3 超高周波 ICT 基盤技術 ―素子から回路まで―

3 Terahertz Wave Electronics ICT Basic Research — Device and Integration —

3-1 ミリ波・テラヘルツ波帯無線通信を実現する化合物半導体電子デ バイス技術と高周波計測技術

3-1 Compound Semiconductor Electron Devices and High-Frequency Measurement Technologies for Realization of Millimeter- and Terahertz-Wave Wireless Communications

渡邊一世 山下良美 原 紳介 町田龍人 笠松章史

WATANABE Issei, YAMASHITA Yoshimi, HARA Shinsuke, MACHIDA Ryuto, and KASAMATSU Akifumi

未利用周波数帯であるミリ波・テラヘルツ波帯 (30 GHz ~ 3 THz)の開拓や無線通信利用には、高速・高周波特性に優れた化合物半導体トランジスタやシリコン (Si) CMOS などの電子デバイス が重要である。化合物半導体電子デバイスの一つである窒化ガリウム (GaN) 系トランジスタ及び 増幅器などは 100 GHz を超える周波数で動作可能であるため、高出力・高耐圧用途だけでなく、 第5世代 (5G) 及び次世代移動体通信システムにおける無線通信を実現するキーデバイスとして期 待されている。本稿では、サファイア、炭化シリコン (SiC) 及び GaN 基板上に作製した 100 nm 以下のゲート長 (L_g)を有する GaN 系高電子移動度トランジスタ (HEMT)の作製プロセスやデバイ ス特性を紹介するとともに、作製した電子デバイスなどの性能・特性評価技術、特に高周波計測 技術について概説する。

Electron devices such as compound semiconductor transistors and Si-CMOS are key devices for millimeter- and terahertz-wave frequency band (30 GHz-3 THz) wireless communications in 5th generation (5G) and next-generation mobile communications systems. GaN-based transistors and amplifiers, which are one of the compound semiconductor electron devices, have been needed and expected for high-power and high-voltage applications because these devices can operate at a frequency over 100 GHz. This paper describes the fabrication procedure and device performance of nanoscale-gate GaN-based high electron mobility transistors (HEMTs) fabricated on sapphire, SiC, and GaN substrates. Moreover, the high-frequency measurement technologies to evaluate the electron device performances will be outlined.



2000 年代に入り、化合物半導体の一つであるインジ ウム・ガリウム砒素 (InGaAs) を電子走行層 (チャネル 層) とする高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor: HEMT) の電流利得遮断周波数 (f_T) は400 GHzを超え、2002 年には富士通研究所、通 信総合研究所(現情報通信研究機構)及び大阪大学の共 同研究においてゲート電極の長さ(ゲート長: L_g)が 25 nm(ナノメートル、1 nmは10億分の1 m)のInGaAs 系HEMTにおいて世界最高(当時)である $f_T = 562$ GHz が報告されている[1]-[4]。これは L_g の短縮や InGaAs チャネル層の In 組成や膜厚の最適化などによるもの で、現在は1 THz を超える最大発振周波数(f_{max})や700 GHz を超える f_T が報告されている[5]-[7]。一方、窒化 ガリウム(GaN)系 HEMT も 2000 年代後半から特性が 向上し、200 GHz を超える f_{max} が報告された[8]。これ らの報告は、InGaAs や GaN などの III-V 族化合物半 導体電子デバイスが、ミリ波・テラヘルツ波帯(30 GHz ~ 3 THz)の周波数を用いた超高速・大容量無線通信、



高感度・高分解能なセンシングやイメージングなどの 実現に必要不可欠であることを示している。このよう な背景から、電波の割当てや周波数の再編を管轄する 総務省は、将来の周波数の逼迫状況を緩和し、新たな 周波数需要に的確に対応するため、2005年度より「電 波資源拡大のための研究開発」を実施し、①周波数を 効率的に使用する技術、②周波数の共同利用を促進す る技術、③高い周波数への移行を促進する技術につい ての研究開発を推進している [9]。特に③では、携帯電 話やスマートフォン、Wi-Fi などで利用が逼迫してい るため、6 GHz 以下の周波数を使用する無線システム を比較的逼迫の程度が低い高マイクロ波帯(~30 GHz) へ移行したり、未利用周波数帯の"電波・周波数 資源"を開拓する高周波利用技術に関する研究開発が 行われている。近年では、通信速度を10倍以上高速化 する次世代無線通信技術として、未利用であるミリ 波・テラヘルツ波周波数帯を用いた超高速無線通信技 術、特に周波数の割当てがなされていない 275 GHz 以 上の周波数帯で動作する電子/光デバイス・集積回路・ システムなどの研究開発が盛んに行われている。これ は、ミリ波・テラヘルツ波帯における超高速かつ大容 量な無線通信の実現が、ネットワーク上のデータトラ フィック増大に伴うバックホール回線やモバイル端末 間の高速・大容量通信の実現に寄与するものと期待さ れているためで(図1)、InGaAs 系 HEMT だけでなく シリコン(Si)CMOS 集積回路を用いた送受信機による 300 GHz 帯高速無線通信の研究開発や実証実験も活発 に行われている [10]-[16]。

