1-7　化合物半導体技術のエレクトロニクスへの展開

The Role of Compound Semiconductors to the Electronics Development

上田大助　田中　毅　瀧川信一

Abstract

化合物半導体のエレクトロニクスにおける用途は発光デバイスと高周波デバイス，パワーデバイスが主である．化合物半導体の多くは直接遷移形の半導体であり，電流注入で発光させることができる．一方，電子の飽和速度が大きい GaAs や InP などの化合物半導体は，高速・高周波デバイスとして使用される．高周波用途の化合物半導体については，本特集 1-4 の「ワイヤレスインターネット社会を支える高周波集積回路技術」の解説に譲り，本稿では，発光デバイスとともに，化合物半導体の中でワイドバンドギャップ半導体を用いるパワーデバイスについて，Si パワーデバイスと比較しながら概説する．

キーワード：半導体レーザ，発光ダイオード，パワー MOS，シリコンカーバイド，窒化ガリウム

1．化合物半導体の発光波長と応用

情報通信技術の発展は現代の社会構造や人々の生活を大きく変えつつある．ディジタル化によって情報処理が一元化された要因はシリコン半導体技術の飛躍的進化であることは言うまでもない．化合物半導体技術は，シリコンでは実現できない領域を補完することが契機になって研究開発が進んだが，システム実現の可否を決めるキーデバイスとして位置付けられることになった．

電流注入で発光できる化合物半導体は，幅広い波長領域の LED を実現している．初期の LED は長波長のものから実現されたが，現在では材料や構造を変えることで，紫外から赤外までの発光が可能となった．図 1 は化合物半導体の発光波長と主な用途を示す．現在では，様々な材料を用いて，赤外から紫外に至るまで 10 nm 刻みの LED を供給するメーカも存在する．代表的な光デバイスは LED とレーザであり，様々な用途開発が行われてきた．

以下に波長域で分け，レーザと LED の二つの光デバイスについて概説する．

（1）　赤外域

化合物半導体のれい明期から研究が進んだ GaAs 系半導体は，1962 年に Biard らによって初の赤外発光ダイオード（LED）が実現された[1]．人の目に見えない赤外 LED はテレビのリモコンに採用されることで市場化された．1970 年には，林らは同様の材料でダブルヘテロ構造を実現し，室温連続レーザ発振を達成した[2]．半導体レーザは，音楽再生用コンパクトディスク（CD）に採用され，新しい市場を育んだ．図 2 は 1980 年代に使用された CD 用半導体レーザである．

石英ファイバの透過損は 1.3 μm と 1.5 μm 帯で最少となることが明らかになり，1980 年代には，同波長帯で発振する GaInAsP 系レーザが InP 基板上に作成された．その後，長波長のレーザは自動車の衝突防止装置や，距離測定装置（ライダ）の光源，生体での透過性に

上田大助　正員：フェロー　京都工芸繊維大学グリーン・イノベーションセンター
E-mail　dueda@kit.ac.jp
田中　毅　正員　パナソニック株式会社オートモーティブ＆インダストリアルシステムズ社
E-mail　tanaka.tsuyoshi@jp.panasonic.com
瀧川信一　パナソニック株式会社オートモーティブ＆インダストリアルシステムズ社
E-mail　takigawa.shinichi@jp.panasonic.com
Daisuke UEDA, Fellow (Green Innovation Center, Kyoto Institute of Technology, Kyoto-shi, 606-8585 Japan), Tsuyoshi TANAKA, Member, and Shinichi TAKIGAWA, Nonmember (Automotive & Industrial Systems Company, Panasonic Corporation, Nagaokakyo-shi, 617-8520 Japan).
電子情報通信学会誌　Vol.100 No.9 pp.919-924 2017 年 9 月
©電子情報通信学会 2017

