

グリーンナノ企画特集＜第 19 回＞

高度電力化社会実現の キーテクノロジー SiC パワーデバイスへの挑戦

ローム株式会社研究開発本部 神澤公氏と中村孝氏に聞く



1. はじめに

地球環境問題に関連したエネルギー問題が重視されている。資源エネルギー庁が 2005 年作成した「超長期エネルギー技術ビジョン」で 2050 年までに温室効果ガスを半減させるためには、最終エネルギーの電力化率を現在の 20% から 50% に引き上げ、高度電力化を実現する必要があるとしている。ここで電力エネルギーの供給効率を高めることが必須とされ、パワーエレクトロニクスがその鍵の一つを握っている。

経済産業省が 2008 年 3 月に発表した「Cool Earth エネルギー革新技術計画」では、掲げられた 21 項目の重要技術のなかにパワーエレクトロニクスが選定され、分野横断の基盤技術として位置づけられている。パワーエレクトロニクスは発電・送電・産業・運輸・民生機器の各分野に適用され省エネルギー効果を実現するものであり、その進歩・普及の鍵を握るのがパワーデバイスである。特に SiC パワーデバイスに対する期待は高い。

一方、Si 集積回路は、集積度が一定の割合で増加し続けるとする Moore の法則に沿った形で継続的に微細化が進んで来たが、ナノテクノロジー領域に入って微細化の限界が議論され、More than Moore と称してアプリケーションに向けた新しい技術分野等の開拓が追求されるようになってきた。SiC（シリコンカーバイド）パワーデバイスもその目標の一つである。

今回、SiC パワーデバイス開発で世界を先導しているローム株式会社を訪問し、研究開発本部 神澤公（かみさわ あきら）副本部長ご同席も得て、新材料デバイス研究開発センター 中村孝（なかむら たかし）センター長に、SiC パワーデバイスについてのお話を伺った。

（取材日：2009 年 12 月 9 日）

2. SiC パワーデバイスへの期待

2.1 SiC 開発の経緯

はじめに神澤副本部長よりロームの SiC パワーデバイスについての取り組みの概要がビデオを含めて紹介された。「地球環境・エネルギー供給・金融危機に対処するグリーンニューディール政策（2008 年 7 月 米国 NEF（New Economic Foundation）が提言、国際連合環境計画（UNEP）による採用）公表以後の諸外国の動きを見るにつけ、日本の積極的対応の必要性を痛感している」「ロームの研究開発は、京都大学等の大学との共同研究や自動車メーカー等の他企業と共同開発を積極的に進めることに特徴がある。現在 SiC ショットキーバリアダイオード（以下 SBD）の国内初の量産化および SiC DMOS（Double-diffused MOS）FET の世界初の量産体制整備、トレンチ型 MOSFET で最先端の 1200A/cm² の実現などの成果を挙げており、この分野を積極的に開拓して行く。」などロームの意欲的な姿勢が語られた。

続いて、中村氏からロームの SiC 研究開発の経緯に始まり、技術展開、その戦略等について詳細な話を聞いた。「ロームは高耐圧のパワーデバイスについては初めから SiC で参入し、Si を使わなかった。そもそも、20 年位前に SiC に目をつけ、当時はよい結晶がなかったので 1990 年に Si 基板上にヘテロエピタキシャル成長で SiC 結晶を得ることを試みている。2～3 年で中断したが、SiC の 1～2 インチの良い結晶が使えるようになったので 2000 年から再開した。当時はまだ、省エネルギーの狙いはあったものの、具体的市場ニーズも立ち上がっておらず、ものになるか心配であったが、その後の地球環境問題のクローズアップに伴い、研究開発・実用化も地に足が着いてきた。現在海外メーカーも積極的に SBD は既に商品レベルに達しているが、主役となる MOSFET に関しては課題も多く、サンプル評価段階のものが一部に出だしている程度である。ロームはここで先行して行きたいと考えている。」とのこと。

表 1 SiC の特性上の特徴

特性項目	優位性
エネルギーバンドギャップ	Si比 3倍
絶縁破壊強度	Si比 10倍
熱伝導率	Si比 3倍

2.2 SiC の特徴とその期待される効果

SiC は Si とダイヤモンドの中間の性質を持ち、硬くて脆く加工も困難である。しかしワイドギャップ半導体であり表 1 のような特長を持つ。絶縁破壊強度が Si に比べ 10 倍高いのでデバイスとして同じ耐圧なら電極間の距離を 1/10 にできる。従って、オン抵抗を下げ、電力損失を大きく減らすことができる。SBD で導通時の蓄積電荷も少なくできるのでスイッチング時の電力損失も減らし、また、高速動作が可能となる。

更に、エネルギーバンドギャップが広いため高温動作に適している。Si では 175℃ が動作上限だが、SiC では 400℃ の動作が可能で、pn 接合は 1000℃ でもその性質を失わないという論文もある。その適用効果の例としてインバータ^(注)に適用した場合を図 1 に示す。

Si の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を用いたものに比べて電力損失を大幅削減すると同時に、高周

