



【寄稿】(エレクトロニクスソサイエティ賞受賞記)

電磁界理論およびマイクロ波分野

「高周波光線理論を適用した電磁界解析に関する先駆的な研究」

白井 宏 (中央大学)



この度、第22回エレクトロニクスソサイエティ賞を頂き、大変光栄に存じます。本賞の対象となりました「高周波光線理論を適用した電磁界解析に関する先駆的な研究」は、これまで研究を続けてきた成果をまとめ、「幾何光学的回折理論」[1]として出版したものを中心に評価をいただけたものと思います。同賞へ推薦していただいた方々、並びに審査にあられた方々に厚くお礼申し上げます。

学生時代に電子情報通信学会の全国大会で発表をさせて頂いてから、今までエレクトロニクスソサイエティの電磁界理論研究専門委員会を中心に研究活動を進めてきました。電磁界の散乱解析のうち、高周波漸近解析手法は、まだ電子計算機を用いて解析が十分でできなかった頃に提案され、1950年代になって大きく進歩した手法であります。今では収束の悪い級数計算、無限積分、複素積分等も電子計算機を用いて計算が可能ですが、当時(私もまだ生まれたか、生まれていなかったかの頃ですが)は、数表と手回しの計算機を使うのがやっつであり、解析数学の知識を総動員してなるべく計算しやすい形まで解を変形していました。こうした努力の中で生まれた解析法の一つにマクスウェルの方程式から、波数の逆べき数で展開する、いわゆる高周波漸近展開による解法が生まれ、その展開の初項が幾何光学波となり、高次項から回折波を表現する方法が生まれました[2]、[3]。

電子計算機が発達した現在でも、電磁波の放射・散乱問題を数値解析する場合に、散乱体の寸法が波長に比べて大きな場合には、サンプル数を十分取る必要があります、サンプル数が多くなれば、必然的に計算時間がかかるようになります。例えばITS分野の衝突防止のために利用されているミリ波レーダによる自動車の散乱応答解析、5Gの移動体通信で使われる28GHz帯の電波伝搬解析、レーダや宇宙天文分野で使われる大型反射鏡アンテナの指向性設計等においては、精度が高く、高速な解析手法が望まれます。こうした解析を工夫もなくしてこなすには、市販のパーソナルコンピュータでは記憶容量も足りなくなり、計算時間も数日かかることも珍しくありません。今でも開領域における解析では、無限に広い空間を形式的な境界面を置いて

模擬する吸収境界に対する精度の高い計算手法はありません。また数値解析の場合には、最後に得られた数値からその結果の妥当性を判断しなくてはならないわけです。これに対して高周波漸近解析手法は、波長が短くなって電波が光の性質に近い直進性や回折性を強く示すようになることを利用して解を組み立てるため、直感的な物理解釈が可能で理解しやすく、得られた結果の良し悪しを数値計算する前からある程度つかむことができます。更に散乱体の大きさが波長に比べて大きいほど、解析にかかる時間が短くなり、前述の数値解析と相補的な立場にあります。

こんな利点も持ちながらも、解析の途中の導出計算が難しく理解しにくいことや、とくに最近では、高速で安価な電子計算機の発達に隠れてしまい、解析に利用する人が少なくなっています。私が最初にこうした解析手法を勉強したのは学生時代ですが、その後いろいろな分野への適用や処方の拡張を考えていきました。

光線近似を使った解析においては、導波・共振構造をもつ散乱体に電波が入射した場合には、入射した光線が導波・共振構造体の壁において多重反射を起こすため、非常に収束の悪い表現となります。この収束の悪い級数表示は、ポアソンの和公式を使うことで、収束の良い表示へ変換することができることが示されました[4]。この公式はフーリエ変換の原関数と像関数の対応関係にある関数の帯域に関係しており、電磁界の問題に適用すると、多重反射光線の級数表示は、フーリエ変換領域において、導波・共振モードの級数表示に変換されます。導波・共振モードは、遮断周波数以下の周波数になると、非伝搬モードとなり急激に減衰します。したがって形式的には無限まで続くモード和は、非伝搬モードになるところまでで、収束の良いモード和となるわけです。こうした光線・モード変換は最初に平行平板導波管モードの開口部での反射の問題として定式化され[5]、その後ポアソンの和公式を使った形で開領域における変換[6]、閉領域での変換[7]に適用されました。またポアソンの部分和公式を用いると、更に収束性の良い表示を得ることができることも示されています[4]。

私の場合は、最初に飛行機による散乱解析から、レーダ散乱断面積を計算する際に、エンジンの吸入孔における散

乱解析に使うために、この光線・モード変換を使いました[8]、[9]。この解析の際に、幾何光学的回折理論を用いた回折波の表現が重要となりました。この解析では、開口に入射した電波が開口端で回折した回折波の内部多重反射波の和の表現を使って、吸入孔内の電磁界を導波管モード和に変換して、再度開口端から放射する電波を光線に再変換して求めるもので、開口部が波長に比べて大きくても、すべての光線・モード変換は開口端のみで行うために、効率よく解析ができます。加えて開口端における多重回折波を考慮することにより、開口部が波長に比べて比較的に狭い場合についても精度良く解析できること、さらに回折波の放射角を解析接続して複素角に拡張すると、非伝搬の導波モードの励振にも計算することができることもわかりました[10]。

こうした光線・モード変換を使った散乱解析法は、平板上の溝や厚みのあるスリットによる電磁波散乱問題への適用が試みられてきました[11]-[13]が、今後も各種の形状に適用が考えられると思われます。

最近考えていることは、数値解析手法や可視化の技術との組み合わせによる解析です。高速に計算できる利点を生かして、見に見えない電波の放射・伝搬・散乱現象を少しでも理解しやすい表現にできないかと考えております。

最後になりましたが、本賞をいただいた研究業績は私だけのものではなく、恩師や共同研究を一緒に行ってくれた研究者の方々、そして中央大学の白井研究室で一緒に勉強してきた学生の皆さんとの成果でもあります。心より感謝申し上げます。

文献

- [1] 白井 宏、208 p.,コロナ社、2015.
- [2] J. B. Keller, *Proc. Sympos. Microwave Optics*, Eaton Electronics Research Lab., McGill Univ., Montreal, Canada (1953).
- [3] J. B. Keller, *J. Appl. Physics*, vol.28, pp.426-444 (1957).
- [4] L. B. Felsen, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol.AP-32, no.8, pp.775-796 (1984).

- [5] H. Y. Yee, L. B. Felsen, and J. B. Keller, *SIAM J. Appl. Math.*, vol.16, pp.268-300 (1968).
- [6] T. Ishihara, L. B. Felsen, and A. Green, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol.AP-26, pp.757-767 (1978).
- [7] L. B. Felsen and A. H. Kamel, *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol.AP-29, pp.637-649 (1981).
- [8] H. Shirai and L. B. Felsen, *Wave Motion*, vol.9, issue 4, pp.301-317 (1987).
- [9] H. Shirai and L. B. Felsen, *Wave Motion*, vol.9, pp.461-482 (1987).
- [10] H. Shirai, Y. Matsuda, R. Sato, *IEICE Trans. on Electronics*, vol.E80-C, no.1, pp.190-192 (1997).
- [11] H. Shirai and K. Hirayama, *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E76-B, no.12, pp.1558-1563 (1993).
- [12] H. Shirai, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.8, no.11, pp.1443-1464 (1994).
- [13] H. Shirai, M. Shimizu and R. Sato, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.64, no. 11, pp. 4828-4835, (2016).

著者略歴：

1980年静岡大学工学部電気工学科卒、1982年同大学院工学研究科修士課程了。1986年米国 Polytechnic 大（現 NYU Tandon School of Engineering）博士課程了。Ph.D. その後同大ポスドクトラル研究員。1987年から中央大学に勤務。現在、理工学部教授、国際センター所長兼務。本会基礎・境界ソ編集特別幹事、和文論文誌編集委員長、ソ副会長、ソ誌編集委員長、英文誌論文編集委員長、エレンソ国際担当幹事、電磁界理論研究会委員長等を歴任し、現在基礎・境界ソ誌編集委員会顧問。電磁波散乱・伝搬解析、高周波漸近解析等の研究に従事。著書に「応用解析学入門」、「電磁気学」、「幾何光学的回折理論」、「理工系の技術文書作成ガイド」（すべてコロナ社）等がある。IEEE シニア会員、電気学会会員。



【寄稿】(エレクトロニクスソサイエティ賞受賞記)

光半導体およびフォトニクス分野

「レンズ集積光デバイスとそれを用いた小型・省電力
光トランシーバの先駆的研究」

李 英根 (日立製作所)



この度は栄えある 2019 年度エレクトロニクスソサイエティ賞を頂き、誠に光栄に存じます。学会関係者の皆様に心より御礼申し上げます。今回の受賞対象となりました「レンズ集積光デバイスとそれを用いた小型・省電力光トランシーバ」の研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「次世代高効率ネットワークデバイスの技術開発」(2007 年度～2011 年度)で行ったものです。本賞の受賞対象者数に制限があるため、レンズ集積光デバイスに係った私を含む3名(日立製作所 篠田和典氏、日本ルメンタム 足立光一朗氏)のみ受賞となりましたが、本研究の最終目標であった小型・省電力光トランシーバの開発には、電子回路設計、モジュール設計・実装、伝送評価などに多くの方が携わりました。本来、これらすべての方が受賞者に名を連ねるべきで、今回の受賞はこれらの方を代表して受賞したものと考えています。

