



丸文研究奨励賞 受賞者

種村 拓夫

東京大学 大学院工学系研究科  
准教授

# 半導体集積フォトニクスに基づく 光波合成・制御素子の研究

光のユニタリ性に根差した新しい光集積回路を開拓する

## 研究の背景

多数の光素子をワンチップに集積した半導体光集積回路 (PIC) は、光通信デバイスの大容量化と小型化を実現する技術として、1980年代から著しい発展を遂げてきた。現在では、レーザ、光変調器、受光器などの能動光素子を100以上集積した大容量光送受信回路が実現している。

その一方で、エレクトロニクスのようなスケール則を持たないフォトニクスでは、素子の小型化を単純に繰り返しても性能向上に直結せず、従来技術の延長で集積化を進める意義は薄れ始めている。同時に、次世代の光通信技術として、光の空間モードや偏波状態などの新しい自由度を利用した方式に注目が集まっており、PICに求められる機能が多様化している。さらには、光センシングや光量子演算など、新規応用分野においても大規模な光処理をチップ内で行うPICへの期待が高まっている。

## 研究の成果

このような状況の中、光ならではのユニ

タリ性、並進性、高速性に着目し、これらの特性を最大限活用した半導体PICの新しい可能性を模索してきた。その一環として、種々の光波合成・制御素子の研究開発を進めている。

### 1. 光集積フェーズドアレイ素子

アレイ状に並べた多数のアンテナの位相を制御することで電磁波の入出射角度を選択する「フェーズドアレイ技術」は、レーザや無線通信など、ラジオ波・マイクロ波帯において広く普及している。我々は、このようなフェーズドアレイを「光」の波長帯に適用し、半導体PIC上に実現する技術に早くから着目し、その高性能化に挑戦してきた[1]。その結果、100ポート光スイッチ[2]や8×8マトリクス光スイッチ[3]をはじめとする大規模光フェーズドアレイ素子の試作実証に世界に先駆けて成功した。数ミリ角のインジウムリン (InP) 系半導体チップ上に、光位相制御器135個、光増幅器100個、および、無数の光導波路を集積した100ポート光スイッチの写真を図1(a)に示す。半導体中のキャリア効果を利用することで、ナノ秒オーダーの高速スイッチングを達成した。さらには、全光

ルータへの応用に向けて、光パケットスイッチングや光バッファ機能も実証している[2, 4, 5]。一例として、1×16フェーズドアレイ型光スイッチを用いた全光バッファ実験の結果を図1(b)に示す。

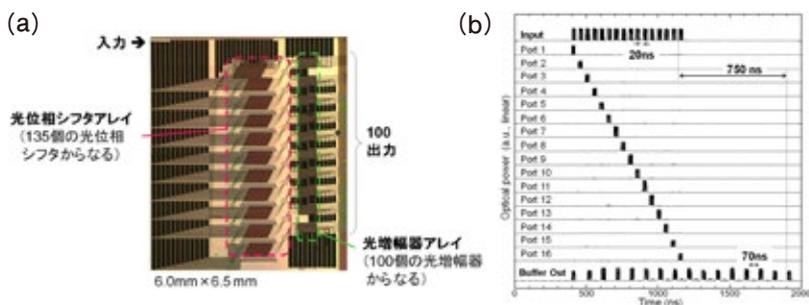
このような大規模かつ高速な光スイッチは、現在の光通信／データセンターネットワークにおける消費電力を抜本的に削減する技術として期待を集めている。さらに本技術を拡張することで、高速イメージング素子やユニバーサル光ユニタリ変換回路が実現できることを実証し[6]、LIDAR (3次元レーザセンサ) や光演算回路への展開を図っている。

### 2. 偏波制御／検出素子

従来のInP系半導体PICでは、単一の偏波状態の光を想定し、偏波多重などの処理は、チップ外に取り出した後に空間光学部品を用いて行っている。一方、次世代光通信システムでは、「偏波」という自由度をより積極的に利用した方式が検討されており、チップ内で光の偏波状態を自在に操り、検出する技術が求められている。

そこで我々は、InP系能動光素子との集積に優れるハーブリッジ型偏波変換器を提案し[7]、変調器や受光器を組み合わせた偏波制御素子の開発を進めている。例えば、位相変調器を組み合わせることで、動的に偏波状態を制御する「偏波変調器」が実現できることを実証した[8]。さらには、量子井戸型受光器を集積することで、チップ内の偏波状態を読み取る「偏波受信器」も実現できる[9]。これらの素子の応用例として、4値ストークスペクトル変調信号を受信した結果[10]を図2に示す。ポアンカレ球上の4点に対応する偏波状態を高速に検出できることを示している。

図1 (a) 光フェーズドアレイを用いた100ポート光スイッチ  
135個の光位相シフタを制御することで、100本の出力ポートに高速にスイッチングできる[2]  
(b) 光フェーズドアレイ型スイッチを用いた光バッファ実験結果[6]



これらの成果は、光の強度と位相にのみ情報をのせる現在の光通信のパラダイムを変え、3次元ストークス空間を活用した電力効率の高い通信方式の可能性を示唆する。さらには、偏波状態を利用したイメージングやセンシングなど、広範な産業分野への波及効果が期待される。

