

【技術分類】 2 - 1 - 2 時間・時刻標準（含む：調節、補正） / 内部時間標準 / 原子時間標準式

【 F I 】 G04F5/14, G04G3/00@N, H03L7/26

【技術名称】 2 - 1 - 2 - 1 原理・システム構成

【技術内容】

原子の電磁的な固有振動を基準とする時間標準周波数発生システムであって、超小型化、省電力化に適し、将来的にクロック、ウオッチの周波数源(原子時計)への適用の可能性を有する、CPT(Coherent Population Trapping)方式(変調したレーザー光で原子を励起する方式)の原子時間標準に関する技術である。

図 1 に CPT 方式超小型原子時計の原理図を示す。

Laser 光をセシウム原子ガスを封入したセルに照射し励起する。セル出力を Detector で検出し、Laser Diode の変調器にフィードバックする構成となっている。Laser Diode は、その出力の上側と下側サイドバンドの周波数差が、セシウム原子の固有振動数に一致するように変調されている。

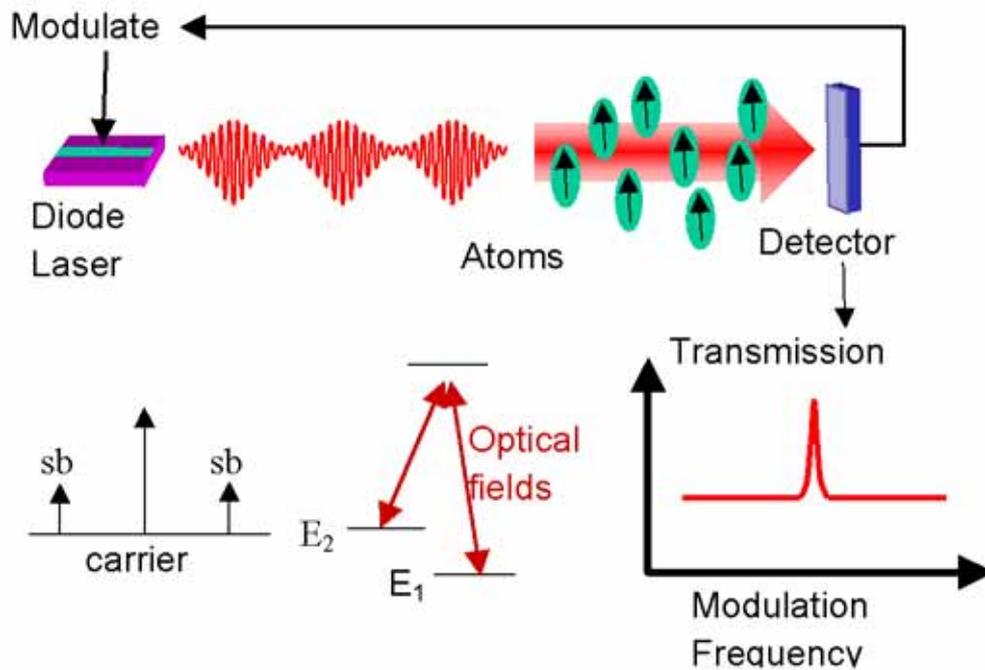
励起されたセシウムガスを通過する Laser 光 (Transmission) は、上側と下側サイドバンド周波数差が、セシウム原子の固有周波数に一致したときに最大となるので、Detector 出力が最大値を保持するように、フィードバックにより変調周波数を調整する。

こうして変調周波数はセシウム原子の固有周波数を基準として安定化され、その周波数は上側と下側サイドバンド周波数差の $1/2$ となる。この原理は Coherent Population Trapping (CPT) と呼ばれている。

