レーザー解説 2

最近の固体レーザー

鷲 尾 邦 彦*

(1980年5月14日 受理)

Recent Progress in Solid-State Lasers

Kunihiko WASHIO *

(Received May 14, 1980)

1. はじめに

1960年6月にMaiman¹⁾が 1 cm^3 のルビーを用いて史上最初にレーザー光を発振させてから、今年で、ちょうど20年が経った。この間、固体レーザーは実に目覚ましい発達を遂げ、種々のレーザーが、理化学分野のみならず、各種産業や医用分野にまで、幅広く実用に供せられるようになった。とくに、Nd:YAGレーザーを核としたレーザー加工装置やレーザー測距装置の長足の進歩と、レーザー核融合を目指したガラスレーザーシステムのたゆまぬ大出力化には目を見張るものがある。

Laser Focus 誌の1980年1月号所載の記事²⁾によれば、当年の固体レーザーの売り上げは単体で1.2億ドル、伸び率は約26%に達すると予測されており、固体レーザーはレーザー全体の44%を占め、CO₂レーザー、He-Neレーザー、イオンレーザーなどを抑え、ここ数年に引き続いて首位を堅持するものと見られている。

この急激な固体レーザーの発展は、YAGレーザーロッドの需要が供給を上回る状態をまねき、全世界でレーザーロッドの品不足という問題をもたらしたほどである。

一般に固体レーザーは光学的に励起され、その基本構成はレーザー媒質、レーザー共振器、および励起光源から成っている。この光学的励起という基本原理はこの20年間変わっていない。しかし、ハロゲンランプやアークランプなどの従来の励起光源に代り、高輝度なレーザー光を用いるレーザー励起法が開発された結果、新たに多数の発振線が見出され、短波長側は、Ce:YLFの $0.325\mu\text{m}^4$ から、長波長側はHo:YLFの $3.91\mu\text{m}^5$ までに発振域が拡大された。

固体レーザーのもつ最大の特徴は、蛍光寿命が比較的に長いので、大量のエネルギーを反転分布という形で蓄積しやすいということであろう。このため、固体レーザーでは、Qスイッチ、あるいはパルス増幅などの手段により、容易に光パルスの高出力化をはかることができる³⁾。

最近の固体レーザーの開発においては、堅牢性、コンパクト性、経済性など、実用的な道具として必要な諸性能の向上を目指した努力がなされるとともに、多波長化、モード同期あるいは負帰還によるレーザー出力の安定化などによる機能の拡大と、さまざまな応用目的に適した固体レーザーの多様化がはかられている。例えば、半導体レーザー励起のミニアチュアレーザ

* 日本電気株式会社レーザー装置開発本部 (〒213 川崎市高津区宮崎4丁目1-1)

* Laser Equipment Development Division. Nippon Electric Co., Ltd., (1-1, Miyazaki, 4-chome Takatsu-ku Kawasaki, Kanagawa 213)

—⁶⁾のように、光伝送用光源を目指した小形固体レーザーが開発される一方、他方ではレーザーレーダー用、あるいはレーザー核融合用を指向した多段増幅器付きの大形な大出力レーザーシステムの開発もなされている。

この解説では、以上に述べたような多様化しつつある最近の固体レーザーについて、主としてレーザー発振部、およびその周辺技術的を紋り、最近の進歩を中心にして説明を試みたい。固体レーザーの基本構成や従来技術については既にある教科書等³⁾を参照していただきたい。

2. 励起光源・レーザー材料

2.1 励起光源

固体レーザーの励起用光源としては、Xeフラッシュランプ、Krアークランプ、沃素—タングステンランプなどがある。これらのランプは、技術的成熟度が既に比較的高いものが多いが、さらにランプの長寿命化、大入力化、あるいは固体レーザーの効率向上などを目指した開発の努力が地道に続けられている。

Nd:YAGレーザーの連続励起用光源としては、Krアークランプが効率および最大許容入力の点で優れている⁷⁾。さらに高入力化を可能とするために、管材を、従来の石英ガラスに代えて、熱伝導率と引っ張り強度が大きく、放熱特性の優れたサファイヤ製としたアークランプが開発されている⁸⁾。最近では、 $6.3^{\phi} \times 150\text{mm}$ の放電長で、最大10kWのものが得られつつある。

宇宙通信用に指向した小形Nd:YAGレーザー⁹⁾の励起光源としては、小形、長寿命で、かつ高効率なランプの開発が進められている^{10,11)}。例えば、RF—励起の無電極Krアークランプを使用すれば、250WのRF—励起入力のあるとき、Nd:YAGレーザーよりマルチモードで1.55W、TEM₀₀モードで0.5Wの連続発振出力を得ることができ、既に5,000時間のランプ寿命が実現されている¹⁰⁾。

また、同様の狙いで、長寿命でかつ堅牢なK-Rbアークランプの開発がなされている¹¹⁾。Fig.1に、このK-Rbランプの構造を示す。

Fig.1. Potassium-rubidium arc lamp for Nd:YAG laser pumping. (After N. C. Anderson et al., ref. 11)

K-Rb 容器はヒーターで加熱され、気化した金属蒸気は放電により発光する。K-Rbの近赤外スペクトルはNd:YAGの $0.73 \sim 0.82 \mu\text{m}$ の吸収スペクトルと波長域がよく合致しており、従来のアークランプに比べて高効率化がはかれる。DC 250Wの励起入力において、現状では3,000時間以上の動作寿命が得られている。

最近では、高出力でかつ高信頼度のレーザーが容易に得られるようになったので、これらを励起光源として用い、固体レーザーを励起することも種々試みられている。レーザー励起によれば、必要な領域のみを選択的に励起でき、励起に伴う発熱を極力減らすことが可能となるため、放熱設計が極めて容易になる。例えば、バルクのガラスレーザーロッドを用いてもレーザー励起によればガラスレーザーの連続発振が可能となることが示されており¹²⁾、放熱をよくするために細長くした導波路構造¹³⁾をもたなくとも差しつかえないことが明らかにされた。

