

ピコ秒モード同期 Nd : YAG レーザーの試作

小林洋志*・田中省作*・上岡充生**・渡部 明*・笹倉 博*

(1978年5月31日受理)

Design of Picosecond Modelocked Nd : YAG Laser

by

Hiroshi KOBAYASHI,* Shosaku TANAKA,* Mitsuho UEOKA,**

Akira WATANABE* and Hiroshi SASAKURA*

(Received May 31, 1978)

Abstract

Infrared picosecond pulse trains (~ 7 ns pulse separation) have been obtained from a passive modelocked Nd : YAG laser. Modelocking is achieved by a saturable absorber dye (NDL 112) in 1, 2-dichloroethane.

The pulse duration is measured by TPF technique to be ~ 30 ps. The efficiency with which energy is transferred from a lamp to the Nd : YAG rod is determined by the delay time of emission from a krypton flashlamp. By varying the impedance characteristics of the krypton flashlamp, the optimum delay time ($\sim 105 \mu\text{s}$) is obtained. In order to generate the stable picosecond pulse (~ 3 percent fluctuation), the output voltage fluctuation of power supply must be held within ~ 2 percent.

The SHG (532 nm) and the THG (355 nm) of picosecond pulses from the Nd : YAG laser were also obtained by using KDP (KH_2PO_4) crystals of Type I and Type II phase-matching, respectively.

1. ま え が き

パルス発振レーザから発生する光パルスのパルス幅は、マイクロ秒 (10^{-6} s) 領域である。しかし Q スイッチ法を用いることによりパルス幅はナノ秒 (10^{-9} s) 領域まで短くすることができる¹⁾。そしてモード同期法を用いれば、パルス幅はさらに短くなり現在ではピコ秒 (10^{-12} s) 領域にまで短くすることができるようになった²⁾。このようなパルス幅の短縮と同時に、光パルスの尖頭出力も、数 100kW 程度からしだいに高くなり、最

近では、数 100MW の光パルスを発生できるようになった²⁾。

ピコ秒領域のパルスが得られるようになったため、現在では、従来の電気的方法では直接測定が不可能であった固体物質³⁾や有機物質⁴⁾のピコ秒領域での高速緩和現象の研究が可能となっている。また、高い尖頭出力をもつ光パルスが得られたことにより、非線型光学効果の実験にも広く応用されるに至っている⁵⁾。

ピコ秒パルス・レーザには、モード同期を行なった各種のレーザがあるが、まだ多くの問題を残している。そ

* 電子工学科 Department of Electronics

** 現在 : 日本電気株式会社 present Address : Nippon Electronic Co., Ltd.

ここで、我々は、ピコ秒パルス・レーザーとして、モード同期 Nd : YAG レーザを試作し、その動作特性を検討した。本報告では、モード同期 Nd : YAG レーザの簡単な動作原理、試作したレーザーの構造、得られたピコ秒レーザー・パルスの特性、レーザー発振強度の電源電圧依存性さらに試作したレーザーからのピコ秒レーザー・パルスを基本波とした第2高調波および第3高調波の発生について報告する。

2. モード同期によるピコ秒レーザー・パルスの発生方法

2-1 モード同期の原理⁶⁾

レーザー光のパルス幅を短くする方法として、Qスイッチ法がある。しかし、この方法では、パルス幅は数ナノ秒までしか短縮できない。さらに短いパルス幅 ($\sim 10^{-12}$ s) を得るためには、モード同期を行なう必要がある。次にモード同期の原理について、簡単に説明する。

光学共振器内には、 $C/2L$ (C : 光速, L : 共振器長) の周波数間隔で多くの縦発振モードがある。そのため、レーザー発振は、一般に多縦モード発振となる。モード同期を行なわないレーザー発振 (多モード非同期) の状態を Fig. 1(a) に示す。各発振モードの位相 $\phi(\nu)$ は一定でなく、熱雑音的に変化しており、その強度分布 $i(\nu)$ も変化する。このため、時間領域での位相 $\Phi(t)$ 、および強度 $I(t)$ も時間とともに変化している。次にモード同期を行なったレーザー発振 (多モード同期) の状態を Fig. 1(b) に示す。モード同期が行なわれると、熱雑音的に変化していた位相は、 $\phi_{ML}(\nu)$ のように一定値に同期される。また、出力 $i_{ML}(\nu)$ はガウス型分布となる。このとき、 $\Phi_{ML}(t)$ は一定となり $I_{ML}(t)$ は、図のように単一パルスとなる。

