

まえがき

本書は、パワーデバイスに関する入門書である。“パワー”とは何らかの仕事をする源のことである。本書は“電気”を対象としており、“電気的なパワー”を扱う。

デバイスとは何であろうか？ デバイス (device) を英英辞書で引くと「特別な目的のために使用されるあるいは作られたもの」という意味のことが書かれている。つまり、人間が知恵をしばり工夫して作った道具はすべてデバイスである。すると古くは、狩りのために作った旧石器や食事のための土器がデバイスの始まりであろう。その後、人類は新石器を、そして青銅器を、さらに鉄器を発明した。そして現在は“シリコン時代”と呼ばれている。その主流は、コンピュータや家電製品の中に数多く使われている集積回路である。

現在、日本はエネルギー供給体制の変換に迫られている。この課題に対し、太陽電池や風力発電などの自然エネルギー利用の拡大、自動車のハイブリッド化や電気自動車による化石燃料使用量の削減、電気機器のインバータ化による省エネルギーの推進などをエレクトロニクス技術によって支えるパワーデバイスが大きな注目を浴びている。

大多数のパワーデバイスは、集積回路と同様、シリコンを用いて製造されるが、使用するシリコンの製造方法、デバイス構造およびデバイス製造プロセスが大きく異なる。半導体産業は現在も日本の重要産業の一つであり、集積回路に関する教科書が、入門書から専門書までさまざまなものが店頭に並んでいる。また、パワーデバイスを部品として使用するパワーエレクトロニクスの教科書も多く存在する。しかしながら、パワーデバイスそのものに特化した教科書、特に入門書は非常に少ないのが現状である。

本書では、半導体およびデバイスの基礎については、パワーデバイスを理解

するうえで最小限にとどめ（多数存在する他の専門書にまかせ）、パワーデバイスの構造および特性とパワーデバイス特有の製造プロセスを詳しく解説する。現在のパワーデバイスの主流はシリコンデバイスであり、この状況は当面続くと考えられる。一方で、パワーデバイスの高性能化を、材料を変えて実現しようという動きのなかで、ワイドギャップ半導体が注目されている。その状況についても取り上げた。

本書は12章から構成されている。まず、1章と2章ではパワーデバイスについて概観した。次に3章～5章では半導体および半導体デバイスの基礎に関し、パワーデバイスに必要な内容を説明した。それをもとに、6章および7章ではパワーチップの構造と特性を詳細に解説した。8章ではパワーモジュールの構造と要求性能を述べた。9章ではパワーデバイス用シリコンウェーハについて説明した。10章ではパワーチップ、11章ではパワーモジュールの製造プロセスを集積回路との比較で説明した。最後に12章では次世代パワーデバイスとして検討されているワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスについて解説した。なお、各章末のコーヒープレイクには、その章に関連したトピックス、知っておきたい歴史あるいは個別に説明した内容のまとめなどを記した。

本書は、大学で半導体デバイスの基礎を学んだ学部学生を対象とし、電力変換を効率的に行うパワーデバイスの原理と構造および製造方法を理解できる内容とした。そして、パワーデバイスを適切に使用することにより、効率的に実現されるパワーエレクトロニクスにつながる内容とした。

さらに、パワーデバイスに携わっているあるいはパワーデバイス産業に参入を検討している一般企業のエンジニアのための入門書としても活用できる内容とした。本書により、パワーデバイスに対する障壁が少しでも低くなれば幸いである。

2011年12月

著 者

目 次

1. パワーデバイスの概要

1.1	パワーデバイスの役割	1
1.1.1	パワーデバイスとは	1
1.1.2	電気・電子機器と人体の比較	3
1.2	パワーデバイスの用途	4
1.2.1	適用分野による分類	4
1.2.2	容量・動作速度による分類	5
1.3	身近で活躍するパワーデバイス	6
1.3.1	分散型発電とスマートグリッド	6
1.3.2	自動車からのCO ₂ 排出量削減	8
1.3.3	家電への適用	9

