

高耐压 半導体パワーデバイスの本質

絶縁状態 ⇔ 通電状態 (スイッチ)

●ガス放電管

- ガス原子の電離による電子と正イオンの発生
- 電子とガス原子の**プラズマ**

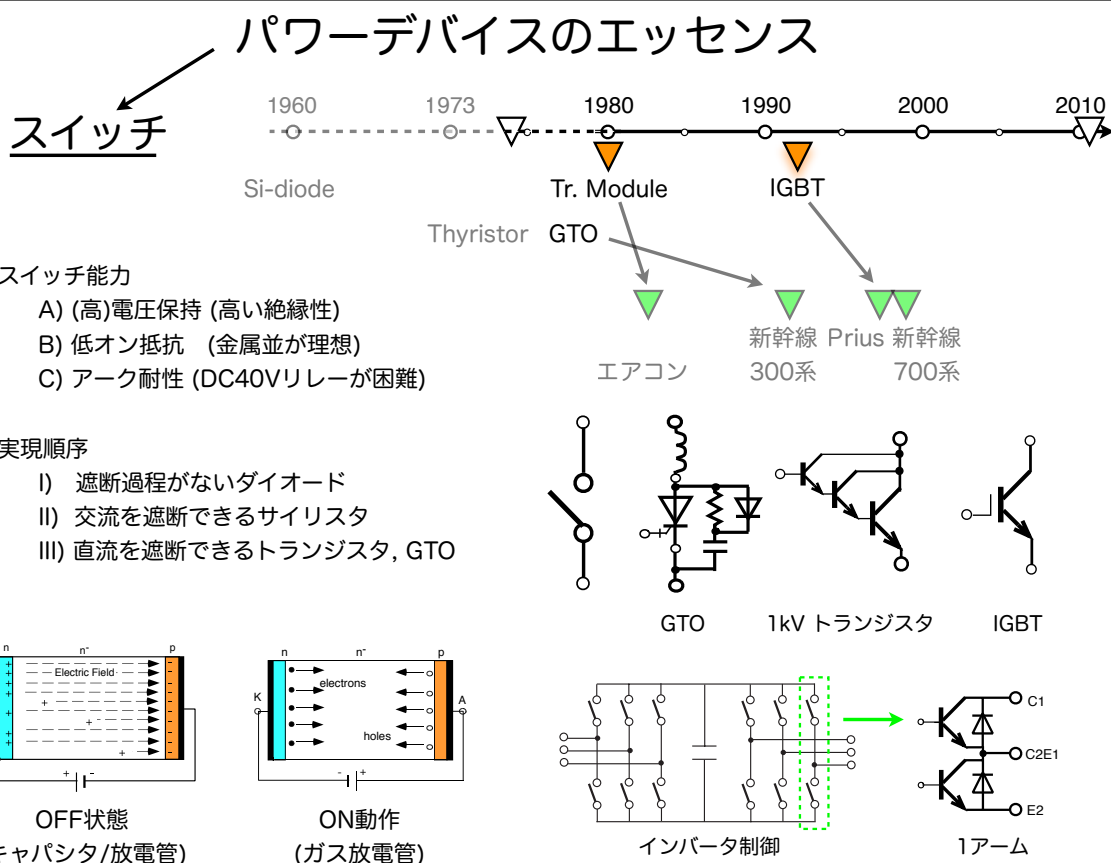
●半導体

- 自由電子と正孔が**既存**
- 電荷担体密度の制御が可能 (in 真性半導体: n^-)
- 電圧保持能力 (OFF状態 & 通電状態)
 - 「静的な耐压」と「動的な耐压: **安全動作領域**」

15年11月7日土曜日

(配付資料 2015 #2-p.1) 高田
ガス放電管は自己遮断できない。
電荷担体: 自由電子と正孔。

1



15年11月7日土曜日

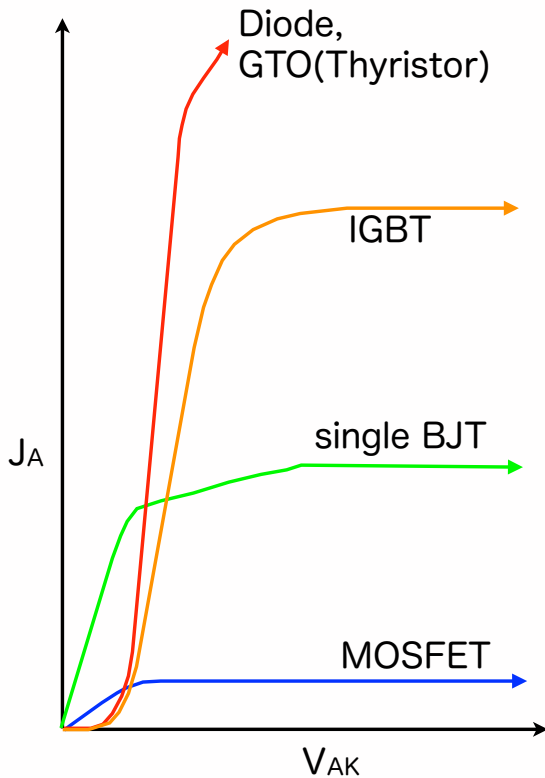
(配付資料 2015 #2-p.2c) 制御理論が重要な訳! (GTO構成図を修正)

