

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

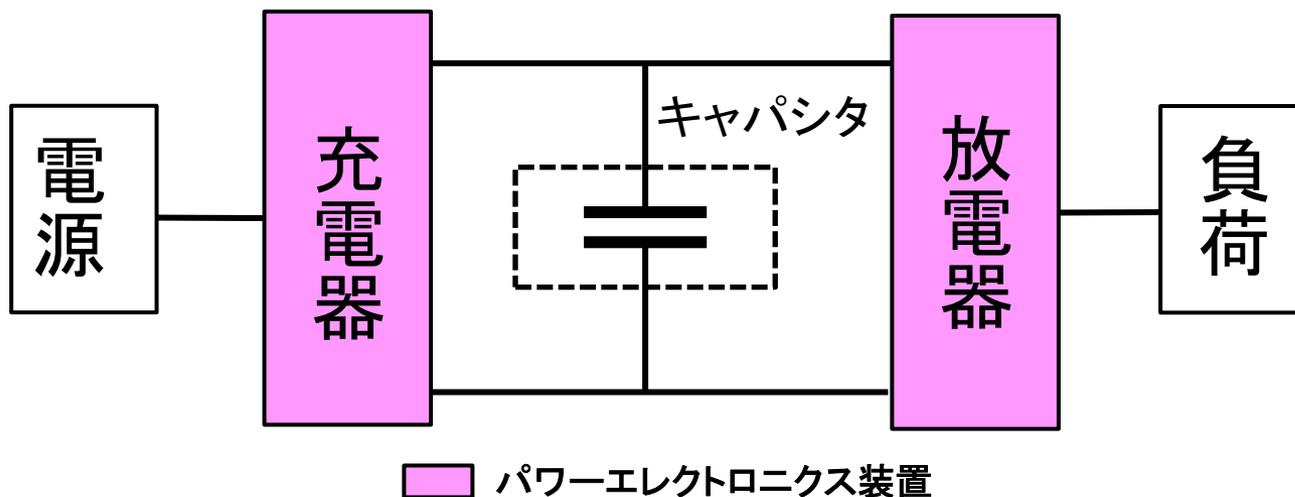
木下 繁則

第3回 (2018-9-21)

パワー半導体デバイス(1)

半導体の基礎

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として“パワーデバイス”は重要で且つ基本技術です。

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”を3回にわたって解説します。

半導体デバイスとは？

半導体中のキャリアの動きを利用した電子バルブデバイス

電気学会 電気専門用語集 No.9の用語より

(キャリア、電子バルブ:後で説明します。)

