高周波光デバイスの変遷と今後の展開

高周波光デバイス製作所長
平野嘉仁

1. まえがき

三菱電機高周波光デバイス製作所は，1959年に当社北伊丹製作所の一部門として設立して以来，いくつかの変遷を経て1993年に製作所として独立し，一貫して高周波デバイス，光デバイスの開発，生産を行ってきた。

本稿では，これまでのデバイス開発，生産の歴史を振り返るとともに，今後の注力分野について述べる。

2. 高周波デバイス

2.1 トランジスタ開発と無線通信用デバイス

2.1.1 事業・技術の変遷

高周波デバイスでは，研究所で最先端の化合物半導体デバイスを開発し，その成果を社内の宇宙・防衛・通信事業に展開して製品力を磨き，その後量産化技術を磨いて市場の低コスト化要求に応えることで社外展開を図ってきた。化合物半導体トランジスタとしては，ガリウムヒ素(GaAs)による MESFET(MEtal Semiconductor Field Effect Transistor)に始まり，HEMT(High Electron Mobility Transistor)，HBT(Hetero-junction Bipolar Transistor)，さらに窒化ガリウム(GaN)によるHEMTと先端デバイスを順次発売して，市場要求に応えてきた(**図1**)。GaAs MESFETは1979年から生産を開始し，1980年にはX帯誘電体発振器に適用し，その後，集積化を進めて1984年には国内初のGaAs MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)となる30GHz帯高出力増幅器に適用した。また1987年には衛星放送受信機向けに世界最高レベルの低雑音特性を持つGaAs HEMTの量産を開始し，現在では月間4,000万個を生産するにいたっている。GaAs HBTは，現在，小型かつ低コストなMMICとして携帯電話端末の増幅器用に量産するとともに，他用途のMMICにも適用している。

このほかにも，2002年から，車載ミリ波レーダによる衝突被害軽減システム向けに，77GHzミリ波信号の増幅器，ミキサ，電圧制御発振器からなるGaAs MMICチップセットの生産を行っており，これまで累計70万台以上のミリ波レーダに用いられている。増幅器とミキサをGaAs HEMTで実現するとともに，電圧制御発振器にはHBTを採用することで世界最高レベルの低位相雑音を実現しレーダの精度向上に寄与している。

一方，最近は，動作電圧がGaAsより高く，高出力動作が可能なGaNデバイスの製品化に注力している(**図2**)。GaN HEMTは高効率なため，機器の低消費電力化，小型軽量化が可能で，衛星通信，レーダ，携帯電話基地局の増幅器として適している。当社では2005年のC帯140Wを皮切りにL帯360W，S帯330W，Ku帯80Wのデバイスを開発してきた。

当社GaN HEMTでは，独自の触媒化学気相成長法(CATalytic Chemical Vapor Deposition：CAT-CVD)による絶縁膜を用いることで，半導体表面へのダメージを軽

