

TOSHIBA

ディスクリート半導体の基礎

第2章 ダイオード

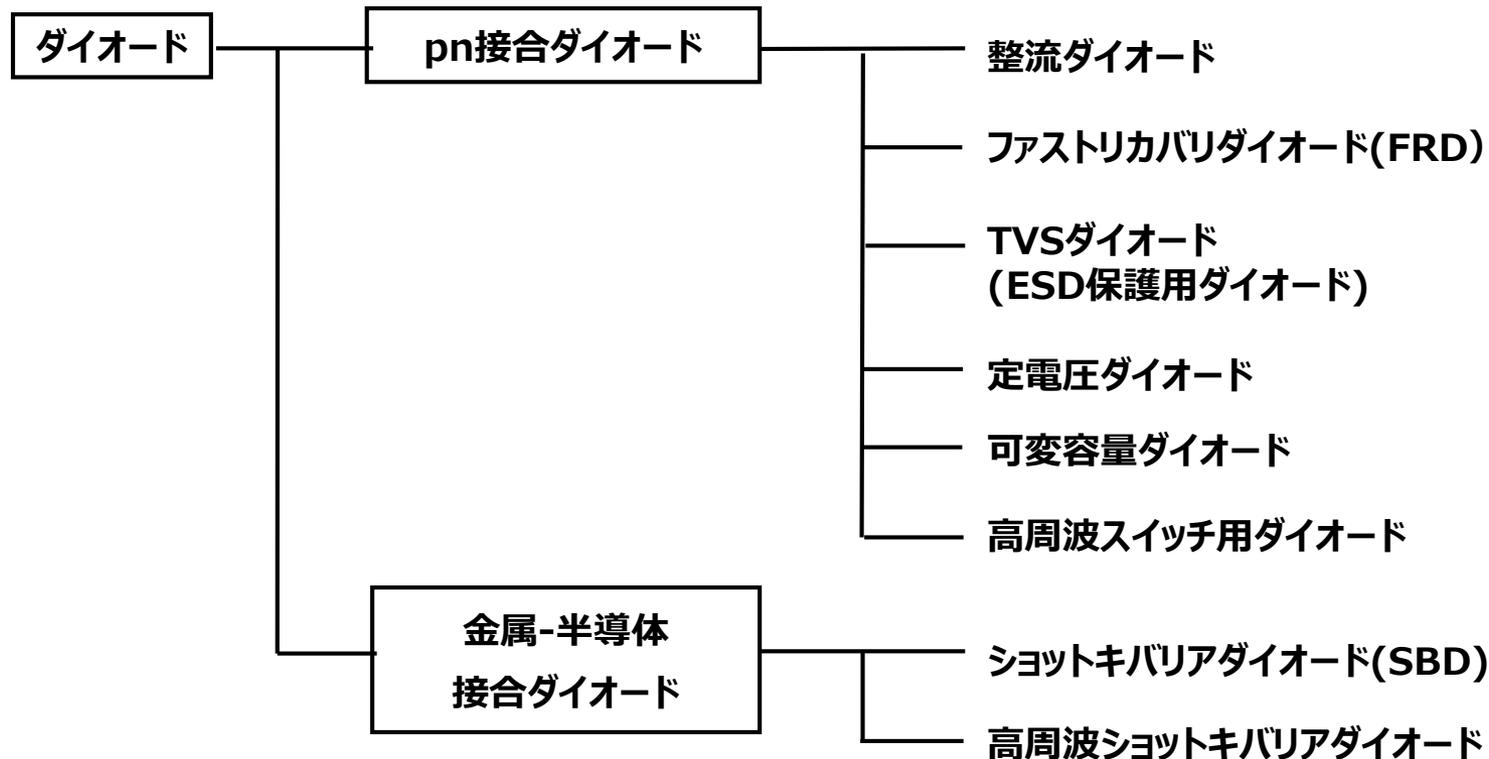
2022年2月

東芝デバイス&ストレージ株式会社

ダイオードの種類

ダイオードとは、1つのpn接合またはこれに代わる接合を持つ2端子の半導体デバイスです。大別すると表2-1. のように分類されます。**構造・用途により整流ダイオード、定電圧ダイオードなどに区分され、幅広く使用されています。**

表2-1 ダイオードの分類例



●用途：整流、検波、定電圧源、サージ保護、インバータ還流用、高周波帯域切り換え、高周波同調回路、信号処理用と電力処理用とに分類する場合もある。

整流ダイオードの働き

印加される電圧の方向により電流が流れる（順方向）、電流を流さない（逆方向）という性質を持っています。この性質を利用してダイオードは交流（AC）電圧を整流する働きをします。電極端子は、アノード（Anode：A）とカソード（Cathode：K）と呼ばれアノード電極がプラス電位の時に電流が流れます。



