

# パワーデバイス

---

の最新動向・課題応用展開・今後の展望

## 執筆者紹介

### 第1章

寺島 知秀 九州大学大学院 システム情報科学研究院 教授／博士（工学）

### 第2章

#### 第1節

##### 第1項

川戸 祐一 石原ケミカル株式会社 開発本部 第三研究部 主幹

##### 第2項

山口 朋彦 三菱マテリアル株式会社 イノベーションセンター  
プロジェクトリーダー

##### 第3項

米澤 徹 北海道大学 大学院工学研究院 材料科学部門 教授  
チュラロンコン大学 工学部 訪問教授／博士（工学）

#### 第2節

##### 第1項

陳 伝彤 大阪大学 産業科学研究所 特任教授／工学博士

##### 第2項

熊谷 圭祐 株式会社日本スペリア社 R&Dセンター 主任／博士（学術）

##### 第3項

友利 大介 株式会社大阪ソーダ

#### 第3節

##### 第1項

中村 真也 株式会社レゾナック エレクトロニクス事業本部 開発センター  
封止材料開発部 マネージャー

##### 第2項

恩田 真司 DIC株式会社

## 執筆者紹介

### 第4節

#### 第1項

竹谷 英一 インフィニオンテクノロジーズジャパン株式会社  
プリンシパルエンジニア

#### 第2項

川口 雄介 東芝デバイス＆ストレージ株式会社 シニアフェロー

#### 第3項

増岡 史仁 三菱電機株式会社 パワーデバイス製作所 開発部 Siデバイス開発G  
グループマネージャー  
曾根田真也 三菱電機株式会社 経営企画室 経営企画担当マネージャー  
新田 哲也 三菱電機株式会社 パワーデバイス製作所 開発部 部長

#### 第4項

谷川 兼一 沖電気工業株式会社 グローバルマーケティングセンター  
CFB事業開発部 部長

## 第3章

### 第1節

中村 孝 ネクスファイ・テクノロジー株式会社 代表取締役  
大阪大学 招聘教授／博士（工学）

# 目 次

<b>第1章 パワーデバイスの基本動作から最新開発動向、課題と展望</b>	<b>001</b>
九州大学大学院	寺島 知秀
はじめに	002
1. パワーデバイスの基本動作	002
1.1 信号增幅	002
1.2 電力変換	003
2. パワーデバイスの発展	004
3. パワーデバイスの基本動作と、それに適したデバイス構造と製品形態	006
4. 現在の主力パワーデバイス	008
4.1 パワーMOSFET	008
4.1.1 Trenchゲート パワーMOSFET	008
4.1.2 Super Junction (SJ) パワーMOSFET	009
4.1.3 Trenchゲート パワーMOSFET (ゲート構造にSJ効果を付与)	010
4.1.4 パワーMOSFETの動作	010
4.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)	011
4.2.1 TrenchゲートIGBT	012
4.2.2 トレンチゲートIGBTの薄厚化と裏面拡散技術	013
4.2.3 Reverse Conducting (RC) IGBT (フリーホイールDiode内蔵技術)	014
4.2.4 IGBTの動作	015
5. 次世代パワーデバイス	015
5.1 Wide Band Gap (WBG) 材料	015
5.2 SiC MOSFET	016
5.3 GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor)	018
5.4 Diamond、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ パワーデバイス	019
6. 課題と展望	020
6.1 各パワーデバイスの市場に関する実績と将来予測	020
6.2 各パワーデバイスの適用領域に関する実績と将来予測	021
6.3 各パワーデバイスにおける課題	021
6.4 パワーデバイスマーカーにおける課題	022

