

シリコンフォトニクスを用いたソリッドステートライダーへの挑戦

馬場 俊彦

横浜国立大学 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

Challenge for Si Photonics Based Solid-State LiDAR

Toshihiko BABA

Yokohama National Univ., 79-5 Tokiwadai, Hodogayaku, Yokohama 240-8501

Abstract Wide-range nonmechanical solid-state beam steering is available by an array of Si photonic crystal slow-light waveguides and their switching without complicated control. FMCW LiDAR action is obtained with this beam steering on a Si photonics chip.

1. はじめに

自動運転やロボット・ドローンの話題と共に、周囲環境の3次元情報を取得するセンサであるLiDARが注目を浴びている^{1,2)}。しかし従来のLiDARは機械式光偏向器を利用する等の理由から、大型、高コストであり、幅広い応用は困難と考えられる。そこで最近、フラッシュ方式、光フェーズドアレイ方式、スローライト方式など、非機械式(いわゆるソリッドステート)LiDARが活発に開発されている。本発表では、我々が開発中のフォトニック結晶スローライト導波路を基盤技術としたこのようなLiDARを中心に、シリコンフォトニクスを用いた非機械式小型LiDARを実現するためのチャレンジを紹介する。なお、ほとんどの内容については別途、論文発表予定なので、参照されたい³⁾。

2. スローライト光偏向器

フォトニック結晶導波路は、低群速度 v_g をもつスローライトを手軽に発生させる⁴⁾。光の周波数 ω と伝搬定数 β に対して $v_g = (d\beta/d\omega)^{-1}$ と与えられるので、群速度の低下は一次分散 $d\beta/d\omega$ の増大と同義であり、周波数(波長でも同じ)や屈折率の微小変化に対して伝搬定数が大きく変化する。このような光を回折格子によって自由空間に放射すれば、波数保存則に従って光の角度 θ が大きく変わる⁵⁾。導波路回折格子と似ているが、導波路回折格子は一般に偏向範囲が狭い。スローライトを用いることで、この欠点を補うことができる。

フォトニック結晶導波路における回折格子には、表面に形成した回折格子や、フォトニック結晶パターンに導入された二重周期などである⁶⁾。結合係数を小さくして放射を弱めることで、長い放射開口が得られ、導波路に沿った方向のビーム広がり角 $\delta\theta$ は 0.1° 以下になる。一方、導波路直交方向は、閉じ込められた伝搬光が放射されて広がり、扇状ビームとなる。このような導波路の上方にコリメートレンズを配置すれば、扇状ビームを点状ビームに変換できる。また、このような導波路をアレイ集積し、それを光スイッチにより切り替えると、レンズとの相対位置関係によって、コリメートビームの横方向角度が変化する。

図1は32本のアレイ導波路と切り替えスイッチを搭載したSiフォトニクスチップ⁷⁾、および同チップをコリメート用に特別に設計したプリズムレンズ⁸⁾と共にプリント基板上に搭載した様子ある。また図2は波長掃引と導波路切り替えによる2次元光偏向である。導波路の光伝搬方向を切り替えることで、 θ の偏向範囲を2倍に拡大している。多少のスポットの乱れを無視すれば、解像点数は 400×32 と評価される。ビームの狭幅化と導波路集積を進めれば、最終的に 1000×100 は得られるであろう。また波

