

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06483

研究課題名(和文)位相変調法に基づいたチップスケール原子時計の特性改善

研究課題名(英文)Improvement of chip scale atomic clock using phase modulation

研究代表者

梶田 雅稔(Masatoshi, Kajita)

国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究室・嘱託

研究者番号：50359030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：携帯電話などの小型端末に搭載できるチップスケール原子時計(CSAC)の実現に際して、小型化に伴う原子共鳴のS/N比の低下は重要な課題となる。そこで、S/N比を改善する方法とし、原子共鳴の高速検出を可能とする位相変調法を開発に着手した。これまでに、S/N比の改善効果を検証するための数値解析ソフトと実験装置を構築した。これらによって、実験と理論が一致することを確認し、安定度が最適となる磁場条件が明らかとなった。実際に位相変調法を適用したところ、発振器の性能指標で最も重要な周波数安定度が2倍程度改善されることを確認した。これらは国際会議や論文で報告をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高いS/N比で原子共鳴を超小型、低価格、低消費電力な装置で観測できる超小型原子時計が開発、実用化されると水晶時計よりもずっと高精度な時計を携帯電話、PCなどに搭載できるようになる。また、現在水晶時計を用いているGPS受信機に超小型原子時計を搭載すると4台以上の衛星との交信が不可能な場合でも位置測定を正確に行うことができるようになる。今回行った位相変調による周波数安定化の方法は、超小型原子時計ばかりでなくて、一般的なレーザー光周波数安定化を簡易な装置で行うためにも有用である。

研究成果の概要(英文)：For the development of chip scale atomic clock (CSAC), the signal-to-noise ratio must be obtained using an apparatus with a small size, low cost, and low power consumption. We developed a phase modulation method, with which we can observe the atomic resonance spectrum with a high modulation rate. To confirm its utility, we developed a simulation software and experimental setup. The results of simulation of simulation and experiment were in good agreement, and the optimum magnetic field was also searched. Using the phase modulation, the frequency stability was improved with a factor of 2 in comparison with the frequency modulation, which has been previously used. The result was published with a journal paper and an international conference.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：超小型原子時計 レーザー 位相変調

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2つの波長成分を持つレーザ光を原子に照射したときにその周波数差がマイクロ波領域の遷移周波数に一致したときに透過強度が大きくなる Coherent Population Trapping(CPT)と呼ばれる原子共鳴を利用したチップスケール原子時計(Chip-Scale Atomic Clocks: CSAC)が注目されている。CSACは体積が 1 cm^3 と小型でかつ低消費電力でありながら良好な周波数安定度が得られることができるため、近年ではIoT向けの周波数基準として応用が期待されている。

小型ガスセルや低出力のレーザ素子を利用するCSACの場合、SN比の確保が重要な課題となる。一般にCPT共鳴の検出には周波数変調が用いられるが、周波数変調ではQ値が高くなるほど長い相互作用時間が必要になるために応答速度が低い。そのため、数kHz以上の変調周波数では透過光強度の変化が小さくなり、SN比が低下する。そこで本研究では、小型かつ低消費電力でS/N比を改善することを目的とし、CPT共鳴の位相に着目した位相変調法を開発する。

2. 研究の目的

ノイズを低減する方法として、原子共鳴の高速検出を可能とする位相変調法を開発する。位相変調における原子共鳴の高速検出技術を確認し、S/N比の改善効果を実証する。同時に、申請者らが発案した解析アルゴリズム(固有値解析アルゴリズム)を用いて、高速応答の原理と実験の最適条件を明らかにする。これらにより、実験と理論の両側面から、従来法に比べ優れるSN比を実現し、CSACの周波数安定性を高めると同時に、従来の小型化の困難の解決に手がかりを提供する。

3. 研究の方法

位相変調法によるSN比改善効果を理論と実験の両側面から明らかにすることを目的とし、密度行列に基づいた数値解析およびアルカリ原子として ^{87}Rb 、面発光半導体レーザ(VCSSEL)を用いた実験装置を改良して測定を行った。なお、理論は梶田、実験は矢野が担当した。

