

# アレイイルミネーターを用いた等間隔高速繰り返し光パルス発生器

粟辻 安浩\*・久保田敏弘\*・森 市郎\*<sup>†</sup>・志村 努\*\*・黒田 和男\*\*

\*京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

\*\*東京大学生産技術研究所 〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1

## Optical Pulse Generator with High-Repetition-Rate and Equi-Interval Using an Array Illuminator

Yasuhiro AWATSUJI,\* Toshihiro KUBOTA,\* Ichiro MORI,\*<sup>†</sup> Tsutomu SHIMURA\*\* and Kazuo KURODA\*\*

\*Department of Electronics and Information Science, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585

\*\*Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-8558

An optical pulse generator with high-repetition-rate using an array illuminator is proposed. It converts an optical pulse emitted from a pulse laser to an optical pulse train. Interval between beams generated by the pulse generator and their intensities can be equalized for wide range of repetition rate by providing an adjustor of optical path length between the beams and a corrector of the beam profile. The adjustor and the corrector are realized by using two rectangular equilateral prisms and a micro lens array, respectively. A design method of the pulse generator consisting of such modules is described and an example of the design for a typical pulse laser is presented. The characteristics of the generated beams are analyzed and the validity of the proposed pulse generator is verified. The possible optical devices for implementing the pulse generator are also discussed.

### 1. はじめに

並列光コンピューティング、光記録媒体からの並列読み出し、光応用計測などの分野では、空間的に多重化されたビームアレイが有用である。1つの光源からビームアレイを効率よく作成する素子として、アレイイルミネーターがある。これまでに、アレイイルミネーターを実現するための種々の方式が提案されている<sup>1-6)</sup>。筆者らは、導波路型のアレイイルミネーターに関して研究を行ってきた<sup>7,8)</sup>。一方、1つの光パルスから時間的に多重化された光パルス列を作成することは、時間発展する現象の計測、光記録用の光源に有用であると考えられる。そこで筆者らは、アレイイルミネーターを用いて、1つの光パルスから高速繰り返し光パルス列を作成する方法を提案した<sup>9)</sup>。本方法では、

パルスレーザーの1つの光パルスから作られる光パルス列の各パルスの時間間隔は、光が導波路内で導波路の一方の界面で全反射を行い、他方の界面で全反射受け、再びもとの界面に達するまでの時間間隔となる。この時間間隔は、100 MHz程度以下の周波数のパルスレーザーのパルス間隔に比べると十分に短い。そのためにパルスレーザーから光パルスを導波路型アレイイルミネーターに周期的に入射させた場合、1つの入射パルスから作成される光パルス列中の各パルスの時間間隔に比べて長い周期でこの光パルス列が繰り返される光パルス列を得る。この方法で得られた時間多重光パルス列では、時間領域全体でみると等間隔の光パルスが得られておらず、その応用はきわめて特殊な分野に限定される。広い分野において応用が可能な光パルス列を実現するためには、各光パルスの間隔が時間領域の広範囲において一定になっていることが望ましい。そこで、本論文ではアレイイルミネーターを用いた等間隔高速繰り返し

E-mail: awatsuji@dj.kit.ac.jp

<sup>†</sup>現在：東レ株式会社 〒520-8558 大津市園山 1-1-1

<sup>†</sup>Present address: Toray Industries, Inc., 1-1-1, Sonoyama, Ohtsu 520-8558