(注) インバータ: 直流電力を交流電力に変換する装置。産業用、家電用、電池駆動の自動車等に広く使われる。

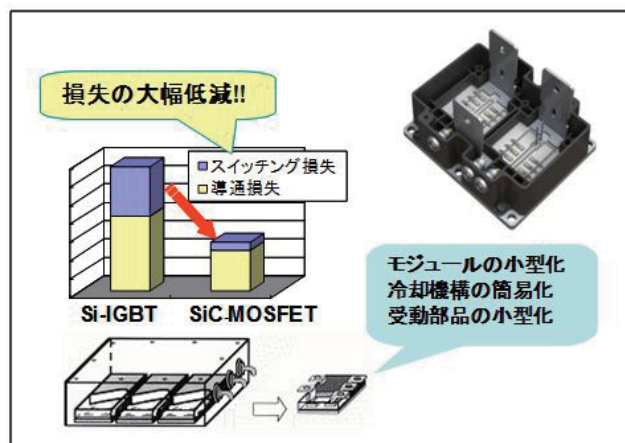


図 1 SiC MOSFET のインバータへの適用効果（提供：ローム）

波化による受動部品の小型化効果もありモジュールの小型化が実現し、更に冷却機構の簡易化という特徴も発揮される。

なお、SiC パワーデバイスの普及による省エネルギー効果について資源エネルギー庁発表の「省エネルギー技術戦略 2007」では図 2 の予測をしている [1]。

2.3 応用分野による要求性能の違いとロームの狙い

図 3 はパワーデバイスの応用分野を定格電圧と定格電流を縦横の軸として示したものである。パワーデバイスは全般的に電圧が高い応用分野に対応しているが、その中でもアプリケーションに対応して、高耐圧用、中耐圧用、低耐圧用とデバイス要求仕様が大きく異なる。

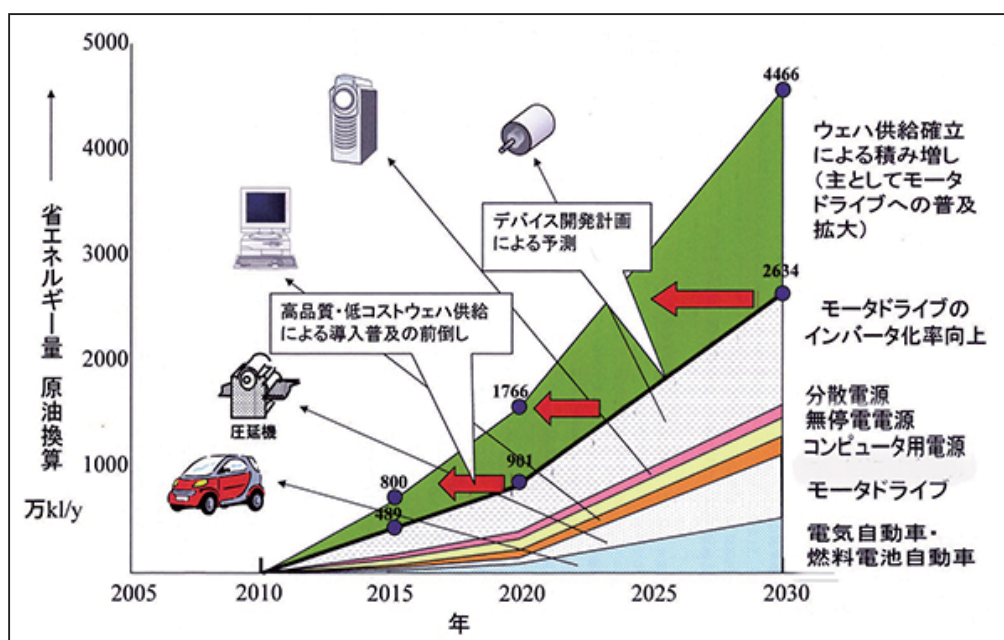


図 2 省エネデバイスの導入効果（出典：参考文献 [1]）

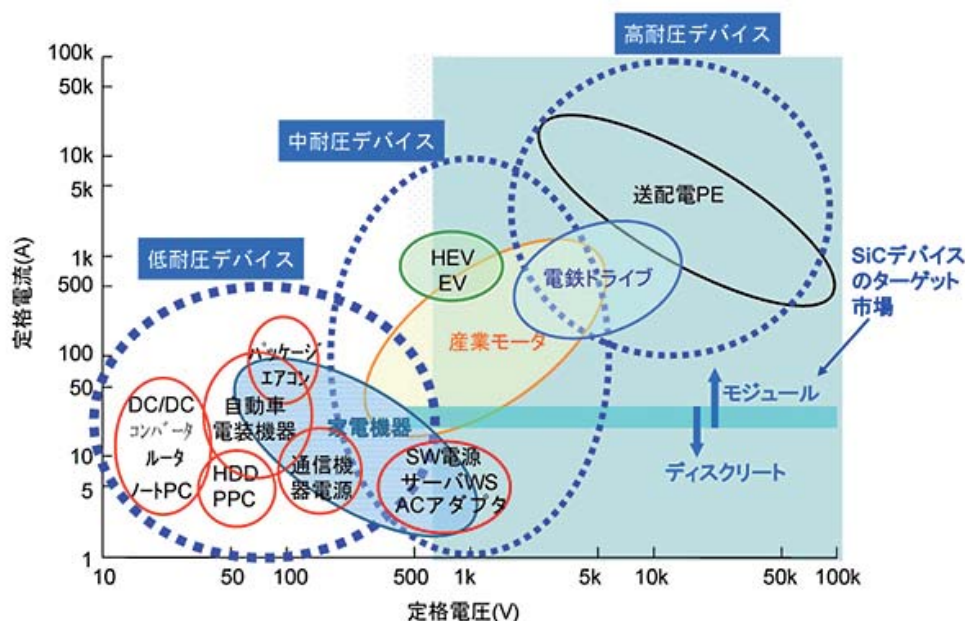


図3 パワーデバイスの応用分野（提供：ローム）

例えば、ハイブリッド・電気自動車(HEV, EV)用インバータの場合、電流が大きいと損失が増大し、また安全性の問題も発生するので電圧を高めたいが、高過ぎるとスパークが発生するのでサイズを大きくする必要がある。そのバランスで耐圧 600V となっている。1,200V の話もあるがそれ以上にはならない。

