

# STEMスループット向上のためのFIB自動化機能活用

Utilization of FIB Automation Function to Improve STEM Throughput

鶴見 大輔\*  
Daisuke Tsurumi

土井 友博  
Tomohiro Doi

鳥井 一輝  
Kazuki Torii

丸山 理絵  
Rie Maruyama

松川 真治  
Shinji Matsukawa

化合物半導体デバイスの開発・製造では、その出来栄や特性評価に原子レベルでの構造解析が求められる。この評価手法には走査透過電子顕微鏡（STEM）の活用が欠かせない。ところが、STEMの試料作製では集束イオンビーム（FIB）加工装置により試料厚を100 nm前後に薄くする必要があり、熟練の技術者が作業しても迅速に必要な試料数を作製できないという課題があった。これに対し我々はFIBの自動化機能を用いたスキルレス化、無人運転化による処理能力の向上を目指した。当社では多品種のデバイスを開発・製造しており、各デバイスの解析目的に応じた試料作製が必要だが、それぞれの試料作製工程で自動化条件を選定し、確立した自動化機能を組み合わせることで、迅速に多くの試料作製が可能な体制を構築した。これによりSTEMのスループットを向上し、迅速に試作と評価のサイクルを回すことで、開発加速、品質向上を進めている内容を報告する。

In the development and production field of compound semiconductor devices, atomic-scale structural analysis is essential for the evaluation of their performance and characteristics. For this analysis, the use of a scanning transmission electron microscope (STEM) is indispensable. However, it is necessary to control the sample thickness to be around 100 nm using a focused ion beam (FIB) milling system, and the required number of samples could not be prepared quickly even by highly skilled engineers. In order to solve this problem, we have improved the processing capacity by introducing unmanned foolproof operation using the automated functions of the FIB milling system. Since a wide variety of devices are being developed and manufactured in our company, it is necessary to prepare various kinds of samples according to the analysis purposes of each device. We have established a system that enables the quick preparation of a large quantity of samples by using the automated functions in combination with selected conditions in each sample preparation process. Thus, we have succeeded in improving STEM throughput, enabling quick evaluation to accelerate development and quality improvement.

キーワード：化合物半導体デバイス、構造解析、FIB自動化機能、STEM、スループット

## 1. 緒言

大容量・高速通信の需要に対応する幹線系、メトロ系光通信システム、スマートフォンやその基地局用無線通信などの情報通信網では、半導体レーザやフォトダイオード、高電子移動度トランジスタなどの化合物半導体デバイスが広く使用されており、現代社会において欠かせない役割を担っている<sup>(1)</sup>。今後もIoTの普及やクラウドサービスの増加などによりネットワークの急速な大容量化が見込まれるため、これら化合物半導体デバイスは更なる発展が期待されており、研究開発の迅速化や品質向上が求められる。近年の化合物半導体デバイスは、異なる機能を持つ構造を1つの素子内に高密度に集積する<sup>(2)</sup>など、一層複雑化・微細化しており、高精度なエピ・プロセス技術が要求されるため、試作と出来栄評価のサイクルを速く回す必要がある。そのため評価に活用される構造解析技術は極めて重要な要素である。この構造解析手法としては、近年、原子レベルの空間分解能を有する走査透過電子顕微鏡（STEM:

Scanning Transmission Electron Microscope)<sup>\*1</sup>が不可欠となっている。しかし、STEMは試料の作製に時間を要し迅速に必要な試料数を解析できないという課題があった。これは、STEM観察では電子線が観察試料を透過するように、集束イオンビーム（FIB: Focused Ion Beam）加工装置<sup>\*2</sup>を用いてデバイス内から観察箇所を取り出した後、100 nm前後に均一に薄膜化する必要があることに起因する。この作業は高いスキルを要し、熟練の技術者が操作してもスループットに限界があった。

そこで、この課題解決のため解析技術研究センターではFIB自動化機能を活用し、ボトルネックであったSTEM試料作製の処理能力を向上させた。これにより、STEM解析のスループット向上を実現し、評価サイクルを迅速に回すことで、研究開発の加速、品質向上に活用している。本稿ではこのSTEMスループット向上のためのFIB自動化機能活用について報告する。

