

YAG レーザのモード同期

Mode Locking of YAG Laser

藤 井 陽 一*・三 木 栄*

Yoichi FUJII and Sakae MIKI

1. はじめに

最近、固体化されたあたらしい連続波発振のできるレーザとして、YAG レーザがある。これは、強誘電体のガーネット族の一種で、可視光でも透明な Yttrium Aluminum Garnet に、従来から、発振開始値のひくいことで知られており、 CaWO_4 結晶や、光学ガラス中にドーパされてレーザ作用をさせてきたネオジム (Nd) イオンをいれたものである。この YAG 結晶は、レーザ媒質を含有させる。いわゆる host crystal として、安定性がよく、透明度が Nd のレーザ発振波長 ($1.06\mu\text{m}$) に対して高く、かつ発振開始励振エネルギーがちいさくてすむので、Nd 用の host crystal としては最良のものといわれている。

YAG レーザは室温のタングステン電球、あるいは、Kr 放電管の励振で連続発振が可能であり、その干涉性も比較的すぐれ**ているので、通信用のレーザ光源として、また、固定化したレーザ光源として、有望なものと考えられている。

光通信の方式としては、いわゆる光 PCM 方式が有望なもののひとつとされ、それには、ガス・レーザの場合も同様に、モード同期といわれる操作を行ない、発振している多数のレーザの線スペクトル同志の位相を同期させ、一本の細い光パルスをうる。このパルス幅は、ほぼ、全発振線幅に比例すると考えられるので、YAG : Nd^{3+} レーザではこれがガス・レーザより広いので、より細い幅のパルスを発生できる点で有利であると考えられている。

この報告では、これらの基本的な点をたしかめるために、YAG レーザにモード同期を実際にかけてみて、この特性がどのくらいまで実現されるかを実験的にくらべたものである。

使用した YAG : Nd^{3+} ロッドは $3\text{mm} \times 75\text{mm}$ 長のもので、モード同期用の結晶としては、 $5 \times 5 \times 15\text{mm}$ の大きさの LiNbO_3 結晶をもちい、出力鏡の透過率が 3% のとき、立上り 330ps 、半径幅 557ps 、くりかえし 3.33ns の $1.06\mu\text{m}$ 波長のモード同期パルス光が観測された。

2. 実験装置

図 1 に示すようなものである。

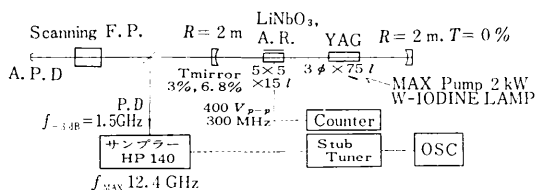


図 1 実験装置

3. 偏波面、エタロン効果, Optical Damage, Photodiode

レーザ Cavity 内には、偏光子を挿入していない。しかし、 LiNbO_3 の端面に、 y 偏波方向屈折率に対する無反射コーティングが行なわれており、出力光は、free running の場合、実験条件下で、 y 軸方向に、平均 98% 以上偏波しており、また、その fluctuation も少ない。Lock を行なうと、この状況は、若干悪化し、したがって、結晶の bremsstr cut 等の処理が望ましい。結晶の無反射コーティング、および、結晶の透過率等は、きわめて、すぐれており、反射を含めた損失は、0.2% 以下程度である。(ただし、 y 偏波に対して。)

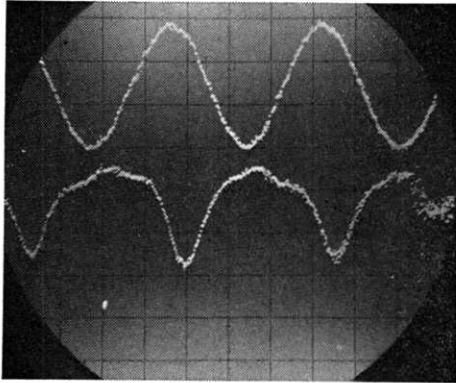
1.06μ における optical damage は、 LiNbO_3 における電力が、 $\approx 15\text{W}$ 程度までは、ないものと考えられる。しかし、最大出力を加えた場合には、damage が観測される。Damage は加熱しなければ、速やかに除くことはできない。(150°C への昇温で十分である。)

Photodiode の -3dB 帯域は、 1.5GHz 程度であり、 6dB/oct で感度は減少する。パルスに対する回復時間は、したがって、 0.25nsec の程度と考えられる。

