小信号 MOSFET における ESD による故障の防止

本書について

適用範囲と目的

このアプリケーションノートでは、小信号 MOSFET の最も一般的に受け入れられている ESD 規格とテスト, ESD による故障, および基本的な ESD 保護について説明します。

目次

本書について 1
目次 2
1 半導体デバイスにおける ESD 3
2 ESD 規格と試験 4
3 MOSFET の ESD 不良 6
3.1 ジャンクション損傷 6
3.2 ゲート酸化膜の損傷 6
3.3 メタライゼーション バーンアウト 6
4 ESD 保護 7
改訂履歴 8
免責事項 9

1 半導体デバイスにおける ESD

ダウンスケーリングは、ドーピングレベルの増加とともに、半導体デバイスのゲート酸化膜の厚さと pn 接合の幅を劇的に減少させます。これは、回路の密度が高いことと相まって、デバイスの ESD に対する感受性を高めます。

その後の電子機器の故障は、ハード障害, 潜在的損傷, または一時的な誤動作として識別できます。ハード障害は見つけやすく、一般的には故障したデバイスを交換する必要があります。機器の一時的な誤動作や潜在的な故障につながる故障は非常に一般的であり、現場で検出または追跡することは非常に困難です。

ESD 保護が優れていても、ESD ストライクは、保護を回避してチップに注入する方法を簡単に見つけることができるため、デバイスの信頼性に永続的な打撃を与えます。

ESD 損傷の最も一般的な原因の 1 つは、人体または帯電した材料から大きな直列抵抗を介して電荷が直接伝達されることです。このように突然の電荷の放出により、高電圧や電流が発生し、不可逆的な変化や破壊につながる可能性があります。

2 ESD 規格と試験

ESD には、デバイス内で発生する 2 つの基本的なメカニズムがあります。最初のメカニズムは、ヒューマンボディモデル (HBM) によってエミュレートされます。このモデルでは、電荷は人体を介してデバイスに伝達されます。2 番目のメカニズムは、Charge Device Model (CDM) によってシミュレートされます。このモデルでは、デバイスは充電され、接地されたボディに放電できます。「モデル」という言葉が使用されていますが、これらは実際には、特定のデバイスの ESD 耐性を判断するための異なるテストです。これらのモデルは製品の認定に使用され、各試験方法の概要を示すための多くの規格が存在します。

HBM は、最も広く受け入れられている ESD 試験です。HBM 試験では、故障モードは通常、接合部の損傷, 金属層の溶融, およびゲート酸化物の損傷で構成されます。これらの故障モードについては次の節で説明します。テスト手順のセットアップを以下の Figure 1 に示します。

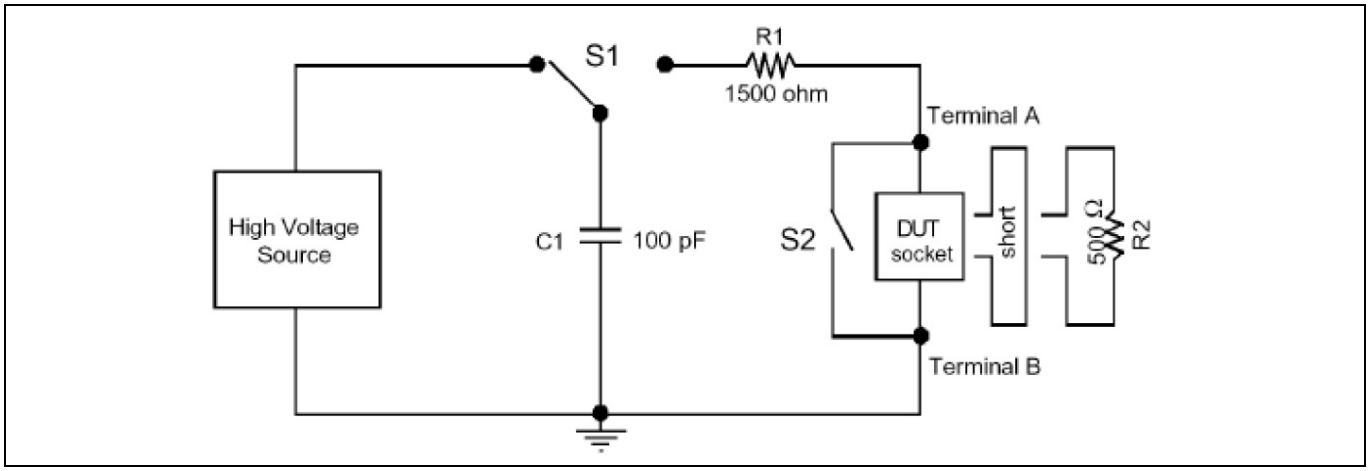

Figure 1 HBM テストのセットアップ

コンデンサ C1 は、最初に ESD 規格に基づいて異なる電圧に充電されます。このコンデンサは、被試験デバイス (DUT) を通じて放電されます。デバイスが耐えられる最高電圧レベルは、ESD 感度の分類に使用されます。この分類を Table 1 に示します。

