

チューナブルダイオードレーザーで マイクロ構造・ナノ構造を研究

ルドルフ・ニューハウス

光励起マイクロキャビティ、先進的量子技術、量子ドットの活用は、フォトニクスに大きな影響を与える可能性があるチューナブルダイオードレーザーの応用である。

マイクロ構造とナノ構造が基礎研究や応用量子技術にとってますます重要になってきている。そうした構造の顕著な例はマイクロキャビティや量子ドットである。また重要な応用例には、シングルフォトン光源、エンタングルフォトン光源、量子コンピュータ用の量子ビット、および様々なセンサがある。そうした構造によって、量子限界、つまりマイクロキャビティ内の量子振動など、量子ドットの量子電磁力学(QED)、あるいはキャビティにシングル量子ドットを持つキャビティ QED 研究さえも可能になる。

多くのアプリケーションが、適切なチューナブル連続(CW)レーザーを用いた共鳴光励起を必要としている。適切な波長でマイクロキャビティを光励起することで、微視的コヒーレント周波数コムや短パルスを作ることさえ可能になる。これは、フォトニクスに大きな影響を与えることが期待されている極めて有望なアプリケーションである。

マイクロキャビティ

量子特性は、特殊サンプル形状や冷却を用いなければ、環境デコヒーレンスのためにマクロ的な対象では通常は観察できない。例えばマイクロキャビティを利用すると、相対的に大きなマイクロメートルスケールの構造で量子効果を観察することができる。図1は、

隔離したドーナツ型、 $\sim 30\mu\text{m}$ 径のガラスマイクロキャビティを示している。これはマクロ的な機械的オシレータとリング形状の高Q値光キャビティを統合したものである。エバネセント場でキャビティに結合された光は、全反射によりドーナツ壁を跳びはね、放射圧力によって構造に小さな力を伝達する。

こうして、結合光は構造の振動挙動に影響を与えることができ、逆も可である。この特性によりマイクロキャビティは、量子研究にとって胸を躍らせる対象になる。例えば、研究者は光振動と機械的振動の間のパラメトリック結合を観察した⁽¹⁾。またそうしたマイクロキャビティのアクティブフィードバック冷却のためのオプトメカニカル結合に基づくセンサも利用した⁽²⁾。

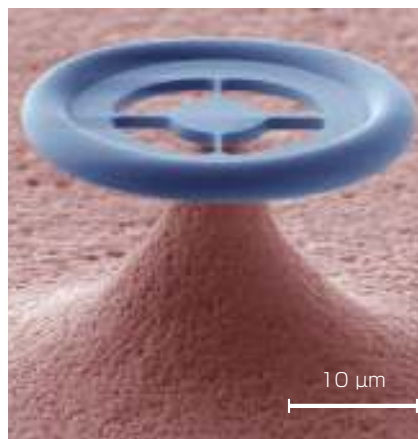


図1 マイクロトROIDは同時に、光共振器であり、機械的共振器でもある(提供:EPFL、トビアス・キッペンベルク氏)。

サイズが小さいのでマイクロキャビティの自由スペクトル領域(FSR)は相対的に大きく、わずかな偏差がキャビティ共鳴の大きなスペクトルシフトを起こす。したがって、マイクロキャビティの共鳴周波数を見つけて研究するためには広帯域モードホップフリー可変レーザーが貴重なツールである。また、キャビティの単一FSRを超えて掃引するためのツールでもある。さらに、不要な励起振動を疑似的に回避するために、レーザーはパワーと周波数においてローノイズでなければならない。

マイクロキャビティの共振周波数のサイズや他の環境パラメータへの依存は、有望なアプリケーション、溶液内の個々の生物学的分子のラベルフリー検出に活用できる。これは、広帯域可変モードホップフリーレーザー(トプティカ社のDLC CTLのような)と組み合わせたマイクロトROID光共振器を使うことで可能になる。研究者は、そのようなレーザーがマイクロトROID光共振器に対してどのように周波数安定化されているか、また共振器に結びついている分子によって起こる光共振周波数シフトがどのように観察されるかを説明している⁽³⁾。このような方法で、半径2~100nmの粒子が検出され、識別される。

成果は、さらに非侵襲的腫瘍生検分析試料作製に拡張され、溶液の光質量分析計の基盤となる。このアプリケーションでは、広帯域モードホップフリーチューニングが必要となるだけでなく、マイクロキャビティに対してレー

ザを簡便に安定化する機能も必要になる。例えば、CTLレーザは、組込み、オールデジタル安定化エレクトロニクスを持っており、オプションで高帯域アナログ、もしくは高速デジタルロッキングエレクトロニクスを利用できる。