SiC が特に効果を発揮するのは定格電圧 500 ～ 600V 以上の領域であり、それ以下の領域は Si でも対応可能である。例えば Si の場合、仮に 1,200V の耐圧を得るためには電極間の距離（これは基板をドレインとし垂直方向に電流を流すパワーデバイスではエピタキシャルで形成される活性層の厚さに相当）を離すために 100 μ m のエピタキシャル層を形成する必要がある。或いは耐圧の低いデバイスを何段も直列に繋いで耐圧を稼ぐことになる。SiC では、絶縁破壊強度が大きいのでエピタキシャル層の厚さは、9 ～ 10 μ m でよく、もし 100 μ m のエピタキシャル層を積み重ねれば 10kV の耐圧が可能となる。なお、それ以上の耐圧については Si で IGBT が使われたように SiC でも新しい技術が必要とのこと。

「ロームとしては当面は 600V から 1,200V の中耐圧領域を狙っている。さらにその先の高耐圧領域に進むためには、大電流化が必要である。中耐圧の自動車用でも 600A が要求されており、大電流化が課題である。電流を大きくする手段は、オン抵抗を小さくして電流密度を高めることと、面積を大きくすることである。しかし、面積を大きくすると結晶欠陥に当たる確率が増し、歩留まりが指数関数的に低下する。現在 10A 位であればかなり良品がとれるが、50 ～ 100A になると難しくなってくる。電流の大きい用途には複数チップをモジュールにして対応しているが、できるだけデバイス当たりの電流を増や

すことが望まれている。」と中村氏は語る。

3. SiC パワーデバイス実用技術確立へのステップ [2]

3.1 SiC パワーデバイス・モジュールの一貫した生産技術確立に向けて

ロームは従来デバイスを中心に事業を進めてきたが、SiC になると、結晶の改善や安定供給などの課題があり、またデバイスを高温・大電力で使用するためのパッケージングの課題もある。これらの技術と生産体制が揃わないと省エネを目指す市場にたいしてソリューションとなる製品提供ができない。この観点から図 4 に示すような技術開発の一貫体制を整えてきている。

結晶材料に関しては 2009 年に業界 2 位のドイツの SiCrystal 社に出資して系列化した。ウエハ加工、エピタキシャル成長、モジュール作成技術についてはそれぞれ大学等との共同研究や共同開発の成果を導入しつつ生産体制を構築している。その傍らデバイスやモジュール開発に関してユーザーである自動車企業との共同開発をするなど、総合的な技術開発を進めている。

3.2 SiC デバイス製造技術の前進

SiC パワーデバイスを実用化する上でのプロセスの課題は歩留まり向上である。SiC は融液にならないので Si のように融液からの結晶成長法は取れない。カーボン坩堝に入れた原料を 2400℃で昇華させ、上方に固定した種結晶上に析出させる昇華法を採る。成長速度は 3 日で 2cm

