

SiC 及び関連ワイドバンドギャップ半導体研究会企画
「低炭素・脱石油社会実現に貢献する SiC パワーデバイス開発の現状」
富士電機 AT (株) 上野 勝典

SiC、GaN を中心とするワイドバンドギャップ半導体を用いたデバイスは、電力用途であるインバータなどの電力変換機器などのスイッチング用パワーデバイスへ適用されることで、従来のシリコンデバイスと比較して、大幅な省エネルギーが実現できるとして、将来の低炭素化へ向けて期待されてきた。近年では、地球温暖化、化石燃料の枯渇といった地球規模の環境危機が叫ばれる中で、ますます重要度を増してきている。その中で、いよいよ市場に SiC デバイスが出始め実際の製品に使われ始めた。ショットキーバリアダイオード (SBD) は、すでに数 10 億円のマーケットを形成しており、現状ではサーバー用電源など小体積で高効率性が要求される限られた用途のみであるが、今後のコストダウン、性能向上とともに、急激に市場が広がっていくものと期待される。そこで、このシンポジウムでは、前半に各方面のデバイスユーザーからの期待と要望、今後の製品への適用検討状況を中心に講演をいただいた。それに続いて、実際のデバイスの開発状況、製造に関わるプロセス、物性制御の現状、また量産をにらんだ半導体製造装置の現状と、単結晶ウェハの動向について講演いただくことで、応用からデバイス開発の全体を把握し、今後の進むべき方向を議論することを目的として企画した。なお、このシンポジウムではもっとも実用化の近い SiC を中心にプログラムを構成したが、さらにその先のデバイスとして期待される GaN を用いたパワーデバイスの開発状況も織り交ぜた。

本シンポジウムは「SiC 及び関連ワイドバンドギャップ半導体研究会」が企画したもので、冒頭に同研究会の代表幹事である播磨氏 (京都工繊大) より、日本のエネルギー戦略におけるワイドバンドギャップ半導体への期待について簡単に紹介された。次に自動車分野から渋谷氏 (日産自動車)、産業分野から山田氏 (安川電機) にそれぞれの分野における SiC の適用検討状況の紹介があり、清水氏 (首都大学東京) からはアプリケーションに組み上げる場合の検討すべき技術課題が提示された。自動車分野では、ハイブリッド自動車はすでに市場投入されているが、今後の更なる CO₂ の排出抑制に向けて、EV、燃料電池車が出てくることを想定して、インバータのより小型で高効率化が達成可能な SiC の適用を検討している。日産ではポリシリコンと SiC のヘテロ接合を利用した SBD の実車試験を行っており、ビデオでその様子が紹介された。この SBD を用いたインバータでは、インバータ体積を減らすと同時に発生損失を 20% 低減できるという結果を得ている。自動車の場合には、発進時や巡航走行などの異なるシーンでの温度上昇が大きく異なることから、これらを最適化して全体の小型化をはかることが課題とされた。山田氏は、従来使用されているシリコン IGBT とシリコンファーストリカバリダイオード (FRD) に換わって SiC のパワー MOSFET および SBD を用いて実際のインバータ動作試験を行い、その課題について議論した。SBD を用いることで従来に対して逆回復電流がほとんど無くなり、IGBT のターンオン損失、FRD の逆回復損失が大幅に低減され、さらにノイズの低減が期待された。その一方で、スイッチングの高速化に伴う高 dV/dt、また SiC デバイスの高出力容量などの影響で、大きな放射電磁ノイズが問題となると指摘した。清水氏は、これまではデバイス開発に主眼が置かれているが、実際の電力変換装置を構成するには、インダクタやキャパシタなどの受動部品や高密度パッケージング技術など周辺の技術を同時に開発していくべき、と提案した。特にインダクタやキャパシタは全体の半分近いコスト、サイズを有しており、高速化対応と合わせて、より高性能な受動部品の開発が必要とした。また、高温、高速での動作が要求されるゲート駆動回路も、ワイドバンドギャップ半導体デバイスに合せた技術が必要との指摘がされた。

これらのユーザーからの期待を背景にして、今泉氏 (三菱電機) は、自社で開発している高耐圧 DMOSFET、SBD の特性について紹介するとともに、今後の課題を示した。試作したインバータは 11 kW 級のもので、小型化を実現しながら損失を 70% に減らせることを確認した。MOSFET のオン抵抗

