SiC パワー半導体向け熱処理装置の開発

Development of Heat Treatment Equipment for SiC Power Semiconductors

大東隆文　T. DAITO　青柳圭太　K. AOYAGI

SiC power semiconductors are attracting significant attention as next-generation power conversion devices. JTEKT THERMO SYSTEMS CORPORATION provides a range of furnaces designed for SiC-specific processes, including activation, oxynitridation, and contact annealing. These furnaces can perform high-temperature processing of SiC semiconductors, enhancing manufacturing efficiency and reducing costs. This report outlines the technical features and advantages of the activation annealing furnace.

Key Words: heat treatment, activation annealing, SiC power semiconductors, vertical furnaces

1．はじめに

近年，電気自動車や再生可能エネルギーの普及に伴い，高効率なパワー半導体の需要が増加している．従来は加工性に優れ，コスト面でも利点のあるシリコン（以下，Si）がパワー半導体の主要材料として用いられてきた．しかし，Si の物性には限界があり，特に高温環境や高電圧下での性能に課題がある．そのため，次世代のパワー半導体の材料として，シリコンカーバイド(以下，SiC）や窒化ガリウム（以下，GaN）が注目されている．中でも SiC は，自動車や鉄道，エネルギー分野で機器の小型化，省エネルギー化の実現に向けた利用が期待されている．

SiC は，広帯域ギャップ（Wide Band Gap）半導体材料であり，高電圧耐性，低電力損失特性，優れた熱伝導性を有するため，従来の Si パワー半導体に比べて高効率で信頼性の高い電力変換が可能である．そのため，電気自動車のインバーターや充電器，再生可能エネルギーシステムのインバーターなどで利用が進んでおり，システム全体の効率向上によってエネルギー消費の削減が可能である．このように，次世代パワー半導体は前述の利用分野を中心に需要が急速に高まっており，市場規模の拡大が予測されている．

半導体の品質は製造工程内の熱処理が重要な役割を果たす．SiC パワー半導体の製造工程（**図 1**）では，Si パワー半導体と比較して高温の処理が必要であり，熱処理技術によってデバイスの性能が大きく左右する．特に活性化アニール工程は SiC デバイスの性能，信頼性，歩留まりに影響する重要な工程である．活性化アニールとは，イオン注入によりウェハ内に打ち込まれた不安定な位置の原子を高温アニールで結晶格子位置へ移動させ，

図 1　SiC パワー半導体製造工程の一例
Example SiC power semiconductor manufacturing process

電気的に活性化させる熱処理のことである（**図２**）．SiC の場合，一般的に Ar 雰囲気中で 1 600 ～ 1 900℃ の高温熱処理が必要となる．

したがって，高品質な SiC パワー半導体製造には，高温での精密な温度制御や雰囲気制御の技術が不可欠である．当社の SiC パワー半導体向け製造装置には**図１**中の朱色部の工程に対応した装置のラインアップがある（**図３**）．本報では Si パワー半導体には求められない高温処理が必要となる SiC 活性化アニールにおいて，要求される温度性能を満たしつつ，高い生産性を有する縦型炉を開発した概要を紹介する．

