

枚葉式半導体成膜装置向け高精度温度分布制御システム SumiTune

“SumiTune” High-Precision Temperature Distribution Control System for Single-Wafer Film Deposition Equipment

先田 成伸*
Shigenobu Sakita

木村 功一
Koichi Kimura

板倉 克裕
Katsuhiko Itakura

三雲 晃
Akira Mikumo

当社は、5G次世代通信、人工知能自動運転技術、データセンタ用大容量ストレージ等に不可欠な各種半導体の製造工程で使用される枚葉式成膜装置向けに半導体ウエハを加熱するヒータを供給している。半導体回路配線の微細化要求から均質な成膜分布のために、ウエハ面内温度分布の均一化の要求が日々厳しくなっている。これまでのヒータは、同心円状のゾーンに区分けして制御されていたが、均一化を妨げる様々な装置環境因子による周方向の微妙な温度分布ムラをカバーすることができず、均一化に対して限界を迎えていた。この限界を乗り越えるために、マルチゾーン化したヒータとそのヒータを高精度に制御するコントローラを開発したので、報告する。

We supply heaters for heating semiconductor wafers in the single-wafer film deposition processes. Semiconductor wafers are indispensable for 5th generation communications, artificial intelligence, automatic driving, and large-capacity data storage in data centers. The refinement of semiconductor circuits requires the formation of uniform films on wafers, and this demands uniform temperature distribution in the wafers. Conventionally, heaters have been divided and arranged in concentric zones, but this does not cover the subtle unevenness of circumferential temperature distribution caused by various factors in the device environment. To overcome this challenge, we have developed a multi-zone heater and a controller capable of high-accuracy control.

キーワード：SumiTune、マルチゾーン制御、半導体、枚葉式成膜装置

1. 緒言

5G (5th Generation) 次世代規格通信、人工知能 (AI) による自動運転技術、データセンタ用大容量ストレージ等に欠かせない各種半導体の製造工程では、半導体ウエハを加熱するための様々なヒータが用いられている。特に、前工程と呼ばれているウエハへの感光材膜を塗布する工程、ウエハ上に様々な膜種を成膜するCVD (Chemical Vapor Deposition, 化学気相成長法) 工程、ウエハ表面を削るドライ/ウェットエッチング工程などの各種工程で、ウエハを加熱する必要があり、様々な温度域 (室温~1000℃) にマッチした多種多様なヒータが用いられている。

近年のマルチコアCPU (Central Processing Unit)、AI用GPU^{*1}の演算処理速度の向上や、データセンタ用ストレージの大容量化の要求に対して演算回路の集積度を上げるために、回路配線の微細化の要求が増している。それには均質な膜の形成が必要であり、さらには、ウエハ面内の温度分布の均一化が必要不可欠である。

本稿で紹介するSumiTuneは、枚葉式半導体成膜装置でこれまで困難とされていた多ゾーン制御によるウエハ面内温度分布の高均熱化を実現し、次世代の回路配線の微細化要求に応えられる次世代対応の高精度温度分布制御システムである。

2. 半導体成膜装置について

半導体成膜装置には、大別してバッチ式と枚葉式の2種類がある。前者は25~100枚程度のウエハを同時処理し、後者は1枚ずつウエハを処理する。バッチ式は図1で示すように縦型炉タイプの発熱体で覆われ、高層ビルのようにウエハを並べる。装置のわずかな非対称性もなくすようにウエハを回転させながら、長時間 (2~10時間) かけてゆっくり熱処理することで非常に均質な膜厚が得られるのが特徴である。ただしこの場合、ウエハ裏面にも成膜されてしまうため、次工程に移る前に付着した膜を除去する追加工程が増えることで、スループットを上げるためには装置が相当数必要になる。

一方、枚葉式は、ウエハの処理時間が数分程度とバッチ式よりもはるかに速く、ヒータの上に載せられたウエハを処理することから裏面へ成膜されないため、次工程にスムーズに移行可能なのが特徴である。

各メーカーはバッチ式と枚葉式の特徴を生かした工程に対して使い分けている。これまで性能面では、バッチ式が優位であったため、特に高精度を必要とする工程への枚葉式の投入がほとんどなかった。ところが近年のメモリの大容量化に伴い、前工程の繰り返し回数が爆発的に増えてきた。そこで、スループットの高い枚葉式が注目され始め、

