

4-2-6 超小型原子時計のための高周波変調用発振器及び波長可変レーザーチップの開発

4-2-6 *Microwave Band Modulation Oscillators and Tunable Laser Chips for Ultraminiaturization of Atomic Clocks*

原基揚 品田聡

HARA Motoaki and SHINADA Satoshi

超小型原子時計の製造コストを大幅に削減するためのキー技術として、ここでは、デバイスレベルからのアプローチを紹介する。1つは、原子時計に特化した垂直共振器型面発光レーザー (VCSEL) の開発である。当該 VCSEL は、レーザーのキャビティ長を静電アクチュエータによって制御できるように設計されており、組み立て後の工程においても目標の中心波長からオフセット補償することが可能である。これにより、レーザーチップのコスト上昇の主な原因であるスクリーニングプロセスを不要にできる。さらに、原子時計に必須となるレーザーへの高周波変調に関しては、発振器に圧電薄膜共振器 (FBAR) を採用し、小型・低消費電力化に成功している。当該素子は線幅 150 nm 以上のレガシープロセスにて製造され、平衡出力・不平衡出力にて 3 GHz 帯での良好な動作を確認した。

In this paper, we propose key approaches to manufacturing cost reduction in the microfabricated atomic clock. One is the development of Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) for atomic clocks, which are designed so that the laser cavity length can be controlled by an electrostatic actuator, allowing offsets from the targeted center wavelength to be compensated even in post assembly. It can be made possible to skip the screening process which is the main cause of the increasing cost of laser chips. In addition, the atomic clock oscillator utilizes thin-film bulk acoustic resonators (FBARs) to increase circuit integration. By designing under the conventional legacy process, where linewidth is larger than 150 nm, we successfully made it operate in the 3 GHz band for both balanced and unbalanced outputs.

1 緒言

Beyond 5G / 6G 時代において、通信ネットワークは従来の携帯電話だけに限定されることなく、その対象を、ロボット制御やドローン、コネクテッドカー、スカイカーへと大幅に拡張して行くことが予想され、効率と安全性、安定性は今までにない高いレベルで要求されることとなる。通信ネットワークが取り扱う情報サービスのクラウド化は電力供給のクラウド化のアナロジーから語られており [1]、近年のスマートグリッドにおける電力伝送の効率化と安全性、安定性の向上の議論は、情報伝送においても、クラウド化同様、大きな示唆を与える。

図 1 はスマートグリッド (SG) の概念と、我々が提案しているクラスタークロックシステム (CCS) の概念を比較したものである [2]。SG では電源が分散化され協

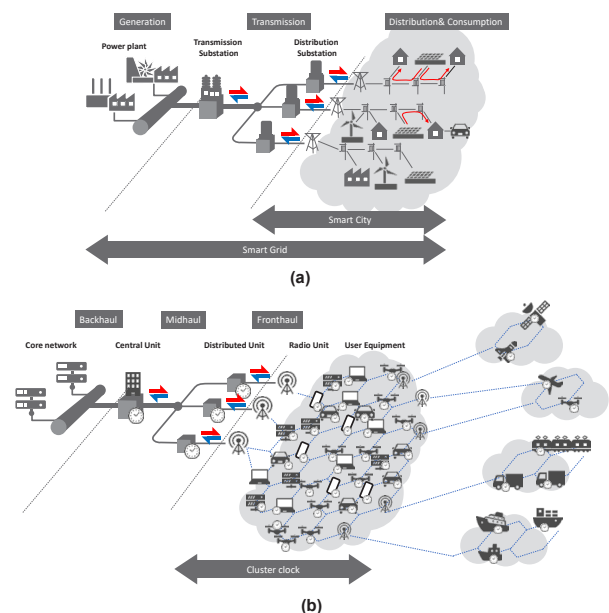


図 1 電力伝送と情報伝送のアナロジー

調制されるのに対して、CCSでは、情報端末が多数分散している。そして、CCSでは、情報を有効に活用する(協調制御する)ために位置と時刻とをタギング(時空間同期)する必要があり、我々は、以下の項目について、開発を加速させている [3]-[5]。