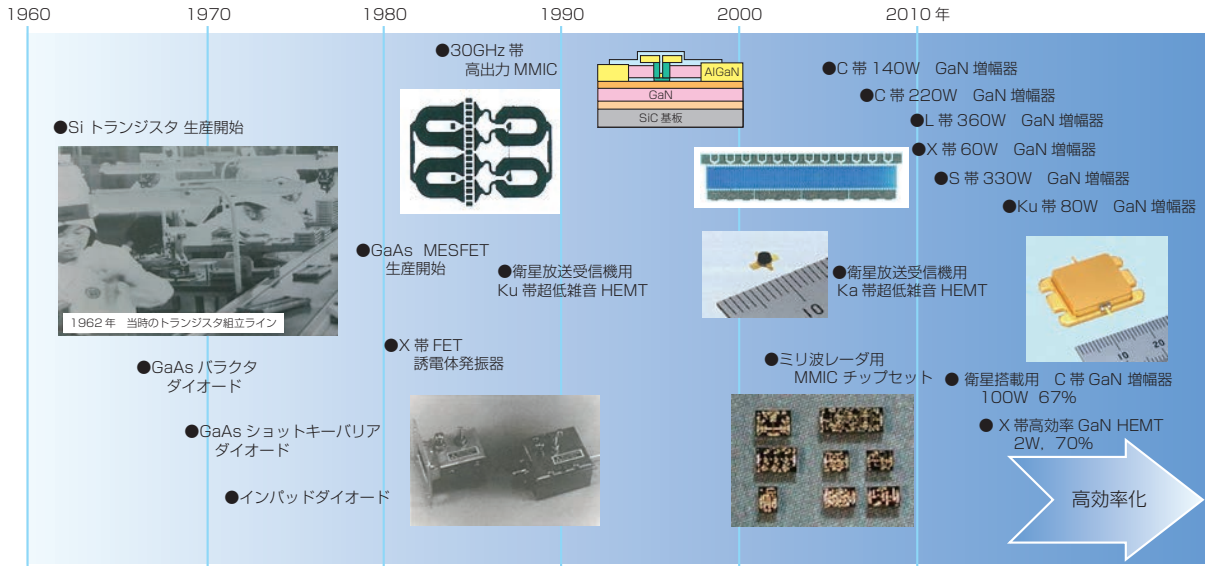

図1．当社の無線通信用デバイスの変遷と今後

減し，半導体中の電子の流れを改善してトランジスタの効率を向上させている。また，ソース・ドレイン電極の直下にオーミックイオン注入構造を採用することによって，寄生抵抗を低減してトランジスタで発生する電力損失を抑制し，更なる高効率化を図っている。これらの技術によって，2011年にC帯100Wで67％，2012年にはX帯2Wで70％の電力付加効率を達成した。

近年，携帯電話基地局ではグリーン化の要請から消費電力低減が大きな課題となっており，中でも電力消費の大きい高出力増幅器の効率向上が重要である。GaN HEMTは従来基地局用高出力増幅器で主に用いられてきたシリコンLDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor)に比べて高効率であり，次第に採用されつつあるが，コスト高が普及の障害となっている。このため当社では，高価な炭化ケイ素(SiC)基板に代えて安価なシリコン(Si)基板上にGaNをエピタキシャル成長する“GaN on Si”の技術開発を進めている。格子定数の大きく異なる材料間での，独自のエピタキシャル成長技術を確立することで，“GaN on SiC”並みの電気特性と信頼性を確認するにいたっている。

2. 1. 2　今後の展開

グリーンIT時代の要請に応じるために，高効率・高出力で低コストなGaNデバイスの開発を推し進め，その普及率を高めていく。さらに将来に向かっては，より高出力が可能なⅢ－Ⅴ窒化物系デバイスなどの次世代新材料デバイスの開発も進めていく。また，安心・安全に向けた取組みとして車の安全サポートも重要性が増しており，ミリ波レーダを利用した先進運転システムの普及が社会的要請となりつつある。高精度なレーダの広範な普及に向けて，GaAs MMICではチップスケールパッケージングなど低コスト化を進めていく予定である。

2. 2　携帯電話端末用デバイス

2. 2. 1　事業・技術の変遷

図3に当社携帯電話端末用デバイスの変遷を示す。当社は日本における携帯電話の黎明(れいめい)期から高出力増幅器(Power Amplifier：PA)の開発を行っており，1987年には，既に当社製アナログ携帯電話にPAモジュール(PA Module：PAM)を採用していた。初期のPAMは単体のGaAs MESFETと容量，コイル等のチップ部品から構成され，そのサイズは，45.0×12.0×6.3(mm)と大きかったが，1991年にはMMIC化によって小型化したPAMが使用された。また同時期に開発した携帯電話端末用周波数分周器(プリスケーラ)は，従来比1/2以下の低消費電流化を実現したもので，世界初の量産化GaAsデジタルICとしてR&D100賞を受賞した。