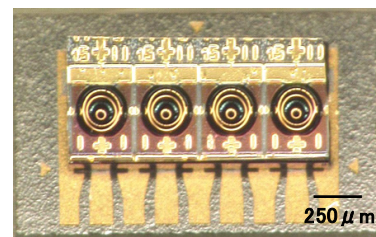
この場をお借りして、本研究に携わったすべての方に御礼申し上げます。私はこの研究開発の中で、レンズ集積フォトダイオードの開発を担当致しました。設計、作製、評価を通して行いましたが、実はこの仕事の前までは、フォトダイオードに関しての知識は乏しく、そのうえ半導体プロセスを行ったことがありませんでした。しかし、弊社で蓄積された確かな技術と周りの優秀な技術者のおかげで、何とか無事担当の仕事を全うすることができました。サポート頂いた方には本研究と関係ない方も多く、貴重な時間を割いて頂きました。御礼申し上げます。

では、以下に「レンズ集積光デバイスとそれを用いた小型・省電力光トランシーバ」の研究開発について、簡単ではありますが紹介させていただきます。

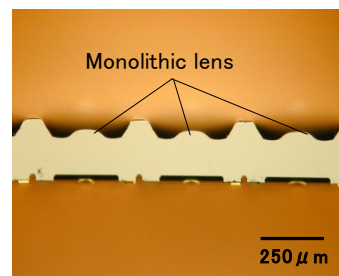
研究業績の要約

筆者らは、光通信用トランシーバの小型化と低消費電力化に向け、レンズ集積型半導体光素子(レーザとフォトダイオード)を開発しました。エッチングプロセスを検討し、InP 結晶からなる半導体レーザ/フォトダイオードの基板側に、設計仕様通りの曲率をもつ放物面形状に加工するこ

とに成功しました。異方性の強い化合物半導体結晶を、高精度に加工する技術を実現したことに価値があると考えております。本技術を用いて、25 Gb/s×4ch のレンズ集積型面射出レーザーアレイ(図1)およびレンズ集積型フォトダイオードアレイを開発し、これらを搭載することで、大きさが従来比 1/100 (サイズ: 14 mm×9 mm)、消費電力が従来比 1/10 の超小型かつ低消費電力の 100 Gb/s トランシーバ(図2)を実現しました。



(a)



(b)

図1 レンズ集積レーザーアレイ(a)上面写真、(b)断面写真

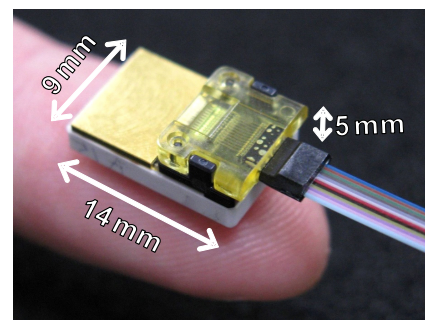


図2 100 Gb/s (25 Gb/s×4ch) 光トランシーバ

研究背景と経緯

インターネットの普及によるデータトラフィックの爆発的な増大に伴い、イーサネットならびに光インターコネクションに用いる光インターフェースの更なる大容量化が必要不可欠です。光インターフェース装置のスループットはチャンネル当りの速度以外に、素子の消費電力で決まる実装密度により制限されるため、半導体光デバイス（レーザ/フォトダイオード）の高密度実装性がシステム総合性能を決める鍵の一つとなります。

このような流れを受けて、筆者らは、高密度実装が可能なレンズを集積化した半導体レーザとフォトダイオードを提案、作製プロセスの確立、100 Gb/s 光インターフェースで要求される性能を実証しました。さらに、作製した 25 Gb/s×4ch のレンズ集積型レーザアレイ、およびフォトダイオードアレイを用いて大きさが従来比 1/100、消費電力が従来比 1/10 の超小型かつ低消費電力の 100 Gb/s 光トランシーバを実現しました。

主な研究業績

ここでは、上記の小型・低消費電力 100 Gb/s 光トランシーバの実現を可能にしたレンズ集積光デバイス化技術の各研究業績について述べます。

篠田氏は 2007 年頃から簡易実装に対応したレンズ集積型面出射レーザの開発を目的として、半導体レーザにレンズを集積形成する要素技術の検討を開始しました。CH₄ 系反応性イオンエッチングと HBr 系ウエットエッチングの組合せにより異方性の強い InP 結晶にレンズ形状（平滑性と曲率）を実用化が可能なレベルまでに高精度に作製する技術の開発に成功しました [1]。

さらに、足立氏と篠田氏を中心に、開発したレンズ形成技術を用いて、レンズ集積型面出射レーザを試作し、ビーム拡がり角が 4°×4°の狭窄動作実証に成功しました[1]。その後、厚膜回折格子を集積した短共振器構造の適用ならびに高バイアス印加による周波数応答帯域の拡大により、100 °C までの 25 Gb/s 動作の実証[2]かつ 55 °C における 1.3 μm 波長帯の面出射型レーザで 40 Gb/s の動作を実証しました [3]。

レンズ集積型フォトダイオードに関しては、筆者を中心に、レンズ集積型面出射レーザと同様のレンズ形成技術を用いて開発を進めました。従来の簡易実装向きの面型フォ

トダイオードでは、高速化と高感度化、ならびに、高速化と実装性の間にトレードオフの関係があり、これら三つ全てを満足させることは困難でした。そこで、誘電体保護膜を用いた界面平坦化技術ならびに多重反射による高反射ミラー形成技術とレンズ集積化技術により、高速（帯域 35 GHz）、高感度(0.8 A/W)、実装容易性（位置ずれ許容量：26 μm）を実現するレンズ集積型フォトダイオードの開発に成功しました [4]。

2010 年には、上記のレンズ集積型光デバイスの 4ch アレイとアナログフロントエンド回路と速度変換機能を一体化した 65 nm CMOS 回路を用いて、超小型 25 Gb/s×4ch 光トランシーバ（サイズ：14 mm×9 mm、従来比：1/100）を作製し、20 mW/Gb/s（従来比 1/10）の低消費電力で、25 Gb/s/ch の光伝送動作を実証しました [5]。

本研究の位置づけと開発技術の現状

他のレンズ集積化方法として、他社からも報告されてきました。一つは多段形状のためプロセス工数が多く、量産性に難がありました。もう一つは加熱によりレンズ形状に整形したレジストパターンをドライエッチングで半導体に転写する方法であり量産性に優れるが、曲率制御が難しく、レンズが素子表面から突出するためレンズ表面の品質保持の点で難がありました。一方、我々の技術は、ドライエッチングとウエットエッチングを用いることで、これら他社技術の欠点を克服しました。

本レンズ形成技術ならびにそれを用いたレンズ集積型光デバイス技術は、これらを用いて、一早く小型で高速(25 Gb/s/ch) の光トランシーバが実現できることを示したという意味で価値があったと考えています。このレンズ集積光デバイス技術は、日本ルメンタムに移管され、100GE 小型光トランシーバに適用されています。

参考文献

- [1] K. Shinoda, K. Adachi, Y. Lee, T. Kitatani, T. Fukamachi, H. Yamashita, T. Takemoto, F. Yuki, T. Sugawara, S. Tanaka, and S. Tsuji, “Monolithically lens integrated photonic device arrays for compact optical transceivers,” Jpn. J. Applied Physics 52, Vol. 52, 022701, 2013.

- [2] K. Adachi, K. Shinoda, T. Fukamachi, T. Shiota, T. Kitatani, Y. Matsuoka, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, "100°C, 25 Gbit/s Direct Modulation of 1.3 μm Surface Emitting Laser," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference 2010, San Jose, CA, CME4, May 2010.
- [3] K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, "40-Gb/s/ch Operation of 1.3- μm four-wavelength lens-integrated surface-emitting DFB Laser Array," 2012 IEEE International Semiconductor Laser Conference, San Diego, CA, TuB5, Oct. 2012.
- [4] Y. Lee, K. Nagatsuma, K. Hosomi, T. Ban, K. Shinoda, K. Adachi, S. Tsuji, Y. Matsuoka, S. Tanaka, R. Mita, T. Sugawara, and M. Aoki, "A 35-GHz, 0.8-A/W and 26- μm Misalignment Tolerance Microlens-Integrated p-i-n Photodiodes," The IEICE Transaction on Electronics, Vol. E94-C, No. 1, pp. 116-119, Jan. 2011.
- [5] T. Takemoto, F. Yuki, H. Yamashita, S. Tsuji, Y. Lee, K. Nido, M. Namiwaka, T. Kaneko, T. Sugimoto and K. Kurata, "100 Gbps CMOS transceiver for multi-plane optical backplane system with a 1.3 cm² footprint," Optics Express, Vol. 19, No. 26, pp. B777-B783, 2011.