4. 周波数特性

Cavity 間隔 l_c (光学有効長) $= 500 \pm 0.5\text{mm}$ であり、従って、変調波数は、 $300 \pm 0.3\text{MHz}$ である。300 MHz を中心として、5 MHz 程度の帯域でパルス動作が観測される。周波数 detuning の影響は、パルス半値幅に対しては顕著でないが、波型の fluctuation に対して著しい。図 2, 3, 4 は $\pm 3\text{MHz}$ の帯域における観測パルス

* 東京大学生産技術研究所 第3部 ** 緩和振動が生ずることもある。

図 2 $f_m = 297 \text{ MHz}$

(図 2, 3, 4 に共通)

 $\delta_c = 0.14$

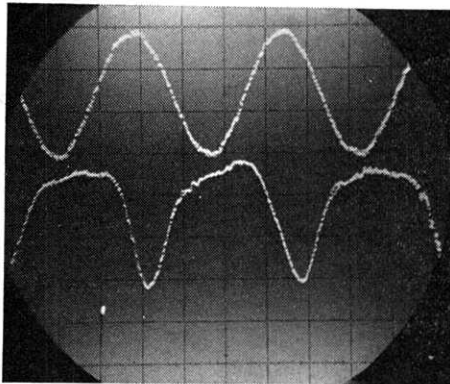
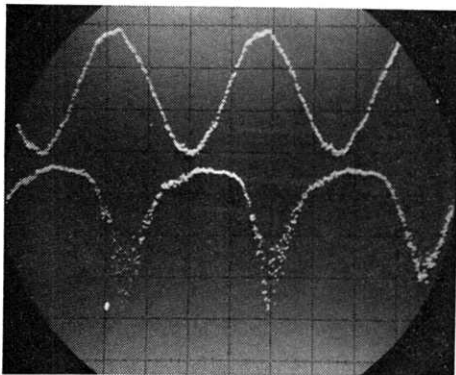
Tmirror = 6.8% (出力側)

 $P_L/P_L \text{ threshold} = 1.21$ (ランプ入力) ($P_L = 1.9 \text{ kW}$)

水平軸 1 nsec/div

垂直軸 上 57 V/div (結晶電圧)

下 0.4 mA/div (Diode 電流)

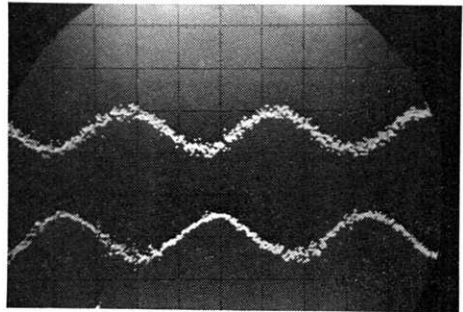
図 3 $f_m = 300 \text{ MHz}$ 図 4 $f_m = 303 \text{ MHz}$

である。

図 2, 4 は得られた波型のうち、良質な部分に相当し、通常は、十分な Locking がかかっているとは言いがたい。

5. Phase Retardation に対する特性

パルス半値幅 t_p は、phase retardation δ_c に対し、 $t_p \propto \delta_c^{-1/4}$ の関係がある。図 5, 6, 7 は、 $\delta_c = 0.0192 \sim 0.288$ に対する、観測パルスである。

図 5 $\delta_c = 0.0192$ ($V_c = 23 \text{ Vp-p}$)パルス半値幅 t_p
(実測) $\times \frac{1}{1.56}$ に縮む $\delta_c^{1/4}$ $\times 1.50$ に増す

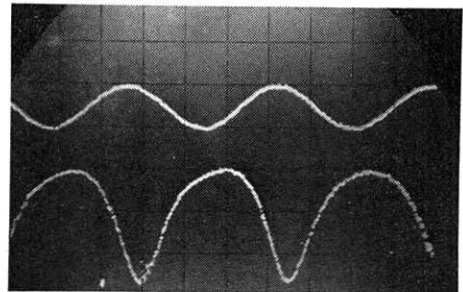
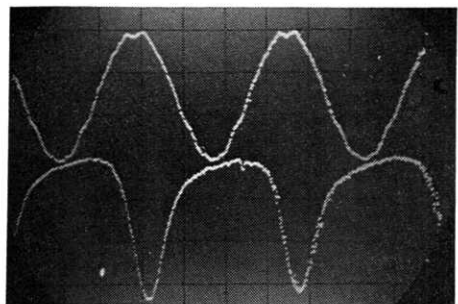
(図 5, 6, 7 に共通)

