レーザー技術ノート

大出力波長可変ピコ秒パルスの増幅システム

浅 香 修 治*・中 塚 宏 樹*・藤 田 雅 幸*・松 岡 正 浩**

(1982年4月19日 受理)

Amplification System for High Power Tunable Picosecond Pulse

Shuji ASAKA*, Hiroki NAKATSUKA*, Masayuki FUJITA*,
and Masahiro MATSUOKA**

(Received April 19, 1982)

1. ま え が き

ピコ秒(サブピコ秒)パルスの開発によって分光学に於ける時間分解能は飛躍的に向上したが、種々の応用において大出力、かつ波長可変ピコ秒(サブピコ秒)パルスの重要性が増大してきた。大出力の要求は一般の非線型現象の実験ではもちろんである。特にコヒーレントな共鳴励起を用いる実験では現象はパルス面積(光電場とパルス幅の積)に比例するので、パルス幅が短くなるとパルス幅の2乗に反比例して入射光の強度が大きくなければならない。

大出力ピコ秒パルスを得るには大きく分けて2種類の方法が考えられる。1つはもともと出力が大きいモード同期パルスレーザーから出発する方法で、例えばモード同期パルスYAGレーザー出力の2倍波等でそれと同等の共振器長を有する色素レーザーを同期励起し、得られたモード同期パルス列から単一パルスを切り出す方法である。システム全体として単純であるのが利点であるが、モード同期パルスレーザーの

パルス列の数が色素レーザーのモード同期を成長させるのに充分でなく、得られるパルス幅は20~30 psecと広いことが欠点である。

一方cwモード同期色素レーザーではモード同期が十分に成長するので、transform limited pulseを得ることも比較的容易である。これを第2の大出力パルスレーザーにより励起された色素増幅セルで多段増幅すれば、cwレーザーのもつ超短パルス幅とパルスレーザーのもつ大出力という二つの利点を同時に得ることが可能になる。ベル研究所のShank等¹⁾はcw Ar⁺レーザーで励起された受動モード同期cw色素レーザーの出力を、QスイッチYAGレーザーの2倍波で励起された色素増幅セルで3段増幅することによって、6000 Åから6150 Åの波長域において出力4 GW、パルス幅0.5 psecのパルスを得た。(その他の例については文献2参照)

我々は上述の色素レーザーの代りに、モード同期Ar⁺レーザーによる同期励起cw色素レーザーを用いてより広い波長域で同調可能な大出力超短パルス増幅システムを製作した。これに

* 京都大学理学部物理学第一教室(〒606 京都市左京区北白川追分町)

* 分子科学研究所(〒444 岡崎市明大寺町字西郷)

* Department of Physics, Faculty of Science Kyoto University, Kyoto 606.

* The Institute for Molecular Science, Myodaiji, Okazaki 444.

よって、パルス幅 7 psec の場合、単一パルスエネルギー 0.5 mJ を得た。なお、この場合、cw 色素レーザーの同期励起と同時に可飽和色素による受動モード同期も行う Hybrid 方式³⁾を用いれば、サブピコ秒化も容易である。

(本研究は分子科学研究所の客員部門において
行われたものである。)

2. 実験装置及び方法

我々の用いた増幅システムを Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Schematic diagram of the picosecond pulse oscillator and amplifier system.

Ar⁺レーザーはSP-171型で、514.5nmのシングルラインを使い、A O素子によって約80MHzで能動モード同期される。放電電流45Aの時に平均出力は300mWであった。Ar⁺レーザーのパルス波形は常時モニターする必要がある。高速フォトダイオードSP・403B(立ち上がり時間50psec)とサンプリングオシロスコープ(同30psec)で観測される典型的なパルス波形をFig. 2に示す。図で大きなピークのうしろにある数個の山は測定系のリングングによる。測定系の時間分解能を考慮したレーザーのパルス幅は約160psecである。また出力は2時間程度のウォームアップ後は安定するが、周辺の機器からの振動によって出力が低下することがあり、除振に注意を要した。

色素レーザーはSP・375型を用いた。色素はエチレングリコール中のR6Gで波長570～610 nmで発振させた。モード同期Ar⁺レーザーに

Fig. 2 Output pulse shape of the mode-locked Ar⁺ laser detected by a Spectra-Physics 403B fast photodiode and a sampling oscilloscope.