2.2 レーザー材料

2.2.1 希土類イオン

1971年のレーザーハンドブック¹⁴⁾によれば、3価の希土類イオン (Pr^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Nd^{3+}) などを含んだ固体レーザーでは、その当時フラッシュランプ励起により $0.55 \mu\text{m}$ ($\text{Pr}:\text{LaF}_3$) から $2.69 \mu\text{m}$ ($\text{ErF}_3:\text{TmF}_3:\text{CaF}_2$) まで、110本以上の発振線が知られていた。なかでもNd:YAGの $1.064 \mu\text{m}$ のレーザー遷移は高出力な発振線として知られている。

最近では、極めて優れた光学的特性を有する

YLF (Li Y F_4) という母体結晶材料が比較的容易に得られるようになり¹⁵⁾, これをレーザー励起することによって, 固体レーザーの発振波長域は, Ce : YLF の $0.325 \mu\text{m}$ ⁴⁾ から Ho : YLF の $3.91 \mu\text{m}$ ⁵⁾ にまで拡大された。

Table I. Properties of YLF and YAG

	YLF ¹⁵⁾	YAG ³⁾
<i>Crystalline Structure</i>		
Formula	Li Y F_4	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Symmetry	Tetragonal	Cubic
<i>Mechanical Properties</i>		
Density (gm/cm^3)	3.99	4.55
Hardness	4 ~ 5	8 ~ 8.5
<i>Thermal</i>		
Thermal Conductivity ($\text{W.cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.06	0.14
Thermal Expansion Coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	A-axis 13×10^{-6} B-axis 8×10^{-6}	6.9×10^{-6}
<i>Optical</i>		
Index of Refraction ($@ \lambda = 1.06 \mu\text{m}$)	$n_o = 1.4481$ $n_e = 1.4704$	1.823
Nonlinear Refractive Index n_2 (10^{-13}esu)	0.59 ± 0.07	4.09
UV Absorption	50% at $0.12 \mu\text{m}$	N.A.
Damage Resistance ($\text{GW/cm}^2 @ 1.064 \mu\text{m}$)	~18.9	10.1

Table I に, YLF のもつ諸特性を, YAG のそれと比較して示す。YLF は, 紫外域における吸収損失が小さい, レーザー損傷のしきい値が高い, 屈折率が石英ガラス並みに小さくブリュースタ角のロッドを用いた発振器の設計が容易, 非線形光学係数 n_2 が小さく波面歪が小さいなど, レーザー用母体結晶として極めて望ましい特性を兼ね備えている。ただし熱伝導率が YAG と比べて小さいので, 連続発振用としては若干問題があるかも知れない。Nd イオンをドープした Nd : YLF は, 大出力化が容易なフォスフェートガラスレーザーの利得の中心波長とよく一致した波長 $1.053 \mu\text{m}$ で発振し得るため, レーザー核融合用発振器部に適したレーザー材料として注目されている。

Table II に, YLF を母体結晶に用いて得られ

Table II. Laser Transitions in YLF¹⁵⁾

Wavelength (μm)	Material	Transition
0.325	Ce : YLF	^5D ^4F
0.453	Tm : YLF	$^1\text{D}_2$ $^3\text{F}_4$
0.48	Pr : YLF	$^3\text{P}_0$ $^3\text{H}_4$
0.545	Tb : YLF	$^5\text{D}_4$ $^3\text{F}_5$
0.7498	Ho : YLF	$^5\text{S}_2$ $^5\text{I}_7$
0.85	Er : YLF	$^4\text{S}_{3/2}$ $^4\text{I}_{13/2}$
0.9794	LiHoF ₄	$^5\text{F}_5$ $^5\text{I}_7$
1.0143	LiHoF ₄	$^5\text{S}_2$ $^5\text{I}_6$
1.047	Nd : YLF (π)	$^4\text{F}_{3/2}$ $^4\text{I}_{11/2}$
1.053	Nd : YLF (σ)	$^4\text{F}_{3/2}$ $^4\text{I}_{11/2}$
1.23	Er : YLF	$^4\text{S}_{3/2}$ $^4\text{I}_{13/2}$
1.396	Ho : YLF	$^5\text{S}_2$ $^5\text{I}_5$
1.486	LiHoF ₄	$^5\text{F}_5$ $^5\text{I}_6$
1.67	Ho : YLF	$^5\text{I}_5$ $^5\text{I}_7$
1.73	Er : YLF	$^4\text{S}_{3/2}$ $^4\text{I}_{13/2}$
2.0672	Ho : YLF (Ho : $\alpha\beta$ YLF)	$^5\text{I}_7$ $^5\text{I}_8$
2.352	LiHoF ₄	$^5\text{F}_5$ $^5\text{I}_5$
2.81	Er : YLF	$^4\text{I}_{11/2}$ $^4\text{I}_{13/2}$
2.9	Ho : YLF	$^5\text{I}_6$ $^5\text{I}_7$
3.9	Ho : YLF	$^5\text{I}_5$ $^5\text{I}_6$

た各種の希土類イオンの発振波長のリストを示す¹⁵⁾。これらのうち, 短波長側の Ce : YLF の $0.325 \mu\text{m}$ ⁴⁾ と, Tm : YLF の $0.453 \mu\text{m}$ ¹⁶⁾ の発振線は, それぞれ希ガスハライドレーザーの KrF ($0.249 \mu\text{m}$) と XeF ($0.353 \mu\text{m}$) を用いてパルス的に励起されている。高出力な希ガスハイドレーザーを励起源とした, これら紫外—可視域の新しい固体レーザーは, 今後に高出力化と波長可変領域の拡大などが期待でき, 注目される。

