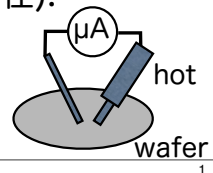


p形半導体と正孔の存在判明の歴史

- 1821年 Seebeck効果 (T. J. Seebeck)
→熱電対の原理 (異金属接触部に温度差があると、起電力を生ず)
- 1834年 Peltier効果 (J. C. A. Peltier)
→異金属に電流を流すと、吸熱 or 発熱反応をする。
- 1854年 Thomson効果 (W. Thomson)
→温度差がある単一金属に電流を流すと、吸熱 or 発熱反応をする。
- 1879年 Hall効果を発見 (E. H. Hall)
→電流方向と垂直に磁場を掛けると、電流, 磁場 両方向に垂直方向に起電力が生じる(担体の電荷量 q とその個数 n の積 qn が測定できる)。
- これらは全て金属に対しての効果として見いだされたが、半導体では著しく顕著に表れる。
また、起電力/電流が逆の物質も存在する(n形とp形の存在)。

- 最も簡便なp形/n形ウエハの判定法 (右図):
→半田ごて側に電流が流れ込むとp形 (逆ならn形)。



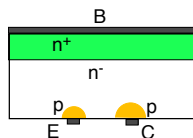
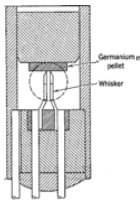
16年7月6日水曜日

(参考資料 2016 #8-p.1) :高田

- ・電荷担体は、高温側から低温側に移動する。それが正電荷か負電荷で発生する起電力は逆になる。
- ・電流が流れると、電荷担体の移動方向にエネルギーも移動する。

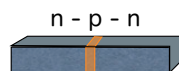
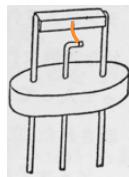
トランジスタ基本構造の発展

Ge点接触形Tr



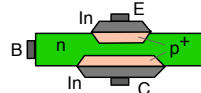
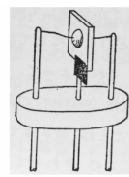
1950年

Ge Tr (成長形)



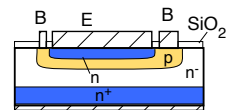
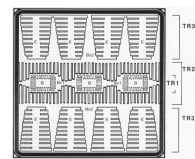
1952年

Ge Tr (合金形)



1952年

Si Tr (プレーナ形)