我々は、いまだ十分に利活用が進んでいないミリ 波・テラヘルツ波帯 (30 GHz ~ 3 THz)の電波資源拡 大及び有効活用技術の確立や、将来の超高速無線通信 の実現に必要となる III-V 族化合物半導体である InGaAs やGaN などを電子走行層(チャネル層)に持つ HEMT に注目し、その高速・高周波・高出力性能の向 上を目指してきた。

本稿では、III-V 族化合物半導体電子デバイスの高速・高周波化について、100 nm 以下のゲート長 (L_g)を有する GaN 系 HEMT の作製プロセスやデバイス特性を紹介し、さらに電子デバイスの性能・特性評価技術、特に高周波計測技術について概説する。

化合物半導体電子デバイスの高速・高周2 波化

化合物半導体電子デバイスとして、我々は HEMT



に注目している。これは HEMT の作製に用いる化合物半導体結晶構造において、図2に示すように電子走行層(チャネル層)と電子供給層(ドーピング層)がドー ピングされていない層(スペーサー層)により空間的に 分離されているため、電子がドーピング原子(不純物) からの散乱を受けることなく、高い移動度や速度を示 し、このことにより高速・高周波特性や低雑音特性を 実現できるためである。

化合物半導体結晶は分子線エピタキシー法(Molecular Beam Epitaxy: MBE) や有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) な どにより"基板"となる単結晶半導体を下地として、下 地の半導体結晶と同じ結晶面や結晶方位を持つ薄膜結 晶を成長する(エピタキシャル成長)。MBEやMOCVD では、成長する薄膜の膜厚をÅ(オングストローム、 1 Åは 100 億分の1 m 若しくは 0.1 nm) の精度で制御 可能であるが、格子定数(結晶間隔)のほぼ等しい結晶 や温度による膨張係数の近い材料を選択する必要があ る。例えばインジウム(In)の組成が53%の In₀₅₃Ga₀₄₇As 層は、格子定数が一致(格子整合)するイ ンジウム・リン (InP) を基板としてエピタキシャル成 長することにより結晶欠陥の少ない良質な結晶が得ら れる。一方、ガリウム砒素 (GaAs) とは格子定数が大 きく違う(格子不整合)ため、GaAsを基板とする場合 は In₀₅₃Ga₀₄₇As 層と GaAs 基板との間に中間層 (バッ ファ層)を導入し、格子不整合による転位や欠陥が入 りにくくする工夫がなされる。

2.1 HEMT の性能指数と高速・高周波化

HEMT は電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor: FET)の一種で、ゲート電極に電圧 (ゲート電圧 V_{gs})を加えることによりチャネル領域に生じる電界により電子または正孔の密度を制御し、ソース・ドレイン電極間の電流 (ソース・ドレイン電流 I_{ds})を制御するトランジスタで、図 11 で後述するオンウェハ・プロービング測定評価システムにて HEMT の性能指数である電流・電圧 (I-V)曲線や相互コンダクタンス (g_m)などの DC 特性や、S パラメータ (散乱パラメータ)や増幅率などの高周波特性を測定する。なお、S パラメータは通過・反射電力特性を表し、利得や損失を求めるだけでなく、電流利得遮断周波数 (f_T)や最大発振周波数 (f_{max})などを見積もることが可能である。

図2にHEMTの小信号等価回路を示す。 f_T は式(1) で定義され、 g_m は相互コンダクタンス、 C_{gs} はゲート・ ソース容量、 C_{gd} はゲート・ドレイン容量をそれぞれ 示し、 g_m は式(2)で定義される。なお、 I_{ds} はドレイ ン・ソース電流、 V_{gs} はゲート・ソース電圧、 R_s はソー ス抵抗、 g_{mi} はFET内部の真性 g_m を示す。

$$f_{\rm T} = \frac{g_m}{2\pi (C_{gs} + C_{gd})} \tag{1}$$

$$g_{\rm m} \equiv \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{\rm gs}} = \frac{g_{mi}}{1 + R_s \cdot g_{mi}} \tag{2}$$

一方、 f_{max} は式(3)で定義され、 R_g はゲート抵抗、 g_{ds} はドレイン・コンダクタンスを示す。なお、 f_T 及び f_{max} を実測されたSパラメータから求める場合は、Hパラメータ $|h_{21}|^2$ や Mason のユニラテラル電力利得 U_g を求め、-20 dB の傾きでの直線フィッティングから 0 dB となる周波数を読み取ることにより求めることが可能である(図 8)。

$$f_{max} = \frac{f_T}{2\sqrt{R_g g_{ds}}} = \frac{f_T}{\sqrt{4g_d(R_s + R_i + R_g) + 2(C_{gd}/C_{gs})[(C_{gd}/C_{gs}) + g_m(R_s + R_i)]}}$$
(3)