枚葉式装置に対する高均質な成膜の要求が高くなってきている。高均質な成膜のためには、ウエハ面内の温度分布の均一化が必要不可欠である。

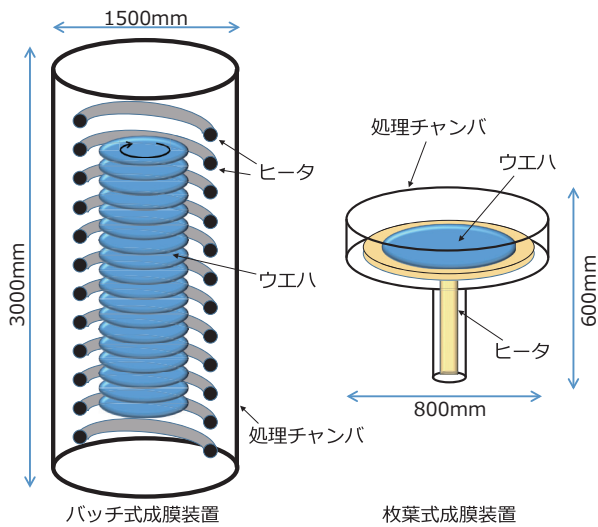


図1 バッチ式と枚葉式の概略

3. SumiTuneの概要

SumiTune は、Super Multi Intelligent heating Tune systemからの造語で、SumiTune Heater と SumiTune Controller で構成される高精度温度分布制御システムである (図2)。マルチゾーンヒータおよびその制御は、ドライエッチング装置では、ウエハ吸着機能が搭載された静電チャックと呼ばれるヒータとして、すでに100を越えるゾーン数で温度分布を制御するシステムが数多く開発され運用されている。

一方、成膜装置では腐食性ガスを取り扱うことから、多

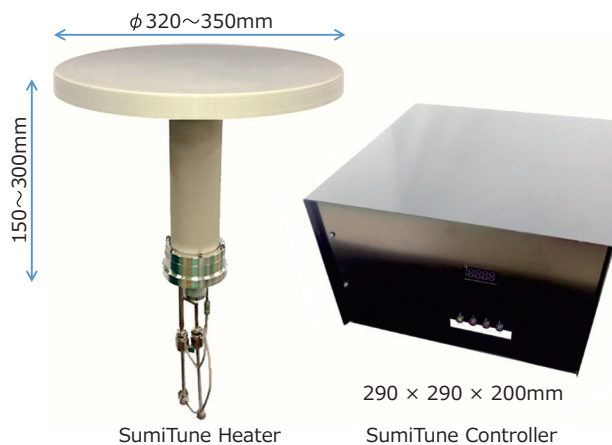


図2 SumiTune 外観

ゾーン化が困難なため、最大でも3ゾーンに制限されていた。ヒータの発熱回路や電極に使用される金属は腐食性ガスに弱いため、耐腐食性の高い窒化アルミニウムセラミックス (AlN) 材料で覆われている。図3に示すような電極を通すためのAlN製シャフト部と発熱回路が内蔵されているプレート部から成るキノコ形状のAlN製ヒータが採用されている。AlN製ヒータの制御ゾーン数を増やすことは、発熱回路の電極数を多くすることと等価であり、多くの電極を収納するためにはシャフトの直径を大きくする必要がある。シャフトの直径を大きくすると、シャフトの上下の温度差で生じる熱応力でプレートとの境界部分が割れてしまうことから、シャフトの直径には制約がある。必然的に電極の数が制限され、最大でも3つのゾーン数 (電極6個) からなるヒータしか市場に投入されていない。

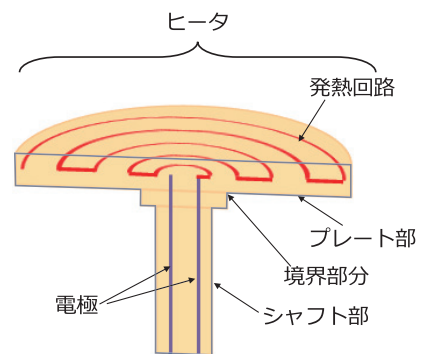


図3 一般的な成膜用ヒータの概略構造

従来型ヒータでは、2つ以上のゾーン区分けは、図4 (a) に示すような同心円状になっている。動径 (r) 方向には温度均一に調整できても、装置やその周りの環境の非対称性からくる円周 (θ) 方向の温度分布ムラに対応することができないことから、ウエハ面内温度分布の均一化には限界があった。

