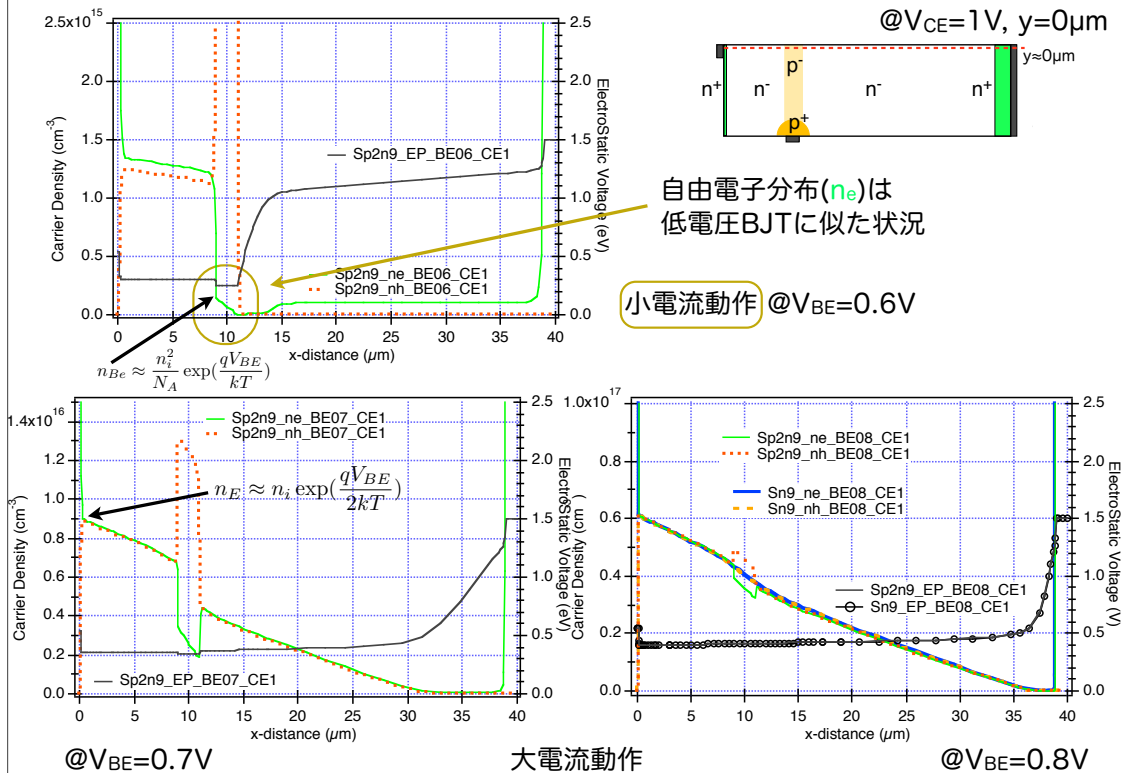


高耐圧BJTの電荷担体密度と電位分布(シミュレーション結果)



16年7月12日火曜日

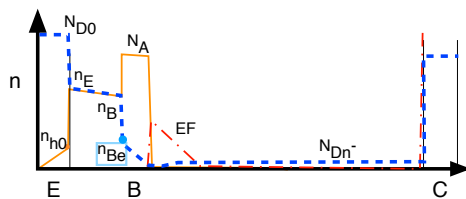
(参考資料 2016 #10-p.1) :高田

大電流動作は、n⁻領域の電界存在領域の幅 x_n を小さくして電界強度EFを増やして、大きな J_C を流す状況。この時、電荷担体存在領域がベース領域からコレクタ側に伸展する。

高耐圧BJTの小電流動作/大電流動作

小電流動作

$$n_{en^-} = N_{Dn^-}$$

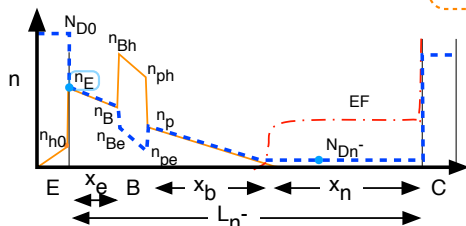


p-ベース領域の拡散電流

$$n_{Be} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$$

接合端部の少数電荷は熱平衡状態時(n_i^2/N_i)の $e^{qV_0/KT}$ 倍

大電流動作-A $n_{en^-} = N_{Dn^-}, J_C > q\mu_e \frac{V_{CE} - V_{BE}}{L_{BC}} N_{Dn^-}$



