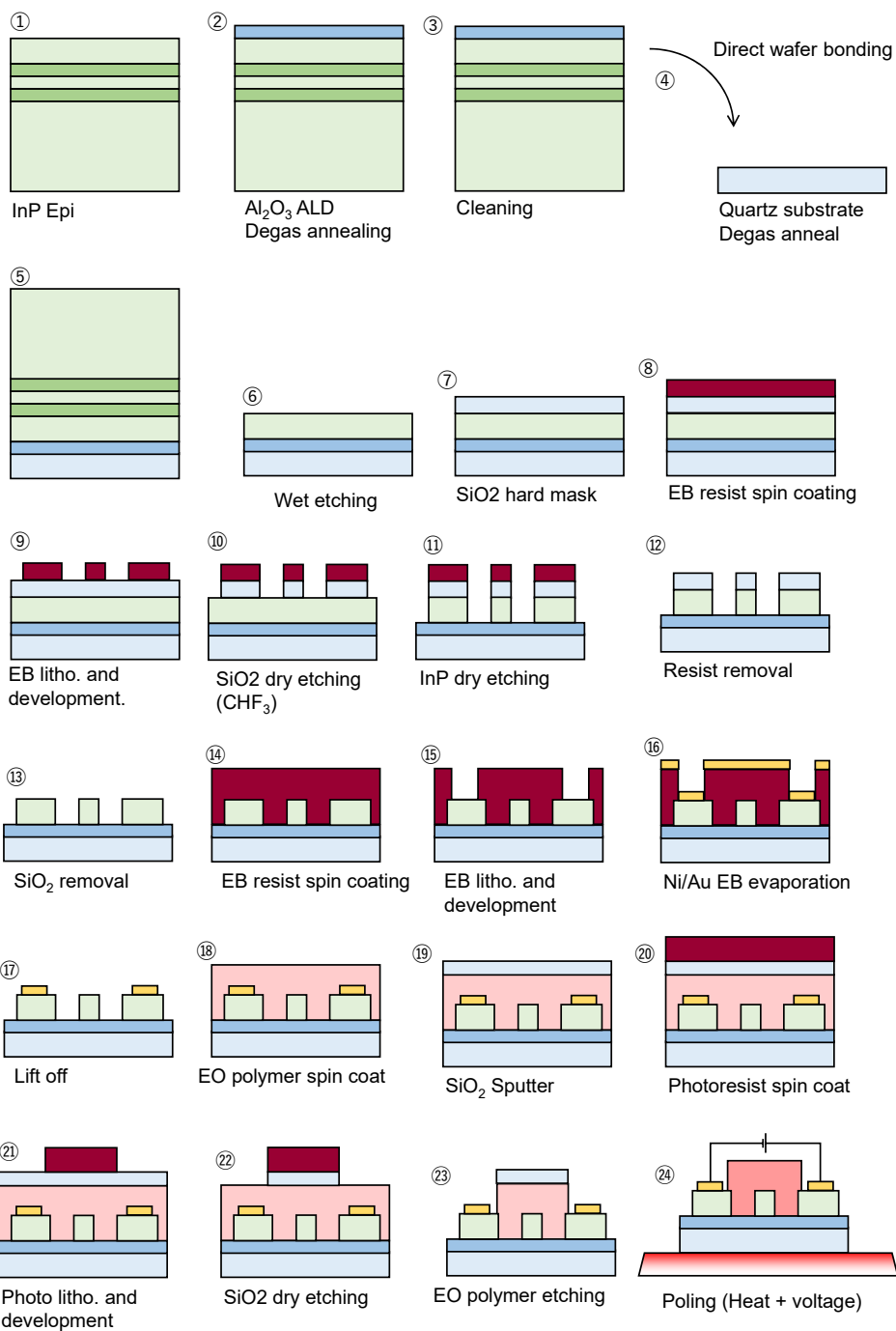


図4 素子の作製フロー.