その後，日本の携帯電話は第1世代のアナログから第2世代(2G)のデジタルに移行し，その価格，サイズの低下と相まって爆発的に普及した。当社は1992年にPDC(Personal Digital Cellular)，1993年にはPHS(Personal Handy-phone System)に対応したPAMを量産化した。この後，当社のPAMは，その高効率化・小型化によって，携帯電話端末の高性能化・小型化，ひいては爆発的な普及に寄与することになる。高効率化のため1996年にはPAMの基本デバイスをGaAs MESFETからGaAs HEMTに変更し52％の高効率を実現した。また，小型化のためPA，LNA(Low Noise Amplifier)，SW(Switch)，負電源発生回路を1チップに集積した送信用多機能MMICをPHS端末向けに開発した。引き続き1997年には第3世代(3G)のN－CDMA(Narrowband Code Division Multiple Access)対応PAMを，1999年にはW-CDMA(Wideband Code Division Multiple Access)対応PAMを量産化した。また同年，海外携帯電話で主流であったGSM(Global System for Mobile Communications)方式に対応するための900/1,900MHzに対応したデュアルバンドPAMをGaAs HBTで日本メーカーとして初めて量産化し，当社の欧州向け携帯電話に供給した。

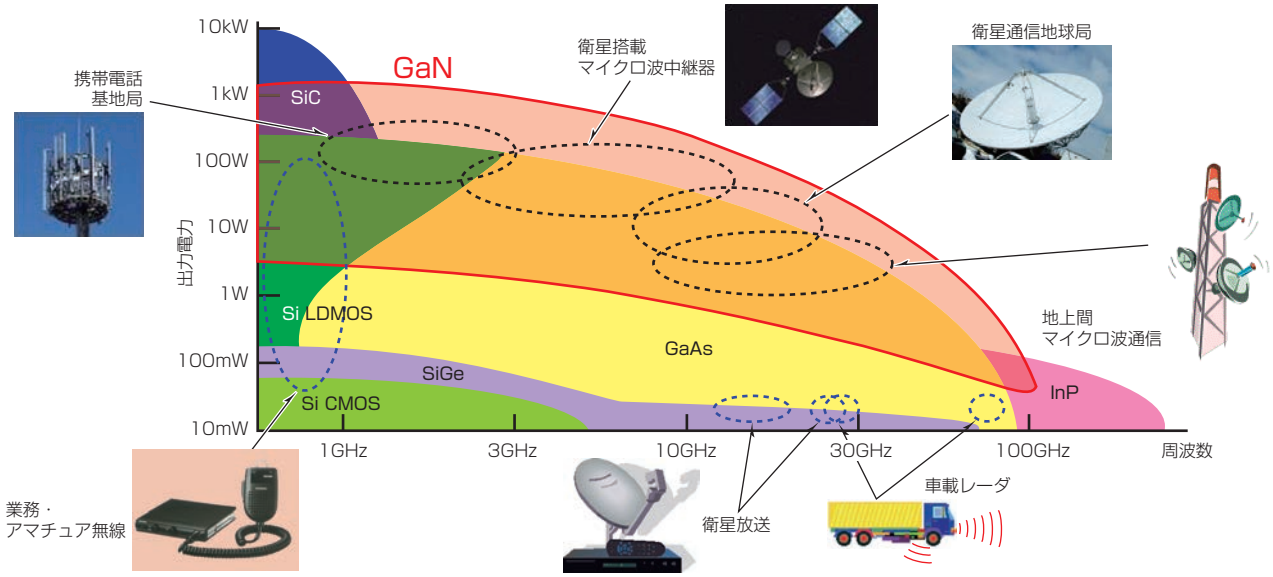

図2．高周波デバイスの材料と応用分野

2002年当時，PDC用の当社HEMT PAMは，小型(4.5×4.5×1.5(mm))，高効率(57%)を実現し国内トップシェアを獲得した。2004年以降はHBTを採用したN/W-CDMA用PAMに主力が移行し，2005年に，そのサイズを3.0×3.0×1.0(mm)まで小型化した。以降，携帯電話の帯域確保のためのマルチバンド化に伴い，2008年には，W-CDMAで800MHz／2GHzに対応したデュアルバンドPAMを3.0×4.5×1.0(mm)という画期的な小型サイズで実現し，さらに2010年には同サイズで1.7GHzを加えたトリプルバンドPAMを実現した。

