

戦略的創造研究推進事業 ACCEL

研究開発課題

「スローライト構造体を利用した非機械式  
ハイレゾ光レーダーの開発」

研究開発終了報告書

延長分追記版

研究代表者 氏名 馬場 俊彦

プログラムマネージャー 氏名 小林 功郎

# 1. 研究開発成果

## 1-1. 実施概要

光レーダー (LiDAR) は光偏向と測距の繰り返しにより周囲を 3 次元 (3D) スキャンするセンサであり、自動運转向けなどで世界的に開発されている。ただし従来は機械式光偏向器が大型、高価、不安定なため、本格導入や応用展開を阻んでいた。本研究はスローライト構造体による非機械式光偏向器を着想し、これを組み込んだオンチップの半導体光レーダーを構想した。測距には構成が単純なパルス時間計測方式 (Time of Flight: TOF) と、構成は複雑だが高精度・低雑音なコヒーレント方式 (Frequency Modulation Continuous Wave: FMCW) がある。本研究は、化合物半導体スローライト導波路で TOF を、シリコンフォトニクスフォトニック結晶スローライト導波路で FMCW を並行して研究し、様々な状況に対応できる光レーダーを目指した。

化合物半導体スローライト導波路は、最大 6 インチ GaAs ウェハ上にエピタキシャル成長される半導体多層膜で構成され、構造調整により、波長 900 nm 帯の伝搬光を空間に放射させる。波長を変えると、拡がり角  $0.05^\circ$  以下のライン状ビームが、スローライト効果により  $30^\circ \sim 70^\circ$  の広範囲で 1D 偏向した (対応する解像点数は 1,000 点以上)。電流注入による光増幅機能により、最大出力は 10 W に達した。さらに、波長可変型面発光レーザの集積で実用的なスキャン光源となること、導波路の折り返しで小型化できること、市販の TOF カメラやイメージ段差検出により、近距離から 40 m 以上の物体の 3D スキャンが可能なことなどを示した。これは世界初の非機械式 TOF 光レーダーの実証であり、企業への技術移転、大学発ベンチャーの設立と投資の受け入れ、製品の試作などに結び付いた。

一方、フォトニック結晶スローライト導波路は、8~12 インチ SOI 基板上に CMOS プロセスを用いて製作した。こちらは浅堀回折格子を形成することで、波長 1550 nm 帯の光が拡がり角  $0.1^\circ$  以下のライン状ビームを放射した。熱光学ヒータを内蔵した同導波路 32 本をアレイ配置し、導波路選択用スイッチツリーと FMCW 用の変調器、光干渉回路、Ge 受信器なども一括集積した光レーダーチップを製作、簡易モジュールを構成し、ライン状ビームを点状ビームに変換する独自のプリズムレンズを搭載した結果、波長掃引と熱制御の両方で、 $50^\circ \times 8.8^\circ$  の 2D 偏向 (解像点数  $500 \times 32 = 16,000$ ) と 2 MHz を超える高速応答を確認した。熱制御による動作は、固定波長での世界初の本格的な非機械式光偏向である。さらにこのチップ単独で物体の 3D スキャンに成功し、非機械式 FMCW 光レーダー動作を実証した。以上の研究も国際的に報道され、複数の企業との共同研究に結び付いた。以上の 2 方式は、同様の非機械式光レーダーを目指す欧米の光フェーズドアレイ (Optical Phased Array: OPA) の研究をしのご高性能を示し、本研究の Proof of Concept (POC) を達成して、社会実装に貢献した。

