

【産業競争力懇談会 2008 年度推進テーマ報告】

グリーンパワーエレクトロニクス技術

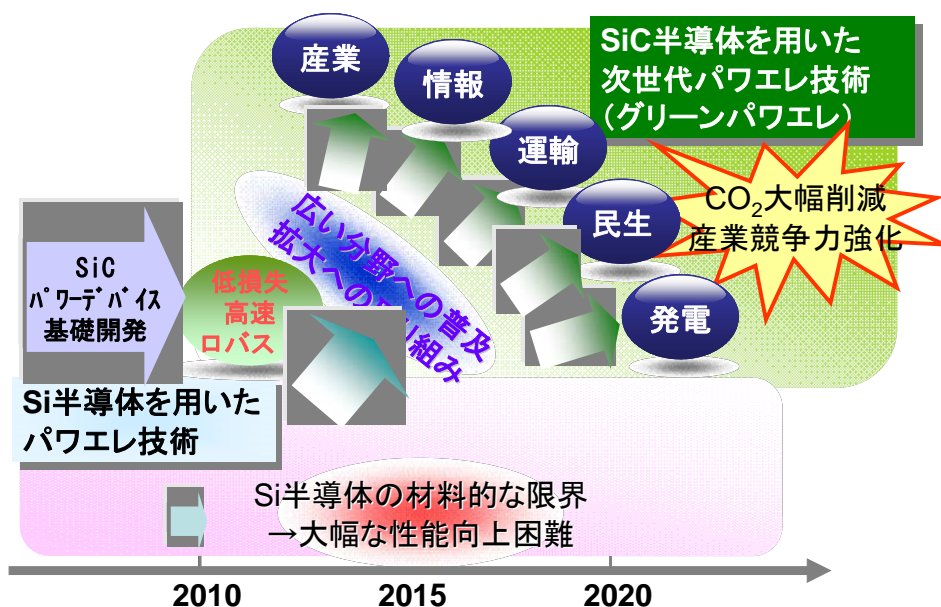
新材料 SiC 半導体により
パワーエレクトロニクス第二世代へ

2009年3月6日

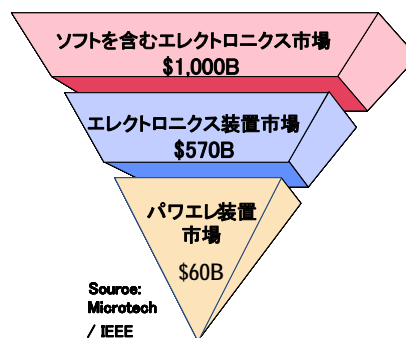
産業競争力懇談会 (COCN)

【エグゼクティブサマリー】

- 地球温暖化対策として CO₂ 削減が重要視されている。パワーエレクトロニクスは高効率な電力変換技術でこれまで省エネルギーに大きく寄与してきた。パワーエレクトロニクスはパワーデバイスの性能向上をドライビングフォースとして継続的に成長してきたが、近年 Si パワーデバイスが性能限界に近づきあり、Si パワーデバイスに換わる次世代デバイスである SiC パワーデバイスの実用化が切望されている。本プロジェクトでは SiC パワーデバイスを適用した次世代パワーエレクトロニクス（グリーンパワエレ）の普及、拡大に向けた提言を行う。

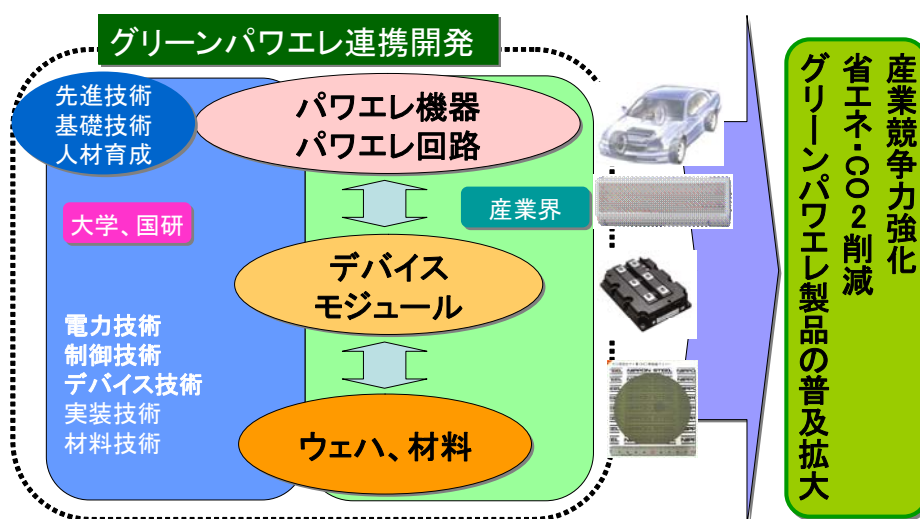


- パワーエレクトロニクスの市場規模は約 6 兆円で、産業、家電、分散電源、自動車、電鉄、IT 機器等広い分野に適用されている。これらの市場では、グリーンパワエレの特長である低損失化、小型化、高速化、高温環境対応への期待が大きい。グリーンパワエレ分野は、今後 CO₂ 削減対策に伴いその市場規模は増加すると予想され、2050 年にはグリーンパワエレが貢献できる耐圧が数百 V 以上のデバイス市場で約 10 兆円と、現在の約 10 倍に増

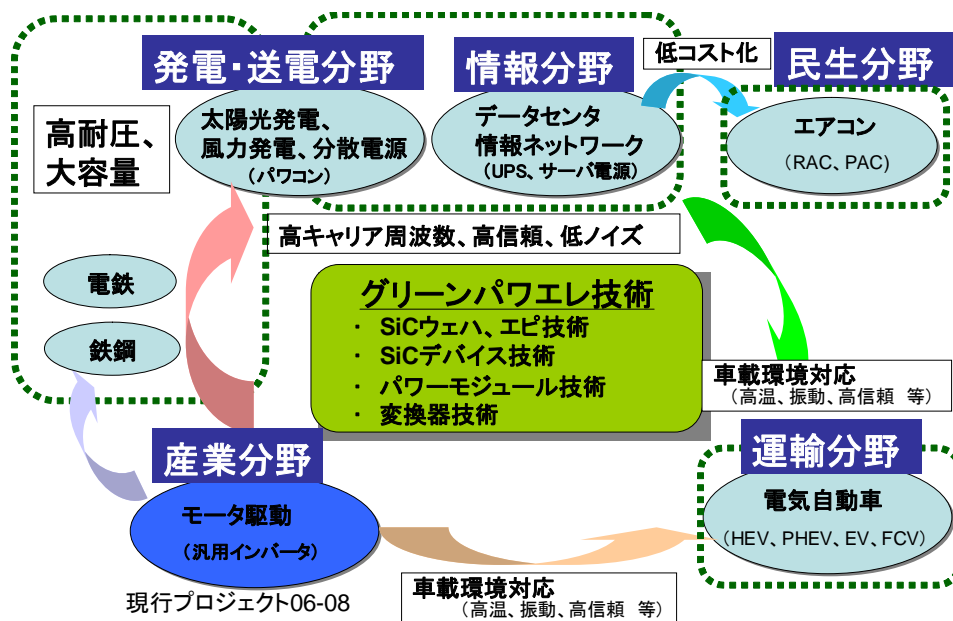


加するとの推定がなされている。グリーンパワエレが広く普及した際の省エネルギー効果は、汎用インバータの普及効果を含めた見積もりによると 2030 年には原油換算で約 5,300 万 kl、CO₂換算で 8,300 万 t と試算されており、大きな省エネルギー効果が期待される。

- グリーンパワエレの開発はこれまで国家プロジェクトの支援を受けて、SiC 基板、エピからデバイス、機器応用までの研究開発を進めてきた結果、SiC パワーデバイスの適用によるインバータ動作時の損失 70%減の実現や、次世代自動車への適用検討が始まるなど、世界トップレベルの技術を保有するに至っている。今後拡大することが予想されている世界市場で国際競争力の維持、強化のためには、現状技術レベルをさらに高めるとともに、現在市場拡大を阻害している要因を取り除くために、更なる取り組みが必要と考えられる。
- グリーンパワエレ普及拡大に向けた提言
 - ① SiC デバイスは単純に Si デバイスを置き換えるだけでなく、その低損失、高速動作、高温動作を最大限に活かすために、最適な駆動法、回路技術、実装技術、特徴を活かした新たな機器応用の創出等、デバイス、材料側からのアプローチでは困難な課題が多い、そこで応用機器メーカー、パワーエレクトロニクス機器ユーザを巻き込んだパワーエレクトロニクス連携開発が不可欠であり、今後推進すべきである。さらに大学、国研における先進技術研究、基礎技術開発、人材育成が今後のグリーンパワエレ技術開発の継続的発展の基盤になる。中長期をにらんだ重点的な取り組みが必要である。



- ② SiC 関連技術開発はこれまでモータ駆動応用を最初の展開先として進められてきた。グリーンパワエレを広く展開するために、情報機器用電源、再生可能エネルギー用パワーコンディショナー、エアコンなどの民生機器、さらにはハイブリッド自動車、電気自動車など、具体的なターゲットを想定した、デバイス、機器応用技術開発が重要である。一方、電鉄、鉄鋼といった基幹産業に向けた、高耐圧デバイスの開発は、市場規模をだけを考えると大きなものではなく、メーカー主導の開発が進みにくいことが憂慮される。しかし社会に及ぼす影響や、極限的な材料、デバイスの開発であること、さらに国内技術力向上につながり波及効果大きいことから、中長期にわたる課題として推進すべきである。



- ③ 量産対応 SiC パワーデバイス製造装置開発の遅れは、グリーンパワエレの早期実用化、普及拡大を阻害する要因と考えられる。そこで、従来の Si パワーデバイス製造装置では対応できない、高温処理が可能でかつ高スループットが実現できる SiC パワーデバイス特有工程用の製造装置技術開発をデバイス、応用機器開発と並行して推進することが必要と考えられる。
- ④ SiC 基板、エピはグリーンパワエレの基本となるものであり、普及拡大を左右する大きなテーマである。国内において現在量産適用可能な最低レベルである 4 インチ基板の供給が開始されている段階だが、品質、価格等課題は多い。グリーンパワエレの普及拡大を考え、デバイスの低コスト化に不可欠な 6 インチ

