

標準用安定化レーザーの現状と将来

洪 鋒 雷・石川 純・大 苗 敦

Present and Future of Frequency-Stabilized Lasers for Metrological Applications

Feng-Lei HONG, Jun ISHIKAWA and Atsushi ONAE

Recently, research activities related to frequency-stabilized lasers for metrological applications increase rapidly due to technical breakthrough and needs from industry and other applications. We have developed the iodine-stabilized He-Ne lasers (633 nm), the iodine-stabilized Nd:YAG lasers (532 nm and 1064 nm) and the acetylene-stabilized semiconductor lasers (1.5 μm) in the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. In this report, the characteristics of each of these three frequency-stabilized lasers, their applications as wavelength (optical frequency) standards and future perspectives are presented.

Key words: laser frequency stabilization, wavelength standard, optical frequency standard, frequency measurement, frequency metrology

長さの単位「m」は、真空中の光速が一定であることをふまえて時間の単位「s」と結びつく形で下記のように定義されている¹⁾。「メートルは、1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである」。

精密機械計測などの実際の現場での高精度の長さ計測は、マイケルソン干渉計などを用いて行われているが、その際基準となる波長安定化レーザーとして、ヨウ素分子の吸収線に安定化された赤色のヘリウムネオンレーザーがよく用いられる。

このような安定化レーザーは、使用条件などを注意深く設定して用いれば、10~11桁程度の再現性を確保することができる。そのため、メートル条約の長さ諮問委員会では、メートル定義に忠実に実現する1つの方法として、「安定化レーザーの放射のリスト」を提案し、国際度量衡委員会で承認されている。現在最新のものは1997年のリストで、国際度量衡局(BIPM)のホームページなどで入手できる(http://www.bipm.fr/enus/6_Publications/si/si-brochure.html、この中のAppendix 2の最初のほうを参照)。

長さの定義によると、これらの安定化レーザーの真空波長を精密に測定することは、その光周波数を測定することと同義である。ある安定化レーザーの光周波数は、そのためにデザインされた周波数チェーンで測定される。周波数チェーンは、多くの安定化レーザーやマイクロ波源、それらの制御装置、光ミキサ、周波数測定系などからなるかなり大がかりな装置で、その開発、運転、維持などが困難で、動作状態の周波数チェーンを維持していたのは、ドイツ、フランス、カナダ、ソ連のみであった。

ところが、20世紀も終わろうとする1999年ごろから、ドイツと米国のグループで、モード同期超短パルスレーザーを用いた光周波数計測の提案がなされ、この分野においてきわめて大きな技術革新が起こった。超短パルスの繰り返し間隔は、フーリエ変換を施して周波数軸上で考えると、光周波数のものさしの目となっていることがわかる。この原理を用いた光周波数計測の技術が近年きわめて短い期間でほぼ完成された。産業技術総合研究所(産総研)計測研究部門の前身の計量研究所でも同じころ、超短パルスレーザーを用いた光周波数計測のプロジェクトを開始してお

り、20世紀中にこの新しい方法で安定化レーザーの光周波数計測ができたのはドイツ、米国と日本の計量研だけであった（詳細は、本号、杉山の解説を参照²⁾）。

これらのブレイクスルーをふまえて、2001年の秋に、「安定化レーザーの放射のリスト」の見直しが行われ、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー（波長532nm）、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー（632nm）、アセチレン分子安定化半導体レーザー（1.5μmの光通信帯）の3つの安定化レーザーの値を決める際に、産総研からの成果が貢献した。

この総合報告では、これら3つの安定化レーザーについての研究・開発の現状を中心として、精密光周波数計測技術の応用や将来の展望について述べる。

1. ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー（633nm）

現在、波長標準として、標準の供給・校正といった用途に実際に用いられているのは、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー（633nm）である。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、勧告されたレーザーの中で不確かさの最も小さいものではないが、実際に製品として流通していて、一般に入手できる唯一の波長標準レーザーである。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーが波長標準として用いられているのは、干渉測長光源として、実用波長安定化ヘリウムネオンレーザーが用いられているからである。ヘリウムネオンレーザー（633nm）は、波長制御・安定化の容易さに限れば、半導体・固体レーザーよりもすぐれた特性をもっている。現状では、長さ計測用レーザー干渉計の光源は、すべて実用波長安定化ヘリウムネオンレーザーであり、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、これらのレーザーの校正に、もっぱら用いられている。