図2-1(a) ダイオードの記号と電極名



図2-1(b) ダイオードの外観例

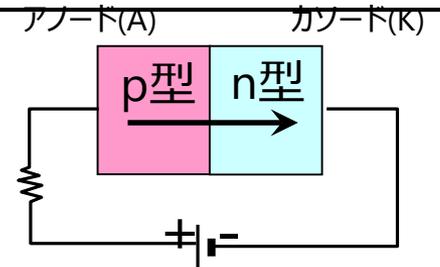


図2-1(c) ダイオードの極性

一般のダイオードはこの範囲を利用

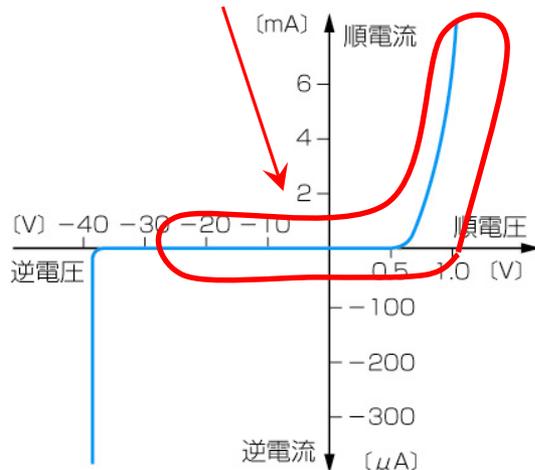


図2-1(d) ダイオードの主特性

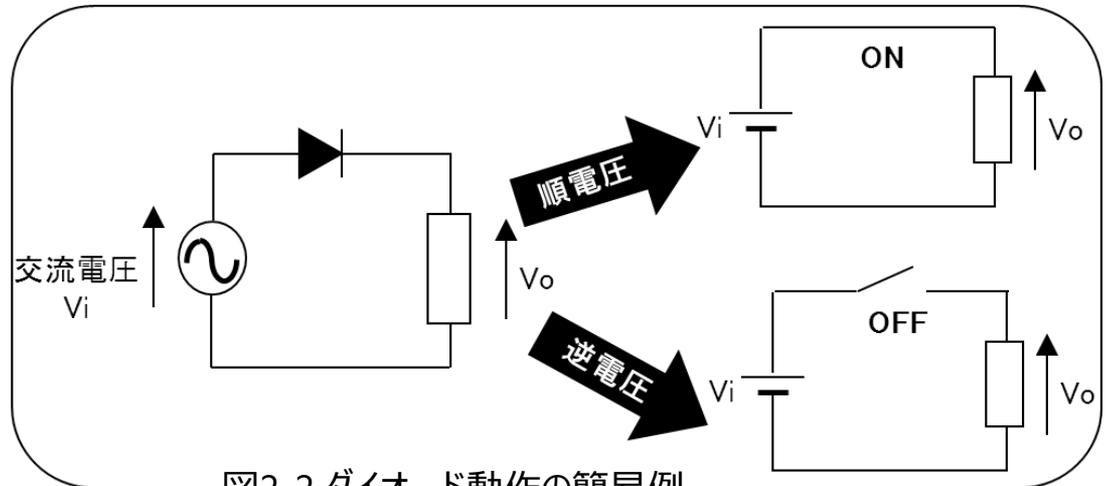


図2-2 ダイオード動作の簡易例

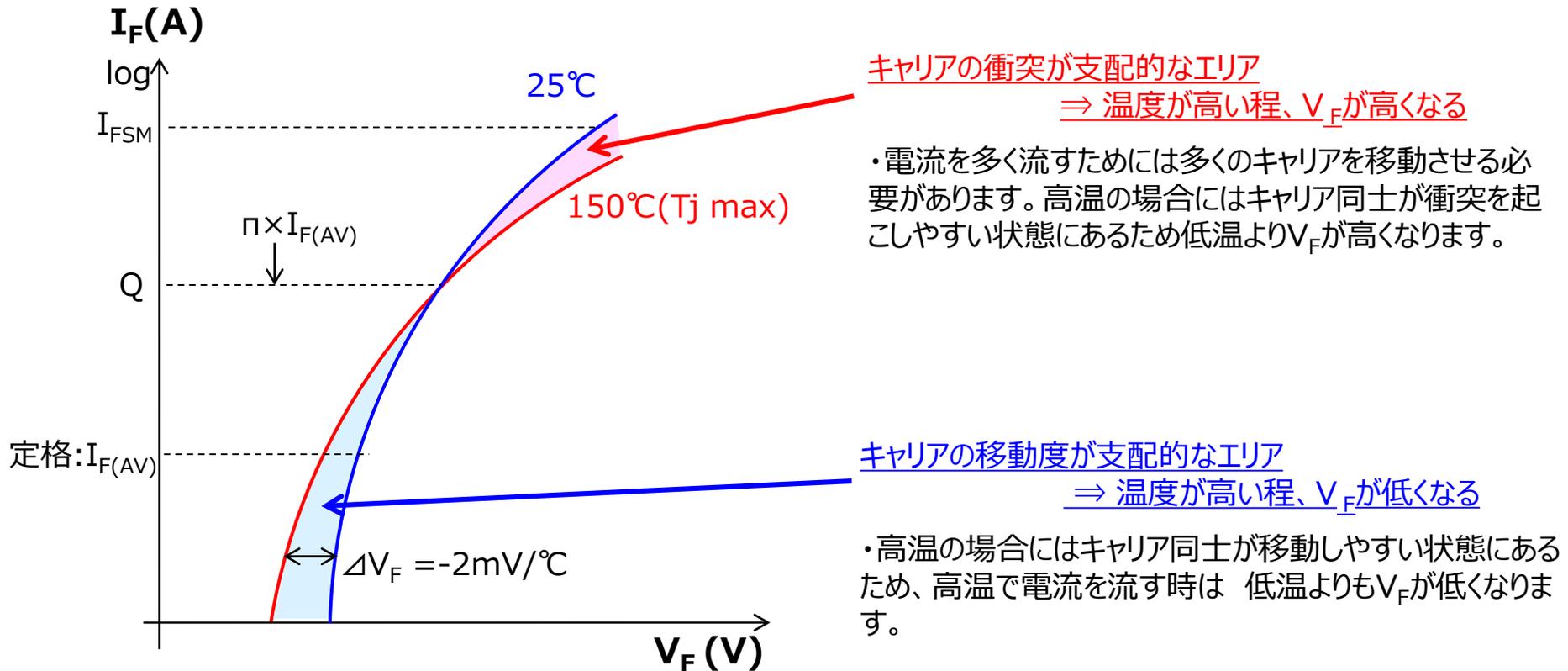
参考：なぜCathode（カソード）なのにシンボルは“K” ⇒シンボルのKはドイツ語（Kathode）に由来します。

整流ダイオードの順方向特性

整流ダイオードの順方向特性は、電流レベルと温度により特性が変わってきます。

低電流領域は、高温時が低 V_F となり、高電流領域ではその逆となります。

一般的には、両者の交点となるQ点以下で十分な温度マージンをもって使用します。



FRD

ファストリカバリダイオード(**FRD : Fast Recovery Diode**)の構造や働きは整流ダイオードと同じです。整流ダイオードが、500Hz以下の低周波応用に使用されるのに対し、**FRDは数kHz~100 kHzの高周波のスイッチングに使用されます。**その為にダイオードのスイッチング性能である**逆回復時間(t_{rr})を速くしてあります。**この t_{rr} の値によりS-FRD、HEDなどと別名称で呼称されることがありますが、総称してFRDに分類されます。

一般の整流ダイオードの t_{rr} が数 μs ~数十 μs に対し、**FRDは数十ns~数百ns**と1/100程度となっています。**スイッチング電源全般、インバータ応用機器およびDC/DCコンバータなどに使用されています。**