そこで当社では、図4 (b) に示すような、 r 方向に3区画、 θ 方向に4区画のゾーン区画を設けるべく、1-1-4のゾーン割の6ゾーンヒータを開発した。また、温度制御のためには

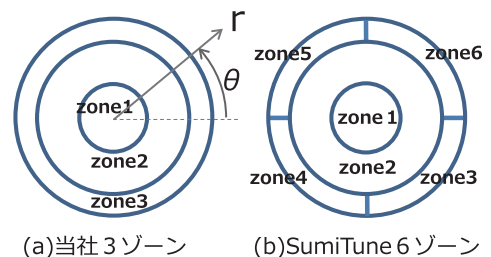


図4 ゾーンのイメージ

熱電対を使用するが、耐腐食のためにシャフトの内部にしか収納できないので、仮に多ゾーン化しても各ゾーンの温度をモニタすることが困難であった。そこで、6ゾーンを効率よく高精度で電力制御することで温度制御できることを見出し、製造装置に収納できるコンパクトなコントローラの開発を行った。

3-1 SumiTune Heaterの特長

多ゾーン化にあたり、特に外周部でθ方向に複数のゾーンを配置するには、発熱回路への導線が立体交差する必要がある。そのため、まず、図5に示すように、複数のAlN基板にペースト状のタングステン (W) を、ゾーン毎の回路として、スクリーン印刷技術で高精細に印刷する。次に、回路を挟み込むように複数枚のAlN基板を図6のように重ねてホットプレス接合することで、回路を埋設したヒータ本体を作製している。複数の層にゾーンを分けることができるので、立体交差が容易になっている。さらに回路に通電するために電極部の加工を行った後、シャフトを取り付け、最後に切削加工を行い製品形状へ仕上げている。

1つの発熱体回路には、電気を導入するための正極と負極の2つの電極^{*2}が必要である。6個のゾーンにはゾーン毎に1つの発熱体回路を設けるので、通常なら合計12個の電極が必要となるが、シャフト直径の制約から電極数を減らす必要があった。また、電極を1個ずつ装置の外側の導線に接続することが手間となるため、ワンタッチで接続できるよ

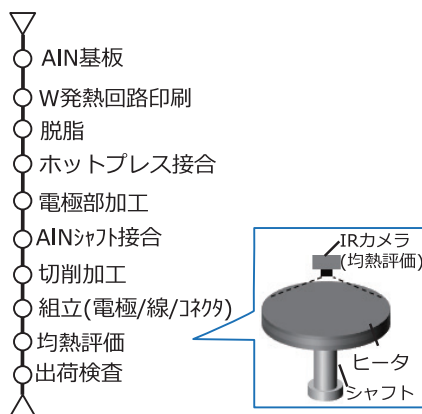


図5 当社AlN製ヒータの製造工程

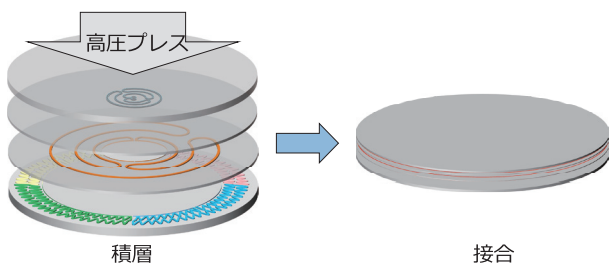


図6 ホットプレス接合イメージ

うに、シャフト下部のフランジ部分に多極のワンタッチ継手のコネクタを搭載したヒータを構想した。使用するコネクタの接続ピンの許容電流を考慮し、図7に示すように各ゾーンの干渉を回避するために、高さ方向で上からzone1、zone2、zone3～6の発熱体回路を3つの層に分け、zone1とzone2の負極、zone3とzone6の負極、zone4とzone5の負極をそれぞれ共通電極として、zone1～6の各正極の6個との計9個の電極で、6個のゾーンを制御できるヒータを考案した。図8に示すような様々な温度分布に対応でき

