



【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

「アルゴリズムによるシミュレーション高速化技術の先駆的研究」

大貫 進一郎 (日本大学)



令和に改元され最初となる第23回エレクトロニクスソサイエティ賞を頂きましたこと、誠に光栄に存じます。大変名誉ある本賞に推薦して頂きました方々、審査にあられたエレス関係者の皆様に改めて厚く御礼申し上げます。

物体の形状認識を目的とした電磁波散乱に関する研究テーマで日本大学から学位取得後、イリノイ大学でポストドクトラル研究員として、電磁界解析のアルゴリズム開発に携わる機会を頂きました。計算電磁気学センター所長のWeng Cho Chew教授よりシミュレーション技術の高速化に関するテーマを与えて頂いたことが、本賞の対象である「アルゴリズムによるシミュレーション高速化技術の先駆的研究」に繋がっています。2000年から研究を開始した高速多重極法 (Fast Multipole Method: FMM) [1]は、20世紀の10大アルゴリズムの一つ[2]として知られ、現在では多くの商用シミュレータに搭載されています。

電磁界解析分野で従来用いられたモーメント法は、その信頼性の高さからアンテナ解析などで広く利用されてきました。ただし、計算コストは連立方程式の求解に起因するため、波長に比べて数百倍以上の対象物や、より詳細なモデル化が必要となる解析は困難です。そのため1980年代まではスーパーコンピュータが必要となる大規模問題に分類されていました。FMMはこれら大規模問題をデスクトップPCレベルでの解析を可能にした、計算科学分野のブレークスルー技術です。電磁界解析では1990年代から本格的に応用されましたが、計算の信頼性に関しては、少なからず疑問の声もありました。「日本人は堅実に研究を行う」という印象をお持ちであったChew教授から最初に与えられた研究テーマは、FMMの信頼性を計算科学的に検証し、誤差制御が可能であることの証明でした。

トウモロコシ畑に囲まれた広大な敷地内、計算電磁気学センターがある建物はレンガ造りで、中にはノーベル物理学賞を二度受賞されたJohn Bardeen教授が教鞭をとった教室もありました。各国から集まった同僚たちと昼夜研究に励み、ディスカッションを重ね、FMMの信頼性を計算科学的に検証し解決できた[3]ときの喜びは、昨日のことのように思い出されます。また、本テーマを拡張し、ドクターコースの学生と一緒に研究する機会を頂いたこと[4]

は、研究者人生において貴重な経験となっております。その後、FMMの計算精度保証技術、計算コストの最適化技術などに研究を発展することも出来ました[5-8]。

FMMの応用研究として、自動車搭載用アンテナの開発に携わりました。これは、イリノイ大、自動車メーカー、ソフトウェアメーカーとの共同プロジェクトで、乗用車に小型アンテナを搭載したモデルを解析する、当時では画期的な内容でした。本プロジェクトにおいて、イリノイ大グループの取り纏めを行い、自動車搭載用デバイス設計に必須となるシミュレーション基盤技術を開発しました[9]。自動車関連業界のデファクトスタンダードであるメッシュ生成ソフトに関連技術は搭載されており、自動車搭載用アンテナの設計においても本成果は利用されています。

2004年に母校の日本大学に助手として着任した際には、FMMを利用する新しい研究テーマの模索から始めました。総合大学の強みを活かした分野横断型の日本大学N.研究プロジェクト「ナノ物質を基礎とする光・量子技術の極限追求」、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「超短時間光・物質相互作用の理解・制御が切り開く新材料・物性・デバイスの探索と創生」等の大型プロジェクトに参画する機会を頂き、工学、理学、医学の多岐に渡る分野の研究者と定期的なディスカッションを行える環境に恵まれました。特に実験系および理論系のエキスパートから刺激を受けることが多く、今後の方向性がうっすらと見え始めたところに、磁気記録分野の研究テーマと出会いました。

ハードディスクで利用される現行の磁気記録方式に対して、フェムト秒レーザーにより生成した円偏光のみで磁化反転を制御できる新規物理現象、光直接記録が本学とその共同研究先で発見されました[10]。本記録方式は、現行の磁気記録システムに比べ最大で10万倍の超高速化を実現できることから世界的に注目されています[11]。磁気記録分野への最初の応用として、照射光のスポットサイズに依存した記録密度の低下を解決するナノアンテナを開発しました[12, 13]。この技術を用いることで、ナノサイズのスポットに集光した局所的な円偏光を生成できることが数値的に検証され、このことは光直接記録の高密度化の実

現性を示唆しています。また、共同研究者と開発したナノアンテナは、世界初となるフェムト秒レーザを用いた熱アシスト磁気記録の実証に用いられ、実験から磁化反転が検証されました[14]。

学生時代から従事している電磁界解析の経験をもとに、近年では更なる発展を目指した研究に取り組んでいます。電磁界解析を基盤とする複合物理解析においては、マックスウェル方程式（古典論）とシュレディンガー方程式（量子論）の時空間同時解析法を実現し、光パルスによる量子状態制御法を開発しました[15, 16]。また、並列処理による超高速計算に向けたアルゴリズムの開発では、電磁界解析の時分割並列計算法を世界に先駆けて提案しています[17, 18]。

今年度は新型コロナウイルス感染症拡大に伴い、研究室の学生とはオンラインでのディスカッションの機会が増えました。対面での研究が進められないもどかしさも経験しましたが、リモート環境下におけるシミュレーション技術の重要性を再認識するに至りました。今回の受賞を糧に、なお一層の研鑽を重ね、シミュレーション技術の更なる進展および分野を支える後進の指導に精進し、エレクトロニクスソサイエティの益々の発展に貢献していきたいと存じます。

