

第 1 章

緒論

1.1 バルク型固体レーザーからファイバーレーザーへ

レーザー (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) は、1960 年のルビーレーザー (固体レーザー) の発振[1]により幕を開け、気体レーザー[2]、半導体レーザー (LD: Laser Diode)[3]、色素レーザー[4]など新しいレーザー材料・媒質の研究が活発に行われた。高出力化の期待できる固体レーザーはその後、Q スイッチ発振の考案[5]によりマイクロ秒 (μs : 10^{-6} s) ~ ナノ秒 (ns : 10^{-9} s) のパルス幅でピーク出力メガワット (MW: 10^6 W) 級のジャイアントパルス発生が可能となり、非線形光学の研究が発展した。更に、モード同期レーザーの開発[6]によりピコ秒 (ps : 10^{-12} s) ~ フェムト秒 (fs : 10^{-15} s) のパルス生成が可能になり、ピーク出力はギガワット (GW: 10^9 W) まで進展した。近年では、チャープパルス増幅 (CPA: Chirped Pulse Amplification) 法の発明[7]により、実験室での実証実験では TW (10^{12} W) を越えペタワット (PW: 10^{15} W) 級レーザーまで出現した[8]。

産業用の実用型レーザーの開発は、主に炭酸ガス (CO_2) レーザー、希ガスレーザー及びネオジム (Nd) を添加した $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 結晶 (Nd:YAG 結晶) 固体レーザーを中心に進展してきた。代表的な固体レーザーの Nd:YAG レーザーや Nd ガラスレーザーの励起源には、希ガスフラッシュランプが用いられてきた。フラッシュランプ励起方式は安価で高出力が得られるが、発光スペクトルが紫外域から赤外域の広範囲にわたるため、レーザー媒質の吸収スペクトルとの整合性が悪くレーザー媒質への熱負荷も大きかった。1980 年代には LD の高出力化、高効率化、長寿命化が進み、LD 励起の固体レーザーが発展した。LD は発光スペクトルが狭いため、媒質の特定の吸収遷移のみを選択的に励起することが可能で、高い吸収効率が得られる。また、LD はコヒーレント光であるため、集光性に優れ高密度励起が可能となる。

Nd:YAG 結晶が高出力レーザー媒質として最も利用されている理由は、 Nd^{3+} イオンが 4 準位のエネルギー準位構造を持ち、YAG 結晶の熱伝導率が他のレーザー材料に比べ非常に優れているからである。しかし、バルク型固体レーザーは励起光とレーザー光のカップリング効率が悪く、モード制御が困難である。光学系のミラーやレンズ等に塵埃付着や、周囲環境による熱的・機械的影響による光軸ずれの発生等により、出力低下やビーム品質劣化が発生してしまう。また、固体レーザーの高出力化に伴い、励起光吸収による熱レンズ効果や熱複屈折効果といった熱効果が顕著となるため、ビーム品質が大幅に低下する。このため、冷却効率の高いアクティブミラー型やスプリットディスク型が提案されているが、構造が複雑であり産業用には不向きである。

このようなレーザー技術と、光通信分野のファイバー技術の融合により近年急成長してきたファイバー型レーザーの歴史は古く、最初のファイバーレーザーは 1964 年にクラウンガラスに Nd_2O_3 を添加したものをフラッシュランプで励起することにより増幅が行われた[9]。その後 1974 年にシリカ系の低損失ガラスファイバーを用いて GaAs 系の LD で励起することにより連続 (CW: Continuous Wave) 発振が行われた[10]。ガラス中の希土類元素は YAG 等の結晶の場合とは異なり、複雑な結晶場の影響を受けて微細構造のない幅広い準位を示し、幅広い波長域にわたる光増幅が可能となる。ファイバーでは、単位長さ当たりの利得が小さくても相互作用長が長いことにより十分な総合利得が得られる。そして、ファイバーは表面積/体積比がバルク型レーザーに比べ 4 桁以上大きいため冷却能力が高い。更に、伝搬モードはファイバー導波路により制御されるため、熱によるビーム品質の劣化がほとんどなく高輝度・高効率動作が可能である。またモジュールの並列接続で出力を増加させることができるため容易に出力向上が可能である。しかしながら、ファイバーは小さなコア径で相互作用長が長く、非線形光学効果が発生しやすいこと、高強度のパルス動作には不向きで、レーザーの性能を制限することがある。