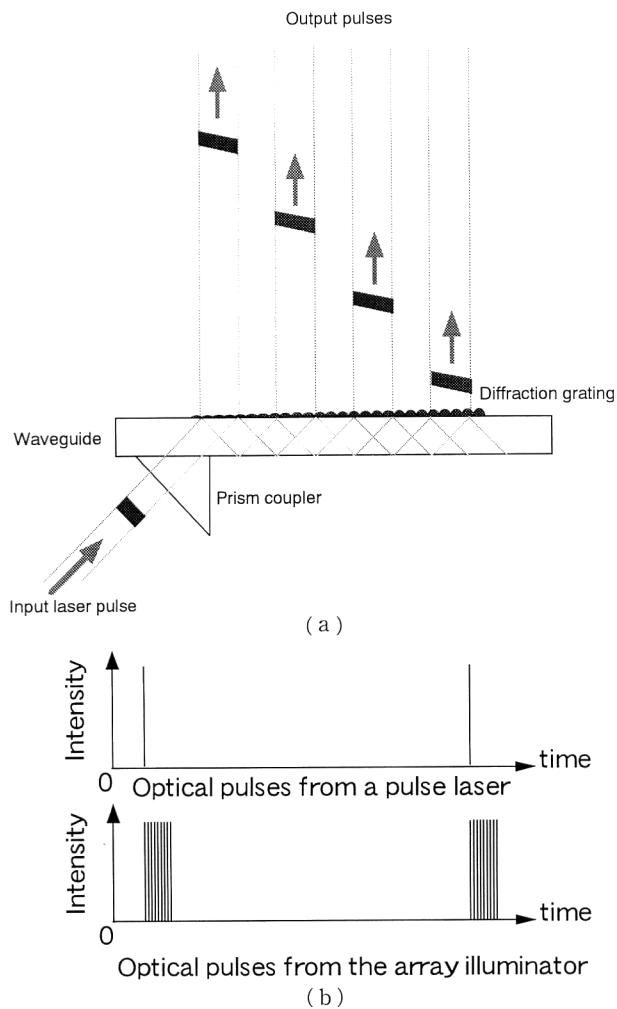


Fig. 1. Generation of high-repetition-rate optical pulse from the array illuminator. (a) Schematic diagram of the optical system, (b) diagrams of optical pulses from a pulse laser and optical pulses obtained by the array illuminator.

返し光パルス発生器を提案する。また、等間隔光パルス発生器を設計する。さらに、設計した光パルス発生器から出力されるビームの空間的な広がり、および入射パルスの時間幅に起因する出射ビームへの広がりについて解析的に評価する。最後に、本光パルス発生器の実装方法について、利用可能な技術に基づいて検討する。

## 2. アレイイルミネーターによる高速繰り返し光パルス発生

Fig. 1(a) にアレイイルミネーターを用いた高速繰り返し光パルスの発生方法の概念図を示す。パルスレーザーからの光パルスはプリズムカップラーを通して導波路内に導かれる。導波路内に入った光は導波路の界面で全反射を繰り返しながら導波路内を伝搬する。導波路の一方の界面に

はグレーティングが形成されている。この界面において光パルスが反射する際に、グレーティングで回折され、光エネルギーの一部が導波路の外に光パルスとして出力される。反射した光パルスは導波路内を伝搬して再びこの界面で反射するときに、そのエネルギーの一部が導波路の外に出力される。この過程を繰り返すことにより、光が導波路の一方の界面で反射して再びこの界面に戻るのに要する時間間隔をもつ光パルス列がアレイイルミネーターから得られる。この方法は、レーザー内部で高速変調を行う方法に比べてより安価かつ簡単に高速な繰り返し光パルスを実現できる。アレイイルミネーターを用いることで、パルスレーザーの1つの光パルスから10~100程度のパルスを作成できる。導波路の幅は1~10 mm程度とするとアレイイルミネーターから射出するパルス列のパルス間隔は10 GHz程度となる。したがって、パルスレーザーの繰り返し周波数が100 MHz程度以下の場合には、1つのパルスレーザーの出力と次の出力との時間間隔が、1つのレーザーパルスから作成される光パルス列のパルス間隔に比べて長くなる。そのため、Fig. 1(b)に示すように、アレイイルミネーターから出力される光パルス列は、広い範囲の時間領域においては、間隔が等しい光パルス列は得られていない。繰り返し光パルスを広い分野に应用することを考えると、低い繰り返し周波数のパルスレーザーを利用する場合でも、広い時間領域で各パルスの間隔が等しい光源を実現することが重要である。

## 3. 等間隔高速繰り返し光パルス発生器

100 MHz程度以下の繰り返し周波数のレーザーを用いた場合でも、時間領域で各パルスの間隔が等しい高速繰り返し光パルスの発生器を検討した。

等間隔高速繰り返し光パルス発生器では、1つの光パルスがアレイイルミネーターに入射したときに得られる光パルス列の各光パルスの間隔を、パルスレーザーの周波数を考慮して長くする必要がある。そのためには、アレイイルミネーターを構成する導波路の界面で反射した光が、次にこの界面で反射するまでの間に適当な光路長をもつ光遅延回路を設ければよい。ここで、アレイイルミネーターからの各光パルス間の遅延時間は等しい必要がある。さらに、等間隔高速繰り返し光パルス発生器を実現する際に、以下の点が重要である。

1. 光量効率が高い
2. 光遅延回路は特殊な機能素子を利用せず、光学素子数が少なく簡単に構成できる
3. 等間隔高速繰り返し光パルス発生器をコンパクトに

実装できる

これらの点を考慮して、Fig. 2 に示す等間隔高速繰り返し光パルス発生器を考案した。等間隔高速繰り返し光パルス発生器はビーム導入部、ビームアレイ作成部、光路長調整部およびビームプロファイル整形部で構成される。

パルスレーザーからの光を本パルス発生器に導入する。ビームの導入はプリズムカップラーで行う。このカップラーは、2個の直角二等辺プリズムの等辺のうちグレーティングを装着していないいづれの辺に設定してもよい。

