

2000年3月28日
独立行政法人 理化学研究所

シリコン原子のレーザー冷却の実現に必要な新しい コヒーレント深紫外光源の開発に成功

理化学研究所（小林俊一理事長）は、シリコン原子のレーザー冷却に必要であり、実用的でコヒーレントな深紫外光源の開発に世界で初めて成功しました。新しい光源は、当研究所レーザー物理工学研究室の熊谷寛前任研究者らの実験チームが開発。効率よく和周波を発生できる点が大きな特徴で、従来方式の深紫外レーザー光源よりも約500万倍（50mW）高い出力を取り出すことができます。

新光源の開発によって、これまで困難とされていたシリコン原子の運動を抑えるレーザー冷却に必要な技術を確認。冷却することで、原子が合わせ持っている波動としての性質が優位となり、原子波として光のように自由に操ることが可能となります。このことは、シリコン原子波を制御・利用する新しい応用の幕を開き、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されます。さらに、シリコン原子のアイソトープデザイン（核スピン制御技術）や高純度な結晶成長技術へのブレークスルーにつながります。

なお、本研究は、3月28日から31日まで、青山学院大学（東京都渋谷区）で開かれる「応用物理学関係連合講演会（応用物理学会）」で発表されます。

1. 背景

ボース・アインシュタイン凝縮の実証に始まって、種々の原子波レーザーの開発、非線形原子波光学の開拓、原子リソグラフィ、原子ホログラフィーなど、レーザー冷却応用分野の最近の進展は大変目覚ましいものがあります。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ました。もし、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でき、応用は計り知れません。しかしながらシリコン原子の冷却波長は252.4nm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ます。さらに連続波で数十mWレベルの出力を必要とするため、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全く実現されておられません。

シリコン原子のレーザー冷却を目指し、実用的な光源の開発が進められています。過去の開発例として、周波数可変の色素レーザーと周波数固定のアルゴンイオンレーザーによる和周波発生や、一台の単一周波数チタンサファイヤレーザーの基本波と第二高調波とによる和周波発生の研究が行われてきました。過去二例とも、高効率な和周波発生に至っていません。特に後者は全固体型ですが、外部共振器を利用していないため、わずか10nWと極めて低い出力しか発生できず、実用にはほど遠いレベルでした。

2. 研究成果

今回、新たに開発した方式は、紫外単一縦モード光の共振を保ちつつ、共振器長を固定し、別の赤色の単一縦モードレーザー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ます。この方式は、二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ます。まず第一段階において、半導体レーザー励起高出力連続波(CW)グリーン固体レーザーで光励起して得たリング型単一モードチタンサファイヤレーザー光（波長 746nm）を外部共振器に導き、共振器内で光強度を増大させ、共振器内のリチウムボレート結晶により第二高調波を発生させます。続いて第二段階において、得られた第二高調波 373nm 光と単一モード半導体レーザー光 780nm を第二の外部共振器に導き、二波長同時共振させることにより、各々の光強度を同時に増大させます。共振器内のバリウムボレート結晶による和周波混合により 252.4nm 光を高効率に発生させる仕組みです。

第一段階において 1.3W の入力レーザーパワーに対して、500mW の第二高調波発生に成功しました。このとき変換効率は 40% で、同波長で同程度の入力パワーに対して世界で最高の値になります。第二段階では、373nm 入力光 480mW、780nm 光 380mW により、共振器内では 60mW の 252nm 光の発生に、また共振器外へは 50mW の 252nm 光の取り出しに、それぞれ世界で初めて成功しています。同光源は波長 251nm から 253nm までの波長範囲を、出力を低下させることなく同調することが可能です。同調範囲が広いことは、容易にシリコンのアイソトープを分離・制御することにつながります。

3. 研究成果の意義

現在までレーザー冷却が実現されている原子は、アルカリ金属原子(Li、Na、K、Rb、Cs)、アルカリ土類金属原子(Mg、Ca、Sr)、希ガス(準安定状態)原子(He、Ne、Ar、Kr)などがあります。シリコンに関しましては、レーザー冷却できる光源が開発されておらず、・連続波であること、・252nm 付近で波長可変であること、・単一縦・横モードであること、・出力数 10mW 以上であること、の必要条件を満足する実用光源の開発が待ち望まれていました。直接的に半導体産業と結びつく半導体原子のレーザー冷却技術は、シリコン原子の原子波制御・利用の新しい研究・技術分野を開拓し、高純度な結晶成長技術や核スピン制御技術に関連するシリコンテクノロジー技術分野に新たな展開と、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の誕生につながります。