Table 1 HBM の ESD 感度分類

クラス	説明
0	250V 以下の ESD パルスにさらされた後に故障したデバイス
1A	250V の ESD にさらされた後にパスするが、500V の ESD パルスまでで故障するデバイス
1B	500V の ESD にさらされた後にパスするが、1000V の ESD パルスまでで故障するデバイス
1C	1000V の ESD にさらされた後にパスするが、2000V の ESD パルスまでで故障するデバイス
2	2000V の ESD にさらされた後にパスするが、4000V の ESD パルスまでで故障するデバイス
3A	4000V の ESD にさらされた後にパスするが、8000V の ESD パルスまでで故障するデバイス
3B	8000V の ESD パルスにさらされた後に故障するデバイス

2 ESD 規格と試験

下の図に、HBM テストでコンデンサが放電を開始し、約 500 ナノ秒で 0A に近づくまで電流がランプダウンするときに、初期電流スパイクが発生する一般的なオシロスコープの読み出しを示します。

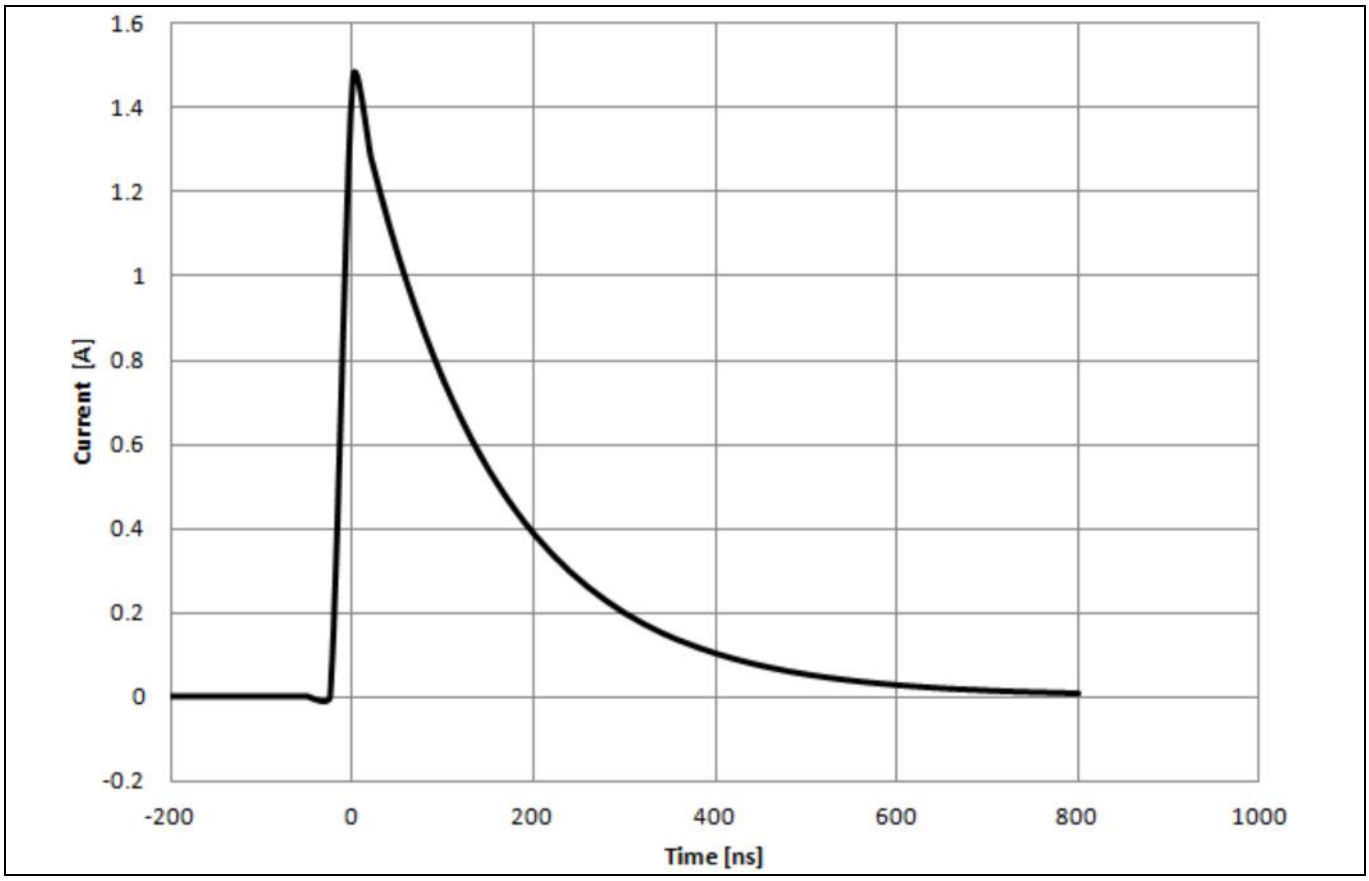

Figure 2　HBM テストでの標準的なオシロスコープの読み出し

3 MOSFET の ESD 不良

MOSFET には、3 つの基本的な ESD による障害、ジャンクション損傷, ゲート酸化膜損傷, およびメタライゼーションバーンアウトがあります。これらの故障は熱的に誘発され、局所的な温度が臨界値 (多くの場合、材料の融点) を超えると損傷が発生することを示します。

3.1 ジャンクション損傷

最も一般的な HBM の障害はジャンクション損傷です。ジャンクション損傷は、ジャンクションを二次破壊に追い込むのに十分なエネルギーと持続時間の ESD 過渡が注入されることによって引き起こされます。ジャンクション損傷は、多くの場合、逆バイアスのリーク電流が大きいか、完全に短絡するという特長があります。

損傷したジャンクションの故障解析により、ジャンクションのバーンアウト故障には、ソフト故障とハード故障の 2 種類が存在することが明らかになりました。ソフト障害は、ゲートエッジに沿った小さなスパイクです。ハード障害とは、深刻な損傷がデバイスのチャネル長全体に広がる場合です。ソフト障害では、接合部のリークがわずかに増加しますが、MOSFET はまだ機能しています。ハード障害が発生しているデバイスは、多くの場合機能せず、非常に高いリークを示します。故障の電気的特長は、多くの場合、ドレイン端子とソース端子の抵抗性短絡です。

3.2 ゲート酸化膜の損傷

ゲート酸化膜損傷は、ESD 損傷の主要なカテゴリです。これは、ゲートが酸化膜を破壊するのに十分な大きさの ESD パルスにさらされたときに発生します。試験では、ゲート酸化物は最大の電界強度を受ける領域で破壊することが示されます。

MOSFET の場合、ゲート酸化膜は非常に薄いため、ESD 感度の程度にばらつきがあります。電圧 (V) が印加されたときのゲート酸化膜の厚さ (t_{ox}) の両端の電界 (E) は、$E = V/t_{ox}$ で与えられます。

t_{ox} が小さい場合、電界 E は比較的小さな電圧の絶縁破壊電界を超える可能性があります。ESD イベントの短い過渡領域では、ゲート酸化膜のブレークダウンを開始するために、ゲートに印加される電圧が非常に大きくなければいけません。

