

キャパシタフォーラム

# パワーエレクトロニクス基礎講座

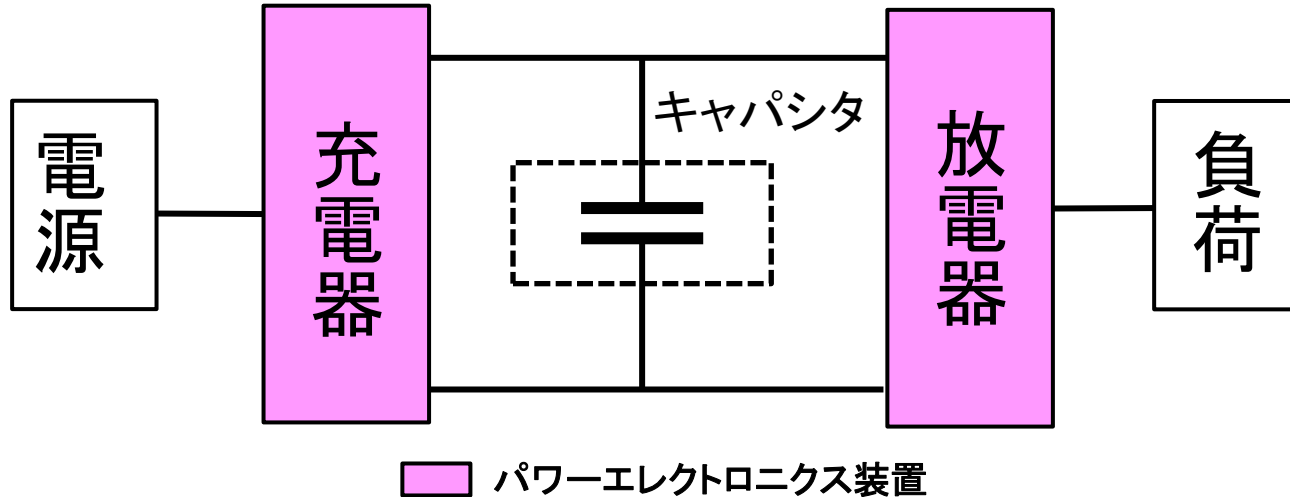
木下 繁則

第4回 (2018-10-12)

## パワー半導体デバイス(2)

逆回復電流とスナバ

# キャパシタとパワーデバイスとの関わり



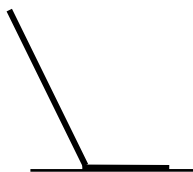
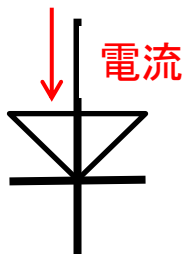
パワーエレクトロニクスの基礎講座として“パワーデバイス”  
3回シリーズの2回目で“逆回復電流”について解説します。

1980年代から実用化が進展したバイポーラ形Siパワーデバイスの大きな課題はデバイス固有の“逆回復電流”の克服でありました。

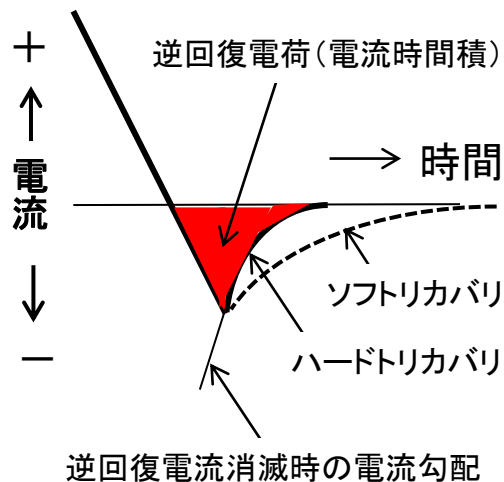
# 逆回復電流とは？

オン状態から逆阻止状態に切り換わるとき流れる逆電流。

## 理想ダイオード



## バイポーラダイオード



ターンオフの際、過渡的に流れる逆電流の時間積分値として算定される電荷を逆回復電荷と呼ぶ。指定の接合温度にて指定の電流を流した後、指定の電流減少率にて順方向から逆方向に切り換わり、逆回復電流がピーク値に達した後に、0になる過程の電流減少率が緩やかなものをソフトリカバリと呼び、急なものをハードリカバリと呼ぶ。

(電気学会 電気専門用語集 No.9 パワーエレクトロニクスより)

# 半導体の基本構造

(パワーエレクトロニクス基礎講座第3回(2018-9-21) p17 再掲)

## 半導体の基本構造

半導体は何をキャリアとするかによってその基本構造が決まります。  
半導体の基本構造には**p型半導体**と**n型半導体**とがあります。

### p型半導体

p型半導体はそのキャリアが正孔(ホール)とした半導体です。

### n型半導体

n型半導体はそのキャリアが電子とした半導体です。

# 半導体の用語

(パワーエレクトロニクス基礎講座第3回(2018-9-21) p14 再掲)

