

超小型原子時計の量産化に向けた ガスセル製造技術

Wafer-level microfabrication technologies for alkali vapor cells in chip-sized atomic clocks

Keywords

Atomic clock

Quantum sensing

Vapor cell

Wafer-level microfabrication

ユーザー氏名 / User's Name

清瀬 俊¹、村上 諒¹、島田 弥力²、原 基揚³、平井 義和¹ / Shun Kiyose¹, Ryo Murakami¹, Miroku Shimada², Motoaki Hara³, Yoshikazu Hirai¹
(¹京都大学, ²東洋紡エムシー, ³情報通信研究機構 / ¹Kyoto University, ²TOYOBO MC Corporation, ³National Institute of Information and Communications Technology)

実施機関担当者 / Person in Charge of ARIM

諫早 伸明, 江崎 裕子, 沖川 満, 岸村 真治, 瀬戸 弘之 / Nobuaki Isahaya, Yuko Esaki, Mitsuru Okigawa, Shinji Kishimura, Hiroyuki Seto
(京都大学 / Kyoto University)

概要 / Overview

超小型原子時計は、アルカリ金属原子と光の相互作用による量子干渉現象を利用した高精度・高安定な周波数基準器である。これをIoTや自動運転へ普及させるためには、中核部品であるアルカリ金属封入セル（ガスセル）をウェハレベルで量産できる技術基盤の構築が不可欠である。本研究では、ARIMの支援を受けて①DRIEによるシリコン三次元構造を用いた高効率なRb生成技術の開発、②RbN₃封入量の精密制御により最適なRb/N₂分圧を高い再現性で実現できるプロセス技術を構築した。これらの技術は、ガスセル性能の向上とウェハ面内の均一性を改善するとともに、超小型原子時計に実装可能なガスセルの量産技術となる。

Chip-sized atomic clocks require the wafer-level fabrication of millimeter-scale alkali-metal vapor cells. With the support of the ARIM platform, we developed two key technologies: (1) an efficient rubidium (Rb) generation method that uses three-dimensional silicon structures and (2) precise control of Rb/nitrogen (N₂) partial pressures using a combination of a rubidium-azide (RbN₃) deposited substrate and low-temperature anodic bonding. These advances improve vapor cell performance and uniformity, leading to the mass production of the atomic clocks.

超小型原子時計によるBeyond 5G社会

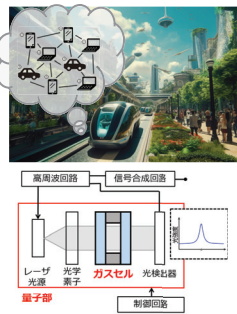
Chip-sized atomic clocks for the Beyond 5G era

高精度な時刻標準/時空間同期が必須

- Beyond 5G社会では、自動運転、遠隔システムなどで超小型原子時計のエッジデバイスへの搭載が不可欠
- 超小型原子時計は、アルカリ金属と光の量子干渉効果（CPT現象）を利用した高精度/高安定な周波数基準器
- その性能を決めるのが、シリコンとガラス製の数mm角の容器に、アルカリ金属とバッファガスを封入・封止した「ガスセル」

【社会実装に向けたニーズ】

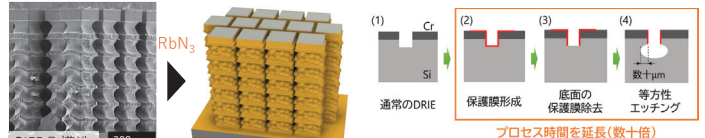
小型かつ量産可能なガスセルの製造技術



技術①【熱分解】：微細構造による高効率なRb生成

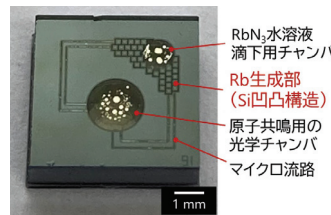
Technology ①: Highly efficient alkali metal generation due to microstructure