モード同期されたときには、 $I_{ML}(t)$ の半値幅 Δt と $i_{ML}(\nu)$ の半値幅 $\Delta\nu$ の間には、次のような関係がある⁷⁾

$$\Delta t \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (s) \quad (1)$$

(1)式より、レーザー発振スペクトルの半値幅 $\Delta\nu$ が 10^{12} Hz のとき、出力レーザー・パルスのパルス幅 Δt は約 10^{-12} s となる。このことから、レーザー媒質のレーザー発振スペクトル幅 (ゲイン幅) が約 10^{12} Hz のとき、ピコ秒レーザー・パルスを得ることができる。我々が使用した Nd : YAG では、ゲイン幅は 1.8×10^{11} Hz であり、(1)式から、出力パルス幅は約 6 ps となる。

2-2 受動モード同期と能動モード同期

モード同期の方法には、受動モード同期と能動モード同期がある⁸⁾。我々は、ピコ秒レーザー・パルスを得るために、受動モード同期を用いた。

受動モード同期は、可飽和吸収体を光学共振器内に置き、可飽和吸収体の非線型特性により、モード同期を行なう方法である。可飽和吸収体には、可飽和吸収色素溶液を用いる。この方法は、Nd : YAG レーザ、有機色素レーザーなどのパルス発振レーザーによく用いられている。

他方、能動モード同期は、変調素子を光学共振器内に置き、この変調素子を外部から、縦モード間隔 ($C/2L$) に近い周波数で変調することによりモード同期を行なう方法である。この方法は、Arイオン・レーザー、He-Ne ガス・レーザーなどの連続発振レーザーによく用いられる⁹⁾。

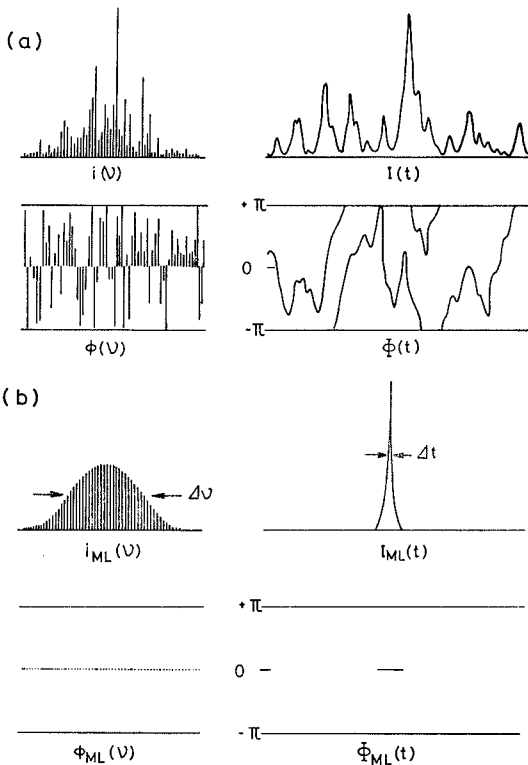


Fig.1 Simulation of the signal structure of (a) A non-modelocked laser, and (b) An ideally modelocked laser (from Bradley and New⁶⁾).

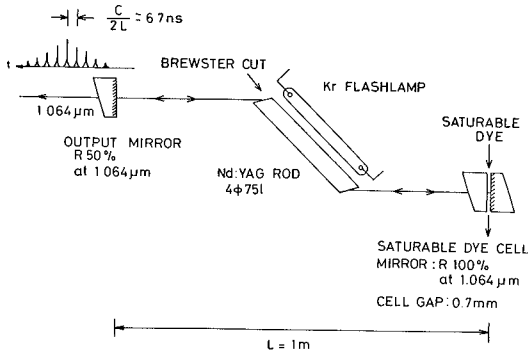


Fig. 2 Optical schematic of the modelocked Nd : YAG laser system.