2. パワーデバイスによる電力変換

2.1	パワーデバイスによる直流-交流の相互変換	11
2.1.1	交流から直流への変換	11
2.1.2	直流から交流への変換	12
2.1.3	スイッチングデバイスの損失とトレードオフ関係	14
2.2	コンバータ / インバータシステム	15
2.2.1	コンバータ / インバータシステムの構成	15
2.2.2	三相モータの駆動	16
2.2.3	還流ダイオードの働き	17
2.3	パワーデバイスの進化	18
2.3.1	パワーデバイスの技術革新	18
2.3.2	IGBTの技術革新	19
2.3.3	新材料によるブレイクスルー	20

3. 原子と結晶

3.1 原子構造と元素の周期性	22
3.1.1 原子構造	22
3.1.2 元素の周期性	22
3.1.3 IV族原子の結晶構造	23
3.2 半導体結晶とエネルギーバンド	25
3.2.1 原子/分子間の結合	25
3.2.2 半導体結晶	26
3.2.3 エネルギーバンド構造	26
3.2.4 金属, 半導体, 絶縁体のエネルギーバンド図	28
3.3 結晶欠陥	29
3.3.1 結晶欠陥の分類	29
3.3.2 結晶欠陥の二面性	31
3.3.3 不純物のエネルギー準位	33
3.3.4 固溶度と拡散係数	34

4. 半導体中のキャリア

4.1 半導体中のキャリアの生成	36
4.1.1 電子とホール	36
4.1.2 ドナーとアクセプター	37
4.2 半導体中のキャリア統計	39
4.2.1 キャリヤ密度の計算方法	39
4.2.2 不純物半導体中のフェルミ準位	41
4.2.3 キャリヤ密度およびフェルミ準位の温度依存性	42
4.3 半導体中の電気伝導	43
4.3.1 ドリフトによる電気伝導	43
4.3.2 拡散による電気伝導	45
4.3.3 キャリヤ連続の式	45

5. 半導体デバイスの基礎

5.1 pn 接合	47
5.1.1 pn接合のエネルギーバンド図	47
5.1.2 pn接合の整流性	49

5.1.3	pn 接合の降伏現象	50
5.1.4	pn 接合における最大電界	52
5.1.5	ヘテロ接合	54
5.1.6	pn 接合応用デバイス	56
5.2	金属-半導体接触	57
5.2.1	金属と半導体のエネルギーバンド図	57
5.2.2	ショットキー接触	58
5.2.3	オーム性接触	59
5.3	MOS 構造	61
5.3.1	MOS 構造のエネルギーバンド図	61
5.3.2	MOS 構造における反転現象	61
5.3.3	界面準位の影響	63

6. 電力用ダイオードおよび

電流制御型スイッチングデバイスの構造と特性

6.1	パワーチップの構造	66
6.1.1	パワーチップの高耐圧化	66
6.1.2	パワーチップの電極構造	68
6.2	電力用ダイオード	69
6.2.1	電力用ダイオードの構造	69
6.2.2	電力用ダイオードの過渡特性	71
6.3	パワーバイポーラトランジスタ	72
6.3.1	バイポーラトランジスタの電流-電圧特性	72
6.3.2	バイポーラトランジスタのエネルギーバンド図	73
6.3.3	バイポーラトランジスタのスイッチング動作	74
6.3.4	パワーバイポーラトランジスタの構造	75
6.3.5	バイポーラトランジスタの安全動作領域	76
6.3.6	ダーリントン接続	76
6.4	サイリスタ	77
6.4.1	サイリスタの構造と電流-電圧特性	77
6.4.2	サイリスタの動作原理	79
6.4.3	GTO サイリスタ	80
6.4.4	トライアック	81
6.4.5	逆導通サイリスタ	82

7. 電圧制御型スイッチングデバイスの構造と特性

7.1	パワー MOSFET	84
7.1.1	MOSFET の構造	84
7.1.2	MOSFET の電流-電圧特性	85
7.1.3	パワー MOSFET の構造	86
7.1.4	スーパージャンクション構造	87
7.2	IGBT	88
7.2.1	IGBT の 構 造	88
7.2.2	IGBT の電流-電圧特性	90
7.2.3	IGBT のオン抵抗	92
7.2.4	IGBT の順方向および逆方向耐圧	93
7.2.5	IGBT の損失とトレードオフ関係	94
7.2.6	IGBT の構造開発	95
7.3	IGBT の多機能化	96
7.3.1	IGBT とダイオードの集積化	96
7.3.2	逆 導 通 IGBT	97
7.3.3	逆 阻 止 IGBT	98