実験では、より高い周波数応答の測定に対応するために光検出器と検出回路の改良を行った。位相変調法では、従来の周波数変調法に比べて、数桁高い変調周波数を利用するため、より高い周波数に定応可能な光検出器と検出回路を設計し導入した。

実験装置構成を図1に示す。レーザ光源としては Rb-D_1 線に相当する波長 795 nm のVCSSELを用いた。VCSSELにはバイアスティーを用いて 1.0 mA の直流電流に 3.4 GHz 、 -11.2 dBm のRFを重畳している。RF周波数は ^{87}Rb の超微細構造遷移周波数(6.834 GHz)の半分の周波数とし、この変調により生じる2つの1次サイドバンドをCPT共鳴の励起として利用している。レーザ光のガスセルへの入射強度は $16\text{ }\mu\text{W}$ 、直径は 3 mm 、偏光は円偏光とした。レーザ温度と直流電流を制御し、吸収強度が最大になるように調節しレーザ波長を安定化させている。アルカリ原子が封入されているガスセルは円筒形で直径は 25 mm 、長さは 22.5 mm 、同位体選別された ^{87}Rb とバッファガスとして N_2 を 4.0 kPa 封入したものを利用した。ガスセルの温度は $60.0\text{ }^\circ\text{C}$ 一定になるようにヒーター電力を制御している。ガスセルは、レーザとの相互作用領域における磁場の外乱を防ぐために、パーマロイ製の磁気シールドの内部に設置される。また、時計遷移を選別するために、内部に設置されたソレノイドコイルにより量子軸(レーザ光軸)方向に静磁場が一定に印加される。局部発振器は温度補償水晶発振器(TCXO)を用いた。TCXOには周波数調整機構がついており、周波数を制御することでCPT共鳴に周波数を安定化している。周波数安定度を測定するために、周波数リファレンスとして水素メーザを利用した。

理論では、CPT共鳴における位相変調法の応答特性を数理的に明らかにするために、CPT共鳴の振る舞いを記述できる Λ 型3準位モデルを採用し、密度行列解析に基づいて数値解析を行った。 Λ 型3準位は、2つの基底準位と1つの励起準位に対し、2つのレーザが同時に相互作用している量子系である。変調によるCPT共鳴の動特性を解析するために、大きい時間分割数で解析できるように固有値解析法を改良した。この解析法は、従来の逐次解析と比べて高速かつ精度よく周期条件を満たす解が得られることが特徴である。数値解析では、実験環境を考慮してバッファガスによる衝突緩和、レーザ光強度などのパラメータを設定した。

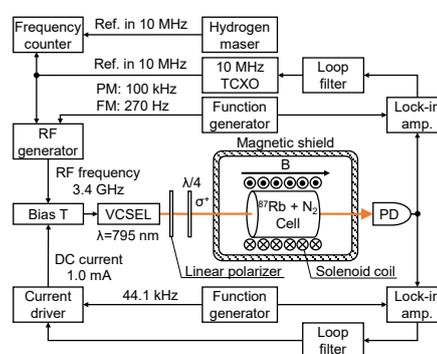


図1. 実験装置構成

4. 研究成果

前節の実験装置および数値計算法を利用して、CPT 共鳴の動特性について詳細な検討を行った。以下に代表的な特性例および研究成果を記述する。

・CPT 共鳴における位相変調法によるスペクトル解析

図2に数値解析によって得られた共鳴近傍における CPT 共鳴のスペクトルを示す。内挿図は変調周波数に対する CPT 共鳴の振幅の大きさを示している。内挿図から、周波数変調法(青線)はカットオフが数百 Hz 以降の周波数では-20 dB/dec で振幅が小さくなるのに対し、位相変調法(赤線)ではバンドパス特性を示し、高い変調周波数領域で振幅が大きくなること分かる。このことから、変調法によって、原子時計動作の最適な変調周波数は異なること、位相変調法の方が高い周波数帯を利用できることが分かる。

