

急拡大する小型衛星市場「New Space」における GaN デバイスの活用

ルネサス エレクトロニクス株式会社 産業用アナログ・パワーデバイス部門
Kiran Bernard (アプリケーションエンジニア)

2019年4月

概要

「New Space」と言われる市場は、地球低軌道 (LEO) 衛星開発においてより費用効果の高いアプローチをとることを目指しています。これまで衛星の動作モジュールはシステムに冗長性を組み込んで信頼性を重視し、一度打上げた衛星システムは10年から20年の期間、可動することを目的としていました。それに対し「New Space」は、多数の衛星がネットワークを組み相互補完をすることで信頼冗長性を実現します。これにより1つの衛星が故障しても、他の衛星でミッションを代行することができます。LEO型衛星に期待されている寿命は約3年から5年で、静止軌道 (GEO) 型衛星の10年から20年の寿命に比べると大幅に短い稼働期間になっています。



従来の宇宙向け機器は、商用電子産業と比較して一般的に数世代遅れた技術を使用して製造されてきましたが、「New Space」市場の事業者は宇宙用途としては、これまで考えもしなかった新技術も取り入れ始めました。窒化ガリウム (GaN) もそのような技術の1つです。GaNを使ったパワーエレクトロニクス製品の宇宙市場での採用は、ドライバICの供給不足の影響もあり導入が遅れていました。近年、エンハンスメントモードの GaN FET が入手可能になり、現在では耐放射線の PWM コントローラや GaN FET ドライバも入手できるようになり、電源管理アプリケーションでの GaN 型デバイスの普及が実現しました。GaN FET デバイスは、FET の類の中では最高水準のゲート電荷性能と高周波スイッチング特性があり、このタイプの製品を使用することで基板スペースの画期的な削減と電力効率の大幅な向上が実現可能となります。本稿では、GaN FET の性能とドライバソリューションについて詳細に説明します。

GaN FET は小型衛星の電源モジュールに最適です

GaN FET が衛星用の電源に最適であるという理由がいくつかありますが、本稿では物理的特性 (固有の耐放射線性と小さいダイサイズ)、電気的特性 (寄生 p-n ダイオードが無い、高速スイッチングなど)、および電源システムでの利点 (効率の向上と電源モジュールの小型化) という視点から、詳細に解説します。

シリコン MOSFET とは対照的に、GaN FET はゲート酸化膜層を有していないのでガンマ放射線に起因するトラップ（ホール）形成が発生しません。また GaN FET は、シングルイベント効果（SEE）テストでも優れた性能を発揮します[1]。

図 1 に GaN FET の構造を示します。GaN FET の形成は、まず標準的なシリコンウエハ上に GaN とその他の材料が積層されます。よって、GaN FET は縦型構造デバイスとなるので電流は GaN 層上部の二次元電子ガス層（図 1 の「----」で示される部分）を水平方向に流れます。

