

6-3 原子時計のチップ化に向けた超小型集積部品の開発

6-3 *Ultra-compact Integrated Components for Atomic Clock Chip*

原 基揚 矢野雄一郎 梶田雅稔 井戸哲也

Motoaki HARA, Yuichiro YANO, Masatoshi KAJITA, and Tetsuya IDO

時空標準研究室では日本標準時の生成・維持・配布を行っており、この標準時の源となるのが原子時計である。市販の原子時計はラックマウントレベルであるが、この原子時計を小型化・モジュール化する動きが、近年、国内外にて目覚ましい進捗を見せている。この動向に対し、我々は、より実用的かつボード実装に好適な原子時計の小型化(チップ化)を先行して進めている。そして、原子時計向けの超小型マイクロ波発振器及びアルカリ金属ガスセルの開発に成功し、良好な原子時計動作も実験的に確認した。開発した超小型マイクロ波発振器及びアルカリ金属ガスセルは Micro Electro Mechanical Systems (MEMS^{*1}) 技術を駆使して製造され、ウェハープロセスによる微細化と優れた量産性を実現している。また、超小型マイクロ波発振器は、LC 発振器を水晶発振器で安定化する従来の手法と異なり、GHz 帯で動作可能な MEMS 発振器のみで構成され、周波数通倍処理などの複雑な回路処理を必要とせず、極めてシンプルなシステム構成を有し、小型かつ低消費電力な時計動作を提供する。

The Space-Time Standard Laboratory is producing, maintaining, and distributing the Japan Standard Time, and the atomic clock is the source of this standard time. The trend to miniaturize and modularize this atomic clock has shown remarkable progress globally in recent years, and under such a situation, we are working to lead in dramatically miniaturizing the atomic clock (chip level integration). Then, we succeeded in developing a microminiature microwave oscillator and an alkali metal gas cell for atomic clock, and experimentally confirmed excellent atomic clock operation. The developed microwave oscillators and gas cells are manufactured using Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) technology and are achieving miniaturization by wafer process and excellent mass productivity. Unlike the conventional method in which the LC oscillator is stabilized with the crystal oscillator, the microwave oscillator is composed of only the MEMS oscillator that can operate in the GHz band and does not require complicated circuit processing such as frequency multiplication processing. It has a simple system configuration and provides clock operation with small size and low power consumption.

1 緒言

Cs や Rb などのアルカリ金属原子では、電子のエネルギー準位が電子のスピンと原子核スピンの相互作用により僅かに分裂している(超微細分裂、超微細構造)。これらの原子では、この微細な分裂によってマイクロ波帯にて吸収特性を持ち、その吸収スペクトルに外部のマイクロ波発振器の発振周波数をフィードバック制御にてロックさせることで超高安定な周波数標準(原子時計)を得る(図1)。原子時計は、この電子軌道に由来する優れた周波数安定性から人工衛星や主要な基地局に配備され、時刻・周波数標準として機

器の位置推定や通信網の同期などに広く活用されている。

市販されている原子時計は一般にラックマウントレベルに集積されているが、この原子時計を更にチップレベルにまで小型化できれば、ありとあらゆる無線端末に時刻・周波数標準を実装することが可能となる。これは GPS (Global Positioning System) 衛星など測位用衛星システムをひとつの頂点とする従来のトップダウン型の時刻供給・時刻同期システムに対して、すべての端末が相互に校正・補完し合う極めてロバストな同期無線通信網の構築を可能にする。