## 2. FIB自動化機能の活用方針

処理能力を向上させるため、加工作業のスキルレス化や夜間の無人運転化を可能とする自動加工機能は極めて有効なツールであると考えた。そこで、自動化機能を有する(株)日立ハイテクノロジーズ社製のFIB-SEM複合装置<sup>\*3</sup>NX2000を導入し、活用検討を開始した。

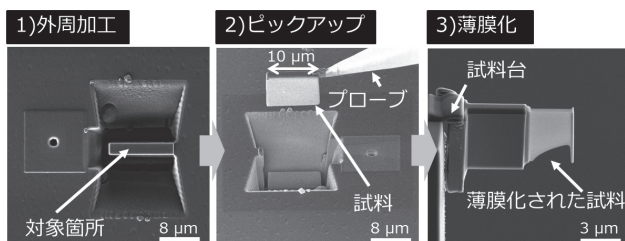


図1 STEM試料作製工程

図1に示すようにSTEM試料作製は大きく分けて1) 外周加工、2) ピックアップ、3) 薄膜化の3つの工程からなる<sup>(3)</sup>。当センターではレーザーダイオードやフォトダイオード、高電子移動度トランジスタ等多種多様な化合物半導体デバイスに対してそれぞれの目的に応じた試料を作製しており、個別に加工条件を選定する必要があるため、即座に自動化技術を導入するのは困難だった。そこで、これら3つの工程においてデバイスの種類や解析目的に応じた自動加工条件を選定した。そして、これら確立した自動化機能を組み合わせ、複数品種のデバイスが混在していても連続で自動加工を行うことで、迅速に多くの試料作製が可能な体制の構築を目指した。

## 3. 自動化機能の活用

本章では1) 外周加工、2) ピックアップ、3) 薄膜化の各工程に対する自動化機能の適用に関して述べる。

### 3-1 外周加工工程の自動化

STEM試料作製ではまず、解析対象部を10 μmサイズでピックアップするために外周を加工する必要がある。半導体材料の違いだけでなく、加工箇所によって酸化膜や金属、樹脂等、加工レートの違い材料が使われているため、それぞれで加工条件を確立する必要がある。また、結晶欠陥の位置・分布を空間的に特定するため、図2に示すような断面観察に加え平面観察<sup>(4)</sup>も必要とされている。そのため、これら目的に応じピックアップする試料のサイズを断面観察時は10 × 10 × 2 μm程度、平面観察時は10 × 10 × 10 μm程度にするなどの変更が必要だった。

そこで、当センターではInPやSiC等材質による加工レ

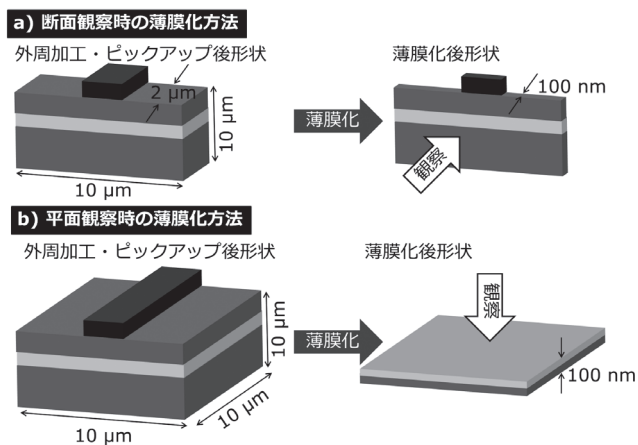


図2 a) 断面、及びb) 平面STEM試料加工プロセス

トの違いを反映した加工時間の設定や、凹凸があるデバイスでも確実に認識することが可能なドリフト補正マーク<sup>\*4</sup>位置の選定等を進め、ベースとなる12種の加工条件を決定した。そして、デバイスや解析目的に応じてこれら加工条件を適用することで外周加工工程の自動化に成功した。

### 3-2 ピックアップ工程の自動化

ピックアップ工程は、外周を加工した試料をプローブに接着した後デバイス内から取り出しSTEM用試料台に接着する工程である。通常、ピックアップを行う場合は、図3 a)に示すように、デバイス内から取り出した試料の姿勢はそのまま薄膜化を行う。ところが、デバイスは半導体基板の上部に電極などの構造物があることが多く、これら構造

