レーザーノート 1

安定化モード同期Nd:YAGレーザーの開発研究

豊田 浩一*

Development of Stable Mode-Locked Nd:YAG Lasers

Koichi TOYODA*

1. まえがき

Nd:YAGレーザー光の高次高調波発生等により1000Å以下の短波長レーザー光を得る技術が確立されたことにより、レーザー技術の1つの重要な目標であったVUVレーザーを用いた計測がすでに現実のものとなりつつある。さらにこのような波長域の拡大と並行して時間域での要請もつよく、ピコ秒、サブピコ秒レーザーパルスを用いた理化学的研究も盛んである。これらの分野での研究をさらに推進し、精度のよいデータを能率よく蓄積して行くためには何と言っても基本となるレーザー装置の安定性を確保することが必要である。このような状況に対応するため、理研において安定化モード同期Nd:YAGレーザーの開発研究を行い、現在2段目の増巾器まで完成したのでその概要を紹介し、今後の参考に供したい。

基本となるレーザーの種類としてNd:YAGレーザーを選んだ理由としては、まず結晶の非線型光学効果によって高調波発生を行うため光パルスの尖頭出力が大きいことが必要であって、これはネオジムガラスレーザーシステム等によって1.06 μm光の増巾技術がすでに確立されているのでこれを参考にし易いことによる。さらに従来のピコ秒レーザー技術が単一パルスによる測定を主に行っているのに対し、YAGレーザーを使った場合にはくり返し測定が可能にな

り、パルス間のパワーの変動を通常の計測器で平均化、平滑化することが容易になりデータがより精密になると期待される。

反面、レーザー装置の高速くり返し運転において部品、素子の寿命が問題となってくる。事実、この装置の運転経験においてもフラッシュランプ、アバランシトランジスタ、クライトロンなどの信頼性に不明の点が多く、一旦故障した場合それらの交換のため意外と時間がとられることがあった。したがって今後は設計段階で修理が簡単にできるように配慮するとか過酷な使用条件にならないよう十分な検討が必要であろう。

この装置は第1図に示されるように巾5.5m長さ12.6mの実験室の一半に設置され、他の半分はこのレーザーを使用した実験のためのスペースとなっている。レーザー装置の安定化のためには装置自身を精密かつ強固に製作することはもちろんであるが、またその設置場所の環境が安定していることも重要な要素である。そこで以下に装置の概要と併せて設置場所の整備状況および装置の運転状況についても述べることにしたい。

2. 装置の概要

YAGレーザー装置の主な仕様は第1表に示すようなもので、その構成はモード同期Nd:YAGレーザー発振器、単一パルス抽出器およ

*理化学研究所(〒351和光市広沢2-11)

*Institute of physical and Chemical Research (2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351)

Fig. 1 Setup of mode-locked YAG laser.

Table Characteristics of mode-locked Nd:YAG laser

(1) 性能

波長	1.06 μm
出力エネルギー	50 mJ / パルス
パルス巾	30 ~ 100 ps 可変
くり返し	毎秒 1, 2, 5, 10 回および単発
モード	単一横モード
安定性	3 % 以下

(2) 構成

Nd: YAG 発振器	
Nd: YAG 増巾器	2 台
単一パルス抽出器	
色素セル	
施光板	

びNd:YAG 増巾器 2 段よりなっている。以下それらの概要について述べる。

2.1 発振器 YAG レーザー 発振器は第 2 図の写真に示されるように 80cm × 210cm の定盤の上に組立てられている。YAG ロッドの寸法は直径 4 mm × 長さ 75mm で両端ブルースターカット

TP-63031

Fig. 2 Mode-locked Nd:YAG laser oscillator.

From left to right, full mirror, AO mode-locker, aperture, laser head, etalon, output mirror (with flowing dye cell)

である。フラッシュランプは ILC 4 FC (改) キャパシタ容量 70 μF , 充電電圧 500 ~ 900 V 可変となっている。モード同期は熔融水晶を用いた超音波セルと可飽和性吸収色素セルとを併用して行なっている。超音波モード同期のドライバーの周波数は 50 MHz, したがって共振器間隔は約 1.5 m とした。共振器長は全反射鏡のホルダーをマイクロメータヘッドで光軸方向に移動できるようにし、モード同期周波数と同調できるようにされている。可飽和性色素溶液は出力側ミラーに密着させた厚さ 0.5 mm の色素セル中を循環させるようになっている。当初は色素

セルの入射窓もブルースター角にしたが、共振器の調整が困難であったので後にこれはくさび型の窓板に変更した。そのほか、横モード抑制のため直径 $1.4\text{mm}\phi$ のアパーチャー、パルス巾制御用のエタロン板等が挿入されている。なお第3図は発振器ヘッドの外観を出したものである。