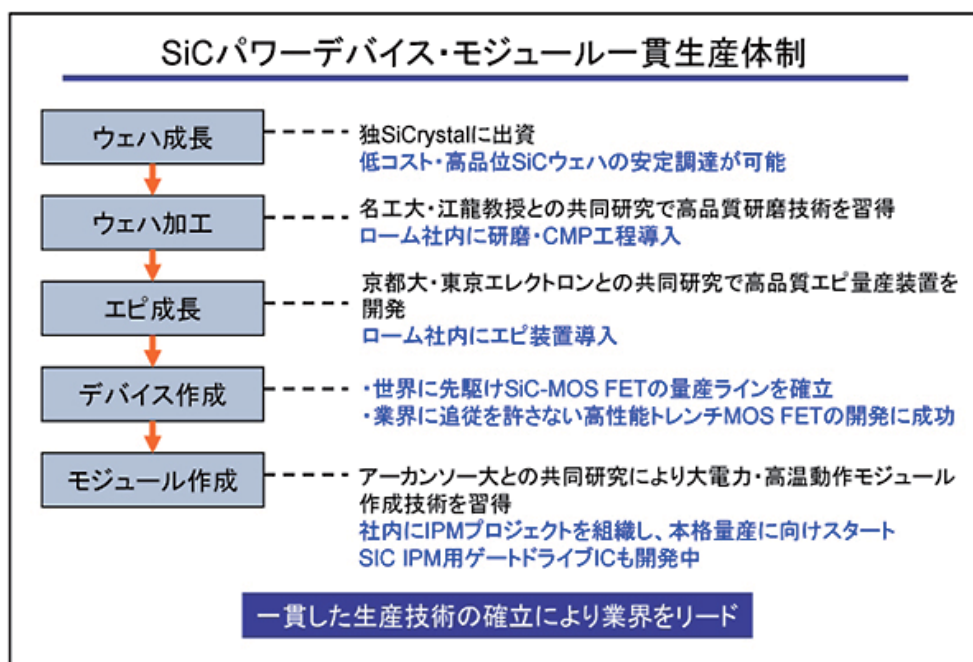


図4 SiC パワーデバイス・モジュールの一貫した体制での生産技術の開発（提供：ローム）

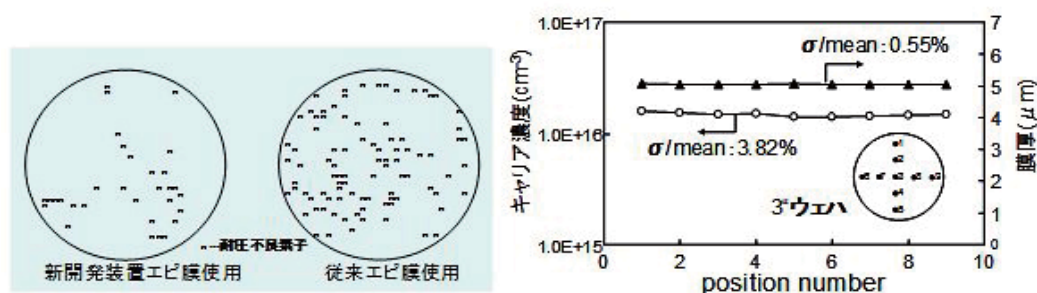


図5 新開発装置によるエピタキシャル膜の改善（提供：ローム）

の低速度である。昇華法では融液成長のような欠陥低減技術はまだ進んでおらず、マイクロパイプと言われる貫通孔もある。その上に CVD (Chemical Vapor Deposition) で形成するエピタキシャル層で発生する欠陥も存在する。当初この欠陥密度をデバイス歩留まりで評価すると 5 ～ 10 個 /cm² と評価された。この欠陥密度では、5 ～ 10A のデバイスであればチップ寸法が 1 ～ 2mm 角で 90% 程度の歩留まりが得られるが、車に乘せるような 100A ～ 200A のデバイスでは歩留まりが 10% 以下になってしまふ。

そこで 2005 年 4 月からエピタキシャル層の改良を目指して、京都大学と東京エレクトロン株式会社との 3 者による SiC 用エピタキシャル膜成長装置の開発を含む共同研究を実施した、その結果欠陥密度を 1 個 /cm² に低減できた。現在量産機を導入中である。図 5 (a) は 3 インチウェハ内の耐圧不良素子分布の試験結果例である。また、図 5 (b) に示すように良好な面内均一性が得られている。

膜の成長は 1600℃ 以上で行なうのでキャリア濃度ばらつきも大きくなりがちで、市販品の装置では 10 ～ 20% だが、それを 3% 位まで下げることができている [3]。

3.3 SiC パワーデバイス製品のニーズへの対応

こうした製造技術を駆使したデバイスとして、スイッチング用では DMOSFET、ダイオードでは SBD と HJD (Hetero-Junction Diode) の開発を進めてきた。2 年前に福岡の Si 半導体工場内に SiC 少量生産ラインを作り、Si の 6 インチラインを使って SiC の 3 インチウェハを流している。現在、信頼性を含む最終チェックの段階にあり、近々 DMOSFET と SBD の量産に入るとのこと。開発された各デバイスの特徴は次の通りである。

(1) SBD

SBD については他社も既に製品を出している。ローム

では技術はできていたが、MOSFET と同時にということ
で、今量産を開始しようとしている。600～1,200V の
耐圧で、電流 20A 以下のものをデバイス単体で、自動車
用や大電流な産業機器用の 70～100A のものをモジュ
ールとして提供する。図 6 は SiC SBD の構造とチップ写真
である。

SBD は導通時の電荷蓄積がほとんどないため Si の pn
接合ダイオード FRD (Fast Recovery Diode) に比べて、
リカバリー電流 (オン状態からオフ状態に移る際の逆方
向過渡電流) が極めて少ない。図 7 はリカバリー時の波
形を比較したもので、リカバリーに要する時間 t_{rr} と流
れる電荷 Q_{rr} (電力損失となる) が SiC SBD では大幅に低減
している。Si FRD では Q_{rr} が温度と共に大きく増えるので、
SBD による改善効果は一段と大きくなる。

SBD の問題点として、耐圧は高いがそれを超えるサー
ジ電圧に弱いことがある。SiC は異方性結晶であるため電
界が偏りやすい。これに対してガードリングを工夫する
など種々の電界集中をなくす努力をしてきた結果、他社
の $270\text{mJ}/\text{cm}^2$ に対して $1900\text{mJ}/\text{cm}^2$ まで耐性を高める
ことができたとのことである。これはノイズの大きい自
動車用に必要な条件である。同時に静電破壊耐性も大変
強くなっている。

(2) HJD

HJD は日産自動車からの提案に基づき共同開発したダ
イオードで、図 8 に示すように SBD の金属電極を Poly-Si
に替えた構造であり、p-poly Si と n-SiC のヘテロ接合を
ダイオードとして利用する。poly Si 電極は Si LSI のプロ
セスを用いて容易に作ることができ、また poly Si の不純
物濃度を変えることによって簡単に接合電位差を変えら
れるので、特徴あるデバイスを作ることができる。特性
は SBD とほぼ同じで耐破壊性の大きなデバイスが実現し
ている [4]。600A の大電流チップができ、燃料電池自動
車の走行試験に始めて適用された [5]。将来的にこの構造
を MOS FET にも適用するための開発を進めていることを
中村氏は明らかにした。

