

Title	電力用半導体素子の低温動作
Author(s)	村上, 吉繁
Citation	大阪大学低温センターだより. 1989, 68, p. 5-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11342
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

電力用半導体素子の低温動作

工学部 村上 吉繁 (吹田5242)

1. まえがき

これまでマイクロ(情報)エレクトロニクスの分野ではデバイスの高集積化と高速化の要請から集積回路の開発が進み超LSIが実現し1メガから4メガビットラム(RAM)の記憶装置も数ミリ角のチップとなり、数十ナノ秒の速度でデータの出し入れができるようになっている。

一方パワーエレクトロニクスは電力制御のエレクトロニクスであり、エアコンなどの小型モータの制御から電車や鉄鋼圧延の大型モータの制御など電力応用のあらゆる分野で広く貢献している技術である。しかしこれ迄パワーエレクトロニクスの高集積化と高速化はそれほど進んでいない。その理由は次のように考えられる。

マイクロエレクトロニクスでは情報が対象であるから、それを処理する電力と損失の両方をできる限り小さくすれば集積化を図ることができる。しかし、パワーエレクトロニクスでは、電流×電圧=電力は制御の対象として与えられる量であるから、それを処理する損失を小さくして小型化を図るしかない。

いずれにしてもマイクロエレクトロニクス、パワーエレクトロニクスの両者を通じて、高集積化と高速化は大きな目標である。その一方法として低温に於ける半導体の良好な特性を利用することと超伝導トランジスタの研究が行われてきた。特に最近の数年間に研究の量と質の進歩が顕著でありLow Temperature Electronics(1)の領域が確立しようとしている。以下では筆者がこれまで検討してきた低温パワーエレクトロニクスのための電力用半導体素子(1)について述べたい。

2. 半導体デバイスの極低温特性

2.1 キャリヤ密度

半導体の電流の担い手(キャリア)となる電子と正孔(ホール)は、低温に於いてはボルツマン分布をしていない。そこで、伝導帯と価電子帯の電子とホールの濃度は、両帯域の軌道をそれぞれ電子とホールが占める確率を求めて計算しなければならない。この確率はフェルミ順位の関数として表される。フェルミ順位は、不純物として半導体に加えられるドナーとアクセプタがイオン化する確率を考慮して電荷の中性条件から求められる。

このようにしてドナー(濃度 N_D)またはアクセプタ(濃度 N_A)を加えられたSi半導体中の多数キャリアの濃度を10k~300kについて求めた。その結果を図1に示す。300kに対して80kまでは多数キャリア密度は一桁の減少にとどまっているが、80k以下では急激に減少する。また少数キャリアは多数キャリアに比べて温度低下の影響が強く300kに対して200kでの密度は10桁ほど低くなる事が分かった。

半導体デバイスには少数キャリアの拡散を基本とするP-N接合構造のバイポーラ型と多数キャリアの電界による移動を基本とするユニポーラ型の二種類がある。前者は低温で少数キャリア濃度が格段に低下することから低温では良好な動作が望み難い。

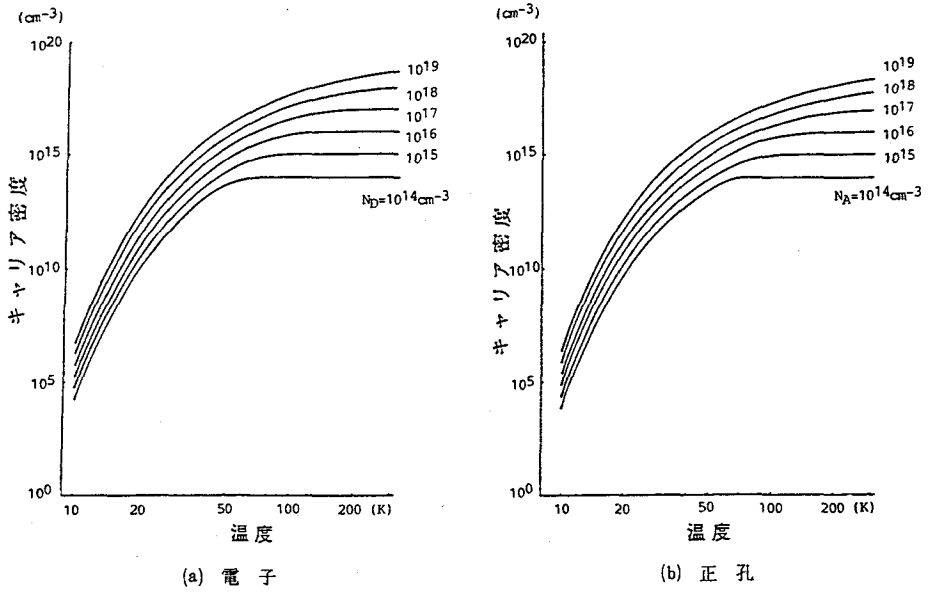


図1 Si半導体中のキャリア密度

2.2 移動度

キャリアの移動度は、格子振動（フォノン）による散乱とイオン化不純物による散乱を始めその他の散乱機構に依存している。これらの散乱要素について理論的に精細な研究が行われているが、実際にはこれらの散乱機構が複雑に関係するため理論と実験とを突き合わせて移動度を実験式で表現している。図2はSi半導体中のキャリア移動度の実験式による計算の一例で温度の低下とともに移動度は上昇している。

