



衛星搭載用高効率L帯200W GaN HEMT

High-Efficiency L-Band 200-W GaN HEMT for Space Applications

大沢 研*
Ken Osawa

吉越 大之
Hiroyuki Yoshikoshi

新田 敦
Atsushi Nitta

田中 常之
Tsuneyuki Tanaka

三谷 英三
Eizo Mitani

佐藤 富雄
Tomio Satoh

人工衛星への搭載を目的として、L帯*1 200Wの高効率・高出力GaN HEMT*2を開発した。200W GaN HEMTは100W出力をもつGaN HEMT2個を同一パッケージ内に実装することで実現され、1.58GHzのCW動作においてドレイン効率74.6%、電力付加効率71.0%を達成した。この効率性能はL帯200W級GaN HEMTにおいて世界最高水準である。また我々は、このGaN HEMT技術に対し衛星搭載用認定試験を行い、衛星用途として要求される全ての品質と信頼性を満足していることを確認した。GaN HEMTを用いた固体素子増幅器（SSPA）の実現可能性を示し、今後衛星の小型化や軽量化に大きく貢献することを期待する。

We have developed a high-efficiency L-band 200-W GaN HEMT (high electron mobility transistor) for space applications. Incorporating two 100-W dies, the GaN HEMT achieves a power-added efficiency (PAE) of 71% and drain efficiency (DE) of 74.6% at 1.58 GHz in continuous wave operation, demonstrating world-class efficiency in this field. In a space qualification test conducted under high temperature and RF overdrive conditions, this GaN HEMT showed excellent performance, satisfying all the reliability and lifetime requirements for space applications. This paper describes the feasibility of a solid state power amplifier (SSPA) using the GaN HEMT, which will contribute to a reduction in the size and weight of satellites.

キーワード：GaN HEMT、高効率、高出力、衛星用途、衛星搭載用認定試験（SQT）

1. 緒言

ナビゲーションシステムや衛星通信等の衛星アプリケーションの増加に伴い、高効率かつ高出力の電力増幅器が必要とされている。これまで、L帯やそれ以上の周波数帯で50W以上の出力が要求されるアプリケーションでは大きな出力電力が得られる進行波管増幅器（TWTA）が広く使われてきた。しかしながら、固体素子として窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ（GaN HEMT）を用いることで、従来のガリウム砒素電界効果トランジスタ（GaAs FET）*3では為し得なかった出力電力を実現できるようになり、TWTAからSSPAへの置き換えが期待されてきている。加えて人工衛星のエンジンを電気推進に置き換えたオール電化衛星の検討が進められており、更なる衛星の小型・軽量化が図られるSSPAへの期待は今後さらに膨らむと思われる。

本報告は、TWTAを代替する実現可能なソリューションとして開発した高効率（74.6%）、高出力（200W）、高信頼性L帯GaN HEMT製品を紹介するものである。

両立するよう、そのディメンジョンを最適化した。また接地のため、シリコンカーバイド（SiC）基板を貫通したソースビアホールを形成した。図1のその他構造についても、衛星搭載用途として十分な信頼性を達成することも考慮に入れて設計した。

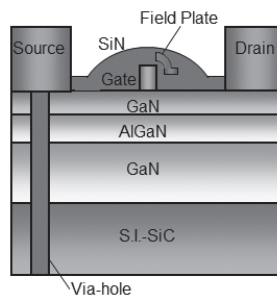


図1 GaN HEMT 断面図

2. GaN HEMT 技術

2-1 GaN HEMT 構造

図1は、本製品で用いたGaN HEMTの断面構造である。高耐圧特性を得るための電界緩和を目的にフィールドプレート構造を採用しているが、これはまた寄生容量を増やすことから効率低下につながる⁽¹⁾。耐圧特性と効率特性を

2-2 GaN HEMT 基本特性

図2は、1.58GHzにおいてパルス条件（12μs幅、10%デューティ）でロードプル*4技術を用いて測定した基本ユニットトランジスタ（ゲート幅2.25mm）のRF特性である。この図は、出力電力（Pout）、利得（Gain）、電力付加効率（PAE）およびドレイン効率（DE）を示している。こ

の測定では、出力と効率のバランスが取れる点で基本周波数と2次高調波周波数における負荷インピーダンスを調整している。この図に示すように、41.5dBmの出力で約75%のドレイン効率が得られた。

