

Application Note

ツェナー ダイオードの概要



Mengesha Tekle, Kartikey Thakar, Kevin Ginunas

概要

エレクトロニクス業界の拡大に伴い、ディスクリート保護設計に対するニーズが高まっています。IC の微細化とシステム電圧の上昇により、ピンが絶対最大定格に近づくにつれて過渡現象や ESD によるリスクが増大します。このような場合にディスクリート ダイオードを使用すると、ハードウェア設計者はこれらの過渡サプレッサを ESD やサージ イベントの発生源の近くに自由に配置し、システムを保護できます。ただし、保護方式を適切に実装するには、さまざまな種類のダイオードと、過渡事象発生時における各種ダイオードの動作を理解しておくことが重要です。このような保護デバイスの最も重要な要素の 1 つがツェナー ダイオードです。

ツェナー ダイオードは、拡充を続ける TI の保護デバイス製品ラインアップに加わった最新製品です。この記事の内容は、ツェナー ダイオードの基本動作、回路保護アプリケーションにおける適切な使用方法、他の保護設計との違いについて理解するのに役立ちます。このドキュメントでは、この市場において TI のツェナー ダイオードがお客様が抱えている主な課題の解決に大きな役割を担っている理由についても説明します。

目次

1 概要.....	2
2 ツェナーの動作と主要なパラメータ.....	3
2.1 動作.....	3
2.2 主要なパラメータ.....	4
3 ツェナー ダイオードの製造プロセス.....	6
3.1 製造.....	6
4 TI のツェナー ダイオードが選ばれる理由.....	8
5 適切な保護ダイオードの選択.....	9
5.1 ツェナー ダイオード.....	9
5.2 ESD ダイオード.....	9
5.3 TVS ダイオード.....	10
6 代表的なアプリケーション.....	11
6.1 ツェナー ダイオード.....	11
6.2 ESD ダイオード.....	14
6.3 TVS ダイオード.....	15
7 まとめ.....	16
8 参考資料.....	16

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

ダイオードを構築する最も簡単な方法の 1 つは、PN 接合を使用することです。単純な PN 接合は、さまざまな種類のダイオードの構成要素であり、それぞれが回路保護のさまざまなアプリケーションに使用されます。この PN 接合から、「アバランシェ」ダイオードまたはツェナー ダイオードが形成されます。同じ構成要素で形成される他の種類のダイオードとして、ESD ダイオード、TVS ダイオード、スイッチング ダイオード、整流器などがあります。保護のためのシステム要件が異なるため、それぞれに最適な用途があります。また、望ましくない過渡事象からの適切な保護のためにシステム内で必要とされる主要な性能パラメータを最適化するため、それぞれの種類のダイオードの中でも製造と構造にバリエーションがあります。たとえば、データラインの保護では容量が小さいことが必須であるため、ダイオードの接合部容量やその他のパラメータを最適化するようにダイオードを構築する必要があります。同様に、TVS ダイオードはツェナー ダイオードと同じ構造を採用していますが、用途によっては大きめの過渡エネルギーを吸収できるように、ダイ面積や他の要素を最適化する場合があります。本書では、主に電源ラインで使用するツェナー ダイオード、すなわち IEC61000-4-5 で定義されている長い過渡や DC 電圧レギュレーションに最適化されたダイオードを取り上げます。以降のセクションでは、このような用途向けのツェナーの製造方法と、TI 独自のツェナーでサポートされている追加用途について説明します。

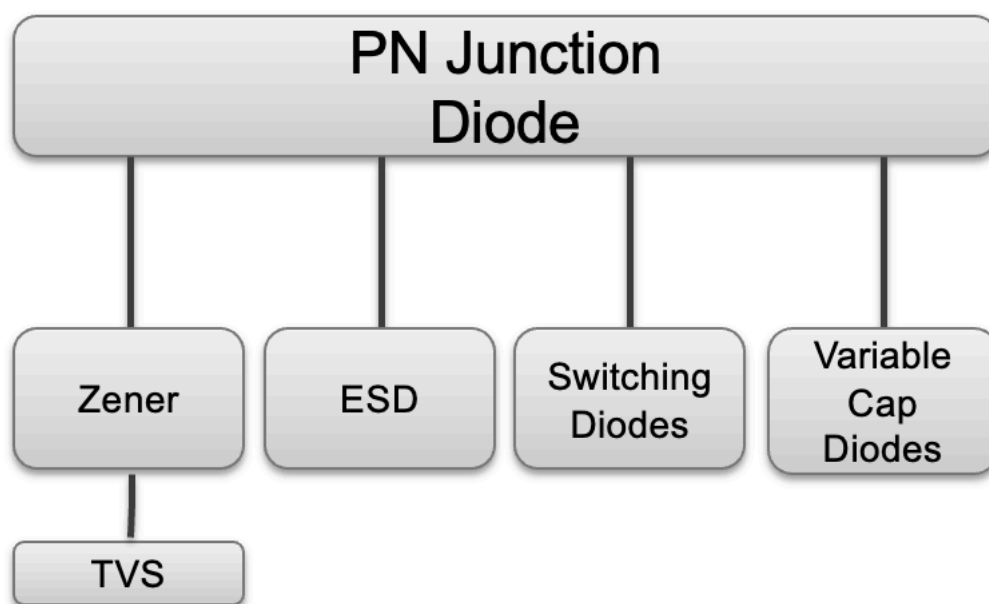


図 1-1. PN 接合のダイオードタイプ

2 ツェナーの動作と主要なパラメータ

2.1 動作

通常動作の場合、PN ダイオードは片方向スイッチのように動作します。PN ダイオードでは、電流が一方 (p から n) に流れ、逆方向 (n から p) には流れません。図 2-1 (i) は、ウェハ製造工程で形成された冶金接合によって、n 領域に多数の電子 (青色) が、p 領域に多数の正孔 (赤色) が存在する様子を示しています。濃度に勾配があるため、図に示すように高濃度領域から低濃度領域に向けて電子と正孔が拡散します。その結果、(ii) の平衡状態 (外部からバイアスを印加しない状態) で冶金接合面近くにあるいわゆる「空乏層」が形成されます。空乏層は、その名の通り p 領域と n 領域の両方で大多数のキャリアが存在しない状態にあり、拡散電流と逆方向に電界が発生します。これにより、電流内に「バリア」が形成されます。

図 2-1 (iii) は、順方向バイアス (n 領域と比較して p 領域が正バイアス) にある状態で、空乏層が縮小 (バリアが減少) し、バイアスが増加すると拡散電流が大きくなることを示しています。この電流は、基本的な物理的メカニズムに従って順方向バイアスが印加されると指数関数的に増加し、ダイオードは「オン」状態になります。逆バイアスでは、空乏層の幅が広くなり拡散電流が小さくなりますが、図 2-1 (iv) に示すように、キャリアが少数であるためにドリフト電流が増加します。ただし、このドリフト電流は、降伏電圧よりも低いバイアスの順方向電流と比較して非常に小さいため、ダイオードは「オフ」状態となります。

