高周波高出力GaN-HEMTにおける熱設計

伊藤　正紀　　海部　勝晶　　見田　充郎　　大来　英之
戸田　典彦　　佐野　芳明　　関　昇平

近年，無線通信データ容量の増加に対応するために，無線基地局用の高周波高出力電力デバイスは，より大きな出力電力，より良い線形性そして信頼性が求められている。ワイドバンドギャップ半導体である窒化ガリウム（GaN）を用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT，High Electron Mobility Transistor）は，既存デバイスであるガリウム砒素（GaAs）のHEMTやヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT，Hetero junction Bipolar Transistor），シリコン（Si）の横方向拡散金属酸化膜半導体（LDMOS，Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor）等と比較して，

- バンドギャップが大きい → 高温動作
- 電子移動度･飽和速度が大きい → 高速･大電流動作
- 電子密度が高い → 大電流動作
- 破壊電界が高い → 高電圧動作

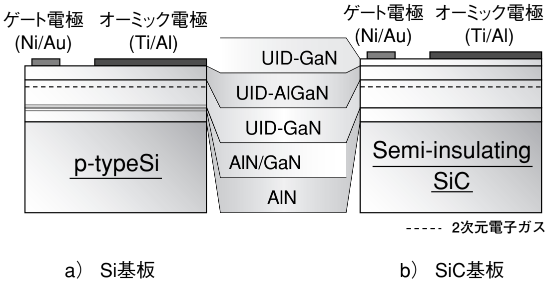
という特長から，高周波高出力電力デバイスに適している[1) 2)]。30W/mmの高電力密度パワーFET[3)]や200Wを超える高出力デバイス[4)]が報告され，研究開発が急速に進んでいる。高電力密度特性によりAlGaN/GaN-HEMTデバイスのチップ寸法は，従来のGaAs-HEMT/HBTやSi-LDMOSデバイスに比べ，1/10～1/5程度にすることが可能である。しかし，チップを小さくすることによって放熱が課題となり，動作チャネル温度の上昇が大きな問題となる。熱抵抗は，発熱領域の寸法，基板の材質と厚さでほぼ決定される。発熱領域の寸法は，必要とする出力電力とデバイスの電力密度で決まる。同じゲート幅の場合，たとえばゲート間隔を広げる等により発熱領域を大きくする，また基板の薄層化により熱抵抗を小さくすることは可能であるが，チップ寸法の増大や高度な組立工程導入を必要とするために，デバイスの価格は上昇する。最近，さまざまな基板を用いた時のAlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗の計算[5)]，Si上に作製したGaN-HEMTの熱設計と特性[6)]等，AlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗に関する報告が多数されている。

今回，AlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗を求めるために，熱伝導シミュレーション用の新しい構造モデルを考えた。このモデルを用いて，熱抵抗を算出し最適な基板厚を求めた。また，この構造モデルを検証するために，Siおよび炭化シリコン（SiC）基板上にAlGaN/GaN-HEMTデバイスを作製し，熱抵抗の測定結果とシミュレーション結果を比較した。さらに，得られた結果からAlGaN/GaN-HEMTデバイス動作時のGaNのエピタキシャル成長基板として広く用いられているSiCの熱伝導率について考察した。

AlGaN/GaN-HEMTデバイス構造

図1a）と**b**）にSiおよびSiC基板上に有機金属気相成長法を用いて作製したAlGaN/GaN-HEMTのエピタキシャル層構造をそれぞれ示す。Si基板を用いた場合のHEMT構造は，AlNバッファ層，AlN/GaNの超格子層，n型の不純物であるSiを添加していない（UID, Unintentionally Doped）-GaNチャネル層およびUID-AlGaNキャリア供給層からなる。SiC基板を用いた場合のHEMT構造は，AlNバッファ層，UID-GaNチャネル層，UID-AlGaNキャリア供給層およびUID-GaNキャップ層からなる。

