

レーザーが形作る量子技術の世界

ステファン・リッター、ユルゲン・ステューラー

狭線幅可変ダイオードレーザー、増幅・周波数倍増レーザー、周波数コム、波長計により、多くの量子技術が実現する。

量子理論が初めて定式化された1世紀前、どれほど多くの技術開発が量子物理学から生まれ、それが今日の私たちの生活や交流のあり方を形作ることになると、誰が想像したでしょうか。コンピュータで仕事をしたり、携帯電話を使ったり、磁気共鳴イメージングによる診断を受けたりする場合、いずれも技術の基礎となっているのが量子力学の理解である。

フォトニクスでは、レーザーと発光ダイ

オード(LED)がその代表例であり、レーザーだけでも現在の市場は120億ドルを超える。今や、新たな量子技術の兆しが見えている。研究者とサイエンスライターともに第2の量子革命と宣言するほど、エキサイティングなアプリケーションである。

基礎研究から市場へ

彼らの情熱は、「量子2.0」に多額の投資をしている政府や企業にも共有さ

れている。量子系の最大の弱点は、しばしば直感に反して不気味にすら受け止められることだが、実際には新技術の根本となっている。結果として得られるアプリケーションは新しいものだが、量子技術を実現するツールは真新しいものではない。すでにニュートンは、近代科学技術の中心に存在するものを認めていた。「私が彼方を見渡せたとするのなら、それは巨人の肩に乗っているからだ」。

