

シリコン原子レーザー冷却のための連続波深紫外コヒーレント光源の開発

熊谷 寛

Development of a Continuous-Wave Deep-Ultraviolet Coherent Light Source for Laser Cooling of Silicon

Hiroshi KUMAGAI

We developed a deep-ultraviolet (UV) single-mode coherent light source through two-stage highly efficient frequency conversions using external cavities. In the first stage, the second-harmonic power of 500 mW was obtained by frequency doubling of a 746 nm Ti:sapphire laser with a conversion efficiency of 40%. In the second stage, 50 mW power at around 252 nm was obtained by doubly resonant sum-frequency mixing of 373 nm light from the first-stage conversion and 780 nm light from a diode laser. The output performances of this deep-UV light source are sufficient for realizing the laser cooling of neutral silicon atoms.

Key words: deep-ultraviolet, continuous wave, sum-frequency mixing, laser cooling, silicon

ボーズ・アインシュタイン凝縮の実証¹⁾に始まって、種々の原子波レーザーの開発^{2,3)}、非線形原子波光学⁴⁾、原子リソグラフィ⁵⁾、原子ホログラフィー⁶⁾など、レーザー冷却応用分野の最近の進展はめざましい。この分野では主としてアルカリ金属原子が主役を担ってきたが、アルカリ金属原子の代わりにシリコンなど半導体原子を使って実現できれば、工学的観点からも新たな展開が期待できる。

シリコン原子の冷却波長は 252.4 nm であり、レーザーの線幅を自然幅 29 MHz 程度以下にする必要があり、さらに連続波で数十 mW レベルの出力を必要とする。このレーザー冷却の必要条件を満たす光源の開発が、波長 523 nm の色素レーザーと波長 488 nm のアルゴンイオンレーザーによる和周波発生⁷⁾や、波長 756 nm の単一周波数チタンサファイアレーザーの第三高調波発生⁸⁾のアプローチにより試みられてきた。いずれも先駆的な研究ではあるが、結果として高効率な和周波発生に至っていない。実用的な光源開発の困難さから、シリコン原子のレーザー冷却は今まで実現されてこなかった。

筆者らは、シリコン原子のレーザー冷却実現に必要な、実用的な全固体深紫外コヒーレント光源 (図 1) の開発に世界で初めて成功した⁹⁾。新しい光源は、効率よく和周波を発生できる点が大きな特徴で、従来方式のシリコン原子レ

ーザー冷却用深紫外光源よりも約 500 万倍 (50 mW) 高い出力を取り出すことができた。

本稿では、同光源の概要、出力性能を紹介する。

1. シリコン原子レーザー冷却用コヒーレント深紫外光源の概要

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 第二高調波励起のリング型単一モードチタンサファイアレーザー光 (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) 結晶により第二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、得られた第二高調波の 373 nm 光と単一モード半導体レーザーの 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二重に共振させる。この 2 波長同時に共振させることによりおのおのの光強度を同時に増大させ¹⁰⁾、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。

2. 第 1 段階目の第二高調波発生の詳細

第 1 段階目において、波長 746 nm の単一モード CW チタンサファイアレーザーの出力は、蝶ネクタイ型の外部共振

理化学研究所レーザー物理工学研究室 (〒351-0198 和光市広沢 2-1) E-mail: hkumagai@postman.riken.go.jp

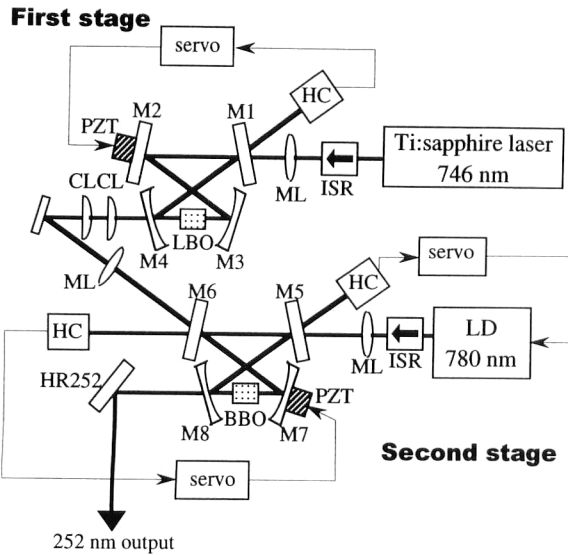


図1 深紫外コヒーレント光源の概略図⁹⁾。ISR：アイソレータ，ML：モード整合用レンズ，PZT：ピエゾ素子，HR252：252 nm用の高反射鏡，HC：HänschとCouillaudの提案¹¹⁾による偏光を利用したエラーシグナル発生器，M2，M3：746 nm用の高反射鏡，M7：373 nm，780 nm用の高反射鏡。