## バルブデバイス

可制御・非可制御によらず一方向のみに実質的な電力損失なしに通電する機能をもち、電力変換または電力開閉に使用される**最小単位の電子デバイス**。

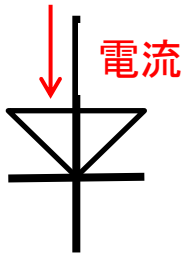
## バイポーラ型

半導体の電流の流れを電子(自由電子)及び正孔(ホール)の2つのキャリアによって行う半導体を**バイポーラ型半導体**と言います。

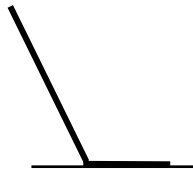
## ユニポーラ型

半導体の電流の流れを電子(自由電子)又は正孔(ホール)うち、どちらのキャリアによって行う半導体を**ユニポーラ型半導体**と言います。

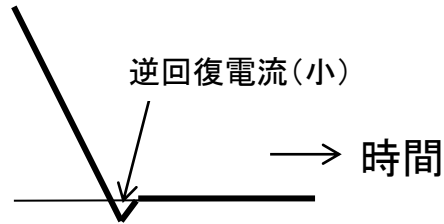
# デバイス構造と逆回復電流



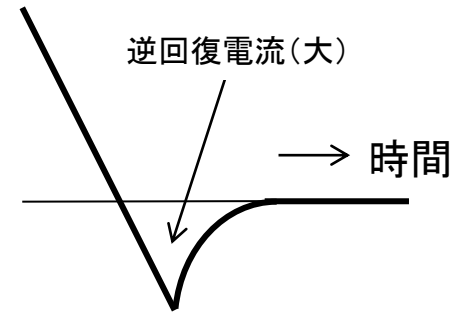
理想形



ユニポーラ形

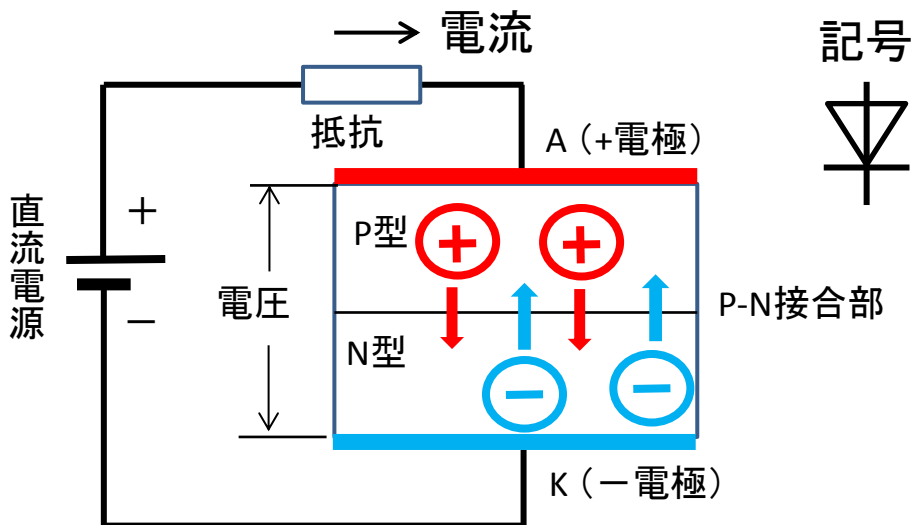


バイポーラ形

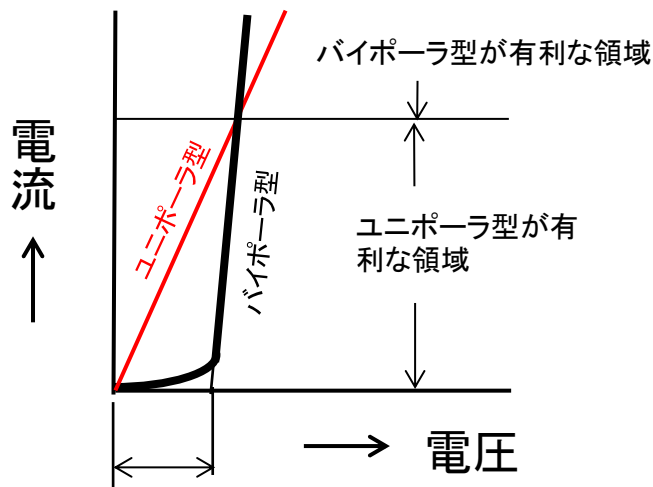


# バイポーラ半導体の基本動作(1)

## — ダイオードオン動作 —



ダイオードの電流-電圧特性



P型半導体内の ⊕ はK極(-電位)に、N型半導体内の ⊖ はA電極(+電位)に引かれて、両電極に向けて移動します。PN半導体内には両キャリア存在する状態となります。

キャリア

- ⊕ ホール(正孔)
- ⊖ 電子

立上り電圧

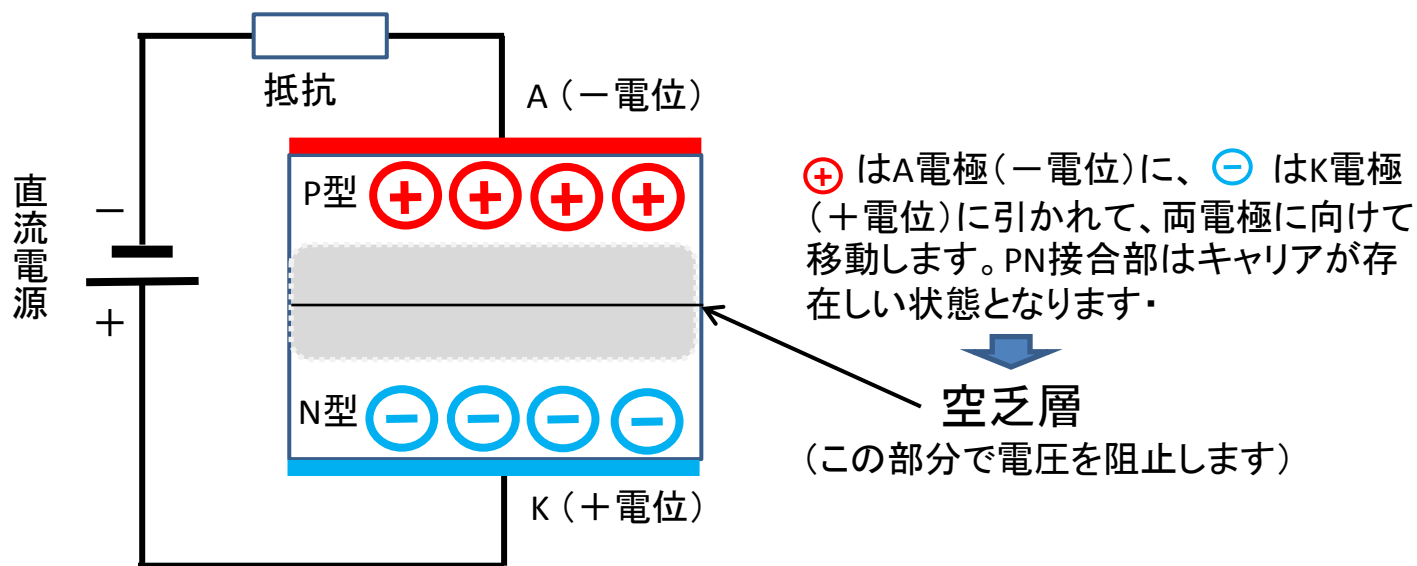
立上り電圧は開発当初(1970~1980年代)、えん層(堰層)電圧と呼んでいました。キャリアがP-N接合部を通過する時に乗り越える電圧との意味から。