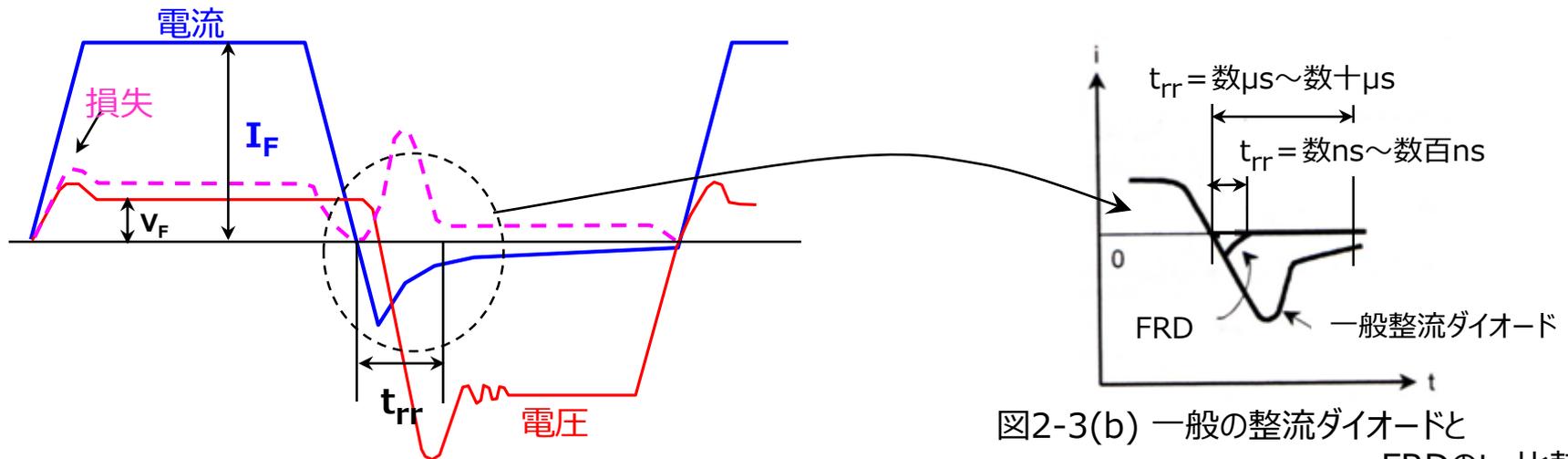


図2-3(a) ダイオードスイッチング
波形例と損失

図2-3(b) 一般の整流ダイオードと
FRDの t_{rr} 比較

t_{rr} による損失（逆回復損失）は、周波数が低いと無視できるが、周波数とともに増加し数kHz以上になると無視できなくなります。

定電圧ダイオード

定電圧ダイオードは、pn接合の逆方向特性を利用したダイオードです。pn接合ダイオードの逆方向電圧を上げていくと、ある電圧で大きな電流が流れ始め電流に関わらず一定の電圧が得られます。(これを降伏現象、その電圧を降伏電圧と呼称しています)

この特性を積極的に利用したのが**定電圧ダイオード**です。この降伏電圧をツェナー電圧と呼ぶことから、**ツェナーダイオード**ともいいます。

得られた定電圧を利用して電子回路の定電圧電源部や基準電圧を必要とする箇所に用いられます。

(注：一般的にツェナー現象は、6V以下で観測されます。6Vを超える場合は、ツェナー現象よりアバランシェ現象が支配的になります。MOSFETにおける同様の動作をアバランシェと呼んでいます。ツェナー電圧とアバランシェ電圧では、その温度特性が異なり前者は負の、後者が正の温度特性を持っています。)



図2-4(b) 定電圧ダイオードの記号

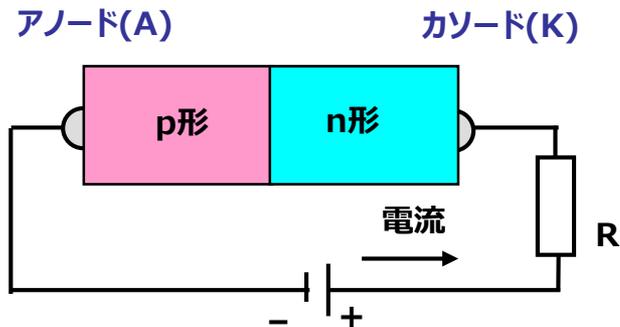


図2-4(a) 定電圧ダイオードの構造と接続

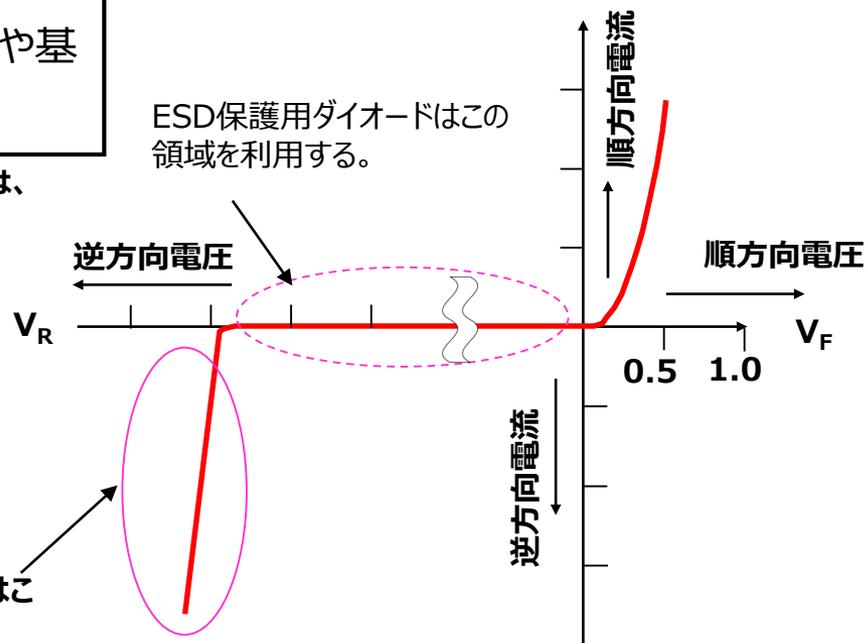
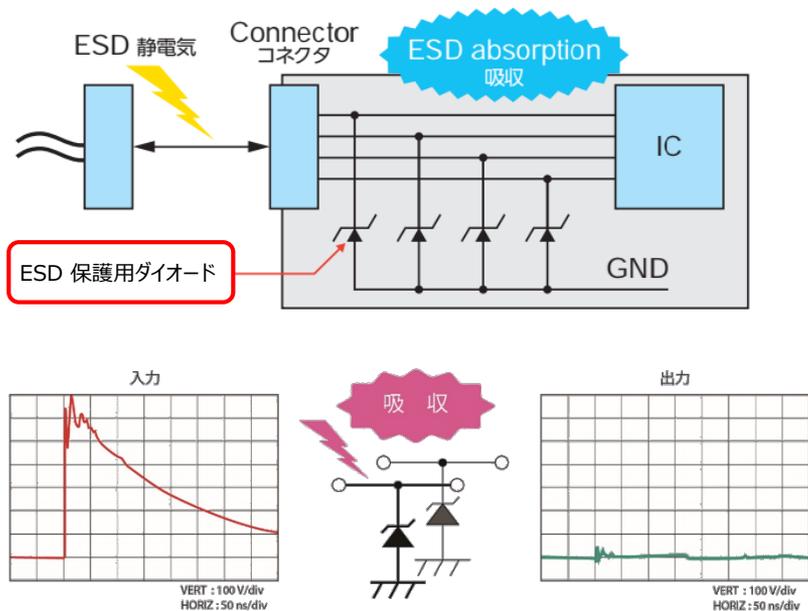