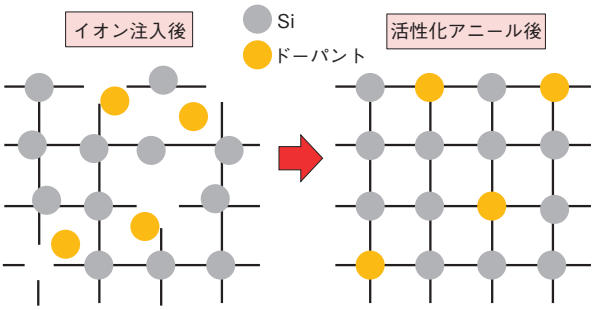

図２　活性化アニール工程
Activation annealing

2. 活性化アニール用縦型炉

2.1　装置の仕様

本節では SiC パワー半導体製造の活性化処理工程で使用する当社装置の仕様と技術を紹介する．

2.1.1　温度性能の向上

本装置は最高使用温度 1 900℃ での温度制御が可能であり，ϕ6 インチおよび ϕ8 インチのウェハサイズに対応した縦型炉である．高温度領域の温度性能として，昇温後のオーバーシュートを 1 900℃ に対して 2.0℃ 以内に抑えており，安定時の温度分布は ± 1.5℃ 以内で制御可能である（**図４**）．また，同一処理の繰り返しにおける温度再現性は 2.0℃ 以内（**図５**）であり，プロセスの信頼性および製品品質の均一性を維持している．生産性に寄与する一定時間の処理量（以下，スループット）向上のためには，急速な昇温特性および降温特性への対応が必要である．そのため，昇温特性と安定特性とのバランスを考慮して断熱材の厚みを熱流体解析にて設計した結果，最高昇温レート 100.0℃ /min を実現し，降温特性は従来比で 20% 向上した．さらに，炉の開口部付近（炉口）を耐熱部品にすることで高温下でのサンプル投入・取出が可能となり，全体の処理効率が向上した．

コンタクトアニール用ランプアニール装置
（RLA-4100-V）

活性化アニール用縦型炉
（VF-5300HLP）

ゲート絶縁膜形成用縦型炉
（VF-5300H）

図３　パワー半導体製造装置[1)]
Power semiconductor manufacturing equipment

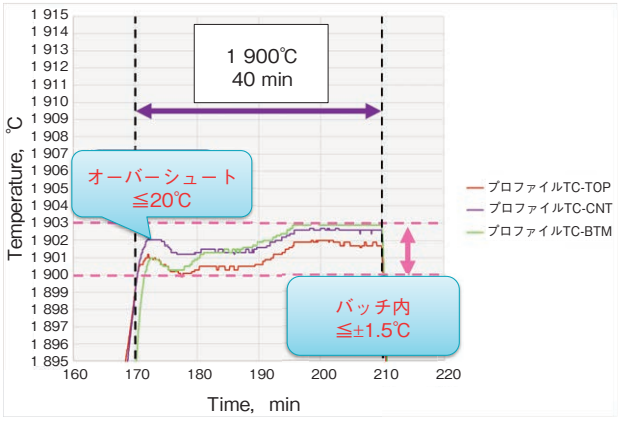

図4　1 900℃での温度制御データ
Temperature control data at 1 900°C

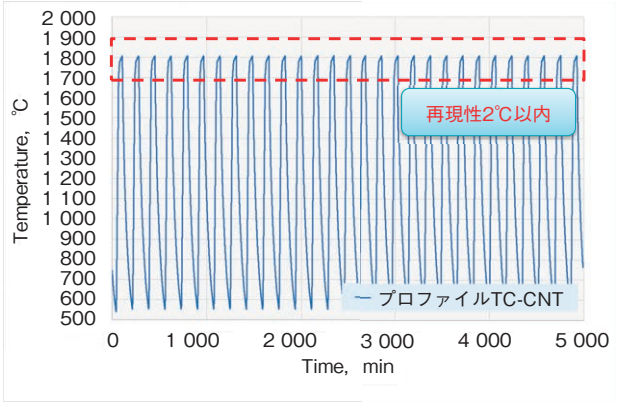

図5　再現性温度データ
Temperature reproducibility data

2.1.2　温度安定分布領域の拡大

生産性向上の課題として，ウェハ処理枚数の増加があげられる．2022 年まではウェハ 50 枚処理の仕様であったが，当社は熱流体解析技術（**図6**）を活用し，ゾーン数，熱電対数，ヒーター長の最適設計により，8 インチウェハ 100 枚の一括処理に対応可能な従来比 2 倍以上の均熱区間（330 mm ～ 660 mm）を確保した．これにより，スループットが 10.0 WPH（Wafer Per Hour）から 17.1 WPH へ約 60% 向上した．現在はウェハ 50 枚処理用のミニバッチ炉と，100 枚処理用のラージバッチ炉の 2 機種をラインアップしている．