Ho : YLF の $1.67 \mu\text{m}$ および $3.91 \mu\text{m}$ の両発振線は, 共に $^5\text{I}_5$ 準位を共通の始準位とするレーザー遷移であるが, これらは, Nd : ガラスレーザーの SHG 光 ($0.535 \mu\text{m}$) を用いてまず $^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{I}_5$ のレーザー遷移 ($1.39 \mu\text{m}$) を選択的に発振させておき, このレーザー遷移の終準位 $^5\text{I}_6$ の分布数を意図的に増大させることによりカスケード発振させられている。カスケード発振は, 気体レーザーではよく用いられているが, 固体レーザーにおいても, 従来の励起法では十分な反転分布を得ることが困難であった中赤外域の遷移に関し, 新たなレーザー発振を行なわせる

有力な技法として、今後の展開が期待される。

2.2.2 遷移金属イオン

遷移金属イオンとしては、よく知られたルビー中の Cr^{3+} イオンのほか、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 V^{2+} イオンなどがレーザー発振する^{3,14)}。このうち、 Ni^{2+} イオンは、 MgF_2 を母体結晶とすることにより、 $1.63\sim 1.75\mu\text{m}$ の広範な波長域でCW発振する。ただし、CW発振の温度範囲は低温から約200Kまでである。 $\text{Nd}:\text{YAG}$ レーザーの $1.33\mu\text{m}$ 光を用いてレーザー励起された $\text{Ni}:\text{MgF}_2$ レーザーからは、動作温度35Kのとき、CW発振出力として1.7W（発振波長は $1.63\mu\text{m}$ ）電力変換効率は37%が得られている¹⁷⁾。

2.2.3 カラーセンター

KClなどのアルカリハライド結晶のカラーセンター（着色中心）を利用したカラーセンターレーザーは、 $0.89\sim 3.3\mu\text{m}$ 帯域の波長可変レーザーとして、近年盛んに研究されている^{18,19)}。陰イオンの空格子点に電子がとらえられてつくられるFセンターには、不純物イオンや空格子点などの配位によって F_A 、 F_B 、 F_2^+ 、 $(F_2^+)_A$ などの種類がある。このうち F_A 、 F_B センターを利用したものには $2.2\sim 3.3\mu\text{m}$ 帯域で発振する市販品²⁰⁾がある。通常、液体窒素温度で動作させなければならない難点はあるが、可視域におけるレーザー励起の色素レーザーと類似した取り扱いができる。励起光源としては、カラーセンターの吸収波長に応じて、Krイオンレーザー、Arイオンレーザー、色素レーザー、Nd:YAGレーザーなどが適当に選ばれる。カラーセンターレーザーは利得帯域が $\sim 10^{13}\text{Hz}$ と広いので、その広帯域性を利用したモード同期による超短光パルス発生の研究も盛んに行なわれている^{21,22)}。 $1.06\mu\text{m}$ モード同期Nd:YAGレーザーで励起された KF:F_2^+ レーザーからは、波長 $1.25\sim 1.45\mu\text{m}$ の領域で、パルス幅3～5psという固体レーザーでは最短の光パルスが得られている。平均出力は1～2.3Wである。この KF:F_2^+ レーザーより得られた波長可変な超短光パルスは、単一モード光ファイバーの、波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯のゼロ分散領域における伝送特性の測定に用いられ

ている²³⁾。

3. 固体レーザーの機能の拡大

レーザー共振器の内外に光制御素子を設けることによりレーザー発振器の機能を拡大することができる³⁾。レーザー加工やレーザー測距で重要な役割をはたしているQスイッチ法や、ピコ秒光パルスの発生法として有用なモード同期法^{24,25)}は、とりわけよく用いられている。

最近では、複数種の光制御素子やセンサーなどを組合せて用いることにより、多岐にわたるレーザー発振器の機能の一層の拡大と性能の向上がはかられている。ここでは、おもにNd:YAGレーザーを対象として、そのような試みの数例をとりあげ説明しよう。

3.1 発振波長域の拡大

レーザー計測やレーザー分光などの諸種の応用分野では、レーザーの発振波長域の拡大と、発振線の数の一層の増大が望まれている。Nd:YAGレーザーは、よく知られた波長 $1.064\mu\text{m}$ の発振線のほかにも離散的に多数の発振線があり、これらの発振線で高出力を得る試みがなされている²⁶⁾。レーザー共振器内にエタロンなどの波長選択素子を設け、適当な波長選択的反射特性をもった共振器反射鏡と組み合わせて用いることにより、 $1.052\sim 1.444\mu\text{m}$ の領域で19本の発振線のCW発振が実現している。このうち、 $1.052\sim 1.356\mu\text{m}$ の領域では16本の発振線についてマルチモード発振出力として5W以上が得られている。Fig. 2に、5kW入力における各発振線のマルチモード出力を示す²⁶⁾。

これらの発振線のうち、波長 $1.052\mu\text{m}$ の発振線はフォスフェートガラスレーザー増幅器の利得の中心波長に近いので、また波長 $1.319\mu\text{m}$ や $1.338\mu\text{m}$ は光伝送用シリカファイバーの低分散・低損失な波長帯域に合致しているためとくに重要であり、 $1.052\mu\text{m}$ や $1.319\mu\text{m}$ におけるモード同期^{27,28)}や、Qスイッチ動作²⁹⁾などが相次いでなされている。Fig. 3に、超音波変調器を用いたQスイッチング動作の特性例を波長 1.319

Fig. 2 Observed CW laser output in watts for 18 Nd : YAG transitions over the frequency range of $6900-9500\text{ cm}^{-1}$ (After J. Marling, ref. 26)