- (a) 無線端末間での電波による時刻補正(無線双方向時刻比較技術(Wi-Wi))
- (b) ドリフトのない内蔵クロックチップ(超小型原子時計チップ(CLIFS))
- (c) 分散時刻系における効果的な時刻推定スキーム

情報への標準時刻にもとづいたタグ付けや、高効率なプロセス管理はクラウドサーバにおいて、すでに米国企業を中心に先進的な試みがなされており [6][7]、ユーザデバイスへ同技術が展開・実装されることは明白な状況にある。本報告では誌面の都合上、上記(b)、CLIFSに関する開発進捗をピックアップして紹介する。

2 CPT 原子時計

原子時計は原子の安定した吸発光スペクトルを用いて発振器をフィードバック制御し、ドリフトのない安定したクロック信号を外部に取り出す技術である。システムの概念は単純だが、スペクトル検出を高安定に取得しようとする、全ての要素部品に安定動作させる機構を組み込む必要があり、実際の原子時計は実験

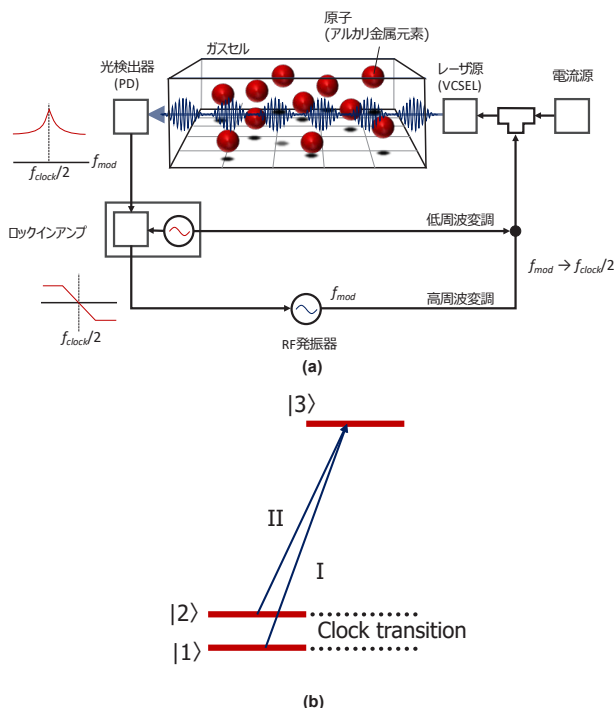


図2 CPT 原子時計の構成図

室レベルに大型化する。

そのため、原子時計の小型化では、Ramsey フリンジや CPT (Coherent Population Trapping) 共鳴など、原子共鳴のスペクトル自体を狭線化する手法が必須である [8][9]。ここで、CPT 共鳴は、原子干渉系を光学系だけで構成でき、小型化に最も適した技術の一つである。

図2にCPT原子時計の構成例を示す。CPT共鳴は、レーザーに高周波変調を行って得られる二つのサイドバンドを活用する。このサイドバンドの二光束が図2(b)のIとIIとのエネルギーに相当する場合、|1>と|2>の準位が近接しているため、誘導吸収と誘導放出とが相殺され、レーザーと原子との相互作用が狭い変調周波数範囲で、観測されなくなる。その結果、対向する光検出器にて、急峻な透過光強度の上昇ピークとしてCPT共鳴は取得される。

3 構成部品の低コスト化

3.1 超小型原子時計用レーザー

CPT共鳴の活用では、ガスセルへ導入するレーザーの高度な安定化が必要なくなり、CPT原子時計では、小型で応答速度の速い垂直共振器型面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL) が活用されている。VCSELはスマートフォンの顔認証用光源などで実用化されており、バッチ生産が可能なことから安価な光源と捉えられている。しかしながら、原子共鳴の取得では、製造においてVCSELに許容される波長トレランスが1nm以下と厳しく、既存のVCSELから換算すると、製造コストはスクリーニングによって10倍以上に増大してしまう。

そこで、我々は波長制御機構を集積化したVCSELの開発を行った。VCSELは発光のための注入電流の加減によって、熱による波長制御が可能であり、実際の原子時計システムでも、レーザー発振の安定化に活用されている。しかし、初期の波長ずれに対する補償