は MOSFET のチャネル抵抗が 50% を占めていることから、MOS 特性の更なる改善、またゲート抵抗をさらに下げることでスイッチングロスがさらに改善するものの、ノイズが急激に増大することからノイズ対策の必要性が指摘された。一方、さらに低コストで優れた特性の期待される GaN デバイスについて、加藤氏（古河電工）から、開発状況の紹介をした。加藤氏は AlGaIn/GaN 構造 HFET をパワーデバイスに応用している。これまで、シリコン基板に 5 μm 以上の厚膜を形成する技術を開発することで、1.7 kV 耐圧を実現している。従来の HFET ではノーマリオンが困難なことから、パワーデバイス用途を念頭においた MOSFET を試作し、サファイア上ながら、1500V/2A の素子ができることを示した。今後は、シリコン基板での開発、電流コラプスの抑制、大容量化が課題とした。前半の講演をまとめると、いよいよ実用段階に入って、実際に使われる場での試験が繰り返されて課題が明確になりつつある。現状では、従来のシリコンデバイスを単に置き換えるだけのものが多いが、今後高速性、高温動作を生かすためのノイズ対策、冷却技術などの周辺技術が重要度を増している。

後半では、主に製造プロセスに関わる技術として、エピ技術、イオン注入技術を木本氏（京大）MOSFET を実現する上でもっとも重要な界面制御技術を先崎氏（産総研）量産対応製造装置開発状況を岡氏（アルバック）最後に単結晶ウェハ技術の開発状況を藤本氏（新日鉄）から、講演いただいた。これまでの開発によって、パワーデバイスで必要とするエピ層の不純物濃度制御、成長速度、均一性は十分要求に耐えられるレベルに達してきた。特に成長速度では 250 $\mu\text{m/hr}$ の高速成長も開発され、低コスト技術が確立されつつある。エピ成長に伴う結晶欠陥の分類、発生メカニズムと低減技術も進展し、積層欠陥（SF）の数も 10 個/ cm^2 程度に低減されてきている。パイポーラ動作に影響を与える基底面転位（BPD）のさらなる低減や、キャリアライフタイムの制御が必要となる。木本氏らは $Z1/2$ センターがライフタイムキラーとなっていることをつきとめ、酸化性雰囲気アニールすることでその準位が消滅しライフタイムが増加することを発見した。SiC の MOSFET 応用デバイスでは、酸化膜中の残留カーボンに起因した SiO_2 との界面準位密度によって、FET の移動度やしきい値制御、および信頼性がもっとも重要な課題となっている。先崎氏には、SiC は化合物半導体であることから、面方位の選択、酸化前後の処理によってさまざまな組み合わせが試されており、それを総括的にまとめていただいた。ウェット酸化では MOS チャネル移動度には良い影響を与えるが、絶縁性や信頼性においてやや劣る。酸化後の H_2 処理は酸化膜の全体の特性向上に有効であることが示された。チャネル移動度では $30\text{cm}^2/\text{Vs}$ から $250\text{cm}^2/\text{Vs}$ と大きな値が出るようになっているが、実用化へ対応するには今後のよりいっそうの改善が必要である。これまでの SiC デバイス開発は、ウェハ口径が最大でも 2 インチ程度であることや、材料が高価であったため、小片での試作が中心であったが、ウェハ口径が 3 ~ 4 インチが入手可能になってくるとともに、量産を念頭においた製造装置を導入する動きが広がってきた。それにともない、大口径で、複数枚数のバッチ処理、短時間処理、均一性の確保を可能とする装置の要求が強まっている。岡氏からはこのような量産向け製造装置として、イオン注入装置（高温、高エネルギー対応）、高温アニール装置（1800 対応）、酸化膜処理装置（高温 NO アニール）、ドライエッチング装置（SiC 対応）の開発状況を紹介していただいた。特に高温、高エネルギーイオン注入は、不純物の熱拡散が困難な SiC においては不可欠な設備であり、高温の多段注入が長時間となるため、スループットの更なる向上が期待される。最後にもっとも重要な SiC 単結晶基板の状況について藤本氏に概観いただいた。上述のように、最近では 4 インチまで開発されてきており、数年後には 6 インチが計画されている。従来キラー欠陥とされたマイクロパイプ（MPD）はほぼ皆無となり、そのほかの各種結晶欠陥に関心が移ってきている。その発生原因と成長条件の関連について更なる研究が必要である。特に異なる転位間の相互作用を考慮することが必要との指摘がされた。なお、新日鉄では 4 月より関連会社にて、月産数 100 枚体勢での事業化を行う、とのアナウンスがあった。従来、国内でもいくつかのウェハメーカーがあったが、本格的な量産体勢が国内に整備されるのは、国内デバイスメーカーにとって朗報である。今後の量産化へ向けてさらにはずみがつくことが期待される。

このシンポジウムでは会場が 300 名前後の参加者でほぼ満席となったうえ、マスメディアでも開催翌日には早速詳しく報じられるなど(4/2 日経ウェブサイト;「SiC パワー素子を使いこなす技術確立を急げ」)、幅広い関心と高まる期待を裏付けるものとなった。

本シンポジウムの開催にあたり、ご講演いただいた皆様、ならびに企画段階での有意義なご議論をいただきました播磨代表幹事をはじめ、SiC 及び関連ワイドバンドギャップ半導体研究会幹事諸兄に感謝いたします。