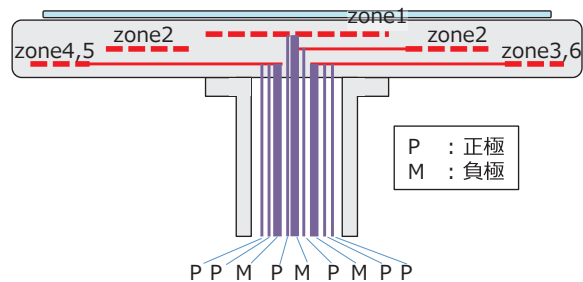


図7 配線・電極イメージ

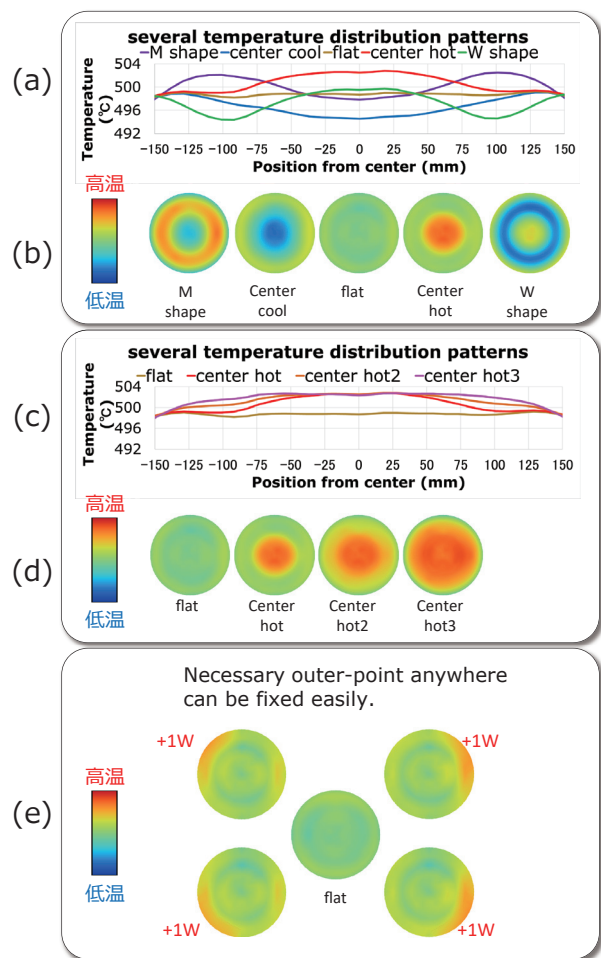


図8 ヒータ温度分布のCAE解析結果

る最適なゾーン配分をコンピュータシミュレーション解析により高精細パターンを決定した。

フラットな均熱分布時の均熱レンジ（最大値と最小値の平均からのずれ幅）は市場からの要求±1.0℃以下を達成すべく、ヒータ表面温度均熱レンジ±0.5℃以下を目指した。最終的なSumiTune heaterの仕様を表1に示す。

表1 SumiTune Heaterの仕様

材質	AIN 99.6%
温度範囲	室温～650℃
昇降温速度	5℃/分
出力定格	AC200V / 30A
対応ウエハサイズ	12インチ(300mm)
標準サイズ	直径φ 320～350mm 高さ150～300mm
ゾーン数	6個
対応熱電対	タイプRまたはK
φ 300内均熱レンジ (49 points, @500℃)	仕様±1.0℃ [実力 ±0.5℃]
各ゾーン内均熱レンジ (@500℃)	±0.5℃
通電コネクタ	専用コネクタ、専用ケーブルでコントローラとワンタッチ接続

3-2 SumiTune Controllerの特長

各ゾーンの温度を制御するためには、各ゾーンを正確に温度計測できる手段が必要不可欠とされており、電極配置に自由度のあるコータデベロッパ装置用ヒータでは、各ゾーンに1個ずつの温度計を設置し温度制御している。

一方、成膜装置において、シャフトよりも外側のゾーンに熱電対や光学センサなどを設置するのは耐腐食対応が事

表2 SumiTune Controllerの仕様

対応熱電対	タイプRまたはK
制御温度範囲	室温～650℃
負荷回路入力定格	AC208V±10% 60A 60Hz/50Hz
制御回路入力定格	AC120～230V 2A 60Hz/50Hz
制御ゾーン数	6個
出力端子数	9個 (ch1～6, COM1～3) + GND
出力定格	AC200V/60A (各ゾーン毎に制限有)
温度制御方式	PID制御 (ゾーン1 に対する)
電力制御方式	位相制御 (ゼロクロス検知)
設定可能電力比率	0.000～9.999 (ゾーン1 対比)
温度/電力/電圧/電流の各分解能	0.01℃ / 0.1W / 0.01V / 0.01A
通信方式	RS-485, EtherCAT (dip switch切替)
サイズ/重量	290×290×200mm / 11kg
安全機構	外部interlock機能
対応しているガイドラインおよび取得規格	・半導体製造装置安全ガイドライン (SEMI S22) ・コントローラ制御基板単体の製品安全国際規格 (EN61010-1)

