

ダイオードの基礎 (ダイオードの種類とその概要)

概要

ダイオードは、あらゆる機器の整流、逆流防止および回路保護など、さまざまな用途に使用されます。また、ダイオードの種類でも、Si (シリコン) の pn 接合ダイオードに加え、ショットキーバリアダイオード (SBD)、TVS (ESD 保護ダイオード)、ツェナーダイオードなどがあり、さらに最新の化合物半導体である SiC SBD もラインアップされています。

本資料では、これらダイオードの種類と概要について説明をしています。

目次

概要	1
目次	2
1. ダイオードの種類	5
1.1. ダイオードの用途や特性による分類	5
2. 各種ダイオードの概要	6
2.1. pn 接合ダイオード	6
2.1.1. pn 接合とは	6
2.1.2. 無バイアス状態の pn 接合	7
2.1.3. 順バイアス状態の pn 接合	8
2.1.4. 逆バイアス状態の pn 接合	9
2.1.5. pn 接合ダイオードの特性	9
2.1.6. pin ダイオード	11
2.2. ショットキーバリアダイオード	13
2.2.1. ショットキー接合	13
2.2.2. JBS 構造	16
2.3. SiC ショットキーバリアダイオード	18
2.3.1. SiC とは	18
2.3.2. 改良形 JBS 構造 SBD	19
2.4. ツェナーダイオード	21
2.4.1. ツェナー降伏とアバランシエ (雪崩) 降伏	21
2.4.2. ツェナーダイオードの順方向特性	22
2.4.3. ツェナーダイオードの逆方向特性	23
製品取り扱い上のお願い	25

目次

図 1.1	ダイオードの種類による分類	5
図 1.2	ダイオードの内部接続による分類	6
図 2.1	真性半導体のフェルミ準位	6
図 2.2	p 形半導体のフェルミ準位	6
図 2.3	n 形半導体のフェルミ準位	6
図 2.4	p 形半導体と n 形半導体の	7
図 2.5	p 形半導体と n 形半導体の	7
図 2.6	pn 接合のバンド図	7
図 2.7	pn 接合が無バイアス状態時のバンド図	8
図 2.8	pn 接合に順バイアスを印加したときのバンド図	8
図 2.9	pn 接合に逆バイアスを印加したときのバンド図	9
図 2.10	pn 接合ダイオードの電流 - 電圧特性イメージ図	10
図 2.11	pn 接合ダイオードの逆電流 - 周囲温度特性例	11
図 2.12	pin 形ダイオードの構造イメージ図	11
図 2.13	pin ダイオードによる高耐圧化	12
図 2.14	伝導度変調時の n 層の不純物濃度の変化 (イメージ図)	12
図 2.15	ショットキーバリアダイオードの構造例	13
図 2.16	金属のバンド図	13
図 2.17	n 形半導体のバンド図	13
図 2.18	ショットキー接合が無バイアス状態のバンド図	14
図 2.19	ショットキー接合に順バイアスを印加したときのバンド図	15
図 2.20	ショットキー接合に逆バイアスを印加したときのバンド図	16
図 2.21	JBS 構造イメージ図	17
図 2.22	ショットキー接合に逆バイアスを印加	17
図 2.23	ショットキー接合に印加した逆バイアス	17
図 2.24	通常の SBD と JBS 構造の SBD の逆電流特性イメージ図	17
図 2.25	Si のバンドギャップ	18
図 2.26	SiC のバンドギャップ	18
図 2.27	Si SBD と SiC SBD の電界の広がりイメージ図	19
図 2.28	全波整流時のコンデンサへの充電電流波形例	19

図 2.29 改良形 JBS 構造 SBD 断面イメージ図	20
図 2.30 通常の SBD、pn 接合ダイオードおよび改良形 JBS 構造 SBD の	20
図 2.31 ツェナー降伏	21
図 2.32 アバランシ降伏	22
図 2.33 ツェナー電圧による温度係数特性例	22
図 2.34 ツェナー電圧毎の I_Z - V_Z 特性例	23

表目次

表 2-1 代表的な半導体材料の物性値	18
---------------------------	----

1. ダイオードの種類

1.1. ダイオードの用途や特性による分類

ダイオードは種々の用途に応じて製品が開発されており、大きく2つに分類されます。1つはp形半導体とn形半導体を接合したpn接合ダイオードで、もう1つはn形半導体、または、p形半導体と金属を接合した金属-半導体ダイオード(ショットキーバリアダイオード:SBD)です。これらのダイオードは用途や特性によって図1.1のように大別することができます。



*1 : HED (High Efficiency Diode) 高効率ダイオード
LLD (Low Loss Diode) と呼ばれることもあります。
*2 : ESD保護ダイオードと呼ばれることもあります。

図 1.1 ダイオードの種類による分類

また、内部接続では図 1.2 のように分類されます。

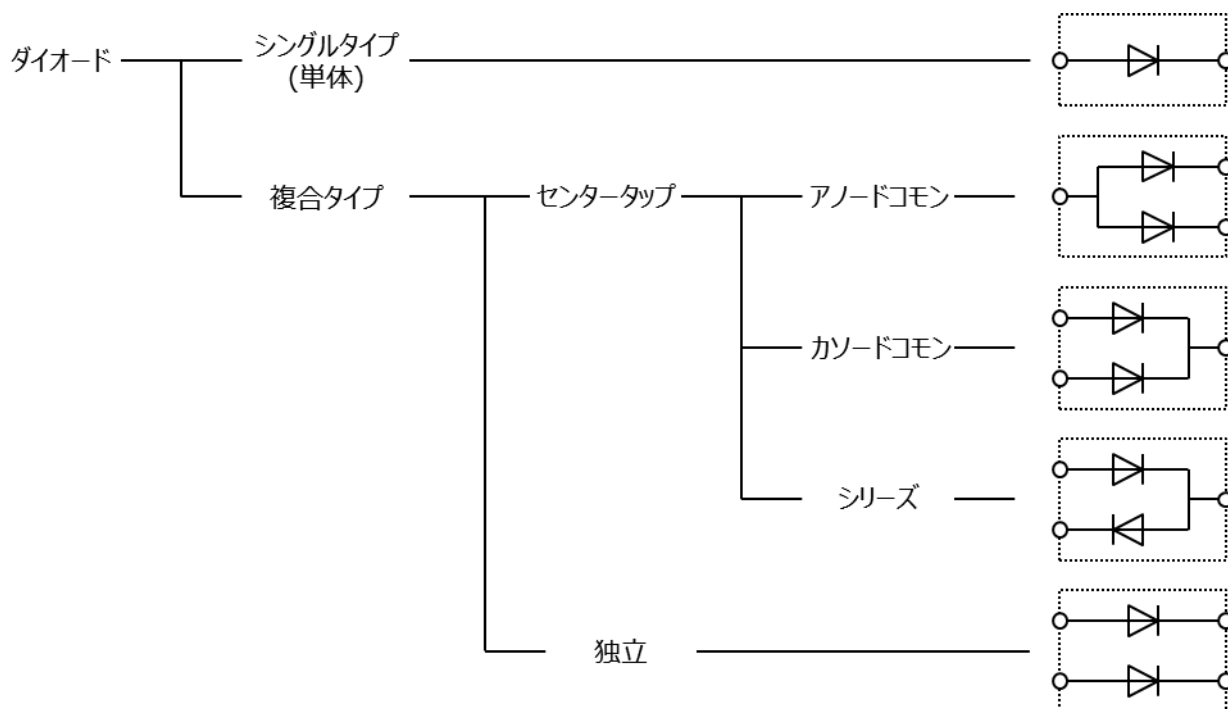


図 1.2 ダイオードの内部接続による分類

2. 各種ダイオードの概要

2.1. pn 接合ダイオード

2.1.1. pn 接合とは

pn 接合とは結晶格子配列が保たれた状態で p 形半導体と n 形半導体が接触していることです。p 形半導体と n 形半導体のフェルミ準位は高さが異なります。フェルミ準位は p 形領域では価電子帯の最も高いエネルギー上端の近くに、n 形領域では伝導帯の最も低いエネルギーの下端の近くに存在しています。

