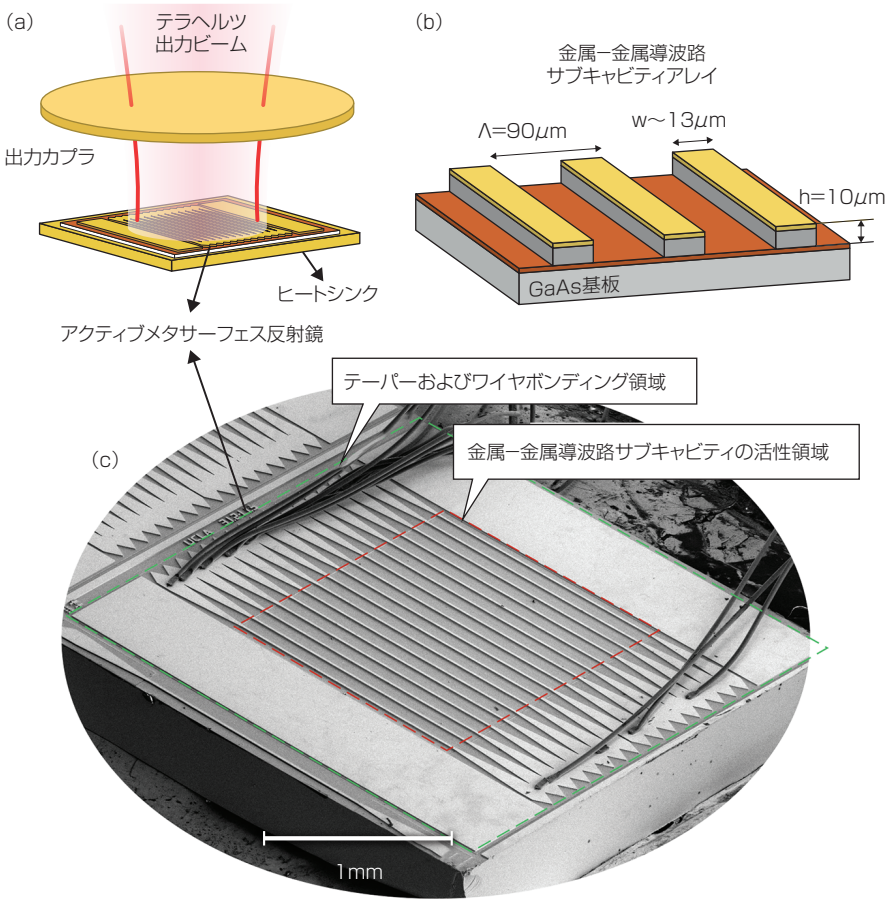
テラヘルツQCメタサーフェスVECSEL、発散が少なく、ニア・ガウシアン出力を実現

2000年代早期に連続波（CW）量子カスケード（QC）ベースのテラヘルツレーザが実証されてから、研究者たちは出力レベルを低ミリワット範囲に上げること、発散角を10°程度に抑えること、またビーム品質を改善することに継続して努めてきた。

残念ながら、これらの性能パラメータのどの1つでも改善しようとすると他のパラメータが犠牲になることがよくあり、複数のパラメータの同時改善は非常に難しい。例えば、半導体QCLの出力を高めることは難しい。導波路ベースの利得キャビティの拡大は、マルチ横モード発振に悪影響を及ぼし、ビーム品質やモード安定性が悪化するからである。また、テラヘルツ波長の達成は一般にサブ波長金属導波構造やプラズモン導波路構造を必要とするので、特別なアンテナ結合分布帰還（DFB）あるいはフォトニック結晶キャビティを使用しなければ、結果的に大きなサイドローブを持つビームが著しく発散することになる。

こうした性能トレードオフの多くを除去することを目指した、カリフォルニア大ロサンゼルス校（UCLA）の研究者たちによる代替設計は、テラヘルツ周波数で動作する垂直外部共振器発光レーザ（VECSEL）である。VECSELは、増幅メタサーフェス反射鏡と平坦な出力カプラで構成されている[1]。

メタサーフェスとは、二次元（2D）メタマテリアル表面であり、これは基本的にはアンテナ結合QCキャビティアレイである。一方、出力カプラは市販のワイヤグリッド偏光子で構成されている。カプラは、レーザキャビティを構成し、一定量のパワーを出力する半透明ミラーである。