上述したファイバーレーザーの特徴をまとめると次のようになる。

長所

- (1) 小型軽量である
- (2) メンテナンスが容易で、長期安定性に優れている
- (3) 利得が高く、利得幅が広い
- (4) ビーム品質が優れている
- (5) 効率が高い
- (6) 高出力化が容易である

短所

- (1) 非線形光学効果が生じやすい
- (2) レーザー損傷を受けやすい

ファイバーレーザーの実用化は、光通信帯におけるエルビウム (Er) 添加ファイバーレーザーが最初である。1985 年に改良型化学気相堆積法 (MCVD: Modified Chemical Vapor Deposition 法) により低損失なシリカガラスのシングルモードファイバーの作製が確立され[11]、1987 年にはシリカガラスファイバーの損失が最も小さい $1.54 \mu\text{m}$ 帯での低雑音な Er ファイバー増幅器 (EDFA: Er-Doped Fiber Amplifier) が開発されたことにより、光電変換を伴わずに光信号をそのまま増幅できるようになった[12]。EDFA の開発により光通信市場が活性化し、900 nm 帯の InGaAs 系 LD の普及と高性能化と共に光ファイバーレーザー増幅器の研究開発が急速に進んだ[13]。超短パルスレーザーの分野では、これまで使用されてきたテーブルトップサイズのチタンサファイア (Ti:sapphire) レーザーから小型化・安定化が進み、手のひらサイズの Er ファイバーレーザーの第 2 高調波発生 (SHG: Second Harmonic Generation) 光源に替わってきた。

光通信用以外に高出力ファイバーレーザーとして最初に開発されたものが、Nd 添加ファイバーレーザーである。1988 年にこれまでのコア励起の概念を打ち破るクラッド励起の Nd ファイバーレ

ザーが登場[14]したことで、CWのファイバーレーザーの出力は飛躍的に増大した。1999年にはクラッド励起 Nd ファイバーで CW・100 W を達成し[15]、2002 年には 1 kW を達成した[16]。