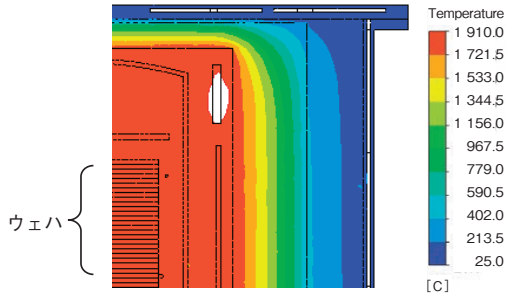

図6　熱流体解析（ヒーター設計）
Thermal-fluid analysis (heater design)

2.1.3　金属汚染の低減

半導体製造において，金属汚染の低減はデバイスの性能および信頼性の維持に重要な課題である．金属汚染は再結合中心の生成，リーク電流の増加，ゲート絶縁膜の劣化など，デバイス動作に深刻な影響を及ぼす．この課題に対し，当社では金属汚染低減技術を開発した．まず，ウェハを処理する装置内部の材料には石英とカーボンのみを使用し，メタルフリー構造を実現している．これにより，半導体デバイスへの金属汚染の影響を排除し，安定した品質の提供が可能となる．さらに，半導体デバイスの品質を安定させるため，炉内温度を定期的にメンテナンス可能な設計とし，炉内温度測定用の熱電対もカーボン部材で覆うことで金属汚染を防止している．

このように，装置はメタルフリー構造のため，装置起因による金属汚染の発生はない．しかし，外部要因として処理品や作業者などによる金属汚染の可能性は残る．このような場合，一般的には石英などの汚染された部品を取り外し，ウェットクリーニングによって汚染を低減する．これに対して本装置では，高温維持性能を活用し，多くの元素が固体として存在できない高温（例：1 800℃ 以上）で所定回数の加熱処理を行うことで金属汚染の低減を実現している．これにより，分解メンテナンスの頻度を削減でき，生産性の向上が可能である．

2.1.4　ウェハ脱落防止の対策

SiC ウェハは熱膨張および熱応力の変化が大きいため，処理中にウェハが滑り，保持しているボートから脱落する懸念がある．その対策として，ウェハの落下を防ぐ構造を備えた活性化アニール用縦型炉専用のボートを新たに開発した．

2.1.5　装置内酸素の除去

本装置は内部構造にカーボン部材を使用しており，高温処理時に酸素が存在するとカーボンと反応するリスクがある．そのため，本装置では酸素濃度の値を 20 ppm 以下での運用を徹底している．さらに，炉内の酸素濃度をしきい値以下に保ち，ウェハに吸着している不純物成分を離脱させる目的もかねてガス置換だけではなく，真

空パージも可能としている． なお，真空パージとは炉内のガスを一度真空状態にした後，再度ガスを充填する方法である．これにより，炉内の酸素濃度をさらに低減し，不純物の除去効果を高めることができる．

2.1.6 パーティクルの低減

半導体デバイスにおいて，パーティクルは品質および信頼性に重大な影響を及ぼす要因である．パーティクルとは微小な粒子やちりを指し，ウェハ表面に付着すると回路パターンの欠陥や電気的特性の劣化の原因となる．その結果，歩留まりが低下するため，パーティクルの低減が必要となる．当社ではカーボン部材の表面にコーティングを施し，発じんを抑えている．これにより，0.3 μm 以上のパーティクルを 30 個以下に低減している．

2.2 試し焼きサービス

当社では複数の試し焼き装置を社内に設置し，顧客が無償で試し焼きを実施できる環境を整えている．その目的は以下の二点である．

第一に，購入前の性能評価である．当社装置による試し焼きを通じて事前にデバイス評価をすることにより，購入後に所望の結果が得られないという懸念を解消している．

第二に，発注後の追加評価である．装置引き渡しまでに当社の試し焼き装置にて良品条件を事前に確立することで納入後の立ち上げ期間が短縮できる．これにより，装置引き渡し後の生産開始計画を立てやすくなったと顧客からの評価を得ている．