ドーピング濃度でも共振時の光損失が10%程度に抑えられ、かつQ値300程度の共振が実現できていることがわかる。Q値が高いほうが変調効率が高まるものの、あまりにQ値が高いと光の動作帯域が狭まってしまうため、10~1000程度のQ値が共振器として適切であるとされている[7].

続けて、動作帯域の数値解析を行った。図3に、3 dB 動作帯域のドーピング濃度依存性を示す。ここで、素子サイズは40 μm × 40 μmとした。素子サイズを小さくすることでRC時定数は小さくできるが、素子サイズを小さくすると有限サイズ効果のために光学特性が損なわれるため、無限

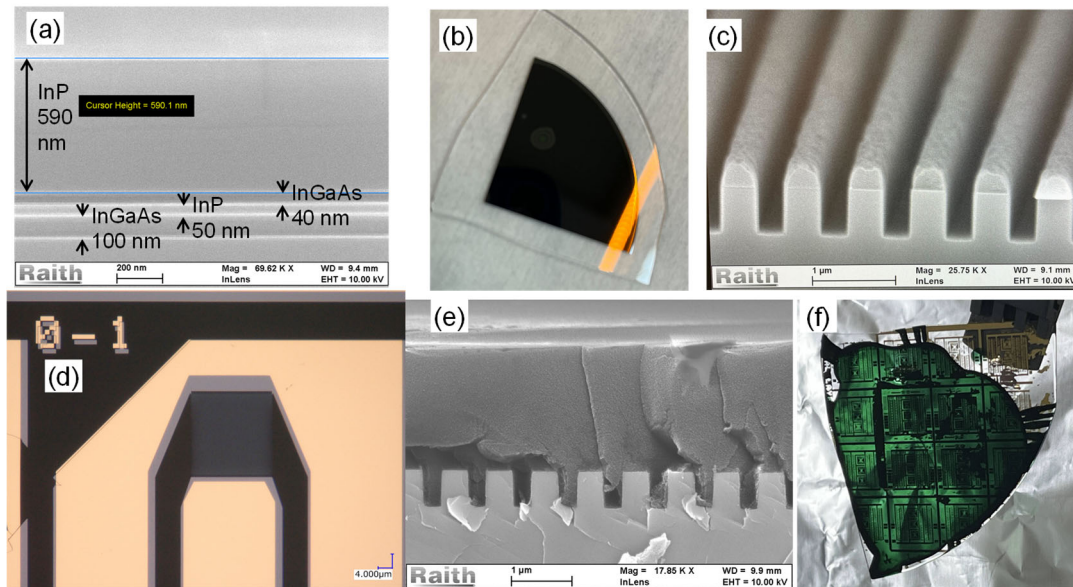


図 5 (a) 成長した基板の断面の電子線顕微鏡写真. (b) ウエハ接合後のウエハの写真. (c) 条件出し基板における InP ドライエッチング後の断面構造. (d) 電極形成後の素子の顕微鏡写真. (e) 条件出し基板における電気光学ポリマーの埋め込みの様子. (f) 電気光学ポリマー塗布後の素子の写真.

に小さくはできない. 今回は過去の計算を元に, 動作に差支えのない素子サイズを選択した. ドーピング濃度 10^{19} cm^{-3} の時に 3 dB 帯域は 40 GHz と見積もられ, 光通信などにおいても十分活用可能な高速動作が可能であることが分かった.