CPT 方式は従来のマイクロ波共振器を使用した一般的な原子時計より、小型化・低電力化に有利である。これは次の理由による。

- (1) 原子時計に使用されるセシウムなどの原子の固有周波数の波長は数 cm のオーダーであり、マイクロ波共振器のサイズは波長の $1/2$ の長さが必用である。これに対し、CPT のセルは遥かに小型のもので良い。
- (2) 原子時計のマイクロ波共振器、CPT のセルなどは温度依存性があり、高精度の周波数を維持するには、一定の温度(例：80 度)に保持する必要があるが、このため電気ヒータを用いて保温する必要があるが、この電力は共振器又はセルのサイズに比例する。CPT のセルはマイクロ波共振器より遥かに小さいので、低電力化に有利である。

【図】図1 超小型原子時計の原理図



出典1、「1頁 CPT excitation of atomic hyperfine transitions by means of a modulated semiconductor laser」

当該技術の開発例では、サイズが $1.5 \times 1.5 \times 4.0$ mm、消費電力が 75mw と報告されており、将来的に本技術はウォッチ等の超小型原子時計への応用が期待される。

【出典 / 参考資料】

出典1：

- ・ 出典：National Institute of Standard and Technology (NIST) Physics Laboratory
- ・ 著者名：National Institute of Standard and Technology
- ・ 関連箇所：Chip - Scale Vapor - Cell Atomic Clocks at NIST
- ・ 表題：Overall Design and basic physics research
- ・ 掲載年月日：2004年 掲載者：NIST
- ・ 検索：2005年2月2日
- ・ アドレス：<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/>

【技術分類】 2 - 1 - 2 時間・時刻標準（含む：調節、補正） / 内部時間標準 / 原子時間標準式

【 F I 】 G04F5/14, G04G3/00@N, H03L7/26

【技術名称】 2 - 1 - 2 - 2 C P T方式セルの構造

【技術内容】

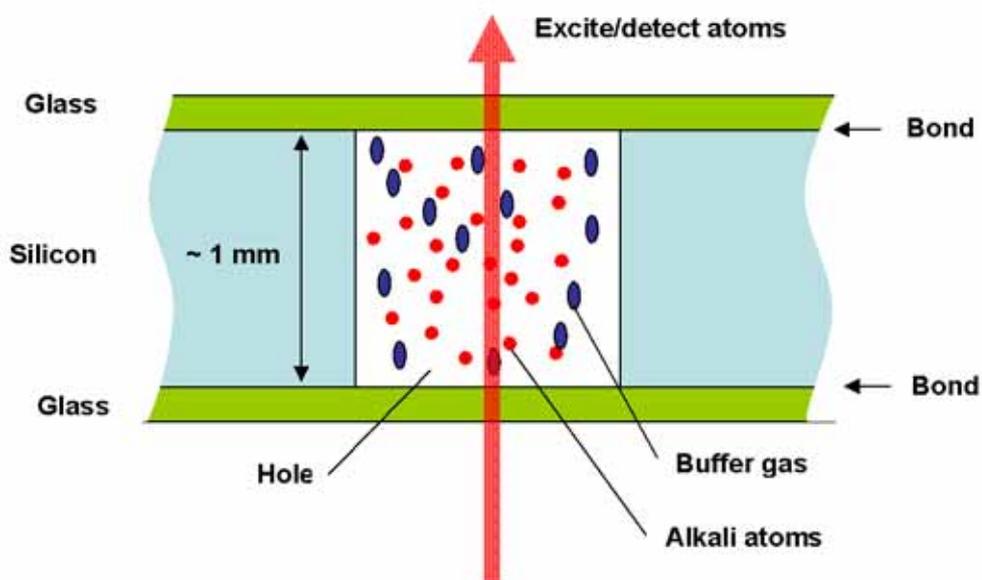
原子の電磁的な固有振動を基準とする時間標準周波数発生システムであって、超小型化、省電力化に適し、将来的にクロック、ウオッチの周波数源(原子時計)への適用の可能性を有する、CPT(Coherent Population Trapping)方式原子時間標準システムにおける、セル構造に関する技術である。

図1に、CPT (Coherent Population Trapping)方式の超小型セルの構造を、図2に同試作品上面の写真、図3に同試作品断面の写真を示す。セルのサイズは10 μ mから数mmが可能であるが、図2、図3のものは縦、横共に1mmよりやや大きい程度である。

