

■8 群 (情報入出力・記憶装置と電源) - 5 編 (バッテリー・電源)

3 章 電力部品

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

3-1 電池

3-2 パワー半導体デバイス

3-3 磁性部品

3-4 誘電体部品

■8 群-5 編-3 章

3-1 電池

3-1-1 一次電池

3-1-2 二次電池

(1) 鉛蓄電池

(2) ニッケル水素電池

(執筆者：山下 明) [2010年12月受領]

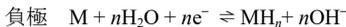
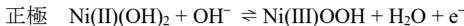
(a) はじめに

ニッケル水素電池は、ニッケルカドミウム電池を改良した代替品として、1990年代初めに実用化された。ニッケルカドミウム電池は、エネルギー密度、微小内部短絡発生、有害なカドミウムの使用などが問題点であった。ニッケル水素電池はこれらの問題を克服するべく登場した。

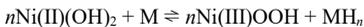
(b) 構成と電極反応

ニッケル水素電池は正極にニッケルカドミウム電池と同じオキシ水酸化ニッケル (Ni(III)OOH)、負極に水素吸蔵合金¹⁾、電解液に水酸化カリウムを主成分としたアルカリ水溶液を使用した二次電池である。公称電圧は 1.2 V で、ニッケルカドミウム電池と同等である。

電極反応は次の通りである。M は水素吸蔵合金を、 e^- は電子を表す。また、右向きの矢印は充電反応を、左向きの放電反応を示す。



両極での反応をまとめると、



となり、水素原子が正極と負極の間を移動する単純な反応である。ニッケルカドミウム電池のように金属が溶解析出する反応が含まれないので、ニッケル水素電池では活物質がセパレータを貫通することによる微小内部短絡は起こらない(ただし、(e)項参照)

負極に使われる水素吸蔵合金には様々な種類があるが、ニッケル水素電池に使われているのは LaNi_5 を主成分とする AB_5 型合金と呼ばれるものが多い。La などの希土類元素はどれも化学的性質が似通っているため、分離精製には手間が掛かり、コスト高となる。そのため、複数の希土類元素を含む鉱石から希土類を単体ごとに分離せず合金の形で精製し、これをミッシュメタル (Misch Metal) と呼ぶ。ニッケル水素電池ではミッシュメタルにニッケル、その他 10 種類程度の元素を加えて用いている。

(c) 充放電

ニッケル水素電池は通常定電流で充電される。小型電池の場合、標準的な充電は、充電電流 0.1 It (10 時間率) で 16 時間である。電池が大きくなると放熱効率が悪くなるため、充電末期の温度上昇が激しくなる。また、小型でも大電流で急速充電すると充電末期には温度上昇が大きい。このような場合には充電終止条件として、電圧低下値 ($-dV$) や一定時間内の温度上昇 (dT/dt) が使われる。充電方法としては定電流以外にパルス電流によるトリクル充電や定電圧

フロート充電も一部で使われているが、一般的ではない。

公称容量 2100 Ah の市販ニッケル水素電池の定電流充電曲線を図 1・2・1 に示す。充電電流は 210 mA (0.1 It)，充電時間は 16 時間である。また、図 1・2・1 と同一のニッケル水素電池の放電曲線を図 1・2・2 に示す。放電電流は 420 mA (0.2 It)，放電終止電圧は 1.0 V である。

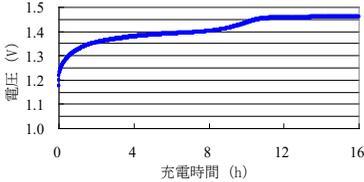


図 1・2・1 公称容量 2100 mAh 電池の充電曲線
(充電電流 210 mA，充電時間 16 時間)

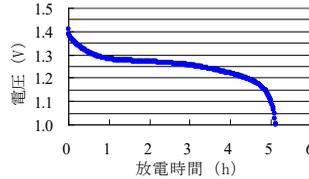
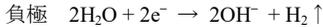
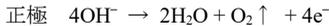


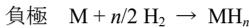
図 1・2・2 公称容量 2100 mAh 電池の放電曲線
(放電電流 420 mA，終止電圧 1.0 V)

(d) 副反応とニッケル水素電池の劣化

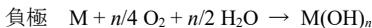
ニッケル水素電池の充放電時に (b) 項に示した反応だけが起こるのであれば反応は可逆であって電池は劣化しないのであるが、現実にはこれ以外の副反応が起こる。ニッケル水素電池の内部では充電時に充電反応と同時に水の電気分解が起こる。



正極、負極でそれぞれ発生した酸素と水素は、以下の反応によって吸収され、最終的に水分子に戻る。



しかし、過充電状態が長時間続いたりすると、下記の反応により合金が不可逆な変化を起こして不活性化する。これが劣化の一因である。



また、水の分解によって発生した水素と酸素が電極活物質によって完全に吸収されず、一部が少しずつ電池の外部に漏れていくと電解液が減少し、これも劣化の一因となる。これ以外にサイクル使用では負極の水素吸蔵合金が充放電によって膨張、収縮を繰り返すために微粉化し容量が低下する。

更に、ニッケルカドミウム電池と同様に、ニッケル水素電池でもメモリー効果²⁾と呼ばれる現象が見られる。これは、浅い放電と満充電のサイクルを繰り返した後に深い放電をすると、浅い放電の終了電圧を過ぎた後に電圧が低下するという現象である。過充電によって NiOOH が γ 相と呼ばれる結晶相に変化して蓄積し、起電力、電導度が下がるのが原因である。一度ないし数回の深い放電により回復するので、上述した不可逆な劣化とは異なる。

(e) トピックス

ニッケル水素電池の短所の一つとして、自己放電が比較的速く、購入してもそのままでは使えないという消費者の不満があった。新規合金を用いてこの問題を克服したニッケル水素電池が、21 世紀になって日本で相次いで開発された³⁾⁴⁾。ニッケル水素電池の自己放電では、活物質と電解液の反応による本来の意味での自己放電よりも、むしろ AB₃ 型合金の成分として含ま

れるマンガン、コバルトが溶出してセパレータ上に導電性の化合物として析出し、微小内部短絡を引き起こす点が問題であった。新規合金はマンガン、コバルトを使用しておらず、自己放電が非常に少なくなると同時に容量も AB₅型に比べて増加している。

■参考文献

- 1) 大角泰章：“新版 水素吸蔵合金—その物性と応用—” アグネ技術センター，1999。
- 2) 佐藤祐一：信学技報，vol.104，no.576，CPM 2004-144，pp.11-16，2005。
- 3) 中村 宏：信学技報，Vol.104，no.576，CPM 2004-142，pp.1-3，2005。
- 4) 尾崎哲也，金本 学，境 哲男：信学技報，vol.108，no.403，CPM 2008-138，pp.29-34，2009。

(3) リチウムイオン電池

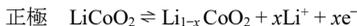
(執筆者：千坂光陽) [2011年10月 受領]

(a) はじめに

リチウムイオン電池は、ノートパソコン、携帯電話などに代表されるモバイル機器用電源として、1990年代初めに実用化された。最近では電動工具、電動スクーターや、ハイブリッド・プラグインハイブリッド・電気自動車などの動力源にも用いられ、その利用シーンは拡大し続けている。

(b) 構成と電極反応

リチウムイオン電池の定義は、「リチウムイオンを吸蔵・脱離し得る炭素質材料を負極活物質として、リチウムイオン含有金属酸化物を正極活物質として用いたトポ化学反応原理に基づく非水系電池」が一般的である¹⁾。広義には、負極として炭素質材料以外のものを用いる場合も含めることがある。トポ化学反応とは、化学的な反応を伴わずホスト分子などにゲスト分子、ゲストイオンなどが出入りする反応である。正極・負極活物質材料には様々な選択肢があるが、今日のモバイル機器用電源としてのリチウムイオン電池において最も用いられているのは、各々コバルト酸リチウム (LiCoO₂)、グラファイト (C₆) であり、その電解液にはエチレンカーボネート (EC) などの有機溶媒に六フッ化リン酸リチウム (LiPF₆) などのリチウム塩を溶解させた有機電解液が用いられている。公称電圧は3.7 Vで、ニッケルカドミウム電池やニッケル水素電池などほかの二次電池と比較しても非常に高い。電極反応は次の通りである。e⁻ は電子を表す。また、右向きの矢印は充電反応を、左向きは放電反応を示す。



両極での反応をまとめると、



であり、リチウムイオンが正極と負極の間を移動する、いわゆるロッキングチェア型電池である。正極活物質 LiCoO₂ からのリチウム脱離量 x が一定値以上に増加すると、その結晶構造が不安定になり可逆性が失われるため、最大 $x=0.5$ 程度までに留められる。負極においては、原理的にはリチウム金属が溶解・析出する反応が含まれない。

正極・負極用活物質には続々と新しい材料が開発されてきており²⁾、使用目的・用途などに応じて使い分けられている。正極活物質を例にとると、電気自動車用リチウムイオン電池には層状岩塩型 LiCoO₂ の Co サイトの一部を Ni, Mn で置換したいわゆる三元系材料やスピネル型 LiMn₂O₄系材料が、電動工具やバックアップ電源用リチウムイオン電池にはオリビン型 LiFePO₄

が既に実用化されている。

(c) 充放電

リチウムイオン電池は、通常定電流 (CC) 充電後に定電圧 (CV) 充電を行う、CC-CV モードで充電される。公称電圧は負極活物質にグラファイトを用い、正極活物質に LiFePO_4 、 LiMn_2O_4 を用いた場合にそれぞれ 3.4 V、3.8 V となる。

(d) 副反応とリチウムイオン電池の劣化

リチウムイオン電池の充放電時には (b) 項に示した反応以外に様々な副反応が起こる。代表的な副反応は、負極での電解液分解による表面被膜 (Solid Electrolyte Interface : SEI) の生成である。リチウムイオンがグラファイトに挿入される電位は、標準水素基準電極に対し約 -3 V と非常に低く、前述の EC 系溶媒を含むほとんどすべての溶媒が還元される領域である。しかしながら、電解液の還元分解により、グラファイト表面に SEI が形成され、これが更なる電解液の分解を抑える役割を担っている。SEI を通して充放電反応が進行し、かつ電解液の分解を抑えるには、SEI がリチウムイオン伝導性を有しかつ電子伝導性を示さないことが必須である。このような特性を併せ持ち、ひとたび生成すればその後は充放電を繰り返しても安定な、いわば都合の良い SEI のみが存在することが理想である。しかしながら、電池の劣化時には、SEI が成長し、電池の内部抵抗を増加させていることを示唆する結果が報告されており³⁾、また SEI 生成による電解液の減少も、内部抵抗増加の原因になり得ることから、その成長メカニズム解明・制御が長期にわたる電池特性改善の鍵であると考えられる。ほかにも、正極上において生成される SEI や、特にマンガン系活物質・バインダの溶出、負極上のリチウム金属析出、活物質の結晶構造変化及び電極体積の変化も劣化要因として挙げられ、材料ベースでの対策ならびに充放電条件などの使用方法からの対策がなされている。