原子時計の小型化は、Cyr 等によるコヒーレントポ

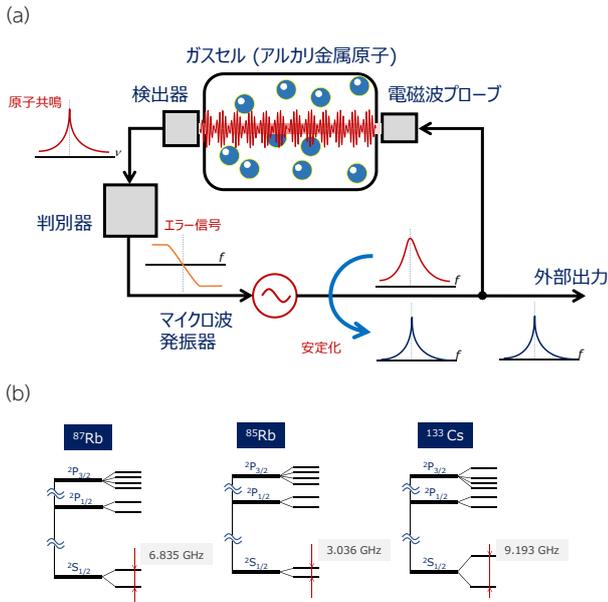


図1 (a) 原子時計システムの概念図 (b) アルカリ金属原子の超微細構造

ピュレーショントラッピング (CPT^{*2}) 共鳴を利用した周波数標準の提案に端を発し、2004年、米NIST (National Institute of Standards and Technology) の研究グループよりMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による小型原子時計モジュールが開発され、時計動作の実証に至った [1][2]。そして今日、当該技術はチップスケール原子時計 (Chip Scale Atomic Clock : CSAC) として市販化も成されている [3]。

これらの先駆的な研究開発は米国にとどまらず各国へと波及し、現在、多くの研究所や企業において小型原子時計モジュールの開発が進められている。ただし、CSACは、現状、数cm角のパッケージサイズを有しチップサイズとは言えない。100 mW オーダーの電力消費も電池駆動を想定するとまだまだ改善の余地がある。CSACの開発レポートによれば [4]、電力消費とチップ面積は主にマイクロ波発振器を含む高周波制御ユニットによって占められており、この高周波制御ユニットを簡略化し原子時計システムのサイズと消費電力を低減することが必須の課題と言える。

原子時計は、先に述べたようにCPT共鳴に安定化されるマイクロ波発振器を必要とする。Rbを使用する場合、発振器はRbの超微細構造の遷移周波数の半分である3.417 GHzにおける発振が求められる。このような高周波帯において精緻な制御を実現するには、MHz帯にて安定に動作する水晶発振器から位相ロックループ (Phase Locked Loop: PLL) を用いて周波数通倍を行う必要がある。しかし、この方式ではシステムが煩雑となり、原子時計システムのコスト、サイズ及び電力消費の低減が難しい。そこで我々は、代表的