セルのキャビティはシリコンウエハーをフォトリソグラフィーで加工して作成しており、上下両面にガラスを接着 (field - assisted bonding) し、セシウムとバッファーガスを封入している。このセルはフォトリソグラフィー、マイクロマシニング技術などを用いて、一枚のシリコンウエハー上に多数製作可能である。

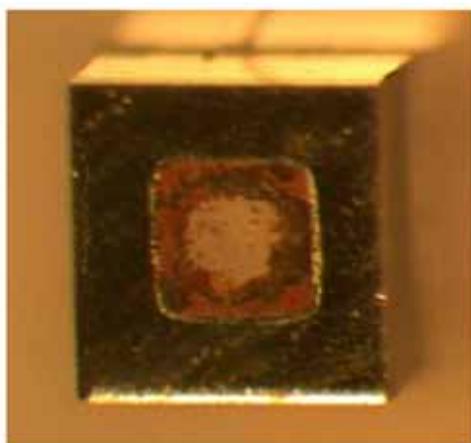
セルを励起するレーザー光線は図1のように、ガラスを通して外部から入射され、フォトディテクター側に出力される。

【図】図1 CPT方式原子時計の超小型セル構造



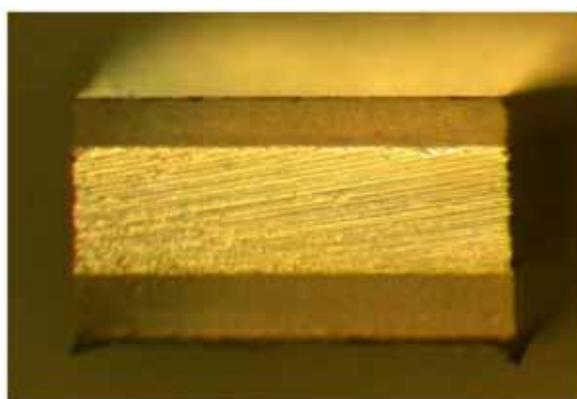
出典1、「1頁 Overall micro - fabricated cell design」

【図】図2 超小型セルの上面写真



出典1、「1 頁写真左 A cell fabricated at NIST containing Cs metal and a buffer gas.」

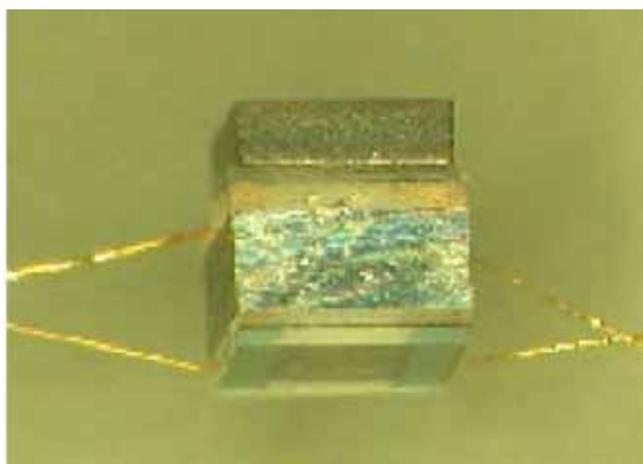
【図】図3 超小型セルの断面写真



出典1、「1 頁写真右 A cell fabricated at NIST containing Cs metal and a buffer gas.」

図4に示すように、ガラスの表面には、セル内部の温度を80 - 130度間の一定温度に保持するためのITO(酸化インジウム)による加熱ヒーターが設けられている。これは常温ではセル内部のセシウム蒸気の原子数が35,000,000程度であり、レーザー光線で励起される原子数も小さく感度が低い。セルを加熱し、温度を高めることでセシウム蒸気の原子密度を増やし、レーザー光線で励起される原子数を50%程度に高め、感度を向上させている。