長を固定し、熱光学ヒーターで導波路を加熱したときにも同様の2次元偏向が得られている⁹⁾。

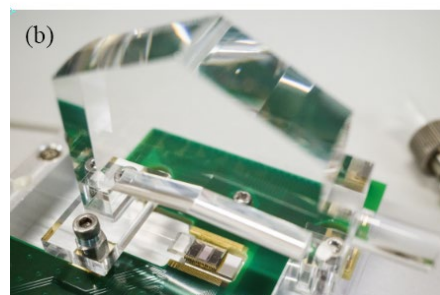


図1 製作した光偏向チップ(a)、およびコリメートレンズと共にプリント基板上に搭載した様子(b)。

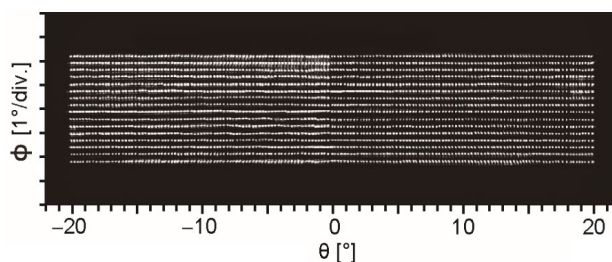


図2 出射ビームの偏向。異なる角度のスポットを重ね表示している。縦方向が16点となっているが、32点まで得られている。

3. Si フォトニクスの利用

本研究と類似のソリッドステート光偏向器に光フェーズドアレイがある¹⁰⁻¹⁴⁾。これもフォトニック結晶導波路も、製作にはSiフォトニクスを用いる。Siフォトニクスは30年に及ぶ歴史があるが、

約 10 年前から Si エレクトロニクスのインフラである CMOS プロセスにより本格的な光集積回路が作られるようになった¹⁵⁾。ここでは光導波路やパッシブデバイス、PN 接合による高速な光変調器、エピ成長された Ge フォトダイオードなどがモノリシック集積可能であり、光ファイバ接続、半導体レーザのフリップチップ実装など、周辺技術も開発されている。既にデータセンターの光インターコネクション用送受信器として市場を拡大させている。

CMOS プロセスは強力な光集積プラットフォームであるが、メリットと共に大きな制約もある。光インターコネクションは成熟した Si フォトニクス部品のみで構成され、CMOS プロセスの利用条件を満たす大量需要があり、作れば作るほど低コスト化して製品が低価格になり、既存技術に対する競争力が増すというメリットを享受している好例である。同様の例で、家庭向け光回線や 5G 基地局用通信など、アクセス系への導入も検討されている。これに続く応用として LiDAR は有望である。

フォトニック結晶スローライト導波路について言えば、現在の CMOS プロセスにとって必ずしも製作が容易な汎用部品ではないが、構成要素である円孔列の直径は約 200 nm、周期は約 400 nm なので、KrF エキシマレーザ露光を用いた旧世代 180 nm プロセスでも製作でき、十分に作りこめば技術的に成熟すると思われる。また、それ以外の構成要素には汎用部品が使えるので、高性能なソリッドステート LiDAR になると期待される。

4. 測距方式

ミリ波レーダーには、パルスの往復時間を計測する飛行時間 (TOF) 方式と、周波数変調を受けた連続波の周波数ずれをホモダイン検波する周波数変調連続波 (FMCW) 方式がある。

現在の多くの LiDAR は、構成が単純という理由から TOF を採用している。ここでは、アイセーフ条件を満たす高強度短パルスレーザと、熱雑音が小さな高感度光検出器が用いられる。50 W 以上のピークパワーをもつ波長 0.9 μm 帯のパルスレーザが使われるが、これはアイセーフ波長ではないので、デューティ比を下げて平均パワーを下げる。また環境光は雑音となるので、光源以外の波長の除去が必須となる。それでも光源と同じ波長成分の混入により S/N は大きく変動するため、大きなマージンが必要になる。これが結果的に測距限界を制限する。また、接近する他車が搭載した LiDAR との混信の回避も課題である。パルス符号化による識別が考えられるが、信号処理を複雑化させ、測距速度を低下させる。