実上不可能であった。そこで、当社はある特定の電力分布で維持すれば特定の温度分布を維持できることを見出し、zone1はヒータ中心近傍に設置されている熱電対に対してPID制御^{*3}による温度制御とし、他のゾーンはzone1の電力に対する所定の電力比率での電力制御を行うことで各ゾーンの温度調整することを考案した。

0.1℃の高精度な温度制御を実現するために、電力比率の制御精度を0.01とするべく、0.001の分解能で電力比率を制御できるコントローラを目指した。既製の温度制御コントローラと電力比率制御コントローラをリンクさせることで、原理的には電力比率を制御することは可能であるが、その制御性や応答性、精度、コンパクト性の要求を満たさないことから、SumiTune Heater用の温度・電力制御のコントローラとして表2に示す仕様のSumiTune Controllerの開発を目指した。

3-3 SumiTune システムの特長

SumiTune システムの主な特長は以下の通りである。

- ①均熱レンジ±0.5℃レベルのフラットな温度分布だけでなく、様々な温度分布に対応可能。
- ②成膜処理チャンバ環境の非対称性要素に対応可能。
- ③開発期間・開発費用の圧縮ができる。

3-3-1 様々な温度分布に対応

一般的に、使用する温度帯や膜種によってはヒータの内外の電力比率を変えて使用することがある。一方、SumiTune システムでは、図8 (a)、(b) に示すように、均熱レンジ±0.5℃レベルのフラットな温度分布だけでなく、M字型、センタークール、センターホット、W字型に加え、図8 (c)、(d) に示すように、同じセンターホットでもその範囲を様々なに変更できる。このように多種多様な温度分布を可能にすることで、種々の成膜工程にも1台での対応が可能である。

3-3-2 1Wレベル調整で非対称性要素に対応

これまでのヒータでは、温度に敏感な工程において、ヒータの温度分布だけの調整ではウエハ上の温度分布の調整（実際には、成膜分布の調整）には限界があった。微調整のため、反応ガス供給用のシャワーヘッドの穴の配置の最適化や、シャワーヘッド直前のガス拡散板などの調整・再製作が必要とされていた。SumiTuneは電力制御の制御

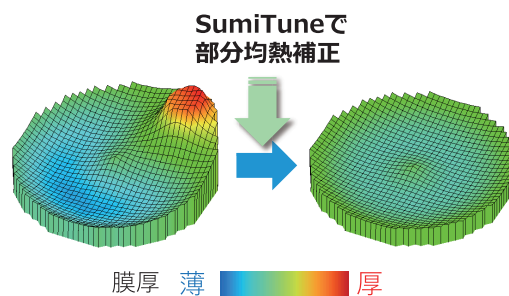


図9 SumiTuneによる成膜分布の改善イメージ

性が良く、**図8 (e)** に示すように、外周ゾーン毎に1Wレベルでの電力調整を実現したことで、500℃付近であれば概ね0.02℃の調整に相当する非常に高精度 (or 高精細) な、温度分布の部分的な微調整が可能になる。使用する成膜処理チャンバ環境の非対称性要素 (ウエハ搬入口、ガス排気ラインポート位置など) による**図9**のような θ 方向に一部不均質な成膜分布の微調整も実現できる。

3-3-3 開発にかかる時間とコストを圧縮可能

従来型ヒータの場合、顧客の環境に合わせたヒータの設計・製作に最低でも約3か月、顧客での工程検証に約1か月必要となる。更に、改良が必要な場合は同じ時間を費やして再製作と再評価を行うので、1年に3回程度しか設計変更ができなかった。一方、SumiTuneは様々な環境に対応できるので、最初のヒータさえ設計・製作してしまえばその後の顧客での成膜検証で様々な条件の評価が可能となり、従来必要であったヒータの改良 (再製作・再評価) が不要となる。このため、開発時間を大幅に短縮でき、ウエハを使用したトライアル&エラーの評価回数が圧倒的に少なくでき、開発費用の大幅削減に寄与できる。

