

審査の結果の要旨

氏名 母鳳文

本論文は、ワイドバンドギャップ半導体としてパワーデバイスへの適用に期待の大きい炭化ケイ素 SiC に関し、新しい表面活性化接合 (SAB) による接合の可能性を明らかにしたものである。論文の独自性は、標準的な表面活性化手法と Si を介在させた表面活性化手法を、 SiC と SiC 、 Si ないしは SiO_2 それぞれの組み合わせに対して最適条件を見出し、これを適用することで、接合強度・接合信頼性の向上を実現した点、またその結果に基づき、従来の接合では難しかった極薄パワーデバイス、 SiC だけで構成される All- SiC の MEMS を製造する新規プロセスを初めて提案した点にある。

さらに、炭化ケイ素 SiC の単結晶ウエハについては、同じ(001)面であっても、 Si 面と C 面の裏表があり、化学的特性が全く異なることが知られている。本論文では、この両面における接合特性を詳細に比較し、 SiC の表面活性化接合の基本的メカニズムを明らかにした点も特筆できる成果である。

実験では、まず、 SiC-SiC 、 SiC-SiO_2 、および SiC-Si の組み合わせについて、 Ar イオン衝撃を使った標準的な表面活性化接合、 Si を含んだ Ar イオンビームによる表面活性化、 Si 中間層と Fe イオンを組み合わせた拡張表面活性化手法、最後に Si 中間層のみによる活性化接合を適用した。その結果、 Si を含んだ Ar イオンビームによる表面活性化で接合強度の 30%の向上が得られ、実用強度に達したことが示された。この理由を上記の SiC の結晶面の違いによる接合特性の比較、モンテカルロシミュレーション、接合界面の透過電子顕微鏡観察、EDX による界面組成の分析、等から明らかにした。その内容の骨子は次のとおりである。まず、1) イオン衝撃によって、 SiC の表面からは Si が優先的にスパッタ除去され、 SiC の表面は C リッチとなる。2) そのような状態で接合された界面には 4nm 程度の厚さの SiC のアモルファス層が形成されるが、その界面において、 Si の濃度は低くなっている。3) また、そのため SiC 間の接合は、 C-C の結合が主体となり、そのままでは強度は高くない。4) さらに 1000°C以上の加熱で界面では酸化が進行する。これに対し、 Si を含んだ Ar イオンビームによる表面活性化を適用することで、この Si 欠如層の Si の欠如は 30%から 20%程度へ回復し、下記のような効果が得られる。1) アモルファス層の厚さが 4nm から 5nm 程度増加する。2) 加熱によっても界面の酸化は進行しない緻密な界面が形

成される。その結果として、30%あまりの接合強度の増加が得られる。

また、 SiO_2 との接合では、 Si の中間層が有効であることが示された。この Si 内には Fe の拡散が見られるのが通常であるが、 Fe を含まない Ar による活性化により、十分な接合強度が得られることを新たに示した。

本論文では、以上の成果をもとに、下記のような極薄パワーデバイス、および、All-SiC MEMS 製造の新規プロセスを提案した。

すなわち、極薄デバイスについては、高品位 SiC 単結晶ウエハの薄化のための SiC キャリアウエハとの直接接合ならびに分離プロセスを行うことが必要である。しかし、従来の親水化処理に基づく SiC のウエハ接合はいずれも 1000°C 近い高温処理が必要で、かつ界面には SiO_2 層が形成されるため、このような用途に適用することができない。ここに、本提案手法を有効に適用することが期待される。また、薄型化したデバイスの裏面の電極処理を行うためには、高温耐熱性のある接合が必要であるが、これも従来の接合では対応できない。この場合には、スルーホールを設けた Si 支持基板をデバイス基板に直接接合することで解決出来る。この際も、従来の SiO_2 を介在させるような接合では、高温処理に耐えることはできないので、やはり、提案の表面活性化手法を適用する。これについては、実際、接合界面が高温耐熱性、化学エッチングに対する耐性があることも実験的に検証している。一方、All-SiC MEMS では、通常の Si -MEMS であれば、 Si のバルクマシニングでさまざまな MEMS デバイスが構成されるのに対し、 SiC のバルクマシニングは一般的に難しく、実際、All-SiC MEMS は実現していない。これを浅い加工を施したサポートウエハを接合することで代替すれば All-SiC MEMS が実現できる。すなわち、これについても、本論文で提案する直接接合が有効である。

なお、以上のプロセスは新規のアイデアに基づくものであり、将来の産業界への貢献も大きいと期待できることから、特許化の検討を進めている。

以上のように、本論文では、これまでの手法では困難であった SiC 単結晶ウエハの低温接合を複数の表面活性化手法を用いて実現するとともにその接合メカニズムを実験的、理論的に明確にしたものであり、また、その工学的適用についても新しい可能性を示したものである。したがってその研究の独創性は極めて大きく、また、工学の発展に寄与するところは多大であると判定された。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。