<b>第2章 パワーデバイスにおける材料・技術の最新動向</b>	025
<b>第1節 焼結銅接合材料・ペーストの動向</b>	026
<b>第1項 パワーデバイスの分野における銅接合材</b>	026
石原ケミカル株式会社 川戸 祐一	
はじめに	026
1. PVD法銅ナノ粉	026
1.1 銅ナノ粉	026
1.2 焼結温度	027
2. 理想的な状態での粉末の接合性評価	029
3. ペースト最適化	030
4. 接合プロセスの最適化	033
4.1 窒素雰囲気での乾燥条件の検討	033
4.2 タック材を用いた場合	034
5. 接合シート	035
おわりに	037
<b>第2項 焼結型銅接合材料の実用化に向けたプロセスの検討</b>	039
三菱マテリアル株式会社 山口 朋彦	
はじめに	039
1. 焼結型銅接合材料の接合特性	039
1.1 原料銅粒子	039
1.2 銀接合材料との接合信頼性比較	040
2. 更なる量産化に向けたプロセス開発	042
2.1 接合低温化とペーストの連続印刷性の両立	042
2.2 タック性付与工程の選定	044
まとめ	047
<b>第3項 低温焼成に向けた銅系ナノ接合材料の開発</b>	049
北海道大学 米澤 徹	
はじめに	049
1. 銅系ナノ接合材料の設計アプローチ	052
2. MOD（金属有機分解）インク	053
3. 低温・短時間焼結のプロセス設計	054
3.1 圧力・温度・時間	054
3.2 雰囲気制御と表面酸化の克服	056
4. 信頼性：TCT・パワーサイクル・高温保持	056
5. コアシェル型Cuナノ粒子高濃度ペースト	056

おわりに	057
<b>第2節 銀焼結接合材料・ペーストの最新開発動向</b>	059
<b>第1項 銀焼結接合と新実装材料の開発、構造信頼性評価</b>	059
大阪大学産業科学研究所 陳 伝彤	
はじめに	059
1. Ag焼結接合技術	061
2. Cu焼結接合技術	064
3. 複合焼結接合技術	065
3.1 Ag-Cu複合焼結接合技術	066
3.2 Ag-Si複合焼結接合技術	067
おわりに	069
謝辞	070
<b>第2項 パワー半導体用銀ペーストの特性と最新動向</b>	073
株式会社日本スペリア社 (R&Dセンター) 熊谷 圭祐	
はじめに	073
1. 焼結型Agナノ粒子	073
1.1 Agナノ粒子	073
1.2 ナノ粒子の焼結と接合メカニズム	074
1.3 低温焼結に向けた取り組み	075
2. 貴金属以外への接合	077
2.1 Cuへの接合	077
2.2 Niへの接合	078
2.3 Ni接合の低温焼結接合	081
3. 技術動向と今後の展望	081
3.1 低コスト品	081
3.2 大面積接合への展開	082
3.3 焼結接合用のシート材の開発	083
おわりに	084
<b>第3項 低温無加圧で銅基板への接合を可能にする銀ナノ粒子の開発</b>	087
株式会社大阪ソーダ 友利 大介	
はじめに	087
1. 焼結銀接合と最密充填設計	087
2. 無加圧銅基板接合	088
おわりに	092

<b>第3節 パワー半導体向け封止材料・技術の最新動向</b>	093
<b>第1項 半導体封止材の基礎技術と最近の開発動向</b>	093
株式会社レゾナック 中村 真也	
はじめに	093
1. レゾナックの封止材事業	094
1.1 固形封止材 (EMC)	094
1.1.1 エポキシ樹脂	096
1.1.2 硬化剤	096
1.1.3 硬化促進剤	097
1.1.4 無機充填材	098
1.1.5 カップリング剤	098
1.1.6 離型剤	099
1.1.7 その他の添加剤	099
1.2 Capillary Under Fill (CUF)	099
1.3 白色封止材	099
1.4 磁性封止材	100
<b>第2項 半導体封止材用高耐熱性樹脂の分子設計</b>	103
DIC株式会社 恩田 真司	
はじめに	103
1. 高耐熱性と低粘度、耐トラッキング性の兼備	103
2. 高耐熱性と耐熱分解性の両立	107
3. 高耐熱性と高韌性の両立	109
4. 植物由来原料を用いて実用レベルの耐熱性と強度の兼備	111
おわりに	113
<b>第4節 パワーデバイスの高機能化に貢献する技術の最新動向</b>	115
<b>第1項 インフィニオンの車載 SiC パワー半導体システムソリューション</b>	115
インフィニオンテクノロジーズジャパン株式会社 竹谷 英一	
はじめに	115
1. パワーデバイス向け半導体材料とその特性	115
2. 車載アプリケーションへの適用事例	116
3. SiCがxEVに貢献する定量的な効果	118
3.1 SiC MOSFETとIGBTの挙動：ユニポーラとバイポーラの違い	118
3.2 ミッションプロファイルとの関係性	118
3.3 損失計算による定量評価	119
3.4 高温化に伴う最大定格条件の拡大	119