器にモード整合用レンズを通して導入される。同外部共振器は、偏光を利用した Hänsch-Couillaud 法¹¹⁾により M2 の全反射鏡に付いているピエゾ素子にフィードバックをかけながら内部の光強度を増強している。非線形光学結晶として LBO (タイプ I) を用いた¹²⁾。結晶の切り出し角度は、 $\theta=90^\circ$ 、 $\phi=37.5^\circ$ 、結晶長は 15 mm で、入力側に 746 nm の、出力側に 746 nm と 373 nm の無反射コーティングを施した。外部共振器の 1 周の損失が 2% と見積もれるため、M1 の入力結合鏡の反射率を 98% とし、光学的なインピーダンス整合を図った。

出力鏡 M4 は二重に多層膜コーティングが施されていて、373 nm 光の 95% を透過し、746 nm 光の 99.9% を反射するように設計した。M3 および M4 の焦点距離は 100 mm で、外部共振器の 1 周の長さは 650 mm とした。反射鏡と結晶の配置は、共振器のモードと入力ビームのモードが一致し、結晶中央でのビームウエストサイズが Boyd-Kleinman 集光パラメータを最大にするように計算された最適値 $35 \mu\text{m}$ になるように決定された¹³⁾。最適条件では、単一光路の変換効率が $9.1 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1}$ になる。外部共振器から出た第二高調波は非線形結晶のウォークオフにより生じる縦横異なる発散角を補償するために、2 枚のレンズにより、横方向、縦方向を独立に平行化した。

図 2 は、測定された第二高調波出力の入力基本波依存性である。最大 500 mW の第二高調波出力を得た。これは、LBO 結晶や出力鏡の透過率を考慮すると、結晶直後では

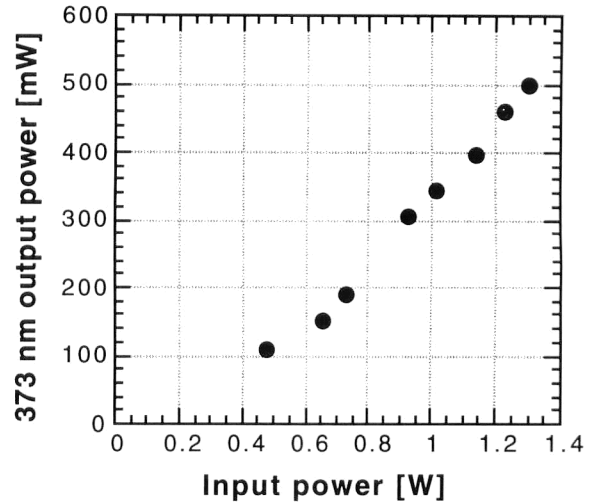


図2 第二高調波発生における入出力特性⁹⁾。746 nm 入力光に対する 373 nm 光出力特性。

520 mW 以上の出力が出ていたことになる。入力基本波から第二高調波出力への変換効率、実に 40% 以上である。

測定されたエンハンスメント・ファクターは 72 で、単一光路の変換効率が最適値の 65% の $5.9 \times 10^{-5} \text{ W}^{-1}$ になっていることを示している。この原因として、ミスアライメントによるビームウエストの食い違いなどがあげられる。不完全なコーティングによる損失を含む、1 周の損失が、1% と見積もられる¹⁴⁾。入力結合鏡の反射率を最適化することで、光学的なインピーダンス整合の向上ができる。

3. 第 2 段目の和周波発生の詳細

図 1 の下部は、第 2 段目の外部共振器である。同じく蝶ネクタイ型で、M5 はテーパ型増幅器半導体レーザーからの 780 nm の入力結合鏡、M6 は第 1 段階目の外部共振器中で得られた第二高調波 (373 nm) 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% の反射率をもつが、もう一方の波長に対しては 99.8% 以上の反射率をもつ。M8 の出力鏡は三重に多層膜コーティングしてあり、252 nm に対しては 84% 透過するが、373 nm、780 nm の波長に対しては 99.8% 以上の反射率をもつ。

曲率 50 mm の凹面鏡を使い、共振器長を第 1 段目の約半分の約 300 mm に設定した。第 2 段目での非線形結晶として、10 mm 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 252 nm 光に対して、95% の透過が得られるようにさらにコーティングしている。

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。まず最初に、M7 に取り付けられているピエゾ素子を使って、373 nm 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