(e) トピックス

近年最も注目を集めているアプリケーションの一つは自動車であり、その動力源としてはより大容量を有し、かつ安全なリチウムイオン電池が求められている。

前者に関しては、正極・負極双方の高容量活物質が探索されている。負極についてはその候補材料として、スズ複合酸化物やシリコン酸化物、コバルト酸化物微粒子、窒化物、合金系もしくは究極としてリチウム金属と枚挙に暇がない。これらの多くは、その理論容量が現行グラファイトの 372 mAh/g の倍以上である。しかしながら、(c) 項で例示した現行の正極用活物質は、実用量で 160 mAh/g 程度もしくはそれ以下で、材料によっては安定して利用できない領域を含む理論容量をもってしても 270 mAh/g 程度であり、負極材料と比較して小さい。そのため、リチウムイオン電池の高容量化に向けてはより正極材料の開発が重要であると考えられ、現在は、過剰型 Li_2MnO_3 ($\text{Li}[\text{Li}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}]\text{O}_2$) 及びその固溶体に代表されるリチウム過剰型遷移金属酸化物、充放電時に活物質当たり最大 2 Li の脱離・挿入が期待される Li_2MSiO_4 ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ni}$) などのポリアニオン系材料に注目が集まっている。これらの中には 250 mAh/g を超える容量を示す材料も報告されているが、依然として負極材料の容量に比べれば小さく、空気中の酸素とリチウムイオンの反応を利用するリチウム空気電池の基礎研究も盛んに行われている。いずれも材料開発が高容量化への鍵である。

後者に関しては、製造不良や極端な誤使用などの何らかのトリガーで電池温度が上昇した際に、リチウムイオン電池内部において正・負極活物質と電解液との反応や、これらの熱分解などが連鎖的に引き起こされる熱暴走に至るため、発熱現象/過充電状態を検知し、熱暴走を未

然に防止する対策がなされている。現在市販されている電池パックには温度モニタ，電流・温度ヒューズ，保護 IC などからなる複数の電子デバイスを利用した保護回路が搭載され，これによりリチウムイオン電池は保護されている。安全性を保障する代わりに，正・負極の有する性能を 100% は利用していない状況である。一つの解決策として，有機電解液に代わり固体電解質を用いた全固体リチウムイオン電池が期待されている。

■参考文献

- 1) 吉野 彰, 大塚健二, 中島孝之, 中條 聡 : 日化誌, vol.2000, no.8, pp.523-534, 2000.
- 2) J.B. Goodenough, Y. Kim : Chem. Mater., vol.22, no.3, pp.587-603, 2010.
- 3) K. Takeno, M. Ichimura, K. Takano, J. Yamaki : J. Power Sources, vol.142, no.1-2, pp.298-305, 2005.

3-1-3 電気二重層キャパシタ

(執筆者：萩谷将之) [2010年4月 受領]

(1) はじめに

電気二重層とは，分極性電極の表面と電解液の界面にそれぞれ形成される電荷層のことをいう。電気二重層の構造に関するモデルはこれまでに様々な型で提案されてきている（図 1・3・1）。分極性電極として活性炭とイオン伝導性の電解液のような 2 つの異なる界面において，正と負の電荷が極めて短い距離を隔てて分布・配列し，ここに外部から電圧を印加すると電極が正(負)の電荷を帯びる。すると，電極と電解液界面に電解液中のアニオン(カチオン)が配列し電荷を蓄積することができる。電気二重層において電極と配列したイオンとの間には電荷移動が生じず，電荷とエネルギーの貯蔵は静電的なものであるため，この電荷貯蔵機構は非ファラデー過程であるといえる。この非ファラデー過程を利用している点が二次電池との大きな違いであるため，電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) は急速充放電が可能で長期サイクル寿命を有する。

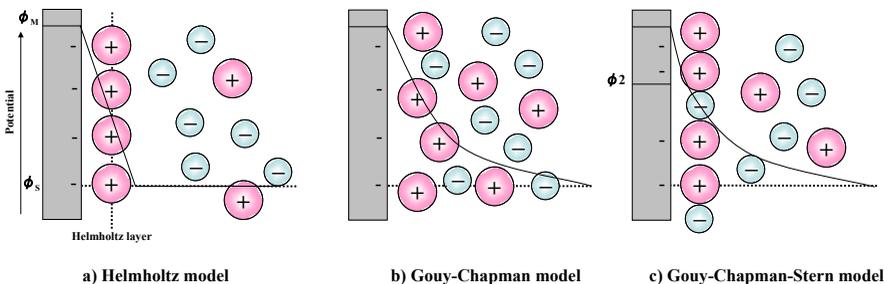


図 1・3・1 電気二重層モデル

(2) 電気二重層キャパシタの蓄電原理

図 1・3・2 に電気二重層キャパシタ蓄電モデルを示す。電気二重層キャパシタは一對の分極性電極と電解液から構成される。分極性電極と電解液との界面に形成される電気二重層容量 C は式 $C = \int \varepsilon / (4\pi\delta) dS$ で表すことができる。水溶液と水銀電極との界面で形成される電気二重層

容量は、 $20\sim 30 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ になることから、比表面積が大きく高導電性で電気化学的に安定な多孔質性の活性炭を極性電極として用いることにより、ファラッドオーダーの小型大容量コンデンサ、すなわち電気二重層キャパシタを得ることができる。また電気二重層キャパシタのエネルギー密度 E は C と作動電圧 V により $E = 1/2 CV^2$ と表すことができる。

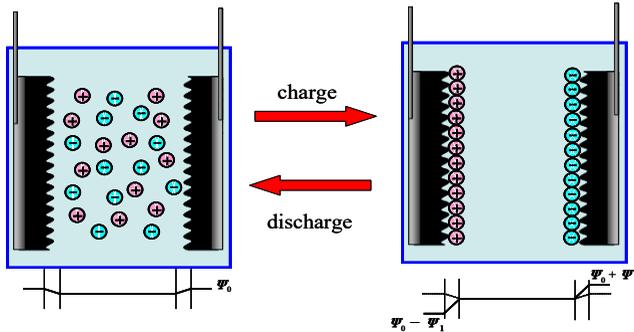


図 1・3・2 電気二重層キャパシタの充放電機構

更なる高エネルギー密度化のためには、高電位で稼働させることが必要となる。そのため広い電位範囲で電解液分解などによってファラデー反応が生じない、すなわち理想極性電極に近い挙動をとるものが望ましい。

(3) 電気二重層キャパシタの構成材料

(a) 電極材料 (活性炭)

活性炭の最大の特徴は多孔性の構造にある (図 1・3・3)。活性炭は賦活処理により細孔を大きく発達させたものであり、比表面積は $800\sim 3000 \text{m}^2/\text{g}$ にも達する。大きく分けて活性炭の細孔はマクロ孔 (細孔直径 $> 50 \text{nm}$)、メソ孔 ($2\sim 50 \text{nm}$)、ミクロ孔 ($< 2 \text{nm}$) に区別される。ミクロ孔は活性炭の表面積の大部分を占め、強力な吸着力を有しており、ガスや比較的分子サイズの小さな物質の吸着サイトになる。メソ孔は、分子サイズの大きな高分子物質 (液中の着色成分など) の吸着や薬剤の担持に利用される。また、活性炭表面に吸着した吸着質のミクロ孔への移動に関与するため、動的吸着性能、あるいは吸着速度にも影響する。活性炭に対する被吸着物質の吸着容量 (静的吸着量) や電極材として使用する場合の静電容量は、ミクロ孔からメソ孔の容積や分布に大きく影響を受ける。マクロ孔は吸着質やイオンが活性炭内部のミクロ孔に吸着するための通路であり、吸着容量にあまり寄与しないが、動的な吸着速度や電極材料とした充放電応答性 (速度) に対し大きな影響がある。マクロ孔容積が大きいと活性炭の密度も低くなり、また硬さも低下する場合が多い。

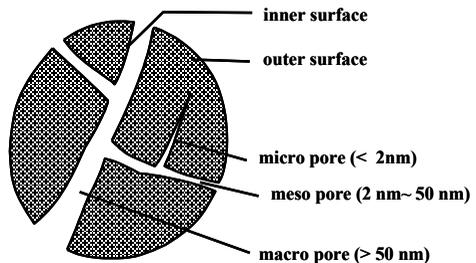


図 1・3・3 活性炭モデル

上記に示した細孔は、活性炭製造時の賦活処理条件、加熱温度、薬品濃度、雰囲気によって形状、密度、面積が異なり、電気二重層キャパシタ用の電極材料として使用する場合、活性炭の吟味が電気二重層キャパシタの特性を大きく左右すると言っても過言ではない。

(b) 電解液

電解液は、大きく水系電解液と非水系電解液に分けることができる。水系では硫酸水溶液が主流であり、非水系は溶媒にプロピレンカーボネート (PC)、支持電解質にテトラエチルアンモニウムテトラフルオロボレート (TEA-BF₄) などの四級アンモニウム塩を用いた電解液が多い。上述のように電気二重層キャパシタのエネルギー密度は V の 2 乗に比例して大きくなるため、電位窓 (電解液の酸化還元反応が起こらない電位範囲) が広い電解液が有利となる。非水系 (2.5 V) の電位窓は水系 (約 0.8 V) に比べて広く、高エネルギー密度が得られるため、現在のところ実用化した例は非水系がほとんどである。一方、水系はエネルギー密度の点では非水系に劣るものの、出力密度が高い (非水系の 3~5 倍) ことや安全面でのメリットがある。

(4) 電気二重層キャパシタの特徴及び性能

電気二重層キャパシタの充放電は非ファラデー的な反応 (化学反応を伴わない物理的な吸脱着) であるため、急速充放電が可能で長期的なサイクル寿命を有する蓄電デバイスである。表 1・3・1 には Li 二次電池と特性を比較したものを示す。今後、石油燃料などの代替となる新しいエネルギーデバイスが求められていくと思われるが、電気二重層キャパシタは更なる高容量化、高電圧化、低抵抗化、使用温度の拡大など課題をクリアしていくことにより大きく発展していかう。

表 1・3・1 電気二重層キャパシタと Li 二次電池との比較

	電気二重層キャパシタ	二次電池
使用温度 [°C]	-25~85	-5~45
充放電サイクル [回]	半永久的	200~500
エネルギー密度 [Wh/kg]	10 ⁰ ~10 ¹	10 ¹ ~10 ²
パワー密度 [W/kg]	10 ² ~10 ⁴	10 ¹ ~10 ³
ショート時	問題なし	破損

3-1-4 燃料電池

(執筆者：武 哲夫) [2011年12月受領]

(1) はじめに

燃料電池の歴史は古く、1859年のプランテ (G. Plante) による鉛蓄電池の発明に先立って、1839年にイギリスのグローブ卿 (Sir William R. Grove) によりその原理確認が行われた。しかし、燃料電池を支える周辺材料技術が未成熟なため、100年以上の間、実用化には至らなかった。1965年にアメリカが宇宙船ジェミニ5号に1kWの固体高分子形燃料電池を搭載し、燃料電池の実用化に初めて成功した。この成功が契機となってその後世界中で燃料電池の研究開発が活発に行われ、周辺材料技術の進歩も相俟って燃料電池の実用化に向けた流れが加速された。

