

“パワーデバイス特論” 高田担当資料の修正箇所

高田 育紀

平成 30 年 9 月 15 日

概 要

“パワーデバイス特論” 高田担当の講義資料 “パワーデバイスの基礎” 第 I 部「パワーデバイスの概略」は、技術的な専門用語を出来るだけ使わずに、パワーデバイスの概要を説明する。まず、パワーデバイスの歴史を述べ、正孔と自由電子の説明から始めて、電圧保持方法、電流を流す機構を紹介して、各パワーデバイスの特徴とその実現に必要であった技術改善点を概説する。

なお、耐圧は低くとも大電流を扱うものは全てパワーデバイスであるが、本書ではパワー IC や横形デバイス並びに数十 V 以下のデバイスは扱わない。横形の高耐圧デバイスには多くの要因が関係するし、低耐圧の高周波デバイス、MOSFET やダイオードは、既に多くの良書があるためである。

また、付録の後半部では、*pin* ダイオードとバイポーラ トランジスタの動作機構、パワーデバイスの動作限界、さらに宇宙線による破壊なども概説している。入門書としては専門的過ぎるのだが、パワーデバイスの核心を覗き見て欲しいためである。

第 II 部「半導体内部における基本現象」では、“半導体中の正孔や自由電子の振る舞い”、“金属-半導体接触”、“デバイス シミュレーションの原理”、“*pin* ダイオードや発光ダイオードの基本動作”、“宇宙線誘起破壊のシミュレーション結果”等を説明する。

第 III 部「パワーデバイス特有動作と長期信頼性」では、第 I 部で紹介した各デバイスの詳しい内容と新材料デバイスや信頼性を取り上げる。“高速 *pin* ダイオード”、“Thyristor, GTO, GCT, SiThy”、“接合形バイポーラ トランジスタ”、“IGBT”、“新材料パワーデバイス”、“構造が制限する動作限界”、“半導体材料で定まる極限動作”、“電力用素子の長期信頼性”、“電力用素子の今後の可能性”等である。

第 IV 部「電子技術屋の考えたプリミティブ物理学」は、分光スペクトルの解析から始まった従来の量子力学は結晶の様な複雑な構造体中の電子の振る舞いを記述するには無理があるという観点から、新しく電子軌道モデルを提起する類いの内容である。パワーデバイスを説明しようとする本書の範疇から全く逸脱しており、著者の勝手な私論で余分な別冊と見なして欲しい。

< 履歴 >

2013 年 9 月: 第 I 部を発行。

2014 年 9 月: 第 I 部 第 2 版を発行。

2015 年 9 月: 第 I 部 第 3 版、第 II, III 部の初版を発行した。

2017 年 5 月: 第 I 部 第 4 版と、第 II 部の基礎物理に関する箇所を大幅に増補して第 IV 部を作成した¹。

2018 年 9 月: 第 IV 部を大幅に修正、補筆した第 2 版を発行した。

(第 I 部は第 4 版、第 II, III 部、IV 部は第 2 版が最新構成になる)

将来 改訂の機会があれば、3.3 節 “不純物濃度が異なる領域の電位障壁” の電位分布図²と 13 章 “発光ダイオードの動作原理”³を修正して、新たに第 II 部 17.9 節として “現在の BJT-高周波用 HBT-”⁴を付加する予定である。

¹また、旧第 II 部と第 III 部の章構成を一部入れ替えた。

²本文章で後述する。

³開発経緯の記載に間違いがあった。修正箇所は、文献 [1] 高田 育紀, “高輝度 LED の開発経緯と動作機構の再検討 -パワーデバイス屋が考えた LED の動作機構-,” H29 電気学会研究会資料, EDD-17-077/ SPC-17-176, pp.21-28, 2017-11-21 を参照されたい。

⁴本文章と同時に東工大 oew “パワーデバイス特論 (2016 年度)” の講義ノート 全体資料として up-load している。

これまでの改訂で多くの修正を行って来たが、“パワーデバイスの基礎”の第Ⅰ部は第4版においても、3.3節“不純物濃度が異なる領域の電位障壁”の電位分布図に致命的な間違いがあることに最近気付いた。