8. パワーモジュールの構造と要求性能

8.1	パワーチップのモジュール化	102
8.1.1	パワーモジュール搭載チップ	102
8.1.2	パワーモジュールへのチップの搭載	103
8.1.3	パワーモジュールのインテリジェント化	105
8.2	パワーモジュールの構造	106
8.2.1	ケースタイプとトランスファーモールドタイプ	106
8.2.2	ケースタイプ IGBT モジュールの構造	106
8.2.3	ケースタイプ IPM の構造	107
8.2.4	トランスファーモールドタイプ IPM の構造	108
8.3	パワーモジュールへの要求性能	108
8.3.1	主要な要求性能	108
8.3.2	パワーモジュールの絶縁性	109
8.3.3	大電流通電への対応	109
8.3.4	パワーモジュールの放熱性	110
8.3.5	パワーモジュールの信頼性	111

9. パワーデバイス用シリコンウェーハ

9.1 CZ シリコンウェーハ	113
9.1.1 CZ 法によるシリコン単結晶育成	113
9.1.2 CZ 法における偏析現象	115
9.1.3 ウェーハ加工プロセス	116
9.2 FZ シリコンウェーハ	117
9.2.1 FZ 法によるシリコン単結晶育成	117
9.2.2 FZ 法におけるドーバント不純物制御	118
9.2.3 FZ ウェーハの直径	120
9.2.4 拡散ウェーハ	121
9.3 エピタキシャル成長	122
9.3.1 エピタキシャル成長装置	122
9.3.2 エピタキシャル成長の限界と課題	123
9.4 パワーデバイス用ウェーハの選定	126
9.4.1 これまでのパワーデバイス用ウェーハの選定	126
9.4.2 最近のパワーデバイス用ウェーハの選定	126

10. パワーチップ製造プロセス

10.1 パワーチップと MOS-LSI の構造比較	129
10.1.1 全体構造の比較	129
10.1.2 最表面の構造比較	130
10.2 パワーチップ表面側プロセス	131
10.2.1 MOS-LSI 製造プロセスの概要	131
10.2.2 パワーチップ表面側プロセスフロー	132
10.2.3 パワーチップと MOS-LSI の製造プロセスの比較	134
10.2.4 ライフタイム制御	136
10.3 パワーチップ裏面側プロセス	137
10.3.1 裏面プロセスフロー	137
10.3.2 薄ウェーハのハンドリング	140
10.3.3 裏面不純物の活性化	141
10.3.4 さらなる新技術の導入	142

11. パワーモジュール製造プロセス

11.1	パワーモジュール製造プロセス	144
11.1.1	パワーモジュール製造プロセスフロー	144
11.1.2	ダイシング	145
11.1.3	ダイボンド	146
11.1.4	ワイヤボンド	147
11.2	パワーモジュール対応新技術	147
11.2.1	レーザダイシング	147
11.2.2	高電流密度化への対応	149
11.2.3	高温動作への対応	150
11.2.4	高信頼性への対応	152
11.3	パワーデバイスのテスト技術	152
11.3.1	半導体デバイスのテスト技術	152
11.3.2	パワーデバイスのテスト工程	153
11.3.3	チップ状態でのテストの重要性	154
11.3.4	アナログテスト技術	154

12. ワイドギャップ半導体パワーデバイス

12.1	シリコンパワーデバイスと比較した優位性	156
12.1.1	物性値による比較	156
12.1.2	高温動作および高速駆動	158
12.1.3	SiC および GaN パワーデバイスのターゲット	159
12.2	SiC パワーデバイス	160
12.2.1	SiC ウェーハ	160
12.2.2	SiC パワーデバイスの構造	161
12.2.3	SiC パワーデバイスの製造	162
12.2.4	SiC パワーデバイスの課題	164
12.3	GaN パワーデバイス	166
12.3.1	GaN ウェーハ	166
12.3.2	GaN パワーデバイスの構造	169
12.3.3	GaN パワーデバイスの課題	170