以上より、高い f_T を実現するには、 g_m の向上と C_{gs} 、 C_{gs} などの容量の低減が、高い f_{max} の実現にはさらに R_g や R_s などの抵抗の低減が必要不可欠である。

2.2 GaN 系 HEMT の高速・高周波化

図3に示すように、GaN は化合物半導体の中でもバ ンドギャップの大きな半導体(ワイドバンドギャップ 半導体)で、GaN を用いた電子デバイスは、Si や GaAs などと比較して熱伝導率が大きく、放熱性に優れるた め、高温動作が可能である。さらに電子の飽和速度が 高く、絶縁破壊電圧が高いため、高出力・高耐圧なパ ワーエレクトロニクス材料や半導体デバイスとしての 応用が期待されている。

GaN 系 HEMT の高速・高周波化には、InGaAs 系 HEMT と同様に、結晶構造やデバイス構造の最適化 だけでなく、近年では薄膜バリア層、セルフアライン



3 超高周波 ICT 基盤技術 ―素子から回路まで―

ゲート電極構造や再成長コンタクト層などの工夫によ り、AIN/GaN/AIGaN HEMT で約 600 GHz の f_{max} と 450 GHz を超える f_T が、また高い分極を示す InAIN/ AIN バリア層を有する HEMT において f_T = 370 GHz がそれぞれ報告されている [17]-[19]。さらに、周波数 94 GHz で 6.7 W/mm もの高い出力電力密度が N 極性 GaN MIS-HEMT で報告されている [20]。これらの性 能は、GaN-HEMT などの GaN 系トランジスタや増幅 器が高出力・高耐圧デバイスとしてだけでなく、第 5 世代移動通信システム (5G) や次世代移動体通信シス テム (Beyond 5G など)で必要とされる高速・高周波・ 高出力特性を兼ね備えた電子デバイスとして有望であ る。

LsD SiN Ti/Al gate SiO2 Ti/Al Ti/Al Source Ti/Al Ti/Al Ti/Al Ti/Al Ti/Al Ti/Al Source Ti/Al drain i-In0.18 Al0.82 N i-AIN i-GaN buffer Sapphire, SiC and GaN sub strates

図 4 作製した GaN-HEMT の断面模式図

2.3 GaN 系 HEMT の作製プロセス

優れた高速・高周波特性をもつ GaN-HEMT の実現 には作製プロセスの最適化だけでなく、エピタキシャ ル結晶の設計と最適化、そして実際に良質な結晶を成 長することが重要である。

図4は、作製した In₀₁₈Al₀₈₂N/AIN/GaN HEMT の断 面模式図である。エピタキシャル層として GaN バッ ファ層 (2000 ~ 1600 nm)、AIN スペーサー層 1 nm 及 び In₀₁₈Al₀₈₂N バリア層 (層厚: 2 ~ 10 nm) で構成され ており、サファイア、炭化シリコン (SiC)、及び GaN 基板上に MOCVD 成長した。表1は、各基板上にエピ タキシャル成長した In₀₁₈Al₀₈₂N/AIN/GaN HEMT 作 製用結晶のホール測定結果で、In₀₁₈Al₀₈₂N バリアの厚 さが 10、5、3、2 nm のエピタキシャル構造の電子移

Substrate	InAlN [nm]	μ [cm²/Vs]	N _s [cm ⁻²]	$ ho_{\Box}$ [$\Omega/sq.$]	R_c [Ω mm]
Sapphire [21]	10	864	2.83×10^{13}	259	0.89
Sapphire [21]	5	1160	2.52×10^{13}	214	0.62
SiC [21]	3	1580	1.60×10^{13}	248	0.19– 0.34
GaN [22]	3	1560	1.64×10^{13}	245	0.3-0.4
SiC [22]	2	1720	1.16×10^{13}	312	0.17

表 I GaIN-HEIMI 作製用結晶のホール測定結果



動度 (μ)、シートキャリア濃度 (N_s)、シート抵抗 (ρ_{\Box})、 コンタクト抵抗 (R_c) である。なお、R_c は TLM (Transmission Line Method) 法により見積もった。InAlN バ リア厚が 10 nm から 2 nm になると、 μ は 846 cm²/Vs か ら 1720 cm²/Vs に増加する一方、N_s は 2.83 × 10¹³ cm² から 1.16 × 10¹³ cm² に減少するため、 ρ_{\Box} は InAlN バ リア層 5 nm で最小値 (214 Ω/sq.)を示した。一方、R_c の最小値 (0.17 Ωmm) は InAlN バリア層 2 nm で示さ れた。なお、InAlN バリア層 3 nm では SiC 基板と GaN 基板による差異は認められなかった。