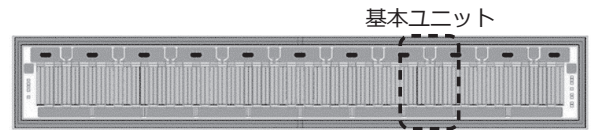


図4 100W GaN HEMT チップレイアウト

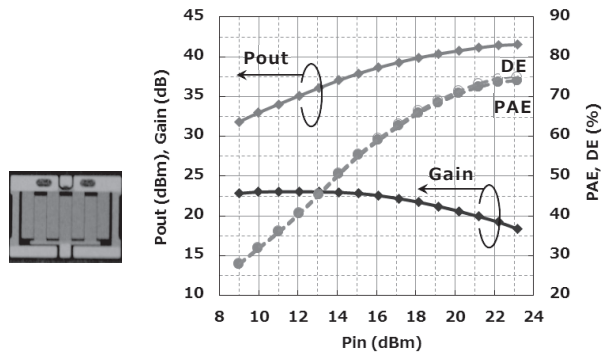


図2 基本ユニットトランジスタのRF特性

図3は、基本周波数における最大Pout / PAEおよび2次高調波における最大効率に対する位相を示したものである。回路設計では、これらのインピーダンスを実際使用するチップのゲート幅に対してスケールリングし、基準負荷として使用した。

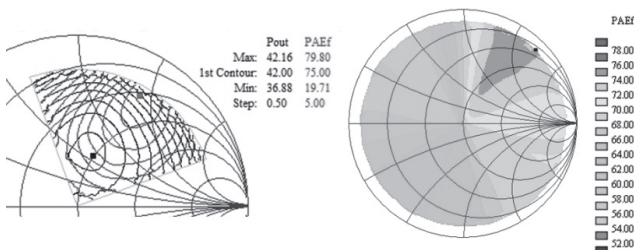


図3 基本波 (左) と2次高調波 (右) のロードプル測定結果

3. 200W GaN HEMTの開発

3-1 デバイス設計

200Wの出力を達成するため、図3に示したロードプル測定結果に基づいて100W GaN HEMTのゲート幅を決定し、それを2個並列で動作させることとした。100Wチップのゲート幅は24mmであり、図4はそのチップレイアウトである。

動作周波数は、ナビゲーションや移動体通信衛星で主に使われる1.5GHz帯を選択した。この周波数は比較的低いため、整合回路のサイズが大きくなりパッケージ内部のみ

で完全に50Ωに整合するのは難しい。パッケージ内は部分整合で15~30Ωに設計し、外部の整合回路を使用して最終的に50Ω整合する形とした。回路設計では、まず図4に示したゲート幅2.4mmの基本ユニットトランジスタの正確な小信号モデルを抽出した。次にロードプル測定で大信号特性に対する基本波と2次高調波の出力負荷インピーダンスを抽出し、効率が最大となる点に回路負荷を一致させた。入力に対する2次高調波に関しては、ショート(180°)付近に最大効率点が存在することはよく知られている⁽²⁾。したがって、入力側では基本周波数はソースプル測定によって得られた最大利得点に負荷を調整し、2次高調波はショートに近いインピーダンスに調整している。

4. 200W GaN HEMT 評価結果

4-1 RF特性

写真1は設計した200W GaN HEMTの内部回路、写真2は外部整合回路を備えた評価治具の写真である。パッケージの全体サイズは24mm×17.4mmである。パッケージ内

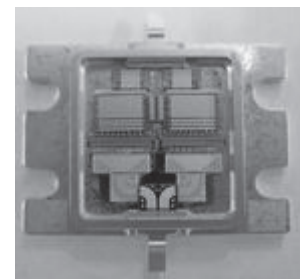


写真1 L帯200W GaN HEMT 内部回路

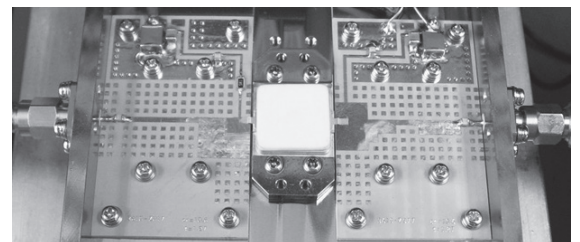


写真2 L帯200W GaN HEMT 評価治具

の入力と出力の整合回路は、アルミナおよび高誘電体基板上に形成される。

図5は、周波数1.58GHz、ケース温度 (Tc) 45°CにおけるCW動作時の出力電力、ドレイン効率、電力付加効率、利得特性である。図5に示すように、飽和出力 53.2dBm (210W)、線形利得 (GL) 18.3dB、電力付加効率71%、ドレイン効率74.6%を達成した。