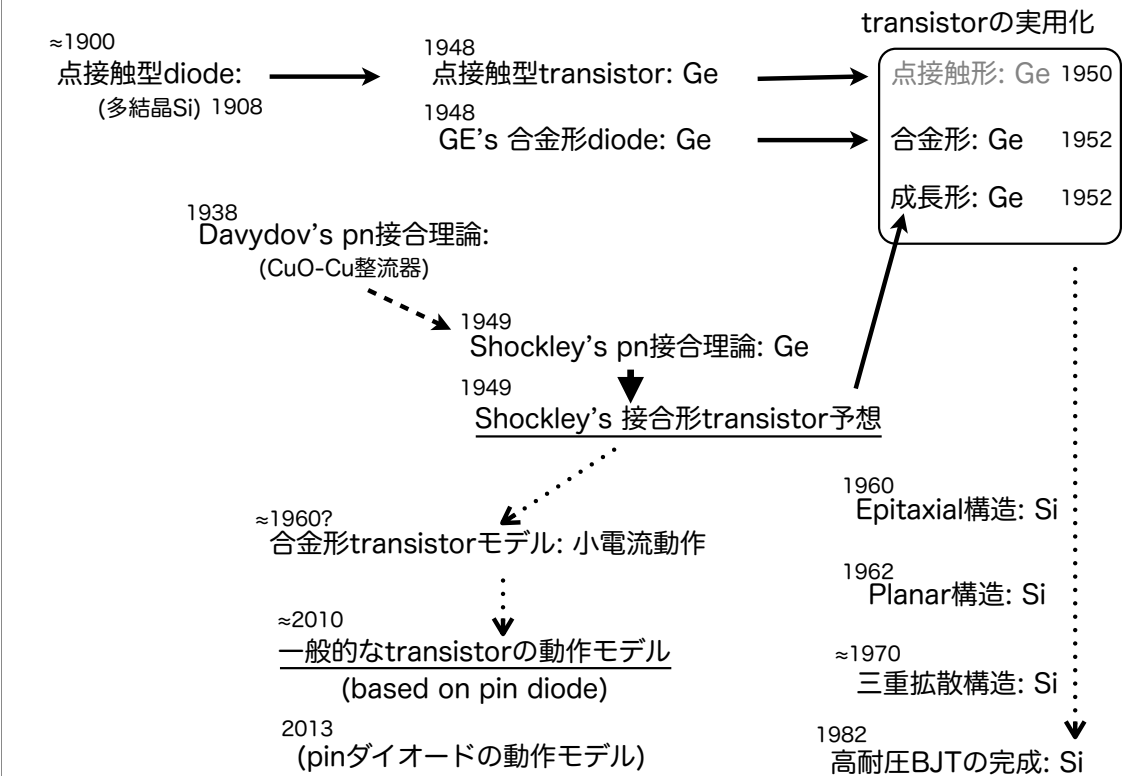
1982年

16年7月6日水曜日

(参考資料 2016 #8-p.2) :高田

合金形は、米国で全自動製造装置が出来ていた。ソニーに2年ほど遅れてラジオ用も可能となった。

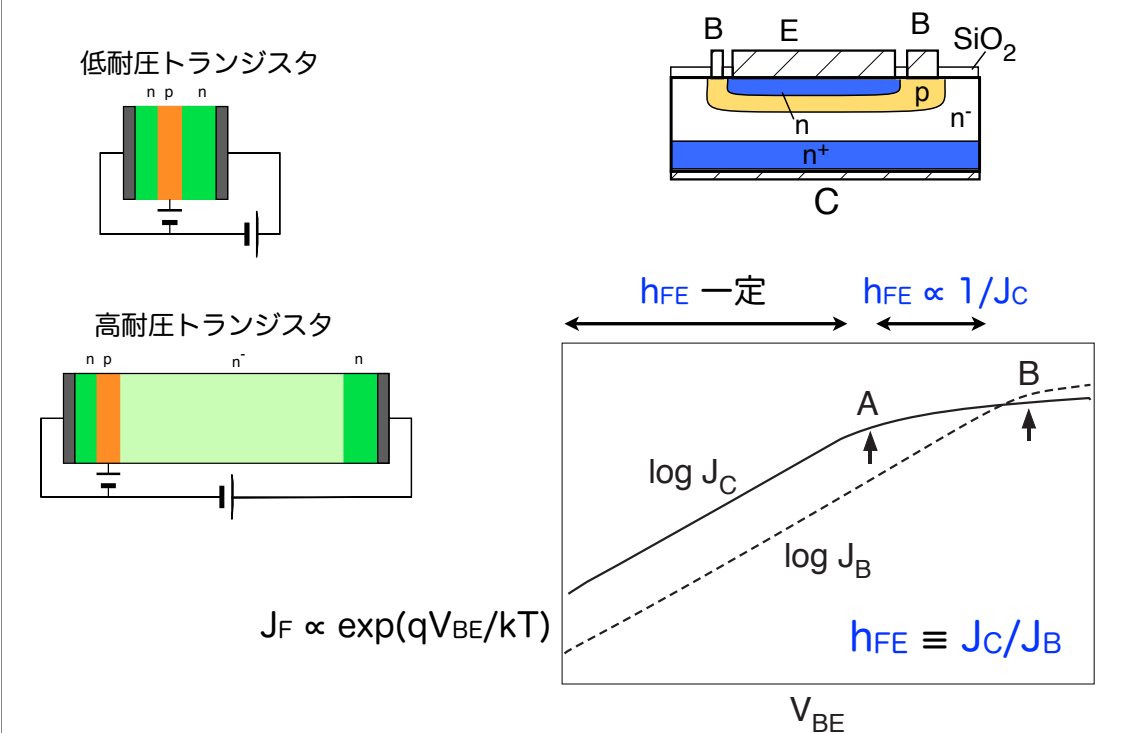
トランジスタの構造と理論の進化



(参考資料 2016 #8-p.3) :高田

Shockleyの理論は突然現れたものではない。
GEは、ダイオード、BJTの開発、製品化に大きな寄与をした。その中心人物はR. Hallであった(半導体レーザーに先立つLED開発も先導した)。

トランジスタ(BJT)の基本特性

