

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)

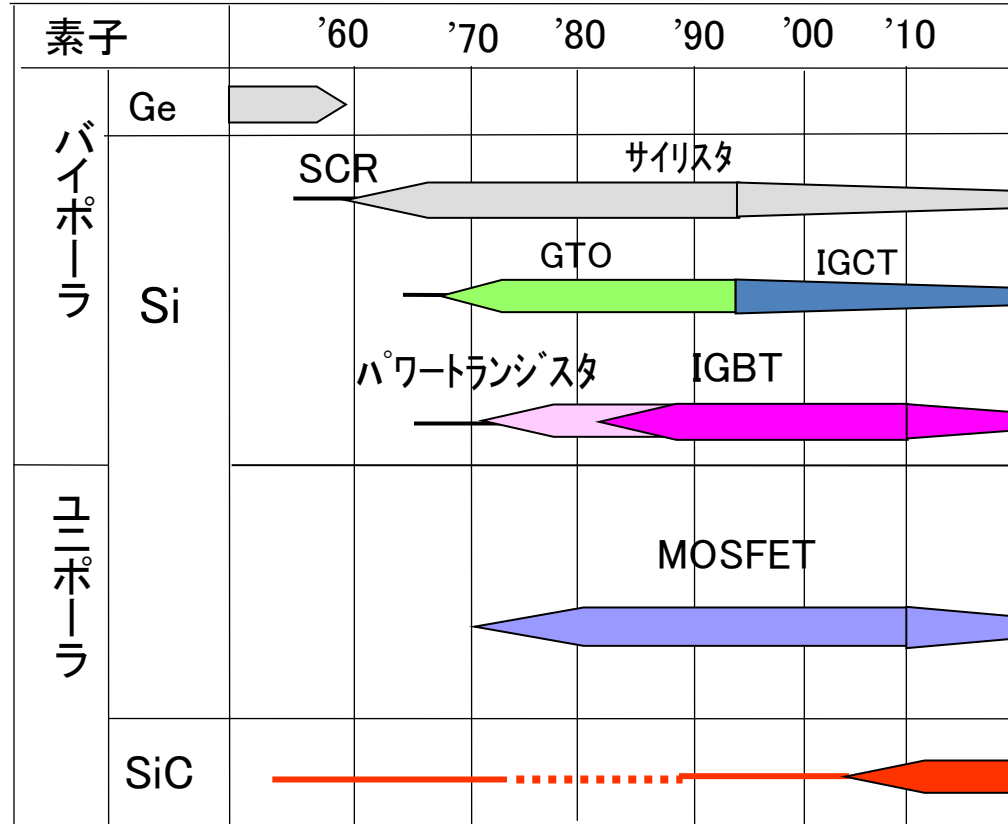
パワーデバイス(3)

パワーデバイスの種類と特徴

パワーデバイスの歴史

パワーデバイスの変遷

(第3回パワーエレクトロニクス基礎講座(2018-9-21) P9 再掲)



— 開発期 中断期 ◀ 実用期 ▶ 成熟期

注記: Geの次の半導体研究として、Si、SiCとダイヤモンドとされていた。

出展: 木下 繁則 『パワーエレクトロニク関連デバイスの課題と展望』
第159回パワーエレクトロニク学会定例研究会(2005-7-30)

周期率表から見る半導体の変遷と将来(1)

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

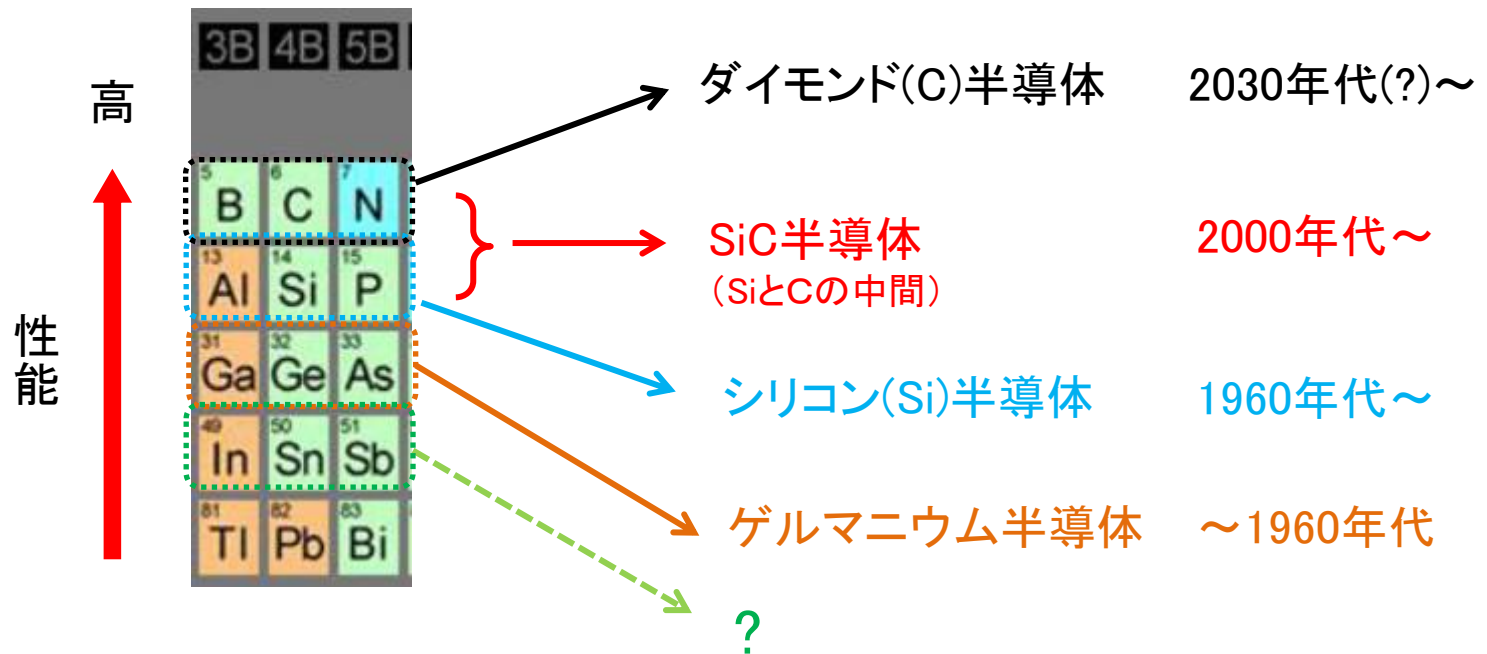
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	H															He		
2	Li	Be								B	C	N	O	F		Ne		
3	Na	Mg								Al	Si	P	S	Cl		Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
			L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- 典型金属元素
- 半金属元素
- 非金属元素
- 遷移金属元素
- 希ガス

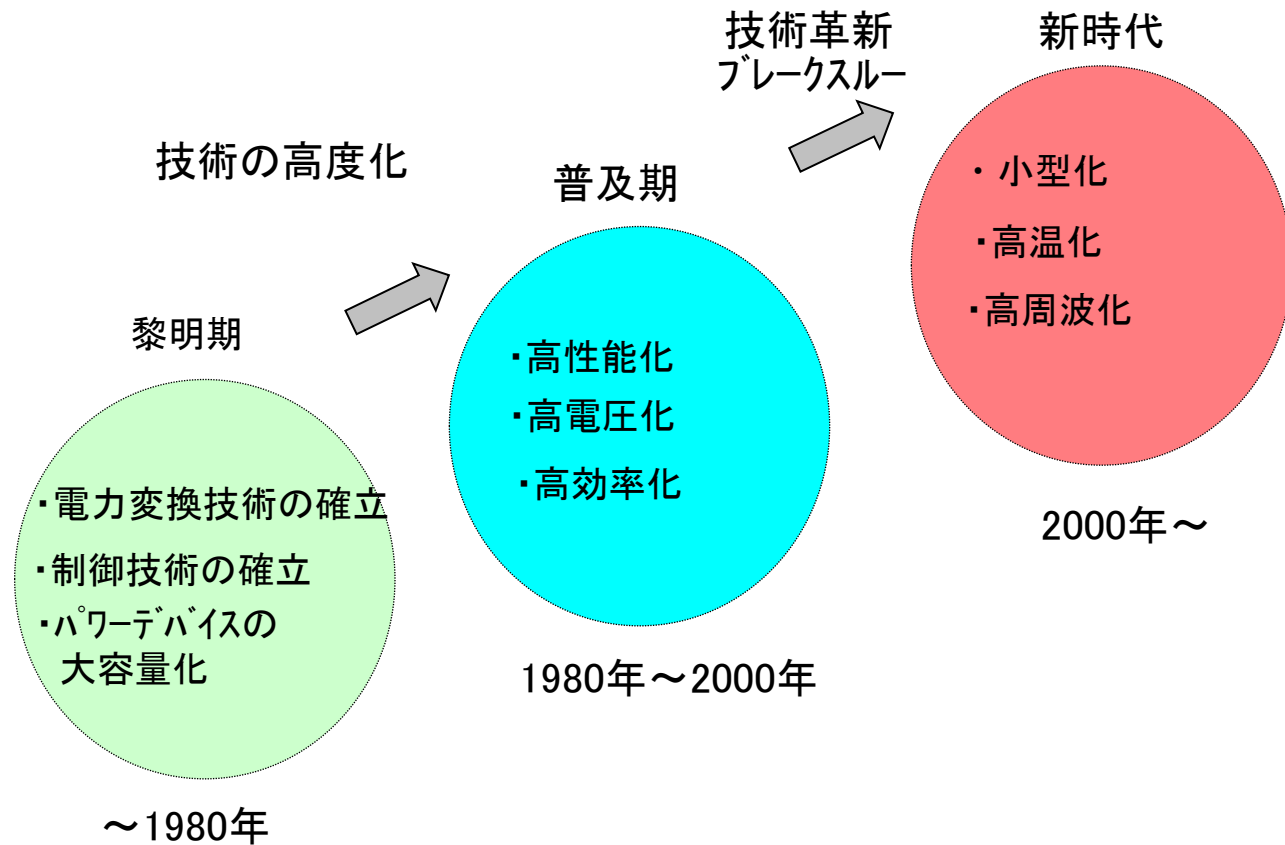
Copyright © 2002 RICE

周期率表から見る半導体の変遷と将来(2)