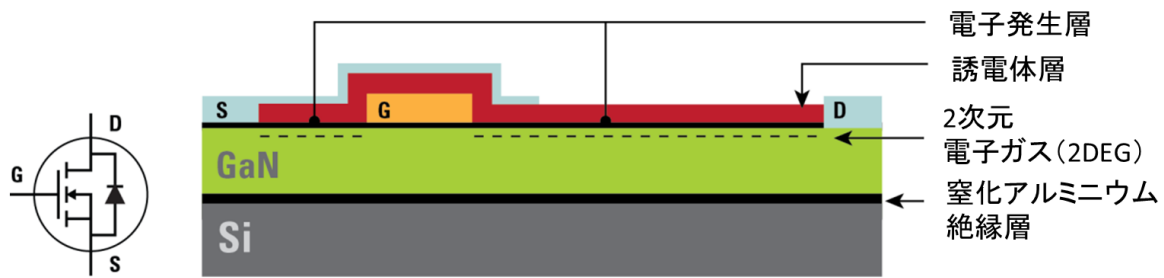


図 1 - EPC 社 GaN パワートランジスタ構造

GaN はワイドバンドギャップ特性を有した材料です。ドレインとソースの分離層の間隔は、シリコンタイプと比較すると理論的には 10 分の 1 にすることが可能です。そしてドレイン・ソース間オン抵抗 $R_{DS(ON)}$ に関しては、チャンネル長がはるかに短いため、チャンネル幅はもっと狭くできます。成熟期にあるシリコン MOSFET はすでに理論限界値に非常に近くなっていますが、GaN FET にはさらなる改良の余地があると考えられます。図 2 を参照してください。さらに、標準生産品の MOSFET を宇宙用 MOSFET として衛星用途などに転用すると性能劣化を引き起こしますが、GaN FET の場合は宇宙用規格を十分満たす性能を維持します[2]。

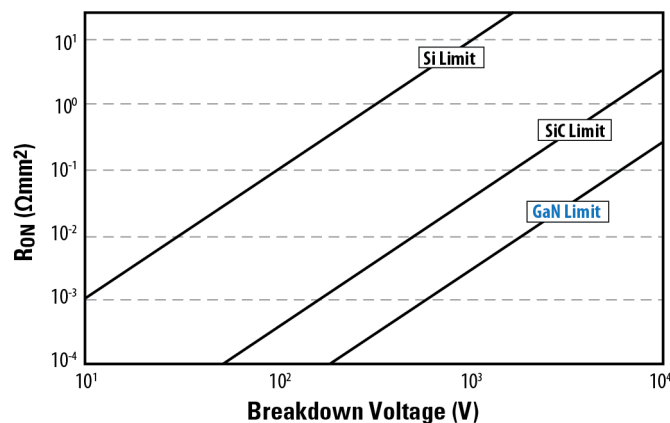


図 2 - 抵抗対ブレイクダウン電圧

シリコン MOSFET と比較すると GaN FET はダイサイズが小さいので、スイッチング電源用途において大きな性能改善が期待できます。出力段キャパシタや回路パターンに起因するインダクタンスなどの寄生成分が減少しスイッチング損失の減少や、同じ損失の場合はより高い周波数での動作を可能とします。

GaN FETには、寄生 pn ダイオードがないので、逆回復特性もないという点で非常に便利です。逆回復特性は、ダイオードの電荷チャージから回復するためのデッドタイムを長くするだけでなく、温度・電流・ダイオード通電にかかる時間など、いくつもの要因に影響を与えます。ここで1つ疑問が湧いて来ます。GaN FETには逆回復特性がないということであれば、ゲートが「オフ」($V_{gs} = 0V$)のときに逆方向(ソースからドレイン)に通電するのでしょうか？答えはYESです。GaN FETは、順方向と同じチャネルを使って通電します(寄生素子ではありません)。この通電による電圧降下はダイオードによる電圧降下よりも大きいですが、非常に短いデッドタイムを活用することで、総損失を最小限に抑えることができます。逆回復特性がないので5~15 ns程度のデッドタイムに抑えることができます。さらに、必要であればオプションで並列にショットキーダイオードをGaN FETの周囲に配置できます。デッドタイムが短い小型のショットキーダイオードで十分です。

スイッチング電源への応用

GaN FETを使用することで電源設計をさらに最適化することができます。その効果は、サイズ、重量、効率、EMIを含む電源モジュール全体に及びます。そして場合によっては、電圧レール数の削減や高ループ周波数にも効果を発揮します。

電源サイズと重量への効果：高速スイッチングと寄生成分の減少により、各スイッチングサイクルでの損失が減少します。電源設計において、この利点をどう活用するか選択することができます。周波数を上げて小型化するのか効率を上げるか、またはその両方のバランス(小型化と効率)を取るかです。GaN FETは同等のMOSFETよりも小型のため、衛星用電源では、電源のサイズと重量に大きく貢献します。効率が増えると、ヒートシンクのサイズや重量が減少するだけでなく電源自体の消費電力も減少します。スイッチング周波数を上げることでトランスやコンデンサを小さくできる可能性があり、トランスはインダクタンス値を小さくできるので銅損失が減少する可能性があります。またコスト削減の効果があります。