普通のヘリウムネオンレーザーが、ヘリウムネオンの増幅管（レーザー管）と、レーザーチューブを挟む2枚のレーザーミラーにより構成されるのに対して、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、図1に示したように、高純度のヨウ素を封入した吸収セルが加わる。レーザー内には、レーザーの光軸方向に、反対向きに進む光による強い定在波が存在する。吸収セル内を自由に飛び回るヨウ素分子は、さまざまな速度で、レーザー光と相互作用する。レーザー光の周波数が、ヨウ素分子の共鳴周波数 ν より δ だけ高い場合、光の進む方向への速度成分、 $V=c\cdot\delta/\nu$ をもつ分子に対しては、ドップラー効果により、見かけの光周波数が共鳴周波数 ν に一致するので、吸収が起こる。レーザー内には、反対向きに進む2つの光が存在するので、 $\pm V$ の光軸方向速度成分をもつヨウ素分子が、吸収に関与する。レーザー光周波数と、ヨウ素分子の共鳴周波数の差 δ

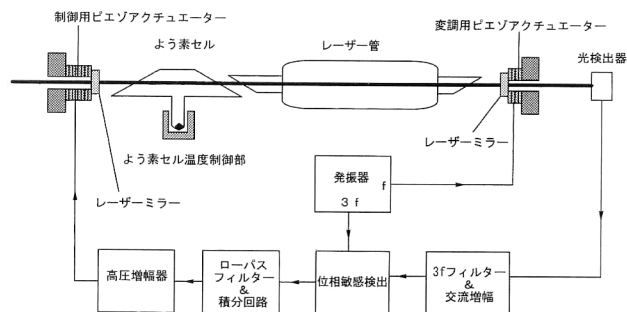


図1 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの原理。

をさらに小さくして、両者が一致した場合、 $\pm V$ の速度成分のヨウ素分子は、速度ゼロで重なる。レーザー内の光は非常に強いので、光の強さと吸収の比例関係は成立せず、吸収が飽和する。すなわち光の強度を2倍にしても吸収は2倍にはならないので、速度ゼロの分子が関与する共鳴周波数においては、吸収が減少し、レーザー光の出力は、逆に増加する。

この現象を利用すると、吸収気体分子の運動に起因する、ドップラー効果による周波数変化の影響を受けない、非常に鋭い周波数マーカーを実現することができる。レーザー周波数を掃引すると、ゆるやかなレーザー出力曲線上に、飽和吸収による小さなこぶが観測される。ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、飽和吸収によるレーザー出力曲線のこぶの中心を検出し、レーザー発振周波数を安定化する。レーザー出力曲線はゆるやかなカーブを描いているので、こぶの中心位置を正確に捉えるためには、出力曲線の傾きの影響を除去する必要がある。このためには、中心位置検出に、一次微分信号の代わり、傾きの影響を受けない三次微分信号を用いる。微分信号を検出するために、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーには、周波数変調（変調周波数 $f=1\sim 5$ kHz、変調深さ6 MHz p-p）がかけられる。このときのレーザー出力信号を、変調周波数（ f ）ではなく、変調周波数の3倍の周波数（ $3f$ ）で位相敏感検出すると、三次微分信号が得られる。レーザー周波数の安定化は、この三次微分信号をエラー信号として、周波数制御を行うことにより実現される。

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの研究は、30年も前から行われてきた。初期のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーは、装置の大きさ・重量、外部環境（温度・振動・音）に対して敏感であることなどから、実験室内でのみ用いられた。しかし、近年、持ち運びも含めて、実験室の外で用いることのできるヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの需要が高まり、現在では、このような実用的ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを、複数の会社から購入する

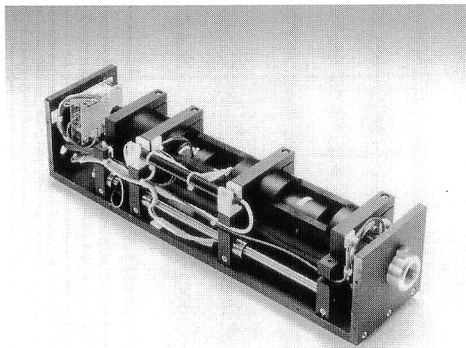


図2 ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー実用機の例。レーザーヘッド部分のカバーをはずしたところ。

ことができるようになった。図2は、実用化に重点を置いて開発された可搬型ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの一例である。写真のレーザーヘッド部分は、幅11 cm、高さ10 cm、全長およそ42 cmであり、質量は6.5 kgである。コントローラー部は、幅35 cm、高さ10 cm、奥行き40 cmで、質量はおよそ8 kgである。このレーザーは、小型であるにもかかわらず、環境、とくに温度変化の影響を受けにくいことが特長で、周囲温度15~25°Cの間で、周波数の変動を5 kHz (1×10^{-11}) 以下に保つ。

ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの不確かさを1 mの長さ測定の不確かさに換算すると、およそ0.02 nmに相当する。これは、原子の直径のおよそ10分の1である。今後どのような微細加工技術が実現しても、原子が最小単位であるので、産業計測において、これ以上の不確かさが要求される可能性は、まずない。一方で、実用安定化レーザーの不確かさは、これよりも数百倍悪く、半導体製作プロセス等の先端的な要求に対しては、十分とはいえない状況にある。不確かさの点だけからいえば、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを採用することで問題は解決するが、干渉光源として用いるには、周波数変調、低出力などの原理的な難点が存在する。現在、研究・開発の課題として、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーと実用波長安定化ヘリウムネオンレーザーの間を埋めるレーザーの実現が求められている。

2. ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザー (532 nm および 1064 nm)

ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーは、新しい波長標準として注目され、その研究が現在、世界各国で展開されている。ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの最大の特徴は、周波数安定度が高いことである。その結果、レーザーの周波数再現性がよく、長期運転の信頼性も高い。1997年に改訂

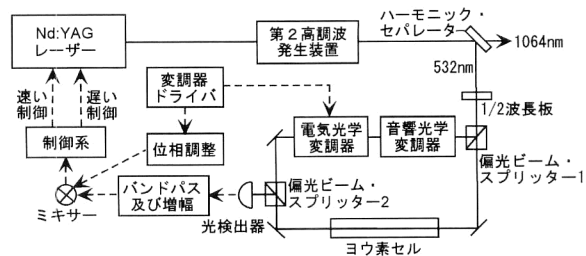


図3 ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの原理。安定化レーザー装置は、光源、第二高調波発生装置、分光系および制御系からなる。

された安定化レーザーの放射リストに、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーが追加され、実用的な波長標準として正式に認められた。

波長標準としてヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーが注目される理由は数多くあって、その主要なものは、

- (1) ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの出力に周波数変調がのっていないので、高度な干渉計測などに直接使える
- (2) 数百 GHz のレーザー周波数同調範囲中に 20 近くのヨウ素吸収線があり、基準となりうる吸収線の選択肢がたくさんある。さらに、数十 GHz にわたって、波長標準としての精度を保持しながら、連続同調が可能である
- (3) ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーから、532 nm および 1064 nm の 2 波長の位相のそろった光が得られる
- (4) ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの出力 (今回の装置では、532 nm においては約数十 mW、1064 nm においては約 1 W) は、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの出力 (約 0.1 mW) と比べて桁違いに大きいので、より多くの応用に対応することができる。

図3にヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの原理を示す。光源は半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザーで、結晶1枚でレーザー共振器を構成するモノリシック構造をとっているため、他の種類のレーザーと比べて固有の周波数特性はきわめてよい。

第二高調波の発生は周期的分極反転 KTiOPO₄ (PP-KTP) を用いたシングルパス変換で行われた。得られた第二高調波 (532 nm) は、ハーモニック・セパレーターによって基本波 (1064 nm) と分けられ、計測やヨウ素分子の分光に用いられた。532 nm におけるヨウ素分子の吸収線は、線幅が狭いうえ、吸収強度も大きいので、波長安定化の基準としてたいへんすぐれている。また、吸収が強いので、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーのように吸収体を光

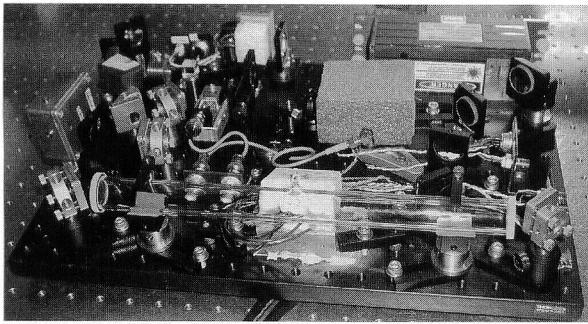


図4 産総研の可搬型ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー装置の写真。すべての光学部品が30 cm×45 cmの定盤の上にのせられている。

共振器に入れて光強度を上げる必要もない。その結果、各種のシステムパラメーターの制御が独立にできるという利点が生まれた。

ヨウ素の分光は、飽和吸収分光法であるモジュレーション・トランスファー分光法 (modulation transfer spectroscopy)³⁻⁵⁾を用いて行われた。モジュレーション・トランスファー分光法では、スペクトルのベースラインがドップラーの影響をほとんど受けないでほぼ直線となるので、レーザー分光や周波数安定化にとってたいへん魅力的な分光法である。532 nmの光を1/2波長板と偏光ビームスプリッター1の組み合わせでポンプとプローブ光に分けた。ポンプ光は音響光学変調器で周波数シフトさせられ、電気光学変調器で位相変調させられた。周波数シフトは80 MHzで、分光系内の不要な干渉を避けるために用いられた。ポンプ光とプローブ光はヨウ素セルの中で対面進行をし、精密に重ね合わせられた。飽和吸収が起きるときだけ、四光波混合過程により、変調されていなかったプローブ光にポンプ光から変調が移る (モジュレーション・トランスファー)。プローブ光がビームスプリッター2によって光検出器へ導かれ、そこでプローブ光に新しくできたサイドバンドとキャリアがビート信号をつくる。ビート信号が復調され、ヨウ素分子の飽和吸収信号 (超微細構造) として観測される。