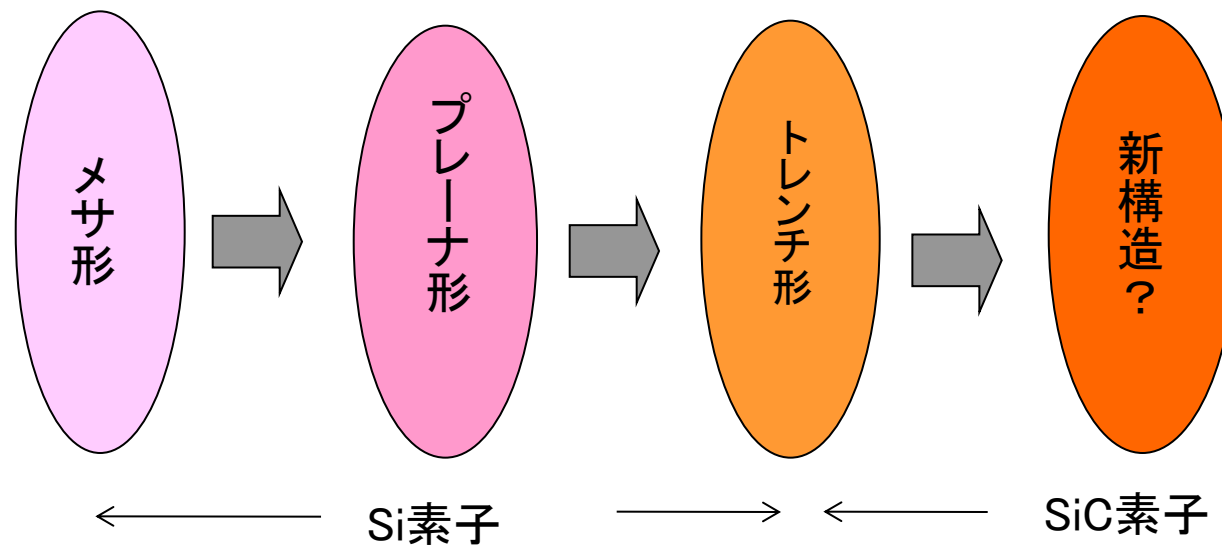
周期率表のⅢ族、Ⅳ族、Ⅴ族元素



パワーエレクトロニクスの変遷

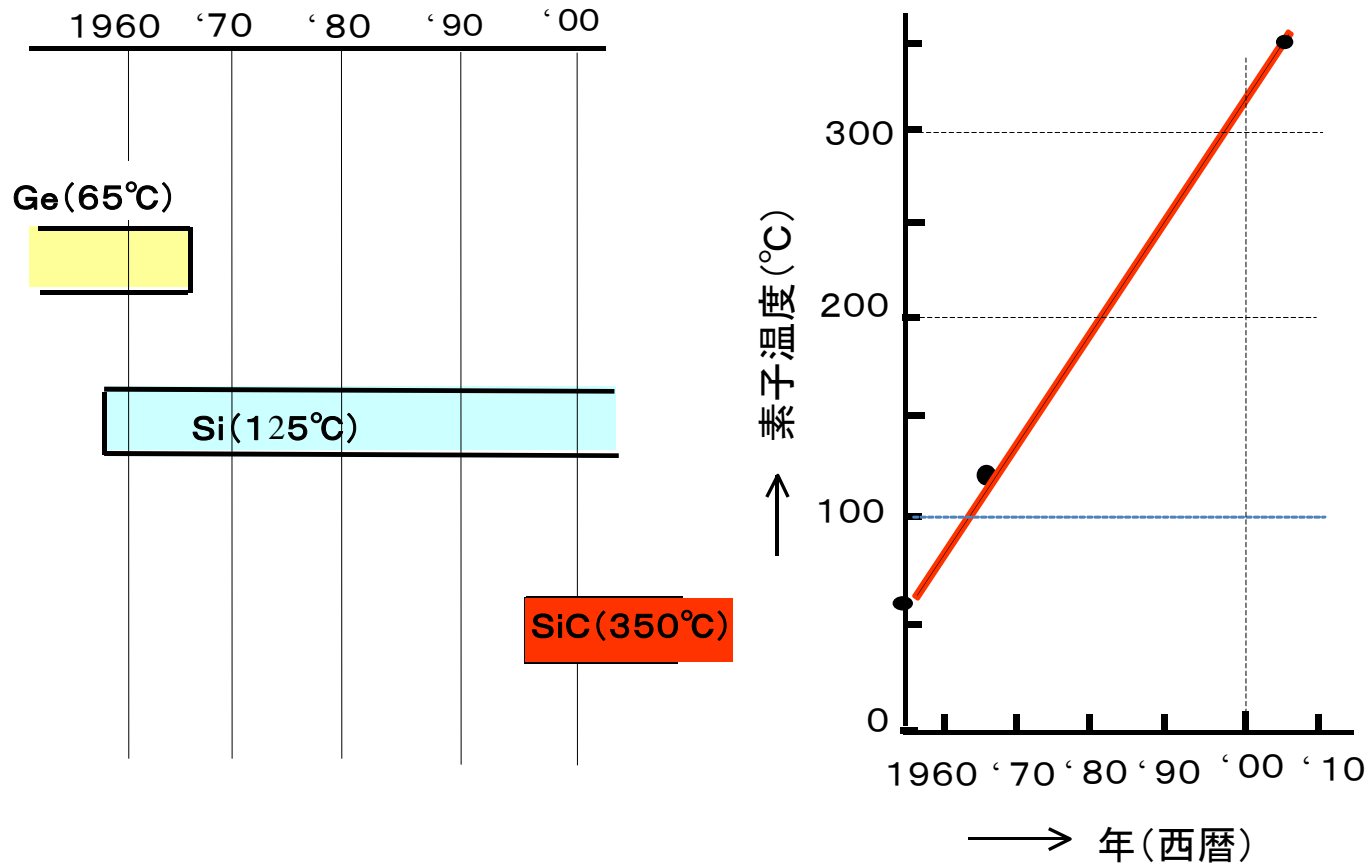


パワーデバイス構造の変遷



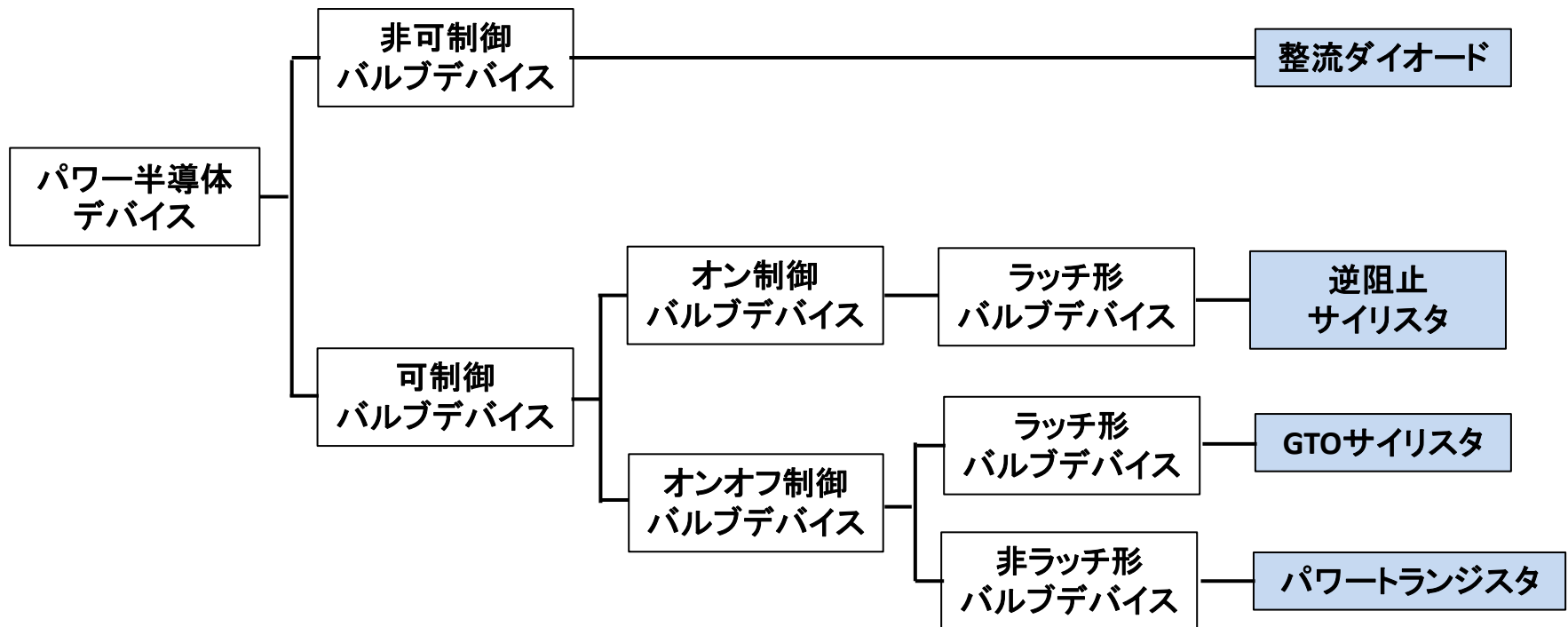
出展: 木下 繁則 『パワーエレクトロニク関連デバイスの課題と展望』
第159回パワーエレクトロニク学会定例研究会(2005-7-30)