最後になりましたが、これまで研究をご指導頂いた恩師、共同研究を行っていただいた方々、研究室で一緒に研究を進めてくれたメンバーの皆様へ改めて感謝いたします。

文献：

- [1] L. Greengard and V. Rokhlin, *J. Comput. Phys.*, vol. 73, pp. 325-348, 1987.
- [2] B. Cipra, *SIAM News*, vol. 33, no. 4, p. 1, 2000.
- [3] S. Ohnuki and W. C. Chew, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1883-1890, 2003.
- [4] M. L. Hastriter, S. Ohnuki, and W. C. Chew, *Micro. Opt. Tech. Lett.*, vol. 37, no. 3, pp. 184-188, 2003.
- [5] S. Ohnuki and W. C. Chew, *SIAM J. Scientific Computing*, vol. 25, no. 4, pp. 1293-1306, 2004.
- [6] S. Ohnuki and W. C. Chew, *SIAM J. Scientific Computing*, vol. 26, no. 6, pp. 2047-2065, 2005.
- [7] S. Ohnuki and W. C. Chew, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E89-C, no. 11, pp. 1676-1681, 2006.

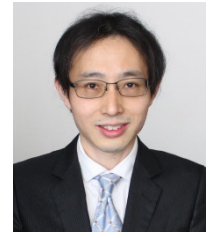
- [8] S. Kishimoto and S. Ohnuki, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E95-C, no. 1, pp.71-78, 2012.
- [9] W. C. Chew, H. Y. Chao, T. J. Cui, C. C. Lu, S. Ohnuki, Y. C. Pan, J. M. Song, S. Velamparambil, and J. S. Zhao, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol.27, no.8, pp.803-823, 2003.
- [10] C.D. Stanciu, F. Hansteen, A.V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A.Itoh, and Th. Rasing, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, 047601, 2007.
- [11] 塚本新、大貫進一郎、中川活二、伊藤彰義, 電子情報通信学会誌, vol. 98, no. 2, pp. 138-143, 2015.
- [12] 大貫進一郎, 千葉英利, 電子情報通信学会誌, vol. 96, no. 6, pp. 391-395, 2013.
- [13] K. Nakagawa, Y. Ashizawa, S. Ohnuki, A. Itoh, and A. Tsukamoto, *J. Applied Physics*, 109, 07B735, 2011.
- [14] K. Nakagawa, A. Tajiri, K. Tamura, S. Toriumi, Y. Ashizawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, Y. Sasaki, S. Saito, M. Takahashi, and S. Ohnuki, *J. the Magnetics Society of Japan*, vol. 37, no. 3-2, pp. 119-122, 2013.
- [15] Takeuchi, S. Ohnuki, T. Sako, *Physical Review A*, vol. 91, pp.003400-1-003400-13, 2015.
- [16] T. Takeuchi, S. Ohnuki, and T. Sako, *J. Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 50, no. 4, pp. 045002-1 - 045002-13, 2017.
- [17] S. Ohnuki, R. Ohnishi, D. Wu, and T. Yamaguchi, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 24, pp. 2143-2146, 2018.
- [18] 大貫 進一郎, 電子情報通信学会論文誌C, vol. J103-C, no. 4, pp. 203-210, 2020.

著者略歴：

2000年日本大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。イリノイ大ポストドクトラル研究員・客員講師を経て、2004年日本大学理工学部電気工学科助手。現在、同大学教授、理工学部（駿河台校舎）次長。2011年イリノイ大客員准教授。博士（工学）。2020年本会エレクトロニクスシミュレーション(EST)研究会委員長。計算電磁気学、複合物理計算の研究に従事。2000年度鹿島学術振興財団海外派遣研究員。2013年日本磁気学会論文賞、2014年EST研優秀論文発表賞（一般部門）、2014年電気学会電気学術振興賞（進歩賞）、各受賞。



【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

「異種材料集積シリコン光集積回路と光変調器応用に関する先駆的研究」

竹中 充 (東京大学)

この度、栄えある第23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。今回の受賞の対象となりました「異種材料集積シリコン光集積回路と光変調器応用に関する先駆的研究」は、2007年に大学に赴任して以来取り組んでまいりましたシリコンプラットフォーム上への異種材料集積技術に関する研究成果となります。改めて、ご推薦頂いた先生、並びに審査にあられた関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

学生時代は InP 系化合物半導体を用いた光アイソレータや半導体レーザーの研究に取り組み、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトに研究員と参画してからも、自身で開発した光メモリを全光ルーティングに応用する研究に取り組んできました。

その後、2007年に東京大学に赴任し、高木信一教授の指導の下、シリコン半導体素子の研究に取り組むことになりました。それまでずっと化合物半導体デバイスの研究が中心であり、シリコンには触れたこともなかったことから、赴任当初は驚くことばかりではありました。当時シリコンエレクトロニクス業界では、半導体微細化を延命するため、高移動度材料である化合物半導体やゲルマニウムをチャネルとしたトランジスタの研究が世界中で進められており、シリコンプラットフォーム上への異種材料集積が研究のトレンドとなっていました。幸いなことに、化合物半導体やゲルマニウムは光物性にも優れることから、電子デバイスに加えて、異種材料集積を活用したシリコンフォトニクスの研究にも取り組むことになりました。

