

最近の技術から

極紫外レーザー

小原 實

慶応義塾大学理工学部電気工学科 〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1

1. ま え が き

最近の 266 nm 以下 109 nm 以上の波長のレーザーの研究の最先端を紹介する。屈折光学系が使用できる最短波長に限定している。

2. 波長変換によるコヒーレント紫外光の発生

2.1 連続発振 Ar レーザーの第二高調波発生

波長 250 nm 以下の連続発振ガスレーザーとしては、Xe イオンレーザー (232 nm), Kr イオンレーザー (242 ~ 266 nm) があるが、高出力化には、大電流放電励起、高品質プリュースタ窓、高品質電極などの技術が必要であり、出力も現在 2 W 程度である。そこで、連続発振可視レーザーの波長変換によって紫外光を得ることができる。514 nm の高出力 Ar イオンレーザーの 2 倍波の 257 nm への変換が考えられる¹⁾。位相整合条件の温度依存性が小さく、光損傷しきい値が高い BBO (β -barium borate) を用いると、長さ 6.5 mm の結晶で変換効率係数は 10^{-4}W^{-1} 程度と非常に小さいので高効率変換には、工夫が必要である¹⁾。高い Q 値の外部共振器を用いてレーザー強度を増大し、変換効率を向上する方法では、430 mW の基本波入力で、230 mW の SHG 出力が得られており、変換効率は 53% である²⁾。Ar レーザーの共振器内に BBO を設置し、円筒レンズによる楕円集光により、1.2 W の 257 nm 出力を得ている。この出力は基本波出力の 40% を超える¹⁾。改良した同様のスキームで、10 W の基本波出力の Ar レーザーで SHG 出力として 6 W が得られている³⁾。この方法で SHG 波のビーム品質の向上および BBO の光損傷や劣化を低減することができる。

2.2 銅蒸気レーザーの第二高調波発生

銅蒸気レーザーは 510.6 nm に強い発振線を持つ、高繰返し金属蒸気パルスレーザー (CVL) である。スペクトル幅は狭く (約 5 GHz)、繰返し周波数はエキシマーレーザーよりも高いので、SHG の変換効率が高ければ、リ

ソグラフィ用光源の可能性が出てくる。繰返し周波数 4 kHz で 2.5 W の CVL から、平均出力 230 mW、255.3 nm の紫外光が BBO を用いて得られている。このときの変換効率は 9% で、単一光路集光変換である⁴⁾。CVL のビーム広がり角の低減と光損傷のない高効率変換が課題であろう。

2.3 Nd:YAG レーザーの第四高調波発生

Nd:YAG レーザーを基本波とすると、2段階の波長変換 (SHG) で、266 nm の紫外コヒーレント光を発生できる。ソニーの久保田⁵⁾は、808 nm、28 W の LD で Nd:YAG レーザーを励起し、8 W の出力を発生し、この波長を共振器内 KTP (チタン酸リン酸カリウム) で第二高調波 (532 nm、2.7 W) に変換している。2段目は外部共振器内の BBO で変換し、266 nm、1 W の紫外光を発生している。このコヒーレント紫外光源は、全固体素子レーザー (holosteric laser) であるので、ガスレーザーに比較して、コンパクトで、ランニングコストも低減できよう。

東芝の後藤らは、アークランプ光励起 Q-スイッチ Nd:YAG レーザーの基本波を共振器内 LBO で SHG 波に変換し、さらに、単一光路集光による BBO で SHG 波を発生し、266 nm 光を得ている⁶⁾。長さ 5 mm の BBO を Type-I の位相整合で用い、平均パワー 10 W (繰返

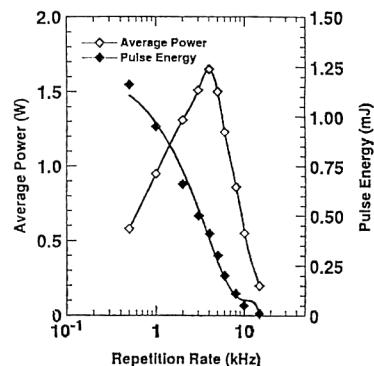


図 1 266 nm の出力特性⁶⁾ (焦点距離 200 mm のレンズで集光)

し周波数 5 kHz) を焦点距離 100 mm のレンズで集光し、266 nm 光の平均出力 2 W を得ている。266 nm のビームのプロファイルは楕円形で、短焦点ほど細長くなる。図 1 に、焦点距離 200 mm のレンズ使用の時のパルス繰返し周波数に対する 266 nm 変換特性を示す⁶⁾。