図6は出力電力、電力付加効率の周波数特性である。50MHzの帯域幅において出力52.8dBm以上、電力付加効率69%以上が得られている。また、低温 (Tc = -40°C) や高温 (Tc = 85°C) でも測定し、発振やスプリアス^{*5}等は見られず安定動作することを確認した。

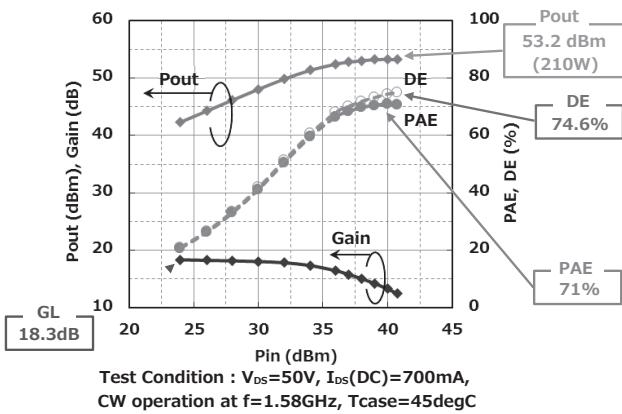


図5 L帯200 W GaN HEMT RF特性

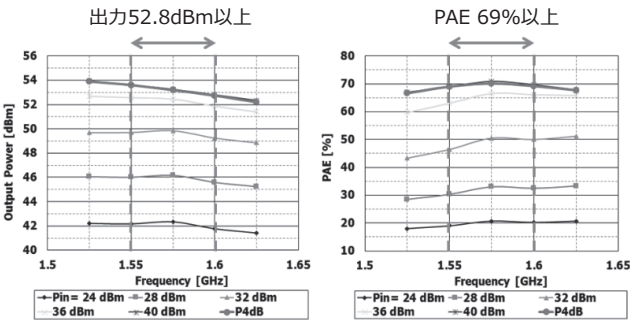


図6 L帯 200 W GaN HEMT RF周波数特性

4-2 熱設計および検証結果

このデバイスはCW動作用であるため、熱設計も重要な項目である。図1に示すように、我々のGaN HEMTはSiC基板上に形成されている。その場合、SiC基板のサイズは、GaN HEMTの熱抵抗 (Rth) における主要なパラメータである⁽³⁾。図7は、様々なGaNチップのサイズ (SiCサイズに等しい) と熱抵抗との間の関係の実験結果である。この図に

示すように、熱抵抗とチップサイズの間には非常に良い相関が見られる。我々は、CW動作条件下で最高の信頼性を維持することに対して適切な熱抵抗を達成するため、100WのGaN HEMTチップサイズを6.0mm × 0.86mmに設計した。予想される熱抵抗は1.1°C/Wである。

測定した200W GaN HEMTの熱抵抗は0.6°C/Wであり、期待値にかなり近い結果が得られた。200Wデバイスの1.58GHzにおけるRF動作時の推定チャンネル温度 (Tch) は以下の式で計算できる。

$$Tch = (PDC + Pin - Pout) \times Rth + Tc = 136^{\circ}C$$

*PDC: バイアス電源から供給される直流電力

ここでは、ケース温度Tcは衛星用途として想定される最大温度の85°Cとしている。このチャンネル温度136°Cの条件下で、200W GaN HEMTは次項の信頼性試験結果から示されるように高い信頼性が得られている。