著者略歴 :

1986 年広島大学工学部電気電子工学科修了。1991 年米国パデュー大学電気電子工学部 PhD 修了。同年広島大学工学部助手。1994 年日立製作所に入社、中央研究所に勤務。光通信デバイス、光計測の研究に従事。2011 年 16th OECC Best Paper Awards、第 37 回(2015 年)応用物理学会論文賞など受賞。



【寄稿】(エレクトロニクスソサイエティ賞受賞記)

回路およびエレクトロニクス分野

「時間領域信号処理に関する先駆的研究」

池田 誠 (東京大学)



この度は平成 30 年度 (第 22 回) エレクトロニクスソサイエティ賞を頂き、誠に光栄に存じます。推薦頂きましたルネサスエレクトロニクス (株) 日高秀人氏を始めとするエレクトロニクスソサイエティ関係各位、選考委員各位に厚くお礼申し上げます。また今回受賞の対象となりました時間領域信号処理に関する先駆的研究は、東京大学で実施したもので、研究をともにした研究室教員、研究員、学生はじめ多くの方々に深く感謝申し上げます。

以下では、本賞の対象となりました時間領域信号処理に関する先駆的研究について、時間領域最小ハミング距離検出回路に関する研究、時間領域信号処理輝線検出回路を活用した三次元形状計測用イメージセンサに関する研究、最粒度のハンドシェークというコンセプトに基づくゲートレベルハンドシェーク型非同期制御方式の研究に関して紹介いたします。

時間領域最小ハミング距離検出回路[1],[2]

時間領域信号処理は、半導体プロセスの微細化の進展に伴う電圧方向のダイナミックレンジが不十分になってきている状況、一方で半導体プロセスの微細化に伴うトランジスタ動作の高速化に伴い大きな可能性を秘めた技術となっています。ここで紹介する、時間領域最小ハミング検出回路は、インバーター遅延を活用することで Digital-to-Time (距離—時間) 変換を利用し、CAM(Contents Addressable Memory)を実現する提案です(図 1)。これは、今で言う In-Memory-Computing の概念を実現したものであり、同様の機能をアナログ電流加算やパルス幅変調による実現例は存在していましたが、インター遅延を活用することで、よりばらつきに強い検索が可能であることを示しています。これをさらに階層探索によりより大きなデータに対する検索を実現する回路への展開を行っています(図 2)。また、この考え方を次に紹介する三次元形状測定向けイメージセンサにおける輝線検出回路としての応用や、リングオシレータにおけるパルスの消滅時間を活用したプロセスモニター回路[3]への展開などを行っています[4]。

三次元形状計測用イメージセンサ

時間領域信号処理の応用例として、次に紹介するのは、スマートイメージセンサへの応用です。我々の研究グループでは三角測量法の一つである光切断法を用いた高速、実時間三次元形状測定を実現するイメージセンサとして、揮線を高速に検出するために、列並列に時間領域検出回路を適用したイメージセンサを提案し、3次元形状計測速度として 1k-rangemap/sec (1秒間に 1000枚の形状画像の取得が可能)を実現しました(図 3)。この性能は発表当時としては世界最高速度性能を示すもので、当時 10k~100k ピクセルの解像度を有する 3次元形状計測としては 60 rangemap/sec 程度、2k ピクセル程度の低い解像度のもので 100 rangemap/sec 程度が最高性能であったため、100k ピクセルを超える解像度において 1k rangemap/sec の実現は既存結果と比較して 1桁の性能向上を実現したものとなっています。

ゲートレベルハンドシェーク型非同期制御方式[6],[7]

時間領域デジタル信号処理分野においては、最粒度のハンドシェークというコンセプトに基づきゲートレベルハンドシェーク型非同期制御方式の提案を行い、それを用いた非同期型 FPGA を実現し、高速性能、高い雑音耐性、低電圧における高いばらつき耐性といった特性を実証してきました(図 4)。一般的にはハンドシェーク回路は非同期回路方式において、面積、遅延時間の面で大きなオーバーヘッドになり得るほか、信号の分岐において分岐先からの信号の調停回路などの実現が、非同期回路の実用に向けた大きな課題となり続けている。一方本方式においては、ダイナミック回路を用いてゲートレベルでの演算終了判定を実現するため、ハンドシェーク回路が簡易なものとなることに加え、回路の Fan-out 数を制約することで、調停回路の実現を容易化することも実現しています。特に、FPGA のような規則性の高い回路においてはより効果的に実装が可能であり、さらに、ゲート単位でのパワーゲーティングによる消費電力の極小化を実現し、既存の同期式の FPGA と比較しても演算あたりのエネルギー消費電力を大幅に削減できる可能性を実測により実証しているほか、

ゲート単位での動作エラー検出による動作時のエラー耐性の向上などを実現しており、極限環境における応用の可能性を示しています。また、完全バランス動作を実現していることから、暗号回路など、消費電流、電磁界放射による情報流出が問題となる応用への適用が期待されており、RSA 暗号回路を実現し、攻撃耐性を実証しています。

大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)

これらの研究はいずれも 1996 年 5 月に発足した東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)の活動を抜きにしては語れません。VDEC は[8]に詳しいですが、1996 年 5 月 10 日に、東京大学に全国共同利用施設として設置され、以降集積回路の設計支援に関わる研究・教育に取り組み続けてきました。特に、VDEC およびその設立直前 2 年間実施された NEDO プロジェクトによるチップ設計試作パイロットプロジェクトによるチップ試作の機会は、私自身にとって研究上大きなきっかけになっただけでなく、日本全国における集積回路設計研究教育に対して大きな高揚感を与えるものになったことは間違いありません。チップ試作においては、その後各方面の尽力により 1.2 μm (モトローラ、オン・セミコンダクター：1996 年～2011 年)、0.8 μm (オン・セミコンダクター：2011 年～現在)、0.6 μm (ローム：1997 年～2001 年)、0.6 μm Bipolar (2002 年～2006 年：NEC)、0.5 μm (1994 年～2002 年：NTTEL、日立北海)、0.35 μm (1998 年～2000 年：日立)、0.35 μm (1999 年～2006 年：ローム)、0.25 μm BiCMOS (2006 年～2008 年：日立)、0.18 μm (2001 年～2005 年：日立)、0.18 μm (2005 年～現在：ローム)、90nm (2004 年～2007 年：ASLPA)、0.15 μm SOI (2004 年～2006 年：OKI)、90nm (2004 年～2007 年：ASLPA)、65nm (2008 年～2013 年：eShuttle)、65nmSOTB (2015 年～2020 年：ルネサス)、40nm (2010 年～2012 年：NECEL・ルネサス) と試作を続けてきました(図 5)。その間、主要な EDA ベンダーとの日本全国の国公立大学・高専をサイトとみなすアカデミックライセンス契約により、大学における教育・研究において EDA ツールが手軽に使える環境が整っています(図 6)。これらは、AIoT 時代における、特化した賢いハードウェアの実現において不可欠な社会インフラであるとも考えられます。

なお、VDEC は 2019 年 10 月 1 日に発展的改組により東京大学大学院工学系研究科附属システムデザイン研究センター(d.lab)の基盤設計研究部門として、その活動を継続しています。

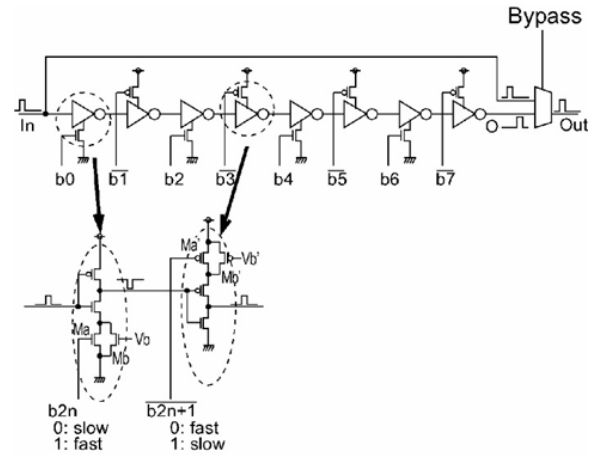
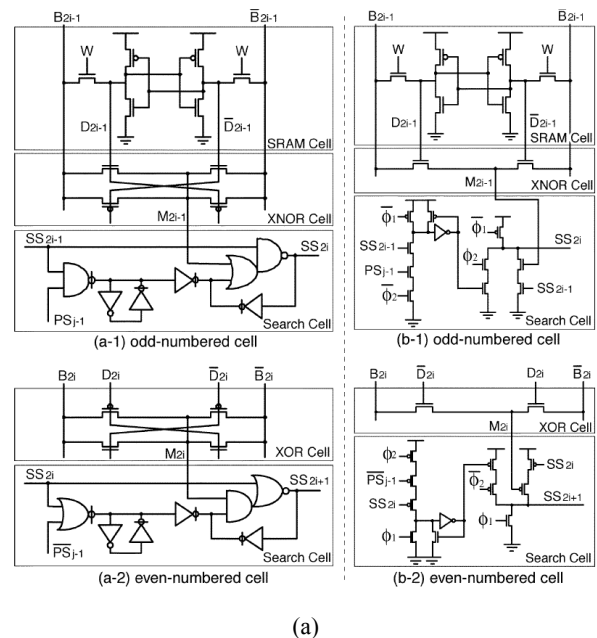
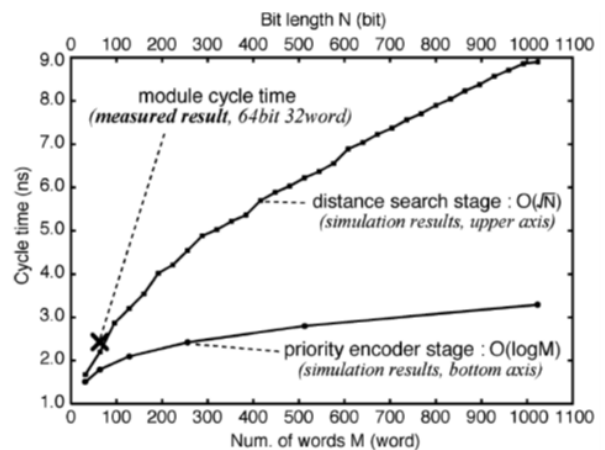


図 1 インバータチェーンを用いた距離-時間変換回路[1]

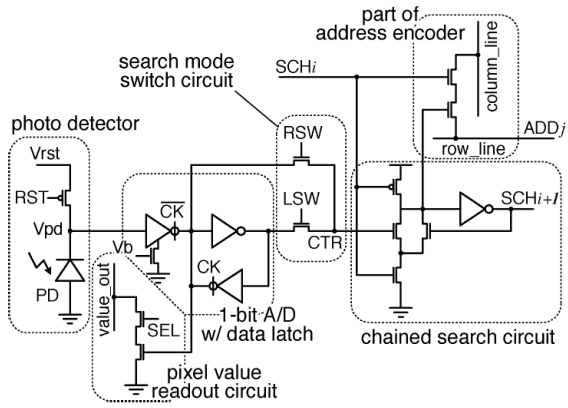


(a)