ビームアレイの作成は、導波路型アレイイルミネーターと同様にグレーティングを用いて実現する。グレーティングは、一方のプリズムの等辺の一辺にとりつけられている。光パルス列の各パルスのパワーを等しくするために、 $k$  番目に射出するビームに対してグレーティングの回折効率  $\eta_k$  は次式に基づいて変化させる<sup>8)</sup>。

$$\eta_k = \frac{1}{N - k + 1} \quad (1)$$

ここで、 $N$  はビームアレイのビーム数である。

光路長の調整は、同じサイズの2個の直角二等辺プリズムで実現する。2個のプリズム間を光が周回し、各周回ごとに、1つのビームを射出する。直角二等辺プリズムの斜辺を向かい合わせて平行に配置する。また、各プリズムの頂点を結んだ線と斜辺とのなす角度が直角からずれるようにプリズムを配置する。2個のプリズム間を光が周回する構成なので、少数の光学素子を用いてコンパクトに実装できる。光量効率を高めるために、プリズムの斜辺には反射防止膜を設定する。

入射した光パルスは伝搬距離にしたがい、そのスポットサイズが広がる。アレイイルミネーターから出力される各ビームは、プロファイルが著しく異なるという問題が生じる。そのために、本光パルス発生器では、各ビームのプロファイル等を等しくするために、ビームプロファイル整形部を設ける。ビームプロファイルの整形には、微小レンズを用いる。ビームプロファイルの整形として、ビームがプリズム内を周回するごとに微小レンズが必要なので、これらのレンズの実装を容易にするためにモノリシックに実装された微小レンズアレイで実現する。

本光パルス発生器の動作を以下に述べる。パルスレーザーからの光はプリズムカップラーを通して、プリズム内に入射する。プリズムを通った光は、アレイイルミネーターに入射する。グレーティングで光パワーの一部は出力され、残りは反射してプリズムから抜けて他方のプリズムに入射する。他方のプリズム内で2回反射を受けた光は、再び一方のプリズムに入射する。この光はプリズム内で1回

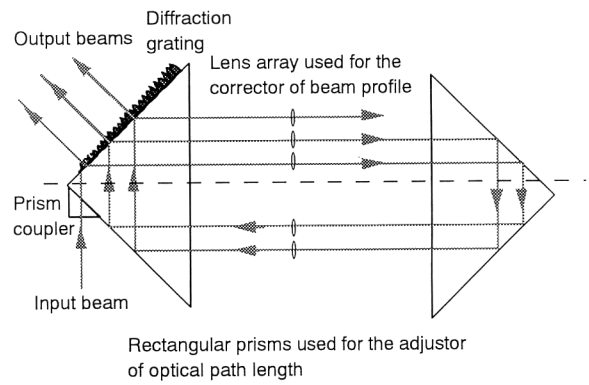


Fig. 2. Composition of the high-repetition-rate optical pulse generator.

反射した後、再びアレイイルミネーターに入射し、そのパワーの一部を射出する。反射した残りのビームは、もう一方のプリズムに向かう。この過程を繰り返して、高速繰り返し光パルスを発生させる。

#### 4. 等間隔高速繰り返し光パルス発生器の設計法

提案する等間隔高速繰り返し光パルス発生器を構成するために、本光パルス発生器の設計法を考案した。Fig. 3 にその設計の流れを示し、以下に設計法について説明する。アレイイルミネーターが設定されているプリズムと他方のプリズムをそれぞれ、プリズム1、プリズム2で表す。

##### 4.1 光路長調整部の設計法

まず、プリズムの大きさ、2個のプリズムの配置を設計する。Fig. 4 に示すように、プリズム1の頂点に2次元  $xy$  平面の原点をとり、 $x$  軸、 $y$  軸を定める。直角二等辺プリズムの斜辺の長さを  $a$ 、2個のプリズムの斜辺の間隔を  $b$ 、プリズムの屈折率を  $n$  とする。また、Fig. 4 において2個のプリズムの頂点間の  $y$  軸方向の差を  $d_{\text{offset}}$  とする。パルスレーザーの繰り返し周波数を  $r$ 、1つの光パルスからアレイイルミネーターによって分周されて  $N$  個のパルスが作成されるとする。入射ビームは、プリズム1内で、 $y$  軸正方向に向けて  $x$  軸を通過し、再び  $y$  軸正方向に向けて  $x$  軸を通過するまでに進む光路長を  $L_{\text{around}}$  とする。 $L_{\text{around}}$  は、次式で表すことができる。

$$L_{\text{around}} = 2na + 2b \quad (2)$$

パルスレーザーの光パルスは繰り返し周期の間に  $c/r$  進む。ただし、 $c$  は真空中の光速とする。1つの光パルスから  $N$  分周した光パルス列を作成する場合、パルス列中の各パルスの光路差  $L_{\text{different}}$  は、次式で表すことができる。