Fig. 3 Output power and pulse width from $1.32\mu\text{m}$ acousto-optically Q-switched Nd : YAG laser. (After K. Inoue, et al., ref. 29)

μm の場合について示す²⁹⁾。繰り返し 1 kHz のとき、 TEM_{00} モードのピーク出力として 2.9 kW 程度が得られている。このような波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯の高出力な Q スイッチレーザーは、光ファイバー中の非線形光学効果を利用した高効率な誘導光散乱の発生用光源として有用である³⁰⁾。

3.2 注入同期による発振線の狭帯域化

パルス励起の高出力 Q スイッチレーザーは、発振の立ち上がりが急激なため、レーザー共振器内に分散素子を用いても、狭帯域なレーザー発

振を得ることは容易でない。この対策として、発振線幅を狭めることが比較的容易な CW レーザーなどを用い、これより得られる狭帯域な信号光をパルスレーザーに注入し、これをパルスレーザー内で増幅することにより発振波長を注入した信号光のそれと同期させるという注入同期法が開発されている^{31,32)}。注入同期法は、色素レーザー³³⁾などの他の高出力、高利得なパルスレーザーにおいても、高出力狭帯域な光パルスを得る方法としてその有用性が実証されている。

Nd : ガラスレーザーでは、発振線幅が通常の Q スイッチ発振時の約 5 千分の 1 の 10^{-2} cm^{-1} にまで狭められており、また信号注入用レーザーを波長同調することにより、注入同期したガラスレーザーの発振波長を 40 cm^{-1} 程度可変にできている³¹⁾。

高出力だがパルスの立ち上がりがとくに急速で、狭帯域化が従来困難であった非安定共振器を用いた Q スイッチ Nd : YAG レーザーにおいては、Fig. 4 に示した構成により単一縦モード発振の CW レーザー光を注入した結果、光パルスの帯域が 50 MHz にまで狭められ、フーリエ変換の極

Fig. 4 Schematic of the injection-locked single-axial-mode Q-switched unstable-resonator Nd : YAG source. (After Y. K. Park et al., ref 32)

限としての理想的な帯域をもった、パルス幅9ns,³²⁾出力150mJの高出力な光パルスが得られている。

3.3 負帰還によるレーザー発振の安定化

Nd:YAGレーザーなどの通常の固体レーザーは、わずかの外部擾乱により、一般にスパイク状の出力変動が誘発され易いという問題がある。この対策として、内部変調器を用い、光出力の変動に応じて共振器の内部損失を増減するようにした負帰還方式によるレーザー出力の安定化が試みられている^{34,35)}。

長尺光ファイバーや各種光デバイスの評価用光源として有用な波長 1.3 μ m 帯のCW Nd:YAGレーザーについて負帰還方式によるレーザー出力の安定化がなされている³⁵⁾。この例では、変調器の挿入に伴うレーザー出力の低下を軽減するために、従来のパルス励起ルビーレーザー³⁴⁾などで用いられていた電気光学変調器に代えて、1.3 μ m帯で低損失な超音波変調器を用いることにより、レーザー出力はTEM₀₀モードで約2W、最大出力変動は $\pm 7\%$ （発生頻度は1時間に1回程度）という高出力な安定化レーザーが得られている。Fig. 5に、負帰還のあるときとないときについて観測されたレーザー出力の変動波形の例を示す。この1.3 μ m帯の高出力なCW Nd:YAGレーザーは、LiTaO₃ 外部光変調器と組み合わせることにより、長尺光ファイバーを用いた32Mbitの伝送実験に供せられた^{36,37)}。この実験により、伝送距離100km程度の無中継の光伝送が可能であることが示された。

強制モード同期固体レーザーにおいては、とくに損失変調の場合、変調周波数と共振器基本周波数 $c/2L$ (L は共振器長)との間に離調が生じると、激しい緩和発振が誘発され、安定なモード同期光パルスが得にくくなるという問題があった。このため、モード同期CW Nd:YAGレーザーに対しても、Fig. 6に示したような構成により、負帰還方式によるレーザー出力の安定化が試みられた³⁸⁾。これによれば、レーザー出力のゆらぎの振幅が20dB程度縮小され、また許容離調範囲が一桁程度拡大されている。

Fig. 5 Oscilloscope traces of laser output waveform. (1ms/div.)

- a) With feedback control.
b) Without feedback control.

Fig. 6 Experimental arrangement for negative-feedback power-stabilized mode-locking in Nd:YAG laser. Output fluctuation characteristics with respect to detuning were measured by varying mirror position. NF, negative feedback; ML, mode locking; AOM, acousto-optic modulator. (After S. Kishida et al., ref. 38)

パルス励起の高出力QスイッチNd:YAGレーザーにおいては、レーザー媒質から発する蛍

光強度を検知し、レーザー利得が一定値に達したときにQスイッチを行なうようにした帰還回路を設けることにより、Qスイッチピーク出力の安定化がはかられている³⁹⁾。フラッシュランプの発光波形の変動に起因するレーザー出力の変動は、この帰還回路の作動により顕著に減少され、Qスイッチパルスの出力が5 mJという条件では、出力変動の標準偏差値が0.43%にまで安定化されている。この値は、帰還回路が無い場合に比べて約3倍の改善になっている³⁹⁾。

4. 小形固体レーザー

4.1 希土類直接化合物レーザー

Ndイオンを化合物の構成イオンとしたNdP₅O₁₄やLiNdP₄O₁₂などの直接化合物レーザーは、Nd:YAGに比べて20~40倍の高濃度なNdイオンを含み、レーザー発振器の小形化に適しているため、とくに光通信用の光源を目指した研究開発が進められた⁴⁰⁾。