シリコンプラットフォーム上への異種材料集積として真っ先に基板貼り合わせ (ウェハボンディング) の研究に取り組みました。最初はあり合わせの装置で実験をしていましたが、NEDO プロジェクトが始まり、研究が本格化することで、化合物半導体薄膜を Si 基板上に貼り合わせた III-V on insulator (III-V-OI) ウェハが研究室で作製できるようになってきました。このウェハを使って、化合物半導体トランジスタ[1]や光集積回路[2]など様々な半導体デバイスの実証に成功しました。

ゲルマニウムを使ったトランジスタ[3]や受光器[4]の研究にも取り組む中、2010年ごろからシリコン光変調器の研

究に本格的に取り組み始めました。化合物半導体と異なりシリコン中では顕著な電気光学効果がないことから、光変調には自由キャリア効果が主に用いられており、変調効率が低く、光学損失も大きいことが課題となっていました。色々と研究のアイデアを練る中で、自由キャリア効果が半導体中のキャリアの有効質量に反比例することから、有効質量を軽くすることで光変調効率を改善できるとの着想を得ました。同様の考えは、歪み Si トランジスタなどで既に広く実用化されており、これを光変調器にも応用するという発想のもと、歪み SiGe を用いた光変調器を提唱しました[5]。Si 上に SiGe を結晶成長することで格子定数差により SiGe 層に圧縮歪みが印加され、ホールの有効質量が軽くなることから、光変調効率が数倍向上することが期待できました。歪み SiGe 層を Si 光導波路に埋め込んだキャリア注入型光変調器 (図1) を作製し、理論予想通り、自由キャリア効果が増大することを実証しました[6]。歪み SiGe はチャネルやソース/ドレインとして既にトランジスタで広く活用されており既存の CMOS ファブでの製造が容易であることから、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA) との共同研究で、量産化に適した空乏型光変調器の実用化に取り組んでおります[7]。

その後、更なる高性能化を目指して、歪み SiGe を用いた MOS 型光変調器の研究に取り組みました。研究を進めるにつれて、ポリ Si 導波路形成時に SiGe MOS 界面が劣化してしまう問題に直面しました。これを解決するため、基板貼り合わせを用いた MOS 型光変調器の作製手法を提案し研究を進めました。2015年頃には貼り合わせを用いた MOS キャパシタの作製プロセス[8]がほぼ確立した結果、歪み SiGe ではなく化合物半導体薄膜を Si 導波路上に貼り

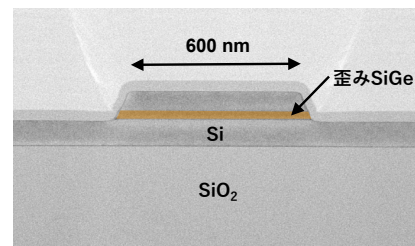


図1 歪み SiGe 光変調器の断面 TEM 像[6]

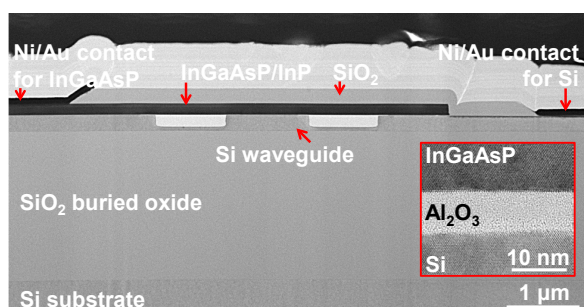


図2 ハイブリッドMOS型光変調器の断面TEM像[9]

合わせたハイブリッドMOS型光変調器を考案しました(図2)。化合物半導体中では電子の有効質量が極めて軽いことから、空乏型Si光変調器と比較して10倍以上の変調効率を実現しました[9]。現在、変調速度の向上に取り組んでいる他、プログラマブル光回路中の光位相シフタとして用いて、光演算による深層学習に応用する研究にも取り組んでおります[10]。

今回の受賞対象にもなりましたハイブリッドMOS型光変調器は、中野義昭先生(東京大学)および高木信一先生(東京大学)のご指導なくして実現しなかったものです。改めて両先生に感謝申し上げます。また、さがけ研究総括としてご指導頂いた佐藤勝昭先生(東京農工大学)、NEDOプロジェクトリーダーとしてご指導頂いた荒川泰彦先生(東京大学)にも、多大なご支援を頂きましたこと、この場を借りて感謝申し上げます。これまでの研究成果は、私一人の力では到底成しえないものです。共同で研究に取り組んでくれた学生の皆さんにも心より感謝申し上げます。受賞理由となりました異種材料集積シリコン光変調器は、2011年の東日本大震災により当面実験に取り組めないという危機感から着想が生まれました。いま再びコロナ禍の中、この逆境を跳ね返すべく、一層研究に邁進する所存です。

参考文献

- [1] M. Yokoyama et al., "Thin body III-V-semiconductor-on-insulator MOSFETs on Si fabricated using direct wafer bonding," *Appl. Phys. Express.*, Vol. 2, 124501, 2009.
- [2] M. Takenaka, M. Yokoyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, and S. Takagi, "InGaAsP photonic wire based ultrasmall arrayed waveguide grating multiplexer on Si wafer," *Appl. Phys. Express.*, Vol. 2, 122201, 2009.
- [3] K. Morii, T. Iwasaki, R. Nakane, M. Takenaka, and S. Takagi, "High-performance GeO₂/Ge nMOSFETs with

source/drain junctions formed by gas-phase doping," *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 31, no. 10, pp. 1092 - 1094, 2010.

