

MOSFET ボディダイオードの逆回復動作と破壊

概要

MOSFET のボディダイオードの逆回復動作と破壊メカニズムについて説明しています。

目次

概要	1
目次	2
1. MOSFET のボディダイオード	3
2. 逆回復	4
3. ボディダイオードの逆回復破壊	5
製品取り扱い上のお願い	8

図目次

図 1 MOSFET のボディダイオード	3
図 2 ボディダイオード 逆回復波形	4
図 3 リカバリ時のキャリア分布およびリカバリ時と静電圧印加時の終端部電界分布の違い	6

1. MOSFET のボディダイオード

MOSのドレイン・ソース間は構造上ボディダイオード（寄生ダイオードとも言う）が存在します。MOSFETは、図1.に示すようにソース電極側の n^+ と p^+ （pベース層と言う）がソース電極で短絡される構造となります。そのためMOSFETのドレイン・ソース間はMOSFET動作部とは別に p ベース層 - n^- ドリフト層 - n^+ 基板でPINダイオードが形成され、これがボディダイオードとなります。

一般的なPINダイオード（ $p^+ - n^- - n^+$ 層からなるダイオード）は下記a～dの4つの状態を持ちます。この状態をMOSFETに置き換えて考えます。

a. 電圧を阻止している状態

⇒MOSFETの順電圧阻止状態、いわゆるオフ状態です。

b. ターンオン状態（順回復（フォワードリカバリ）状態）

⇒ボディダイオードへ電流が流れ始める期間です。

c. 順電流が通電されている状態

⇒MOSFETのソースからドレインへ通電（ボディダイオードの順電流通電）している状態です。

d. ターンオフ状態（逆回復（リバースリカバリ）状態）

⇒ボディダイオードへの順電流通電からMOSFETの順電圧阻止状態へ移行期間です。

MOSFETでは、前記dの状態はオン状態からオフ状態に変わる通常の動作と異なり、直前にボディダイオードの順電流が流れており、ドリフト層（ n^- 層）にキャリア（ホールと電子）が充満された状態になっています。（伝導度変調）

この状態（ボディダイオードにとって順バイアス状態）からMOSFETのドレイン端子にプラス、ソース端子にマイナス電位の電圧を印加すると、その電圧のレベルに応じてボディダイオードは逆バイアスされ逆回復モードに移行します。

MOSFETを単純なスイッチとして使用する場合はドレイン・ソース間が逆バイアスされることはなく、ボディダイオードは動作しませんが、共振型の電源システムやインバータ回路の場合、環流動作あるいは同期整流動作によりボディダイオードに電流が流れるモードが発生します。

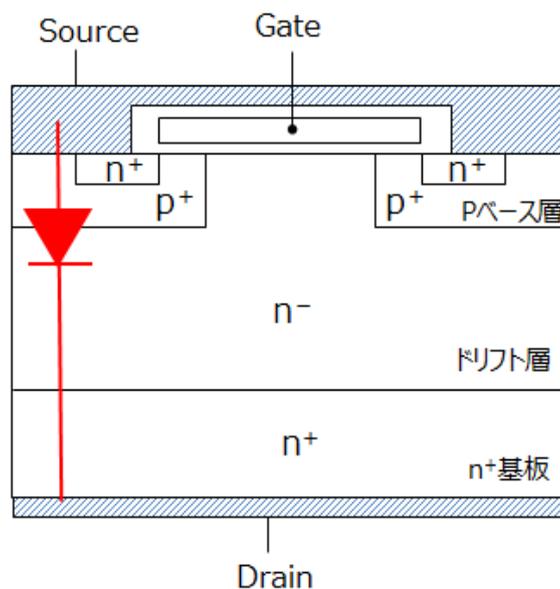


図 1 MOSFET のボディダイオード

2. 逆回復

ダイオードの動作において、大きな損失を発生させるのは、順方向から逆方向バイアスに切り替わるスイッチング動作時で、逆回復と呼ばれています。順方向バイアス状態（電流が流れている状態、ドリフト層中に大量のキャリア（電子とホール）が注入されている状態）から、逆方向バイアスを加えて、電流をゼロとするときに、注入されたキャリアが排出され、逆方向に大きなリカバリ電流が流れます。この電流により大きなリカバリ損失が発生します。順回復においては、キャリアの注入が始まるだけなので、これによる大きな電流は流れず、逆回復に比べて大きな損失にはなりません。図2.にダイオードの逆回復波形を示します。

