

ショットキー・ダイオードにおける Trench 型と Planar 型の比較

Trench 技術の使用により、 Q_{rr} とスイッチング損失を低減し SOA を拡大

 Reza Behtash 博士 - Nexperia アプリケーション・マーケティング・マネージャー

発明者であるドイツの物理学者ウォルター・ハンス・ショットキーにちなんで名付けられたショットキー・ダイオードは、基本的に金属・半導体接合から構成されます。ショットキー・ダイオードは順方向電圧降下が小さくスイッチング・スピードが速いため、電力変換回路の昇圧ダイオードなどのさまざまな用途で広く使用されています。もちろん、ショットキー・ダイオードの電気特性は、主に順方向電圧降下、リーク電流、逆方向阻止電圧の間で物理的なトレードオフの関係にあります。Trench 型ショットキー・ダイオードはベースとなるショットキー・ダイオードを発展させたものであり、Planar 型よりも優れた特性が得られます。本書では、Trench 型ショットキー・ダイオードの構造と利点について説明します。

ショットキー動作

ダイオードとして理想的な特性は、順方向電圧降下が小さく、逆方向阻止電圧が高く、リーク電流がなく、寄生容量が小さく、高速スイッチングを容易に行えることです。順方向電圧降下を考える場合、主に次の2つの要素があります。1つは、接合部 (PN ダイオードの場合はPN接合、ショットキー・ダイオードの場合は金属・半導体接合) での電圧降下、もう1つはドリフト領域での電圧降下です。PN接合での順方向電圧降下は本質的に拡散電位により決まる (従って主に特定の半導体材料により決まる) のに対し、ショットキー・バリア・ダイオードの金属・半導体接合での順方向電圧降下はショットキー金属の選択により変わり、金属の仕事関数と半導体の電子親和力との差がショットキー・バリアになります。

金属の仕事関数の値が小さいショットキー金属を使用すると、金属・半導体接合での電圧降下を最小限に抑えることができます。一方、ショットキー・ダイオードの接合部での順方向電圧降下とリーク電流はトレードオフの関係にあります。これは、リーク電流のレベルがショットキー・バリアと金属・半導体接合部の電界によっても決まるためです。このトレードオフのほかに、逆方向阻止電圧を高くするためにドリフト領域を厚くすると、接合部の電圧降下が小さいという長所がなくなってしまう可能性があります。従来からショットキー・ダイオードの逆方向阻止電圧が200Vよりかなり低い値に抑えられているのは、このためです。

Trench 技術

このような説明を聞くと、リーク電流を小さく、逆方向阻止電圧を高くしなければならないのに、金属・半導体接合での電圧降下が小さいというショットキー・ダイオードの主要な利点がどのように保持されるのか、疑問が生じるかもしれません。これこそが、Trench型ダイオードが極めて有利な理由です。Trench型ショットキー・ダイオードの背景にあるのが、'RESURF' (REduced SURface Field: 表面電界緩和) という概念です。RESURF現象を図1に示します。Planar型ショットキー・ダイオードの場合は、等電位線が上部電極の近くに集中するため表面電界が強くなります。この結果、逆方向電圧が上昇してリーク電流が大幅に増大し、表面の近くで臨界電界強度を超えると早いタイミングで降伏します。

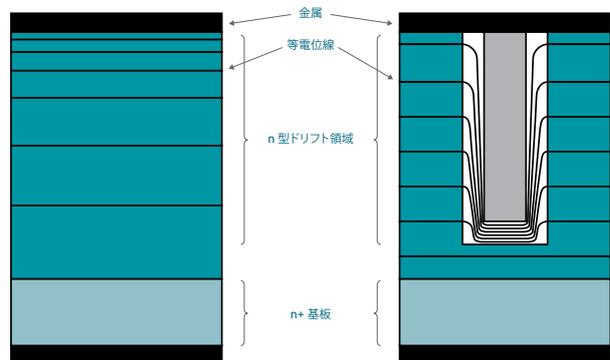


図1: Planar 型ショットキー・ダイオードの等電位線 (左) と Trench 型ショットキー・ダイオードの逆方向の等電位線 (右)