A:Anode(アノード) K:Kathode(カソード)

(パワーエレクトロニクス基礎講座第3回(2018-9-21) p122 再掲)

# バイポーラ半導体の基本動作(2)

## — ダイオードオフ動作 —

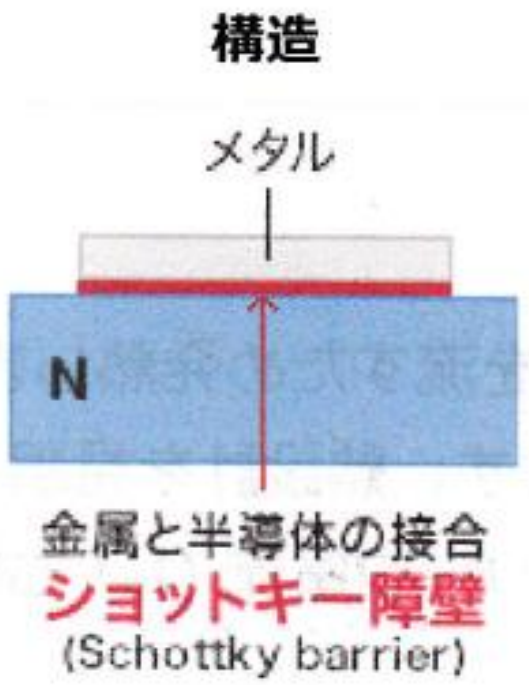


(パワーエレクトロニクス基礎講座第3回(2018-9-21) p123 再掲)

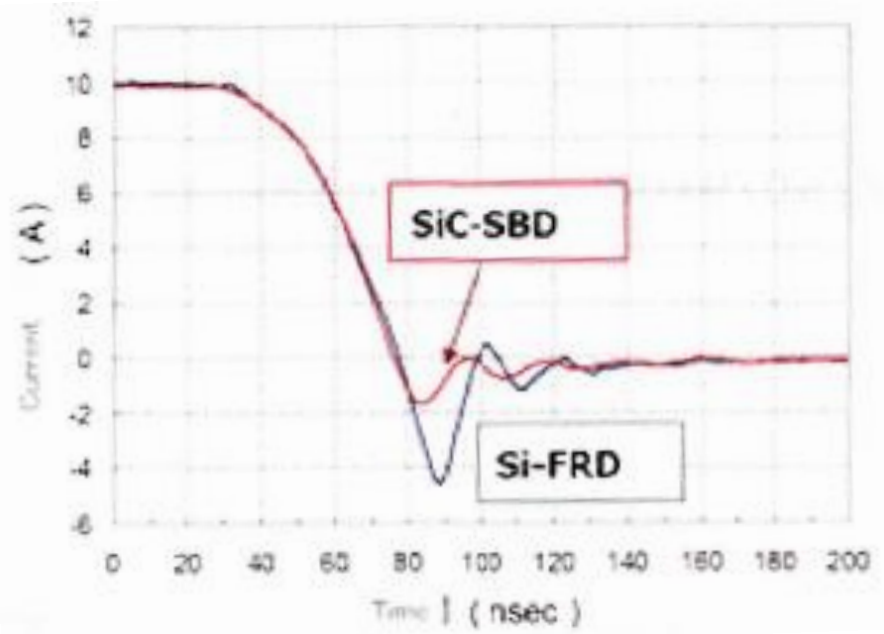


# ユニポーラ半導体の動作

## ショットキー・バリアダイオードの例



ショットキーバリアダイオードは金属と半導体と間のショットキー接合の整流作用を利用したダイオードです。



# バイポーラ型半導体の 逆回復電流の発生メカニズム(1)

## ①の点

・電流が+電極から-電極に流れ続けている状態。

(電子が-電極に入り、+電極から出て行く)

・p型層とn型層にはホールと電子が充満した状態。

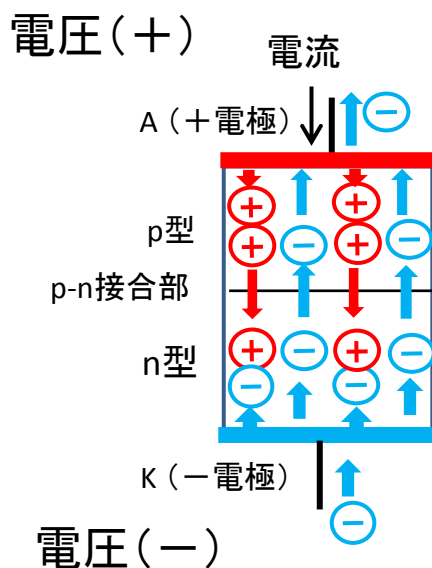
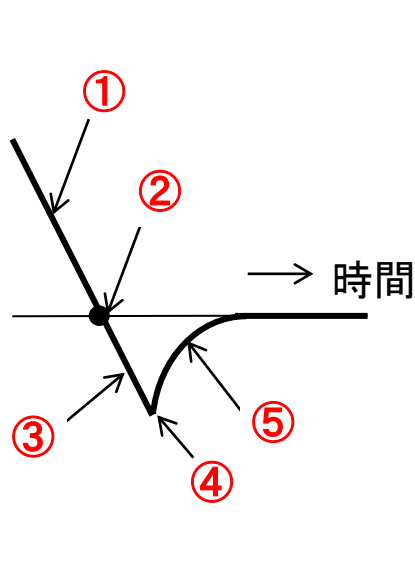
・電子は+電極とのクーロン力を受け+電極に向けて、ホールは-電極とのクーロン力を受け、-電極に向かって移動します。