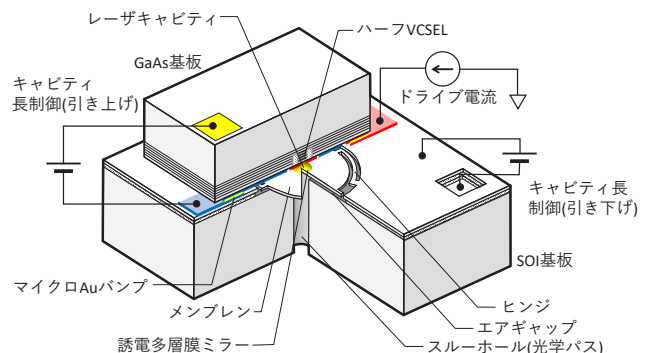


図3 波長可変 VCSEL の構成図

を目的とする場合、常時制御が求められるため、消費電力の観点からその適用は容認されない。

図3は我々が開発した波長可変 VCSEL の構造図である。開発した素子では、静電アクチュエータによって誘電多層膜ミラーが垂直方向に可動するように設計されている。これによって、レーザキャビティを短縮・伸長させることができ、波長制御が可能となっている。静電アクチュエータによる DC 制御のため、熱制御と異なり、常時制御でも消費電力が過大となることはない。

図4は、レーザキャビティを可変させたときの波長の変化を、分布定数等価回路を用いて計算した結果である。この図より、レーザキャビティは $\lambda/2$ 波長ごとに同じ波長可変特性を繰り返すことがわかる。ただし、実際はミラーでの減衰や、対向するミラーの平行度・平坦度の不良による光エネルギーの散逸があるため、MEMS ミラーとハーフ VCSEL との間隙は波長程度に近接していることが望まれる。本開発では、図5(b)に示した微細 Au バンプアレイを活用し、熱圧着を用いて接合を行った。図5(a)は接合後のチップ写真であり、(c) (d) は接合断面である。本図より、波長以下の近接

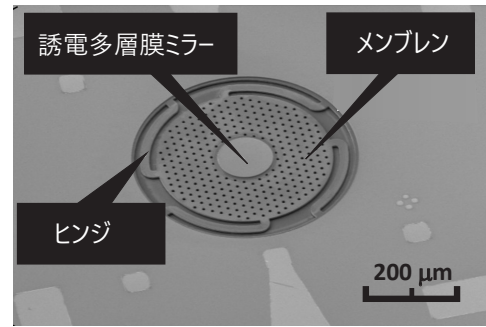
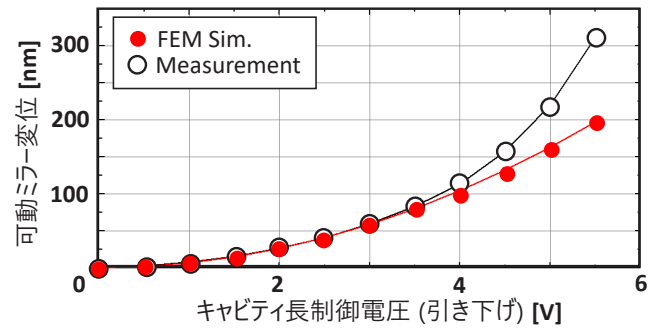