- [4] M. Takenaka et al., K. Morii, M. Sugiyama, Y. Nakano, and S. Takagi, "Dark current reduction of Ge photodetector by GeO₂ surface passivation and gas-phase doping," *Optics Express*, vol. 20, no. 8, pp. 8718-8725, 2012.
- [5] M. Takenaka and S. Takagi, "Strain engineering of plasma dispersion effect for SiGe optical modulators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 1, pp. 8 - 15, 2012.
- [6] Y. Kim, M. Takenaka, T. Osada, M. Hata, and S. Takagi, "Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators," *Scientific Reports*, vol. 4, 4683, 2014.
- [7] J. Fujikata et al., "High-speed and highly efficient Si optical modulator with strained SiGe layer," *Appl. Phys. Express*, Vol. 11, 032201, 2018.
- [8] J. Han, M. Takenaka, et al., "Study on void reduction in direct wafer bonding using Al₂O₃/HfO₂ bonding interface for high-performance Si high-k MOS optical modulators," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, 04EC06, 2016.
- [9] J.-H. Han, F. Boeuf, J. Fujikata, S. Takahashi, S. Takagi, and M. Takenaka, "Efficient low-loss InGaAsP/Si hybrid MOS optical modulator," *Nature Photonics*, vol. 11, no. 8, pp. 486-490, Jul. 2017.
- [10] M. Takenaka et al., "III-V/Si hybrid MOS optical phase shifter for Si photonic integrated circuits," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 5, pp. 1474-1483, March 2019 (invited).

著者略歴:

1998年3月東京大学工学部電子工学科卒業、2000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、2003年3月同大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了、博士(工学)。2003年4月より財団法人光産業技術振興協会研究員。2007年4月に東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻に講師として赴任。2008年4月より同大学院工学系研究科電気系工学准教授、2020年10月より同大学院工学系研究科電気系工学教授。シリコンフォトニクスや異種材料集積光電子集積回路の研究に従事。応用物理学会、電子情報通信学会、IEEE、OSA 会員。第9回シリコンテクノロジー一分科会論文賞、IEEE EDS Paul Rappaport Award などを受賞。



【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

「集積パワーマネジメント回路に関する先駆的研究」

高宮 真 (東京大学)



この度は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。この栄誉は私個人の力ではなく、これまでに私を指導して育てて頂いた先生方・先輩・同僚・学生、エレクトロニクスソサイエティの皆様、特に集積回路研究専門委員会の皆様のお陰であると実感しております。お世話になった皆様に深く感謝申し上げます。今後とも、多くの人たちにお力添えを頂きながら、集積パワーマネジメント回路の分野で、産業界や電子情報通信学会に貢献していきたいと思っております。

集積パワーマネジメント回路

今回受賞の対象となりました「集積パワーマネジメント回路に関する先駆的研究」とは、LSIの「消費電力」「電源」に関する技術分野です。

これまでに、NECでは高速マイクロプロセッサ向けの世界初の「電源ノイズ測定回路」、東京大学に移籍後はIoT向けの「マイクロワット、ナノワットクラスのパワーマネジメント回路」「超低消費電力の無線通信回路」などのLSI回路設計の研究を行ってきました。

さらに、有機トランジスタを用いたフレキシブルエレクトロニクスにおける「電源供給」分野を開拓し、世界初の「無線給電シート」「振動発電を用いた靴の中敷き型万歩計」「無線給電で動作するおむつ向け尿漏れセンサシート」などを実証してきました。

近年では、集積回路分野とパワーエレクトロニクス分野の融合に注力しており、パワートランジスタを低損失・低ノイズに駆動できる世界初のデジタルゲートドライバICの研究を行っています。以下では、デジタルゲートドライバICについて簡単に紹介させていただきます。

ゲートドライバとは

図1に示すように、ゲートドライバとは、コントローラからの5V振幅のオン・オフ信号を15V振幅に増倍してパワートランジスタ(今回は(Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)))のゲート端子を駆動することによりパワートランジスタのオン・オフを制御する回路です。ゲートドライバは、5V以下の電源電圧で動作するマイクロエレクトロ

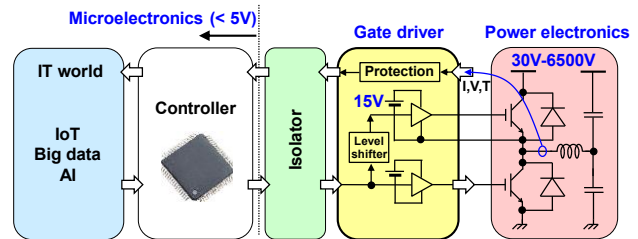


図1 ゲートドライバの位置づけ。ゲートドライバは弱電と強電の世界の橋渡しをする重要な回路ブロックである

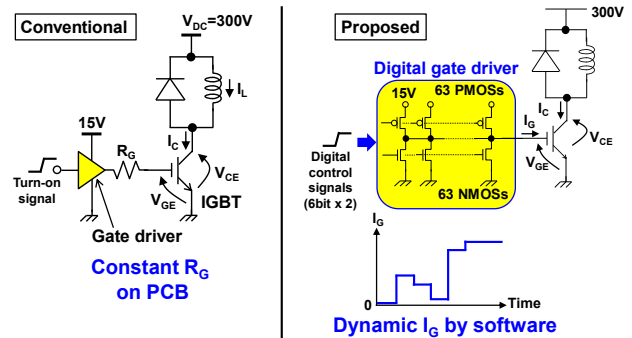


図2 従来のゲート抵抗(R_G)一定のゲートドライバと提案のプログラマブルなデジタルゲートドライバ

ニクス(弱電)の世界と、30V以上で動作するパワーエレクトロニクス(強電)の世界の接点となる重要な回路ブロックです。ゲートドライバをデジタル化したICを開発することにより、ゲート波形をソフトウェアで自動最適化することができ、パワートランジスタのスイッチング時の損失とノイズの両方を同時に低減することができます。