・+電極から電子が1個飛び出すとそれに対応してP型層にホールが1個が発生します。

・p型層のホールは-電極からのクーロン力を受け、p-n接合を通過してn型層に移動します。

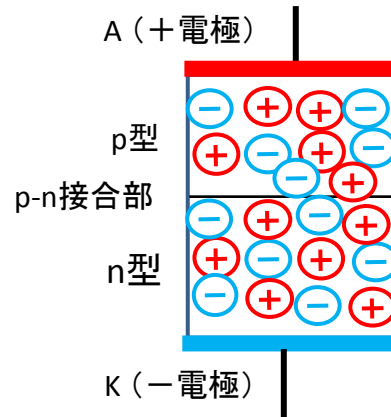
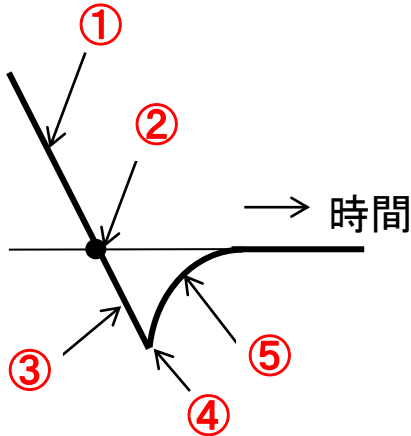
・-電極からは入った電子はn型層を通り抜け、p-n接合部を通り抜けて、p型層を通過して+電極に到達。電子は+電極から出て行きます。

・n型層に入ったホールは電子が結合してそれぞれ消滅します。(キャリア再結合)



# バイポーラ型半導体の 逆回復電流の発生メカニズム(2)

## ②の点

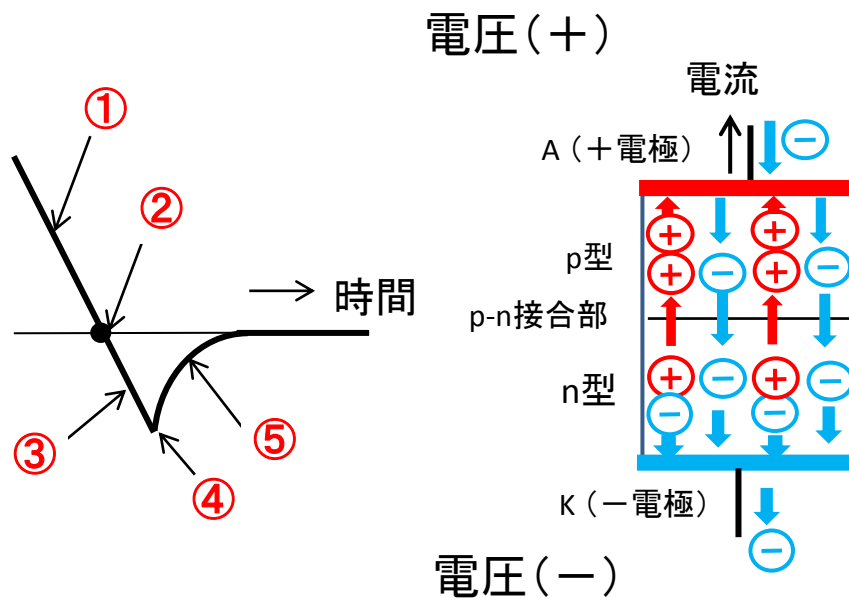


電流はゼロであるので、両電極からの電子の流出、流入はありません。

p型層とn型層には電子とホールは充満しているが電子は移動しません。

# バイポーラ型半導体の 逆回復電流の発生メカニズム(3)

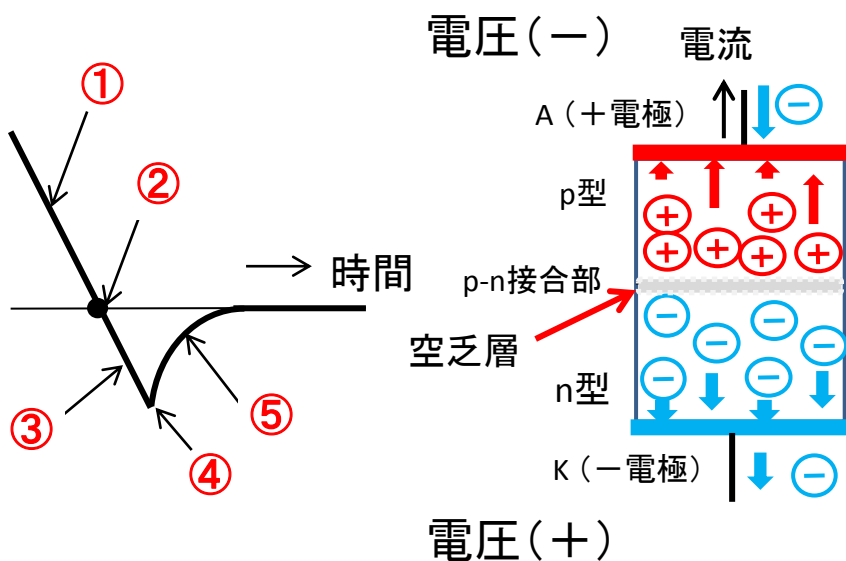
## ③の点



- ・p型層とn型層にはホールと電子が混在した状態で充満している状態。  
(電子は、+電極から入り、-電極から出て行きます)。
- ・電気回路の電流を流せる量のホールと電子が充満しています。
- ・ダイオードの電圧(極性)は変わらず、①と同じ。
- ・電極電圧は反転しているので、p型層とn型層に充満していた電子とホールは①とは逆向きのクーロン力が働き、①とは逆向きに移動する。
- ・n型層のホールはp-n接合部を抜けてp型層に、p型層の電子はp-n接合部を抜けてn型層に移動する。
- ・+電極から流れ込んだ電子はp型層のホールと結合してホールが消滅(キャリア再結合)。