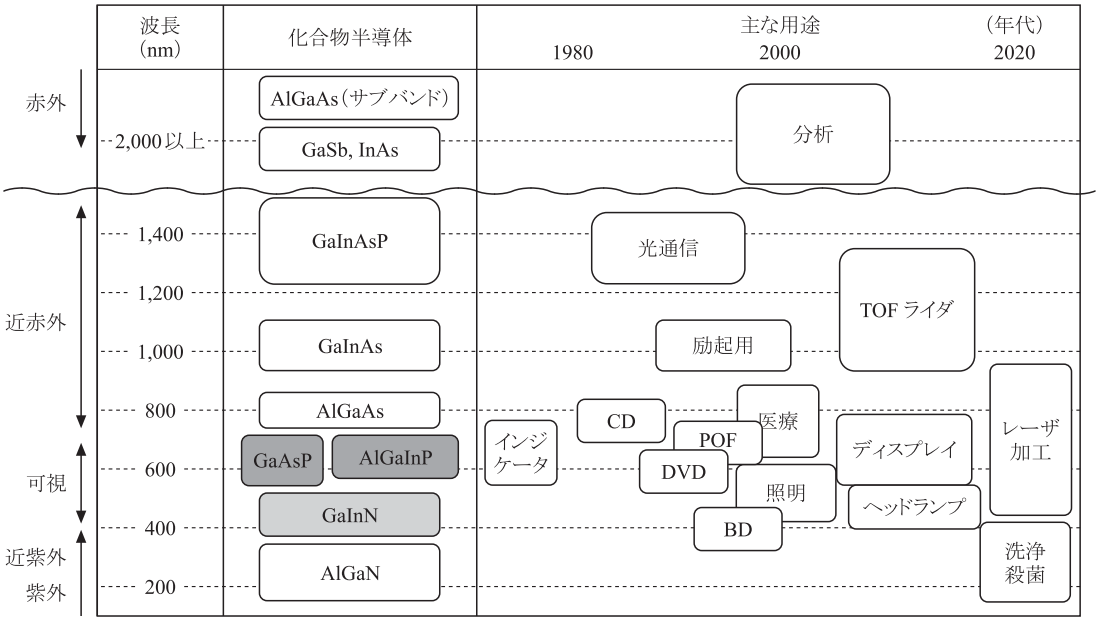

図1　化合物半導体材料と発光する波長（主な用途の年代は，製品化された時期）

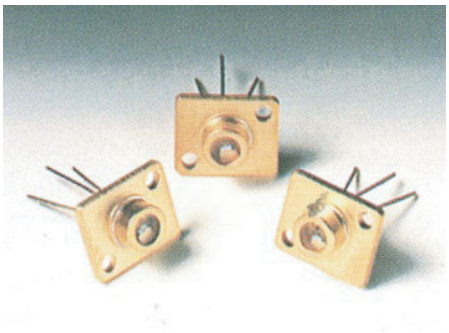

図2　1981年に量産化されたCD用半導体レーザ MEL4757

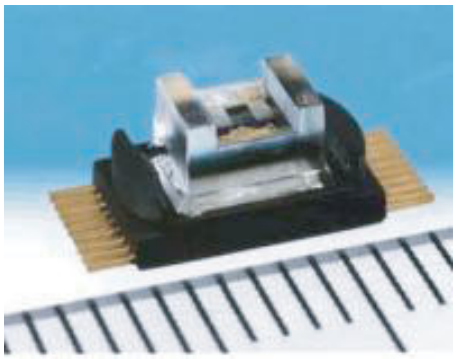

図3　半導体レーザとフォトデテクタICを機能集積したホログラムモジュール

優れることを利用して，医療用に開発が進んでいる．

（2）　可視域

GaAsP（nドープ）は間接遷移形半導体であるが，禁制帯内のトラップを利用して，赤色～緑色発光が可能である．これらは表示LEDとして実用化された．長年の夢だった青色発光は多くの試行錯誤から始まった．1990年代に材料として候補に挙がっていたのは，SiC，ZnSe，GaNである．最終的に競争に勝ち残ったのは窒化物半導体である．これは信頼性と効率に優れていたからである．窒化物半導体技術に関しては次章で詳説する．