図2-4(c) 定電圧ダイオードの電気的特性

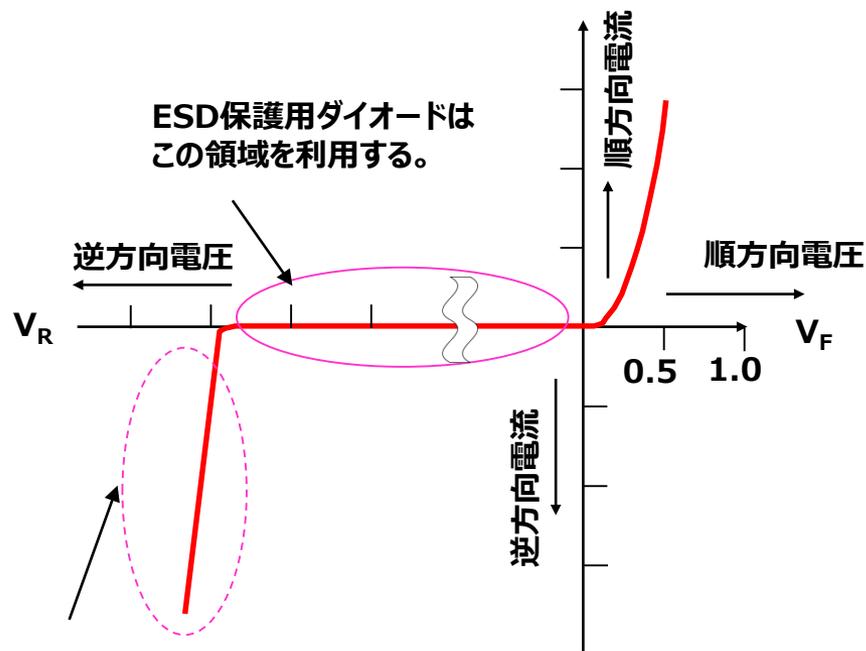
ESD保護用ダイオード

ツェナーダイオードの一種です。主にESD対策用途に使用されるダイオードです。一般的にUSBラインなどから入るESD(静電気)の大きな電圧から集積回路(ベースバンドIC等)を保護する目的に使用されます。**インタフェースなど外部端子から侵入する異常電圧(ESD)を吸収し、回路の誤動作防止およびデバイスを保護**します。静電気・短時間のパルス電圧吸収・抑制対策に最適です。



ESD保護用ダイオードを使用することにより、侵入する静電気(ESD)を吸収し回路の誤動作防止、ICなどのデバイス保護をすることができます！

図2-5 (a) ESD保護用ダイオードの使用例



定電圧ダイオードはこの領域を利用する

図2-5(b) ESD保護用ダイオードの電気的特性

ESD保護用ダイオードと定電圧ダイオードの違い(1)

