

●課題

従来の原子にマイクロ波を照射する共振器を持つタイプの原子時計では、共振器の大きさがサイズが決まり小型化できない問題点があった。そこで、コヒーレントポビュレーションラッピング(CPT用語5)を用いて、マイクロ波で変調したレーザー光を原子に照射するだけで時間の基準となる正確なマイクロ波周波数の検出が可能となり、これまで数百 cm^3 のサイズだった原子時計を一桁以上小型化することができた。しかしながら、周波数シンセサイザや、レーザーを駆動するためのドライバ回路といった原子時計の構成要素は、それぞれ非常に高い精度を求められるため、消費電力を下げるのが難しく、結果として、原子時計全体の消費電力が数百 mW と高くなってしまう課題があった。

●研究成果

今回、高精度でありながら2 mW という超低消費電力な周波数シンセサイザの実現および新たな量子部パッケージによる温度コントロールの効率化で、60 mW の超低消費電力な小型原子時計(ULPAC: Ultra-Low-Power Atomic Clock)の開発に成功した(図1)。開発した小型原子時計は、消費電力を大幅に削減しながら、大型の原子時計とほぼ同等の1日で300万分の1秒以下の精度を達成した。この原子時計は、電圧制御水晶発振器(用語6)、周波数シンセサイザ、レーザーのドライバ回路、制御回路、セシウム133原子(用語7)へのレーザー光照射を行う量子部パッケージ(図2)で構成される。

CPTを利用した原子時計では、セシウム133原子に2つの周波数のレーザー光を照射する。この2つのレーザー光の周波数差がセシウム133原子に固有の共鳴周波数(9,192,631,770 Hz)に一致したときに、検出される光強度が最大となる。これを利用して電圧制御水晶発振器を校正し、原子時計の基準となる非常に安定した周波数を作りだしている。

周波数シンセサイザは、レーザー光の周波数差を0.3 mHz 以下の非常に細かい周波数ステップで変えるために用いられ、従来、原子時計の構成要素において50 mW 以上の大きな電力を占める構成部位だった。開発した原子時計は、周波数シンセサイザをCMOS集積回路(図3)で作ることによって、消費電力を25分の1以下まで削減することに成功、2 mW の消費電力を達成した。

さらに、新たな量子部パッケージの構造を採用し、ヒーターによる温度制御の際に、外部の温度が伝わりにくくなるような隔離機構を設けるとともに、パッケージ内部を金でコーティングした。温度制御の効率を向上させることで、電力を消費しがちなヒーターの消費電力を9 mW まで削減した。高安定レーザードライバ回路および高精度温度制御回路により長期間での周波数安定性も改善した。

従来の周波数標準器では、図4に示すように、消費電力と周波数安定度はトレードオフの関係にあったが、開発した原子時計(ULPAC)は、良好な周波数安定度と低い消費電力を両立しており、サイズも 15cm^3 と非常に小型である。今回、 10^5 秒(約1日)の平均化時間で 2.2×10^{-12} の長期周波数安定度を達成した。一般的な水晶発振器を搭載した時計と比べ、約10万倍も正確な時計を実現した。

●今後の展開

開発した原子時計は、非常に小型で消費電力も小さいため、自動車、スマートフォン、小型衛星等、様々な機器への組み込みが可能である。従来は搭載できなかった様々な機器で高精度な原子時計が搭載可能となり、自動運転や GPS の代替、高精度計測など、政府が進める IoT が支えるソサエティ 5.0(超スマート社会)の実現 に貢献すると期待できる。この開発品は、5 年後を目途に販売開始を目指す。

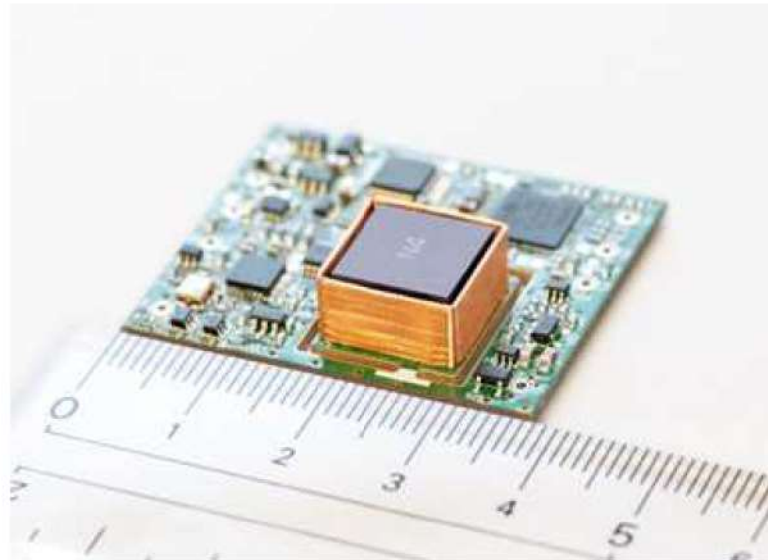


図1: 開発した小型原子時計 (内寸 33 mm x 38 mm x 9 mm)

