

TRUMPF



ホワイトペーパー

VCSEL技術に基づく9.6kWのウェハ加熱システム

目次

ウェハ加熱への挑戦	4
VCSEL加熱装置によるプリケーション構築	4
ウェハ加熱用のVCSEL対策	5
ウェハ加熱の実験構築	6
シリコンウェハの加熱	7
結論	8

お問い合わせ窓口

TRUMPF Photonic Components GmbH
Lise-Meitner-Straße 13
89081 Ulm
Germany

電話番号 : +49 731 5501940
電子メール : photonic.components@trumpf.com

概要

本紙では、高出力VCSELエミッタを分散しながらも高密度に配置することで、大面積の均一加熱が可能であることを紹介しています。

アプリケーション例として、 \varnothing 300 mmのシリコンウェハと大面積熱処理用の9.6 kW VCSEL加熱システムを取り上げ、シリコンウェハの高速熱処理(RTP)にVCSEL加熱モジュールを使用する利点について検討しています。本紙では、アプリケーションの結果を示し、説明しています。また、光学シミュレーションを行うことで、お客様のご要望に応じる潜在的な加熱システム採用のアイデアと可能性を印象付けます。

ウェハ加熱への挑戦

半導体デバイスの製造では、ウェハを1個ずつのダイに切断するまでに、ウェハレベルでさまざまな製造工程を経る必要があります。

ウェハの加工プロセスでは、最高1000°Cまでのさまざまな温度レベルと大変優れた均質性が求められます。

望ましい加工結果を得るためには、ウェハを非常に高速で加熱することが常に強制されています。そのため、VCSEL加熱装置のお陰で、製造工程の時間を大幅に短縮し、より少ない副作用が発生し、歩留まりも向上する可能となります。



図1:
トルンプ
(TRUMPF) の
VCSELは、Ulm
(ウルム) にある
クリーンルーム施設
で製造されています。

VCSEL加熱装置によるアプリケーション構築

アーヘン (Aachen) にある弊社の関連技術センターでは、様々なアプリケーションの実験を行えるレーザー安全性の高いシステムをキチンと構築しています。このシステム構築には、赤外線カメラ、光学カメラ、パイロメーター、熱電対、高速リニア軸が装備されています。

対象ウェハと加熱モジュールを柔軟性高く取り付けることでお客様の様々なアプリケーションに対応できます。

また、お客様とともに実行可能性実験を実施し、お客様はその場で高出力VCSELモジュールを体験して頂けます。

2.4~9.6 kWすべてのスタンダードモジュールのテストが可能となり、特殊モジュールはお客様のご依頼に応じて対応します。

以下では、特殊な加熱モジュールを構築することでウェハ加熱アプリケーションを検討致します。



図2:
アーヘンの関連技術
センターでのシ
ステム構築。
冷却ユニット、駆
動ユニット、制御
PC、レーザー
チャンバーなど

ウェハ加熱用のVCSEL対策

まず、ウェハレベルの均一照射を実現するために、スタンダードVCSELエミッタの配布を最適化するように光学シミュレーションを実施しました。(図4参照)。その結果、例として24個のスタンダードエミッタと鏡筒(図3参照)を使用することで、ウェハレベルで完全な均質性を達成できることを判明。また、エミッターの稼働数によって加熱速率や作業距離も制御でき、システムの性能とコストを最適化することができます。

これらのシミュレーション結果を受けて、第二段取りとして、9.6kWのウェハ加熱用装置(図5、鏡筒のないモジュール)を構築しました。最初のテストは、ベアシリコンウェハで行いました。