蛍光体を組み合わせた白色LEDは液晶バックライトから使用され始め，省エネ性から一般家庭の照明に展開され，蛍光灯さえも置き換えるようになった．窒化物LEDが起こした社会的影響は計り知れない．2014年には，窒化物LED実現の業績により赤﨑，天野，中村にノーベル物理学賞が授与された．

一方，大容量化を求められた光ディスクはCDからDVD，Blu Rayへと高密度化が進み，より短波長のレーザ光源の開発が必要になった．1985年には，赤色AlGaInP系半導体レーザ[3]，1996年に青紫色InGaN系半導体レーザ[4]が実現された．このように1980年代から2000年代に掛けて，半導体レーザの短波長化／高出力化と，光ディスクの高密度化／高速化は，相互に強く関係し合って発展した．

更に，1990年前後から，レーザ光源と検出フォトデテクタの機能を集積化することが始まり[5]，光の入出力を分岐するホログラムを用いて，発光・受光を行う機能化集積光学デバイスが実用化された．図3は1990年代に使用されたホログラムユニット・モジュールである．現在の光ディスクは多層化され12 cmディスク片面容

量 50 GByte まで達しているが，通信速度の飛躍的拡大とともに，パッケージメディアの役割は次第に縮小し，ディジタルアーカイブ用途などの方向へ特化しつつある．

（3） 紫外～近紫外域

窒化物を用いる紫外光源は 2010 年代に入って，研究開発が加速している．短波長化は深紫外（波長 250 nm）域まで進み，今後，水銀ランプの置き換えや，医療現場での殺菌，洗浄などの用途に拡大すると予想される．

2. 窒化物半導体について

日本で生まれ，世界を変えた窒化物半導体の歴史を振り返ってみたい．窒化物半導体は，バルク基板がない，p 形半導体が得られないなどの問題があり，実用的なデバイスの実現には大きな壁が存在した．

これに対し，赤﨑，天野はサファイア基板と GaN のエピタキシャル層の間に低温で堆積した（AlN バッファ層）を形成することにより，平たん・低欠陥の GaN 膜が成長できることを見いだした[6]．更に Mg を添加した GaN 膜に低エネルギー電子ビームを照射することで，p 形化できることを発見した[7]．1989 年には，GaN 材料の pn 接合による電流注入形の青色 LED（GaN の発光波長は紫外であるので，トラップによる発光であったと推定される）が発表された[7]．一方，中村は結晶成長装置のガスの流れをツーフロー方式にし[8]，より簡易な熱アニールによって p 形活性化を実現し[9]，GaInN を発光層にしたダブルヘテロ構造 LED の製作に成功した[10]．更に中村らは YAG 蛍光体を組み合わせ，補色となる黄色発光と混色することで白色 LED を開発した[11]．表 1 にブレークスルー技術の年表を示す．

青色レーザの実現を契機にして，2010 年には三原色のレーザを用いた高色純度で高輝度のレーザプロジェクタが実用化された[12]．また 2011 年には，窒化物半導体レーザ光源を用いて車載用の白色ヘッドランプが発表された[13]．図 4 はその例である．点光源として扱えるレーザヘッドライトは 500 m 以上の遠距離照射が可能であるため[14]，夜間の高速運転における視認性を高められる．

3. パワー半導体の歴史

やがて枯渇する化石燃料や地球温暖化による環境問題から，太陽光や風力などの再生可能エネルギーシステムは拡大する一方である．未来社会のエネルギー基盤は電力になることは明確になった．ここに化合物（特にワイドバンドギャップ半導体）を用いた高効率の電力変換器の実現の機運が生まれた．