(2) 原理と構成

燃料電池は、電池という名前が付けられているが蓄電機能は有しておらず、外部から還元剤

と酸化剤を連続的に供給し、これらを電気化学的に反応させることにより化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換する高効率な発電装置である。反応生成物や未反応の酸化剤と還元剤は、連続的に外部に排出され、燃料電池内部に蓄積することはない。発電反応は、発熱反応であり、燃料電池温度を一定に保持するためには、水、空気などの冷媒で冷却する必要がある。発電電力とともにこの冷却過程で得られる排熱を有効利用することにより、燃料電池を用いて電気と熱のコージェネレーションシステムの構築が可能である。

燃料電池は、水素、一酸化炭素などの還元剤が供給されその酸化反応が起こる電極であるアノード、イオン伝導が起こる電解質、及び酸素などの酸化剤が供給され、その還元反応が起こる電極であるカソードからなる単セルが複数積層されたセルスタックから構成される。発電時の単セル電圧は 1V 未満であるため、所定の電圧を得るためにセルスタックが用いられる。燃料電池には、アノードで還元剤から生成したカチオンが電解質中をカソードに移動し酸化剤と反応するタイプとカソードで生成したアニオンが電解質中をアノードに移動し還元剤と反応するタイプの 2 種類がある。

燃料電池では電流密度が上昇するにつれてセル電圧が低下する。燃料電池の効率は電圧に正比例するので、高効率で発電するためには低電流密度領域で発電するのが有効である。しかし、所定の電力を得るためには、多数の単セルもしくは大面積の単セルが必要となり、セルスタックの大型化が避けられない。セルスタックをコンパクト化するためには、発電効率をある程度犠牲にして高電流密度領域で発電するのが有効である。一般的に、高効率が特に要求される定置用燃料電池では低電流密度領域で発電を行い、コンパクト化が特に要求される移動用燃料電池では高電流密度領域で発電を行う。

(3) 種類

燃料電池は、使用する電解質の種類によって、アルカリ型燃料電池 (AFC)¹⁾、直接メタノール型燃料電池 (DMFC)²⁾、固体高分子型燃料電池 (PEFC)³⁾、りん酸型燃料電池 (PAFC)⁴⁾、熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC)⁵⁾、固体酸化物型燃料電池 (SOFC)⁶⁾ に分類される。これらの燃料電池の比較を表 1・4・1 に示す。なお、表 1・4・1 に示した各燃料電池の電解質と動作温度は、標準的なもので、今後の研究開発により変わる可能性がある。また、DMFC は、PEFC の一種であるが、アノードに水素の代わりにメタノール水溶液を還元剤として供給してプロトンを生産させる点が PEFC と異なる。

表 1・4・1 燃料電池の比較

種類	アルカリ形 (AFC)	直接メタノール形 (DMFC)	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
電解質	水酸化カリウム	パーフルオロスルホン酸	パーフルオロスルホン酸	りん酸	炭酸リチウム/炭酸カリウム	安定化ジルコニアランタンゲレート系酸化物
動作温度	100°C 以下	80°C	80°C	200°C	650°C	800~1000°C
イオン伝導種	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
アノード反応	H ₂ +2OH ⁻ →2H ₂ O+2e ⁻	CH ₃ OH+H ₂ O →6H ⁺ +CO ₂ +6e ⁻	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +CO ₃ ²⁻ →H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻	H ₂ +O ²⁻ →H ₂ O+2e ⁻ CO+O ²⁻ →CO ₂ +2e ⁻
カソード反応	1/2O ₂ +H ₂ O+2e ⁻ →2OH ⁻	3/2O ₂ +6H ⁺ +6e ⁻ →3H ₂ O	1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ O	1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ O	1/2O ₂ +CO ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻	1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻
電池反応	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	CH ₃ OH+3/2O ₂ →CO ₂ +2H ₂ O	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O CO+1/2O ₂ →CO ₂

(4) システム構成

燃料電池は、一次電池や二次電池と異なり、電気化学反応を行わせることにより電力を取り出す発電部、すなわちセルスタックだけでは動作させることができない。セルスタック以外に、炭化水素、アルコールなどの燃料を供給する燃料供給部、燃料から水素などの還元剤を作るとともにその精製を行う燃料処理部（水素などの還元剤をそのままアノードに供給する場合には不要）、空気、酸素などの酸化剤供給部、セルスタックで発電とともに発生した熱を管理し、水、空気などの冷却媒体を用いて冷却を行うことによってセルスタックを所定の温度に維持するための温度管理部、燃料電池の発電電力を直流から交流に変換するとともに、出力電力の制御を行う出力調整部（パワーコンディショナー）、セルスタックの冷却によって生じた排熱を有効利用する熱利用部（排熱を利用しない場合には熱処理部が必要）が必要であり、これらをまとめて燃料電池システムという。燃料電池システムの一例としてPEFCを用いた家庭用燃料電池システムの構成を図1・4・1に示す。

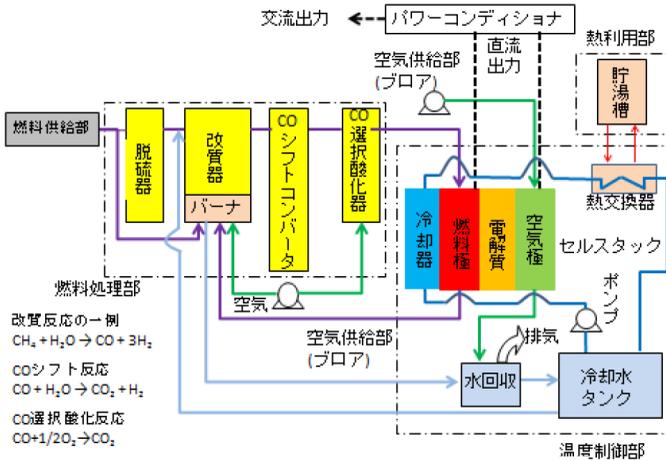


図1・4・1 家庭用燃料電池システム

本システムでは、還元剤に水素、酸化剤に空気をそれぞれ使い、還元剤の水素の製造と精製は燃料処理部を構成する脱硫器、改質器、COシフトコンバータ、及びCO選択酸化器で行う。脱硫器では燃料の天然ガス、液化石油ガス、灯油などに含まれる改質器やセルスタックに有害な硫黄分を吸着除去し、改質器で燃料と水蒸気を反応させ水素と一酸化炭素を生成させる。COシフトコンバータでは、セルスタックに有害な改質ガス中の一酸化炭素と水蒸気を反応させ二酸化炭素と水素を生成させる。更に、CO選択酸化器では、改質ガス中に残存する一酸化炭素を空気中の酸素で二酸化炭素に酸化し、その一酸化炭素濃度を数ppbオーダーまで低下させる。

(5) 用途

PEFCの主な用途は、1kW以下の家庭用コージェネレーションシステムと数十kW～100kW級の自動車用電源であり、PAFCの主な用途は100kW級の事業所用コージェネレーションシステムである。また、MCFCは、PAFCと同様に数百kW級の事業所用コージェネレーション

システムが主な用途であり、SOFC は、1 kW 以下の高効率発電が可能な家庭用コージェネレーションシステムと SOFC とガスタービンを組み合わせた高効率ハイブリッドシステムが主な用途である。DMFC の用途は、二次電池に代わる携帯機器用高エネルギー密度電源であるが、これまでのところ携帯機器に容易に実装可能なレベルまでの小型化が達成されていない。AFC の用途は、電解質の水酸化カリウムと反応する二酸化炭素を含む空気を酸化剤として使用できないので、酸化剤として純酸素を使用する宇宙船用電源に限定されている。

■参考文献

- 1) 太田健一郎：“燃料電池の原理と現状,” ソーダと塩素, vol.53, no.3-4, pp.49-668, 2002.3.
- 2) 梅田 実：“直接メタノール形燃料電池,” 応用物理, vol.75, no.8, pp.988-994, 2006.8.
- 3) 太田健一郎, 石原顕光：“原理から考える固体高分子形燃料電池,” 自動車技術, vol.65, no.4, pp.31-37, 2011.4.
- 4) 腰 一昭：“りん酸形燃料電池の現状と今後の展望,” 高温学会誌, vol.35, no.5, pp.250-255, 2009.9.
- 5) 渡辺隆夫：“MCFC 開発の最先端,” ケミカル・エンジニアリング, vol.52, no.3, pp.198-202, 2007.3.
- 6) 江口浩一：“固体酸化物燃料電池開発の現状と構成材料,” 信学技報, vol.109, no.410 (CPM2009 147-161), pp.75-80, 2010.2.

3-1-5 太陽電池

(執筆者：松本 聡) [2010年12月受領]

太陽電池は、シリコンや化合物半導体 (GaAs, CdS, CIS), 有機半導体や無機酸化物 (TiO₂) に光が当たると光起電力が発生する光電効果を利用した発電デバイスである。地球温暖化防止のキーデバイスの一つとして近年注目を浴びており、単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコンなどのシリコン系、GaAs などの III-V 族や CIS の化合物、色素増感型など様々なタイプの太陽電池 (図 1・5・1) が研究開発・生産されている。

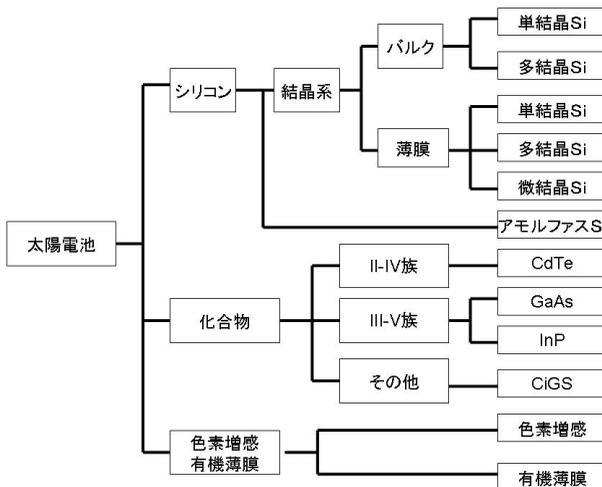


図 1・5・1 太陽電池の種類

容量別には、メガ (M) ソーラーやギガ (G) ソーラーと呼ばれる MW から GW クラスの大規模な太陽光発電設備 (大容量) から、一般家屋の屋根に搭載する家屋用発電設備用の数 k W レベルの中容量、LED 照明用、携帯電話、電卓、時計などに搭載される数 mW ~ 数十 W 小容量に分類される。用途としては、発電設備が大部分を占めており、その他として自立型電源へ適用されている。変わった用途としては、衛星用の太陽電池がある。

(1) 太陽電池の動作

太陽電池の等価回路を図 1.5.2 に示す。等価回路は、ダイオード、電流源、直列抵抗と並列抵抗で表すことができる。直列抵抗と並列抵抗を無視した場合、太陽電池の特性は

$$I = I_L - I_0[\exp(qV/nkT) - 1] \quad (1.5.1)$$

となる。 I_L は光照射に伴って流れる光電流、 I_0 は逆方向飽和電流、 q は素電化量、 V は電圧、 n はダイオード因子、 k はボルツマン定数、 T は温度である。