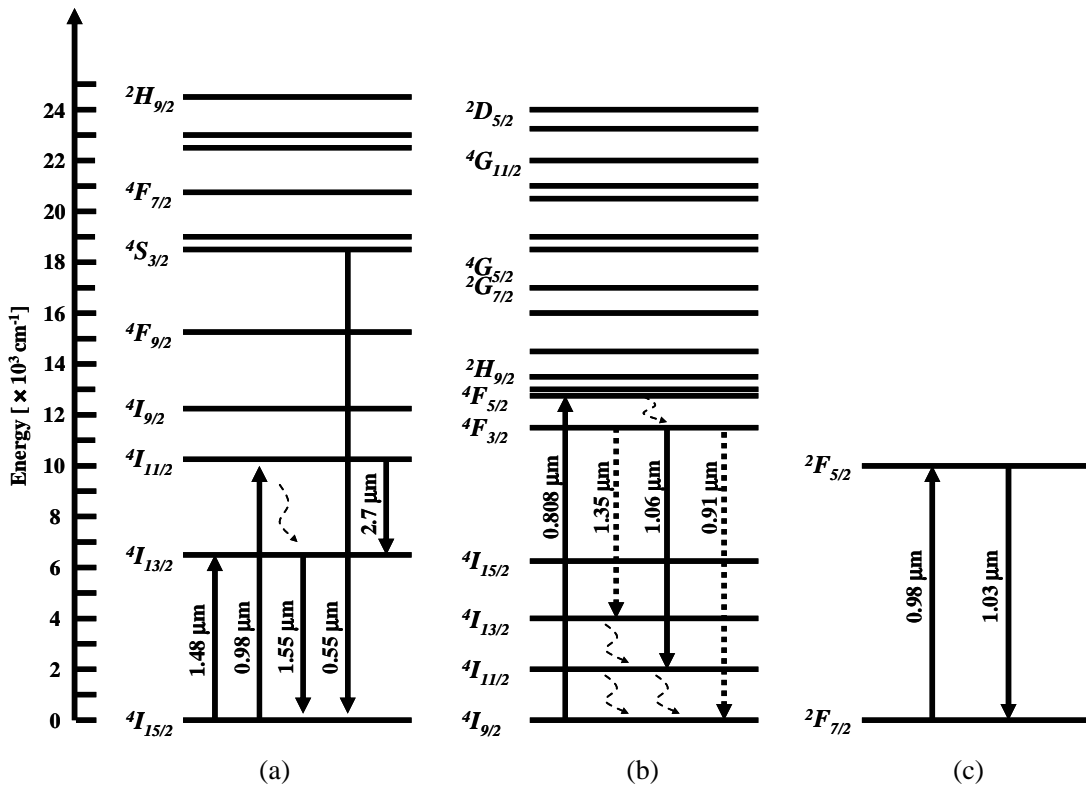


図 1.1 種々イオンのエネルギー準位構造

(a) Er^{3+} イオンの場合、(b) Nd^{3+} イオンの場合、(c) Yb^{3+} イオンの場合

Nd 添加媒質より優れた特性を持つ高出力レーザー媒質として、イッテルビウム (Yb) を添加した媒質が注目され、Yb シリカガラスファイバーレーザーの研究が 2000 年に入り盛んに行われるようになった。図 1.1 に Er^{3+} イオン、 Nd^{3+} イオン及び Yb^{3+} イオンのエネルギー準位構造を示す。 Er^{3+} イオンでは、 ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ の吸収遷移 ($0.98 \mu\text{m}$) と ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ のレーザー遷移 ($1.55 \mu\text{m}$) により 3 準位系が構成される。 Nd^{3+} イオンでは、 ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{5/2}$ の吸収遷移 ($0.808 \mu\text{m}$) と ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ のレーザー遷移 ($1.06 \mu\text{m}$) により 4 準位系が構成される。これらのエネルギー準位構造は複雑であり励起状態吸収 (ESA: Excited-State Absorption) が存在するため励起効率が下がる。 Yb^{3+} イオンのエネルギー準位構造は、基底状態 ${}^2\text{F}_{7/2}$ と励起状態 ${}^2\text{F}_{5/2}$ のみで構成されているため、ESA、エネルギー移動アップコンバージョン及びクロス緩和などの複雑な過程を原理的には無視することができる。基底状態はシュタルク分裂効果により、基底準位とレーザー下準位に分かれている (第 2 章参照)。室温でのレーザー下準位は熱的に励起されレーザー光の再吸収が生じるため、高効率動作させるには強励起により下準位の吸収飽和を起こし大きな反転分布を得る必要がある。このため、 Yb^{3+} イオンは準 3 準位系と呼ばれる。表 1.1 に Yb シリカガラスの特性[17]を Er シリカガラス[18]、Nd シリカガラス[19-21]、Yb:YAG 結晶[22]と比較して示す。Yb 系は Nd 系より上準位寿命が長く、エネルギー蓄積効果大きい。上準位寿命が短いと励起中にも自然放出による励起損失が生じてしまう。また Er^{3+} イオンは石英系ガラス