もしくはそれ以上の高品質かつ大口径基板や低コスト化に向けた新規基板加工法の開発を目的とした技術開発を提言する。合わせて今後 SiC 基板、材料に関する高品質、大口径、低コスト化の研究開発を促進する上で、人材育成、材料基礎研究の充実が望まれる。

- ⑤ 標準化は新しい技術、製品の普及には不可欠な課題であり、国内産業競争力を強化し、海外に拡大するためにも基板、各種評価方法、デバイス、機器まで幅広く、国際標準化でイニシアティブを取るような取り組みを要望する。

分野	技術課題	内容
SiCパワーデバイス・ パワエレ機器応用技術	低損失化 高耐圧化	具体的なパワエレ機器をターゲットとしたデバイス、機器応用技術開発
SiCパワーデバイス 製造装置技術	高温処理技術 高スループット	SiCパワーデバイス特有工程用の製造装置技術開発
SiCウェハ・ 材料技術	大口径化 低欠陥化 低コスト化	高品質SiCウェハ、エピ製造技術

【目次】

はじめに	1
1. パワーエレクトロニクス（パワエレ）技術の現状とグリーンパワエレへの期待	3
2. パワーエレクトロニクス開発動向	6
3. SiC開発現状	7
3-1 基板、エピ	7
3-2 デバイス	10
3-3 プロセス装置	12
3-4 応用装置	13
4. 市場動向と環境への貢献	14
4-1 産業分野	14
4-2 情報分野	14
4-3 民生分野	15
4-4 運輸分野	16
4-5 発電、送電分野	17
4-6 グリーンパワエレ技術の環境への貢献	18
4-7 グリーンパワエレ技術の市場規模	19
5. 普及への課題分析	19
5-1 デバイス	19
5-2 基板、エピ	19
5-3 標準化	21
6. 普及に向けた提言	22
6-1 パワーエレクトロニクス連携開発の推進	22
6-2 SiCパワーデバイス・パワエレ機器応用技術開発	24
6-3 SiCパワーデバイス製造装置技術開発	25
6-4 基板、エピ高品質、大口径、低コスト化への取り組み	25
6-5 標準化の推進	26

はじめに

国連の IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は 2007 年、“地球の温暖化はもはや疑う余地がない”との結論を出し、地球環境の異変が深刻化していることを明確にしている。我が国でも 2007 年、当時の安倍総理が「美しい星 50（クールアース 50）」を発表し、世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して 2050 年までに半減するという長期目標を提案した。さらに目標の実現には革新的技術の開発が必要として、2008 年には「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」が発表され、重点的に取り組むべき革新技術として「21」の技術を選定するとともに、その技術ロードマップを示している。

パワーエレクトロニクスはその中で部門横断の重要技術と位置づけられ、次世代デバイスとして SiC デバイスの実用化の必要性があげられている。これまでパワーエレクトロニクスでは長く Si デバイスを用いてきた。SiC パワーデバイスは数十年に一度の変革をパワーエレクトロニクスにもたらすものと期待されている。本提言では、次世代パワーデバイス、及びそれを用いた次世代パワーエレクトロニクスを地球環境への貢献を明確に示す意味で「グリーンパワエレ」と名づけた。グリーンパワエレの普及が省エネルギー、CO2 削減に貢献するとともに、国内パワーエレクトロニクス産業の競争力拡大に寄与するものと考えている。本提言を総合科学技術会議を始め、政府関係機関において、活用していただき、「美しい星 50（クールアース 50）」実現の一助となることを期待している。

2009年3月6日

産業競争力懇談会

会長（代表幹事）

野間口 有

【プロジェクトメンバー】

プロジェクトリーダー 三菱電機株式会社

デバイス、パワエレワーキング

三菱電機株式会社

株式会社日立製作所

富士電機デバイステクノロジー株式会社

株式会社東芝

財団法人 新機能素子研究開発協会

独立行政法人 産業技術総合研究所

基板、エピワーキング

新日本製鐵株式會社

三菱電機株式会社

1. パワーエレクトロニクス技術の現状とグリーンパワエレへの期待

近年、地球温暖化対策としてCO2削減が重要視されているとともに、最近では石油価格の高騰による燃料費の上昇が経済に及ぼす影響も問題となっている。クリーンな電力を利用し、直流から交流、交流から直流といった電力の変換を高効率に行うパワーエレクトロニクス機器は、省エネルギーに大きく寄与するため、地球温暖化問題やエネルギー問題を解決するための重要技術として注目されている。パワーエレクトロニクスのコア技術は、パワーデバイス、電力変換技術、制御技術、インテグレーション技術の4つであるが、市場からの小型化、高効率化、低コスト化、高信頼性ニーズに答えつつ、それぞれ進化発展してきた。

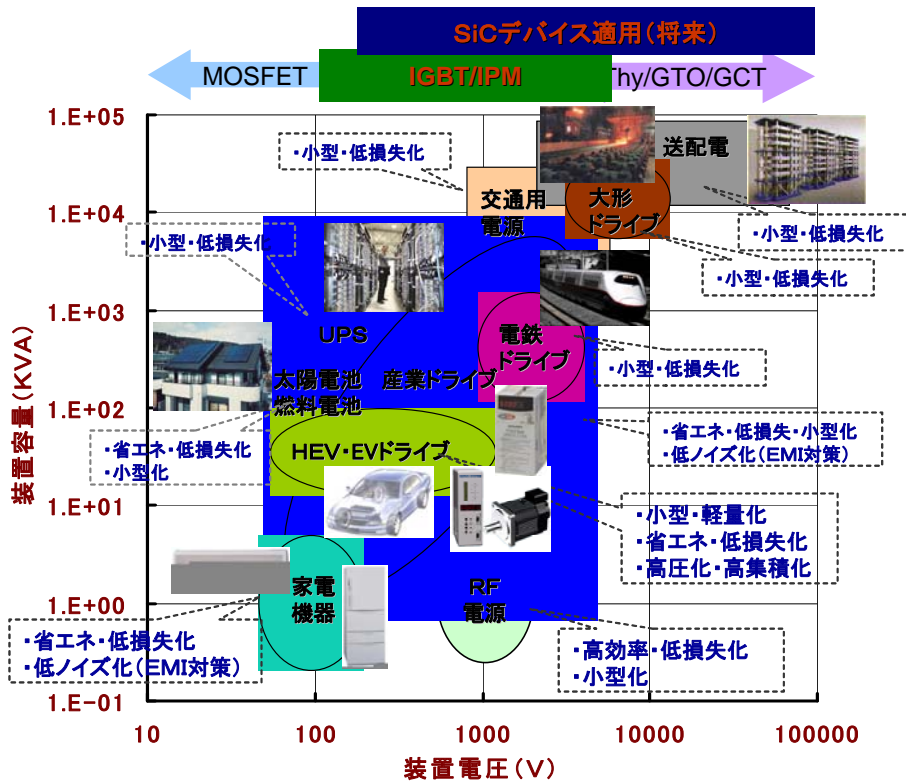


図1 パワーエレクトロニクス装置の応用とパワーデバイスへの要求 (三菱電機技報より)

パワーエレクトロニクス技術の主要目標は、省エネルギー化にある。商用電源を用いた一定速のモータ駆動を、インバータを用いた可変速駆動への切り替えることで電氣的損失が大幅に低減される。パワーエレクトロニクス技術の展開は、発電・送変電応用から始まって、電鉄、家電製品（エアコン、洗濯機、冷蔵庫、IH 機器等）、さらには自動車（HEV、EV）へと適用範囲を拡大している。これまで市場要求（小型化、高効率化、低コスト化）に答えて、パワーエレクトロニクス機器はパワーデバイスの性能向上をドライビングフォ

ースとしてパワー密度（単位体積当たりの出力容量）を増大させてきた。別の言い方をすると過去 20 年でパワーエレクトロニクス機器の体積を大幅に縮小させてきたことになる。今後もこの傾向は継続すると予想され、パワーデバイスはさらなる性能向上が求められている。

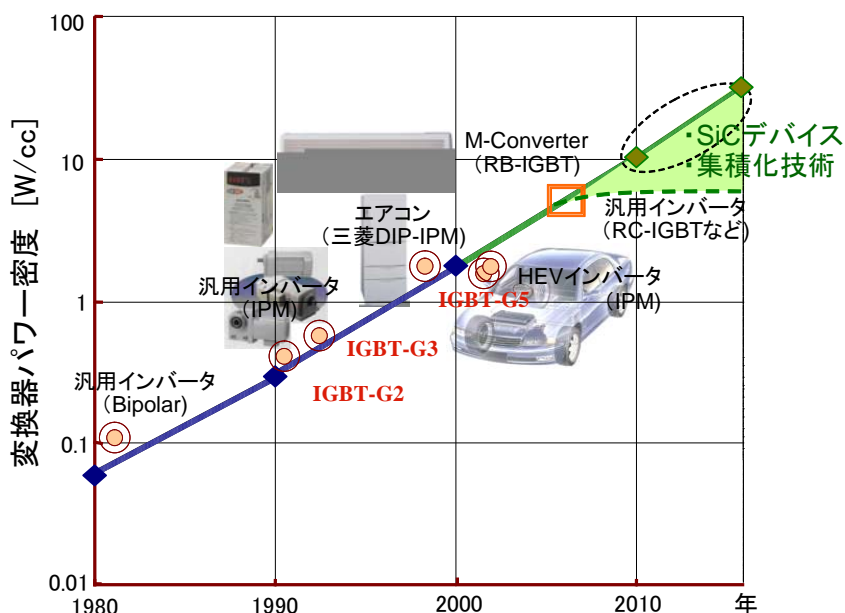


図2 パワーエレクトロニクス機器のパワー密度トレンド（三菱電機技報より）

パワーデバイスには、主に電力応用や鉄鋼用大容量インバータに用いられるサイリスタ系のデバイスと、産業機器、家電機器などに使用されるトランジスタ系のデバイスがある。トランジスタ系デバイスは現在 100V 以下の低電圧領域では MOSFET、それ以上の電圧領域