ウェハヒーターは最大75.2kWまでスケールアップが可能であり、これにより8倍以上の加熱速度を実現することができます。

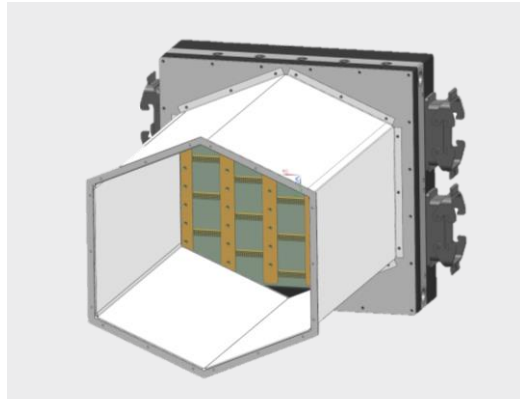


図3:
エミッタを配置したウェハヒーターのレイアウト。

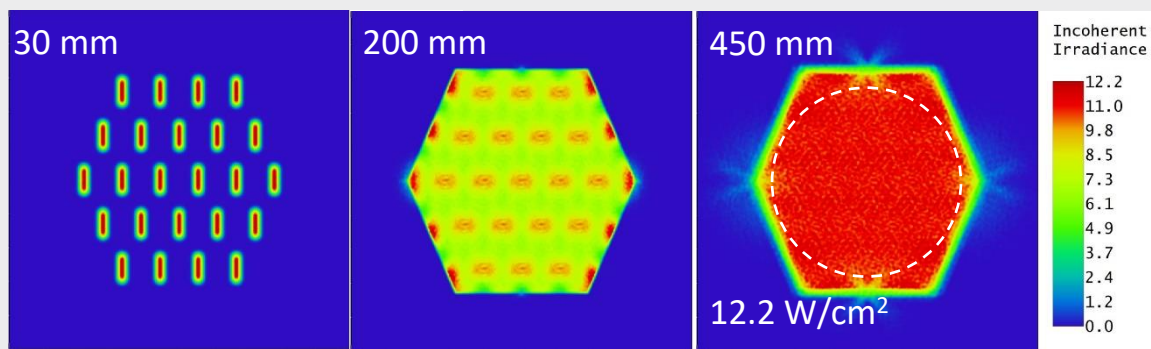


図4:
外部ミラーを使用し、異なる作動距離での光学シミュレーションを実施: 30 / 200 / 450 mm.
破線の円は $\phi 300$ mm ウェハです

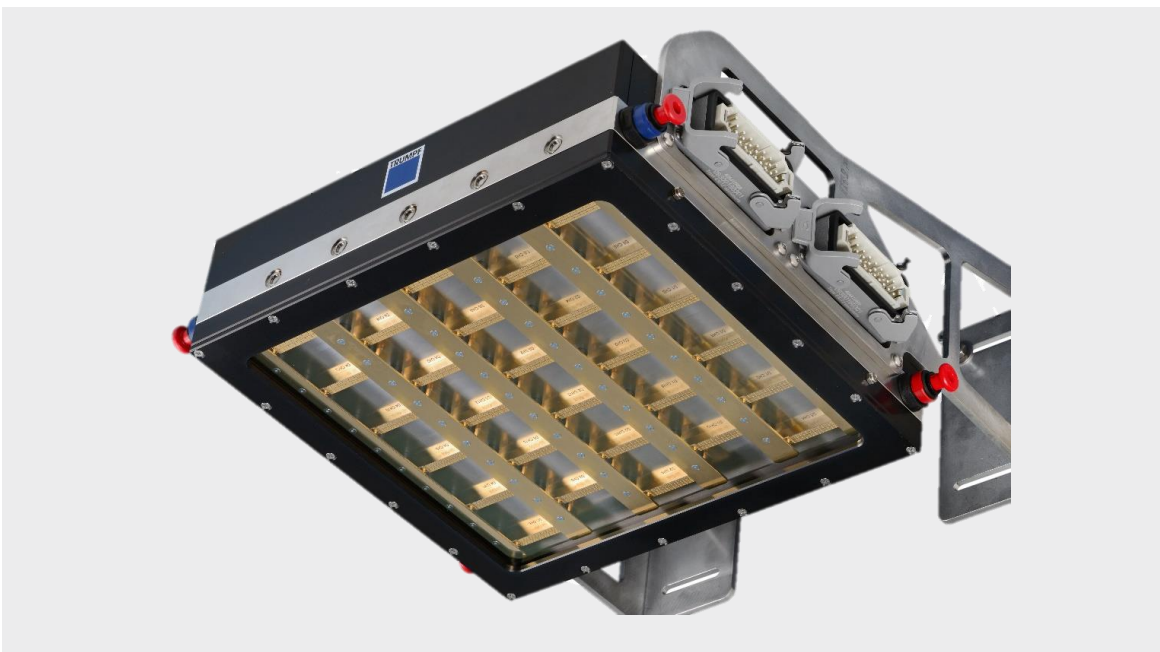


図5:
9.6kWウェハヒーターのVCSEL加熱装置

ウェハ加熱の実験構築

アーヘンの関連技術センターでは、9.6kWのウェハヒーターを設置しました（図6、7参照）。最初のテストは、黒色塗布したφ300 mmのステンレス製ダミーとφ300 mmのベアシリコンウェハで行われました。ウェハは、熱伝導率の低いホルダーを使って三のポイントに取り付けられました。