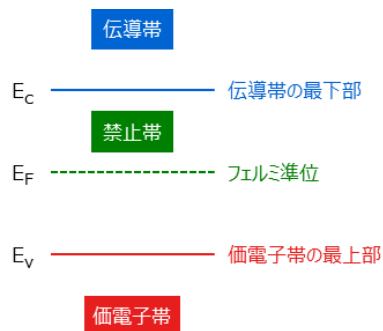


図 2.1 真性半導体のフェルミ準位

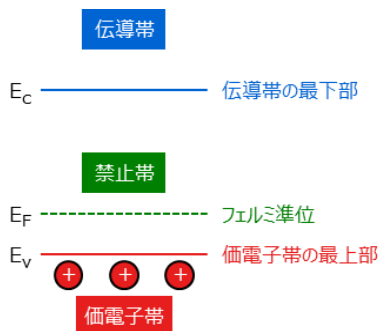


図 2.2 p 形半導体のフェルミ準位

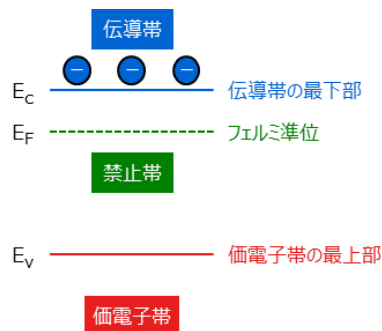


図 2.3 n 形半導体のフェルミ準位

2.1.2. 無バイアス状態のpn接合

pn接合の近傍では、n形半導体の電子はp形半導体へ拡散してp形半導体の正孔（ホール）と再結合します。反対にp形半導体の正孔は、n形半導体へ拡散して、n形半導体の電子と再結合します。n形半導体、p形半導体に拡散したキャリアが正孔と電子と再結合することにより、図2.5のようにキャリアが存在しない空乏層と呼ばれる領域が発生します。

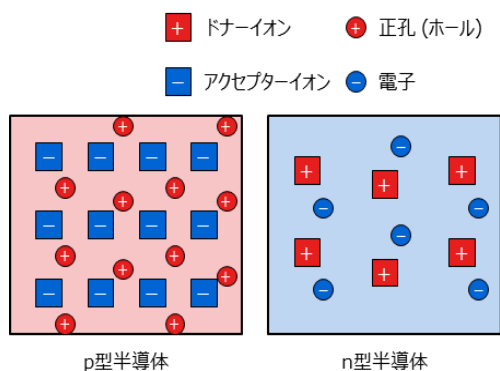


図 2.4 p形半導体とn形半導体の接合前の状態

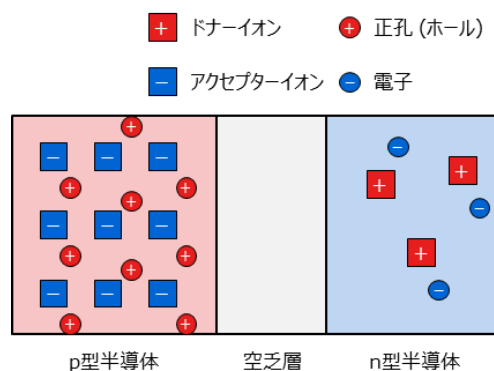


図 2.5 p形半導体とn形半導体の接合後の状態

キャリアの拡散により、図2.6のようにp形半導体のフェルミ準位は上昇、n形半導体のフェルミ準位は低下して、pn接合後には新しいフェルミ準位に移行します。このとき、伝導帯の準位の低下は両領域における仕事関数の差に等しく、そして両領域の間に $q \cdot V_D$ という拡散電位が現われます。

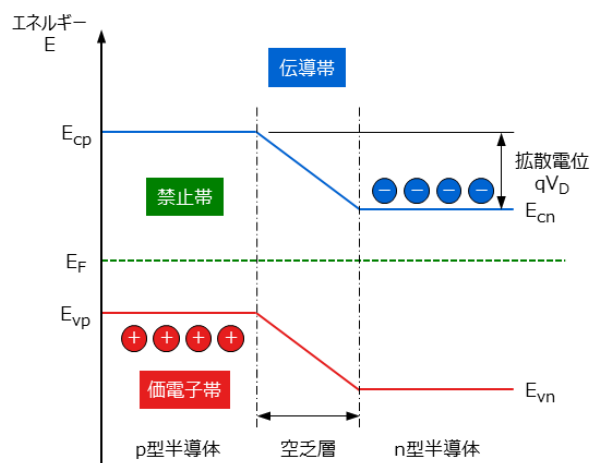


図 2.6 pn接合のバンド図

図2.7は、pn接合にバイアスが印加されていない状態での、p形半導体とn形半導体に存在する電子密度と正孔密度を示しています。 E_{cp} より高いエネルギーを持つn形半導体内の電子は、p形半導体の領域に移動することができます。また、同様に、p形半導体内の E_{vn} よりも低いエネルギーを持つ正孔は、n形半導体の領域に移動することができます。このとき、n形半導体内の電子密度 n_n とp形半導体内の電子密度 n_p は、ほぼ等しく $n_n \approx n_p$ の関係があることから電子の移動

は止まり平衡状態が保たれます。p 形半導体内の正孔密度 p_n と n 形半導体内の正孔密度 p_p も同様の関係が成り立ちます。

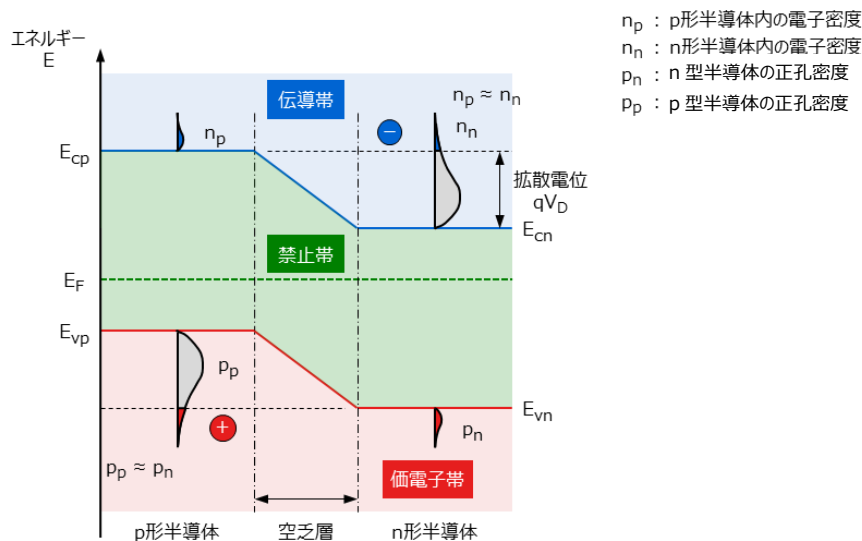


図 2.7 pn 接合が無バイアス状態時のバンド図

2.1.3. 順バイアス状態の pn 接合

pn 接合に順方向バイアス (p 形半導体に“+”、n 形半導体に“-”) の $q \cdot V_B$ を印加すると、無バイアス時の拡散電位 $q \cdot V_D$ から、 $q(V_D - V_B)$ に拡散電位が減少します。これにより、 E_{cp} より高いエネルギーを持つ n 形半導体内の電子密度は p 形半導体内の電子密度より多くなり、n 形半導体から p 形半導体へ多量の電子が移動することができ、同時に p 形半導体内の多くの正孔も n 形半導体内に移動して拡散することにより電流を流すことができます。