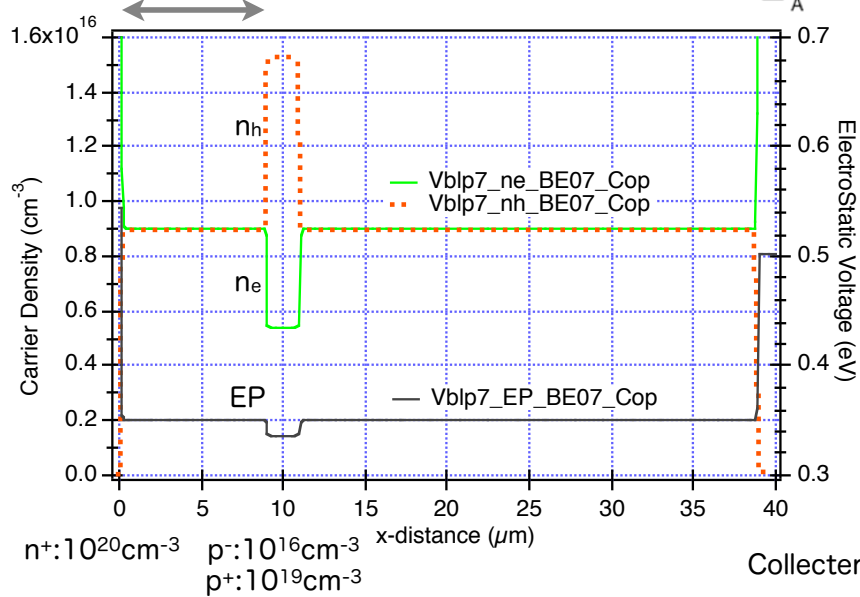


(参考資料 2016 #8-p.4) :高田

右下の図が、 n^- 領域の有無に関わりなく、トランジスタの最も基本的な特性。

E-Bダイオード動作時の電荷担体密度と電位分布

K, A不純物濃度が異なっても
電荷担体密度は一定



@ $V_{BE}=0.7\text{V}$, $y=0\mu\text{m}$

16年7月6日水曜日

5

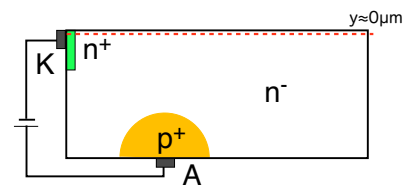
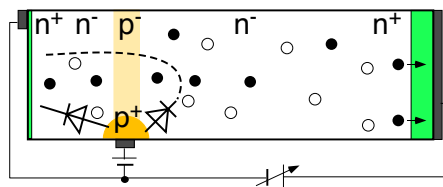
(参考資料 2016 #8-p.5) :高田