$$L_{\text{different}} = \frac{c}{rN} \quad (3)$$

$L_{\text{around}}$  と  $L_{\text{different}}$  が等しくなるように設計すればよい。し

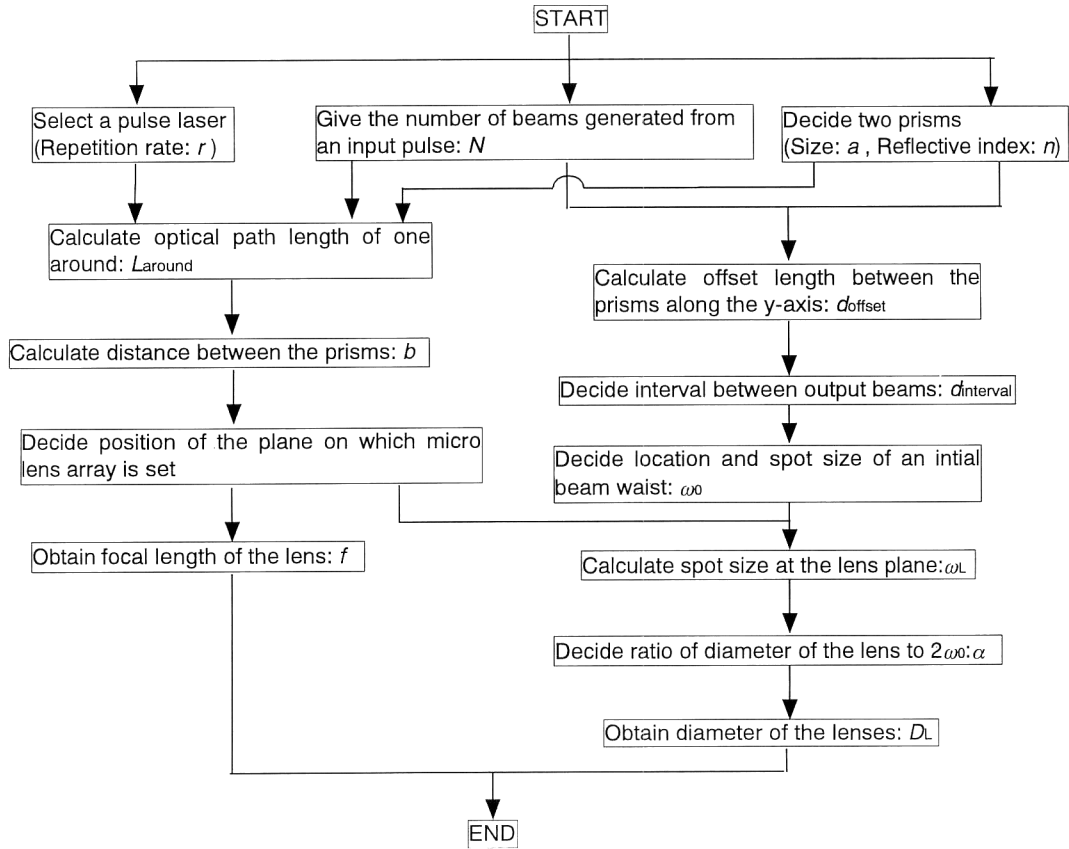


Fig. 3. Flowchart for designing the high-repetition-rate optical pulse generator.

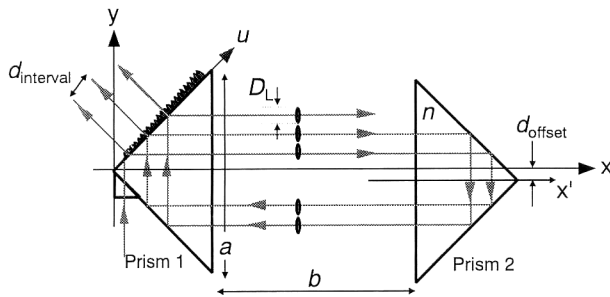


Fig. 4. Coordinates and parameters used for design of the high-repetition-rate optical pulse generator.

たがって、2つの斜辺間の距離  $b$  は次式で定めればよい。

$$b = \frac{c}{2rN} - na \quad (4)$$

次に、アレイミミネーターからの光パルス列の各ビームが互いに空間的に重なり合わないようする場合について、 $d_{\text{offset}}$  を定める。この光パルス列中の各出力ビームの空間的な間隔を  $d_{\text{interval}}$  とする。 $d_{\text{interval}}$  は、幾何学的な考察から次式で与えられる。

$$d_{\text{interval}} = 2\sqrt{2}d_{\text{offset}} \quad (5)$$

プリズムの等辺の長さを十分利用して、この長さの  $1/N$  間隔で各ビームを射出するためには、 $d_{\text{offset}}$  を次式で定め

ればよい。

$$d_{\text{offset}} = \frac{a}{4N} \quad (6)$$

#### 4.2 ビームプロファイル整形部の光学素子の設計法

ビームプロファイル整形部のレンズアレイの設計法を示す。設計を容易にするために本ビーム発生器は次に述べる順序で動作するように設定した。ただし、素子製作、素子配置、光学系設計を容易にするために、各レンズ要素は同一平面上に設定する。