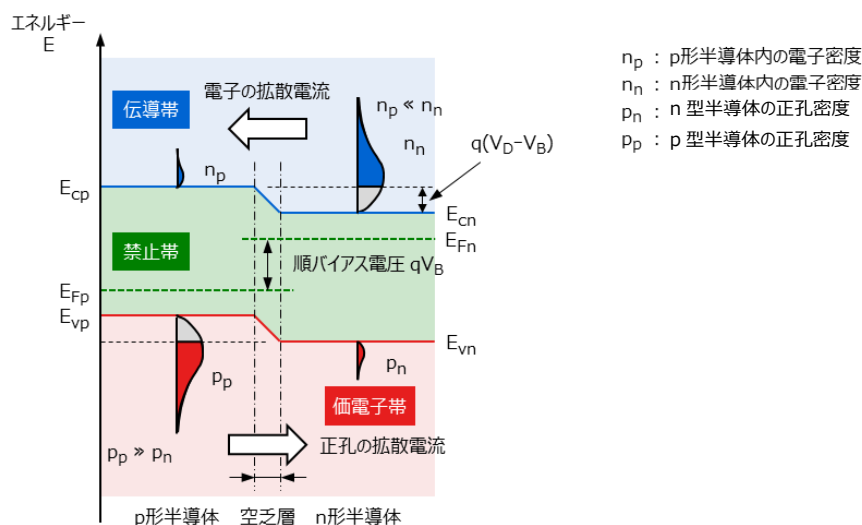


図 2.8 pn 接合に順バイアスを印加したときのバンド図

2.1.4. 逆バイアス状態の pn 接合

pn 接合に逆バイアス (p 形半導体に“-”, n 形半導体に“+”) の qV_R を印加すると、無バイアス時の拡散電位 $q \cdot V_D$ から、 $q(V_D+V_R)$ に拡散電位が増加します。これにより、 E_{cp} より高いエネルギーを持つ n 形半導体内の電子密度は、ほぼ無くなります。p 形半導体でも同様にほぼ移動できる正孔が無くなり、キャリアの移動ができなくなるから電流が流れない状態になります。

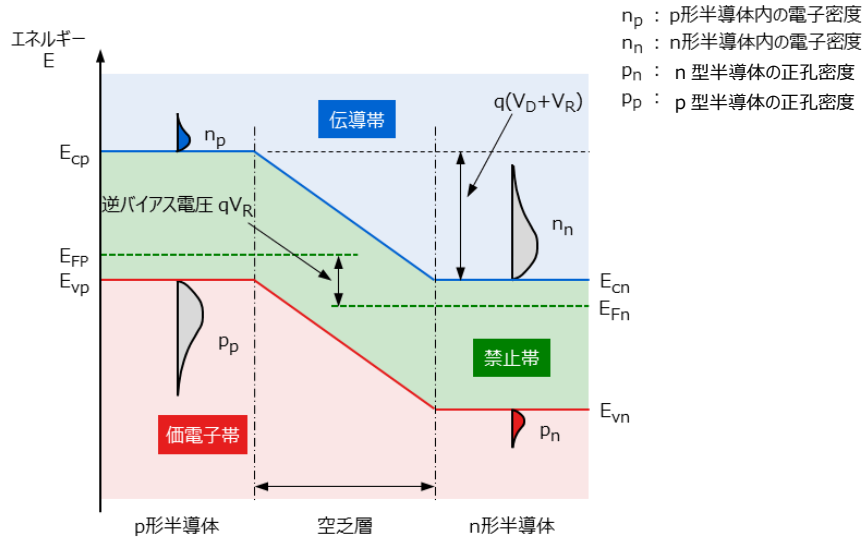


図 2.9 pn 接合に逆バイアスを印加したときのバンド図

2.1.5. pn 接合ダイオードの特性

pn 接合で構成されたダイオードの順電流 I_F と順電圧 V_F の関係は、式 2-1 で表されます。この式は、小電流領域に適用され、大電流領域ではダイオードの内部抵抗による電圧降下が発生するために適用することができません。

$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_F}{K \cdot T}} - 1 \right) \dots \dots \dots (2-1)$$

- | | | | |
|-------|---|-------------------------------------|----------------------|
| I_F | : | 順電流 | (A) |
| I_S | : | 飽和電流 | (A) |
| q | : | 電子の電荷 (1.602×10^{-19}) | (C) |
| V_F | : | 順電圧 | (V) |
| K | : | ボルツマン定数 (1.381×10^{-23}) | ($J \cdot K^{-1}$) |
| T | : | 接合温度 (絶対温度) | (K) |

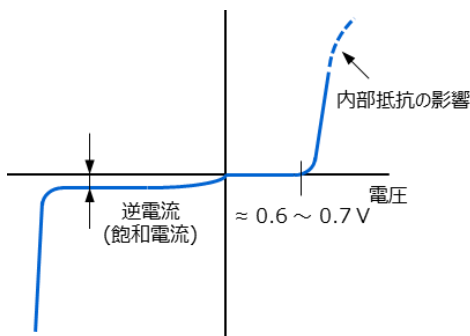


図 2.10 pn 接合ダイオードの電流 - 電圧特性イメージ図

pn 接合ダイオードの電流—電圧特性のイメージ図 2.10 に示します。Si ダイオードでは、0.6～0.7V の順方向バイアスを印加すると順電流が立ち上がり始めます。

なお、Si ダイオードでの順電圧 V_F の温度特性は、約-2 mV/ °C と負の温度係数を持っています。しかし、大電流領域では内部抵抗による電圧降下分の温度係数が正となるための温度係数の値は小さくなります。

ダイオードの逆方向に電圧を印加したとき、流れる電流を逆電流 I_R ^{*3} または飽和電流 I_S と呼びます。 I_R の近似式は、式 2-2 で表されます。

*3 : 漏れ電流、リーク電流と呼ぶこともあります。

$$I_R = I_{R0} \cdot e^{k(T-T_0)} \dots\dots\dots (2-2)$$

- I_R : 温度 T における逆電流 (A)
- I_{R0} : 規準温度 T_0 における逆電流 (A)
- k : 半導体材料で決定する定数 (Si の場合、約 0.1/ °C)
- T : 温度 (°C)
- T_0 : 基準温度 (°C)

I_R の温度特性例を図 2.11 に示します。この例では、 $\Delta T_a = 75^\circ\text{C}$ の温度上昇で、 I_R は約 2 桁上昇することがわかります。

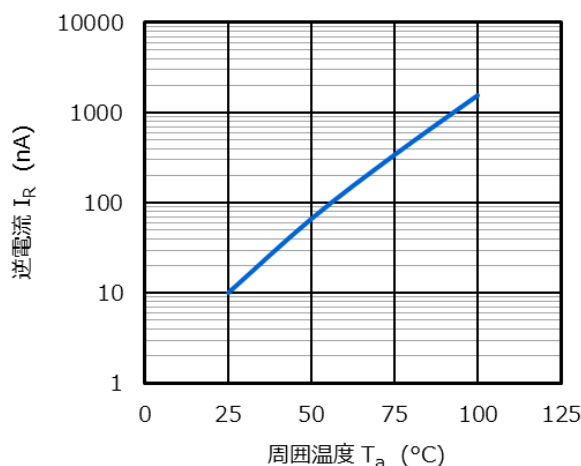


図 2.11 pn 接合ダイオードの逆電流 - 周囲温度特性例

2.1.6. pin ダイオード

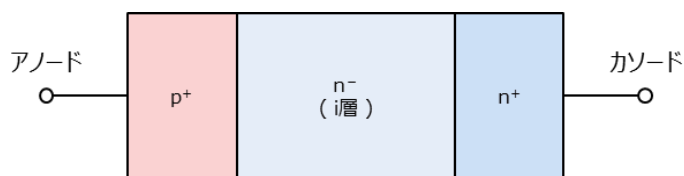


図 2.12 pin 形ダイオードの構造イメージ図

pn 接合を用いた通常の Si ダイオードは、図 2.12 のように p^+ 層と n^+ 層の間に厚く、不純物濃度の薄い n^{*4} 層を挟んだ構造となっています。 n^- 層は、真性半導体に近い不純物濃度から i (intrinsic) 層と呼ばれ、p-i-n の構造から pin ダイオードと呼ばれます。 pin ダイオードは、下記のような特長を持ちます。

