単一周波数深紫外コヒーレント光源の開発

Development of a single-frequency deep-ultraviolet coherent light source

熊谷 寛 (大阪市立大学大学院電子情報系専攻)

Hiroshi Kumagai (Graduate School of Engineering, Osaka City University)

1. はじめに

ボース・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進展は目覚ましい。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 29MHz 程度以下にする必要があり、さらに連続波で数 10mW 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 523nm の色素レーザーと波長 488nm のアルゴンイオンレーザーによる和周波発生や、波長 756nm の単一周波数チタンサファイヤレーザーの第 3 高調波発生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) の開発に初めて成功した⁽⁷⁻¹⁰⁾。さらに最近では、シリコン原子波操作⁽¹¹⁾に必要な、単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発も行なった。

2. 単一周波数 CW 深紫外コヒーレント光源の開発⁽⁷⁻¹⁰⁾

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 2 高調波を効率よく発生させる⁽¹²⁾。続いて第 2 段階において、得られた第 2 高調波の 373 nm 光ともう一台のリング型単一モードチタンサファイヤレーザーの 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。この二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。結果として、154mW の 252 nm 光を得た^(9,13)。

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。具体的には、373nm 光源の周波数は固定し、その単一周波数

により、図 1 の第 2 段階目の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 の温度を上昇させる。そのとき、共振器は 373nm 光が共振し続けるように、共振器長が僅かに変化させることになる。そしてもう一方の入射レーザーである 780nm 光は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ることになる。結果的に 780nm 光の周波数が変化することにより、図 2 に示すように、252nm 光の周波数が 2MHz/0.1°C で微調できることを実証した⁽¹⁴⁾。

図1 深紫外コヒーレント光源の概略図⁽¹⁴⁾

図2 252nm コヒーレント光の周波数精密制御⁽¹⁴⁾

3. 単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発⁽¹⁵⁾

共振器内にエタロン、プリズムを挿入した狭線幅ナノ秒チタンサファイアレーザーの線幅は数GHzあり、同位体分離性能を引き出すには不十分である⁽¹⁶⁾。講演者らは、単一周波数チタンサファイアレーザーを用い注入同期を行うことで、単一周波数化を目指した。本講演では、シリコンの光ガルバノ分光結果^(17,18)と対比することで、注入同期効果を明らかにする。

注入同期により単一周波数化された深紫外光を用いて、シリコン原子の光ガルバノ分光を行った結果を図4に示す。横軸は注入同期レーザーの周波数の3倍値である。スレーブレーザーの共振器長間隔で注入同期の効果がみられシグナルが大きく変化していることがわかる。また、その包絡線よりシリコン原子の吸収スペクトルを観測できた。このスペクトル幅はレーザー線幅の影響を無視でき、シリコン原子のドップラー幅そのものに対応している。注入同期後の線幅はシグナル変化の半値幅から求めることができ、フーリエ変換限界近くの0.12GHzまで狭線幅化され、単一周波数化されていることがわかる⁽¹⁵⁾。

図3 単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源の概略図⁽¹⁵⁾

参考文献

- (1) M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman and E. A. Cornell, Science 269, 198 (1995).
- (2) M.-O. Mews, M. R. Andrews, D. M. Kum, D. S. Durfee, C. G. Townsend and W. Ketterle, Phys. Rev. Lett. 78, 582 (1997).
- (3) E. W. Hagley, L. Deng, M. Kozuma, J. Wen, K. Helmerson, S. L. Rolston, and W. D. Phillips, Science 283, 1706 (1999).
- (4) L. Deng, E. Hagley, J. Wen, M. Trippenbach, Y. Band, P. J. Julien, J. Simsarian, K. Helmerson, S. Rolston and W. Phillips, Nature 398, 218 (1999).

図4 シリコン原子の光ガルバノ分光による単一周波数化の評価⁽¹⁵⁾

- (5) J.J. McClelland, R.E. Scholten, E.C. Palm and R.J. Celotta, Science 262, 877 (1993).
- (6) J. Fujita, M. Morinaga, T. Kishimoto, M. Yasuda, S. Matsui and F. Shimizu, Nature 380, 691 (1996).
- (7) T. Fujii, H. Kumagai, K. Midorikawa and M. Obara, Opt. Lett. 25, 1457 (2000).
- (8) H. Kumagai, IEEE Circuits & Devices 20, 32 (2004).
- (9) H. Kumagai, K. Midorikawa, T. Iwane and M. Obara: Opt. Lett. 28, 1969 (2003).
- (10) H. Kumagai, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 10, 1252 (2004).
- (11) S. Shimizu, T. Iwane, A. Kunieda, H. Kumagai, K. Midorikawa, and M. Obara, Science and Technology of Advanced Materials 5, 581 (2004).
- (12) H. Kumagai, Y. Asakawa, T. Iwane, K. Midorikawa, and M. Obara, Appl. Opt. 42, 1036 (2003).
- (13) T. Iwane, H. Kumagai, K. Midorikawa, and M. Obara, Science and Technology of Advanced Materials 5, 589 (2004).
- (14) H. Kumagai, Opt. Lett. (2006) (in press).
- (15) Y. Shiomi, K. Kyutoku, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Opt. Lett. 31, 3037 (2006).
- (16) 熊谷 寛, 光技術コンタクト 43, 113 (2005).
- (17) Y. Ueda, H. Kumagai, T. Meguro, and K. Midorikawa, and M. Obara, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section B 215, 419 (2004).
- (18) 國枝 晶, 熊谷 寛, 岩根 哲晃, 清水 悟, 緑川 克美, 小原 寛, レーザー研究 32, 469 (2004).