レーザー遷移断面積が比較的に大きく、高効率化が期待しうるLiNdP₄O₁₂ (LNP) レーザーでは、0.805 μm帯のGaAlAs DH レーザーを用いた端面励起法により、光源 (LD)、レンズ、マウント、およびレーザー共振器を含めた全体の寸法が6 cm^φ×10 cm以内に納まる小形なモジュールが実現している⁴¹⁾。このLD-励起LNPレーザーの構成をFig. 7に示す。発振出力は、

Fig. 7. Structure of LD-pumped LNP lasers for 1.05-μm and 1.32-μm operation. (After K. Kubodera et al., ref. 41)

波長1.05 μmでCW 2 mW (スロープ効率18.2%), 1.32 μmでCW 0.5 mW (スロープ効率6.5%) が

得られている。このLNP レーザーでは、厚さ0.3 mmという薄いレーザー結晶が共振器反射鏡に接して配置されているため、空間的な反転分布のホールバーニングに伴う多モード発振を避けることができ、発振しきい値に対する相対励起比 W を14程度まで高めても、Fig. 8に示し

Fig. 8. Output spectra for both 1.05-μm and 1.32-μm lasers. $W \equiv P_{in}/P_{th}$. Resolutions are (a) 0.1 Å, and (b) 0.3 Å. (After K. Kubodera et al., ref. 41)

たように、単一縦モードの発振スペクトルが得られている⁴¹⁾。高密度に励起されたLNPレーザーの発振スペクトルや緩和振動などの挙動については詳細な理論的検討がなされている⁴²⁾。発振横モードの安定化や励起効率の改善などを狙いとした導波形のLNPレーザーも試作されている⁴³⁾。Arレーザー励起により、1.05 μmおよび1.32 μmの発振が得られているが、これについては散乱による内部損失を減らすことが今後の課題と思われる。

希土類直接化合物レーザーの一種であるNd_{0.5}La_{0.5}P₅O₁₄ レーザーについて、その蛍光線幅が約25 cm⁻¹とかなり広いことを利用して、モード同期による超短光パルス発生の実験が行なわれている⁴⁴⁾。その実験構成をFig. 9に示す。FMモード同期により、パルス幅14 psの超短光パルスが得られている。この値は、現在のところ、CW発振Nd固体レーザーを強制モード同期して得られるパルス幅の最少値であり、この点注目される。

希土類直接化合物レーザーは、微小領域への

Fig. 9. Schematic diagram of FM mode-locked $\text{Nd}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{P}_5\text{O}_{14}$ laser. (After S.R. Chinn et al., ref. 44)

高密度励起が可能な高輝度な励起光源を必要とする。このため、発光ダイオード励起による室温 CW 発振は困難であり、現状では上述したように専らレーザー励起が用いられている。レーザー励起の場合は光 → 光の変換効率が大きくできるので、希土類直接化合物レーザーは一種の波長変換デバイスとしての応用も期待できよう。

4.2 コンパクトパルスレーザー

車載あるいは携帯用測距装置の光源として、コンパクトなパルスレーザーが開発されている^{45,46,47)}。実装密度を高めるため折り返し共振器構成を採用し、また振動や衝撃などによるアラインメントの狂いを軽減するために、共振器反射鏡の代りに自己補償型の特殊プリズムやコーナーキューブを用いているものが多い。

車載搭載用として設計された折り返し型 Q スイッチレーザーの一例としては、長さ 200 mm、幅 100 mm、高さ 70 mm 程度のものである⁴⁵⁾。これは、出力エネルギー 120 mJ、ピーク出力 10 MW 程度の Q スイッチ光パルスを 20 pps 程度の繰り返しで発振できる。

携帯用ミニ測距儀としては全重量がわずか、510 g という非常に軽量化されたものが開発されている⁴⁷⁾。これは、可飽和色素により Q スイッチされるパルス励起 Nd : YAG レーザーを発振

器部に用いている。電源はリチウム電池を使用し、数百回の連続測定が可能である。このミニ測距儀の構成を Fig. 10 に示す。この測距儀の最

Fig. 10. Optical schematic of minirangefinder. (After A. M. Johnson et al., ref. 47)

大測定距離は約 4 km、分解能は 5 m であり、超小形な割に優れた性能を有している。

5. 高出力レーザーシステム

5.1 高出力レーザー用の共振器構成

大入力で使用する CW レーザーにおいては、レーザーロッドに熱レンズ効果⁴⁸⁾が顕著に生じるので、レーザーの高出力化のためには、凸面鏡などを用いてこの熱レンズ効果を補償し、モード体積を増大させる必要がある。熱レンズ効果は励起入力によってその大きさが変化するので、共振器の安定条件を十分考慮に入れる必要がある³⁾。通常は、ランプの標準入力において安定でかつ高出力なレーザー動作が得られるような共振器構成が選ばれる。

パルス励起レーザーの場合には、CW レーザーに比べて熱レンズ効果が比較的小さいので、モード体積を広げることにより容易にレーザー出力の増大をはかることができる。最近では、レーザーの共振器構成を工夫することにより、 $6^\circ \times 75 \text{ mm}$ の Nd : YAG レーザーロッド用いた場合を例にとると、200 mJ 程度は比較的容易に得られるようになった⁴⁹⁻⁵³⁾。Fig. 11 に、Q スイッチ

Nd:YAGレーザーに用いられている共振器構成の2, 3の例を示す。

Fig. 11. Various resonator configurations for high-power Q-Switched Nd:YAG laser.