エッチングによりシリコン内にトレンチを形成し、薄い誘電体によりドリフト領域から電氣的に分離されたポリシリコンをトレンチに埋め込むことにより、トレンチは半導体内でフィールドプレートのような機能を果たして逆方向のドリフト領域を小さくし、その結果、ドリフト領域に沿った電界形状が平らになります。従って、トレンチ方式では、同じエピタキシャル構造を有する Planar 型デバイスよりも、表面近くの電界が弱く降伏電圧が高くなり、リーク電流を低減できます。

Nexperia は Trench 型ショットキー・ダイオードの製品ポートフォリオを開発し、電圧範囲 45 ~ 100V のダイオード (PMEG*T ファミリー) を発売しています。これらのデバイスでは、順方向電圧降下 (V_f) とリーク電流 (I_R) の間のトレードオフのバランスが良好になっています。例として 60V の製品の場合の V_f/I_R のトレードオフを図 2 に示します。この図では、125°C における最大順方向電流のときの順方向電圧降下に対する最大逆方向電圧のときのリーク電流がプロットされています。比較のため、グラフには他の 2 つのメーカーの Trench 型と Planar 型のショットキー・ダイオードも示してあります。特定の順方向電圧降下のときのリーク電流は、Nexperia のデバイスが最も小さくなっています。

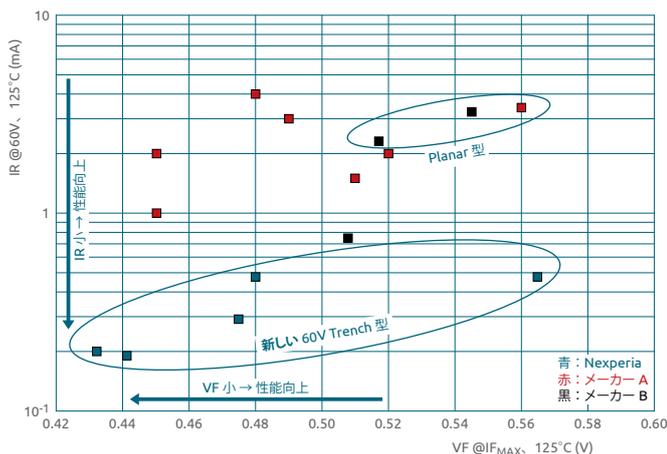


図 2：125°C における最大順方向電流と最大逆方向電圧のときの V_f/I_R のトレードオフ

広い安全動作領域 (SOA)

同等の順方向電圧降下を有する相当品の Planar 型ショットキー・ダイオードと比較した Trench 型ショットキー・ダイオードのリーク電流が小さいほど、Trench 型デバイスの安全動作領域 (SOA) が広がっています。このケースでは SOA は、ある接合温度のときに印加可能な最大逆方向電圧を示します。Trench 型ダイオードは Planar 型ショットキー・ダイオードに比べて SOA の面で本質的に有利ですが、Nexperia の Trench 型製品は、広い SOA が得られるよう特に考慮して設計されています。図 3 は、システムの熱抵抗 ($R_{th(j-a)}$) が 90K/W のときの SOA について、Nexperia の Trench 型ショットキー (PMEG100T080ELPE: オレンジ色の線) と、別のサプライヤの同様の定格の Trench 型ショットキー・デバイス (青い線) との違いを示したものです。接合温度が 125°C のとき、Nexperia の Trench 型デバイスの最大許容逆方向電圧は、競合他社の Trench 型製品より約 40V 高くなっています。