図5は微細T型ゲートを有する GaN-HEMT の作製 プロセスである。紫外線 (Ultra-Violet: UV) 及び電子 ビーム (Electron Beam: EB) を用いたリソグラフィ技 術により、L_o、ゲート幅(W_o)及びソース・ドレイン電 極間距離 (L_{sD}) をそれぞれ短縮し、L_g = 35~140 nm、 W_{g} = 50 μm × 2、L_{SD} = 0.75 μm である。なお、ソー ス電極・ドレイン電極に Ti/Al を、ゲート電極に Ti/ Pt/Auを使用した。なお、GaN-HEMTの高速・高周 波特性の向上のため、L。を100 nm 以下に短縮すると ともにエピタキシャル結晶表面の保護やショットキー 界面の安定化を試みた結果、三層絶縁膜 SiN/SiO₂/SiN 構造を開発・導入した [23][24]。この三層絶縁膜の最下 層 SiN により(1) GaN エピタキシャル結晶表面の安定 化を、中間層 SiO₂により(2) 微細ゲート作製時のプロ セスダメージの除去を、さらに最上層 SiN により(3) 微細ゲート電極の機械的支持を同時実現する [17]。な お、SiN はホットワイヤー CVD (Chemical Vapor Deposition)法により形成した。この三層絶縁膜の最下層 SiN 上にゲート電極を直接形成すると MIS (Metal-Insulator-Semiconductor)型 HEMT になる一方で、こ の SiN をフッ素 (F) 系反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE)による選択的エッチングなどに より除去した後、InAlN 層上にゲート電極を形成する ことにより MES (Metal-Semiconductor) 型 HEMT を 容易に、かつ同一基板上に作製可能である [25]。

図6はサファイア、SiC及びGaN基板上に作製した In_{0.18}Al_{0.82}N/AlN/GaN-HEMTの断面の透過型電子顕微 鏡(Transmission Electron Microscope: TEM)像であ る。なお、図6(d)に示すとおり、最下層SiNの膜厚 は2.5 nmで設計どおりであった。また、サファイア及 びSiC基板上のGaNエピ層に生じた貫通欠陥密度は約 2×10^9 cm²であるのに対して、GaN基板上では7× 10^7 cm²以下と2桁以上も少ないことも断面TEM写真 から判明した。

2.4 GaN 系 HEMT の高周波特性

作製した MIS 型 HEMT 及び MES 型 HEMT について、 f_T 及び f_{max} の L_g 及び InAlN バリア層の膜厚依存



図 6 (a) サファイア基板上、(b) SiC 基板上、(c) GaN 基板上にそれぞれ作 製された In_{0.18}Al_{0.82}N/AlN/GaN HEMT の断面 TEM 像と (d) GaN 基 板上 HEMT の T 型ゲート電極のフット部 (L_g = 70 nm)



図 7 GaN 基板上 MES 型 GaN-HEMT (L_g = 45 nm) の DC 特性 (a) I_{ds}-V_{ds} 特性、(b) g_m 特性



図 8 GaN 基板上 MES 型 GaN-HEMT (Lg = 45 nm)の高周波特性

性を調査した結果、3 nm 厚の In_{0.18}Al_{0.82}N バリア層を 持つGaN 基板上のIn_{0.18}Al_{0.82}N/AlN/GaN HEMT におい て良好なピンチオフ特性を示す(図7)とともに、MIS 型 HEMT (L_g = 45 nm) では f_T = 237 GHz、 f_{max} = 235 GHz (V_{ds} = 3.0 V) を得たが、SiC やサファイア基板上 の MIS 型 HEMT もほぼ同等の f_T 及び f_{max} を示した。 一方、MES型 HEMT ($L_g = 45 \text{ nm}$) では $f_T = 228 \text{ GHz}$ 、 f_{max} = 287 GHz (V_{ds} = 3.0 V、V_{gs} = 0.4 V)を得た (図 8)。 この値はSiC やサファイア基板上の MES 型 HEMT と 比べて約5%高い値であった。このことから、MIS若 しくは MES 構造のいずれにおいても基板材料による 高周波特性には差がなく、ほぼ同等の fr 及び fmax を得 られることが分かった。しかし、ショットキーゲート の順方向リーク電流については GaN 基板の方が他の 基板と比べて1桁小さく、より大きなオン電流(I_m)を 得られる可能性を確認した。なお、fr はコンタクト・ パッド電極の寄生容量を差し引いた真性 fr である。

図 9 (a) は GaN 基板上 MIS 型 HEMT ($L_g = 45 \text{ nm}$ 、 W_g = 50 µm × 2、L_{SD} = 0.75 µm)の周波数 70 GHz に おける出力特性 ($V_{ds} = 2.5 \text{ V}$)である。なお、出力特性 (利得、飽和出力、出力電力密度、電力負荷効率 PAE など) は EHF 帯オンウェハ・ロード・ソースプル評価 測定システム (図 10)を用いて測定した。この結果、約 15 dBm (32 mW、ゲート幅1 mm あたり 0.32 W)を 超える出力電力 P_{out}を得るとともに、InGaAs系 HEMT[26] ($L_g = 50 \text{ nm}$ 、W_g = 50 µm × 2、L_{SD} = 1.8 µm、 図 9 (b))に比べ、高い P1dB (10.8 dBm)を示した。