提案するデジタルゲートドライバIC

図2に従来のゲート抵抗(R_G)一定のゲートドライバと提案のプログラマブルなデジタルゲートドライバを示します。従来のゲートドライバでは、 R_G に関してIGBTのターンオン時のスイッチング損失とコレクタ電流のオーバershootがトレードオフ関係にありました。そこで、低スイッチング損失と低オーバershoot電流を同時に実現するために、IGBTのターンオン期間中にゲート電流(I_G)波形をクロック同期式でソフトウェアを用いて動的に制御で

きるデジタルゲートドライバ IC を新規開発しました。IGBT を駆動する CMOS バッファを 63 個に分割し、ターンオンの場合には 63 個中いくつかの pMOS をオンさせるかを 6bit のデジタル信号で制御します。図 3 に 180nm BCD プロセスを用いて試作したデジタルゲートドライバ IC を定格 600V、100A の市販の IGBT モジュールに取り付けた写真を示します。IGBT の 300V、50A におけるターンオンのスイッチング試験において、ゲート電流をソフトウェアで自動最適化することにより、提案のデジタルゲートドライバ IC は従来のゲートドライバに比べ、スイッチング損失揃えでオーバシュート電流を 37%低減、オーバシュート電流揃えでスイッチング損失を 47%低減することに成功しました。

著者略歴：

1995 年東京大学工学部電子工学科卒業。2000 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 NEC 入社。2005 年に東京大学 大規模集積システム設計教育研究センターに移り 2019 年より生産技術研究所 教授。2013 年～2014 年にカリフォルニア大学バークレイ校客員研究員。

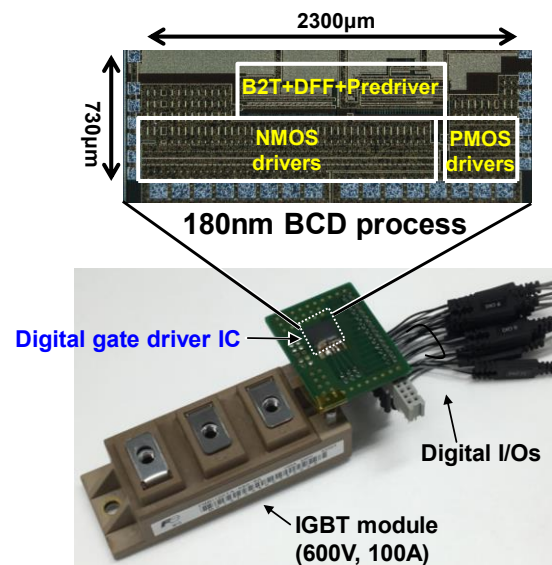


図 3 デジタルゲートドライバ IC を IGBT モジュールに取り付けた写真



【寄稿】 (ELEX Best Paper Award 受賞記)

「InGaP/GaAsSb/InGaAsSb double heterojunction bipolar transistors with 703-GHz f_{max} and 5.4-V breakdown voltage」

星 拓也 (日本電信電話)



この度は、IEICE Electronics Express (ELEX)に投稿させていただきました論文、"InGaP/GaAsSb/InGaAsSb double heterojunction bipolar transistors with 703-GHz f_{max} and 5.4-V breakdown voltage"^[1]を、Best Paper Awardにご選定いただきましたこと、大変光栄に思います。選定に携われた委員会の方々、ELEX 編集委員の皆様方には深く感謝申し上げます。

本研究は、高速性と高耐圧性を両立可能な、InGaAsSb ベースダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタ(DHBT)の高周波特性のさらなる向上を目指して実施されたものです。本デバイスは、従来の InGaAs ベースを有する type-I 型のバンドラインナップの DHBT に適用される複雑なコレクタ構造を用いずとも、シンプルな InP コレクタによって、遮断周波数(f_T)を犠牲にすることなく高耐圧化が可能です。また四元混晶材料である InGaAsSb は、我々が以前開発した、 CBr_4 流量変調法^[2]によって、ベース層内に極めて大きな組成・ドーピング傾斜を形成することが可能であり、これを利用することで、500 GHz 以上の f_T 、最大発振周波数(f_{max})の両立を実現しています。また、ベースコンタクト領域に高濃度ドーピングされた GaAsSb を適用することで、InGaAsSb の課題であった高濃度化を解決し、 f_{max} を 630 GHz まで改善されることを確認しています^[3]。

本研究においては、高周波特性のさらなる向上のために、2点について新たな改善を試みました。一つ目はワイドバ

ンドギャップ InGaP エミッタの適用による高電流利得化です。電流利得と f_{max} はトレードオフ関係にあるため、高 f_{max} するためには、電流利得の改善が必須です。図 1 に示すよう、本デバイス構造においては、ベースコンタクト抵抗を低減するために、高濃度ドーピングした GaAsSb を 3 nm 導入しています。このため、ベース抵抗・ベースコンタクト抵抗を低減できる一方、エミッタ層との界面領域の正孔濃度が高く、再結合電流が増大し、電流利得の低下を招いていました。そこで、再結合電流を抑制するために、InGaP からなるワイドバンドギャップエミッタを適用しました。このようにすることで、エミッタからベースに拡散する電子に対して、type-II バンドラインナップの伝導帯障壁を作らず、再結合電流を低減させて電流利得を向上させることができます。