全n⁻領域の拡散(+ドリフト)電流

$$n_E \approx n_i \exp(\frac{qV_{BE}}{2kT})$$

接合端部のキャリアは真性キャリア密度(n_i)の $e^{qV_0/2KT}$ 倍

$$EF = \frac{J_C}{q\mu_e n_e}$$

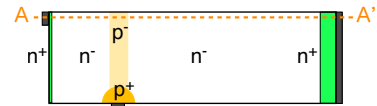
16年7月12日火曜日

(参考資料 2016 #10-p.2) :高田

小電流動作は低耐圧トランジスタと変わらない。p-ベース領域での自由電子の拡散電流。大電流動作は、n⁻領域の電界存在領域の幅 x_n を小さくして電界強度EFを増やして、大きな J_C を流す状況。 x_b は長くなり、拡散電流である J_C が低下することで安定な動作となる。

高耐圧BJTの大電流動作-A

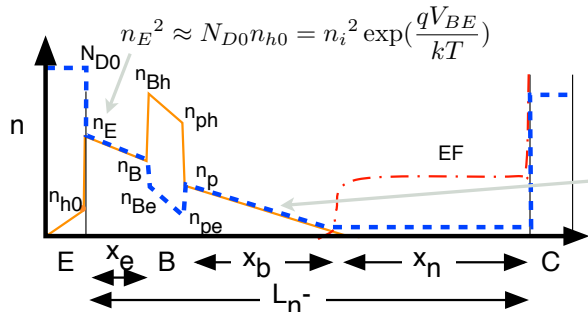
- 電荷担体存在領域がベース領域からコレクタ側に伸展する。
あるいは、電界存在領域が n^- 長よりも短くなる。



$$J_B = \frac{qD_h n_{h0}}{L_E} + \frac{qD'_e n'_{Be}}{L'_B} \approx \frac{qD_h n_{h0}}{L_E} \approx \frac{qD_h}{L_E} \frac{n_i^2}{N_{D0}} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)$$

$$J_C \approx \frac{2qD_e n_E}{L_{n^-}} \approx \frac{2qD_e}{L_{n^-}} n_i \exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right) \quad \leftarrow \quad J_C = 2qD_e \frac{n_E - n_B}{x_e} = 2qD_e \frac{n_p}{x_b}$$

$$h_{FE} = \frac{J_C}{J_B} \approx \frac{D_e N_{D0} L_E}{D_h n_i L_{n^-}} \exp\left(\frac{-qV_{BE}}{2kT}\right)$$



BJT内のキャリア密度と電界強度分布の模式図

正孔電流は流れない

電子電流は拡散電流の2倍

$$-qD_h \frac{dn_h}{dx} = qn_h \mu_h E_i$$

$$J_e = qD_e \frac{dn_e}{dx} - qn_e \mu_e E_i = 2qD_e \frac{dn}{dx}$$

16年7月12日火曜日

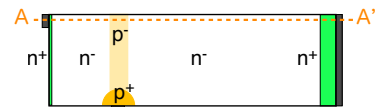
(参考資料 2016 #10-p.3) :高田

J_B の第2項は、 p^+ 領域内の自由電子の拡散電流に当たる。

p^+ 不純物が高濃度のため小さくなり無視できる。

3

高耐圧BJTの大電流動作-B



高電圧
大電流動作

$$n_{en^-} > N_{Dn^-}, \quad v_{de} \approx v_s$$

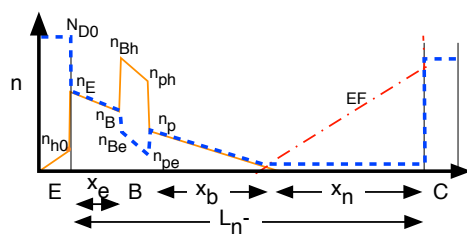
全 n^- 領域の拡散(+ドリフト)電流

$$n_E \approx n_i \exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right)$$

接合端部の電荷担体密度は

真性電荷担体密度(n_i)の $e^{qV_0/2kT}$ 倍

$$EF \approx \frac{q}{\epsilon_s} n_e x = \frac{q}{\epsilon_s} \frac{J_C}{qv_s} x$$