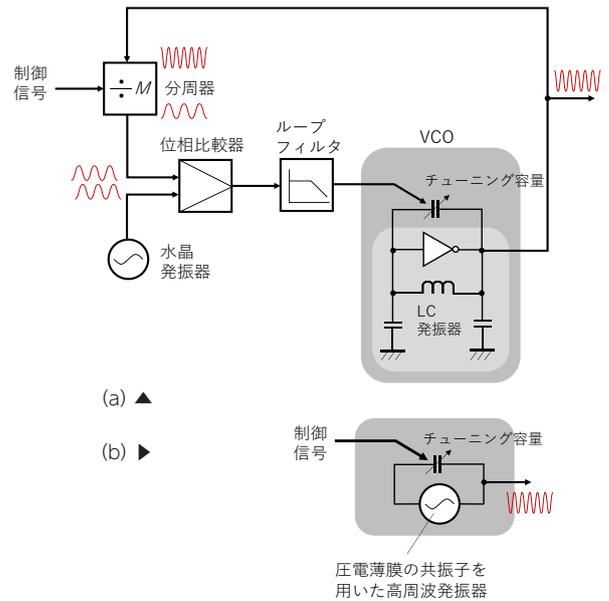


図2 FBAR素子を活用したマイクロ波発振器の簡略化: (a) 従来方式 (b) 提案方式

なMEMS共振子のひとつである圧電薄膜共振子 (thin-Film Bulk Acoustic Resonator : FBAR^{*3}) を利用し発振器を構築することを提案した [5]。FBARは基板上に堆積される薄膜の体積弾性波 (Bulk Acoustic Wave : BAW) 素子であり、高いQ値にてGHzの帯域における基本モード共振を得ることが可能である。また、原子時計に必要とされる3.417 GHzに発振周波数を合わせ込むことによって、PLLを利用した周波数通倍を省略した極めてシンプルな原子時計システムの構築を可能にする。図2に具体例を示す。

2 原子時計用マイクロ波発振器

2.1 薄膜弾性波素子の利用

FBARは、圧電薄膜を電極で挟んだ積層構造を持つ機械共振器である。圧電膜に厚み振動の基本モードを閉じ込めるため、積層体の直下にビアホール、または音響ブラッグ反射膜などの音響絶縁構造が必要となる [6][7]。この絶縁構造はMEMS技術を用いて基板上に集積化される。本研究では、圧電膜の応力を利用した自立型のエアドーム構造を採用することで、基板加工を必要としない片面プロセスでの製造を実現しコスト圧縮を図っている [8]。FBARは、水晶振動子と同様の体積弾性波 (BAW) 素子であるが、バルク水晶と違い薄膜で構成されるため、周波数帯の選択が容易であり高周波化にも有利である。また、平行平板電極を用いるため、表面弾性波 (SAW) 素子と異なり電極の微細化による電気抵抗の増大に悩まされることもなくGHz帯にて1000以上の高いQ値を実現する。

現在、FBARは携帯電話向けの高周波フィルタとして広く活用されており、無線通信規格の拡充に伴って5 GHzに達する高い周波数帯でもFBARフィルタの量産が報告されている[6]。 ^{87}Rb のCPT共鳴を利用した小型原子時計では3.417 GHzが必要とされ、この周波数はFBARの量産ラインアップと既に適合していると言える。

2.2 薄膜弾性波発振器の製作と評価

FBARの使用は、MHz帯で動作する水晶発振器からPLL回路を用いた周波数通倍処理によるGHz帯の信号を生成する必要をなくし、原子時計のマイクロ波発振器を大幅に簡略化する(図2)。

本図において、発振器に使用する反転増幅器は65 nm CMOSプロセスを用いて試作され、チップサイズは $1 \times 1 \text{ mm}^2$ である。図3は、新規に提案した発振器と従来の発振器(水晶と周波数通倍回路とを組み合わせた発振器モジュール)とを比較したものである。本図より提案回路が従来の発信器と比べ大幅に縮小されていることが分かる。

^{87}Rb のCPT共振を用いてFBAR発振器を安定化するためには、3.417 GHz近傍での発振が重要である。試作された発振器の発振スペクトルを図4に示す。本図より、所望の周波数にて急峻な発振ピークが確認される。ここで電源電圧を1 Vとしたとき、発振器の消費電力は9 mWであった。また、可変コンデンサのバイアス電圧 V_{ctrl} を0 Vから1 Vへ挿引したときの可変周波数範囲は約390 kHzであった。

図5は、図4の発振に対して位相雑音を計測した結果である。図5より、スプリアスの少ない滑らかな位相雑音特性が確認される。この結果はフィードバックループを持たないシンプルな発振器の回路構成に起因していると考えられる。図中、不要なスプリアスが一つだけ、観測されているが、これは、評価用ボードの配線に起因するものであり、チップ本来の応答ではない。また、図中に示される発振器の性能指数(FoM)は下式にて定義される。

$$FoM_{\text{osc}} = L(f) - 20 \log \left(\frac{f_{\text{osc}}}{f} \right) + 10 \log P_{\text{dc}} \quad (1)$$