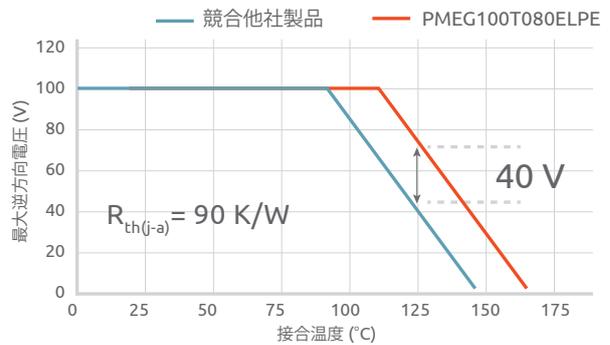


図 3：Nexperia の Trench 型ショットキー PME100T080ELPE と、競合他社の Trench 型ショットキー製品の安全動作領域の比較

従って、Trench 型ショットキー・ダイオードの方が熱暴走 (ダイオードのリーク電流に起因する消費電力増大が、システムの熱抵抗を通じた放熱より速い場合に不安定になる現象) を起こしにくいいため、自動車など比較的高い許容周囲温度が要求される用途には Trench 型ショットキー・ダイオードが適します。

Trench 型ショットキー・ダイオードの等価回路図を図 4 に示します。ショットキー・ダイオードの通常の寄生容量 C_{DIODE} のほかに、Trench 構造内の電極と薄い誘電体起因する第 2 の寄生容量 C_{TRENCH} があります。これは、Trench 型ショットキー・ダイオードの単位面積当たりの合計寄生容量が Planar 型より大きいことを意味します。

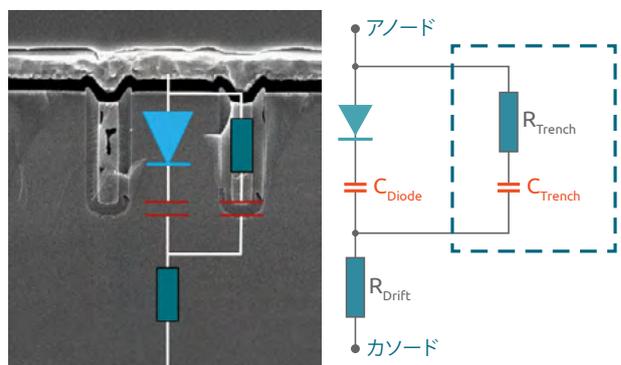


図 4：回路要素をわかりやすく示した、Trench 型ショットキー・ダイオードの断面図と等価回路図

一方、 C_{TRENCH} はダイオードのスイッチング特性や EMI には影響を与えません。実際に、Trench 型ダイオードは、Trench 型ダイオードのデータシートに示されているように総寄生容量が大きいにもかかわらず、Planar 型ショットキー・ダイオードよりも電荷蓄積 Q_{rr} が少なくスイッチング性能が優れているためです。次項では、Trench 型ショットキーのスイッチング性能と、それがコンバータ効率に与える影響について説明します。

逆回復動作と Q_{rr}

デバイスのスイッチング動作を評価するには、逆回復測定を行います。この測定を行うには、ダイオードを順方向にバイアスしてから、デバイスを逆バイアスにスイッチングします。デバイス内の電荷蓄積(図4の等価回路に示す寄生容量 C_{Dioded})はダイオードがブロックする前に除去される必要があり、電荷蓄積があると、いわゆるダイオードの逆回復電流が発生します。同等のダイ・サイズとパッケージを有する Trench 型と Planar 型のショットキー・ダイオードの逆回復特性の測定結果を図5に示します。