よって80MHzで同期励起された色素レーザーはキャビティダンパーによってくり返し800kHzでパルスを共振器外にとり出した。出力パルスのくり返し周波数を低くしたのは増幅器セル内での色素レーザー光の吸収による発熱で波面が乱れるのを防ぐためである。キャビティダンパーを動作させる際に、色素レーザー光の一部を検出して、それと同期させると色素レーザー出力の不安定性(色素ジェット中の泡等による)のために、同期が一定せず出力が安定し難い。このためキャビティダンパーは Ar^+ レーザーの一部を検出して、これと同期をとる様にした。色素レーザーのキャビティダンパー出力のパルス波形及びスペクトルをそれぞれ auto-correlator (SP409) とファブリ・ペロ分光器で測定した。その結果を Fig. 3(a), 4 に示す。キャビティダンパー出力は 5 nJ/pulse で、パルス波形をガウス形と仮定すると、パルス幅 (FWHM) は 6.2 psec , スペクトル幅 (FWHM) は 3 cm^{-1} で、 $\Delta t \cdot \Delta \nu \approx 0.58$ となり、transform limited Gaussian pulse の場合の約1.5倍であった。

増幅色素セルの励起はQスイッチ YAG レーザー (Quanta Ray DCR-1) の2倍波を用いた。くり返しは10Hzで色素レーザーのキャビティダンパーと同期している。Fig. 5に同期回路を示す。我々の典型的な条件下では、2倍波 (532nm) 出力のパルス幅は7nsec, エネルギーは140mJ/pulseであった。なお、このYAG レーザーにはQスイッチのトリガーパルスとレー

Fig. 3 Second harmonic autocorrelation trace of the dye laser output pulse from the cavity dumper (a), and the amplified pulse (b).

Fig. 4 Fabry-Perot interferogram of the dye laser output from the cavity dumper. Free spectral range is 10 cm^{-1} .

Fig. 5 Schematic diagram of the synchronization circuit between the cavity dumper and the YAG laser.

に細かな構造が乗っていて、それがショット毎に変化する。これが増幅段の最終出力の不安定性をもたらす。(最近 Quanta Ray 社はポッケルセルにかかる Q スイッチパルス回路をアバランシェトランジスタ方式に改良した。これにより電圧の立下りを 1 nsec 以下とし、かつ回路定数から決まる電圧のリングングを、レーザーのモードロック周波数に近づけて、準モードロック状態にすることにより、Q スイッチ出力波形を安定させている。また、パルス幅も 3 nsec 程度に狭くなり、ピーク出力も増加した。この改良後に我々は実験を行っていないが、上述の不安定性は相当に改善されたものと思われる。)

色素レーザー増幅器は 3 段あって、各々ガラスセルから成り、内部に色素のエタノール溶液が循環している。短波長域 ($\sim 580\text{nm}$) では Kiton Red, 長波長域 ($\sim 600\text{nm}$) では R-640 を用いた。増幅されたパルスのエネルギー密度が高いので、増幅率が飽和しない様に色素レーザーのビーム径は増幅段毎に大きくしてある。このため第 1, 2 段は構成の容易な横励起, 第 3 段は大きなビーム径で良いビームパターンを得る様に同軸励起になっている。第 1 段は長方形のセルで YAG レーザー 2 倍波の約 8 % で励起される。励起長は約 40 mm, 色素レーザーのビーム径は $100\mu\text{m}$ 程度である。第 1, 2 段間にはプリズムと飽和吸収体 (色ガラスフィルター, 例えば 600nm 付近では R-61) を入れて第 1 段からの Amplified Spontaneous Emission (ASE) をカットしている。第 2 段は第 1 段と同様のセルを使い, 励起光の約 25 % で励起される。色素レーザービーム径は 2 mm である。第 2, 3 段間には吸収体等は入れていない。(第 2 段で発生する ASE に較べて第 1 段で発生する ASE が多段増幅システムに於いてはより有害であり, 第 1, 2 段間の飽和吸収体は不可避である。) 第 3 段は長さ 70 mm, 直径 20 mm の円筒形セルで, 励起光の約 60 % を使い, 色素レーザービーム径は励起光と同じで約 10 mm である。色素濃度は各段とも増幅率が大きくて, しかも ASE があまり大きく出ない程度に経験的に決めた。