(問い合わせ先)

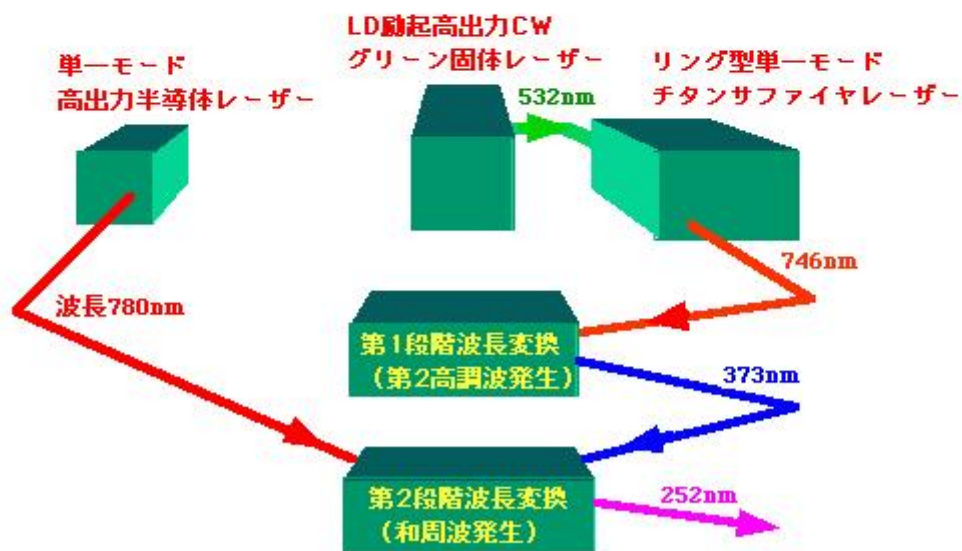
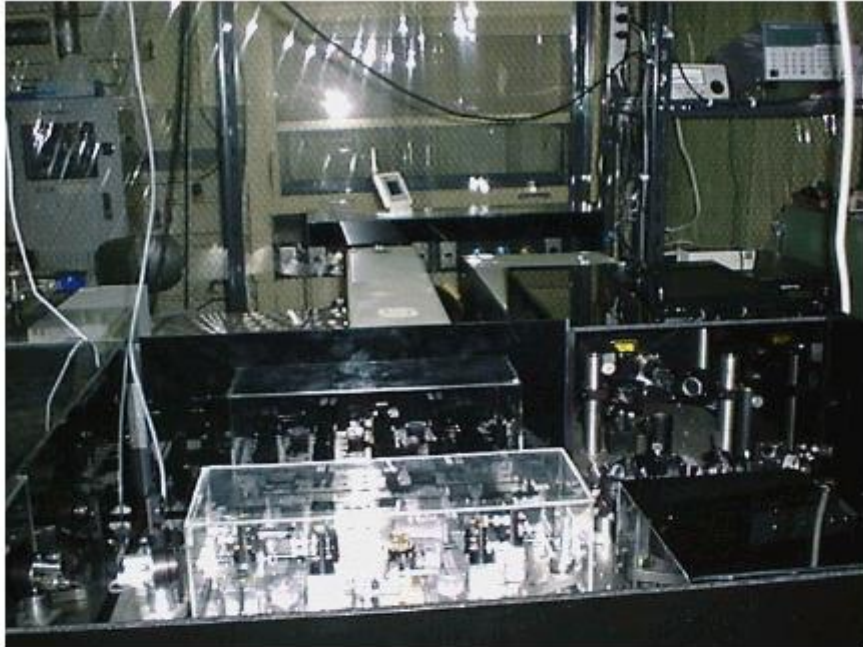
独立行政法人理化学研究所 レーザー物理工学研究室
前任研究員 熊谷 寛
Tel : 048-462-1111 (内線 4476) / Fax : 048-462-4682

(報道担当)