### 3. 微小プラズモニック光波合成素子

従来の半導体PICは、屈折率差による光の閉じ込めを利用するため、光の回折によって集積密度が制約を受ける。そこで我々は、光波合成PICの集積度を極限まで高める試みとして、金属の微小ナノ構造を用いたプラズモニック光波合成回路を提案し、シリコンチップ上で実証することに成功した。金属による共振器構造(光アンテナ)をチップ上に巧妙に配置することで、入射光を効率良く表面プラズモン波に変換し、波長毎に所望の光波面を合成することができる。これを利用することで、コンパクトな波長分離器や空間モード多重分離器が実現できる[11-13]。一例として、数 $\mu\text{m}^2$ の波長分離器の実験結果を図3に示す[11]。これらの成果は、プラズモニック技術を用いた光波合成PICの新しい可能性を示したものであり、学術的な意義が大きい。

### 今後の展望

本研究では、種々の光波合成・制御素子を新しく提案し、半導体PIC上で実証してきた。これらのテーマは、光が本質的に持つユニタリ性、並進性、高速性を半導体PIC上で最大限活用しようと模索する中で自然と生まれたものであり、いわゆるシーズ型の研究であったと言える。しかしここに来て、研究開始当初には予想だになかった多様な分野において、このような技術への期待が高まっている。

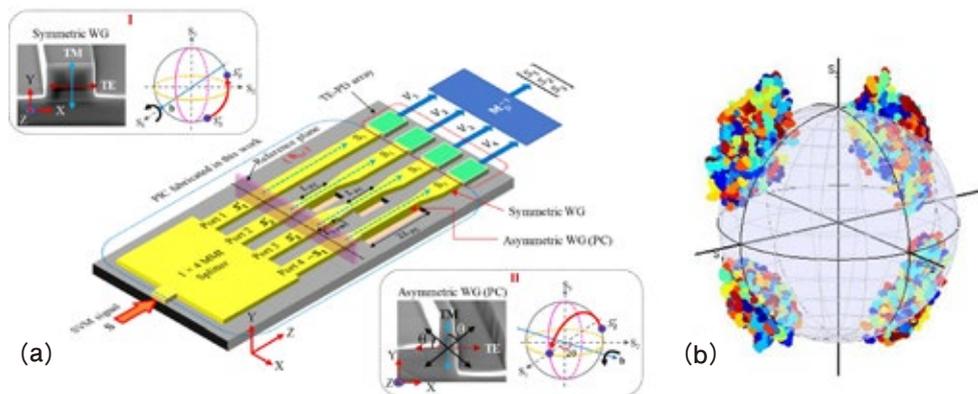
例えば、3次元の画像情報を高速に取得するLIDARは、将来の完全自動運転の実現に向けて鍵となる技術であるが、現在の機械式LIDARの小型化、低コスト化、高速化、高信頼化を一挙に達成する技術として、光集積フェーズドアレイへの期待が

図2 (a) InP集積偏波受信器の構成

ハーブリッジ型偏波変換器と受光器を同一チップ上に集積することで、入力光の偏波状態を検出することができる

(b) 4値ストークスベクトル変調信号(3 Gbaud)の受信実験結果

ポアンカレ球上の4値信号を高速に検出できることを実証した[10]



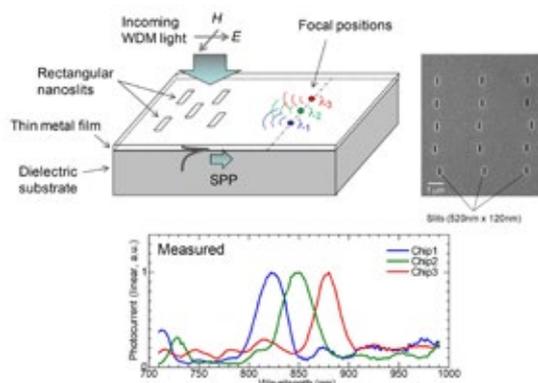
急速に高まっている。また、大規模な光ユニタリ変換回路を用いることで、量子シミュレーションや高速な機械学習が可能になることが提唱されており、次世代コンピューティング技術として関心を集めている。

このように、1980年代以来、光送受信器の大容量化に特化してきたPIC技術は、今日、大きな転換期を迎えている。光集積フォトリソの新時代を切り拓き、その礎を築くことを目指し、今後も研究を推進していきたい。

本研究は、東京大学大学院工学系研究科の中野義昭教授、および、スタンフォード大学Ginzton LaboratoryのDavid Miller

図3 微小金属共振器構造を用いたプラズモニック光波合成回路

入射光が波長毎に分離されて受光できることを実証した[11]



教授のご支援とご協力を仰ぎながら、多くの共同研究者と学生と共に実施したものである。この場を借りて深く感謝申し上げたい。

### References (参考文献)

- [1] T. Tanemura, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 20, 1063 (2008).
- [2] I. M. Soganci, et al., Laser & Photon. Rev., 6, 549 (2012).
- [3] M. J. Kwack, et al., Opt. Express, 20, 28734 (2012).
- [4] T. Tanemura, et al., Opt. Express, 17, 9454 (2009).
- [5] T. Tanemura, et al., J. Lightw. Technol., 29, 396 (2011).
- [6] R. Tang, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 29, 971 (2017).
- [7] M. Zaitso, et al., Opt. Express, 21, 6910 (2013).
- [8] M. Kazi, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 29, 1951 (2017).
- [9] T. Suganuma, et al., J. Lightw. Technol., in press.
- [10] S. Ghosh, et al., J. Lightw. Technol., in press.
- [11] T. Tanemura, et al., Nano Lett., 11, 2693 (2011).
- [12] T. Tanemura, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 19, 4601110 (2013).
- [13] P. Wahl, et al., Opt. Express, 22, 646 (2014).