ボディダイオードに順電流が流れている状態から逆方向へとバイアスが加わり（ドレイン電極がプラス）、電圧阻止状態（注入されたキャリアの排出）になり、逆回復電流が流れるはじめてからゼロとなるまでの過程が逆回復の期間です。一方、順方向バイアスでは、ソースに接続されたpベース層からホールが注入され、ドレインへと流れ、ドレインに接続されたn⁺基板から電子が注入されて、ソースへと流れます。

逆回復の動作過程（図2. ①～④）

①の期間

ボディダイオード極性から見て外部回路条件が逆バイアス印加状態に変化し、順電流 I_F が任意の傾き（ $-di_F/dt$ ）を持って減少していき、少数キャリア（ホール）の注入が止まり、順電流はゼロまで減少します。この状態ではn⁻ドリフト層には多くのキャリアが残っています。なお、 di_F/dt は、外部回路条件（印加電圧、閉回路のリアクタンス、スイッチング素子のターンオン速度）によって決定されボディダイオード特性とは無関係です。

②の期間

外部回路がボディダイオードに対して逆バイアス（ドレイン電極がプラス、ソース電極がマイナス）されており、n⁻ドリフト層に残っているキャリアの内ホールはソース電極へ、電子がドレイン電極へ排出され、ボディダイオードの極性に対し逆方向に電流が流れます。 $-di_F/dt$ が大きい程、排出に向かってキャリアが加速されますので、逆電流のピーク値は増加していきます。この時、n⁻ドリフト層内のキャリアがある程度まで排出しないとドレイン・ソース間（カソード・アノード間）が低インピーダンス状態のためドレイン電圧は上がりません。

③の期間

n⁻ドリフト層内のキャリア排出が進み、あるレベルに達するとドレイン電圧印加が始まります。この時、p⁺ベース層とn⁻ドリフト層の境界に空乏層（注1）が伸びて来ます。ドレイン・ソース間（カソード・アノード間）が高インピーダンス状態になり、逆電圧を保持できるようになります。逆電圧は増加するのに対して、排出するキャリアが減少してきていますので、逆電流も減少していきます。この時の電圧変化 dv/dt は空乏層容量 C_{ds} に反比例します。