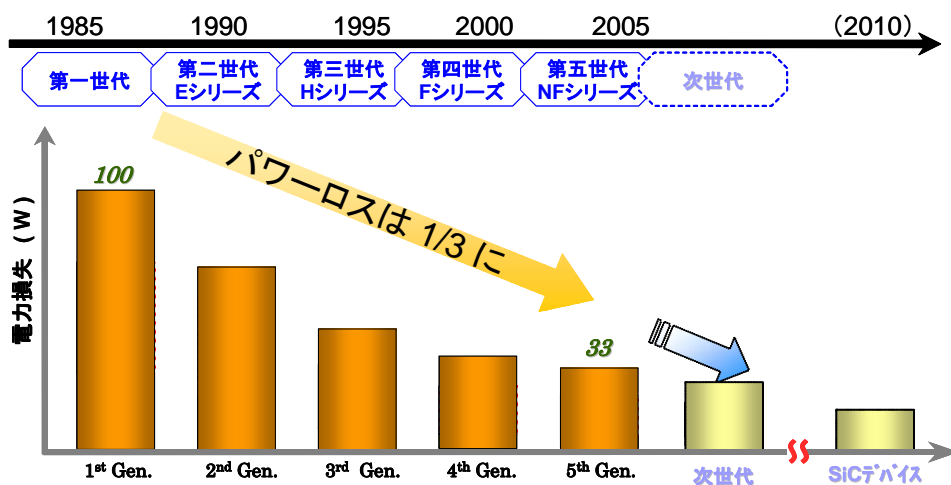


図3 パワーデバイス（IGBT）の損失低減推移（三菱電機技報より）

では IGBT が主流である。IGBT は 1980 年代半ばに開発されて以来目覚ましい進歩を遂げ、IGBT をインバータに適用した場合の電力損失は第一世代に比べて最新の第五世代 IGBT では 33%に低減されている。

IGBT は産業用電気機器や家電用電気製品などに広く適用されており、たとえばトランスファーモールド技術を応用した DIP-IPM (Dual-In-Line Package Intelligent Power Module) はエアコンや冷蔵庫のインバータ化を加速し、家電製品の省エネルギー化に大きく貢献した。一方低損失化と並行して IGBT の高耐圧化が進み、現在では 6.5 kV 耐圧の IGBT 製品化されるに至り、電鉄車両用推進制御装置では、それまでの GTO サイリスタから IGBT への置き換えが進み変換器損失の低減、装置の大幅な小型軽量化が可能となっている。このように IGBT は飛躍的な進化を遂げてきたが、近年その性能向上は鈍化してきており、シリコン (Si) 半導体の物性的な限界に近づきつつある。

1950 年代中ごろの整流ダイオードやサイリスタの誕生以来、デバイス構造の変化はあったものの、半導体材料については一貫して Si を用いてきた。ここにきて市場からの要求に答え続けるためには、これまでの Si に変えて新しい材料を用いたパワーデバイスの出現に期待が集まっている。

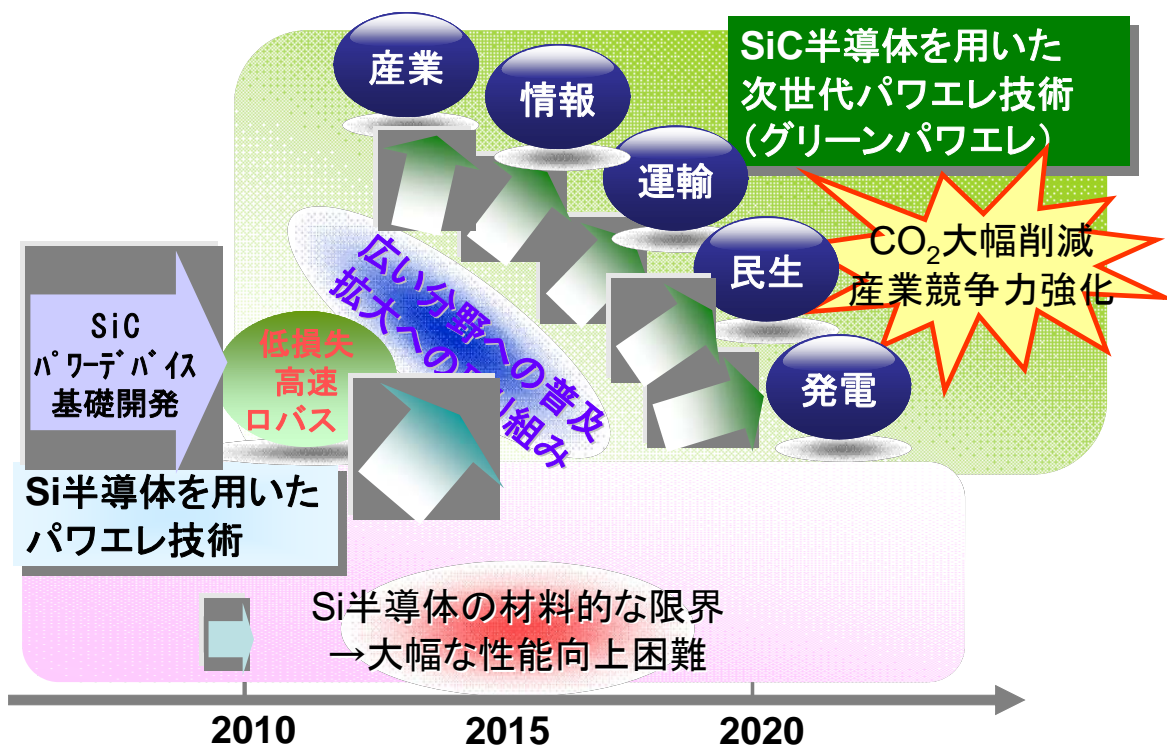


図 4 次世代パワーエレクトロニクス (グリーンパワエレ)

その代表がシリコンカーバイド (SiC) である。SiC は Si に比べ、バンドギャップが約 3 倍、絶縁破壊電界が約 10 倍、電子飽和速度が約 2 倍、熱伝導度が約 3 倍というパワーデバイス用半導体材料として優れた物性値を有しているために、高耐圧低損失パワーデバイスが実現でき、損失を一挙に数分の 1 以下に低減できると期待されている。このように SiC 半導体を用いたパワーデバイスはパワーエレクトロニクス技術に数十年に一度の大きな変革 (パラダイムシフト) をもたらす。いわばこれまでの Si パワーデバイスを用いたパワーエレクトロニクスを第一世代とすれば、SiC パワーデバイスを適用するパワーエレクトロニクス技術は第二世代 (次世代) パワーエレクトロニクスと呼ぶことができる。本プロジェクトでは省エネルギーによる地球環境への貢献を明確にするためにグリーンパワーエレクトロニクスと呼称する事とした。

2. パワーエレクトロニクス技術の開発動向

米国 (CPES : Center for Power Electronics Systems) ^{注1)} と欧州 (ECPE : European Center for Power Electronics) ^{注2)} では、SiC パワーデバイスの適用を始めとした超低損失なパワーエレクトロニクスの包括的な開発が積極的に進められている。

一方、わが国では SiC パワーデバイスの基盤技術開発をこれまで継続的に行ってきた。注3) しかし地球環境問題の解決のための省エネルギー、炭酸ガス排出量削減に必要なエネルギー技術革新に向けて、SiC パワーデバイスを広くエネルギー需要および供給側で多分野に使われているパワーエレクトロニクス機器全般へ適用し、普及の拡大を実現するためには更なる取り組みが必要である。

注 1) CPES は米国科学財団 NSF の研究センターのひとつで、米国をパワーエレクトロニクス分野の世界的リーダーにする目的で、1998 年に設立された、バージニア工科大学、ウィスコンシン大学、レンセラー工科大学などの 5 大学と ABB、インテル、Honeywell、オスラム、東芝インターナショナル、GE エネルギー、ボーイング、インフィニオンなど 80 社からなるコンソーシアム。資金は 1998 年から 2008 年まで 60~70 億円、2007 年度は 7 億円を得ている。

注 2) ECPE はパワーエレクトロニクス分野の主要企業である SIEMENS, ABB, ALSTOM, インフィニオンなど 27 社で 2003 年に設立された。目的はパワーエレクトロニクス関連の研究、教育 訓練、技術移転の促進。プリンシパルメンバーからの会費 (40000 ユーロ/パートナー : 総額 10 億円程度) を大学に渡して研究を実施。パ

イエレン州政府と EU はこのプロジェクトを資金面でサポートしている。

注 3) ①NEDO「超低損失電力素子技術開発」H10～14 年度（65 億円）：SiC パワーデバイス実現のためのバルク成長技術、エピタキシャル成長技術、イオン注入等のプロセス技術、JFET、MOSFET、MESFET の基本デバイス構造の開発と Si デバイスに対する優位性の実証。参画メンバーは産総研、日立、東芝、三菱、三洋、沖、日産、デンソー、昭和電工、大学) ②NEDO「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」、H15～17 年度（10 億円）：SiC 基板品質向上技術開発と SiC デバイスの性能向上技術開発に関しこのスキーム内で数社程度からなる複数のプロジェクトが実施された。参画メンバーは産総研、日立、デンソー、東芝、三菱、新日鐵。③NEDO「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」、H18～20 年度（30 億円）：SiC デバイスを用いたインバータの基盤技術開発と性能実証、インバータ損失 70%減、デバイス信頼性向上、パワー密度 50W/cm³ への技術的目処。

3. SiC 開発現状

3-1 SiC 基板、エピ

Si と C では常圧では化学量論組成の溶液を得ることができないため、SiC は Si や GaAs のような融液固化による単結晶成長はできない。SiC 基板の作成に必要なバルク単結晶の成長には昇華法（改良 Lely 法）、液相エピタキシー法（LPE 法）、高温 CVD 法（HT-CVD 法）がある。

現在市販されている SiC 単結晶基板の製造には主として昇華法が用いられている。パワーデバイス応用に当たっては、バルク結晶に対して、1) 口径 2) 抵抗率 3) 結晶品質に関する要求がある。パワーデバイスにおいては縦型が主であるため、基板部分の直列抵抗を下げる必要があるが、現状の基板では抵抗率 $\sim 20\text{m}\Omega\text{cm}$ が一般的である。結晶欠陥は、マイクロパイプ、転位からなる。転位はその結晶学的構造から、貫通らせん転位、貫通刃状転位、基底面転位の 3 種類に分類される。このうち、マイクロパイプと貫通らせん転位の間には、大きなバーガーズベクトルを持つらせん転位がマイクロパイプとなるという関係がある。4H ポリタイプの場合には、バーガーズベクトルの大きさが c 軸方向の unit cell の大きさの 3 倍以上となるとマイクロパイプ化するとされている。