4. プロセス技術	119
4.1 オン抵抗とトレードオフの関係	120
4.2 スーパージャンクション技術によるオン抵抗低減	120
5. 製品ポートフォリオ	121
5.1 サプライチェーンに応じた供給形態	121
5.2 HybridPACK™ Drive：フルブリッジモジュール	122
5.3 HybridPACK DSC：2 in 1ソリューション	123
6. 応用技術	124
6.1 Si/SiCの並列利用（Fusion）	124
6.2 システムレベルソリューション	125
おわりに	126

## 第2項 車載用パワー半導体の最新動向～Si MOSFET/IGBT, SiC の開発状況～

東芝デバイス&ストレージ株式会社 川口 雄介

はじめに	129
1. 車載用パワー半導体の用途と分類	129
2. シリコンパワーMOSFET	130
2.1 低耐圧パワーMOSFET	131
2.2 高耐圧パワーMOSFET	132
3. シリコンIGBT	133
4. ワイドバンドギャップパワー半導体	134
4.1 SiC MOSFET	135
おわりに	136

## 第3項 脱炭素社会をささえる次世代Siパワーデバイス技術

三菱電機株式会社 増岡 史仁・曾根田 真也・新田 哲也

はじめに	139
1. 再エネ向け第8世代IGBT・Diode技術	140
1.1 スプリットゲート構造によるゲート容量最適化技術	140
1.2 新しいバッファ層技術（CPL技術）	141
1.2.1 薄型化とサージ電圧抑制	141
1.2.2 ダイナミックアバランシェ抑制とクランプ電圧向上	143
2. 電力・電鉄向けIGBT・Diode技術	144
2.1 シャローアクティブトレンチ構造によるゲート容量最適化技術	144
2.2 耐環境性能を実現する終端構造	145
2.2.1 新しい電界緩和構造による無効領域の縮小	146
2.2.2 表面電荷制御構造による長期信頼性の確保	146

3. 民生・車載用第3世代RC-IGBT技術	148
3.1 RC-IGBTチップ内ダイオード配置技術による放熱性向上	148
3.2 RC-IGBT用低キャリア注入ダイオード構造によるリカバリ損失低減	150
おわりに	152
<b>第4項 縦型GaNパワーデバイスの真の社会実装に向けたQSTxCFBによる新技術</b>	155
<b>沖電気工業株式会社 谷川 兼一</b>	
はじめに	155
2. 半導体デバイスの付加価値を向上するCFBソリューションの特長	156
2.1 プリンター事業で培われたCFB技術	156
2.2 CFBソリューションのビジネスモデル	157
2.3 CFBソリューションのバリエーション	158
3. 応用事例3：縦型GaNパワーデバイス	159
3.1 市場ニーズと課題（次世代パワーデバイス）	159
3.2 共創パートナーの特長（信越化学工業株式会社のGaN on QST基板）	161
3.3 共創成果（縦型GaNパワーデバイスに向けた新技術）	162
おわりに	164
謝辞	164
<b>第3章 パワーデバイスの応用展開</b>	165
<b>第1節 SiCパワーデバイスの超高電圧用途への応用</b>	166
<b>大阪大学/ネクスファイ・テクノロジー株式会社 中村 孝</b>	
はじめに	166
1. 高電圧SiCスイッチングモジュール	166
2. 応用例	167
2.1 絶縁試験機	167
2.1.1 部分放電試験向けバースト運転	167
2.1.2 寿命試験向け連続運転	169
2.2 低温プラズマ用パルス電源	170
2.2.1 大気圧プラズマ	170
2.2.2 液中プラズマ	172