テラヘルツ量子カスケード（QC）垂直外部キャビティ表面発光レーザ（VECSEL）は、アクティブメタサーフェス反射鏡と出力カプラ（a）で構成されている。メタサーフェスは金属−金属導波路サブキャビティアレイでパターニングされている（b）。走査型電子顕微鏡（SEM）画像は、メタサーフェス反射鏡とその1.5×1.5mm^{2}アクティブ領域（c）を示している（UCLA提供）。

ビームエンジニアリング

アクティブメタサーフェス反射鏡は、幅wの金属−金属リッジ導波路で構成されており、これはガリウムヒ素（GaAs）／アルミニウムGaAs（AlGaAs）QCレーザ媒質を金属ストリップで上下から挟んでいる。これらの10μm厚サブキャビティ導波路の各々は、フリースペース波長λ0よりも小さい周期Λによって分離されており、標準的な入射光からの回折損失とサイドモード励起を防いでいる。

これらの改良サブキャビティは、GaAs基板上の導波路内活性材料にモードを巧妙に閉じ込める。しかし、それらは設計上、各先端がテーパー状の吸収領域となっている。目的はフィードバックの抑圧と、通常の閉じ込め導波モードに

おける発振を防ぐことである。むしろ、個々のサブキャビティは基本的には、入力テラヘルツ照射をQCレーザ利得媒体に結合するアンテナであり、誘導放出によってテラヘルツ光を増幅し、再度メタサーフェス面に垂直に向ける。

全体として、これらのサブキャビティアレイは入射テラヘルツ波を増幅する「メタサーフェス・リフレクトアレイ」ミラーとして機能する。そのような増幅ミラーは、今度は外部キャビティ作製に利用できる。つまり、それは高品質ビームを直接生成するようになる。メタサーフェス応答は特定偏光で起こるため、出力カプラとして使用されるワイヤグリッド偏光子は、キャビティからの伝達を即座に出力結合最適に変える。

公称2.9THz動作になるように設計された1.5×1.5mm^{2}利得キャビティ（約17のサブキャビティリッジ）の実験結果は、異なるバイアス条件で2.8～2.9THzの発振を確認している。また、リッジ幅は11.5～13.5μmの範囲で変動、周期は90μm。これらの変動で、最大の発振パワーとなるのはリッジ幅12.5μm。これはおそらく、利得スペクトルとメタサーフェス共振との重なりがベストであるからだ。

ワイヤグリッドカプラを用いた外部キャビティ構成では、メタサーフェスレーザは、16.7mW/Aスロープ効率で出力5.5mWに達する。遠視野ビームパターンは、発散角が約5°でほぼガウシアン形状である。将来的に、CWレーザ出力を改善する多くの方法が考えられる。

「リフレクトアレイ・メタサーフェスとレーザを組み合わせたのはこれが初めてである。この組み合わせによりVECSELアプローチでテラヘルツ波長が可能になり、さらなる光出力と優れたビーム品質の同時実現に道が開ける」とUCLAの電気工学准教授、ベンジャミン・ウィリアムズは話している。「将来的には、メタサーフェスアプローチにより、ビームを改善して任意の偏光、形状、位相面、スペクトル特性も可能になるかも知れない」と同氏は続けている。（Gail Overton）

参考文献

(1) L. Xu et al., Appl. Phys. Lett., 107, 22, 221105 (2015).

LFWJ

光産業技術マンスリーセミナー

OITDA

Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム（4~5月）

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第 395回 4月19日（火）15:30-17:30	「自動運転技術の最新動向」 講師：二宮 芳樹氏（名古屋大学）
第 396回 5月17日（火）15:30-17:30	「光技術を用いた低侵襲医療機器、ヘルスケア機器の開発」 講師：芳賀　洋一氏（東北大学大学院）

■場所　一般財団法人光産業技術振興協会
■定員　各６０名
■参加費　光協会賛助会員：1,500円（税込み）　／　一般参加：3,000円（税込み）
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

■申込方法　オンライン申込フォーム　>>> **http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html**
■申込締切　定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先　一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当　潮田、綿貫
〒112-0014　東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F　TEL：03-5225-6431　FAX：03-5225-6435
E-mail：mly@oitda.or.jp　URL：http://www.oitda.or.jp/