表 1　窒化物半導体発光素子の技術進展

発表年	技術進展の内容	文献
1986	低温 AlN 緩衝層による高品質 GaN 成長	（6）
1989	低エネルギー電子ビーム照射による p 形 GaN	（7）
1989	ホモ接合 GaN LED の発光	（7）
1991	ツーフロー方式 MOCVD による高品質 GaN 成長	（8）
1992	熱アニールによる p 形 GaN	（9）
1993	ダブルヘテロ接合 InGaN LED による青色発光	（10）
1996	青色 LED と YAG 蛍光体を用いた白色 LED	（11）
1996	InGaN レーザの室温連続発振	（5）

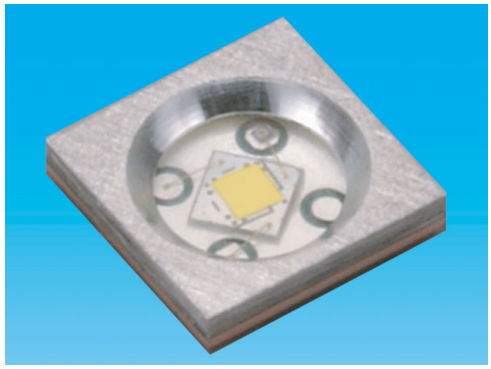

図 4　InGaN/GaN 青色 LED に YAG 蛍光体を塗布した白色 LED

はじめに，パワー半導体の歴史を振り返っておこう．図 5 にパワー半導体の開発年表を示す．1951 年にショックレーが接合形トランジスタを発明した当初から，トランジスタの大電力化は重要な課題であった．バイポーラトランジスタの大電力化は Emitter Crowding 効果のために，上限が存在する．すなわちエミッタ周辺長によって動作電流の上限が決まる[15]．このため，1956 年には RCA 社と GE 社から，動作電流の大きいサイリスタ（Ge は Silicon Controlled Rectifier : SCR と呼んだ）が開発された．サイリスタの特長はキャリヤ注入が接合全面で生じるため，Emitter Crowding 効果は存在しないことである．したがってサイリスタは大電流動作が可能であるが，デバイス内の自立的な正帰還メカニズムによって，ターンオフが難しい．1970 年代には，ゲート電流を引き抜く機能を持たせた GTO（Gate-Turn-Off）サイリスタが生まれ[16]，電車や新幹線などに使用されるようになった．更に双方化動作させる Triac など[17]，数多くのサイリスタ派生のデバイスが提案された．

1970 年代後半になると，Si で発展した集積化プロセスを用いて，MOSFET を並列接続した縦形パワー MOS が実用化された．少数キャリヤ蓄積効果がないパワー MOS は，高速スイッチングが可能であるためである．パワー MOS の登場により，スイッチングレギュレータの動作周波数は大幅に高くなり，多くのエレクト