二つ目はベースメタル条件の最適化によるコンタクト抵抗の低減です。図 2 に示したのは、コンタクト抵抗およびベースシート抵抗の Pt 電極厚さ依存性です。我々の DHBT は、ベース層は 3 nm の GaAsSb ($\sim 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) と組成傾斜 InGaAsSb ($\sim 7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) の 2 層によって構成されています。ベース電極の Pt 層厚が薄層化されるにつれて、コンタクト抵抗率は減少し、2 nm の時に $4.8 \text{ } \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ まで低減されました。この現象は、Pt 原子のベース層内への侵襲と相関があると考えられます。Pt 層を厚くしすぎると、侵襲した Pt がドーピング濃度の高い GaAsSb を突き抜け、

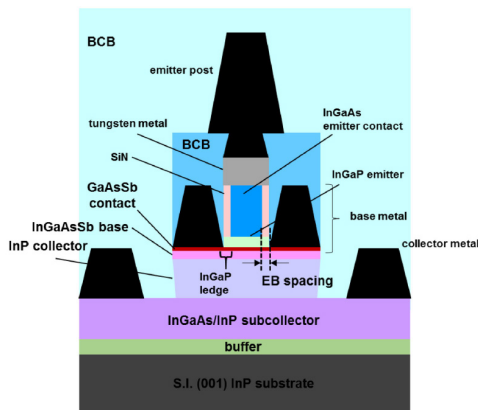


図 1 試作した素子の構造の模式図 (受賞論文^[1]より引用)

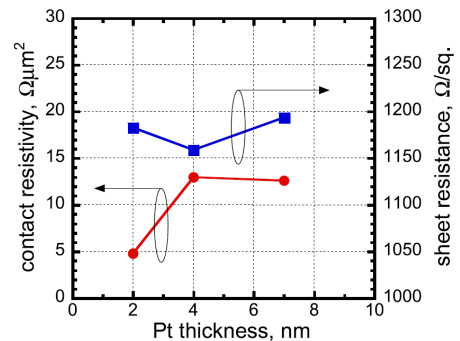


図 2 ベースコンタクト抵抗率およびベースシート抵抗の電極 Pt 層厚依存性 (受賞論文^[1]より引用)

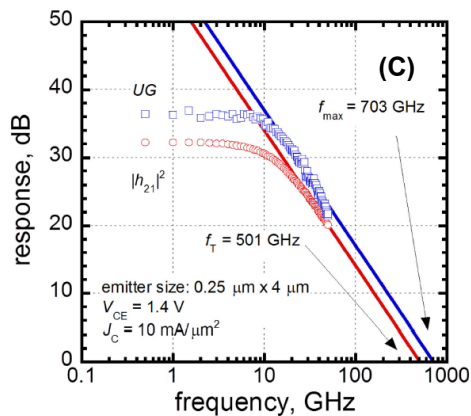
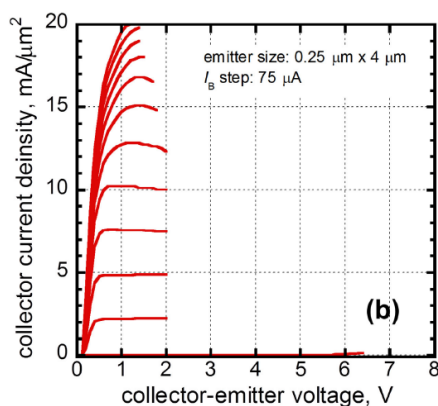
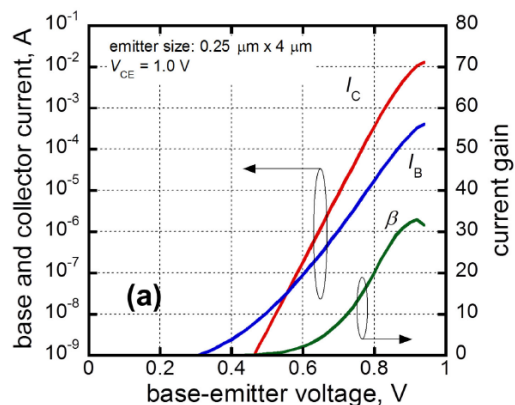


図3 試作したデバイスの DC 特性および RF 特性
(受賞論文^[1]より引用)

ドーピング濃度が低い InGaAsSb 層へと到達してしまい、コンタクト抵抗が増大してしまうと考えられます。以上の結果から、Pt 層の厚さは、GaAsSb コンタクト層のそれよりも小さく設定することが望ましいという結論を得ました。

図3に示したのは、試作したエミッタ幅 0.25 μm の

DHBT の(a), (b)DC 特性および(c) RF 特性です。本デバイスにおいては、15 nm の InGaP エミッタ、3 nm の GaAsSb コンタクト層、17 nm の組成傾斜 InGaAsSb ベース、100 nm の InP コレクタを採用しました。デバイス作製は *i* 線ステッパを用い、エミッタ構造は自己整合工程によって形成しました。エミッタ-ベース間の距離は 0.05 μm まで縮小しています。最大電流利得は 33 であり、同程度のベースシート抵抗の過去のデバイスと比較し 27%程度増大しました。また、耐圧は $BV_{CEO} = 5 \text{ V} (@J_C = 0.01 \text{ mA}/\mu\text{m}^2)$ を達成しました。本試作により、 $f_T = 501 \text{ GHz}$, $f_{max} = 703 \text{ GHz}$ ($@J_C = 10 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$, $V_{CE} = 1.4 \text{ V}$) を達成しました。