1.1 第Ⅰ部3.3節の修正箇所

次頁の図13.1, 図13.2, 図13.3は、第Ⅰ部3.3節“不純物濃度が異なる領域の電位障壁”の電極で挟まれた半導体領域の電位とフェルミ準位の分布図の各改訂版における変遷を示している⁵。はなはだ節操もなく変更してきたものだと思入る次第である。これらの図を説明する本文を、以下のように修正したい⁶。

— 正しい本文 (第4版 p.16 右下～p.17 左欄)—

さて、物質はそれぞれの状態に応じて固有のエネルギーを有しており⁷、その値を半導体分野では“フェルミ準位” E_F で表す⁸。異なる物体が互いに接して熱平衡状態にあれば、両者の“フェルミ準位” E_F は揃う⁹。例えば、不純物が入っていない真性半導体の両側に金属電極が付いた状況の“フェルミ準位” E_F は、図3.21の破線で表される¹⁰。一方、各領域の電位は仕事関数 ϕ だけ異

なるので、金属と半導体の境界で段差が生じる¹¹。

さらに、 p 形や n 形の不純物原子が導入された半導体中では、自由電子や正孔は、それらのイオンによって純粋な真性半導体(i 領域)であった場合とは異なる影響を受ける。例えば図3.19の右側が i 領域であった場合を考えると、 n 領域の電位は i 領域よりも高くなって、 p 領域の電位は i 領域よりも低くなるのが判る。

一方、半導体のフェルミ準位は最外殻軌道に拘束されている電子のエネルギー準位なので、 n 形や p 形の不純物が導入された場合にも変わらない。すなわち、 n 領域と p 領域のフェルミ準位 $E_{F,n}$ と $E_{F,p}$ は、真性半導体(図3.21の E_i)と同じ値である。

p 形や n 形の不純物原子の導入に因る電位の変化は、それらの導入に依って変化しない電位(ポテンシャル)因子で表すことが出来る。その因子として、伝導帯、価電帯のエネルギー準位 E_c , E_v の中間値(すなわち、真性半導体のエネルギー準位) E_i を用いるのが合理的である¹²。すると、外部電圧が加わらない状況(熱平衡状態)において、図3.22や図3.23で示される関係が出現する。

これらの図中の ElectroStatic Potential (静電電位¹³)線の半導体領域部は、半導体デバイスの電極金属が同じであれば(両電極部で相殺されて)外部に現れないので、特に“内部電位”と呼ばれている。

— 以上 —

なお、著者らが発行した英文書籍“Power Devices for Efficient Energy Conversion”

¹⁴ §2.2.4 の Fig.2.15～Fig.2.17 とその説明は第Ⅰ部 第4版に相応しているので、上記の修正が必要である。

⁵ちなみに、第3版までは図13.1に相応する図はなかった。

⁶第4版では「異なる物体が互いに接して熱平衡状態にあれば、両者の“フェルミ準位” E_F は仕事関数 W だけ異なる」とあるが、「両者の“フェルミ準位” E_F は一致する」。

なお、本文章の東工大 ocv への up-date と同時に、同じく up-date している第3回講義資料と、第15回講義資料中の“修正箇所のまとめ”も修正した。

⁷それは、物質中の電子を取り出して無限遠点に遠ざけるのに必要なエネルギー(仕事関数 ϕ)が異なることから判る。2物体間の相対値を“接触電位差”で表すこともある。熱電対は、この“接触電位差”が温度に依って変わることを利用している。

⁸フェルミエネルギーとも呼ばれているが、それがフェルミ速度 v_F を有する電子の運動エネルギー $m_0 v_F^2/2$ を表すこともあるので、本書では“フェルミ準位”と呼ぶ。この名称は、量子力学では、ある物体に存在し得る電子の最大エネルギーをそう呼ぶことに由来している。本来、それが存在する領域に固有の構成粒子のエネルギー(化学結合や電位(potential)に因るエネルギー)を意味する熱力学の“化学ポテンシャル” μ と同義である。

⁹異なる物体が互いに接して熱平衡状態にあれば、両者の“フェルミ準位” E_F は一致する原則がある。

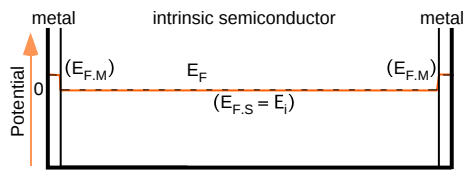
¹⁰真性半導体のフェルミ準位 $E_{F,S}$ は、慣習的に E_i と表す。