半導体とは？

「読んで字のごとし」で、電流を流す機能が導体と絶縁物の中間の特性を持った物質。

英語表記：SemiCondctor

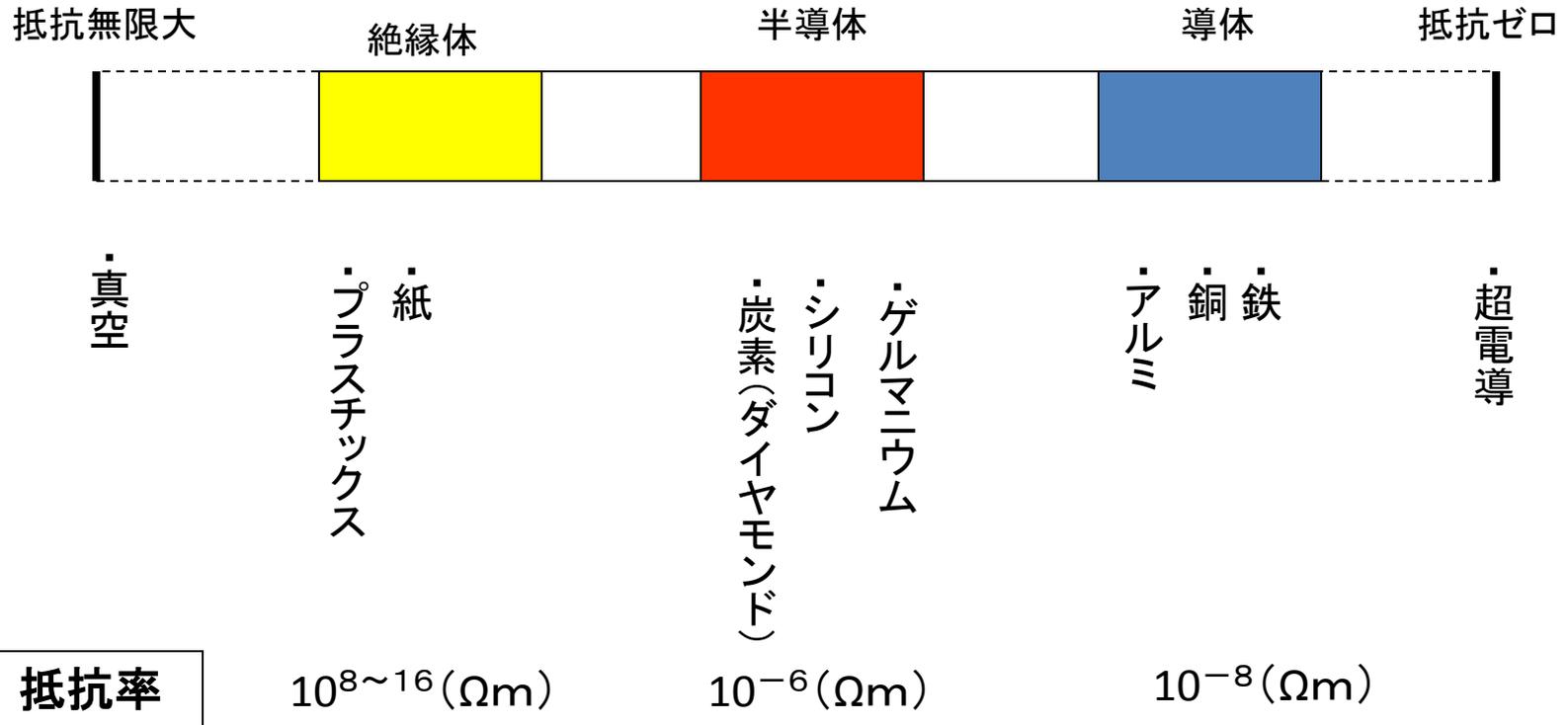


半ば



導体

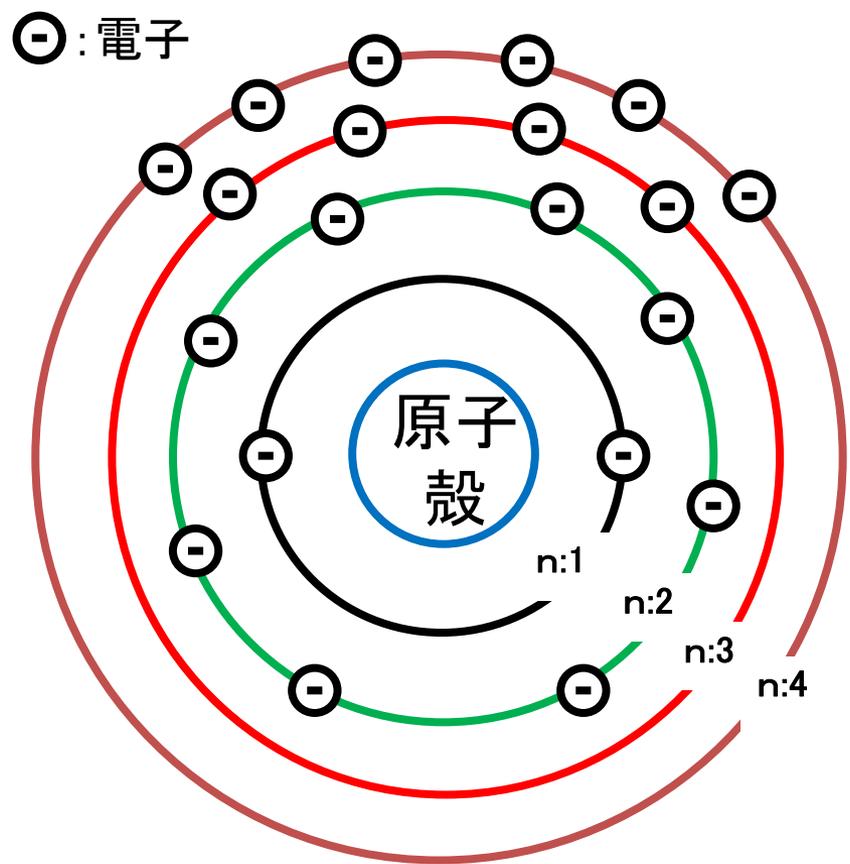
物質の電気抵抗



電子とは？

原子の電子配列

(第1回キャパシタ基礎講座(2015-10-16) P16 再掲)



電子: 負の電気を持った物

電荷量: 1.6×10^{-19} (クーロン)

大きさ: なし (わかっていない)

殻の最大電子数: $2 \cdot n^2$

K殻($n=1$): 2

L殻($n=2$): 8

M殻($n=3$): 18

最外殻の電子数: 原子価

最外殻原子数: 1 \Rightarrow 1 価の原子

最外殻原子数: 3 \Rightarrow 3 価の原子

元素の周期率表

(第1回キャパシタ基礎講座(2015-10-1) P17 再掲)

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be									⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg									¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ L	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ A															
			⁵⁷ L	⁵⁸ La	⁵⁹ Ce	⁶⁰ Pr	⁶¹ Nd	⁶² Pm	⁶³ Sm	⁶⁴ Eu	⁶⁵ Gd	⁶⁶ Tb	⁶⁷ Dy	⁶⁸ Ho	⁶⁹ Er	⁷⁰ Tm	⁷¹ Yb	⁷¹ Lu
			⁸⁹ A	⁹⁰ Ac	⁹¹ Th	⁹² Pa	⁹³ U	⁹⁴ Np	⁹⁵ Pu	⁹⁶ Am	⁹⁷ Cm	⁹⁸ Bk	⁹⁹ Cf	¹⁰⁰ Es	¹⁰¹ Fm	¹⁰² Md	¹⁰³ No	¹⁰³ Lr

■ 典型金属元素 (orange)
■ 半金属元素 (green)
■ 非金属元素 (cyan)
■ 遷移金属元素 (yellow)
■ 希ガス (pink)

Copyright © 2002 RICE

出典: Iホームページ <http://cinfo.ims.ac.jp/periodic/indexj.html>

原子の電子配列と半導体

(第1回キャパシタ基礎講座(2015-10-1) P18 再掲)

元素名	原素記号	K	L	M	N
水素	1H	1			
ヘリウム	2He	2			
リチウム	3Li	2	1		
ベリリウム	4Be	2	2		
ホウ素	5B	2	3		
炭素	6C	2	4		
窒素	7N	2	5		
酸素	8O	2	6		
フッ素	9F	2	7		
ネオン	10Ne	2	8		
ナトリウム	11Na	2	8	1	
マグネシウム	12Mg	2	8	2	
アルミニウム	13Al	2	8	3	
ケイ素	14Si	2	8	4	
リン	15P	2	8	5	
硫黄	16S	2	8	6	
塩素	17Cl	2	8	7	
アルゴン	18Ar	2	8	8	
カリウム	19K	2	8	8	1
カルシウム	20Ca	2	8	8	2