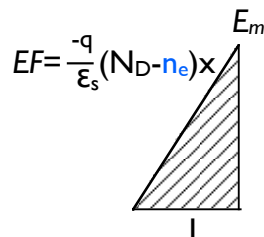


$$E_m = -q(N_D - n_e)L/\epsilon_s$$

$$\epsilon_s \approx 1 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$$

$$v_s \approx 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

$$E_c \approx 1.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$$



$$\epsilon_s \nabla^2 \psi = -q(n_h - n_e + N_D - N_A)$$

$$V = E_m \cdot L/2 \approx \epsilon_s \cdot E_m^2 / (2 \cdot q \cdot n_e)$$

$$J \cdot V = q \cdot v_s \cdot n_e \cdot V \approx (\epsilon_s \cdot v_s / 2) \cdot E_m^2$$

$$J \cdot V \approx 110 \text{ kW/cm}^2$$

16年7月12日火曜日

(参考資料 2016 #10-p.4) :高田

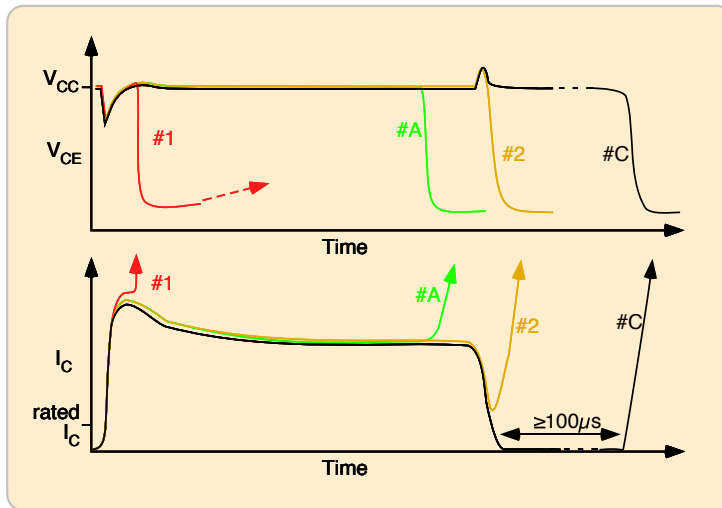
ドリフト速度(μEF)が飽和速度(v_s)に達すると、 x_n の短縮による J_C の増大効果なし。

代わりに、(正味の負電荷密度が増えると)電界強度EF増大する関係が働き J_C が増大する。

電界強度EFは直線的に増大し、その傾きは(巨大電流動作では) J_C に比例する。この関係を使って、短絡耐量の解析が行われた(1983年)。

4

Destruction Modes on Short Circuit



BJTの解析

#1: '83 高田

IGBTの解析

(#2: '85 中川)

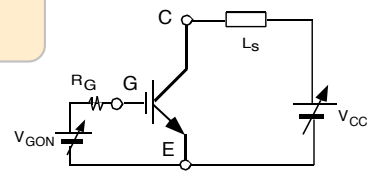
(#1: '93 山下)

#A: '94 萩野

#1: '02 高田

(#2: '02 高田)

#C: '03 大月



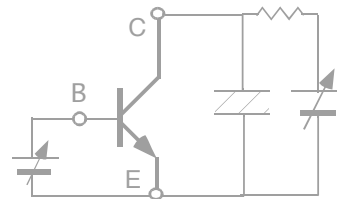
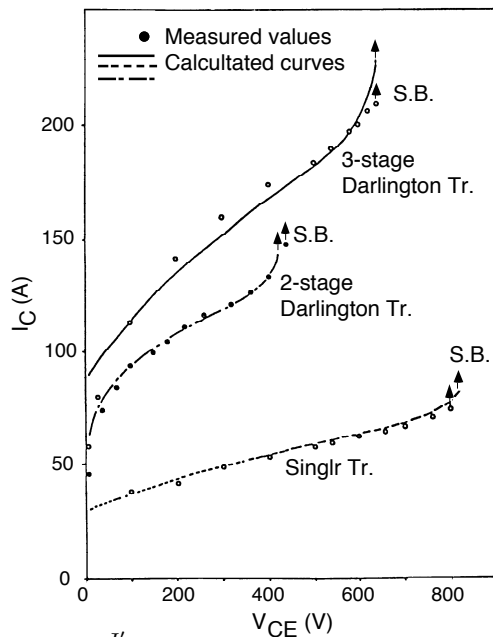
16年7月12日火曜日

(参考資料 2016 #10-p.5) :高田

5

短絡動作時の I_C - V_{CE} 特性の測定値と計算値

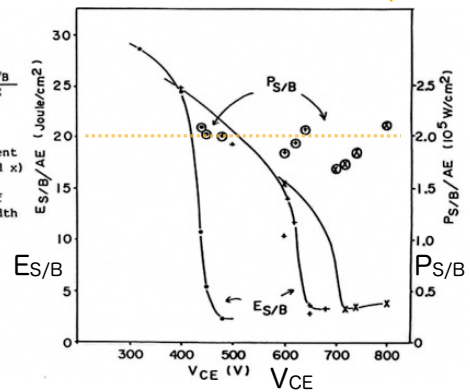
短絡破壊現象の解析 (I)