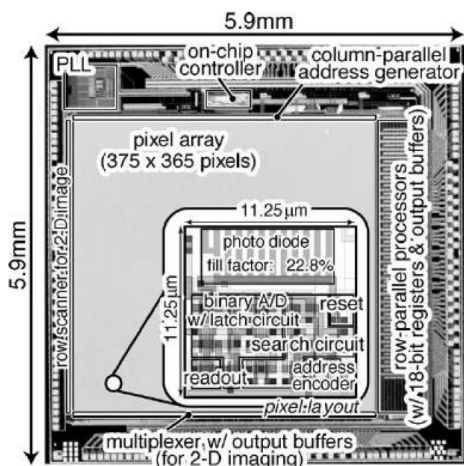


(b)

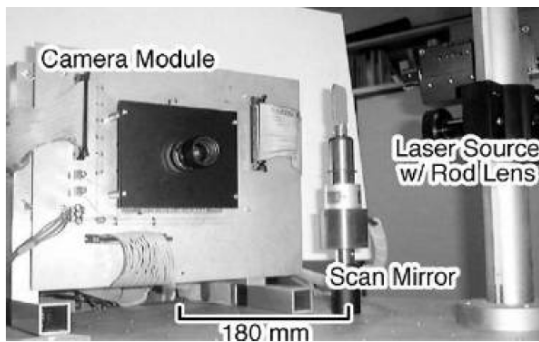
図 2 (a) 階層探索を可能とした CAM および (b) 0.18 μm CMOS による実測結果[2]



(a)



(b)



(c)

図3 列並列揮線検出機能を有するイメージセンサ[5]

(a) 検出回路、(b) チップ写真、(c) 評価環境

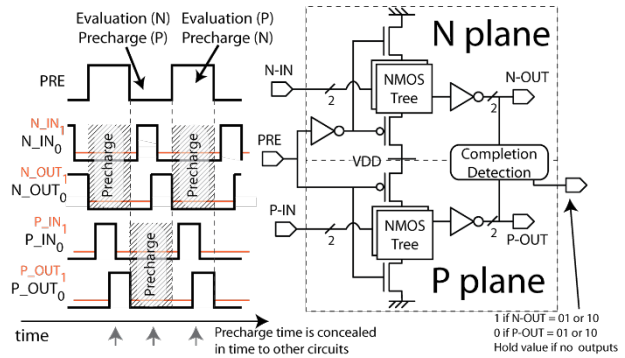
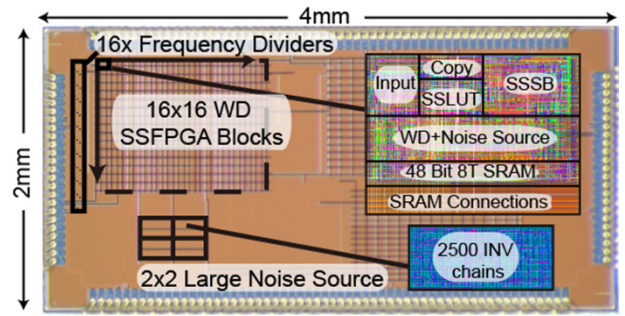


図4 ゲートレベルパイプライン制御方式とそれを適用したFPGAチップ写真[6],[7]

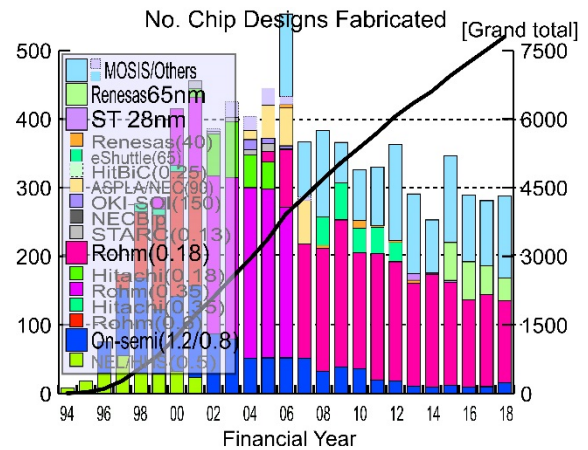


図5 チップ試作品種数の推移

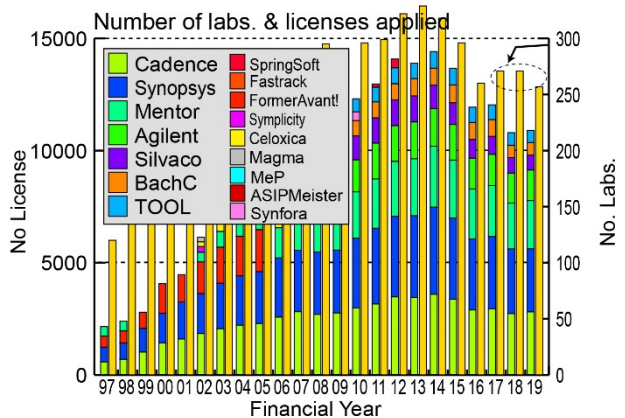


図6 EDA利用の推移

参考文献

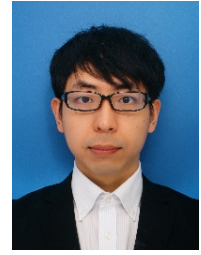
- [1] M. Ikeda and K. Asada, "Time-Domain Minimum-Distance Detector and Its Application to Low Power Coding Scheme on Chip Interface," 24th European Solid State Circuit Conference(ESSCIRC 1998), pp. 464-467, Sep. 1998.
- [2] Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "A High-Speed and Low-Voltage Associative Co-Processor With Exact Hamming/Manhattan-Distance Estimation Using Word-Parallel and Hierarchical Search Architecture," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.39, No.8, pp.1383-1387, Aug. 2004.
- [3] T. Iizuka, J. Jeong, T. Nakura, M. Ikeda and K. Asada, "All-Digital On-Chip Monitor for PMOS and NMOS Process Variability Utilizing Buffer Ring with Pulse Counter," IEICE Trans. on Electronics, Vol. E94-C, No.4, pp. 487-494, Apr. 2011
- [4] K. Asada, T. Nakura, T. Iizuka, and M. Ikeda, "Time-domain approach for analog circuits in deep sub-micron LSI," IEICE Electronics Express, V. 15, No. 6, pp. 1-21, March 2018.
- [5] Y.Oike, M.Ikeda, and K.Asada, "A 375 x 365 High-Speed 3-D Range-Finding Image Sensor Using Row-Parallel Search Architecture and Multi-Sampling Technique," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.40, No.2, pp.444-453, Feb. 2005.
- [6] B. Devlin, M. Ikeda and K. Asada, "A 65 nm Gate-Level Pipelined Self-Synchronous FPGA for High Performance and Variation Robust Operation," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 46, No.11, pp. 2500-2513, Nov. 2011.
- [7] B. Devlin, M. Ikeda and K. Asada, "Energy Minimum Operation with Self Synchronous Gate-Level Autonomous Power Gating and Voltage Scaling," IEICE Trans. on Electronics, Vol. E95-C, No.4, pp. 546-554, Apr. 2012.
- [8] 池田, "VDEC の概要と沿革", 電子情報通信学会誌, Vol. 99, No. 9, pp. 886-890, 2016年9月.

著者略歴 :

1991年3月東京大学工学部電子工学科卒業、1993年3月同大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了、1996年3月同博士課程修了、博士(工学)。1996年4月から東京大学助教、現在東京大学教授。この間2001年~2002年英国ケンブリッジ大学客員研究員。非同期式デジタル回路、スマートイメージセンサ、ハードウェアセキュリティに関する研究に従事。電子情報通信学会シニアメンバー、IEEE Senior Member。電子情報通信学会学術奨励賞、論文賞など受賞。



【寄稿】(ELEX Best Paper Award 受賞記)



「Demonstration of true-eigenmode propagation in few-mode fibers by selective LP mode excitation and near-field observation」

山口 拓人 (東京大学)

この度は IEICE Electronics Express に投稿させていただいた論文を Best Paper Award にご選定いただき大変光栄に思います。そして、選定に携われた委員会の方々、ELEX 編集委員の皆様方に深く感謝申し上げます。今回受賞の対象となりました論文は、数モードファイバ(FMF: few-mode fiber) 中を伝播する固有モードの観測に関して報告しています。こちらは、私が横浜国立大学理工学部在籍していた際に取り組みました卒業研究での成果に当たります。

最初に本研究の背景を述べますが、近年 IoT や AI に代表されるような情報社会のめざましい発展に伴い、光通信における伝送容量の枯渇が深刻な問題となっています。これを解決するためにファイバのコア数を増やしたマルチコアファイバによる空間多重伝送や、FMF を用いたモード多重伝送などの提案が多くなされてきました。ここで、従来のモード多重伝送では直線偏光の光源を用いるため、基底として LP (linearly polarized) モード[1]を用いてきました。しかし出射端ではもはや LP モードではなくなるので、信号処理によって伝送チャネルを復元する Multiple-Input Multiple Output (MIMO) 信号処理が不可欠でした。この原因はランダムなモード混合が起こるためと考えられていましたが、信号を回復させる目的で MIMO を導入することは伝送遅延の発生やオンライン処理が難しくなるといった欠点がありました。

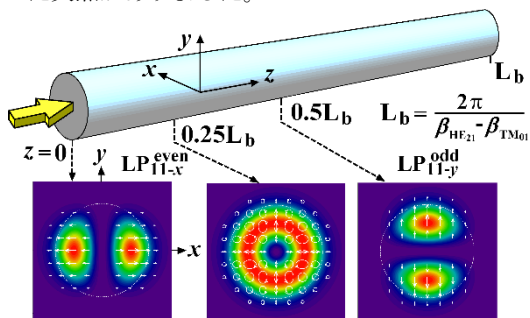


図1 LP_{11-x}^{even}モードを励振した時の電磁界分布の変化[4]