価電子:0 ⇒ 安定した原子

価電子:1

価電子:2

価電子:3

価電子:0 ⇒ 安定した原子

価電子:1

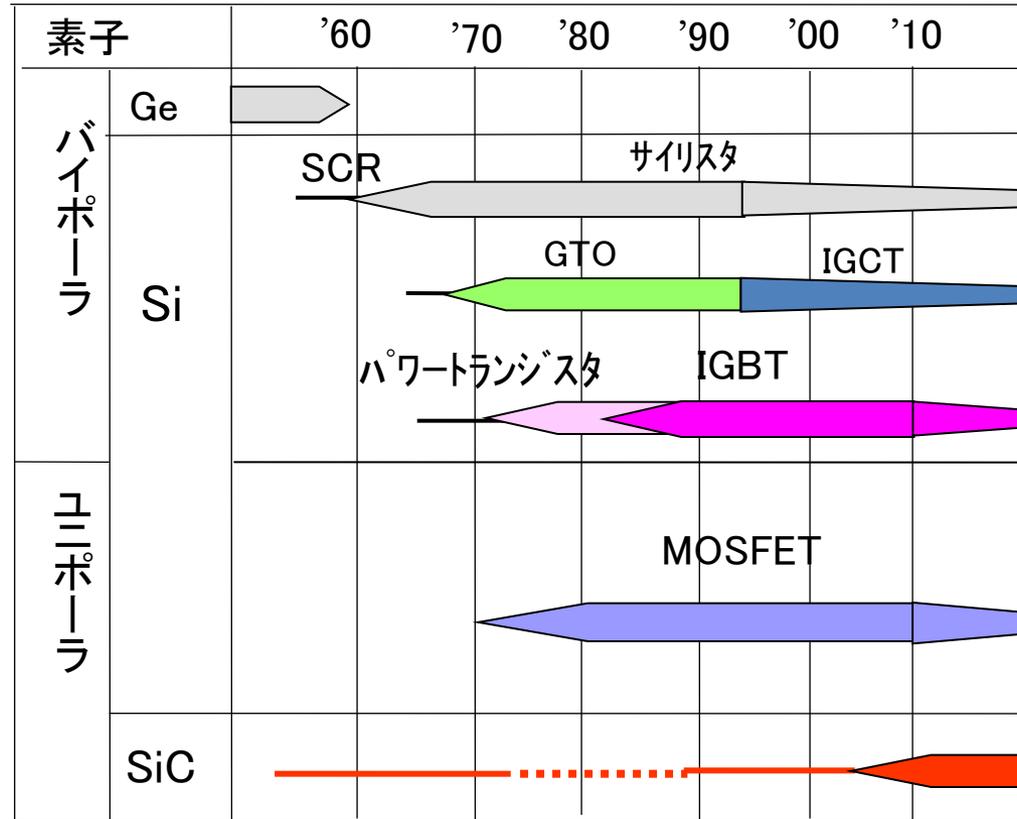
価電子:3 ⇒ III 属原子 ⇒ P 形シリコン半導体

価電子:4 ⇒ IV 属原子 ⇒ シリコン半導体のベース材料

価電子:5 ⇒ V 属原子 ⇒ N 形シリコン半導体

価電子:8 ⇒ 安定した原子

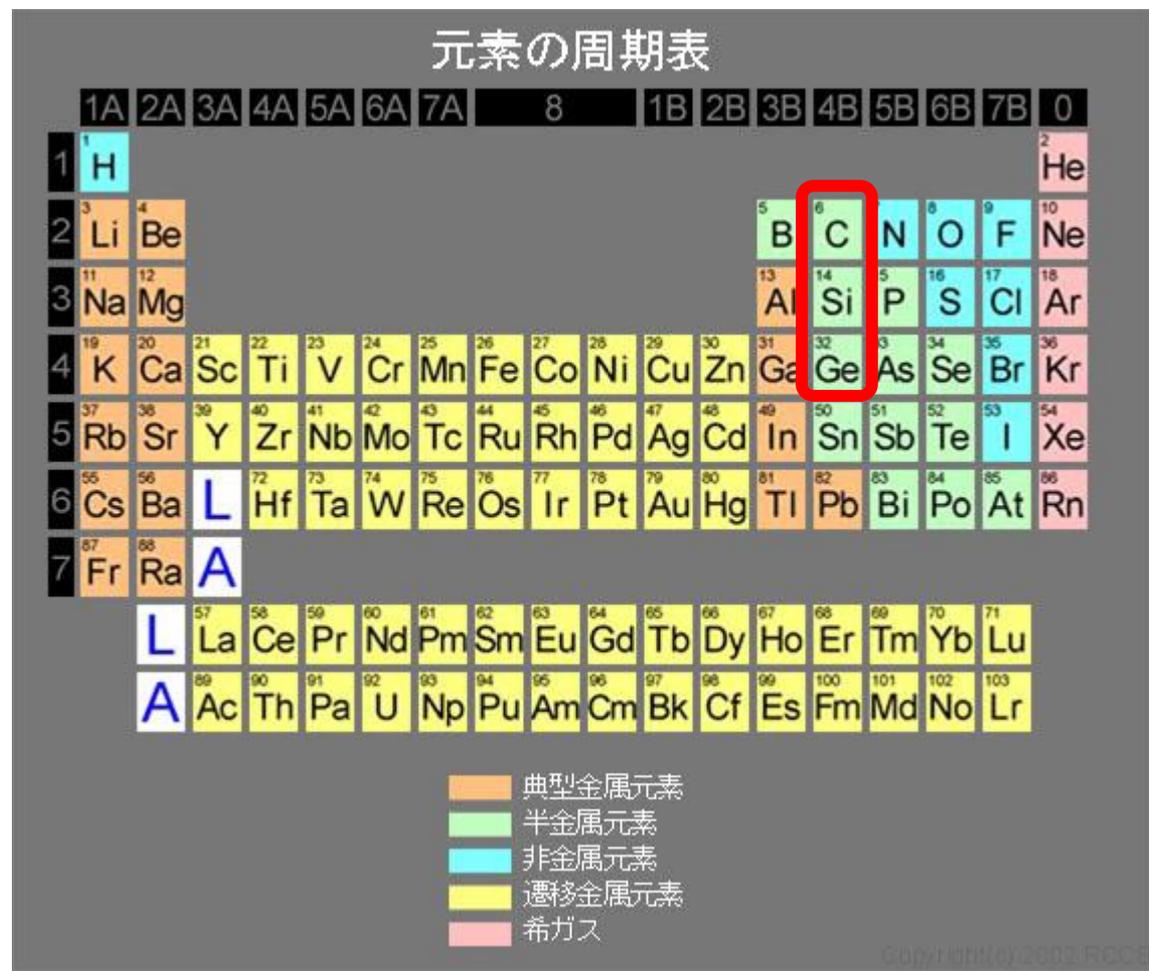
パワーデバイスの変遷



— 開発期 中断期 ◀ 实用期 ▶ 成熟期

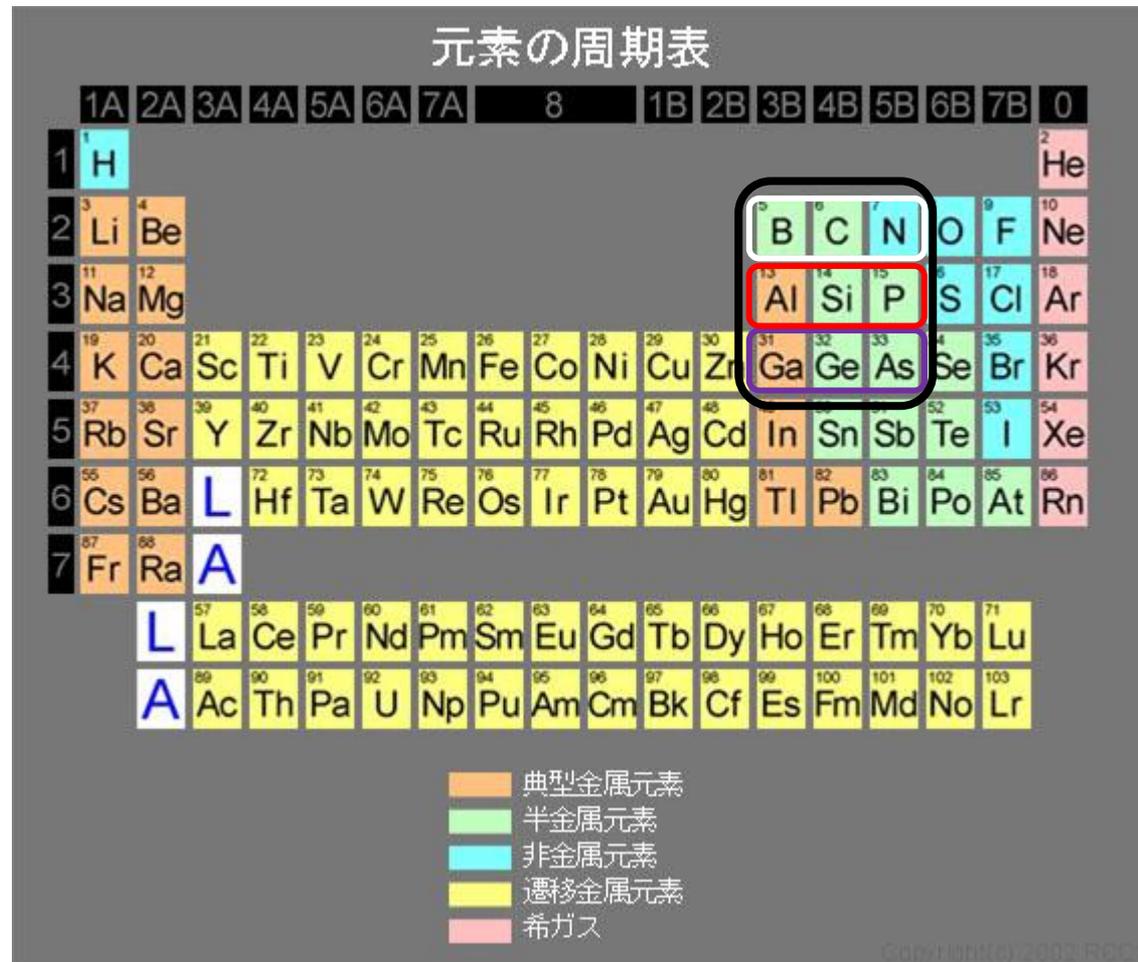