瞬時破壊条件: $J_C \cdot V_{CE} \approx 200 \text{ kW/cm}^2$

Fig.8

$\frac{E_S/B}{AE} \text{ \& } \frac{P_S/B}{AE}$
vs. V_{CE}
Three different marks (+, * and x) indicate difference of collector width



$$J_C = \frac{J'_C}{(1-A)}$$

$$J'_C = h_{FE} \left(\frac{I_B}{AE} + A J'_C \right) - C \left[W_C - \sqrt{\frac{2\epsilon_s v_s V_{CE}}{(1-A)J'_C - qN_D v_s}} \right] = h_{FE} \left(\frac{I_B}{AE} + A J'_C \right) - C(W_C - L)$$

16年7月12日火曜日

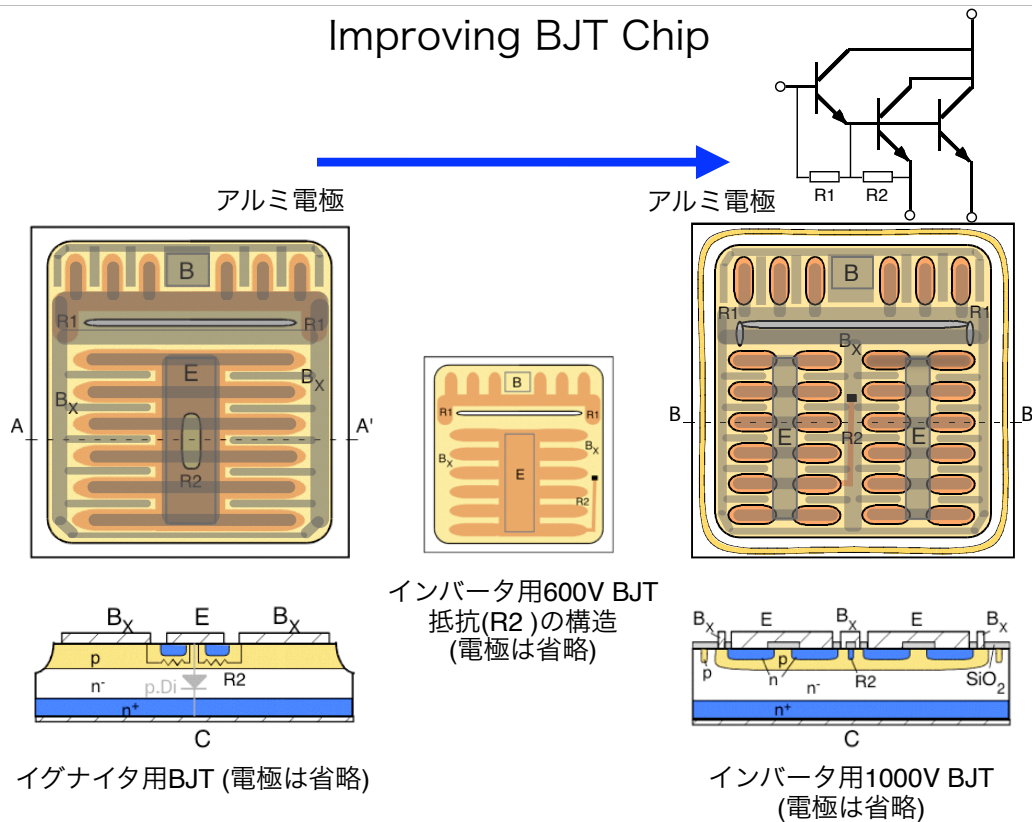
(参考資料 2016 #10-p.6) :高田

1983年 BJT短絡動作機構の説明

J_C^* は、 $I_C/(\text{エミッタ面積})$ 。デバイス面積で求めると、 $J_C V_{CE} \approx 100 \text{ kW/cm}^2$ 。

