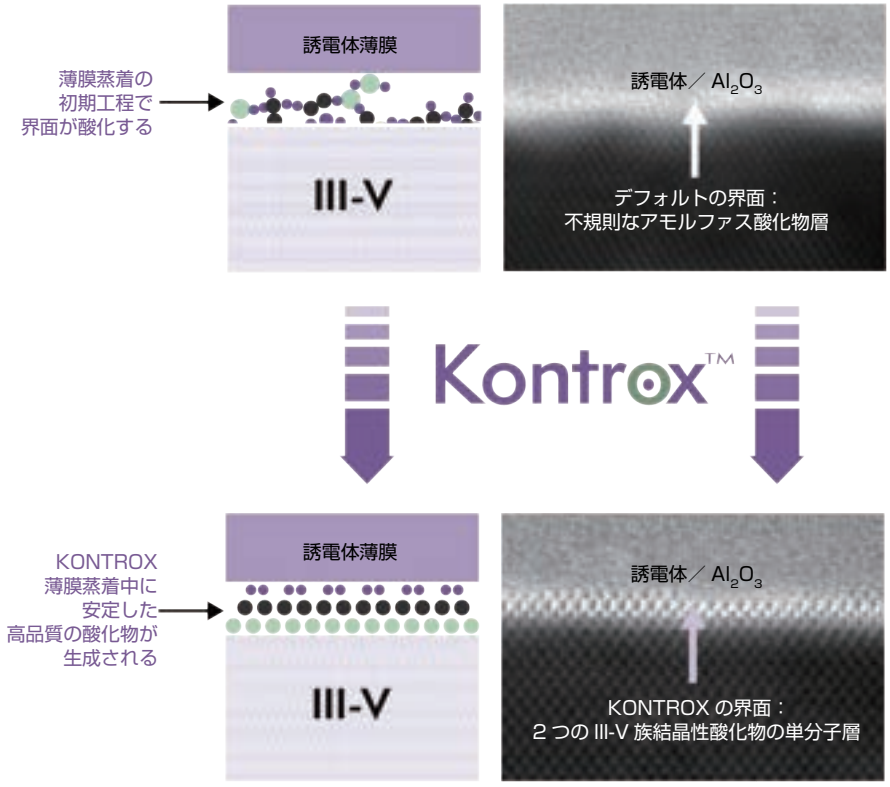
高出力端面発光レーザ用の革新的なファセットパッシベーション

ヨウコ・ラング

結晶性酸化物を使用する方法は、光学的ミラー損傷（Catastrophic Optical Mirror Damage：COMD）のリスクと生産コストを抑えつつ、レーザダイオードの性能を向上させる。

要件の厳しい用途に対する高出力レーザダイオードの利用が増加していることに、効率と信頼性が高く、熱的に安定したレーザファセットパッシベーション戦略の必要性がはっきりと示されている。これらの技術は、光劣化を最小限に抑え、COMDを軽減し、高出力動作時の長期的なデバイス性能を確保するために不可欠である。

しかし、レーザファセットにおける非常に高い光出力密度は、特にCOMDという形で深刻な課題をもたらす[(1)]。この問題は、電気通信、医療機器、材料加工に一般的に使用されているガリウムヒ素ベースのレーザダイオードにおいて特に顕著である[(2)、(3)]。データセンターの規模の拡大に伴い、高速光通信用のリン化インジウム（InP）ベースのダイオードも、動作温度の上昇によってさらに深刻化する、同様の信頼性の課題に直面している。



従来のコーティングプロセスによる界面品質（上）とKontrox処理によって得られた安定した高品質の酸化物（下）の比較

高出力動作時にレーザミラーファセットが徐々に劣化していくことは、端面発光レーザにおいて確実に高い出力を達成することを阻む、主要な制約要因である。COMDの根本的な原因をたどると、半導体の表面と界面の固有特性、特にレーザバー劈開プロセス中とその後の周辺環境への曝露で形成される、欠陥のあるネイティブ酸化物に至る場合が多い。この空気曝露は、高密度の欠陥状態とそれに関連する表面再結合中心を持つ、低品質の酸化物の形成を促進する。こうした要因は、局所的な光吸収と熱暴走を促進し、それは不可逆的な損傷をファセットに与える。従って、COMDを軽減し、高出力レーザダイオードの動作寿命を延長することが、デバイスの信頼性と性能を向上させるために克服しなければならない重要な課題である[(4)]。