出典: 木下 繁則「パワーエレクトロニクス関連デバイスの課題と展望」パワーエレクトロニクス学会誌 Vol.31(2005年)JIPE-36-16

周期率表から見る半導体材料(1)



出典: Iホームページ <http://cinfo.ims.ac.jp/periodec/indexj.html>

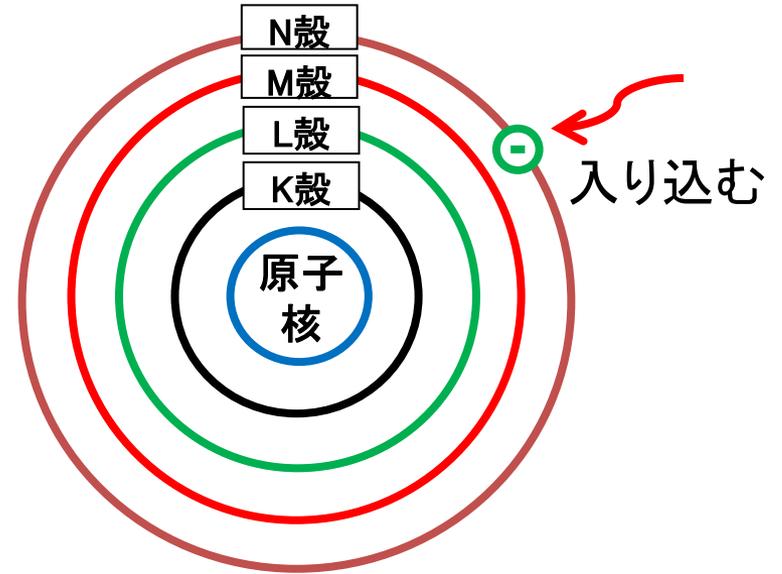
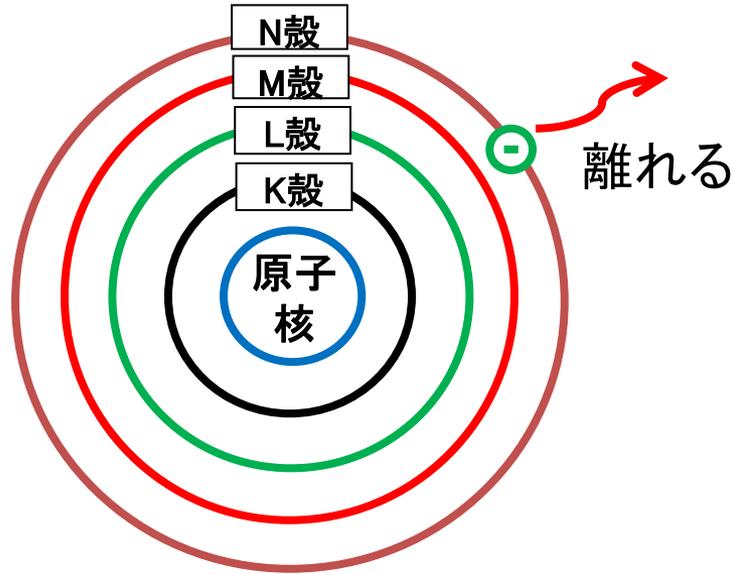
周期率表から見る半導体材料(2)



出典: Iホームページ<http://cinfo.ims.ac.jp/periodec/indexj.html>

正の原子と負の原子

(第1回キャパシタ基礎講座(2015-10-1) P19 再掲)