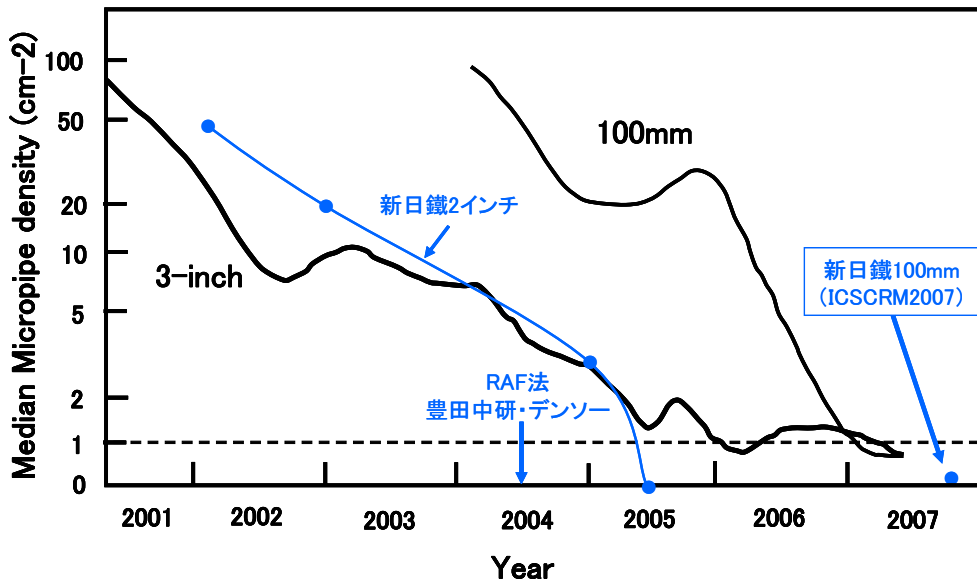


図5 マイクロパイプ密度の低減状況 (ECSCRM2008 における Cree 社資料に追記)

マイクロパイプは異種ポリタイプの境界から発生することが知られており、マイクロパイプ低減には4Hポリタイプの安定成長が不可避である。異種ポリタイプ発生のない安定成長を実現するためには、原料温度、ルツボ内温度勾配、雰囲気圧力などの成長パラメータを制御する必要がある。バルク単結晶の口径拡大においては、c軸に沿った成長に加えて、c軸に垂直なa軸方向への成長も必要になることから、結晶面内の温度勾配の制御も必要となる。これら多数の成長影響因子を結晶の全成長過程において制御することによって、マイクロパイプ低減と口径拡大が進められてきた。図5にマイクロパイプおよび口径拡大の状況を示す。現在、マイクロパイプ密度はゼロ近くまで低減が進んでいる。また、マイクロパイプがほとんど無い良質結晶で口径は100mmφに到達している。この口径はパワーデバイスの量産において使用可能な口径のうち、最小のものとされている。

このように結晶欠陥の低減に関しては、対象がマイクロパイプから転位に移りつつある。貫通らせん転位は100台~1000台/cm²、貫通刃状転位は1000台から10000台/cm²、基底面転位は1000台から10000台/cm²である。3種類の転位を合計すると、総転位密度~10000台/cm²である。この転位密度であれば、1mm口の領域に~100個の転位欠陥が存在することになるが、もしすべての転位がデバイスの動作不良につながるとすれば、デバイス歩留はゼロとなるはずである。しかしながら、実際には有限のデバイス歩留となり、転位欠陥と

デバイス不良をもたらす致命的欠陥、いわゆるデバイスキラ欠陥との関係について更なる理解が必要である。

高温 CVD 法はシラン、炭化水素を高温炉内に導入し、熱的に分解、反応、堆積を行うもので、高純度な結晶が得られる利点がある。高純度が必要とされる高周波デバイスへの適用が行われている。

液相エピタキシー法は熱平衡状態に近い状態で結晶を析出させる方法で昇華法や高温 CVD 法のような熱的に非平衡状態での成長に比べ結晶欠陥の少ない高品位な結晶を成長させることができる。パワー用には不向きな 6H 型結晶ではあるが、4 インチ結晶や、2 インチの長尺（5mm）の結晶が得られているが、基板の市販レベルには至っていない。この方法はバルク結晶以外にも、エピタキシャル成長への適用検討も行われている。

バルク結晶成長においてポリタイプ混在が起こりやすいが、エピ薄膜成長も例外ではない。異種ポリタイプの発生を克服するためにエピ薄膜成長において、オフ角度をつけた基板を用いることを特徴とするステップ制御エピタキシーが考案され広く用いられている。この手法によれば、オフ基板表面に現れた Si-C 対の積層情報を維持するようにエピ成長が行われるため、4H 基板上に良品質な 4H エピ薄膜を安定して成長することが可能となる。SiC エピ成長においては、従来、Si 源としてモノシラン、C 源としてプロパンが用いられてきたが、最近ではエピ成長 window を拡大するため、種々のガス種が試されるようになってきた。また、Si 源、C 源に加えて、塩素 (Cl) 源を成長中に同時供給してエピ成長速度を増加させることが行われており、最大～100um/Hr の高速成長が報告されている。

ドーピングに関しては、C/Si 比を制御しドーパントが所望の格子位置に入るように制御するサイトコンペティション技術 (site-competition technology) を用いるのが一般的である。この技術の活用によりドーピングを広範囲に制御することが可能となった。アンドープ条件では 10^{13} 台/cm³ が可能となっている。この場合は、残留不純物の影響から n 型の伝導型となっている。n 型、p 型ドーピングにおいては、それぞれ、窒素、TMA が用いられるが、サイトコンペティション技術の適用によって、n 型、p 型ともに 10^{15} 台から 10^{19} 台/cm³ の範囲で制御が可能となっている。

膜厚、ドーピング値の均一性向上のため、エピ成長中に基板を公転、自転させる薄膜成長装置が市販されるようになった。エピ成長においては基板温度の制御が重要であるが、基板を乗せたサセプターのみを温度調節する cold wall 式から、より高い温度制御性・安定性を求めて、サセプターを含めて成長空間全体を温度調整する hot wall 式に装置構成が

変わってきた。3インチ基板において、膜厚は σ/mean で表して、面内均一性が0.2~0.4%、基板間が0.7%、ドーピングは、面内均一性が8.9~11.7%、基板間が7.2%のエピ品質が報告されている。

エピ起因でComet、Carrotをはじめとするエピ欠陥が発生することが判っている。バルク結晶内の転位がエピ欠陥の起源となることが報告されている。また、バルク側に転位がなくとも、バルク/エピ界面あるいはエピ成膜途中でエピ欠陥が発生することも報告されている。エピ欠陥密度はデバイスキラ欠陥の密度に比べて高く、全てのエピ欠陥がデバイス不良を起すわけではない。この状況はバルク結晶中の転位密度とデバイスキラ欠陥の関係と同様である。今後、エピ欠陥とデバイスキラ欠陥の関係について理解を深める必要がある。

3-2 デバイス

SiCはSiに比べ、バンドギャップが約3倍、絶縁破壊電界が約10倍、電子飽和速度が約2倍、熱伝導度が約3倍という優れた物性値を有している。SiCパワーデバイスはユニポーラデバイスとバイポーラデバイスに大別できる。

SiCはSiに比べ絶縁破壊電界が約10倍であるため、同じ耐圧を保持するためにはドリフト層厚さを約1/10に、かつ不純物濃度を高濃度(約100倍)にできる。そのためオン抵抗の大幅低減が可能である。Siの場合、kV級の耐圧を有するユニポーラデバイスになるとドリフト層の抵抗が非常に大きくなり通電時の損失が大きくなるため、伝導度変調効果により通電時の損失を低減できるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、GTO(Gate Turn off Thyristor)等のバイポーラデバイスが用いられる。Si-IGBTは現在耐圧600V以上のパワーデバイスの主流となっており、微細加工技術、トレンチゲート技術、薄基板技術の適用とともに低オン抵抗化が進んできているが、近年材料物性の壁に近づきつつある。一方SiCのユニポーラパワーデバイスはSi-IGBTを超える低オン抵抗化が実現可能である。ユニポーラ型のダイオードであるSiCを用いたSBD(Schottky Barrier Diode)、JBS(Junction Barrier Schottky)は構造が簡単であることから開発が先行し、2001年ごろより容量10-20A、耐圧300-1200Vのデバイスがインフィニオン(独)、クリー(米)から市販され始めた。2008年にはSTマイクロからも市販を開始している。SBDはSi-pinダイオードに比べ逆回復損失が小さいためPFC(Power Factor Correction)回路、インバータ回路のFWD(Free Wheeling Diode)への適用により、高周波化と低損失化さらにはパワーモジュール、パワーエレクト

ロニクス機器の小型化が期待される。ユニポーラ型パワーデバイスのスイッチングデバイスとして SiC による MOSFET や JFET (Junction FET) 等の開発が進められている。JFET はチャネル部に酸化膜/SiC 界面を有しないということからオン抵抗の低減は比較的容易であるが、パワーデバイスとして安全動作に必要なノーマリーオフ型デバイスの実現が困難であるという課題がある。ノーマリーオフ化の取り組みとしては、低圧の Si-MOSFET とのカソード接続、及びチャネル部への微細トレンチ構造の適用が報告されている。一方 SiC-MOSFET はノーマリーオフを実現しやすいという特長を持つことから近年多くの機関で活発に開発が行われている。SiC の場合、熱酸化により形成した MOS 構造の界面準位密度が Si に比べ 1 桁以上高いため、キャリアが界面準位に捕獲され伝導に寄与しなくなること、またトラップされたキャリアのクーロン散乱により MOS チャネル移動度が低下し、オン抵抗が期待される値より大きくなることが課題である。この課題の解決のため、通常使われる Si 面 ((0001) 面) に対し異種面 ((000-1) 面、(11-20) 面等) の利用、エピタキシャル層のチャネル部への適用、酸化膜形成後の窒化処理等が検討されている。最近では耐圧が kV 級のデバイスにおいて、Si-IGBT のオン抵抗を超えた低抵抗特性が実証されており、今後更なる低抵抗化が期待される。また SiC-MOSFET の場合、SiC のバンドギャップが大きいため酸化膜と SiC の界面における伝導帯のエネルギー障壁が Si-MOSFET の場合に比べ小さいこと、SiC を酸化する際にカーボンが酸化膜中に残留すること、SiC 表面の結晶欠陥の影響等により、ゲート酸化膜の信頼性が低下することも大きな課題である。そのため堆積 ONO (oxide/nitride/oxide) 膜の適用、信頼性低下を引き起こす欠陥の同定、低減が進められている。