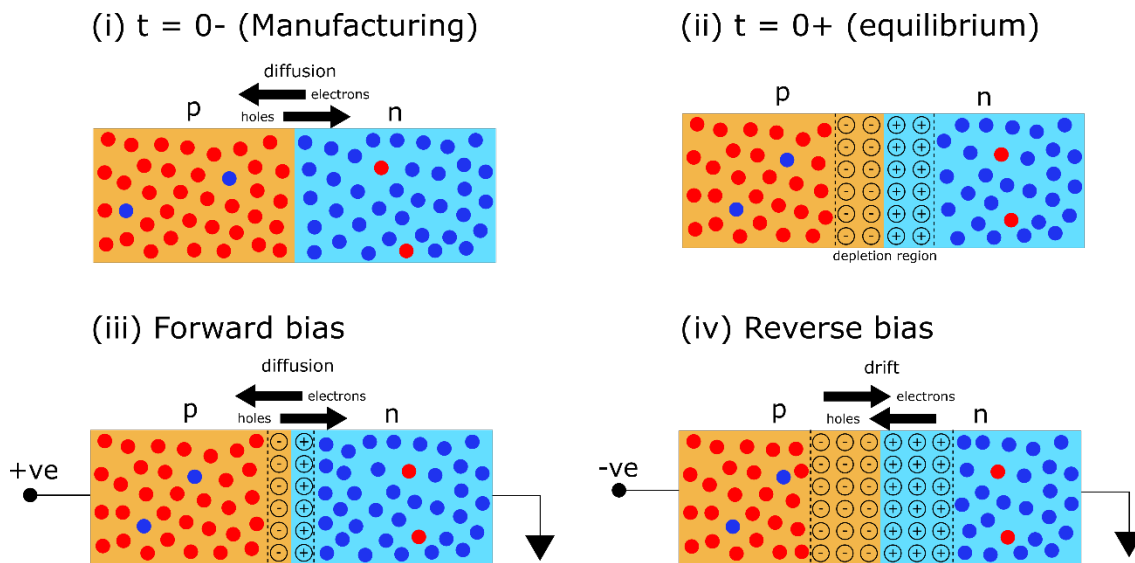


図 2-1. 平衡状態、順バイアス、逆バイアス動作時の PN 接合ダイオードにおけるキャリアの動き

2.1.1 降伏時のデバイス動作

PN ダイオードに降伏電圧 (V_Z) より高い逆バイアスを印加すると、ダイオードに大量の電流が流れることがあります。または、逆バイアス状態でダイオードに固定電流を強制的に印加すると、PN ダイオードは電圧を V_Z まで保持することができますとも言えます。PN ダイオードのこうした動作は、広い範囲の電流に対する固定電圧クランプとして、または回路保護用の粗電圧リファレンスや電圧クランプとして利用できます。図 2-2 に示すように、PN ダイオードの降伏は「アバランシェ降伏」と「ツェナー降伏」という 2 つの主要な物理現象によって発生します。発生する降伏メカニズムがどちらの場合でも、市販されているダイオードは、通称「ツェナー」ダイオードと呼ばれています。

アバランシェ降伏は、空乏層内の高エネルギー電子が衝突してイオン化した結果、発生します。電子が空乏層内に入ると、指数関数的に増加して電子正孔対を生成します。その結果、逆バイアスが V_Z 以上のときには、電流が急激に増加します。ツェナー降伏は、非常に高い接合電場において価電子が p 領域からシリコン バンドギャップを通過して n 領域にトンネリングした結果、発生します。ツェナー降伏は通常、p タイプと n タイプの両方の領域で高濃度にドーピングされた PN ダイオードで発生します。通常、アバランシェ降伏は 6V を超える高い電圧で発生しますが、ツェナー降伏は約 2 ~ 5V の低いバイアスで発生します。どちらの降伏現象も、過剰な電流により PN ダイオードが熱破壊を受けない限り可逆的です。

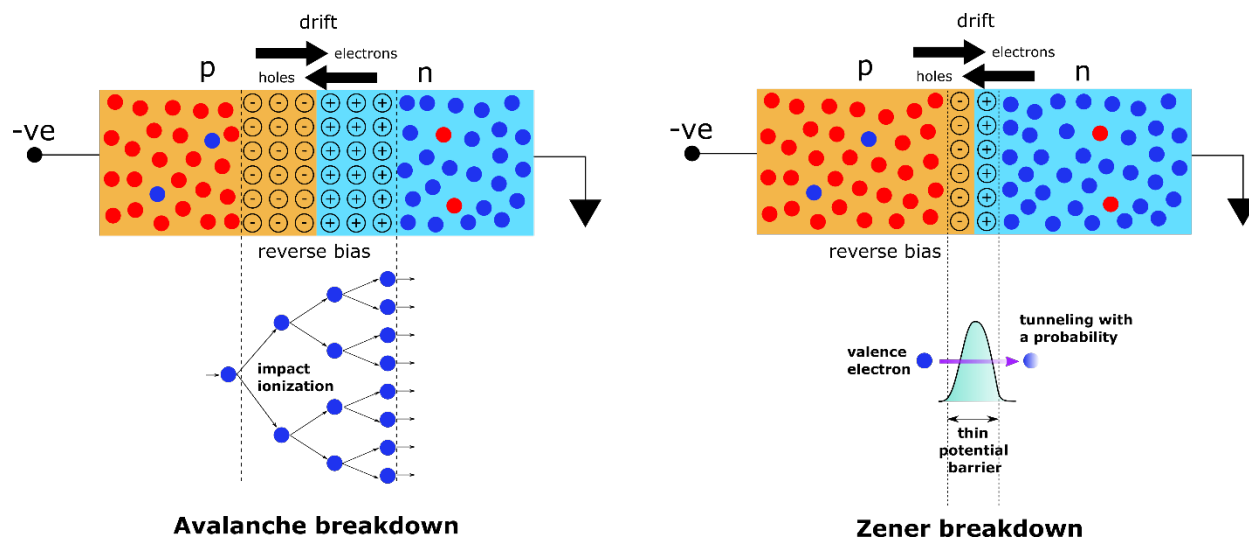


図 2-2. 逆バイアスをかけられた PN ダイオードで発生する 2 種類の主な降伏現象

2.2 主要なパラメータ

これまでに詳しく説明したツェナー ダイオードの動作から得られる一連の特性は、評価対象のパラメータとして定義づけることができます。こうしたパラメータの例として、ツェナー電圧 V_Z 、ツェナー インピーダンス Z_Z 、逆リーケージ I_R 、温度係数 S_Z 、消費電力 P_D 、容量 C_D が挙げられます。

前のセクションで説明したツェナー電圧は、ツェナーが導通を開始して保護されたラインをレギュレートする実効降伏電圧を定義するため、ツェナーを選択する際の最も重要な仕様の 1 つです。このため、 V_Z は特定のツェナー電流または I_Z において安定する値として定義されます。これについての詳細と、低電流時の安定性については、TI 製ツェナー ダイオードの説明で後述します。ツェナー ダイオードは保護されたラインを V_Z で常にクランプすると思われるがちですが、それは誤りです。仮に理想的なツェナー ダイオードであったとしても、ダイオードには、降伏領域の動的インピーダンス Z_Z があり、この値はゼロではないため、レギュレーション電圧レベルが増大するからです。この電圧レベルは式 1 を使用して計算できます。

$$\Delta V = \Delta I \times Z_Z \quad (1)$$

V_Z と同様に、ツェナー インピーダンス Z_Z も同じツェナー電流で規定されています。図 2-3 に示すように、ツェナー インピーダンスは、降伏領域内の I_Z の変動に対する V_Z の変動の比率です。ツェナー インピーダンスが小さいと、ライン電流が大きく変化し、電圧のシフトが比較的小さくなるため、より安定したラインレギュレーションを実現できます。この特性は、ツェナーを DC 電圧レギュレーションに使用する場合に非常に重要な意味を持ちます。