*4 : n^- 層は、i 層以外にも高抵抗層、ドリフト層とも呼ばれることもあります。

1) 高耐圧化が可能

pn 接合に逆バイアス電圧を印加すると空乏層が広がります。 pn 接合部分で最も電界が強まり最大電界強度を超えるとアバランシェ降伏、または、ツェナー降伏が発生します。 pn 接合の耐圧は、図 2.13 に示す三角形の面積で決まります。 このため、 n^- 層の不純物濃度を低下させて電界強度の傾斜を緩やかにし、かつ、 n^- 層の厚さを厚く (長く) することで高耐圧化が可能となります。

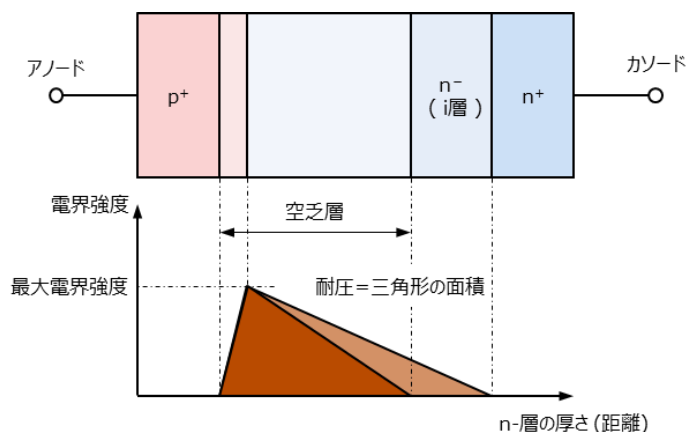


図 2.13 pin ダイオードによる高耐圧化

2) 導通時の抵抗が小さい

この p⁺層と n⁻層の pn 接合ダイオードが導通すると、P⁺層から n⁻層に正孔が注入されます。反対に、n⁺層から n⁻層に電子が注入され、n⁻層には不純物濃度以上にキャリアが増加します。この増加したキャリアにより n⁻層は低抵抗となり、導通時の抵抗が小さくなります。n⁻層のキャリアが増加して導通抵抗が低下する現象を伝導度変調と呼びます。

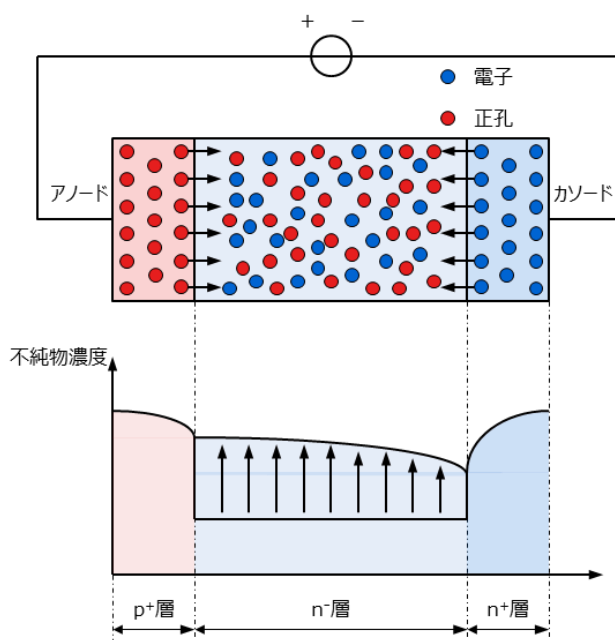


図 2.14 伝導度変調時の n⁻層の不純物濃度の変化 (イメージ図)

2.2. ショットキーバリアダイオード

2.2.1. ショットキー接合

図 2.15 にショットキーバリアダイオードの構造図を示します。金属と半導体の接触による整流性を利用したダイオードで、ショットキーが提唱したことから、ショットキーバリアダイオード (以下、SBD) と呼ばれます。蒸着した金属と n 形半導体との間にショットキー接合が構成されるのが特徴です。

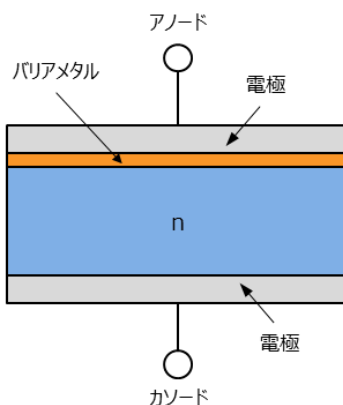


図 2.15 ショットキーバリアダイオードの構造例

図 2.16 に示すように金属には、価電子帯と伝導帯の間にフェルミ準位が存在し、禁制帯は存在しません(バンドギャップが存在しない)。このため、金属は価電子帯には多量の正孔が、伝導帯には多量の電子が存在することになります。

また、n 形半導体を例にバンド図を図 2.17 に示します。n 形半導体では、価電子帯と伝導帯の間に電子の存在できない禁制帯が存在し、その禁制帯中にフェルミ準位が存在します。

このとき、n 形半導体のフェルミ準位より低いフェルミ準位を持つ金属を接合するとショットキー接合が形成され、整流特性を示します。反対に n 形半導体のフェルミ準位より高いフェルミ準位を持つ金属を接合するとオーミック接合となり、抵抗の特性を示します。

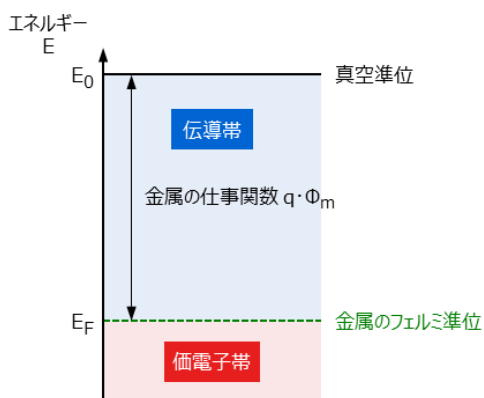


図 2.16 金属のバンド図

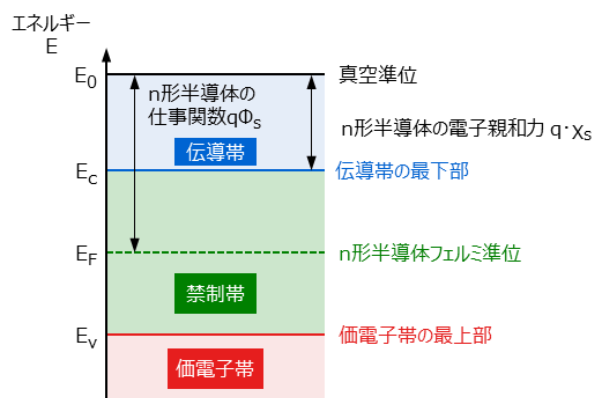


図 2.17 n 形半導体のバンド図

金属と n 形半導体を接合すると、n 形半導体から金属へ一部の電子が流れ込み、フェルミ準位が一定になります。これと同時に n 形半導体の伝導帯の底部 E_c と価電子帯の上部 E_v もエネルギー順位が移動して、図 2.18 のようなバンド図になります。このとき、金属と n 形半導体の間には、 $q \cdot \Phi_{bi} = q(\Phi_m - \Phi_s)$ となる拡散エネルギーが発生し、n 形半導体側には+イオンによる空乏層が形成されます。なお、金属側には多量の電子が存在するため、n 形半導体から電子が移動しても空乏層は、ほとんど形成されません。ショットキー接合が無バイアスの状態では、電子が空乏層の拡散エネルギー $q(\Phi_m - \Phi_s)$ を超えることができないため電流は流れません。