【図】図4 セル加熱用ヒーターの写真



出典1、「1頁 写真 Photograph of cell assembled with bonded ITO heaters」

CPT方式のセルのサイズは、従来の原子時計のマイクロ波共振器のサイズに比べて非常に小さくできる。マイクロ波共振器も温度制御電力が必要であり、その電力はサイズに比例している。このため、CPT方式の原子時計は、加熱電力を小さくでき、省電力動作が可能であり、腕時計サイズなどの超小型原子時計の可能性を秘めている。

【出典 / 参考資料】

出典1：

- ・ 出典1：National Institute of Standard and Technology (NIST) Physics Laboratory
- ・ 著者名：National Institute of Standard and Technology
- ・ 関連箇所：Physics package fabrication methods and assembly
- ・ 表題：1.Si - based atomic vapor cells, 2. Cell heaters
- ・ 掲載年月日：2004年 掲載者：NIST
- ・ 検索：2005年2月2日
- ・ アドレス：<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/>

【技術分類】 2 - 1 - 2 時間・時刻標準（含む：調節、補正） / 内部時間標準 / 原子時間標準式

【 F I 】 G04F5/14, G04G3/00@N, H03L7/26

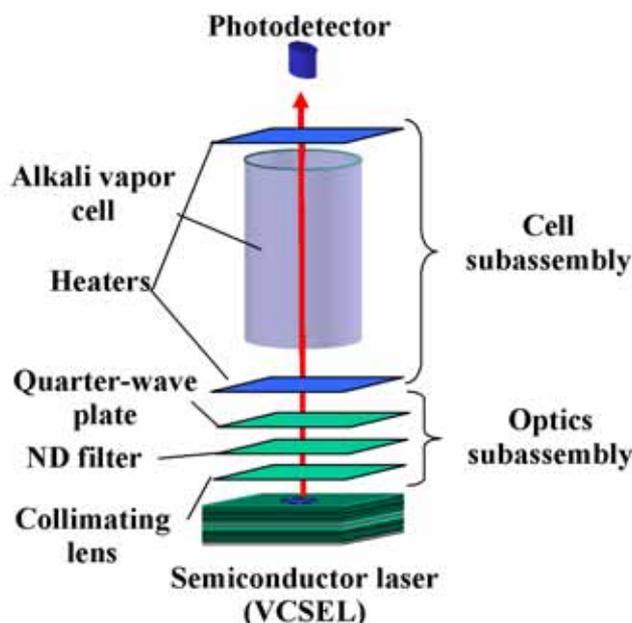
【技術名称】 2 - 1 - 2 - 3 レーザー・光学系

【技術内容】

原子の電磁的な固有振動を基準とする時間標準周波数発生システムであって、超小型化、省電力化に適し、将来的にクロック、ウオッチの周波数源(原子時計)への適用の可能性を有する、CPT(Coherent Population Trapping)方式原子時間標準システムにおける、レーザー光源・光学系に関する技術である。

図1に示すように、CPT (Coherent Population Trapping)方式の原子時計は、セシウムなどの原子を封入したセルをはさんで、一方にレーザーダイオードと光学系、反対側に光ディテクターを配置した構造となっている。

【図】 図1 レーザー、光学系の構成



出典1、「表題1. Physical design of an atomic frequency reference based on CPT excitation of atomic hyperfine transitions.」

レーザーダイオードと光学系は、図2に示すような Optics subassembly としてまとめられている。レーザーダイオードには VCSEL (Vertical Cavity Surface - emitting Laser : 垂直面発光レーザーダイオード) が用いられている。VCSEL は、光出力が表面に垂直であること、閾値が低く低電流で動作可能であること、広帯域変調が容易であることなど CPT 方式の超小型原子時計に適した特性を有している。