$L(f)$ 、 f_{osc} 、及び P_{dc} は、それぞれ、オフセット周波数 f における位相ノイズ、発振周波数及び供給されるDC電力である。

3 MEMS ガスセルの開発

ガスセル製造におけるMEMS技術の適用は、従来のガラスブローイングや熱融着を用いた手工芸的なガスセル製造と異なり大幅な小型化を可能にする。ま

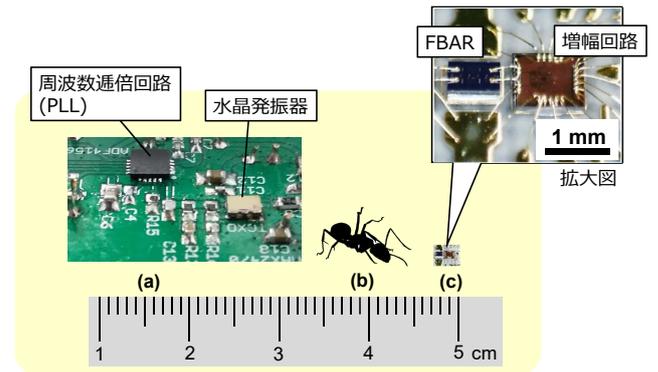


図3 (a) 水晶振動子を利用したマイクロ波発振器 (b) クロオオアリ(7~12 mm) (c) 新規提案した圧電薄膜共振子(FBAR)を利用したマイクロ波発振器

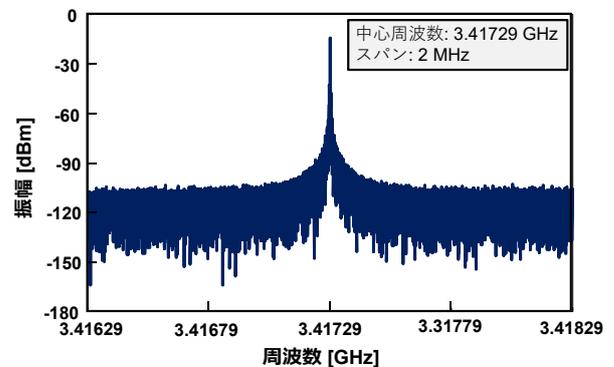


図4 新規提案した圧電薄膜共振子(FBAR)を利用したマイクロ波発振器の発振スペクトル

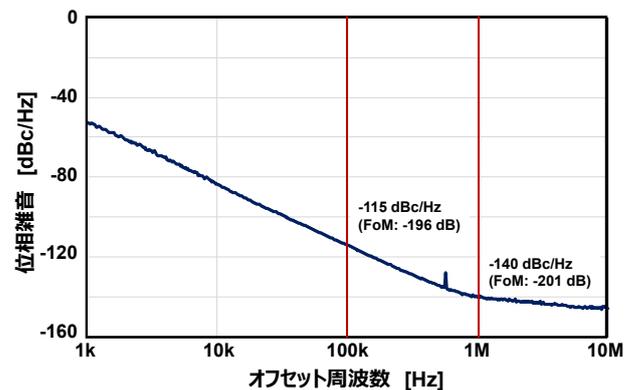


図5 新規提案した圧電薄膜共振子(FBAR)を利用したマイクロ波発振器の位相雑音特性

た、ウェハープロセスでの生産は、製造コストにおいても大きなメリットを持ち、デバイスの平坦性から実装工程の簡略化も容易となる。

図6は、本研究で作製したMEMSガスセルである。このガスセルでは、3 mm厚のシリコン基板に直径3 mmの光学観測用スルーホールとそれに接続される2つのマイクロチャンバが作り込まれている。個々の