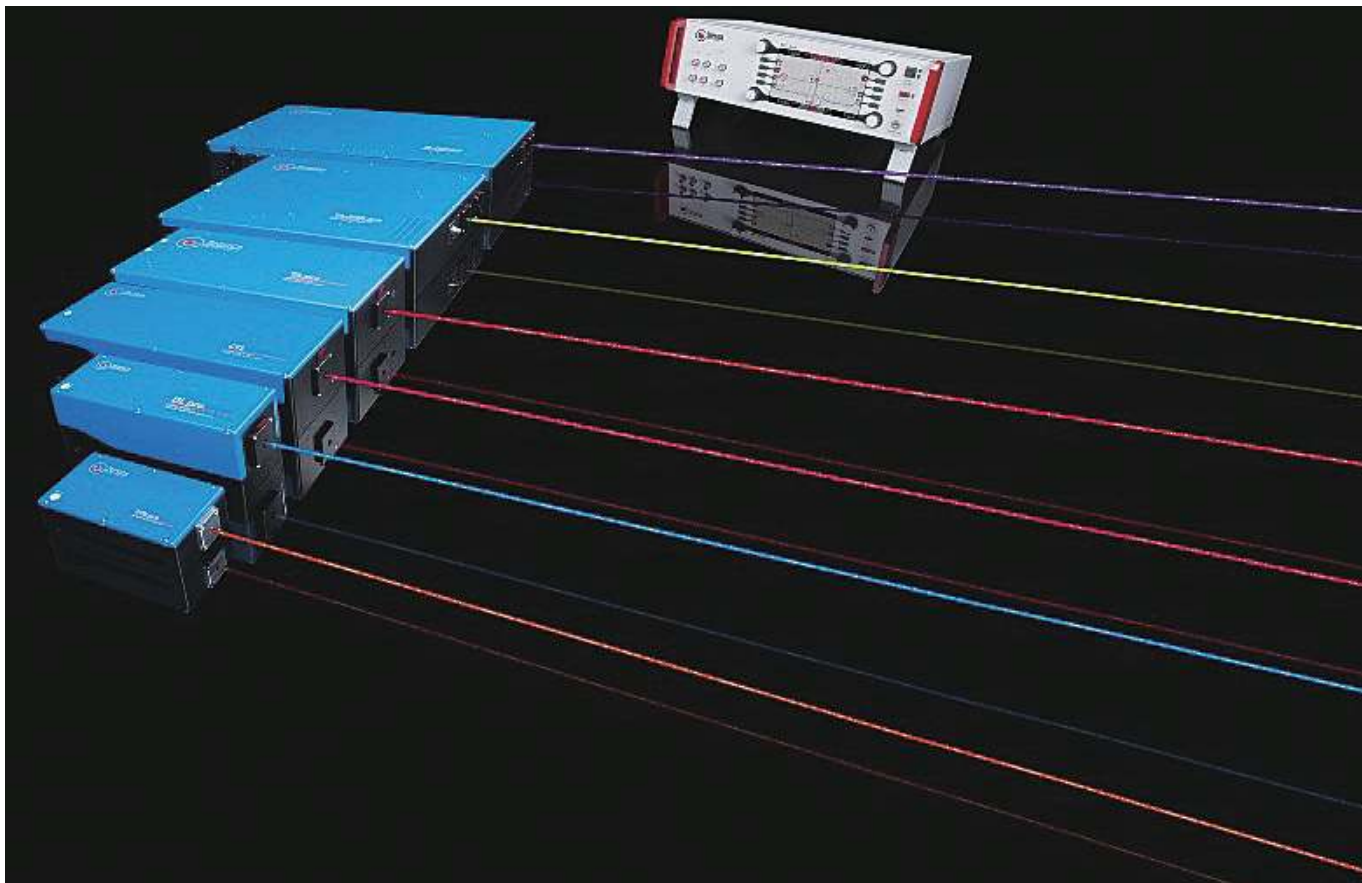


図1 トプティカフォトニクス社は、波長可変ダイオードレーザーの豊富なラインナップと便利なデジタル制御により、レーザーを必要とする量子技術にカスタムソリューションを提供している。

このことは、特に量子技術に当てはまる。例えば、最初の量子革命の産物であるレーザーは、量子技術を実現する技術である。その応用は、純粋に光量子技術に限られていない。むしろ、レーザーは大多数の量子装置で使用されている。

事実、レーザー企業である独トプティカフォトニクス社 (TOPTICA Photonics) は、レーザー冷却と原子種分光學に起源を持ち、現在では量子通信、量子コンピュータ、量子シミュレーション、量子計測、量子センシングなど、あらゆる分野の量子技術におけるレーザーシステムを提供する主要企業となっている。

最も明確なことは、量子ネットワークの中心に光源があることだ。なぜなら、長距離にわたって量子状態の天然のキャリアとなるのが光子だからだ。光子は、量子鍵配送や、将来的には量子コンピュータの相互連結などのアプリケーションを可能にする。その中でレーザーは多くの量子コンピュータや量子センサ、光時計に必要なコンポーネントでもある。本質的には、レーザーから発せられる光をすべての自由度で驚異的に制御することは、最も重要なツールだ。なぜなら、しばしば量子限界において、他の量子系を初期化して操作し、読み出すからである。

レーザーのすべての特性、すなわち波長、線幅、出力、偏光、空間的ビームプロファイルは、量子技術において重要な制御パラメータである。量子通信では、制御パラメータが量子情報の多くの異なるエンコーディングに反映されている。単一光子の偏光は、その時間的形狀がタイムビン量子ビット (qubit) の形としているように、量子ビットを運ぶことができる。

単一光子のタイミング、周波数、空

間構造、さらには軌道角運動量も同様に、量子情報をエンコードするために用いられるが、特定の長所と短所がある。これらの自由度のいくつかは、二準位系に存在する量子ビットを超える