# バイポーラ型半導体の 逆回復電流の発生メカニズム(4)

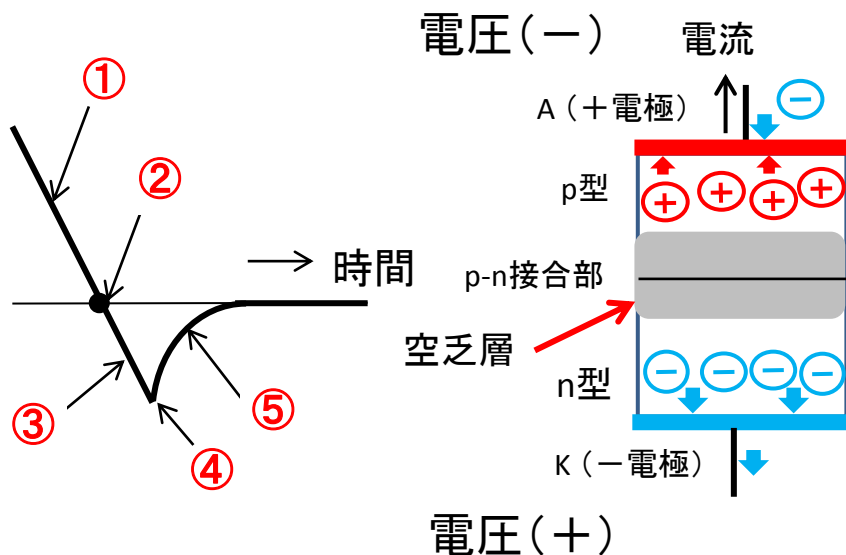
## ④の点



- ・一電極から電子が流れ出し、ホールと電子が混在して充満した状態が終わり、p-n接合部を超えて移動するホールと電子がなくなります。
- ・電気回路の電流を流せる量のホールと電子が充満しています。
- ・p型層では、+電極から流入した電子とホールの結合が続き、ホールの量が減少し始めます。
- ・n型層では、電子が-電極から流れだし、電子の量が減少し始めます。
- ・p-n接合部のホールと電子消滅して空乏層が出来始めて、p-n接合部に電圧が現れます。
- ・ダイオードの電圧(極性)は反転します(③の電圧に対して)。

# バイポーラ型半導体の 逆回復電流の発生メカニズム(5)

## ⑤の点



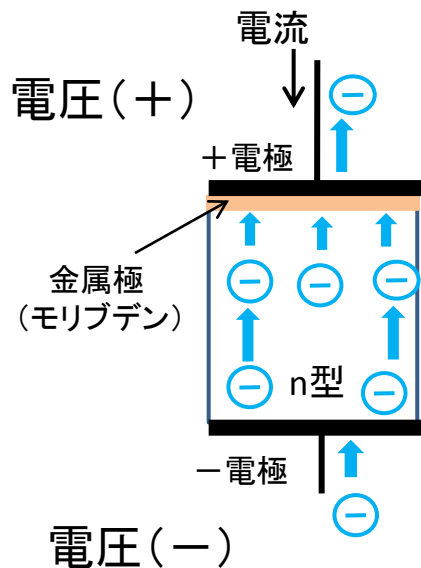
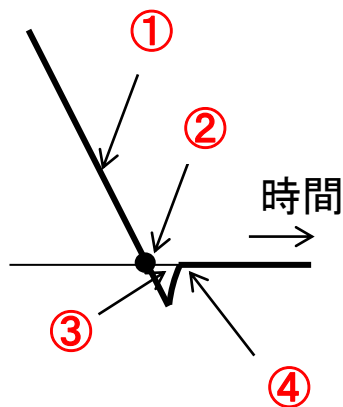
n型層では、電子が-電極から流れだす電子の量(+電極から流れ込む電子の量)は時間と共に減少して行き、ゼロとなります。

p-n接合部の空乏層も時間と共に増大して行きます。

電流がゼロになってから規定時間でオフ動作が完了します。

# ユニポーラ半導体 逆回復電流の発生メカニズム(1)

## ①の点



電流が+電極から-電極に流れ続けている状態。

(電子が-電極から入り、+電極から出て行きます。)

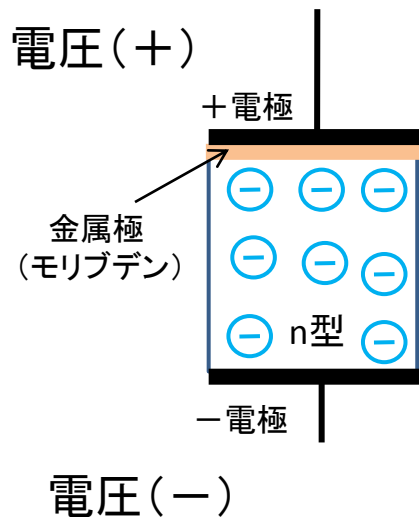
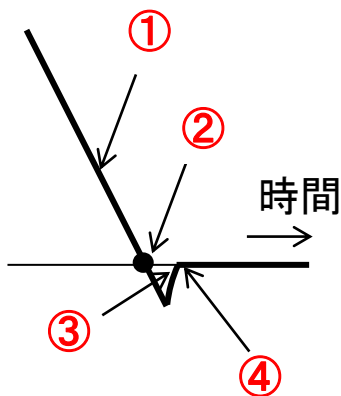
n型層には電子が充満した状態。