本論文を発表した後、我々のグループではさらなるデバイスプロセス技術の改良を行い、素子寸法の短縮によって、あらゆるトランジスタの中で最高である 800 GHz を超える f_T を実現しています^[4]。また層構造とデバイス寸法の調整により、1 THz に迫る f_{max} も、利得・耐圧をほとんど犠牲にせずに実現できる見通しを得ています。今後、さらなるエミッタ寸法の微細化と、デバイス高性能化に向けたもう一つのキー技術である基板転写技術^[5]による放熱性向上効果を適用し、1 THz 以上の f_T/f_{max} の実現を目指して、検討を進めております。

本論文の共著者である柏尾典秀氏(現・栗原学園)、栗島賢二氏(現・NTT エレクトロニクス)、井田実氏(現・NTT エレクトロニクス)におかれましては、在籍中には貴重なご助言・多大なるご助力をいただきました。また、白鳥悠太氏、杉山弘樹氏、松崎秀昭氏にも、多くのご助力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献：

- [1] T. Hoshi *et al.*, IEICE ELEX **16**, 20181125 (2019).
- [2] T. Hoshi *et al.*, APEX **7**, 114102 (2014).
- [3] N. Kashio *et al.*, IEEE EDL **36**, 657 (2015).
- [4] Y. Shiratori *et al.*, IEEE EDL **41**, 697 (2020).
- [5] Y. Shiratori *et al.*, IEEE EDL **39**, 807 (2018).

著者略歴：

2009 年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻修了(修士)、同年より日本電信電話に入社。InP・GaN 系電子デバイス材料の結晶技術に関する研究に従事。2015 年に筑波大学社会人のための博士後期課程(早期修了プログラム)修了。電気学会より平成 26 年 C 部門研究会 優秀論文発表賞・平成 29 年 C 部門大会 優秀論文発表賞を受賞。



「超広帯域電磁界解析のための周波数依存性 FDTD 法」

チャカロタイ ジェドヴィスノプ (情報通信研究機構)



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、選考委員の皆様並びにエレクトロニクスソサイエティの皆様深く感謝申し上げます。また、本研究は、東北大学との共同研究による研究成果であり、ご指導いただきました澤谷名誉教授及び陳教授に心から感謝申し上げます。

今回受賞対象となった論文は、広帯域電磁界解析のための周波数依存性 FDTD 法に関して述べています。本稿では、研究要約及び対象論文の着想に至った経緯について簡単に触れさせていただきます。

研究業績の要約

時間領域における電磁界解析は 1966 年に発表された Yee の先駆的な研究により著しく発展してきた。Yee のアルゴリズムは、マクスウェル方程式の微分形を数値的に差分化して得られた更新式を使って電界及び磁界を時間的に交互で計算する手法であり、時間領域有限差分(Finite-difference time-domain, FDTD)法と呼ばれる。FDTD 法は、時間領域の解が得られるため、一度の解析で広帯域の解を得ることができ、これまで高速で動作する電子回路解析、電磁界ばく露評価、メタマテリアルや表面プラズモン等の様々な電磁界問題に対して最も多く利用されている電磁界解析手法の一つである。しかし、広帯域で解析を行うためには、物質の分散特性を考慮する必要がある。

これまで FDTD 法で物質の分散特性を考慮する手法として RC 法、ADE 法や z 変換法等が挙げられる。しかし、これらは Debye や Lorentz 等の比較的単純な分散モデルに対して有効であるが、生体組織等のように通常、複素誘電率が Cole-Cole 分散モデルによって表される媒質への適用が困難である。他にも、Davidson-Cole や Havriliak-Negami 等の様々な分散モデルがあるが、時間領域において分数次数微分の定式化が困難なため、これまで統一的に解析できる手法は存在しなかった。

著者らは、この問題を解決するために、分数次数微分を定式化することなく、周波数領域で表現されている分散モデルを数値的に z 領域へ変換することで、FDTD 法に容易に組み込む手法を提案した。図 1 に示すように、周波数領域から複素周波数領域へ変換し、複素周波数領域での表現

を高速逆ラプラス変換(Fast Inverse Laplace Transform; FILT)を用いて数値的に複素誘電率の時間領域におけるインパルス応答を求め、時間波形の特徴を抽出できる Prony 法を利用して、 z 領域での表現を数値的に求めた。得られた表現は z 領域の有理多項式であるが、部分分数展開することで、次式のように一次または二次の有利関数で表することができる。

$$X(z) = \sum_{l=1}^{N_l} \frac{A_l}{1 - p_l z^{-1}} + \sum_{k=1}^{N_k} \frac{B_k - C_k z^{-1}}{1 - r_k z^{-1} + q_k z^{-2}} \quad (1)$$

ここで、 N_l 及び N_k はそれぞれ実数の極数及び複素数の極の対数である。 $A_l, p_l, B_k, C_k, r_k, q_k$ は Prony 法から求めた係数であり、すべて実数である。物理的には、右辺の第一項が時間領域において指数関数的に減衰する項に対応しており、第二項が指数関数的に減衰しながら、正弦的または余弦的に振動する項に対応している。(1)式を用いて定式化することで、様々な分散モデルに対して一般化した形で電界及び磁界の更新式を得ることができる。

本論文では、まず Jonscher-Raicu 分散を有する誘電体球に対する散乱の解析を行い、提案手法の妥当性を検討した。解析で得られた誘電体球内部の観測点における時間波形を Mie による解析解と比較することで妥当性を確認した。

