

最近の技術から

CW 紫外コヒーレント光の高効率発生

平 洋 一

日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所 〒242 大和市下鶴間 1623-14

1. まえがき

連続コヒーレント紫外光を発生するレーザーとしては、ヘリウムカドミウムレーザーや、希ガスイオンレーザーがあり、このうち波長 300 nm 以下のいわゆる深紫外域での発振として、波長 231 nm で連続 2 W のキセノンイオンレーザーの報告¹⁾もあるが、市販されているものとしてはアルゴンイオンレーザーの 275 nm が最も短波長である。いずれにしても、イオンレーザーの紫外域での発振は、多価イオンの遷移であるので、可視域の発振にくらべ大電流を流す必要があり、装置の寿命も短くなる傾向がある。

紫外光を得るために、直接のレーザー発振ではなく、非線形光学効果を用いた波長変換によることもできる。たとえば、500 nm 付近の緑色光の第二高調波発生(SHG)を行えば 250 nm 付近の深紫外光に変換することができる。そこでこの波長変換を効率よく行わせることができれば、直接発振に代わる紫外レーザーとして利用できる。ダイオード励起固体レーザーをもとにすれば、低消費電力・長寿命の光源が期待できる。そこで、高効率の波長変換によって連続の紫外光を得る方法についてわれわれの研究を中心に紹介する。

2. 波長変換による紫外光発生の高効率化

波長変換にもちいる非線形光学結晶には(1)基本波、二倍波の両方の波長域で、透明であること、(2)非線形光学定数が大きいこと、(3)位相整合可能であることなどが必要である。以前から用いられてきた結晶は、位相整合可能波長域、吸湿性、温度特性、光の吸収による結晶の劣化・波長変換出力の不安定さなどの理由で、一般的な使用が難しかった。しかし最近急速に利用が普及している β -硼酸バリウム結晶(BBO)は、上記の条件に適合し、吸湿性、温度安定性、可視・紫外域での透明度などにおいても優れた材料である²⁾。より短波長まで透明な LBO 結晶は周波発生は可能であるが、位相整合の理由で緑-青色光の SHG には使えない。BBO は紫外での微小

吸収といった解決すべき問題もあるが、SHG によって紫外光を発生するにはもっとも適切な結晶である。SHG における周波数変換の効率係数は結晶の非線形感受率と位相整合の受容角で決まる。90度位相整合の時は受容角が非常に大きく、高い変換効率係数が得られる。しかし90度位相整合が可能な波長は限られ、また BBO は結晶構造上、90度位相整合では実効的な非線形感受率が非常に小さくなるので、実際的には角度位相整合の条件で使うことになる。514 nm の SHG での BBO の SHG の変換係数は 10^{-4} W^{-1} 程度である³⁾。バルク結晶の SHG の最大変換効率は、集光条件を最適に調整すると、波長と非線形光学結晶の種類が決まっているときには、入力パワーのみによって決まり、結晶を長くしても効率が上がるものではない²⁾。したがって効率を上げるには別の工夫が必要となり、入力パワーを上げるか、効率の高い非線形材料を用いるといったことになる。このとき共振器は効率を上げるのに非常に効果的である。たとえば共振器内 SHG 装置で、基本波のレーザー出力 P が外部共振器内で A 倍されているとすると、SHG 出力は効率係数を η として $\eta(PA)^2$ となる。したがって変換効率は $\eta(PA)^2/P = \eta PA^2$ 。一方単一パスの SHG では基本波入力が P のときの効率は ηP であるから、共振器の効果は A^2 倍ということになる。単一パスで入力パワーが A 倍のとき、効率は A 倍になることを考えると、共振器によって、基本波パワーの増大と再利用の相乗効果で高い変換効率を実現しているといえる。上記の η を用いると、 $P=1 \text{ W}$ 、 $A=100$ のとき、100% の変換が可能で 1 W の紫外出力が得られることになる。レーザー共振器内での SHG でも同様の議論ができる。なお共振器内での散乱、吸収等の基本波の光損失があれば、それにしたがって効果が下がる。