1. パルスレーザーからの光は、プリズムカップラーを通ったあと、 $x$  軸上でビームウェストを作る
2. 光路長調整部内を周回するビームは、プリズム1内で  $y$  軸正方向に向かって  $x$  軸を通過するときにビームウェストを常に形成する
3. ビームウェストを形成したビームは伝搬後、レンズによりプロファイルが整形される
4. レンズを通ったビームはプリズム2内で、 $y$  軸負方向に向かって  $x'$  軸を通過するごとにビームウェストを作成する。ただし、Fig. 4 に示すように  $x'$  軸はプリズム2の直角頂点を通って  $x$  軸に平行な線とする
5. プリズム2内でビームウェストを形成した後、レンズ

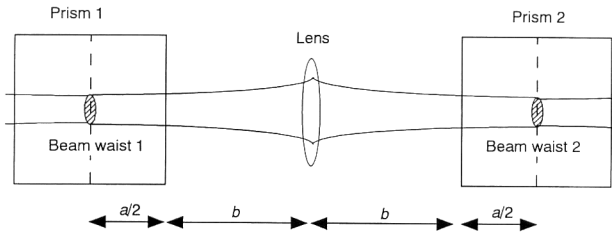


Fig. 5. A unit optical system of periodical structure implementing the adjuster of optical path length and the corrector of beam profile.

でそのプロファイルが整形されて再びプリズム 1 に入射する

以上の動作を繰り返して、レーザービームをプリズム間で周回させる。この動作に基づいてビームウェストを形成させるために、レンズアレイの設置面は、2つのプリズムの斜辺から等距離に設定する。このとき、レンズの中心はビーム断面の中心に設定する。

次に、ビームがプリズム 1 内で  $x$  軸上でビームウェストを作成した後、プリズム 2 内で  $x'$  軸上で同様のビームウェストをつくるためのレンズの焦点距離を設計する。

ビームウェストからレンズを通して再びビームウェストを作るまでの光学系を単位構造と考えると、等間隔高速繰り返し光パルス発生器は、Fig. 5 に示す単位構造の周期構造として等価的に考えることができる。この単位構造に基づいてビームの伝搬を解析する。ビームウェスト 1 での複素ビームパラメータ<sup>10)</sup>に対して光線行列<sup>11)</sup>を用いた解析法に基づきビームウェスト 2 での複素ビームパラメータを求める。ビームウェスト 1 および 2 での複素ビームパラメータを等しくするためのレンズの焦点距離  $f$  は、次式で決定できる。ただし、 $\omega_0$  はビームウェストでのスポットサイズである。

$$f = \frac{\left(\frac{a}{2n} + \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{2\left(\frac{a}{2n} + \frac{b}{2}\right)} \quad (7)$$

Fig. 6 に  $a=50$  mm,  $b=106$  mm,  $n=1.52$  の場合について、ビームウェストのスポットサイズに対する焦点距離の関係を示す。ビームウェストのスポットサイズは、パルスレーザーから等間隔高速繰り返し光パルス発生器に入射するまでに適当なレンズを設定することにより、適当な大きさに調整することができる。ビームウェストのスポットサイズは、出力光パルスの所望のスポットサイズを考慮して決定する。

次に、レンズの口径を設計するために、レンズの位置でのスポットサイズを求める。レンズ直前の複素ビームパラメータを計算して複素ビームパラメータとスポットサ

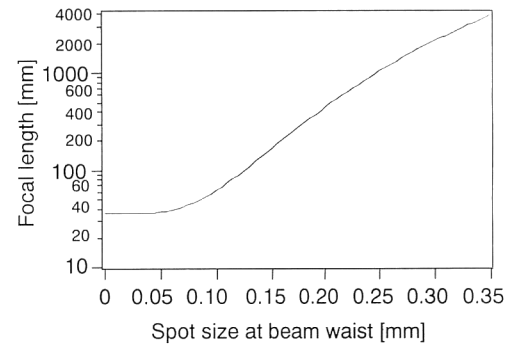


Fig. 6. Focal length of the lens versus spot size at the beam waist for  $a=50$  mm,  $b=106$  mm and  $n=1.52$  in the Eq. (16).

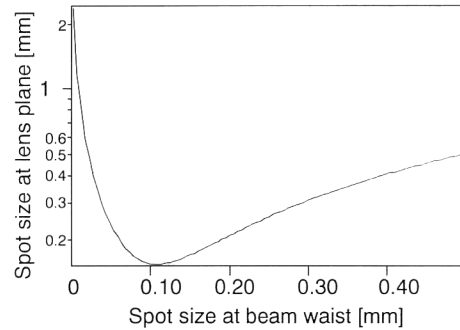


Fig. 7. Spot size of beam at the lens plane versus spot size at the beam waist for  $a=50$  mm,  $b=106$  mm and  $n=1.52$  in the Eq. (20).