次に、人体近傍における広帯域アンテナの設計に対して、本手法の有効性を示すために、均一性誘電直方体及び不均一性を有する人体モデル近傍における広帯域アンテナの反射係数を求めた。本手法を用いることで、Cole-Cole 分散を組み込み、一度で広帯域な解が得られるため、従来の Yee アルゴリズムを用いた場合よりも格段に効率よく解析が行えることを示した。

現在まで本論文で提案した手法を時間領域において分数次数微分を取り扱う必要がある Cole-Cole, Davidson-Cole, Havriliak-Negami 等の様々な分散モデルに対して適用できることを確認した。また、生体ばく露評価問題及び人体近傍の広帯域アンテナの設計に対して適用した例を示したが、他にも人体内外電波伝搬・人体内インプラントアンテナの設計、地中レーダの解析、パルスを用いた構造物の非侵襲的検査、高速に動作する電子回路設計等の様々な分野において応用されると期待できる。

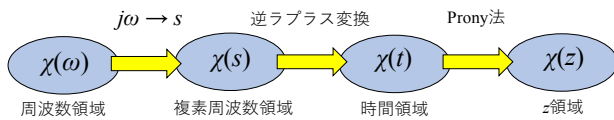


図1 提案法の概要

本研究の着想に至った経緯

本研究の源となる研究は、私が2002年に秋田大学4年生として研究室に配属されたときまで遡ることができる。環境電磁工学(Electromagnetic Compatibility; EMC)分野の井上浩教授(現、名誉教授)からは、フェライトの電磁ノイズ抑制効果に関する研究テーマが与えられ、FDTD法を用いてその抑制効果を数値的に検証していた。当時、私が図書館で見つけた一冊の本”Electromagnetic Simulation Using FDTD Method” [1]から z 変換を用いて分散性媒質の電磁界解析について勉強した。また、図書館にこもって日々様々な文献を漁り読みしていたとき、レーダ信号解析に用いられるMatrix Pencil (MP)法に関する文献もたまたま読んだ[2]。当時の私には、MP法の内容は理解できなかったが、数年後にMP法がProny法と同じく波形の特徴を抽出する手法であることを理解した。

その後、秋田大学を卒業してから東北大学において、澤谷邦男教授(現、名誉教授)及び陳強准教授(現、教授)に師事し、引き続き、計算電磁気学分野の研究を行っていた。それから10年のときを経て、2013年に首都大学東京(現、東京都立大学)の特任研究員として広島で開催された国際学会URSI-EMTSでFILTを用いた誘電体散乱の時間領域解析に関する研究発表を聴講した[3]。当時、私は生体ばく露評価について研究していたが、広帯域解析時の問題点について認識がなかった。自分が研究対象とする解析モデルがラットで比較的に小さく、解析周波数も一点で良かったためである。それから2013年9月に情報通信研究機構の電磁環境研究室に移ってからは、人体モデル等の解析対象の規模も大きくなり、解析周波数も様々であったため、生体EMC分野においてより効率良く解析できないかと思い、生体組織の分散特性を考慮した広帯域の時間領域解析法について取り組もうと常々思っていた。そこで、複数誘電率の分散項にFILTを適用し、時間領域のインパルス応答を求めることができないかと考えた。そして、2017年の春からFILTとProny法を組み合わせた手法について検討した結果、非常にうまく行ったため、すぐに論文執筆に取り掛かった。私は今でも当時、Cole-Coleモデルに対して、広帯域でFDTD解析ができたときの感動を鮮明に覚えており、嬉しい気持ちと共に感謝の念もこみ上げ

てきた。それは同年2月に第一子を出産した後ずっと育児で子供の世話をしていた、妻への感謝の気持ちであった。同年夏に提案手法及び人体モデルを用いた数値解析について2編の論文にまとめ、IEEE Trans. Antennas Propagat.に投稿した。両編の論文に対する査読は厳しかったが、なんとか採録まで辿り着くことができた。それから招待論文の執筆依頼を法政大学の柴山純教授から頂いたため、一般定式化を含めて、人体近傍の広帯域アンテナの解析について研究成果を本招待論文に取りまとめた。最終的に、このような形で栄誉な招待論文賞を頂いたのは、本当に望外の喜びであったと共に、今後の関連研究の発展にますます励むよう、身を引き締まる思いである。

ここまで、一連の流れを振り返ってみたら、本研究を進める上でも、様々な困難もあった。私自身の研究職における不安定な立場や「そんなのできないよ」のような言葉等から、自分自身との葛藤があった。それでもやり通すことができ本当に良かったと思っている。私と同じような、職において不安定な立場に置かれた多くの若い研究者にもぜひ自分の信念を突き通す自信を持っていただければと思う。また今後機会があるたびに、若い研究者をぜひ応援・支援していきたい。

参考文献

- [1] D. M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, IEEE Press Series on RF and Microwave Techniques, 2000.
- [2] T. K. Sarkar, O. Pereira, “Using the Matrix Pencil method to estimate parameters of a sum of complex exponentials,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, no. 1, Feb. 1995.
- [3] S. Kishimoto et al., “Transient analysis of electromagnetic fields of nano structures by integral solvers with FILT,” *URSI-EMTS, Hiroshima*, May 21, 2013.

著者略歴:

2003年秋田大学工学資源学部電気電子工学科卒、2010年東北大学大学院工学研究科電気・通信工学科博士後期課程修了、工博。現在、広帯域電磁界解析手法や環境電磁工学に関する研究に従事。電気学会、信学会、IEEE各会員。2014年URSI若手科学賞、2018年信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会優秀論文発表賞等受賞。現在、情報通信研究機構電磁波研究所電磁環境研究室の主任研究員。