付	録	173
参	考 文 献	175
索	引	176

1

パワーデバイスの概要

本章では、最初にパワーデバイスの位置づけと機能を説明する。次に、パワーデバイスの幅広い用途について解説する。さらに、いかにパワーデバイスが身近な存在であるかを述べる。

1.1 パワーデバイスの役割

1.1.1 パワーデバイスとは

パワーデバイスとは、通常1W以上の電力を制御できる能力を持つ半導体デバイスを指す。半導体デバイスとして主流のシリコン **MOS型大規模集積回路 (MOS-LSI^{†1}: metal oxide semiconductor large scale integration)** は、電気信号の制御が主である。それに対しパワーデバイスは、電気的エネルギー、つまり電力を制御するデバイスである。この点が大きく異なる。

われわれの身の回りにはさまざまな形態の“電気”が存在する。例えば、電圧を例にとると、比較的小さなものは乾電池で、通常1本当り1.5Vの大きさである。一般家庭に送られている電気の電圧は、日本では通常100Vである。それに対し、雷も電気であるが、その電圧は数億~数十億ボルトにもなる。

また、電気には**直流 (DC: direct current)** と **交流 (AC: alternating current)** がある。これは、電気の作り方に関連している。一般に、化学変化や光電変換で発生させる電気は直流である。したがって、乾電池や燃料電池および太陽電池などから作れるのは直流である。また、エレキテル^{†2}のような静電気を発生させる場合も直流である。

^{†1} モスエルエスアイと読む。

^{†2} オランダで発明された摩擦電気を蓄積する装置。日本では、江戸時代に平賀源内が復元させたことで有名。

2 1. パワーデバイスの概要

一方、発電機を連続的に運転させる場合は、回転を利用しているため、交流のほうが作りやすい。したがって、火力、水力、原子力など大規模な発電システムから供給されているのは、おもに交流である。一般家庭には、変圧器で電圧を下げた交流が供給されている[†]。表 1.1 は、直流と交流の比較をまとめたものである。

表 1.1 直流と交流の比較

	直 流 (DC : direct current)	交 流 (AC : alternating current)
定 義	電流の流れる方向が一定	電流の流れる方向が逆転
電源の記号	(+)  (-)	(+ ⇄ -)  (- ⇄ +)
発生源	<ul style="list-style-type: none">・乾電池、蓄電池・太陽電池・燃料電池	<ul style="list-style-type: none">・発電所 水力、火力、原子力など・風力発電
適 用	<ul style="list-style-type: none">・パソコン・携帯電話・LED照明・直流モータ・直流送電	<ul style="list-style-type: none">・家庭用商用電源 日本：50/60 Hz, 100 V 欧米：200 V・交流モータ・変圧器

パワーデバイスは、電圧が数十～数千ボルトの電気エネルギーを取り扱い、直流から交流および交流から直流の相互変換（インバート）と直流から直流の電圧変換および交流から交流の電圧および周波数変換（コンバート）を行うデバイスである。

交流の電圧は、通常実効値で表される。一方、動作中のパワーデバイスは、電圧の最大値まで耐える必要がある。正弦波交流では、電圧の最大値は実効値の $\sqrt{2}$ 倍である。また、パワーデバイスは、電圧に対し2～3倍の余裕を持って設計される。したがって、交流電圧が100Vであれば300～600V、交流が200Vであれば600～1200Vの耐圧が要求される。耐圧値に幅があるのは、どこまで余裕を持たせるかなどの設計思想に関係している。

[†] 章末のコーヒーブレイクを参照。

1.1.2 電気・電子機器と人体の比較

パワーデバイスの役割を理解するため、鉄腕アトムのような人工頭脳を持った人間型ロボットを作ることを考えてみる。人体と比較して、どのような電気・電子部品を用いて設計するかを考えると表 1.2 のようになる。人間の脳には、思考と記憶という重要な役割がある。この二つの機能に対応する電子機器は、シリコン集積回路で実現されている。思考に関しては中央演算処理装置（CPU：central processing unit）が、記憶に関しては各種のメモリデバイスがそれらの機能を果たしている。