④の期間

空乏層が伸びきった後に、セル部や終端部に残留したキャリアが排出される間、電流が流れます。順電流が大きい、つまり、強い注入状態でないと観測されないこともあります。

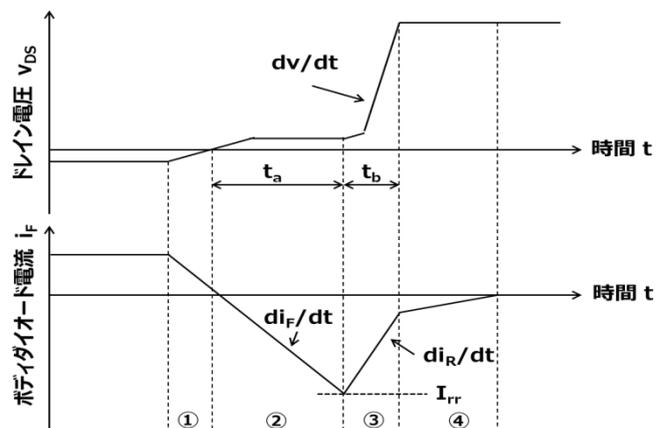


図 2 ボディダイオード 逆回復波形

状態②から③へと切り変わる時点で電流がピークとなり、このピーク電流が逆回復電流 I_{rr} です。状態②の時間 t_a と状態③の時間 T_b の比 (t_b/t_a) で逆回復時のソフトネス度合を示します。 t_b/t_a が大きいほど、ソフトリカバリであり、状態③における di_R/dt 、 dv/dt が小さくなり、リカバリノイズが小さくなります。 I_{rr} とソフトリカバリ度合 (t_b/t_a) は、状態①と②の電流変化 di_F/dt によって変化します。

状態②から④の期間の電流を積分したものが、排出されるドリフト層内のチャージ電荷量に相当し、逆回復電荷量 Q_{rr} と呼ばれています。

3. ボディダイオードの逆回復破壊

逆回復動作では、瞬間的に高電圧を印加された状態（高電界な状態）で高キャリア濃度状態となっています。このような状態では、大きなアバランシェ電流^(注2)が流れているのと同様に、キャリアの偏在により損失が集中する箇所が発生すると、破壊が起こることがあります。その破壊のメカニズムについて説明します。

ドリフト層内に存在するキャリア濃度が高いほど、電荷注入量も多くなって、電界が変化します。前述しておりますが、 di_F/dt が大きいほど排出される電荷は加速され逆回復時間が短くなります。場所によりキャリアの移動距離と排出のしやすさが違い、時間が短くなることで場所によっては排出しきれずに残留するキャリアも増えてきます。この残留キャリアが、排出される部分に電界が集中して破壊を起こします。よって、 di_F/dt が大きいほど破壊し易くなります。

逆回復破壊に至る過程

通常、電流がある程度まで減少した後、高電圧が印加されるようになった瞬間（図2. における状態③-④）に破壊が起こります。このような状態では、セル部のキャリアはほとんど無くなり、終端部にはキャリアが残留しています。終端部に残留したホールは全てセル外周に形成された終端部の p ベース端に集まり、終端部の p ベース端のみからソースへ排出されます。

この集まったホールによって電界分布が変化し（臨界電界強度を超え）、局所的なアバランシェ降伏^(注2)が起こって、素子を破壊します。この場合、壊痕は終端部に見られます。

静電圧印加時には、ドーピング^(注3)された分だけのキャリアしか存在せず、終端部直下のドリフト層の電荷量は少ないので（ドナーイオンのプラスチャージのみ）、このため横方向に空乏層が伸びることで、pベース端の電界は小さくなります。（空乏層は濃度が低いn層に伸び、印加された電圧は全て空乏層で保持されるため、静電圧印加時はセル直下のp層も終端のp層も同一電界となります。）

しかし、逆回復時にはpベース端に集まったホールのプラス電荷が多く存在することになり、終端部ドリフト層の不純物濃度が高くなったのと同様に空乏層が伸び難くなります（図3.(b)参照）。このため、pベース端の電界が大きくなります。（ $E=V/d$ E:電界 V:印加電圧 d:空乏層距離）電界が臨界電界に達すると、静耐圧よりも低い印加電圧であってもアバランシェ降伏が起こります。アバランシェ降伏により電流が大きくなると、負性抵抗が発生し、電流集中が起きて破壊に至ります。