¹¹第Ⅱ部10章“半導体と金属の接触”や第Ⅱ部の付録B.20節“仕事関数 ϕ , 電子親和力 χ 等について”を参照されたい。

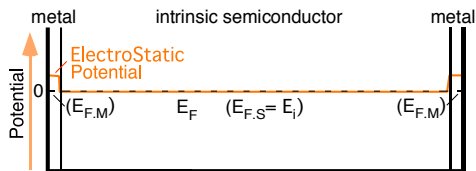
¹²そうすれば、純粋な半導体からの電位変化値を(各図中の破線で表す E_F 値からの変位として)直接読み取ることが出来る。

¹³時間変化が無い時の電位。単に Electric Potential とも言う。その値は、 n^+ 領域 $>n$ 領域 $>p$ 領域の順に低下する。

¹⁴文献 [2] G. Majumdar / I. Takata, Power Devices for Efficient Energy Conversion, Pan Stanford Publishing, 2018-4.

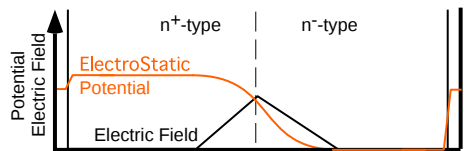


第 I 部 第 4 版の図 3.21.

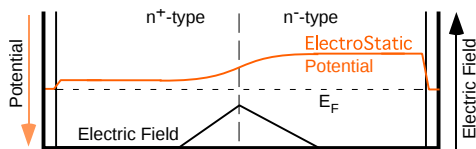


正しい図 3.21 (第 I 部 第 4 版).

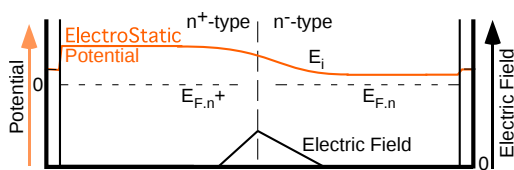
図 1.1: 電極付き真性半導体内部電位分布 (熱平衡時).
(これらに対応する図は第 I 部 第 3 版以前には無かった)



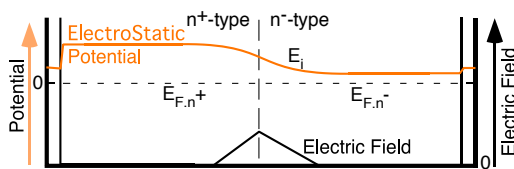
第 I 部 第 1, 2 版の図 3.19.



第 I 部 第 3 版の図 3.20.

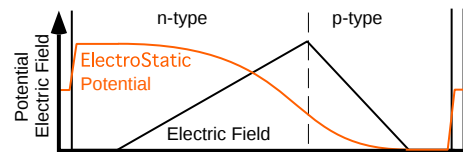


第 I 部 第 4 版の図 3.22.

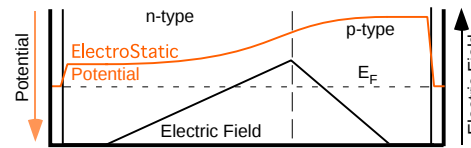


正しい図 3.22 (第 I 部 第 4 版).

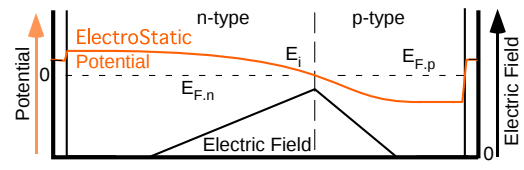
図 1.2: $n^+ - n^-$ 境界の電界強度と電位分布 (熱平衡時).



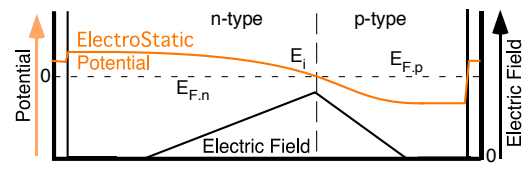
第 I 部 第 1, 2 版の図 3.20.



第 I 部 第 3 版の図 3.21.