高速フィードバックループ：スイッチング周波数を効率的に上げることができるため、必要に応じてフィードバックループの応答速度を上げることができます。高速な過渡応答の利点は、電源の負荷変動にすばやく応答できる特性により、負荷変動を吸収するために必要な出力コンデンサがそれほど多くのエネルギーを蓄積しておく必要がなくなり、その結果コンデンサの容量とサイズを縮小することが可能となります。

EMI低減：周波数とスイッチング速度が上がるとEMIの問題が増すと思われるかもしれませんが、これについてはGaNに利点があります。寄生成分が減少すると、スイッチングサイクルごとに、これらの寄生素子に蓄えられて放出されるエネルギーも減少します。またチップサイズが小さいため、基板レイアウトを改善してループインダクタンスを減らすことができます。下記は、電源ハーフブリッジ評価ボードからのスイッチング波形の例です[3]。このバックコンバータの立ち上がり時間と立ち下り時間が速いにもかかわらず、回路レイアウトが最適化されているため、電圧オーバーシュートが小さくなることに注目してください。



図3 - 150VIN から 5VOUT @ 4A (200kHz) でのバックコンバータの波形

CH1 : VPWM 入力電圧
 CH2 : インダクタ電流
 CH4 : VOUT スイッチノード電圧

ゲートドライバ

GaN FET を最大限に活用するには、高速で理想的な駆動電圧にレギュレートされた専用のゲートドライバが必要です。許容される最大ゲート電圧は6Vであり、ほとんどの商用グレードの応用製品には GaN FET ドライバの駆動電圧は5Vを使用します。しかし衛星用途製品では、電圧マージンを大きく取る必要があります。衛星用途の理想的なゲート駆動電圧は4.5Vです。この電圧は5Vゲートドライブに比べると $R_{DS(ON)}$ に与える影響は非常に小さいです。標準値4.5V（あるいはそれ未満）の駆動電圧を使用すると、最悪の場合、 $R_{DS(ON)}$ が大きくなる可能性があります。GaN デバイスのデータシートの曲線は標準デバイスを基準にしているため「4V（あるいはそれ以下）の標準ゲート駆動電圧が適切な選択である」と解釈するのは間違いです。

現在、市場に出ているほとんどの FET コントローラおよびドライバは、10V を超える駆動電圧を提供しているため、これを GaN FET に使うとゲート損傷を起こすでしょう。MOSFET の電圧レベルを4.5Vのゲートドライブまでレベルシフトできるドライバを提供できれば、市販されている一般的な PWM コントローラを利用することができます。GaN FET ゲートドライバを選定する際に慎重に考慮すべき点が2つあります。（1）スイッチング時にゲートドライバは適切にレギュレートされているか？（2）GaN FET がオフになっているべき状態の時、適切にオフになるような動作を保証できているか？

しっかりレギュレートされたゲートドライブは、その電源ラインと出力負荷の変動に関係なく、ゲート電圧を一定に維持します。ドライバの特性として短時間で繰り返し何アンペアかの電流を供給することができる必要があるということです。これは通常、出力段キャパシタに対して内部レギュレータの補償を調整することによって達成されますが、ここは通常 IC の製造業者が対応しています。ユーザー側の真の課題は、この出力容量と GaN FET のゲート間の配線における浮遊インダクタンスをどう扱うのかということです。短時間で何アンペアもの電流が流れると、大きな電圧トランジェントが発生しゲート損傷を引き起こす可能性があることです。これを回避するためには、まずドライバ出力と FET ゲート間の銅配線をできるだけ短くするようにします。図4は、ローサイドアプリケーション用に最適化されたレイアウト例を示しています。