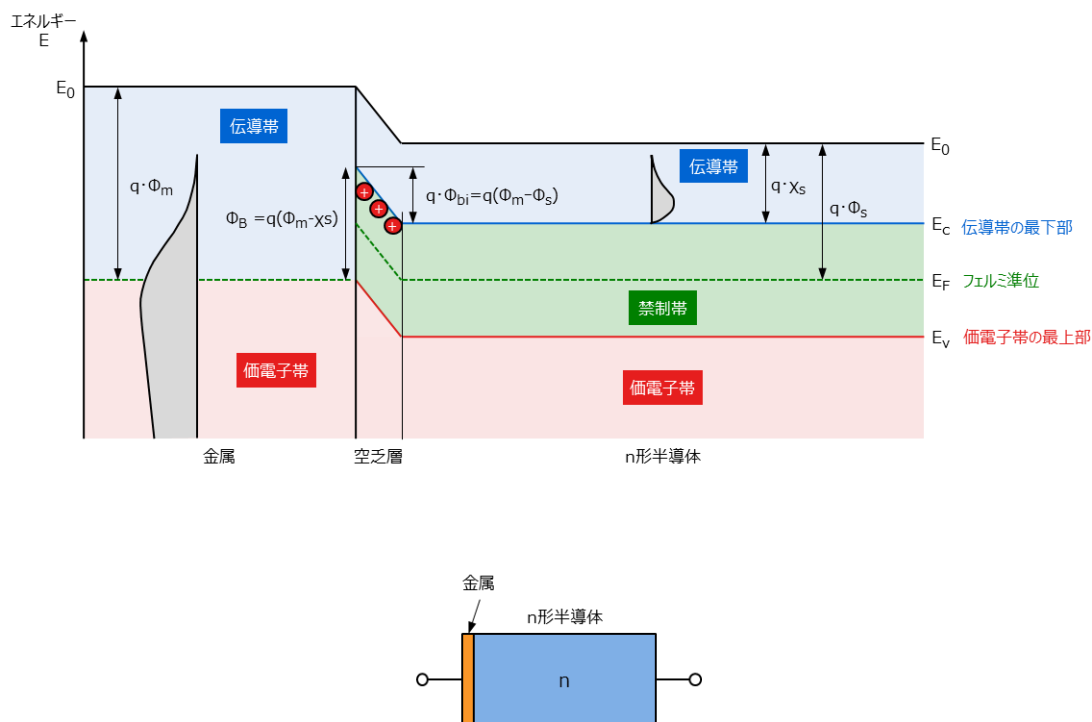


図 2.18 ショットキー接合が無バイアス状態のバンド図

ショットキー接合に順方向バイアス V_B が印加されると、n 形半導体のエネルギー順位が底上げされて、拡散エネルギー $q(\Phi_m - \Phi_s - V_B)$ を超える電子の量が増加します。この拡散エネルギーを超えた電子は金属側に流れ込み電流が流れます。

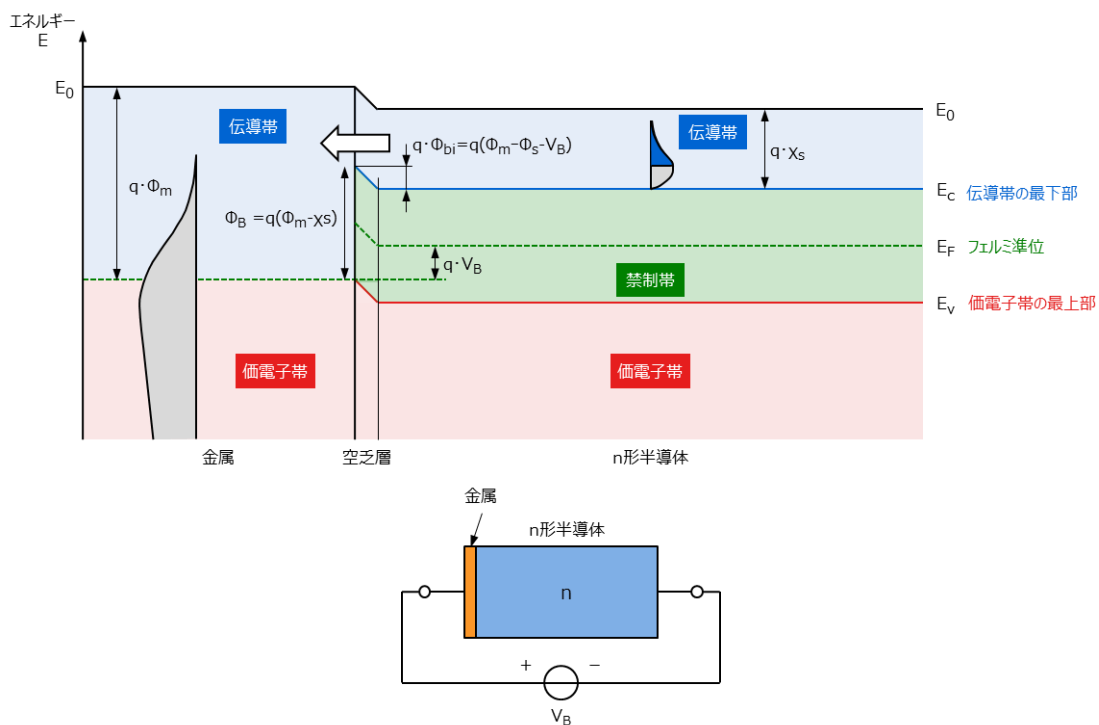


図 2.19 ショットキー接合に順バイアスを印加したときのバンド図

ショットキー接合に逆バイアス電圧 V_R が印加されると、n形半導体のエネルギー順位は下がります。このため、拡散エネルギー $-q(\Phi_m - \Phi_s + V_R)$ を超えられる電子は、ほとんどなくなり電流は流れなくなります。

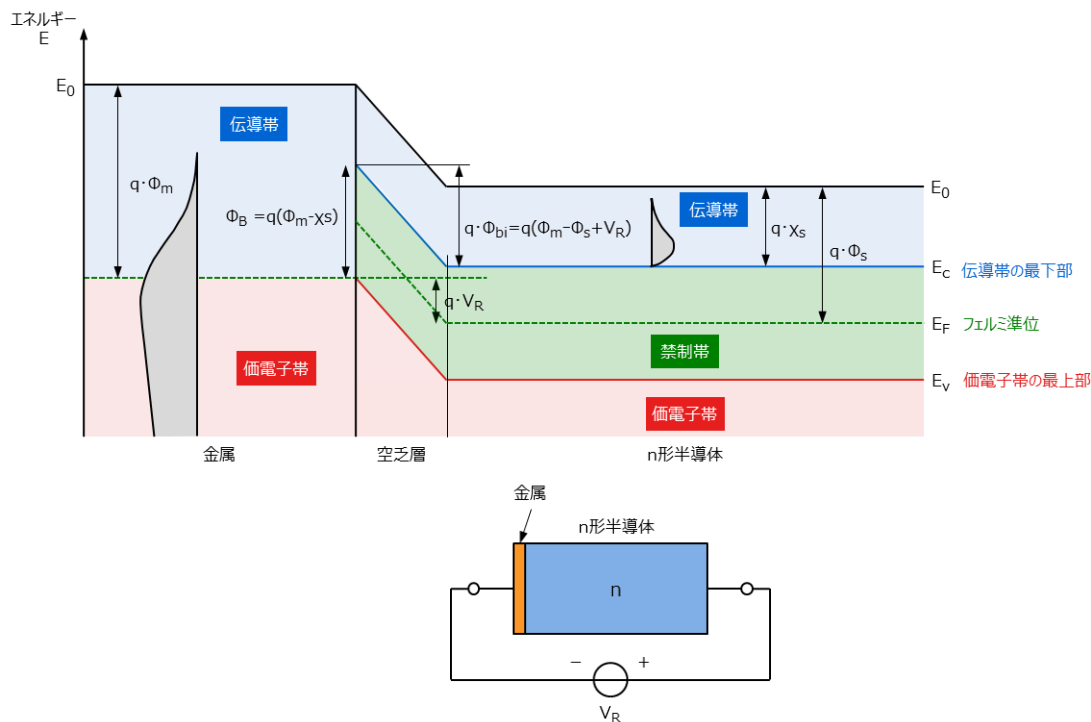


図 2.20 ショットキー接合に逆バイアスを印加したときのバンド図

ショットキー接合を構成する代表的な金属 (バリアメタル) として、モリブデン (Mo)、チタン (Ti) およびバナジウム (V) などがああります。SBD の電流が立ち上がる電圧は Si ダイオードに対して小さいことが大きな特長です。