第 I 部 第 4 版の図 3.23.



正しい図 3.23 (第 I 部 第 4 版).

図 1.3: np 境界の電界強度と電位分布 (熱平衡時).

1.2 第I部でのSonyトランジスタに関する修正

第I部 5.4.3 項 “接合形バイポーラ トランジスタ (BJT)” の (i. 低耐圧BJT) において、ソニーは最初のトランジスタ ラジオ TR-55 に “自社製の成長形Ge トランジスタを5ヶ使った” と記したが、“自社製の成長形と合金形の Ge トランジスタを5ヶ使った” に修正する。

第I部付録 A.1 節 “トランジスタ実用化を巡る裏話” の第2文節の “自社製の点接触形トランジスタと成長形トランジスタを使ってラジオの試作を開始し” を “自社製の合金形トランジスタと成長形トランジスタを使ってラジオの試作を開始し” に修正する。

東通工 (ソニー) は、成長形トランジスタと同時に合金形トランジスタも試作していたのだった¹⁵。

— 以上 —

1.3 第I部(第2版) 付録 A.13.4 項 “安定性の計算例” 中の修正

第2版の付録 A.13.4 項 “BJT 高耐圧動作 安定性の計算例” の間違いは第3版以降で修正しているが、深刻な論理の誤謬なので改めて記載する。

— 正しい本文-I. (p.121 左下部)—

正しいベース開放時のコレクタ-エミッタ間降伏電圧 BV_{CEO} は、増倍率 M_e が (式 A.55) を満たす V_{CEO} 値である。この (式 A.55) は、(式 A.52) に $J_{B.net} = 0$ と $J_B = 0$ を代入して (式 A.56)、 h_{FE} を J'_C/J_{B0} と見なすことで得られる。増倍率 M_e は、電界存在領域で (式 A.57) を計算すればよい。この式は、正孔の衝突電離作用を無視して¹⁶自由電子の衝突電離作用だけを考慮した式である。

$$M_e - 1 = \frac{1}{h_{FE}} \quad (\text{式 A.55})$$

$$0 \equiv -J_{B0} + (M_e - 1)J'_C \quad (\text{式 A.56})$$

$$M_e \approx \exp\left[\int_0^{t_n} \alpha_e(x) dx\right] \quad (\text{式 A.57})$$

— 正しい本文-II. (p.123 右最下部~p.124 左上部)—

e 領域 $J_{B.net} < 0$ の場合には、 V_{CE} 値を増やすか J_C 値を下げるかして、 $J_{B.net} > 0$ となる電圧、電流条件を見い出す (◎点)。

小さめの J_C 値ならば必ず $\Delta M_e / \Delta J_e < 0$ となる。この点の電流は安定に増大する。

d 領域 $J_{B.net} > 0$ の動作点を得たならば、同じ V_{CE} で $J_{B.net} < 0$ となる ◎点まで J_C を少しずつ増やして行く。この動作点の電流は安定に減少する。

サスティン動作点

— 以上 —

¹⁵高周波回路には成長形トランジスタを、低周波回路には合金形トランジスタを用いた。

これらは、文献 [3] 川名 喜之, “東京通信工業、日本初のトランジスタ及び トランジスタラジオ量産成功の軌跡,” 半導体産業人協会 会報 Encore No.84, pp.26-33, 2014-04 <<http://www.ssis.or.jp/encore/encore2014.html#no84>> からの情報である。

¹⁶シリコンでは α_h が α_e よりも一桁程度小さいので許される。しかしながら、ゲルマニウムでは $\alpha_h > \alpha_e$ なので使えない。実際の (式 A.57) の計算では、まず電界強度分布 $EF(x)$ を求め、 $\alpha_e(x)$ に第II部 7.5.7 項の (式 7.116) か同等の近似式を用いる。

1.4 第II部(第2版)

13.3.1 項, 13.3.2 項の修正

第II部(第2版)13章“発光ダイオードの動作原理”の13.3.1項と13.3.2項中の開発経緯が大きく間違っていたので、以下に修正する¹⁷。

13.3.1 赤色LEDの高輝度化

最初に試作された赤色LEDはGaAs_{1-x}P_xを用いたpn構造で、気相エピ成長法で作られた¹⁸(1962年)[3]。発光効率は0.01%程度と極めて小さかった。1968年に米国で製品化されたが、くすんだ赤色で輝度が低かったので、長寿命と低消費電力を売りにして専ら表示ランプに使われた¹⁹。