コレクタをオープンにしたBSITのB-E間ダイオード動作時の電荷担体密度と電位を示す。

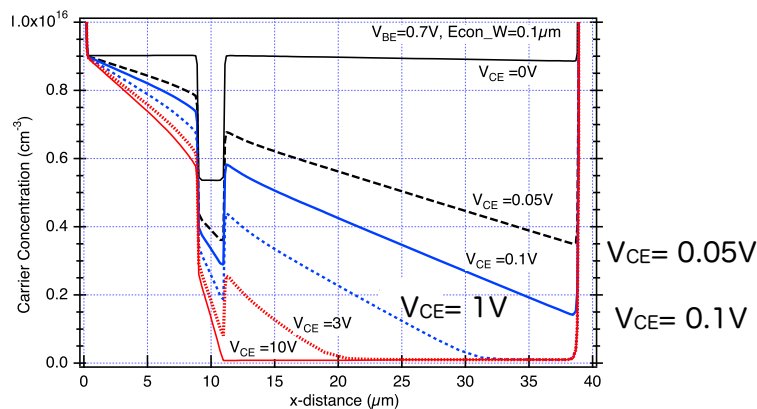
電荷担体密度は n^- 全域で均一! 電位も一定。

一見不思議だが、正孔と自由電子は対であったならば、どこでも動けるので電位差が0!。pinダイオード動作の本質!!

トランジスタの基本動作



E-B間ダイオード



電荷担体密度分布の V_{CE} 依存性

16年7月6日水曜日

6

(参考資料 2016 #8-p.6) :高田

E-B間ダイオードが動作している状況は、 n^- 箇所全体の正孔と自由電子が増えている状況。

僅かにコレクタ電圧を加えると、自由電子が移動することでコレクタ電流が流れる。

これが、最も基本的な"トランジスタ動作"である。

まとめ -1 (バイポーラトランジスタの基本動作)

- BJTベース領域は2つの構成要素(J_c 通路, J_B 通路)からなる。
- E-B間のpinダイオードはいわば独立している。
E-B中間領域の電荷担体密度を決定するだけの働き。
- 高耐圧BJTの低電流動作は低耐圧BJTと基本的に同じ。
- 高耐圧BJTの大電流動作は全n-領域の自由電子の拡散電流。
n-高抵抗部 E近傍の電荷担体密度は p^+ ベース電位(V_{BE})で決まり $n_i \exp(qV_{BE}/2kT)$ となる。
- BJT動作には、電荷担体の再結合現象は必須要因ではない。
- 正孔密度 n_h は、(空乏領域を除く)ほとんどの領域で、その内部電位(V)に応じたボルツマン分布をしている(npn-BJT)。