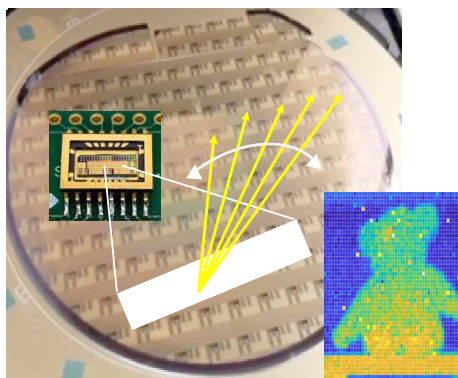


図 1 TOF 光レーダー光源の製作と実証。背景はウェハ。下と左は製作した素子とモジュール。右は 3D スキャンイメージ。

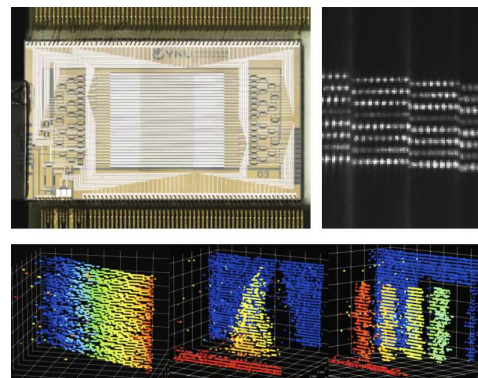


図 2 FMCW 光レーダーの製作と実証。左上は製作したチップ。右上は物体へのビーム走査の様子。下は物体の 3D スキャンイメージ。

## 2. 社会実装／実用化に向けた取組

### 2-1. 実施概要

本プロジェクトは、3D センサである光レーダーを開発、その実用化・社会実装を目指してきた。光レーダーは自動運転用途が注目されているが、ロボット・ドローン、セキュリティ、物体スキャナなど、図 3 に示す広範な応用が期待されている。このプロジェクトは、スローライト構造体による独自の非機械式光偏向により小型、低コスト、安定、高自由度を実現することで、応用展開が加速すると考えた。光レーダーには TOF 方式と FMCW 方式があるが、そのいずれにもこのコン

セプトを適用し、それぞれの POC 達成に向けて同時並行的に開発を行った。プロジェクト開始時は、馬場グループがシリコンフォトニクスをベースとした FMCW 方式、小山グループが化合物半導体をベースとした TOF 方式、西山グループがシステム実証を主な担当とした。2017 年 10 月からは岡野グループが FMCW 方式の開発に参加し、現在の体制となった。

将来の社会実装・実用化を視野に入れ、本プロジェクトの広報、ならびに国内の光レーダー開発状況の把握、研究コミュニティ形成などを目的に、3 回の光レーダー研究会を独自に開催(2017 年 1 月、6 月、10 月)、プロジェクト側と国内の関連企業・機関が開発状況や内外の動向、今後の展望を発表し合い、要求性能等について活発な議論を行った。これは企業 40 社以上のメンバーを集める光産業技術振興協会の自動車・モビリティフォトニクス研究会につながり、本技術を含むフォトニクス技術の自動車・モビリティへと展開した。そして技術の進展、POC マイルストーンの達成を基礎に、各グループが複数の企業と接触し、NDA 締結、技術協議、共同研究を実施してきた。その中で必要な仕様等を議論し、POC の一部修正も行った。数社については技術移転を進めている。

TOF 方式は、2019 年度には光レーダーモジュールの開発・実用化の中心企業が確定し、実用化へと動き始めた。また、この動きを加速させるべく、本プロジェクト参加メンバーが中心となって、東京工業大学発のベンチャー企業 Ambition Photonics 社を設立した。同社はデザインハウス機能をもって TOF 方式グループに参加し、ウエハ製造ファウンドリーやモジュール製造企業と連携、十分な外部資金を調達して光偏向光源や光レーダーの生産を目指している。さらにこれ以外にも、この光レーダーを応用しようとするユーザー企業も参入してきており、社会実装の道筋が付きつつある。

一方、FMCW 方式も企業の関心は高く、頻繁にコンタクトがある。デバイス／モジュール、システム／FMCW 信号処理等について複数の共同研究を実施しており、一部は技術移転も開始した。ただし光レーダーとして本格的に実用化に取り組む企業の確定はこれからである。光レーダー集積チップ、レーザモジュール、FPGA を含む制御用電子回路、その他の光学部品までを収納したボックスを製作しており、さらに送受信信号処理回路を追加すれば、可搬型の光レーダーが実現する見通しである。この試作品を武器に、関心の高い企業にさらに働きかけ、中心企業の確定、実用化・社会実装へと向かう予定である。