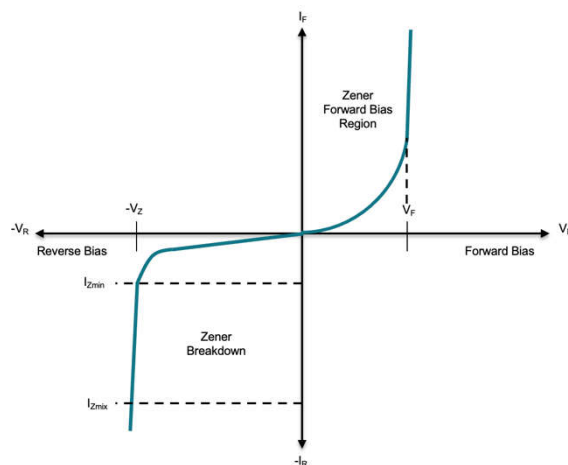


図 2-3. ツェナー I-V 曲線

電力線の保護には使用されるため、逆リーケージ I_R と呼ばれるリーク電流を規定することが非常に重要です。このリーク電流は、ツェナーがオフ (非導通状態) となる、逆電圧または V_R と呼ばれる電圧条件で検証します。このリーク電流の範囲は $nA \sim \mu A$ であり、選択したツェナーの V_Z によって異なります。

もう 1 つの重要なパラメータとして、温度係数 S_Z があります。これは、 $mV/度$ 、 mV/C 、または mV/K で表されます。ツェナー電圧の安定性を示すパラメータの 1 つであり、規定の動作温度範囲全体で把握できるという特徴があります。電子部品が車内 (エンジン ブロック付近) の広範囲な温度や外部の気象条件にさらされる車載アプリケーションなどで、DC 電圧レギュレーションにツェナー ダイオードを使用する場合、温度係数が影響を及ぼすことがあります。

これまでに説明した用途の多くは、DC 電圧レギュレーションに関連しており、これらのシナリオではツェナーが実質的に無制限に導通する必要があります。そのため、ダイオードレギュレーション時にダイオードが消費できる最大電力を把握することが重要です。この電力を合計消費電力 P_D と呼びます。これはツェナーを封止するパッケージによって大きく左右されるため、 P_D は DFN1006 などの小型パッケージから SMA-F などの大型パッケージまでスケールリングするに従って変化します (図 2-4 を参照)。



図 2-4. 小型の 0402 パッケージと大型の SMA-F パッケージの比較

注目すべき最後の仕様項目は静電容量です。多くの電力線アプリケーションでは、ツェナー ダイオードの容量 C_D は重要ではありません。そのため、最大数百 pF の容量を持つツェナー ダイオードが許容されます。ただし、ツェナーはデータライン保護にも使用できるため、選択したデバイスの C_D が重要であり、それがシステムの全体的な容量バジェットやシグナル インテグリティにどのように影響するかを考慮する必要があります。

3 ツェナー ダイオードの製造プロセス

ツェナー ダイオードの動作原理が分かったところで、次はこの独自の動作を実現するための標準的な製造プロセスについて説明します。このセクションでは、PN ダイオードの一般的な製造手順と、通常状態の動作と降伏時の動作について説明します。

3.1 製造

3.1.1 ウェハの製造

PN ダイオードはウェハ内で p 型ドーパントを n 型サブストレートに拡散することにより製造できます。図 3-1 に、n タイプのサブストレート (i) から始まるシンプルなウェハ製造フローを示します。次に、オプションとして、サブストレート (ii) とは異なる抵抗率を持つ n 層の抵抗率を制御するために、n 型層を堆積させることもできます。(iii) に示すように、p 型層はドーパントの直接拡散またはイオン注入によって形成されます。通常、フォトリソグラフィーで p 型領域を選択的に定義するためにはフォトマスクを使用します。最後に、p 型および n 型領域にウェハを形成します。(iv) に示すようにウェハの上下に接点を保持すると縦型 PN ダイオードとなりますが、n+ 領域を介してウェハの上面にある n 型層に接触すると、横型 PN ダイオードになります。一般に、コストとアクティブ面積利用の向上を目的とするディスクリート ダイオード製品では縦型ダイオードを使用します。一方、横型ダイオードは CMOS やアナログ統合設計との配線や相互接続が容易であるという観点から、IC に適しています。p 型および n 型領域、マスクレイアウト、デバイス形状のプロセス パラメータは、安定した降伏電圧、低リークage、低キャパシタンスを実現するように慎重に設計されています。

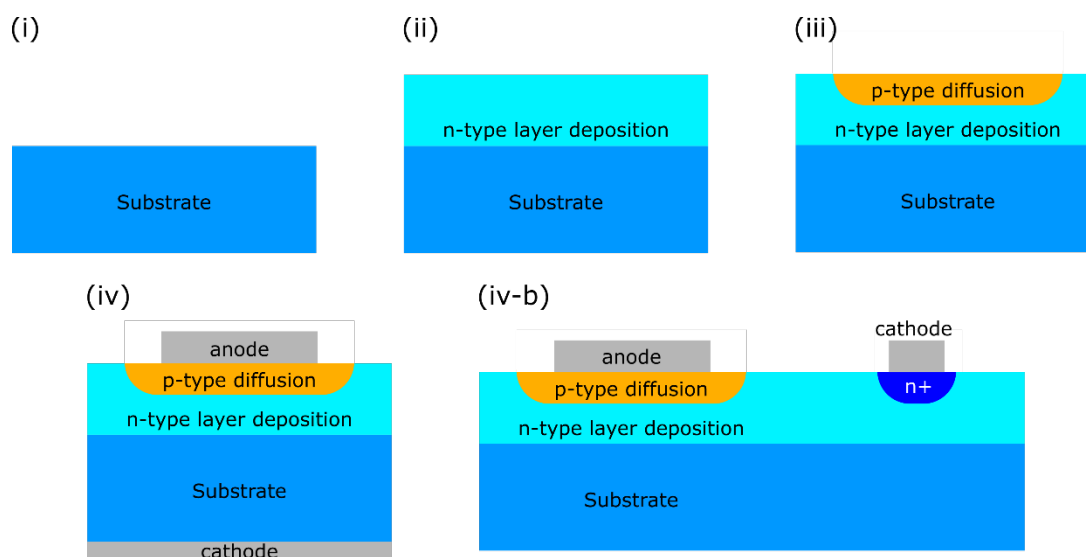


図 3-1. 単純な p-n ダイオード製造フロー

3.1.2 全体的な製造フロー

図 3-2 のフローチャートは、製品におけるエンド ツー エンドの製造工程を示しています。ウェハの製造後、一連の工程でダイがパッケージされます。ダイ マウントおよびパッケージ モールドの寸法と材料の選択が、ダイの性能に影響を与えます。その後、各ユニットは X 線検査と機能的および電氣的試験を経て、データシートの仕様と TI の品質規格に準拠するためのスクリーニングを受けます。テスト後、デバイスはリールで梱包され、出荷されます。通常、初期リリース時およびその後の変更時に、製品が予測寿命まで確実に動作するよう保証するために、一連の信頼性ストレステストを実施します。信頼性の内容と重大度は、製品クラスおよび対象市場（車載グレード 0、商用、産業用機器など）によって異なります。