(a) Polarex Resonator. (After G. Brassart et al., ref. 52)

(b) Phase-Coupled Resonator. (After P. H. Sarkies, ref. 53)

(c) Unstable Resonator. (After R. L. Herbst et al., ref. 49)

レーザー共振器は安定共振器と不安定共振器⁵⁴⁾とに大別される。不安定共振器を用いたレーザー発振器は、使用する光学素子が少なくすみ構成が単純であること、活性領域のモード体積を容易に大きくできること、および指向性が極めて良く拡がり角が0.25 mrad程度とかなり小さくできることなどの優れた利点を有している。⁴⁹⁻⁵¹⁾不安定共振器の難点は、レーザー出力の近視野像が穴あきパターンとなること、および共振器のアラインメントがややクリティカルで、レーザー出力がロッドの熱レンズ効果に依存して変化しやすいことなどである⁵³⁾。

安定共振器を用いたQスイッチレーザーでは、 $6.3^{\circ} \times 75 \text{ mm}$ 程度のNd:YAGレーザーロッドを用いた場合、一対の反射鏡を用いた単純な安定共振器構成のときは、TEM₀₀モードの出力はたかだか50 mJ程度でしかない⁴⁹⁾。このため、共振器内のモード体積を広げたり、レーザーロッドの被励起領域を有効に活用して利得の増大をは

かるなどの工夫がなされている^{52,53,55)}。レーザー共振器内に $\lambda/4$ 板を設けて偏波面を回転させ、レーザーロッドで増幅された光の一部をポラライズで反射させてこれを出力として取り出す偏光結合方式では、繰り返し20 Hzのとき200 mJ程度のQスイッチ出力が得られており⁵³⁾、出力の点では前述の不安定共振器を用いた場合と比べて遜色ない。しかし、共振器内に挿入する光学素子が増加するので調整がやっかいである。この反省から、レーザーロッドの径を9.5 mm⁶⁾と発振器用としてはかなり大きくしてモード体積を広げ、その代りに共振器は従来の単純な構成に近づけたものが現われた⁵⁵⁾。この種の大口徑レーザーロッドを使用する発振器としては、パルス幅12–20 ns、出力480 mJ程度の光パルスが得られるものがある⁵⁵⁾。

5.2 レーザー発振・増幅システム

カリフォルニア大学ローレンス・リバモア研究所、ロチェスター大学、大阪大学などでは、ガラスレーザー増幅器を中心とした極めて大出力なレーザー発振・増幅システムが開発されている。我国では、最近、大阪大学の激光XII号モジュールにおいて99 psパルスに対しレーザー出力346 Jすなわちピーク出力3.5 TWが得られている⁵⁶⁾。このような大出力化のためには、ファラデーアイソレーター、スペーシャルフィルター、大口徑ポッケルスセルなどの光学素子が必要とされ、全体システムは極めて大規模なものとなる。ガラスレーザー増幅器を中心とした大規模レーザーシステムについては既に本誌にも多数報告例があるので⁵⁷⁾、ここでは説明は省略する。

レーザーレーダーや高感度レーザー分光、レーザー誘起光化学など多くの分野では、少なくとも数pps以上の高速繰り返しの高出力パルスレーザーの需要が強まっている。応用分野によっては、近赤外域より検出感度の点で有利な可視ないしは紫外域の光源が必要とされている。高速繰り返しを可能とするために、熱伝導度が大きく、放熱特性の優れたNd:YAGなどのレ

ーザー結晶を用いてレーザー光を多段増幅し、可視光を得るためには最終段よりのレーザー出力をKD*Pなどの非線形光学結晶を用いて波長変換するようにしたレーザー発振、増幅システムが多数開発されている^{58,59)}。

Fig. 12にその一例を示す⁵⁸⁾。発振段から得られる出力125 mJ, パルス幅17 nsのTEM₀₀モード

Fig. 12. Optical schematic of a high-energy, TEM₀₀-mode Nd:YAG laser. (After R. M. Kogan et al., ref. 58)

の光パルスを4段増幅し、最終段の12.7×102 mmのNd:YAGロッドからは、繰り返り10 ppsで2.7 Jの出力光を取り出している。このSHG (0.53 μm)の出力は1.05 Jに達し、平均出力は10 W以上が得られている⁵⁸⁾。

大口径のレーザー結晶は育成が困難であり、例えば直径2 cm以上の固体結晶レーザーロッドを得ることは至難である。このため、現状では、出力3 J以上が必要なパルスレーザーシステムには、熱伝導度が低いこと繰り返り速度は低下するが大口径化が容易なガラスレーザーを増幅段に用いるしかないようである。ラマン分光光源として開発中のシステム⁶⁰⁾では、最後段にスラブ状のガラスレーザー増幅器を用いることにより、レーザービーム径10 mmで5 Jの出力(パルス巾は~1 μs)を5 ppsの繰り返りで実現する計画になっている。

5.3 高出力モード同期固体レーザーシステム 高出力な超短光パルスを得る方式として、従

来はパルス励起固体レーザーを用い、これを可飽和色素により受動モード同期する方式が用いられていた。しかし、このようなパルス励起レーザーのモード同期においては、モード同期過程と光パルスの増幅過程とがほぼ同時に進行するため、発生する光パルスに統計的なゆらぎが存在し、再現性のよい光パルスを得ることが難しいという欠点がある。一方、CW固体レーザーを用いてこれを強制モード同期した場合には、安定な定常光パルスを得ることが可能である。しかし、CW励起レーザーから得られるモード同期光パルスの出力エネルギーは通常10⁻⁷~10⁻⁸ Jにしかすぎないので、多くの応用には光パルスの増幅が必要である。前述したように、モード同期過程と光パルスの増幅過程をほぼ同時に進行させることは問題が多いので、最近ではこれらの2過程を時間的に分離した種々のハイブリッド方式が提案されている²⁵⁾。