レーザーの周波数安定化は、観測された吸収信号に基づくレーザーへのフィードバック制御により実現される。速い制御信号はレーザーの共振器を制御する電歪素子に戻され、遅い制御信号はレーザー結晶の温度制御に戻される。

図4に、産総研の可搬型ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー装置の写真を示す。すべての光学部品が30 cm×45 cmの定盤の上にのせられている。アタッシュケースに入れられたレーザー装置は飛行機の中へ持ち込むことが可能で、国際比較に適している。性能を落とさずにシステムを小型化することは容易なことではない。可搬型レーザーは、産

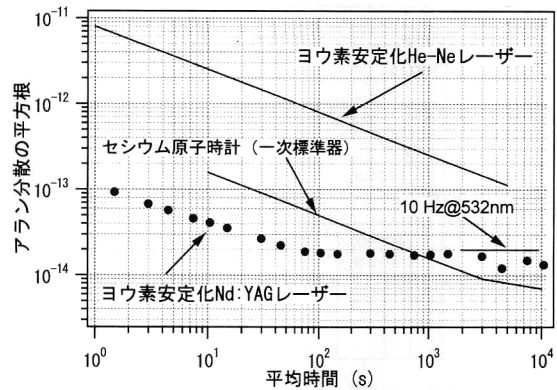


図5 ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの安定度を示すアララン分散。比較のために、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーおよびセシウム原子時計 (一次標準器) の周波数安定度も表示されている。

総研でしか作製されていないので、各国のレーザーの周波数リンクに大きな役割を果たしている⁶⁻⁸⁾。

筆者らは4台のヨウ素安定化Nd:YAGレーザーを製作し、レーザーの周波数安定度および再現性の評価を行った。図5は産総研のヨウ素安定化Nd:YAGレーザーのアラン分散⁹⁾ (時間領域ごとのレーザーの周波数安定度)を示す。また、参考のためにヨウ素安定化He-Neレーザーおよびセシウム原子時計 (一次標準器) の周波数安定度も表示されている。レーザーの周波数の相対変動は、1秒の積分時間において約 1×10^{-13} で、積分時間が60秒以上では 2×10^{-14} より小さいレベルまで向上している。 2×10^{-14} の相対変動は532 nm (563 THz)では約10 Hzの周波数変動に相当する。典型的なヨウ素安定化He-Neレーザーと比べて、筆者らのヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの安定度が短期では約70倍、長期では約10倍以上よくなっている。また、セシウム原子時計と比べて、100秒より短い積分時間においては、レーザーの周波数安定度のほうがセシウム原子時計の周波数安定度より数倍よいことがわかった。また、長期では互いに安定度を競い合うところまできている。

4台の産総研レーザーの周波数ばらつきを標準偏差で表すと約460 Hz (相対値では 8.2×10^{-13})である¹⁰⁾。安定化レーザー全体の再現性として考えた場合、この値はヨウ素安定化He-Neレーザーの27分の1である。

ヨウ素安定化Nd:YAGレーザーのもう1つの特徴は、その広い同調特性である。図6にNd:YAGレーザーの同調範囲にあるヨウ素分子吸収線 (17本) のアトラスを示す。筆者らは、光周波数コム発生器を製作し、この17本の吸収線の周波数間隔を約200 Hzの不確かさで測定した (表1)¹¹⁾。そのうちの8本の吸収線は初めて測定されたもので、残りの9本の吸収線に関しては文献値から最大6

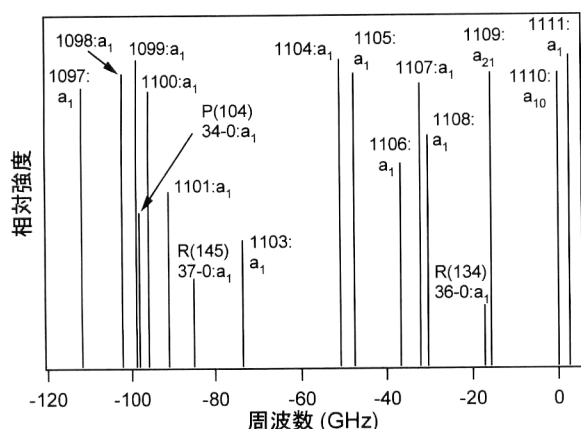


図6 波長 532 nm 近辺におけるヨウ素分子吸収線の周波数アトラス. R(56)32-0 遷移の a_{10} 超微細成分の絶対周波数が測定されているので、それを周波数基準として用いている。