電子が出ていった原子:
+(プラス)の電気を持った原子

電子が入り込んだ原子:
-(マイナス)の電気を持った原子

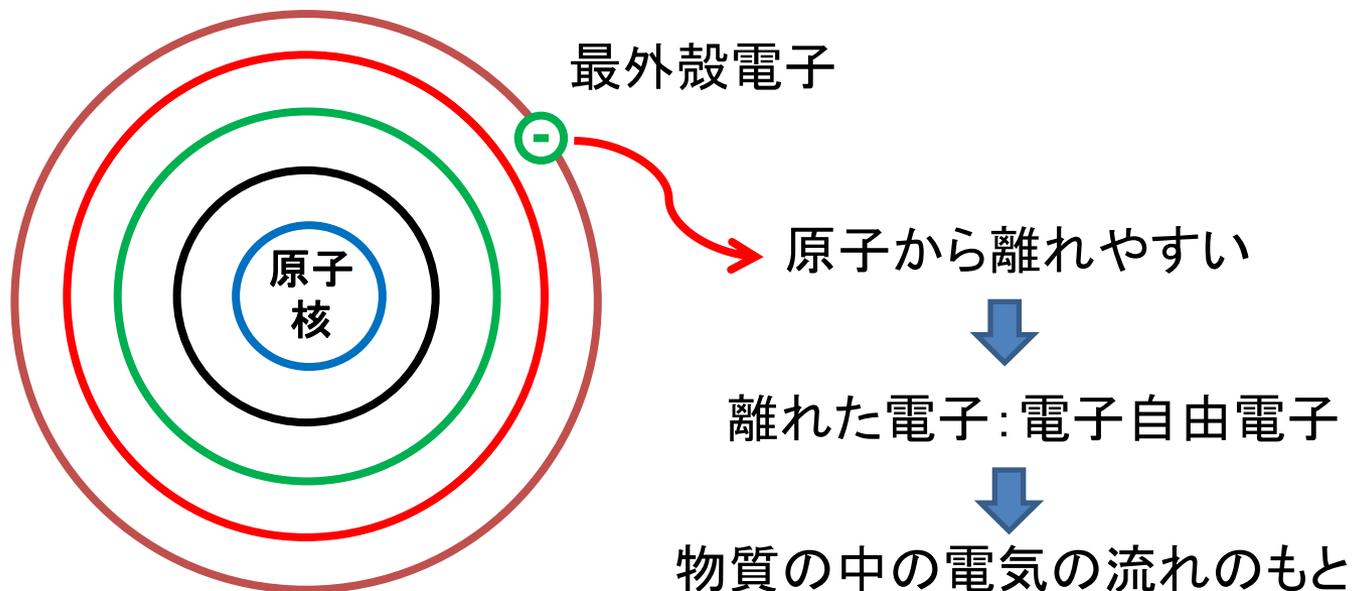
↓
電子が出ていったところ
↓

正孔(ホール)

電子: エレクトロン

物質の中の電気の流れのメカニズム

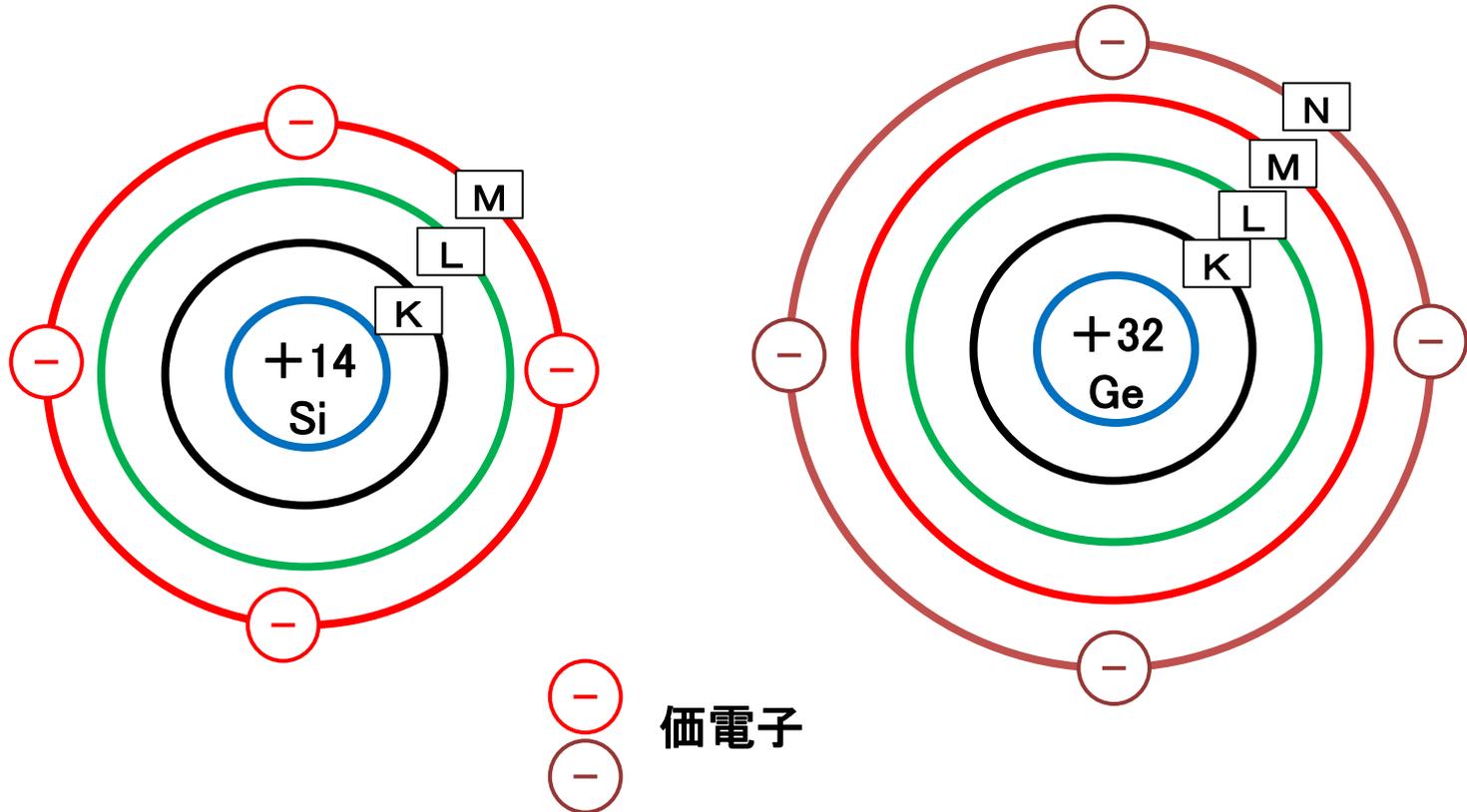
(第1回キャパシタ基礎講座(2015-10-1) P20 再掲)