近年，スマートフォンの普及によってデータ通信量は爆発的に増加しており，更なる高速化とバンド数の確保が課題となっている。また世代の異なる通信方式と多くのバンドを同時にサポートするために，マルチバンド(Multi Band：MB) PAMからマルチモードマルチバンド(Multi Mode Multi Band：MMMB) PAMへと高集積化が進展している。開発中のMMMB PAMでは，GSMの4バンド，WCDMA／LTE(Long Term Evolution)のバンドをカバーしながら占有面積をシングルバンドで構成した場合の約1/3(7.0×5.0×1.0(mm))に縮小している。また出力バンド切替え機能と新しいデジタルインタフェース(Mobile Industry Processor Interface：MIPI)に対応するため，HBTに加えHEMT，CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)を搭載している。

2.2.2　今後の展開

2014年に，複数帯域を同時に使用して伝送レートを高めるLTE Advancedが実用化されたが，広帯域化とともに，現状の1～2GHz帯に加えて3.5GHz帯以上の周波数も使用されるため，PAMの高周波化が求められる。また小型化・高集積化の要求はとどまるところを知らず，MMMBの進化形としてフィルタやアンテナスイッチ等の周辺部品まで取り込んだフロントエンドモジュール(Front End Module：FEM)が主流になっていく。一方，低消費電力化技術としては，アンテナとPAMの整合条件を各バンドで最適に保ちPAMの効率を向上させるチューナー技術や，PAMの電源電圧を変調波の包絡線振幅に合わせて制御し消費電力を削減するET(Envelop Tracking)技術，歪み補償技術が広く採用されていくと予想される。

3. 光デバイス

3.1　事業・技術の変遷

当社はレーザダイオード(Laser Diode：LD)発明の黎明期から研究開発に取り組み，マイルストーンを刻んできた(**図4**)。1967年にはアルミニウムガリウムヒ素(AlGaAs)半導体を用いて世界初の可視光(波長780nm) LDの室温パルス発振を実現した。1974年には当社独自の横方向接合(Transverse Junction Stripe：TJS) LDで世界初の単一縦モード発振にも成功した。

1984年にはコンパクトディスク(CD)用LD(波長780nm)の量産を開始し，月産50万個を生産，さらに1997年には世界初の記録型DVD用高出力LD(波長650nm)を開発・製品化した。LDの長期信頼性実現に重要な技術となる端面窓構造を波長650nm帯で世界で初めて実現，規格化での波長決定を後押しするなどDVD記録光源の世界標準の確立に貢献した。以降，高出力化開発と量産を推進し，記録型DVD用高出力LDとして月産1,600万個を達成，2005年には“DVD記録用赤色高出力レーザの開発と生産”で第51回大河内記念生産特賞を受賞した。

一方，産業用にこれらのLD技術を発展させ1984年に波長1.3μmの光通信用LDとして漏れ電流抑制に優れたp基板埋め込み三日月(P-substrate Buried Crescent：PBC)構造LDを開発した。このLDを使った光通信用モジュールは，当社光通信事業で光加入者系に初めて参入した実験システム(INSモデルシステム用加入者線光伝送装置)に