表1 測定されたヨウ素分子吸収線の周波数間隔。

吸収線	同定	周波数間隔
1111	P(53)32-0 : a_1	2,599,708.0
1110	R(56)32-0 : a_{10}	0.0
1109	P(83)33-0 : a_{21}	-15,682,076.2
	R(134)36-0 : a_1	-17,173,682.9
1108	R(106)34-0 : a_1	-30,434,765.2
1107	R(86)33-0 : a_1	-32,190,408.0
1106	P(119)35-0 : a_1	-36,840,164.4
1105	P(54)32-0 : a_1	-47,588,898.2
1104	R(57)32-0 : a_1	-50,946,886.4
1103	P(132)36-0 : a_1	-73,517,088.1
1101	R(145)37-0 : a_1	-84,992,177.6
	R(122)35-0 : a_1	-90,981,724.1
1100	P(84)33-0 : a_1	-95,929,863.0
1099	P(104)34-0 : a_1	-98,069,775.0
	P(55)32-0 : a_1	-98,766,590.0
1098	R(58)32-0 : a_1	-102,159,977.4
1097	R(87)33-0 : a_1	-111,935,173.1

kHz の偏差を見いだした。現在、国際度量衡委員会において勧告値の見直し手続をしている。さらに、筆者らはこれらの吸収線の超微細構造を測定し、超微細構造定数を求めた¹²⁻¹⁴⁾。得られた超微細構造定数から、ヨウ素分子超微細構造定数の振動および回転に対する依存性を表す公式を導いた¹³⁻¹⁵⁾。

産総研におけるフェムト秒レーザー周波数コムを用いた光周波数測定によって、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーの絶対周波数が得られた^{2,16)} (詳細は本号杉山の解説を参照)。この、筆者らにとって初めての光周波数測定結果を確認するために、筆者らは絶対測定と同時に可搬型ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーによる米国との国際比較を実施した。その結果、産総研の絶対周波数測定値と国際比較に

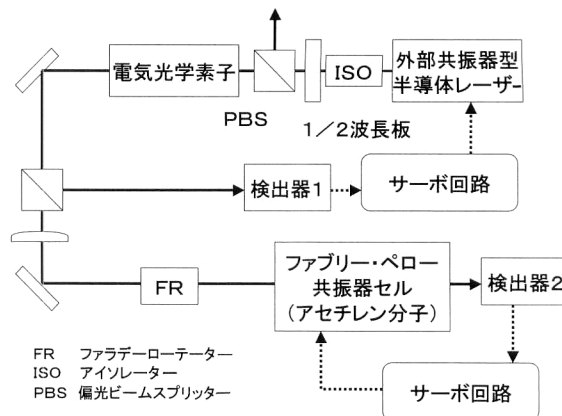


図7 アセチレン安定化半導体レーザーの構成。

よる測定値は、 6.7×10^{-13} のレベルで合致した¹⁷⁾。産総研のヨウ素安定化 Nd:YAG レーザー (標準器名: Y3) の周波数値は (基準線 R(56)32-0 : a_{10}),

$$f = 563\,260\,223\,510.1(3) \text{ kHz} \quad (1)$$

で、ヨウ素セルのコールド・フィンガー温度が -15°C に設定されていた。この周波数値は、2001 年「安定化レーザーの放射のリスト」の見直しの際に、米国とドイツの周波数値とともに採用された。

一方、産総研において、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザーが実際にブロックゲージ干渉計の光源として使用開始され、良好な実験結果が得られている¹⁸⁾。

3. 通信帯の安定化レーザー (1.5 μm)

波長 1.5 μm 帯には、多くの原子・分子の吸収が存在し、分子の振動状態と回転状態が同時に励起される振動回転遷移は、ほぼ等間隔に並んだ多数の吸収線を与えるため光周波数 (波長) 標準の候補となっている。

シアン分子、アセチレン分子をファブリー・ペロー (FP) 光共振器の中の試料セルに入れて、通常の半導体レーザーの出力を数十倍の大きさに増幅させて分子ガスと相互作用させることにより飽和吸収信号を得ることができると中川らにより約 10 年ほど前に示された¹⁹⁾。この成果を受けて産総研計測標準部門では、電気通信大学の中川研究室、東京工業大学の天津研究室との共同で、光通信帯においてより実用的で高精度な光周波数 (波長) 標準器の開発を行ってきた。