そのようなハイブリッド方式の例としては、モード同期が実現しているCW固体レーザーの増幅媒質中に外部からごく短時間強い光励起を行ない光パルスを急速に増幅するようにした利得スイッチング法⁶¹⁾、CWモード同期レーザーから抽出した単一の超短光パルスをパルス励起の再生増幅器に注入して増幅する再生増幅法⁶²⁾、およびパルス励起時間を数msと従来よりも一桁程度長くし、Qスイッチを開始する以前に長いprelase状態(準CW状態)を設け、あらかじめ強制同期により安定したtransform-limitedな光パルスを得たうえでこれをQスイッチにより増幅するというKuizenga方式⁶³⁾などが知られている。Fig. 13に、Kuizenga方式によるレーザー発振器の構成例を示す。最近では、発振波長がフォスフェートガラスレーザー増幅器の利得中心波長(1.053 μm)にほぼ合致しており、かつ蛍光線幅がNd:YAGより約2倍広いNd:YLFレーザーが、レーザー核融合研究用の原発振器として注目されている⁶⁴⁾。Kuizenga方式のNd:YLFレーザーからは、パルス幅66 ps, 出力200 μJの高出力な超短光パルスが得られており、その出力安定度は±5%以内である⁶⁴⁾。

Fig. 13. Optical configuration of the actively mode-locked, Q-switched lasers developed by Kuizenga. (After D. J. Kuizenga, ref. 63)

レーザー核融合研究などにおいては、高速現象の測定用として、主パルスに同期した幅の狭いプローブパルスがしばしば必要とされる。再生増幅方式を用いれば、可飽和吸収体の使用によりパルス幅の1桁程度の圧縮が可能になる。Kuizenga発振器より得られたパルス幅120psのモード同期光パルスを、Fig.14に示したような構成で再生増幅することにより、出力20 μ J、パルス幅15ps程度の光パルスが得られており、主パルスとの同期は ± 5 ps以内が実現している⁶⁵。

6. おわりに

最近の固体レーザーに関し、レーザー発振器およびその周辺技術を中心に述べた。固体レーザーは、気体レーザー、色素レーザー、半導体レーザーなどに比べて高出力であり、とくに、Qスイッチやモード同期によりピーク強度の高い光パルスが得られるという特徴がある。理化学分野のみならず、産業、医用、軍事、通信分

Fig. 14. Schematic for synchronized probe pulse generation using the actively mode-locked and Q-switched (AMQ) laser and the regenerative amplifier. (After J. E. Murray et al., ref. 65)

野への拡大, 発展につれて, 多種多様な固体レーザーの開発が必要とされるようになった。これに伴ない, 固体レーザーの信頼度の改善, 装置の小形化, 経済性の追究といった実用性能の向上がはかられ, また波長選択, 光パルス制御, レーザー増幅などの多岐にわたるレーザー光制御技術が発達しつつある。

カラーセンターレーザー, $\text{Ni}:\text{MgF}_2$ レーザーなどの波長可変範囲の広いレーザーが開発され, またレーザー励起により固体レーザーの発振波長域は $0.325\sim 3.91\mu\text{m}$ にまで拡大されている。

宇宙通信用光源, あるいは小形測距装置用の光源として, 軽量, コンパクトな手のひらサイズの小型固体レーザーが開発されている。一方, 大気測定用レーザーレーダー, 高感度レーザー分光, あるいはレーザー誘起化学研究用の光源として, 出力1J以上, 繰り返し10pps程度の高出力, 高速繰り返しのパルス固体レーザーシステムが開発されている。さらには, レーザー核融合を目指した出力20kJ以上の極めて大出力なガラスレーザー増幅システムも開発されつつある。

固体レーザーは, 光励起法を中心とした基本構成は変らなくとも, それぞれの応用目的に応じた専用機, あるいは単能機としての最適化と機能の拡充が今後ますます必要になるものと考えられる。そのためには, 材料技術, 研磨蒸着技術をはじめ, 自動制御技術などレーザーを支える多くの周辺技術分野との一層の交流と, 総合的な工業力の拡充・強化が必要と考えられる。関連する多岐の技術分野よりの強力な支援を得て, 固体レーザーおよびその応用分野がますます発展することが切に望まれる。

最後に, 本解説をまとめるにあたり, 有益な討議を頂いた日本電気株式会社レーザー装置開発本部の諸氏に感謝する。

参考文献

- 1) T. H. Maiman: *Nature* **187** (1960) 493.
- 2) *Laser Focus* (1980) 30.
- 3) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin (1976).
- 4) D. J. Ehrlich, P. F. Moulton, and R. M. Osgood, Jr.: *Opt. Lett.* **4** (1979) 184.
- 5) L. Estrowitz, R. C. Eckardt, and R. E. Allen: *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 236.
- 6) K. Kubodera and K. Otsuka: *Appl. Opt.* **18** (1979) 3882.
- 7) I. Liberman and R. L. Grassel: *Appl. Opt.* **8** (1969) 1875.
- 8) 堀田, 都島, 吉川: 昭和55年信学・光・電波部門・全大 (1980) 発表予定
- 9) M. Ross, P. Freedman, J. Abernathy, G. Matanov, J. Wolf, J. D. Barry: *Proc. IEEE* **66** (1978) 319.
- 10) D. A. Huchital and G. N. Steinberg: *CLEA* (1977) paper 14. 10.
- 11) N. C. Anderson, J. M. Heitman, R. M. F. Linford, and D. K. Priest: *CLEOS* (1978) paper WHH4.
- 12) S. Kishida, K. Washio, S. Yoshikawa, and Y. Kato: *Appl. Phys. Lett.* **34** (1979) 237.
- 13) T. Uchida, S. Yoshikawa, K. Washio, R. Tatsumi, K. Tushima, I. Kitano, K. Koizumi, and Y. Ikeda: *Japan. J. Appl. Phys.* **12** (1973) 126.
- 14) M. J. Weber: in *Handbook of Laser with Selected Data on Optical Technology*, Edited by R. J. Pressley, The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio (1971) 371.
- 15) YLF and Nd: YLF laser material data sheets, Sanders Associates Inc., March (1980).
- 16) J. W. Baer, M. G. Knights, E. P. Chicklis: in *Proc. Int'l Conf. on Lasers, 1978*, edited by V. Corcoran (STS Press, McLean, 1979) 770.
- 17) P. F. Moulton, A. Mooradian, and T. B. Reed: *Opt. Lett.* **3** (1978) 164.
- 18) L. F. Mollenauer: *Opt. Lett.* **1** (1977) 164.
- 19) K. —P. Koch, G. Litfir, H. Welling: *Opt. Lett.* **4** (1979) 387.
- 20) 例えば, FCL-20 F-center laser, Burleigh Instruments, Inc., Burleigh Park, Fishers, N.Y. 14453.
- 21) L. F. Mollenauer and D. M. Bloom: *Opt. Lett.* **4** (1979) 247.
- 22) L. Isganitis, M. G. Sceats, and K. G. German: *Opt. Lett.* **5** (1980) 7.
- 23) D. M. Bloom, L. F. Mollenauer, Chinlon Lin, D. W. Taylor, and A. M. Del Gaudio: *Opt. Lett.* **4** (1979) 297.

- 24) S. L. Shapiro ed.: *Ultrashort Light Pulses*, (Springer Verlag, 1977)
- 25) 鷲尾, 寛具, 岸田: 応用物理 **47** (1978) 908.
- 26) J. Marling: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 56.
- 27) 山根, 都島, 吉川: 昭和53年度信学全大, (1978) 744.
- 28) G. C. Reali: Appl. Opt. **18** (1979) 3975.
- 29) 井上, 岸田, 鷲尾: 第27回応物学会 (1980, 春) 1p-K-5.
- 30) K. Washio, K. Inoue and T. Tanigawa: Electron. Lett. **16** (1980) 331.
- 31) I. G. Zubarev and S. I. Mikhailov: Sov. J. Quantum Electron. **4** (1974) 348.
- 32) Y. K. Park, G. Giuliani, and R. L. Byer: Opt. Lett. **5** (1980) 96.
- 33) T. Okada, M. Maeda, and Y. Miyazoe: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 616.
- 34) H. Statz, G. A. de Mars, and D. T. Wilson: J. Appl. Phys. **36** (1965) 1510.
- 35) 井上, 岸田, 鷲尾, 寛具: 第40回応物学会 (1979 秋) 30p-R-6.
- 36) S. Shimada, T. Matsumoto, T. Ito, S. Matsushita, K. Washio, and K. Minemura: Electron. Lett. **15** (1979) 484.
- 37) 松本, 伊藤, 鷲尾, 松下: 信学技報 OQE 79-82 (1979).
- 38) S. Kishida, K. Inoue, and K. Washio: Opt. Lett. **5** (1980) 191.
- 39) D. C. Downs, J. E. Murray, and W. H. Lowdermilk: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 571.
- 40) **5** (1978) 143.
- 41) K. Kubodera and K. Otsuka: Appl. Opt. **18** (1979) 3882.
- 42) K. Otsuka and K. Kubodera: IEEE J. Quantum Electron. **QE-16** (1980) 419.
- 43) K. Kubodera and K. Otsuka: J. Appl. Phys. **50** (1979) 6707.
- 44) S. R. Chinn and W. K. Zwicker: J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) Sept. 93D.
- 45) 伊東, 村上, 橋本: 第5回レーザーレーダ (ライダー) シンポジウム予稿集 (1978) 7.
- 46) R. M. Kogan and R. E. McKinney: in *Proc. Int'l Conf. on Lasers, 1978*, edited by V. Corcoran (STS Press, McLean, 1979) 142.
- 47) A. M. Johnson and R. W. Herron: CLEOS (1980) THCC4.
- 48) W. Koechner: Appl. Opt. **9** (1970) 2548.
- 49) R. L. Herbst, H. Komine and R. L. Byer: Opt. Commun. **21** (1977) 5.
- 50) R. L. Byer and R. L. Herbst: Laser Focus (1978) 48.
- 51) D. C. Hanna, L. C. Laycock: Opt. Quantum Electron. **11** (1979) 153.
- 52) G. Brassart, G. Bret and J. —M. Marteau: Opt. Commun. **23** (1977) 327.
- 53) P. H. Sarkies: Opt. Commun. **31** (1979) 189.
- 54) A. E. Siegman: Appl. Opt. **13** (1974) 353.
- 55) J. K. Laser Ltd., Model DLPY4 YAG Laser.
- 56) 吉田, 加藤, 小松, 田島, 原田, 太田, 守部, 薬王: 第27回応物学会 (1980 春) 4p-K-9.
- 57) 例えば, Y. Kato, S. Nakai, and C. Yamanaka: レーザー研究 **8** (1980) 59.
- 58) R. M. Kogan and T. G. Crow: Appl. Opt. **17** (1978) 927.
- 59) 木村, 嶋田, 清水, 竹内: 第6回レーザーレーダ (ライダー) シンポジウム予稿集 (1979) 76.
- 60) R. P. Sandoval and F. R. Franklin: SAND 78-1259, Sandia Laboratories (1978).
- 61) T. Yamane: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13** (1977) D65.
- 62) Wm. D. Fountain and R. L. Hansen: Advanced Research Projects Agency Contract No. N00014-70-C-0342 Final Report (July, 1972).
- 63) D. J. Kuizenga: Opt. Commun. **22** (1977) 156.
- 64) D. J. Kuizenga: in *Laser Program Annual Report-1978*, Lawrence Livermore Lab., UCRL-50021-78 (1979) p. 7-9.
- 65) J. E. Murray, D. J. Kuizenga, W. H. Lowdermilk, and D. C. Downs: *ibid* p. 7-11.