テキサス インスツルメンツは、ウェハ製造、組み立ておよびパッケージング、物理的および電氣的スクリーニング、信頼性テストなど、社内においてエンド ツー エンドで製造する環境を備えています。TI はお客様の要件を中心に据え、地政学的観点を考慮した製品のマルチソーシングも実現しています。加えて、お客様が永続的に恩恵を享受できるよう、TI は製造業務を定期的に改善し、性能の向上とコストの削減を図っています。

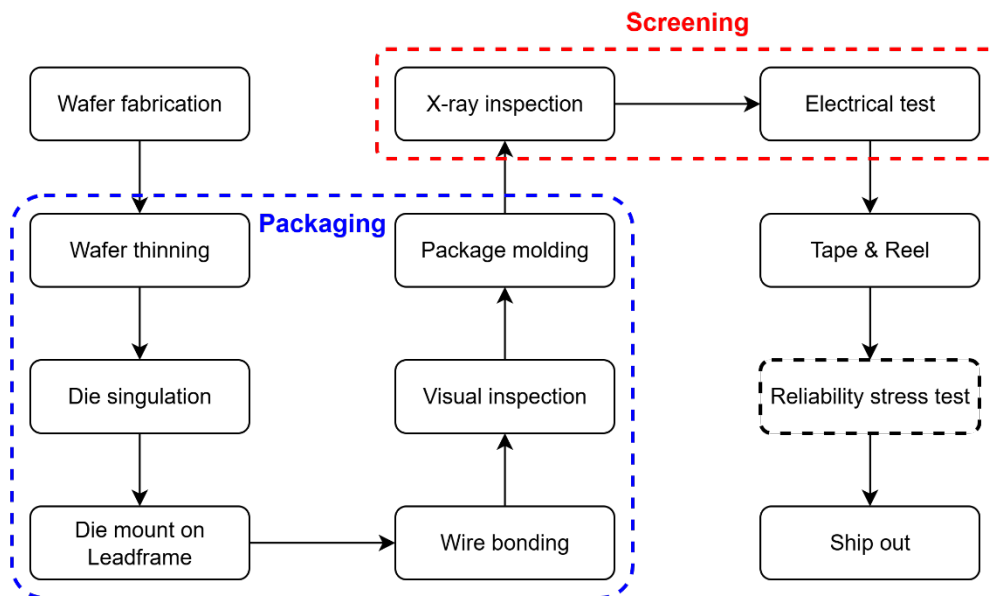


図 3-2. ウェハ プロセスから顧客へのお荷までの全体的な製造フロー

3.1.3 プロセス制御と能力

大量生産におけるプロセス制御は、部品の高い品質を確保し、電氣的仕様を問題なく満たす上で重要な要素です。統計的プロセス制御 (SPC) は、インラインの物理的および電氣的パラメータのセンタリングと分布を追跡し、製造中のエラーや製造機器の誤動作による偏位の発生を監視するために使用されます。PN ダイオードのような単純なデバイスには、ウェハ プロセスの制御を監視し、最終的な製品が高品質規格を満たしているかどうかを検証するために、20 を超えるインラインテストおよび最終工程テストを実施します。各ウェハはリリース前にすべてのテストを通過し、その先の工程に回されます。

同様に、組み立てとテストの際にも、最終製品がすべての仕様を満たしていることを検証するために、複数のプロセス制御と監視の工程を実施します。新しい製品の認定時には、詳細なプロセス制御と能力分析を実施し、物理的および電氣的制御パラメータごとの Cpk (能力指標) が十分高く、製造時の歩留まりが 99% を上回っていることを検証します。ご注文可能な各製品については、TI.com で詳細な品質レポートをご覧になれます。

4 TI のツェナー ダイオードが選ばれる理由

ツェナー ダイオードは特性が限定的ですが、各特性はシステムに影響を与えることがあります。これらの各パラメータについては説明済みですが、以降のセクションでは 3 つのパラメータに注目します。ツェナー市場で TI のツェナーが突出している例として、これらの重要性について説明します。

DC 電圧レギュレーションは、ツェナー ダイオードの非常に代表的な用途であり、すでに説明したように、合計消費電力 P_D は、どのパッケージを選択するかによって変化します。ツェナー P_D を最適化すると、保護されたラインのツェナー電圧を正確にレギュレートしながら、ダイオードを流れるツェナー電流を非常に大きくすることができます。ダイオードの最大消費電力には複数の要因が影響を与えます。パッド レイアウトのサイズもその 1 つで、これはツェナーのヒートシンクになる可能性があります。ただし、ダイオードに内蔵されている場合、放熱性能が P_D に直接関係するのと同様の理由から、適切にリードフレームを設計することが重要です。設計に加えて、リードフレームの材料構成によっても、消費電力性能を強化できます。一般的な SOT-23 パッケージに封止されている TI 製ツェナーは、これらの変数の両方が最適化されており、BZX84Cx シリーズのツェナー製品は業界をリードする消費電力を実現しています。次の表 4-1 に示すように、TI の SOT-23 ツェナーは、類似のパッケージに封止されたツェナーの中でも業界をリードする電力レベルを実現し、SOD123 のような大型パッケージで実現できる P_D レベルも達成しています。詳細な情報や、多様なアプリケーションにおけるシステムを改善する方法については、『[Why Use TI Zener Diodes for High Power Applications \(TI の大電力アプリケーション向けツェナー ダイオードを使用する理由\)](#)』をご覧ください。

表 4-1. ツェナー PD に関する競合他社分析

	TI	A 社	B 社	C 社
P_D	430mW	300mW	250mW	370mW
パッケージ	SOT-23	SOT-23	SOT-23	SOD123
ボディ エリア	3.8mm ²	3.8mm ²	3.8mm ²	4.8mm ²

V_Z のツェナー安定性は、ツェナー ダイオードのすべてのアプリケーションおよび用途で、最終的に最も重要な性能指標となります。このアプリケーション ノートもすでに説明したように、特定のツェナー電流 I_Z で V_Z が定義されており、ほとんどの汎用ツェナー ダイオードでは、安定した V_Z を実現するために必要な電流は mA のレベルです。壁面電源を使用する大半の最終製品では、この電流量を簡単に実現できますが、バッテリー駆動の電子機器には μA レベルの I_Z が適しています。こうした低ツェナー電流条件の場合、汎用ツェナーは不安定になり、ツェナー電圧が大きく変動することがあります。このような条件下では「ツェナー ノイズ」という現象が発生することがあります。これは、ダイオードがアバランシェ降伏に移行して復帰することによって電圧レギュレーションが不安定になる現象です。不安定になる現象の例として、図 4-1 に、競合他社のツェナー ダイオードにおいて、この低い電流負荷の状況で高いリンギングが発生している様子を示します。一方、TI のツェナー ダイオードは、最低 50 μA の I_Z 電流でもこうした不安定性を最小限に抑えるように設計および製造されているため、一般的に多くのバッテリー駆動アプリケーションや電圧レギュレーションに適しています。詳細については[低ノイズ ツェナー](#)のアプリケーション ノートを参照してください。