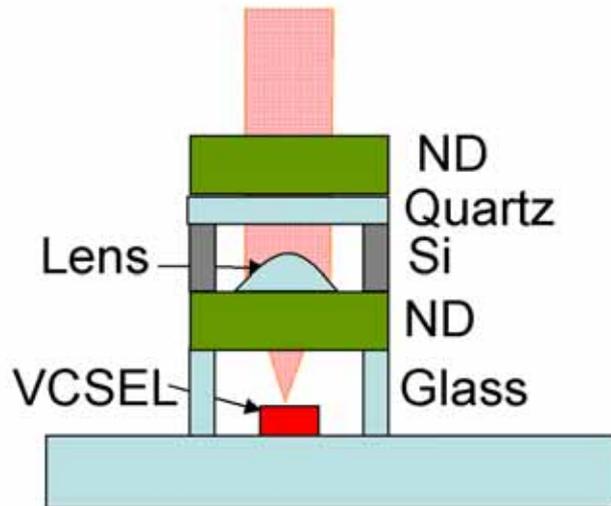
VCSEL の光出力は、いくつかの光学フィルタやレンズなどの光学系を通過して、セルに入力される。この光学系はレーザー光がセル内の原子を最適に励起できるように整える目的で使用される。ND (Neutral Density) フィルターは、レーザー光の電力を減衰して、最適電力となるように調整する。Lens はレーザー光を Collimation (平行光線に変換) する目的で使用されており、Collimation 後の

光ビームの直径は 250 マイクロメートルである。

Quarter wave plate はレーザー光を直線偏光から円偏光に変換している。セルに入力される円偏光の電力密度は約 0.1mW / 平方 cm となる。

光学系から入力されセルを通過した光は、反対側に設置されたフォトディテクター (Si PIN フォトダイオード) で検出される。

【図】図 2 Optics subassembly の詳細



出典 1、「1 頁 CSAC optics assembly.」

【出典 / 参考資料】

出典 1 :

- 出典 : National Institute of Standard and Technology (NIST) Physics Laboratory
- 著者名 : National Institute of Standard and Technology
- 関連箇所 : Chip - Scale Vapor - Cell Atomic Clocks at NIST
- 表題 : 1. Overall Design and basic physics research
2. Optics Subassembly
- 掲載年月日 : 2004 年 掲載者 : NIST
- 検索 : 2005 年 2 月 2 日
- アドレス : <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/Optics.htm>

【技術分類】 2 - 1 - 2 時間・時刻標準（含む：調節、補正） / 内部時間標準 / 原子時間標準式

【 F I 】 G04F5/14, G04G3/00@N, H03L7/26

【技術名称】 2 - 1 - 2 - 4 電子回路・制御系

【技術内容】

原子の電磁的な固有振動を基準とする時間標準周波数発生システムであって、超小型化、省電力化に適し、将来的にクロック、ウオッチの周波数源(原子時計)への適用の可能性を有する、CPT(Coherent Population Trapping)方式原子時間標準システムにおける、周波数のフィードバック制御、温度制御などの電子回路に関する技術である。

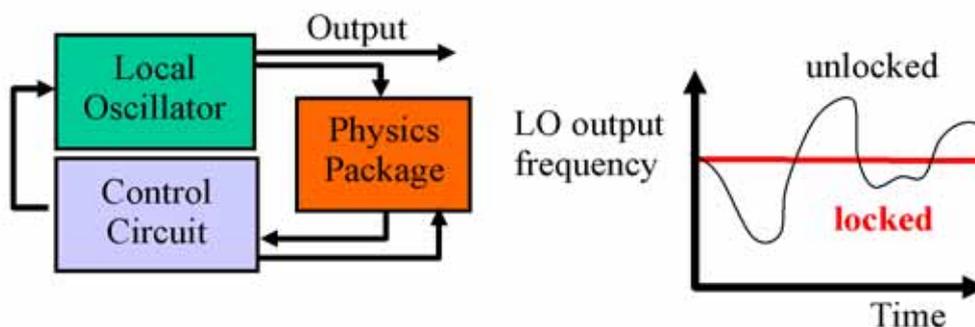
図1(左側)に原子時計の制御系の原理図を示す。

Physics Package、Control Circuit を経由して Local Oscillator (LO) にフィードバック制御を行うことにより、Local Oscillator の発振周波数を Physics Package 内セルのセシウム原子の固有周波数を基準として安定化を行っている。