表 1.2 人体と電気・電子機器との比較

人 体		電気・電子機器
脳	思考	CPU
	記憶	メモリ
五 感		センサ
消化器官		太陽電池
筋肉	動作	アクチュエータ モータ
	指示	パワーデバイス

五感（見る、聞く、かぐ、味わう、触れる）としては、見ることに关しては以前からイメージセンサにより実現されている。そのほかの機能に関しても、最近ではマイクロマシンの技術が進化し、小型マイク、臭いや味覚センサ、圧力センサなど各種センサが実現されている。

また、活動のためのエネルギーを発生させるのは、人体では消化器官であり、ブドウ糖の形で蓄える。電気・電子機器でも太陽電池で電気エネルギーを発生させ、蓄電池に蓄えることができる。最近では、フレキシブルな太陽電池も開発されている。

人間は筋肉を動かすことで実際の行動が可能となる。このとき、消化器官で発生した栄養（エネルギー）が脳の指令によって筋肉に送り込まれている。人間型ロボットの場合、実際に動くのはモータあるいはアクチュエータである。このとき、CPUの指令を受けて、モータあるいはアクチュエータに電気エネ

ルギーを送り込むのが、パワーデバイスの役割である。なお、モータは回転運動、アクチュエータは伸縮運動を行う装置である。人体の機能がアクチュエータ的であるのに対し、電気機器はモータ駆動が主である。

この際に、効率良く電気エネルギーを使用しないと、電池切れでロボットはすぐに動かなくなってしまう。かつ繊細な制御を行わないとロボットの動きはぎこちないものになる。パワーデバイスの性能が、いかに人間に近い、さらには人間以上の動きができるかの決め手となる。

1.2 パワーデバイスの用途

1.2.1 適用分野による分類

現在、パワーデバイスはさまざまな用途に用いられ、電力の変換・制御を行っている。パワーデバイスが用いられる分野は、**図 1.1** に示したように、大まかに**電力用途**、**電気鉄道用途**、**産業用途**、**自動車用途**、**家電用途**、**通信・情報用途**に分類できる。

数千ボルトの超高電圧を扱う分野に、電力用途と電気鉄道用途がある。電力用途としては、直流送電や製鉄所の圧延プラントなどがあり、スイッチング用

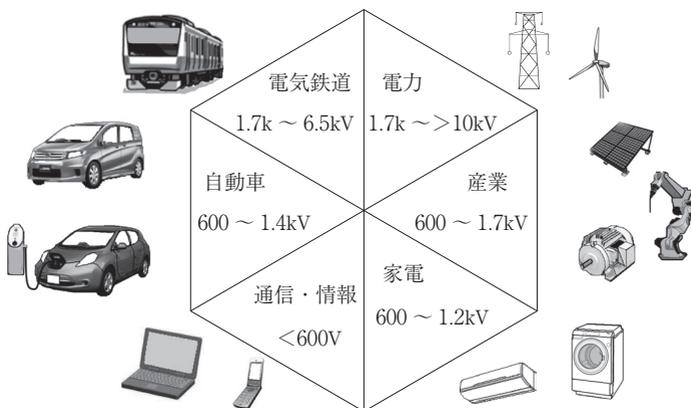


図 1.1 パワーデバイスの用途

のパワーデバイスとして、耐圧が1700~10kV程度までのサイリスタやHV (high voltage) -IGBT (insulated gate bipolar transistor) が用いられている。電気鉄道用途は新幹線などの電気鉄道のモータ駆動用であり、電力用途と同様、耐圧が1700~6500VのサイリスタやHV-IGBTが用いられている。

産業用途は最も市場規模の大きい分野であり、FA (factory automation) 機器のモータ制御に用いられる。また、エレベータやエスカレータおよび自動ドアなどのビルシステムにもかかせないものとなっている。さらに、太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーの有効利用の分野も含まれる。スイッチングデバイスとしては、耐圧が600~1200VのIGBTがおもに用いられている。

自動車用途はハイブリッドカーや電気自動車のモータ駆動用であり、耐圧が600~1400VのIGBTがおもに用いられている。家電用途はエアコンや冷蔵庫などの電化製品用であり、600~1200VのIGBTやHVIC (HV integrated circuit) がおもに用いられている。

通信・情報用途にはパソコンや携帯電話などがあり、充電用のアダプターには必ず用いられている。パワーデバイスとしては、耐圧600V程度以下のパワー MOSFET[†] (MOS field effect transistor) やHVICが用いられている。