現状の Si-IGBT と Si-pin ダイオードを用いた Si パワーモジュールの場合、両素子ともバイポーラデバイスであるために蓄積キャリアの影響があり、IGBT のターンオン時は Si-pin ダイオードの逆回復電流が、また IGBT のターンオフ時には IGBT の蓄積キャリアが流れるためスイッチング損失が大きくなる。それに対して、SiC-MOSFET と SiC-SBD を組み合わせた SiC モジュールではトランジスタ、ダイオードともにユニポーラデバイスであるため、スイッチング時の蓄積キャリアの影響がなく、Si モジュールに比べてスイッチング時の損失を大幅に低減できる。このように MOSFET、SBD 等の SiC のユニポーラパワーデバイスは IGBT、pin ダイオード等の Si のバイポーラパワーデバイスに比べて、低オン抵抗化による通電時の損失とスイッチング時の損失を共に低減できるためインバータ等に適用した場合電力損失を大幅に低減できる。

SiCを用いた pin ダイオード、IGBT、GTO サイリスタといったバイポーラデバイスの場合、pn 接合の拡散電位が約 2.5V と大きいことから、3-4 kV 以上の高耐圧デバイスが主ターゲットになる。SiC バイポーラデバイス特有の課題として pn 接合に順方向通電した場合に、伝導度変調層内に含まれる基底面転位が分解し積層欠陥を形成し、その結果オン電圧が通電時間とともに増大する不良モードが実用化への大きな障害になっている。オン電圧増大の原因となる基板内の転位の低減のため、バルク結晶成長時に a 面、c 面方向に繰り返し成長することにより転位欠陥を 2-3 桁低減できる RAF (Repeated A-Face) 成長法の使用、またエピ成長時に基板内の基底面転位を C 軸方向の刃状転位に転換する手法が提案されており通電劣化が大幅に改善されることが報告されている。

3-3 プロセス装置

SiC は Si と同様に、イオン注入による伝導性制御、熱酸化による酸化膜形成、プラズマによるドライエッチング等が適用可能なため、基本的には現状の Si プロセスに類似したプロセスが適用できることが特徴である。しかし SiC の場合いくつかのプロセスで Si と異なる装置が要求される。イオン注入プロセスではイオン注入種がアルミ、窒素と Si と異なることともに、高ドーズ注入時には活性化アニール時の結晶性の回復が不十分であるために、高温に過熱した状態でのイオン注入が必要とされている。またイオン注入後の活性化アニール温度も 1700 度以上と Si に比べ非常に高い温度が必要となる。さらにデバイス作成にはエピタキシャル成長層が必要となるが、その成長には 1500 度以上の CVD 装置が必要になる。さらに MOSFET の作製には MOS 界面特性改善を目的に 1200 度以上での酸化、窒化プロセスが提案されている。

イオン注入装置は量産対応として ULVAC より高温注入に対応した装置が 2005 年市販されている。しかしまだ量産に供したという実績の点で十分とはいえない。アニール装置については処理温度が非常に高温となるために実験機はいくつかのメーカーから出ているが、高スループットの量産対応装置はまだ開発途上である。エピタキシャル装置についてはスエーデンのエピグレス社が 4 インチ多数枚の量産対応装置を販売している。最近国内の東京エレクトロンがローム、京都大学と協同で 3 インチ 8 枚をバッチ処理できる装置を発表している。まだ製品化時期を明らかにしていないが、国内メーカーとして製品化が期待される。SiC は Si に比べ成長速度が遅く現在数 μm /時間程度であり、大規模量産には成長速度の高速化が不可欠である。4 インチ対応装置が出てきているものの、成長速度とともにエピ膜

の膜厚分布、エピ濃度分布については不十分である。大口径基板への対応も含め、今後改善の余地は大きいといえる。

3-4 応用装置

SiC デバイスを搭載したパワーエレクトロニクス機器としては、既に小容量（600V 耐圧 10A 以下）の SBD がその高速性を活かしてハイエンドの電源の力率改善回路に適用されている。2006 年には 700 万個の SBD ダイオードが販売され、市場規模としては約 16 億円程度との報告がある。またジーメンスより、インフィニオン社の SiC-SBD を搭載した 690V 対応のインバータが市販され始めた。正弦波出力のインバータにおいて、Si-Pin ダイオードを SiC-SBD に置き換えることでキャリア周波数を高くすることができ、出力段のフィルターを小型化できたとする。このように SBD のパワーエレクトロニクス機器への適用はまだ限定的ではあるものの始まっている。しかしパワーエレクトロニクス機器への本格的な普及にはスイッチングデバイスである MOSFET のようなトランジスタの実用化が急がれる。

スイッチングデバイスである SiC-MOSFET を用いて、インバータ等のパワーエレクトロニクス機器のコア変換機を実際に試作し、駆動、評価、実証した報告は、近年増加してきている。2005 年に三菱電機は 3.7kW 定格出力のインバータモジュールを試作し実際にモータを駆動し、損失が Si-IGBT を用いたものに対し約半減できることを世界で初めて示した。さらに 2007 年には SiC の低消費電力特性を最大限に活用し、出力は 3.7kW と同じであるが、体積を約 1/4 に低減しパワー密度で $9\text{W}/\text{cm}^3$ のインバータユニットを実証した。2008 年にはデバイスの低損失化と大容量化を進めて 11kW 出力で損失を Si-IGBT の 30%にまで低減可能であることを示した。またローンは SiC の高温動作を前面に積極的な開発を行っている。2008 年には 250 度動作の SiC インテリジェントパワーモジュールを発表するとともに、自動車メーカーと協同で電気自動車用の大容量パワーモジュールを発表し、損失が Si モジュール比で 47%低減できることを実証した。一方ヨーロッパではドイツのフランクフォール研究所が太陽光発電用パワコンへの SiC デバイス適用検討を進めており、最近 SiC-MOSFET を適用して 99%近い高効率を報告している。

SiC-SBD を適用したモジュールも力率改善回路以外にも、インバータ適用時に損失を 30-40%低減可能であることを 2008 年に東芝が発表している。日産自動車は SiC ダイオードを実際に燃料電池自動車（X-TRAIL FCV）に適用して、走行試験を開始しておりインバータ回路損失を 20%改善できたことを発表している。電中研と東芝は市販の SiC-SBD を太

陽光発電等の分散電源連携インバータに適用して、損失が15%低減できるとともに、変換機の体積を15%削減できることを示した。このようにSiCパワーデバイスのパワーエレクトロニクス機器への適用を想定した、性能実証が活発化してきている。また従来のようにデバイスメーカー単独でなくパワーエレクトロニクスユーザと連携し、より具体的な仕様での実証が始まっており今後の進展が期待される。

このようにSiCパワーエレクトロニクスは各分野への応用に省エネルギー効果を引き出すと期待されている。しかし現在SBDは市場投入されているものの、多様なシステム応用を想定した、回路、モジュールを試作するためにはダイオードに加えてスイッチングデバイスが必要である。スイッチングデバイスは開発段階にあり、SiCパワーエレクトロニクスの普及にはSiCスイッチングデバイスの早急にサンプルレベルまでの開発を加速する必要がある。

4. 市場動向と環境への貢献

4-1 産業分野

モータ駆動にインバータを用いて可変速駆動を適用することで、たとえば事務所空調設備の15kWモータでは省エネルギー効果として年間電力削減量は45%削減され、CO₂削減量に換算すると12654kgと推定されている。(JEMA 「伸び行くインバータ 2008年版」) このように、これまでインバータを適用したパワーエレクトロニクス機器の普及により省エネルギーが進んできている。全電力の内モータが消費する電力は約60%といわれており、インバータの導入によりモータの消費電力が45%低減できれば大幅な電力削減効果が期待される。実際にはインバータ駆動に適さない応用や、エネルギー削減が期待されない用途もあるため、単純計算はできないが、効果は相当大きいといえる。またモータ駆動用インバータは1980年代初頭より、デバイスの性能向上、実装技術の向上をベースにして小型が進んできている。1997年には体積が1/10以下にまでなっているがその後小型化は大きくは進んでいない。kW級のインバータが発生する損失の約50-60%は半導体デバイスが発生しており、半導体デバイスの発生損失を低減できると冷却系の小型化が可能になり、さらなる小型化が図れるとともに省エネルギーにも大きく寄与できることになる。この点でSiCデバイスが期待されている。

4-2 情報分野

情報通信トラフィックの爆発的な増加に伴い、情報通信分野、特に情報通信インフラ部分であるサーバ、ルータおよびこれらが設置されるデータセンタ等の電力消費の増大が懸念されている。国内の IT 機器の電力消費量は 2006 年で約 466 億 kWh であるが、毎年約 1000 億 kWh 増加しており、2025 年には 2400 億 kWh を超えるとの推定がされている。現在の国内における総発電量が約 1 兆 kWh である事との比較においても、この増大は極めて大きい。我が国のエネルギーの需給高度化や利用の高効率化を図る観点から、こうした設備・施設に対する省エネルギー技術の開発は喫緊の課題であるといえる。

こうした電力消費増大問題の解決を目指し、処理すべき情報の内容に応じて動的にジョブを移動させるマイグレーション技術による情報機器群のソフトウェア的な省エネルギー技術と、現用の Si よりも材料特性に優れた SiC デバイスを用いた高効率かつ高速応答な電源技術といったハードウェア側的な技術を統合して運用する事で、IT 機器（付随する空調設備を含む）の電力消費を大幅に削減することが期待されている。