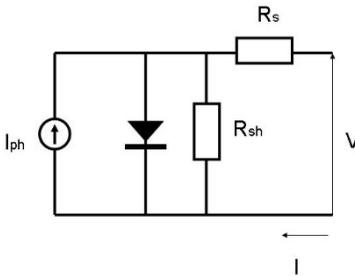


図 1.5.2 太陽電池の等価回路

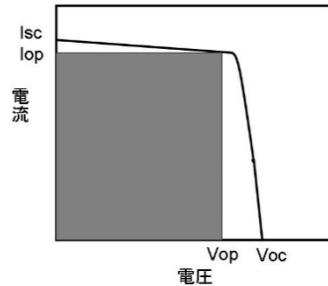


図 1.5.3 太陽電池の電流-電圧特性

太陽電池の電流-電圧特性は図 1.5.3 のように表される。

開放電圧 V_{oc} : 出力端子を開放した場合に発生する電圧 (電流が 0)

短絡電流 I_{sc} : 出力端子に負荷をかけずに短絡した状態で流れる電流 (電圧が 0)

変換効率 η : 入射エネルギー P_{in} に対する最大出力 $V_{op} \times I_{op}$ の割合で、式 (1.5.2) のように表される。 I_{op} と V_{op} は最適動作点における電流と電圧である。

$$\eta = \{(V_{op} \times I_{op})/P_{in}\} \times 100 \quad (1.5.2)$$

曲線因子 FF: $V_{oc} \times I_{sc}$ と $V_{op} \times I_{op}$ の面積比を表し、次のように定義される。

$$FF = (V_{op} \times I_{op}) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (1.5.3)$$

となる。

$$\eta = \{(V_{oc} \times I_{sc} \times FF)/P_{in}\} \times 100 \quad (1.5.4)$$

と表すことができる。

(2) シリコン系太陽電池

(a) 単結晶シリコン太陽電池

最も古くから開発の進んだ太陽電池で、ほかの太陽電池に比べて変換効率が高く、22% を超える効率のものも商品化されている。モジュールでの変換効率は 13~18% 程度である。基板はチョクラルスキー法で製造されたシリコンインゴットを用いる。単結晶シリコン太陽電池は純度の高いシリコンを原料として用いるため、材料コスト・加工コストが高い。最近では、原料

の Si の不足のため、ウエハの薄化が検討されている。

(b) 多結晶シリコン太陽電池

単結晶シリコン太陽電池のコストを改善するために、キャスト法により作成したインゴットを用いている。シリコンの LSI には使用できないオフグレード品のシリコンインゴットも基板として用いることができるため、単結晶太陽電池に比べ製造コストが安い。不純物や欠陥が多いため、モジュールの変換効率は 12~16% である。単結晶シリコン太陽電池に比べ効率が低いいため効率の改善、また原料シリコンの使用量の削減の観点から単結晶シリコン太陽電池と同様に、ウエハの薄化が検討されている。

(c) アモルファスシリコン太陽電池

結晶系シリコン太陽電池に比べてシリコンの使用量が 1/300 にかつ製造が簡単なため結晶系太陽電池に比べて大幅な低コスト化が可能である。アモルファスシリコン太陽電池は、CVD で水素化アモルファスシリコンの薄膜をガラス基板、金属や樹脂基板上に堆積して製作する。結晶系シリコン太陽電池に比べて変換効率の温度依存性が小さくかつ低照度下での効率が高いといった特徴があり、電卓などの室内用途に用いられてきたが、変換効率は 10% 以下と低い。近年では単結晶シリコンと積層することにより高効率化が図られている。

(3) 化合物系太陽電池

(a) GaAs 系、InGaAs 系太陽電池

単結晶の GaAs を用いたものは禁制帯幅が 1.4 eV で太陽光スペクトルに適合性が良く 25% 以上の高効率を実現された。また、InGaAs 系は格子定数あった材料を用いて多接合構造にすることにより、より広範な太陽スペクトルをカバーすることで 35% 以上の高効率を達成している。しかしながら、高コストなため宇宙用途に限られている。

(b) CIS 系太陽電池

CIS 太陽電池は銅(Cu)-インジウム(In)-セレン(Se)を主成分とするカルコパライト系と呼ばれる I-III-VI 族化合物を用いる。代表的なものに Cu(In, Ga)Se₂ や Cu(In, Ga)(Se, S)₂ などで CIGS, CIGSS と略称される。CIGS や CIGSS は従来のバルクを用いた結晶シリコン系とは異なり、薄膜型でありながらバルクシリコンに匹敵する変換効率が得られことに特徴がある。また、ガラスなど安価な基板に製作でき、かつ大面積化や量産化に向くことから低コスト化が可能であり、量産化も始まっている。

(4) 色素増感型太陽電池

色素増感型太陽電池は、導電性膜がついたガラス基板上に TiO₂ や ZnO などの無機酸化物を Ru 色素などの色素で被覆した光電極と対極の導電性ガラス基板でヨウ素化合物などの電解質を挟む構造であり、原料が安価であること、製造プロセスに真空系を用いる必要がなく印刷形式を採用できるため、コストをシリコン系太陽電池の 1/2~1/5 に抑えることができるため、次世代の太陽電池として注目を集めている。

■8 群-5 編-3 章

3-2 パワー半導体デバイス

3-2-1 IGBT

(執筆者：岩室憲幸) [2010年10月 受領]

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) は AC ドライブコントロールや UPS などの中・高耐圧装置を中心に様々なパワーエレクトロニクス機器に適用されている。1982 年の誕生以来、現在までの四半世紀に IGBT は EST (Emitter Switched Thyristor) や MCCT (MOS Controlled Cascode Thyristor) などの MOS ゲートサイリスタの挑戦を幾度となく受けてきたが、それらの挑戦をことごとく跳ね返し上記パワーエレクトロニクス機器のキーデバイスとして中心的な役割をしている。

IGBT は MOSFET の低駆動電力特性とバイポーラトランジスタの低オン電圧特性を兼ね備えた新型 MOS ゲートバイポーラトランジスタとして RCA の Becke や GE の B.J. Baliga らにより、それぞれ COMFET, IGR として発表された¹⁾²⁾。しかしながら、開発当初はスイッチング速度が極めて遅く、また素子がすぐ壊れてしまうなどの欠点があったため、なかなか市場に普及することはなかった。1984 年、東芝の中川氏らが発表した Non latch up (ノンラッチアップ) 構造により破壊耐量が大幅に向上し³⁾、また高速スイッチング特性と相まって 1985 年世界で初めての IGBT モジュールが発売された。その後、80 年代後半から 90 年代前半にかけて、パワー半導体各社は第一世代ならびに第二世代 IGBT モジュールとしてそれぞれ開発を完了し発売に至った。IGBT の技術革新は、オン電圧・スイッチング特性・破壊耐量の、それぞれトレードオフの関係にある特性をいかに同時に改善するかにある。1989 年、従来のエビタキシャルウエハを用いたパンチスルー (PT) 構造に代えて FZ ウエハを用いたノンパンチスルー (NPT) 構造を適用した新しいタイプの IGBT が開発された⁴⁾。この NPT 型 IGBT には薄いシリコンウエハ加工技術のほか、裏面への低注入効率 pn 接合形成など、最先端のプロセス技術が必要不可欠であった。これはまさにパワーデバイス独自の技術である。これに、1 ミクロンルール程度の微細加工技術を適用した IGBT モジュールが 90 年代の終わりに開発・発売するに至った。

2000 年代に入ると、この薄ウエハ技術を更に発展させたフィールドストップ (FS) 構造を用い、表面にはトレンチゲート構造を適用した最新の IGBT モジュールの展開が始まった。この素子の特徴は、図 2・1・1 に示すように、裏面のコレクタ側に FS 層というやや高濃度の n 型層を設けることで更にウエハ厚さを薄くでき、その結果、表面のトレンチゲート構造と相まって更なる低オン電圧化と高速化が実現できる場所にある⁵⁾⁶⁾。これにより更なる低損失化が図られ、その結果、チップサイズも、図 2・1・2 に示すように 1990 年の第二世代 IGBT チップに比べ、約 30% までに縮小化ができた。これにより、IGBT モジュールの小型化が達成できたのである。

今後 IGBT モジュールの特性改善、特に高速化に伴う低損失化が進むと、スイッチング時の di/dt , dV/dt による放射ノイズの増大が実使用上大きな問題になると予想される。次世代 IGBT の開発は、従来のトレードオフ特性の改善だけではなく、発生損失と放射ノイズのトレードオフ特性の改善がキーワードとなるであろう。

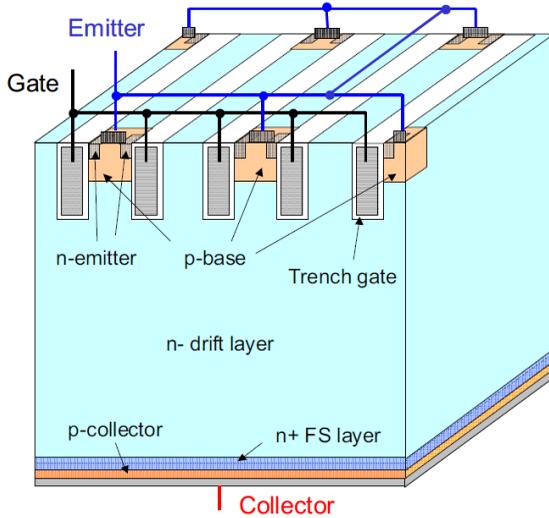


図 2・1・1 最先端 IGBT 構造 (トレンチ FSIGBT 構造)

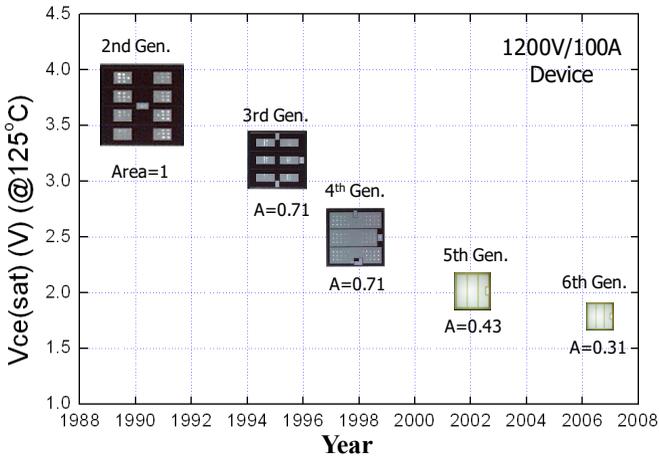


図 2・1・2 IGBT オン電圧低減とチップサイズ縮小の推移

現在普及している電力変換回路は電解コンデンサや直流リアクトルなどで構成される直流平滑回路が必要であり、このことが装置の小型化、低コスト化、長寿命化の妨げとなっている。そこで直流平滑回路を用いない変換方式としてマトリクスコンバータに代表される直接変換形電力変換回路が注目されている。この直接変換回路には双方向の電流遮断が可能なスイッチが必要であり、この用途に向けた逆阻止性能を持つ新しい IGBT である逆阻止 IGBT (RB-