マイクロ共振器ベースの周波数コム

マイクロ共振器も、光周波数コム開発のためにますます有効活用されるようになる。誘導光フィールドの小さなモード体積と 10^{10} までの高Qファクタのために、これら共振器の強度が非常に高いので、非線形効果が極めて強くなる。マイクロ共振器は、非線形四光波混合(FWM)によりCW励起光を他の周波数成分に変換できるので、これにより周波数コムを作ることができる(図2)。

結果としての周波数コムの特性は、励起レーザ波長に強く依存する。CWレーザがソリトン状態とともにインコヒーレントな高ノイズ状態を励起できるからである。ソリトン状態は好ましい結果としてコムがコヒーレントになり、極めてローノイズで狭線幅、短パルスという特徴が得られるからである。励

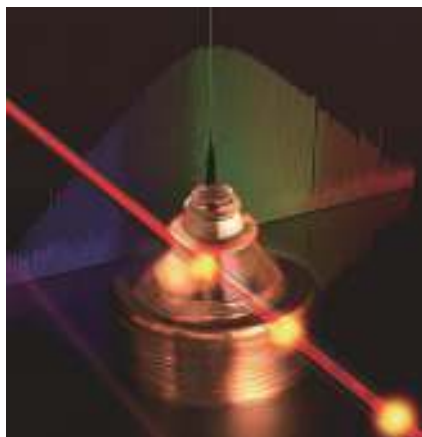


図2 周波数コム実現のための連続波(CW)光によるマイクロキャビティ励起(提供:トビアス・ハー氏、CSEM社)。

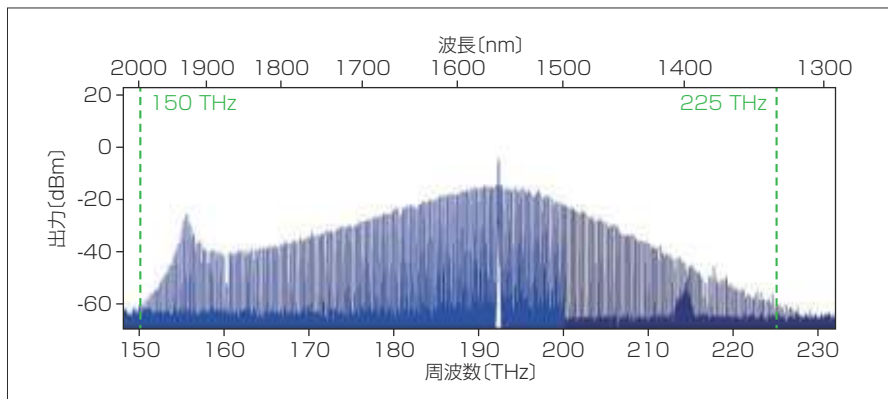


図3 ローノイズコヒーレントマイクロコムの光スペクトル。マイクロ共振器は、短パルスで、適切なCW励起をコヒーレント・フォトニックチップベース光周波数コムに変換する(提供:EPFL、ピクター・ブラッシュ氏)。



図4 マイクロコム作製用SiN集積マイクロキャビティ(提供:EPFL、マイケル・ガイゼルマン氏)。

起レーザをより高い周波数から低い周波数まで掃引すると、異なるソリトン状態間で急なステップが生ずる。各ステップは、マイクロ共振器内で周回するソリトン数の連続的な減少に対応している。レーザに対するフィードバックにより、マイクロコムはこれらのステップのひとつで安定化でき、安定したソリトン動作が可能になる。図3は、チューナブルレーザダイオードで励起した、そのようなマイクロキャビティの光シングルソリトンスペクトルを示している⁽⁴⁾。マイクロキャビティは、窒化シリコン(SiN; 図4)でできている。

結晶ベースのマイクロ共振器は、特徴として最高のQファクタであるため、特に有望である、これまでは、結晶ベースのマイクロ共振器の励起はローノイズファイバレーザだけを利用していた。そのようなファイバレーザは、広帯域可変ではなく、また従来型のチューナブルダイオードレーザは、ノイズ

がもっと高いので、適切ではなかった。しかし今では、新世代の連続可変ダイオードレーザの特徴は、超低ノイズ電流ドライバと低ドリフトで10kHz以下の狭線幅を可能にするレーザ共振器である。このようなチューナブルダイオードレーザを用いると、結晶ベースのマイクロコムでさえ励起できる。高帯域アクティブ周波数安定化を利用すると、レーザの線幅は1Hzレベルにでき、マイクロコムの励起レーザにおけるノイズ効果を調べることができる。

マイクロ共振器の分散特性を明らかにすることは、理想的な特性のマイクロ共振器設計に極めて重要である。ここでは、究極のツールはモードホップフリーチューナブルレーザである。レーザは、シフトが厳しく制御された安定化コム⁽⁵⁾にロックされている⁽⁶⁾。