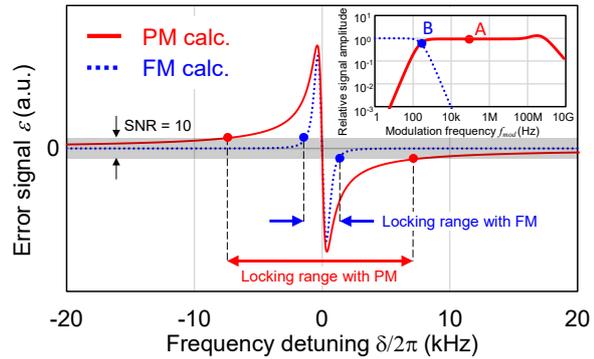


図2. 周波数変調と位相変調による CPT 共鳴スペクトル

図2は、内挿図で示された変調周波数、点Aと点Bで計算したCPT共鳴のエラー信号 ε のスペクトルである。共鳴の中心($\delta = 0$)に着目すると、周波数変調と位相変調の信号は重なっている。原子時計として重要な指標となる短期周波数安定度は、中心周波数におけるエラー信号の傾き($d\varepsilon/d\delta$)に依存し、傾きが大きいほど短期周波数安定度は良くなる。したがって、この図から周波数変調と位相変調のどちらを利用しても、ノイズレベルが同じであれば、同程度の短期周波数安定度が得られることが予測される。

共鳴中心でのエラー信号が重なった一方で、共鳴外での信号特性は周波数変調と位相変調で大きく異なっている。周波数変調では離調 δ が大きくなるに伴って急激に信号が小さくなるのに対して、位相変調では信号の減少が小さく抑えられ、より大きい離調 δ でも大きい共鳴信号を得られることが分かる。共鳴外のエラー信号強度はその値が大きいほど、発振器初期状態の共鳴探索過程において有利である。これは、局部発振器の周波数許容偏差が大きい場合、原子共鳴による安定化前では共鳴中心を同定するために許容偏差内で局部発振器の周波数を掃引して共鳴の中心を探索する必要があるが、帯域外でもSN比が高い信号が得られれば共鳴の中心周波数を同定しやすくなるためである。ここでは、エラー信号がノイズレベルよりも大きい条件とロックレンジと定義すると、図2で明らかのように位相変調の方がより広いロックレンジが確保できる。一般的に、CPT共鳴の線幅は広いほどロックレンジは拡大するが、線幅の広がりによって共鳴中心におけるエラー信号の傾き($d\varepsilon/d\delta$)は小さくなるため、短期周波数安定度は劣化する。そのため、ロックレンジと短期安定度にはトレードオフ関係が成り立つ。位相変調法においては、共鳴中心での傾きは周波数変調と同一であるにもかかわらず、共鳴外で大きい信号を得られることから、広いロックレンジと高い短期周波数安定度の両立が可能であり、位相変調法はCPT共鳴の検出方法として好適な手段であると言える。

・スペクトルの解析結果と実験結果

図3に、より広範囲のCPT共鳴のスペクトルの解析結果(a),(b)と実験結果(c),(d)に示す。本実験におけるCPT共鳴のSN比は700であった。位相変調によるスペクトルの解析結果(a)と周波数変調の結果(b)を比べると、周波数変調では共鳴中心に1つのピークが確認できるのに対し、位相変調では共鳴中心のピーク(●0)以外にサブピーク(●1, ●2)が生じている。これらサブピークは変調によるサイドバンドによって生じたものであり、これら周波数差は変調周波数の整数倍と一致する。解析結果におけるロックレンジは、SN比を700としたとき、位相変調と周波数変調でそれぞれ200 kHz(31.3 ppm)と6.4 kHz(1 ppm)であった。したがって、位相変調の方が1桁以上広いロックレンジを確保できることが分かる。また、図3(a)から、理想的なロックレンジは変調によるサイドバンドによって制限され、変調周波数の2倍になることが分かる。

実験結果における周波数変調のロックレンジは6.4 kHz(1 ppm)、位相変調では100 kHz(14.6 ppm)が得られた(図3(c),(d))。位相変調法により1桁以上の広いロックレンジが得られたが、位相変調におけるロックレンジは理論値の半分程度となった。これは、時計遷移以外の磁場に敏感な遷移であるゼーマンサブレベルによるピークが近接しているため生じている。実験結果では解析では考慮されていない▼のピークが複数生じていることが分かる。これらは磁気に敏感なゼーマンサブレベルであり、それらのサイドバンド(▼1)が時計遷移のピーク(●0)に近接し、エラー信号の符号反転を生じさせるため、ロックレンジの拡大が制限されている。これらから、ロックレンジ拡大のために位相変調を利用する場合、変調周波数はゼーマンサブレベルのサブピークに注意して決定する必要があるといえる。