図6 ミラー可動特性

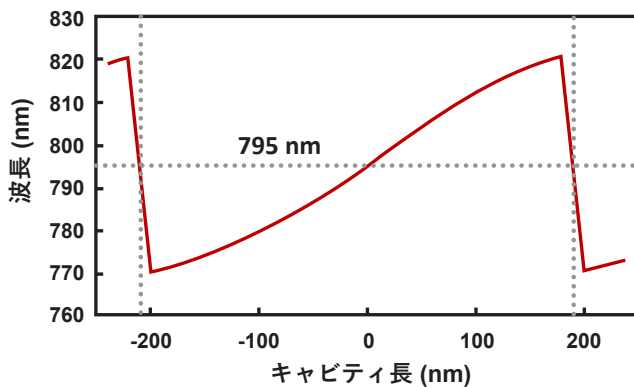
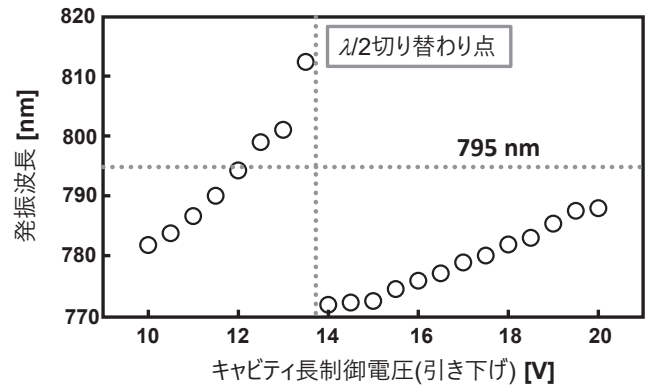
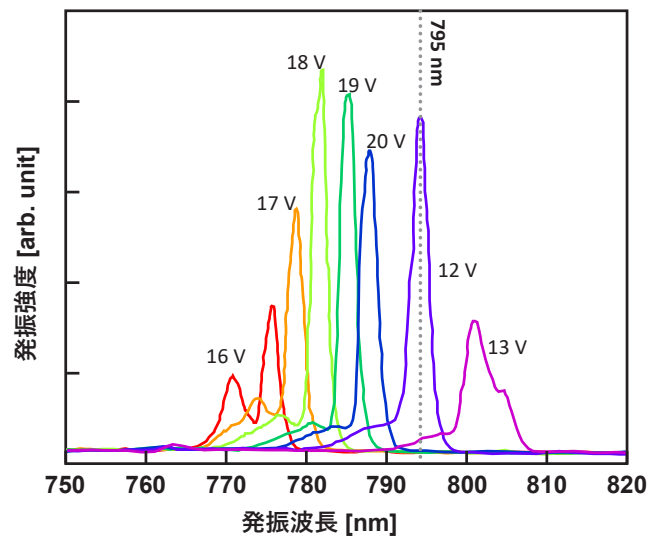


図4 レーザキャビティ長と発振波長の関係 (Simulation)



(a)



(b)

図7 波長可変特性 (Measurement)

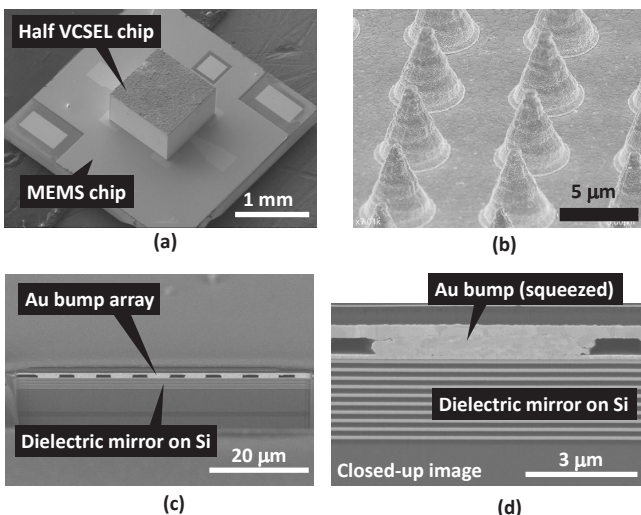


図5 ハーフ VCSEL と MEMS 可動ミラーの接合技術

接合が得られていることが確認される。

図6、7にMEMSミラーの可動特性と波長可変特性とを示す。本図より、所望の795 nmの発振を、波長掃引によって得られていることが確認される。一方で、発振強度が波長によって大きく変動することも確認された。これは、ハーフVCSELの活性層直下に作り込まれる半導体DBR(Distributed Bragg Reflector)の帯域が設計より高波長側にずれていることに起因すると推測される。

3.2 小型原子時計用RF発振器

我々は原子時計用発振器として、水晶発振器を用いないFBAR発振器を開発している。3 GHz帯で高Qな共振が得られるFBARを利用することで、PLL回路や周波数通倍回路を必要としないシンプルな回路構成が実現できる[4]。