1.2.2 容量・動作速度による分類

図1.2は、パワーデバイスとして重要なスイッチングデバイスを、横軸に動作速度を、縦軸に電力容量をとり、使用される領域で分類したものである。サイリスタは、動作速度は遅いが大容量デバイスが実現されており、古くから電力、電気鉄道分野に利用されている。しかしながら最近では、騒音の問題などで新規開発品はHV-IGBTに置き替わってきている。特に、新幹線などの電気鉄道用途では、HV-IGBTの適用範囲が急速に広がっている。

パワー MOSFETは、電力容量は小さいが高速動作が可能であり、通信・情報分野では広く使用されており、市場規模は大きい。

[†] モスフェットと読む。

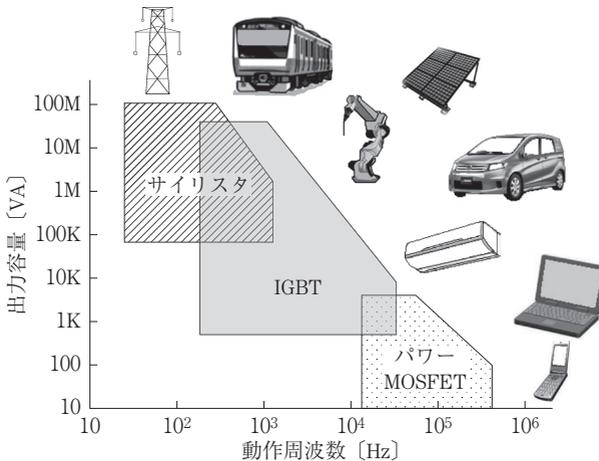


図 1.2 パワーデバイスの適用領域

産業，自動車，家電といった分野は，高速動作と大容量化を両立できる IGBT の適用範囲が急激に伸展している。この領域での適用が，省エネルギーおよび低炭素化社会の実現につながり，パワーデバイスが重要な役割を果たしている。

1.3 身近で活躍するパワーデバイス

1.3.1 分散型発電とスマートグリッド

図 1.3 は，着実に浸透しつつある分散型発電の概要である。各家庭に必要な電力は個々に発電しようという考え方に基づく。家庭での発電は太陽電池などにより行われるが，最大の問題は，発電量が一定していないかあるいは制御できないことである。特に太陽電池の発電量は，天候に左右されるだけでなく，夜はまったく発電できない。したがって，家庭で発電する電気が余っているときは，電力会社に買い取ってもらい，電力が不足する夜などは電力会社からの供給を受けるようなシステムが必須である。