ために使われ、量子ビットをエンコードする。つまり、追加された次元で量子ビットの一般化である。光パルスの位相と振幅は量子通信にも採用されている。

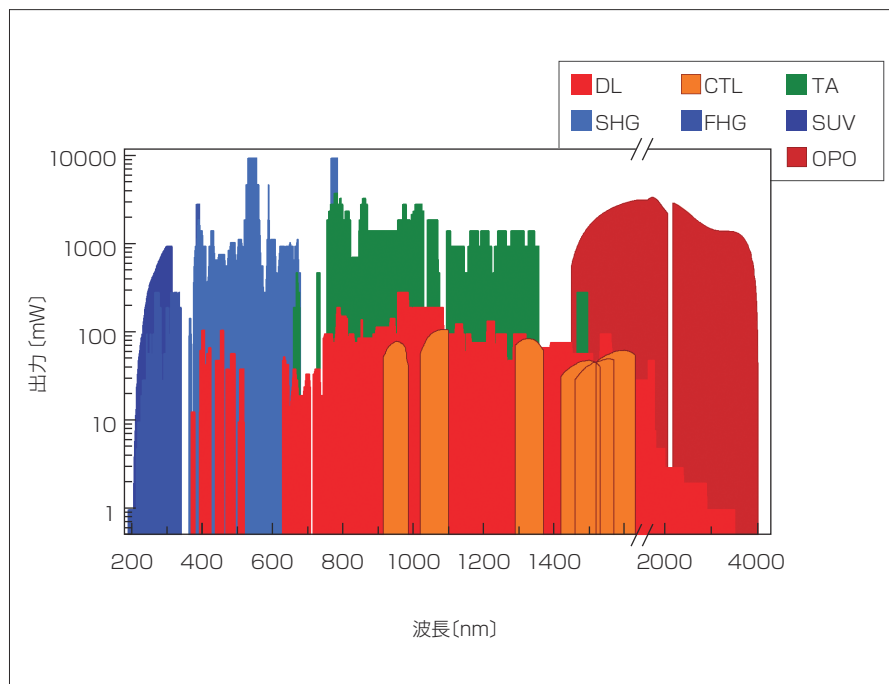


図1 各量子系には、特定の波長と出力レベルを組み合わせたレーザーが必要である。トプティカの波長可変レーザーには190nmから4μmまでの幅広い波長範囲があり、多くの量子アプリケーションを可能とする。

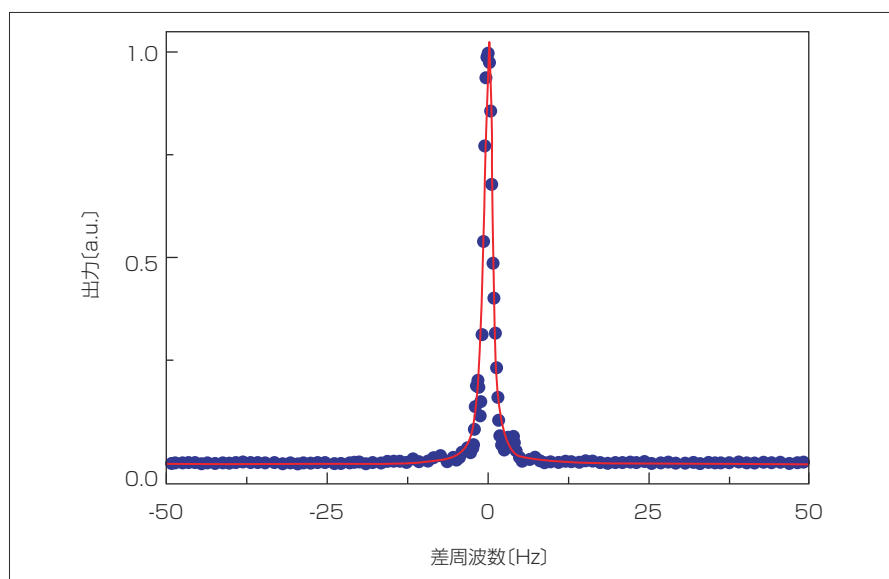


図3 狭線幅レーザーは、光時計のようなアプリケーションの鍵となる。高精度の光共振器にロックすることで、外部の共振器ダイオードレーザーの線幅を1Hzレベルにまで狭くできる。グラフは、独立した2つのトプティカ社のダイオードを、1162nmにおいて共振器で安定化させた光ビット信号を示す。

すべての波長が必要

量子技術で使用される、または量子技術のために提案されている量子系のリストは、量子アプリケーションのリストに劣らず多様である。これは、シリコンベースの古典的なコンピュータ技術のように「1種類ですべてをこなす」アプローチに比べると未熟に見えるかもしれない。しかしながら、それが意味するものは、個々の原子のエネルギーレベルの構造のような特性と、多様なアプリケーションとの本質的な相互関係である。