3. エキシマーレーザー

3.1 KrF レーザー

デザインルールの微細化につれて、KrF ステッパーでも NA を大きくする必要がある。一般に、NA 0.45 を実現するには、レーザーのスペクトル幅は 2 pm, NA 0.55 では 1.5 pm, NA 0.6 では 0.8 pm が必要である。最新の KrF ステッパーのスペクトル幅は 2 pm 程度であり、先端の i 線ステッパーに比較してまだ低い。そこで、KrF レーザー利得断面をプリズムで空間的に分割する方式の自己増幅形狭帯域共振器の採用により、狭帯域化素子の劣化を抑えて高出力が得られる。この結果、狭帯域化素子として損傷しきい値が比較的低いエタロンを用いることができ、受動的波長ドリフトの少ない狭帯域スペクトルのビームが得られている。東芝では、この方式でレーザー出力 8 W, 600 Hz で、スペクトル幅 1 pm 以下で安定性 ± 0.25 pm 以下を得ている⁷⁾。ガス寿命は 4×10^7 ショットである。

3.2 ArF レーザー

193 nm の ArF レーザーは KrF に比較して、ガス寿命が短いことが問題であった。最近、日本電気ではガス純化器を付け、CF₄ の濃度を 15 ppm 以下に抑え、銅の放電電極の使用により、40 W 級の ArF レーザー (400 Hz) で、 9.5×10^8 ショットのガス寿命を達成している。

3.3 F₂ レーザー

現在のところ、このレーザーは放電励起できる最短波長 157 nm で MW 以上の出力の得られる唯一のエキシマーレーザーである^{8,9)}。最近では、100~200 mJ/pulse の出力が得られるようになってきた。スペクトル幅の測定によれば、0.01~0.05 Å (中心波長 1576 Å) と極めて狭く、通常のエキシマーレーザーに必要な狭帯域化素子なしで 0.1 μm ルールのリソグラフィで色収差を避けることができる特徴を有する¹⁰⁾。市販装置としても 3 W (60 mJ, 50 Hz) の出力でガス寿命が 5×10^5 ショットの F₂ レーザーがある。解決すべき問題点は、ガスの長寿命化とビーム広がり角の低減である。

4. Xe Auger レーザー

このレーザーは軟 X 線励起により、Xe の内殻 4d 電

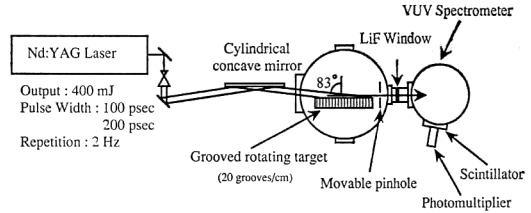


図 2 Xe オージェレーザー装置¹²⁾

子を選択的に除去し、Auger 崩壊により、XeIII の ¹S₀ ~ ¹P₁ 間に反転分布を形成し 108.9 nm で発振する¹¹⁾。図 2 に Xe Auger レーザーの実験装置図を示す。現在、Nd:YAG レーザー生成プラズマからの軟 X 線励起で 1 μJ 以上の出力が理化学研究所とライス大学で得られている。この波長が、屈折光学系が使える最短波長である。

5. む す び

実用に供せるような出力特性を備える極紫外レーザーの最近の研究を概説した。真空紫外波長域で実用的な非線形光学結晶および光学素子の開発、および直接励起真真空紫外レーザーのさらなる開発が期待される。

文 献

- 1) Y. Taira: "High-power continuous-wave ultraviolet generation by frequency doubling of an argon laser," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) L682.
- 2) S. Owa, Y. Taira and S. S. Kano: "Efficient second-harmonic generation using an external resonant cavity for cw ultraviolet radiation," CLEO '93 (1993) p. 636.
- 3) Y. Taira: "Continuous 6-watt coherent deep UV generation using a resonant frequency doubling technique," CLEO '93 (invited paper) (1993) p. 634.
- 4) 黒田和男, 尾松孝茂: "ホウ酸バリウムによる銅蒸気レーザー光の第二高調波発生", 光学, **19** (1990) 234.
- 5) L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota: "Longitudinally diode-pumped continuous-wave 3.5-W green laser," Opt. Lett., **19** (1993) 189.
- 6) 後藤訓頭, 伊藤 弘: "YAG レーザー第 4 高調波の高出力化と加工への応用", レーザー研究, **21** (1993) 885.
- 7) 日経マイクロデバイス, 12月号 (1993) 107.
- 8) M. Kakehata, T. Uematsu, F. Kannari and M. Obara: "Efficiency characterization of vacuum ultraviolet molecular fluorine laser excited by an intense electric discharge," IEEE J. Quantum Electron., **27** (1991) 2456.
- 9) 神成文彦, 欠端雅之, 小原 實: "157 nm F₂ レーザー", レーザー研究, **19** (1991) 986.
- 10) P. C. Hill, P. R. Herman and R. Sia: "Spectral width of a F₂ laser," J. Appl. Phys., **73** (1933) 5274.
- 11) M. H. Sher, S. J. Benerofe, J. F. Young and S. E. Harris: "2-Hz 109-nm mirrorless laser," J. Opt. Soc. Am., **B8** (1991) 114.
- 12) 小河原成哲, 窪寺昌一, 緑川克美, 小原 實, 田代英夫, 豊田浩一: "光励起 109nm Xe オージェレーザー (II)", 第 54 回応用物理学学会学術講演会 (1993).

(1994年6月10日受理)