3. 試作したモード同期 Nd : YAG レーザ・システム

試作したモード同期 Nd : YAG レーザ・システムの構成を Fig. 2 に示す。レーザ媒質には、Nd : YAG を用い、励起はクリプトン (Kr) ・フラッシュランプで行ない、光学共振器長は 1 m である。

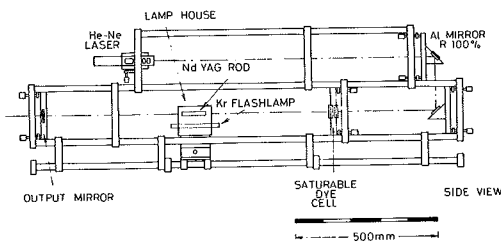


Fig. 3 Modelocked Nd : YAG laser system.

3-1 レーザ発振器

支持装置に組み込んだモード同期 Nd : YAG レーザ・システムを Fig. 3 に示す。

3-1-1 ランプ・ハウス

使用した Nd : YAG ロッド (直径 4 mm, 長さ 75 mm, 米国 Airtron 社製) は、両面ブリュースターカットで、面精度 $\lambda/10$ のものである。レーザ発振波長は、 $1.064 \mu\text{m}$ (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) である。

励起光源には、水冷式 Kr フラッシュランプ 4F2K (直径 4 mm, 放電長 50 mm, 米国 ILC 社製) を使用した。この理由は、Kr フラッシュランプの輝線スペクトルが Nd : YAG の吸収スペクトル ($\sim 750 \text{nm}$ およ

び $\sim 810 \text{nm}$) とよく一致しており、効率よい励起が可能なたためである。

ランプ・ハウスには、真鍮を加工して楕円筒 (長径 60 mm, 短径 56.56 mm) を作り、Kr フラッシュランプと Nd : YAG ロッドを各焦点に配置した。また、紫外線の反射を抑え、 $600 \text{nm} \sim 900 \text{nm}$ の光をよく反射させるために¹⁰⁾、楕円筒の内面は、鏡面バフ研磨した上に $15 \mu\text{m}$ のニッケル・メッキをし、その上に $3 \mu\text{m}$ の金メッキを行なった。

3-1-2 光学共振器

光学共振器は、平行平面型であり、共振器長 $L = 1 \text{m}$ である。使用した 2 枚の反射鏡は、反射率がそれぞれ、100%, 50% で、くさび形の多層蒸着膜平面鏡 (昭和光機製) である。これらの反射鏡を、ステンレスパイプとジュラルミン板で製作したレーザ支持装置に取りつけた。鏡の平行度はマイクロ・メータ・ヘッドにより、 $2 \times 10^{-5} \text{rad}$ (~ 4 秒) 以内の精度で調整できる。Fig. 3 の He-Ne レーザは、光軸調整用である。

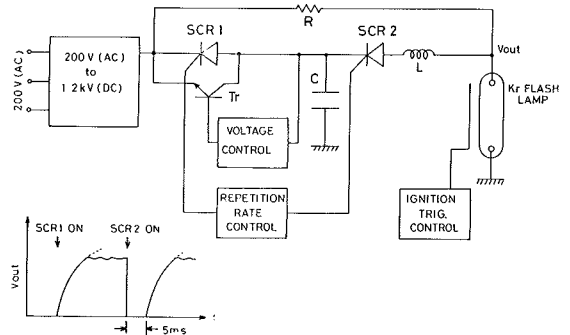


Fig. 4 Block diagram of the power supply.

3-1-3 モード同期用可飽和吸収色素セル

モード同期のために使用した可飽和吸収色素は、NDL 112 (日本感光色素研究所製) である。溶媒にはアミノ酸分析用 1, 2-ジクロロエタン (和光純薬製) を用いた。溶液の濃度は、 0.0125mg/cc である。セルは、100% 反射鏡の片面を利用し、 0.7mm の隙間をあけて、くさび形基板とで構成した。この隙間に可飽和吸収色素溶液を循環させた。

3-2 Kr フラッシュランプ励起用電源

Kr フラッシュランプに使用する電源の概略図を Fig. 4 に示す。この電源は、3 相 200V, 6 A を整流し、充電用

サイリスタ (SCR1) により、容量 $20\mu\text{F}$ のコンデンサに電気エネルギーを蓄え、トランジスタ (Tr) により、蓄えられた電気エネルギーを一定に保つようになっている。コンデンサに蓄えられた電気エネルギーは、放電用サイリスタ (SCR2) およびコイル (L) を通して、最大 20Hz の繰り返し周波数で Kr フラッシュランプに送られる。図の抵抗 (R) は Kr フラッシュランプに常時約 50mA の電流を流すためのものであり、これにより発振時にランプ点灯用イグニッション・パルスを必要とせず発振時の電氣的ノイズを減らすことができる。