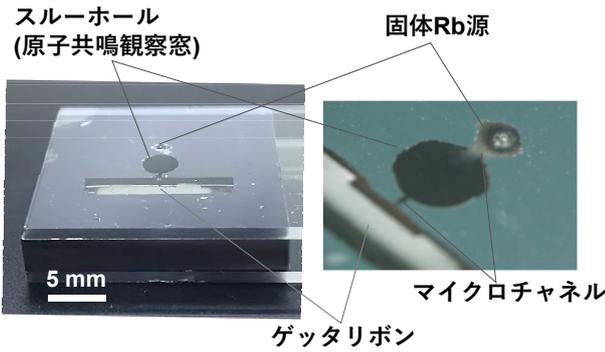


図6 MEMS ウェハープロセスを活用して試作された Rb ガスセル

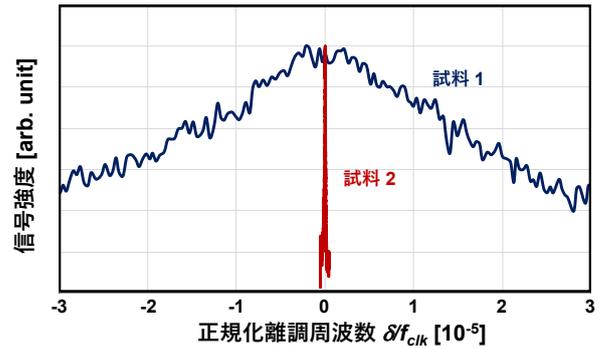


図8 試作した MEMS Rb ガスセルの CPT スペクトル評価

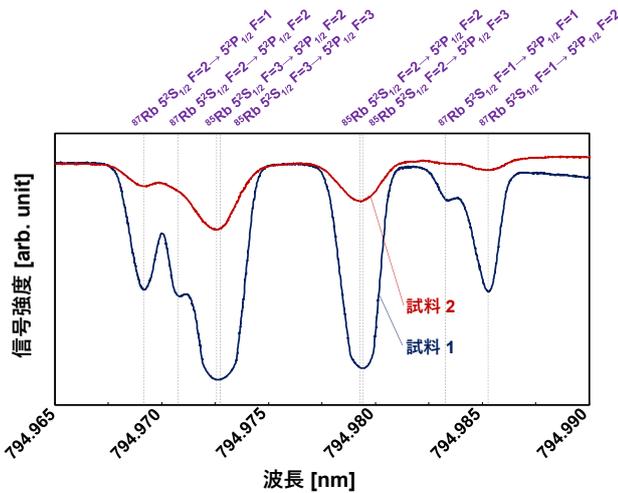


図7 試作した MEMS Rb ガスセルの吸収スペクトル

チャンバには、固体 Rb 源とゲッターリボンとが格納され、厚さ 1 mm のガラス基板を用いて陽極接合による封止がなされる。固体 Rb 源は、Rb 酸化物と還元剤とからなる圧粉体であり、密封後レーザーを照射することで Rb ガスをセル内に生成する。小型ガスセルでは、一般に Rb 原子がセル壁面に高速度で衝突するのを防ぐため、不活性ガスをバッファガスとして封入する。本試作では、純窒素を圧力 1.2 kPa にて封入している。

図7に試作したガスセルの吸光スペクトルを示す。セル内の Rb は同位体選別を実施していないため、⁸⁵Rb と ⁸⁷Rb とが天然比にて混在し、本スペクトルでは 8 つの吸収ピークが観察されている。

試料 1 は、バッファガスのない真空環境にて封止し、封止後ゲッターリボンの活性化を行うことで残留ガスの除去を行った。一方、試料 2 はゲッターリボンを用いずに圧力 1.2 kPa の N₂ 雰囲気中にて封止した。図7において、試料 2 の吸収ピークが N₂ の緩衝によってブロードとなっている様子が観測されている。

試料 2 にて、⁸⁷Rb ($5^2S_{1/2} F=1 - 5^2P_{1/2} F=2$) と ⁸⁷Rb ($5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{1/2} F=2$) とを用いた CPT 共鳴を観