パワーデバイス許容温度の変遷



出展: 木下 繁則 『パワーエレクトロニク関連デバイスの課題と展望』
 第159回パワーエレクトロニク学会定例研究会(2005-7-30)

スイッチング機能による パワーデバイスの分類



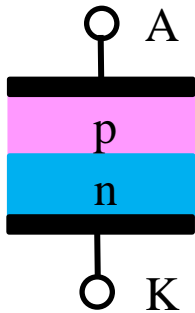
パワーデバイスの接合構造

バイポーラ形

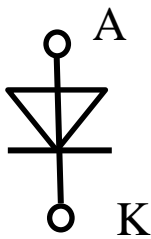
2層構造

ダイオード

素子構造



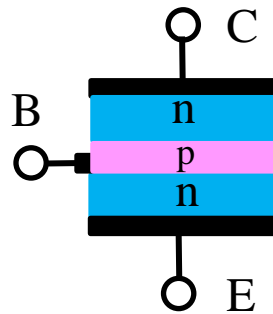
記号



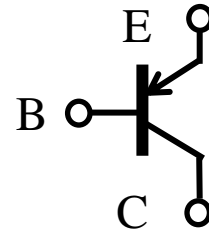
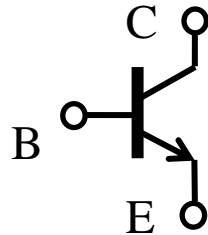
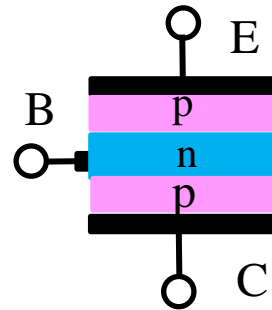
3層構造

トランジスタ

npnトランジスタ

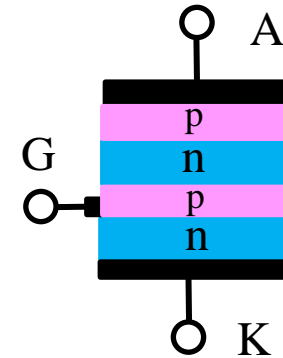


pnnpトランジスタ

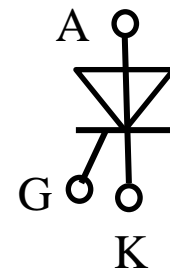


4層構造

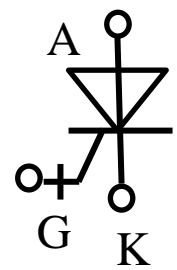
サイリスタ、GTOサイリスタ



サイリスタ



GTO



スイッチング機能から見たパワーデバイスの分類

スイッチング機能	機能の種別	デバイス
無	無	ダイオード
ターンオン*1	自己ターンオフ機能無	サイリスタ
ターンオン／ ターンオフ*2	自己ターンオフ機能有	GTOサイリスタ IGBT MOSFET SiCデバイス GaN デバイス

*1: ターンオンとは「可制御バルブデバイスまたはそれをういたアームのオフ状態からオン状態への切り換え動作」

*2: ターンオフとは「可制御バルブデバイスまたはそれをういたアームのオン状態からオフ状態への切り換え動作」

パワーデバイスのゲート(ベース)駆動方式

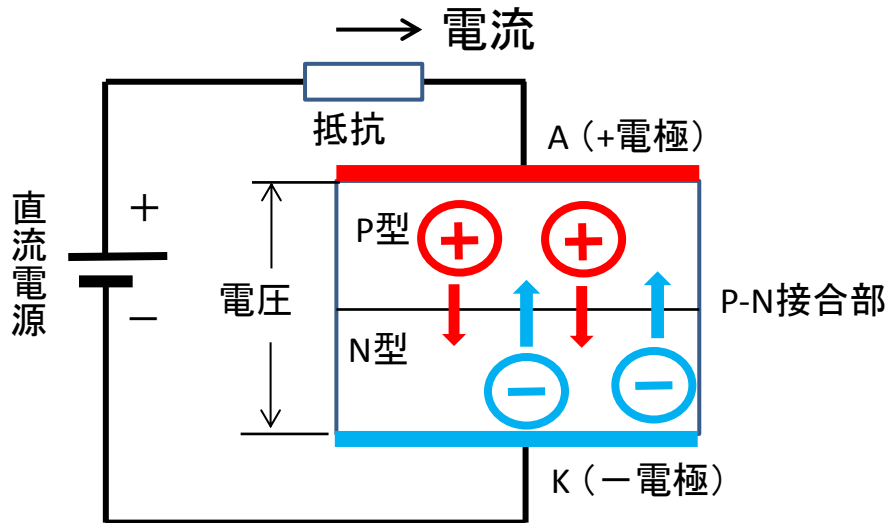
駆動方式	デバイスの種別	デバイス
電流形	バイポーラ形	パワートランジスタ
		サイリスタ
		GTOサイリスタ
電圧形	バイポーラ形	IGBT
	ユニポーラ形	MOSFET
		SiCデバイス, GaN デバイス

2層構造半導体基本動作(1)

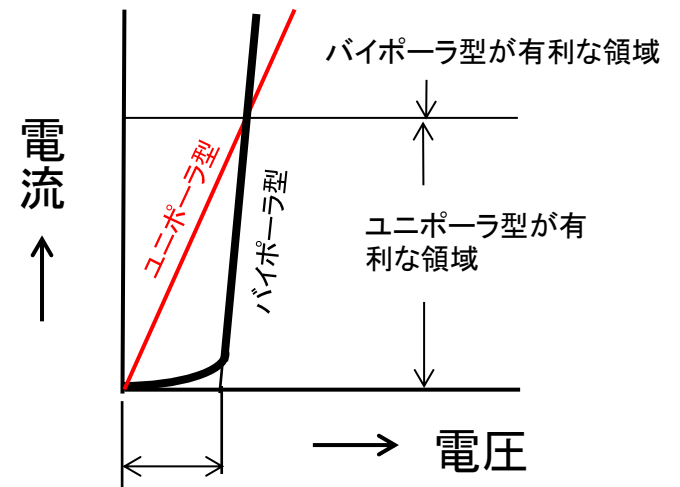
— バイポーラ型 ダイオード —

(オン動作)

(第3回パワーエレクトロニクス基礎講座(2018-9-21) P22 再掲)



ダイオードの電流-電圧特性



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

立上り電圧

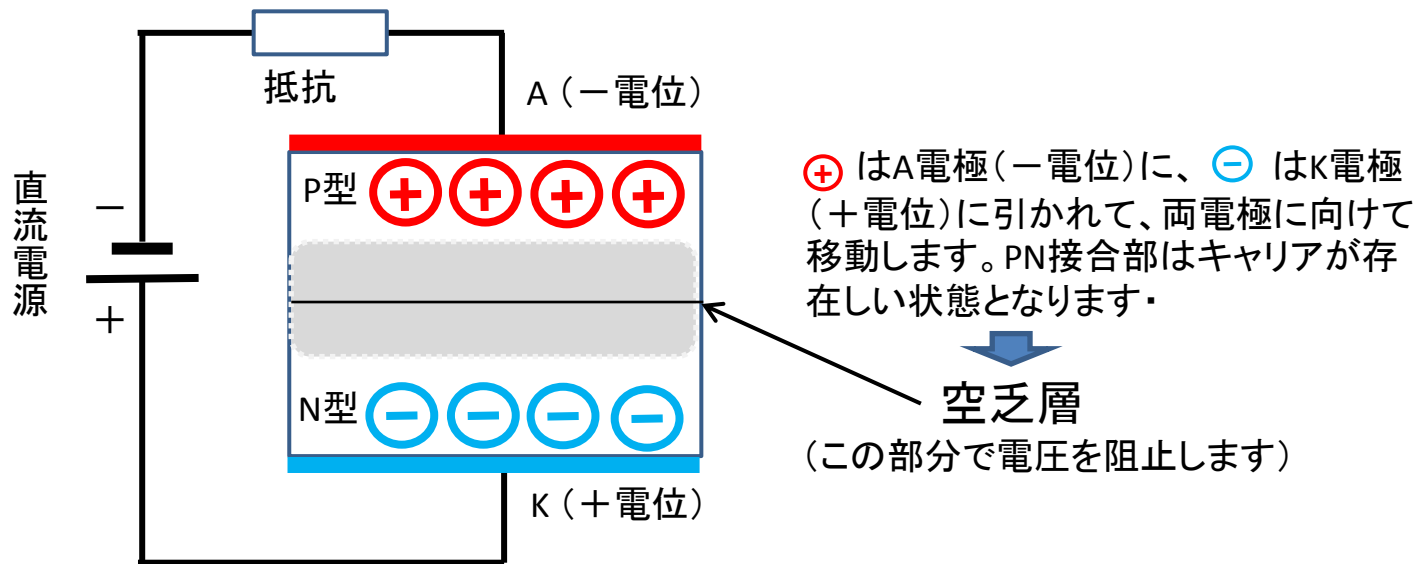
立上り電圧は開発当初(1970~1980年代)、えん層(堰層)電圧と呼んでいました。キャリアがP-N接合部を通過する時に乗り越える電圧との意味から。