この電源の動作の概略を Fig. 4 の内挿図に示す。

4. 試作したモード同期 Nd : YAG レーザの特性

4-1 パルス・トレインの観測

試作したモード同期 Nd : YAG レーザのパルス・トレインを観測した。その結果を Fig. 5 に示す。図から、パルス・トレインは約 20 本のピコ秒パルスで構成されていることがわかる。パルス間隔は、約 7 ns であり、この値は、 $2L/C$ ($C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $L = 1 \text{ m}$) から得られる値 (6.7 ns) とよく一致する。

パルス・トレインは、バイプラナ光電管とオシロスコープを用いて観測した。しかし、この測定系の時定数は約 1 ns であり、Fig. 5 から各パルスのパルス幅を測定することはできない。

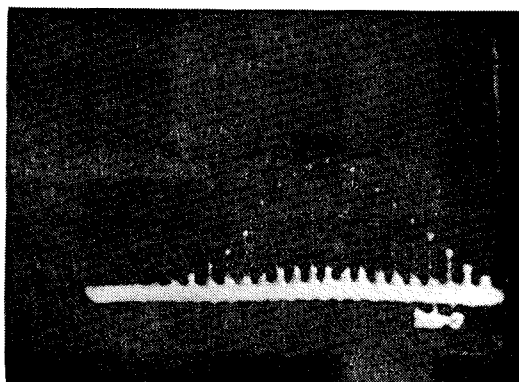


Fig. 5 Oscillogram of the modelocked pulse train from the modelocked Nd : YAG laser.

4-2 TPF 法によるパルス幅の測定¹⁾

TPF (Two-Photon Fluorescence) 法により、試作したモード同期 Nd : YAG レーザの出力パルス幅を測定した。TPF パターンは有機色素ローダミン 6G のエチルアルコール溶液セルに、モード同期 Nd : YAG レーザからのレーザ・パルスを両方向から入射して測定した。その結果を Fig. 6 に示す。図から、パルス幅約 30 ps が得られた。この値は、(1)式から得られるパルス幅 (~6 ps) より約 5 倍大きい、この理由はよくわからない。

4-3 レーザ発振強度と電源パラメータ

Nd : YAG を効率よく励起するためには、Kr フラッシュランプの励起条件を最適にする必要がある。そこで、L (Kr フラッシュランプの発光遅延用コイル) の値を変化させ、このときの Kr フラッシュランプの発光の遅れ時間 (τ) とレーザ発振しきい値電圧 (V_{th})、およびレーザ発振強度との関係を測定した。この結果を Fig. 7 に示す。

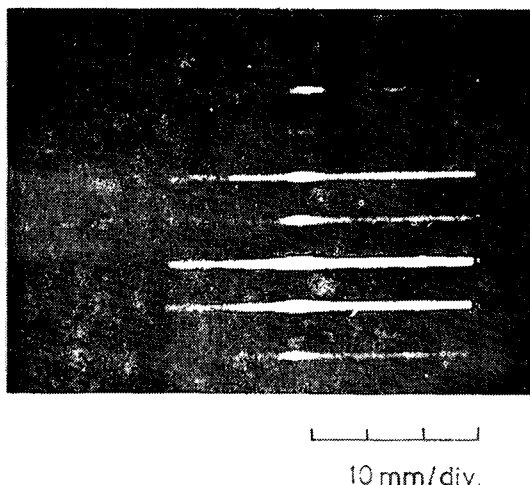


Fig. 6 Photograph of the experimental two-photon fluorescence traces.