TOF を Si フォトニクスで実現しようとするときの最大の問題は、二光子吸収である。Si フォトニクスでは、Si にとっての透明かつアイセーフとなる波長 1.45~1.6 μm が用いられるが、導波路が小さく、光密度が容易に高くなるので、100 mW 以上の光パワーでは二光子吸収とそれに伴う自由キャリア吸収が発生し、出力飽和や光損傷が起こる。よって、TOF に使われる 10 W 以上のパルスを導入することはできない。これに対して FMCW 方式は、周波数変調、参照光とのミキシング、周波数解析を必要とするので、TOF より構成が複雑で、LiDAR の例は少ない。しかし Si フォトニクスを用いれば、究極的には光源を除く全ての光電子部品を一体集積できる可能性がある。測距におけるビート周波数の観測はコヒーレント検波なので、熱雑音の影響を受けにくく、普通のフォトダイオード (Si フォトニクスでは Ge) を用いてもショット雑音限界までの高感度検出が行える。コヒーレント検波のためには、物体までの往復距離以上のコヒーレント長を確保できる狭線幅単一波長レーザが要求されるが、最近の通信用分布帰還形半導体レーザでは線幅 1 MHz 以下が容易に得られるので、

物体までの距離 100 m 以上に十分に対応できる。このようなコヒーレント検波は、同波長の参照光との干渉によってビート周波数を得るので、環境光の影響や、接近する他車の LiDAR との干渉も大幅に低減することができる。

我々は実際、周波数変調器と Ge フォトダイオードを前記の光偏向素子と共に集積した FMCW LiDAR チップを製作済みである (実は図 1(a)はこれらの要素まで一体集積している)。また、偏向ビームを金属物体に照射し、FMCW の原理により、その 2 次元形状を表すイメージを取得、初期的な LiDAR 動作に成功した。現在、その S/N を高める検討を進めており、今後の進展に期待している。

謝辞

本研究は科学技術振興機構 ACCEL プロジェクトにより推進されている。

参考文献

- 1) 松元則雄: 日経エレクトロニクス 2 (2017) 4.
- 2) 三宅常之, 松元則雄: 日経エレクトロニクス 3 (2018) 20.
- 3) 馬場ら: 電子情報通信学会論文誌 J103-C (2020, in press).
- 4) T. Baba: Nature Photonics 2 (2008) 465.
- 5) K. Kondo, T. Tatebe, S. Hachuda, H. Abe, F. Koyama and T. Baba: Opt. Lett. 42 (2017) 4990.
- 6) H. Abe, M. Takeuchi, G. Takeuchi, H. Ito, T. Yokokawa, K. Kondo, Y. Furukado, T. Baba: Opt. Express 26 (2018) 9389.
- 7) H. Ito, Y. Kusunoki, J. Maeda, D. Akiyama, N. Kodama, H. Abe, R. Tetsuya, T. Baba: Optica 7 (2020) 47.
- 8) J. Maeda, D. Akiyama, H. Ito, H. Abe, T. Baba: Opt. Lett. 44 (2019) 5780.
- 9) T. Tamanuki, H. Ito, T. Baba: J. Lightwave Technol. (2020, submitted).
- 10) S. W. Chung, H. Abediasl, and Hossein Hashemi: IEEE J. Solid-State Circuits 53 (2018) 275.
- 11) T. Kim, P. Bhargava, C. V. Poulton, J. Notaros, A. Yaacobi, E. Timurdogan, C. Baiocco, N. Fahrenkopf, S. Kruger, T. Ngai, Y. Timalina, M. R. Watts, and V. Stojanovic: IEEE J. Solid-State Circuits 54 (2019) 3061.
- 12) J. C. Hulme, J. K. Doyle, M. J. R. Heck, J. D. Peters, M. L. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, J. E. Bowers: Opt. Express 23 (2015) 5861.
- 13) D. N. Hutchison, J. Sun, J. K. Doyle, R. Kumar, J. Heck, W. Kim, C. T. Phare, "A. Feshali and H. Rong: Optica 3, 887 (2016).
- 14) M. Zadka, Y. Chang, A. Mohanty, C. T. Phare, S. P. Roberts, and M. Lipson: Opt. Express 26 (2018) 2528.
- 15) 馬場俊彦, レーザー研究, 42, 223 (2014).