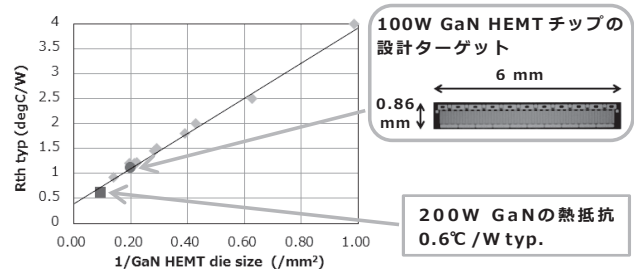


図7 GaN HEMTチップサイズと熱抵抗の関係

5. 信頼性試験

5-1 衛星搭載用認定試験 (SQT)

我々は、世界標準MIL-PRF-19500に基づいて確立した標準衛星搭載用認定手順に従って、このGaN HEMT技術の衛星搭載用認定試験 (SQT) を実施した。表1は、耐放射線試験を除いたSQTの実施項目であり、寿命試験と環境試験の両方が含まれている。DC高温動作寿命試験 (DC HTOL)、

表1 衛星搭載用認定試験 (SQT)

カテゴリ	試験項目	
寿命試験	DC HTOL (V _{DS} =60V, T _{ch} =250, 275, 300, 315°C) RF HTOL (V _{DS} =55V, T _{ch} =270, 290, 310°C, P4dB) RFステップストレス (V _{DS} =60V, Pin=P3dB~P13dB, 各2時間)	
	熱環境	熱衝撃 温度サイクル
環境試験	機械環境	衝撃・振動 定加速度

RF 高温動作寿命試験 (RF HTOL) およびRF ステップストレス試験を実施し、長期信頼性を確認した。また環境試験として、熱環境 (熱衝撃、温度サイクル) および機械環境 (衝撃・振動、定加速度) 試験を実施し、全てにおいて問題なき結果が得られた。DC HTOL およびRF HTOL の双方において、利得が低下する故障モードが観測され、求められた活性化エネルギー (Ea) は、DC HTOL については 2.10eV、RF HTOL については 2.21eV である。これら Ea が非常に近いことから、DC HTOL と RF HTOL の故障モードは同一と考えられる。図8および図9は、DC HTOL およびRF HTOL の結果およびこれらの寿命試験から得られたアレニウスプロットを示している。チャンネル温度 200°C における平均故障時間 (MTTF) は、DC HTOL については 2.34×10^7 時間 (2671年)、RF HTOL については 1.18×10^7 時間 (1347年) と予測される。これらの MTTF は、一般的に15年を寿命とする衛星搭載用途には十分である。また前述の通り 200W GaN HEMT の動作時推定チャンネル温度は 136°C であり、このとき MTTF は 5.71×10^{10} 時間で十分な信頼性が得られている。

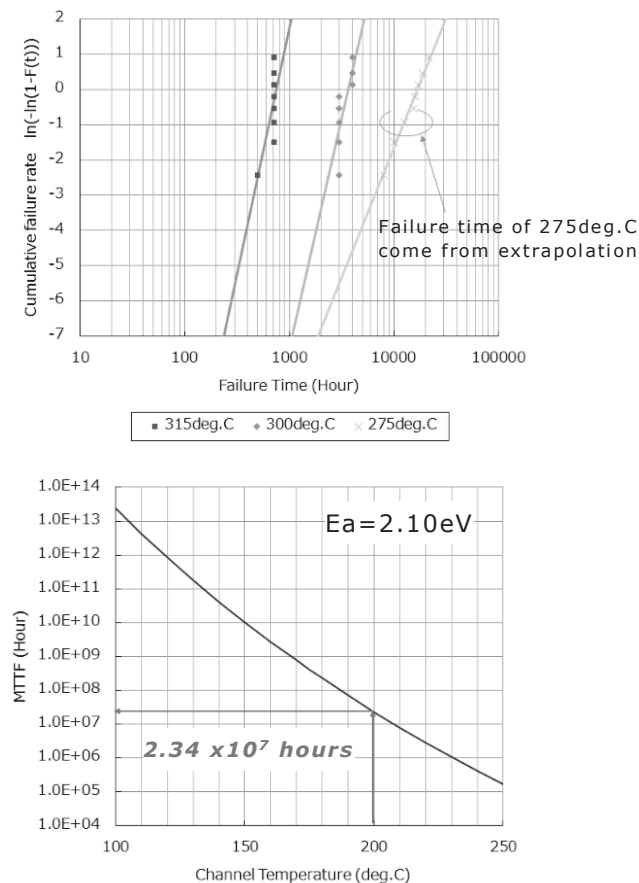


図8 DC HTOLのワイブル分布 (上) とMTTF (下)