なお、拡散電位の小さいバナジウム (V) やチタン (Ti) を使った SBD では、金属と n 形半導体の障壁が低いことから、拡散電位の大きい金属であるモリブデン (Mo) などに比較して、逆電流が大きい傾向があります。逆電流の大きい SBD では、逆電圧×逆電流による損失が発生し、接合温度が上昇します。逆電流は正の温度係数を持っており、接合温度の上昇とともに逆電流が増加し、逆電流増加→接合温度上昇→逆電流増加の正帰還が掛かり、最終的に熱暴走して、素子の特性劣化や破壊を招く恐れがあります。SBD を使用する際には、印加される逆バイアス電圧や周囲温度などの使用条件を考慮して、十分に問題がないことを確認してください。

2.2.2. JBS 構造

SBD は、順電圧 V_F が小さい反面、逆電流が大きい特徴を持っています。この大きい逆電流は、正の温度係数を持っており、印加される逆電圧や周囲温度などの使用条件によっては、逆電流増加→接合温度上昇→逆電流増加→接合温度上昇の正帰還が掛かり、最終的に熱暴走状態となり素子の劣化や破壊を招く恐れがあります。このため、当社の SBD では、逆電流を小さくすることができる JBS (Junction Barrier Schottky) 構造を採用した製品をラインアップしています。

JBS 構造の断面は、図 2.21 のように n 層の表面に部分的に p 層が拡散された構造となっています。SBD に逆電圧が印加されると n 層と拡散された p 層で空乏層が広がり始めます。さらに逆バイアス電圧を増加させると、隣り合う空乏層同士が繋がることによって逆電流を抑制することができます。

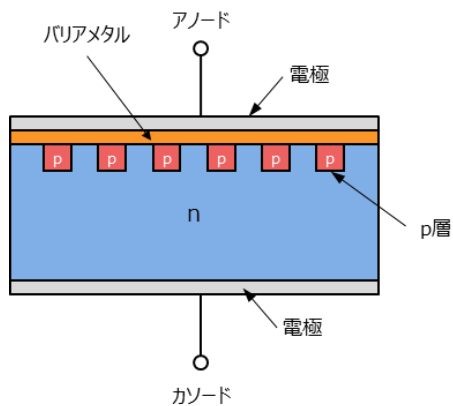


図 2.21 JBS 構造イメージ図

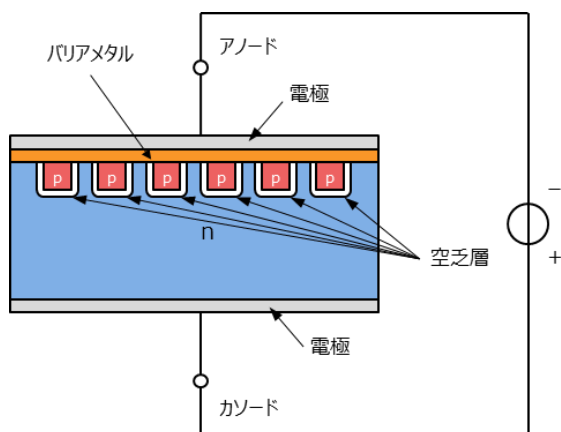


図 2.22 ショットキー接合に逆バイアスを印加し始めたときの空乏層イメージ図

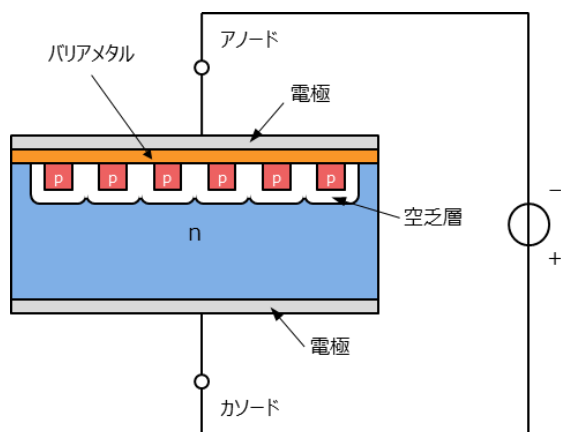


図 2.23 ショットキー接合に印加した逆バイアスを増加したときの空乏層イメージ図

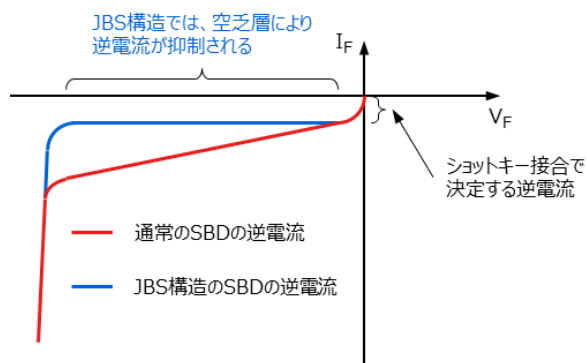


図 2.24 通常の SBD と JBS 構造の SBD の逆電流特性イメージ図

2.3. SiC ショットキーバリアダイオード

2.3.1. SiC とは

SiC (炭化ケイ素)は、Si (シリコン) と C (炭素) の原子から構成され、各原子の周りを異なる 4 個の原子が正四面体で配置された構造をしています。SiC は、その四面体が最も密になる配置をとった最密充填構造の化合物半導体材料です。積層方向の正四面体の重なり方の周期的な違いから多数の結晶多形 (ポリタイプ) が存在し、それぞれの物性値が異なります。

SiC は Si と比較して価電子帯と伝導帯の間の電子が存在しない禁制帯のエネルギー幅 (バンドギャップ: E_g) が大きい材料です。バンドギャップが大きいということは原子間の結合が強固であり、絶縁破壊電界強度が高くなります。SiCは、Siと比較して約 10 倍程度の絶縁破壊電界強度を持っています。また、結合が強固なことから格子が振動しやすくエネルギーが伝わりやすいので、熱伝導も良好な半導体材料になります。SiC の結晶構造には、六方晶の 4H-SiC、6H-SiC および立方晶の 3C-SiC などがあります。表 2.1 に Si および他の半導体材料との物性定数の比較を示します。SiC の結晶多形のうち電子移動度・絶縁破壊電界強度・飽和速度など物性定数のバランスの良い 4H-SiC が半導体材料としてよく使われています。

表 2-1 代表的な半導体材料の物性値

項目	記号	単位	Si	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	GaN	GaAs	ダイヤモンド
バンドギャップ	E_g	eV	1.12	3.26	3.02	2.23	3.39	1.43	5.47
電子移動度	μ_e	cm ² / Vs	1400	1000/1200	450/ 100	1000	900	8500	2200
正孔移動度	μ_h		600	120	100	50	150	400	1600
絶縁破壊電界強度	E_c	V/ cm	3.0×10^5	2.8×10^6	3.0×10^6	1.5×10^6	3.3×10^6	4.0×10^5	1.0×10^7
熱伝導度	λ	W/ cm·K	1.5	4.9	4.9	4.9	2.0	0.5	20
飽和速度	V_{sat}	cm/ s	1.0×10^7	2.2×10^7	1.9×10^7	2.7×10^7	2.7×10^7	2.0×10^7	2.7×10^7
比誘電率	ϵ_r	-	11.8	9.7/ 10.2	9.7/ 10.2	9.7	9.0	12.8	5.5