イズの関係<sup>10)</sup>を用いると、レンズ直前のスポットサイズ  $\omega_L$  は次式で定めることができる。

$$\omega_L = \sqrt{\left\{ \frac{\lambda \left( \frac{a}{2n} + \frac{b}{2} \right)^2}{\pi\omega_0} \right\}^2 + \omega_0^2} \quad (8)$$

ビームウェストのスポットサイズとレンズを配置する位置でのスポットサイズの関係を示す。ここで、 $a$ ,  $b$ ,  $n$  は、Fig. 6 の評価のために用いたのと同じ値である。レンズの口径は、レンズの開口による回折の影響が少なく、隣接するビームからのクロストークが少なく、また、高いエネルギー効率を得られるように設定することが望ましい。口径の上限はビームの間隔で制限される。レンズの口径を  $D_L$  とすると、 $D_L$  は、スポットサイズを基準にして、 $D_L = 2\alpha\omega_L$  ( $\alpha$  は実数) で設定する。

レーザーの仕様が定めれば、この方法に基づいて、等間隔高速繰り返し光パルス発生器を設計できる。

## 5. 設計と評価

### 5.1 設計

前節で説明した設計方法に基づいて、市販パルスレーザ

Table 1. Specifications of the devices used in the pulse generator.

Parameters	Specifications
Pulse laser (Nd:YAG)	
Wave length (nm)	532
Pulse width (ps)	3.5
Repetition ratio (MHz)	82
Spot size at beam waist (mm)	0.35
Prisms in the adjustor of optical path length (Rectangular equilateral prisms)	
Refractive index	1.52
Length of the hypotenuse (mm)	50
The number of beams generated from an input pulse	10

Table 2. Characteristics of the designed devices.

Parameters (mm)	Specifications
Lens	
Focal length: $f$	3810
Diameter of aperture: $D_L = 2\alpha\omega_L$	2.50 ( $\alpha = 3.55$ )
Distance between the adjacent lenses: $d_{\text{different}}/\sqrt{2}$	2.50
Prism	
Distance between the two prisms: $b$	106
Distance between the two prisms along the $y$ -axis: $d_{\text{offset}}$	1.25

一の仕様に対する等間隔高速繰り返し光パルス発生器を具体的に設計する。Table 1に、市販パルスレーザーおよびプリズムの仕様の例を示す。Table 1の仕様に対して、本設計で得られた等間隔高速繰り返し光パルス列発生器の諸量を Table 2 に示す。

## 5.2 評価

設計した等間隔高速繰り返し光パルス発生器の有効性を確認するために、1つの光パルスが入力されたときに出力される繰り返し光パルスのビームプロファイルの評価をする。

パルスレーザーからのビームは、グレーティングによりその光パワーの一部を各周回ごとに出力していく。そのために周回する光パワーは周回ごとに減衰する。しかしながら、各ビームは式(1)で表される回折効率によって射出するために、出力されるビームアレイの強度プロファイルは、光パワーの減衰と回折効率の増大とで相殺されて、伝搬距離の変化のみ考慮すればよい。また、ビームの広がりに対して、レンズの口径がスポットサイズに比べて大きく、口径食によるエネルギー損失と隣接するビームからのクロストークが十分小さいと考えて、アレイイルミネーターから作られる光パルス列のうち  $k$  番目 ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) のビームの強度プロファイル  $I_k$  は、付録より次式で表すことができる。

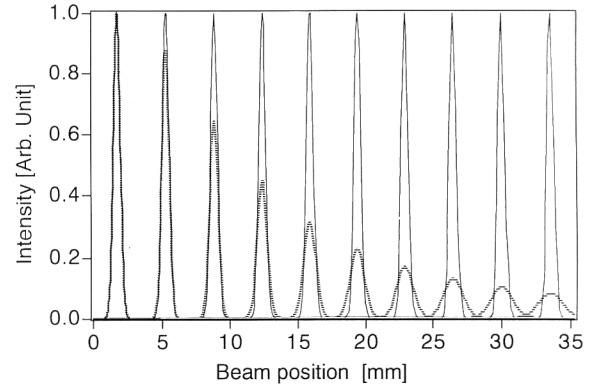


Fig. 8. Profiles of the output beam intensity. The solid and the dashed lines correspond to the optical pulse generator with and without the corrector, respectively.

$$I_k = \left| \frac{\omega_0}{\omega_k} \exp \left[ - \left\{ \frac{u - \frac{\sqrt{2}a(2k-1)}{4N}}{\omega_k} \right\}^2 \right] \right|^2 \quad (9)$$

ここで、 $\omega_k$  は付録中の式(A-2)で表すことができる。

次に、ビームプロファイル整形部を設定しない場合の射出ビームの強度プロファイルを解析する。 $k$  番目のビームのプロファイル  $I'_k$  は、付録より次式で表すことができる。

$$I'_k = \left| \frac{\omega_0}{\omega'_k} \exp \left[ - \left\{ \frac{u - \frac{\sqrt{2}a(2k-1)}{4N}}{\omega'_k} \right\}^2 \right] \right|^2 \quad (10)$$