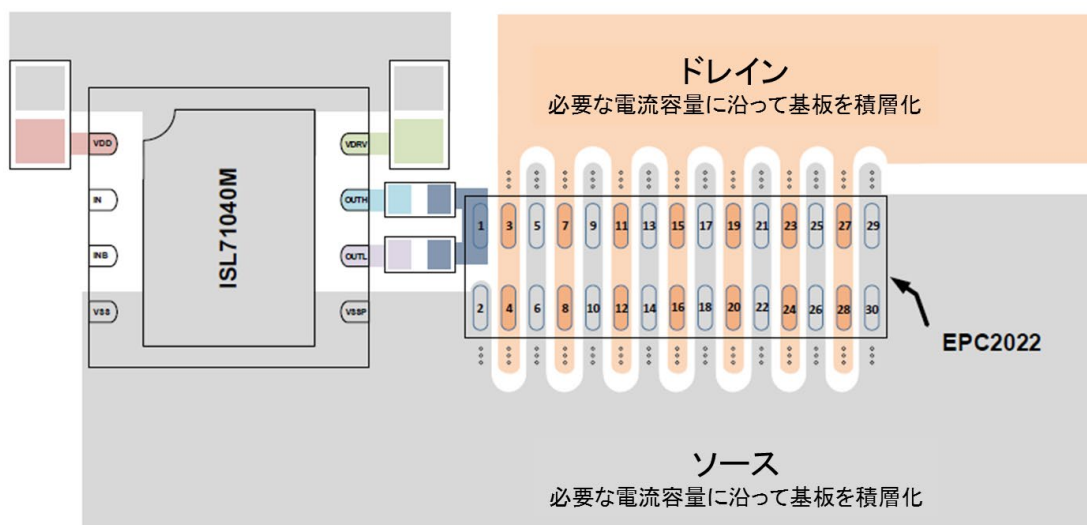


図4- ゲート駆動ループのインダクタンスを最小にするための最適化されたレイアウト：ゲートループは可能な限り太く短くする。最小化するパスは、VDRV（緑）から OUTH（青）を通してゲート（濃い青）へ、そして OUTL（紫）を通して VSSP（灰色）に戻る経路です。

次の作業は、ゲートリターンループのインダクタンスを最小限に抑えることです。上の例では、これを実現するためにゲートリターン（基板）がソースプレーンとマージされています。レイアウトを考慮した後、ゲート波形にまだ望ましくない電圧スパイクがある場合は、それを補償するためにゲート抵抗を増やすことができます。また、ドライバにフェールセーフ機能が組み込まれていることを確認することも重要です。これにより、何らかの問題が発生した場合（または問題発生を想定して）、FET をオフにします。何らかの理由で入力が駆動されなくなった場合でも、FET をシャットオフする状態に落ち着くようにします。FET をオフにしておくもう1つのケースは、ゲート駆動電圧が、最適な $R_{DS(ON)}$ で GaN を駆動するのに十分な High 電圧になっていない場合です。

堅牢な PWM コントローラとローサイドゲートドライバの設計を含む技術的課題を除いたとしても、衛星システムの設計には克服する必要がある特有のハードルがあります。衛星が軌道上で意図したように機能するためには、その構成部品は、宇宙空間内のイオン化粒子（重イオンなど）との相互作用に対処する必要があります。さらに低線量率（LDR）の全イオン化線量（TID）に対する長時間被爆を受けても、デバイスは適切な動作を維持する必要があります。重イオンが接合部に電荷を蓄積したときや、LDR TID によってデバイスのしきい値がシフトしたときに、維持すべき状態が反転しない PWM コントローラと GaN FET ドライバにするためには、IC 設計およびプロセス設計の段階で何らかの対策を取る必要があります。これはドライバが宇宙用途にゼロから設計されたときに何ができるかを示すグラフです（市販のスクリーンされた IC とは対照的に）：