また，太陽電池や燃料電池で発生する電気は直流である。一方，家庭内で使

索引

<p>【あ】</p> <p>悪性 PRIDE 31</p> <p>アクセプタ 38</p> <p>アナログテスト 153</p> <p>アノード 11</p> <p>アノード電極 77</p> <p>アバランシェ降伏 50</p> <p>アモノサーマル法 168</p> <p>アルミナゲート 166</p> <p>安全動作領域 15, 76</p> <p>【い】</p> <p>イオン結合 25</p> <p>イオン注入 131</p> <p>インゴット 114</p> <p>インバート 2</p> <p>【う】</p> <p>薄ウェーハプロセス 19, 126, 137</p> <p>埋め込みチャネル 166</p> <p>【え】</p> <p>エッチング 132</p> <p>エネルギー準位 33</p> <p>エネルギー帯 27</p> <p>エネルギーバンド 27</p> <p>エピタキシャル成長 122</p> <p>エミッタ 72</p> <p>エミッタ接地回路 72</p> <p>エミッタ接地電流増幅率 72</p> <p>【お】</p> <p>オクターブの法則 35</p> <p>オートドープ 125</p>	<p>オフ損失 14</p> <p>オーム性接触 60</p> <p>オン損失 14</p> <p>【か】</p> <p>回生 8</p> <p>界面準位 63</p> <p>殻構造 23</p> <p>拡散 45, 132</p> <p>拡散ウェーハ 121</p> <p>拡散係数 34</p> <p>拡散電位 48</p> <p>加工 131</p> <p>加工性 152</p> <p>ガスドープ法 119</p> <p>カソード 11</p> <p>カソード電極 77</p> <p>価電子 23</p> <p>価電子帯 27</p> <p>家電用途 4</p> <p>過渡特性 71</p> <p>ガードリング 93</p> <p>還流ダイオード 15</p> <p>【き】</p> <p>寄生インダクタンス 104</p> <p>逆回復時間 72</p> <p>逆阻止 IGBT 20, 96</p> <p>逆導通 IGBT 20, 96</p> <p>逆導通サイリスタ 82</p> <p>逆方向飽和電流密度 49</p> <p>キャリヤ 36</p> <p>キャリヤ連続の式 46</p> <p>鏡面 117</p> <p>共有結合 25</p> <p>許容帯 27</p>	<p>禁制帯 27</p> <p>金属 28</p> <p>金属結合 25</p> <p>銀ナノ粒子 151</p> <p>【く】</p> <p>空孔 30</p> <p>偶発故障 111</p> <p>空乏状態 62</p> <p>空乏層 48</p> <p>空乏層幅 48</p> <p>駆動機能 105</p> <p>クラウン 125</p> <p>【け】</p> <p>軽水炉 119</p> <p>ケース温度 110</p> <p>ケースタイプ 106, 144</p> <p>ケースタイプ IGBT モジュール 106</p> <p>ケースタイプ IPM 107</p> <p>結合半径 124</p> <p>結晶欠陥 29</p> <p>ゲート 84</p> <p>ゲート電極 77</p> <p>原子 22</p> <p>原子核 22</p> <p>元素 22</p> <p>【こ】</p> <p>高温高圧合成法 168</p> <p>格子間原子 30</p> <p>高周波誘導加熱 117</p> <p>高純度多結晶シリコン 113</p> <p>高信頼性 108</p> <p>高性能化 20</p>
--	--	---

高絶縁性	108	ショットキーバリア		体積欠陥	30
高速中性子	119	ダイオード	59	大電流通電能力	108
高 ϵ 化	150	シリコン MOS 型大規模		耐熱性	152
降伏電圧	50, 66	集積回路	1	ダイボンド	146
交流	1	シリコン融液	113	ダイヤモンド	157
枯渇領域	43	自立基板	167	ダイヤモンド構造	23
固溶度	34	シリンドラ	122	太陽電池	10
コレクタ	72	新材料	20	多機能化	20
コンバータ / インバータ		真性キャリア密度	158	多数キャリア	38
システム	15, 102	真性領域	43	立上り電圧	50
コンバート	2			種結晶	113
		【す】		ダーリントン接続	76
【さ】		スイッチング損失	14	ターンオフ	78
再結合	45	スイッチング動作	74	ターンオン	78
再結合中心	71, 136	水素結合を持つ結晶	25	ダングリングボンド	63
サイリスタ	5, 18, 19, 77	スーパージャンクション構造		単結晶シリコンウェーハ	113
サファイア	172		87		
産業用途	4	スクリーニング	111	【ち】	
酸素	114	ステルスダイシング	148	蓄積状態	62
酸素ドナー	33, 114	スマートグリッド	8	チップテスト	154
		スライス	117	地のらせん	35
【し】				チャンネル	85
しきい値電圧	85, 91	【せ】		中性子	22
自己消弧	80	制御機能	105	中性子照射法	119
自己消弧型	19	正孔	36	超臨界液体	169
自己ターンオフ型	19	成膜	132	直流	1
仕事関数	57	整流比	50		
自動車用途	4	石英るつぼ	113	【つ】	
写真製版	131	積層欠陥	30	通信・情報用途	4
遮断領域	72	絶縁体	28	ツェナー降伏	50
周囲温度	110	絶縁破壊電界	156		
周期律表	22, 35	接合温度	110	【て】	
重金属不純物	34	線欠陥	30	低抗性接触	60
重水炉	119	全波整流回路	11	低コスト化	20
昇華法	160			ディスクリートデバイス	102
消弧	78	【そ】		出払い領域	43
少数キャリア	38	ソース	85	転位	30
状態密度関数	39			転位低減層	167
蒸発速度	115	【た】		電気自動車	8
初期故障	111	ダイオード	11	電気鉄道用途	4
ショットキー接触	58	ダイオードモジュール	103	点欠陥	30
ショットキーダイオード	59	ダイシング	145		
		ダイシングライン	146		