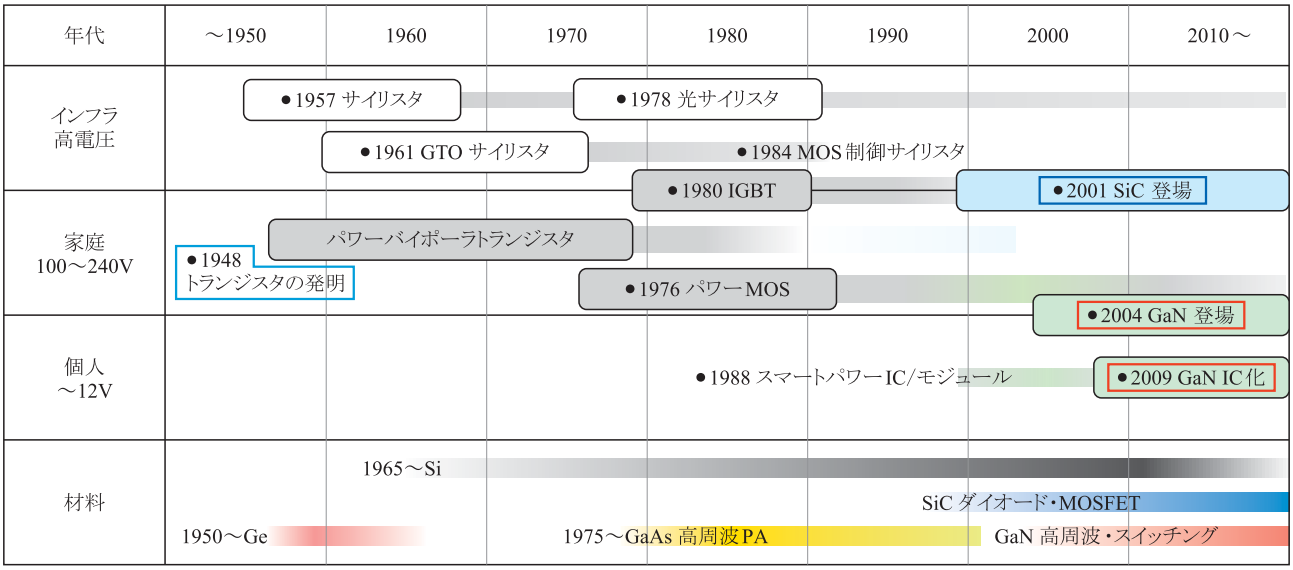

図 5　パワー半導体の発展の系譜と応用セグメントの関係

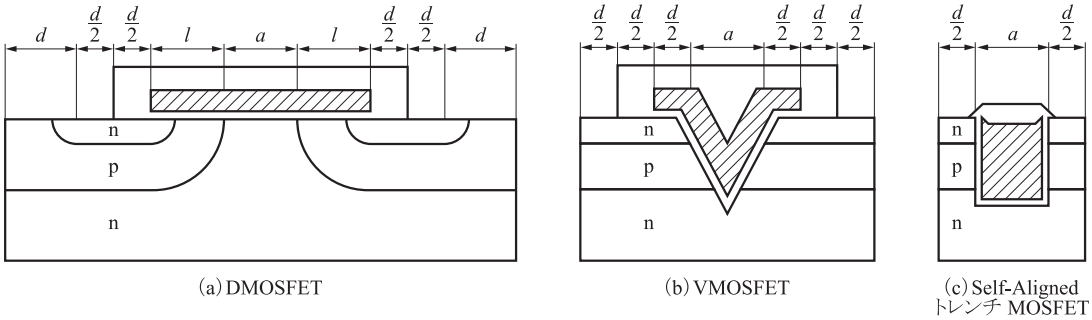

図 6　自己整合拡散（DSA : Difusion Selef-Aligned）プロセスで製作される縦形パワー MOS の代表構造

ロニクス機器の小形化が進んだ[18]．これはトランスの小形化や平滑回路のキャパシタやインダクタの小形化によるものである．

パワー MOS の動作電流はゲート幅で決まるため，集積密度を高めることでオン抵抗を削減できる．このため，米国の企業は垂井らの提案した DSA（Diffusion Self-Aligned）技術[19]を採用することで，実用化において先行した．図 6 に代表的な DSA MOSFET の構造を示す．現在では集積密度を極限まで高めたトレンチ構造のパワー MOS が標準である[20]．1980 年代には，パワー MOS はバイポーラトランジスタを駆逐すると言われたが，実際の交代は IGBT の登場まで待たなければならなかった．

最初の IGBT 構造は三菱の山上の特許である[21]．ただし，その発想の源流は多様なサイリスタ研究の中に見ることができる．これらのデバイスの動作のポイントは，図 7 に示すように，基板側の pnp バイポーラトランジスタのベース電流への電子注入を行う機能である．これを npn バイポーラトランジスタとすれば GTO サイリスタとなり，SIT（Static Induction Transistor）とすれば SI サイリスタ[22]となり，MOSFET とすれば IGBT になる．これらのデバイス構造はサイリスタを内蔵するため，大電流化は容易であるが，スイッチング速度が低い欠点がある．