# 第 1 章

---

パワーデバイスの基本動作から  
最新開発動向、課題と展望

---

## はじめに

パワーデバイスとは何か?これを一言で言うならば電力を伝達、あるいは様々なエネルギーに変換するために使われるトランジスタ及びダイオードである。これらは主にシリコンウェハに対する様々なプロセスを経て作られているという意味において情報処理を担う集積回路（LSI）と極めて類似しているが、LSIが本質的には物理量では無く情報を取り扱い、その手法として半導体の性質を利用する方式が最も優れているという状況であるのに対し、パワーデバイスは電力という物理量自体を取り扱う事が目的であり、これを実現するものが特性的な必然性で半導体になるという面で大きな違いがある。

また、人類が築いた文明、それに伴う生活の変化において電化・電動化が決定的な役割を果たしており（図1）、これらを縁の下の力持ちとして支えてきたパワーデバイスは、昨今のモバイル機器、各種充電アダプターでの小型・軽量化、EV実用化、脱炭素等において重要性が増し続けている。

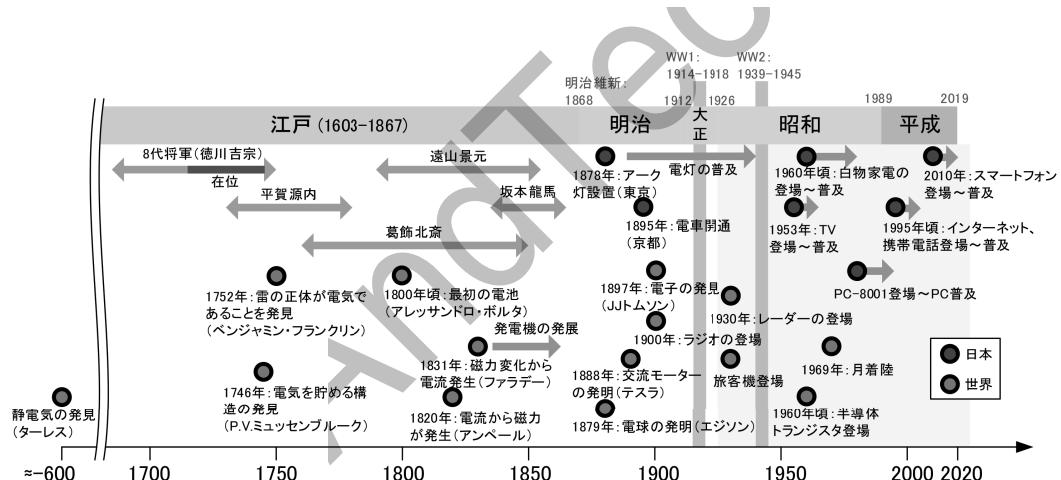


図1 電化・電動化の歴史

## 1. パワーデバイスの基本動作

パワーデバイスの動作は、信号增幅と電力変換の二つに大別される。どちらも電力を扱っているが、その目的が異なる事に連動して要求性能も異なってくる。

### 1.1 信号増幅

これは典型的には拡声器のような、小電力信号をそのまま大電力化してスピーカー等の機器を駆動

するような動作である。この動作では図2のようにパワーデバイス（トランジスタ）の特性をそのまま利用する形が基本である。この動作は高周波領域ではAM/FM放送、さらに高周波ではGaN等の高周波動作に優れるパワーデバイス等を使用し数10 GHzに至る情報通信領域まで広がっている。