2層構造半導体基本動作(2)

－ バイポーラ型 ダイオード －

(オフ動作)

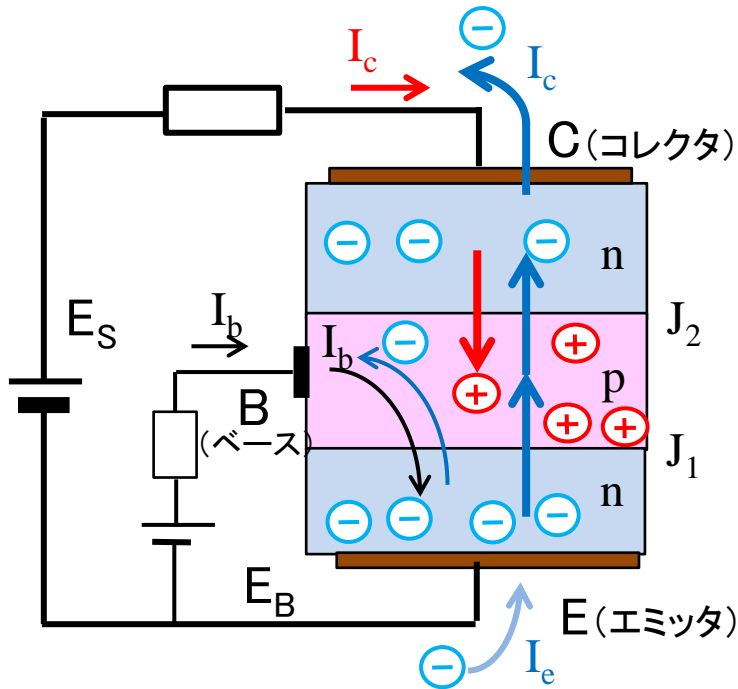
(第3回パワーエレクトロニクス基礎講座(2018-9-21) P22 再掲)



3層構造半導体基本動作(1)

(バイポーラトランジスタの例)

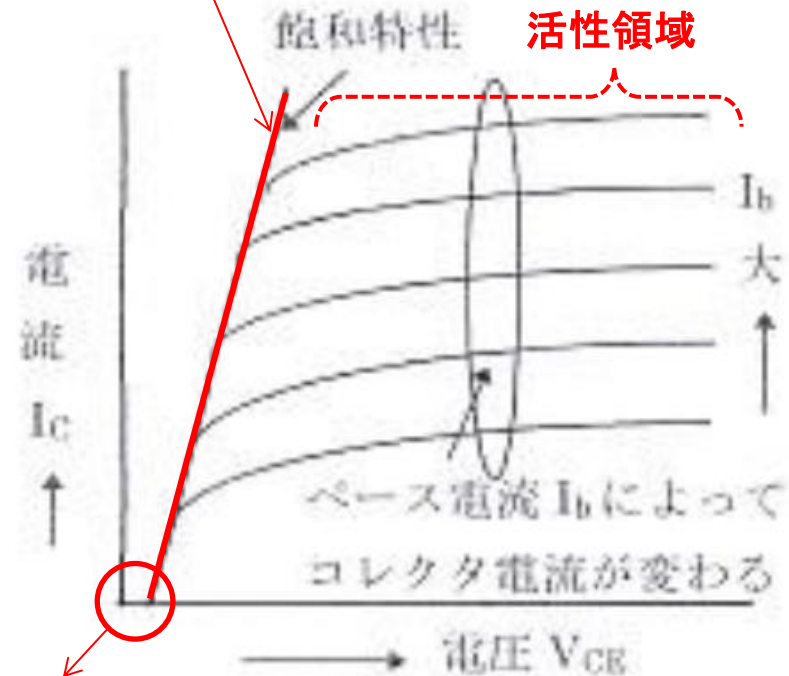
(スイッチ オン)



E(エミッタ)電極からJ₁層を超えてp層に流れ込んだ電子はJ₂層を超えてコレクタ側のn層に到達する。P層に流れ込んだ電子はコレクタ電極から電源に流れる(C(コレクタ)電極に電流 I_c が流れます)。

n層とp層は電子と正孔が充満した状態になります。

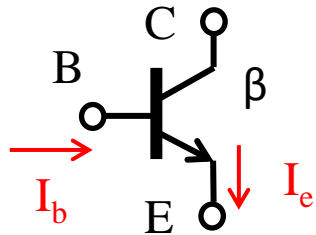
(スイッチオン時の電流-電圧特性)



$\beta = I_c / I_b$ を電流増幅率といいます。

3層構造半導体基本動作(2)

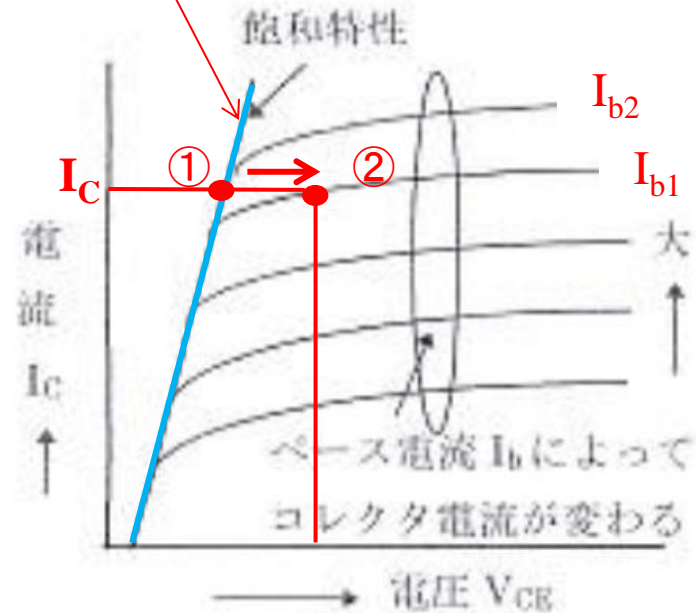
電流増幅率



β : トランジスタの電流増幅率

$$\beta = I_e / I_b$$

(スイッチオン時の電流-電圧特性)

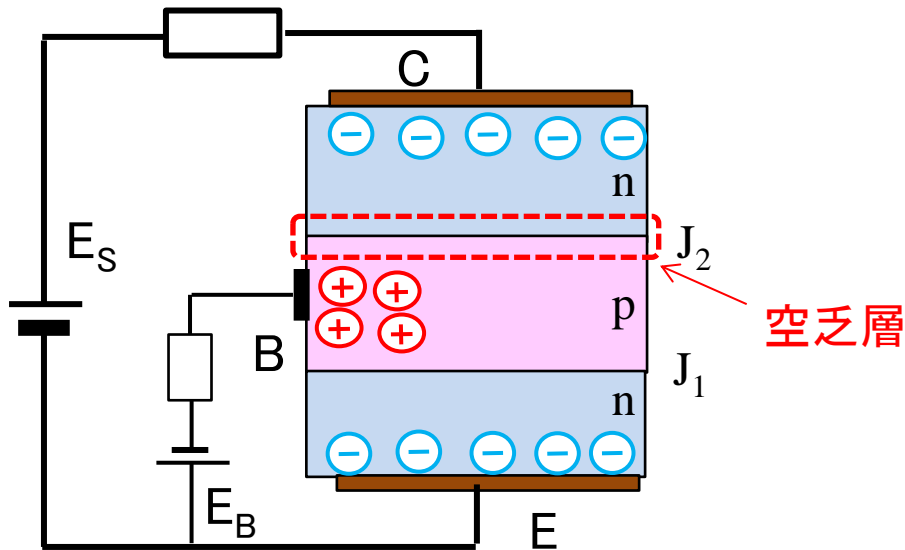


ベース電流が十分であれば(ベース電流は図示の I_{b2}) トランジスタの電圧は飽和特性上の電圧(①)となるが、ベース電流が不足すると(ベース電流は図示の I_{b1}) 活性領域の動作となり、電圧は②となってしまう。

3層構造半導体基本動作(3)

(バイポーラトランジスタの例)

(スイッチ オフ)