4. SiC と GaN パワーデバイス

SiC 材料には 3C，4H，6H など様々な結晶系（ポリタイプ）がある．一般的な 4H の場合，バンドギャップは 3.26 eV であり，臨界電界強度は Si の 10 倍以上になる．このため，SiC は高耐圧化してもドリフト領域の抵抗の増大が少ないため，高速動作と大電流動作を兼ね備えたデバイスを実現できる．SiC パワーデバイスへは松波らが開拓したポリタイプの発生を抑制できるオフ基板を用いる結晶成長法の開発[23]や高い移動度が得られる（11-20）面の発見[24]などがブレークスルーになった．現在では，ショットキーダイオードとトレンチ形パワー MOSFET が実用化されつつある．

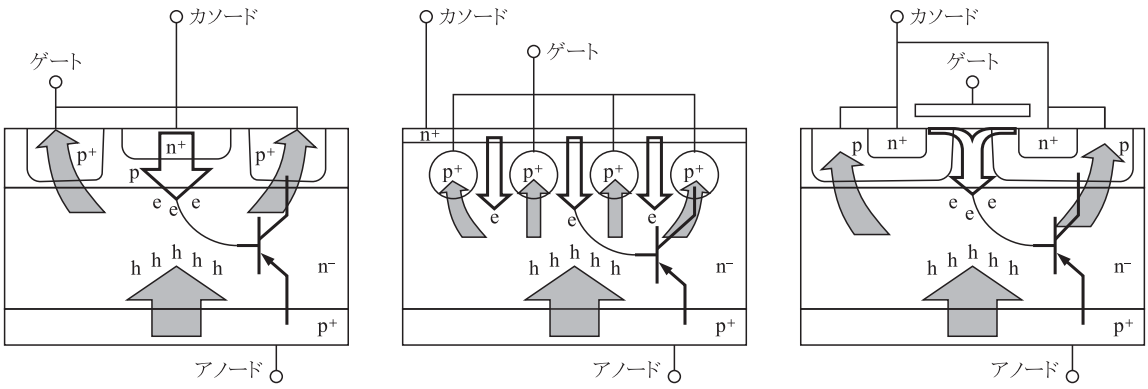

図7　伝導度変調を利用した（サイリスタ構造を内蔵する）パワーデバイスの分類

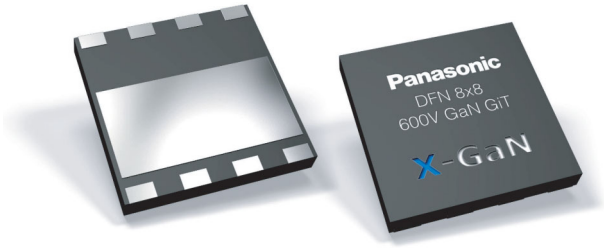

図8　面実装化することで高速化されたGaN/AlGaNトランジスタの例

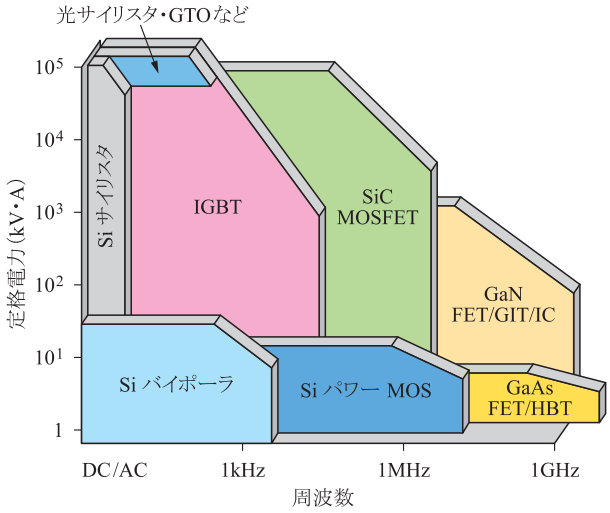

図9　電力及び周波数セグメントで見たパワーデバイスの守備範囲

化合物半導体を用いた高周波・通信デバイスは，2000年以降では微細化Si MOSFETやSiGe HBT（Heterojunction Bipolar Transistor）の登場により，特に小信号増幅器における化合物デバイスの用途は縮小した．現在の化合物高周波デバイスの市場は送信用PA（Power Amplifier）に絞られる．ここで，青色LEDの事業化で蓄積された結晶成長技術やプロセス技術をベースにして，GaNパワーアンプの研究開発が始まった[25]．