HBM の下での別の非常に一般的なイベントは、ゲート酸化膜に閉じ込められた電荷が蓄積され、MOSFET のしきい値電圧がシフトすることです。このしきい値電圧のシフトは、機能障害を引き起こす可能性があります。

3.3 メタライゼーション バーンアウト

メタライゼーション バーンアウトは、金属配線または接点に存在します。これは、金属を流れる電流が (I^2R 電力損失による) 材料の融点に達するのに十分な温度上昇を強いる場合に発生します。メタライゼーション バーンアウトは、多くの場合、二次的な影響であり、最初のジャンクションまたはゲート酸化膜の故障後に発生します。

4 ESD 保護

MOSFET を ESD から保護するための主な目的は、ゲートとソース間の電圧が破壊電圧に達しないようにクランプすることです。

一般的な ESD 保護デバイスは、ESD ストライクの発生時に電圧を低い値にクランプして、MOSFET のゲートで見られる電圧を最小限に抑えます。保護デバイスは、電流をグランドにシャントし、保護されたゲートから遠ざけます。この期間中、ゲートで見られるクランプ電圧と残留電流は、保護デバイスのブレークダウン電圧と動的抵抗に依存します。ESD ストライクが完全に消散すると、ESD 保護デバイスはハイインピーダンス状態に戻ろうとします。現在、ESD 保護デバイスにはいくつかの種類がありますが、最も一般的に使用されているのは TVS とツェナーダイオード (これもインフィニオンから入手可能) です。

ただし、最も重要な防御線は、デバイスの組み立て時です。導電性の梱包材や箱は、電荷の蓄積を防ぐだけでなく、外部の電界からのシールドも提供するため、輸送や保管に適しています。

したがって、完全な静電気保護の基本概念は、静電荷の蓄積を防ぎ、既存の電荷を除去して、デバイスを ESD による障害から保護することです。

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
2.0	2025-04-23	本版は英語版 AN2013-04 Preventing ESD Induced Failures in Small Signal MOSFETs V2.0 について、インフィニオン DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2025-04-23
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2025 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN2023-04_JA

重要事項
本手引書に記載された本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用の前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

警告事項
技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。
インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。