Applications of ultra-stabilized laser techniques

植田憲一 (電通大レーザー極限技術研究センター)

Ken-ichi Ueda (Institute for Laser Science, University of Electro-Communications)

1. はじめに

レーザーはコヒーレント光源である。したがって、極限レーザーとは光のコヒーレントの極限を追求したレーザーであるが、それらを追求することはとりもなおさず、レーザー本来の応用とはどうあるべきかを追求するものであるべきであろう。本講演では、重力波検出用に開発を続けてきた極限レーザーとその応用、さらにそれらの研究が生み出した新しいレーザーについて紹介する。中には、一見、極限レーザーと対極に見えるものも含まれているが、いずれも極限レーザーの研究なしには発展しなかった。

2. 重力波検出用超高安定レーザー

LD 励起固体レーザーは、レーザー励起と固体媒質という性質を兼ね備えているため、もっとも安定度の高いレーザーである。実際、市販の NPRO と呼ばれるレーザー結晶そのものをリング共振器に利用したレーザーでは、熱的安定化だけで絶対周波数が 4kHz 程度[1]まで安定である。安定化レーザーには、度台となるレーザーそのものの安定度が制御されていない雑音レベルを決定するものなので、このように安定な LD 励起固体レーザーは超高安定化レーザーとしてもっとも優れたものである。レーザーの安定化は共振器調整だけでなく、共振器外の音響変調器、電気光学変調器などを駆使して行うが、重力波検出に必要な特性は参照共振器に対する追従性で、相対安定度である。透過線幅が数 10kHz 以下という超高性能共振器を参照共振器とし、ショット雑音限界を下げるために、8 個のフォトダイオードを並列接続して、 $\delta\nu/\nu=1.5\times10^{-19}$ Hz/Hz の安定度が達成された[2,3]。現在、建設が完了して、調整中の大型レーザー干渉計 TAMA300 では、さらに高出力のレーザーでなくては、その量子限界雑音まで到達することができないので、注入ロック方式で高出力化した安定化レーザーを開発[4]、組み込み調整中である。アーム長 300m のマイケルソン・ファブリペロー干渉計を実際に運転したのは、我が国が世界で最初で、レーザーの安定化の研究も同時に新しい時代に突入したといえる。

3. 超低損失ミラー

超高安定化レーザーのためには、その周波数標準となりうる超高性能ミラーが必要である。しかし、損失が 100 万分の 1 程度の超低損失、料理限界光学素子を作る技術は、我が国にはなかったので、光学メーカーと一緒に開発を進めてきた。実際、フィネスが 10 万以上のミラーを使った光共振器は、透過スペクトル幅が数 kHz と極端に狭帯域なので、ふつうのレーザーでは光学パラメータの測定すらできない。そこで、光学ミラーの開発にも、超高安定化レーザーが応用された。完全に周波数を同調し、空間モードの整合を取ると、共振器内部の光パワーはフィネス倍だけ増大するので、ppm オーダーの吸収、散乱損失も正確に測定できる[5,6]。さらに、mW 級のレーザー入力に対しても、光学薄膜におけるレーザー光吸収が生み出すわずかな熱分布で生じるミラー表面のわずかな変形を、共振周波数のスペクトル計測から測定した[7]。一見、雑音を出さないように見えるミラーであっても、損失は位相を変化させるので、コヒーレント光にとっては雑音源である。重力波用レーザーに関係して開発した超低損失ミラーは、量子限界を意識させる光学素子に始めてなった。

4. 高出力固体レーザー

量子限界レーザーでは、周波数雑音を減少させるには高出力化を測る必要がある。これまでの常識とは一見反対に見えるが、ショット雑音が周波数の安定化限界を決める量子限界では、1 kW の出力がなくては、10 の 21 乗の安定度を実現することが原理的にできない。したがって、安定化のためには高出力レーザーの開発が必要となる。高出力レーザーのための拡大則を検討した結果、ファイバーのように冷却面積の広いレーザーの方が、高出力の限界性直方会と結論し、仮想点光源マルチパス励起方式レーザー[8,9]を開発した。開発思想に共鳴した米国マクダネル・ダグラス社の協力を得て開発した装置は、最大 320W の励起パワーから 108W の出力を発生する。半導体レーザーでなくてはできない励起機構を実現した本装置は、励起分布と熱レンズ効果の関係など、基礎的なデータを供給し続けている。