2000年代に入り，GaN半導体をスイッチングデバイスへ展開する研究が開始された．これまでのSiデバイスを超える高速スイッチングの実現を狙ったものである．2010年にスイッチング周波数をMHz領域に高めた超小形DC-DCコンバータが開発され，インバータやマトリックスコンバータの実現に向けた世界的な開発競争が始まっている．図8はGaNパワートランジスタの例である．リードインダクタンスの影響を最小化するため面実装形のパッケージや両面放熱のためのプレスパック技術が重要になっている[26]．

GaNバルク基板の開発は緒に就いたばかりである．基板材料としてサファイア，SiC，Si，Ga_2O_3などを用いたヘテロエピ技術によってFETを製作する場合が多い．将来，GaNバルク基板が実用化されれば，縦形構造を採用することで大電流・高耐圧の産業用パワーデバイスを実現できる可能性もある[27]．また，横形構造GaNパワーデバイスは集積化に適しており，小形機器のスマートパワーICへの実用化が期待されている．

このようにSiCやGaN電力デバイスはエレクトロニクスをrenovateするものとして期待される．GaNとSiCの材料的特長に応じて，今後はコンシューマ用と電力インフラや輸送システム向けなどに適切な展開方向に分化していくと推察される．図9にパワーデバイスの扱う電力とスイッチング周波数の関係の中で予測される各種デバイスのセグメンテーションを示す．

以上述べたように，化合物半導体は，システム実現のキーデバイス，あるいは差別化の中核的なデバイスとして，今後も研究開発が進められると予測される．

文　　献

（1） J.R. Biard, E.L. Bonin, W.N. Carr, and G.E. Pittman, “GaAs infrared source,” 1962 IEDM, vol. 8, p. 96, 1962.

（2） I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. Foy, and S. Sumelay, “Junction lasers which operate continuously at room temperature,” Appl. Phys. Lett., vol. 17, no. 3, pp. 109-111, 1970.

（3） K. Kobayashi, “Room-temperature CW operation of AlGaInP double-heterostructure visible lasers,” Electron. Lett., vol. 21, no. 20, pp. 931-932, 1985.

（4） S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, and H. Kiyoku, “Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes,” Appl. Phys. Lett., vol. 69, no. 26, pp. 4056-4058, 1996.

（5） A. Yoshikawa, H. Nakanishi, and K. Ito, “Laser-detector-hologram unit for thin optical pick-up head of a CD player,” IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. B, Adv. Packag., vol. 18, no. 2, pp. 245-249, 1995.

（6） H. Amano, N. Sawaki, and I. Akasaki, “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer,” Appl. Phys. Lett., vol. 48, no. 5, pp. 353-355, 1986.

（7） H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, “P-Type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI),” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 28, no. 12, pp. L2112-L2114, 1989.

（8） S. Nakamura, Y. Harada, and M. Seno, “Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth,” Appl. Phys. Lett., vol. 58, no. 18, pp. 2021-2023, 1991.

（9） S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, “Thermal annealing effects on P-type Mg-doped GaN films,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 31, no. 2B, pp. L139-142, 1992.

（10） S. Nakamura, M. Senoh, and T. Mukai, “P-GaN/n-InGaN/n-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 1A/B, pp. L8-L11, 1993.

（11） K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi, and Y. Shimizu, “Development of high-bright and pure-white LED lamps,” J. Light Vis. Environ., vol. 22, no. 1, pp. 2-5, 1998.