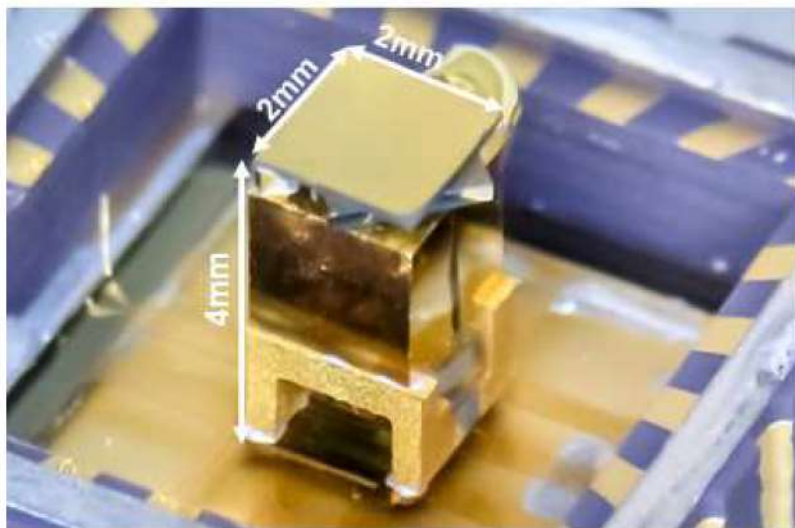


図2: 量子部パッケージ

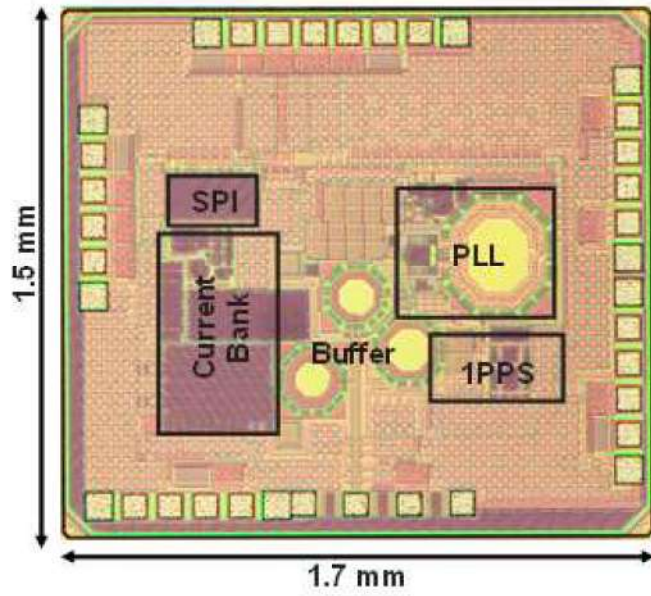


図3: CMOS 集積回路

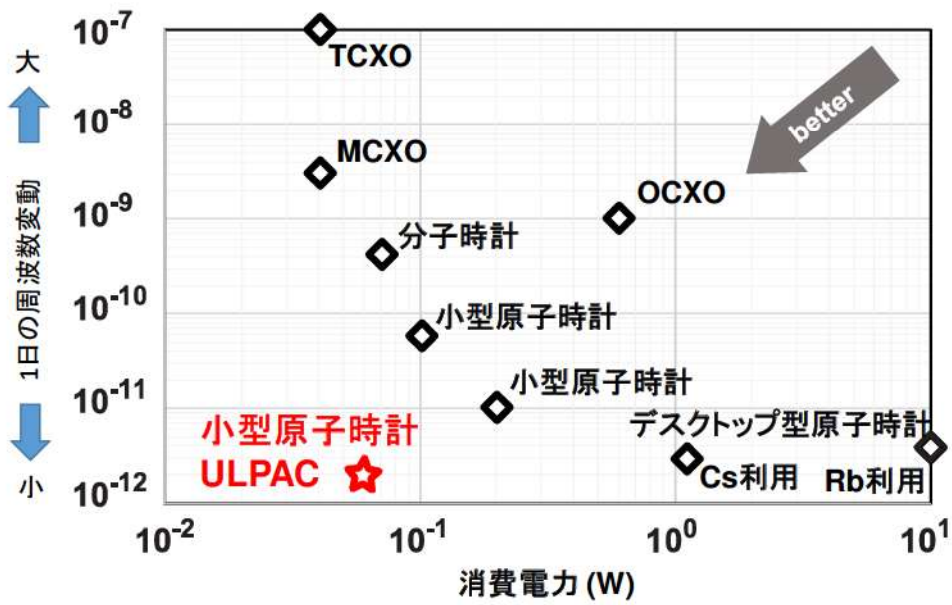


図4: 従来品との比較

(注)