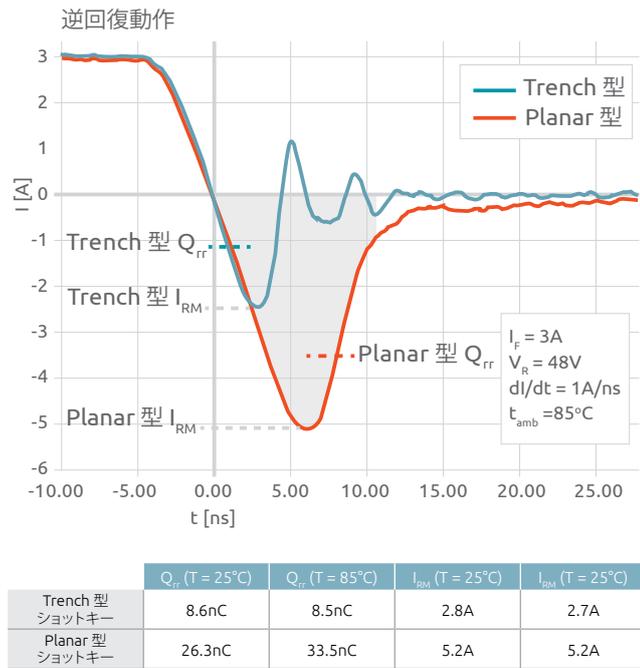


図5：Trench 型と Planar 型のショットキーの逆回復動作

この測定では、直前に $di/dt=1A/ns$ の変化率で電流を変化させています。値が0の線より下の部分がダイオードの Q_{rr} になります。青い線で示す Trench 型デバイスの方が、 Q_{rr} が小さくなっています。また、このグラフからは、Planar 型ダイオードよりも Trench 型ダイオードの方が、(前述のように寄生容量が大きいにもかかわらず) 逆回復電流が小さく逆回復時間が短いことも分かります。25°Cで使用される用途は極めて稀であるため、Trench 型ダイオードの Q_{rr} の温度安定性は注目に値します。図5のように、周囲温度が85°Cまで上昇した場合に、Planar 型ショットキーの Q_{rr} はかなり大きくなりますが、Trench 型ダイオードの Q_{rr} はわずかしかなり変化しません。

図6は、Trench 型ショットキーの Q_{rr} が小さいことが48V/12V スイッチモード・コンバータの効率に与える効果を示します。Trench 型ショットキー・ダイオードの Q_{rr} が小さいため、スイッチング損失が大きくなる高周波領域では特に、コンバータの効率が大幅に向上します。

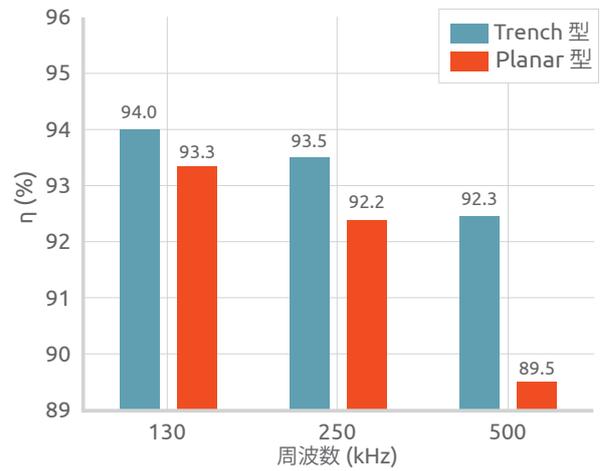


図6：Trench 型ショットキー・ダイオードでは、特に高周波領域でスイッチング損失が Planar 型ダイオードより小さく、コンバータの効率が大幅に向上

伝導ノイズと放射ノイズを測定すると、図7のように、スイッチング中に Trench 型ダイオードで発生するリングングは電磁ノイズ・レベルに影響を与えないことが分かります。