6

Improving BJT Chip



16年7月12日火曜日

(参考資料 2016 #10-p.7) :高田

壊れるところ(エミッタ中央の短絡部とトランジスタ段間部のエミッタ領域)を取り去っていった。
原理的なトランジスタ構造のみが残った。

<解説: PwDev#10: バイポーラ トランジスタ(BJT)の基本動作-II: device simulationに拠る計算結果 >

- (p.1) 右上の高耐圧BJT構造の上辺部(赤破線)の正孔と自由電子密度 n_h , n_e と電位EPの分布の V_{BE} 依存性を示す(@ $V_{CE}=1V$)。<左上図>の小電流動作(@ $V_{BE}=0.6V$)では、p領域のコレクタ側に1V近い電位差が生じて V_{CE} を保持している。ここには高電界が存在するので $n_h \approx n_e \approx 0$ となる(空乏層)。自由電子はp領域中の勾配(n_{Be}/L_p)を拡散電流として流れて、コレクタ電流となる。 $n_{Be} = (n_i^2/N_A) \exp(qV_{BE}/kT)$ 。
- (p.1)<左下図>は $V_{BE}=0.7V$ 、<右下図>は $V_{BE}=0.8V$ の状況である。 n^- 領域の電荷担体密度はコレクタ側に直線的に低下して、その先からコレクタ n^+ 層の間で V_{CE} が保持される。B-C間に正孔は流れ得ないので、正孔の拡散を押し止めるコレクタからベース側に向かう電界が存在する。自由電子は、密度勾配による拡散機構とこの内部電界に因るドリフト機構に因ってコレクタ側に動く(I_c)。両機構に因る電流値は等しい。 n^- 領域左端部の自由電子密度は $n_E = n_i \exp(qV_{BE}/2kT)$ である。
- 上記(1.)は、#8講義参考資料p.6図の $V_{CE}=10V$ の状況に相応する。(2.)の<左下図>は#8-p.6図の $V_{CE}=1V$ 図と同じである。BJT内部の分布は、 V_{BE} (すなわち内部の電荷担体量)と V_{CE} の両方に依存する。
- (p.2)は、(p.1)に示す小電流動作<上図>と大電流動作<下図>の状況を模式的に示している。<上図>の電圧保持領域以外と<下図>のベース拡張領域外の n^- 領域は抵抗として働いて、不純物濃度 N_{Dn^-} と同じ密度の自由電子が存在する。抵抗を流れる得るドリフト電流値($q \mu_E E N_{Dn^-}$)よりもコレクタ電流密度 J_c が増すと、小電流動作<上図>→大電流動作<下図>に移行する。
- BJTのベース電流 J_B は、pinダイオードの小電流動作と同じ形で表される(p.3-第1式)。ただし、自由電子成分はp+領域を有するBJT構造では n_{Be} が小さくなるので無視できる。小電流動作の h_{FE} は $J_c = qD_e(n_{Be}/L_p)$ をこの J_B で除した値となる。
- (p.3) 右下の上側の式は n^- 領域中で、正孔の拡散電流とドリフト電流が打ち消し合うことを示している。この式から求めた内部電界 E_i を下側の自由電子電流式に代入して、Einsteinの関係式($qD = kT\mu$)を用いるとドリフト電流成分が拡散電流成分に等しくなることが導かれる。この自由電子電流を J_c として先の J_B で除すと大電流動作の h_{FE} が得られて、 $h_{FE} \propto 1/J_c$ が判る。
- J_c が増すと、<p.2下図>の電界強度($E = J_c/(q \mu_E N_{Dn^-})$)がそれに比例して増大することで、 n^- 抵抗領域を電流が流れる。ところが、 E が増すとドリフト速度 v_d は早晩飽和速度 v_s に達する。すると J_c の増大は自由電子密度 n_e が(N_{Dn^-} よりも)増えることで賄われる。そして大電流で $n_e \gg N_{Dn^-}$ となる状況が(p.4)である。 n^- 領域の総電荷密度は負となって、その傾きは J_c に比例すると近似できる。 $J_c V_{CE} = (\epsilon_s v_s/2) E_m^2$ となるが、衝突電離作用による増倍率が $(1+1/h_{FE})$ 程度となる目処として $E_m=150 \text{ kV/cm}$ と選べば、衝突電離作用で発生した正孔が J_c を流し続ける臨界条件として $J_c V_{CE} \approx 110 \text{ kW/cm}^2$ を得る。
- BJTの短絡動作試験を行うと(p.5)の#1波形の破壊が問題になったが、それが起こるのはBJTや試験条件に拠らず $J_e V_{CE} \approx 200 \text{ kW/cm}^2$ となった<p.6右図>。2倍の差はエミッタ面積がコレクタ面積の約1/2であるためである。

16年7月12日火曜日

(参考資料 2016 #10-p.8) :高田

BJTの短絡動作時の瞬時破壊は、BJTの普通の高電圧、大電流動作で、電界強度が高くなって衝突電離作用が起こり、それによって発生した正孔がベース電流として動く。発生率が J_c/h_{FE} を超えれば正帰還が起きて J_c が増大し続ける。これを破壊と判断していた。
また、L負荷オフ時の破壊は、トランジスタ構造を純化して寄生部を無くすることで解決した(p.7)。