高性能な超小型原子時計を実現する MEMS ガスセル製造プラットフォーム技術を確立

～インクジェットプリンティング技術で高精度なガス環境制御を実現～

【ポイント】

- 超小型原子時計に適用するインクジェット技術を開発し、MEMS ガスセル量産の高精度な制御技術を確立
- 量産プロセスを維持したまま、ガスセル内部のガス圧の安定かつ高精度な制御を実現
- 高性能な超小型原子時計を実現するガスセルの設計・最適化を加速

国立研究開発法人情報通信研究機構（ＮＩＣＴ、理事長: 大野　英男）、国立大学法人京都大学（京都大学、総長: 立川　康人）、東京都公立大学法人東京都立大学（東京都立大学、学長: 大橋　隆哉）、東洋紡エムシー株式会社（代表取締役　社長執行役員　CEO: 藤井　尚毅）及びネオアーク株式会社（代表取締役: 波多野　智）は共同で、超小型原子時計[*1] 用ガスセルの設計・最適化を加速する新たな MEMS ルビジウムセル製造プラットフォーム技術を確立しました。

本成果では、熱処理によりルビジウム原子と窒素ガスを生成するルビジウム源 RbN_3（アジ化ルビジウム）の微粒子を、インクジェットプリンティング[*2]によりガラスウェハ上へ高精度に形成する技術を開発しました。さらに、RbN_3の封入量を精密に制御することで、ウェハレベルの量産プロセスとガスセル内窒素分圧の精密制御を両立することに成功しました。その結果、ガスセル内部で生成される窒素ガス量を高い精度と再現性で制御できることを実証しました。さらに、本技術を用いることで、異なる窒素分圧を持つ MEMS ガスセルを効率的に作製し、超小型原子時計に利用されるコヒーレントポピュレーショントラッピング（CPT）共鳴[*3] 特性の高度な評価が実現でき、原子時計性能を最大化する窒素分圧条件を明らかにするとともに、量産プロセス上で最適化できることを実証しました。

【背景】

超小型の原子時計は、衛星測位システム（GNSS）の補完、通信ネットワークの時刻同期、衛星搭載機器、自動運転や各種センサシステムなど、社会インフラを支える幅広い分野での活用が期待されています。こうした用途で求められる高い性能は、ルビジウム原子を封入した MEMS ガスセル内のガス圧力やガス組成に大きく左右されることが知られています。そのため、高性能化に向けてはガスセル内条件の最適化が重要となります。

一方で、従来の MEMS ガスセル製造技術では、ウェハレベルの量産性を維持しながらガスセル内条件を精密に制御することは容易ではなく、性能向上に向けた最適条件探索の大きな制約となっていました。

【今回の成果】

研究グループは、熱処理によりルビジウム原子と窒素ガスを生成するRbN_3に着目しました。今回開発した技術では、RbN_3をインクジェットプリンティングによってガラスウェハ上に形成することで、ガスセル内部の窒素ガス量を設計どおりに制御することを可能にしました。図 1 に、本技術を用いて試作した小型ガスセルの一例を示します。



図 1. 試作された原子時計用ガスセルと黒大豆

本技術により、RbN_3封入量の異なる MEMS ガスセルをウェハレベルで一括作製することが可能となりました（図 2 参照）。作製されたガスセルの CPT 共鳴の評価から窒素分圧を分析した結果、図 3 に示すようにRbN_3封入量と窒素分圧の間に優れた線形関係が確認され、ガスセル内圧を高い精度と再現性で制御できることが実証されました。

この成果により、従来は製造後にばらつきを評価するしかなかった MEMS ガスセル内の窒素分圧を、ウェハレベルで設計どおりに制御できるようになりました。これは、量産プロセスを維持しながらガスセル内圧の最適化を効率的に進める製造基盤が確立されたことを意味し、超小型原子時計を実現する MEMS ガスセルの設計・最適化を加速させ、次世代の時空間同期インフラを支える基盤技術としての発展が期待されます。