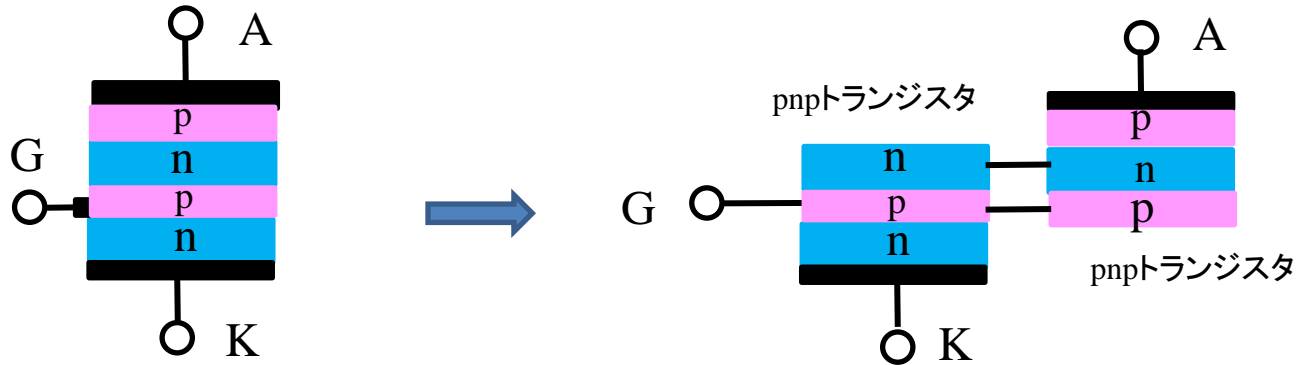


スイッチオフ時はB-E間電圧はオンとは反対にします(電圧を反転させます(E側が+、B側が-)に)。

エミッタ電極側のn層の電子は+電位のエミッタ電極に引き寄せられ、p層の正孔は-電位のベース電極に引き寄せられます。コレクタ電極は+電位となっており、コレクタ側のn層の電子はコレクタ電極に引き寄せられます。この結果、J2層には電子、正孔のない空乏層になります。即ち、J2層を通る電子、正孔がなくなり、スイッチオフの状態になります。

4層構造半導体(サイリスタ)

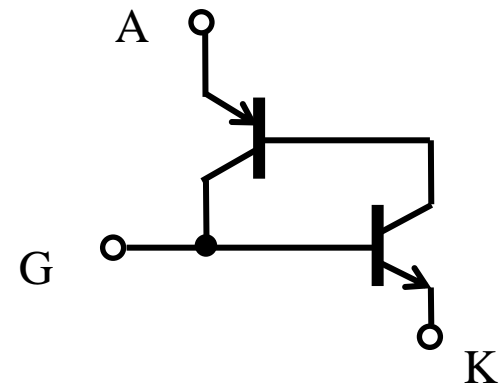
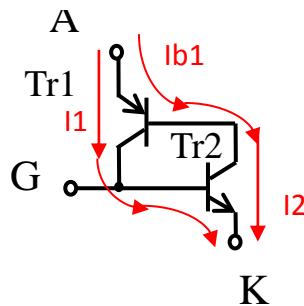
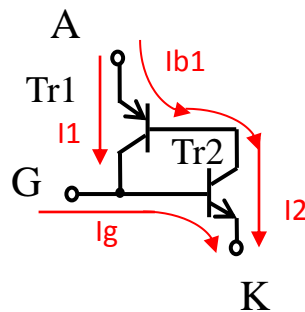
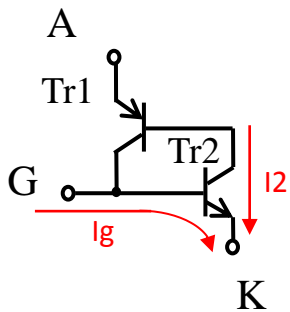
サイリスタのターンオンのメカニズム



Gにゲート電流 I_g を流すとTr2がオンして、Tr2に電流 I_2 が流れる。

I_2 はTr1のベース電流となりTr1がオンする。Tr1に電流 I_1 が流れる。この I_1 はTr2のベース電流となる。

Tr2のベース電流がTr1より供給され続けるのでゲート電流 I_g を零にしてもTr1,Tr2はオン状態を継続する。サイリスタはオン状態を継続する。

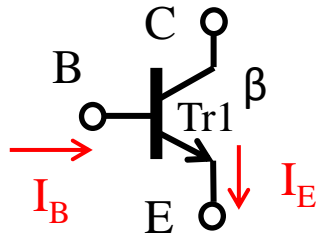


等価回路

ダーリントントランジスタ

— ベース電流を小さくするため —

非ダーリントン

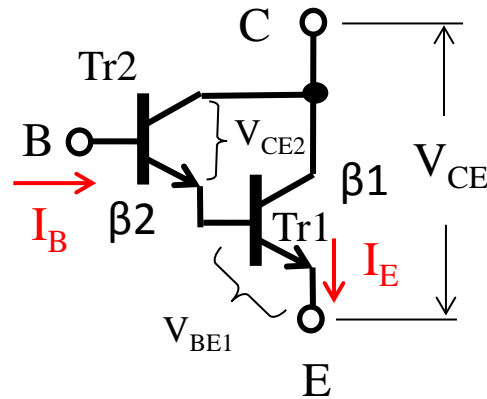


β : トランジスタの電流増幅率

$$I_B = I_E / \beta$$

$$V_{CE} = V_{CE1}$$

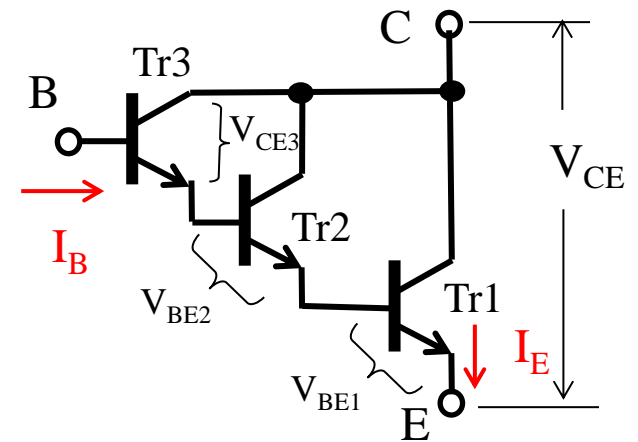
2段ダーリントン



$$I_B = I_E / \beta_1 \cdot \beta_2$$

$$V_{CE} = V_{BE1} + V_{CE2}$$

3段非ダーリントン



$$I_B = I_E / \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$$

$$V_{CE} = V_{BE1} + V_{BE2} + V_{CE3}$$

ベース電流 I_B はより小さく出来る。

電圧 V_{CE} はより大きくなる。

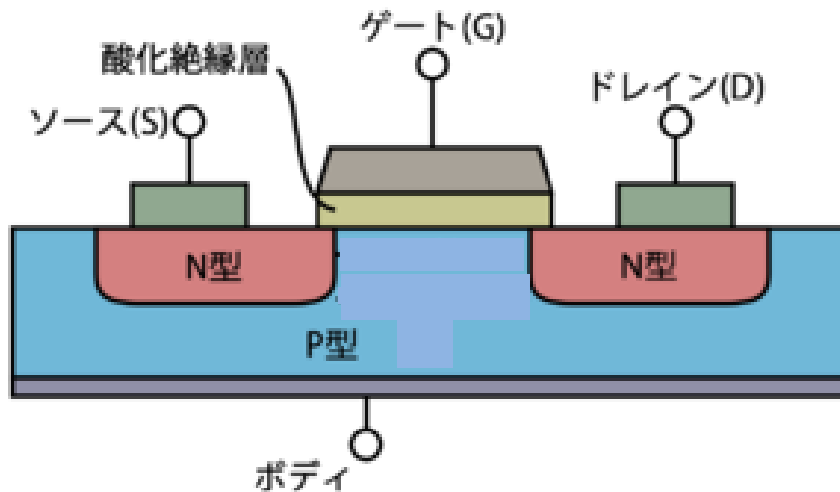
ユニポーラトランジスタ

Si MOSFET

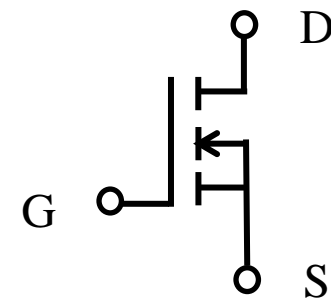
MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

(酸化膜半導体電界効果トランジスタ)

素子構造(Nチャンネル)



