

半導体レーザー励起高出力Nd:YAGレーザーの強度安定化に関する研究

三尾研究室 46116 尾関孝文

背景と目的

自然界には、強い力、弱い力、電磁気力、重力という4つの力が存在する。この中の1つである重力は、ほかの3つの力と比べて微視的なスケールでは非常に弱い。そのため重力の性質について、実験による検証は困難であり、実証的解明は進んでいない。たとえば、重力の動的な効果により、重力の波動である重力波の発生が理論的に言われているが、重力波を直接検出した例は世界にまだない。

現在、天文学的イベントによって放出される重力波を検出する計画が、日本をはじめ世界で進められている。

重力波検出には、レーザー干渉計を用いる。レーザー干渉計の感度を、重力波検出が可能なレベルまで改善するためには、高出力で強度雑音が小さいレーザーが必要である。現在、高出力レーザーはすでに加工用として市販されている。だが、加工用レーザーには高い強度安定性はない。

そこで、本研究では、半導体レーザー励起Nd:YAGレーザーに対する出力強度安定化をおこなった。半導体レーザー励起Nd:YAGレーザーは加工用高出力レーザーとして一般的であり、重力波検出用レーザーとしても有望である。

本研究に使用したレーザーの出力は2W程度である。重力波検出で求められている出力は150Wなのだが、レーザー励起方法などは共通、励起パワーも同水準であり、本研究で強度安定化が実現すれば、技術の転用は可能と考える。

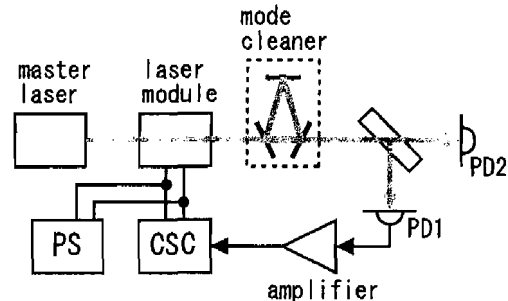


図1: フィードバック制御を用いた強度安定化の実験方法. PD1,2: フォトディテクタ, CSC: 電流引き込み回路, PS: 電源.

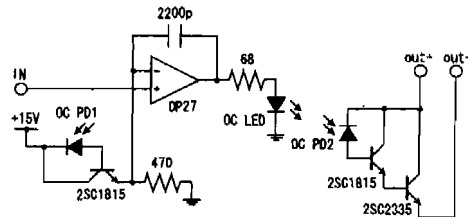


図2: 電流引き込み回路. OC: オプトカプラ.

電流引き込み回路を用いたレーザー強度安定化法

強度安定化の方法を図1に示す。

実験におけるレーザーは、マスターレーザーと、レーザーモジュールによる増幅で構成した。強度安定化にはフィードバック制御を用いた。PD1で計測した光強度信号をレーザーモジュールにフィードバックすることにより光強度を安定化した。

レーザーモジュールの制御には、電流引き込み回路[1]を自作して用いた(図2)。この回路は電源から出力される電流を一部引き込む回路である。電源は定電流源になっ

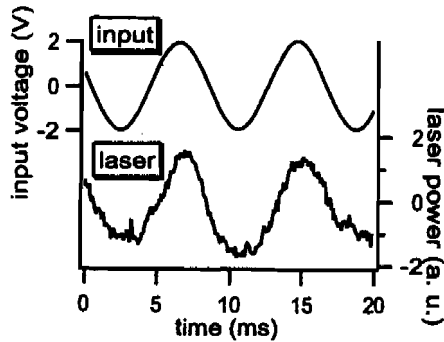


図3: 電流引き込み回路による光強度変調.

ているので、引き込んだ回路を制御すればレーザーモジュールに流れる電流も制御できる。制御性を試すために電流引き込み回路に正弦波信号を入力すると、光強度は確かに変調された(図3)。

実験結果

強度安定化の実験結果を図4に示す。この強度雑音は、図1におけるPD2で計測し、スペクトルアナライザで周波数分解したものである。フィードバック制御により強度雑音が下がり、安定化が実現していることがわかる。モードクリーナー(MC)という光共振器を導入する(図1)ことによってさらなる安定化を実現した。

考察

フィードバック制御による雑音の抑制について考える。フィードバック制御における雑音の流れを図5に示す。ここで、元の雑音 n_{in} に対し、フィードバック後の雑音 n_{out} は、

$$n_{out} = \frac{1}{1+hd}(n_{in} - hn_d - n_h) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 d : デテクタ系の伝達関数、 n_d : デテクタ系の雑音、 h : フィー

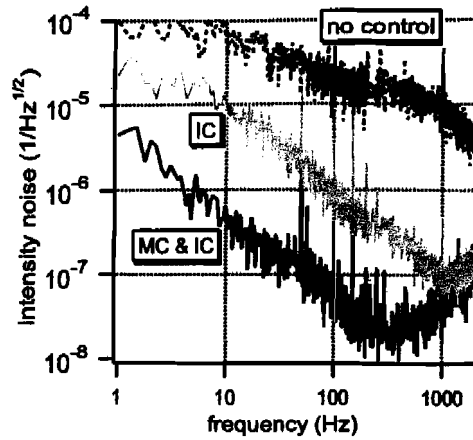


図4: 強度安定化の結果. IC: 強度安定化制御, MC: モードクリーナー.