発振しきい値電圧 (V_{th}) は、 τ が約 $105\mu\text{s}$ のとき最も低く、約 0.7 kV である。使用したコンデンサの容量は $20\mu\text{F}$ であるから、発振しきい値エネルギーは約 4.9 J である。この結果から Nd : YAG を効率よく励起するためには、Kr フラッシュランプの発光を約 $105\mu\text{s}$ 遅らせる必要があることがわかる。これは、Nd : YAG の

自然放出寿命が約 $230\mu\text{s}$ と比較的長いことによると思われる。

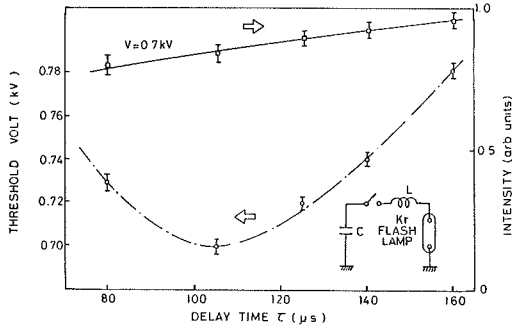


Fig. 7 Threshold voltage and laser-output intensity versus delay time of the Kr flashlamp.

一方、レーザ発振強度と Kr フラッシュランプの発光の遅れ時間(τ)との関係から、しきい値電圧付近 (~ 0.7 kV) では、レーザ発振強度は τ にはほとんど依存しないことがわかる。このことから、ランプの最適遅れ時間は約 $105\mu\text{s}$ である。

次に、Kr フラッシュランプの発光の遅れ時間を最適値 ($\sim 105\mu\text{s}$) にして、レーザ発振強度と印加電圧との関係を測定した。この結果を Fig. 8 に示す。図から、レーザ発振強度は、しきい値電圧付近 (~ 0.7 kV) の方が安定であることがわかる。また、Fig. 8 から電源電圧の変化 ΔV に対するレーザ発振強度の変化 ΔI の比を求めると、 $\Delta I/\Delta V \approx 1.5$ である。このことから、レーザ発振強度の変動を 3% 程度に抑えるためには、電源電圧の変動は 2% 以内に抑える必要がある。

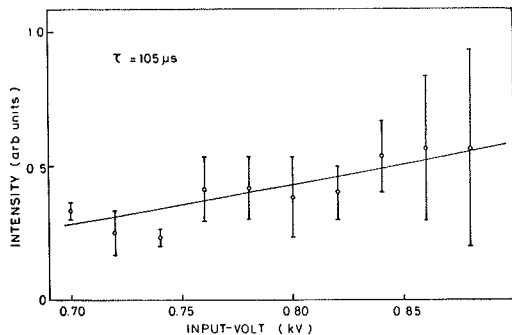


Fig. 8 Laser-output intensity versus input voltage for the modelocked Nd:YAG laser.

5. 第 2 (SHG), 第 3 (THG) 高調波の発生^{12,13)}

非線型光学結晶 KDP(KH_2PO_4 , 負結晶 $n_o > n_e$) を用いて、第 2 (SHG: Second-Harmonic Generation) 第 3 (THG: Third-Harmonic Generation) 高調波の発生を行なった。これにより、赤外 ($1.064\mu\text{m}$), 可視 (532nm) および紫外 (355nm) におけるピコ秒レーザ・パルスを得た。

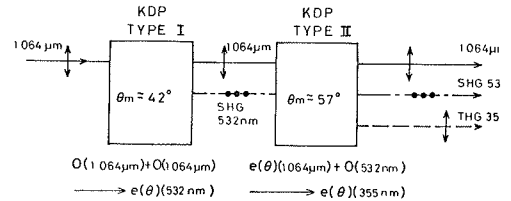


Fig. 9 Optical schematic of the second-third-harmonic generation from the fundamental pulse.

位相整合は角度位相整合を用いた。このときの概略図を Fig. 9 に示す。第 2 高調波の発生には、モード同期 Nd:YAG レーザの基本波 $1.064\mu\text{m}$ を常光線とし、第 2 高調波 (532nm) を異常光線とする Type I 角度位相整合を用いる。このとき、整合角 θ_m は、次式で与えられる。

$$\sin^2 \theta_m = \frac{(n_o^\omega)^2 - (n_o^{2\omega})^2}{(n_e^{2\omega})^2 - (n_o^{2\omega})^2} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式から、 $\theta_m \approx 42^\circ$ を得る。