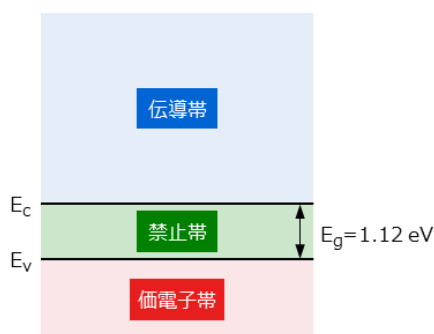


図 2.25 Si のバンドギャップ

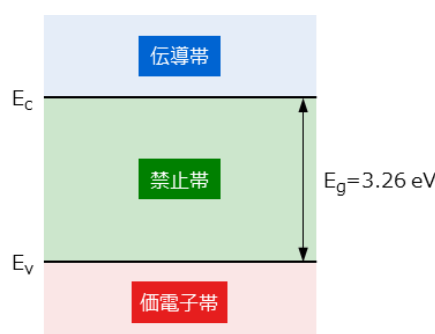


図 2.26 SiC のバンドギャップ

Siの高耐圧のパワーデバイス、絶縁破壊電荷強度が低い、高耐圧を実現するために、図2.27のように低濃度のn⁻層の厚さ (距離) を確保する必要があります。しかしながら、低濃度のn⁻層は抵抗率が大きいためダイオードが導通したときの抵抗が大きくなります。

しかしながら、SiCでは、絶縁破壊電荷強度がSiの10倍近くあるため、Siと同じ耐圧を得るためのn⁻層の濃度を高め、かつ、

厚さも薄くすることが可能となります。

また、移動度 μ は電子やホールが電界で加速された場合の速度 (速度 = 移動度 $\mu \times$ 電界 E) に関係します。 μ が大きいほど電流が流れやすく抵抗が小さくなり、その速度の限界が飽和速度も SiC は Si に比較して優れていることから、SiC は性能の高い素子を実現することが可能となります。

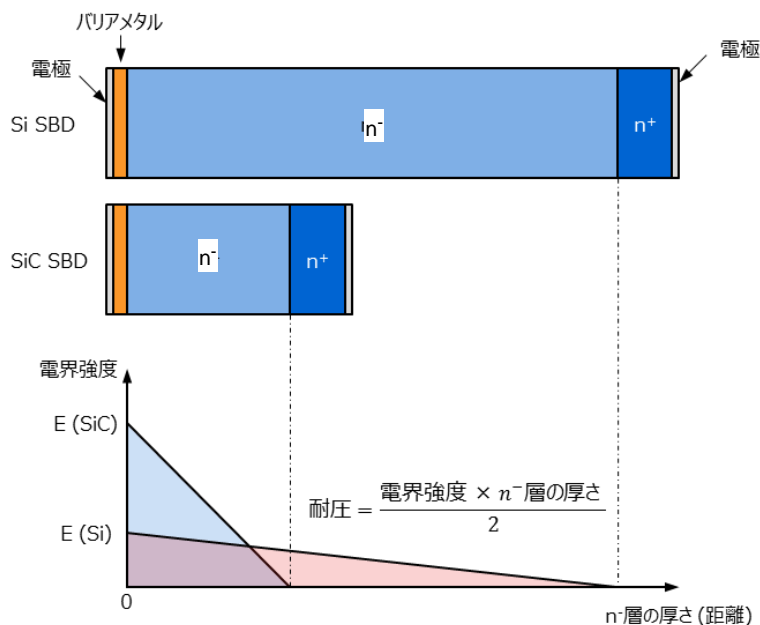


図 2.27 Si SBD と SiC SBD の電界の広がりイメージ図

2.3.2. 改良形 JBS 構造 SBD

SiC をはじめとした整流用途に使用するダイオードは、容量性負荷を充電するときに大きな電流が流れることから、高いパルス順電流能力 I_{FP} 、または、 I_{FSM} が要求されます。

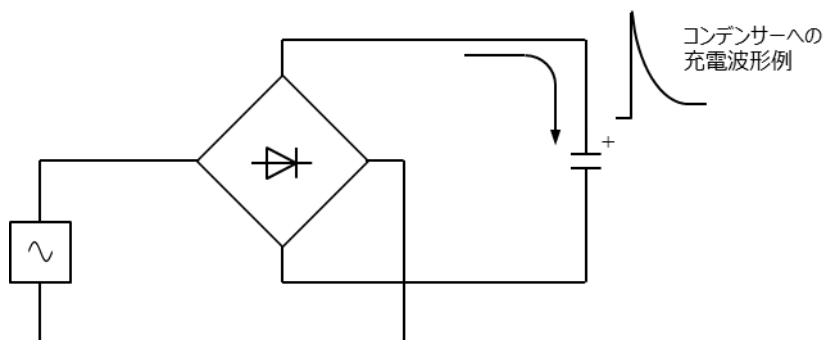


図 2.28 全波整流時のコンデンサへの充電電流波形例

当社の SiC SBD では、この要求に応えるために MPS (Merged PIN Schottky) 構造の概念を取り込んだ改良形 JBS 構造の製品を開発しました。

MPS 構造は図 2.29 に示すように、 n^- 層の一部に濃度の高い p^+ 層を拡散した構造になっています (当社では JBS 構造の p 層の一部を P^+ 化しています)。SBD に大きな電流が流れると、ショットキー接合に加えて、この p^+ 層と n^- 層の pn 接合ダイオードも導通します。このとき、 p^+ 層から n^- 層に正孔が、 n^+ 層から n^- 層に電子が供給され、 n^- 層のキャリア濃度が高まる伝導度変調を起こします (2.1.6 参照)。伝導度変調が起こると n^- 層は高抵抗から低抵抗に変化し、大きな電流を流すことが可能となり電流サージ耐量を向上させることができます。

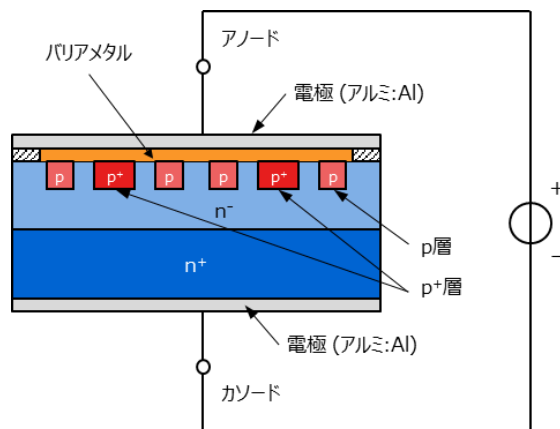


図 2.29 改良形 JBS 構造 SBD 断面イメージ図

図 2.30 に改良形 JBS 構造 SBD の順電流-順電圧特性イメージ図を示します。改良形 JBS 構造 SBD は、高いパルス電流能力を持ち、かつ、大電流領域においても低い順方向電圧特性を実現することができます。

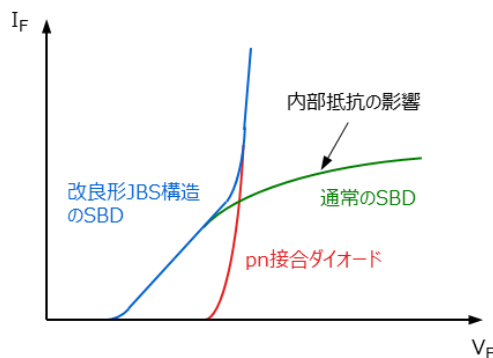


図 2.30 通常の SBD、pn 接合ダイオードおよび改良形 JBS 構造 SBD の順電流-順電圧特性イメージ図

2.4. ツェナーダイオード

ツェナーダイオードと一般の整流やスイッチングダイオードと異なる点は、pn 接合の逆方向特性の安定した降伏領域を利用することです。通常のダイオードは、特に指定されない限り逆方向の降伏領域で使用することはできず、これに使用した場合は、降伏現象が局部的に起こり電流集中による pn 接合が破壊することがあります。ツェナーダイオードでは降伏領域で使用しても pn 接合面や接合内部で局部的な電流集中が起こらないような構造で設計されています。

ツェナーダイオードの降伏特性は pn 接合近傍の不純物濃度分布や pn 接合の形状および表面状態により決定されます。従って、これらの条件を選ぶことにより種々の降伏電圧を有するツェナーダイオードを作ることができます。