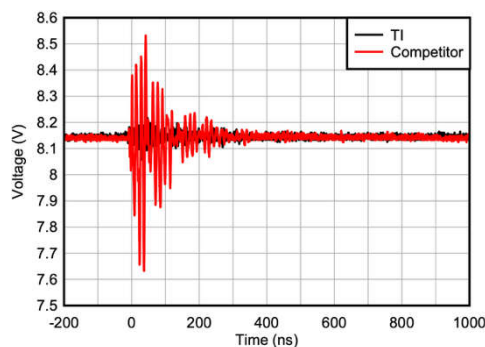


図 4-1. 500 μA の I_Z での TI の BZX84C8V2 と競合製品との比較

設計時には、逆リーク電流 I_R のパラメータにも注意が必要です。本書ですでに説明したように、 I_R はダイオードの静止電流を定義します。この値が大きくなると、不要な電力損失になります。大半の TI のツェナー ダイオードは、 I_R が競合製品の半分であるため、特定のライン電圧における電力損失も半分に正比例して低減されます。この比較を次の表 2 に示します。バッテリー駆動アプリケーションでは、リーク電流を最小限に抑えてバッテリー駆動時間を延長することが常に重要です。

さらに、バッテリーが倉庫内に長期間保管されたままになっている場合は電力損失が増大するため、TI の低リーケージ ダイオードを選択することがさらに重要になります。

表 4-2. 競合製品のツェナー I_R 分析

パラメータ	TI	A 社	B 社	C 社
V_Z	15V	15V	15V	15V
パッケージ	SOT-23	SOT-23	SOT-23	SOT-23
I_R リークエージ	30nA	50nA	50nA	100nA

5 適切な保護ダイオードの選択

これまでのセクションで説明したように、ダイオードには接合、ショットキー、ツェナーなど、さまざまな種類があります。このアプリケーション ノートの目的上、本ドキュメントでは、過剰な電圧および電流を防止するために設計されたダイオード カテゴリ (ツェナー ダイオード、静電放電 (ESD) ダイオード、過渡電圧抑制 (TVS) ダイオード) を主に取り上げ、アプリケーションに適したダイオードを適切に選択する方法を説明します。

5.1 ツェナー ダイオード

ツェナー ダイオードは、順方向バイアス時には接合ダイオードと同様の特性を示しますが、逆電流が流れた時は降伏領域で動作する独自の設計になっています。ツェナー電圧以上の電圧時に逆バイアスが印加された場合、ツェナー ダイオードはパッケージの消費電力定格を越えなければ損傷することなくツェナー電圧を継続的に維持できます。

5.2 ESD ダイオード

ESD とは、2 つの物体が接触したり近づいたりした場合に、1 つの帯電した物体から別の物体に対して電気が瞬時に放電される現象です。ESD ダイオードは、IC を保護するように設計された静電気抑制ダイオードです。ESD ダイオードは、イーサネットや USB などの各種データ インターフェイスを保護するために使用します。また、逆方向に接続します。順方向電圧が印加された通常動作では、ESD ダイオードは非アクティブになり、電流はゼロとなります。ESD ダイオードに逆電圧が発生すると、最小限の (リーク) 電流が消費されます。定格で逆方向の降伏電圧を超える電圧の ESD が発生した場合、ESD ダイオードに低インピーダンスの経路が形成され、電流がグランドに流れます。ESD ダイオードはピーク電圧とピーク電流を制限することで、下流の IC を保護します。ESD イベントの詳細な説明、システム設計上の考慮事項、パラメータ用語については、TI の『[System-Level ESD Protection Guide \(システムレベルの ESD 保護ガイド\)](#)』を参照してください。

接触放電や空中放電など、システム レベル IEC61000-4-2 テスト手法用の保護に使用するダイオードは、一般的に ESD ダイオードと呼ばれます。接触放電法では、試験シミュレータの電極を試験対象デバイス (DUT) と接触させた状態に保ちます。空中放電では、シミュレータの電荷を帯びた電極を DUT に近づけて、DUT にスパークが発生すると放電します。IEC テスト手順の詳細については、『[Design considerations for system-level ESD circuit protection \(システムレベルの ESD 回路保護の設計上の考慮事項\)](#)』を参照してください。』

人体モデル (HBM)、荷電デバイス モデル (CDM)、マシン モデル (MM) などのデバイスレベルのテスト方法と混同しないよう注意してください。デバイスレベルの HBM、CDM、MM テストは、IC が製造プロセスに耐えられることを検証することを目的としており、IEC 61000-4-2 で規定されているシステムレベルのテストは現実世界のエンドユーザーの ESD イベントをシミュレートすることを目的としています。

高速データ転送アプリケーションでは、シグナル インテグリティを維持し、信号の歪みを最小限に抑えるため、ESD ダイオードの静電容量を小さくします。目標 ESD 容量は、インターフェイスの種類 (USB、イーサネット、CAN FD/XL など) によって異なります。詳細は、各種インターフェイスの推奨最大容量に関するエンジニア ツー エンジニア (e2e) フォーラムの次の投稿をご覧ください。(2) [\[FAQ\] システム内のインターフェイスを保護するためには、どのような TI の ESD/TVS ダイオードを使用すればよいですか？ - インターフェイス フォーラム - インターフェイス - TI E2E サポート フォーラム](#)

5.3 TVS ダイオード

TVS ダイオードは、IC を電圧スパイクから保護するために設計された過渡抑制ダイオードであり、電圧クランプ性能の仕様を備えています。TVS ダイオードには、一般にシステムレベルのテスト方法 IEC61000-4-5 雷 (サージ) 仕様が使用されます。サージ イベントは通常、電源システムのスイッチング動作または雷イベントで生成します。

TVS ダイオードには、システムレベルのテスト方法である IEC61000-4-4 の電氣的高速過渡 (EFT) またはバーストを使用することもできます。電源ケーブルまたはデータ ケーブル周辺環境での EFT イベントのために、誘導性または容量性カップリングによってデータ通信が中断されることがあります。TVS ダイオードは多くの場合、信号パスにおける最初のアクティブ部品として過渡現象に直面するため、多くの半導体ベンダは標準的な試験を使用してバースト耐性を試験しています。

一部の TVS ダイオードには、IEC61643-321 のサージテストも適用されています。IEC61000-4-5 サージ耐性テストは、立ち上がり時間 8us、半値幅 20us のパルスを使用して実施されています。一方、IEC61643-321 サージ規格では、10us の立ち上がり時間と 1000us の半値幅を持つ非常に長いパルスに対する IC 耐性をテストします。IEC 61000-4-x テストの詳細については、『[IEC 61000-4-x Tests for TI's Protection Devices \(TI の保護デバイスの IEC 61000-4-x テスト\)](#)』を参照してください。

TI の ESD ダイオードと TVS ダイオードは、産業用と車載用のさまざまな最終製品で静電放電と過渡電圧に関する規格を満たすように堅牢な設計を採用しています。多くのアプリケーションでは、ESD、バースト、サージに関する複数の仕様を満たすための保護ダイオードが必要になります。そのため、多くの TI 製保護ダイオードは、複数の IEC61000-4-x 規格でテストを実施しています。TI 製「ESD」ダイオードの中には、過渡電圧抑制保護機能を搭載しているものもあります。また、TI 製「TVS」ダイオードも ESD 保護機能を搭載している場合があります。正確な電圧および電流定格については、このデバイスのデータシートを参照してください。