以上のような性能により、GaN-HEMT を含む GaN 系デバイスは携帯電話基地局用高出力増幅器や IGBT インバータなどの DC・マイクロ波帯向けの製品、ミリ 波・テラヘルツ波帯デバイスや集積回路、さらには 5G や 5G 以降の次世代移動体通信システム (Beyond 5G など)でのマイクロ波~ミリ波~テラヘルツ波帯で動 作する高出力増幅器 (Power Amplifier: PA) などに期 待されている。

また、5G などで MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 無線通信やアクティブ電子走査アレイ (AESA) アンテナなどの技術が採用されると、より多 くの PA が送信機に必要となる [27]。この場合、高価 な SiC や GaN を基板として作製された GaN-HEMT で は、チップコストの増加を伴う可能性がある。このた め、SiC 基板や GaN 基板と比較して安価で大口径化が 容易な Si 基板上の GaN 系 HEMT も有効な選択肢であ る。このため、前述と同様の InAIN/AIN/GaN HEMT を高抵抗 Si (111) 基板上に作製した結果、L_g = 90 nm、 W_g = 50 μ m × 2、L_{SD} = 1 μ m の MIS 型 HEMT で f_T = 100 GHz、f_{max} = 245 GHz (V_{ds} = 10 V、V_{gs} = -1.38 V) を達成し、得られた f_{max} 値からは周波数 80 GHz で



図 9 出力特性 (a) GaN 基板上 MIS 型 GaN-HEMT (周波数 70 GHz)、(b) InP 基板上 InGaAs-HEMT (周波数 90 GHz)



図 10 EHF 帯オンウェハ・ロード・ソースプル評価測定システム

10 dB 程度の利得が期待でき、E 帯 (60 ~ 90 GHz) PA への応用に道を開くものである [28]。

2.4 更なる高速・高周波特性を目指して

ワイドバンドギャップ半導体である GaN とは異な り、バンドギャップの小さな半導体(ナローバンド ギャップ半導体) であるインジウム・アンチモン (InSb)は、III-V 族化合物半導体の中で最小の電子有効 質量を持ち、InSb をチャネルとする HEMT は高周波・ 低消費電力デバイスとして期待されており、InSb-HEMT 作製用結晶の成長技術の高度化、チャネル材 料・構造の改良、デバイス作製プロセスの改良などに ついて検討を進めている。なお、InSb-HEMT 作製用 エピタキシャル結晶は GaAs 基板上に MBE 法にて成 長される。Lg = 50 nm、Wg = 50 × 2 μ m の InSb-HEMT において f_T = 316 GHz、 f_{max} = 192 GHz (V_{ds} = $0.5 V, V_{ss} = -0.06 V)$ を得た。さらに、L_s = 200 nm で は $g_m = 1.1$ S/mm を達成し、これまで報告されている InSb 系 HEMT での最高値と同じ値を得た [29][30]。今 後、更なる特性向上を目指すとともに、インジウム・ ガリウム・アンチモン (InGaSb) やグラフェンなどの新 規材料によるトランジスタなどの研究開発を実施し、 更なる高速・高周波化、高出力化を目指す。

3 高周波計測技術

高速・高周波特性に優れた化合物半導体電子デバイ スの実現には、前述のデバイス作製用結晶の高品質化 やデバイス作製プロセスの最適化だけでなく、作製さ れたデバイスの特性や性能を正確に測定・評価可能な 技術が必要不可欠である。本節では化合物半導体電子 デバイスなど電子デバイスの性能・特性評価技術、特 に高周波計測技術について概説する。

3.1 S パラメータ測定

GaN-HEMT などの電子デバイスの性能評価指標と して、DC 特性(電流・電圧、電気容量など)や高周波 特性(Sパラメータ、出力特性など)があるが、これら の指標はベクトル・ネットワークアナライザ(Vector Network Analyzer: VNA)、スペクトラムアナライザ、 半導体パラメータアナライザ、信号発生器(Signal Generator: SG)、パワーメータ/センサ、DC 電源、さ らにはオンウェハ測定を行うための高周波プローブや プロービング・ステーション、電波暗室などを組み合 わせて計測される。オンウェハ測定とは、被測定デバ イス (Device Under Test: DUT)である電子デバイス のベアチップやウェハ上の各電極に高周波プローブと 呼ばれる針を直接コンタクトし、DC 特性や高周波特

3 超高周波 ICT 基盤技術 ―素子から回路まで―

性を得るもので、プロービング・ステーションにより DUT や高周波プローブの位置をマイクロメートル以 下の高精度で制御する(図11)。なお、図12のように 高周波プローブやプロービング・ステーションを使用 することなく、DUT を周波数エクステンダに直接接 続し、導波管インターフェースを有する高周波部品の Sパラメータも測定可能である。測定周波数帯域は VNA 若しくは周波数エクステンダの動作上限周波数 により決定され、我々のグループでは現在1100 GHz (= 1.1 THz) までのSパラメータを取得可能である。 またスペクトラムアナライザ機能を追加したネット ワークアナライザを用いることにより、Sパラメータ と信号スペクトルの両方が測定可能である。