ここで、 $\omega'_k$  は付録中の式(A-4)で表すことができる。

グレーティングにより  $45^\circ$  曲げられてビームが射出する。そのために射出面内でのビーム断面は、ビームが並ぶ方向に  $\sqrt{2}$  倍に広がった楕円になる。

Fig. 8 に  $N = 10$  の場合について、式(9)、(10)で与えられる強度分布に対して  $\sqrt{2}$  倍に広がることを考慮して、射出面におけるビームアレイの強度プロファイルをビームプロファイル整形部がある場合とない場合について示す。第10番目のビームプロファイルについて、ピーク値に対して  $1/e^2$  の強度になる部分の幅は、ビームプロファイル整形部がある場合とない場合それぞれ、1.40 mm, 4.88 mm である。ビームプロファイル整形部がある場合とない場合に比べて  $1/3.49$  にビームの広がりが抑えられることがわかる。ビームプロファイル整形部がある場合とない場合に関して第10番目のビームの強度プロファイルのピーク値はそれぞれ、0.999, 0.0825 である。ビームプロファイル整形部がない場合は、ある場合に比べて  $1/12$  にピーク強度が下がることがわかる。

設計した光パルス列発生器では、プリズム1内の各ビームウェストから、射出位置までの伝搬距離は異なる。しかしながら、Fig. 8 からわかるようにビームのプロファイル

がほぼ等しいパルス列が得られ、本光パルス発生器の設計値が有効であることを確認した。

## 6. 光パルスの時間幅に起因する射出ビームの広がり

一般に、光パルスの時間幅が短くなると周波数スペクトルの幅が大きくなり、回折光学素子やバルク素子に対する特性に影響が生じる。そこで、入射ビームの短パルス化に対する本光パルス列発生器の性能を評価する。

まず、入射ビームの短パルス化に対して、グレーティングからの出射ビームの回折角度の広がり进行评估する。フーリエ変換限界パルスを仮定する。パルスの時間幅、周波数のスペクトル広がりそれぞれ  $\Delta t$ ,  $\Delta \nu$  とすると、 $\Delta t \Delta \nu \sim 1$  が成立する<sup>12)</sup>。この関係を考慮して、格子方程式<sup>7)</sup>に基づいて、回折角度の広がり  $\Delta \theta$  を求める。 $\Delta \theta$  は次式で与えられる。

$$\Delta \theta = \frac{n \lambda \sin \theta}{c} \Delta \nu \sim \frac{n \lambda \sin \theta}{c \Delta t} \quad (11)$$

ただし、 $n$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$  はそれぞれ、プリズムの屈折率、レーザー光の波長、グレーティングへのビームの入射角である。例として、 $n=1.52$ ,  $c=2.89 \times 10^8$  m/s,  $\lambda=532$  nm,  $\theta=45^\circ$  とする。 $\Delta t$  が 3.5 ps, および 100 fs の場合、 $\Delta \theta$  はそれぞれ、 $0.0324^\circ$ ,  $1.13^\circ$  となる。

次に、ビームがプリズムを通過するときの波長分散による出射ビームの時間幅の変化进行评估する。そこで、アレイイルミネーターから射出されるビームアレイの中で、 $N$  番目のビームに対する波長分散による光路長の変化を求める。プリズムの斜辺の長さを  $a$ , 波長分散の増大によるプリズムの屈折率の変化を  $\Delta n$  とする。 $\Delta n$  による光パルスの時間幅の広がり  $\Delta \tau$  は、次式で与えられる。

$$\Delta \tau \sim \frac{2(N-1)an\Delta n}{c} \quad (12)$$

例として、 $\lambda=532$  nm,  $n=1.52$  とする。 $\Delta t$  が 3.5 ps, 100 fs の場合、 $\Delta n$  はそれぞれ  $1.63 \times 10^{-5}$ ,  $5.61 \times 10^{-4}$  程度になる。 $N=10$ ,  $a=50$  mm とすると、それぞれの  $\Delta t$  に対する  $\Delta \tau$  はそれぞれ、77 fs, 2.6 ps 程度になる。これらの時間幅の広がり大きさは、繰り返し光パルスの周期である 1 ns 程度に比べると十分に小さい。

このように、本光パルス発生器では、100 fs 程度までの時間幅の光パルスに対してはアレイイルミネーターの出射ビームの回折角の広がりや時刻幅の広がりの変化は少なく、等間隔高速繰り返し光パルス発生器として十分利用できる。