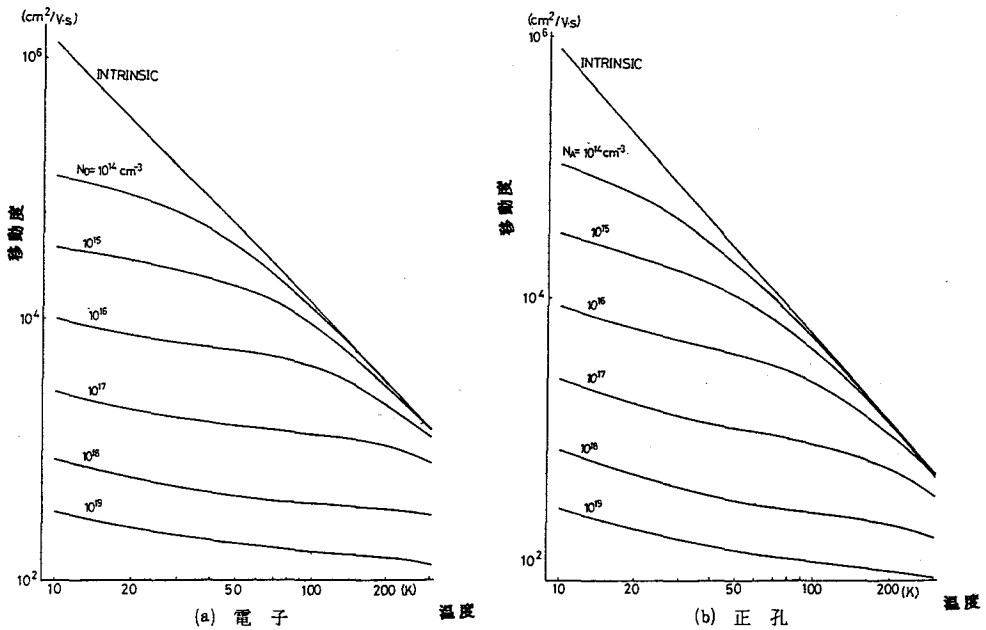


図2 Si半導体中のキャリア移動度（バルク）の温度依存性

3. パワー-MOSFETの低温特性

キャリア密度は低温に於いて低下するが多数キャリア密度は80Kの低温に於いても常温に於ける密度の1/10以内にとどまっている。さらに移動度は80K程度までは温度低下にともない増加する。したがって多数キャリアのデバイス(MOSFET)ではキャリアの電界による移動を制御してスイッチ動作を行うので低温特性が向上すると考えられる。

図3は集積化されたSi半導体パワー-MOS型FET(Nチャンネル)の構造を示したものである。ソースS(-)とドレインD(+)間に電圧(V_{ds})を加えてゲート(G)と基板間に電圧(V_{gs} 、ゲート+)を与えると絶縁層(SiO_2)を経て与えられる電界によりチャンネルに(-)のキャリア(電子)が基板の中から引き寄せられる。これによってドレインとソース間にドレイン電流(I_d)が流れる。図4にゲート電圧 V_{gs} によって I_d が制御される特性を示す。実験結果はシミュレーションの結果ともよく一致している。