 $f_M = 300 \text{ MHz}$

Tmirror = 6.8%

 $P_L/P_L \text{ threshold} = 1.21$ ($P_L = 1.9 \text{ kW}$)

水平軸 1 nsec/div

図 6 $\delta_c = 0.096$ ($V_c = 113 \text{ Vp-p}$) $\times \frac{1}{1.41}$ に縮む $\times 1.31$ に増す図 7 $\delta_c = 0.288$ ($V_c = 340 \text{ Vp-p}$)

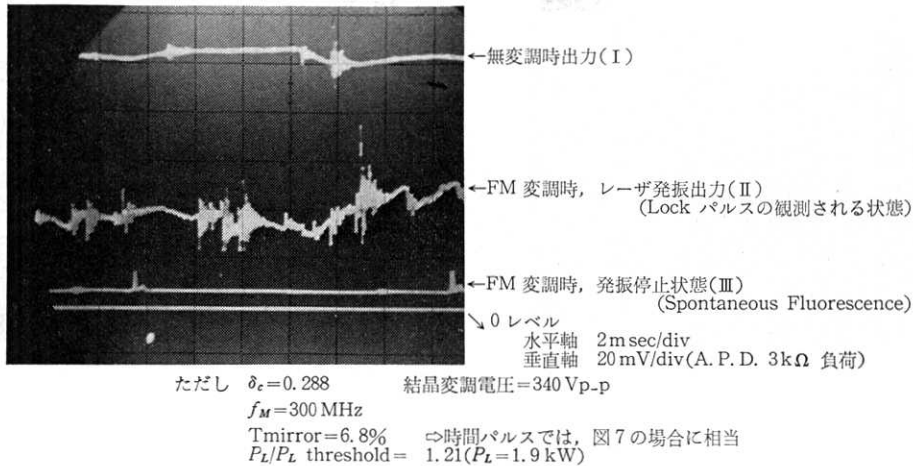


図 8

6. 平均出力

FM 変調時には、free run に比して、大幅な出力の低下が認められる。図 8 は、A. P. D. に依る、平均出力観測波形である。

FM 変調時には、等価的ロスが増大しているものと考えられる。図 8 の II, III は外部条件は等しいが、機械的振動等により、発振の停止する場合が存在するものと考えられる。

7. 発振帯域

Locking 時の、発振スペクトル帯域は、無変調時の 1/10 程度ときわめて狭く、発振出力の低下 (等価的ロスの増大) と密接な関係があると考えられる。

図 9 は、図 7, 8 の状況における縦モードである。4 本の縦モードが、発振に寄与しており、 $\tau_p=1/N \cdot T_M$ によれば、 $N=4$ 、 $T_M=3.33 \text{ nsec}$ より、 $\tau_p \approx 800 \text{ psec}$ であり、観測されるパルスの程度になる。(図 7 参照)

図 10, 11 は、free run および、FM 変調非発振時のスペクトルである。

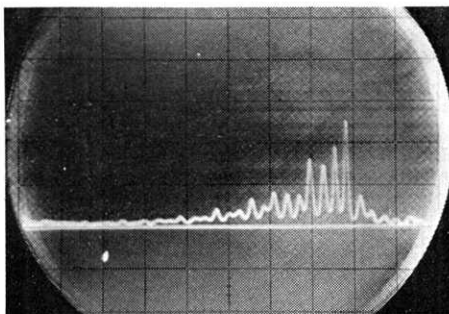
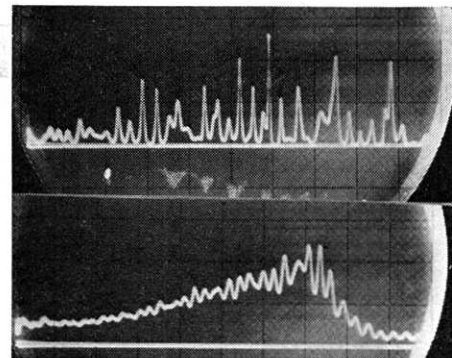


図 9 Locking 発振時のスペクトル
 水平軸 1.05 GHz/div
 垂直軸 20 mV/div

図 9, 10, 11 は、縦軸のレベルが異なっている。



上・図 10 free run 発振時のスペクトル
 水平軸 1.05 GHz/div (上下共通)
 垂直軸 200 mV/div
 下・図 11 fluorescence のスペクトル
 垂直軸 10 mV/div