試し焼き装置には活性化アニール用縦型炉も含まれており，毎年多くの顧客が試し焼きを実施している．2022 年から 2024 年の過去 3 年間で 250 回以上の試し焼きを実施した．試し焼きでは顧客から提供されたサンプルの評価にくわえ，顧客との対話を通じて課題や要求を抽出し，それらを装置設計に反映することで装置の付加価値向上に貢献している．例えば，サンプルから発生する脱ガスが熱処理に与える影響を確認し，その影響を抑制する構造に改良した事例などがある．

当社の試し焼き装置は活性化処理にくわえ，トレンチラウンド化処理※や表面改質改善などの用途にも対応可能である．今後は SiC パワー半導体の生産拡大に伴い，装置導入の検討が増加すると予測される．相談と試し焼きの結果を確認し，顧客とともに良品の実現を目指す．

※トレンチラウンド化処理：半導体デバイスのトレンチ部分をラウンド化することでデバイスの性能や信頼性を向上させる処理．

3. 今後の展開

現在の活性化アニール用縦型炉に関して，さらなる生産性と品質の向上を図るため，当社が取り組んでいる重要な技術を以下に紹介する．

第一に，新たな搬送システムである．生産性向上を目的として搬送機構を見直し，複数の処理工程を装置内で同時進行させることで待機時間の削減を図る機構を開発中である．現状はウェハの熱処理と熱処理後の冷却，つぎのロットウェハの搬送などは一連の工程として順次実施していたが，新搬送システムでは，これらの工程を並行で実施できる．これにより，待機時間を削減し，従来比で 25% の生産性向上が見込まれる．なお，内部構造の改良は装置内スペースを有効活用しているため，本体設置面積に変更はない．

第二に，温度監視システムの導入である．従来は炉内の温度を確認する熱電対を定期的に挿入し，内部温度を管理していたため熱電対の脱着にダウンタイムが発生していた．この問題に対し，当社では放射温度計（IR：Infrared）を導入し，常時炉内温度を監視できる機能を開発中である（**図 7**）．これにより装置異常の早期検知が可能となる．さらに，アラーム機能を搭載し，多種のインターロックと連携させることで装置の保全管理を強化している．

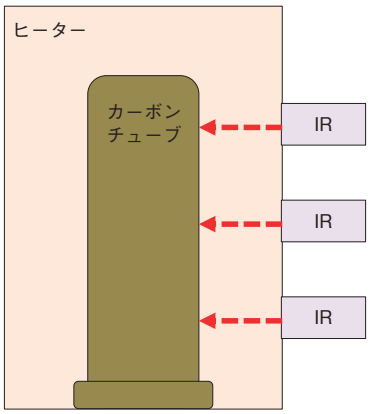

図 7 温度監視システム
Temperature monitoring system

4. おわりに

SiC パワー半導体製造には多様な工程があり，その中でも高温での熱処理は不可欠である．特に活性化アニール工程では，高温度での熱処理性能と高い生産性が求められる．この要求に対し，当社が開発した活性化アニール用縦型炉は，1 900℃ の高温処理，メタルフリー構造，酸素除去およびパーティクル低減機能を備えており，SiC パワー半導体の活性化アニール工程において高い生産性と品質の安定性を実現している．今後も性能向上と信頼性確保に向けた技術開発を継続し，SiC デバイスの量産化に貢献していく．

さらに，本報にて紹介した活性化アニール用縦型炉などの半導体製造装置だけでなく，当社では工業用熱処理装置や電子部品用熱処理装置など，多種多様な熱処理装置を取りそろえている．当社の技術および装置をご理解の上，ご活用いただけると幸いである．

参考文献

1）株式会社ジェイテクトサーモシステム：SiC 用縦型炉 8インチウェーハの 100 枚処理，技術情報，2023-01-30，https://thermos.jtekt.co.jp/tech/sic8100.html（参照：2025.05）．

筆　者

大東隆文*
T. DAITO

青柳圭太*
K. AOYAGI

*　株式会社ジェイテクトサーモシステム
半導体・開発装置部