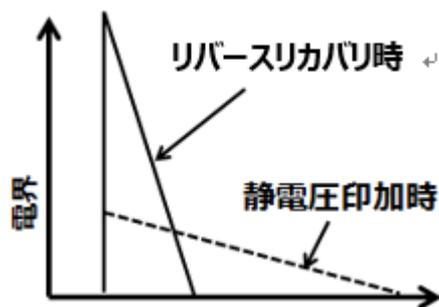
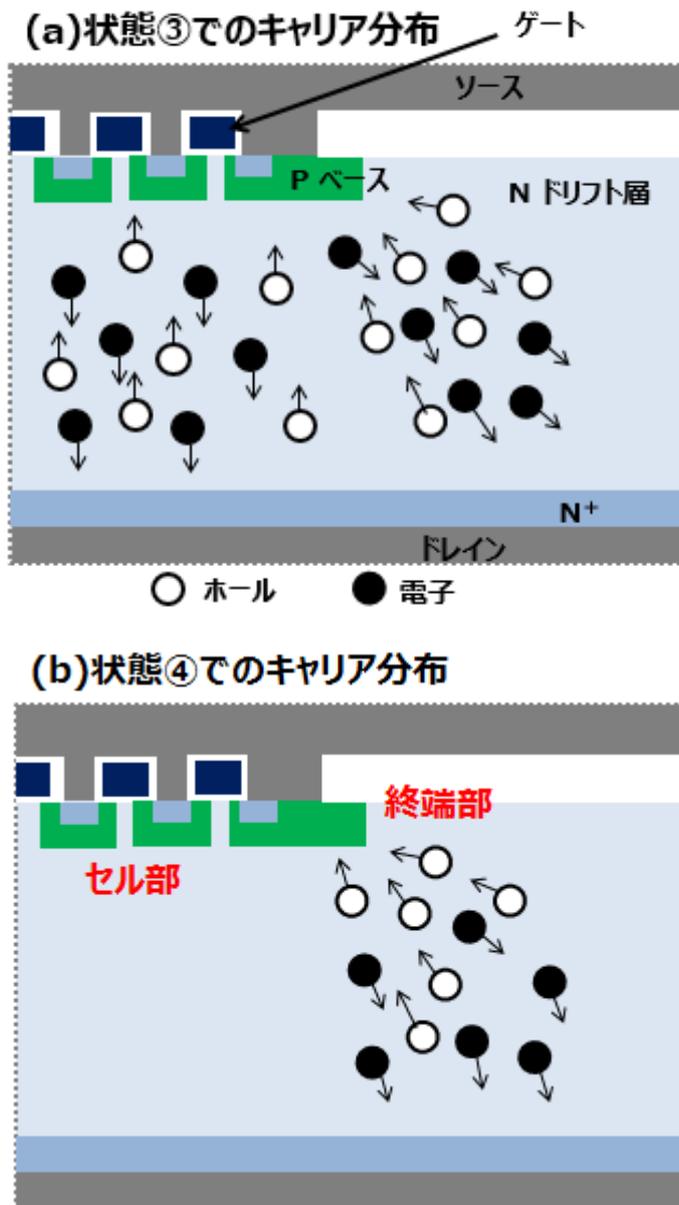


図 3 リカバリ時のキャリア分布およびリカバリ時と静電圧印加時の終端部電界分布の違い

注 1: 空乏層

電子や正孔（ホール）がほとんど存在しない領域

注 2: アバランシェ降伏

空乏層中にはわずかなキャリア（電子）が移動しています。この移動している電子が電界によって加速され、大きな運動エネルギーを持ちます。この電子が、結晶格子を構成している原子に衝突して原子内の価電子を励起して電子・ホール対を生成します。生成された自由電子もまた加速して同じように原子から電子を引き離すため、自由電子がどんどん増加していきます。

このことをアバランシェ降伏と呼び、そのときの電流をアバランシェ電流、電界を臨界電界と呼んでいる。

またアバランシェ降伏の起こる電圧が耐圧であり、耐圧の大きさは、そのときの電界分布で決まります。このため、耐圧を決めているパラメータは、電界の最大値である臨界電界、電界の傾きを決めている不純物濃度、それに伴って決まる空乏層の厚さ（ドリフト層厚）となります。

注 3: ドーピング

デバイスに所定の不純物を添加すること

注 4: ドナー

半導体に電子を与える不純物で、このドナーを含む半導体がn型半導体、逆に正孔（ホール）を与える不純物のことをアクセプタと呼び、このアクセプタを含む半導体がp型半導体

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。