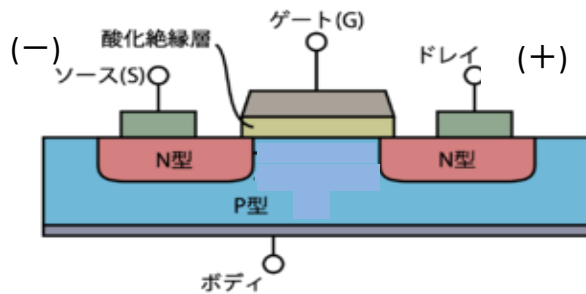
記号



MOSFETのオン、オフ動作

オフ

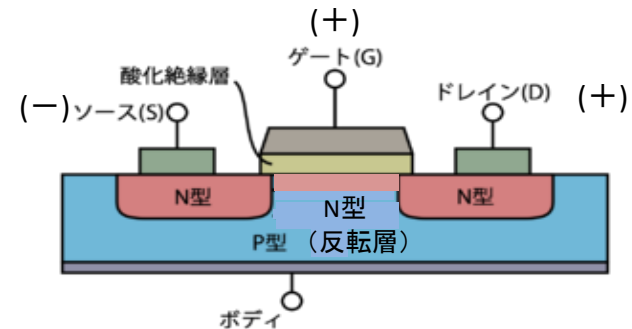
ゲート-ソース間電圧: 負



ドレインからソースの方向はNPN接合になっており、電流は流れない。
オフ状態。

オン

ゲート-ソース間電圧: 正

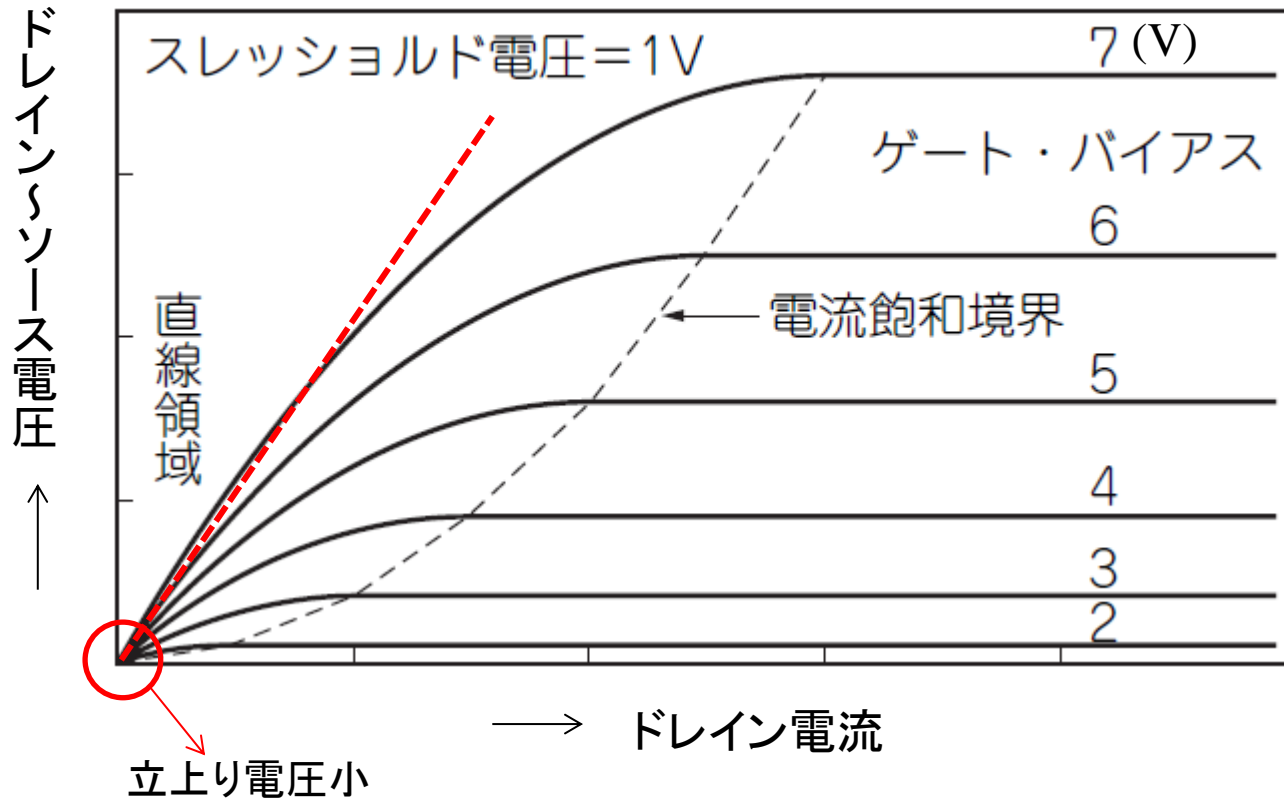


ゲートの電圧がプラスになると電気絶縁層を挟んでP型層の絶縁層との界面に電子が引き寄せられn型層(反転層)が形成される。



ドレインからソースの方向はN型(ドレイン) → N型(反転層) → N型(ソース)となり電流が流れる。
オン状態。

MOSFETの特性



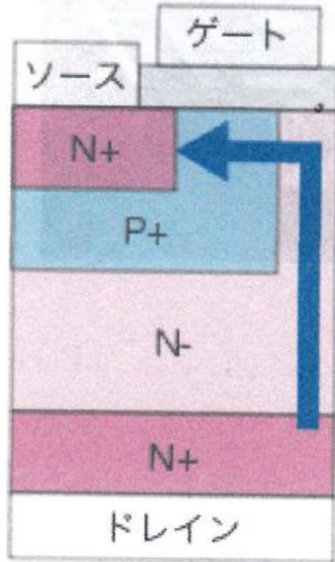
IGBT

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

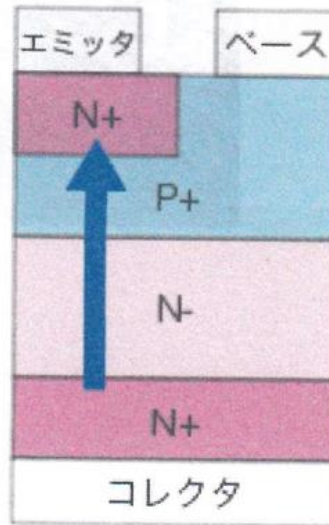
(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)

MOSFET

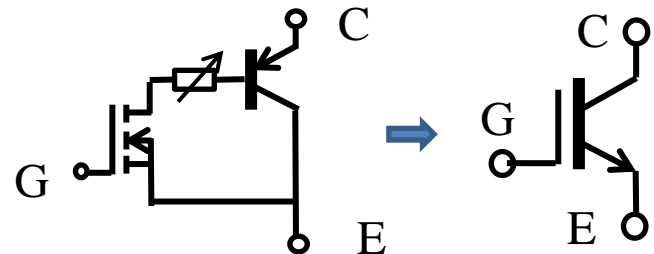
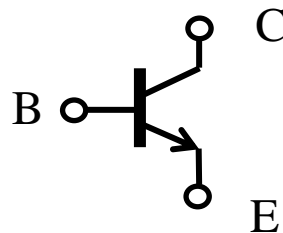
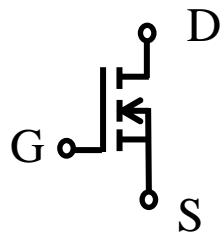
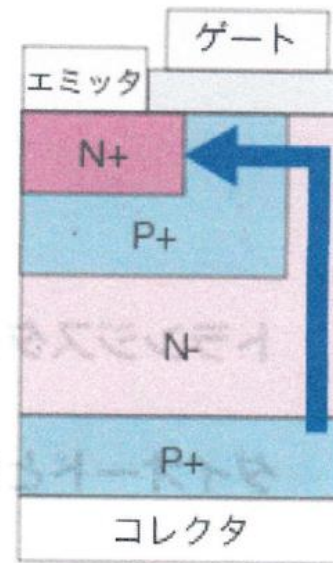
(Nチャンネル)



バイポーラトランジスタ



IGBT



パワーデバイス構造の変遷

メサ構造

メサ:スペイン語で“台形”

沿面型

初期のSi半導体
(サイリスタ、トラン
ジスタ)の構造

プレーナ構造

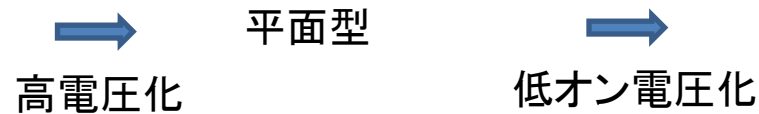
平面型

パワートランジスタ
やGTOで発展

トレンチゲート構造

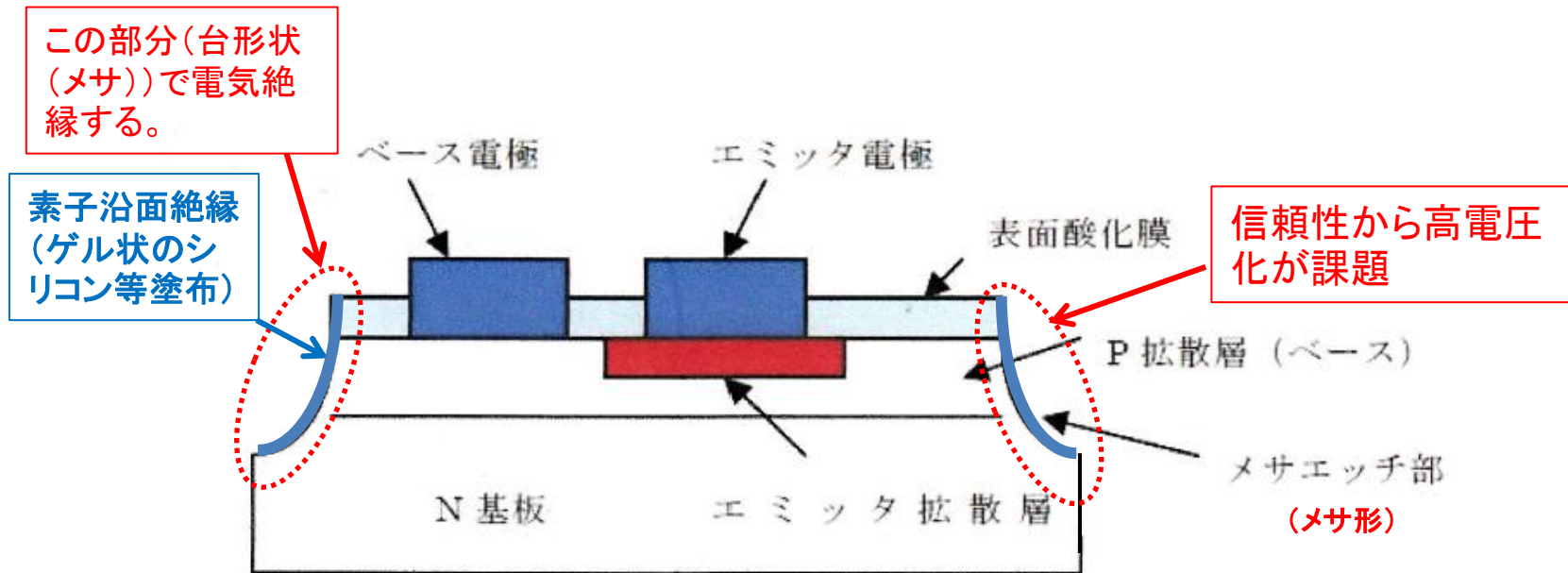
立体型

IGBTで発展



半導体の電気絶縁から見た 素子構造の変遷(1)