4. 開発結果

コントローラの制御に用いているPLC (プログラマブルロジックコントローラ) は定評のあるRS-485通信を用いて信頼性を上げている。SEMI^{*4}のガイドラインで半導体製造装置用の通信規格として認定されているリアルタイム通信のEtherCAT^{*5}にも対応した。コントローラの電力制御精度として、電力比率の表示分解能を0.001単位として、0.002単位の精度を達成し、これにより温度換算で0.02℃の温度制御性を確保できた。これによりヒータ温度500℃でのIR評価^{*6}によるヒータ表面温度の49点箇所の均熱レンジは±0.5℃ (**図10**) とユーザ向け仕様の均熱レンジ $\leq \pm$

1.0℃以下を達成した。**表3**に示すように、同心円内上での均熱レンジは±0.5℃未満、ゾーン内均熱レンジは±0.4℃未満であり、SumiTuneは次世代成膜に対応できる均熱性を有したシステムであることがわかった。

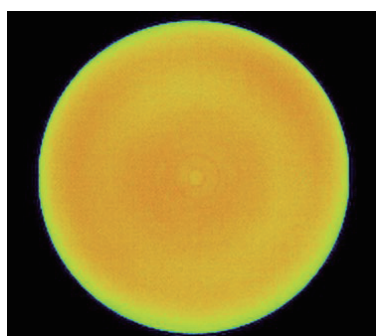
表3 均熱評価結果

ヒータ温度		500℃
均熱(℃)		±0.50℃
同心円 均熱レンジ	φ 100	±0.21℃
	φ 200	±0.30℃
	φ 300	±0.41℃
ゾーン内 均熱レンジ	zone1	±0.34℃
	zone2	±0.30℃
	zone3	±0.21℃
	zone4	±0.35℃
	zone5	±0.18℃
	zone6	±0.14℃

5. 結 言

本「SumiTune」により、従来の成膜2~3ゾーンヒータでは得られなかった温度分布の部分微調整が可能となった。これにより、チャンバ環境に合わせた高均熱化を実現でき、回路配線の微細化のニーズに対応可能となった。すでに半導体装置メーカーおよび半導体メーカーにて評価を開始頂いており、ファインチューニングによる成膜分布の大幅な改善が進み、バッチ式成膜装置に代わるシステムとして採用に向けた検討が進められている。

配線の微細化のニーズは益々高くなり、数年後には6 (1-1-4) ゾーン制御でも厳しくなっていくことが予想されるため、現在、9 (1-4-4) ゾーン制御のシステムも開発を行い試験運用中である。



φ 300内
均熱レンジ
(49 points)

±0.50℃
at 500℃

	zone1	zone2	zone3	zone4	zone5	zone6
電力(W)	412	561	210	210	210	210
電力比率	1	1.363	0.510	0.510	0.510	0.510

図10 SumiTune heaterの表面温度分布IR画像

用語集

※1 GPU

Graphic Processing Unit。元来グラフィック描画に使用されていた処理装置であるが、近年、その並列演算処理に注目され人工知能やコンピュータシミュレーションの演算処理に使用されている。

※2 電極

成膜装置では一般的に交流を用いるので、便宜上、各極を区別するために、直流回路的な表現の正極と負極として定義する。

※3 PID制御

Proportional-Integral-Differential Control。制御工学におけるフィードバック制御の一種であり、入力値の制御を出力値と目標値との偏差 (P)、その積分 (I)、および微分 (D) の3つの要素によって行う制御方法。

※4 SEMI

Semiconductor Equipment and Materials International (国際半導体製造装置材料協会)。

※5 EtherCAT

SEMIのガイドラインで半導体製造装置用の通信規格として認定されているリアルタイム通信規格。

※6 IR (Infrared) 評価

温度により放出される赤外線波長の違いを赤外線カメラで読取り、温度分布を測定する手段の一種。

- ・ SumiTuneは住友電気工業㈱の登録商標です。
- ・ EtherCATはBeckhoff Automation GmbH社の商標または登録商標です。

執筆者

先田 成伸* : ハイブリッド製品事業部 主幹
博士 (理学)



木村 功一 : ハイブリッド製品事業部 グループ長



板倉 克裕 : ハイブリッド製品事業部 部長



三雲 晃 : ハイブリッド製品事業部 事業部長



*主執筆者