3.2 アンテナ放射パターン測定

3.1の VNA 及び周波数エクステンダと2軸マウント



図 11 オンウェハ・プロービング測定評価システム



図 12 VNA 及び周波数エクステンダ (DC~1.1 THz)



図 13 アンテナ放射パターン評価システム(電波暗室内)

を組み合わせることにより、アンテナの放射パターン や利得なども測定可能である。図13は電波暗室内に構 築したアンテナ放射パターン評価システムで、送信側 の2軸マウントの AZ (azimuth: 方位角)軸及び EL (elevation: 仰角)軸の回転を高精度で制御することに より、各軸のアンテナ放射パターンを測定できる。な お、アンテナは送信・受信側マウントにある周波数 エクステンダにそれぞれ接続する。図 14 に 300 GHz 帯方形導波管ホーンアンテナ (Aperture diameter : 5.6 mm、Horn length: 26.5 mm)の放射パターンで、ア ンテナ間距離は 1500 mm である。これにより、アン テナ放射パターンは AZ 軸及び EL 軸で対称であるこ と、放射パターン半値幅 (Bandwidth at 3-dB level)が 10.2~10.7°であること、さらにはサイドローブ特性も 判別可能であることが分かる。

3.3 更なる高周波計測技術

近年、電子デバイスや集積回路(IC)は、ガリウム砒素(GaAs)やInP、サファイア(Al₂O₃)、SiC、GaN及びSiなどの半導体だけでなく、セラミックやガラスエポキシ、ポリイミド、テフロンなど様々な材質の基板上に作製されている。また電子デバイスが高速・高周波化し、かつICがモノリシック化するにつれて、高



精度な回路設計のために各基板材料の誘電率を、回路 の動作周波数帯で正確に求める必要がある。さらに、 電子デバイスやモノリシック集積回路(MMIC)がミリ 波・テラヘルツ波帯で動作可能になり、衝突防止や自 動運転に必要不可欠な車載レーダーや 5G及び 5G以 降の移動体通信システム(Beyond 5Gなど)における ミリ波・テラヘルツ波帯の利活用、特に超高速無線通 信などで送受信モジュールが広帯域化するにつれて、 アンテナやレドーム、パッケージなどの構成材料の誘 電特性(比誘電率 ε_r、誘電正接 tanδ)を広帯域かつ正確 に知りたいというニーズがある。

このため、3.1の VNA 及び周波数エクステンダと多 軸マウントを組み合わせることにより誘電特性評価が 可能で、この手法は自由空間 S パラメータ法 (フリー スペース法)[31]と呼ばれる。自由空間Sパラメータ法 は空間に放射した電波を被測定物 (Material Under Test: MUT) に照射し、その透過・反射特性 (Sパラ メータ)から誘電特性を求めるものである。なお、テ ラヘルツ波は電波と光の中間の性質を有することから、 光で誘電率を測定する手法もあり、連続波を照射した 透過光や反射光を測定する手法のほか、フェトム秒 レーザーを用いたテラヘルツ波パルス光源を用いた時 間領域分光法(Time-Domain Spectroscopy: TDS)など が知られており、誘電率や屈折率、膜厚などの材料定 数を測定可能なシステムは既に市販されている。しか し、現状の TDS で発生できるテラヘルツ波の下限 周波数は100 GHz 程度で、これ以下の帯域ではパルス 光源の出力不足やディテクタの感度低下により、 100 GHz 以下及び近傍の周波数帯域の誘電率を光で測 定することは困難である。

図 15 はミリ波・テラヘルツ波帯材料評価システム で、VNA と周波数エクステンダ、導波管アンテナ、そ して MUT マウントで構成される。なお、誘電率測定 前には2ポート TRL (Thru-Reflect-Line)校正を行う必



図 15 ミリ波・テラヘルツ波帯材料評価システムの外観 (電波吸収体を取り 外して撮影)



図16 自由空間 S パラメータ法による比誘電率

要があり、導波管アンテナと MUT の位置を Line 長 (波長 λ の 1/4)以下の精度で制御しなければならず、 導波管アンテナを接続する周波数エクステンダのマウ ントと MUT マウントにはそれぞれ XYZ θ ポジショ ナを装備し、特に XYZ 軸はそれぞれ 5 μ m の分解能を 有する。

図16は測定した比誘電率の結果であり、140~ 220 GHz (導波管規格:WR-5.1)で測定した3インチ径 InPウェハ(650 µm 厚)の比誘電率、75~110 GHz (同:WR-10)で測定したPTFE(ポリテトラフルオロ エチレン)フィルム(80 µm厚)の比誘電率、さらに60~ 90 GHz(同:WR-8)で測定したPS(ポリスチレン)フィ ルム(1.3 mm 厚)の比誘電率を示す。なお、MUTマウ ントなどからの多重反射によるノイズが生じることか ら VNA の Time Domain Gatingを適用している。こ の結果、測定可能周波数の異なる周波数エクステンダ や導波管アンテナを使用することにより、複数の周波 数帯での誘電率測定が可能であること、厚さが数 10 µm~数 mmの材料の誘電率測定が可能であること が分かった。なお、得られた比誘電率は低周波数で測 定・報告されている比誘電率とほぼ同じ値を示した。