この問題の一つの解決策として、LP モードを固有モードとして保持できる楕円コア FMF を用いた LP モード多重伝送方法[2]が報告されています。ここで我々は、LP モードが HE, EH, TE, TM 等の厳密固有モード[3]の線形結合で構成されることに着目しました。ここでは入射モードを構成する厳密固有モード間の伝播定数の違いによってフ

ァイバ中を伝播する光の電磁界分布が変化するため(図1)、MIMO の必要性が説明可能であると考えました。そこで我々のグループは厳密固有モードを基底とした MIMO を必要としないモード多重伝送方式をすでに提案しました[4]。

しかし、実際の FMF では様々な摂動によって厳密固有モード間でのモード変形が起こりえます。ここで考えられる摂動としては例えば曲がりやねじれ、コア真円性の劣化、製造時の残留応力、コア・クラッド界面における非平滑性などが挙げられます。そこで今回我々は、実際の FMF を用いてファイバ中を伝播する固有モードの観測を行いました。

観測のために我々は図2のような測定系を構築しました。まず LP モード選択励振器を用いて LP₁₁ モードを励振させてファイバに入力します。その後、入力側で波長を変化させたときに射出端で近視野像(NFP)を赤外線カメラで観察しました。ここでは射出端付近に回転可能な偏光板を挿入することで、偏光成分の分布を確認することができます。

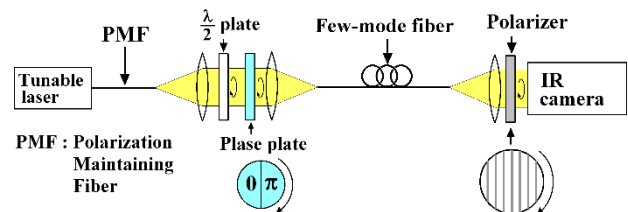


図2 NFP 観測のために用いた観測系

本論文では LP₀₁ と LP₁₁ モードが励振可能な 2-LP モード単一コア FMF (階段および分布屈折率型の 2 種)、LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂ モードが励振可能な 4-LP モード 12 コア分布屈折率型 FMF[5]を用いて励振実験を行った結果について報告しています。ここで、LP₁₁ モードを構成する厳密固有モードは TMH 系列(TM₀₁, HE₂₁^{even})と TEH 系列(HE₂₁^{odd}, TE₀₁)に分類することができ、例えば TMH 系列は厳密固有モードの線形結合で表記される LP_{11-x}^{even}モードと LP_{11-y}^{odd}モードに対応しています[4]。もしもファイバ入射モードが LP_{11-x}^{even}モードであった場合、図1に示したように厳密固有モード間の伝播定数差に起因して、LP_{11-x}^{even}モードと

LP_{11-y}^{odd} モードとの間で周期的なモード変形が生じます。ここで、その周期的変化の中間状態としてドーナツ型の電磁界分布が現れ、このモードは場所に依存した楕円偏光状態を有しています。要するに、LPモードが固有モードとして伝播していない場合には厳密固有モード間での干渉が見えることが期待されます。このことを利用して、我々の測定系では出射端の偏光板を回転させることによって偏光成分を確認し、固有モードの同定を行いました。

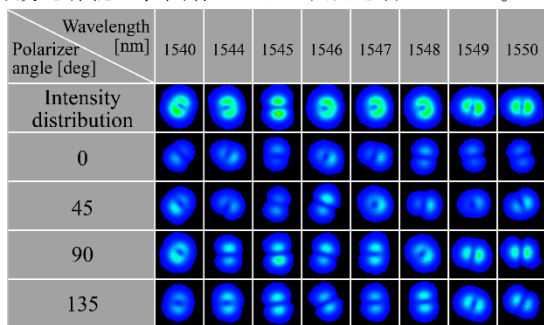


図3 単一コア階段屈折率型 FMF に LP_{11-x}^{even} モードを励振した場合に、ファイバ出射端で観測された NFP

まず、我々は単一コア FMF を用いて入射側で TMH 系列の LP_{11-x}^{even} モードを励振させ、波長を変化させた際の NFP の観測を行いました。図3は階段屈折率型 FMF での励振実験の結果を示していますが、波長 1547 nm のときにドーナツ型の中間状態のパターンが観測され、厳密固有モード間での干渉が起こっていることが分かりました。TEH 系列を励振した場合や分布屈折率型 FMF でも同じような結果が得られ、これらは上記のモード理論に即した結果でした。ここで、階段屈折率型 FMF についてコアの楕円率を確認したところ 1.9% となっていました。

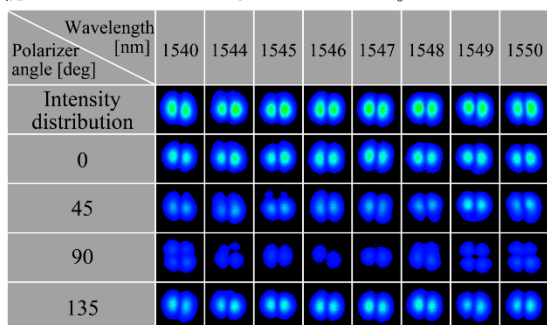


図4 4-LPモード12コア FMF で偏光主軸に合わせて LP_{11-x}^{even} モードを励振した場合に、ファイバ出射端で観測された NFP

一方、我々は同じ実験を 4-LP モード 12 コア FMF でも行ったところ、ある軸に沿うように LP_{11-x}^{even} モードを励起した場合に波長を変化させても出射されるモードパターン

および偏光成分の分布が変化しない現象を確認しました(図4)。一方、この偏光主軸から 45 度傾けて同様のモードを励振したところ、観測される NFP が周期的に変化していました。この 12 コア FMF も同様にコア楕円率を確認したところ平均して 2.8% であり、単一コア階段屈折率型 FMF と大きく変わらないことから、偏光主軸はコアの楕円変形によって生じたものではないと推定しました。実際に我々は Mathieu 関数を用いた楕円柱座標による解析も行って、楕円率が 4% 程度の場合にも厳密固有モードが LP モードに変形しないことを確認しました。

本論文を発表した後、我々のグループでは別の 19 コア FMF でも励振実験を行い、同様に LP_{11} モードの偏光主軸が存在することを確認しました。このように主軸が発生する要因について、我々は内部応力による複屈折の影響や、コアの位置ずれによる効果についても考察しました[6]が、いまだ明確な原因の特定に至らず今後の課題といえます。

本研究の遂行にあたりまして、多大なるご指導を賜りました國分泰雄教授(現・中部大学副学長)に深く感謝申し上げます。また、単一コア FMF をご提供いただいたフジクラの松尾昌一郎氏、丸山遼氏にも感謝申し上げます。そして本論文の共著者である三浦聖矢氏をはじめとして、國分研究室に在籍されていた皆様方には貴重なご助言・ご助力を頂き、日頃の研究生活においても大変お世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] D. Gloge, *Appl. Opt.* **10**, 2252 (1971).
- [2] E. Ip, *et al.*, *Opt. Express* **23**, 17120 (2015).
- [3] E. Snitzer, *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 491 (1961).
- [4] Y. Kokubun, *et al.*, *IEICE Electron. Express* **13**, 20160394 (2016).
- [5] T. Sakamoto, *et al.*, *OFC2016, Tech. Dig.*, 2016, Th5A.2.
- [6] Y. Kokubun, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 08PA05 (2018).

著者略歴:

2017年横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科卒業。2019年東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士課程修了。同年より同専攻博士課程に在籍。現在は半導体トポロジカルフォトリニクスの研究に従事。2017年 Microoptics Conference にて The MOC Student Award を受賞。2018年同国際会議にて Best Paper Award を受賞。



「Fold-back 型アレイ導波路回折格子を用いた 1×2 Si 波長選択光スイッチ」

中村 文 (慶應義塾大学)



はじめに

この度は ELEX Best Paper Award 2018 に選定していただき、誠に光栄に存じます。選出していただきました ELEX 選考委員の皆様、ご推薦していただきました方々並びにエレクトロニサエティの皆様へ深く感謝申し上げます。また、本研究は産業技術総合研究所と慶應義塾大学津田研究室の共同研究による成果であり、デバイスの作製をしていただきました産総研の共同研究者の方々、ご指導いただきました津田裕之教授、ご助力いただきました研究室の先輩方に心から感謝申し上げます。

今回 Best Paper Award をいただきました論文では、平面光回路での小型波長選択光スイッチ(WSS)の実現に向けて、導波路交差数を削減した Fold-back 型 WSS の設計・試作に取り組んでおり、本寄稿ではその概要、今後の研究について述べさせていただきます。

研究背景：波長選択光スイッチ(WSS)

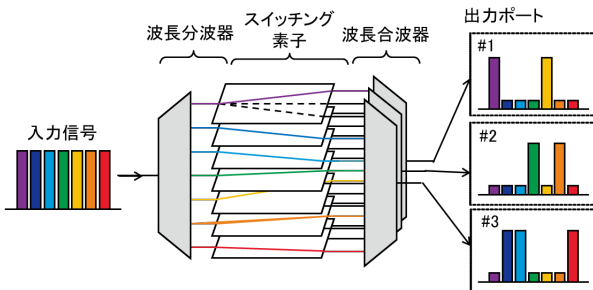


図 1 波長選択光スイッチの構成

波長選択光スイッチ(WSS: Wavelength Selective Switch)とは図 1 のように複数の波長信号を含む入力光を波長ごとに任意の出力ポートへ振り分ける機能を持つ光スイッチである。ネットワークの分岐点で WSS を用いることで、波長ごとの Add・Drop と Through の切り替えや経路の切り替え等が物理的な経路の組み換えなしに可能になるため、より柔軟なネットワーク構成を実現することができる。近年、スマートフォンの普及や動画視聴の増加によって、インターネットトラフィックは年々増加しており、データセンターやメトロネットワークなどの大容量ネットワークにおいて、WSS を利用した高効率な通信の実現が求められている。