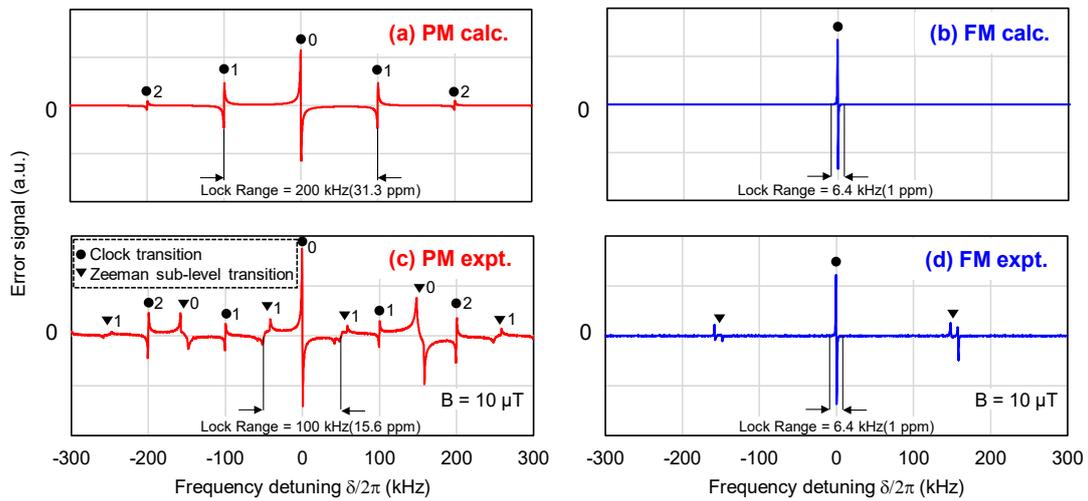


図3. 周波数変調と位相変調による CPT 共鳴スペクトルの解析結果(a),(b)と実験結果(c),(d)

・ 位相変調法を用いた CPT 原子時計の短期周波数安定度

周波数変調と位相変調を用いたときの周波数安定度を測定した結果を図4に示す。周波数変調、位相変調を用いた場合の周波数安定度はそれぞれ $9.0 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 、 $5.0 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ であり、位相変調ではおよそ2倍の周波数安定度が得られた。エラー信号の傾きが同一であったにも関わらず、周波数安定度が改善した主な理由はエラー信号取得の検出ノイズが下がったためであると考えられる。CPT 原子時計の短期安定度は主にレーザの波長不安定に起因する FM-AM 変換ノイズで制限されており、この

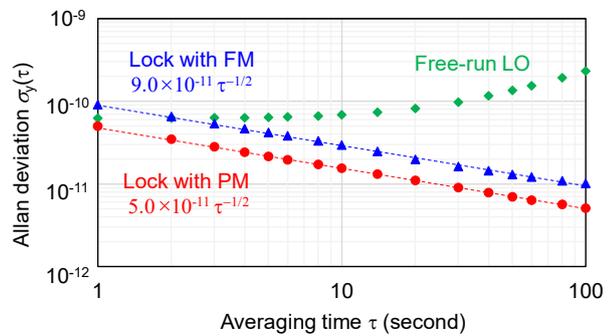


図4. 周波数変調と位相変調による周波数安定度

ノイズは高い周波数領域で小さくなることが知られている。位相変調法では、従来法に比べて高い変調周波数で共鳴検出が可能であることから、この FM-AM 変換ノイズを下げることができ、結果として短期安定度が改善したと考えられる。