【今後の展望】

今回確立した製造技術は、ガスセル内圧を高精度に制御できることに加え、量産プロセスとの両立を実現した点に特徴があります。

今後は、本技術を活用してガスセル構造や量産プロセス条件の更なる最適化を進めることで、社会インフラを支える高性能な超小型原子時計の実現を目指します。

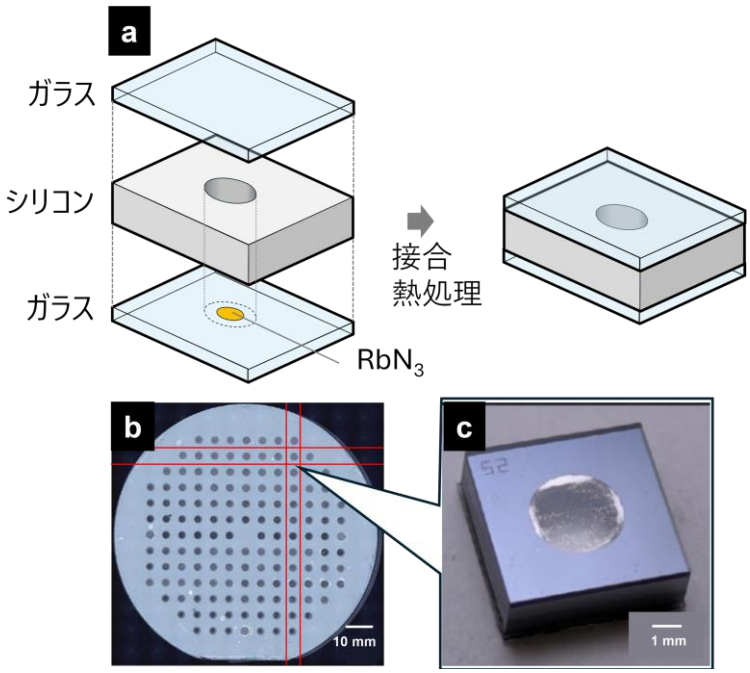


図 2. ガスセル製造技術: (a)ガスセルはレーザー光を通すガラスで、穴のあいたシリコンを挟むように接合して完成する。ガスセル中のアルカリ金属ガスは個体ソースの RbN_3 を接合後に熱処理して、分解し Rb ガスと窒素ガスを充填する。 (b)赤線の方向は、ウェハプロセスでの大量生産が可能。(c)実際のガスセルは、ウェハで製造されたものを個片に切り出して(ダイシング処理にて)完成する。これは、半導体チップの工程と同じ。

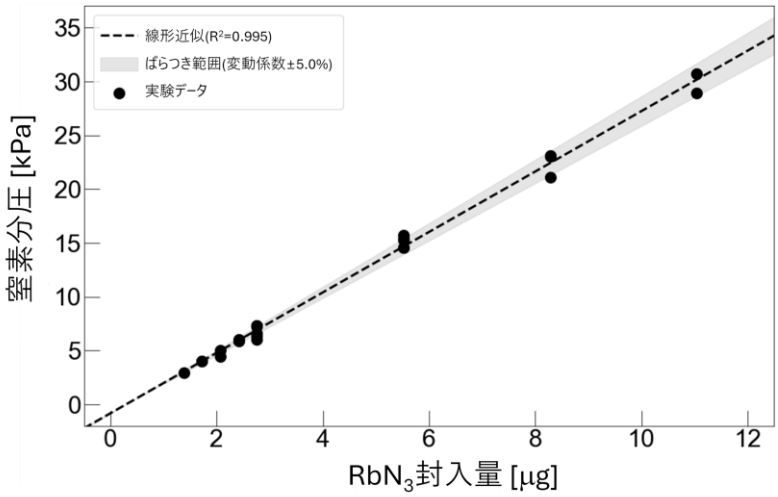


図 3. 本プラットフォームでは、RbN_3 の量を精緻に制御可能であるため、分解後の窒素ガスの発生量を高い精度で制御可能。RbN_3 の封入量と窒素分圧とは比例関係になっていることがわかる。

【論文情報】

著者: Shun Kiyose, Masahiro Fukuoka, Yusuke Odagiri, Satoshi Hatano, Shigeyoshi Goka, Motoaki Hara, Yoshikazu Hirai

論 文 名 : Nitrogen-Pressure Dependence of Coherent Population Trapping Signal Characteristics in Microfabricated Rubidium Vapor Cells

掲載誌: IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control

DOI: 10.1109/OJUFFC.2026.3739231

URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11718789

本成果は、総務省委託研究「電波資源拡大のための研究開発」における研究開発課題「周波数資源の有効活用に

向けた高精度時刻同期基盤の研究開発」（JPJ000254、研究開発代表者：情報通信研究機構　原　基揚）の一環として得られたものです。

＜各機関の役割分担＞

NICT: 小型原子時計開発および当該 MEMS ガスセルの研究開発の推進・統括

京都大学: MEMS ガスセルの設計および試作

東京都立大学: 原子共鳴特性の解析および評価

東洋紡エムシー株式会社: RbN_3材料の合成および高精度パターン形成技術の開発

ネオアーク株式会社: 原子共鳴計測システムの構築および計測支援

＜関連する過去のプレスリリース＞

2018 年 1 月 23 日　NICT、国立大学法人東北大学、国立大学法人東京工業大学
「原子時計をスマートフォンに搭載できるくらいの超小型システムへ」
https://www.nict.go.jp/press/2018/01/23-1.html

＜用語解説＞

***1 原子時計**

原子が持つ固有の共鳴周波数を基準として時刻や周波数を生成する時計である。高い精度と長期安定性を有し、通信ネットワークの時刻同期、衛星測位システム（GNSS）、宇宙機器などに利用される。超小型原子時計では、図 4 に示すようにルビジウムの CPT 共鳴に外部の高周波クロックをロックすることで、超高安定なクロック動作を実現する。