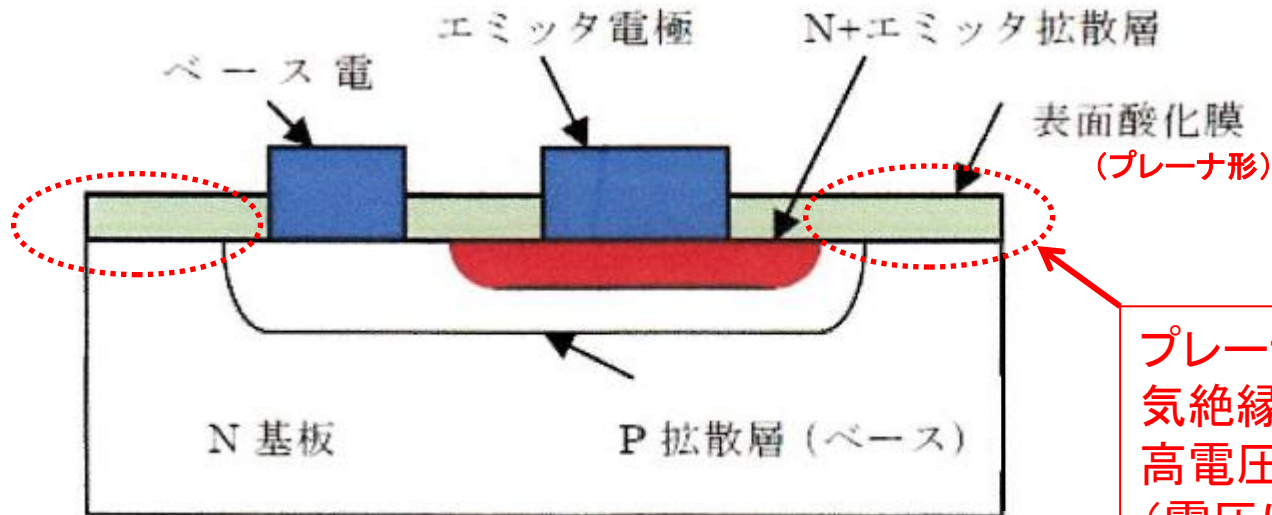
(メサ構造)



(メサ形npnトランジスタの基本構造)

半導体の電気絶縁から見た 素子構造の変遷(2)

(プレーナ構造)

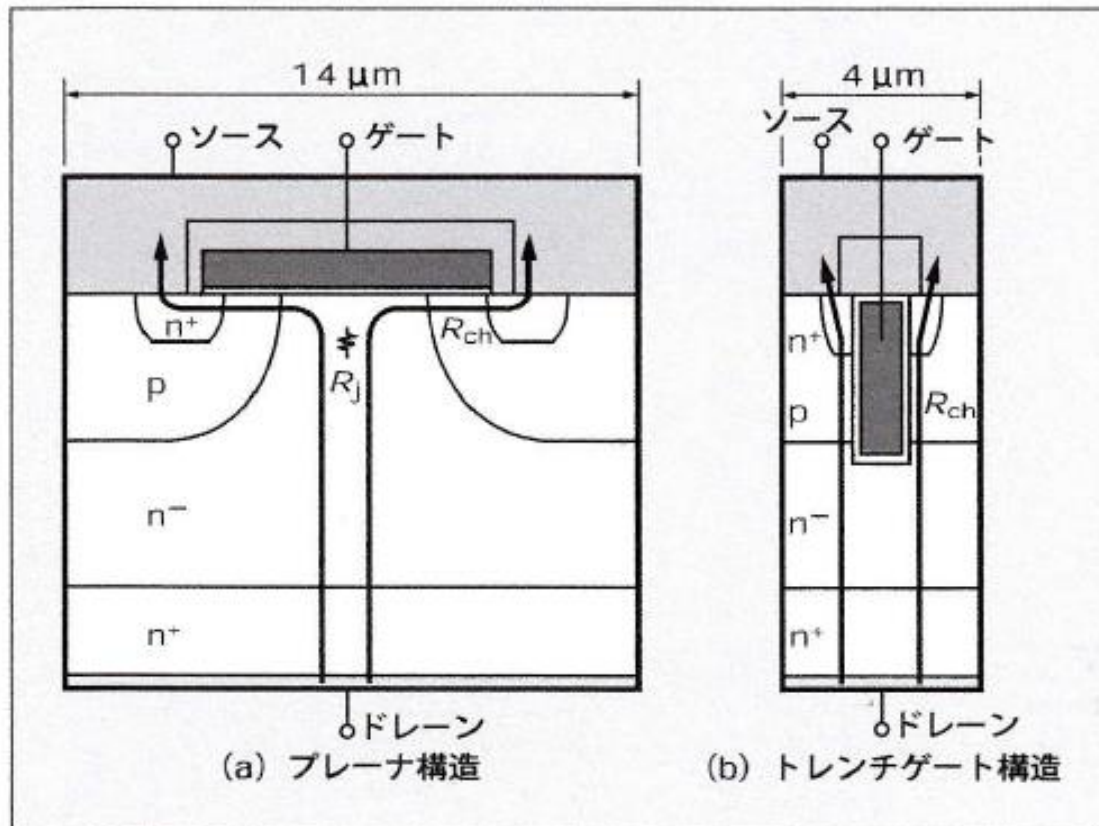


プレーナ部で電気絶縁するので高電圧化が容易
(電圧は沿面距離に比例する)

半導体のオン電圧低減から見た 素子構造の変遷(1)

(プレーナ形からトレンチゲート構造へ)

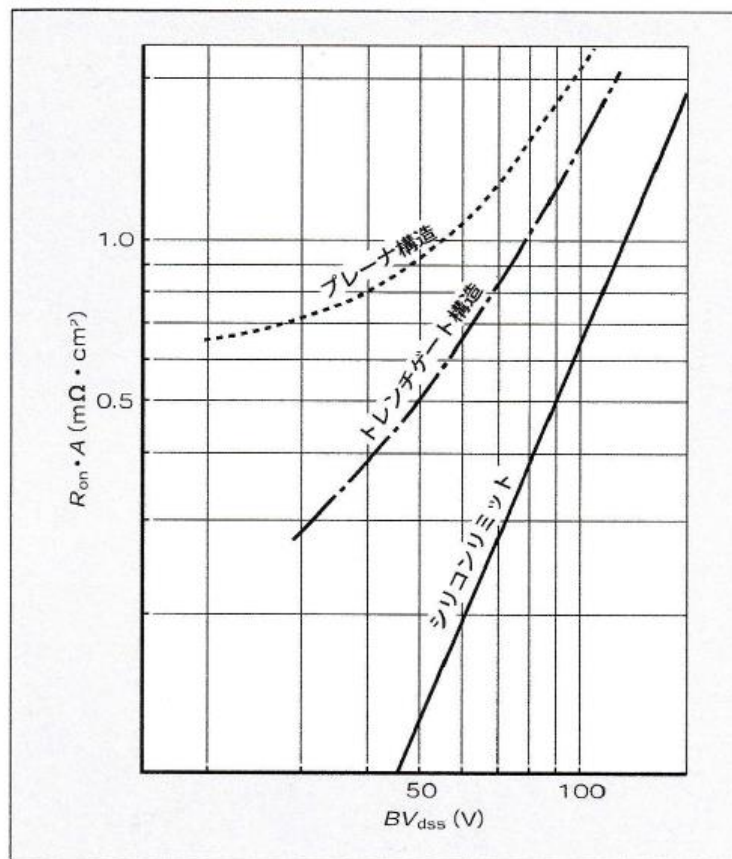
(MOSFET)



半導体のオン電圧低減から見た 素子構造の変遷(2)