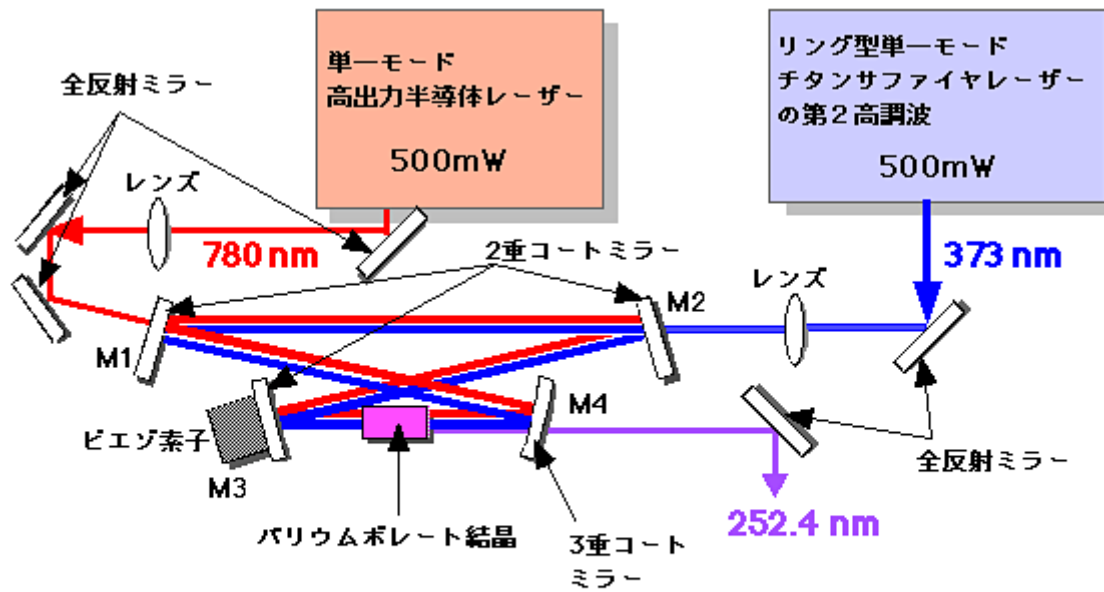
独立行政法人理化学研究所 広報室 嶋田 庸嗣

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@postman.riken.go.jp



新しいコヒーレント深紫外光源の装置写真(上)と構成概略図(下)



高効率な和周波発生によるコヒーレント深紫外光(252.4nm)の取り出し

シリコン原子のレーザー冷却とその応用

深紫外コヒーレント光源

- ・シリコンの共鳴線 (252.4nm)
- ・自然幅(29MHz)よりも狭い線幅 (単一縦モード)
- ・広帯域波長可変(251nm-253nm)
- ・パルス幅 (連続波)
- ・光パワー (50mW)
- ・単一横モード

シリコン原子

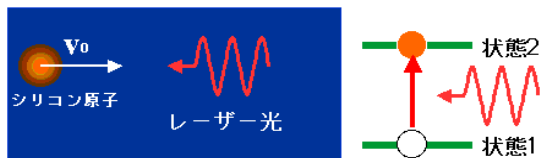
融点温度で一方向に飛び出したシリコン原子の速度: 約700m/s

約12500回の光吸収・放出サイクルにより減速(冷却)でき、約10cmで原子を速度0.25m/sにまで減速できる。温度で約0.2mKになる。

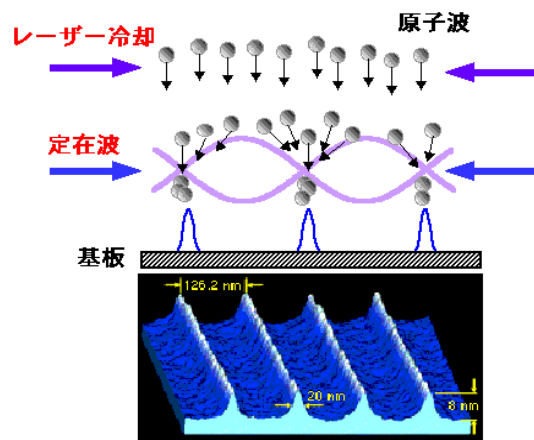
<シリコン原子のレーザー冷却の応用分野>

- 1) シリコン原子の原子波制御
原子波の波長を約20nmから60nmの範囲で制御可能
- 2) シリコン原子波の原子波束制御
- 3) シリコン原子の運動方向制御
- 4) アイソトープデザインと核スピン制御
- 5) 高純度結晶成長技術
- 6) 原子リソグラフィー
- 7) 原子ホログラフィー

・等速運動しているシリコン原子の光吸収



等速運動しているシリコン原子の光放出による減速



原子リソグラフィー