第 3 高調波の発生には、 $1.064\mu\text{m}$ を異常光線、 532nm を常光線とし、第 3 高調波 (355nm) を異常光線とする、Type II 位相整合を用いる。このとき、整合角 θ_m は次式で与えられる。

$$\left[\frac{\cos \theta_m}{n_o^\omega} \right]^2 + \left[\frac{\sin \theta_m}{n_e^\omega} \right]^2 = \left[\frac{1}{n_e^\omega(\theta_m)} \right]^2 \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\left[\frac{\cos \theta_m}{n_o^{3\omega}} \right]^2 + \left[\frac{\sin \theta_m}{n_e^{3\omega}} \right]^2 = \left[\frac{1}{n_e^{3\omega}(\theta_m)} \right]^2 \dots\dots\dots (3-2)$$

$$n_e^{3\omega}(\theta_m) = \frac{1}{2} \left[n_e^\omega(\theta_m) + n_o^{2\omega} \right] \dots\dots\dots (3-3)$$

上式から、 $\theta_m \approx 57^\circ$ を得る。

我々は、SHG の発生に $10 \times 10 \times 20\text{mm}$, 41° カットの

KDP (Type I) 結晶を使用し, THG の発生には, $10 \times 10 \times 20 \text{mm}$, 60° カットの KDP (Type II) 結晶を使用した。変換効率は, SHG の場合約30%, THG の場合約40%である。

6. ま と め

試作したモード同期 Nd : YAG レーザの特性を次にまとめて述べる。

- (1) Nd : YAG レーザ (発振波長 $1.064 \mu\text{m}$) に可飽和吸収色素溶液 (NDL 112 の1, 2—ジクロルエタン溶液) による受動モード同期を行ない, ピコ秒レーザ・パルスを得た。
- (2) モード同期によるパルス・トレインを観測し, パルス間隔約 7 ns は, $2L/C$ から求めた値 ($\sim 6.7 \text{ns}$) と一致することがわかった。
- (3) TPF 法により, パルス幅を測定し, その結果約 30 ps の値を得た。
- (4) Kr フラッシュランプによる励起エネルギーを最も効率よく Nd : YAG ロッドに送るために, ランプの最適励起条件を求めた。その結果, Kr フラッシュランプの発光の遅れ時間の最適値 ($\sim 105 \mu\text{s}$) を得た。このとき, 発振しきい値電圧は最も低く約 0.7 kV であり, 発振しきい値エネルギーは約 4.9 J である。
- (5) レーザ発振強度は, しきい値電圧付近 ($\sim 0.7 \text{kV}$) が最も安定であり, 電圧が高くなるとレーザ発振強度の変動は大きくなる。この発振強度の変動を約 3 % 以内にするには, 電源電圧の変動を約 2 % 以内にする必要がある。
- (6) 非線型光学結晶 KDP を用いて, 基本波 ($1.064 \mu\text{m}$) から, 第 2 高調波 (532nm , Type I) および第 3 高調波 (355nm , Type II) を得た。変換効率は, それぞれ約 30% と約 40% である。

モード同期 Nd : YAG レーザを試作し, SHG および THG を用いて, 赤外, 可視および紫外領域でのピコ秒レーザ・パルスを得た。これらのパルスを用いた光物性研究への応用については別の機会に報告したい。

謝 辞

この研究を行うにさいして, 有益な助言をいただいた東京大学物性研究所の塩谷繁雄教授ならびに田中裕一氏に感謝します。

装置の製作に協力していただいた, 固体電子研究室の方々, 特に中山博文氏, 田淵晴彦氏および藤原瑞穂氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois : "LASER HANDBOOK" (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1972) p. 529-538.
- (2) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 18-76.
- (3) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 204-273.
- (4) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 275-315.
- (5) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Phlses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 123-201.
- (6) D. J. Bradley and G. H. C. New : Proc. IEEE 62 (1974) 313.
- (7) W. Koechner : "Solid-State Laser Engineering" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 459-474.
- (8) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 59-65.
- (9) A. Yariv : "Quantum Electronics 2nd ed." (Jon Wiley and Sons, Inc., New York, 1967) p. 248-281.
- (10) W. Koechnrr : "Solid-State Laser Engineering" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 327.
- (11) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 83-119.
- (12) A. Yariv : "Quantum Electronics 2nd ed." (John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967) p. 421-436.
- (13) S. L. Shapiro : "Ultrashort Light Pulses" (Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1976) p. 125-133.