量子ドット

半導体量子ドットは3次元(3D)ナ

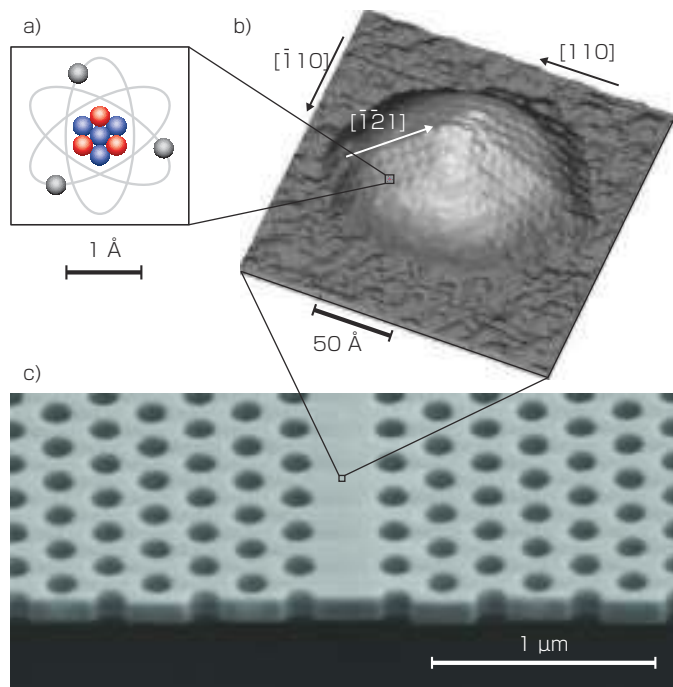


図5 量子ドット(b)は、原子のような特性(a)を持つ小さな物体である。量子ドットは、フォトニック結晶構造(c)に組み込んで光と物質との相互作用を強化することができる。(ロダール氏(Lodahl)、マムーディアン氏(Mahmoodian)、シュトッベ氏(Stobbe)の許可を得て転載⁽⁹⁾)

ノメートルサイズであり、その電子状態は強い閉じ込めのために量子化されている。このような量子ドットも他の単一原子のような特性を示す、つまり強いフォトンアンチバンチングやほぼ寿命限界の線幅である。また、これらは人工原子と呼ばれることもよくある。量子ドットは、量子ビット実現に関連して興味深いシステムである。半導体量子ドットは、半導体プロセスがよくわかっていることから、特にスケラブルな量子コンピュータの候補として有望である。実際の原子とは異なり、半導体量子ドットは、固体状態で制御して成長させることが可能であり、その周囲にはフォトニック結晶キャビティや導波路のような他の構造を形成できる(図5)。

量子ドット状態の共鳴光励起は、特にコヒレント操作や検出にとって重要である。しかし、本質的にランダム成長プロセスであるため、全ての量子ドットがわずかにサイズが違っており、したがって光共鳴周波数が異なる。ひ

とつの量子ドットの光遷移を見つけて共鳴励起するには、広帯域モードホップフリーのチューナブル狭線幅レーザーが理想的なツールとなる。

これは、結合量子ドットには特に当てはまることである。スケラブルな量子ビットアレイへの途上で、結合量子ドットは最近かなりの関心を集めた。結合量子ドットの電子遷移計測が、電子と核スピンのスピン・センシティブ結合と操作を実証し、自己組織化結合量子ドットにおいて、結合エキシトンの光スペクトルを計測して計算したものである。

ひとつのアプローチは、自己組織化成長させ、量子ドットをお互いに重なり合うように結合することである。そのような量子ドット分子におけるドット間結合は、電子-ホール互換相互作用および電子-電子互換結合によって支配することができる。ゲート電圧により量子ドット帯電状態を変えることで、これらふたつのメカニズムを入れ替え、結合力を変えたり/制御したり

できる⁽⁷⁾。

可変結合力によって、そのようなダブル量子ドットは量子ビットや量子コンピューティングアプリケーションにとって興味深いものとなる。しかし、両方の量子ドットを再び共鳴励起するには、その光共鳴に数十ナノメートル(約10THz)の違いがあるので、量子ドット的一方から他方へ簡単に変わるには、広帯域可変モードホップフリーレーザーが必要になる。

フォトニックナノ構造における量子ドット

シングルフォトンレベルで量子オプティクス実験にとって重要な側面は、光と物質との相互作用を著しく強化し制御することである。狙いは、放出シングルフォトンが優先的にひとつの明確に定義された光モードに結合するようにすることである。量子ドットを他の半導体構造、導波路あるいはフォトニック結晶構造(例えば、キャビティ)に集積することによって、キャビティ