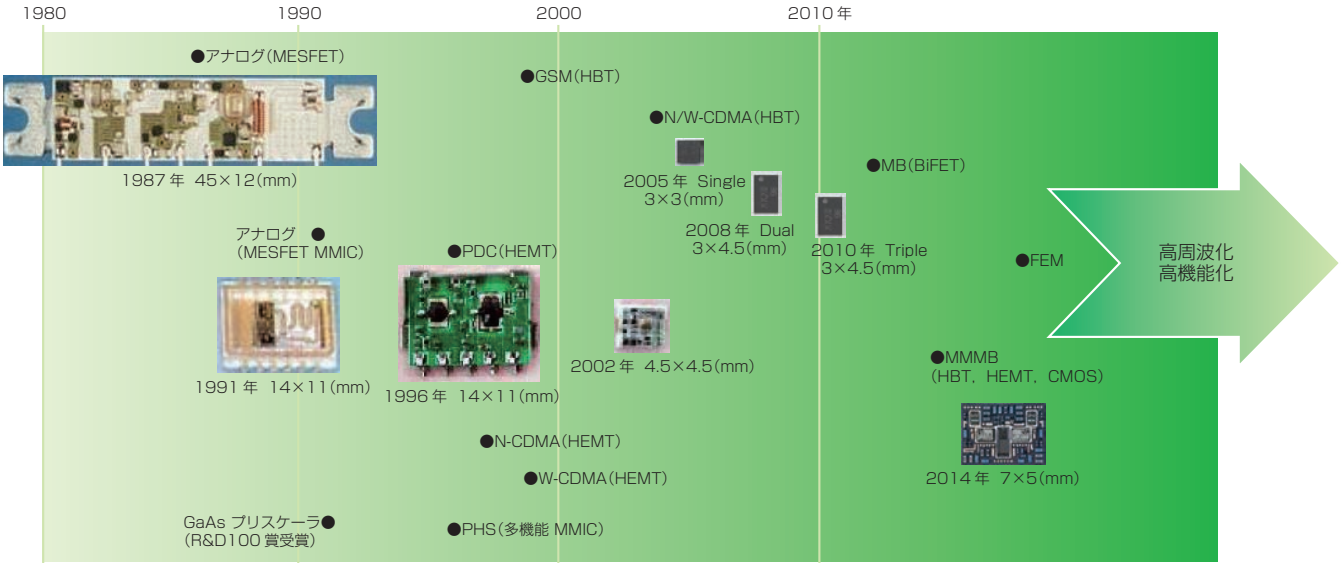

図3．当社の携帯電話端末用デバイスの変遷と今後

採用され，その際に世界初となるレーザ溶接方式モジュール構造と生産技術を確立した。その後も光通信用モジュールの重要な基礎技術となる高周波特性と冷却特性を両立させる橋渡し構造を1988年に開発するなど，世界の光通信モジュール技術の発展に貢献した。1992年には波長1.48μm，出力360mWの高出力ファイバーアンプ励起用LDを開発し，後に，第５太平洋横断光海底ケーブル（TPC-5）向け当社通信システムに搭載された世界初の直接光増幅方式中継装置に，高信頼LDモジュールとして採用された。さらに1998年には光通信の高速化に対応した2.5Gbps分布帰還型（Distributed Feed Back：DFB）LDの量産を開始した。東工大の末松栄誉教授が当時提唱したλ/4位相シフトを取り入れ，高安定な単一モードを実現したDFB LDであった。

1998年から2000年にかけての通信バブルとその崩壊を経て2005年からは国内の各家庭へ光ファイバーが接続されるFTTH（Fiber To The Home）が始まった。光通信用デバイス事業は一般民生向け品へとかじを切り，当社通信事業の機器開発と連携して1.25Gbpsファブリペロー（Fabry-Perot：FP）LD／フォトダイオード（Photo Diode：PD）のペアで日本の光通信インフラ整備を支えた。また2005年にはアルミニウムインジウムヒ素（AlInAs）を受光部に用いた2.5Gbpsアバランシェフォトダイオード（Avalanche PhotoDiode：APD）の開発に成功し，高感度特性で業界をリードした。以後海外FTTHの主流となる2.5Gbpsシステムの受光部に広く採用されている。さらに10Gbps光通信用LD／APDも含めた事業を発展させ，2008年にはDFB LD月産100万個を突破した。2009年には40Gbps変調器付きLDを製品化し，2013年には25Gbps信号を４波長集積して100Gbpsとする変調器付きLDと集積モジュールを製品化して光通信の高速化へ引き続き貢献している。

そのほか近年のLD応用として，当社から2010年に発売されたレーザを用いたプロジェクションテレビ“LaserVue”のキーデバイスとして赤色LD（波長640nm）を開発し，さらに2011年以降は液晶バックライト光源に赤色LDを採用した“レーザバックライト液晶テレビ”に赤色LDを提供し，赤色の美しさで高い評価を得ている。