デバイス作製は，オーミック金属をTi/Alで形成した後，600℃で熱処理する。ゲート金属はNi/Auで形成され，ゲート長（Lg）は0.75μmである。ゲート金属形成後，プラズマ化学気相成長法を用いて層間Si窒化膜を形成する。金属配線は2層で構成され，2層目は金メッキとゲート・ソース交差部にエア・ブリッジ配線技術を用いた。デバイス・プロセス終了後，基板は裏面研磨によって薄層化し，ダイシングによってチップにした。



a）Si基板　　b）SiC基板

図1　AlGaN/GaN-HEMT構造

シミュレーションによる熱設計

熱抵抗は，定常状態の3次元熱伝導解析（有限要素法）を用いて，発熱部から評価治具裏面までの温度分布をシミュレーションすることによって求めた。使用したソフトウェアは，3次元熱伝導解析プログラム“Therm3D”である[7)]。発熱部は，ゲート・ドレイン間の2次元的な領域とした。冷却条件は測定治具裏面を0℃に固定，その他表面は断熱状態と仮定し，デバイスの電力損を50Wとした。**図2**にシミュレーションに用いたAlGaN/GaN-HEMTデバイスの形状概略と寸法を示す。デバイスは単位ゲート幅（UGW）が320μm，ゲート本数20本で構成され，総ゲート幅6.4mm（320μm × 20本）の櫛型構造である。ドレイン電極を挟んだゲート間隔は36.5μm，ソース電極を挟んだゲート間隔は46μmである。チップ寸法は，横1.13mm，縦0.78mmである。**図3**に熱伝導シミュレーション時に用いた測定時の状態をモデル化した概略図を示す。

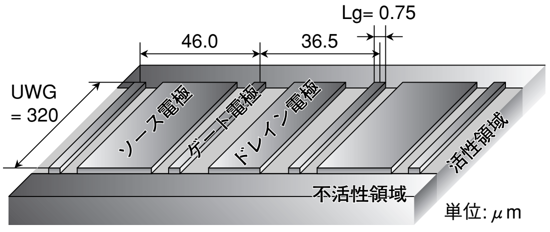


図2　デバイス寸法図

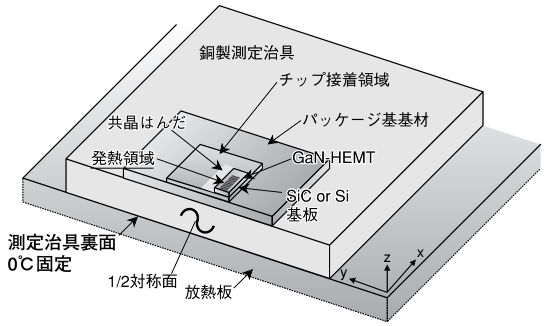


図3　熱伝導シミュレーション構造モデル

従来のモデルは，チップの形状とパッケージ基材の厚さしか考慮していなかったが，新しいモデルでは発熱領域より下の部分に着目し，従来モデルに加えてパッケージ基材の形状，チップ接着時のはんだ厚さ，チップ接着位置および測定治具の厚さを考慮している。測定治具まで考慮しているのは，忠実に測定値を算出するためである。基材部を除くパッケージとチップ表面のワイヤからの熱放散は無視する。GaNエピタキシャル層の熱伝導率は1.5W/cmKを用いた。チップは無酸素銅でできた標準的な高周波パッケージ上に熱伝導率2.5W/cmK，30μm厚のAu/Sn共晶はんだで接着される。チップはドレイン・ワイヤのインダクタンス低減のために，パッケージ上のチップ接着領域端に置かれる。チップ下のパッケージ厚は，1.47mmである。パッケージは11mm厚の銅製測定治具に固定される。それぞれの熱伝導率は3.9W/cmKである。