4 まとめ

未利用周波数帯であるミリ波・テラヘルツ波帯 (30 GHz~3 THz)の開拓や無線通信利用に必要不可 欠な III-V 族化合物半導体電子デバイスとして、 100 nm 以下の L_g を有する GaN-HEMT を作製し、こ の DC 及び高周波特性を評価した。この結果、GaN 基 板上 MES 型 HEMT (L_g = 45 nm、 W_g = 50 μ m × 2、 $L_{SD} = 0.75 \ \mu m$) で $f_T = 237 \ GHz$, $f_{max} = 287 \ GHz$ ($V_{ds} = 3.0 \ V$, $V_{gs} = 0.4 \ V$) を得るとともに、MIS 若しくは MES 構造のいずれにおいても基板材料による高周波 特性には差がなく、ほぼ同等の f_T 及び f_{max} を得られる ことが分かった。また、GaN 基板上 MIS 型 HEMT (L_g = 45 nm、 $W_g = 50 \ \mu m \times 2$ 、 $L_{SD} = 0.75 \ \mu m$)の周波数 70 GHz における出力特性についても測定し、約 15 mW (ゲート幅1 mm あたり 0.32 W)の出力電力を 得た。

高周波計測技術として、VNA 及び周波数エクステ ンダ(最大測定可能周波数 1100 GHz = 1.1 THz)を用 いたSパラメータ測定、アンテナ放射パターン測定に ついて概説するとともに、ミリ波・テラヘルツ波帯に おける誘電特性評価として自由空間Sパラメータ法に よる InP 基板、PTFE フィルム、PS フィルムの比誘電 率を 60 ~ 220 GHz で測定した。この結果、開発した ミリ波・テラヘルツ波帯材料評価システムにおいて、 複数の周波数帯での誘電率測定が可能であること、厚 さが数10 μm~数mmの材料の比誘電率の測定が可能 であることを明らかにした。

今後、5G及び5G以降の次世代移動体通信システム(Beyond 5Gなど)におけるミリ波・テラヘルツ波帯の利活用のため、GaN-HEMTなどの化合物半導体 電子デバイスの更なる高性能化や集積化、光デバイス との融合技術の確立を目指すとともに、ミリ波・テラ ヘルツ波帯で動作する超高速無線通信モジュールの性 能やモジュール構成材料の誘電特性などを高精度で測 定可能な高周波計測技術の確立を目指す。

謝辞

本研究開発の一部は総務省「電波資源拡大のための 研究開発(JPJ000254)」により実施された。

【参考文献】

- A. Endoh et al., "Fabrication technology and device performance of sub-50-nm-gate InP-based HEMTs," Proc. IPRM2001, pp.448–451, 2001.
- 2 K. Shinohara et al., "Ultrahigh-speed pseudomorphic InGaAs/InAIAs HEMTs with 400-GHz cutoff frequency," IEEE Electron Device Lett., vol.22, no.11, pp.507–509, 2001.
- 3 K. Shinohara et al., "InP-based HEMTs with a cutoff frequency higher than 450 GHz," Proc. DRC2002, pp.163–166, 2002.
- 4 Y. Yamashita et al., "Pseudomorphic $In_{_{0.52}}A_{I_{0.46}}As/In_{_{0.7}}Ga_{_{0.3}}As$ HEMTs With an Ultrahigh $f_{_{\rm T}}$ of 562 GHz," IEEE Electron Device Lett., vol.23, no.10, pp.573–575, 2002.
- 5 X. B. Mei et al., "25 nm InP HEMT TMIC Process with 1 THz Amplifier Circuit Gain," Proc. SSDM2015, p.1034, 2015.
- 6 R. Lai et al., "Sub 50 nm InP HEMT device with Fmax greater than 1 THz," Proc. IEDM2007, p.609, 2007.
- 7 W. Snodgrass et al., "Pseudomorphic InP/InGaAs heterojunction bipolar transistors (PHBTs) experimentally demonstrating $f_{T} = 765$ GHz at 25°C increasing to $f_{T} = 845$ GHz at -55°C," Proc. IEDM2006, p.1, 2006.
- 8 M. Higashiwaki et al., "A comparative study of SiN deposition methods

for millimeter-wave AlGaN/GaN HFETs," Proc. DRC2008, pp.207–208, 2008.