電子は+電極とのクーロン力を受け、+電極に向かって移動します。

n型層の電子1個が金属極(モリブデン)に入り込むとそれに対応して-電極から電子1個がn型層に入り込みます。

# ユニポーラ半導体 逆回復電流の発生メカニズム(2)

## ②の点



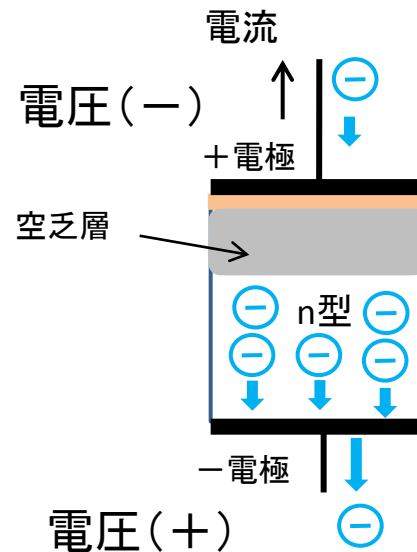
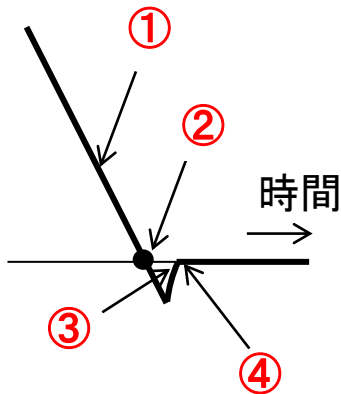
電流はゼロであるので、両電極からの電子の流出、流入はありません。

n型層には電子は充満していますが、電子の移動はありません。



# ユニポーラ半導体 逆回復電流の発生メカニズム(3)

## ③の点



n型層には電気回路の電流を流せる量の電子が充満している状態です。

電極電圧は反転していますので、n型層に充満していた電子は①とは逆向きのクーロン力が働き、①とは逆向きに-電極に移動します。

n型層の電子は-電極から出て行きます。

+電極から金属極に流れ込んだ電子は金属極の結晶内に取り込まれます。

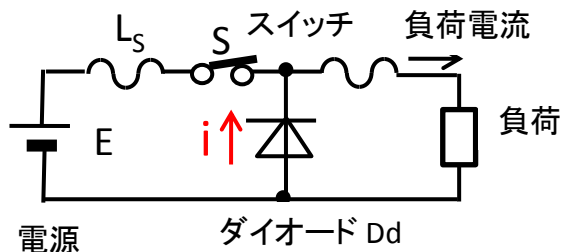
n型層の電子が減少して空乏層が出来始めて空乏層に電圧が現れます。

n型層の電子の流出がなくなるとオフ動作が終了します。

# バイポーラ半導体は逆回復電流が大きいのが欠点

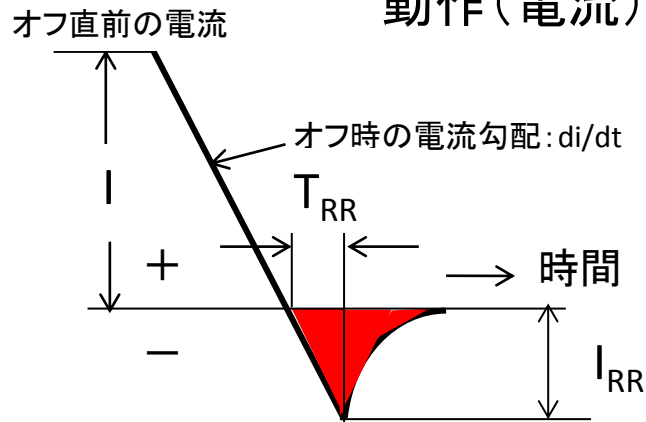
# バイポーラ型半導体の逆回復電流

## 動作(回路)



- ① スイッチSをオンするとダイオードDdの電流はE/Lsの勾配でゼロに向かって減少して行きます。
- ② 電流がゼロになっても流れ続け、電流の向きは逆向きになります(左図の朱色部)。この電流が逆回復電流です。

## 動作(電流)



RR : Revers Recovery

## 逆回復電流を表す用語

$I_{RR}$  : 逆回復電流値 (A)

電流がゼロになっても流れ続け、電流の向きは逆向きになります(左図の朱色部)。この電流のピーク値が逆回復電流値です。

$T_{RR}$  : 逆回復時間 (S)

電流がゼロ点を通過し、ピーク値になるまでの時間が逆回復時間です。

## 逆回復電流に影響する特性

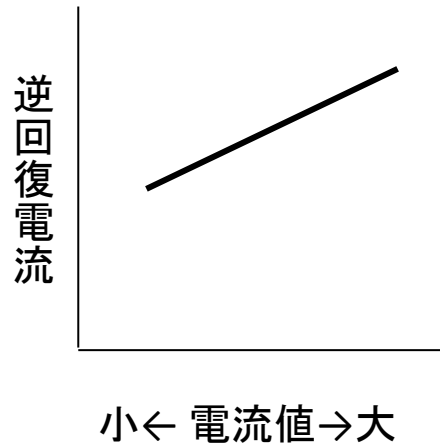
オフ直前の電流値 (A)

オフ時の電流勾配: di/dt (A/S)