3.2　今後の展開

高度に発展した高速大量情報通信社会を支えるため，光通信では高速化だけではなく装置の小型化及び低消費電力化が求められている。今日，通信は食料やエネルギーなどに匹敵する生活を支えるインフラとなりつつあるが，その一方で，エネルギー消費の観点から，現状の通信インフラ装置では持続可能な成長を約束できなくなっている。そのため，LDなどの素子段階やモジュール段階での高集積化と省エネルギー化が必須となってきており，100Gbpsや400Gbpsなどのデバイスには多重集積または多機能集積による高速化とともに，低電圧動作や高温度動作を可能にして低消費電力を実現することが求められる。また映像に用いられる赤色LDなどは，今後より美しさを追求したデジタルシネマ規格や4K／8K規格に対応するための高い波長精度が求められる。

当社は，このような市場の要請に主導的に対応する。

4. む　す　び

当社高周波光デバイス製作所で開発・製品化してきた，無線通信デバイス，携帯端末用デバイス，光デバイスについて，その歴史を振り返るとともに，今後の展望について述べた。昨今の情報通信（無線通信，光通信）のトラフィック増大に対応し，デバイス性能の向上による高速動作化とともに，小型・高集積・低消費電力化が要求されており，短・中期的に最も注力していく課題である。また，情報通信以外でも，先に述べたミリ波レーダや映像関係を含め，化合物半導体をベースとした技術で今後の社会の発展に寄与するための製品開発を行っていく。

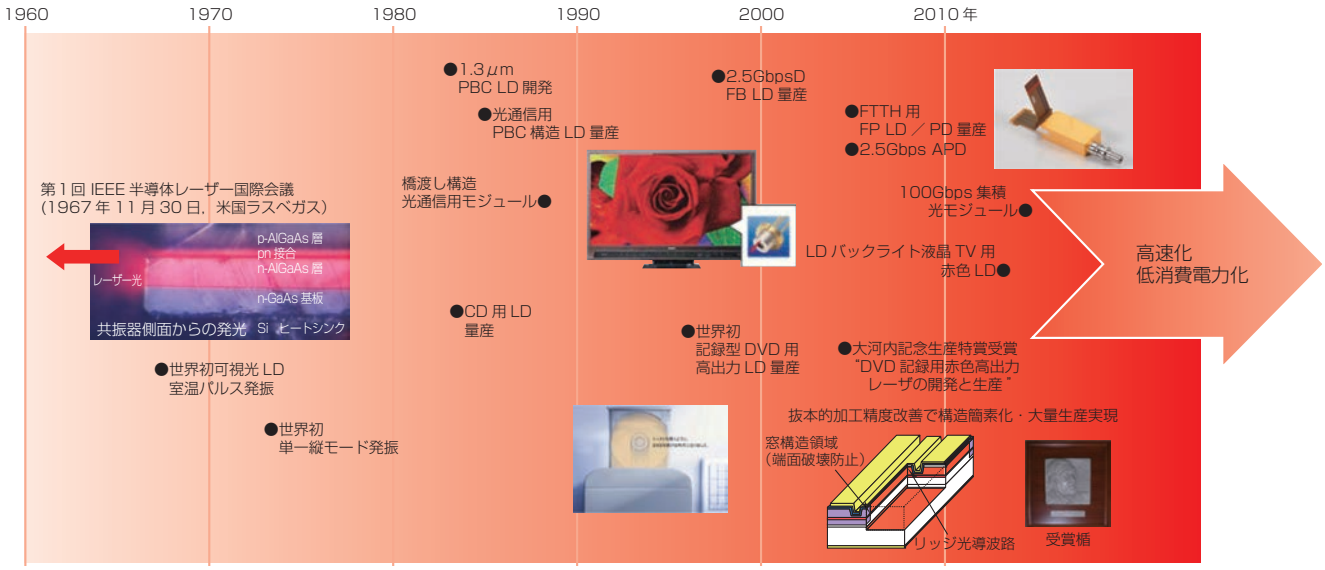

図４．当社の光デバイスの変遷と今後