ヒ化物をベースとする高出力レーザダイオード（GaAs、InGaAs、AlGaAs）は、レーザ切断、溶接、積層造形、クラッディングなど、数十億ドルもの年間売上高を生み出す産業になくてはならないものである。性能を最適化して、サプライチェーンを確保するために、多くの大手企業が垂直統合型のダイオード製造に目を向けている。

今日のレーザダイオードは、高度な熱管理システム（サブマウントアセン

Kontrox と既存手法の比較：

特徴 ＼ 手法	a:Si コーテイング、Si（業界手法）	E2 プロセス（UHV 中劈開）	空気中劈開＋ZnSe エピタキシー	Kontrox™
品質	✓	✓✓✓	✓✓	✓✓
Al 含有レーザに対する品質	—	✓✓	✓	✓✓
量産スループット	✓✓✓	✓	✓✓	✓✓✓
所有コスト	€	€€€€	€€€	€€
欠点	欠陥を完全に防ぐことはできず、いくらかの結晶欠陥が残る	スループットが非常に低い	・AL 含有酸化物は除去されない ・MBE+IBS 装置が必要	新技術である

KontroxパッシベーションとE2（a-Si）やZnSeプロセスのプロセス品質、材料互換性、スループット、コスト、主な欠点の比較

ブリとアクティブ冷却）と精密な光学アライメントにより、ピーク条件下で数万時間の寿命を達成することができる。しかし、そのような長い寿命を確保するには、高い製造コストと運用コストがかかるため、信頼性、性能、手頃な価格のバランスを図るための継続的なイノベーションが必要となる。

効率の向上は、発熱の低減、デバイス寿命の延長、運用コストの低下に直結する。産業用システムによって供給される光出力は数キロワットを超えるため、これらは非常に重要なことである。同様に、輝度（出力×ビーム品質）を高めることにより、さらに要件の厳しい用途への応用や効率的なシステム設計が可能になる。しかし、根強いボトルネックとして残るのが、極端な出力密度においてレーザファセットはCOMD故障モードに陥りやすいという問題である。

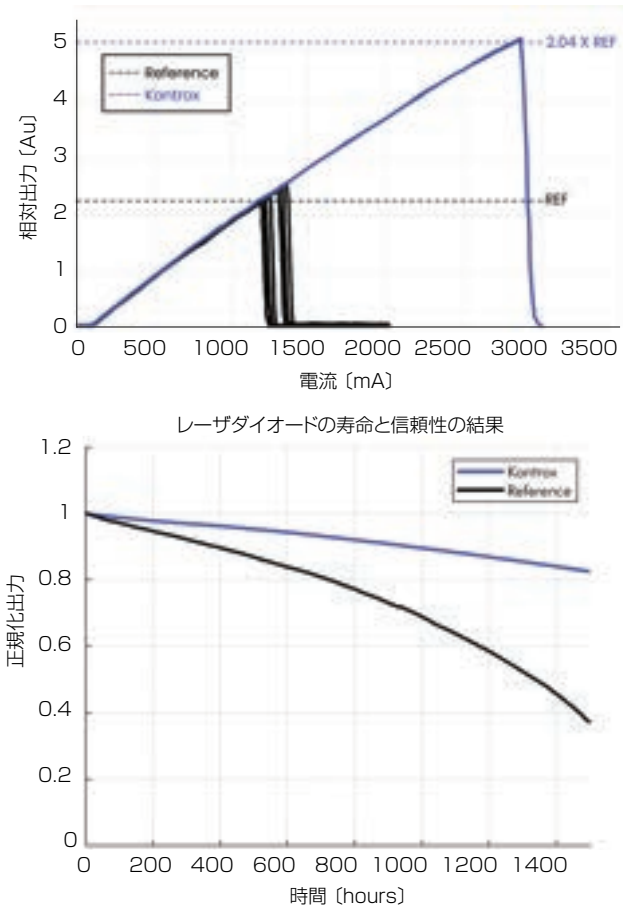
このような課題を解消するには、さらに強固なパッシベーション層、最適化されたファセットコーティング、新しいエピタキシャル構造の開発など、デバイス設計とファセット保護の両方の戦略における進歩が必要である。また、製造時のin situプロセスモニタリングとスマートフィードバックシステムを統合することが、次世代高出力レーザダイオードの歩留まりと信頼性の向上につながる可能性がある。