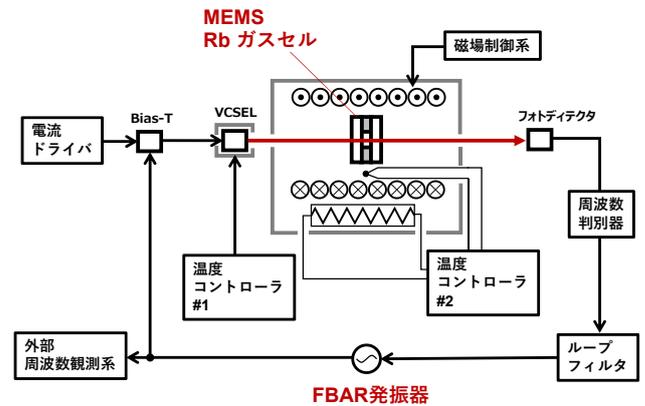


図9 原子時計動作を評価するためのテストベンチの簡易的なシステムブロック

察した (図 8)。試料 1 では、⁸⁵Rb ($5^2S_{1/2} F=3 - 5^2P_{1/2} F=2$) 及び ⁸⁵Rb ($5^2S_{1/2} F=2 - 5^2P_{1/2} F=2$) を用いて CPT 共鳴を評価した。試料 1 では ⁸⁷Rb の吸収線を利用した場合、十分な強度の CPT 共鳴は得ることができなかった。比較のために、図 8 では CPT 共鳴からの離調を共鳴周波数で正規化したものを評価軸としている。ここで、試料 1 及び 2 の CPT 共鳴周波数は、それぞれ 1.518 GHz と 3.417 GHz である。本図より、バッファガス N₂ の導入によって CPT 共鳴が効果的に狭線化されることが確認できる。

4 原子時計動作の評価

CPT 原子時計動作を評価するためのテストベンチを図9に示す。理解を簡便にするため、ここではメインループのみを図示している [9]。MEMS ガスセルは、磁界を印加するためのコイルと温度コントローラとを装備したパーマロイ製のシールド内に固定される。磁場は光路に平行に印加される。セルの加熱温度は、CPT 共鳴の SN 比を最大化するよう実験的に決定され、本実験では、80 °C である。

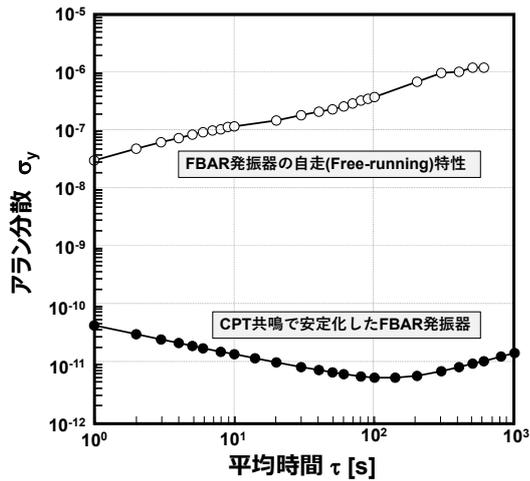


図 10 開発した FBAR 発振器と MEMS Rb ガスセルを用いた時計動作評価

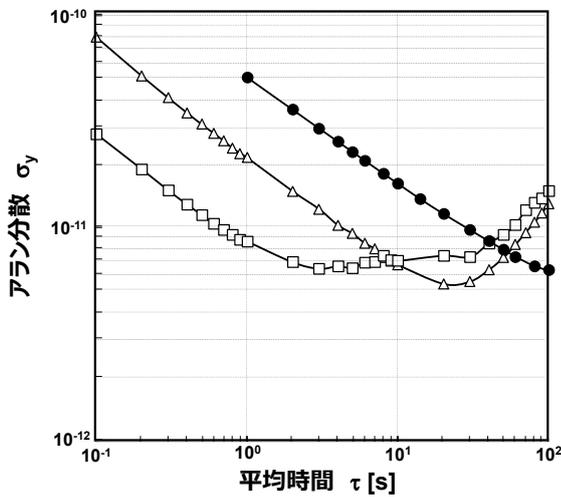


図 11 周波数安定度評価の結果ワイヤ延長による効果 (△)、セル容量の増大による効果 (□)、参考特性 (前出図 8 (●))