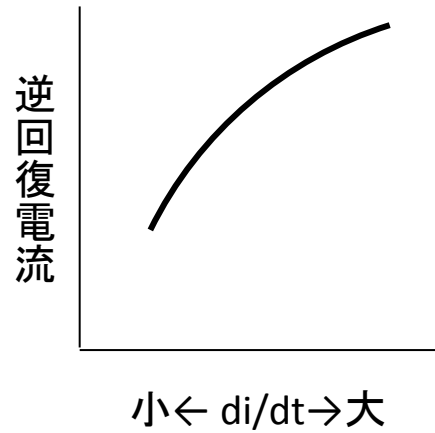
オフ時の素子接合部温度

# 逆回復電流の特性

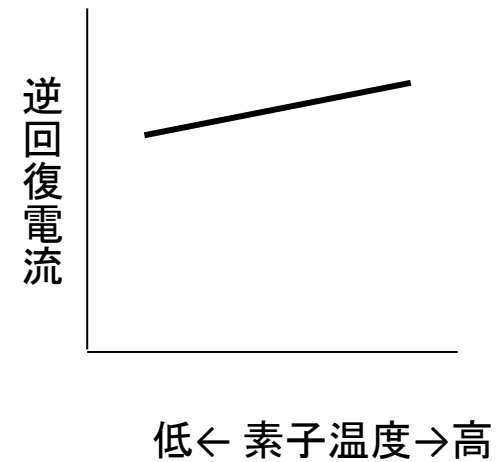
## 電流特性



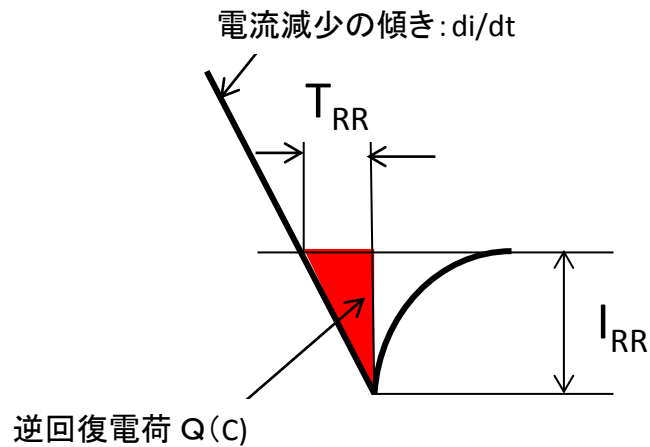
## di/dt特性



## 温度特性



# 逆回復電流のdi/dt特性



$$Q = (T_{RR} \cdot I_{RR}) / 2$$

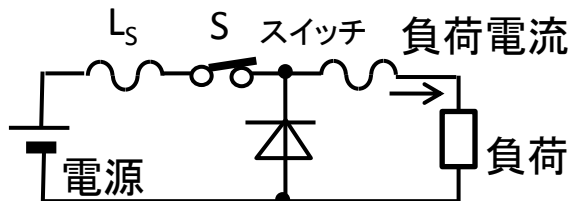
$$T_{RR} = 2Q / I_{RR}$$

$$I_{RR} = di/dt \cdot T_{RR}$$



$$I_{RR} = (di/dt \cdot 2Q)^{1/2}$$

# バイポーラ半導体の逆回復動作

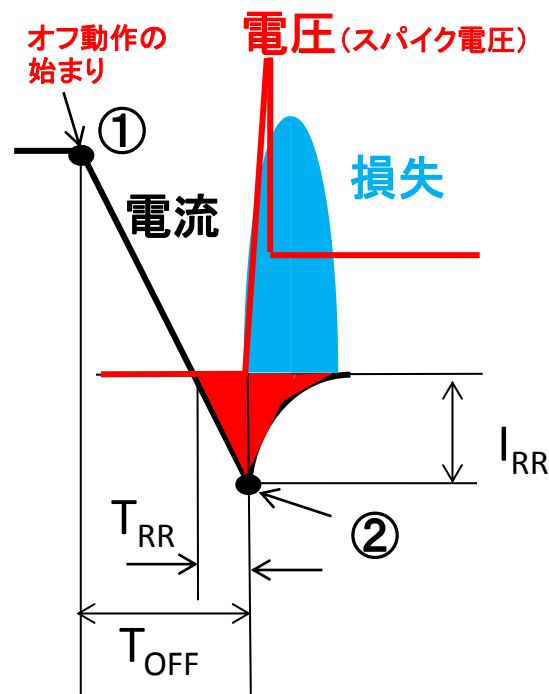


②の点で逆回復が始まるとダイオードに急峻な電圧が発生する(左図)。

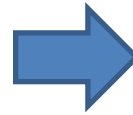
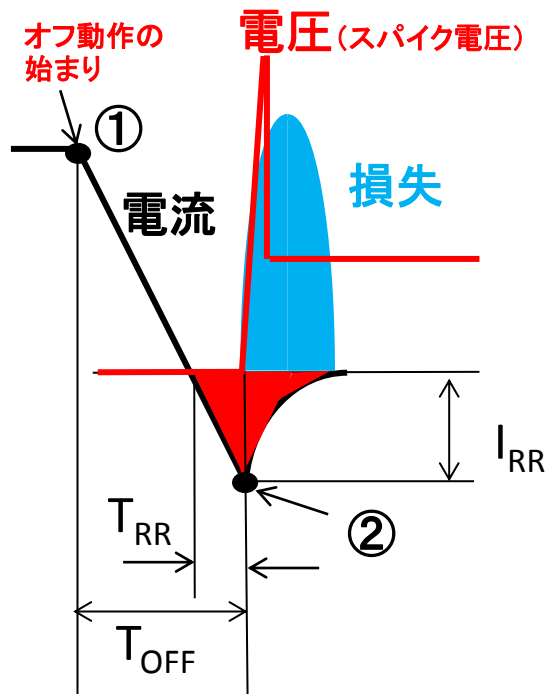
①の点では電流 $I_{RR}$ が流れているので配線インダクタンス $L_s$ には、 $L_s \cdot I_{RR}^2 / 2$ のエネルギーが溜まっています。エネルギー保存の法則から、ダイオード電流が急減するとこのエネルギーによりダイオードに急峻な電圧(スパイク電圧)が発生します。