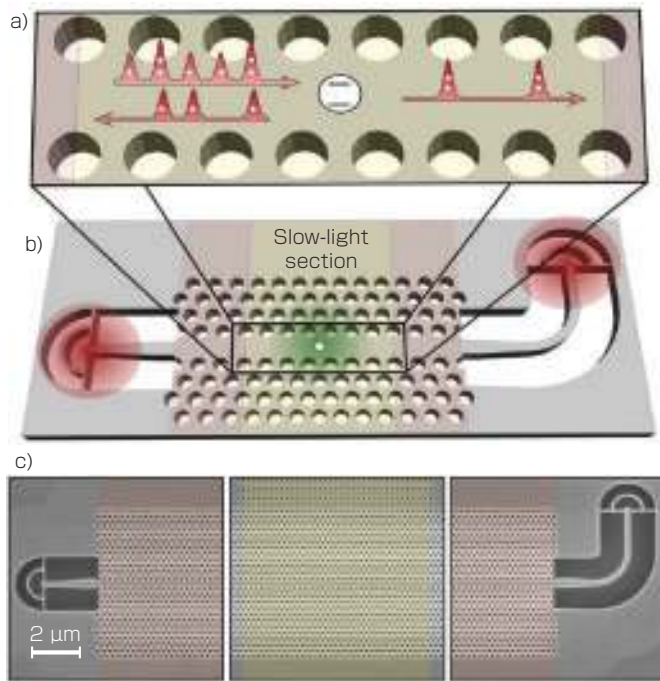


図6 導波路内に量子ドットを集積したシングルフォトン非線形光学、ここではシングルフォトンが量子ドットによって反射され、他方多数のフォトンが通過する(a): (b)と(c)は、それぞれ同じものの説明イラストと走査型電子顕微鏡写真である(ジャヴァデ氏(Jvadi)らの許可を得て転載⁽⁸⁾)。

QED実験でさえも可能である。原子をトラップする必要はない。

フォトニックナノ構造は、光と物質との相互作用を調整する手段を提供する。これによって、自然放出制御、修正ラム(Lamb)シフト、強化版双極子間相互作用、高効率シングルフォトン源、極大非線形性など、広範な実験が可能になる。

量子ドットをフォトニック結晶導波路に集積することで、例えば、コペンハーゲンのニールスボア研究所の研究者は、シングルフォトンレベルで非線形光学を実証することができた、シングルフォトンが通過する一方で量子ドットによって反射された(図6)⁽⁸⁾。そのようなフォトン間の非線形相互作用は、古典的および量子情報技術の両方で論理動作を可能にするものであり、スケラブルな導波路ベースフォトニクス量子コンピューティングアーキテクチャへの道を開くものである。

ここで議論したマイクロ、ナノおよ

び量子アプリケーションと実験は、共通点がある。それらは広帯域モードホップフリー可変レーザを必要としている。新しい世代の外部共振器ダイオードレーザ(ECDL)は、極めて高い分解能で非常に広い可変が可能であり、同時に狭線幅で、低ノイズ、低ドリフトである。いくぶんは、これらの改善された特性はオールデジタルコントローラによるものである。そのコントローラはアクティブフィードバックループで確実にシングルモード動作を

可能にし、必要なら自動的にレーザキャビティを最適化できる。

可変ダイオードレーザの開発における最新の進歩により、マイクロ、ナノ、量子の世界は著しく利用しやすくなった。ここで触れた話題の一部は将来の技術開発にかなり大きな影響を与えるものである、例えばマイクロコムが携帯電話や車に導入されるとき、あるいは衛星通信が量子暗号で保護され、フォトニック結晶に集積した量子ドットで実現されるときである。

参考文献

- (1) E. Verhagen, S. Deléglise, S. Weis, A. Schliesser, and T. J. Kippenberg, *Nature*, 482, 63-67 (2012).
- (2) D. Wilson, V. Sudhir, N. Piro, and T. J. Ghadimi, *Nature*, 524, 325-329 (2015).
- (3) T.-T. Su, "Label-free detection of single biological molecules using microtoroid optical resonators," dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, CA (2014).
- (4) V. Brasch et al., *Science*, 351, 6271, 357 (2016).
- (5) T. Puppe et al., *Opt. Lett.*, 41, 8, 1877-1880 (2016).
- (6) R. Neuhaus et al., "1THz synchronous tuning of two optical synthesizers," *Proc. SPIE*, 9900, 99001E (Apr. 29, 2016).
- (7) S. Fält et al., *Phys. Rev. Lett.*, 100, 106401 (2008).
- (8) A. Javadi et al., *Nature Commun.*, 6, 8655 (2015).
- (9) P. Lodahl, S. Mahmoodian, and S. Stobbe, *Rev. Mod. Phys.*, 87, 347 (2015).

著者紹介

ルドルフ・ニューハウスは、独トプティカフォトニクス社の製品マネージャー、科学ダイオードレーザ担当。