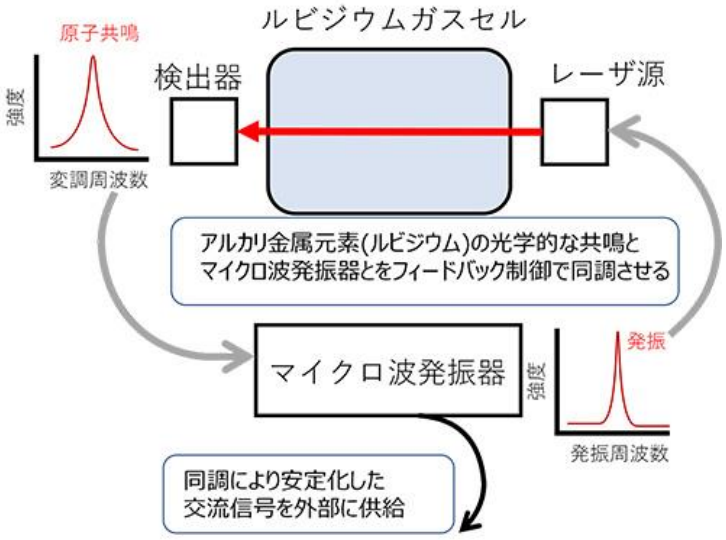


図 4. 原子時計の概念図

***2 インクジェットプリンティング**

液滴を微小なノズルから吐出し、基板上の所望の位置に材料を形成する技術である。一般的なインクジェットプリンタと同様の原理を利用する。本研究では、ルビジウム源となる RbN_3（アジ化ルビジウム）をガラスウェハ上へ高精度に形成するために用いている。図 5 はその例を示している。

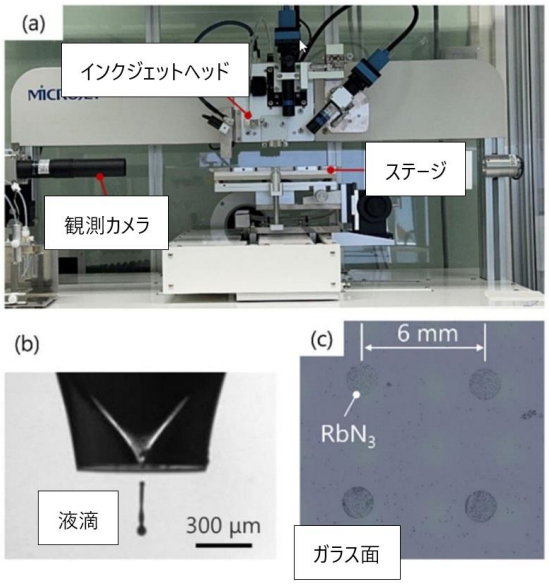


図 5. インクジェットプリンティング装置とそれによる RbN_3 パターンの形成：(a)独自に開発したインクジェットプリンティングシステム、(b)吐出時の映像、(c)RbN_3 パターンの形成

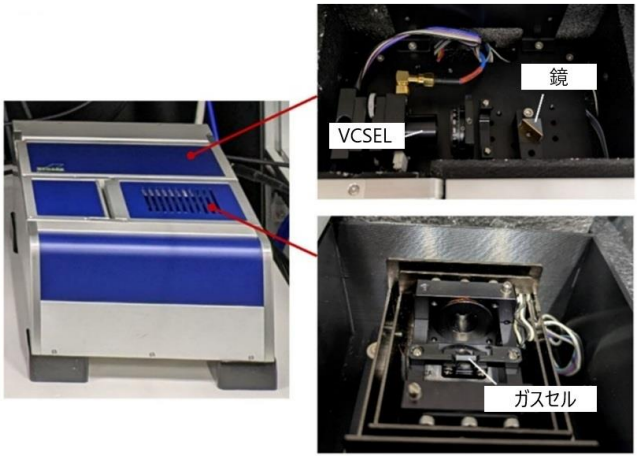


図 6. CPT 共鳴計測装置、フィードバック制御を行うことで時計動作の測定も可能

***3 コヒーレントポピュレーショントラッピング（CPT）共鳴**

コヒーレントポピュレーショントラッピング（CPT）共鳴とは、2 つのレーザー光と原子との相互作用によって生じる量子共鳴現象である。CPT 共鳴では、特定の条件下において原子が光を吸収しない「ダーク状態」が形成され、その結果として非常に鋭い共鳴が観測される。この共鳴周波数は原子固有の周波数に対応するため、超小型原子時計における高精度な周波数基準として利用される。MEMS ガスセルからの CPT 共鳴信号は極めて微弱な信号となるが、我々は開発プラットフォームの構築の一環として、CPT 共鳴計測装置のパッケージ化にも成功している（図 6 参照）。