ESD保護用ダイオードは、図2-6(a)に示すように短時間で非常に大きな過電圧を吸収し、一定電圧以上の電圧を他の半導体製品に印加しないように働きます。

他方、図2-6(b)のように定電圧ダイオードは、入力された電圧を一定の電圧にクランプし、定電圧を他の半導体部品に供給します。

従いまして、ESD保護用ダイオードは電圧サージを吸収し他の半導体製品を守る、定電圧ダイオードは定電圧(源)を他の半導体製品に供給する働きをします。

ESD保護用ダイオード

静電気、短時間パルスの吸収、抑制

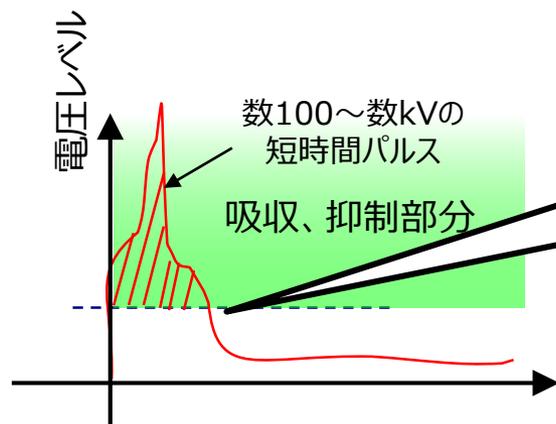


図2-6(a) ESD保護用ダイオードの使用法

定電圧ダイオード

定電圧制御、基準電源

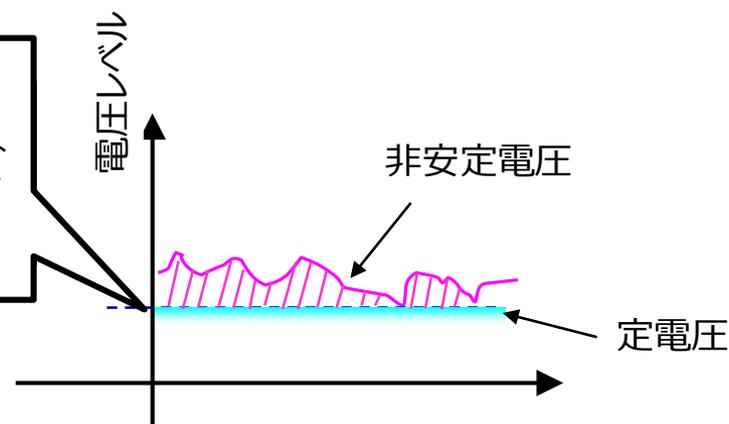
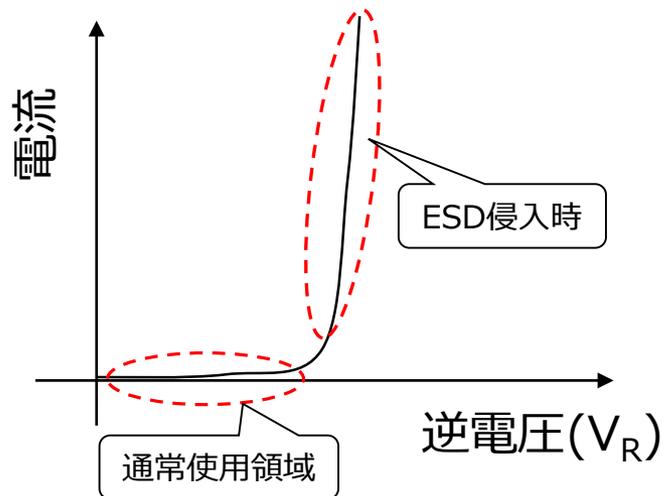


図2-6(b) 定電圧ダイオードの使用法

両ダイオード共に一定電圧以上をカットする働きは同じですがその目的が違います。

ESD保護用ダイオードと定電圧ダイオードの違い(2)

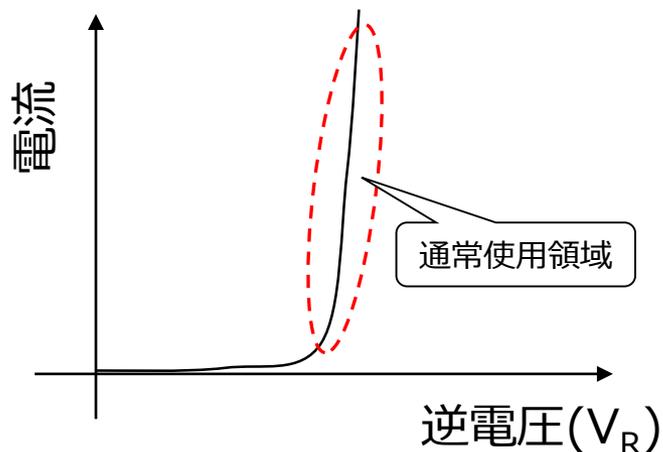


《ESD保護用ダイオード：図2-7(a)参照》

通常は、逆阻止状態（電流がほとんど流れず電圧のみが印加される）で使用します。

一定の電圧（クランプ電圧）を超える電圧が印加された時のみ降伏（クランプ）動作が発生します。

図2-7(a) ESD保護用ダイオードの使用領域



《定電圧ダイオード：図2-7(b)参照》

通常は、電流を流し降伏状態で使用します。

常に降伏（ツェナー）電流を流す使用方法を想定しています。

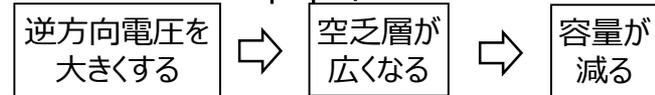
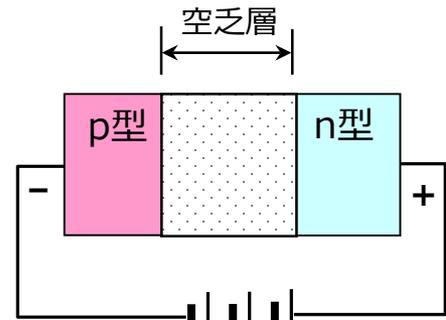
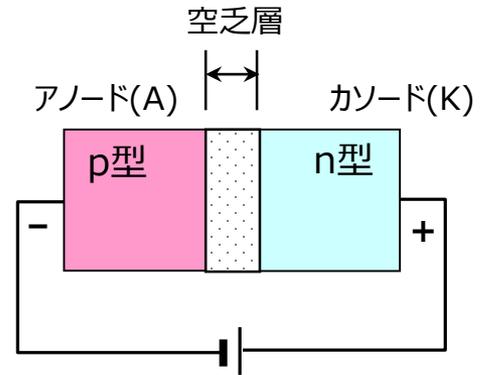
図2-7(b) 定電圧ダイオードの使用領域

可変容量ダイオード

可変容量ダイオードは空乏層の容量特性を活用した製品です。**空乏層は電圧を逆方向に掛けた場合にダイオードのpn接合に発生し、逆電圧に比例して厚みが増加します。**

このため印加される逆電圧が増加すると、あたかもコンデンサの2枚の電極の間隔が広がったようになりますので容量が小さくなり、反対に逆電圧が低いと容量は大きくなります。

チューナなどの同調回路に用いられます。この容量の変化により周波数特性を変化させるため、通常のダイオードに**比べ大きい容量変化比が要求**されます。



可変容量ダイオードはこの範囲を利用する。

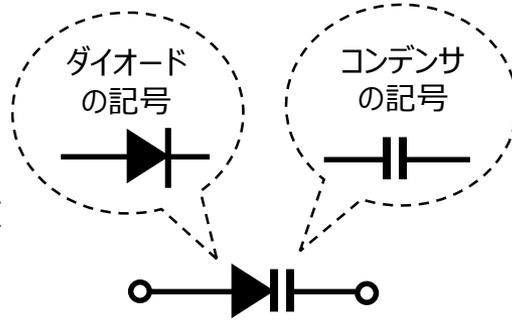
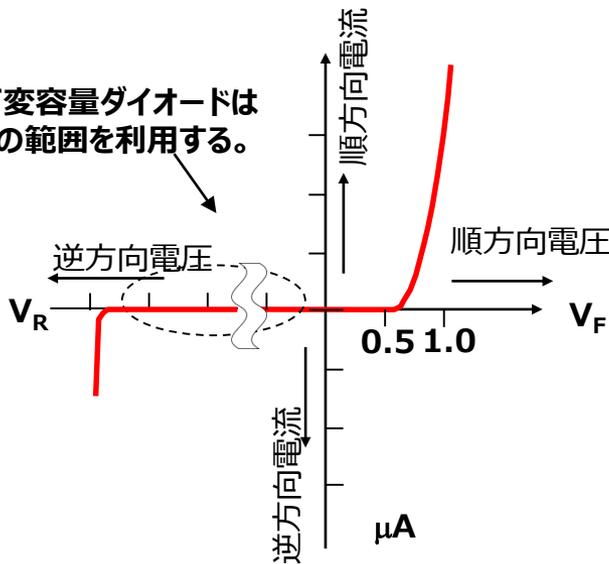