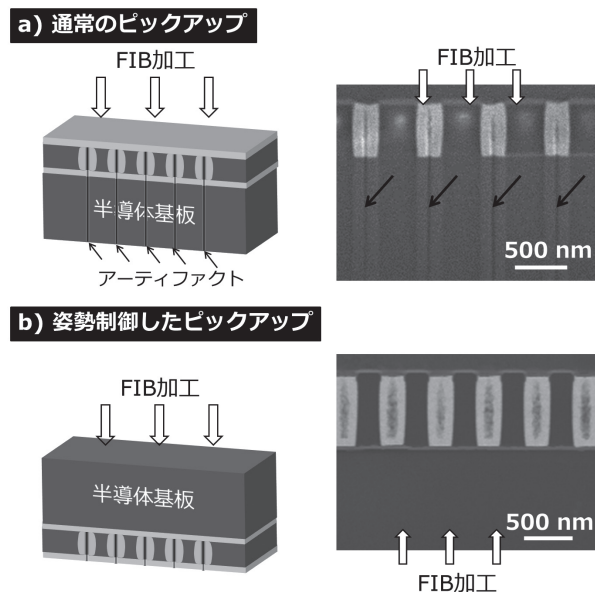


図3 a) 通常の、及びb) 姿勢制御したピックアップ向きとFIB加工によるアーティファクトの低減

物の有無によりFIBの加工レートに差が生じ、半導体基板の加工面にアーティファクト（矢印に示した上下方向に見られる加工すじ）が発生する。その結果、薄膜加工時に試料の一部は消失する一方で一部は狙った厚みよりも厚くなるといった不具合が生じやすい。この対策として図3 b) に示すようにピックアップ時にプローブを回転し試料の姿勢を上下反転させた状態に制御した上で試料台に固定し、構造の均一な基板側からFIB加工を行うことで、試料を均一に薄膜化する手法がある<sup>(5)</sup>。そこで、我々は本手法の自動化に取り組んだ。プローブと試料の固定方法やプローブの回転動作における画像認識方法など、姿勢制御特有の課題があったが、当社のデバイスに適用可能なよう条件を最適化した。その結果、図3 b) に示すように姿勢を制御したピックアップ工程の自動化を可能とした。

### 3-3 薄膜化工程の自動化

最後の薄膜化工程では、試料厚を薄くすることでSTEM観察時に透過電子の散乱が抑制され高分解能での観察が可能となる。そのため、原子分解能の観察を目的とする場合は100 nm以下に薄くする必要がある。100 nm以下の試料を作製するには、試料厚に応じて3~6種の照射電流を段階的に下げること、1 μm程度まで追い込む粗加工から最後の100 nm前後での作業を行う仕上げ加工までを行う必要がある。一方、転位などの欠陥調査を目的とする場合は、~1 μm厚など電子が透過する範囲で試料厚を厚くし広い範囲から情報を得ることで欠陥を見つけやすくすることが好ましく、解析の目的に応じて試料厚も変更する必要がある。

この薄膜化工程に自動化機能の適用を試みた結果、120 nm厚以上の試料であれば安定的に作製できることがわかった。このため、120 nm厚以上の試料作製では自動化機能を活用し、更なる薄膜化には技術者が出来栄をSEM像でモニタしつつ加工方法を微調整しながら薄膜化を進めている。

## 4. 自動化機能の活用事例

このようにSTEM試料作製における3つの工程に関してそれぞれ自動化機能を適用した。多種多様なデバイスや解析目的に応じて、上記3種の自動化機能を組み合わせ、連続的に自動加工を行うことで、迅速に多くの試料作製が可能な体制を構築し、従来比5倍のSTEM解析を可能とした。これにより、これまで困難だった即日での不良解析や試作品の出来栄調査、ウェハ面内のバラつき評価等へ活用を進めている。

解析事例として図4にデバイス構造の測長値と電気特性の関係性を調査した結果を示す。これは自動化機能を活用し16検体をSTEM解析・測長したものである。図より、測長値と電流値とに相関があることが分かる。これより、本デバイスでは1 nmの精度で構造を制御する必要があること

