

SiC レクチャーシリーズ

9. SiC プロセス技術 (1) イオン注入

SiC プロセス技術 (1) イオン注入

SiC は不純物原子の拡散係数が非常に小さく、ドナー、アクセプタなどのドーピング原子の熱拡散プロセスを用いたデバイス構造の作製(pn 接合の形成)が出来ません。このため、SiC デバイスの作製には、イオンの注入プロセスによるドーピング技術が使用されます。SiC へのイオン注入では、n 型領域に対しては低抵抗化が容易なドナー元素である窒素(N)やリン(P)が、p 型領域に対しては、アクセプタ元素としてアルミニウム(Al)が一般的に使用されます。なお、Al イオンの注入に用いる原料は、通常、固体であり、高濃度の Al 注入を安定して行うには多くのノウハウを要します。SiC は、イオン注入によって n 型および p 型ともに高濃度の結晶が得られ、これらはデバイス作製における大きなメリットです。

SiC へのイオン注入の際の加速電圧は数百 kV 程度が一般に用いられ、対応するイオン注入領域の深さは数百 nm のオーダーであり、比較的浅いです。SiC では、注入後のドーピング元素の濃度の深さ方向分布は、高温プロセスを経てもほぼそのままの形で保持されます。これらを考慮し、要求される特性を実現するデバイス構造を得るためのイオン注入プロセスの設計を行うことになります。加えて、高濃度のイオン注入を行う場合には、特別な配慮が必要です。注入量が大きい場合、SiC の結晶が元の結晶構造を維持できない程にダメージを受け、以降のプロセスにおいて増速酸化や過剰な昇華などにより障害になることがあります。電氣的に低抵抗な p 型コンタクト領域の形成時などの高濃度の Al 注入を必要とする場合は、ウエハの温度を上げてイオン注入を行うことによって注入ダメージによる SiC 結晶の多結晶化や非晶質化を大幅に抑制することができます。なお、高濃度イオン注入が結晶に与えるダメージの抑制については、比較的低い温度で効果が得られることが分かっています。

イオン注入を行った直後は、高エネルギーの注入イオンによって、結晶中に多くの微小欠陥が形成されており、また、注入原子が適切に格子位置を占めていないため、注入領域の電気抵抗は高いです。イオン注入を行った SiC ウエハに対し、不活性ガス雰囲気中で高温(通常は 1700℃以上)の活性化アニールを行うことによって、p 型や n 型の低抵抗な領域が形成されます。SiC ウエハを用いたデバイスの作製プロセスにおいて、活性化アニールが最も高温を必要とするプロセスであるため、イオン注入および活性化アニールはウエハプロセスの早い段階で行われます。

SiC の活性化アニールは高温で行われるため、対策を行わない場合、表面の平坦性が劣化します。デバイス構造は SiC エピタキシャル基板の表面の浅い領域に形成するため、表面の平坦性を損なわずに、活性化アニールを行う必要があります。活性化アニールの際に、SiC 表面を平坦に保つための表面保護膜としては、炭素を成分に形成された膜が一般に用いられます。炭素保護膜の形成法については、表面に樹脂を塗布し高温で固める方法、スパッタ法により炭素膜を堆積する方法など、複数のプロセスが報告されていますが、三菱電機では、得られる炭素保護膜が均一で高純度となるように独自の CVD 法を開発して高温アニールに適した炭素保護膜を形成しています。

参考として、イオン注入および活性化アニールを行った後の SiC 表面の形状を数件紹介します。

図 1 に、温度を変えて高濃度の Al 注入を行い、活性化アニールを行った後の SiC 表面の形状を示します。図 1 の(A)および(B)は、それぞれ SiC 基板の温度を 150℃、200℃として Al 注入を行ったものです。150℃では表面が多結晶化しているのに対し、200℃では SiC の結晶が保たれ、ステップが形成されています。これは 200℃で注入することにより注入による結晶の崩れが、イオン注入の最中にある程度回復していることを示しています。