またグリーン IT 推進協議会が、優れた省エネルギー効果を持つ IT 機器、ソフトウェア、サービス、ソリューション等、並びにそれらを活用して優れた省エネルギー効果を実現した提案等を表彰する 2008 年グリーン IT アワードにおいて、「SiC パワーデバイス技術」がグリーン IT 推進協議会会長賞を受賞しており、IT 分野においても SiC パワーデバイスの実用化が切望されている。

4-3 民生分野

家庭における電力消費の中ではエアコン（25%）、冷蔵庫（16%）、照明器具（16%）、テレビ（10%）の割合が大きい。照明器具は今後 LED などの固体照明になることが予想されており、テレビは液晶、有機 EL 等の省エネルギー型が増加してゆくと考えられる。そのため SiC パワーデバイスの適用が期待されるのはインバータが既にほぼ適用されているエアコンと冷蔵庫である。エアコン 冷蔵庫だけで家庭の消費電力の内約 40%を占めている。また最近ではオール電化の普及に伴い、IH 調理機器の台数も増えてきている。エアコン、冷蔵庫の年間平均消費電力はそれぞれ、約 950kWh、約 520kWh であり、国内家庭保有台数はそれぞれ 1 億台、6 千台と推定されている。合計すると 1,200 億 kWh となり国内全消費電力の 10%を超える規模となる。SiC パワーデバイスの適用により機器の効率が約 2%程度向上することが予想され、普及すればその省エネルギー効果は大きいため、SiC パワーデバイス適用機器（グリーンパワエレ）の普及拡大への取り組みが必要である。

4-4 運輸分野

ハイブリッド自動車、燃料電池車、電気自動車の自動車市場における占有率は2020年には15%に達し、2010年にはハイブリッド自動車の販売台数が100万台を越えると予想されている。近年の地球環境問題への注目、燃料価格高騰により、ハイブリッド車を代表とする、モータ駆動車両の普及が進むことは間違いないと考えられる。

小型車から始まったハイブリッド車も、最近では大型乗用車にも適用され、インバータの容量は100kWを超えている。インバータが大容量化すると、搭載場所が限られてくるためインバータの小型化の要求が出てくる。従来のバッテリーと同程度の体積にすることで、インバータを車載する際のスペース確保の問題を避けることができる。このことから必然的にインバータのパワー密度を高める必要があり、低損失で発熱量が小さく、冷却に伴う部品体積を小さくできることから、SiCパワーデバイスへの期待が大きい。現在冷却系としては水冷が用いられているが、Siパワーデバイスの動作温度の制限からエンジン水冷系を共用できず、別系統の水冷系を用いているのが現状である。SiCはワイドバンドギャップ半導体であるため、たとえば200度を超える温度での動作も可能である。このことは冷却系の簡素化（冷却系のエンジンとの共用化、水冷→空冷）につながり、インバータシステムの小型化が可能になる。

一方SiCパワーデバイス適用による省エネルギー効果については、電気自動車の場合はインバータの損失低減が直接低燃費につながる。ハイブリッド車の場合はインバータの低損失の燃費貢献度は、組み合わせるエンジンの性能や、システム構成、走行条件により左右されるため単純ではないが、インバータの小型、軽量化の効果も考慮すると、燃費が約10%改善可能という試算もなされている。

電鉄用パワーデバイス、インバータには、車両を駆動するために推進制御装置、車両内の機器への電力供給に使われる補助電源装置がある。推進制御装置に使われるインバータには回路構成が簡単な2レベルインバータ、低耐圧素子が適用できかつ高調波発生が少ないものの使用されるデバイス数が増加し制御が難しくなる3レベルインバータがある。これらは架線電圧と使用されるパワーデバイスの耐圧に対応して選択される。1500V架線の在来線では1980年代半ばからGTOインバータが適用され始め、その後IGBTを用いた1.7kV耐圧素子を用いた3レベルインバータさらには3.3kV耐圧素子を用いた2レベルインバータが使われるようになってきている。新幹線は300系では4.5kV耐圧GTOを用いた2

レベルインバータ、700系では3.3kV耐圧IGBTを用いた3レベルインバータが使われている。6.5kV耐圧IGBTを用いると2レベル化が実現可能である。デバイスの流れは電流駆動、スナバ回路が必須でスイッチングロスが大ききGTOから電圧駆動、スナバ回路不要でスイッチングロスが小さいIGBTに移ってきており、次世代デバイスとしてSiCが期待されている。SiCパワーデバイスの低オン抵抗、ユニポーラデバイス適用による低スイッチングロス、高温動作（冷却系小型化）という特徴により、車両用推進制御装置の損失、サイズ、重量の大幅削減が期待される。また補助電源装置に対しては高周波駆動による、フィルター、トランスの小型、低騒音化が期待されている。

電鉄用途では1000Aを超える大容量が必要であるとともに、現在1kV級のデバイス対応で開発が進むMOSFET、SBDの1.7kV、3.3kV、6.5kVへの高耐圧化の見極めと、SiC-IGBT、SiC-pinダイオードのようなバイポーラデバイスとの比較検討も必要になると考えられる。

4-5 発電、送電分野

太陽光発電の2007年までの世界累積生産量は8GWで、これは世界電力需要の0.1%以下である。現在太陽光発電の場合1kWh当たりCO₂:315g、石油換算0.227lの削減効果がある。ただ発電コストは1kWh当たり46円で火力発電の20円、水力、原子力の0.7-10円に比べまだ高い。2020年の目標は14円である。ドイツで導入量が急増しているが、これは通常電力料金の2-3倍で20年間に渡り買取する制度によるところが大きい。太陽光発電には系統連携用にパワコンが必要であるが、家庭用パワコンではパネルからの電圧を昇圧するDC/DCコンバータとDC/AC変換するインバータ、トランス、フィルター等からなる。容量は3-4kWでその変換効率は94.5-97.5%である。パワコンのトレンドは高効率化、大容量、軽量化、高電圧化で、これまで高効率化に対しては階調制御方式の回路の工夫により97.5%の高効率が得られている。SiC-MOSFETはSi-IGBTに比べ約5-10倍の高速スイッチング特性を持っている。すなわち現行素子と同じスイッチング損失を許容すると、より高いスイッチング周波数での動作を可能とし、フィルター回路や磁性部品の小型化が実現でき、これが損失低減につながる。また現行素子と同じスイッチング周波数であれば、より小さいスイッチング損失が実現できることになる。ドイツで太陽光発電用パワコンへのSiCデバイス適用検討が進められ、最近では高効率特性が報告されており、期待が大きい。

4-6 グリーンパワエレ技術の環境への貢献（省エネルギー効果）

省エネ効果		(単位:万kl)				
年	2010	2015	2020	2025	2030	
製品分野						
①参考:家電合計	0	29	77	87	97	
②電気自動車(HEV/EV)	0	58	292	1169	2045	
③汎用インバータ	0	63	126	292	457	
④コンピュータ関連	0	0	23	35	47	
⑤無停電電源	0	72	139	192	244	
⑥新エネルギー(太陽光発電等)	0	4	5	13	20	
⑦コジェネ等(燃料電池含む)	0	35	57	86	114	
⑧汎用モータのインバータ化による効果	0	683	1524	2134	2743	
<①~⑦>合計	0	261	720	1872	3024	
<①~⑧:③除く>合計	0	881	2118	3714	5310	

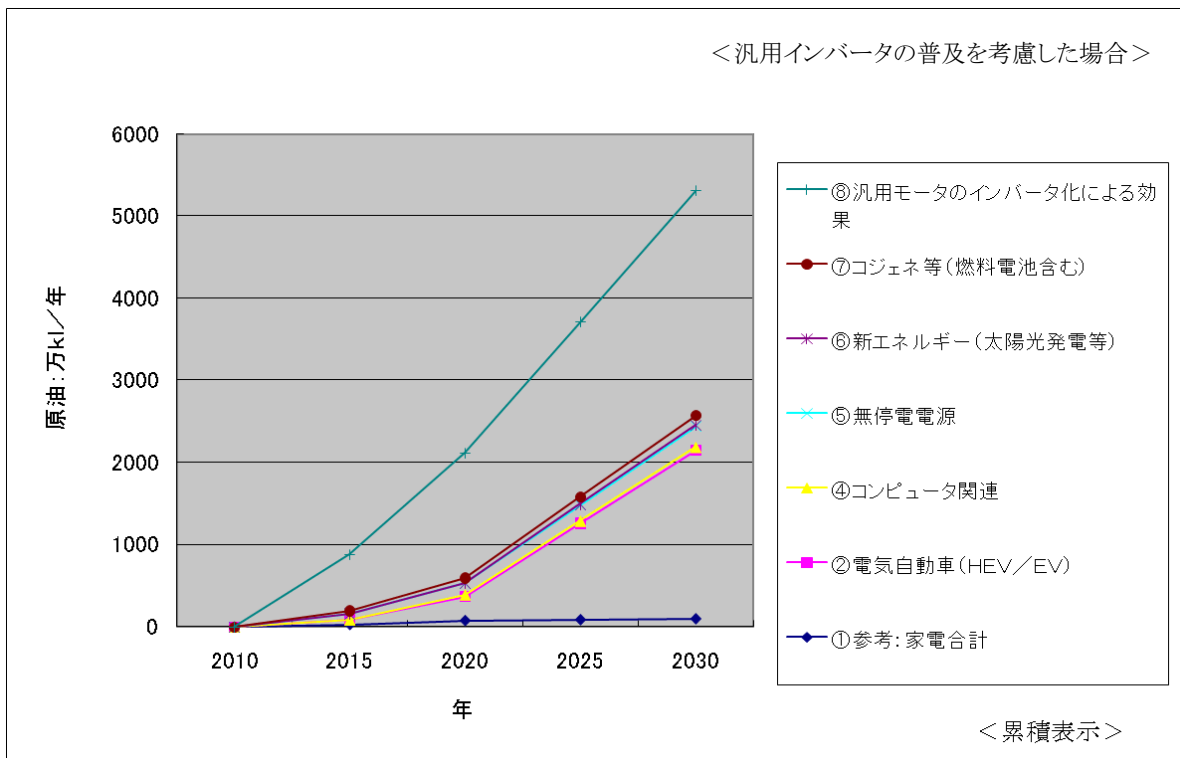


図6 SiCパワーデバイスの省エネルギー効果

(NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2008 より)