図1(右側)はその様子を模式的に表したものである。

Local Oscillator の周波数は当初 unlocked 状態で、図のように変動している。制御回路が動作して、ループが定常状態 (Locked) になると、Local Oscillator 周波数は赤線で示すようにセシウム原子の固有周波数の安定度に近くなるように制御される。原子時計としての信号は Local Oscillator から取り出される。

【図】 図1 原子時計制御系の原理図



出典 1、「1 頁 最初の図 In a passive frequency standard, a local oscillator probes the atomic transition and is locked to the atomic resonance frequency with a control circuit.」

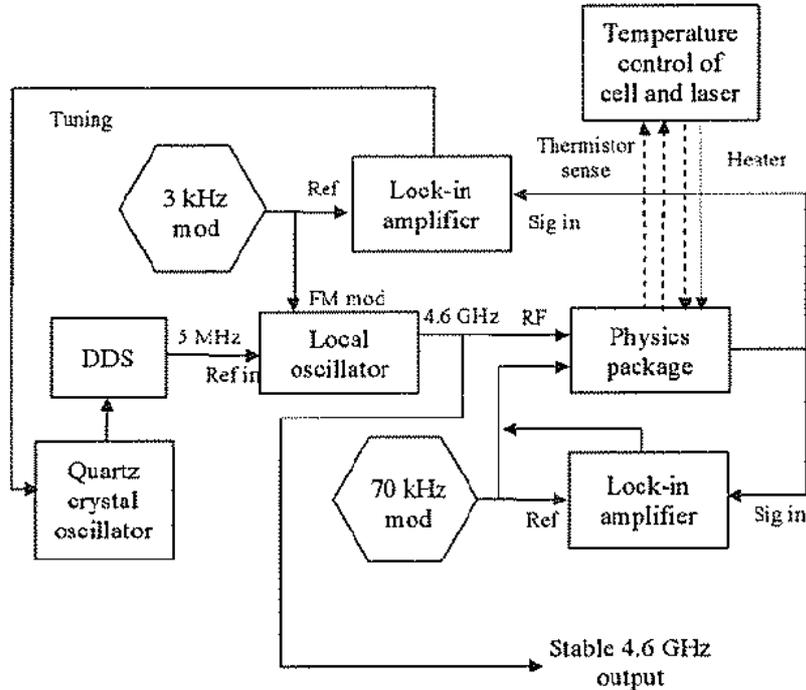
実際の回路では、Physics Package 内のセルの温度なども安定化する必要があり、全体の回路は図2のようになっている。

これは従来の制御回路より低電力で動作するように開発されたもので、次のような制御や信号処理が行われている。

- (1) Laser (VCSEL) の発振波長の制御：VCSEL (垂直面発光レーザー) の発振波長は注入電流依存性が大いので、電流を変化させて波長を制御する。制御はセルのレーザー光吸収波長特性のピークに波長が一致するように行われる。
- (2) Laser 温度コントロール：VCSEL の発振波長、光出力は温度依存性が大いため、温度をモニターして VCSEL 近傍のヒーターで一定温度となるように制御している。

(3)セル温度の制御：バッファーガスとの衝突でセル内原子の固有振動数は温度の影響を受けるので、セルにヒーターを設けて温度が一定になるように制御している。

【図】図2 実際の制御回路全体の構成



出典1、「1頁 3番目の図 Schematic of control electronics electronics used to implement the four servos described above.」

【出典 / 参考資料】

出典1：

- ・ 出典：National Institute of Standard and Technology (NIST) Physics Laboratory
- ・ 著者名：National Institute of Standard and Technology
- ・ 関連個所：Chip - Scale Vapor - Cell Atomic Clocks at NIST
- ・ 表題：Electronics and Local Oscillator
- ・ 掲載年月日：2004年、掲載者：NIST
- ・ 検索：2005年2月2日