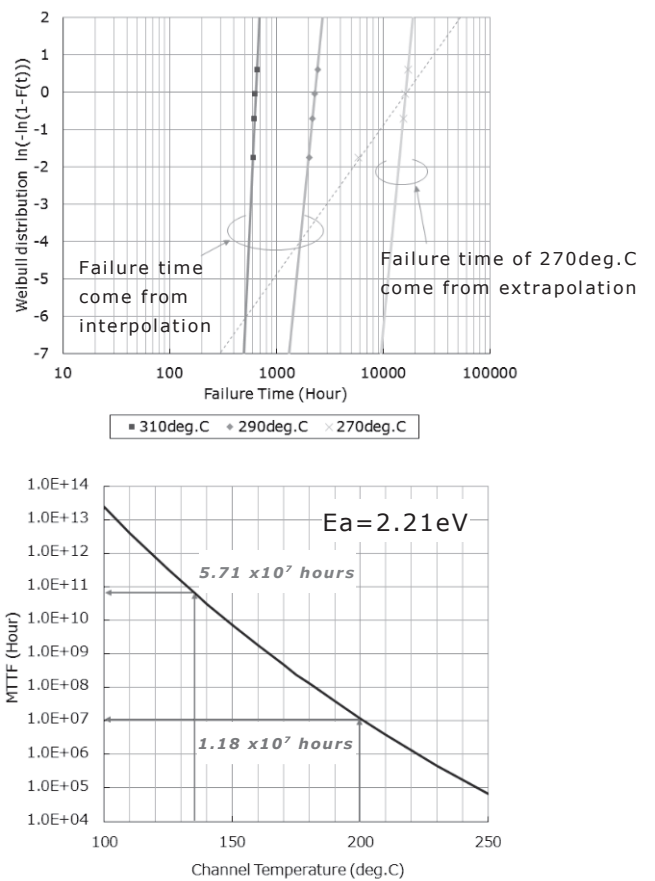


図9 RF HTOLのワイブル分布 (上) とMTTF (下)

5-2 耐放射線試験

耐放射線性は、宇宙空間で使用される上でもう一つの重要な要素である。一般的に、シングルイベント効果 (SEE^{※6})、トータルドーズ効果 (TID^{※7})、陽子線照射の3種類の放射線試験がある⁽⁴⁾。これらの試験の中で、GaN HEMT に対して最も重要と考えられる SEE を実施した。我々は、通常バイアス条件において RF 動作させた状態 (条件 A) とピンチオフさせて RF 信号を入力しない状態 (条件 B) の2つの条件で SEE を実施した。これらの試験の詳細を表2に示す。条件 A の結果、GaN HEMT に壊れは発生しなかった。条件 B では図10に示す安全動作領域 (SOA) を得ることができた。GaN HEMT の焼損が $V_{DS} = 195\text{V}$ 以上で発生していることがわかる。これは $V_{DS} = 50\text{V}$ の3倍以上であり、通常動作に十分な値である。これらの結果から、当社の GaN HEMT 技術は放射線に対して十分な信頼性を有することを確認した。

表2 シングルイベント効果 (SEE)

条件A. RF動作時

線種	¹³² Xe	
エネルギー [MeV]	650	
フルエンス [個/cm ²]	~ 3 × 10 ⁵	
フラックス [個/cm ² /sec]	~ 3000	
LET ^{*8} (Si) [MeV/(mg/cm ²)]	66.3	
ドレイン電圧 V _{DS}	~ 53V	
ドレイン電流 I _{DS} (DC)	250mA	
出力レベル	~ 4dB利得圧縮点	

条件B. ピンチオフ動作、RF入力なし

線種	¹³² Xe	¹²⁴ Xe
エネルギー [MeV]	650	420
フルエンス [個/cm ²]	~ 3 × 10 ⁵	
フラックス [個/cm ² /sec]	~ 3000	
LET (Si) [MeV/(mg/cm ²)]	66.3	67.7
ドレイン電圧 V _{DS}	~ 225V	
ゲート電圧 V _{GS}	-6V	