2.2 単一パルス抽出器 単一パルス抽出器は、モードロックパルス列より単一のレーザー光パルスを取り出すためのもので直交した1組のポラライザーと KD^*P ポッケルスセルより構成されている。ポッケルスセルの $1.06\ \mu\text{m}$ における半波長電圧は $3.3\ \text{kV}$ である。この電圧は高速ホットダイオード、アバランシトランジスターおよびクライトンの組合せにより発生しパルス巾約 $10\ \text{ns}$ 、パルス立上り、下降時間はともに $2\ \text{ns}$ である。単一パルス抽出器を通過したレーザー光は偏波面が 90° 回転するが、装置の都合で水晶旋光子によって再び水平偏光に戻している。高速ホットダイオードとしては当初 PIN ダイオードを使用していたが、後にパイプナホットダイオードに変更した。

2.3 増巾器 第4図は増巾器の外観写真である。YAG ロッドは $8\text{mm}\phi \times 100\text{mm}$ 、キャパシターバンク容量 $125\ \mu\text{F}$ 、充電電圧 $800 \sim 1500\text{V}$ 可変となっている。YAG ロッドの端面は光軸より 5° 傾け、かつ AR コーティングを施してある。なお、1段目の増巾器と2段目の増巾器との間に切出されたレーザー光の直流分カ

TP- 63033

Fig. 3 YAG laser head

PCP-5148

Fig. 4 YAG amplifier

ットのための色素溶液セルおよびガラス製ソフトアパーチャーが挿入されている。増巾度を一定にするためフラッシュランプ電圧の精度を 10^{-4} 程度にし、さらにシンマー放電を行っている。これによってランプ光量の変動は 1% 程度になっている。またランプの寿命の点よりランプ電流、電流増加率を低く抑えるためパルス成型回路によってランプを駆動するようにした。

2.4 レーザーヘッド冷却法 発振器および増巾器のレーザーヘッドはそれぞれの電源コンソールに貯蔵した脱イオン水を1次冷却水とし、これを循環させ冷却している。1次冷却水は熱交換器において2次冷却水に接触し冷却される。2次冷却水としては水道水を用い毎分 $15\ \text{l}$ の水量を流している。冷却不足に対する保護としては2次冷却水の水圧検出リレーおよび1次冷却水の温度を検出することにより2重の安全回路を有している。

2.5 制御盤 レーザー装置の操作は遠隔操作が可能のように制御盤は独立させ発振器、増巾器のオンオフ、発振器フラッシュランプ電圧の調整、発振のくり返し速度の変更などが手許で行えるようにした(第5図参照)。増巾器フラッシュランプ電圧の調整は制御盤で行わず電源コンソールパネルで行うようにした。このようにした理由は増巾器の増巾度はそれほど頻繁に変える必要はないが、発振器の方はくり返し運転と手動操作とでは最適なフラッシュランプ電圧

TP- 63034

Fig. 5 Control panel

(AMP III, IV switches are prepared for future extension)

が異なる傾向があるので、くり返し速度とフラッシュランプ電圧は手許で調整可能とした方が便利であろうと考えたからである。

3. 設置場所の整備状況

モードロックレーザーを長時間にわたって安定に動作させるためには装置自身を精密かつ強固に製作することのほか、設置場所の環境条件に留意する必要があると考えられた。つまりモード同期の安定性から考えると室温はできるだけ一定であることが望ましく、また床面の振動も少ないことが望まれる。さらに除塵の問題も重要であってダストの付着による YAG ロッド端面の損傷も心配であった。この YAG レーザー装置を設置するために与えられた部屋は自動車道路に沿った 2 階建建物の 1 階にあってこれらの条件はいずれも不満足なものであった。しかし将来、新しく建てる実験棟に移設する予定もあったので、大がかりな改修はやりたくなかった。そんなわけでわれわれが行なった実験室の整備は甚だ不十分なものであると考えている。

3.1 室温の調節 モード同期について考えると、 5°C の室温変化は、長さ 1.5m の共振器に約 $100\text{ }\mu\text{m}$ の変化を生じレーザー縦モード間隔は約 7 kHz 変化することになる。したが