アドレス：<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/>

【技術分類】 2 - 1 - 2 時間・時刻標準（含む：調節、補正） / 内部時間標準 / 原子時間標準式

【 F I 】 G04F5/14, G04G3/00@N, H03L7/26

【技術名称】 2 - 1 - 2 - 5 パッケージ

【技術内容】

原子の電磁的な固有振動を基準とする時間標準周波数発生システムであって、超小型化、省電力化に適し、将来的にクロック、ウオッチの周波数源(原子時計)への適用の可能性を有する、CPT(Coherent Population Trapping)方式原子時間標準システムにおける、原子時計のパッケージ・構造に関する技術である。

CPT(Coherent Population Trapping)方式超小型原子時計の構造を図1に示す。各部品を積層して組み立て、機能別のパッケージ(図中央参照)としている。

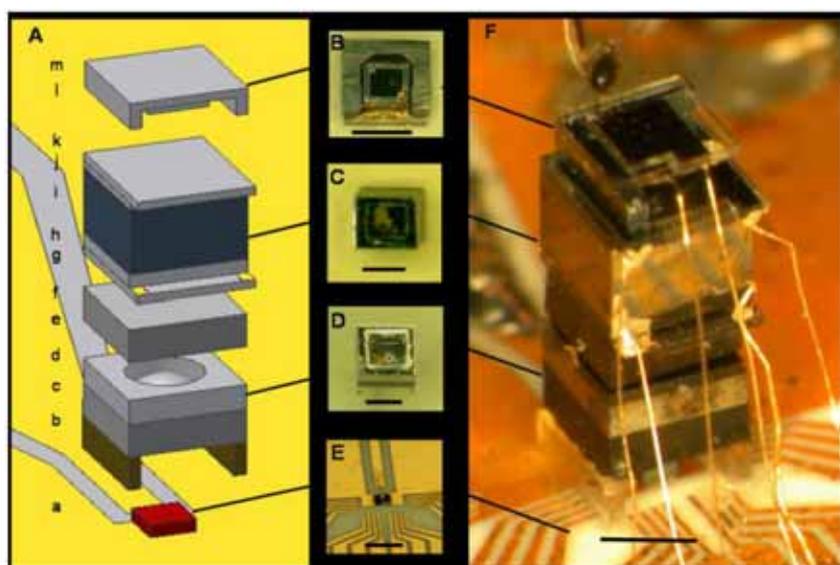
各パッケージは、B: フォトデテクタパッケージ、C: セルパッケージ、D: レンズ・光学系パッケージ、E: レーザーダイオード、および配線基板から構成され、これらの機能別パッケージを積層して図右側の写真に示す全体のパッケージとしている。

図左側に示す各部品は、a: ベースプレート(金メッキ配線基板) / レーザーダイオード(VCSEL)、b: スペース、c: 光減衰器、d: レンズ/スペース、e: 光減衰器、f: Quarter wave plate(図示せず)、g: ヒーター、h: セル(ガラス)、i: セル(シリコン)、j: セル(ガラス)、k: ヒーター、l: フォトダイオード/スペース、m: ベースプレートから構成される。

ベースプレート a(金メッキ配線基板)の配線は、レーザー駆動回路(ローカル発振器など)や制御回路に接続されている。右側の写真に見える6本の金のボンディングワイヤーは、4本がヒーター用、2本がフォトデテクタの信号読み出し用である。

このようにして組み立てられた原子時計の容積は、約9.5立方mmである。(各写真の下に示す黒線が1mmの長さである)

【図】図1 超小型原子時計の構造



出典 1、「1頁 The NIST micro-fabricated atomic clock」

【出典 / 参考資料】

出典 1 :

- 出典 : National Institute of Standard and Technology (NIST) Physics Laboratory
- 著者名 : National Institute of Standard and Technology
- 関連箇所 : 1. Chip - Scale Vapor - Cell Atomic Clocks at NIST
2. Physics package fabrication methods and assembly
- 表題 : Physics package integration
- 掲載年月日 : 2004 年、掲載者 : NIST
- 検索 : 2005 年 2 月 2 日
- アドレス : <http://www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/Integration.htm>