6 代表的なアプリケーション

多くの産業用および車載アプリケーションにおいて、CAN バスや USB などの広範なインターフェイス向けに保護ダイオードが必要とされています。保護ダイオードは、MOSFET やトランジスタなどの他のアクティブ部品の保護や、電圧のディスクリーントレギュレーションに使用できます。回路を保護するためにツェナー、ESD、TVS ダイオードのどれを選択するかを決める際は、以下の質問について検討してください。インターフェイスの速度と必要なライン容量は？この回路に過電圧保護が必要か？また、必要なクランプ電圧レベルは？ダイオードの消費電力は？どの程度の IEC ESD レベルとサージレベルが必要か？以下のセクションでは、ツェナー、ESD、TVS 保護ダイオードの一般的な回路例を示します。

6.1 ツェナー ダイオード

ツェナー ダイオードには、電圧スタビライザ (レギュレータ)、AC 電圧信号クリッピング、過電圧保護など、さまざまな用途があります。以下では、電圧レギュレーション、MOSFET ゲート過電圧クランプ、CAN バス過電圧保護について説明します。

6.1.1 電圧レギュレーション

この例では、24V の入力電源から 15V システム レールを生成するための推奨ツェナー ダイオードを選択しています。図 6-1 は、電圧レギュレーションにツェナー ダイオードを使う例を示しています。以下の計算から、ツェナー ダイオード (D) の選択、直列入力抵抗 (R1) のサイズ設定、ツェナー ダイオードの定格を超えないことを確認する際の主な考慮事項が分かります。直列抵抗は、ツェナー電流 I_z をデバイスに制限するために使用しています。

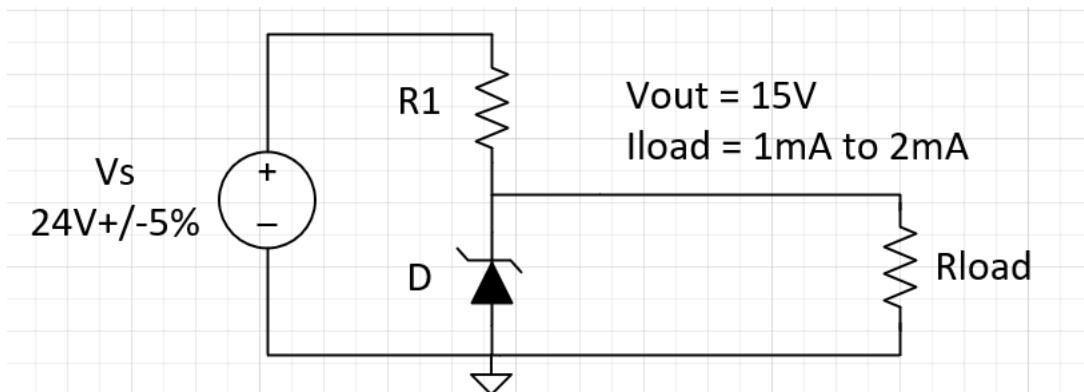


図 6-1. 電圧レギュレーションにおけるツェナーのアプリケーションの例

この例での必要な負荷条件は、最小消費電流 1mA、最大消費電流 2mA の 15V レールです。この回路は、55°C までの周囲温度で使用します。TI の 15V ツェナー ダイオード BZX84WC15V を検討し、この回路の適合性を分析します。BZX84WC15V は、SC70-3 パッケージに封止されており、公称ツェナー電圧が 15V、許容誤差が $\pm 5\%$ 、最大消費電力が 360mW、最大 IO 容量が 80pF、最大リーク電流が 0.03 μ A です。

図 6-2 に示すように、このツェナーは、通常のツェナー電流特性と比べて平坦なツェナー電圧を持っています。公称ツェナー電流 5mA で設計すれば、ツェナー電流の安全動作範囲内に収まります。5mA でのツェナー電圧の公称値は、約 15V と推定できます。

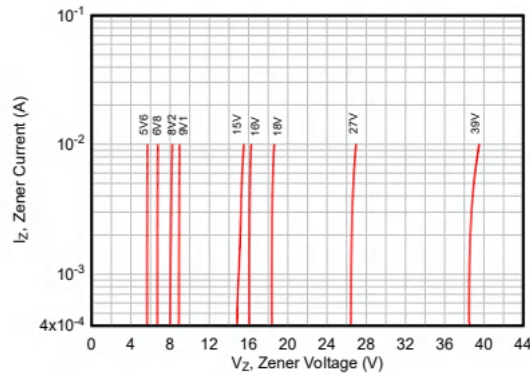


図 6-2. BZX84WC15V におけるツェナー電流とツェナー電圧との関係 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

以下のようにして、公称直列抵抗値 $R1$ を計算します。

$$R1 = \frac{(V_{in,max} - V_{Z,max@25C})}{(I_{Z,typ} + I_{load,max})} = \frac{(22.8V - 15.75V)}{(5mA + 2mA)} \approx 1k\Omega \quad (2)$$

ツェナー内で消費される最大電力を計算するには、式 3 を使用して、回路内に発生が予測される最大ツェナー電流 $I_{Z,max}$ を計算する必要があります。

$$I_{Z,max} = \left(\frac{V_{in,max} - V_{Z,min}}{R1} \right) - I_{load,min} = \left(\frac{25.2V - 14.25V}{1k\Omega} \right) - 1mA \approx 10mA \quad (3)$$

最大ツェナー電圧も、温度によって変化します。公称ツェナー電圧の $\pm 5\%$ 定格は、室温での 25°C 条件にのみ適用されます。BZX84WC15V の場合は $+13\text{mV}/^\circ\text{C}$ の温度係数 (S_Z) を示します。 $V_{Z,max@25C}$ は $15.75V$ です。以下の式 4 と 5 を使用して、 55°C での最大ツェナー電圧の推定値を計算します。

$$V_{Z,max@T_A} = V_{Z,max@25C} + (S_Z \times (T_A - 25C)) \quad (4)$$

$$V_{Z,max@55C} = 15.75V + (13mV/^\circ\text{C} \times (55C - 25C)) \approx 16.14V \quad (5)$$

ツェナー ダイオードの最大消費電力 $P_{Z,max@55C}$ は、式に示すように、 $V_{Z,max@55C}$ に $I_{Z,max}$ を掛けることで計算できます(次の式 6 を参照)。

$$P_{Z,max@55C} = V_{Z,max@55C} \times I_{Z,max} = 16.14V \times 10mA \approx 162mW \quad (6)$$

次に、図 6-3 を使用して、回路における最大ツェナー消費電力が、周囲温度 55°C での BZX84WC15V の消費電力定格を超えていないことを確認します。周囲温度が 55°C の場合、SC70 パッケージの公称 $360mW$ という消費電力は約 75% 低下します。これは、周囲温度 55°C で $270mW$ の電力定格に相当し、今回の $162mW$ という要件を十分上回っています。