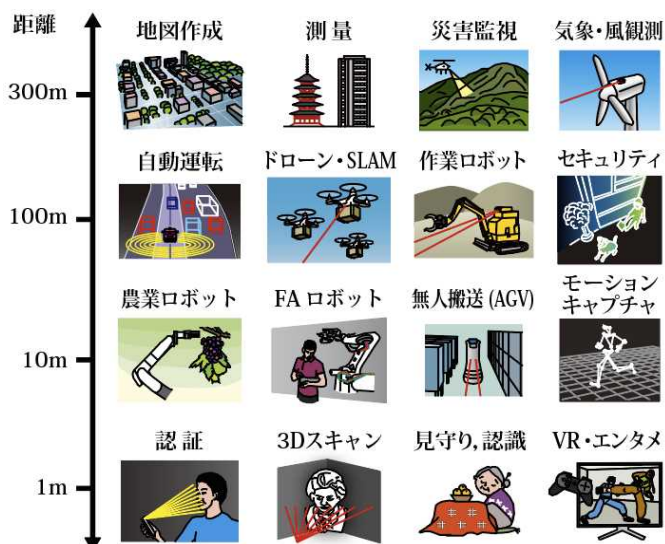


図 3 光レーダーに期待される応用

## 1-1. 実施概要

<2020年10月～2021年3月末までの進捗・成果に関して追記する>

シリコンフォトニクスによるフォトニック結晶スローライト導波路の熱制御による 2D 偏向では、高周波強調信号を用いることで応答周波数をさらに向上させた。また、異なる位置でのビームの時間応答を測定することでビームの振る舞いを動的観測し、高周波強調信号の最適化により、ビーム切替時間を  $2.7\ \mu\text{s}$  に短縮した。これは解像点数 1 万以上に対して約 30 fps のビーム走査を可能にする。また FMCW LiDAR としては、S/N の改善により 3D スキャンの品質が向上、距離分解能は 9.1 mm まで向上したほか、振動と速度のドップラー計測にも成功した。

一方、化合物フォトニクスによる TOF 方式では、回折格子素子 (DOE) をスローライト偏向器に積層し、かつ偏向器を対向集積することで、最大偏向角、解像点数を 10 倍に拡大できることを実証した。この手法により、外部光源を用いる光偏向器では、解像点数 4,000、偏向角  $120^\circ$  を実現するなど、機械式偏向器を凌駕する性能を実現した。さらに、波長可変光源集積化に関しては、表面回折格子の集積化により、高出力化と単一モード化を実現し、波長可変光源集積の光偏向器出力のパルス出力 4W を実現した。さらに、試作した光偏向器を用いて TOF 方式光レーダーシステムの検証を行い、通常のフラッシュ TOF LiDAR に比べて低パワーのパルス出力 0.6W の条件下でも、オフライン測定では測距精度 0.5% 以下で距離 60m、リアルタイム測定では測距精度 1% 以下で距離 40m までの 3D 画像取得に成功した。

<コロナによる研究の延長期間 (2021年4月～2021年9月末) の進捗・成果に関して追記する>

Si フォトニクスによるフォトニック結晶スローライト導波路の光偏向動作では、一方向入力で  $\theta$  方向の最大偏向角  $27^\circ$ 、平均ビーム拡がり  $0.08^\circ$  が観測され、両方向入力で偏向角  $54^\circ$ 、解像点数 675 点が可能になること、 $\phi$  方向の解像点数 32 点を乗じると、2D 偏向で 21,600 点が得られることがわかった。またフル集積 LiDAR チップでは、ミラーに対して FMCW LiDAR 信号の S/N 71 dB、ランバート散乱体を模擬した石膏に対して 16 dB が得られた。再帰性反射シートにより反射光パワーを増強した形状物体のイメージングでは、最大  $154 \times 32 = 4928$  ピクセルの距離点群画像が得られた。これは欧米の光フェーズドアレイやフォーカルプレーンアレイの報告値を大きく上回る高解像度である。さらにピクセル数を 200 程度に限定したイメージングでは、FPGA 回路でビームスキャンを制御することにより、最速で 10 fps のリアルタイムイメージングにも成功した。これも、Si フォトニクス LiDAR チップとしては世界初の達成となる。

化合物フォトニクスによる TOF 方式では、波長可変光源集積光偏向器の 1 次元アレイに DOE とシリンドリカルレンズを搭載することで、 $266 \times 10 = 2660$  点の電氣的 2D ビーム偏向に成功した。さらに、太陽光 AM1.5G 相当の疑似太陽光源を対象物に照射し、屋外使用における測距精度を評価し、これらの結果を用いて、10W 級のビーム掃引光源を実現することにより、30fps のフレームレートで距離 100m 級の測距が可能であることを明らかにした。