IGBT) が注目されている。最近では、素子分離領域を極めて小さくするプロセス技術の開発も進んでおり⁷⁾、いよいよ実用化となってきた。また、IGBT モジュール内に内蔵されている IGBT チップと FWD チップを一つの素子に集積することで、チップ面積を縮小できるだけでなく、モジュール内の内蔵チップ数や組み立て時のワイヤーの本数を大幅に削減できることが可能な、逆導通 IGBT (RC-IGBT) も最近注目されるようになってきた⁸⁾。

■参考文献

- 1) US. Patent No.4, 364,073.
- 2) B.J. Baliga, et al. : "The insulated gate rectifier(IGR): A new power switching device," IEEE IEDM Tech., Dig., pp.264, 1982.
- 3) A. Nakagawa, et al. : "High voltage bipolar-mode MOSFET's with high current capability," Extended Abstract of 16th Conf. Solid-state Devices Mater., p.309, 1984.
- 4) G. Miller, et al. : "A new concept for a non punch through IGBT with MOSFET like switching characteristics," IEEE PESC Record1, p.21, 1989.
- 5) T. Laska, et al. : "The field stop IGBT(FS IGBT) — a new power device concept with a great improvement potential," Proceedings of Int. Symp. Power Semiconductors and ICs, p.355, 2000.
- 6) Y. Onozawa, et al. : "Development of the next generation 1200V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss," Proc. IEEE ISPSD 2007, pp.13, 2007.
- 7) K. Shimoyama, et al. : "A new isolation technique for reverse blocking IGBT with ion implantation and laser annealing to tapered chip edge sidewalls," Proceedings of Int. Symp. Power Semiconductors and ICs, pp.29, 2006.
- 8) H. Takahashi, et al. : "1200V Reverse Conduction IGBT," Proceedings of Int. Symp. Power Semiconductors and ICs, pp.133, 2004.

3-2-2 パワー-MOSFET

(執筆者：橋本貴之) [2009年12月 受領]

図 2・2・1 はプレーナ型パワー-MOSFET のユニットセルの断面図で、このユニットセルを奥行きと横方向に繰り返し配置することで、チップ当たり数十 A の大電流を流す。パワー-MOSFET のオンとオフの動作を説明すると以下の通りである*1。オン時にはゲート電極にしきい値 (V_{th}) 以上の電圧を印加し、ゲート電極直下の p 型領域を n 型に反転させることで、ソースからドレインに電子を供給する。オフ時はゲート電極をソース電極とショートすることで反転層が消滅し、電子の供給が遮断される。

パワー-MOSFET の特徴をバイポーラトランジスタ (BJT) 及び IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と比較すると表 2・2・1 のようになる。パワー-MOSFET は電流の担い手が電子のみ

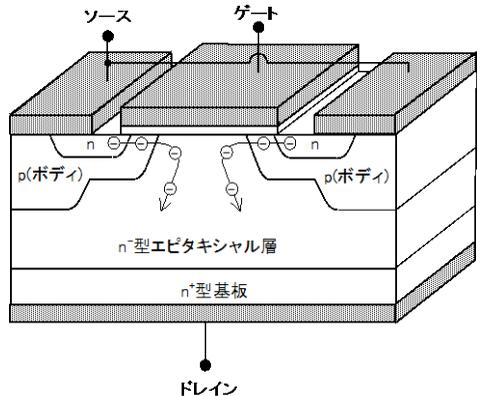


図 2・2・1 プレーナ型パワー-MOSFET の断面図

*1 パワー-MOSFET はチャンネルの反転層が n 型となる n 型チャンネルと、p 型となる p 型チャンネルの 2 種類があるが、ここでは n 型チャンネルに関して記載する。

なのでユニポーラ型に分類され、BJTとIGBTは電子と正孔が渾然一体となって電流が流れるのでバイポーラ型に分類される。駆動電力については、BJTはオン状態において、ベース電流を流し続ける「電流駆動」なので、駆動損失が大きく、駆動回路が大型化するという欠点がある。これに対し、パワーMOSFETとIGBTはゲートが絶縁された「電圧駆動」のため、駆動損失は小さい。スイッチングはパワーデバイスが「オンからオフ」、「オフからオン」に切り替わる動作で、スイッチング損失を低減するには、スイッチングを高速化する必要がある。パワーMOSFETは少数キャリアの蓄積がないので、高速なスイッチングが可能となるが、一方で伝導度変調がないため抵抗が高く、高耐圧化が難しい。破壊耐量については、パワーMOSFETは温度上昇に伴い抵抗が増大するので、BJTと比較して電流集中による熱暴走が起こり難く破壊に強い。

表 2・2・1 パワーMOSFET の特徴比較

デバイス分類	ユニポーラ型	バイポーラ型	
	パワーMOSFET	バイポーラ・トランジスタ (BJT)	IGBT
駆動電力	○:電圧駆動のため、駆動電力が小さい	×:電流駆動のため、駆動電力が大きい	○:電圧駆動のため、駆動電力が小さい
スイッチング	○:少数キャリアの蓄積がないため、スイッチングが速い	×:少数キャリアの蓄積があるため、スイッチングが遅い	×:少数キャリアの蓄積があるため、スイッチングが遅い
耐圧	×:伝導度変調がないため、高耐圧化が難しい	○:伝導度変調があるため、高耐圧化が容易	○:伝導度変調があるため、高耐圧化が容易
破壊耐量	○:熱暴走が起こり難く、破壊に強い	×:熱暴走が起こり易い	△:温度が上昇すると、MOS電流が抑制されるので、BJTより強い

パワーMOSFETの特性のなかで最も重要なものはオン抵抗 R_{on} である。オン抵抗は図2・2・2のように電子が移動する経路の抵抗の総和で表される。低耐圧における主要な抵抗成分はチャンネル抵抗 R_{ch} であり、高耐圧ではエピ抵抗 R_{epi} の比率が大きい*2。

チャンネル抵抗 R_{ch} を低減するには単位面積当たりのチャンネル密度を増加させるこ

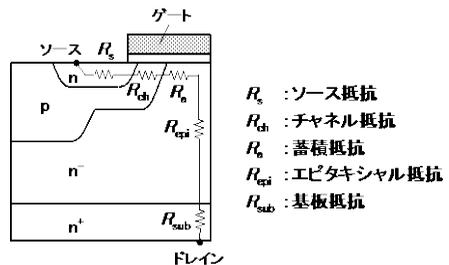


図 2・2・2 抵抗成分の分布

*2 低耐圧と高耐圧の境界線は厳密に定められているわけではないが、一般的に100V以下を低耐圧、100V以上を高耐圧に分類することが多い。

とが有効で、ユニットセルの横方向の寸法を低減することが開発目標となる。図 2・2・3 に示すトレンチ型パワーMOSFET はゲートがトレンチ(溝)型に形成されるので、プレーナ型と比較してユニットセルを大幅に縮小できる。

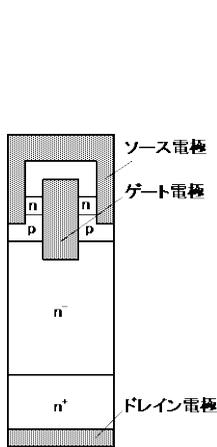


図 2・2・3 トレンチ型パワーMOSFET

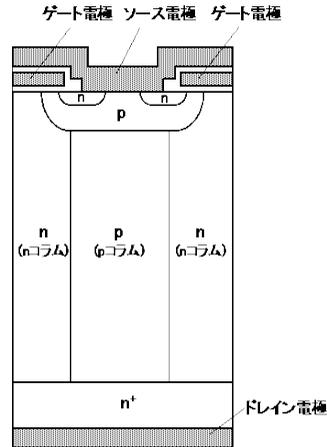


図 2・2・4 Super Junction (SJ) 構造

高耐圧のオン抵抗 R_{on} を低減するには、エピ抵抗 R_{epi} を低減する必要がある、図 2・2・4 に示す Super Junction (SJ) 構造が有効である³⁾。SJ は従来の一様な n^- 型エピタキシャル層の代わりに pn 領域を交互に配置したコラムを形成する。pn コラムのピッチと不純物濃度を調整し、完全空乏化させることで、縦方向の電界は均一となるので、耐圧は pn コラムの縦方向の長さ に比例する。従来構造のオン抵抗 R_{on} は耐圧の約 2.5 乗に比例するのに対して、SJ の R_{on} は耐圧 に比例するので、高耐圧になるほど SJ による R_{on} の低減効果が大い。また、SJ は pn コラム のピッチを小さくするほどするほど、オン抵抗を低減できる。SJ の製造方法としては、エピタキシャル成長とイオン注入を繰り返す「マルチエピ法」³⁾ とトレンチを掘った後にエピタキシャル成長によりコラムを形成する「トレンチ埋め込み法」⁴⁾ があるが、pn コラムの狭ピッチ化には「トレンチ埋め込み法」が有利である。

30V 以下の低耐圧分野はスイッチング電源が主な市場となるので、オン抵抗 R_{on} の低減に加えて、高速なスイッチングが求められる。スイッチングを高速化するには、電極間に存在する寄生容量を低減することが有効で、なかでもゲートとドレイン間の寄生容量である帰還容量 C_{rss} の低減が重要となる。図 2・2・5 は電極間容量の等価回路で、帰還容量 C_{rss} は C_{gd} に相当する。パワーMOSFET のデータシートには下記 3 つの容量パラメータが記載される。

C_{iss} : ドレインとソースを短絡したときの容量

C_{oss} : ソース共通の出力容量

C_{rss} : ゲートとドレインの容量

これらの容量パラメータと図 2・2・5 の電極間容量 (C_{gs} , C_{gd} , C_{ds}) とは次式の関係にある。

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad (2 \cdot 2 \cdot 1)$$

$$C_{oss} = C_{gd} + C_{ds} \quad (2 \cdot 2 \cdot 2)$$

$$C_{rss} = C_{gd}$$

(2・2・3)

帰還容量 C_{rss} を低減できる構造として、裏面にソース電極を設けたオフセットゲート⁵⁾や、トレンチゲート底部の酸化膜を厚くした構造⁶⁾、トレンチ型ゲート電極を分離した構造⁷⁾などが報告されている。

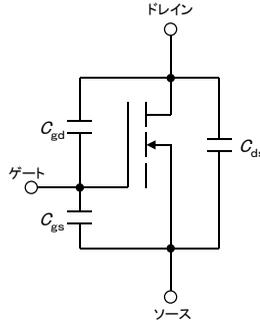


図 2・2・5 電極間容量の等価回路

■参考文献

- 1) 電気学会高性能高機能パワーデバイス・パワーIC 調査専門委員会編：“パワーデバイス・パワーIC ハンドブック,” pp.144-147, コロナ社, 1996.
- 2) 山崎 浩：“パワーMOSFETの応用技術,” pp.65-67, 日刊工業新聞社, 1988.
- 3) L. Lorenz, G. Deboy, A. Knapp, M. Marz：“COOLMOSTM-a new milestone in high voltage power MOS,” Proc. IEEE ISPSD'99, pp.3-10, May 1999.
- 4) J. Sakakibara, Y. Noda, T. Shibata, S. Nogami, T. Yamaoka, and H. Yamaguchi：“600V-class Super Junction MOSFET with High Aspect Ratio P/N Columns Structure,” Proc. IEEE ISPSD'08, pp.299-302, Jun 2008.
- 5) K. Sakamoto, M. Shiraishi, and T. Iwasaki：“Low on-resistance and low feedback-charge lateral power MOSFETs with multi-drain regions for high-efficient DC/DC converters,” Proc. IEEE ISPSD'02, pp.25-28, Jun. 2002.
- 6) M. Darvish, C. Yue, K. H. Lui, F. Giles, B. Chan, K. Chen, D. Pattanayak, Q. Chen, K. Terrill, and K. Owyang：“A new power W-gate trench MOSFET (WMOSFET) with high switching performance,” Proc. IEEE ISPSD'03, pp.24-27, Apr. 2003.
- 7) P. Goarin, G. E. J. Koops, R. van Dalen, C. L. Cam, and J. Saby：“Split-gate RESURF stepped oxide (RSO) MOSFET for 25V applications with record low gate-to-drain charge,” Proc. IEEE ISPSD'07, pp.61-64, May 2007.