(3) DMOS FET

SiC MOS FET の開発で一番問題となるのはゲート酸化
膜である。Si と異なり、SiC の表面を酸化すると SiO_2 と
共に CO_2 ができる。 CO_2 は気化するが、 SiO_2 膜が成長し
て厚くなると、Si 表面で発生する CO_2 が抜け難くなる。
 SiO_2 膜内に $10^{18} \sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ もの C が残る場合もあり、
特性劣化をもたらす。数年前までは MOS FET は不可能で

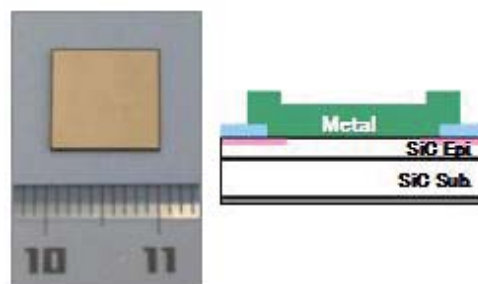


図 6 SiC SBD の構造とチップ写真 (提供: ローム)

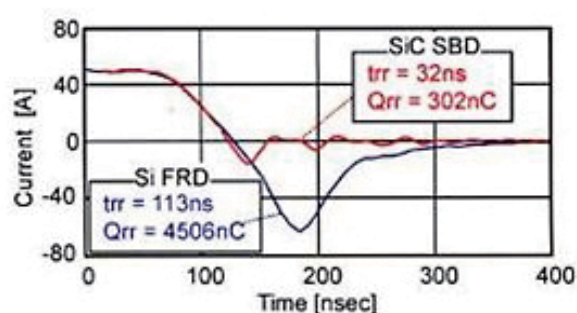


図 7 リカバリー電流の比較 (提供: ローム)

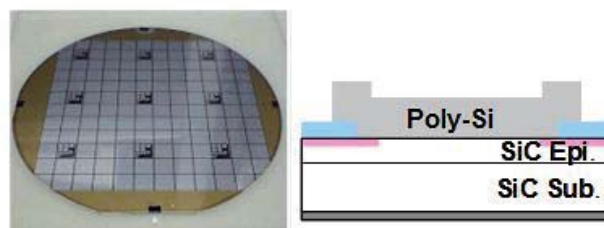


図 8 HJD の断面構造と搭載ウエハ (提供: ローム)

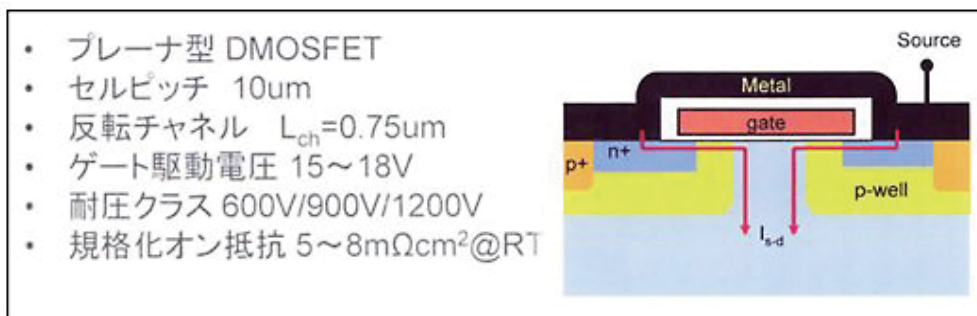


図 9 SiC DMOS FET の構造と諸元 (提供: ローム)

はないと言われ、MOS FET を諦め、接合形 FET に向かったメーカーもあった。しかし接合形 FET はノーマリーオン（ゲートに電圧を加えない時に導通状態）であり、安全を重視するユーザには受け入れられない。ロームはノーマリーオフを実現するため MOS FET の開発を続けた。最終的には電流 20A の製品を量産できるようになった。続いて自動車等の大電流用途向けに 40A の製品の試作評価をしている。図 9 に SiC DMOS の構造と諸元を示す。

Si の DMOS FET の場合はソースの n^+ 領域とチャンネルが形成される p-well 領域とを不純物の二重拡散で形成し、拡散距離の差によりチャンネル長が自己整合的に決まる構造になっている。SiC では不純物が拡散しないので、二つの領域をイオン注入で作る。従って、DMOS の D は Double diffusion ではなく Double implant ということになる。なお、二回のイオン注入を自己整合的に行なう工夫をしている。また、チップのデバイス構成は、小さい FET をセルとして $10\mu\text{m}$ ピッチで敷き詰めて並列接続し、一つの FET としている。

(4) SiC DMOS FET の特性評価

SiC DMOS FET の静特性、スイッチング特性ともに Si パワー MOS-FET と変わらない。違いはまずは 200°C で動作することである。さらに、図 10 に示すように、Si の