【素子の作製と評価】

次に, 設計した素子を作製した. 作製フローを図 4 に示す. まず, InP 基板上に, InP/InGaAs の層構造を, 有機金属気相成長法によりエピタキシャル成長した. ここで, 最上部のデバイス層は先の設計に基づき 600 nm とし, 薄膜を形成するための InGaAs と InP の犠牲層は[6]に倣い 50~100 nm 程度とした. 図 5(a)に作製した層構造の電子線顕微鏡写真を示す. 所望の層構造が形成されていることが分かる. 次に, ウエハの洗浄, 接着用の Al_2O_3 薄膜の堆積, 及び脱気工程を経た後, InP 基板と石英基板の直接ウエハ接合を行った. ウエハ接合後の写真を図 5(b)に示す. その後, ウエハの接合強度を高めるために加圧工程を経て, 硫酸や塩酸を用いた犠牲層除去により薄膜を形成した. 続けて, SiO_2 をハードマスクとして堆積し, 電子線描画を行い, InP のドライエッチングを行った. この際, InP 側壁の垂直性が重要になるが, 事前に条件出しを行うことで図 5(c)に示すように高い垂直性が得られることを確認した. 更に, 電子線描画とリフトオフにより電極を形成した. 電極形成後の顕微鏡写真を図 5(d)に示す. その後, 電気光学ポリマーの塗布を行った. この時, InP 櫛歯電極内に電気光学ポリマーが埋め込まれることが肝要であるが, 事前実験により, 図 5(e)に示すように正しく埋め込まれることを確認した. 塗布後の写真を図 5(f)に示す. その後, SiO_2 を再び堆積し, フォトリソグラフィを行い, 不要部分の電気光学ポリマーを除去することで電極を露出させ

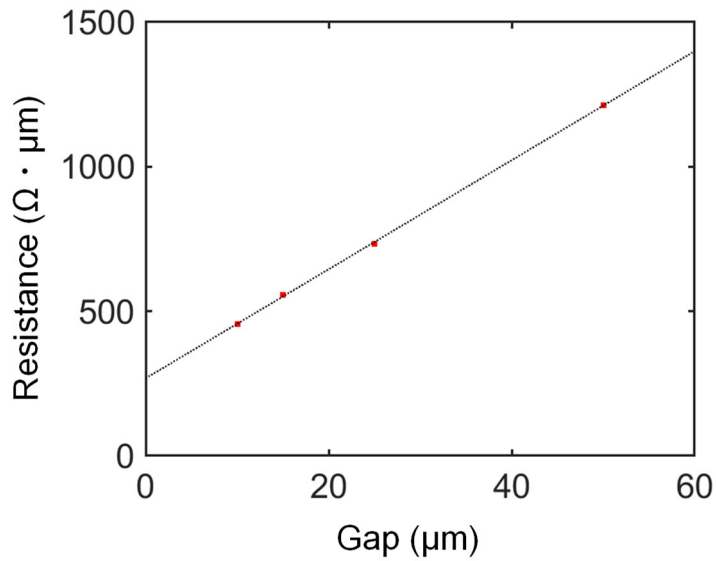


図 6 TLM 法の測定結果

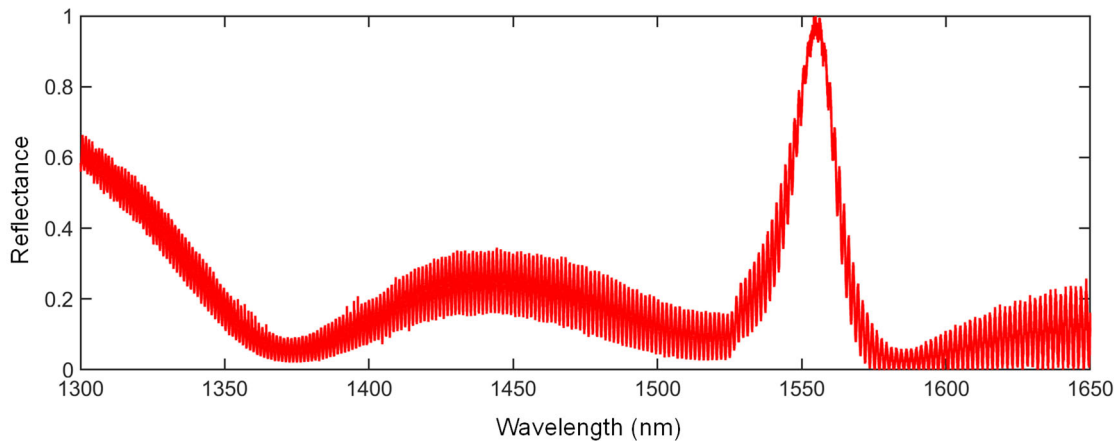


図 7 作製した素子の反射率の波長依存性.