新機能素子研究開発協会を中心に SiC パワーデバイスのパワーエレクトロニクス機器適用時の省エネルギー効果が、家電、電気自動車、汎用インバータ、コンピュータ関連、無停電電源、太陽光発電用パワコン、燃料電池用インバータに対し、今後の導入、普及も考慮して見積もられている。汎用インバータの普及効果を含めた見積もりによると 2030 年には原油換算で約 5,300 万 kl、電力量換算で約 2,080 億 kWh (9.91MJ/kWh)、CO₂ 換算で 8,300 万 t (CO₂ 換算係数 0.4kg/kWh を使用) が削減される。この CO₂ 削減量は 2005 年のエネルギー起因の CO₂ 排出量の約 7%の相当し、大きな省エネルギー効果が期待される。

4-7 グリーンパワエレ技術の市場規模

これまで SiC パワーデバイスの市場は、SiC-SBD の限定された市場で約 16 億円程度であったが、今後デバイスの低価格化、スイッチングデバイスの市場投入、SiC 搭載パワーエレクトロニクス機器の市場投入により規模が増大する。2010 年ごろから急激に市場が立ち上がり始め年率 60-70%で成長し、2015 年には早くも 820 億円に達するとの予想がある。

(Yole Development) その後も高い年率で増加するもとの予想されている。またパワーデバイスの市場規模は約 1.1 兆円 (2005 年、WSTS より)、パワーエレクトロニクスの市場規模は約 6 兆円である。(Microtech / IEEE より) 今後 CO₂ 削減対策に伴い、再生可能エネルギー分野、次世代自動車分野などの市場が拡大すると予想され、それらの分野に使われる耐圧数百 V 以上の SiC が広く適用されて行くと考えられるデバイスの市場規模は 2050 年には約 10 兆円と、現在の約 10 倍に増加すると予想されている。(日立評論「パワー半導体が作る快適な低炭素社会」 2008 年 12 月より)

5. 普及への課題分析

5-1 デバイス

SiC デバイスは既に SBD が市販されており、SBD を搭載した機器の市販も発表されている。しかしながらその市場規模は 16 億円程度であり、限定的であるといわざるを得ない。基板が高価であることが大きな原因ではあるが、パワーエレクトロニクスで重要なスイッチングデバイスがまだ市場投入されていないことが大きい。これまでスイッチングデバイスはオン抵抗の低減を目的に開発進められてきた。最近では MOSFET において kV 級で 3mΩ cm² が実証されてきており、今後は長期信頼性確保、パワーデバイスとしての各種耐量確保の

開発と、実際にデバイスをシステム機器に適用する際の最適な駆動技術、実装技術の検討及び SiC 搭載機の性能実証を進めることが必要になる。これはデバイスメーカ、デバイス開発部門だけでは困難なため、機器メーカ及び機器開発部門との連携開発がポイントなる。また基板の品質向上のためにデバイスキラ欠陥の同定、解析を基板メーカ、エピメーカと連携し進め、基板開発ロードマップの共有も加速すべき課題である。

5-2 基板、エピ

バルク結晶品質においては、マイクロパイプがゼロに近い状況となったことから、マイクロパイプ低減はほぼ完了したと考えられる。マイクロパイプに代わって、転位の低減が品質課題となりつつある。しかしながら、デバイスキラ欠陥に比べてバルク結晶転位ははるかに多いことから、結晶欠陥の低減対象を絞り込むことが重要と考えられる。デバイス量産に向けて、基板平坦度の改善目標を定めることが基板加工の課題である。エピ品質においては、膜厚およびドーピング均一性の一層の向上が重要である。エピ起因の結晶欠陥は低減対象であるが、上述のバルク結晶欠陥と同様に低減対象の絞り込みが不可欠である。また、Downfall がデバイスキラ欠陥となることから、Downfall 低減も重要である。

デバイス量産に向けて、品質課題に加えてコスト低減も重要課題である。バルク結晶～基板加工～エピ薄膜成長の全工程において生産性を向上しコスト低減を実現することが重要である。

平坦度品質はリソグラフィー工程における歩留向上において重要である。SORI 品質はバルク結晶をマルチワイヤーソーでスライスした際のうねり形状によって大きく影響を受ける。SiC が超硬質材料であることから、スライス中にワイヤーが左右にぶれ、スライス形状をフラットに維持することが難しくなっている。この傾向は結晶口径が大きくなるにつれて増大するものと考えられる。これに対する解決策として、非接触で加工対象を切断できる放電加工法が提案されている。放電加工においてもワイヤーを使うが、ワイヤーと SiC バルク結晶が接触せず、ワイヤーに力が加わらないことからフラット形状が維持される。また、マルチワイヤーソーに比べてスライス速度が高いことも長所である。また、スライス後に研削を行って、うねり形状を修正する方法も提案されている。GBIR (TTV)、SBIR (LTV) 品質の向上においては両面加工法の採用が効果的であるが、CMP 工程においては両面の同時加工ができないため、研磨定盤に基板を貼付し片面研磨を行っている。このことにより平坦度品質の劣化が起きている。最近では SiC 向け CMP スラリーの開発が盛

んに行われるようになり、Si 面、C 面で処理条件を変える必要があるものの、同一スラリーで Si 面、C 面の両面を CMP 処理できるところまで来ている。

コスト低減は各工程におけるスループットの向上によって実現される。昇華法によるバルク結晶成長において成長速度は口径に寄らずほぼ一定で大幅な向上は期待できない状況である。加工工程においては、1) 放電加工によるスライス高速化 2) 研削による粗・中研磨の代替・高速化 3) 両面 CMP による工程短縮 が期待される。エピ成膜工程においては、1) 新材料ガスによる成膜速度向上 2) 室温から成膜温度まで高速に昇温・降温可能なエピ装置の開発 3) 同時処理できる基板枚数アップ によりスループットの向上が期待できる。1) については材料ガス製造元との協業、2)、3) についてはエピ装置メーカーとの協業が不可欠である。

また現在 4 インチの段階だが、これはパワーデバイスとして量産適用可能な口径の内最小であり、今後更なる品質向上と大口徑化に向けた開発は重要である。

パワーデバイス向けの SiC ウェハは研究開発の段階であり、市場に供給される価格は Si ウェハに比較して桁違いに高い。グリーンパワエレの普及に伴い、経済原理が働くことがウェハの低価格化には不可欠である。さらに単純なデバイスレベルでの比較ではなく、モジュール、システム機器レベルでの性能、有効性検証を行うことがグリーンパワエレの普及には必須である。また、大きな省エネルギー市場は SiC パワーエレクトロニクスにとって魅力であるが、それだけに Si 半導体と比較したコスト競争が激しく、むしろ参入しにくいとも言える。このために、多様な応用分野のユーザを取り込み、ウェハ→デバイス→機器応用の流れにきっかけを作ることも必要である。

5-3 標準化

SiC 基板の規格化については SEMI の中に Global SiC Task Force で検討中である。メンバーは独、米、日で、2 インチ、3 インチについては既に規格が成立している。4 インチについては欧米中心で議論が進んでいる。その内容には形状規格、オフ角度規格、傷、欠陥の規格も含まれるがその評価法についての標準化が不十分である。

パワーデバイスの標準化については IEC(国際電気標準会議)の中の半導体デバイスの専門委員会(TC47)において、個別半導体デバイス分科委員会(SC47E)が1994年に設立された。その中にパワーデバイス作業グループ(WG3)がありパワーデバイスの標準化が議論されている。国内では社団法人 電子情報技術産業協会(JEITA)内に国内小委員会があり、

IEC への日本提案や投票権を有している。本委員会には国内パワーデバイスメーカーが参加している。しかしながら現時点では SiC パワーデバイスの標準化活動は行われていないのが現状である。

SiC 素子は高温で動作することが特徴だが、たとえば MOSFET のゲート酸化膜の信頼性寿命を高温で測定するためには、ゲート酸化膜に流れる微小電流を 250 度以上の高温で正確に測定する必要がある。現時点ではこのような測定技術は確立されておらず、250 度以上の微小電流測定システム、方法を標準化する必要がある。これには異なる資料の評価を統一できることになり、研究開発においてもデータの正確な比較ができるという点で有意義である。そこで産業技術総合研究所パワーエレクトロニクスセンタ（当時）を中心に「電力用 SiC 素子の高温状態における電気特性試験方法」に関する標準化がデバイスメーカー、測定機器メーカー、パワーエレクトロニクスメーカーが参加して 2006 年に検討され JIS 原案が策定された。