研究者は、周期表に存在する多くの異なる元素を中性の状態だけでなく、イオン、分子内、固体の中に埋め込んだ状態としても扱うことで、本来持っている多様性を最大限に活用している。これら自然の量子系に加え、量子ドットのような人工原子やその他のナノ構造が補完する。基本的にすべての波長のレーザーが必要とされるように、ここで述べたすべての系の共振周波数は電磁スペクトルの大部分をカバーしている(図1、2)。

そのような文字通りのカラフルさに対して、個々の種において非常に厳密に定義された遷移周波数が補完しており、非常に遷移が狭い原子やイオンを理想的な周波数基準にさせる。これらの遷移を光時計のレーザーで調べると、しばしばレーザーの線幅が光時計の品質を決定する(図3)。

この極限レベルの精度では、環境制御が重要や役割を果たす。例えば、中性原子をトラップするためには、マジック波長と呼ばれる光を使う必要がある。この波長でのみ、光トラップによって生じるクロック遷移の乱れが、目標とする精度に対して十分に小さい。

アプリケーションによっては、単一周波数レーザーでは不十分である。例え



図4 量子アプリケーションにおけるコンパクトでロバストなレーザーソリューションの要求に応えるため、トプティカフォトニクス社はモジュール式レーザーの19インチラックシステムを開発している。ラックシステムは、狭線幅の波長可変ダイオードレーザー、増幅・周波数倍増レーザーシステム、周波数コム、波長計、その他のコンポーネントから構成される。デジタルレーザーコントローラは、レーザーモジュールの遠隔制御と、アプリケーションの制御ソフトウェア(例えばPythonソフトウェア開発キットの使用)との深い統合を可能にする。

ば、2つの位相同期レーザーをペアにすると、1つのレーザーでは対処できない原子を遷移できる。1つのレーザービームで多くの離散周波数を使う極端なバージョンは、トプティカ社のDFC CORE+のような光周波数コムである⁽¹⁾、⁽²⁾。その出力は、空間的にはシングルモード

だが、周波数コムの周波数スペクトルは等間隔の線から構成される。

周波数がわずかに異なるが厳密な位相関係のもとで定義された約100万個のレーザーからなる低出力のビームが重なる様子を想像してみよう。こうすることで、周波数コムを想像できる。有効数字21ケタという驚くべき正確性で光時計を比較するための優れたツールである⁽³⁾。異なる波長拡張を用いると、DFC CORE+のコムスペクトルを420~2200nmの間の周波数に変換できる。

直接周波数コム分光法というアプリケーションでは、コム構造を使用して、等距離にある多くの異なる周波数を同時にプローブできる。周波数コムを利用すると、従来の手法よりも正確で低ノイズなマイクロ波トーンを生成できる。そしておそらく最も重要なことは、光周波数とマイクロ波周波数の間のギャップを正確に埋めることができる。

このようにして、量子系における光学遷移の精度を、高周波やマイクロ波の周波数領域におけるユビキタス信号に移すことができる。光周波数コムが最初に実験的に実現してから20年後、光周波数コムなしに光時計は考えられていない。光周波数コムは、それ自体が研究対象であった巨大なデモ用モデルから、コンパクトでロバストな最高精度のツールに変化し、さらに増え続けている科学的応用に便利に活用されている。

すべてのレーザー特性に対する高い要求

光トラップは、レーザー光を用いて原子の運動を操作する方法の一例に過ぎない。原子を絶対基底状態に冷却するためにも用いられる。これにはしばしば、スペクトル特性を完全に制御しながら保持する間、大量の出力を必要と

する。トラップ内イオンをベースにする量子コンピュータをスケールアップするときには、1つの量子ビットを運ぶ各イオンを個別にアドレス指定する必要があるため、高出力が必要とされる。

そのような状況では、半導体ベースのテーパーアンプのような光増幅器との連携が理想だ。テーパーアンプの驚くべき特性の1つは、レーザーのスペクトル特性はシード光源そのままに保持される点である。そのため、特定の必須スペクトル特性を持つよう調整された1つのレーザーから出発し、ビームスプリッティングとテーパーアンプとの連結により、必要なスケラビリティが得られる。