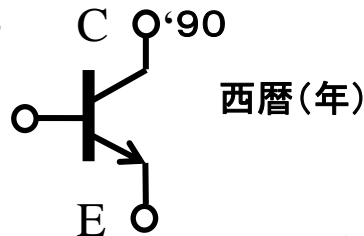
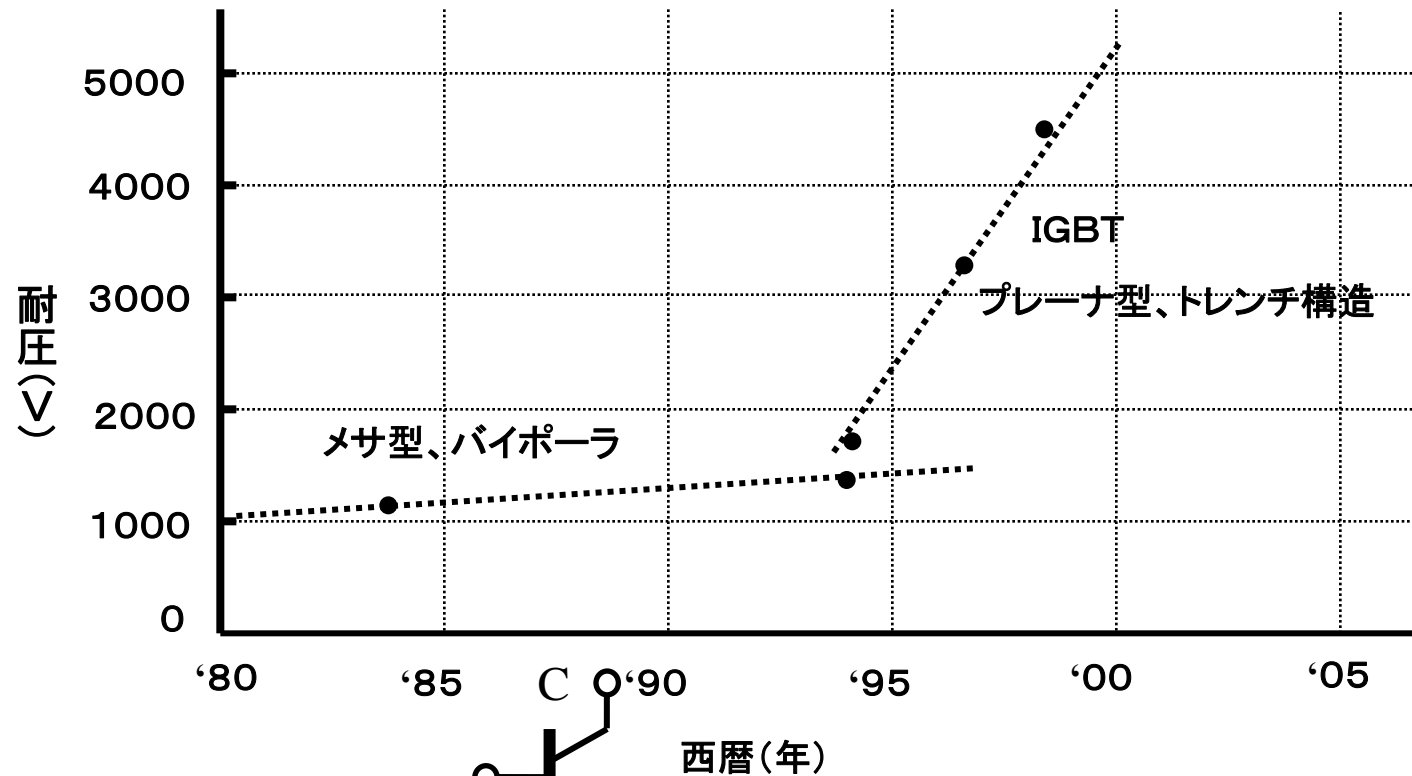
(オン抵抗の変遷)

(MOSFET)



出展: 富士時報 Vol.72, No.3 1999年

パワートランジスタ耐圧の変遷



出展: 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』
 第159回パワーエレクトロニクス学会定例研究会(2005-7-30)

SiデバイスとSiCデバイスの 特性比較

特性	特性値比較 (SiC / Si)
融点 (°C)	~ 2 倍 (2,800 / 1,420)
エネルギーギャップ (eV)	~ 3 倍 (3.2 / 1.1)
絶縁破壊電圧 (V / cm)	10 倍 (3×10^5 / 3×10^4)
熱伝導率 (W / cm · °C)	~ 3 倍 (5.0 / 1.9)

SiC デバイスの良さ(特徴)

1. 高耐圧化が容易

高々耐圧デバイス

2. 低損失

装置の小形化

3. 高温動作

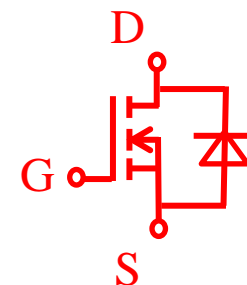
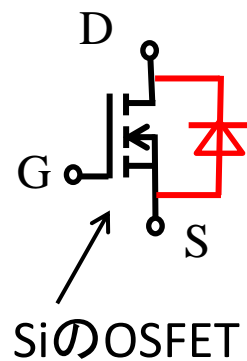
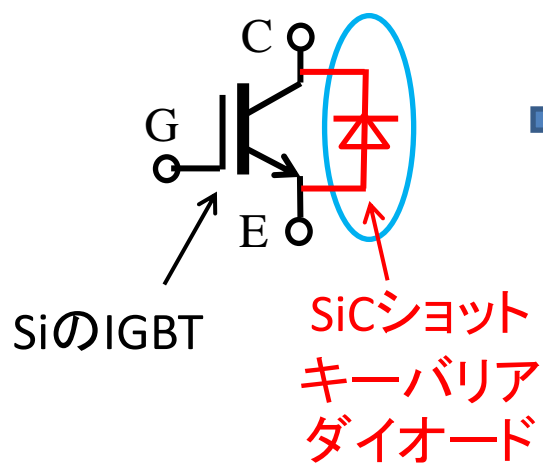
用途拡大、小形化

4. 高スイッチング周波数動作

小形化

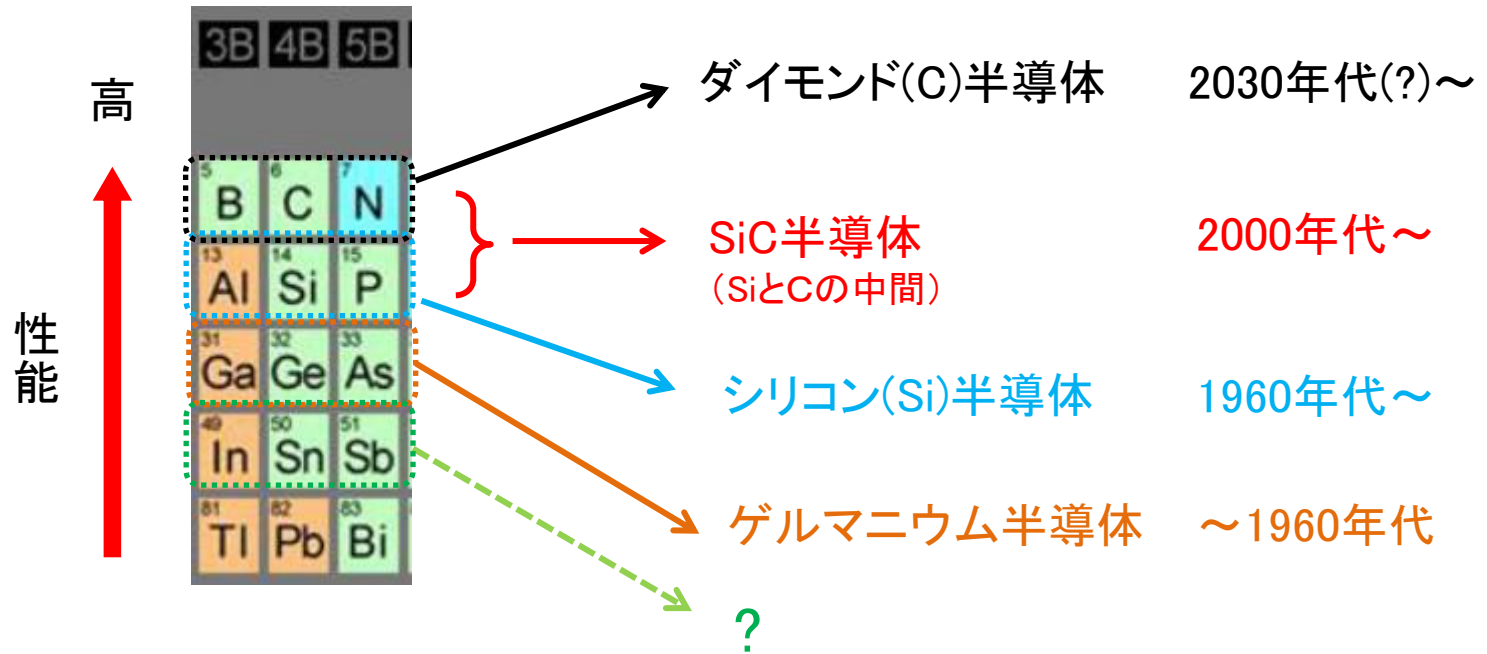
SiC素子の実用化の歩み

初期



次のパワーデバイスは？

周期率表のⅢ族、Ⅳ族、Ⅴ族元素



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6回 (2019-1-25)

(2018-12-21の定例会での講座はお休みです)

半導体変換装置(1)

直流変換装置

(チョツパ、DC-DCコンバータ)