が明らかになり、製造プロセスにフィードバックすることで改善につなげている。

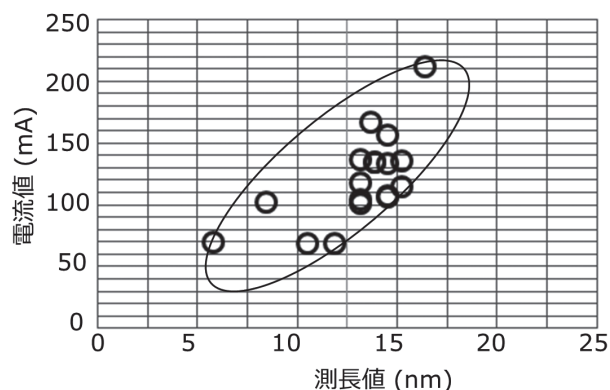


図4 自動化機能を活用し解析したSTEM観察によるデバイス構造の測長値と電気特性評価結果

## 5. 結 言

近年の化合物半導体デバイスの研究開発や量産現場にて不可欠となっているSTEM解析において、ボトルネックとなっていたFIBによる試料作製工程に自動化機能を適用した。熟練の技術者が対応していた作業をスキルレス化・無人運転化し、当社で開発・製造する多種多様なデバイスや解析目的に応じて自動化機能を組み合わせることで、迅速に多くの試料作製が可能な体制を構築した。これにより従来比5倍のSTEM解析を可能とし、これまで困難だった即日での不良解析や試作品の出来栄調査、ウェハ面内のバラつき評価等へ活用を進めている。今後も当社の半導体デバイス開発の加速、更なる品質向上に努めていく所存である。

## 用語集

### ※1 走査透過電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope)

薄膜化した試料に電子ビームを照射し試料を透過した電子を検出し、原子像を直接観察可能なレベルで高分解能観察が可能な顕微鏡装置。元素分析装置を併用することで組成や電子状態等を調べることも可能である。

### ※2 集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) 加工装置

集束したGa<sup>+</sup>イオンビームを試料に照射し加工や観察を行う装置。ナノレベルオーダーで所望位置の断面を切り出すことが可能である。

### ※3 FIB-SEM複合装置

一台の設備でFIBと走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy) 双方の機能を有する装置。FIBでの加工中や加工直後に加工面をSEMで観察することで、STEM試料作製では加工状況を確認しながらの操作が可能となる。

### ※4 ドリフト補正マーク

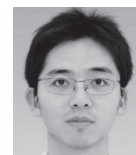
FIBによる加工時間が長くなると、試料ステージ等が時間と共にドリフトすることにより、加工位置がずれてしまうことがある。この対策として、試料上に固有のマークを付けて、このマーク位置を基にドリフトによる加工位置ズレの補正を行なう。

## 参考文献

- (1) 林秀樹、「化合物半導体デバイス -限りなき可能性を求めて-」、SEIテクニカルレビュー第173号、pp.14-24 (2008年7月号)
- (2) H. Yagi et al., "InP-Based Monolithically Integrated Photonic Devices for Digital Coherent Transmission," IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., Vol.24, No.1 (Feb. 2018)
- (3) T. Ohnishi, et al., "A New Focused-Ion-Beam Microsampling Technique for TEM Observation of Site-specific Areas," Proceeding from the 25th International Symposium for Testing and Failure Analysis, Santa Clara, California, pp.449-453 (Nov. 1999)
- (4) H. Saka et al., "Plan-view transmission electron microscopy observation of a crack tip in silicon," Philosophical Magazine Letters, Vol.72, No.4, pp.251-255 (May 1995)
- (5) 加藤淳、「ハイエンドデュアルビームを用いた微細デバイスの評価」、The TRC News、121号、pp.12-15 (2015年10月号)

## 執筆者

鶴見 大輔\* : 解析技術研究センター グループ長  
博士 (理学)



土井 友博 : 解析技術研究センター



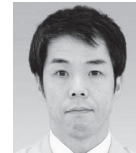
鳥井 一輝 : 解析技術研究センター



丸山 理絵 : 解析技術研究センター 主査



松川 真治 : 解析技術研究センター グループ長



\*主執筆者