ダイオードには、電流と電圧の積の損失が発生します(左図の青色)。

①でダイオードがオフ動作が始まってから逆回復は始まる②との時間( $T_{OFF}$ )はダイオードのターンオフ時間で、他の半導体をオンしてはならない時間です。(実際はこの $T_{OFF}$ に余裕を持たせた時間になっています。)



# バイポーラ半導体の逆回復電流の問題点



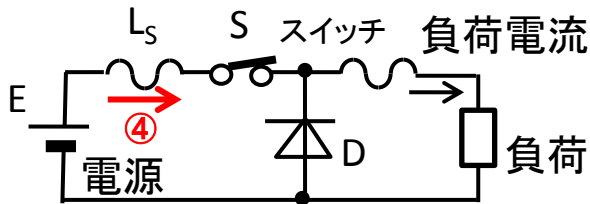
スイッチング周波数を  
高められません。



パワーエレクトロニクスと  
しては致命的な問題点。

# スパイク電圧の発生

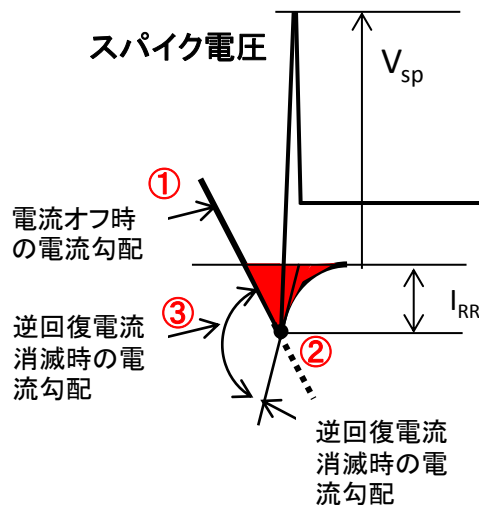
回路



## スパイク電圧発生メカニズム

1. スイッチSがオンするとダイオードDは $E/L_s$ の電流勾配で減少して行きます(左①)。
2. ダイオードDが逆回復しますと逆回復電流は急激に減少して行きます(左②の点)。
3. ②の点では配線インダクタンス $L_s$ には $I_{RR}$ が流れており、この電流が左③で示す勾配で急激に減少が始まります。
4. 電気回路のエネルギー保存の法則で $L_s$ は電流を流れ続けさせよう(左図の破線)と電圧が発生します(左図④)。
5. この $L_s$ の電圧が電源電圧に上乗せされてダイオードに現れます。この電圧がスパイク電圧( $V_{sp}$ )です。
6. このスパイク電圧は理論的には無限大の電圧になるため、ダイオードと並列の**スナバ**を接続します。

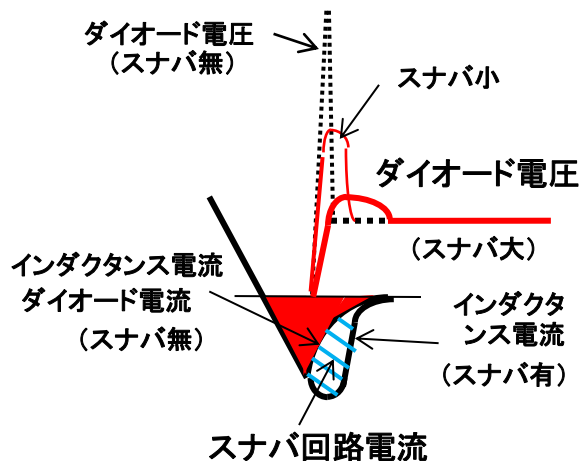
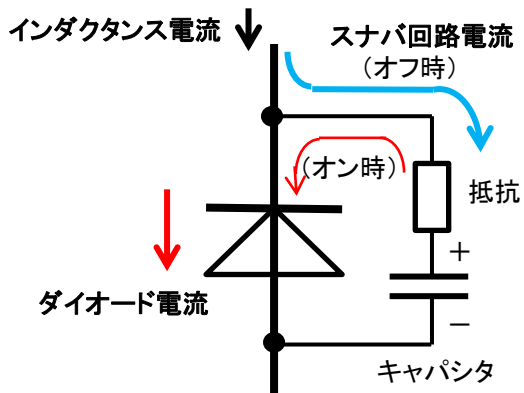
## スパイク電圧





# スナバ

## R-Cスナバ

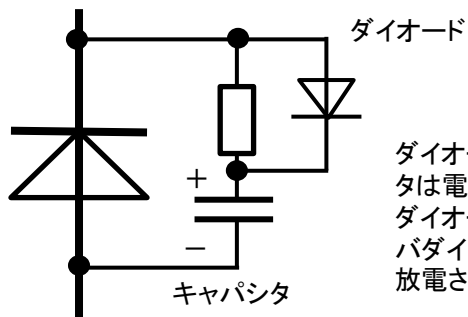


## R-Cスナバ

- ・インダクタンスの電流を流れ続けさせる佐用によって、電流の一部がスナバ回路に流れこみ、スパイク電圧は発生せず、左図のような緩やかな電圧となります。(スナバ効果)
- ・ダイオードオン直前のキャパシタの電圧は電源電圧と同じ電圧となっています。
- ・ダイオードが導通する時、キャパシタは抵抗を介して放電するので抵抗に損失が発生します。



## 放電阻止形スナバ



ダイオードオフ前、キャパシタは電源電圧に充電され、ダイオードがオンしてもスナバダイオードでブロックされ放電されません。

## 放電阻止形スナバ

放電阻止形シナバでは、ダイオードオン時キャパシタの放電がないのでキャパシタをより大きくでき、スパイク電圧をより小さく出来ます。

## キャパシタフォーラム

# パワーエレクトロニクス基礎講座

木下 繁則

第5回 (2018-11-16)

## パワー半導体デバイス(3)

各種パワーデバイス