ファセットの問題とCOMD

一般的なレーザダイオードの製造フローでは、III-Vエピウエハから個々のレーザバーを劈開してから、反射防止／高反射（AR/HR）ミラーコーティングを蒸着する。劈開では通常、原子レベルで平坦でクリーンな結晶性半導体表面が得られるが、空気にさらすと急速にネイティブ酸化物が形成されて汚染物質が吸着し、原子レベルの欠陥がファセットに生じて、関連する電子状態が半導体のバンドギャップに形成される。これによって、非放射再結合、局所的な光吸収、熱暴走が促進されて、不可逆的なファセット損傷が生じる[(5)、(6)]。

COMDの問題に対処するために、この数十年の間に産業界と学術界の両方で、2つの主要なアプローチに焦点を当てた、多大な努力がなされてきた。2つの主要なアプローチとは、劈開とミラーコーティング時の酸化物形成の最小化と、パッシベーション層やコーティングを施す前の酸化物や表面欠陥の除去である。

超高真空（ultrahigh vacuum：UHV）中で劈開して、即座にパッシベーションとミラーコーティングを行う方法は、酸化防止に効果的だが、スループットが低く、技術的に複雑で、プロセスの歩留まりが安定しないという問題がある[(7)、(8)]。空気中劈開したバーに、水素プラズマ洗浄と分子線エピタキシー（Molecular Beam Epitaxy：MBE）成長によるセレン化亜鉛（ZnSe）コーティングを組み合わせる方法は、競争力のある性能を達成できるが、ZnSeの



高Al含有量のレーザバーにKontroxパッシベーションを施すことで得られる、COMDしきい値（上）とダイオード寿命（下）の向上を示すCOMDしきい値グラフの例

過成長は依然として、法外にコストが高く技術的に複雑である[9]、[10]。

COMDを軽減するための現行手法

E2プロセス。UHV劈開 + アモルファスシリコン蒸着は、ファセットを安定化させるが、精密な膜厚制御が必要な半吸収層を使用し、スループットが低いという問題を抱える。

MBEによるZnSe。（GaAsなどとの）優れた格子整合と強い化学的安定性を備えるが、稼働率が限られ（65～70％）、メンテナンスに時間がかかり、占有面積の大きなクリーンルームを伴う、数百万ドル規模のMBEシステムが必要となる。

水素プラズマ+ZnSe。空気中劈開したバーのネイティブ酸化物（アルミニウム含有酸化物を除く）を除去するが、高額なUHV MBE装置にやはり依存する。

どの手法もファセットの安定性を高めるが、資本コストが高く、拡張性が低く、材料の互換性が限られているという制約がある。

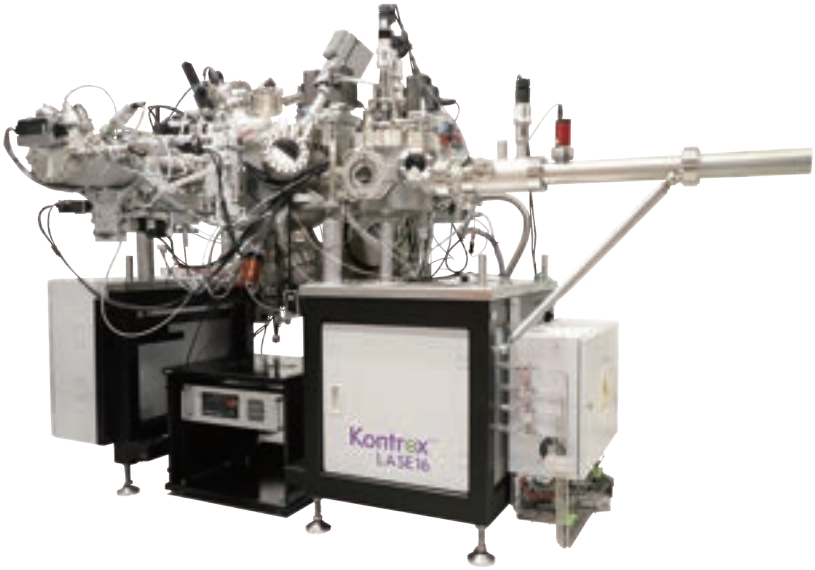
結晶性酸化物パッシベーション

費用対効果に優れたソリューションが市場にあまり存在しないことを受けて、フィンランドのコンプテック・ソリューションズ社（Comptek Solutions）は、真空劈開をなくして、ZnSeエピタキシーに伴う技術的な複雑さや法外なコストを取り払った、レーザダイオードファセットの洗浄とパッシベーションのプロセスを開発した。