物質の中の電気の流れは電子の流れ

銅は最外殻電子数: 1 (1価の原子)

4族原子の核外電子配置



半導体の用語(1)

ドーピング(Doping)

母体原子(例:Si,SiC)とは異なる元素を「不純物」として意図的に添加することを**ドーピング(Doping)**と言います。

ドーパント(Dopant)

ドーピングで添加する不純物を**ドーパント(Dopant)**と言います。

キャリア(Carrier)

半導体の電流の流れは、電子(自由電子)及び正孔(ホール)によって電荷が運ばれることによって行われます。このような電子及び正孔の様な電荷を運ぶ存在を**キャリア(Carrier)**と言います。半導体のキャリアには電子と正孔とがあります。

ドナー(Donor)

電導電子密度を増加させる目的で使用されるドーパントを**ドナー(Donor)**と言います。

アクセプター(Acceptor)

正孔密度を増加させる目的で使用されるドーパントを**ドナー(Donor)**と言います。

半導体の用語(2)

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。とによって行われます。

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。

半導体の基本構造(1)

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。

半導体の基本構造(2)

半導体の基本構造(シリコン半導体の例)

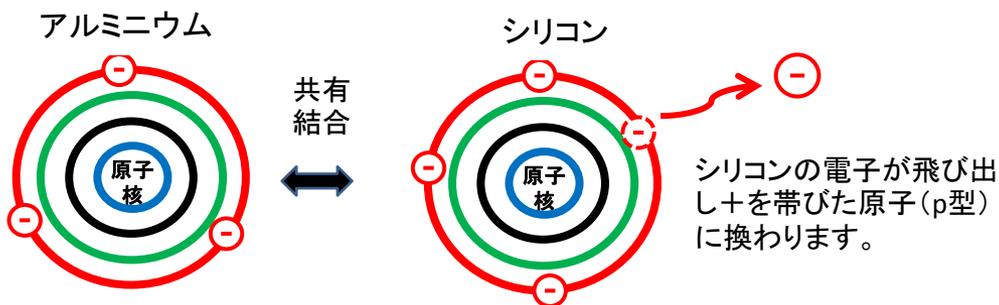
半導体の基本材料

- アルミニウム ⇒ 価電子:3 ⇒ III属原子 ⇒ P形シリコン半導体
- シリコン ⇒ 価電子:4 ⇒ IV属原子 ⇒ シリコン半導体のベース材料
- リン ⇒ 価電子:5 ⇒ V属原子 ⇒ N形シリコン半導体

P型半導体

シリコンに極僅かな不純物としてアルミニウムを混ぜる*。

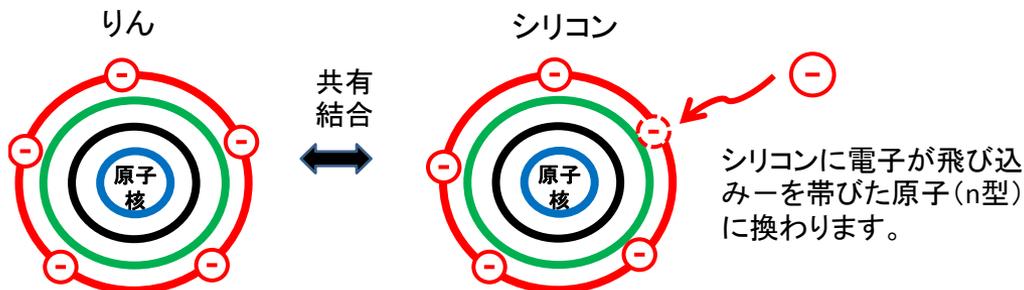
* :ドーピングと呼んでいます



シリコンの電子が飛び出し+を帯びた原子(p型)に換わります。

n型半導体

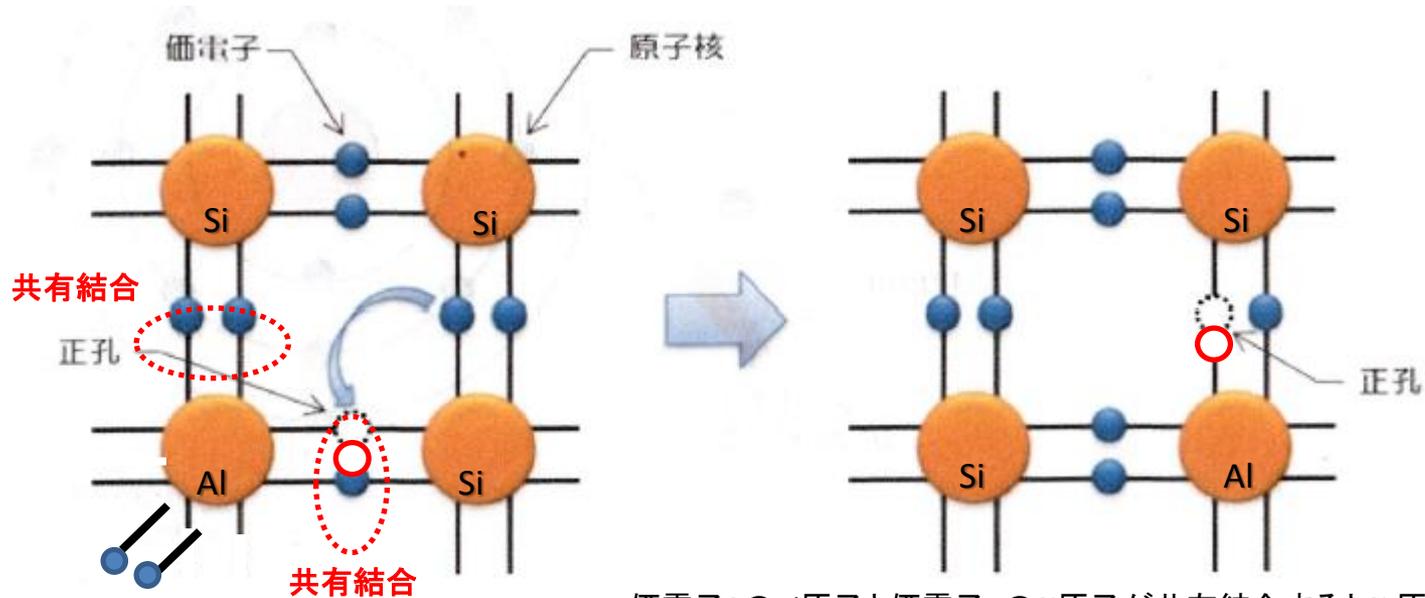
シリコンに極僅かな不純物としてリンを混ぜる。



シリコンに電子が飛び込み-を帯びた原子(n型)に換わります。

P形半導体内の正孔の動き

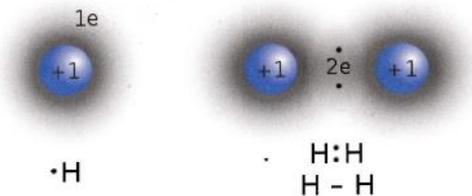
(Si半導体の例)