3-2-3 ダイオード

(執筆者：大西高弘) [2009年12月 受領]

近年の環境保護の高まりから、パワー半導体デバイスの低損失化の要求は強まっており、ダイオードに対しての特性改善の取組みも行われている。本項では、近年のダイオード開発動向・商品化状況について説明する。

(1) Si 半導体

パワー半導体デバイスとしてのダイオードの種類には、大きくわけてショットキーバリアダイオードと、pn ダイオードの2種類がある。

ショットキーバリアダイオードは、金属を半導体表面に接触することで生じる整流作用を利用したものである。一般に順方向電圧は低く、逆回復時間が短く、高周波・高効率の整流に適するが、逆方向漏れ電流が大きいいため、100 V 以下の耐压の商品が主に使用されてきた。シヨ

ショットキーバリアダイオードの特性は、半導体表面に接触する金属の種類によって変わり、**図 2・3・1** に示す例のように、順方向電圧 V_F と逆方向漏れ電流 I_R に相関がある。Ti, V, Cr, Mo などが従来バリア金属として使用されてきたが、近年逆方向漏れ電流を小さくできる Pd や Pt をバリア金属として使用することで、100~200 V 程度の耐圧でも実用可能なレベルの商品がでるようになってきている。

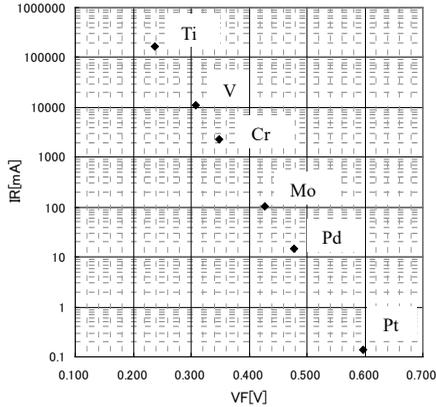


図 2・3・1 ショットキーバリアダイオード（バリア金属の違いによる特性比較例）

ショットキーバリアダイオードの順方向と逆方向漏れ電流の相関を崩し、特性改善を実現するための構造検討は過去から多くされてきている¹⁾²⁾。近年 Trench MOS Schottky 構造³⁾の商品が開発され使用されている。この構造を図 2・3・2 に示すが、MOS 構造により逆方向漏れ電流を阻止することで、順方向と逆方向漏れ電流の相関を改善することに成功している。

pn ダイオードはショットキーバリアダイオードと比較して順方向電圧、逆回復時間の特性は劣るものの逆方向漏れ電流が小さいため、200 V、600 V、1200 V といったより高い耐圧の商品に多く使用されている。pn ダイオードの逆回復時間を短くするために Au、Pt といった重金属を拡散することが長年行われてきたが、電子線照射や He イオンの打ち込みにより逆回復特性を改善した商品も開発されている。ショットキーバリアダイオードと同様、特性改善を実現するために様々な構造が検討されており、実際に色々な構造が実用化されている¹⁾²⁾。ここでは一例として、商品化が進んでいる部分的にショットキーバリアを持つ Merged P-i-n/Schottky (MPS) ダイオードの構造を図 2・3・3 に示す。

パワー半導体デバイスとしてのダイオードは、ショットキーバリアダイオード、pn ダイオード共に順方向電圧、逆回復時間、逆方向漏れ電流（+コスト）のバランスをとりながら、少しずつ特性改善を行ってきているのが現状である。

(2) ワイドギャップ半導体

パワー半導体の材料として長年 Si が使用されてきたが、Si に代わる材料を使用することで特性の大幅改善を狙う取組も行われている。特に Si のバンドギャップ 1.12 eV を大きく越えるバンドギャップを持つ材料のパワー半導体デバイスへの適用研究は盛んである。バンドギャップ

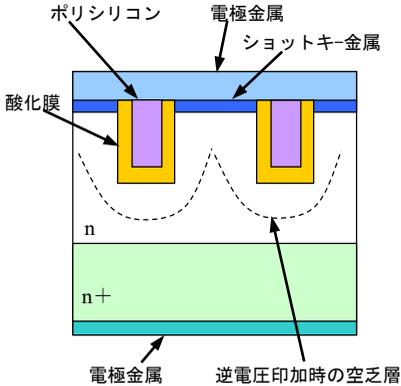


図 2・3・2 Trench MOS Schottky 構造

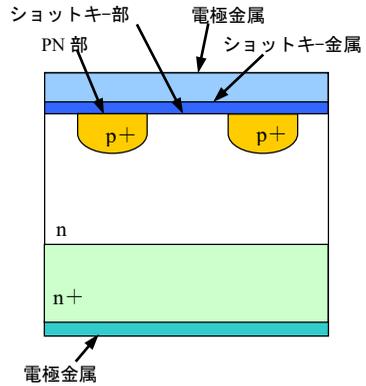


図 2・3・3 Merged P-i-n/Schottky 構造

プの大きいワイドギャップ半導体としては、ダイヤモンド、GaN、SiC が挙げられる。ダイヤモンドに関しては、非常に高い特性は期待できるもののみならず研究レベルであり実用化は遠いと思われるが、GaN と SiC に関しては本格的な実用化への取組みが行われている。GaN は Si などほかの基板上に GaN を成長させたタイプのショットキーバリアダイオードが、実用化に近いところまで来ている。600 V 程度の高耐圧で、逆回復時間が極めて短い物ができているが、ほかの基板上に GaN を成長させたタイプであるため、デバイス横方向にしか電流が流せず大電流化がやや難しい。現在、デバイス縦方向に電流が流せる構造が研究されている。SiC は既に 600 V、1200 V のショットキーバリアダイオードが商品化されており、PFC 回路などに使用されている。ワイドギャップ半導体の中では、パワー半導体デバイスとしての開発が最も進んでいると言える。商品化当初は一般的なショットキーバリアダイオードの構造であったが、電流サージ耐量向上の要求に対応して、MPS 構造をとるものが出てきている。

■参考文献

- 1) 電気学会高性能高機能パワーデバイス・パワーIC 調査専門委員会編：“パワーデバイス・パワーIC ハンドブック,” コロナ社, pp.81-108, 1996.
- 2) 菅井昭彦, 疋田耕一, 山崎みや：“ダイオードの技術動向,” 平成 17 年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp.68-73, 2005.
- 3) M. Mehrotra and B.J. Baliga : “The Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) Rectifier,” IEDM, p.675, 1993.

3-2-4 その他のパワー半導体デバイス

■8 群-5 編-3 章

3-3 磁性部品

3-3-1 フェライト材料

(執筆著：安原克志) [2010年5月受領]

フェライトは鉄を主成分とする酸化物系磁性材料の総称である。磁心材料として用いられるソフトフェライトの多くは $M^{2+}Fe^{3+}_2O_4$ (M^{2+} : 2 価金属イオン) で表されるスピネル型である。スピネル型フェライトの単位格子は、32 個の酸素イオン O^{2-} が面心立方格子を形成し、4 個の O^{2-} イオンが構成する四面体位置の 8 個 (A 格子点) と、6 個の O^{2-} イオンが構成する八面体位置の 16 個 (B 格子点) に分布した陽イオンからなる。

図 3・1 にスピネル構造の模式図を示す。2 価金属イオン M^{2+} が A 格子点に分布するものを正スピネル型、 M^{2+} が B 格子点に分布するものを逆スピネル型と呼んでいる。 Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} は逆スピネル型、 Zn^{2+} は正スピネル型である。 Mn^{2+} の場合には、その中間の状態になることが知られている¹⁾。フェライトは酸素イオン O^{2-} の 2p 電子を介した超交換相互作用により、A 格子と B 格子の磁気モーメントが反平行になり、その差分が自発磁化として現れる (フェリ磁性)。一方、金属系磁性材料は個々の磁気モーメントが同一方向に揃って、強い自発磁化が発生する (フェロ磁性)。一般にフェリ磁性はすべての磁気モーメントが揃うフェロ磁性に比べて自発磁化が小さい。

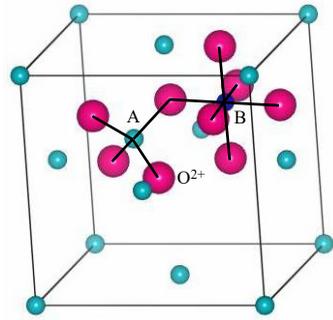


図 3・1 スピネル構造

数 kHz 以下の低い動作周波数の電源用磁心には飽和磁束密度の大きい金属系磁性材料が用いられることが多いが、電気抵抗が小さいために高周波数領域で駆動するスイッチング電源では渦電流損失が大きくなり使用できない。フェライトは電気抵抗が大きく高周波数におけるコアロスが小さいため、スイッチング電源用磁心に適している。とりわけ MnZn フェライトはほかのフェライトと比べて磁気異方性が小さく自発磁化が大きいという特徴があり、低損失で飽和磁束密度が大きいことからスイッチング電源用に適している。MnZn フェライトよりも電気抵抗が高く、高周波特性に優れた NiZn フェライトは主にコイル、パワーインダクタやノイズ対策用として使用されている。

スイッチング電源には様々な回路方式があるが、部品点数が少なくシンプルな回路のフライバック方式が最も一般的に使われている。フライバックトランスやチョークコイルの場合は磁気飽和が小型化の障害となるため、飽和磁束密度 B_s の高い材料が求められる。フェライトの $T[K]$ における飽和磁束密度 $B_{s(T)}$ は $B_{s(T)} = B_{s(0)}(\rho/\rho_t)\{1 - (T/T_c)^n\}$ で近似することができる。ここで $B_{s(0)}$ は 0 K における飽和磁束密度、 ρ は試料の密度、 ρ_t は理論密度、 T_c はキュリー温度、 n は定数である。自発磁化の大きい MnZn フェライトにキュリー温度の高い Ni フェライトを適量固溶させた MnNiZn フェライトは、高温高 B_s 材料として有望である。