TCXO(温度補償水晶発振器)

MCXO(マイコン補償水晶発振器)

OCXO(恒温槽付水晶発振器)

【用語説明】

- (1) **原子時計**：原子と電磁波の共鳴現象と、一般的な時計に利用される水晶発振器の周波数をリンクさせている時計。そのため、一般的な時計より精度の高い時計装置の実現が可能である。マイクロ波領域の電磁波を利用した原子時計では、セシウム (Cs) 原子やルビジウム (Rb) 原子が装置内に封入される。
- (2) **周波数シンセサイザ**：1 つの発振器デバイスの信号を基準として種々の異なる周波数をもつ信号を発生させる回路、あるいはその回路を含む装置。
- (3) **量子部パッケージ**：ヒーターと測温素子からなる温度制御機構と、面発光レーザー素子 (VCSEL-Vertical Cavity Surface Emitting Laser)、偏光光学素子、セシウム原子を封入したガスセル、受光素子からなる原子時計の心臓部に当たるデバイスで、原子共鳴信号の検出機構を小型のパッケージに集積化した。小さい電力で一定温度の安定性を実現するために、外部へ熱が伝わる経路を可能な限り遮断する隔離機構と、パッケージ内部を高真空で封止した断熱構造となっている。
- (4) **衛星コンステレーション**：低軌道衛星は数時間周期で地球を周回しており、全世界をカバーするために、多数の衛星を軌道投入し協調動作をさせる。そのようなシステムを衛星コンステレーションと呼ぶ。
- (5) **コヒーレントポピュレーショントラッピング (CPT)**：原子と電磁波の共鳴現象の一種。セシウム原子に光を照射すると、通常であれば吸収が起きて透過光量は減少する。そこに 2 種類の周波数をもつ光を照射するとセシウム内で特殊な状態が生成され光の吸収量が減少し、すなわち透過光量が増加、共鳴現象が観測される。これまではセシウムとマイクロ波 (波長 3 cm) の直接相互作用となる共鳴現象を利用するしかなかった。この CPT を利用すれば光の波長程度 (約 900 nm) の領域でも、原子と電磁波の共鳴現象の発現が可能となる。
- (6) **電圧制御水晶発振器**：制御電圧を変えることにより出力周波数を調整できる水晶発振器。
- (7) **セシウム 133 原子**：セシウム原子の同位体の中で、放射線を出さず、自然界で唯一安定して存在する原子である。

【発表予定】

この成果は、2 月 17 日から米国サンフランシスコで開催される国際会議 ISSCC 2019 (IEEE International Solid-State Circuits Conference 2019) において発表予定。現地時間 2 月 20 日午後 3 時 15 分から「Ultra-Low-Power Atomic Clock for Satellite Constellation with 2.2×10^{-12} Long-Term Allan Deviation Using Cesium Coherent Population Trapping (衛星コンステレーションに向けたセシウムコヒーレントポピュレーショントラッピングを用いた 2.2×10^{-12} の長期アラン偏差を達成する超低消費電力原子時計)」という題目で発表が行われる。

- ・講演セッション: Session 29: Quantum & Photonics Technologies
- ・講演時間: 現地時間 2 月 20 日午後 3 時 15 分

•講演タイトル: Ultra-Low-Power Atomic Clock for Satellite Constellation with 2.2×10^{-12} Long-Term Allan Deviation Using Cesium Coherent Population Trapping (衛星コンスタレーションに向けたセシウムコヒーレントポピュレーショントラッピングを用いた 2.2×10^{-12} の長期アラン偏差を達成する超低消費電力原子時計)

•著者: Haosheng Zhang(東工大博士後期課程3年生)、Hans Herdian(東工大博士後期課程1年生)、Aravind Tharayil Narayanan(元東工大博士研究員)、白根篤史(東工大助教)、鈴木暢(リコー、NMEMS[†])、原坂和宏(リコー、NMEMS)、安達一彦(リコー、NMEMS)、柳町真也(産総研主任研究員、NMEMS)、岡田健一(東工大准教授)

[†]: 技術研究組合 NMEMS 技術研究機構

•会議 Web サイト: <http://isscc.org/program/>
<http://isscc.org/program/conference-timetable/>