図4に熱抵抗の熱伝導率と基板厚依存性（400μm，150μmおよび80μm）のシミュレーション結果を示す。基板薄層化の効果は，1.5W/cmKの熱伝導率を持っているSiが大きく，3.0W/cmKのSiCは小さいことが確認できる。また，チップ以外の熱抵抗が約3.5℃/Wと熱抵抗全体の中で高い割合を示していることがわかる。これはAlGaN/GaN-HEMTデバイスの高電力密度特性から，チップが小さくなり，パッケージの熱抵抗が大きく見えているためである。パッケージの改良によりパッケージの熱抵抗は，1.5℃/W程度を見込めるため，室温動作時のジャンクション温度が200℃以下となるチップの熱抵抗は1.5℃/W（全体の熱抵抗が3.0℃/W）以下でなければならない。このパッケージを使用した場合，熱抵抗が5.0℃/W以下となるような基板厚を求める必要がある。**図4**から，熱伝導率1.5W/cmK，基板厚80μmのSi基板上にAlGaN/GaN-HEMTデバイスを作製した時の熱抵抗は4.83℃/Wである。熱伝導率3.0W/cmKのSiCの場合，基板を薄層化しなくても熱抵抗値は5℃/W以下であるが，さらなる低熱抵抗化のために，熱抵抗値が飽和する厚さまで裏面研磨した。この時の基板厚は150μmで，熱抵抗は3.9W/cmKである。

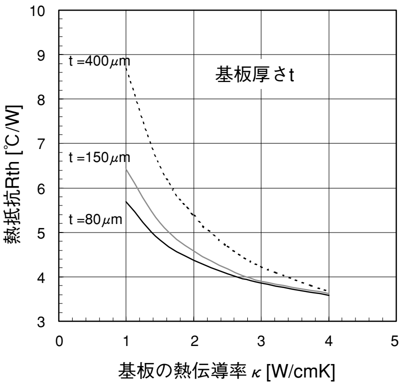


図4　熱抵抗のシミュレーション結果

試作したデバイスの電気特性と熱抵抗測定

写真1，**図5**に作製したSiC基板上に作製したAlGaN/GaN-HEMTデバイスの写真と代表的な電気特性

をそれぞれ示す。DC特性は，最大ドレイン電流（Ids）が3.6A（560mA/mm），最大トランス・コンダクタンスが0.8S（125mS/mm）そして閾値電圧が−6Vである。周波数2GHz，ドレイン電圧40Vそしてドレイン電流640mA時におけるRF特性は，最大出力電力が46dBm（40W），電力付加効率が38%である。

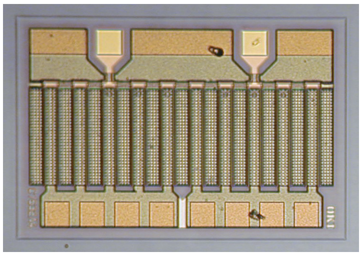
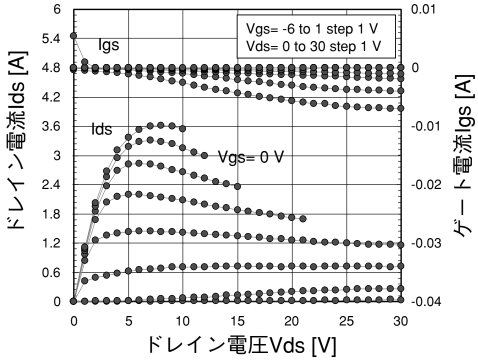
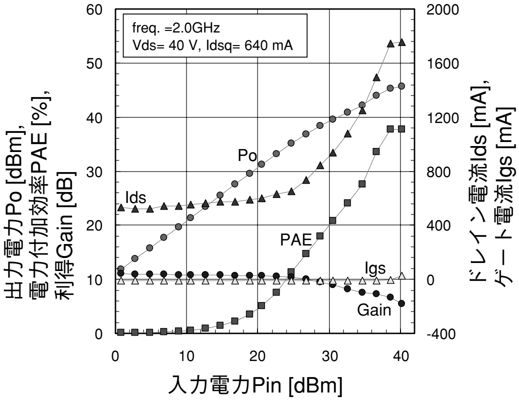