コアロス P_{cv} はヒステリシス損失 P_{hv} 、渦電流損失 P_{ev} 及び残留損失 P_{rv} に分離することが

できる。ヒステリシス損失は直流 $B-H$ 曲線の面積と周波数 f の積 $\oint H \, dB \times f$ である。 f の 2 乗に比例する損失成分を渦電流損失と呼んでいる。図 3・2 に MnZn フェライトの 1 周期当たりのコアロスと周波数の関係を示す。コアロスは低周波域ではヒステリシス損失 Ph_v と渦電流損失 Pev の和で表されるが、およそ 500 kHz 以上の高周波域では f の 3 乗以上の項である残留損失が現れる。MnZn 系フェライトは 500 kHz 以下の周波数で使用されることが多いが、結晶粒子の微細化や磁気異方性の制御により、1 MHz 以上の周波数領域におけるコアロスの低減が図られている。動作周波数が 3~5 MHz を超えると共鳴周波数の高い NiZn フェライトが有利となり、MnZn フェライトと NiZn フェライトのコアロスは逆転する。

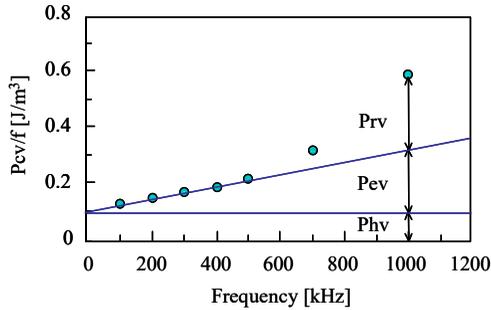


図 3・2 P_{cv}/f の周波数依存性

一般に MnZn フェライトの初透磁率 μ_i は磁気異方性定数 K_1 の符号が変わる $K_1 = 0$ の温度でセカンダリーピークと呼ばれる極大が現れる²⁾。ヒステリシス損失はセカンダリーピーク温度 T_{sp} で極小となるため、コアロスは谷型の温度依存性を示す。セカンダリーピーク温度 T_{sp} は基本組成、微量添加物や焼成条件により制御することが可能である。特に Fe^{2+} 及び Co^{2+} は K_1 を正に増加させて初透磁率やコアロスの温度特性の変化に大きく寄与する³⁾。実用上はコアロスが負の温度係数を示す極小温度付近でトランスを動作させて、トランスの温度上昇と熱暴走を防止する。図 3・3 に MnZn フェライトのコアロス P_{cv} の温度特性を示す。これまでは 100°C 付近

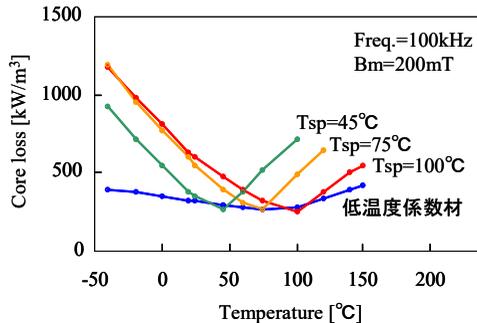


図 3・3 コアロスの温度特性

にコアロスの極小値を持つフェライト材料が多く用いられてきたが、近年は様々な動作環境温度の用途に対応するため、コアロスの極小温度が異なるフェライト材料が開発されている。更に車載用 DC-DC コンバータのように動作温度が大きく変化する用途も増えており、 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲でコアロスを低減したフェライト材料が開発されている⁴⁾。

材料特性を最大限に活かすためにはコア形状も重要である。コア形状は角脚の EE 形、丸脚の EER 形、中脚が長円形の EPC 形や PQ, LP 形などの多くのバリエーションがあり、小型、低背、面実装 (SMD) に対応している。また、小型の電源モジュールには Board-Mounted Power (BMP) と呼ばれる技術が採用されている。BMP とは多層基板にプリント配線で巻線を形成し、基板に設けられた孔にコアを装着するだけで電源回路上にトランスやチョークコイルを形成する技術である。BMP には低背型の E, PQ, RM, ER コアなどが使用されている。

■参考文献

- 1) 近角聡信：“強磁性体の物理(上),” 葦葉房, pp.215-216, 1978.
- 2) K. Ohta：“Magnetocrystalline Anisotropy and Magnetic Permeability of Mn-Zn-Fe Ferrites,” J. Phys. Soc. Jpn, vol.186, pp.685-690, 1963.
- 3) 藤田 明, 後藤聡志：“MnZn フェライトの鉄損温度依存性に及ぼす CoO 置換効果,” 日本応用磁気学会誌, vol.26, pp.471-474, 2002.
- 4) 高川建弥, 村瀬 琢, 瀬在勇司, 渡辺雅彦, 安原克志：“コアロスの温度依存性を低減した MnZn フェライト,” 日本電子材料技術協会会報, vol.35, pp.13-16, 2004.

3-3-2 薄膜インダクタ・トランス

(執筆著者：佐藤敏郎) [2010年5月 受領]

小型・薄型を特徴とする薄膜インダクタ・トランスはコイル巻数と磁心断面積を大きくとれず、また、動作磁束密度も磁心の飽和磁束密度で制限されるので、磁束鎖交数を大きく設定できない。したがって、磁束を媒介にした電力変換においては、磁束鎖交数の不足を補うために、MHz 以上の高周波で利用される場合が多い。

(1) 薄膜インダクタ・トランスの基本構造

図 3・4 は薄膜インダクタの基本構造を示すものであり、内部コイル導体を外鉄磁心で挟み込む外鉄-内部コイル型、内鉄磁心を外部コイル導体で挟み込む内鉄-外部コイル型に大別される¹⁾。薄膜トランスの基本構造も図 3・4 と同様であるが、1 次-2 次巻線間の磁気結合を高くするための巻線レイアウトの工夫が必要となる²⁾。

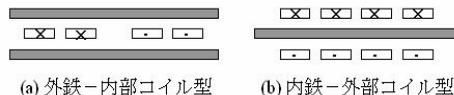


図 3・4 薄膜インダクタの基本構造

薄膜インダクタ・トランスの磁気回路は扁平な構造であるため、分布定数回路のように振る舞う³⁾。外鉄-内部コイル型においては、ある基準位置から x だけ離れた位置における上下磁心の面内主磁束は $e^{-x/\lambda}$ で減衰する。 λ は特性長と呼ばれ、 μ_s を磁心の比透磁率、 t_m を磁心の厚さ、 g を上下磁心間のエアギャップ長とすると、 λ は $[\mu_s g t_m / 2]^{1/2}$ で表される。外鉄-内部コイル型

においてスパイラルコイルを用いる場合は、図 3・5 に示すように、隣接導体間の磁束の結合を強くするため、導体間スペーシング s を特性長さよりも十分に小さくする。また、コイル端部からの磁心のオーバーハング H を特性長さの 3 倍程度にすることで、磁心端部の磁束は十分に減衰し、外界への漏れ磁束はほとんど無視できる。外鉄-内部コイル型は外部への漏れ磁束が少なく、単位面積当たりのインダクタンスを大きくとれる利点があり、部品を高密度に実装して構成される小型電源に対しては近傍配線や部品に対する EMI を抑制できるとともに、インダクタ占有面積を小さくできる。

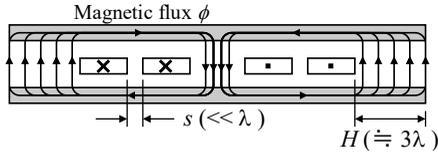


図 3・5 外鉄-内部コイル型における概略設計

(2) 薄膜インダクタ・トランスとオンボード DC-DC コンバータへの適用例

薄膜インダクタ用磁心材料には飽和磁束密度が高い、高周波鉄損（特に、うず電流損）が小さいなどの諸特性が求められる。これらに加えて、薄膜トランス用磁心材料には高い透磁率が求められる。図 3・6 は、高い飽和磁束密度（1.7 T）と $1 \mu\Omega\text{m}$ の電気抵抗率を持つヘテロアモルファス FeCoBC 膜と AlN_x 膜からなる積層磁心を用いた外鉄-内部コイル型薄膜インダクタのインダクタンス、 Q の周波数特性を示したものである⁴⁾。同図には、うず電流損の抑制に有効な高い電気抵抗率（ $3 \mu\Omega\text{m}$ ）を持つナノ結晶 FeCoBN 膜と AlN_x 膜を積層した薄膜磁心を用いた場合も示してある。両者とも、磁性体のトータル厚さは $6 \mu\text{m}$ である。うず電流損の小さいナノ結晶 FeCoBN/AlN_x 積層磁心を用いたインダクタは、MHz 帯でのインダクタンスの低下が小さいだけでなく、高い Q を示す。

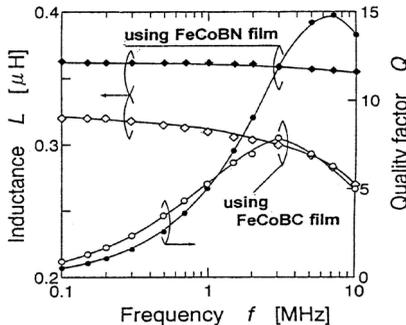


図 3・6 FeCoBC/AlN_x ならびに FeCoBN/AlN_x 積層磁心薄膜インダクタの特性⁴⁾

図 3・7 は、FeCoBC/AlN_x 積層薄膜磁心インダクタを用いた携帯電話送信電力増幅器用 5 MHz スイッチング昇圧 DC-DC コンバータの外観写真を示すものである。スイッチング周波数 5 MHz、

3.6 V 入力 -4.7 V・3 W 出力で約 80 %の効率が得られている⁵⁾。

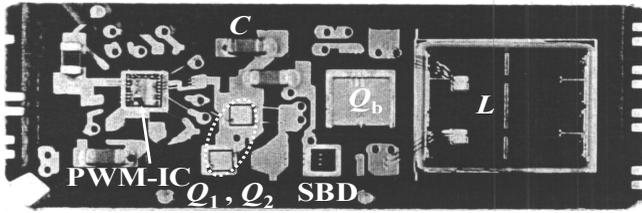


図 3・7 FeCoBC/AINx 積層磁心薄膜インダクタを搭載した 5 MHz スイッチング昇圧 DC-DC コンバータ⁵⁾

(3) オンチップインダクタの最近のトピックス

最近のトピックスとして、LSI 上部に集積したオンチップインダクタの試作例を紹介する。

図 3・8 は、PWM 制御 IC と MOS-FET スイッチをワンチップ化したコンバータ IC 上部に外鉄-内部コイル構造を有する CoZrTa アモルファス磁性薄膜インダクタをモノリシックに集積したワンチップ電源の外観を示すものである。スイッチング周波数 1.8 MHz、4 V 入力 -3 V・1 W 出力で効率 83 %を実現している⁶⁾。また、4つの空心オンチップインダクタを 90 nm プロセス CMOS-LSI 上に集積した 233 MHz スイッチング四相降圧 DC-DC コンバータが試作されている⁷⁾。

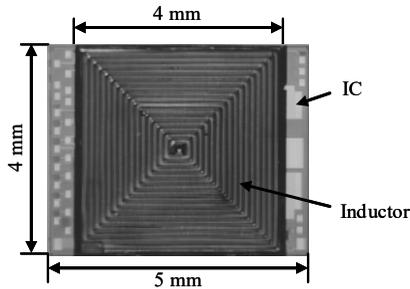


図 3・8 薄膜インダクタを集積したワンチップ降圧 DC-DC コンバータ⁶⁾

薄膜インダクタ・トランスの最大の利点は、LSI との集積化にあり、今後、活発に研究開発が進められていくであろう。その場合、主回路部品であるインダクタ・トランスからの漏れ磁束は回路内で EMI 発生源となるため、磁性膜はインダクタンスの増大だけでなく、磁束をシールドして局所的な EMI を抑制する重要な役割も果たすものと考えられる。

■参考文献

- 1) 白江公輔, 荒井賢一, 島田 寛(編著): “マイクロ磁気デバイスのすべて,” 工業調査会, 1992.
- 2) 横山裕範, 佐藤敏郎, 山沢清人, 小林 茂, 戸谷一美, 南沢俊孝: “Mn-Zn フェライトを用いた積層型トランスにおける巻線構造に関する検討.” 日本応用磁気学会誌, vol.23, no.4-2, pp.1645-1648, 1999.
- 3) 佐藤敏郎, 溝口徹彦, 佐橋政司: “マイクロ磁気素子のシミュレーション,” 日本応用磁気学会誌, vol.17, no.3, pp.661-666, 1993.