た. 今後, ワイヤボンディングを行った後, ポーリングを行う予定である.

次に, 作製した素子について, 動特性の評価には短い期間の中では至らなかったものの, 静特性の評価を行った. まず, InP 薄膜の電気特性を TLM 法 (Transmission Line Model) を用いて評価した. 電極間隔を変えながら測定した抵抗を電極幅で規格化したものを図 6 に示す. コンタクト抵抗は $2.68 \Omega \text{cm}^2$, 抵抗率は $0.0011 \Omega \text{cm}$ と見積もられた. 特に, コンタクト抵抗については文献値との一致が確認された[8,9]. 事前実験で CV 法を用いて概算したドーピング濃度 $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ を仮定すると移動度は $700 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と見積もられ, これも文献値と整合した[10]. この抵抗率は, 先行研究で用いたドーピング濃度 10^{18}cm^{-3} のシリコンと比べて 1/25 倍程度に低いことに注意されたい. 続けて, 光学特性の評価を行った. 図 7 に得られた反射率の波長依存性の一例を示す. 設計通り, 通信波長帯である 1550 nm 近辺で光共振が得られていることが分かる. ここで, 背景に見える細かい共振は石英基板によりファブリ・ペロ共振だと考えられる. 半値全幅~20 nm から見

積もられる Q 値は~75 であった。現在、設計より Q 値が低くなってしまっている原因は不明である。高性能な電気光学ポリマー[11]を用いればこの程度の Q 値でも十分な変調が可能と考えられ、むしろ Q 値が中程度であるために広帯域での動作が期待できる。また、共振時に高い反射率が得られていることから、研究目的の通り、低い電気抵抗と、共振に影響のない小さな光損失を両立できていることが分かる。今後、実験的に高速な動作の実証を試みる。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、指導教員の高木信一教授、種村拓夫准教授には多大なるご支援並びにご指導を賜りましたこと、深く御礼申し上げます。中野義昭教授、杉山正和教授、竹中充教授、トープラサートポンカシディット講師には共同で研究室をご運営いただく中で実験インフラのご用意から細かいご助言まで広範にご支援いただきましたこと御礼申し上げます。副指導教員の島野亮教授、平本敏郎教授には本融合研究をお認めいただき、また、様々な観点からご助言いただきましたこと、感謝申し上げます。本研究で使用した InP/InGaAs 基板のエピタキシャル成長に全面的にご協力いただいたワラーコンヤンワチラクン氏、電子線描画でご協力いただきました相馬豪氏と宮野広基氏、ドライエッチングにおいてご協力いただきました田之村亮汰氏、電気光学ポリマーの埋め込みにご協力いただいた Jiahao Liu 氏には、素子作製において多大なご助力をいただきましたこと感謝申し上げます。最後に、統合物質科学リーダー養成プログラム MERIT には、共同研究の機会に加え、日頃より多大なご支援を賜りましたこと、深く御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] C. J. Chang-Hasnain and W. Yang, *Adv. Opt. Photon.* **4**(3), 379 (2012).
- [2] D. Chen *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **70**(25), 3335 (1997).
- [3] Y. Kosugi *et al.*, *IEICE Electron. Express* **13**(17), 20160595 (2016).
- [4] M. Ogasawara *et al.*, *CLEO'19*, JTH2A.48.
- [5] N. Sekine *et al.*, *Opt. Express* **28**(20), 29730 (2020).
- [6] M. Yokoyama *et al.*, *IEEE Electron Dev. Lett.* **32**(9), 1218 (2011).
- [7] D. A. B. Miller, *J. Lightw. Technol.* **35**(3), 346 (2017).
- [8] S.-H. Kim *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **98**(24), 243501 (2011).
- [9] A. Baraskar *et al.*, *J. Appl. Phys.* **114**(15), 154516 (2013).
- [10] M. Sotoodeh *et al.*, *J. Appl. Phys.* **87**(6), 2890 (2000).
- [11] H. Xu *et al.*, *Adv. Mater.*, **33**(45), 2104174 (2021).