実験はすべて通常の大気圧で行われました。加熱中、温度と均質性は赤外線カメラで記録されました。カメラの放射率設定は、ベアシリコンまたは黒色塗布された鋼板によりキャリブレーションされました。

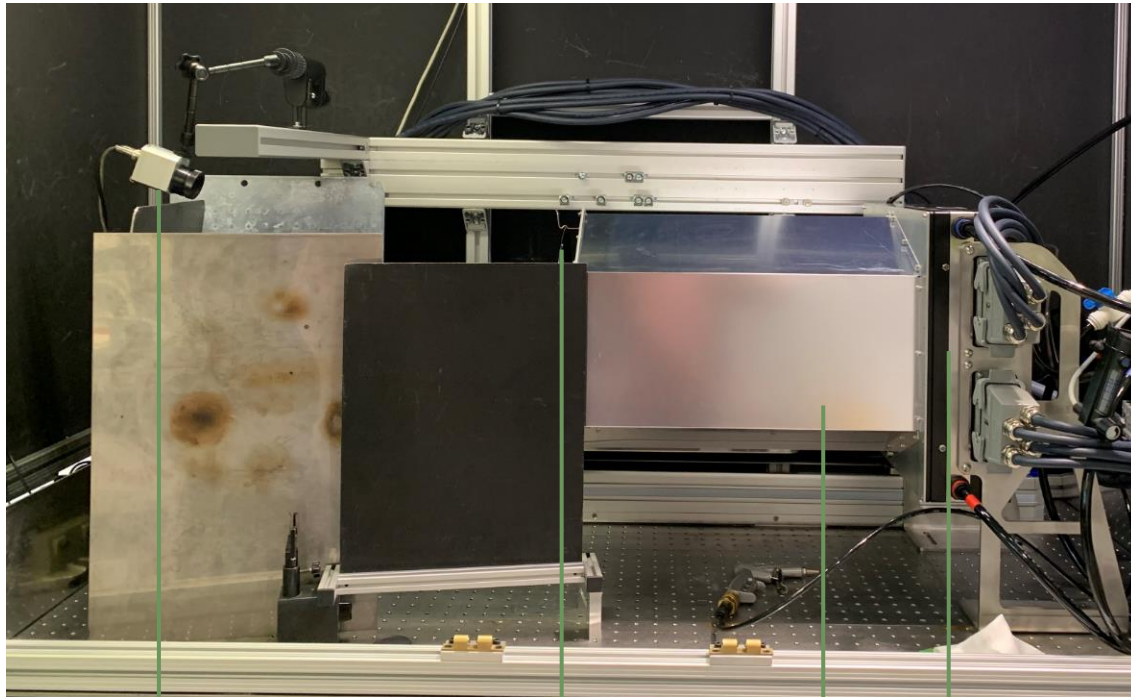


図6:
レーザーチャンバーの外観。
VCSELモジュールの前には、長さ450mmの六角形の鏡筒が確認できます

赤外線カメラ

シリコンウェハ
(裏面黒色塗装)