写真1　デバイス写真（SiC基板，1.13×0.78mm[2]）



a）DC特性



b）RF特性

図5　SiC基板上のAlGaN/GaN-HEMTの電気特性

次に，熱抵抗をゲート順方向電圧特性より評価した。測定に用いたAlGaN/GaN-HEMTデバイスの形状は，前項で述べた形状と同じである。熱抵抗は，FETの順方向ゲート・ソース間電圧（Vgs）の温度係数と，Vgsの入力電力係数を測定し，それらの結果から計算した[8)]。

図6に測定回路図を示す。まず，スイッチをオフとしてVgsの温度依存性を測定する。測定の結果，Vgsの温度係数はSiおよびSiC基板の場合において，それぞれ0.49mV/℃，0.92mV/℃であった。

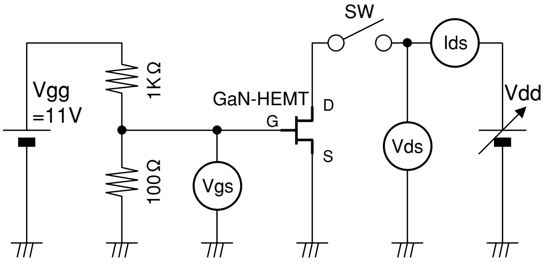


図6　熱抵抗測定回路図

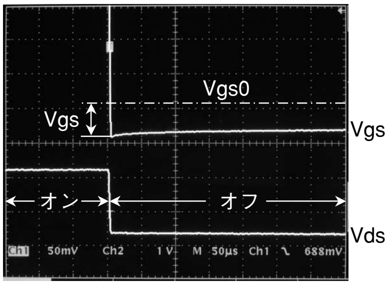


図7　過渡特性

次に，発熱時のVgs特性を測定する。通電時はVgs特性の評価ができないため，スイッチを一瞬オフする。また，スイッチをオフした直後は，発熱時のVgsを示していると仮定する。そのときのVgsを測定し，室温時のVgs（Vgs0）との差と通電時の入力電力から入力電力係数を算出した。実際には，オン時間98ms，オフ時間2msである。**図7**にスイッチオフ前後の過渡特性を測定したオシロスコープの波形写真を示す。スイッチオフ時，Vgsは発熱のためにVgs0よりも小さな値を示し，熱放散によって緩やかに変化しているのがわかる。測定の結果，Vgsの入力電力係数はSiおよびSiC基板の場合において，それぞれ2.4mV/W，3.8mV/Wであった。
熱抵抗は，

（熱抵抗）＝（入力電力係数）／（温度係数）

で与えられるので，SiとSiC基板上に作製したAlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗は，それぞれ4.9℃/W，4.2℃/Wと求まる。

図8に熱抵抗の基板厚と熱伝導率依存性のシミュレーションと測定結果の比較を示す。AlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗は，Si基板上（熱伝導率1.5W/cmK）の

場合，シミュレーションと測定値は良く一致したが，SiC基板上（熱伝導率3.0W/cmK）の場合，それらは一致していないことがわかる。熱抵抗測定は確立されており，Siのシミュレーションと測定値の一致は，モデルの妥当性を裏付けている。SiC基板において両者の一致が得られなかった原因は，シミュレーションに使用したSiCの熱伝導率の設定値に問題があったと考えられる。シミュレーションで用いた熱伝導率3.0W/cmKは，基板仕様書にある室温時の値であり[9]，一般的に高温時において異なる値をとるものと考えられる。**図8**から動作中の発熱を考慮したSiCの熱伝導率は，シミュレーションと測定値が一致している2.5W/cmKが適当であると考えられる。