- 4) T. Sato, K. Yamasawa, H. Tomita, T. Inoue, T. Mizoguchi : "FeCoBN magnetic thin film inductor for MHz switching micro DC-DC converters," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol.121-D, no.1, pp.84-89, 2001.
- 5) T. Sato, T. Inoue, H. Tomita, S. Yatabe, K. Nishijima, Y. Tokai, M. Nameki, N. Saito, T. Mizoguchi : "5MHz switching micro dc-dc converter using planar inductor," INTELEC'96, pp.485-490, 1996.
- 6) H. Nakazawa, M. Edo, Y. Katayama, M. Gekinozu, S. Sugahara, Z. Hayashi, K. Kuroki, E. Yonezawa, K. Matsuzaki : "Micro-DC/DC Converter that Integrates Planar Inductor on Power IC," IEEE Trans. Magn., vol.36, no.5, pp.3518-3520, 2000.
- 7) P. Hazucha, G. Schrom, J. Hahn, B. A. Bloechel, P. Hack, G. E. Dermer, S. Narendra, D. Gardner, T. Karnik, V. De, S. Borkar : "A 233-MHz 80%-87% Efficient four-phase DC-DC converter utilizing air-core inductors on package," IEEE J. Solid-State Circuit, vol.40, no.4, pp.838-845, 2005.

■8 群-5 編-3 章

3-4 誘電体部品

3-4-1 コンデンサ

(執筆: 桑田賢一, 白田俊一) [2010年1月 受領]

(1) コンデンサの基本原則

コンデンサとは、バッテリーや電気化学キャパシタなどと同様に、電気を蓄えるための電子部品である。コンデンサはその内部インピーダンスの低さから、蓄えた電荷を比較的短時間で放出することができるため、電圧の安定化や電気信号中のノイズを除去することに用いられる。コンデンサの基本構造として、図 4・1 に示すような平行平板コンデンサについて考える。



図 4・1 平行平板コンデンサの基本構造

平行平板コンデンサは、2 枚の導体電極板を向かい合わせにして、その電極間に誘電体という絶縁体を挟んだだけの、とてもシンプルな構造である。このときコンデンサに蓄えられる、単位電圧当たりの電荷量を静電容量 C といい、式 (4・1) のように表せる。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (4 \cdot 1)$$

ただし、真空中の誘電率は $\epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12}$ である。

このように、コンデンサの静電容量は、電極の面積 S や誘電体の比誘電率 ϵ_r が大きく、電極間距離 (誘電体の厚さ) d が小さいほど増えることとなる。電極や誘電体の種類・構造により特性が大きく変化するため、それぞれの特徴を理解し、コンデンサを適材適所に配置することが大切である。

(2) コンデンサの用途

(a) エネルギー蓄積用

コンデンサの基本機能は電荷を蓄えることと、蓄えた電荷を極めて短い時間に放電することで、この機能を使った代表例としてカメラのストロボがある。ほかにもスポット溶接機やレーザ溶接機など、ミリ秒単位の時間に数百～数千アンペア [A] の大電流を必要とする装置や、最近では瞬間停電用バックアップ電源でも多くは大容量のコンデンサが使われている。

(b) フィルタ・平滑用途

コンデンサは直流電流に対して最大の抵抗値 (ほぼ絶縁状態) を示し、交流に対しては一定の法則に従って抵抗値が増減する性質があり、直流と交流を分離するための回路に使われる。例えば電源ユニットの内部では整流回路で作った直流電圧に残っている交流成分などは、コンデンサを介してアース電位につなぐことで減衰している。

使用される分野や製品の分類、回路の目的、視点が違えば、用途名が平滑用、DC フィルタ、阻止用、バイパス用、デカップリング用などと変わるが、コンデンサの“直流と交流を分ける”という基本機能を利用している点はどれも同じである。

(c) 共振（同調・発振）用途

コイルとコンデンサを直列につなぐと、特定の周波数において電圧が変化する。これが「LC 共振」の原理で、この LC 共振は様々な発振回路に用いられており、ラジオや TV のチューナなどの同調回路、オシレータなどに用いられている。

(d) 移相用・調相用

交流電力は電圧と電流が（理想的な正弦波で）完全同期している場合に初めて 100%有効に利用できるものであるが、実際には電圧と電流の位相が微妙にずれていたり、波形が歪んでいたりすることが多々ある。そのため、変電所から送電線に電力を送り出すには送電線の調相が必要になり、交流モータを駆動するのにもトルク特性を改善するために移相制御が必要になる。

コイルやコンデンサの素子を通る電流は、素子に加わる電圧に対して位相が 90° 遅れる、あるいは進むという性質があり、これを電圧・電流の位相調整に利用することで力率を改善できる。

(3) 代表的なコンデンサの特徴、近況

(a) セラミックコンデンサ

セラミックの誘電体を電極で挟み、両端に実装用端子を設けた構造である。最近では薄膜状にしたセラミックと電極とを何百層も重ねた積層セラミックコンデンサ (MLCC) が多用される。

セラミックの特性により高精度小容量のもの、小型大容量のもの、温度特性を改善したものなど、多様化してきている。高周波数特性が良く、小型化、量産性に優れる。

(b) フィルムコンデンサ

プラスチックフィルムの誘電体にアルミなどを蒸着して（金属箔の場合もある）電極とし、外部引出し電極を設けた構造である。誘電体フィルムには、ポリエステル、ポリスチレン、ポリプロピレン、テフロンなどがある。

大容量のものは少ないがフィルムの厚みや構造などを自由に設計できるので、高耐圧のものが造りやすい。テフロンを除き、一般に熱に弱い。積層タイプと巻回タイプがあり、積層タイプは周波数特性に優れる。アナログ回路や車両電源 (1500 V) の DC フィルタによく使われる。

(c) アルミ電解コンデンサ

主にエッチングで表面積を広げたアルミ箔表面に電気分解（陽極酸化）により薄い酸化皮膜を形成して誘電体とする構造である。陰極箔とセパレータ（紙）に染み込ませた電解液が電極となる。電解液を蒸発・漏液させないためにゴム栓とアルミケースで密封してある。

小型で大容量のものが作れるが逆極性・過電圧に弱い。時間とともにわずかに電解液が蒸発し電解液が減るため寿命は有限である。容量単価が安く電源平滑用途で主流であることもあり、高容量でかつ高温長寿命品の開発が盛んである。

(d) 導電性アルミ電解コンデンサ

アルミ電解コンデンサとほぼ同じ構造だが、液体の電解質を固体の導電性高分子に置き換えた。また、セパレータや陰極箔を用いず電解質から直接カーボンや銀で電極を引き出し、外装を樹脂製としたチップ形もある。

アルミ電解コンデンサのように液体を使わないので、蒸発が起きず、長寿命。周波数特性が良く、インピーダンスが低いので、電源平滑用などに用いた場合、リップル低減効果や高速応答性に優れる。

(4) キャパシタの電気回路での主な役割

図4・2はPFC（Power Factor Control）付フォワードコンバータの回路構成を示している。各部に様々なコンデンサが使用されており、ここではそれぞれのコンデンサの役割について説明する。

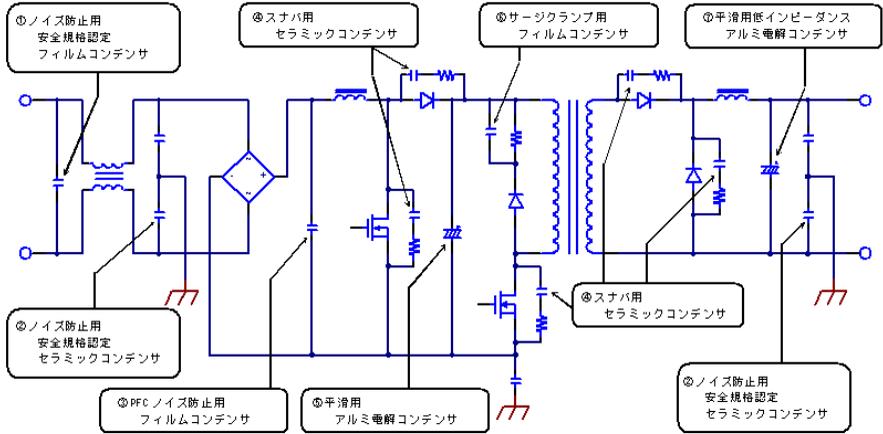


図4・2 PFC（Power Factor Control）付フォワードコンバータの回路構成

- ① ノイズ防止用フィルムコンデンサ：AC入力間のノーマルモードノイズの低減を目的とするコンデンサ。
- ② ノイズ防止用セラミックコンデンサ：スイッチング動作により発生したノイズはトランスを介してコモンモードノイズとなる。ここでのコンデンサはコモンモードノイズの低減を目的としている。
- ③ PFCノイズ防止用フィルムコンデンサ：ここで使用するコンデンサはPFC回路のスイッチング動作により発生する高周波リップル電流を吸収し、電源の入力側にノイズを伝えないようにすることを目的とする。高周波領域において低インピーダンスの特性を有するコンデンサが求められる。
- ④ スナバ用セラミックコンデンサ：スイッチング素子や高速整流ダイオードのサージ電圧を緩和することを目的とするコンデンサ。発熱部品の近傍に実装されることが多いため耐熱性が要求される。
- ⑤ 平滑用アルミ電解コンデンサ：PFC回路からの充電電流とフォワードコンバータへの放電電流が流れるため、高周波領域において低インピーダンスの特性を有するコンデンサが求められる。
- ⑥ サージクランプ用フィルムコンデンサ：トランスのリーケージインダクタンスにより発生するサージ電圧を吸収することを目的とするコンデンサ。

- ⑦ 平滑用低インピーダンスアルミ電解コンデンサ：出力電圧を平滑化することを目的とし、リップル電圧を低減するコンデンサ。大容量かつ高周波領域においてインピーダンスの低いアルミ電解コンデンサが要求される。

3-4-2 圧電トランス