この動作では動作状態において必然的にパワーデバイスに電圧と電流が同時に印加され自己発熱が避けがたいが、第一に出力信号の忠実性を重視し、次に熱対策の順になる。また高周波領域ではゲートドレイン間容量の低減、チャンネル部を流れる電子の高速化等、パワーデバイス自体の高性能化が重要になる。

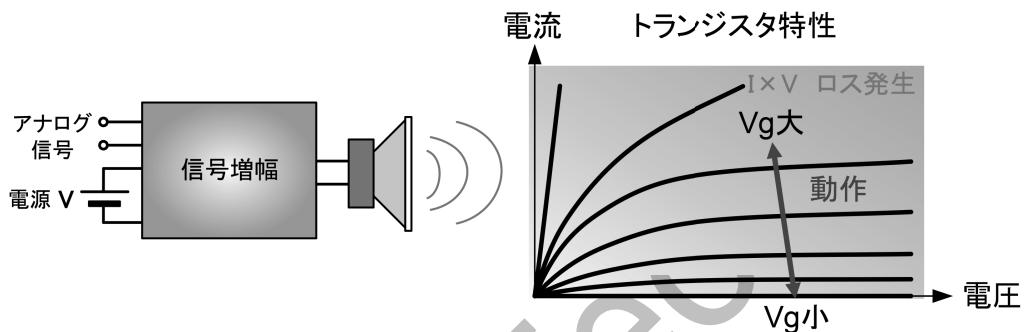


図2 信号増幅のイメージ

## 1.2 電力変換

これは電源からの電力を使用目的に適した形態に変換する動作であり、主なものとしてDC/DC変換、モーター・アクチュエーター駆動などがある。この領域は現在パワーデバイス市場の大半を占めており、図1で示した発展に大きく寄与した。電力変換では変換に要するエネルギー消費、すなわちパワーデバイスの自己発熱を可能な限り抑える事が最も重要である。そのため図3に示すようにパワーデバイス（トランジスタ）をスイッチのように動作させる事で自己発熱を最小化している。

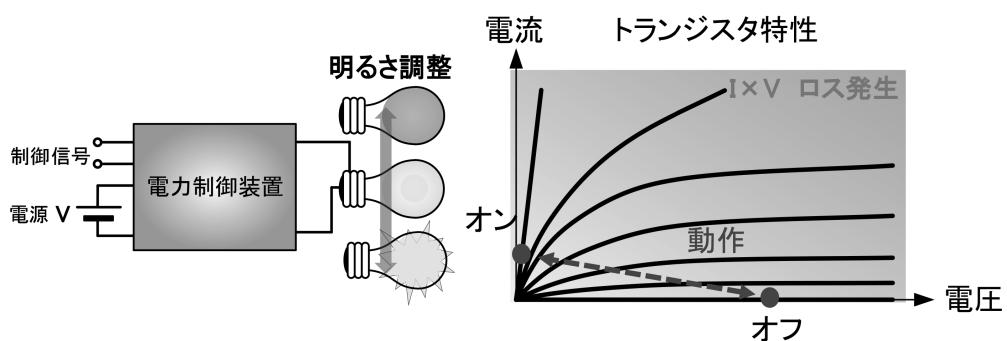
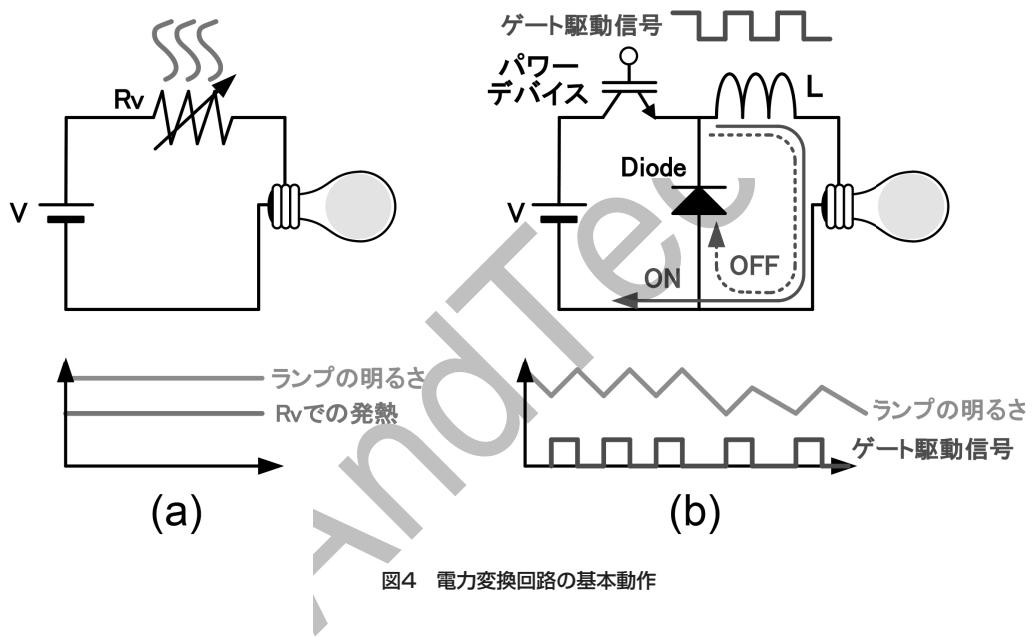