DRIEで形成した凹凸構造を利用して高効率/低温でRbを生成



- Siの微細な凹凸構造にRbN₃が付着
- ホットプレートで加熱するのみでRbを短時間で生成

- DRIEにおける等方性エッチングの時間を長くして、大きな凹形状を形成



4インチウェハでの作製結果

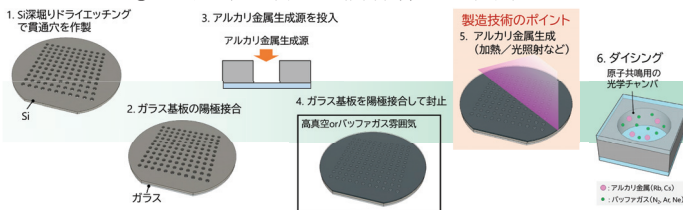
約350°C・10分の加熱でRb生成、凹凸構造の寸法制御で歩留まり向上

MEMSガスセルのウェハレベル製造プロセス

MEMS alkali metal vapor cell and the wafer-level fabrication process

原子時計の性能である「周波数安定性」と「寿命」を左右

- 大気中で安定なアルカリ金属生成源をセルに封止した後、光照射や熱による分解反応により、アルカリ金属を生成する方法が主流
- 製造課題：①Rb生成プロセスの低い制御性と生成効率
②Rb生成量/窒素分圧の精密制御とその再現性



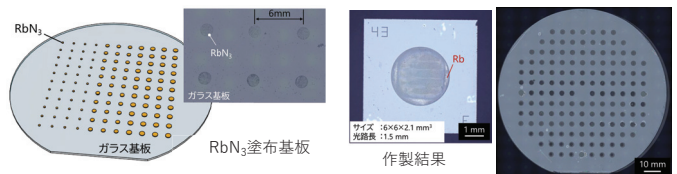
生成材料	固体生成源 (Rb ₂ CO ₃ /Zr/AI)	アルカリ金属アジ化物 (RbN ₃ : 2RbN ₃ →2Rb+3N ₂)		
生成方式	レーザー照射	UV照射	加熱@ガラス基板	加熱@Si凹凸構造
研究グループ	FEMTO-ST (仏)	NIST (米)	CSEM (スイス)	京都大学
生成歩留まり	75%	40%	数%	60%
● Rb ● バッファガス	ガラス 加熱レーザー 固体生成源	UV光 RbN ₃	加熱 RbN ₃	RbN ₃ +凹凸構造 加熱
特徴	● セルを個々に照射 ● 簡便にRb生成が可能 ● 内部に封入した生成源が性能を劣化	● 半日以上UV照射 ● クリーンなRb生成法で高精度なガスセル ● 低い製造効率 (長時間の照射)	● 650°Cの高温加熱 ● 高温加熱により残留ガス放出、性能が不安定 ● 低い歩留まり	● 350°C・10分の加熱 ● ウェハ一括でRb生成 ● クリーンなRb生成法で高精度なガスセル ● 高い歩留まり

技術②【光照射】：RbN₃塗布基板を用いたプロセス

Technology ②: Vapor cell micro-fabrication using RbN₃ patterned substrates

RbN₃封入量の精密制御と低温接合でガスセル特性の均一化

- RbN₃分解後に得られるバッファガス圧（窒素分圧）は、原子時計の特性であるCPT信号の線幅・振幅を決める重要なパラメータ
- ポイント：①インクジェット装置でガラス基板へのRbN₃塗布量を精密制御、②RbN₃の特性を保持するために融点（約320°C）以下の250°Cで陽極接合 → 封入量に依存した最適なRb量/窒素分圧を高い再現性で実現
- 効果：高い周波数安定度を有するガスセルの作製だけでなく、ウェハレベルで作製したガスセル間のCPT信号特性の均一性が向上



RbN₃塗布基板の有用性を確認 → 産学連携による事業化検討を加速

CONTACT

担当者名: 平井 義和、清瀬 俊 / Yoshikazu Hirai, Shun Kiyose
所属機関: 京都大学大学院工学研究科 / Kyoto University
URL: <https://mdde.me.kyoto-u.ac.jp/>