図2-8(b) 可変容量ダイオードの記号

図2-8(c) 可変容量ダイオードの空乏層と容量の関係

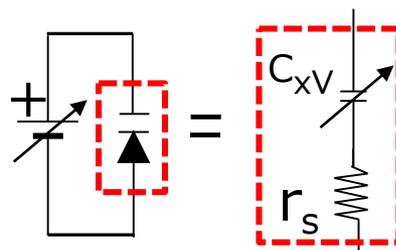
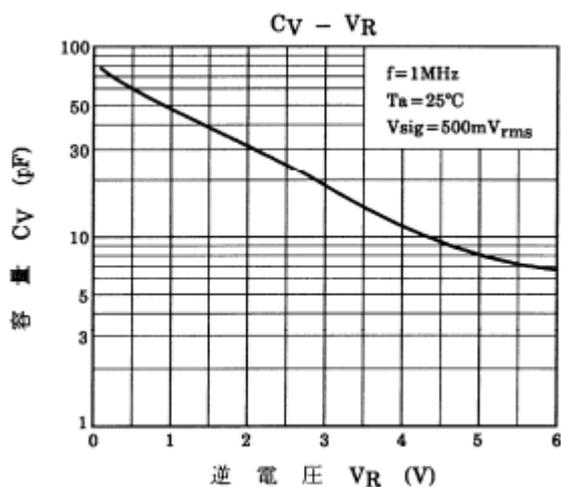
図2-8(a) 可変容量ダイオードの電気的特性

可変容量ダイオード

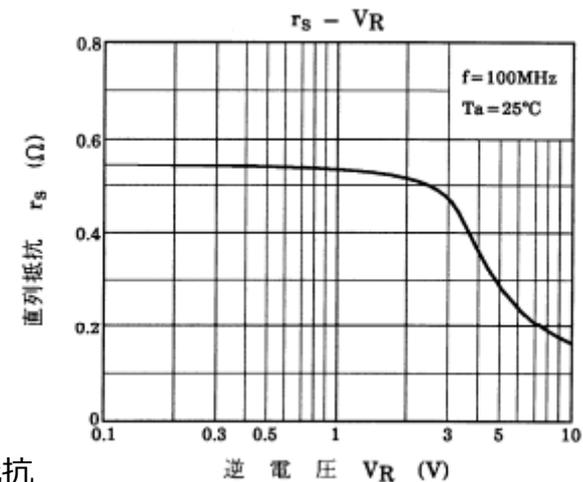
電気的特性 (Ta = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
逆電圧	V_R	$I_R = 1 \mu A$	10	—	—	V
逆電流	I_R	$V_R = 10 V$	—	—	3	nA
容量	C_{1V}	$V_R = 1 V, f = 1 MHz$	44	—	49.5	pF
容量	C_{6V}	$V_R = 6 V, f = 1 MHz$	5.4	—	7.3	pF
容量比	C_{1V} / C_{6V}	—	6.3	7.5	—	—
直列抵抗	r_s	$V_R = 4 V, f = 100 MHz$	—	0.4	0.8	Ω

可変容量ダイオードの重要な特性は、他のダイオードのように順電圧 V_F 、スイッチング特性などでは無く容量特性とその容量の変化量（電圧に対する依存性）となります。



r_s : 等価直列抵抗



ショットキバリアダイオード(SBD)

ショットキバリアダイオード(Schottky Barrier Diode)は、**pn接合の代わりに半導体とモリブデンなどの金属を接合した構造の素子**で、一般的にn型半導体と金属を接合したSBDが製品化されています。**順方向電圧が小さく逆回復時間(注)が短いことから高速スイッチング動作に適しています。**

SBDの順電圧(V_F)と逆電流には、逆相関関係(これをトレードオフという)があります。

使用される金属により変わってきますが、一般的に耐圧は20~150V程度、 V_F は0.4~0.7V程度とpn接合ダイオードより低耐圧・低 V_F の特性となっています。

現在は、低い順電圧を維持しながら逆電流を抑えた新構造のSBDも製品化されています。

(n型半導体層の金属界面側をトレンチ構造とすることにより低 V_F と低漏れ電流特性を達成している。)

注：SBDはユニポーラー素子のためpn接合ダイオードのようなキャリアの再結合による逆回復時間はありません。しかしながら、SBDの端子間容量を充電する電流波形がpn接合ダイオードの逆回復時間のように観測されることから、ここでは逆回復時間と記載しています。