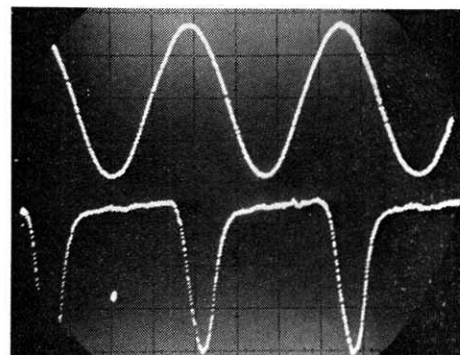


図 12
 パルス立上がり時間 $T_r=330 \text{ psec}$
 パルス幅 $\tau_p=557 \text{ psec}$
 繰り返し 3.33 nsec
 水平軸 1 nsec/div (図 12, 13, 14 に共通)

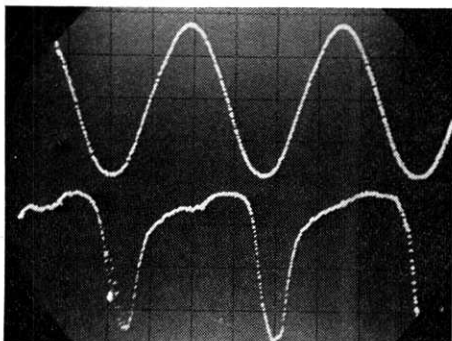


図 13 図 13 に比し、パルスの位相が 180° 変化している

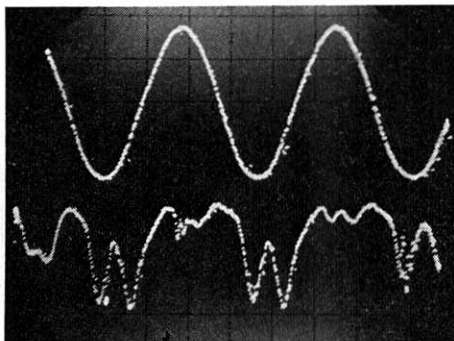


図 14 変則的なパルス

8. 3% 透過率反射鏡によるモード同期

free running の帯域 (スペクトル) が広い、および、 LiNbO_3 の負荷電力が小さくできる等により、実験は、主に 6.8% mirror を用いたが、下記は、3% mirror を用いた時のパルス特性である。

図 12, 13, 14 は同一条件で観測される種々のパルスであるが、このうち、13, または、14 が通常見られる。

9. 結 論

現在得られるパルスは、発振スペクトル帯域、等価的 loss 等により制限され、半値幅、550 psec 程度である。さらにパルスを鋭くするには、エタロン効果の完全な除去、偏波面の確定等、 unnecessary loss を除去する必要があると考えられる。また、機械的振動、optical damage 等も改善しなければならない。(1971 年 10 月 11 日受理)

(p. 27 よりつづく)

- 2) 後藤信行, 時田澄男: 生産研究 **23**, 166 (1971)
- 3) 後藤信行, 李章鎬, 時田澄男: 生産研究 **23**, 146 (1971)
- 4) Paul E. Fanta: *Chem. Rev.*, **38**, 139 (1946)
James Forrest: *J. chem. Soc.*, **1960**, 566
- 5) P. H. Gore, G. K. Hughes: *J. chem Soc.*, **1615** (1959)
- 6) 永井芳男, 後藤信行, 小川昭二郎: 有合成 **28**, 930 (1970)
- 7) M. Busch, W. Weber, H. Zink: *J. Prokt. Chemie*

155, 163 (1940)

- 8) 後藤信行, 時田澄男, 李章鎬: 生産研究 **22**, 482 (1970)
永井芳男, 長沢孝太郎: 工化 **69**, 74 (1966)
- 9) Kleiderer, E. C. Adams: *J. Am. Chem. Soc.*, **55**, 4219
- 10) 後藤, 時田, 湯浅, 佐藤, 李: 生産研究 **21**, 470 (1969)
- 11) P. E. Fanta: *Chem. Rev.*, **64**, 613 (1964)

正 誤 表 (11 月 号)

ページ	段	行	種 別	正	誤
2			図 1	横軸の原点 1	横軸の原点 0
4	右		図 5	必要な関係を示す。	必要な関係も示す。
29	〃	下 2	説 明 文 本 文	パワー・スペクトル・レベル	パワー・スペクトルレ・ベル