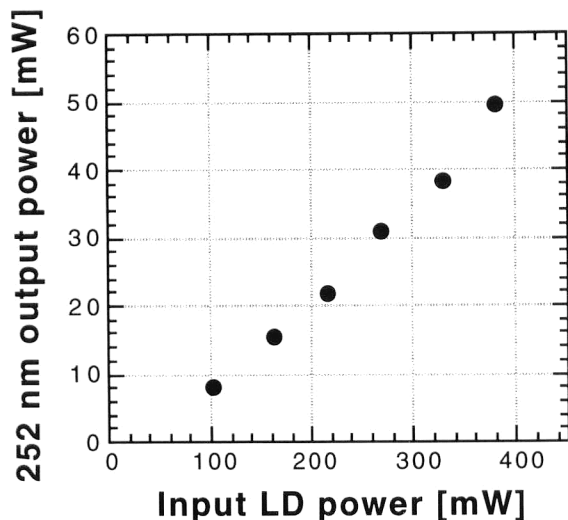


図3 252 nm 和周波発生における入出力特性⁹⁾. 373 nm 光入力は 480 mW (一定). 780 nm 入力光に対する 252 nm 光出力特性.

した後、半導体レーザー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、373 nm 光と 780 nm 光との同一共振器での同時共振を実現した。

図3に、780 nm 光の入力パワーを横軸にとり、共振器から取り出した 252 nm の光出力の測定値を示す。373 nm 光が 480 mW、780 nm 光が 380 mW のとき、50 mW の 252 nm を共振器から取り出すことができた。出力鏡や BBO の透過率から発生した 252 nm は 60 mW を超えていて、和周波の変換効率は 7% と見積もられる。エンハンスメント・ファクターは、780 nm 光に対して 92、373 nm 光に対して 34、全共振器内損失は、780 nm 光に対して 0.6%、373 nm 光に対して 2.5% 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、780 nm 光に対して 241、373 nm 光に対して 141 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、780 nm 光に対して 4.1 MHz、373 nm 光に対して 7.1 MHz と見積もることができた。この結果から、252 nm 光の線幅はたかだか 12 MHz と見積もられ、シリコン原子のレーザー冷却遷移の自然幅の 29 MHz 以内であることがわかる。

また、半導体レーザーの波長を 767 nm から 785 nm に変化させ、最適な結晶の角度に調節すると、波長 251 nm から波長 253 nm までの波長範囲を、ほぼ 50 mW の出力を低下させることなく同調することができた。同調範囲が広い

ことは、シリコンの同位体制御を可能にする。

新しい実用光源の開発により、シリコン原子のレーザー冷却を利用した新しい研究がスタートする。冷却シリコン原子は波動性が顕著になるため、シリコン原子波の原子波操作技術分野が拓かれることになる。これにより、シリコン原子の原子リソグラフィや原子ホログラフィーによる微細加工、微小構造体作製技術への応用が期待できる。さらには、シリコン原子のアイソトープデザイン技術、高純度な結晶成長技術、核スピン制御技術へのブレイクスルーが期待できる。

最後に本研究の推進にご理解とご協力をいただいた理化学研究所レーザー物理工学研究室緑川克美主任研究員、慶應義塾大学理工学部小原實教授、小原研究室の浅川雄一君、藤井剛君にこの場をかりて謝意を表す。

文 献

- 1) M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman and E. A. Cornell: *Science*, **269** (1995) 198-201.
- 2) M.-O. Mewes, M. R. Andrews, D. M. Kurn, D. S. Durfee, C. G. Townsend and W. Ketterle: *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 582-585.
- 3) E. W. Hagley, L. Deng, M. Kozuma, J. Wen, K. Helmerson, S. L. Rolston and W. D. Phillips: *Science*, **283** (1999) 1706-1709.
- 4) L. Deng, E. Hagley, J. Wen, M. Trippenbach, Y. Band, P. Julienne, J. Simsarian, K. Helmerson, S. Rolston and W. D. Phillips: *Nature*, **398** (1999) 218-220.
- 5) J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm and R. J. Celotta: *Science*, **262** (1993) 877-880.
- 6) J. Fujita, M. Morinaga, T. Kishimoto, M. Yasuda, S. Matsui and F. Shimizu: *Nature*, **380** (1996) 691-694.
- 7) 向井哲哉, 清水富士夫: 第 53 回日本物理学会秋の分科会, (1992) 30p-K-7.
- 8) S. Sayama and M. Ohtsu: *Opt. Commun.*, **137** (1997) 295-298.
- 9) T. Fujii, H. Kumagai, K. Midorikawa and M. Obara: *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1457-1459.
- 10) Y. Kaneda and S. Kubota: *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2204-2206.
- 11) T. W. Hänsch and B. Couillaud: *Opt. Commun.*, **35** (1980) 441-444.
- 12) C. S. Adams and A. I. Ferguson: *Opt. Commun.*, **90** (1992) 89-94.
- 13) G. D. Boyd and D. A. Kleinman: *J. Appl. Phys.*, **39** (1968) 3597-3639.
- 14) Y. Kaneda and S. Kubota: *Appl. Opt.*, **36** (1998) 7766-7775.

(2001 年 8 月 16 日受理)