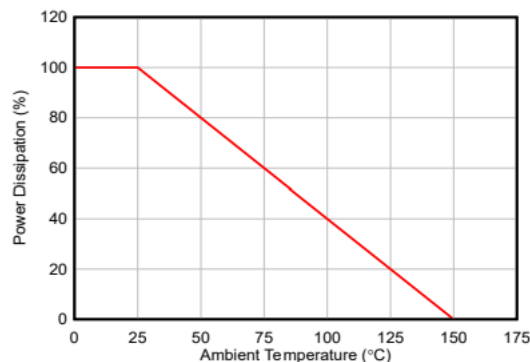


図 6-3. 温度範囲全体における BZX84WC15V の消費電力デレーティング

図 6-4 に最終的な設計値を示します。このアプリケーションには BZX84WC15V を使用することが推奨されます。

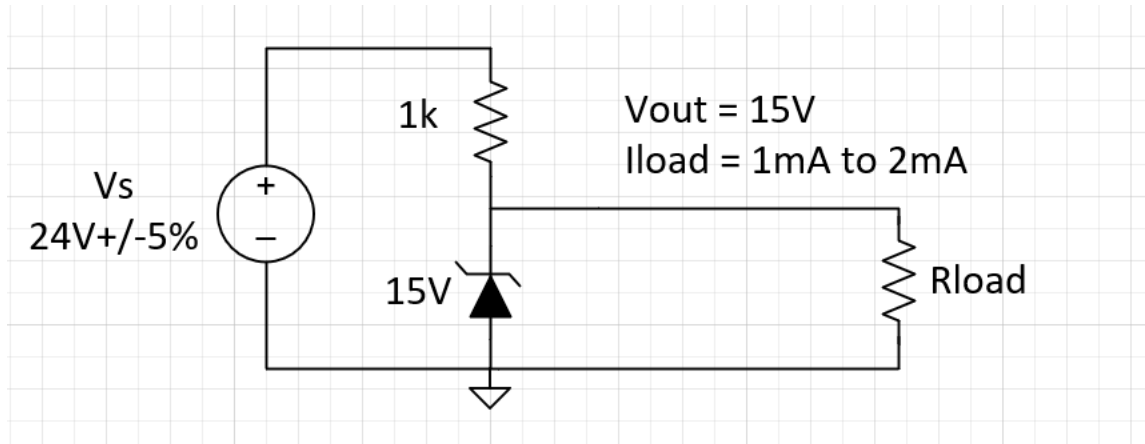


図 6-4. 電圧レギュレーション回路の設計値

6.1.2 MOSFET ゲート過電圧クランプ

この例では、エンハンスメント モード N チャネル MOSFET のゲート - ソース間の最大電圧定格を超過しないように、ツェナー ダイオードを選択します。入力電圧は 12V、最大負荷電流は 1A という条件です。選択した MOSFET Q1 は CSD16401Q5 です。MOSFET のデータシートには、ターンオン用の標準スレッショルド電圧 ($V_{gs, th}$) が 1.5V と記載されています。ゲート - ソース間の電圧の絶対最大定格 (V_{gs}) が 16V と規定されているため、ゲート電圧を 16V 未満に制限する必要があります。十分な設計マージンを確保するため、公称ツェナー電圧 8.2V を選択します。図 6-5 に示すように、選択したツェナー ダイオード D1 は BZX84WC8V2 です。上記の電圧レギュレーション アプリケーションの例と同様に、パッケージの定格を超えないように最大消費電力を計算する必要があります。

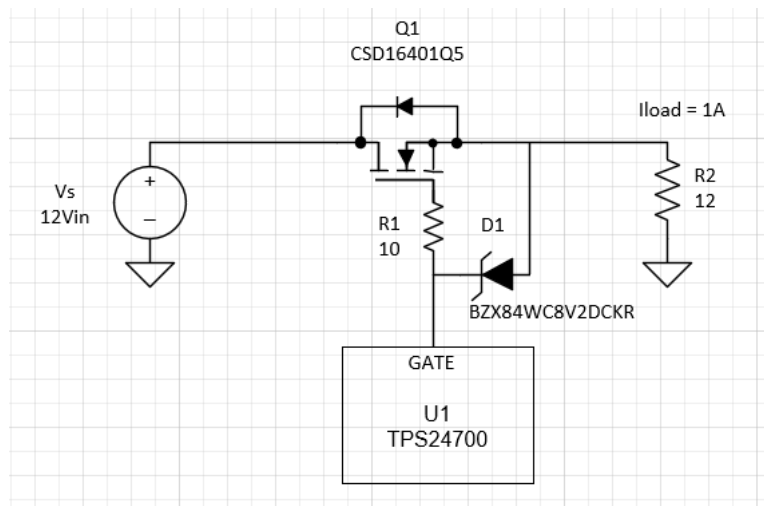


図 6-5. MOSFET ゲート過電圧クランプの最終回路

6.1.3 CAN バス過電圧保護

ツェナー ダイオードは、過電圧イベントからデータラインを保護する用途にも使用できます。CAN (Controller Area Network) バスには、CANH および CANL の 2 つのデータラインがあります。リセッブ状態では、両方のラインが約 2.5V にバイアスされます。ドミナント状態では、CANH が 1V 増加して約 3.5V になり、CANL が 1V 低下して約 1.5V になります。そのため、2 つのデータライン間に約 2V の差動信号が生成されます。ISO 11898 規格では -2V ~ 7V の CAN データライン バス電圧を規定していますが、一般的な CAN トランシーバはそれよりもはるかに広い同相電圧を定格とします。たとえば、TI の CAN 信号改善機能 (SIC) トランシーバである TCAN1462-Q1 は最大データレート 8Mbps の定格で、CANH および CANL ピンは $\pm 58V$ の絶対最大電圧定格です。この例では、電圧が 58V を下回っていることを確認するため、ツェナー ダイオードを探します。CAN-SIC の場合、推奨最大バス容量は 6pF 未満です。

選択したツェナー ダイオードは MMBZ30VCL-Q1 です。SOT23 パッケージに封止されており、動作電圧が 30V、最大降伏電圧が 34.8V、接触 ESD が 30kV です。MMBZ30VCL-Q1 は、両方の内部ダイオードの両端で 4.5pF (代表値) の容量を持っています。各ラインの定格容量は、双方向構成で接続した場合、 $4.5pF / 2 = 2.25pF$ です。図 6-6 に、代表的な回路の実装を示します。