16年7月6日水曜日

(参考資料 2016 #8-p.7) :高田

7

<解説: PwDev#8: バイポーラ トランジスタ(BJT)の基本動作-I>

- 1.<トランジスタ以前の半導体> 半導体の発端は、M. Faradayが1833年に硫化銀 Ag_2S を熱すると金属並の導電性を示すことの発見である。その後、1870年代にセレンSeの光電特性が発見されて、1883年にはセレン整流器が作られた。1900年頃から方鉛鉱 PbS や多結晶シリコンSiの鉱石検波器(点接触型整流器)が使われ出した。第2次大戦中にSiやGeの単結晶が出来ようになって、レーダー波の検波ダイオードとして使われた。ゲルマニウムGeは最も遅く出現した半導体である。
- 2.ゼーベック効果, ペルチェ効果, ホール効果は、金属を対象として見いだされたが、半導体では桁違いの大きさで現れる。正孔やp形半導体の存在は、これら現象(特にHall効果)の(再)測定から1935年頃に漸く認知された。(p.1)
- 3.点接触形TrはC, E電極とGeの溶融部がp形になっていると予想される。成長形Trのベースには p^+ 部が必ず存在した。単純なnpn3層構造は合金形Trにのみ有効なモデルである。プレーナ形Trではコレクタ側に低濃度不純物領域が存在する。(p.2)
- 4.合金形TrはGE社がBell研とは独立に開発した。GE社のR. Hallの功績は大きい(LED開発も先導した)。Shockleyのpnダイオード理論(彼はトランジスタ理論を提起してない)に先立って、ほぼ同じ内容を金属整流器で提起したDavydovが居た。トランジスタは1982年の1,000V Trモジュールの製品化で完成した。一般理論は2010年頃まで掛かった。(p.3)
- 5.接合形トランジスタ(BJT)の電気特性は、横軸に V_{BE} (直線表示)、縦軸に J_c と J_B を対数表示するのが適切である。どの構造のBJTにおいても、低電流部では $h_{FE} = I_c/I_B$ は一定で、高電流部では $h_{FE} \propto 1/I_c$ となる。(p.4)
6. #6講義では、n領域やp領域が変則的なpinダイオードであっても、小電流の順方向動作時にはi領域全体で電位(EP)、正孔密度、自由電子密度のいずれもが均一になると説明した。そのデバイス シミュレーション結果を示したのが(p.5)である。
7. (p.5)の図は熱平衡状態、すなわち $V_{CE} = 0V$ であった($V_{BE} = 0.7V$)。(p.6)では、その自由電子密度 n_e の V_{CE} 依存性を示している。 V_{CE} が僅かでも加わると、i領域中に均等に存在する自由電子 $[n_e = n_i \exp(qV_F/2kT)]$ が移動する。これがコレクタ電流に他ならない。この状況が最も基本的なトランジスタ動作と言える。(p.6)
8. V_{CE} が増えると n_e のコレクタ側への傾きが増える。しかしながら、エミッタ n^+ 領域横のi領域中の n_e は変わらない $[n_e = n_i \exp(qV_F/2kT)]$ 。 $V_{CE} > 0$.数Vでは、 n_e がn-領域の不純物濃度となる領域がコレクタ側から伸展する。それが、pベース領域に到達すると、そこからコレクタ側に自由電子が存在しない空乏層が伸びて、そこでそれ以上の V_{CE} を保持する。(p.6)
9. (p.7)は、バイポーラ トランジスタの基本動作のまとめである。今回の内容を基に、高電圧(高 V_{CE})や大電流(高 V_{BE})の状況と定量的な評価(h_{FE} 式等)を次回で説明する。
- 10.今回、再結合に全く言及していないが、再結合はBJT動作の必須要素ではない。また、ボルツマン分布則が、熱平衡状態に準じる状況(i.e. 拡散電流 $\approx$ ドリフト電流)で成立することが、BJTに限らずバイポーラ デバイス動作解析の鍵である。

16年7月6日水曜日

(参考資料 2016 #8-p.8) :高田

8

Shockleyは、半導体デバイスに関する唯一の著作"Electrons and Holes in Semiconductors" (半導体物理学 上、)でトランジスタ動作を三極真空管になぞらえて説明している。他の文献にも、彼のトランジスタ動作の纏まった説見つけることが出来なかった。

Shockleyによるトランジスタの動作モデルは存在しないと、判断する。

トランジスタ以前の半導体

- 1833年 硫化銀 Ag_2S を熱すると金属並みの導電性 (M. Farady)
- 1873年 セレンSeが光照射によって電気抵抗が減少 (W. Smith)
- 1876年 セレンSe 光電池として働く (W. Adams, R. Ray)
- 1883年 セレンSe 整流器 (C. Fritts)
- 1874年頃 方鉛鉱 PbS , 黄鉄鉱 FeS_2 整流作用の系統的研究 (F. Braun)
- (1879年 E. Hall: Hall効果を発見)
- 1900年頃～ 点接触形整流器(鉱石検波器)。1904年 PbS , 1908年Si.
- 半導体特性を示す鉱物: SiC , Si, Cu_2O , Fe_2O_3 , ZnO , U_2O , Al_2O_3 等.
- ゲルマニウムGeは、最も遅れて現れた半導体である。
- 1935年～1940年 p形半導体の存在が知られるようになった。
- ≈1945年 Ge, Si単結晶成長技術. p形, n形不純物の添加, 制御。