現在商用化されている WSS は LCOS(Liquid crystal on Silicon)をスイッチング素子として用いる自由空間型 WSS[1]であるが、レンズ等の光軸合わせのために高い生産精度を求められることや大型であることが課題となっている。そこで自身は学部・修士課程を通じて所属研究室にて CMOS プロセスでの大量生産に適したシリコン導波路を用いた小型 WSS の設計・試作に取り組んできた[2,3]。

導波路交差数削減型 WSS の提案

当該論文では、マッハツェンダー型光スイッチとアレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed waveguide gratings)を用いた従来構成[4]より導波路交差数を削減した Fold-back 型構成の提案・作製を行っている。導波路交差は、光が伝搬する導波路同士の交差のことであり、平面光回路においてクロストークや損失の原因となる。特に WSS においては、交差導波路数は波長チャネル数や出力ポートの増設に伴って増加するため、導波路型 WSS の拡張を阻む要因となっており、導波路型 WSS の実現には交差導波路数の少ないもしくは交差導波路を含まない構成が必要である。

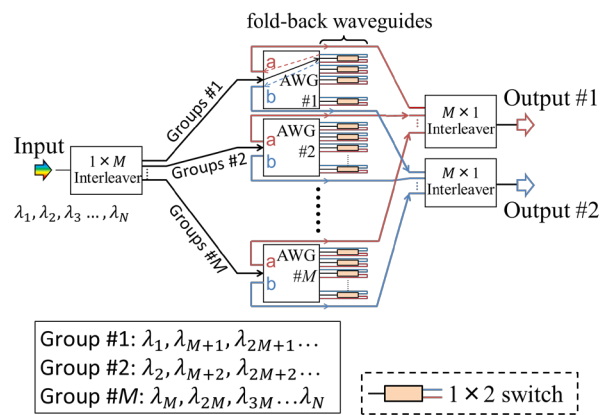


図 2 1×2 Fold-back 型 WSS の構成図

図 2 に Fold-back 型 WSS の構成図を示す。波長合分波器として AWG、スイッチング素子としてマッハツェンダー型光スイッチを用いている点では従来構成と同様であるが、交差導波路数を削減するために、インターリーバを導入し、二段階での波長合分波を行っている。波長分波の手順としては、まず入力された波長多重信号を 1×M インターリーバを用いて、M 個の波長グループに分け、それぞ

れの波長グループ用のAWGにおいてさらに波長分波を行う。波長合波では分波の逆の手順で、AWGにおいて波長グループに合波し、インターリーバを介して波長多重信号としてそれぞれの Output ポートへと出力される。波長合分波にインターリーバを導入することで、1光路あたりの交差導波路数を、従来構成の波長チャンネル数 $N - 1$ から波長グループ数 $M - 1$ まで削減することが可能になる。

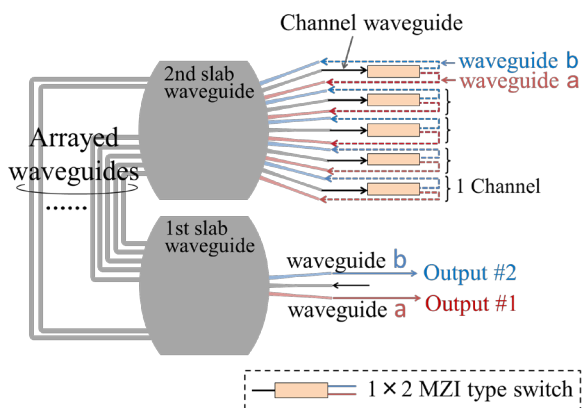


図3 Fold-back 型 AWG の構成

また、Fold-back 型 WSS ではインターリーバを用いた二段階での波長合分波に加え、折り返し導波路を介して MZI 型スイッチと接続されている Fold-back 型 AWG を導入している。Fold-back 型 AWG の構成図を図3に示す。波長分波、MZI スイッチで Output ポートのスイッチングが行われた信号は、折り返し導波路を介して AWG へと再び入力され、波長グループへと波長合波される。波長合分波を同じ AWG で行うため、チップ作製時の位相誤差による中心波長のミスマッチを避けることができる。

1×2 Fold-back 型 WSS の設計・作製

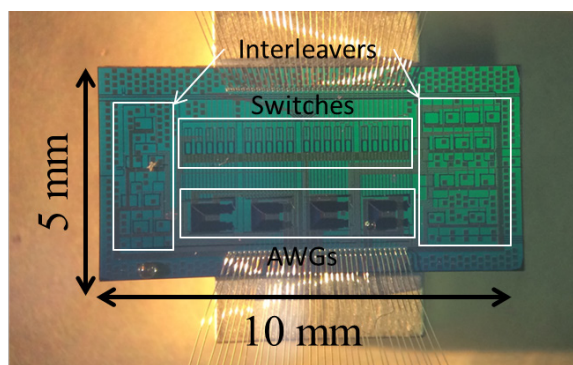


図4 1×2 Fold-back 型 WSS のチップ写真

さらに Fold-back 構成での動作確認のため、周波数間隔 200 GHz、チャンネル数 20 の 1×2 Fold-back 型 WSS の設計・

作製、特性評価を行った。チップサイズは 5 mm×10 mm と非常にコンパクトであった。ワイヤボンディング後のチップ写真を図4に示す。

この設計における波長グループ数 M は 4 であるため、最小交差導波路数は 3 であるが、入力用インターリーバ調整用のモニタ導波路との交差があるため、最小交差導波路数は 7 となっている。構成上の最小交差導波路数よりも多くなってはいるが、チャンネル数 20 において従来構成での導波路交差数が 19 であることを考えると、半分以下に抑えられていることがわかる。

測定における挿入損失は 40 dB、消光比 3.3 dB であり、スイッチング性能はあまり芳しくはなかったが、Fold-back 構成におけるスイッチング動作を確認した。挿入損失が大きく、消光比が小さくなった大きな要因として出力インターリーバの調整不足が考えられる。インターリーバは 3 段階構成となっており、7つのマッハツェンダー干渉計から構成されている。そのため、位相誤差補正のためには7つのヒータの電流値を調整する必要があった。入力インターリーバにはモニタ導波路を導入していたため、調整が容易であったが、出力側にはモニタ導波路を入れていなかったため、完全な位相誤差補正が困難であった。今後、本結果を踏まえ、出力インターリーバへのモニタ導波路の追加、また、MZI スイッチ、AWG など各素子の設計最適化を行い、性能改善に取り組む予定である。

Reference

- [1] M. Iwama, et al., Optical Fiber Communication Conference and Exhibition 2015, Tu3A.8. (2015).
- [2] F. Nakamura, et al, Optics Express, Vol. 26, No.10, pp.13573-13589 (2018).
- [3] F. Nakamura, et al, International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) 2019, W2B.4, Huangshan, China.
- [4] C. R. Doerr, et al., J. Lightw. Technol., vol.30, no.4, pp. 473-478 (2012).

著者略歴：

2017 年慶應義塾大学理工学電子工学科卒。2018 年慶應義塾大学総合デザイン工学専攻修士課程修了。2019 年現在慶應義塾大学総合デザイン工学専攻博士後期課程 2 年在籍。同大学津田研究室に所属し、光集積回路を用いた通信用デバイスの研究に従事。2017 年電気学術女性活動奨励賞、2019 年藤原賞受賞。



【寄稿】 (ELEX Best Paper Award 受賞記)

「Broadband high-efficiency Doherty power amplifier based on novel phase and impedance transform structure」

Guohua Liu (Hangzhou Dianzi University)



With the rapid development of wireless communication, the large peak to average power ratios (PAPR) of the transmitted signal is increasing. Doherty power amplifiers (DPAs) have recently become a research focus due to their high back-off efficiency just because traditional power amplifiers have poor efficiency at back-off power. However, the traditional DPAs require $\lambda/4$ compensation microstrip lines to accomplish the phase compensation and impedance conversion. Unfortunately, it is well known that $\lambda/4$ microstrip line have narrow band characteristic, which severely limits the bandwidth of DPAs. This bandwidth limitation is inconsistent with the broadband requirements of future communications.

This paper proposes a novel phase compensation and impedance transform structure using anti-coupled lines and open circuit stub, which has a stable 90-degree phase shift characteristic over a wide frequency range. A bandwidth enhanced DPA is designed and fabricated based on the proposed phase compensation and impedance transform structure which replaces the $\lambda/4$ microstrip line as well. Meanwhile, the multi-level low-pass matching method and parasitic model of transistor have been applied to design a wideband matching circuit. To verify the validity of the proposed structure, a DPA has been designed and fabricated

based on the proposed structure. The saturated output power reaches 43dBm, and the output efficiency of the drain stage is more than 65% from 2.6 GHz to 3.8 GHz. Meanwhile, over 43% drain efficiency is obtained at 6 dB back-off power. The measurement results fully validate the effectiveness of the proposed structure. The proposed design methodology of DPAs can be applied to design high performance power amplifiers for future wireless communication systems.

Biography :

GUOHUA LIU received the B.S. degree in Automation from Shanghai Tiedao University, China, in 1997, and the M.S. degree in Communication and Information Systems from East China Normal University in 2004, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree with Electronic Science and Technology at Hangzhou Dianzi University. Currently, he is also an associate professor with Hangzhou Dianzi University. And he is a visiting scholar with the University of Central Florida, USA, in 2016-2017. He has published more than 40 papers in international, domestic journals and conferences. His research interests include microwave circuits, nonlinear circuits, and wireless communication system.