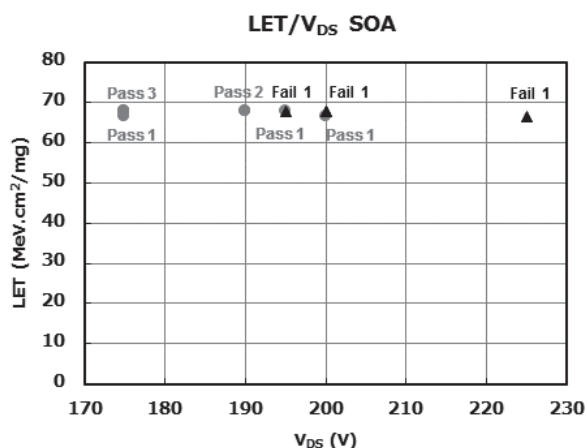


図10 RF入力なしでのSEEによる安全動作領域

6. 結 言

我々は、CW動作下の1.58GHzで74.6%のドレイン効率を有する高効率200W GaN HEMTを開発した。74.6%の効率はL帯200W級の増幅器として最高レベルである。このデバイス設計には、最大ケース温度かつ最大CW電力で十分な信頼性が得られるように熱抵抗を設定することを含んでいる。当社のGaN HEMTは、衛星搭載用認定試験(寿命、環境)と耐放射線試験のSEEに合格し、宇宙空間での使用において十分な信頼性があることを確認した。これらの結果から、我々は衛星搭載用GaN HEMT SSPAの実現可能性を実証した。

用語集

※1 L帯

マイクロ波の周波数による分類において、1-2 GHzの帯域を指す。GPS等のナビゲーションや通信衛星による移動体通信等、多様な用途に用いられている。

※2 HEMT

High Electron Mobility Transistor：半導体接合界面に誘起される2次元電子を利用したトランジスタ。不純物散乱の影響の少ない高電子濃度のチャンネルが形成できる。

※3 GaAs FET

Gallium Arsenide Field Effect Transistor：素材にガリウム砒素を用いた電界効果型トランジスタ。シリコンに比べ、電子が5倍近いスピードで移動できることから、マイクロ波など高周波増幅用途に適している。

※4 ロードプル

大信号特性の評価方法の1つ。チューナーと呼ばれるインピーダンス可変装置を用いて、インピーダンス整合条件を変えながら特性を評価するもの。

※5 スプリアス

増幅器などの出力信号に含まれる、入力信号あるいは規定の周波数成分以外の不要な信号成分。

※6 SEE

Single Event Effect：1個の高エネルギー粒子（陽子・重イオンなど）が半導体デバイスに入射し、電離作用により高密度の電荷が生成されることにより一時的な誤動作や永久な故障が起こる効果をいう。

※7 TID

Total Ionizing Dose Effects：宇宙放射線によって発生した電子・正孔のうち、正孔が集積回路の絶縁物に蓄積することにより素子特性が少しずつ変化し、ついに特性が劣化して故障していくもので、積算線量効果と呼ばれる。

※8 LET

Linear Energy Transfer：線エネルギー付与。粒子が物質中で単位体積密度、単位長さ当たりどのくらいのエネルギーを周囲に与えるかを表す量。

参 考 文 献

- (1) F. V. Rijs et. al, "Efficiency improvement of LDMOS transistors for base stations: towards the theoretical limit," 2006 IEDM Digest
- (2) T. Yamasaki et.al, "A 68% Efficiency, C-Band 100W GaN Power Amplifier for Space Application," 2010 IMS Digest. pp.1384-1387
- (3) T. Yamamura et. al, "A Difference of Thermal Design Between GaN and GaAs," 2011 CS Mantech Digest
- (4) H. Yoshikoshi et. al, "Radiation Hardness Tests for Space Qualified X-band AlGaIn/GaN HEMTs," 2015 Reliability of Compound Semiconductor Workshop

執 筆 者

大 沢 研* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



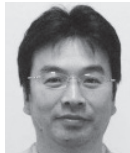
吉 越 大之 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



新 田 敦 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
品質保証部 担当部長



田 中 常之 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



三 谷 英三 : Sumitomo Electric Europe Ltd.
ゼネラルマネージャー



佐 藤 富雄 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部 担当部長



*主執筆者