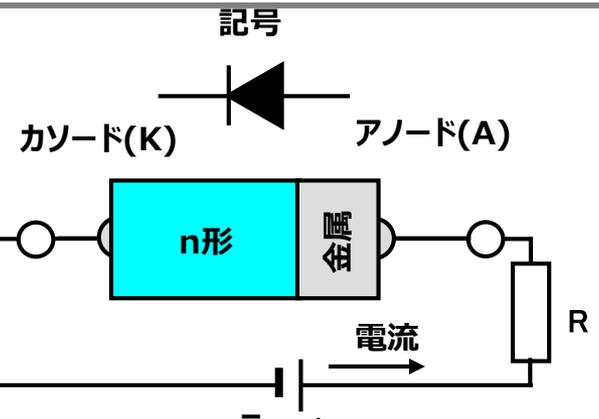


図2-9(a) ショットキバリアダイオードの構造と記号

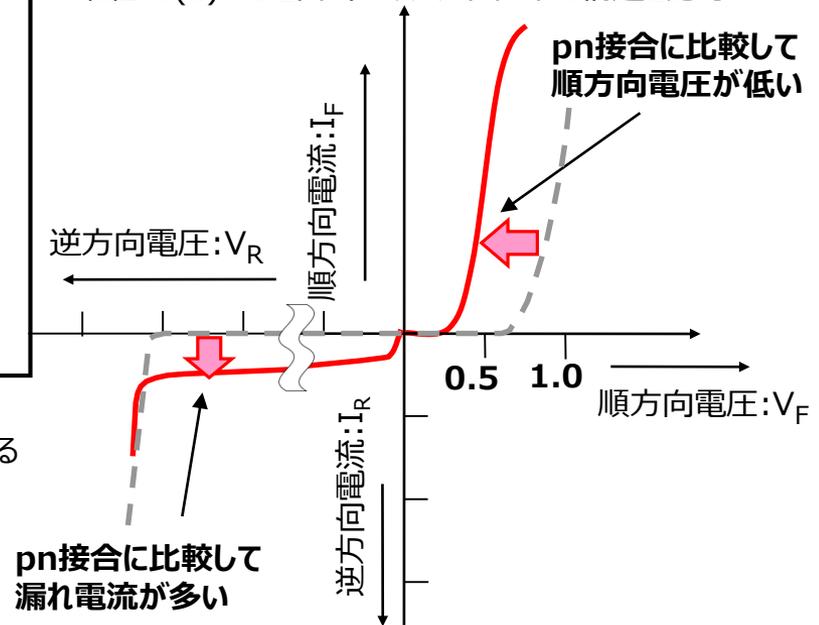
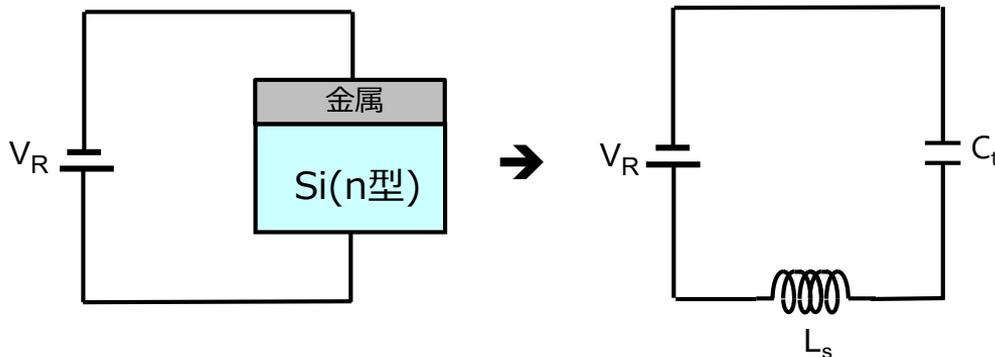


図2-9(b) ショットキバリアダイオードの電気的特性

SBDの逆回復特性

SBDの逆回復時間 t_{rr} (注)は、SBDの端子間容量特性と外部配線のインダクタンスで構成されるLC共振回路により決定されます。この端子間容量がほとんど温度により影響を受けない事から、SBDの t_{rr} 特性は温度により変化することがありません。(常温～高温で同じ t_{rr} 特性となります。)
 他方、pn接合ダイオードは、高温になればなるほど長い時間となり、SBDの高速スイッチング特性はますます優位となり、より高周波のスイッチングに適しています。



注：SBDはユニポーラー素子のためpn接合ダイオードのようなキャリアの再結合による逆回復時間はありません。しかしながら、SBDの端子間容量を充電する電流波形がpn接合ダイオードの逆回復時間のように観測されることから、ここでは逆回復時間と記載しています。

C_t : 端子間容量
 L_s : 回路の寄生インダクタ

図2-10(a) SBDに逆方向電圧(V_R) をかけたときの等価回路

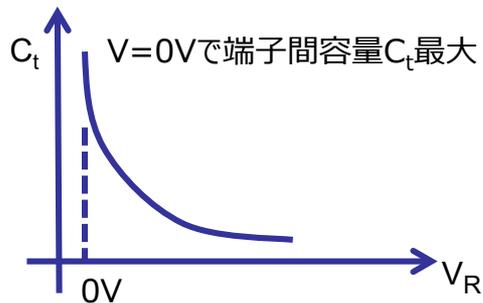


図2-10(b) SBDの端子間容量特性

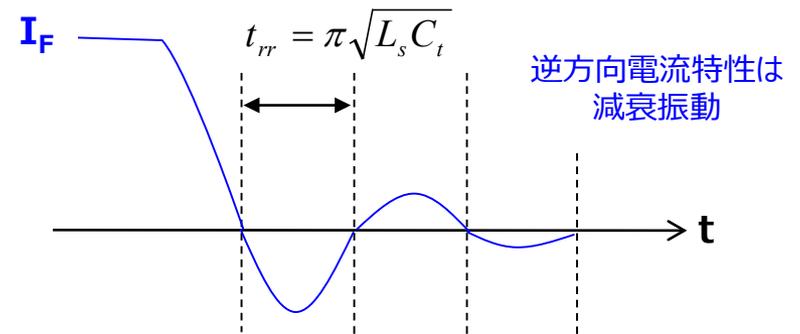
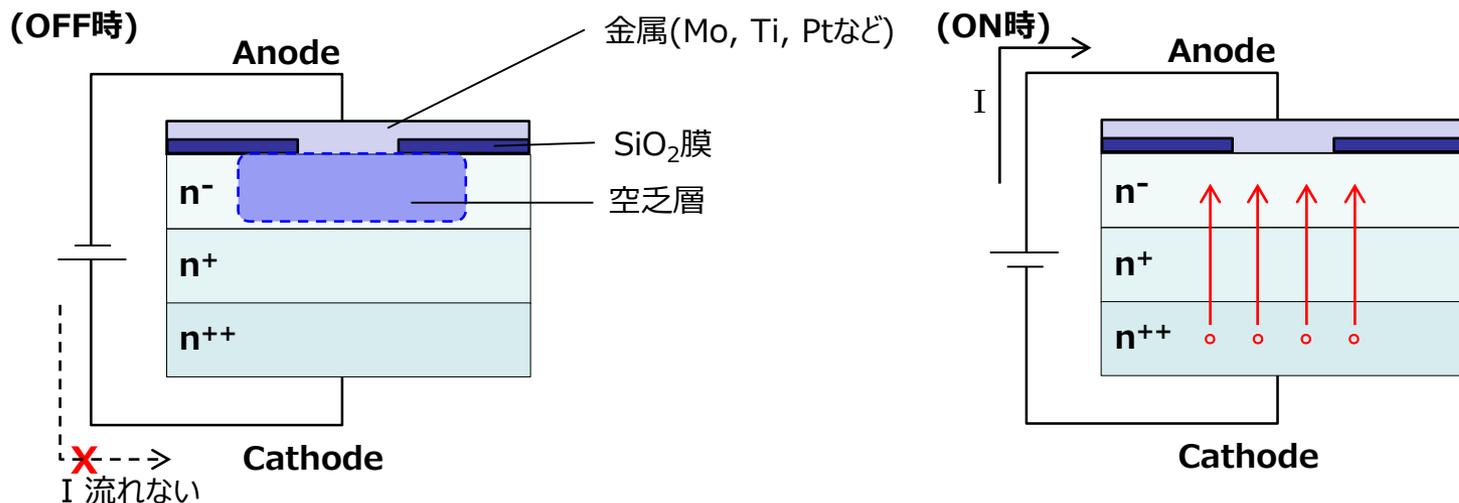