<p>【み】</p> <p>未結合手 63</p> <p>三つ組み元素 35</p> <p>ミニバッチ炉 123</p> <p>【む】</p> <p>無停電電源 7</p> <p>【め】</p> <p>メモリ 3</p> <p>メモリテスト 152</p> <p>面欠陥 30</p> <p>メンデレーエフ 35</p> <p>面取り 117, 125</p>	<p>【ゆ】</p> <p>ユニポーラ型 59</p> <p>ユニポーラデバイス 65</p> <p>【よ】</p> <p>陽子 22</p> <p>【ら】</p> <p>ライフタイム 71</p> <p>ライフタイム制御 33, 136</p> <p>ラッチアップ 80, 83</p> <p>ラッピング 117</p> <p>【り】</p> <p>リボンボンド 149</p>	<p>裏面クラウン 126</p> <p>良性 PRIDE 31</p> <p>両面冷却 150</p> <p>【れ】</p> <p>レーザアニール 139, 141</p> <p>レーザダイシング 147</p> <p>連続 CZ 法 128</p> <p>【ろ】</p> <p>ロジックテスト 152</p> <p>ロードマップ 165</p> <p>【わ】</p> <p>ワイドギャップ半導体 20, 156</p>
---	--	--

<p>【数 字】</p> <p>1 in 1 103</p> <p>2 in 1 103</p> <p>4H-SiC 157</p> <p>6 in 1 103</p> <p>7 in 1 103</p> <p>【A】</p> <p>AC 1</p> <p>AC マトリックスコンバータ 98</p> <p>all in 1 103</p> <p>【C】</p> <p>CMOS 63, 83</p> <p>CMP 117, 135</p> <p>CO₂ 排出量 8</p> <p>CPU 3</p> <p>CSTBT 95</p> <p>CZ 法 113</p> <p>【D】</p> <p>DC 1</p> <p>DLB 150</p>	<p>【F】</p> <p>FA 機器 5</p> <p>FS 90</p> <p>FS 型 137</p> <p>FWD 15, 17</p> <p>FZ ウェーハ 19, 137</p> <p>FZ 法 117</p> <p>【G】</p> <p>GaN 20, 156, 157</p> <p>GTO サイリスタ 19, 80</p> <p>【H】</p> <p>HEMT 169</p> <p>HVIC 5</p> <p>HV-IGBT 5</p> <p>HVPE 法 168</p> <p>【I】</p> <p>IEGT 95</p> <p>IGBT 5, 19, 88</p> <p>IH 9</p> <p>IPM 19, 105</p>	<p>【L】</p> <p>LED 照明 7</p> <p>LPT 90</p> <p>【M】</p> <p>MIS 構造 61</p> <p>MO-CVD 166</p> <p>MOSFET 161</p> <p>MOS-LSI 1</p> <p>MOS 構造 61</p> <p>MPS ダイオード 70</p> <p>【N】</p> <p>Na フラックス法 168</p> <p>NPC 98</p> <p>nnp 型 72</p> <p>NPT 89</p> <p>【P】</p> <p>PDP 9</p> <p>pin 構造 66</p> <p>pnp 型 72</p> <p>pn 接合 47</p> <p>pn 接合ダイオード 50</p>
---	---	--

pn 判定器	46			TEG	153
PRIDE	31		[S]		
PT	89	SBD	59, 161	【ギリシャ文字】	
	[R]	SiC	20, 156	β 崩壊	119
RB-IGBT	20, 96, 98	SOA	76	γ 崩壊	119
RC-IGBT	20, 96, 97	STI	135	ΔT_j	112
			[T]	ωC	159
		TAIKO	142	ωL	159

— 著者略歴 —

- 1979年 北海道大学工学部電気工学科卒業
1984年 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了（電気工学専攻）
工学博士
1984年 三菱電機株式会社勤務
2010年 千葉工業大学教授
現在に至る

パワーデバイス

Power Devices

© Hidekazu Yamamoto 2012

2012年2月16日 初版第1刷発行



検印省略

著者 やまもと ひでかず
山本 秀和
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00831-9 (安達) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします