

紫外レーザーによる光ファイバーの誘導ラマン散乱

水 波 徹

九州工業大学電子工学教室 〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1

1. ま え が き

紫外光は光子エネルギーが大きく、光化学作用が強い。そのため、半導体製造等の分野で需要が高まっている。一方、光ファイバーの製造技術の向上に伴い、紫外吸収がほとんどなくレイリー散乱も小さい低損失の石英ファイバーが開発されている。このため紫外レーザー光を光ファイバーによって伝送することが望まれている。

紫外域では、連続発振のレーザーは波長も効率も限られているので、エキシマーレーザーや窒素レーザー等のパルスレーザーがよく用いられる。この種のレーザーはピークパワーが高いため、光ファイバーに入射すると非線形分極を誘起し、石英の分子振動周波数 (約 440 cm^{-1}) あるいはその整数倍だけ長波長側にシフトした光が発生する。この光がコヒーレントに放出される現象が誘導ラマン散乱であり、インコヒーレントな自然ラマン散乱に比べ、強度が格段に大きい。

従来、紫外域における誘導ラマン散乱は、水素等の高圧気体にレーザー光をレンズで集光することにより行なわれてきた¹⁾。光ファイバーを用いた場合、レンズ方式に比べてはるかに長い距離にわたって光を閉じ込めることができるため、石英のラマン利得係数は水素等に比べて約2桁小さいにもかかわらず、高い効率で誘導ラマン散乱が起きる。

誘導ラマン散乱光の発生は、入射したレーザー光の減衰を伴うので、レーザー光の伝送の立場からは都合が悪く、これを防止する工夫が必要になることもある。その反面、これを利用すれば、気体レーザーでは得られない波長の光を得ることができ、広い波長域をカバーする従来にはないタイプの発振器 (ファイバーラマンレーザー)、あるいは増幅器として用いることができる。

2. 誘導ラマン散乱の特性

紫外域の誘導ラマン散乱の実験は、通常図1のような構成で行なわれている。紫外パルスレーザー (エキシマ

ーレーザーまたは窒素レーザー) の出力を石英レンズで光ファイバーに集光する。ファイバーの端面の光強度が $1.5\sim 3\text{ GW/cm}^2$ を越えると端面が損傷するため²⁻⁴⁾、エキシマーレーザーの場合、数十 mJ 以下の出力のものが用いられる。ファイバーの入口に数 mm の水の層を設けておくと光強度の損傷限界を1.6倍ほど大きくすることができる²⁾。光ファイバーは純粋石英コアに OH 基を $400\sim 1,200\text{ ppm}$ 程度含ませてレイリー散乱を減少させたものが用いられる。光ファイバーの長さは数十 \sim 200 m 程度である。長いほうが高次のラマン光が得られるが、減衰が大きくなるので出力が小さくなる。

図2にわれわれが測定した紫外域の誘導ラマン散乱の例をあげた⁵⁾。また表1にこの種の実験の例をまとめた²⁻⁷⁾。

窒素、XeCl, XeF レーザーのいずれでも、2次以上のラマン光が得られている。最高は9次までで、連続スペクトル光を伴っている²⁾。ファイバーの出力光中に占めるラマン光の割合は90%にもなることがある。ただし入力に対しての変換効率はファイバーによる減衰のためそれほど高くない。なお OH 基によるラマンシフト ($3,684\text{ cm}^{-1}$) も見いだされている⁶⁾。反ストークスラマン散乱光は紫外域では観測された例はない。

3. 誘導ラマン散乱の応用

紫外域においては光ファイバーの誘導ラマン散乱を利用して、可変波長発振⁸⁾や半導体レーザー等からの信号光の直接増幅^{9,10)}が実現されている。これと同様なことが紫外域においても可能になると考えられる。とくに色素レーザーでカバーできない 330 nm 以下で可変波長発振が得られれば、興味ある応用が開けると思われる。またラマン散乱と類似の非線形光学現象として四光波混合があげられ、短波長側への波長変換も可能になっている⁷⁾。さらに、紫外域では石英の二光子吸収も現われてくる。これらの現象も、誘導ラマン散乱の解明に伴って研究が進むものと思われる。

表1 誘導ラマン散乱の実験例

レーザー	波長 (nm)	ファイバー長 (m)	コア径 (μm)	損失係数 (dB/km)	入力エネルギー (mJ)	同パワー (kW)	ラマン光次数	波長 (nm)	全ラマン出力 (mJ)	文献
N ₂	337	10~50	200, 300	148	1.2	300	1	~342	0.15	6)
N ₂	"	100	80	94	0.038	14	1~4	342~359	0.004	5)
XeCl	308	15~180	200	150	4.9	650	1~9	312~350	—	2)
XeCl	"	20~95	400	—	30	850	1, 2	312~317	1.3	3)
XeCl	"	100	80	—	0.3	100	1~5	312~331	—	4)
XeF	351, 353	50, 100	200	100	—	300	1~3	357~370	—	7)

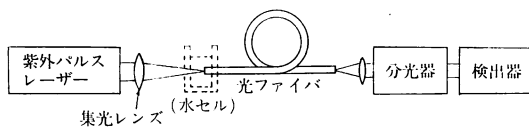
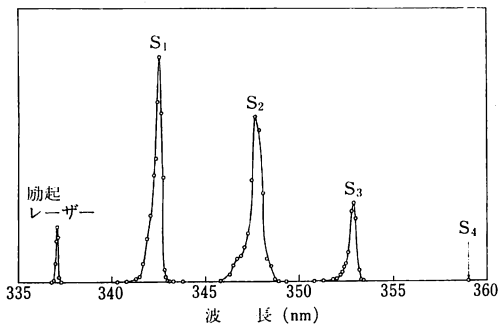


図1 誘導ラマン散乱の実験方法

図2 ファイバーの出力スペクトル⁵⁾

4. あとがき

紫外域の光ファイバーの誘導ラマン散乱はいろいろな応用が期待される興味深い現象である。現在、紫外域で使えるファイバーの種類が限られており、単一モードファイバーや偏波面保存ファイバーなどが用いられるようになれば、超短パルスの増幅など、さらに多様な応用が開けるものと考えられる。

文 献

- 1) T. R. Loree, R. C. Sze, D. L. Barker and P. B. Scott: "New lines in the UV: SRS of excimer laser wavelengths," IEEE J. Quantum Electron., **QE-15** (1979) 337-342.
- 2) R. Pini, R. Salimbeni, M. Matera and C. Lin: "Wide-band frequency conversion in the UV by nine orders of stimulated Raman scattering in a XeCl laser pumped multimode silica fiber," Appl. Phys. Lett., **43** (1983) 517-518.
- 3) 広野順三, 西本昭男, 角井嘉美, 湊 秀幸, 武林正峯: "石英光ファイバによるパルス光伝送におけるラマン散乱", 昭和60年秋期応用物理学会予稿集, 3p-P-11 (1985).
- 4) 水波 徹, 宮崎俊郎, 高樹慶次: "エキシマレーザを用いたファイバラマンレーザの短波長化", 昭和61年春期応用物理学会予稿集, 3p-L-5 (1986).
- 5) T. Mizunami and K. Takagi: "Multiple-order Stokes pulse generation by nitrogen-laser-pumped fiber Raman laser," IEEE J. Quantum Electron., **QE-22** (1986) 227-229.
- 6) M. Rothschild and H. Abad: "Stimulated Raman scattering in fibers in the ultraviolet," Opt. Lett., **8** (1983) 653-655.
- 7) R. Pini, R. Salimbeni, M. Matera and C. Lin: "Ultraviolet four-photon mixing in a multimode silica fiber Raman amplifier," Opt. Commun., **47** (1983) 226-229.
- 8) C. Lin, R. H. Stolen and L. G. Cohen: "A tunable 1.1 μm fiber Raman oscillator," Appl. Phys. Lett., **31** (1977) 97-99.
- 9) Y. Aoki, S. Kishida, H. Honmou, K. Washio and M. Sugimoto: "Efficient backward and forward pumping CW Raman amplification for InGaAsP laser light in silica fibres," Electron. Lett., **19** (1983) 620-622.
- 10) 青海恵之: "光ファイバー中の誘導ラマン散乱による光増幅", O plus E, No. 67 (1985) 52-59.

(1986年1月31日受理)