図2-10(c) SBDの代表的逆回復特性

SBDの金属による差

SBDの場合、金属はpn接合ダイオードのアノードとして働きます。また、半導体はn層だけですので動作の担い手は、**電子(エレクトロン)のみとなりMOSFETと同様にユニポーラ素子となります。**
 金属材料によりシリコンのエネルギー準位と金属との差(エネルギーギャップ)が異なります。この差を Φ_B と表し、大きい金属の代表格は Pt(白金)、低い金属は V(バナジウム)や Ti(チタン)があります。 **Φ_B が大きい金属を使用すると低漏れ電流ですが、順電圧 V_F は大きくなります。 Φ_B の小さいVやTiではその逆の特性となります。**



	Pt	Mo	V	Ti
Φ_B	大 ←			→ 小
V_F	大 ←			→ 小
I_{RRM}	小			→ 大

金属の仕事関数

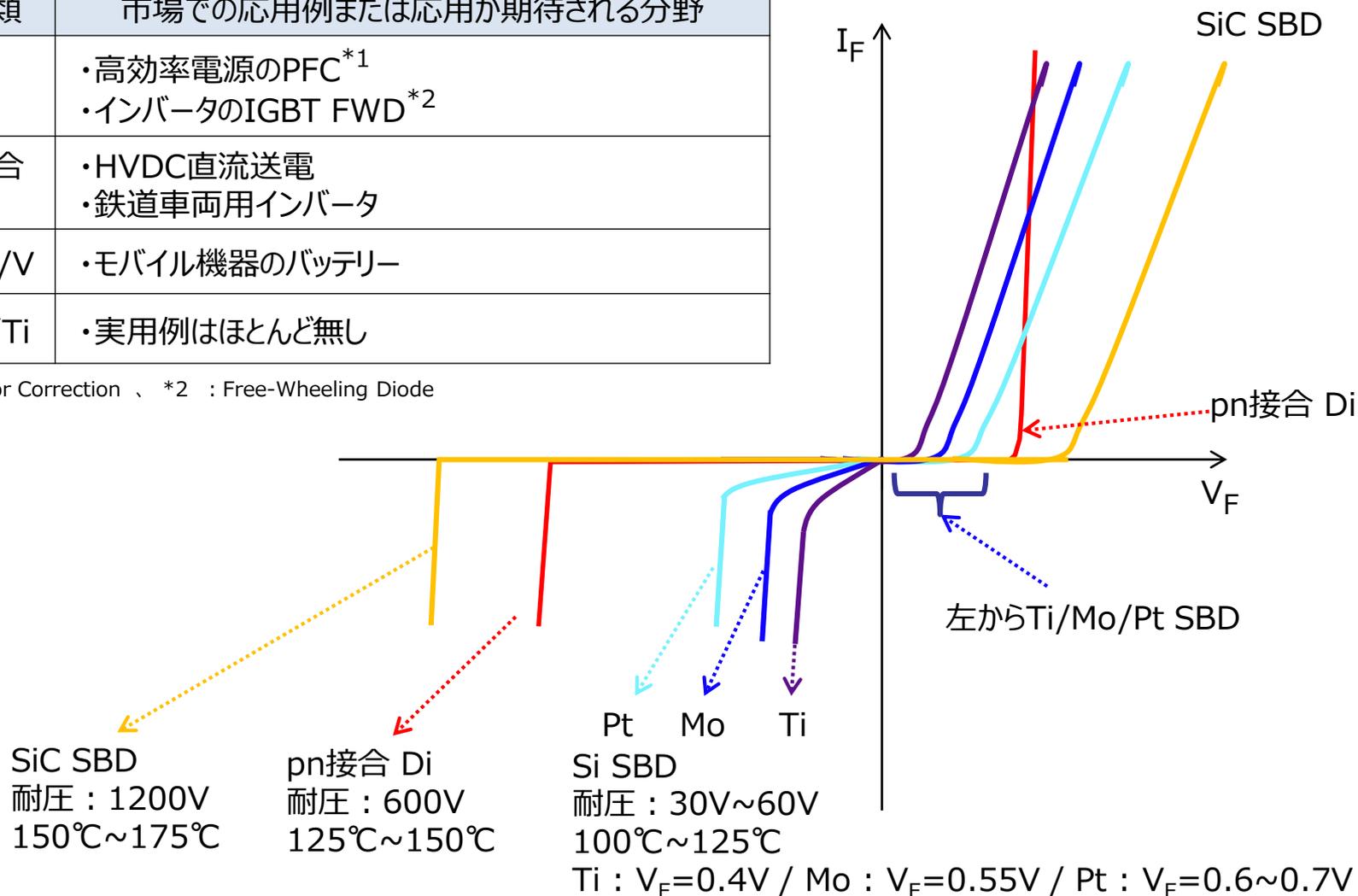
Φ_B : エネルギー準位差 (ショットキー障壁)

Si のエネルギー準位

各種ダイオードの特性と応用

Diodeの種類		市場での応用例または応用が期待される分野
SiC SBD		<ul style="list-style-type: none"> ・高効率電源のPFC^{*1} ・インバータのIGBT FWD^{*2}
SiC、pn接合 Diode		<ul style="list-style-type: none"> ・HVDC直流送電 ・鉄道車両用インバータ
Si SBD	Mo/V	・モバイル機器のバッテリー
	Pt/Ti	・実用例はほとんど無し

*1 : Power Factor Correction 、 *2 : Free-Wheeling Diode



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。

TOSHIBA