図3 電力変換のイメージ

図4はこの動作の最もシンプルな事例である。(a) は古典的な方法であり言うまでもなく可変抵抗で大きな電力ロスが発生する。(b) ではトランジスタに対してインダクターと電球が直列に繋がり、トランジスタがオフした時の電流路としてダイオードが接続されている。トランジスタがオン状態では電流が徐々に上昇し、トランジスタがオフになるとダイオードを介して電流が還流しつつインダクターに蓄積されたエネルギーが電球で消費され電流が徐々に低下する。そしてトランジスタのオン/オフの時間比率によって電球の明るさが調整できる。この一連の動作においてトランジスタはオン状態で電圧の大半がインダクターに加わり、オフ状態では電流が流れない。したがって理想的にはトランジスタ自体のエネルギーロスがほとんど無い状態で電力変換が実現される。実際の電力変換回路は様々な形式があるが、基本的にはこれと同様の動きでトランジスタ自身の電力消費を最小に抑えている。



## 2. パワーデバイスの発展

ここからはパワーデバイスの主要用途である電力変換を中心として説明する。パワーデバイスは電力という物理量自体を取り扱う。そして電力の大きさに応じて前述の電力変換回路の動作が異なる。このため、電力の大きさに応じて最適なデバイスも異なる（図5）。この面において主に情報処理を目的としたLSIがCMOS微細化を軸とした一本道に近いのに対し、パワーデバイスでは領域毎に様々なデバイスが平行して発展してきた。

また、電力変換機器のロス低減に伴い放熱能力の許す限りシステムを小型化するのは商品競争力において必然であり、逆に言うとパワーデバイスの性能向上と共に発熱密度も上昇し最終的には発熱によって性能向上が制限されてくる。これはCPUのクロック周波数向上による性能向上が同様に発熱

## パワーデバイスの最新動向・課題・応用展開・今後の展望

---

発行 令和8年 2月10日発行 第1版 第1刷

---

定 價 55,000円（本体 50,000円 + 税 10%）

発行人・企画 陶山正夫

編集・制作 奥西洋佑、岩崎正純

発行所 株式会社 AndTech

〒 214-0014

神奈川県川崎市多摩区登戸 2833-2-102

T E L : 044-455-5720

F A X : 044-455-5721

Email : [info@andtech.co.jp](mailto:info@andtech.co.jp)

U R L : <https://andtech.co.jp/>

---

印刷・製本 倉敷印刷株式会社