VCSELモジュール

鏡筒

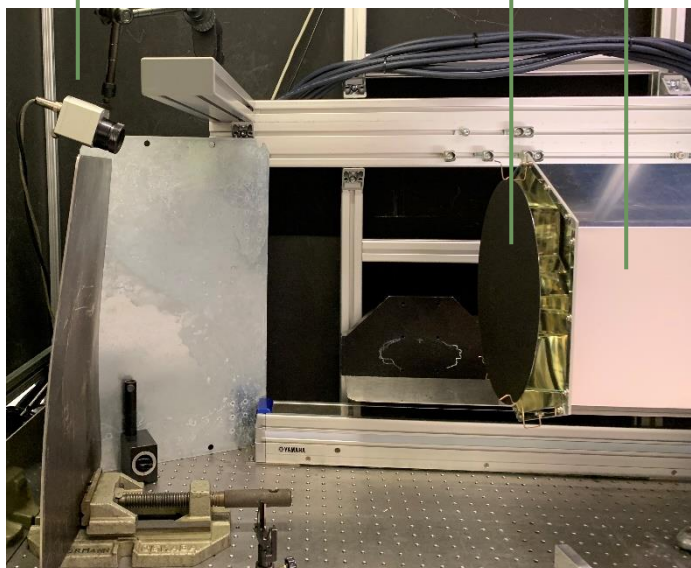


図7:
Ø300mmウェハでのセットアップ。
正確な温度計測を可能にするため、ウェハ裏面に黒色塗装を施しています。

シリコンウェハの加熱

シミュレーションした9.6kWの代わりに、9.12kWの赤外線でシリコンウェハを照射しています。VCSEL加熱モジュールのレーザー出力分布をわずかに調整しながら、シリコンウェハの温度の均一性を改善しました。中央部の過剰加熱の防止及びウェハの下部から上部への熱風の流れによる対流損失を補償するために、出力分布の調整は必要です。

低温（25～230℃）での加熱速率は51K/sであり、625℃では、高温のウェハから再放出される長波長放射と対流のため、加熱速率は16K/sまでに減少しました。

また、垂直に取り付けたウェハは空気中で平均昇温速率が32K/sとなり、良好な均質性が得られました。ウェハの平均温度が640℃に達するまでに20秒がかかりました。

空気中で垂直に取り付けた $\varnothing 300\text{mm}$ のウェハの温度均一性は $\pm 8\text{K}$ でした。

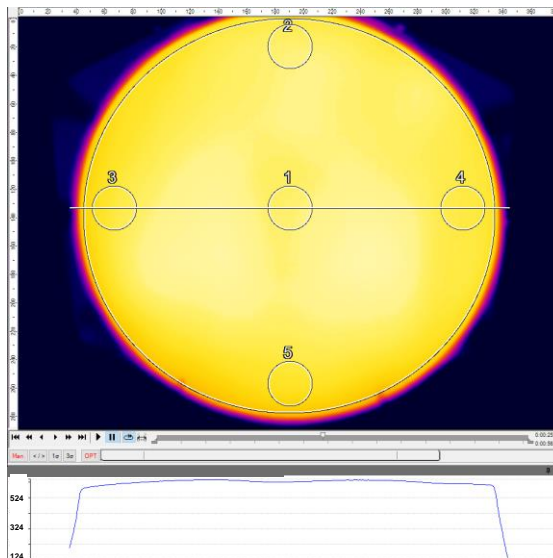


図8:

ピーク温度で赤外線カメラで撮影した2D画像と水平温度プロファイル。図には、ROI1～5の位置も示されています

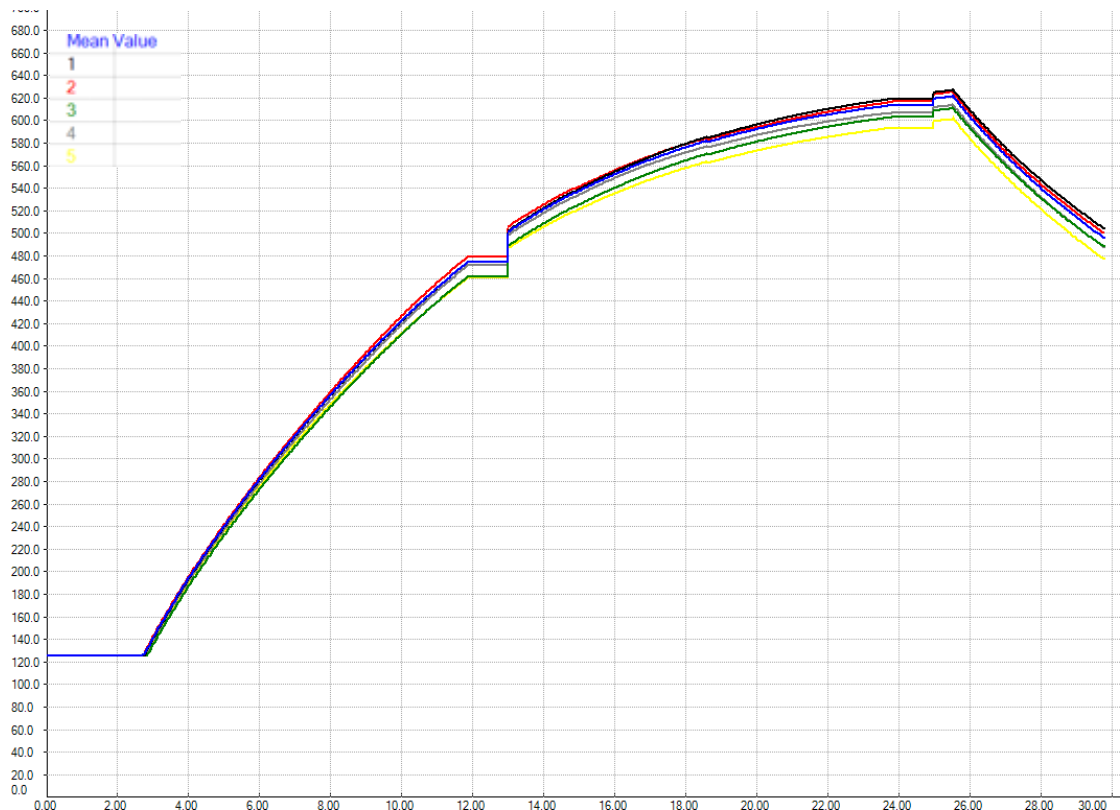


図9:

平均値とROI1～5の温度-時間図。赤外線カメラは、測定中に定期的にキャリブレーションを行うためにシャッターを使用しており、これが温度カーブのねじれの原因となっています。

結論

大面積エリアを加熱する可能な新型VCSELモジュールが高加熱速率と大変優れた均質性を持つことは証明されました。

この装置は、24個のVCSELエミッタを注意深く配置し、9.6kWの総赤外線出力を実現しました。空気の中で最大51 K/sの加熱速率と±8 Kの温度均一性をØ300 mmのシリコンウェハで達成することができました。

このモジュールコンセプトは、エミッタの高密度実装により、より高い性能にスケールアップすることが可能です。

Ø300mmウェハヒータに最大188個エミッタを使用とは可能です。総赤外線出力は75.2kWとなります。このようなモジュールの光学シミュレーションを図10～図13に示します。図中の円は、Ø300mmウェハを表しています。

図10は、作動距離20mmでの赤外線出力分布のシミュレーションです。このような構成は、回転するウェハを使用するアプリケーションに適用します。

より均一な照射を得るためには、側面に追加のミラーを使用し、作動距離を大きくする必要があります。図11は、70W/cm²の均質な赤外線照射に適した作動距離約250mmであるシミュレーションを示します。この場合、シリコンウェハの加熱速率は260K/sまで可能です。

しかし、均一な照射が必ずしも均一な温度プロファイルにつながるとは限りません。例えば、アプリケーションに関連した冷却効果が原因の1つになると考えられます。VCSEL加熱装置の大きな利点の一つは、188個のエミッタの各ゾーンの出力レベルを単独で制御できることにあります。各エミッタは2つのゾーンを持つため、モジュールごとに376通りの出力設定が可能です。

図12と図13は、この利点を示しています。これらのシミュレーションでは、エミッターの一回りが点滅しています。図12は、点滅されたエミッタを示す、距離20mmでの強度分布、図13は、作動距離250mmでの結果として強度パターンを強調しています。

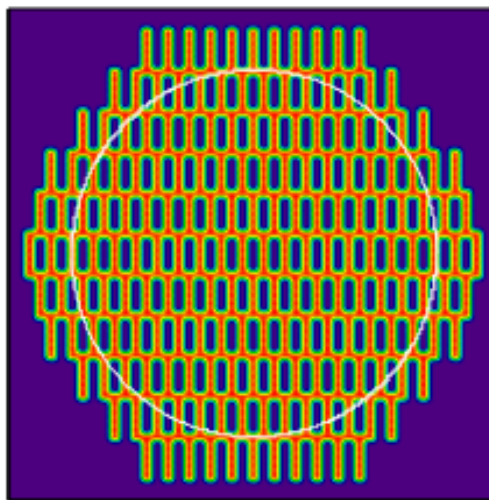
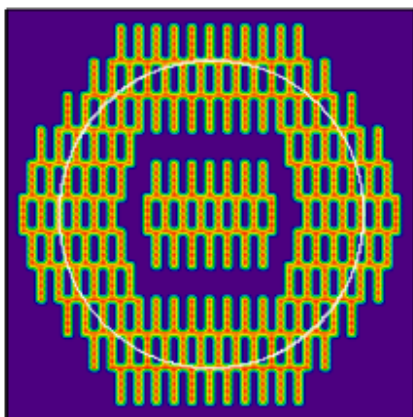