2.4.1. ツェナー降伏とアバランシェ (雪崩) 降伏

ツェナーダイオードの逆方向降伏現象は次の 2 つの現象により説明されます。

2.4.1.1. ツェナー降伏

pn 接合に逆方向のバイアス電圧を印加して次第に電圧を増加させると、空乏層内の結晶格子を形成している価電子 (最外殻の電子) が強電界のため、格子の結合をが引き裂かれて、自由電子が発生します。発生した自由電子が高電界により、トンネル現象により価電子帯から伝導帯に移動し、電子と正孔は電極側に引き寄せられて急激に電流が流れるようになります。また、ツェナー降伏は、不純物が高濃度でドーピングされ、逆方向のバイアス電圧が印加されても空乏層が広がりづらい場合に発生します。5~6 V 以下で降伏が発生する低電圧のツェナーダイオードはこの現象による降伏が支配的となります。

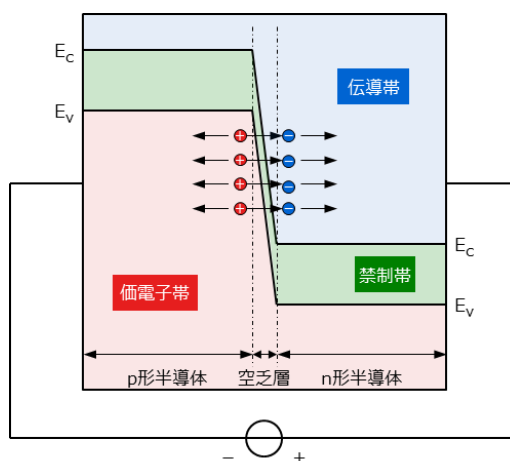


図 2.31 ツェナー降伏

2.4.1.2. アバランシェ降伏

アバランシェ降伏は、電子雪崩降伏、または、雪崩降伏とも呼ばれます。アバランシェ降伏は、逆方向のバイアス電圧を次第に増加させると、熱的に発生した電子と正孔が空乏層内に発生する強電界によって加速され結晶内の原子と衝突して、価電子をたたき出し、電子と正孔の対を作ります。さらに、この電子正孔対も強電界により加速され別の原子に衝突し価電子をたたき出しさらに電子正孔対を作ります。この現象がなだれ的に増殖していき、電子と正孔が電極側に引き寄せられて急激に電流を流すようになります。この現象をアバランシェ降伏と呼んでおり 5~6 V 以上のツェナーダイオードではこの現象による降伏が支配的となります。

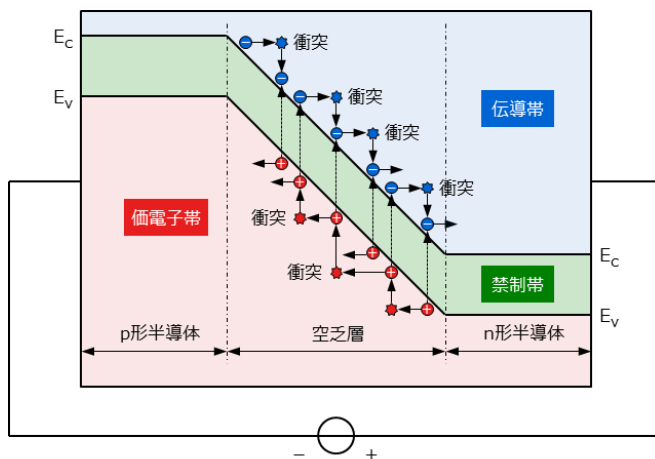


図 2.32 アバランシェ降伏

これらの2つの異なるメカニズムによる降伏特性の差は、降伏電圧の温度特性が異なる点に表れます。ツェナー降伏では降伏電圧の温度特性は負の温度係数を持ち、アバランシェ降伏では正の温度係数となります。

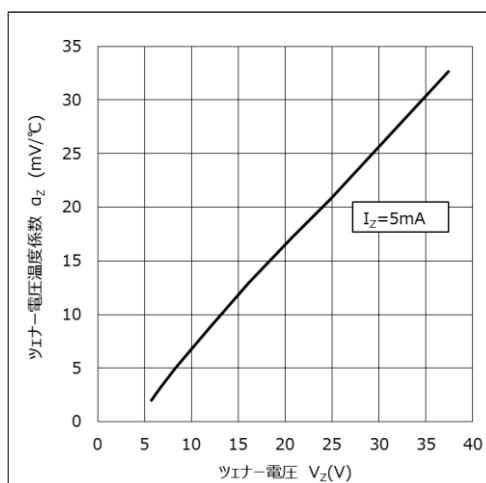


図 2.33 ツェナー電圧による温度係数特性例

2.4.2. ツェナーダイオードの順方向特性

ツェナーダイオードの小電流領域の順方向特性は、一般的な pn 接合ダイオードと同様に式 2-3 で表されます。

$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_F}{K \cdot T}} - 1 \right) \dots\dots\dots (2-3)$$

- \$I_F\$: 順電流 (A)
- \$I_S\$: 飽和電流 (A)
- \$q\$: 電子の電荷 (\$1.602 \times 10^{-19}\$) (C)
- \$V_F\$: 順電圧 (V)

K	:	ボルツマン定数 (1.381×10^{-23})	($J \cdot K^{-1}$)
T	:	接合温度 (絶対温度)	(K)

2.4.3. ツェナーダイオードの逆方向特性

本領域の電圧をツェナー電圧 (V_Z) と呼び V_Z の値は n 形半導体の不純物濃度および、pn 接合部の不純物濃度の勾配で決定されます。 I_Z - V_Z 特性を図 2.34 に示します。 ツェナー電圧 V_Z は、流す電流 I_Z により変化するためツェナー電圧ごとに最適な電流を設定する必要があります。

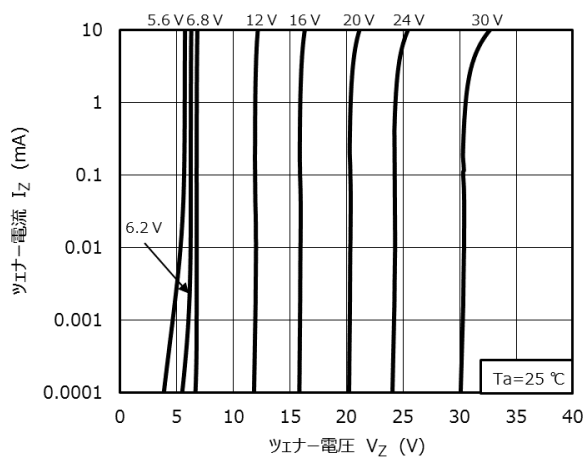


図 2.34 ツェナー電圧毎の I_Z - V_Z 特性例

スイッチングダイオードのパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
整流ダイオードのパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
ショットキーバリアダイオードの製品ページはこちら	→ Click Here
ショットキーバリアダイオードのパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
SiC ショットキーバリアダイオードの製品ページはこちら	→ Click Here
SiC ショットキーバリアダイオードのパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
TVS ダイオード (ESD 保護用ダイオード) の製品ページはこちら	→ Click Here
TVS ダイオード (ESD 保護用ダイオード) のパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
ツェナーダイオードの製品ページはこちら	→ Click Here
ツェナーダイオードのパラメトリックサーチはこちら	→ Click Here
SiC ショットキーバリアダイオード (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
絶対最大定格と電気的特性:SiC ショットキーバリアダイオード (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
昇圧回路用ショットキーバリアダイオードの選定方法 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
ESD 保護用ダイオード(TVS ダイオード)の基礎 (アプリケーションノート) はこちら	→ Click Here
過電圧対策に有効なツェナーダイオードと ESD 保護用ダイオード (アプリケーションノート)はこちら	→ Click Here
ダイオードの FAQ はこちら	→ Click Here
リファレンスデザインはこちら	→ Click Here

製品取り扱い上のお願

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。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>