3. 連続可視光レーザーの共振器内周波数倍倍

共振器を用いる SHG としてもっとも簡単なのは可視レーザーの共振器内周波数倍倍である。この例としてアルゴンイオンレーザーの共振器内 SHG の報告がある

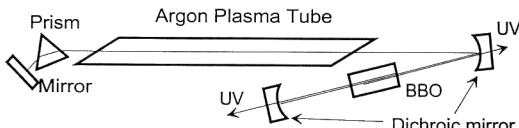


図 1 共振器内通倍アルゴンイオンレーザー
257 nm で両方向に 3 W ずつ計 6 W の
紫外光が得られた。

が⁴⁾、BBO が発表される以前であり、安定な動作はむづかしかった。われわれは端面に AR コートした BBO を用い、緑色での反射率 99.98%、紫外透過率 90% の鏡を用いた 514 nm の大型アルゴンイオンレーザーの共振器内 SHG によって、一方向の紫外出力 3 W を得た。ここで 257 nm の紫外出力は双方向に同じだけ出ており、基本波出力として 10 W を出すことのできるレーザーから 6 W の連続紫外出力を得たことになる⁵⁾。このとき図 1 のような共振器構成であった。他の基本波の波長では、AR コートの損失が増えるため出力は低下したが、244 nm で計 2.4 W が得られた。非線形結晶内の波長変換を効果的に行わせるため、6 mm 長の BBO で 100 μm 程度のビーム径にすること、また增幅媒質であるプラズマ管内のモード体積を十分に大きくする必要があるので、結晶と、波長選択プリズムの 2箇所にビームウェストがある共振器配置をしている。この時の出力は長円あるいは眉月状で平行した縞が付随する。なお光学系が複雑になるが、共振器内に円筒凹面鏡や円筒凸レンズをもちいることで結晶内でのビーム形状を適切な楕円形にするとガウス型ビームが得られ、結晶内の基本波の光強度も下げる⁵⁾。

4. 外部共振器内での周波数遙倍

半導体レーザー励起の Nd : YAG などの固体レーザーは共振器内通倍などの方法で高効率の緑色単色光を発生できる。この光をさらに外部共振器の中で遙倍すれば深紫外光が得られる。われわれの実験でも 250 mW の緑色光を 50% を越える効率で 266 nm の紫外光に変換

できることを示した⁶⁾。外部共振器では、共振器長を入力光の波長に同調させることと、入力光のビームを共振器の基本モードにうまくあわせる必要があるが、リング共振器により、單一方向の紫外光が得られ、連続波長可変の可視光レーザーの遙倍にも利用することができる。

5. むすび

可視光を 50% を越える効率で 1 ワット以上の連続深紫外光に変換することが可能になった。これは超低損失の誘電体多層膜鏡と、低損失・高効率の BBO 結晶を生かした共振器内波長変換によって実現されたものである。このような高出力連続紫外コヒーレント光は、高分解分光等の自然科学への応用のみならず、光リソグラフィーや、物質加工などへの新しい応用が期待されている。

文献

- 1) A. B. Petersen : "A 2-W cw xenon ion laser at 231.5 nm," Tech. Dig., CLEO '92, paper CFC5 (1992); A. B. Petersen : "Ionized gas lasers," *Handbook of Laser Science and Technology, Suppl. 1: Lasers, Vol. 2*, ed. M. J. Weber (CRC Press, Boca Raton, 1991) pp. 335-340.
- 2) D. Eimerl, L. Davis and S. Velsko : "Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate," *J. Appl. Phys.*, **62** (1987) 1968.
- 3) Y. Taira : "High-power cw coherent deep UV generation using elliptically focused resonant frequency doubling," Tech. Dig., CLEO '92, paper CThN 4(1992); Y. Taira : "High-power continuous-wave ultraviolet generation by frequency doubling of an argon laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) L682.
- 4) P. Huber : *Opt. Commun.*, **15** (1975) 196.
- 5) Y. Taira : "Continuous 6-watt coherent deep UV generation using a resonant frequency doubling technique," Tech. Dig., CLEO '93, paper CLF 3 (1993).
- 6) S. Owa, Y. Taira and S. S. Kano : "Efficient second harmonic generation using an external resonant cavity for cw ultraviolet radiation," Tech. Dig., CLEO '93, paper CFL 4 (1993).

(1994 年 8 月 22 日受理)