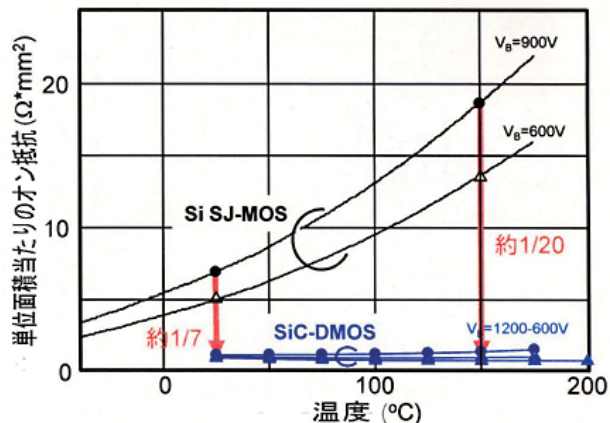


図 10 SiC MOSFET によるオン抵抗の改善（提供：ローム）

SJ-MOS FET（スーパージャンクション MOS FET：特に高耐圧で低オン抵抗を図った MOS FET）に比較しても圧倒的な低オン抵抗、即ち、低損失が実現する。

SiC DMOS FET の信頼性評価のため各種試作チップについて TDDDB（Time Dependent Dielectric Breakdown）測定を行なった。Si MOS の寿命は理論的にはゲートの絶縁膜を通過するトンネル電流の総量で決まる。SiC の場合もその理論に合った測定データが得られるようになったので、スクリーニングにより信頼性を保証できるようになった。推定寿命は 150°C 動作で 3000 年以上である。

3.4 更なる進化を目指して ---SiC トレンチ MOS FET [6]

次のステップとして、電流密度の向上を目指して SiC トレンチ MOS FET を開発している。図 11 の右に構造図を示す。左に示す DMOS FET と比較するとチャンネル部分が水平方向から垂直方向に変わっている。この構造では FET のサイズが縮小され、集積度を 4～5 倍増大できる。またオン抵抗が図 11 中央に示す様に DMOS FET に比較して大幅に改善される。

この構造の問題は耐圧を高めることとチャンネル長を短くしてチャンネル抵抗を減らすことが矛盾すること、Si でもこの構造での高耐圧デバイスが難しい。ロームは SiC の高い絶縁破壊強度を活かし、p-well の不純物濃度分布の工夫なども凝らして破壊耐圧 790V でオン抵抗 $1.7\text{m}\Omega\text{cm}^2$ を実現し 2007 年 12 月に発表した [7]。この単位面積当たりのオン抵抗は Si のパワー MOS に比較して 1 桁改善するものであり、世界一の値である。まだ、改善の余地があり $1.0\text{m}\Omega\text{cm}^2$ までは可能と中村氏は語る。

京都大学との共同研究の中で、結晶欠陥の低減が図られた結果、このトレンチ MOS FET で 4.8mm 角、300A の大電流チップが実現している [8]。電気自動車用、送電、鉄道などでは 600A 以上の電流容量が必要とされ、現在は Si で 200～300A 出力可能な 10mm 角以上のチップが用いられているが、これを低損失な SiC デバイスで置き換える見通しが出来たと言える。図 12 に試作チップの外観を示す。

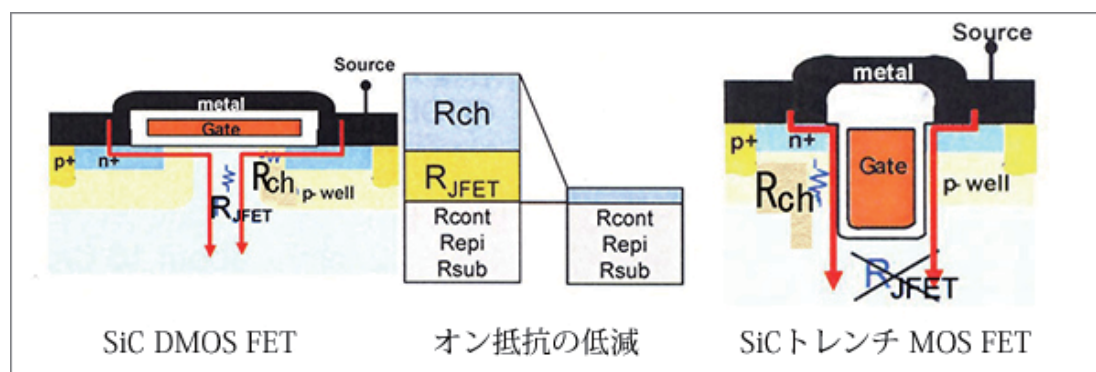


図 11 SiC トレンチ MOS FET の断面構造および DMOS FET と比較した抵抗低減効果（ローム提供図面より）

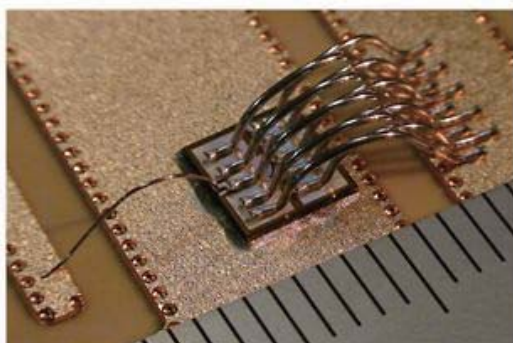


図 12 SiC トレンチ MOS FET チップの外観（提供：ローム）

4. アプリケーションへの対応

4.1 モジュールの開発の経緯

Si 用のモジュールは高温に使用できないので、SiC 用のモジュールの開発を進めている。以前から（株）本田技術研究所とモジュールの開発を行っており、2008 年には Si 用モジュール材料技術ではあるが 1200V/230A クラスの電気自動車向けのハイパワーインバータモジュールを SiC SBD、SiC MOS FET を用いて開発した。フル SiC の大電力モジュールは世界最初である（図 13）。3 相インバータ回路とコンバータ回路を搭載し、パワーモジュールとしてのスイッチング損失が従来の Si の場合と比較して 1/4 以下に減少していることを発表した [9]。