以上の結果から、本研究により、位相変調による SN 比の改善による高安定化(図4)、およびロックレンジの拡大(図2)が示されたことから、位相変調による有効性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kajita Masatoshi | 4. 巻 86 |
| 2. 論文標題 Search for the Variation in (mp/me) Using Two Vibrational Transition Frequencies of Molecular Ions | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 123301 ~ 123301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.123301 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yano Yuichiro, Kajita Masatoshi, Ido Tetsuya, Hara Motoaki | 4. 巻 111 |
| 2. 論文標題 Coherent population trapping atomic clock by phase modulation for wide locking range | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 201107 ~ 201107 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.4991560 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Renu Bala, Huliyaar S. Nataraj, Minoru Abe, and Masatoshi Kajita | 4. 巻 349 |
| 2. 論文標題 Accurate ab initio calculations of spectroscopic constants and properties of BeLi+ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Molecular Spectroscopy | 6. 最初と最後の頁 1-9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Kajita Masatoshi | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Non-destructive Monitoring of Molecular Vibrational Transitions | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 074301 ~ 074301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.074301 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kajita Masatoshi | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Precise Measurement of Transition Frequencies of Optically Trapped 40Ca19F Molecules | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 104301 ~ 104301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.104301 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Hara M., Yano Y., Kajita M., Nishino H., Iyata Y., Toda M., Hara S., Kasamatsu A., Ito H., Ono T., Ido T. | 4. 巻 89 |
| 2. 論文標題 Microwave oscillator using piezoelectric thin-film resonator aiming for ultraminiaturization of atomic clock | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 105002 ~ 105002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5048633 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Bala Renu, Nataraj H. S., Abe Minori, Kajita Masatoshi | 4. 巻 117 |
| 2. 論文標題 Calculations of electronic properties and vibrational parameters of alkaline-earth lithides: MgLi+ and CaLi+ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Molecular Physics | 6. 最初と最後の頁 712 ~ 725 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00268976.2018.1539258 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Kokish Mark G., Stollenwerk Patrick R., Kajita Masatoshi, Odom Brian C. | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Prospects for a polar-molecular-ion optical probe of varying proton-electron mass ratio | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 52513 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.052513 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kajita Masatoshi | 4. 巻 88 |
| 2. 論文標題 Estimation of Blackbody Zeeman Shift in $1S0^2P0$ Transition Frequencies | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 104001 ~ 104001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.104001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yano Yuichiro, Kajita Masatoshi, Ido Tetsuya, Hara Motoaki | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 Fast numerical analysis of the time response in coherent population trapping resonance based on Galerkin spectral method | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SGGB05 ~ SGGB05 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0bab | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kajita Masatoshi, Bala Renu, Abe Minori | 4. 巻 53 |
| 2. 論文標題 Attainable accuracies of QH+ rotational transition frequencies (Q: $40Ca$, $24Mg$, $202Hg$) | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics | 6. 最初と最後の頁 085401 ~ 085401 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://dx.doi.org/10.1088/1361-6455/ab7425 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masatoshi Kajita |
| 2. 発表標題 Attainable accuracy of vibrational transition frequencies of homonuclear diatomic molecular ions |
| 3. 学会等名 1st North American Conference on Trapped Ions (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Yano, Motoaki Hara, Masatoshi Kajita, Tetsuya Ido |
| 2. 発表標題 Theoretical and experimental study of Rb Coherent Population Trapping atomic clock with phase modulation detection |
| 3. 学会等名 International Frequency Control Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Yano, Masatoshi Kajita, Tetsuya Ido, Motoaki Hara |
| 2. 発表標題 Numerical Calculation Method of Time Response of Coherent Population Trapping Resonance Based on Galerkin Spectral Method |
| 3. 学会等名 Joint conference IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masatoshi Kajita |
| 2. 発表標題 Measurement of molecular transition frequencies with the uncertainties lower than 10 ⁻¹⁷ |
| 3. 学会等名 European Quantum Electronics Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Masatoshi Kajita | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 IOP Publishing | 5. 総ページ数 94 |
| 3. 書名 Measuring Time: Frequency Measurements and Related Developments in Physics | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Masatoshi Kajita | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 IOP Publishing | 5. 総ページ数 86 |
| 3. 書名 Measurement, Uncertainty and Lasers | |

〔出願〕 計1件

| | | |
|---|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 直交偏光子に基づいた透過光位相情報を用いた原子時計のフィードバック | 発明者 矢野雄一郎 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2017-121387 | 出願年 2017年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 矢野 雄一郎 (Yano Yuichiro) (80781765) | 国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所時空標準研究室・研究員 (82636) | |