共有結合

原子間で電子対の共有を伴う化学結合を共有結合と言います。

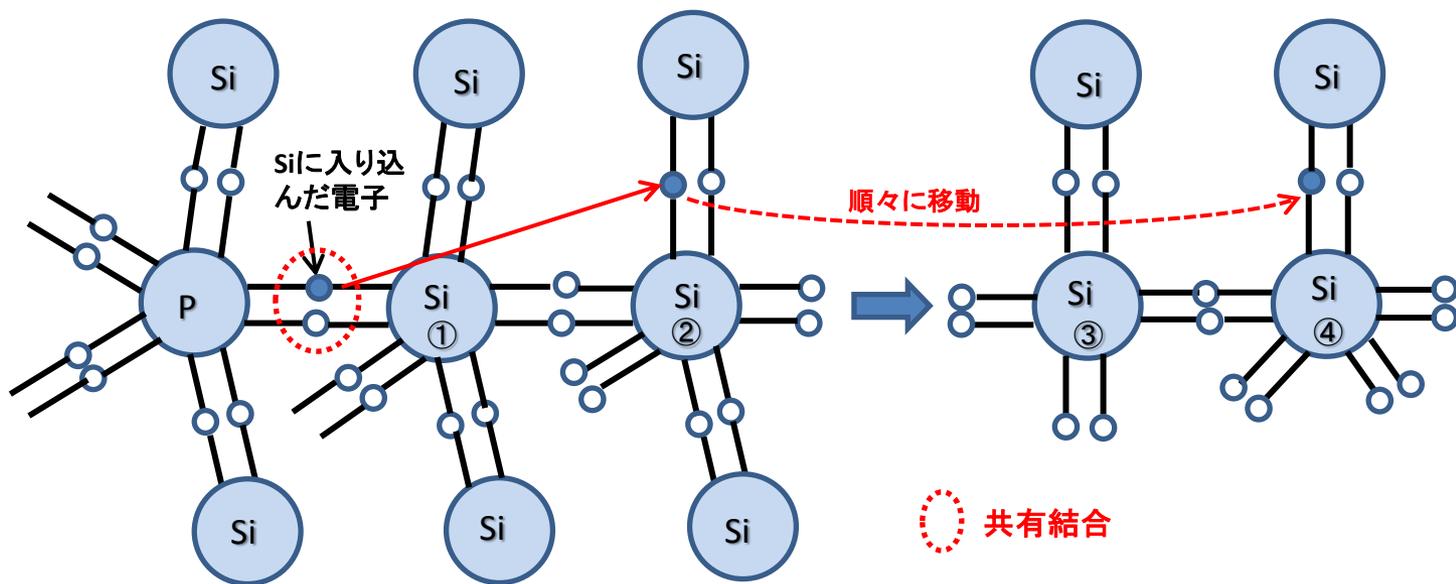
水素原子の例



1. 価電子3のAl原子と価電子4のSi原子が共有結合するとSi原子の価電子の1個は共有結合できず1個の価電子がSi原子から飛び出します。この結果Siの原子は正の電気を帯びます。このことは、等価的には共有結合部に正の電気の正孔が発生した状態として表せます。この正孔に共有結合している原子の価電子が入り込み、価電子が抜けたところに正孔が発生します。
2. 正孔は正の電気を持ちながら共有結合している原子間を順々に移動して行きます。
2. 正孔はプラスの電気を持ちながら共有結合している原子を順々に移動する粒子の様に振る舞い、プラスの電荷を運ぶキャリアとして動作します。

N形半導体内の電子の動き

(Si半導体の例)



Si: シリコン原子(原子価:4)

P: リン原子(原子価:5)

1. 価電子5のP原子と価電子4のSi原子が共有結合するとき、Si原子(①)は周囲から1個の価電子を取り込みP原子と共有結合します。Siの原子(①)は負の電気を帯びます。
このことは、等価的には共有結合部に負の電気を持った電子が発生した状態として表せます。この電子はSi原子(①)と結合しているSi原子(②)に入り込みます。

2. 電子は負の電気を持ちながら共有結合している原子間を順々に移動して行きます。
3. 電子は負の電気を持ちながら共有結合している原子を順々に移動する粒子の様に振る舞い、負の電荷を運ぶキャリアとして動作します。

半導体基板の造り方

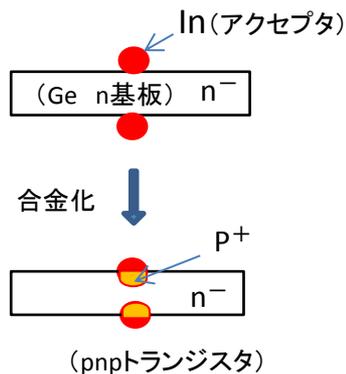
半導体基板(ウエーハ)

合金法

(Ge半導体時代)

Geにドーパントを加えて合金化する方法

(Ge半導体の例)

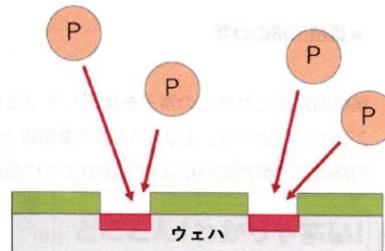


拡散法

(Si半導体時代(初期))

Si基板にドーパントを拡散浸透させる方法

シリコンウエーハ表面にドーパントを堆積し、その後、熱拡散によって不純物を所望の深さまで再分布させてP型半導体領域やN型半導体領域を作る工程。熱拡散法とイオン注入法がありますが、ウエーハの大口径化やプロセスの微細化に伴ってイオン注入法が多く用いられています。