に対する溶解度が低く均一に高濃度添加することが困難であるが[23]、 Yb^{3+} イオンは濃度消光が少なく高濃度添加が可能で利得媒質長を短くできる。ファイバーレーザーでは相互作用長が短くなるため、非線形光学効果の抑制にも有利である。 Yb シリカガラスは広い蛍光幅・低い量子欠損を有しており、超短パルスファイバーレーザーや高出力ファイバーレーザーとして非常に優れているといえる。量子欠損とは励起光からレーザー光への波長シフトによる光子エネルギーの欠損であり、レーザー媒質中における主な発熱要因となる。

以上で述べた Yb シリカガラスファイバーレーザーの特徴をまとめると次のようになる。

利点

- (1) 励起状態吸収が生じない
- (2) 蛍光寿命が 1 ms 程度と比較的長いため、エネルギーの蓄積能力が高い
- (3) 濃度消光が少なく、高濃度添加が可能で利得媒質長を短くできる
- (4) 量子欠損が 10 % 以下と低く、高平均出力・高繰り返し動作が可能である

欠点

- (1) 再吸収による利得損失が生じる
- (2) 誘導放出断面積が小さい

表 1.1 Er、Nd、Yb シリカガラスと Yb:YAG の特性の比較

| | Er silica glass | Nd silica glass | Yb silica glass | Yb:YAG |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| エネルギー準位 | 3 | 4 | 準 3 | 準 3 |
| 上準位寿命 τ_f | 10 ms | 0.4 ms | 1.0 ms | 1.0 ms |
| 励起波長 λ_p | 980 nm | 808 nm | 975 nm | 940 nm |
| 蛍光波長 λ_L | 1550 nm | 1060 nm | 1035 nm | 1030 nm |
| 量子欠損 | 37 % | 24 % | 5.8 % | 8.7 % |
| 吸収帯域 (nm) | 950 ~ 1030 | 700 ~ 950 | 800 ~ 1100 | 850 ~ 1100 |
| 蛍光帯域 (nm) | 1400 ~ 1650 | 1000 ~ 1200 | 900 ~ 1200 | 950 ~ 1100 |
| 蛍光幅 (半値全幅) | ~ 40 nm | ~ 50 nm | ~ 60 nm | ~ 10 nm |
| 吸収断面積 $\sigma_a(\lambda_p)$ | $0.16 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ |
| 誘導放出断面積 $\sigma_e(\lambda_L)$ | $0.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $1.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $0.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ | $2.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ |
| 飽和フルーエンス J_s | 32 J/cm^2 | 13 J/cm^2 | 32 J/cm^2 | 9.2 J/cm^2 |

Yb シリカガラスファイバーを用いたファイバーレーザーの出力パワーは、過去数年間で急速に増加している。 Yb ファイバーレーザーの CW 出力の時系列を図 1.2 に示す。2005 年には Yb ダブルクラッド大モード面積 (LMA: Large Mode Area) ファイバーで、シングルモードで CW・2 kW を超える超高輝度出力レーザーが報告された[24]。近年のファイバーレーザーの高出力化は、コア・クラッド

ド双方の大口径化により非線形性の低減化がなされたこと及び励起光パワーの増大化によるものと考えられる[25]。また多数のファイバーレーザー出力をバンドル化した 50 kW 級の超高出力ファイバーレーザー(コア径 100 μm のファイバー伝送)も既に実用化されている[26]。高出力 CW レーザーの分野でも、これまで使用されてきた炭酸ガスレーザーや Nd:YAG レーザーから小型化・高効率化が進み、Yb ファイバーレーザーへと替わってきた。更に、高出力 CW ファイバーレーザーによる 100 kW の固体レーザーの時代に進むと予測されており[27]、本格的なレーザー産業応用の時代を迎えようとしている。