図 10 (○) に、FBAR 発振器を自立動作させたときの周波数安定度を示す。図 10 より、FBAR と CMOS 回路の温度ドリフトにより、平均時間の増大に伴って、周波数分散(アラン分散^{*4})が徐々に増大していく様子が確認される。

図 11 (●) は、MEMS ガスセルからの CPT 共鳴を用いて、FBAR 発振器の発振を安定化した結果である。安定化により、平均時間 100 s 程度まで周波数の分散が 0 に漸近していく様子が観測され、原子共鳴による安定化(原子時計動作)が確認された。

FBAR と CMOS チップの接続は、本研究において Au ワイヤを利用しているが、このワイヤを延長することで周波数安定度を改善することができる。なぜならば、FBAR への直列インダクタンスが増大すると、調整可能な周波数範囲が拡大されフィードバック制御の電圧振幅が抑制される。この制御電圧の抑制は、発振器からの非線形応答の低減に効果があるためである。

実験の結果、図 11 (△) に示すように、平均時間 1 秒で 2.1×10^{-11} まで、周波数安定度が改善された。

ガスセルのサイズの増大も周波数安定度の改善に有効である。MEMS ガスセルを直径と長さがそれぞれ 2.5 cm のガラス管に置き換えると、平均時間 1 秒での周波数安定度は 8.5×10^{-12} まで改善される(図 11 □)。ただし、ガスセルサイズの増大は、チップ化を目指す我々の開発方針とは必ずしも適合しない。

図 12 において、周波数安定度は 10^{-12} のオーダーで底を打つ。これはガスセルの温度特性による限界と考えられる。ガスセルの温度特性の改善にはバッファガスとして Ar を N_2 に混合する手法や、Ne をバッファガスに用いる手法が提案されており、今後の検討課題のひとつである [10][11]。

5 結言

我々は、原子時計の小型化を目的とし、マイクロ波発振器と MEMS Rb ガスセルの開発を実施した。本案では、圧電薄膜共振子(FBAR)を利用したマイクロ波発振器を新たに提案し、原子時計動作に必要な 3.417 GHz の直接発振に成功した。提案した FBAR 発振器は、水晶発振器と PLL 回路とを用いた周波数通倍処理を必要としないため、極めてシンプルな構成である。また、提案した FBAR 発振器は、65 nm CMOS プロセスを用いて試作され、3.417 GHz における基本発振に対して、位相雑音は -140 dBc/Hz@オフセット周波数 1 MHz であり、消費電力は 9.0 mW であった。さらに、開発した FBAR 発振器と MEMS ガスセルとを CPT 原子時計システムに組み込み、持続的な原子時計動作の可能性を評価した。その結果、平均時間 1 秒にて周波数短期安定度 2.1×10^{-11} を得た。この値は、市販の原子時計モジュールに対して、1桁程度、高い周波数安定度である。

本研究開発の成果は原子時計のチップ化に向けた重要な前進であり、今後、周辺回路の集積化と新規ガスセル構造の提案と合わせ、原子時計システムの更なる小型・集積化を進めていく。

謝辞

貴重な FBAR チップを提供して下さった太陽誘電株式会社：西原時弘氏、谷口眞司氏、太陽誘電モバイルテクノロジー株式会社：上田政則氏に深く感謝を申し上げます。また、Rb 固体源のサンプル提供を快諾下さった SAES Getters S.p.A：Marco Moraja 氏、戸田道夫氏に深く感謝申し上げます。