「RF 直交アンダーサンプリングと同期クロック再生技術」



村口 正弘 (東京理科大学)

この度はエレクトロニクスソサイエティ招待論文賞を頂き、誠に光栄に存じます。ご推薦頂きました方々、選考委員の皆様へ感謝申し上げます。

今回受賞対象となった論文では、OFDM や CDMA などといった直交変調された RF 帯搬送波から搬送波のナイキストサンプリングより低い周波数でサンプリングして、直交情報を直接取り出すことを可能にする技術について述べました。技術名を RF 直交アンダーサンプリング技術としました。本技術はサンプリング周波数を f_s 、搬送波周波数を f_c 、間引き係数を k として、図 1 上に示す関係式を満たせば、直交復調器なしで IQ データが直接得られるというものです。この関係式は学生が実験的に導出し、それを後付けで理論導出しました。長年、無線通信の研究を行ってきた私にとって大きな驚きと共に、世紀の大発明ではないかと思いました。そこで、国内特許出願するとともに、PCT 出願しようと US 特許を調査しましたところ、何と 10 年前に、香港大学の先生が US 特許にしていました。しかも、全く同じ関係式が掲載されていました。

$$f_s = \frac{4f_c}{4k+1}$$

f_s : Under Sampling Frequency
 f_c : Carrier Frequency
 k : sampling interval factor

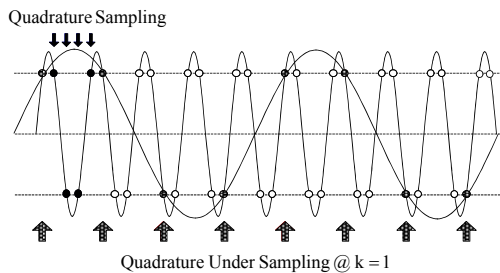


図 1 直交アンダーサンプリング

そのような経緯から、この関係式では特許化が難しいということになったのですが、そこで大きな疑問が生じました。このような素晴らしい発明が未だに実用化されていないのは何故だろうと。そこには、大きな理由がありました。我々は、シミュレーションにおいても、実機検証においても、送信側搬送波周波数を受信側でカンニングさせ、その

周波数を分周してサンプリング周波数を作っていました。そのため理論通りの結果が得られていたのです。実際は、送信側と独立して、受信側で受信信号からサンプリングクロックを作らなければなりません。これは無線技術でいうと、同期検波用キャリア再生技術と等価な技術となります。QPSK 変調ならば受信信号を 4 通倍して、位相状態を縮退させた後、4 分周すればキャリア再生できます。しかし、64QAM 変調とか、OFDM 変調では位相状態を縮退させることなど不可能です。従って、無線信号の搬送波と同期したクロックを受信側で作るという困難な課題をクリアすることに研究がシフトしました。この同期クロック再生技術の完成には、実に 5 年間もの歳月と 20 名以上の学生の力を要しました。

図 2 に直交アンダーサンプリング受信機の同期クロック再生部のブロック図を示します。

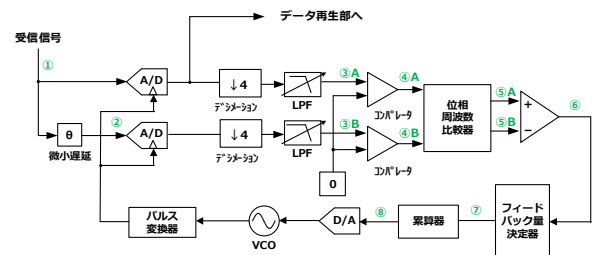


図 2 直交アンダーサンプリング受信機の同期クロック再生部

直交アンダーサンプリングではサンプルタイミングで 90° の直交性を確保しますので、正確な同期サンプリングは特に重要技術となります。同期クロック再生技術のキーポイントを整理すると以下となります。

- (1) 変調波から振幅・位相情報を除去し、周波数情報のみにする。さらにサンプリング周波数ずれ量を検出する。
- (2) サンプリング周波数の高低ずれ方向を検出する。
- (3) シンボル変化の影響を除去する。

ここで、理解しやすいように直交アンダーサンプリングから離れ、搬送波周波数に対してサンプリング周波数が 1% の周波数だけ離れている場合で説明します。搬送波を

サンプリングするとベースバンド信号が1%の差周波数で振動するサンプル値が得られます。このサンプル値をコンパレータで1, -1の2値に変換すると、変換信号の包絡線は1周期で2回ゼロクロスとなるので、1秒間のゼロクロス数は搬送波周波数とサンプリング周波数の差周波数の2倍になります。従って、搬送波周波数とサンプリング周波数が等しくなった時を同期と仮定すれば、ゼロクロスが無くなるようにサンプリング周波数を動かせば良いということになります。即ち、前述の(1)の周波数ずれ量の検出はクリアしたことになります。しかし、この後に困難な課題が2つ残っています。周波数同期引き込みにはサンプリング周波数の高低ずれ方向の検出手段(2)が必要です。更には、ゼロクロス数で周波数ずれを検出する場合、シンボル変化でもゼロクロスを生じるので、シンボル変化の影響を除去する手段(3)が必要となります。この2つの課題では、(2)は学生のアイデアでクリアし、そして、(3)は私のアイデアでクリアしました。

図2の受信機構成で受信信号を2分配し、図中①信号はそのまま、図中②信号は微小遅延 θ を加えて、同じタイミングでサンプリングします。ここで、 θ は搬送波周波数で $0 < \theta < \pi$ の範囲の任意の電気長で、1mm程度の遅延線で十分です。位相周波数比較器の入力信号の図中④A信号と④B信号は差周波数にダウンコンバートされた状態でその位相差は θ を維持します。このとき、サンプリング周波数の高低ずれ方向によって、図中④A信号と④B信号の位相進み遅れの関係が反転することを学生が発見しました。(理論解析は論文に記述しています。)従って、サンプリング周波数のずれの量とずれの方向は、位相周波数比較器の出力信号の図中⑤A信号と⑤B信号との差分の積分値と符号で分かります。しかし、このままではシンボル変化によるゼロクロスの影響が残ってしまい、引き込み周波数はシンボル変化周波数分だけずれてしまいます。

シンボル変化の影響除去には位相周波数比較器の回路構成が重要となります。クロック端子の立ち上がりエッジでデータを読み込み出力するタイプのDFF2個(DFF-A、DFF-Bとします)とAND1個を使用して位相周波数比較器を構成します。2個のDFFのデータ入力端子は常に”H”レベルに固定し、図中④A信号と④B信号をそれぞれDFF-A、DFF-Bのクロック端子に入力します。仮に④A信号が先に立ち上がったとすると、DFF-Aの出力⑤A信号は先に”H”になります。その後、遅れて④B信号が立ち上がり、DFF-Bの出力⑤B信号が”H”になると、AND回路によりDFF-A、DFF-Bの両方にリセットをかけて、一緒

に出力を”L”にします。この動作の位相周波数比較器の出力は、立ち上がりの早い出力⑤A信号は位相差分の幅を持った矩形波となり、出力⑤B信号は”H”になった途端にリセットがかかるので、ヒゲ状の波形になります。さて、図中④A信号と④B信号にシンボル変化が含まれているとすると、シンボル変化は④A信号、④B信号ともほぼ同時に起きるので、出力の⑤A信号と⑤B信号の両方もヒゲ状の波形になります。これらヒゲ状の波形は積分で影響を取り除くことが可能です。

実は殆どのシンボル変化は前記の効果で取り除くことができるのですが、まだ残る影響があります。サンプリングの遅延差 θ の中に遅悪くシンボル変化が入ると、出力が大きく乱れてしまい、収束値付近で振動してしまいます。さらに困ったことには、サンプリング周波数がずれているとシンボル変化個所は時間軸上でアナログ的にスイープするように動き、ほぼ定期的にサンプリング遅延差 θ の中に入ってきてしまいます。この影響はシンボル変化パターンで影響の出方が変わるので、極めて困難な課題でした。結果的には影響を無くすことが可能だったのですが、これを理解するには商用通信の知識が必要です。商用通信では信号のマーク率が50%になるように必ずスクランブル処理を行っています。例えばWiFiではPN7の符号でスクランブル処理を行っています。PN7の符号周期は127bitですが、この符号周期でスクランブルが繰り返されるとシンボル変化のパターンが平均化され、図2の累算器(アキュムレータ)の値を大きくすると出力が安定し、収束値付近での振動が収まります。このような操作で、例えばOFDM信号の搬送波周波数に同期したサンプリングクロック再生が可能になりました。

さて、サンプリング周波数引き込みは、64QAMなどではパイロット信号の捕捉、OFDMではシンボル同期を経てFFT出力が見えるまで周波数を近づけることが最初の目安となります。データが見えるようになって初めて最終的な位相引き込みが可能となり、データ再生ができるようになります。

著者略歴：

1983年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了、工博。同年 NTT 入社。無線通信および光通信用超高周波デバイスおよび回路設計の研究に従事。ワイヤレスシステム研究所、フォトニクス研究所を経て、2005年より東京理科大学工学部電気工学科教授。1994年 MMIC 研究により市村学術賞(功績賞)受賞。電子情報通信学会フェロー、IEEE シニア会員、電気学会会員。

「TMS による末梢神経組織における刺激閾値
のコイル角度依存性」

酒井 隆志 (名古屋工業大学)

この度は、エレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞という名誉ある賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦して頂いた学会関係者の皆様方、本研究を進めるにあたりご指導頂きました名古屋工業大学の平田晃正教授、ならびにご関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。