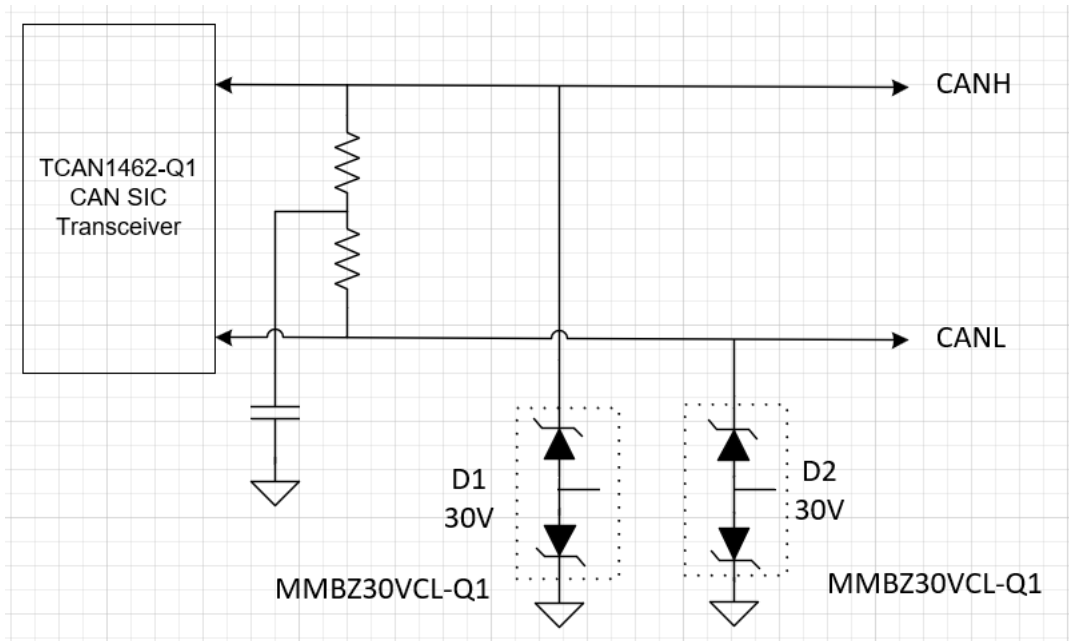


図 6-6. CAN SIC の代表的なアプリケーション回路

6.2 ESD ダイオード

ESD ダイオードの一般的な用途は高速データ インターフェイスです。高速データ インターフェイスでは、データビットの破損を防止するために、低ライン容量が必要とされます。たとえば、2000 年にリリースされた USB High Speed (USB 2.0) は、最大速度 480Mbps を規定しています。データライン (D+/D-) は双方向であり、High にすると約 3.3V で動作するため、動作電圧 3.6V の ESD ダイオードが推奨されます。シグナル インテグリティの問題を回避するため、ESD ダイオードのライン容量は最大 4pF 未満に維持する必要があります。ESD441 は、1pF (代表値) のライン容量を持つ 1 チャネル単方向 ESD ダイオードです。本デバイスは $\pm 30kV$ の空間距離放電 ESD、 $\pm 30kV$ 接触放電 ESD、6.2A サージ定格を備えています。ESD441 は、USB 2.0 アプリケーションに最適です。図 6-7 に、代表的な回路の実装を示します。

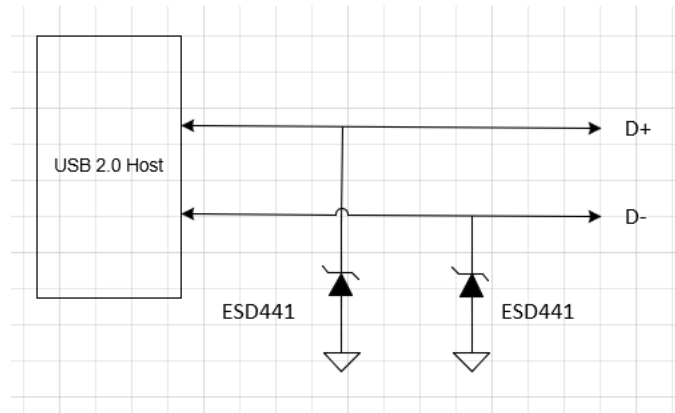


図 6-7. USB 2.0 の代表的なアプリケーション回路

6.3 TVS ダイオード

TVS ダイオードは一般的に、過電圧クランプが必要で、かつ大きめの電力サージ イベントからシステムを保護する必要がある場合に使用します。このため、TVS ダイオードは通常、ツェナー ダイオードや ESD ダイオードよりも電力定格が高くなります。最近の USB パワー デリバリティ (USB PD) 規格は、100W を上回る電力定格を達成しています。USB PD 3.1 仕様に従った USB Type-C コネクタは、現在では拡張電力範囲 (EPR) と呼ばれている最大 240W (48V、5A) を供給できるようになりました。従来の USB PD 仕様は、20V のバス電圧に制限されていました。一方、USB PD 3.1 EPR は最大 48V の電圧レベルをサポートしています。この場合、電圧定格と電力定格の両方で、高い定格の TVS ダイオードが必要です。TVS5200 は、小型の DFN パッケージで、52V の動作電圧、58.8V のクランプ電圧、20A のサージ定格、 $\pm 15\text{kV}$ のエアギャップ放電 ESD レーティングを備えた 1 チャンネル TVS ダイオードです。TVS5200 は、USB PD 3.1 EPR アプリケーションに適しています。図 6-8 に、代表的な回路の実装を示します。

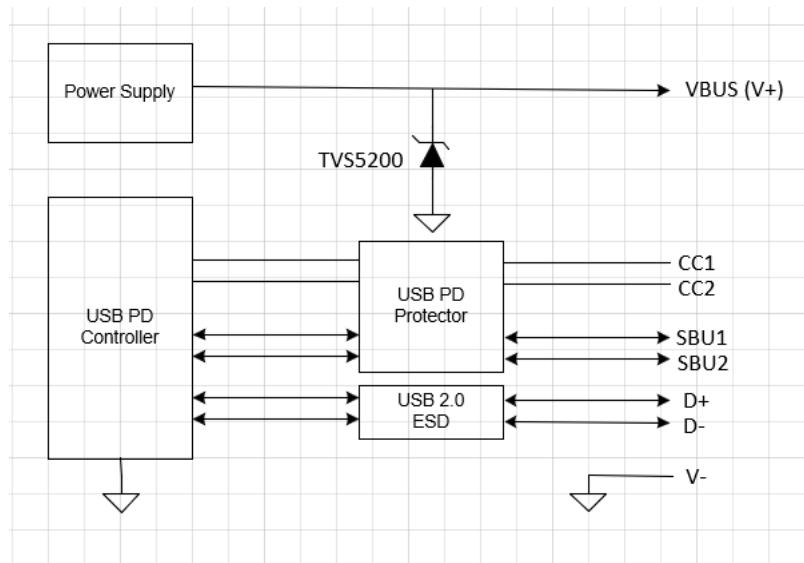


図 6-8. USB EPR の代表的なアプリケーション回路

7 まとめ

ツェナー ダイオードは、ほとんどのシステム保護方式において重要な役割を担っています。このドキュメントで説明したように、他の種類のダイオードと比較して独自の構造を持つため、定電流条件での電圧レギュレーションに最適です。ツェナー ダイオードでは、負荷電流や温度などのさまざまな条件における V_z の安定性が非常に重要です。TI のツェナー 製品ラインアップは、このような仕様が優れた性能を発揮することで実績があり、電子業界で必要とされる広範なアプリケーションで非常に有用です。TI には、充実した ESD と TVS (過渡電圧サプレッサ) 製品ラインアップに加えてツェナー 製品も用意されているため、お客様は多様な保護オプションを選択できます。これらの設計を参照するには、TI.com にアクセスするか、フィールド アプリケーション エンジニアにお問い合わせください。

8 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[BZX84Cx Zener Voltage Regulator Diodes in SOT-23 \(SOT-23 に封止された BZX84Cx ツェナー電圧レギュレータ ダイオード\)](#)』、データシート。
2. テキサス インスツルメンツ、『[Why Use TI Zener Diodes for High Power Applications \(大電力アプリケーションに TI ツェナー ダイオードを選ぶ理由\)](#)』。
3. テキサス インスツルメンツ、『[Low-Noise Zeners \(低ノイズ ツェナー\)](#)』、アプリケーション ブリーフ。
4. テキサス インスツルメンツ、『[System-Level ESD Protection Guide \(システム レベル ESD 保護ガイド\)](#)』、アプリケーション ノート。
5. テキサス インスツルメンツ、『[Design considerations for system-level ESD circuit protection \(システムレベル ESD 回路保護の設計上の考慮事項\)](#)』、アナログ アプリケーション ジャーナル。
6. テキサス インスツルメンツ、『[What TI ESD/TVS diode should I use to protect interfaces in my system? \(システム内のインターフェイスを保護するために、どの TI 製 ESD/TVS ダイオードを使用すべきですか?\)](#)』、FAQ。
7. テキサス インスツルメンツ、『[IEC 61000-4-x Tests for TI's Protection Devices \(TI の保護デバイスに対する IEC 61000-4-x テスト\)](#)』、アプリケーション ノート。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月