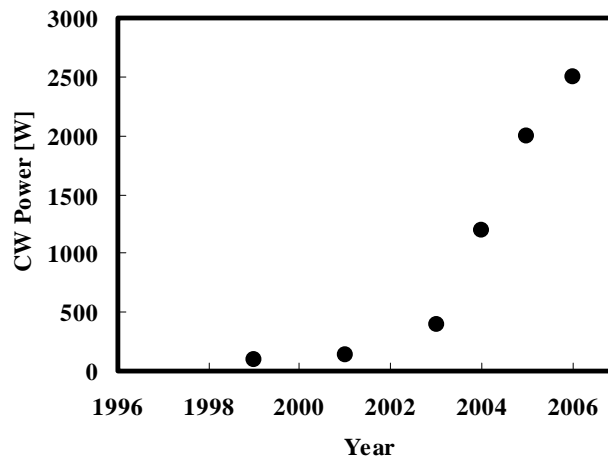


図 1.2 Yb ファイバーレーザーの CW 出力の時系列

参考文献

- [1] T. H. Mainman, *Nature* **187**, 493 (1960).
- [2] A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 106 (1961).
- [3] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366 (1962).
- [4] A. Lampicki, H. Samelson, *Phys. Lett.* **4**, 133 (1963).
- [5] F. J. McClung, and R. W. Hellwarth, *J. Appl. Phys.* **33**, 828 (1962).
- [6] L.E. Hargrove, R.L. Fork, and M.A. Pollack, *Appl. Phys. Lett.* **5**, 4 (1964).
- [7] D. Strickland, G. Mourou, *Opt. Comm.* **56**, 219 (1985).
- [8] Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama, H. Yoshida, S. Matsuo, T. Jitsuno, T. Kawasaki, H. Kitamura, T. Kanabe, S. Sakabe, K. Shigemori, N. Miyanaga, Y. Izawa, *IEEE J. Quantum Elect.* **40**, 281 (2004).
- [9] C. J. Koester, and E. Snitzer, *Appl. Opt.* **3**, 1182 (1964).
- [10] J. Stone, and C. A. Burrus, *Appl. Opt.* **13**, 1256 (1974).
- [11] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **21**, 737 (1985).
- [12] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, *Electron. Lett.* **23**, 1026 (1987).
- [13] 情報通信研究機構超高速フォトニックネットワークグループ, 図解でわかる最新光ネットワーク技術のすべて, 日本実業出版社 (2005).
- [14] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, *Proc. Conf. Optical Fiber Sensors, Postdeadline paper PD5* (1988).
- [15] V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh, and E. Zucker, *Electron. Lett.* **35**, 1158 (1999).
- [16] K. Ueda, H. Sekiguchi, and H. Kan, *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Postdeadline paper CPDC4* (2003).
- [17] H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber, and J. M. Dawes, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **1**, 2 (1995).
- [18] C. R. Giles, and E. Desurvire, *J. Lightwave Technol.* **9**, 271 (1991).
- [19] M. J. F. Digonnet, K. Liu, and H. J. Shaw, *IEEE J. Quantum Electron.* **26**, 1105 (1990).
- [20] Y. Fujimoto, H. Yoshida, M. Nakatsuka, T. Ueda, and A. Fujinoki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1764 (2005).
- [21] T. Sato, Y. Fujimoto, T. Ueda, A. Fujinoki, H. Okada, H. Yoshida, K. Sumimura, and M. Nakatsuka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 6936 (2006).
- [22] M. Inguscio and R. Wallenstein, *Solid State Lasers: New Developments and Applications*, New York (1993).

-
- [23] 須藤昭一, エルビウム添加光ファイバ増幅器, オプトロニクス社 (2000).
- [24] V. P. Gapontsev, D. V. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin, V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov, and S. Ferin, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO Europe), Paper CJ1-1-THU (2005).
- [25] 白川晃, 植田憲一, レーザー研究 **33**, 255 (2005).
- [26] <http://www.ipgphotonics.com/>
- [27] ジェフ・ヘクト, Laser Focus World Japan **10**, 45 (2005).