2 波長同時共振型の CW 深紫外和周波発生における周波数精密制御

正 員 熊谷 寛*

Fine Frequency Tuning in Sum-Frequency Generation of Continuous-Wave Single-Frequency Deep Ultraviolet Coherent Light with Dual-Wavelength Enhancement

Hiroshi Kumagai*, Member

Novel fine frequency tuning of the deep-ultraviolet single-mode coherent light at 252 nm was investigated by changing the temperature of the β -BaB₂O₄ (BBO) in doubly resonant external cavity for the sum-frequency mixing of 373-nm light and 780-nm light. The temperature-dependant frequency tuning rate is 19.3 MHz/°C, which is fine enough to realize the laser cooling of neutral silicon atoms.

キーワード：和周波発生，周波数同調，シリコン原子，深紫外，単一周波数

Keywords：sum-frequency generation, frequency tuning, silicon atom, deep ultraviolet, single frequency

1. はじめに

シリコン原子のレーザ冷却を実現するためには，レーザ波長を 252.4 nm とし，レーザ線幅を自然幅 29MHz 程度以下にする必要があり，さらには連続波で数 10mW レベルのレーザ出力を必要とする。実用的な光源開発の困難さから，今までシリコン原子のレーザ冷却は実現されてこなかった。筆者らは，シリコン原子のレーザ冷却実現に必要な，実用的な全固体深紫外コヒーレント光源の開発に世界で初めて成功した⁽¹⁾。さらには単一周波数 CW 深紫外コヒーレント光源における 2 波長同時共振型外部共振器の特徴を最大限に利用した，新しい周波数精密制御を実証したので，ここに報告する。

2. 深紫外コヒーレント光源の概要⁽¹⁾⁽²⁾

本研究の方式は，2 段階の外部共振器型波長変換システムから構成されている。まず第 1 段階目において，Nd:YVO₄ 第 2 高調波励起のリング型単一モードチタンサファイヤレーザ光（波長 746 nm）を外部共振器に導入し，共振器内で光強度を増強させ，共振器内の LiB₃O₅(LBO)結晶により第 2 高調波を効率よく発生させる。続いて第 2 段階目において，得られた第 2 高調波の 373 nm 光と別の単一モード CW チタンサファイヤレーザの 780 nm 光を第 2 の外部共振器に導き，373 nm 光の共振を保ちつつ，共振器長を固定し，780 nm 光の周波数を微調整し，安定化することによって両波長を同時

図 1 第 2 段階目の外部共振器の概略図

Fig. 1. Schematic of 2nd stage of external cavity.

に共振させる。この 2 波長同時に共振させることにより各々の光強度を同時に増大させ，共振器内の β -BaB₂O₄(BBO)結晶による和周波混合により 252 nm 光を高効率に発生させる仕組みである。

図 1 は，第 2 段階目の外部共振器の光学配置図である。蝶ネクタイ型で，M1 は単一モード CW チタンサファイヤレーザからの 780nm の入力結合鏡，M2 は第 1 段階目の外部共振器中で得られた第 2 高調波（373nm）の入力結合鏡である。2 つの入力結合鏡はそれぞれの波長で 98% の反射率を持つが，もう一方の波長に対しては 99.8% 以上の反射率を持つ。M4 の出力鏡は 3 重に多層膜コーティングしており，252nm に対しては 84% 透過するが，373nm，780nm の波長に対しては 99.8% 以上の反射率を持つ。

曲率 50mm の凹面鏡を使い，共振器長を第 1 段階目の約半分の，約 300mm に設定した。第 2 段階目の非線形結晶として，10mm 長の 47.4° カット BBO（タイプ I）を用いた。BBO 結晶の両端面で 2 つの入力光に対しての無反射コーティングを施し，特に出力側で 252nm 光に対して，95% の透過が得られるように更にコーティングしている。

* 大阪市立大学大学院工学研究科
〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138
Graduate School of Engineering, Osaka City Univ.,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka 558-8585

図2 373nm 光の周波数安定化

Fig. 2. Frequency stabilization of 373-nm light.

図3 780nm 光周波数の BBO 結晶温度依存性

Fig. 3. Fine tunability of 780-nm light for change in temperature of BBO crystal.

第2段目の外部共振器で、異なる2つの周波数の光を共振させるフィードバック・ループが必要になる。まず M3に取り付けてあるピエゾ素子を使って、373nm 光を共振させるように共振器長を制御した。共振器長を固定した後、単一モード CW チタンサファイヤレーザの発振周波数がちょうど安定化した共振器周波数に一致するようにフィードバックをかけ、373nm 光と 780nm 光との同一共振器での同

時共振を実現した。373nm 光が 630mW、780nm 光が 1.2W のとき、154mW の 252nm を取り出すことができた。和周波の変換効率は 8.4%と見積もられる。全共振器内損失は、780nm 光に対して 0.7%、373nm 光に対して 1.8%であった。これらの損失を考慮すると、共振器のフィネスは、780nm 光に対して 232、373nm 光に対して 165 と計算できる。自由スペクトル域とフィネスとの関係から線幅を求めると、780nm 光に対して 4.3MHz、373nm 光に対して 6.1MHz と見積もることができた。この結果から 252nm 光の線幅は高々 10MHz と見積もられ、シリコン原子のレーザ冷却遷移の自然幅の 29MHz 以内であることがわかる。

3. 深紫外コヒーレント光源の周波数精密制御

開発した単一周波数 CW 深紫外コヒーレント光源において、2重共振器の特徴を活かし、周波数制御を簡便にできる手法を考案した。まず第1段目の 746nm 光の周波数を固定し、その第2高調波である 373nm 光の周波数を一定にした(図2)。次にその 373nm 光が2重共振器で共振するように図1の外部共振器の共振器長を固定した。それから和周波発生用の BBO の温度を上昇させた。このとき共振器は 373nm 光に対して絶えず共振し続けるように、共振器長を自動的に僅かに変化させた。そしてもう一方の入射レーザである 780nm 光もその共振器で同時共振できるように周波数を自動的に変化させた。780nm 光の周波数は図3に示すように同時共振条件を満たす形で自動的に 19.3 MHz/°C で変化した。252nm 光の周波数は周波数固定した 373nm 光と周波数微調した 780nm 光の和周波であるため、結果として 252nm 光の周波数も 19.3 MHz/°C で変化した。

4. まとめ

2波長同時共振型の外部共振器による周波数精密制御により、252nm 光の周波数を 19.3 MHz/°C で微調できることを実証した。同手法は周波数制御を安定的に実現できるため、シリコン原子のレーザ冷却用 CW 光源を用いた同位体シリコン原子の制御にも威力を発揮するものと期待できる。

(平成 19 年 2 月 1 日受付)

文 献

- (1) H. Kumagai : "Development of a continuous-wave, deep-ultraviolet, and single-frequency coherent light source- challenges toward laser cooling of silicon", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 10, pp.1252-1258 (2004)
- (2) H. Kumagai, K. Midorikawa, T. Iwane, and M. Obara : "Efficient sum-frequency generation of continuous-wave single-frequency coherent light at 252 nm with dual wavelength enhancement", Opt. Lett. 28, pp. 1969-1971 (2003)