って超音波モード同期素子の変調率を一定にしようと思うと室温の変化はこれ以下に抑えたいと考えた。しかし年間を通じて一定温度に保つためには大容量の空調機を必要とし実現はむずかしかった。そこで空調機は冷暖房能力 11000 kcal/時 程度のものとし、その代りに夏季と冬季とで設定温度を変えて、それに応じて必要ならば、共振器長を再調整することにした。また熱的負荷としては部屋の窓からの輻射によるものが最も影響が大きいので窓ガラスは全面断熱性パネルで閉鎖することにした。窓を閉鎖することは空調機の熱負荷を軽減するばかりでなく遮光のための暗幕が不要となるし、また窓からの砂塵の侵入量を減少させるなど一石三鳥の効用が期待された。しかし室内で可飽和性色素溶液の調合などに有機溶媒を使用する都合上換気の必要があり、このため換気扇 1 台と小型のドラフトチェンバー 1 台を設置している。

3.2 振動対策 さきに述べたようにこの建物は自動車道路に沿って建てられているので車の往来による地盤振動は避けられないと予想された。しかし、構内の類似の場所で振動測定した結果では地盤の振動振巾は $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度であったし、またレーザー装置は床に鉄筋で連結したコンクリート台に載せることにより幾分緩和されるであろうという予測で、振動による影響は成り行きにまかせることとした。

レーザー装置を据付け後、振動測定を行なった結果では床面、ベンチ上ともにやはり最大 $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度の水平振動があることが判った。また上下振動と水平振動とを比較してみると、上下振動の方がより高周波成分を多く含むが振巾は水平振動の $1/2 \sim 1/3$ であった。また予期しなかったことは外部からの振動にくらべて冷却水のポンプによる振動レベルが意外に高かったことである。これらのデータは今後、レーザー実験棟を建てる際活かして行きたいと考えている。

問題となるのは、レーザー共振器等に与えるこれら振動の影響である。定量的に評価はしていないが、数日を経るとレーザーパワーが数 10

%低下することがあるのでやはりこれは振動の影響であろうと推測している。

3. 3 除塵対策 実験室の空気を清浄に保つことがいかに困難であるかは一寸、考えただけでも想像できるし、まして一旦汚れた部屋の清浄度を回復することは不可能に近いと言われている。しかし YAG ロッド端面にダストが付着したために高価な YAG ロッドを壊してしまっても困るのでとにかく思いつくことは全部やってみようということになった。先に述べたように窓を全面、パネルで閉鎖したのもその1つである。そのほか実際にどの程度の効果があったかは不明であるが除塵対策として行ったことを列挙してみると 1) コンクリート床にプラスチックタイルをはること, 2) 露出したコンクリート面には塗装すること, 3) 室内は上ばきに履きかえること, 4) 天井に露出している配管類に積ったほこりを拭いとることなどであった。そして最後にすべきことは実験の都度 YAG ロッド端面を懐中電灯で照らして検査し、目に見えるダストが付着しているのを発見したときは綿棒の先でこれを取り去ることである。結果的に述べると設置当初は毎日 1 ~ 2 個のダストを発見したが、10ヶ月を経た現在ではかなり減少したように思われる。

4. 装置の運転状況

レーザー装置を設置した部屋が昭和51年11月に明け渡され整備に3ヶ月要し昭和52年2月に装置が搬入された。以来、今日に至るまで約10ヶ月運転を行って来たので、その状況について若干触れたい。まず出力パワーであるが、当初の予想を上まわって約3GWである。10ppsの連続使用でパワーの安定性は5%p-pであった。数時間の使用ではパワーの低下は認められなかった。しかし、先に述べたように数日経つとパワーが数10%低下するが、共振器を再調整すると、もとに復するので、これは機械的振動により共振器がずれたためと思われる。後で判ったことであるが、冷却水ポンプの起動時にきわめて大きな衝撃があるのでこれと関係があ

るのかも知れない。単一パルス抽出器の切出し効率70%位でありよいとは言えないが、増巾器の方に余裕があるので差支えないと考えている。部品の故障については、とくに単一パルス抽出器に使用しているアバランシトランジスタは多数予備を用意しておき、アバランシ電圧の似通ったものを組にして使用するのが経過は良好のようである。クライトロンスイッチは劣化が進行してくるとジッターが増し、そのためにパワー変動率が増大する。この装置では許容ジッターが小さいので寿命回数は 10^6 程度であろう。そのほか程度の大小はあるが不備な点がいくつかあった。それらについてはその都度改良し信頼性向上に向っている。

5. あとがき

ピコ秒 YAG レーザーを安定に動作させるために準備段階で考慮したことおよび設計したことを中心に紹介した。2段目の増巾器までを含めて過去10ヶ月に亘り使用しているが、パワーの安定性については当初の目標通り $\pm 3\%$ の変動範囲に入っている。しかし長時間運転に対しては部品等の寿命の問題があり、またレーザー共振器の経時的ずれに対しては地面の振動の影響が無視できないと考えている。これらについては今後さらに検討しより安定なものにして行きたいと考えている。