また、FBARを活用することで、CMOS回路を反転増幅器とバッファ回路、可変容量ネットワークだけのシンプルな構成で実現でき、先進のプロセス技術を用いなくても、従来のレガシープロセス(線幅 $w > 150$ nm)を活用して製造することが可能となる[10]。

さらに、レガシープロセスの活用は、信頼性の高い豊富な設計ライブラリーを流用できるという利点も有する。

図8は本研究において試作を行った発振器の光学写真である。新規に設計された素子では、先に述べた設計ライブラリーを活用して、平衡-非平衡変換回路と発振ゲイン制御機能、6-bit周波数制御機能とが集積されている。

高周波素子は一般にノイズを抑制するため差動にて設計され、試作された発振器も差動設計となっている。一方で、DCにて駆動されるVCSELでは、非平衡入力一般的であり、平衡-非平衡変換回路が必要となる(図9)。

図10は、試作を行った発振器の発振スペクトルを示している。図10(a)は平衡出力における発振特性であり、図10(b)は非平衡出力における発振特性である。ともに、3 GHz帯にて良好な発振が得られている。また、図10(c)は平衡出力と非平衡出力とで位相雑音を比較した結果である。自明であるが、非平衡出力において位相雑音のノイズフロアの劣化が観測される。

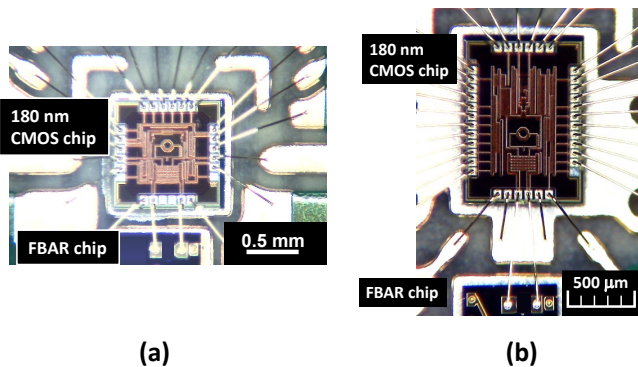


図8 FBAR発振器: (a) 以前の設計、(b) 新たな設計

4 結言

超小型化原子時計の開発において、製造コストを抑制するために新たなアプローチを提案した。1つは、原子時計用の垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)の開発である。当該VCSELでは、静電アクチュエータによってレーザキャビティ長を制御できるように設計されており、製造工程で発生する設計波長からのオフ