- 9 https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/
- I. Watanabe et al., "Research and development of InP, GaN and InSbbased HEMTs and MMICs for terahertz-wave wireless communications," Proc. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp.261–264, 2016.
- 11 H. Hamada et al., "20-Gbit/s ASK wireless system in 300-GHz-band and front-ends with InP MMICs," Proc. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, no.S-D3-2, 2016.
- 12 H. Song et al., "Demonstration of 20-Gbps Wireless Data Transmission at 300 GHz for KIOSK Instant Data Downloading Applications with InP MMICs," Proc. Int. Microwave Symposium, no.WEIF2, 2016.
- 13 S. Hara et al., "A 32Gbit/s 16QAM CMOS Receiver in 300GHz Band," Proc. Int. Microwave Symposium, no.Th03F_1, 2017.
- 14 S. Hara et al., "A 416-mW 32-Gbit/s 300-GHz CMOS Receiver," Proc. IEEE Int. Sym. on Radio-Frequency Integration Technology, no.TH_4A_5, 2017.
- 15 S. Hara et al., "300-GHz CMOS Transceiver for Terahertz Wireless Communication", Proc. APMC2018, no.TH1-C1-2, 2018.
- 16 S. Hara et al., "32-Gbit/s CMOS Receivers in 300-GHz Band," IEICE Trans. Electron., vol.E101-C, no.7, pp.464–471, 2018.
- 17 K. Shinohara et al., "Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications," IEEE Trans. Electron Devices, vol.60, no.10, pp.2982–2996, 2013.
- 18 Y. Tang et al., "Ultrahigh-Speed GaN High-Electron-Mobility Transistors With $f_{\gamma}f_{max}$ of 454/444 GHz," IEEE Electron Device Lett., vol.36, no.6, pp.549–551, 2015.
- 19 Y. Yue et al., "InAIN/AIN/GaN HEMTs With Regrown Ohmic Contacts and $\rm f_{\gamma}$ of 370 GHz," IEEE Electron Device Lett., vol.33, no.7, pp.988–990, 2012.
- 20 S. Wienecke et al., "N-polar GaN cap MISHEMT with Record Power Density Exceeding 6.5 W/mm at 94 GHz," IEEE Electron Dev. Lett., vol.38, no.3, pp.359–362, 2017.
- 21 Y. Yamashita et al., "Effect of InAIN barrier thickness on device performance for nanoscale gate InAIN/AIN/GaN HEMTs," Proc. 12th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, no.5-2, 2015.
- 22 山下他、"GaN 自立基板を用いた InAIN/AIN/GaN HEMTのデバイス特性", 第 63 回応用物理学会 春季学術講演会, no.20, pp.11-157, 2016.
- 23 A. Endoh et al., "High Performance AlGaN/GaN Metal-Insulator-Semiconductor High Electron Mobility Transistors Fabricated Using SiN/SiO₂/ SiN Triple-Layer-Insulators," Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, no.4B, pp.3364– 3367, 2006.
- 24 Y. Yamashita et al., "Effect of Bottom SiN Thickness for AlGaN/GaN Metal-Insulator-Semiconductor High Electron Mobility Transistors Using SiN/SiO_/SiN Triple-Layer Insulators," Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, no.26, pp.L666–L668, 2006.
- 25 M. Higashiwaki et al., "Enhancement-Mode AIN/GaN HFETs Using Cat-CVD SiN," IEEE Trans. Electron Devices, vol.54, no.6, pp.1566–1570, 2007.
- 26 I. Watanabe et al., "Output power performance of InGaAs/InAIAs HEMT at 90-GHz band," IEICE Technical Report 114, ED2014-101, 2014.
- 27 T. Kuwabata et al., "A 28 GHz 480 elements Digital AAS using GaN HEMT Amplifiers with 68 dBm EIRP for 5G Long-range Base Station Applications," Proc. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp.1–4, 2017.
- 28 T. Yoshida et al., "Delay Time Analysis of InAIN-MIS-HEMTs on Si Substrates," IEICE Technical Report 117, ED2017-94, 2017.
- 29 T. Ashley et al., "Indium Antimonide based Quantum Well FETs for Ultra-High Speed Electronics," Proc. 64th Device Research Conference, pp.201–202, 2006.
- 30 T. Ashley et al., "Indium Antimonide Based Technology for RF Applications," Proc. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, pp.121–124, 2006.
- 31 T. Tosaka et al., "Development of Complex Relative Permittivity Measurement System Based on Free-Space in 220-330-GHz Range," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol.5, no.1, pp.102– 109, 2015.



渡邊一世 (わたなべ いっせい)
 未来 ICT 研究所
 フロンティア創造総合研究室
 主任研究員
 博士(工学)
 超高周波電子デバイス・集積回路、高周波計測
 半導体結晶成長



山下良美 (やました よしみ) 未来 ICT 研究所 フロンティア創造総合研究室 研究技術員 超高周波電子デバイス・プロセス技術



原 純介 (はら しんすけ)
 未来 ICT 研究所
 フロンティア創造総合研究室
 主任研究員
 博士 (理学)
 ミリ波・テラヘルツ波集積回路、ミリ波・テ
 ラヘルツ波電子デバイス



町田龍人 (まちだ りゅうと)
 未来 ICT 研究所
 フロンティア創造総合研究室
 研究員
 博士 (工学)
 超高周波電子デバイス、半導体結晶成長



笠松章史 (かさまつ あきふみ)
 未来 ICT 研究所
 フロンティア創造総合研究室
 上席研究員
 博士(工学)
 ミリ波・テラヘルツ無線技術、ミリ波・テラ
 ヘルツ電子デバイス