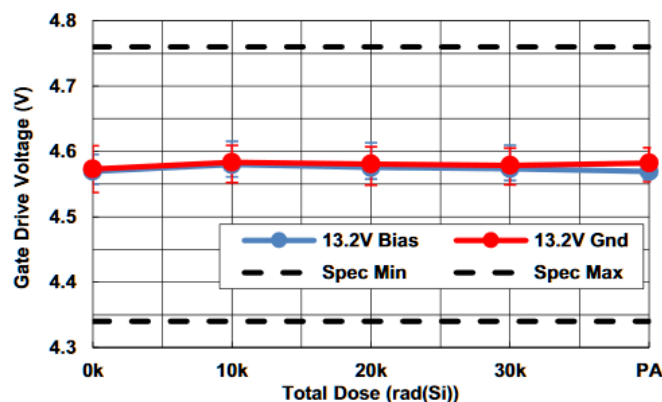


図5 - ISL71040 のゲート駆動電圧の低線量被爆特性 (<10 mrad (Si) / s)

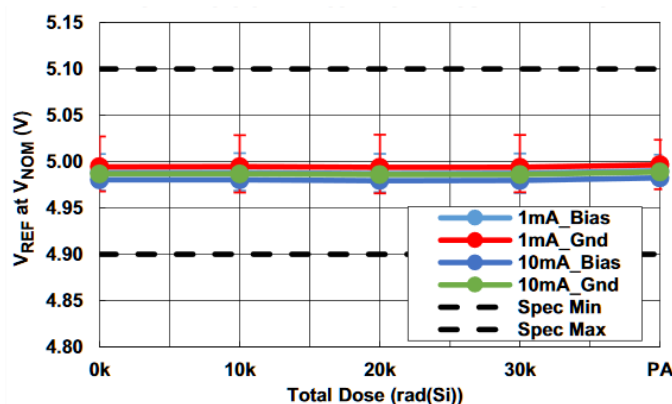


図6 - ISL71043M の全体精度の低線量被爆特性 (<10 mrad (Si) / s)

GaN FET ドライバとインターフェースする PWM コントローラは、重イオン下でも十分に機能する必要が
 あります。BOM コスト削減のために、一般商用グレード部品やアップスクリン部品を採用することに魅
 力を感じる場合があります。しかし、そのデバイスが本当に宇宙用途向けに設計されていない限り性能劣
 化を起こすか動作不良を起こすと考えて下さい。下記に、重イオンにさらされた 2V 出力の市販のスイッ
 チング電圧レギュレータの例を示します：

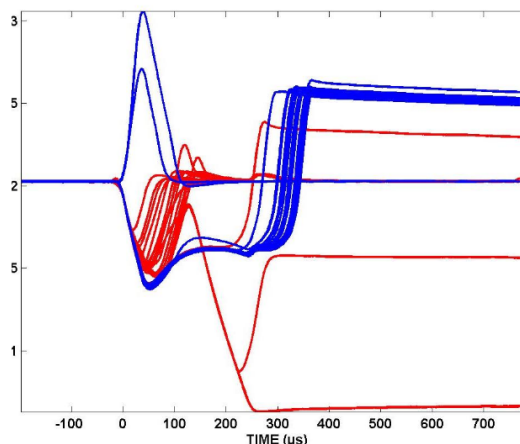


図7 - 25°C で LET = 43 MeV·cm²/mg にさらされた ISL85410 の SET 応答

イオンの衝突後に、出力がまた 2V に戻る事ができたケースもありますが、完全にシャットダウンするか
 別の電位に安定化してしまうケースがほとんどです。前者（シャットダウンする場合）は、単純な電源の
 入れ直しで修正することができますが、後者（別電位にシフト）はペイロードに重大な被害を及ぼす可
 能性があります。次に重イオン下で正常動作するコントローラの例を示します：