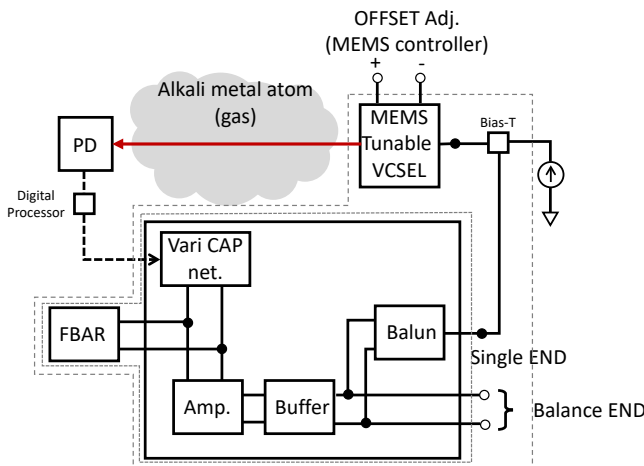


図9 FBAR発振器と波長可変VCSELとを組み込んだ原子時計の構成例

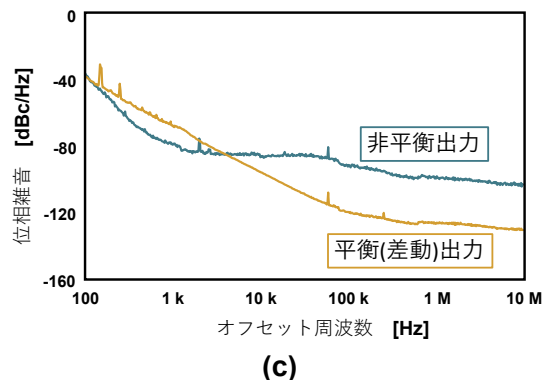
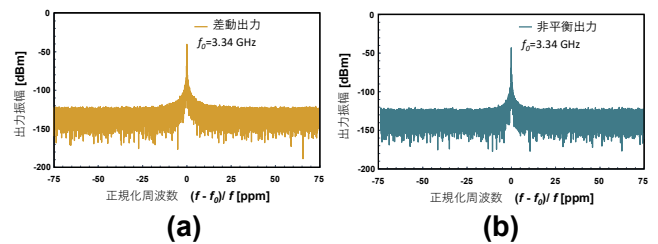


図10 FBAR発振器の発振スペクトル

セットを、組立工程後において修正することが可能となっている。これは、原子時計用 VCSEL で課題となる厳格な製造トレランス (1 nm 以下) によるスクリーニングコストの増大を、アクティブに抑制する有効な手段を提供する。また、原子時計用の発振器として、圧電薄膜共振子 (FBAR) を活用した超小型発振器の開発進捗を述べた。当該発振器は従来のレガシープロセス (線幅 50 nm 以上) を有効に活用して設計・試作され、所望の 3 GHz 帯の発振が平衡出力及び非平衡出力の双方にて確認された。平衡出力 - 非平衡出力変換回路の CMOS チップへの集積は、今後の発振器と VCSEL の一体集積化を容易にする。

謝辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE (No. 195003003) 及び「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254) の委託を受け、実施されました。ここに深く感謝申し上げます。また、FBAR 素子の提供にご協力いただいた株式会社太陽誘電モバイルテクノロジー、上田政則様、西澤年雄様、次世代微小バンプの形成にご協力いただいた産業技術総合研究所、菊地克弥様、仲川博様、熱圧着接合にご協力いただいた東レエンジニアリング株式会社、川上幹夫様、新海恵三様に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 N. Carr, "The Big Switch: Rewriting the world, from Edison to Google," W W Norton & Co Inc., ISBN-10: 9780393062281, 2008.
- 2 Y. Yano et. al., "Distributed Time Synchronization Using Miniaturized Atomic Clocks and Future Vision," NICT News, vol.494, no.4, pp.8-9, 2022.
- 3 N. Shiga et. al., "Demonstration of wireless two-way interferometry (Wi-Wi)," IEICE Com. Exp., vol.6, no.2, pp.77-82, 2017.
- 4 M. Hara et. al., "Microwave oscillator using piezoelectric thin-film resonator aiming for ultraminiaturization of atomic clock," Rev. Sci. Instrum., vol.89(10), pp.105002, 2018.
- 5 Y. Yano et. al., "Distributed time synchronization network under the cluster time system," Proc. IEEE EFTF&IFCS, 2021.
- 6 D.F. Bacon et. al., "Spanner: Becoming a SQL System," Proc. SOGMOD, pp.331-343, 2017.
- 7 A. Byagowi et. al., "Open-sourcing a more precise time appliance," 2021. <https://engineering.fb.com/2021/08/11/open-source/time-appliance/>
- 8 N.F. Ramsey, "A Molecular Beam Resonance Method with Separated Oscillating Field," Phys. Rev., vol.78(6), pp.695-699, 1950.
- 9 N. Cyr et. al., "All-optical microwave frequency standard: a proposal," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.42, Issue 2, pp.640-649, 1993.
- 10 M. Hara et. al., "Study of 3-GHz-band Thin-film Bulk Acoustic Resonator Oscillators for Microfabricated Atomic Clocks," Proc. IUS, pp.1-4, 2021.



原基揚 (はらもとあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員
博士 (工学)
MEMS、圧電素子、原子時計



品田聡 (しなださとし)

ネットワーク研究所
フォトニック ICT 研究センター
フォトニックネットワーク研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
超高速光ファイバ通信、光デバイス、光信号処理
【受賞歴】
2015年 第47回市村学術賞 功績賞