以上のように SiC デバイス関連の標準化は、一部始まっているが主としてこれからの課題といえる。

6. 普及に向けた提言

6-1 パワーエレクトロニクス連携開発の推進

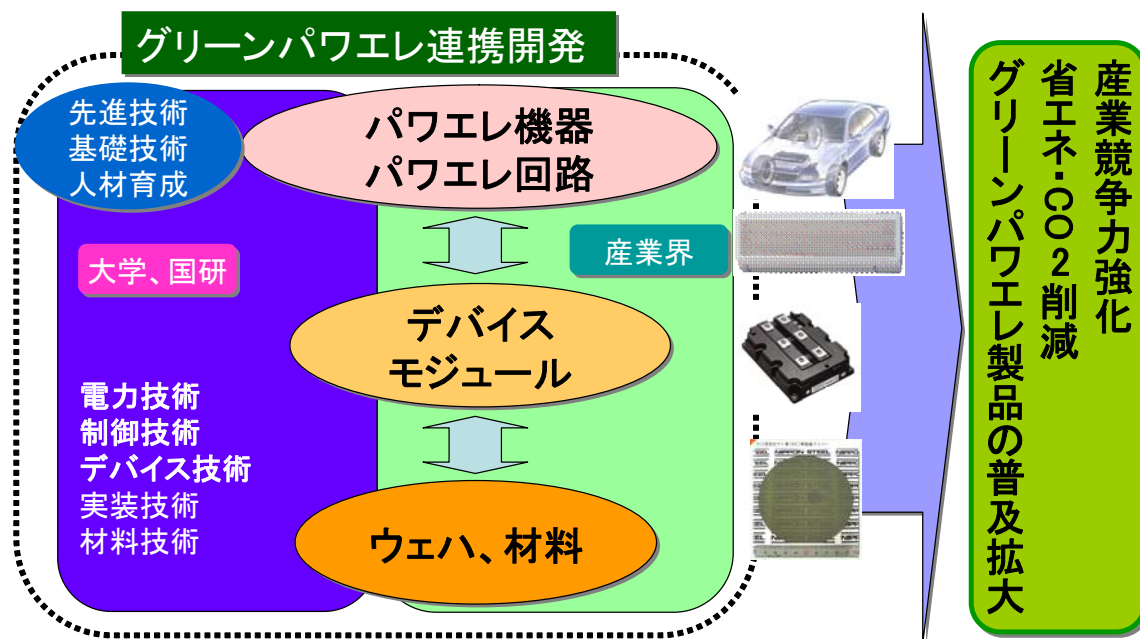


図7 パワーエレクトロニクス連携開発

パワーエレクトロニクス開発は電力技術とデバイス技術、それらをつなぐ制御技術の3つの技術の融合であり、学際的な開発の色彩が強い。先に紹介したように、欧米では CPES、EGPE といったパワーエレクトロニクスの包括的な開発を行うスキームが立ち上がり、まさにグリーンパワエレ開発が積極的に進められているとすることができる。一方国内では SiC 関連開発はこれまで、材料、デバイス側からの開発が主として行われてきた。最近、パワーエレクトロニクス機器メーカー、自動車メーカーの参画、連携による報告が出始めている段階である。SiC デバイスを単純に Si デバイスで置き換えるだけでは、デバイスだけの競争力強化しかならずパワーエレクトロニクス産業の真の競争力強化につながりにくい。地球環境に貢献しつつ産業競争力を生み出すためには、SiC の低損失、高速動作、高温動作を最大限に活かす最適な駆動法、回路技術、実装技術、特徴を活かした新たな機器応用の創出等が不可欠であり、デバイス、材料側からのアプローチでは困難な課題である。このような新しい技術を取り入れたパワエレ機器開発を進めて行くと、場合によっては機器開発側からデバイス側に特性改善を要求することも予想されるとともに、さらにウェハ、エピ材料にまでさかのぼって解決すべき課題が発生する可能性がある。強いグリーンパワエレ産業育成には、このように部品を組み立てるだけでなく、各技術分野のシナジー効果が必須である。

そこでグリーンパワエレが国際競争力をつけるためにも、従来の材料、デバイスメーカーに加え、応用機器メーカー、パワーエレクトロニクス機器ユーザを巻き込んだ開発、機器側が主導する開発が不可欠で、このような技術開発を今後一層推進させるべきであり、支援を要望する。

パワーエレクトロニクスはエレクトロニクス産業を支える基盤技術であるが、一般には、これまであまり注目を浴びてこなかった。近年地球環境問題、省エネルギー問題に関係し、たとえばインバータエアコン、HEV 車、太陽光発電パワコンなどインバータに代表されるパワーエレクトロニクスが注目を浴びるようになってきた。また、パワーエレクトロニクス、パワーデバイスは日本が、国際的に見ても強い分野である。ただエレクトロニクス全体から見ると規模が小さいこともあり、LSI、光半導体、高周波デバイスに比べると、パワーエレクトロニクス技術やパワーデバイス技術、材料技術の大学、国研での教育、研究体制は十分とはいえず、今後も環境問題の重要性が増すことと、その中でパワーエレクトロニクス分野への期待が高まることを考慮すると、当該分野への教育、研究に対する重点的

な支援が必要になる。国のレベルでの支援を要望したい。

6-2 SiC パワーデバイス・パワエレ機器応用技術開発

これまでパワーSiC デバイスの応用開発は、主として産業用モータ駆動用を想定したインバータコア技術開発が行われてきた。SiC パワーデバイスは産業用モータ駆動だけでなく、図8に示したように広い分野への展開が期待される。そこで、今後消費電力の大幅増大が見込まれる情報通信機器のグリーン化を目指した高効率電源、太陽光発電システムにおけるパワーコンディショナー、風力発電、分散電源用電源機器、さらにはエアコンなどの民生機器、今後普及拡大が見込まれるハイブリッド自動車、電気自動車など、具体的な応用をターゲットとしたデバイス、機器応用技術開発を提案する。

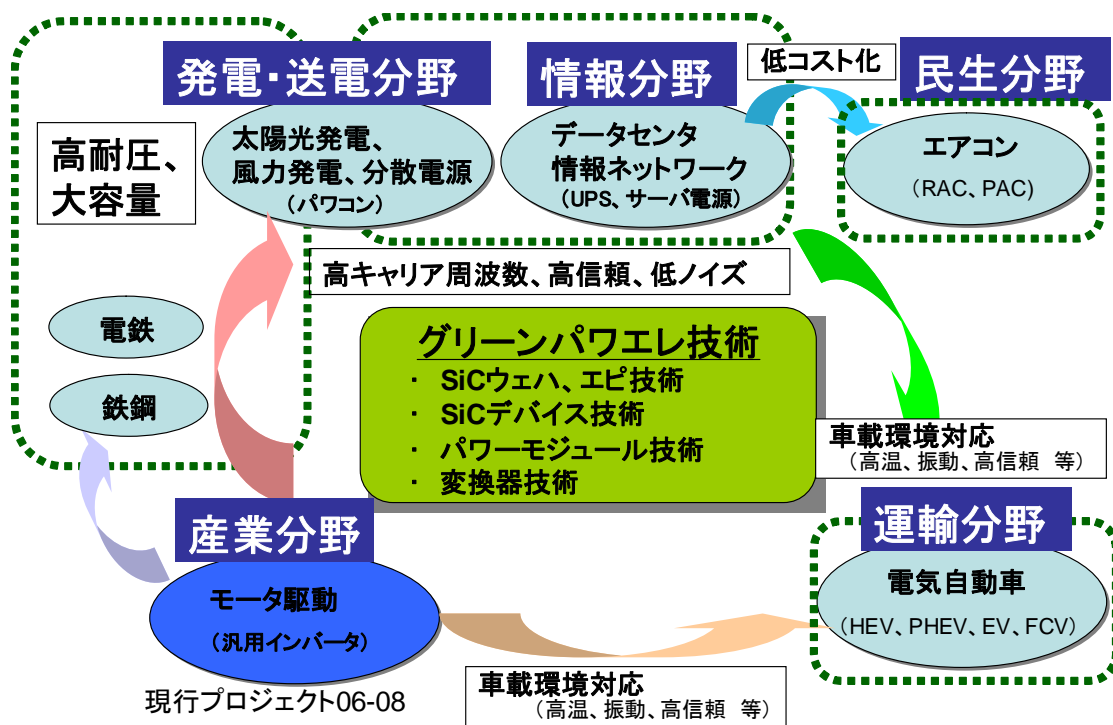


図8 パワーデバイスの応用展開

また、国内では産業用のkV級デバイスの開発が先行的に行われ、世界的に見てもその開発はトップレベルにある。ところが電鉄、鉄鋼といった基幹産業に向けた、高耐圧デバイス(6.5kV以上)の開発は、海外に対し遅れているといわざるを得ない。高耐圧デバイスはデバイスの市場規模をだけを考えると大きなものではなく、これまでのようにメーカー主

導では開発が進みにくいことが考えられる、しかし社会に及ぼす影響、及び極限的な材料、デバイスの開発であり、さらに国内技術力向上につながり波及効果大きい。中長期にわたる課題としての取り組みが必要である。

6-3 SiC パワーデバイス製造装置技術開発

SiC パワーデバイスの製造装置に関しては、従来の Si パワーデバイスの製造装置の多くを流用できるものの、エピタキシャル成長、高温イオン注入置、イオン注入後の活性化アニールなど Si プロセスでは用いない高温処理が必要とされる SiC デバイス特有プロセスがあり、SiC 専用のプロセス装置が必要なる。現在試作レベルであれば対応する装置は市販されているものの、SiC パワーデバイスの本格量産に必要な高スループットを実現できる設備はその開発が遅れている。このままでは SiC パワーデバイスの普及、グリーンパワエレの普及を阻害する要因になると認識している。そこで、前記のデバイス、機器応用技術開発と並行した、SiC パワーデバイス特有プロセス用の量産装置の開発が必要と考える。

6-4 基板エピの高品質、大口徑、低コスト化への取り組み

グリーンパワエレの基盤となる SiC ウェハの量産に関わるノウハウの蓄積においては一定量の基板を継続的に生産することが不可避であることから、或る程度の規模で基板事業をスタートする必要がある。事業スタートに当たっては、基板に関連する品質課題の整理を行い、基板メーカーとデバイスメーカーの間で品質改善に関してロードマップを共有すること、基板市場の規模と立ち上がり時期を的確に予想することが重要である。SiC 基板の製造に関しては、これまで研究設備を流用して対応するのが主であったが、本格的に量産を開始するに当たっては、結晶成長～基板加工～エピ成膜の全工程において設備の見直しが必要と考えられ、Si をはじめとする他半導体分野から設備技術を導入する必要があると考えられる。基板径に関しては、実用化レベルの 4 インチが市販されているものの、デバイスの低コスト化を考慮すると高品質化とともに 6 インチもしくはそれ以上の大口徑化、及び現在主流の昇華法に変わる成長法、新たな加工法にかかる研究開発も必要であり、継続的な技術開発への支援を要望する。

基板、材料に関する研究開発はこれまで国研、メーカーが主導してきたが、今後基板、材料に関する高品質、大口徑、低コスト化の研究開発を促進する上で、人材育成、材料基礎研究の充実が望まれる。そのため大学での基板、材料関連研究への支援を要望する。

6-5 標準化の推進

標準化は新しい技術、製品の普及には不可欠な課題である。パワーエレクトロニクスはワールドワイドに展開される技術、製品であり、その意味で世界レベルの標準化はより重要である。これまでは先行する欧米が中心になった活動が行われていたに過ぎないのが現状である。国内産業競争力を強化し、海外に拡大するためにも基板、各種評価方法、デバイス、機器まで幅広く、国際標準化でイニシアティブを取るような取り組みが必要である。

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