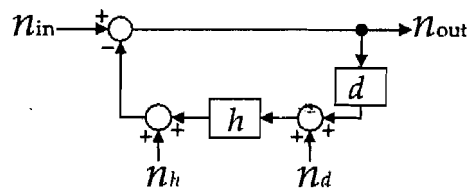


図5: フィードバック制御と雑音.

ドバック系の伝達関数、 n_h : フィードバック系の雑音、である。式(1)から、 $|hd|$ が十分大きければ n_{in} が抑制されることがわかる。また、 n_{in} が十分抑制された場合、

$$n_{out} = -n_d/d$$

となる。ここで、 n_d は、雑音が、本流から分かれてから、ディテクタで検出され、増幅器で増幅されるまでの間(図1)に発生する雑音すべてであり、これらすべてをここではディテクタ系と呼ぶ。

ここで、 n_{in} の残り、 n_d 中の電氣的部分は計測でき、ディテクタの量子雑音は算出できるので、これらと安定化後(MCあり)の強度雑音を比べた(図6)。すると、実際の雑音は、これら3つの雑音を足したものよりも、周波数が100 Hz以下の帯域ではずっと大きいことがわかった。このこと

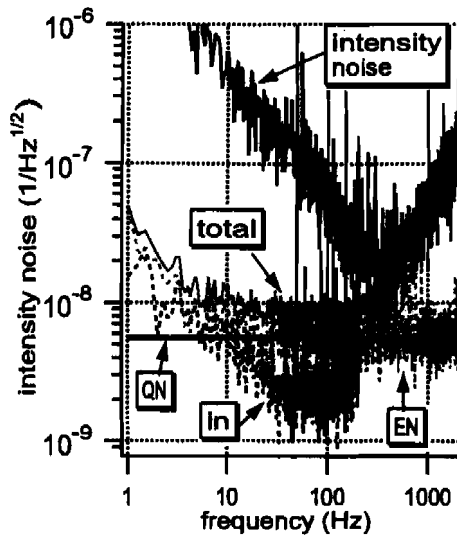


図 6: 強度雑音とシステムの雑音. QN: デテクタの量子雑音, in: n_{in} の残り, EN: デテクタ系の電氣的雑音, total: 以上 3 つの合計.

から, 安定化後の強度雑音の原因は, デテクタ系の光学的雑音 (直接計測不可) にあると推測できる.

また, 図 6 は MC がある場合だが, MC が無い場合もこれら 3 つの雑音は同水準だった. このことから, MC によって強度雑音が改善された (図 4) のは光学的雑音の改善によるためと考えられる. そこで, MC による光への影響を調べた.

レーザーの照射位置揺らぎは, MC による改善が見込まれ, 光学的雑音になる可能性も指摘されている [2]. そこで, この照射位置揺らぎを四分割フォトデテクタで計測した (図 7). その結果, MC の使用により, 安定化時の強度雑音も位置揺らぎも減少することがわかった. だが, MC を使用した場合は, その後に位置揺らぎが付加されたとしても強度雑音の悪化はあまり見られなかった. このことから, 残っている強度雑音の原因は位置揺らぎによるものではないと思われる.

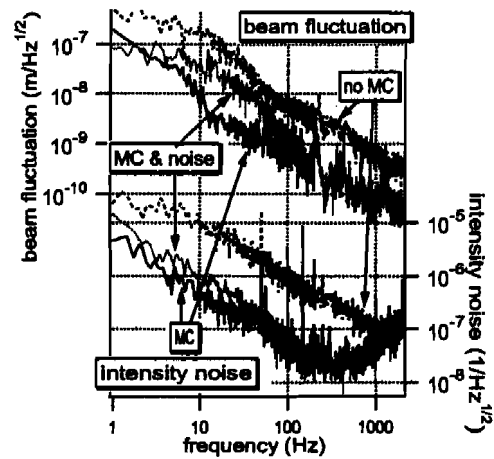


図 7: ビーム位置揺らぎと安定化時の強度雑音.

結論

電流引き込み法を用いたフィードバック制御により, レーザーの強度安定化に成功した. MC の使用によりフィードバック制御の性能を改善し, さらなる強度安定化に成功した. 強度安定化後に残った強度雑音は, デテクタ系の光学的雑音によって発生していると思われる. 残った強度雑音は, ビーム位置揺らぎによるものではないと思われる.

参考文献

- [1] R. S. Abbott and P. J. King, Rev. Sci. Instrum. 72;1346-1349, 2001.
- [2] J. Rollins et al., Opt. Lett. 29;1876-1878, 2004.