自動車の停止ランプに使用し得る高輝度品は、東北大学半導体研究所 西澤 潤一所長の指導によって、(それまでの気相エピ成長法に換えて)温度差を設けた連続液相成長法を実用化したスタンレー電気がpn構造のAl_xGa_{1-x}Asダイオードを1978年に製品化した(90mcd)²⁰[4]。

その後、発光効率は、図13.2に示す構造改善やAl_xGa_yIn_{1-x-y}P系の4元化合物を使用することで大幅に改善されて、近年50~60%に達した²¹。

13.3.2 緑色LEDの高輝度化

緑色に対応したエネルギーギャップ E_g の直接遷移半導体は無いので²²、間接半導体のGaPに窒素N

を大量に添加して黄緑色を得ていた(不純物起因の発光)²³。ところが、西澤はIII-V属半導体の結晶の化学量論的組成(ストイキオメトリ)²⁴に疑問を抱き、GaAs結晶作成時のヒ素As圧力に最適値があることを発見した。彼は、この原理から極めて高品質の化合物結晶を作る蒸気圧制御温度法を見出した[5], [6]。この方法に則って作成した高品質pn構造GaP LEDは、窒素N添加なしで純緑色の80mcdの高輝度発光を可能にした(1978年)²⁵[4], [6]。その際、GaPの発光効率は本質的に低いので、“効率を高くするためには、結晶欠陥を極限的に減少しないと実用に耐え得る純緑色発光は得られない”と説明された[6]。

さらに、Ga_xIn_{1-x}N単一量子井戸構造の青色LEDが実用化した後に、同様の構造を用いてInの比率を上げて長波長化することで、6cd, 量子効率4%の純緑色LEDが実現した(1995年 日亜化学工業[7])。

(参考文献)

- [1] 高田 育紀, “高輝度LEDの開発経緯と動作機構の再検討 - パワーデバイス屋が考えたLEDの動作機構-,” H29 電気学会研究会資料, EDD-17-077/ SPC-17-176, pp.21-28, 2017-11-21.
- [2] G. Majumdar and I. Takata, Power Devices for Efficient Energy Conversion, Pan Stanford Publishing, 2018-4.
- [3] N. Holonyak Jr. and S. F. Bevacqua, “Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions,” Appl. Phys. Lett., Vol. 1, pp.82-83, 1962.
- [4] 小山 稔, 青色LED開発の軌跡, 白日社, 2014.
- [5] 西澤 潤一, 中村 修一, 赤の発見 青の発見, 白日社, 2001.
- [6] 小山 稔, 奥野 保男, 柏原 鳳一郎, 発光ダイオードとその応用, 産業図書, 1988.
- [7] テーミス編集部, 青色発光ダイオード, テーミス, 2004.

¹⁷第II部(第3版)を発行する機会があれば、さらに文献[1]に準じた細かな補正を行う予定である。

¹⁸GaAsの E_g は赤外、GaPの E_g は緑色に対応している。

赤色LEDの試作(N. Holonyak)は、GaAsレーザの試作(R. Hall)と同時期である(両名ともGE社)。その前に、GaAsを使った赤外線LEDをR. Hallが開発していた。

¹⁹明るい場所では光っているのがようやく分かる程度だった。商業化を直ぐに諦めたGE社から製造特許(気相成長)を購入したMonsanto社が販売した。

²⁰約7年掛けて1976年に60mcd @20mA 効率2%品を開発。

²¹内部量子効率(13.6.8項“LEDの最大発光効率”を参照)。発光強度は1976年から1987年までに(pin構造を用いて)約1,500倍になり、量子井戸構造を用いてさらに高輝度化した。

²²AIPとGaPの E_g が適当だが、両者とも間接半導体である。さらに、AIPは空気中の水分と反応して毒ガスPH₃を生じる。

²³不純物添加すると波長が拡がるので白色掛かる。

²⁴化合物を構成する原子組成が化学式通りに存在している状況。

²⁵これもスタンレー電気が実用化した。赤色LEDと緑色LEDの発明者が西澤 潤一であるとする所以である。