試作された光周波数 (波長) 標準器の構成を図 7 に示す。外部共振器型半導体レーザーからのレーザービームは、戻り光を防ぐアイソレーターを通り、1/2 波長板と偏光ビームスプリッター (PBS) により外部への出力がとられたあと電気光学素子 (EOM) で 5 MHz の位相変調がかけられ (光周波数にサイドバンドがたてられ)、封じ切りのアセチ

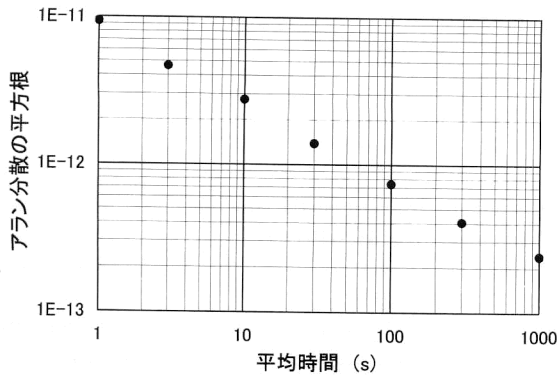


図8 アセチレン安定化半導体レーザーの安定度を示すアラン分散。

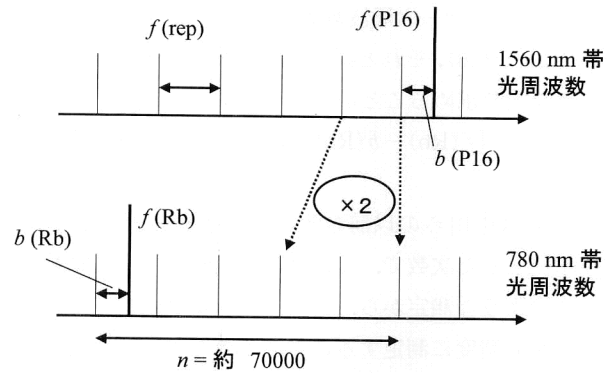


図9 安定化レーザーと超短パルスレーザーモード成分の間の周波数関係。

レン分子セルが取められたFP光共振器に導かれる。共振器の反射光と透過光はそれぞれ赤外光検出器1, 2で検出される。外部共振器型レーザーの周波数は共振器からの反射光から得られる信号を使いFP光共振器の共振(縦)モードの1つに周波数安定化される。

そこでFP光共振器のミラーの1つをとりつけている電歪素子を使い縦モードの周波数を掃引させることで光共振器内セルに封入されているアセチレン分子ガスの吸収を観測することができる。さらに周波数がちょうど吸収線の中心にくると、ごく狭い周波数範囲で吸収の飽和が起り、吸収の度合いが減少する。この信号を使い共振器の長さ、すなわちレーザーの周波数を安定化する。

飽和吸収の信号の中心で符号が反転するような信号を得るため、FP共振器長を決める電歪素子に小さな振幅の変調信号を重ねて、変調周波数もしくはその3倍で位相敏感検出をすることで、吸収信号の一次もしくは三次の微分信号を観測して制御信号とする。観測された飽和吸収の線幅は約1 MHzで、ほぼ同程度の3つの原因、レーザー周波数のジッター、圧力幅、有限なレーザーのビーム径によるものと考えられる。安定化に使ったラインは、 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子の $\nu_1 + \nu_3$ バンドのP(16)回転線(波長1542 nm)、アセチレンの封入圧力は4 Paである。

装置の周波数安定度を評価するために同様の装置をもう1台製作した。同じアセチレンの吸収線に安定化した2つの装置の出力(一方は音響光学変調器で80 MHzシフトさせて)を光検出器で重ね合わせてビート信号を検出することにより周波数標準器としての安定度を評価した。カウンターのゲート時間を1秒に設定して測定したビート周波数の時系列のデータを解析して得られたアラン分散の平方根を図8に示す。積分時間 τ が1秒から1000秒までの範囲で、アラン分散の平方根は、

$$\sigma_y(\tau) \sim 10^{-11} \cdot \tau^{-1/2} \quad (2)$$

となった。 $\tau=1000$ 秒で安定度は 2.4×10^{-13} に達した²⁰⁾。これは、市販されている633 nmのヨウ素安定化He-Neのうちで最も高精度なものと同程度の安定度である。

安定化のために三次微分信号を利用すると、ドップラードによる効果を取り除けるために、より再現性のよい結果を得ることができる。産総研で開発されたシステムと、可搬型として小型化を目指して電気通信大学で開発されたシステムを比較したところ、およそ10 kHz以内の再現性が確認された。これは光周波数200 THzに対して、 5×10^{-11} の相対不確かさに相当する。