エピキヤピタル成長法

(Si半導体時代(現在))
(SiC半導体)

SiやSiC基板にドーパントをエピキヤピタル成長させる方法

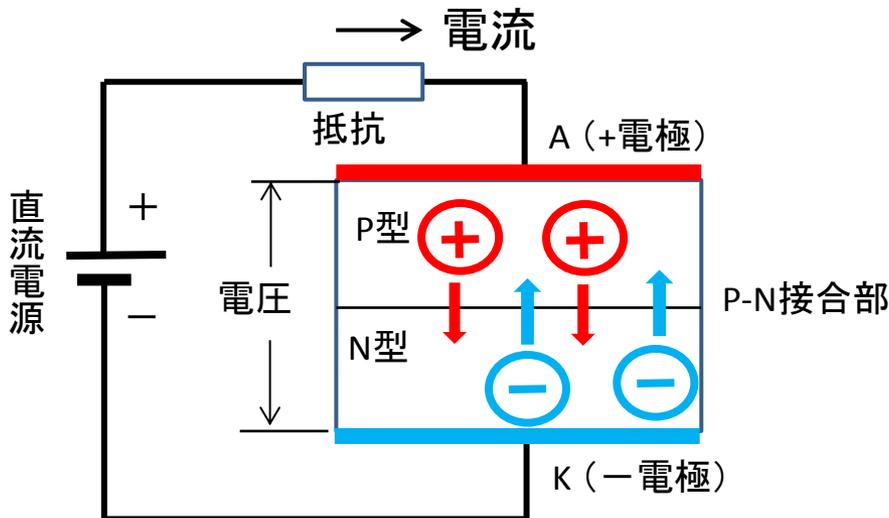
Si又はSiC基板の結晶の上に、基板の結晶面に揃えて結晶成長を行う方法。

結晶成長の方法として、分子線エタキシー法、有機金属気相成長法、液相エピタキシー法とがあります。

PN接合半導体の基本動作(2)

— オン動作 —

(バイポーラ型)

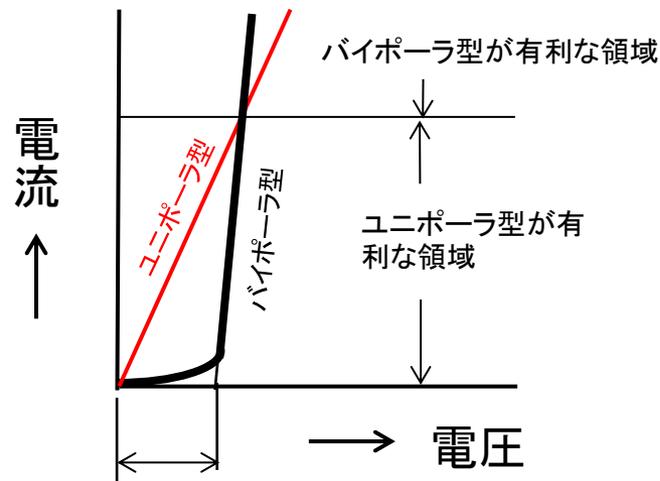


P型半導体内の \oplus はK極(-電位)に、N型半導体内の \ominus はA電極(+電位)に引かれて、両電極に向けて移動します。PN半導体内には両キャリア存在する状態となります。

キャリア

- \oplus ホール(正孔)
- \ominus 電子

ダイオードの電流-電圧特性



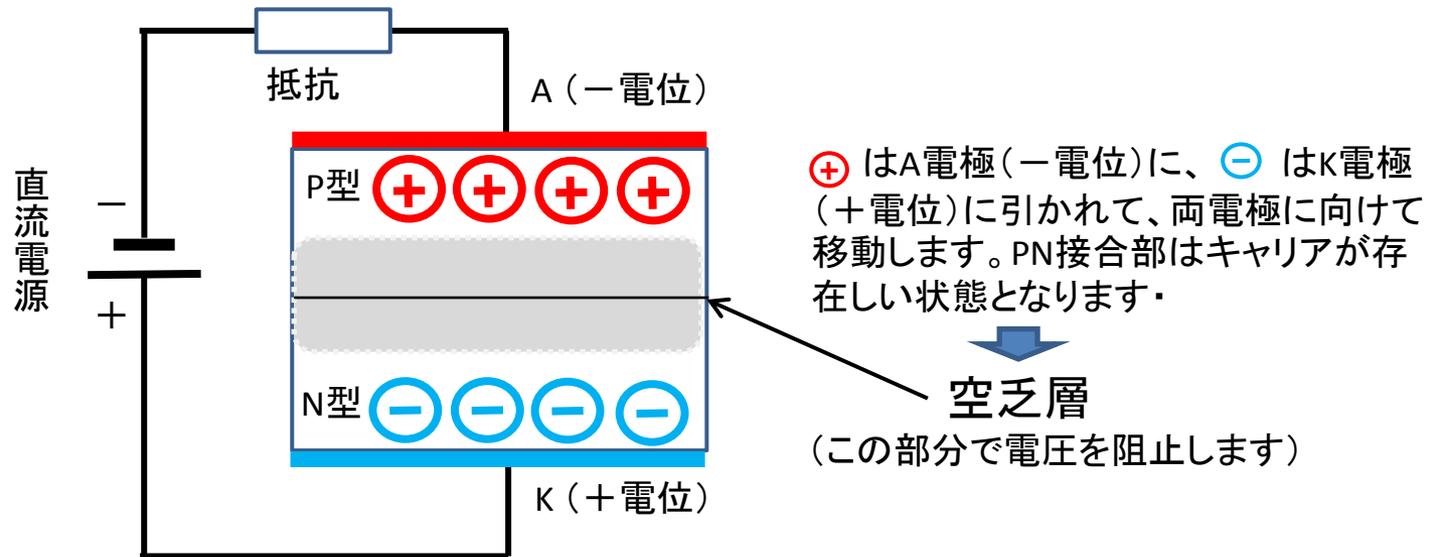
立上り電圧

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。

PN接合半導体の基本動作(3)

— オフ動作 —

(バイポーラ型半導体)



キャパシタフォーラム
パワエレ基礎講座

次回(第4回)内容

開催日(予定) 2018-10-12

パワーデバイス(2)

パワーデバイスの種類と特徴