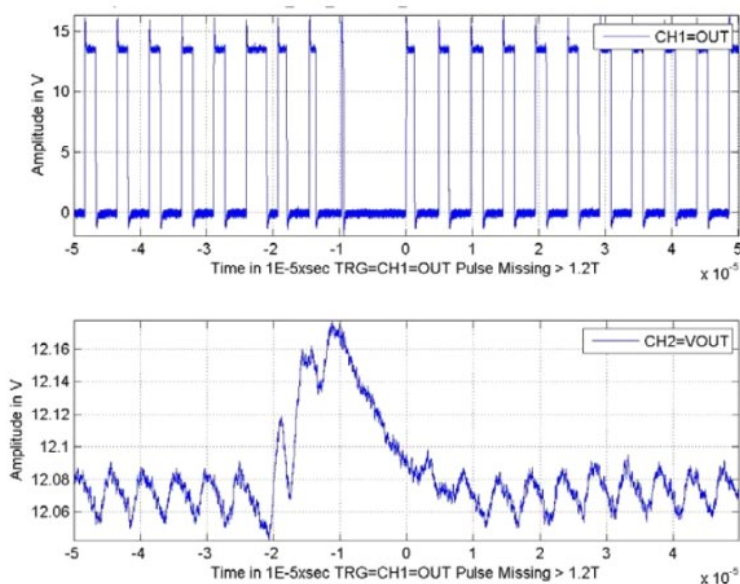


図8 - ISL71043M を 25°C で LET = 43 MeV·cm²/mg にさらした場合の正方向への VOUT 過渡現象の例

図8は、コントローラがイオンストライクを受けて、LXパルスがわずかに拡大しフィードバックループに
 よってすばやく補正されている現象を示しています。

43 MeV·cm²/mg の LET を受けた ISL71040M の場合、スタティック入力で記録されたシングルイベントトランジェントはありませんでした。SET がパルス幅に対して±20n 摂動で、500kHz のダイナミック入力では、≤1.7x10⁻⁶cm²の小断面となりました。

結論

GaN FET は衛星アプリケーションに非常に適していますが、その可能性を最大限に引き出すには優れたゲートドライバが必要です。優秀なゲートドライバと組み合わせることができれば、従来のシリコン相当品と比較して、より効率的なスイッチング、より高い周波数動作、より低いゲート駆動電圧、そしてより小型のモジュールを実現することが可能になります。

脚注

[1] Alex Lidow et al, GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Wiley, 2015, p. 172-178.

[2] HEMTs In Space - A New Take On Rad Hardness, Compound Semiconductor,
<https://compoundsemiconductor.net/article/99757-HEMTs-in-space-a-new-take-on-rad-hardness.html>

[3] EPC9014 Quick Start Guide, EPC, page 2 Figure 4.

©2019 ルネサスエレクトロニクスアメリカ Inc. (REA) 無断複写・転載を禁じます。Bluetooth は米国 Bluetooth SIG, Inc. の登録商標です。ルネサスはこの商標の使用を許諾されています。その他のすべての商標および商品名はそれぞれの所有者のもです。REA は、ここに記載された情報は提供された時点で正確であると確信していますが、その品質や用途に関していかなるリスクも負っていません。すべての情報は、明示、黙示、法定、または取引、使用、または取引慣行から生じることにかかわらず、いかなる種類の保証もなしにそのまま提供されます（商品性、特定目的への適合性、または非侵害に関する制限なし）。REA は、そのような損害の可能性について助言されたとしても、ここでの情報の使用またはそれに依存することから生じるいかなる直接的、間接的、特殊的、間接的、付随的、またはその他のいかなる損害についても責任を負いません。REA は、予告なしに、製品を中止したり、その製品の設計や仕様、あるいはその他の情報を変更する権利を留保します。すべてのコンテンツは、米国および国際的な著作権法によって保護されています。ここに特に許可されている場合を除き、ルネサスエレクトロニクスアメリカの書面による事前の許可なしに、閲覧者またはユーザーは、いかなる公的または商業目的のために、この資料の修正、配布、公開、送信、派生作品の作成をすることは許可されていません。