今回受賞対象となりました研究は、脳組織を非侵襲的かつ局所的に刺激する手法に対して工学的な見地からアプローチしたものとなっております。刺激手法のひとつに、経頭蓋磁気刺激法 (Transcranial Magnetic Stimulation : TMS) があります。TMS は磁界を用いることにより絶縁効果の大きな皮膚や頭蓋などの組織の影響をほとんど受けることなく、脳組織を刺激することが可能な手法です。TMS の臨床応用としては、うつ病などの脳障害を持つ人のリハビリテーション方策などが挙げられます。一方で、大脳皮質の、特に発話等の能動的言語機能を有する部位を刺激した際に、被験者が顔の筋肉や喉、顎などに痛み、ないしは不快であると感じる例が報告されており、施術を続行できない場合があります。

本研究では、TMS による神経刺激を再現するため、各被験者の MRI から解剖学的人体頭部モデルを作製し、電磁界シミュレーションにより得られた結果を基に末梢神経のモデル化について検討し、神経が応答する入力電流強度の閾値について実験結果と比較を行いました。その結果、刺激コイルの回転角度が変わることによって刺激される組織が異なる可能性があることを確認しました。

今回の受賞を励みに、より一層精進を重ね、研究に努めたいと思います。今後とも皆様のご指導ご鞭撻のほど、どうぞよろしくお願い申し上げます。

著者略歴：

2018 年名古屋工業大学電気電子工学科卒業、同年より名古屋工業大学大学院工学研究博士前期課程電気・機械工学専攻在籍。同大学平田・伊藤研究室に所属し、生体電磁気学を応用した脳の磁気刺激に関する研究に従事。

「CRLH 線路スタブを用いた 2GHz 帯
GaN HEMT E 級高出力増幅器」

浅見 紘考 (芝浦工業大学)

この度は名誉あるエレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞を授与いただき、大変光栄に存じます。ご推薦いただきました審査委員団の皆様に厚く御礼申し上げます。



今回受賞対象となりました「CRLH 線路スタブを用いた 2GHz

帯 GaN HEMT E 級高出力増幅器」は右手左手系複合 (Composite Right-/Left-Handed) 線路を用いることで、携帯電話アンテナ基地局において消費電力の占める割合が大きい高出力増幅器を高効率化するというものです。近年の無線通信の高度化に伴い、高出力増幅器に対しては低歪化 (線形動作) の要求が年々厳しさを増しており、その対策としてドハティ構成など回路規模の大きな増幅器が採用されています。これらの増幅器は線形性とトレードオフ関係にある電力効率の低下を極力抑えられる特長を有していますが、さらに高効率化を図ろうとすると既に回路の集積密度が限界に近い中で高調波処理回路を組み込む余地が少ないことが課題となっていました。例えば代表的な高効率増幅器である E 級増幅器は、その高調波処理回路を設計するにあたって、回路小型化に適した集中定数を使うと高周波化が難しく、また分布定数線路を用いると逆に回路面積が大きくなるという二律背反の状況にありました。私が所属する研究室では、CRLH 線路の独自の設計方法により、周波数応答特性を自在に制御できる超小型スタブを実現できることを示してきました。今回はその手法によって小型化した高調波処理回路を採用して 2GHz 帯 GaN HEMT E 級増幅器を試作し、飽和出力 7W、付加電力効率 73%という良好な特性を確認することができました。

今後も今回の受賞を励みとしてより一層精進を重ねていく所存です。最後に日ごろからご指導をいただいている指導教員の田中慎一教授をはじめ、学会でお世話になっている皆様に厚く御礼申し上げます。

著者略歴：

2018 年芝浦工業大学工学部通信工学科卒業、同年より同大学院田中研究室に所属し、無線増幅器に関する研究に従事。

【寄稿】 学生奨励賞受賞記

「III-V/Si ハイブリッド集積プラットフォーム 実現に向けたハイブリッド/シリコン領域 2 段テーパ導波路のテーパ構造依存性」

宮崎 隆之 (東京工業大学)

この度は名誉あるエレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞を授与いただき、大変光栄に存じます。ご推薦くださいました学会関係者の皆様、また、日頃からご指導いただいております荒井滋久教授、西山伸彦准教授、そして立花文人氏らグループの皆様には厚く御礼申し上げます。



今回受賞対象となりました「III-V/Si ハイブリッド集積プラットフォーム実現に向けたハイブリッド/シリコン領域 2 段テーパ導波路のテーパ構造依存性」は、高性能大規模光集積回路で重要となる III-V/SOI ハイブリッド光デバイスに関するものです。III-V/SOI ハイブリッド領域と Si 導波路間の高い光結合効率を得るため我々は 2 段テーパ構造を提案してきました。2 段テーパの先端幅、及び長さは光結合効率に大きく影響を与えるため、i 線ステップによる高精度露光を適用することで、III-V テーパ構造と Si 導波路間の中心ずれの抑制、及びテーパ先端部の先鋭化により高光結合効率を実証しています。今回、安定的かつ光結合効率の向上のために、1st アイランドのテーパ長、2nd アイランドのテーパ長依存性を広い範囲で検討し、1 段目テーパ長 60 μm 、2 段目テーパ長 25 μm で結合効率が 89% という値が得られることを明らかにしました。本構造は高光結合効率に加え、デバイス作製の際、電極形成が困難な 2nd アイランドのテーパの長さを短くできることから、III-V/SOI ハイブリッド光デバイスの高性能化に有利です。この構造を採用することにより、異種材料を含む光集積回路で、多くの異種材料を含んでも安定的にデバイスを接続できることとなります。

今後も、大規模光集積回路の実現を夢見て、今回の受賞を励みとして、一層の精進を重ねていく所存です。今後とも皆様のご指導ご鞭撻の程、何卒よろしくお願い申し上げます。

著者略歴：

2018 年中央大学電気電子情報通信工学科卒業、同年より東京工業大学工学院電気電子系電気電子コース修士課程に進学。同大学荒井・西山研究室に所属し、半導体光デバイスに関する研究に従事。

「ミリ波帯 Radio over Fiber のための平面アンテナを集積した InP 系マッハ・ツェンダー光変調器の提案」

宮関 勇輔 (横浜国立大学)

この度は名誉あるエレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞を授与していただき、大変光栄に存じます。ご推薦していただいた学会関係者の皆様に深く感謝申し上げます。



今回受賞対象となりました研究は、ミリ波帯無線信号を直接光信号に変換可能な、アンテナ集積 InP 系マッハ・ツェンダー (MZ) 光変調器を設計したものです。アンテナ集積光変調器は、ミリ波が入射した際にアンテナに誘起される電界を用いて完全パッシブに変調駆動します。そのため、同軸ケーブルを介したミリ波信号入力や外部電源によるバイアス印加が必要なく、高速かつ低遅延なミリ波帯 Radio over fiber のための変調器として大きく注目されています。これまで、ニオブ酸リチウム (LN) や非線形光学ポリマーベースのアンテナ集積光変調器が報告されていますが、これらのベース材料は電界誘起屈折率変化量が比較的小さく、デバイスサイズや消費電力の低減に限界がありました。本研究では、LN と比較して数十倍以上の大きな電界誘起屈折率変化を示す特殊な多重量子井戸構造を導波路コア層に採用し、変調器の低消費電力化と小型化を実現しました。また、MZ 光変調器の両アーム導波路に、アンテナに誘起された正負方向の電界がそれぞれ印加されるよう変調器構造を工夫し、プッシュプルな駆動を実現することで大きな変調効率を達成しました。

今回の受賞を励みに、より一層の努力を重ね、研究活動に努めていく所存です。今後とも皆様のご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。最後に、指導教員の荒川太郎准教授をはじめ、本研究に対してご助力いただいた関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

著者略歴：

2017 年横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻博士前期課程修了、同年より同大学院同専攻博士後期課程在籍。アンテナ集積 InP 系光変調器の研究に従事。

【寄稿】 学生奨励賞受賞記

「光パルス検出用 IC “LIDARX” の放射線による特性劣化評価実験」

小川 誠仁（東海大学）

この度は名誉あるエレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞を授与いただき、大変光栄に存じます。ご推薦下さいました学会関係者の皆様には厚く御礼申し上げます。



今回受賞対象となりました「光パルス検出用 IC “LIDARX” の放射線による特性劣化評価実験」では、宇宙機の誘導航法や科学観測を目的としたレーザ高度計 LIDAR (Light Detection And Ranging) の開発期間短縮や小型化を目指し、JAXA 宇宙科学研究所にて開発された、光パルス検出 IC “LIDARX” を宇宙機に搭載するために実施した放射線試験について報告致しました。

LIDARX は現在、火星衛星探査計画 MMX (Martian Moons eXploration) への搭載に向けた準備が進められています。本 IC はサブナノ秒のタイミング検出、数 fC の電荷検出を行う高精度のアナログデジタル混在デバイスです。その為宇宙機への搭載にあたっては、宇宙放射線による特性劣化 (トータルドーズ効果: TID) の程度を正しく把握する必要があります。本実験では、LIDARX に Co60 による γ 線を照射し、照射前後の特性変動量を評価する事によって、TID が LIDARX の計測性能に及ぼす影響を確認しました。

実験結果から MMX ミッションで想定される総照射線量を受けた場合にも、測距値の変動は高感度設定時に 0.2 m 以下となり、許容範囲に収まっている事を確認しました。現在これらの結果を基に、MMX 搭載 LIDAR のフライトモデルの開発が行われています。

今回の受賞を励みとして、より一層の精進を重ねていく所存です。また研究指導を賜った、JAXA 宇宙科学研究所の水野貴秀准教授、東海大の田中真准教授をはじめとする先生方、並びに研究のご支援を頂いた関係者の方々に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

著者略歴：

2017 年東海大学工学部航空宇宙学科卒業、同年、同大学院機械工学専攻に入学。2019 年同大学院修了。現在、株式会社 IHI エアロスペースに所属。