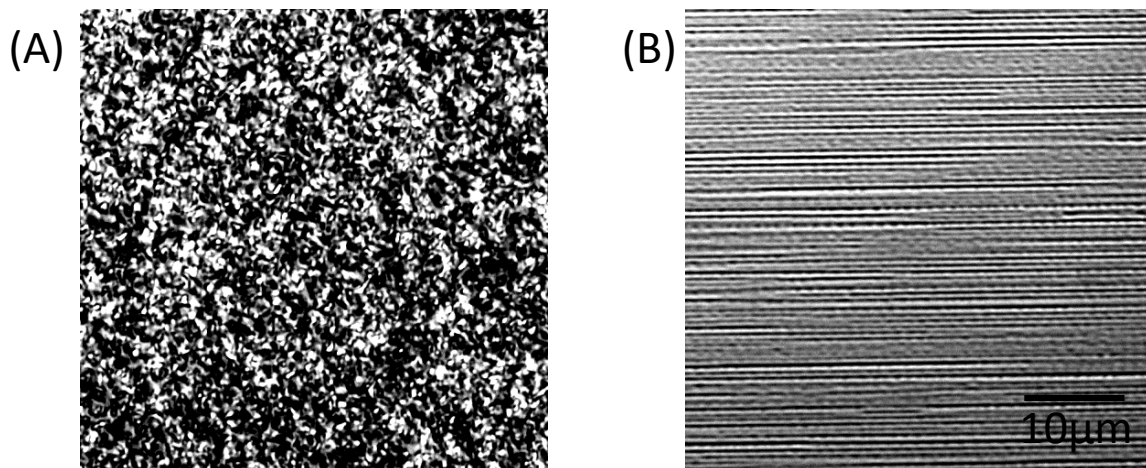


図 1 温度を変えて高濃度 Al イオン注入を行い、活性化アニールを行った後の SiC 表面写真
(A)イオン注入時の温度 150℃ (B)イオン注入時の温度 200℃

図 2 に、CVD 法により形成した炭素保護膜の有無による活性化アニール後の SiC 表面の AFM (Atomic Force Microscope、原子間力顕微鏡)像を示します。保護膜が無い場合、SiC の表面には 20～50nm の高さのジャイアントステップが形成されており、平坦性が劣化しています。表面の凹凸はデバイスの特性に影響し、例えば、MOSFET のゲート酸化膜の致命的な電流リークの原因となり得ます。他方、保護膜を堆積して活性化アニールを行ったものは、表面の RMS (Rooted Mean Square)値として 0.3nm の平坦な表面が得られています。CVD 保護膜にはピンホールなどのマクロ欠陥もほぼ存在せず、非常に良好な表面が得られます。なお、炭素保護膜の除去は熱酸化や酸素プラズマ照射などにより容易に行うことが可能です。

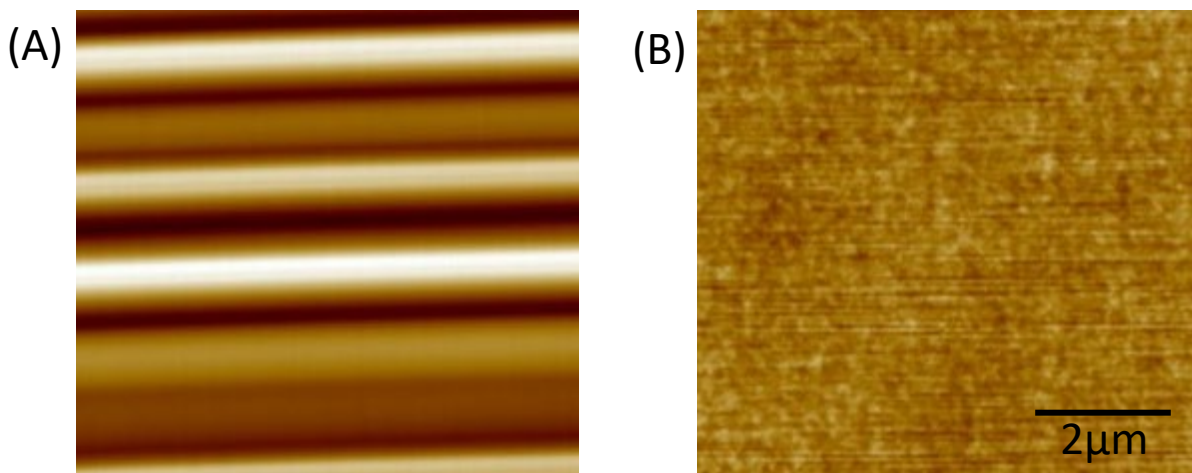


図 2 活性化アニール後の SiC 表面の AFM 像
(A)炭素保護膜が無い場合 (B)炭素保護膜がある場合

結晶は原子が規則的に並んでいるため、結晶軸の方向にイオン注入を行うと、それに沿ってイオンが深くまで注入されます(チャネリング注入)。この現象を利用し、深い領域まで pn 接合のピラー構造を形成し、SiC による SJ MOSFET (Super Junction MOSFET)を作製する試みがなされています。SJ MOSFET は、Si では既に製品化がなされている構造であり、オン抵抗を大幅に低減できることが示されていますが、SiC では未だ研究開発の段階にあります。チャネリング注入ではイオンビームの方向を厳密に結晶軸の方向に合わせる必要があることなど、技術的な課題が多く残されていますが、SiC による SJ MOSFET が実現できれば、特に高耐圧 MOSFET にて大幅に性能を向上させることができるため、開発の進展が期待されています。

以上
2025 年 1 月