図10:
188個のエミッタを有するウェハ加熱用VCSELモジュールの光学シミュレーション（作動距離20 mm）

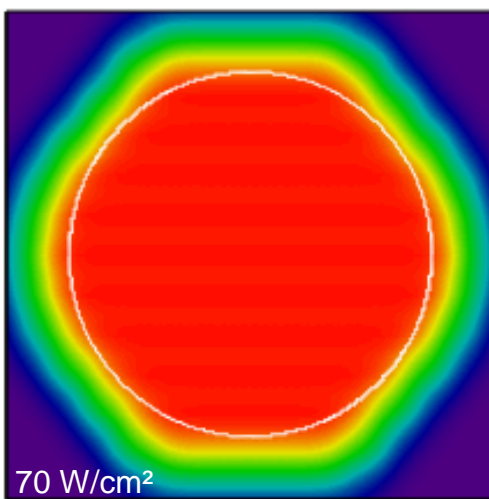


図11:
188個のエミッタを用いたウェハ加熱用VCSELモジュールの光学シミュレーション（作動距離250mm）。

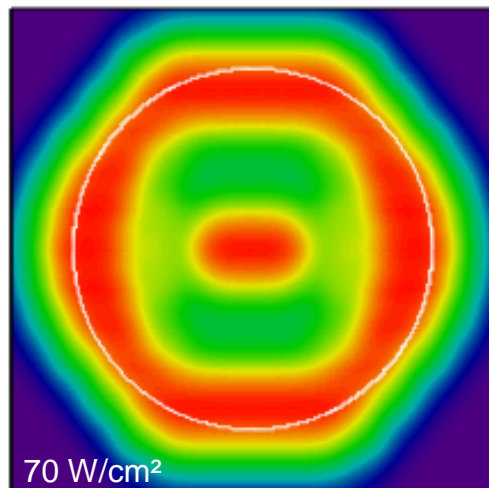


図12/13:
188個のエミッタを用いたウェハ加熱用VCSELモジュールの光学シミュレーション（作動距離20mmおよび250mm）

結論

アプリケーションによっては、低密度で構築したエミッタもメリットを持つこととなります。低密度で構築のため、より広いスペースを作り上げ、加工中のウェハの温度を測定する集積光学計量に使えます。

その結果、VCSEL装置によってウェハを照射する時に同側面で測定することができます。VCSELは、特定の波長（この例では980nm）でのみレーザー放射を行い、上面や下面から測定することができます。したがって、VCSELの放射を適切に濾過することで、光学計測との干渉を抑制することが可能です。ウェハ裏面からの温度測定により、ウェハ表面での放射率の構造的不均一性による悪影響を排除することができます。

その他、VCSEL高出力加熱装置によるウェハ加熱システムの利点は以下の通りとなります。

- 選択的加熱：シリコンは980nmへの高い吸収があるため、シリコンウェハをレーザー光で選択的に加熱することができる。
- VCSELチップの超長寿命化と高信頼性
- レーザーモジュールの繊細なデザイン
- メンテナンスの手間を軽減
- カスタマイズが容易：最適な数のエミッタを設置するだけで、9.6~75kWの範囲で総出力やシステムコストを選びます。

これらのウェハ加熱の応用試験とシミュレーションにより、高出力VCSELエミッタによる大面積加熱が実現することは実行可能性や拡張性やコスト的な利点や信頼性があることが証明されました。その他、ラピッドサーマルプロセッシング (RTP) の新たな可能性を実現できます。

産業用加熱装置の詳細については、こちらをご覧ください。

www.trumpf.com/s/vcSEL-heating-systems