5. 高出力ファイバーレーザー

冷却の拡大則を産業用レーザーの開発に応用したものが高出力ファイバーレーザーであり、クラッド励起ファイバーレーザーからは、最高73%の効率でレーザー発振させることに成功した[10]。これは Nd^{3+} の量子効率 78%からすると、ほとんど理論効率で発振しており、光の伝播を制御したファイバーレーザーの優秀な特性を実証したものである。

さらに、宇宙開発に関係して生み出されたアイデアと合体して、50ミクロンコアから1kWの出力を発生できるファイバーディスクレーザーを通産省のプロジェクトとして開発中[11,12]である。同レーザーは高効率、高出力でありながら、レーザー共振器の微妙さを持たない取り扱い自由なレーザーであり、まさに産業用レーザーの要求から出てきたレーザーである。周波数安定化とは対極にあるが、同時に、空間モードを完全に制御したレーザーという意味で極限デバイスでもある。そのため、発生して誘導ラマン光まで含めて、すべてを閉じこめてレーザー出力にしているのである。

6. 高出力コヒーレントアレイレーザー

レーザーのコヒーレントな性質を完全に利用するということからいうと、2次元の半導体レーザーの出力光をコヒーレント加算するようなレーザーが理想的である。これまで、ある程度の試みがなされてきたが、21世紀のあるべき姿をはっきり示したものは未だない。本講演では、ファイバーレーザーにおける多出力レーザーの概念を発展させた新しいコヒーレント加算の方式について、概念的に検討を加える。

7. まとめ

重力波検出用に始まった極限レーザーの開発研究は、レーザーそのものの問い直しを必然的に要求した結果、さまざまな応用を生み出した。研究の発展の方法の一つの形として、若い研究者の糧となることを願う。これらの研究は、文部省科研費、重点領域研究、創成的基礎研究等の援助を得た。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] N.Uehara, K. Ueda, Frequency Stabilization of two Diode-Pumped Nd:YAG Lasers Locked to two Fabry-Perot Cavities, *Jpn.J.Appl.Phys.*, vol.33, 1628-1633 (1994).
- [2] N.Uehara K. Ueda, 193mHz Beat Linewidth of Frequency Stabilized Laser-Diode-Pumped Nd:YAG lasers, *Opt.Lett.*, vol.18, 505-507 (1993).
- [3] N. Uehara, K. Ueda, Ultra-high frequency stabilization of a diode-pumped Nd:YAG laser using a high power acceptance photodetector, *Opt. Lett.*, vol.19, 728-730 (1994).
- [4] M. Musha, S. Telada, K. Nakagawa, M. Ohashi K. Ueda, Measurement of frequency noise spectra of frequency-stabilized LD-pumped Nd:YAG laser by using a cavity with separately suspended mirrors, *Opt. Comm.*, vol. 140, 323-330 (1997).
- [5] N. Uehara K. Ueda, Accurate Measurement of Ultralow Loss in a High-Finesse Fabry-Perot Interferometer using the Frequency Response Functions, *Appl. Phys. B*, vol.61, 9-15(1995).
- [6] A. Ueda, H. Yoneda, K. Ueda, K. Waseda, and M. Ohashi, Two-dimensional measurement of optical parameters of superhigh-quality mirrors, *Laser Physics*, vol. 8, 697-702 (1998).
- [7] N. Uehara, K. Ueda, Accurate measurement of the radius of curvature of a concave mirror the power dependence in a high-finesse Fabry-Perot interferometer, *Appl. Opt.*, vol.34, 5611-5619 (1995).
- [8] N. Uehara, K. Nakahara, K. Ueda, Continuous-Wave TEM₀₀ mode 26.5 W output, virtual-point-source diode-arrays pumped Nd:YAG laser, *Opt. Lett.*, vol. 15, 1707-1709 (1995).
- [9] J. Song, A. Liu, K. Okino K. Ueda, Control of the thermal lensing effect with different pump light distributions, *Appl. Opt.*, vol. 36, 8051-8055 (1997).
- [10] A. Liu, K. Kametani, K. Ueda, Brightness compression by optimized resonator of clad-pumped fiber lasers, *Rev. Laser Engineer.*, vol.25, 702-706 (1997).
- [11] K. Ueda, A. Liu, Future of high power fiber lasers, *Laser Physics*, vol.8, 774-781 (1998).
- [12] 植田憲一、高出力ファイバーレーザー —日本の独創的提案—、第2回フォトン計測・加工シンポジウム、東京、1998年11月30日。