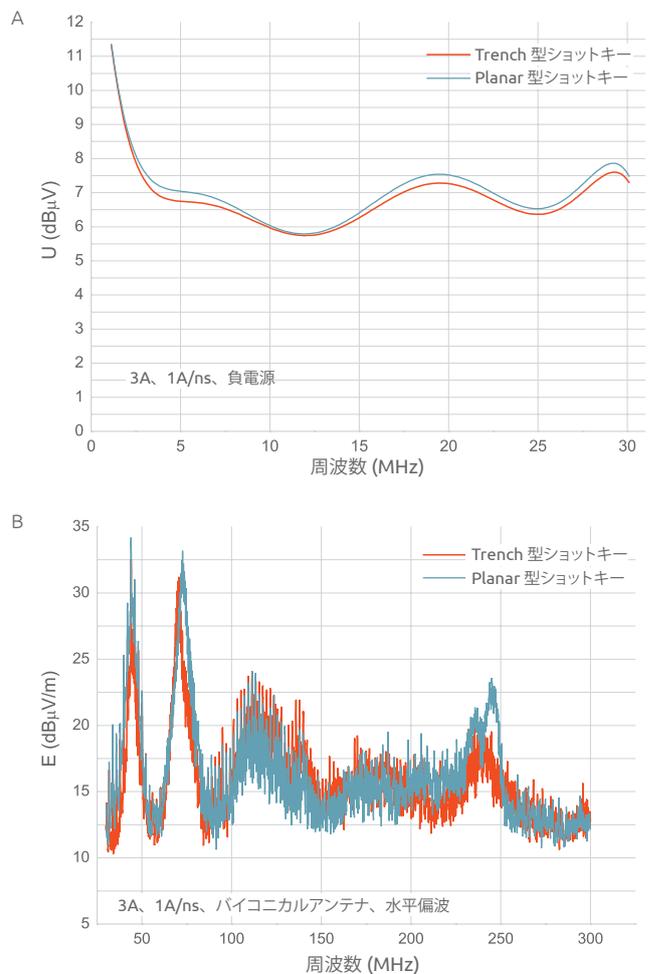


図7：電磁ノイズに与える影響：放射ノイズ(A)、伝導ノイズ(B)。試験デバイス(3A CFP3 ダイオード)として48V/12V 降圧コンバータを使用



CFP2-HP (SOD323HP)
2.2 × 1.3 × 0.7mm*
 $R_{th(j-sp)} = 6K/W$



CFP3 (SOD123W)
2.6 × 1.7 × 1.0mm*
 $R_{th(j-sp)} = 18K/W$



CFP5 (SOD128)
3.8 × 2.5 × 1.0mm*
 $R_{th(j-sp)} = 12K/W$



CFP15B (SOT1289B)
5.8 × 4.3 × 0.78mm*
 $R_{th(j-sp)} = 7K/W$

図 8 : クリップ・ボンディング型 FlatPower パッケージに封止された Nexperia の Trench 型ショットキー・ダイオード

* 本体サイズ (長さ×幅×高さ)

まとめ

以上の説明は次のようにまとめられます。

- 順方向電圧降下とリーク電流の間の良好なトレードオフが必要であれば、Trench 型ダイオードの選択が適切である。
- 熱暴走を起こしにくいことから、周囲温度が高い高電力密度の用途にも Trench 型ダイオードを選択すべきである。
- スイッチング周波数が 100kHz を超える用途の場合は、Trench 型デバイスの低スイッチング損失が特に重要である。

詳細については、

www.nexperia.com/trench-schottky-rectifiers をご覧ください。

Nexperia について

Nexperia は世界ですべての電子設計に求められる必要不可欠な半導体の量産のエキスパートとして、世界をリードしています。Nexperia はダイオード、バイポーラ・トランジスタ、ESD 保護デバイス、MOSFET、GaN FET、アナログ / ロジック IC などの広範な製品ポートフォリオを提供しています。本社はオランダのナイメーヘンで、年間製品出荷数は 900 億を超えており、各製品は自動車業界が設定した厳格な基準に適合しています。Nexperia の製品はプロセス、サイズ、消費電力、性能の面で効率のベンチマークとして高い評価を得ており、貴重な電力とスペースを節減し業界をリードする小型パッケージで提供されています。Nexperia はアジア、欧州、米国で 12,000 名を超える従業員を雇用しています。

営業拠点

© 2021 Nexperia B.V.

All rights reserved. 事前に書面により著作権者の同意を得た場合を除き、本書の全体または一部を複製することを禁じます。本書に記載された情報は何らかの見積もりまたは契約を形成するものではなく、正確で信頼できるものとするを旨としており、予告なく変更されることがあります。本書を使用した結果に関して、発行者はいかなる責任も負いません。本発行物は、特許またはその他の産業用あるいは知的財産権の下での何らかのライセンスを、譲渡または暗示するものではありません。

nexperia.com

発行日：

2021 年 7 月