このアセチレン安定化レーザーの光周波数(波長)を測定するために、Rb安定化レーザーとモード同期ファイバーレーザーを利用して光周波数測定システムを開発した。Rb原子の二光子吸収の遷移に安定化された波長778 nmのレーザーは、すでにその光周波数が精度よく測定されていて基準として用いることができる。また、波長1.5 μm 帯で発振するモード同期レーザーは、はじめに述べたように、通信帯の波長域において光周波数のものさしとして利用することができる。繰り返し周波数は約50 MHz、平均出力は20 mW、パルス幅は約300 fs、スペクトルの広がり約40 nmである。さらにこのレーザーは、内部に擬位相整合型ニオブ酸リチウム結晶(PPLN)とよばれる非線形結晶をもち、波長1.5 μm 帯のパルスレーザーの第二次高調波で波長780 nm帯においても超短パルスを生じさせ、同様に光のものさしとなる。この超短パルスレーザーと、アセチレンとRbの2つの安定化レーザーを重ねてそれぞれの波長帯での検出器に入れると、安定化レーザー自身と周波数軸上でそれに近い超短パルスのあるモード成分との間のビート周波数が検出される。また、どちらの検出器からも超短パルスの繰り返し周波数が検出される。図9に示すような簡単な関係があるため、 $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子の $\nu_1 + \nu_3$ バンド、P(16)回転線に安定化されたレーザーの周波数 $f(16)$ は、

Rb 安定化レーザーの周波数 $f(\text{Rb})$ と、2つのビート周波数 $b(\text{Rb})$, $b(16)$, それと繰り返し周波数 $f(\text{rep})$ から下記のような式で求めることができる。

$$f(16) = [f(\text{Rb}) - b(\text{Rb}) + n \times f(\text{rep})] / 2 + b(16) \quad (3)$$

ここで n は中川らの以前の測定から求まる繰り返し周波数を単位とした次数で、この場合約 70000 程度の整数である。このような測定から、アセチレン安定化レーザーの光周波数を高精度に測定することができた²¹⁾。この結果は、2001年の秋に行われた国際会議²²⁾とそれに引き続くメートル条約関連の「安定化レーザーの放射のリスト」を見直すワーキンググループで報告され、通信帯において初めて、アセチレン分子に安定化されたレーザーの光周波数(波長)として承認された。このことは、電気通信における国際標準機関ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union)で提案されている光通信帯のグリッドを具体化していくとき、メートル条約に整合性のある光周波数(波長)基準を提供するために大きく貢献できると思われる。

4. 将来への展望

将来への展望として、周波数安定化レーザーの研究が、より実用的な方向へ向かうものと、より高精度な方向へ発展するものと二極化すると思われる。

実用的な方向として、633 nm ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーにおいて、実用波長安定化ヘリウムネオンレーザーとの間を埋めるレーザーの開発が求められていることを1章で述べた。532 nm Nd:YAG レーザーにおいては、現在のヨウ素安定化レーザーに用いられているモノリシックタイプの光源が高価であるがために、そのままの形での普及が考えにくい。安価な固体レーザー光源の開発を含めた、小型で使いやすい実用型ヨウ素安定化固体レーザーの研究・開発が求められている。また、通信帯においても、小型で使い勝手のよい安定化レーザー装置に対するニーズが高く、その開発が緊急課題となっている。

より高精度な方向としては、分子のより狭い吸収線の探索、冷却された原子あるいはイオンの吸収線による標準が盛んになると思われる。その背景として、モードロックフェムト秒レーザーによる光周波数の絶対測定(光周波数とマイクロ波周波数のリンク)に関する研究が急速に進んでいることがあげられる。光の吸収信号の Q 値がマイクロ波と比べて数桁高いことを考慮し、また光周波数からマイクロ波周波数までのダウン・コンバージョンの道筋が見え始めた今、光周波数標準が現在のマイクロ波周波数標準によ