6 時空標準技術の社会実装を目指して

- *1 MEMS: 半導体微細加工技術を用いて作製される微細な電気機械システム。加工法自体を指すこともある。
- *2 CPT 共鳴: 一つの励起準位と二つの基底準位とからなり、基底準位間は禁制関係にある3準位系において、二つの基底準位から同時に光ポンピングを行なった際、励起が相殺され、光と原子との相互作用がキャンセルされる現象
- *3 FBAR: 圧電薄膜を電極薄膜で挟んだ自立構造体。電極に高周波を印加すると、共振応答を示す。
- *4 アラン分散: 周期信号の時間情報(周期)の統計量(分散値)から周波数のバラツキを評価する指標。長期の周波数安定度評価に向く。

【参考文献】

- 1 N. Cyr, M. Têtu, and M. Breton, "All-optical microwave frequency standard: a proposal," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, vol.42(2), pp.640-649, 1993.
- 2 Knappe, V. Shar, P. Schwindt, L. Hollberg, J. Kitching, L. A. Liew, and J. Moreland, "A Microfabricated Atomic Clock," Appl. Phys. Lett., vol.85(9), pp.1460-1462, 2004.
- 3 <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>
- 4 R. Lutwak, "Principles of Atomic Clocks," in Tutorial Material of the IEEE Frequency Control Symposium (2011).
- 5 M. Hara, Y. Yano, M. Kajita, H. Nishino, M. Toda, S. Hara, A. Kasamatsu, H. Ito, T. Ono, and T. Ido, "Microwave Oscillator Using Piezoelectric Thin-film Resonator Aiming for Ultraminiaturization of Atomic Clock," Rev. Sci. Instrum., 89, 105002, 2018.
- 6 T. Nishihara, T. Yokoyama, T. Miyashita, and Y. Satoh, "High Performance and Miniature Thin Film Bulk Acoustic Wave Filters for 5 GHz," Proc. IEEE International Ultrasonic Symposium, pp.969-972, 2002.
- 7 R. Aigner, J. Ella, H. J. Timme, L. Elbrecht, W. Nessler, and S. Marksteiner, "Advancement of MEMS into RF-filter Applications," Dig. International Electron Devices Meeting, pp.897-900, 2002.
- 8 S. Taniguchi, T. Yokoyama, M. Iwaki, T. Nishihara, M. Ueda, and Y. Satoh, "An Air-gap Type FBAR Filter Fabricated Using a Thin Sacrificed Layer on a Flat Substrate," Proc. IEEE Ultrasonic Symposium, pp.600-603, 2007.
- 9 Y. Yano, M. Kajita, T. Ido, and M. Hara, "Coherent Population Trapping Atomic Clock by Phase Modulation for Wide Locking Range," Appl. Phys. Lett., 111, 201107, 2017.
- 10 B. L. Bean, and R. H. Lambert, "Temperature Dependence of Hyperfine Density Shifts. IV. ^{23}Na , ^{39}K , and ^{85}Rb in He, Ne, Ar, and N_2 at low temperature," Phys. Rev. A., vol.13(1), pp.492-494, 1976.
- 11 J. Vanier, R. Kunski, N. Cyr, J. Y. Savard, and M. Têtu, "On Hyperfine Frequency Shifts Caused by Buffer Gases: Application to the Optically Pumped Passive Rubidium Frequency Standard," J. Appl. Phys., vol.53(8), pp.5387-5391, 1982.



梶田雅稔 (かじた まさとし)

電磁波研究所
時空標準研究室
理学博士
量子エレクトロニクス、原子分子物理学



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
時空標準研究室
室長
博士(工学)
光周波数標準、光周波数計測



原 基揚 (はら もとあき)

電磁波研究所
時空標準研究室
博士(工学)
MEMS、圧電素子、原子時計



矢野雄一郎 (やの ゆういちろう)

電磁波研究所
時空標準研究室
博士(工学)
原子時計、マイクロ波周波数標準、数値計算