同社の特許取得済みのナノエンジニアリング技術である「Kontrox」は、超高真空中で、高度に制御された酸化プロセスを使用して、熱力学的安定性が持続する高品質で欠陥のないネイティブ酸化物を生成する。無秩序でアモルファスなネイティブ酸化物とは異なり、これらの結晶性III-V族表面酸化物は、明確な格子超構造を示し、誘電体／半導体界面における点欠陥が著しく少ない。Kontroxプロセスは、III-V族材料全般に適用可能で、レーザだけでなく、マイクロLED、検出器、RFデバイスの性能を向上させることができる。

性能の向上とCOMDしきい値

空気中で劈開されたレーザバーは、



ターンキーパッシベーション装置「Kontrox LASE 16」は、ロードロックエントリ、メイン処理チャンバ、量産稼働用の自動スタッキング治具を備える

低圧水素プラズマ洗浄の後に、当社独自のUHV装置による酸化工程に入る。この一連の処理で、表面状態が選択的に除去され、均一な結晶性酸化物層が形成されることで、ファセットの品質と復元力が著しく向上する。

広範囲に及ぶ試験により、パルス波と連続波の両方で、未処理のバーと比較してCOMDしきい値が増加すること、パッシベーション後のファセットの安定性が向上すること（これは、AR/HRミラーコーティングの時間的制約の緩和と、生産スケジューリングの改善につながる）、最大出力が高まること（これは、製造の歩留まりとデバイスの信頼性の向上に寄与する）が、明らかになっている。

UHVシステム

産業分野への導入を加速化させるために、当社は、端面発光レーザのファセットパッシベーション用に最適化された、コンパクトなターンキーUHVシステム（Kontrox LASE 16）を開発した。このシステムは、洗浄、結晶酸化、オプションの精密なファセットシーリングを統合し、デュアルチャンバ構造と自動ハンドリングによって生産を効率化する。

従来のMBEベースのパッシベーションには、高額なUHVチャンバ、占有面積の大きなクリーンルーム、広範囲にわたるメンテナンスが必要である。これに対して当社のシステムは、所有コストを最大40%削減し、既存の生産ラインに簡単に組み込むことができる。

カスタマイズ可能なスタッキング治具、最適化されたプラズマ均一性、自動化された治具移動、レーザによるバー加熱などの主要な機能が、さまざまな端面発光レーザ波長とバー形状に対して、高いプロセス安定性、スループット、効率を達成するために役立つ。また、in situプロセスモニタリングにより、表面変形に対する原子レベルでの精密な制御が可能である。

レーザファセットの保護

非効率的でコストのかかるコーティングプロセスの問題に取り組むレーザメーカーに対し、コンプテック・ソリューションズ社のKontroxによる結晶性酸化物パッシベーションは、レーザファセットを保護するための新たなアプローチである。この技術は、性能を損なうことなく、真空劈開をなくしてZnSeエピタキシーのコストを取り払うことにより、高出力端面発光レーザのスケーラブルで費用対効果の高い製造を可能にする。このイノベーションは、電気通信、医療、産業、新興市場を対象とするフォトニックデバイスの信頼性と効率を向上させるための道を開くものである。

参考文献

(1) J. W. Tomm, M. Ziegler, M. Hempel, and T. Elsaesser, Laser & Photon. Rev., 5, 3, 422-441 (2011).
(2) A. Moserand and E. E. Latta, J. Appl. Phys., 71, 10, 4848-4853 (1992).
(3) Y. Song et al., Crystals, 12, 765 (2022).
(4) R. W. Lambert, T. Ayling, A. F. Hendry, and J. M. Carson, J. Light W. Technol., 24, 2, 956-961 (2006).
(5) J. Robertson, Appl. Phys. Lett., 94, 152104 (2009).
(6) L. Lin and J. Robertson, J. Vac. Sci. Technol. B, 30, 04E101 (2012).
(7) M. Gasser and E. E. Latta, U.S. Patent 5,063,173 (Nov. 5, 1991).
(8) M. Gasser and E. E. Latta, U.S. Patent 5,144,634 (Sep. 1, 1992).
(9) P. Ressel et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 17, 5, 962-964 (2005).
(10) J. E. Boschker et al., IEEE Photon. J., 14, 3, 1-1 (2022).

著者紹介

ヨウコ・ラング（Jouko Lång）は、フィンランドのコンプテック・ソリューションズ社（Comptek Solutions）の共同創設者で最高技術責任者（CTO）。URL: www.comptek-solutions.com

LFWJ