る時間標準にとって代わる日がそう遠くないのかもしれない。

文 献

- 1) "Documents concerning the new definition of the metre," *Metrologia*, **19** (1984) 163-177.
- 2) 杉山和彦: "モードロックレーザーによる光周波数計測", *光学*, **31** (2002) 870-876.
- 3) G. Camy, C. J. Bordé and M. Ducloy: "Heterodyne saturation spectroscopy through frequency modulation of the saturation beam," *Opt. Commun.*, **41** (1982) 325-330.
- 4) J. H. Shirley: "Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 537-539.
- 5) J. L. Hall, L. S. Ma, M. Taubman, B. Tiemann, F.-L. Hong, O. Pfister and J. Ye: "Stabilization and frequency measurement of the I_2 -stabilized Nd:YAG laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (1999) 583-586.
- 6) F.-L. Hong, J. Ishikawa, T. H. Yoon, L.-S. Ma, J. Ye and J. L. Hall: "A portable I_2 -stabilized Nd:YAG laser for wavelength standards at 532 nm and 1064 nm," *Proc. SPIE*, **3477** (1998) 2-10.
- 7) F.-L. Hong, J. Ishikawa, J. Yoda, J. Ye, L. S. Ma and J. L. Hall: "Frequency comparison of $^{127}I_2$ -stabilized Nd:YAG lasers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (1999) 532-536.
- 8) F.-L. Hong, J. Ishikawa, Z.-Y. Bi, J. Zhang, K. Seta, A. Onae, J. Yoda and H. Matsumoto: "A portable I_2 -stabilized Nd:YAG laser for international comparisons," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **50** (2001) 486-489.
- 9) D. W. Allan: "Statistics of atomic frequency standards," *Proc. IEEE*, **54** (1966) 221-230.
- 10) F.-L. Hong, Y. Zhang, J. Ishikawa, Y. Bitou, A. Onae, J. Yoda, H. Matsumoto and K. Nakagawa: "Frequency reproducibility of I_2 -stabilized Nd:YAG lasers," *Proc. SPIE*, **4269** (2001) 143-154.
- 11) Y. Zhang, J. Ishikawa and F.-L. Hong: "Accurate frequency atlas of molecular iodine near 532 nm measured by an optical frequency comb generator," *Opt. Commun.*, **200** (2001) 209-215.
- 12) F.-L. Hong and J. Ishikawa: "Hyperfine structure of the R(122)35-0 and P(84)33-0 transitions of $^{127}I_2$ near 532 nm," *Opt. Commun.*, **183** (2000) 101-108.
- 13) F.-L. Hong, J. Ishikawa, A. Onae and H. Matsumoto: "Rotation dependence of the excited-state electric quadrupole hyperfine interaction by high-resolution laser spectroscopy of $^{127}I_2$," *J. Opt. Soc. Am. B*, **18** (2001) 1416-1422.
- 14) F.-L. Hong, Y. Zhang, J. Ishikawa, A. Onae and H. Matsumoto: "Vibration dependence of the tensor spin-spin and scalar spin-spin hyperfine interactions by precision measurement of hyperfine structures of $^{127}I_2$ near 532 nm," *J. Opt. Soc. Am. B*, **19** (2002) 946-953.
- 15) F.-L. Hong, J. Ye, L.-S. Ma, S. Picard, Ch. J. Bordé and J. L. Hall: "Rotation dependence of electric quadrupole hyperfine interaction in the ground state of molecular iodine by high-resolution laser spectroscopy," *J. Opt. Soc. Am. B*, **18** (2001) 379-387.
- 16) K. Sugiyama, A. Onae, F.-L. Hong, H. Inaba, S. N. Slyusarev, T. Ikegami, J. Ishikawa, K. Minoshima, H. Matsumoto,

- J. C. Knight, W. J. Wadsworth and P. St. J. Russell: "Optical frequency measurement using an ultrafast mode-locked laser at NMIJ/AIST," *Proc. 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology* (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 427-434.
- 17) F.-L. Hong, J. Ishikawa, K. Sugiyama, A. Onae, H. Matsumoto, J. Ye and J. L. Hall: "Comparison of independent optical frequency measurements using a portable I₂-stabilized Nd:YAG laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (2003) in press.
- 18) Y. Bitou, A. Hirai, H. Yoshimori, F.-L. Hong, Y. Zhang, A. Onae and K. Seta: "Gauge block interferometer using three frequency-stabilized lasers," *Proc. SPIE*, **4401** (2001) 288-297.
- 19) K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji and M. Kourogi: "Accurate optical frequency atlas of the 1.5 μm bands of acetylene," *J. Opt. Soc. Am. B*, **13** (1996) 2708-2714.
- 20) A. Onae, K. Okumura, J. Yoda, K. Nakagawa, A. Yamaguchi, M. Kourogi, K. Imai and B. Widiyatomo: "Toward an accurate frequency standard at 1.5 μm based on the acetylene overtone band transition," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (1999) 563-566.
- 21) A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama, F.-L. Hong, K. Minoshima, H. Matsumoto, K. Nakagawa, M. Yoshida and S. Harada: "Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-color mode-locked fiber laser," *Opt. Commun.*, **183** (2000) 181-187.
- 22) A. Onae, K. Okumura, K. Sugiyama, F.-L. Hong, H. Matsumoto, K. Nakagawa, R. Felder and O. Acef: "Optical frequency standard at 1.5 μm based on Doppler-free acetylene absorption," *Proc. 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology* (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 445-452.

(2002年7月27日受理)