これ以降、ロームの独自技術で量産用の開発を進めてきた。その際課題として、スイッチング時に発生するサージ電圧への対策があった。駆動周波数を高めかつスイッチング損失を減らすとサージ電圧が大きくなる。これは EMI（Electromagnetic Interference 電磁気障害）ノイズの増加、デバイスの耐圧を過剰に設定する必要などの問題に繋がる。サージノイズの大きさとスイッチング損失は相反する特性となるが、寄生インダクタンスを極限ま

で減らす等の努力により同じサージ電圧の場合にスイッチング損失を 77% 低減することができた [10]。2009 年 10 月から 1200V/150A のモジュールのサンプル出荷を始めている。

4.2 高温動作モジュールの開発

これまでは Si デバイス用のモジュール材料技術を用いており、デバイスの接合温度を 150℃ に設定していた。接合温度を高くできればそれだけ電流密度が上げられる。SiC デバイスチップはそれが可能であるが、パッケージがもたない。そこで、高温で動作し得るモジュール作成技術の研究開発をアーカンソー大学、京都大学とロームの 3 者で行い、250℃ の高温動作可能な技術を開発した。特に高温に耐えないのは半田であり、それに替わる材料を開発している。この成果は 2008 年の CEATEC JAPAN（毎年秋開催のエレクトロニクス総合展）の展示での実験デモで公開している。また、米国サンディア研究所の太陽電池用インバータに採用されており、2009 年米国の R&D Magazine が選ぶ R&D100 のエレクトリックデバイス部門 3 件の一つに入った。

5. 今後の展開に向けての課題から

5.1 市場展開の目論見

「ロームは 2010 年この中耐圧領域で SiC MOS FET の量産の一番乗りを狙っている。SiC の発展のための問題は需要・供給の関係にある。」と中村氏は語る。「SiC のコストは現状高いが、量産すればまだまだ下がる。しかし値段の高い現状で市場が広がらないので、量産にならない。」革新技術がしばしば遭遇する壁であり、キラーアプリケーションの出現が望まれるところである。自動車の場合は一般に開発期間が長いので、現在ある製品が使われるのは 2014 年以降であり、その前に実績が必要とのこと。

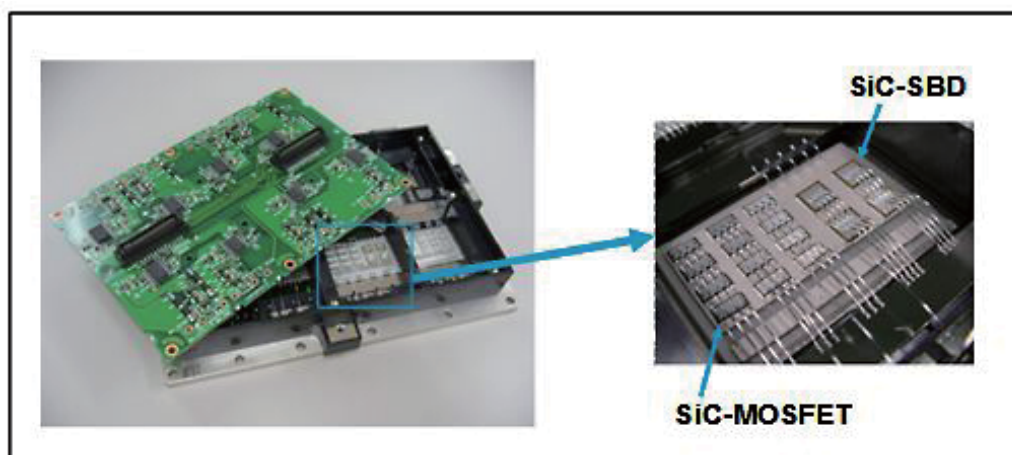


図 13 SiC デバイスによるインバータモジュール（提供：ローム）

ここで、急浮上してきたものに太陽発電用がある。SiC パワーモジュールとしては自動車用と同じ技術が適用できる。太陽発電の業界は、総合効率の向上にしのぎを削っており、少しでもインバータ損失を少なくするために SiC に対する引き合いが多くなっている。SiC の場合は最大負荷時の効率だけでなく、Si の IGBT では効率の下がる負荷の低い条件でも効率が下がらないメリットがある。

民生用はコストのハードルが高い。IH ヒータは高温・高耐圧でよい応用対象であるが、やはり価格が問題である。「いずれにしても、SiC 実用化にとって 2010 年が正念場と考えている。」と中村氏は語る。