システム屋には、パワーデバイスは単なるスイッチ (それが正解)。

リレーを使ってもインバータは出来る。還流ダイオードは必要。

2

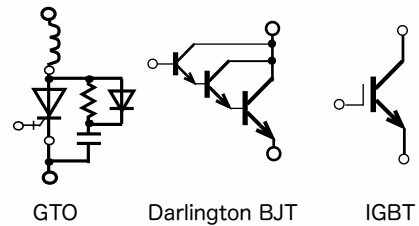
各デバイスの立ち上がり特性



•定格電圧が高くなるほど差が広がる。

•GTO (diode)とIGBTは数居電圧($\approx 0.7V$)が存在する。

•BJTは、ダーリントン接続にすると数居電圧($\approx 0.7V$)が発生する。



15年11月7日土曜日

(配付資料 2015 #2-p.3) 高田

数居電圧: GTO, IGBTはpinダイオード動作に負う。

ダーリントントランジスタは、前段の V_{BE} に負う。

3

半導体 vs. 金属

半導体: 絶縁体 \leftrightarrow 導体 (可変抵抗)

$$J = q \cdot n \cdot \mu \cdot EF \text{ (ドリフト電流)}$$

	半導体 (Si)	金属
$n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$0 \sim 10^{14}, 10^{18}$	$\approx 10^{22}$
$\mu \text{ (cm}^2/\text{Vs)}$	$1,500 \sim 100$	≤ 50
$J \text{ (A/cm}^2\text{)}$	≈ 100	(温度制限)
$J_{\max} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	($\geq 10,000$)	(温度制限)
$E.\text{Field (V/cm)}$	$\sim 100,000$	$\ll 1$

15年11月7日土曜日

(配付資料 2015 #2-p.4) 高田

アボカド口数($6 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$)/(原子量/比重)

原子量/比重: Cu=(63.6/8.9), Si=(28/2.3), シリコンの原子密度= $5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$

4

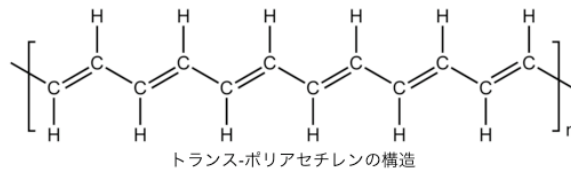
半導体とは何か？

● 電気伝導度での区別は不適切

● 必要要件

1. 自由電子と正孔の共存 (両極性の荷電担体) ...化学と類似？
2. キャリア密度が桁違いに変化 (温度, 光, 電圧に依存)
3. <共有結合が連続する構造>

● ダイヤモンド, SiC, Si, Ge, GaAs, ポリアセチレンが共有する因子？



有機半導体の要件は、”共役二重構造”の存在

15年11月7日土曜日

5

(配付資料 2015 #2-p.5) 高田

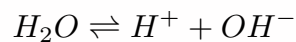
(パワーデバイスだからこそ、新たなアイデアが必要だった)

正孔と自由電子の基本反応

- 最外殻電子の移動 -

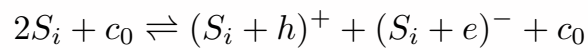
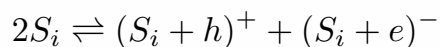
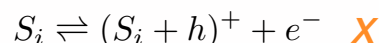
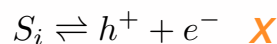
● H^+ と OH^- (水中)

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14} (mol/l)^2 \quad (@300K)$$

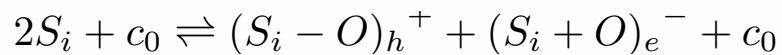


● n_h と n_e (シリコン中) - 固体中の化学反応 -

$$\underline{n_h n_e = n_i^2 = 1.2 \times 10^{20} cm^{-6}} \quad (@300K)$$



c_0 : (触媒)