以上の結果をまとめて**表1**に示す。

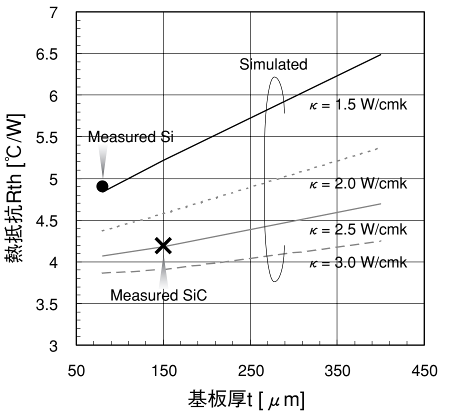


図8　熱抵抗のシミュレーションと測定結果の比較

表1　測定結果のまとめ

基板	作製したデバイスの熱抵抗 [℃/W]	得られた熱伝導率 [W/cmK]
Si	4.9	1.5
SiC	4.2	2.5

お　わ　り　に

今回，AlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗を求めるために，熱伝導シミュレーション用の新しい構造モデルを考えた。そして，このモデルを用いたシミュレーション結果と作製したデバイスの熱抵抗の測定結果を比較した。

Si基板上に作製したAlGaN/GaN-HEMTデバイスの熱抵抗はシミュレーションと測定結果において良好な一致を得たことから，今回用いた構造モデルの妥当性を確認できた。また，SiCの熱伝導率は，物性値で4.9W/cmKであるが，動作中のSiCの熱伝導率は，2.5W/cmKと考えられ，Si上にAlGaN/GaN-HEMTデバイスを作製した場合に比べて1.6倍程度となることが判った。このことは，SiC基板の薄層化が有効であること，Si基板を用いた高出力電力デバイスの実用可能性を示唆している。

謝　辞

本研究開発を進めるに当たり，エピタキシャル成長関連でご尽力頂いた名古屋工業大学極微デバイス機能システム研究センター長江川孝志教授に感謝する。

本研究開発の一部は『科学技術振興調整費』および『産学官連携イノベーション創出事業費補助金（独創的革新技術開発研究提案公募制度）』の支援により実施した。

◆◆

■参考文献

1）吉田貞史：“GaN系半導体の基礎物性”，“GaN系半導体の結晶成長，デバイスの基礎”，第26回応用物理学会スクールB，pp.19–39，2000年

2）荒井和雄，吉田貞史：“SiC素子の基礎と応用”，オーム社，1章，pp.230–231，2003年

3）Y.-F. Wu, *et al.*: “30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization”, IEEE Electron Dev. Lett., Vol.25, pp.117–119, March 2004

4）T. Kikkawa and K. Joshin: “Highly-reliable GaN HEMT transmitter amplifier with output power of over 200 W for wireless base station”, SSDM, no. G-4-1, Extended Abstracts, pp.320–321, Tokyo, Sept 2004.

5）Ali Mohamed Darwish, *et al.*: “Thermal resistance calculation of AlGaN_GaN devices”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.52, No.11, pp.2611–2620, 2004

6）S. Singhal, *et al.*: “Gallium nitride on silicon HEMTS for wireless infrastructure application, thermal design and performance”, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.833–836, 2004

7）黒田英夫：“Visual Basicによる3次元熱伝導解析プログラム”， CQ出版社，第1部，pp.9–61，2003年

8）福田益美, 平地康剛：“高出力GaAs FETの設計と特性”，化合物半導体デバイス・ハンドブック, 第2章，pp.80–81，サイエンス・フォーラム, 東京，1986年9月

9）“Silicon carbide substrates product specification”, CREE, pp2, Mar. 2003

●筆者紹介

伊藤正紀:Masanori Itoh. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
海部勝晶:Katsuaki Kaifu. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
見田充郎:Juro Mita. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
大来英之:Hideyuki Okita. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
戸田典彦:Fumihiko Toda. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
佐野芳明:Yoshiaki Sano. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
関昇平:Shohei Seki. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