（12） カシオ計算機株式会社，プレスリリース，Jan. 2010.

（13） K. Takahashi, Y. Takahira, Y. Maemura, K. Kishimoto, R. Sato, S. Ito, Y. Tomomura, H. Kawanishi, J. Suckling, and D. Montgomery, “Laser headlight for next generation automotive lighting,” Proc. 9th Int'l Symposium on Automotive Lighting, pp. 271-283, 2011.

（14） L. Ulrich, “Whiter brights with lasers,” IEEE Spectr., vol. 50, no. 11, pp. 36-56, Nov. 2013.

（15） S. Sze, “Physics of semiconductor devices,” 3rd edition, 3.4, pp. 169-189, oct. 2006.

（16） 関長　隆，倉田　衛，竹内　南，ターンオフサイリスター GTO の原理と応用，電気書院，1983.

（17） F.E. Gentry, R.I. Scace, and J.K. Flowers, “Bidirectional triode pnpn switch,” Proc. IEEE, vol. 53, no. 4, p. 355, 1965.

（18） 長谷川　彰，改訂 スイッチング・レギュレータ設計ノウハウ，CQ 出版，1993.

（19） Y. Tarui, Y. Hayashi, and T. Sekigawa, “Diffusion self-aligned MOST,” Proc. 1st SSDM, Japan, 1969.

（20） D. Ueda, H. Takagi, and G. Kano, “An ultra low on-resistance power MOSFET fabricated by using fully self-aligned process,” IEEE Trans. Electron. Devices, vol. ED-34, no. 4, pp. 926-930, 1987.

（21） 山上倖三，特許公告，昭 47-21739.

（22） J. Nishizawa, Y. Kajiwara, Y. Watakabe, M. Bessho, Y. Yukimoto, and K. Shirahata, “High speed high voltage static induction thyristor,” IEEE IEDM, vol. 23, pp. 38-41, 1977.

（23） K. Shibahara, T. Saito, S. Nishino, and H. Matsunami, 18th SSDM, p. 717, Tokyo, 1986.

（24） H. Yano T. Hirao, T. Kimoto, and H. Matsunami, “High channel mobility in inversion layer of SiC MOSFETs for power switching transistors,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, part I, no.4B, pp. 2008-2011, 2000.

（25） U. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, “AlGaN/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications,” Proc. IEEE, vol. 90, no. 6, 2002.

（26） M.H. Rashid, Power Electronics Handbook, Butterworth-Heinemann, 2010.

（27） 文科省プロジェクト，省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発，2016.

（平成 29 年 4 月 3 日受付）

上田（うえだ）　大助（だいすけ）（正員：フェロー）

1979 九工大大学院電子修士了，松下電器産業（現パナソニック）株式会社入社．以来，Si パワーデバイス，GaAs 高周波デバイス，ワイドバンドギャップ半導体デバイスの研究開発に従事．1987 工博（阪大），1987～1988 Stanford Univ. Visiting Scholar，1996 大河内記念技術賞，2001 大河内生産賞各受賞．著書「高周波・光半導体デバイス」ほか．現在，京都工繊大特任教授．IEEE Fellow，JSAP Fellow．

田中（たなか）　毅（つよし）（正員）

1983 阪大・工・応用物理卒．1985 同大学院工学研究科修士課程了．同年松下電器産業（現パナソニック）株式会社入社．光デバイス，イメージセンサ，生体センシングデバイス，ヒューマンマシンインタフェース及びその応用に関する研究開発を担当．工博（阪大）．1996 大河内記念技術賞受賞．著書「高周波・光半導体デバイス」ほか．IEEE シニア会員．

瀧川（たきがわ）　信一（しんいち）

1983 京大・工・電気卒．1985 同大学院工学研究科修士課程了．同年松下電器産業（現パナソニック）株式会社入社．ワイドギャップ半導体を用いた光デバイス及びその応用に関する研究開発に従事．工博（京大）．