O : 最外殻軌道

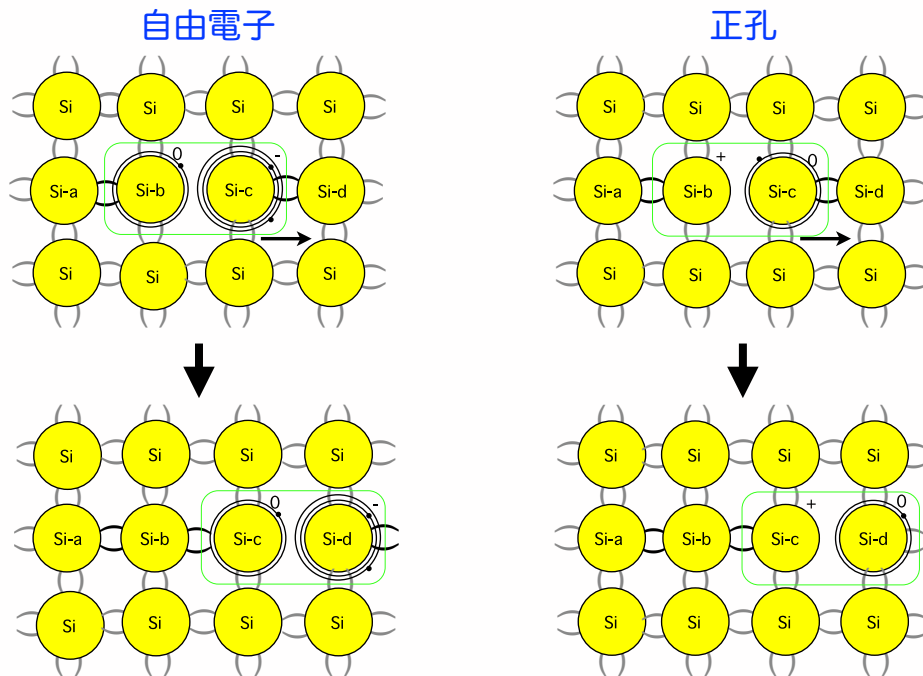
15年11月7日土曜日

6

(配付資料 2015 #2-p.6) 高田

質量作用の法則は、(化学反応の)平衡状態で成り立つ。

自由電子と正孔の移動手順 (シリコン内)



最外殻軌道の移動 + 共有結合の切断と再結合
自由電子と正孔は同等

15年11月7日土曜日

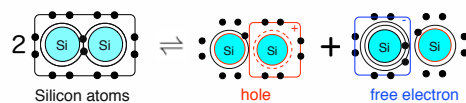
7

(配付資料 2015 #2-p.7) 高田

ポリアセチレンの自由電子, 正孔の伝導と同等。

<解説>

1. 高耐圧パワーデバイスの本質はスイッチである。スイッチには(A)高い絶縁性、(B)低オン電圧、(C)オフ時に発生するアークに対する耐性が要求される。パワーデバイスの実用化には特に(C)が問題となったので、(I)遮断過程が無いダイオード、(II)交流を遮断できるサイリスタ、そして最後に(III)直流を遮断できるトランジスタの順に実現した。
2. 高電圧パワーデバイスの基本は、p領域とn領域の間に純粋なシリコン領域を挟んだpinダイオードである。高電圧を保持する機構は基本的にキャパシタと同じで、そのオン動作はガス放電管の(+, - 担体が混在する)通電機構と同じである
3. 「半導体の正孔は自由電子と同等に振る舞う」と言うのが、半導体技術者の実感である。
4. 最も単純な半導体は、白川 英樹が導電性を確認したポリアセチレンである(1次元半導体)。共有結合と二重共有結合の連鎖(共役二重構造)が半導体特性を示すことは、化学では良く知られている。3次元構造では、共有結合結晶であれば半導体になることが期待できる。実際に、Ge, Si, ダイヤモンド, SiC等、半導体結晶は共有結合特性を有する。
5. $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$ 反応における H^+ イオン濃度 $[\text{H}^+]$ と OH^- イオン濃度 $[\text{OH}^-]$ の積が $10^{-14} \text{ (mol/l)}^2$ となる関係(質量作用の法則)に擬えらると、シリコンの正孔密度 n_h と自由電子密度 n_e の積が 10^{20} cm^{-6} となる関係の反応式として、 $2\text{Si} \rightleftharpoons (\text{Si}-\text{O})^+ + (\text{Si}+\text{O})^-$ を想定することが出来る(Oは最外殻電子軌道を示す)。すなわち、最外殻軌道が1ヶ過剰な原子対が自由電子として振る舞い、1ヶ不足する原子対が正孔に当たる。(高田 案)
6. 実際には、下図に示すように、1対のSi原子の片方の最外殻軌道が過剰な状況が自由電子で、逆に不足する原子対が正孔に当たると考えられる(単独の●は共有結合状態の電子を示す)。そうすると、1対のSi原子の周りの6対の電子は全て共有結合状態にあるので、結晶中のどのSi原子対とも置き換わっても周りの原子群と齟齬を生じない。(高田 案)



7. 自由電子や正孔の移動は、最外殻軌道電子がSi原子間の共有結合の切断と再結合を伴いながら(熱運動でランダムな方向に)移動する状況に他ならない。(高田 案)
8. 外部電界が加わると、このランダム運動体の中心位置が電界方向に偏る。
この運動体の周囲に及ぼす影響が同じなので、正孔と自由電子は同等に振る舞う。

15年11月7日土曜日

8

(配付資料 2015 #2-p.8) 高田

(5.)~(8.)は高田案である。