ザーパルス出力に約 3 nsec のジッターがあり, そのパルス波形にはモード間のビート以外に更

3. 実験結果

光パルス強度の増幅率は第1段増幅器で 10^3 倍、第2段で25倍、第3段で5倍で、結局、色素レーザーパルスは 10^5 倍に増幅され、最終段で0.5 mJ/pulseを得た。最終段で出力とASEとの強度比はピーク出力に換算して約2000:1であった。次に最終段出力のパルス幅を slow scan autocorrelator で得た結果を Fig. 3(b) に示す。ガウス形を仮定したパルス幅 (FWHM) は約 6.9 psec で増幅前に較べて特に広がっていない。さらに、スペクトル幅はファブリペロ分光器によって 5 cm^{-1} を越えないことが確かめられた。増幅されたパルスの強度の安定性はせいぜい 50 % 程度で、この不安定性の最大の原因は前述のように YAG レーザーのジッター及びその波形の変動である。

4. まとめ

我々はモード同期 Ar^+ レーザーで同期励起された cw モード同期色素レーザーを YAG レーザーの2倍波で増幅することによりパルス幅 7 psec, エネルギー 0.5 mJ/pulse のパルスを得た。波長に関しては cw 色素レーザーの発振可能な範囲で使うことができる。

現在出力の不安定性が問題であるが YAG レーザーの改良により安定性と増幅率の向上が期待されている。しかしながら、残された改良点として、飽和吸収体として用いている色ガラスフィルターが長時間の使用で損傷を受けること

があるのでこれは吸収体ジェットに替えることによってより長時間に亘って安定化させることが望ましい。

この装置を用いて、我々は約2年前にピコ秒フォトンエコーの実験を行った⁴⁾が、このようなシステムはさらにサブピコ秒化や高調波による短波長化によって広く利用されるものと期待される。

最後に、本システムの開発に当って、終始ご支援を頂いた分子科学研究所の吉原経太郎教授はじめ多くの方々に感謝します。なお、YAG レーザーの同期回路の製作は打木久雄氏 (現在 東大理) に担当していただいた。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) E. P. Ippen and C. V. Shank : *Picosecond Phenomena* ed. C. V. Shank et al. (Springer, Berlin, 1978) p. 103.
- 2) J. L. Martin, R. Astier, A. Antonetti, C. A. Minard and A. Orszag : C. R. Acad. Sc. Paris, B289 (1979) 45.
S. R. Rotman, C. B. Roxlo, D. Bebelaar, T. K. Yee and M. M. Salour : *Picosecond Phenomena II* ed. R. M. Hochstrasser et al. (Springer, Berlin, 1980) p. 50.
- 3) Y. Ishida, T. Yajima and K. Naganuma : Japan J. app. Phys. 19 (1980) L717.
- 4) M. Matsuoka, H. Nakatsuka and M. Fujita : *Picosecond Phenomena II* ed. R. M. Hochstrasser et al. (Springer, Berlin, 1980) p. 357.
H. Nakatsuka, M. Fujita and M. Matsuoka : Opt. Commun. 36 (1981) 234.