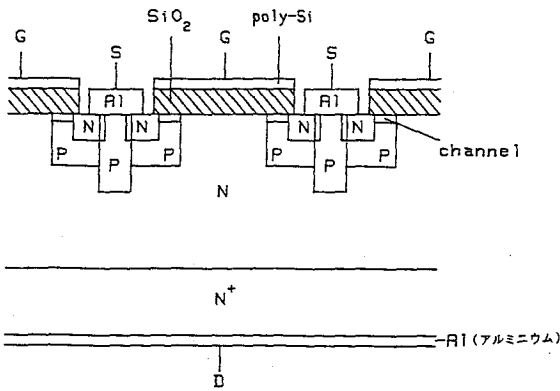


図3 縦形MOSFETの構造

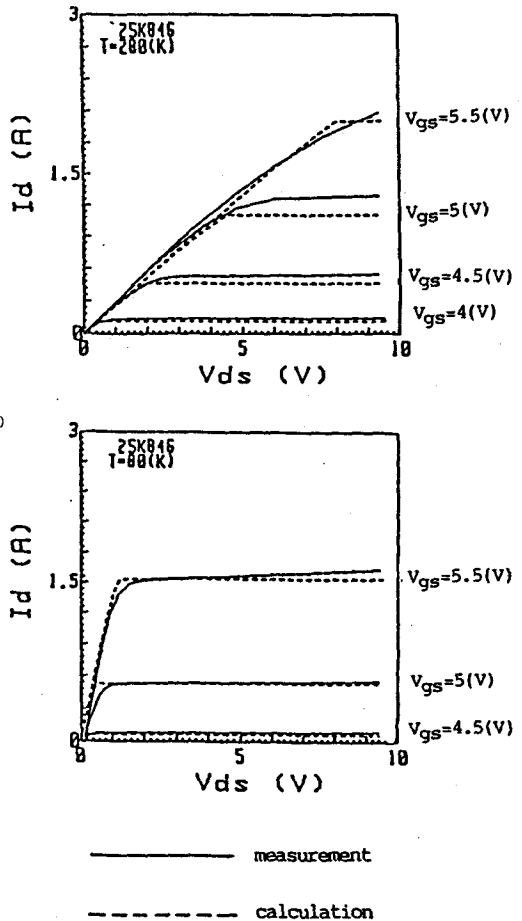


図4 MOSFET 2SK846出力特性計算結果

常温(280K)の特性と低温特性(80K)とを比較すると、 $V_{gs} = 5.5V$ について導通状態に於けるオン電圧(V_{ds})が低温に於いてきわめて小さい。このことはスイッチ損失が低減されることを示唆している。実際繰り返しスイッチングに於ける平均電力損失を測定すると低周波から 10^4 Hzまで80Kに於ける損失は常温の1/4程度になっている事を図5に示している。80K以下ではキャリア密度が低くなりすぎて(キャリアの凍結) 十分な特性は得られない。

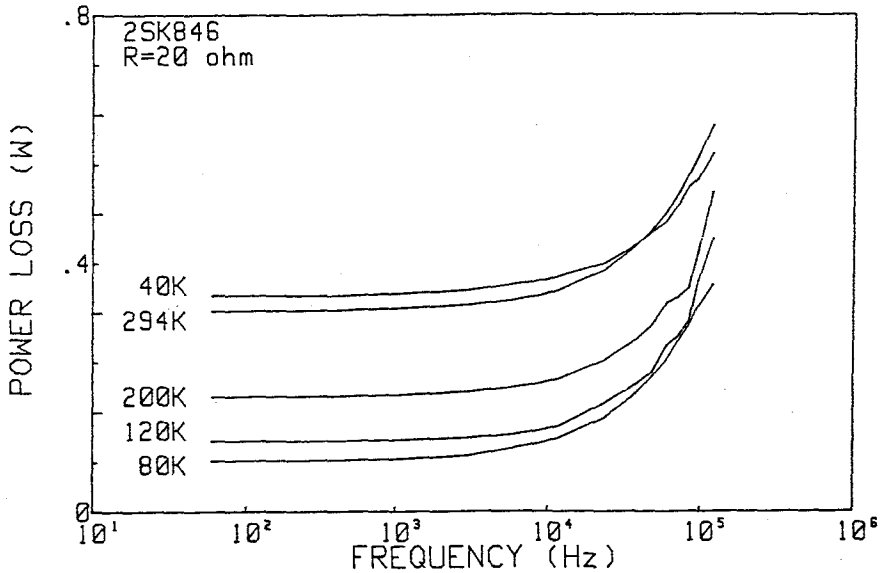


図5 Si半導体MOSFET平均消費電力

パワーエレクトロニクスは低周波数領域の電圧と電流の制御に活用される。この制御はパワーデバイスのオン・オフのスイッチ動作によって行われるので、スイッチ周波数の帯域は最高10kHzが目安である。例えば直流電源からパワーデバイスのスイッチ動作により正負の極性の電圧のパルス列を取り出すことができる。その際に、パルス周波数を10kHzとし、そのパルス幅を60Hzの正弦波の振幅に比例するように変調しておけば、これを低周波フィルタに通して60Hzの正弦波を忠実に発生できる。

バイポーラデバイスでは、少数キャリアの拡散によって電流の流れが制御されるので、低温に於ける少数キャリアの著しい低下のため電流は流れなくなり使えない。

4. 低温パワーエレクトロニクスへの期待

これまで超伝導工学実験センターに於いて電力蓄積の研究を続けてきた。その中でマグネットクライオスタートへの熱侵入はすべて電流リードによる熱伝導による事が分かった。そこで電力変換装置も極低温の環境下で運転して装置の全体を低温の閉じたシステムとすればヘリウムの蒸発がなくなる。このような動機で低温パワーエレクトロニクスを追求してきた。

さらに3年前に窒素温度の超伝導が可能となった。3. で述べたように半導体デバイスは窒素温度で最も優れた特性を示すから高温超伝導によって極低温の閉じたシステムの構成が一層魅力を増してきた。このことは超伝導と半導体の接合デバイスの開発にも適用される。

実験センターが本年度で時限を終了して新たに超伝導エレクトロニクス研究センターとして新設され、低温パワーエレクトロニクスの研究を継続して成果をあげることが願っている。

文献

- (1) Proceedings of the symposium on LOW TEMPERATURE ELECTRONICS AND HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS (1988)

お知らせ

・低温センターだより編集委員の一部交代について

退任 片岡俊彦氏(工学部精密工学科)

新任 遠藤勝義氏(工学部精密工学科)