5.2 結晶供給体制と結晶欠陥への対応

SiC パワーデバイスのコストに大きく影響するのは、ウエハ価格と歩留まりである。「ウエハ供給についてはこれまで米国の Cree 社の一社独占供給に近かった。2009 年 ロームはドイツの SiCrystal 社に出資して安定供給のめどをつけ、材料供給が不確かなためにデバイスの顧客を獲得出来ないという状況から脱却した。国内結晶メーカーも立ち上がりつつあり、中国も結晶開発に乗り出しており、業界が活性化している。現在はまだ、結晶欠陥は小さいものまで含めると数千〜一万個/cm² あるが、ここ 4〜5 年の技術の進歩は急速であり、今 4 インチのウエハも 2 年後位に 6 インチになると言うことで、結晶技術の進展に期待している」と神澤副本部長は語った。

ロームとしてはデバイスメーカーの立場から、エッチピットの種類とデバイス特性への影響を調べて結晶改良への指針を得ること、エピタキシャル層内で、発生する欠陥の低減やウエハの欠陥に基づく欠陥の形状を制御してデバイスへの影響を少なくするなどの努力をしている。

5.3 ナノテクノロジーへの期待

最後に SiC デバイスを開発する立場としてのナノテクノロジーへの期待を伺った。SiC MOS FET のサイズは例えばチャネル長 0.7 μ m 前後、エピタキシャル層厚は耐圧に対応するが 100V 当たり約 1 μ m、FET は 10 μ m 間隔のセルのアレーで形成されており、いずれもナノ領域のサイズではない。しかし Si LSI の技術を基盤としていながら SiC の材料に起因する新たな問題がまだ詳細が解明されずに山積している。例えば、結晶欠陥の構造の仔細な評価とデバイス特性への影響の分析、表面酸化膜形成時の膜中に残存する C の形態と酸化膜の品質 [11]、MOS FET 製造時のイオン注入後の 1800℃アニールに際し Si が離脱した後の表面状態等である [12]。ナノテクノロジーを含む評価技術の活用によりこれらの問題を解決することで、SiC デバイス技術を進化させ、完成度を高めることが必要と中村氏は語る。

6. むすび

SiC パワーデバイスを用いるパワーエレクトロニクスが、電力を使用する幅広い領域において電力供給や使用に際しての効率を高め大変有効な省エネルギー効果を発揮することについては、既に多くの予測がなされている。しかし、SiC という結晶材料を使いこなす製品化技術を量産レベルに高めることの難しさを改めて認識し、それを実行しているロームの力強さを実感した。

ロームでは大学と積極的に連携すると共に SiC パワーデバイスのユーザである企業との共同研究を行ない、且つ、実用化を見据えた戦略的開発体制を敷くことで、地に足の着いた具体的かつ着実なデバイス開発が進行している。「ロームはこの新しい領域開拓の先駆者となる」と中村氏は語る。これによりパワーエレクトロニクスの新しい市場が動き出し、多くの企業がこの分野に参画するようになり、SiC の結晶の需要も増加し、品質向上、価格の低減が実現することを期待している。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課, "省エネルギー技術戦略 2007 の策定について", (2007.4.23)
- [2] Takashi Nakamura, "SiC Schottky Diodes and MOSFETs for Automotive Applications", ICSCRM (Int. Conf. on SiC and Related Materials) 2009, (2009. 10)
- [3] 京都大学, 東京エレクトロン, ローム, "SiC エピタキシャル膜成長装置による量産技術確立に目処!", プレスリリース (2007.6.11)
- [4] ローム, "耐破壊性の大幅な改善により信頼性を大幅に向上! ロームと日産自動車が新構造 SiC ダイオードを共同開発!", プレスリリース (2008.4.25)
- [5] 日産自動車, "日産自動車, 世界で初めて SiC 素子を使用した車両用インバータを開発", プレスリリース (2008.9.5)
- [6] NAKANO Yuki, et al., "4H-SiC Trench Metal Oxide Semiconductor Transistors with Low On-Resistance", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 48, No. 4, Issue 2, p04C100 (2009.4.25)
- [7] ローム, "「トレンチ型 SiC MOS FET」, 「大面積 SiC SBD」チップを開発! 大電流フル SiC モジュール実現に向けて大きく前進!", プレスリリース (2007.12.20)
- [8] 京都大学, ローム, "世界初, 低抵抗 SiC トレンチ MOSFET の大幅な大容量化に成功! 単チップで 300A 駆動に成功し, 電力変換用 SiC モジュール実現へ大きく前進!", プレスリリース (2009.10.7)
- [9] ローム, "次世代の電気動力車向けにロームと本田技術研究所は共同で 新材料 SiC 半導体デバイスを搭載したハイパワーモジュールの開発に世界で初めて成功!", プレスリリース (2008.9.11)

[10] ローム, " ロームがサージノイズを大幅に低減した SiC パワーモジュールを開発, エンジニアリングサンプル供給開始 ", プレスリリース (2009.10.5)

[11] 桐野高史, 他 (大阪大 大学院), HARRIS James, 他 (原子力発電機構), 箕谷周平, 他 (ローム), "4H-SiC(0001) 面の熱酸化により形成した SiO₂/SiC 界面の放射光 XPS 評価 " 応用物理学会学術講演会講演予稿集 Vol. 70th, No. 1,

p385 (2009.9.08)

[12] 小園幸平, 他 (大阪大 大学院), 箕谷周平, 他 (ローム), " 導電性 AFM を用いた 4H-SiC 熱酸化膜の信頼性評価 ", 応用物理学会学術講演会講演予稿集 Vol. 56th, No. 1, p439 (2009.3.30)

(向井久和)