トラップされたイオンの状態でさらに多くの量子ビットを量子コンピュータに追加するとき、必要とされるレーザー出力を増幅する方法として最も効果的なのは、テーパーアンプを追加することだ。当然ながら、これらのアプローチではすべて、使用するレーザービームのポインティングやその他の空間特性に対する要求も厳しい。

レーザーの偏光は別の制御因子であり、選択律を用いてスペクトル的に縮退遷移した間でさえ識別できる。単一光子の偏光は、量子通信における量子ビットの符号化のための自然な自由度としてすでに言及された。

今後数年間の課題

アプリケーションと物理学的な側面からの、すべてのレーザーパラメータの制御に対する要求に加え、量子技術向けの光源が満たすべき課題が多くある。不可欠な多くの機能の中には、モードホップフリー波長可変で可変領域が広いこと、ポインティングと出力の安定性、信頼性、コンパクトさ、低消費電力、所有コストが低いこと、遠隔

制御が挙げられる。

ダイオードレーザーは、これらの要件の多くを非常によく満たしている。ダイオードレーザーはそもそも小型デバイスであり、比類なき効率で電気エネルギーをレーザー光に変換する。その他のほとんどの要件は、駆動と制御電子回路、レーザーヘッド自体からなる完全なシステムを慎重に設計することによって満たす必要がある。

トプティカ社のような企業が変化をもたらししているのは、数十年にわたる経験と顧客との密接な協力を結びつけること、その顧客の多くは量子工学や量子技術における世界的な研究者だからである。デジタルリモート制御向けに一から設計された制御電子機器と、幅広い周波数基準は、レーザー自体を超えた多くの成果の2つに過ぎない。

量子技術向けのレーザーの関連性と汎用性を考慮すると、多くの装置では、特性がすべて異なる複数あるいは1ダースのレーザーを必要とすることは驚くべきことではない。上述した量子コンピュータのような特定の例では、システムサイズのスケールアップもまた1つの装置で同じ種類のレーザーを複数必要とし、合計ではレーザーは数十本にも上る。

このため、レーザーシステムのフォームファクタ、統合、機能性において新たな道が求められている。この要求に応えるため、トプティカ社が新たに開

発しているものは、高度にモジュラー化された製品群である。工業用ラックに統合するため、量子技術として承認されたレーザーだ(図4)。狭線幅の波長可変ダイオードレーザーと分布帰還型フィードバックレーザーにより、増幅レーザーは高出力の要求に対応しながらコンパクトなソリューションが実現する。

周波数変換ダイオードレーザーは、スペクトルの可視光とUV域をカバーする一方で、周波数コムとロッキングエレクトロニクスは究極の周波数安定性を提供する。これらのモジュール型レーザーシステムはすべて、トプティカ社のT-RACK19インチキャビネットに統合できる。キャビネットにはモジュール型の電源入力ユニット、専用ケーブルが含まれており、熱管理もなされている。量子技術向けのレーザーにとって、研究グレードの光学テーブル上の巨大装置から、産業活用できる大きさで最高性能を持つ完璧な専用ソリューションへの変化である。

国連は2015年を国際光年と宣言し、光と、光をベースとした技術の重要性を祝福した。2020年は、レーザーの発明から60周年を迎える。量子技術は、レーザーによって可能となった光ベースを啓蒙する名著に新章を加えようとしている。小さなレーザーが巨人として、その肩に将来の量子技術が頼もしくあり続けるか、興味深いものである。

謝辞

本稿の一部は『Photonics in Germany 2019』(ウィリー社)の「Consult and PhotonicsViews 3/2019」において以前に公開されている。

参考文献

- (1) R. Kliese et al., Eur. Phys. J. Spec. Top., 225, 2775 (2016).
- (2) T. Puppe et al., Opt. Lett., 41, 1877 (2016).
- (3) E. Benkler et al., Opt. Express, 27, 36886 (2019).

著者紹介

ステファン・リッター博士はトプティカフォトニクス社量子技術アプリケーションディレクター、ユルゲン・ステューラー博士は量子技術副社長である。e-mails: stephan.ritter@toptica.com
juergen.stuhler@toptica.com URL: www.toptica.com