## 7. 実装するための素子の検討

設計した等間隔高速繰り返し光パルス発生器を実現する

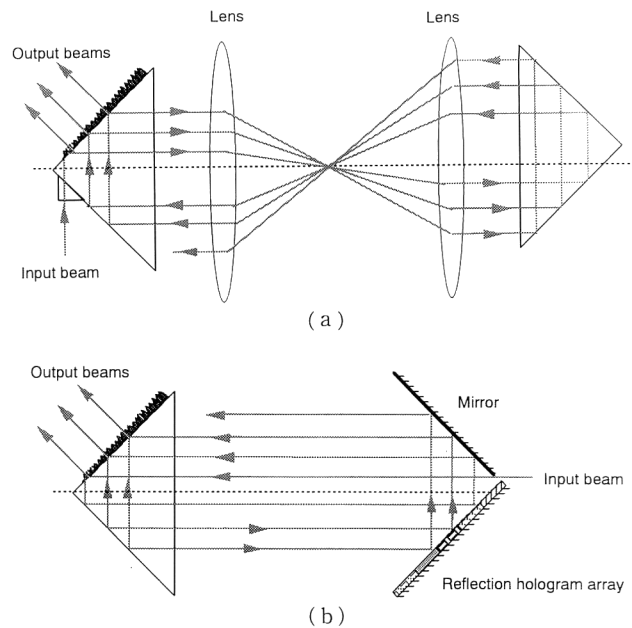


Fig. 9. Schematic diagrams of options to implement the high-repetition-rate optical pulse generator. (a) Two lenses with large aperture, (b) holographic optical elements.

ためには、ビームプロファイルの整形として微小レンズアレイが必要である。開口が小さいレンズアレイ用の素子としては、平板マイクロレンズアレイ<sup>13,14)</sup>が有効であると考えられる。長い焦点距離のレンズアレイが要求されるが、平板マイクロレンズを製作する際に、イオン交換の時間を短くすることで実現できると考えられる。

本論文ではレンズアレイを用いたビームプロファイル整形部を設計したが、Fig. 9(a)のような大きな口径のレンズ2枚で実現する方法や、Fig. 9(b)のように、ホログラムアレイを用いた構成も可能である。レンズ2枚で実現する方法は、光学素子数を減らすことができるが、等間隔高速繰り返し光パルス発生器のサイズが大きくなる。また、光軸から離れた部分を利用するために収差を小さくするためのレンズ設計が必要となり設計が複雑になる。ホログラムを用いた構成では、等間隔高速繰り返し光パルス列発生器をよりコンパクトに構成できる特長をもつ。また、長焦点距離をもつホログラフィック光学素子は容易に製作できる。したがって、ホログラムは、有用な実装方法と考えられる。

## 8. おわりに

アレイイルミネーターを時間領域に応用した、等間隔高速繰り返し光パルス発生器を提案した。本パルス発生器は、パルスレーザーからの1つの光パルスを時間的に多重化して、すべての光パルスの時間間隔が等しい高速繰り返

しパルスを作成する。等間隔高速繰り返し光パルス発生器の構成を検討し、光路長調整部を2つの直角プリズムで、ビームプロファイル調整部をレンズアレイで実現する方法を示した。また、等間隔高速繰り返し光パルス発生器の設計方法に関して述べた。市販の典型的なパルスレーザーとして、Nd:YAGレーザー(波長532nm, パルス幅3.5ps, 繰り返し周波数82MHz, スポットサイズ0.350mm)に対して、等間隔高速繰り返し光パルス発生器を設計した。設計した等間隔高速繰り返し光パルス発生器から出力されるビームアレイを解析し、本光パルス発生器が有効であることを確認した。等間隔高速繰り返し光パルス発生器の実装方法を検討し、実現するデバイスに関して考察した。

## 文 献

- 1) A. W. Lohmann, J. Schwider, N. Streibl and J. Thomas: "Array illuminator based on phase contrast," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 2915-2921.
- 2) F. B. McCormick: "Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings," *Opt. Eng.*, **28** (1989) 299-304.
- 3) U. Krackhardt and N. Streibl: "Design of Damman-gratings for array generation," *Opt. Commun.*, **74** (1989) 31-36.
- 4) A. W. Lohmann and J. A. Thomas: "Making an array illuminator based on the Talbot effect," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4337-4340.
- 5) N. Streibl, U. Nölscher, J. Jahns and S. Walker: "Array generation with lenslet arrays," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 2739-2742.
- 6) A. V. Vasara, M. R. Taghizadeh, J. Turunen, J. Westerholm, E. Noponen, H. Ichikawa, J. M. Miller, T. Jaakkola and S. Kuisma: "Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 3320-3336.
- 7) T. Kubota and M. Takeda: "Array illuminator using grating couplers," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 651-652.
- 8) M. Takeda and T. Kubota: "Integrated optic array illuminator: a design for efficient and uniform power distribution," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 1090-1095.
- 9) T. Kubota, N. Umehara, K. Iida, T. Shimura and K. Kuroda: "Generation of an ultrahigh-repetition-rate pulse by an array illuminator," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1667-1669.
- 10) 末田 正: 光エレクトロニクス, 初版(昭晃堂, 東京, 1985) pp. 85-87.
- 11) H. Kogelnik: "Imaging of optical modes—resonators with internal lenses," *Bell Syst. Tech. J.*, **44** (1965) 455-494.
- 12) 矢島達夫 編: 超高速光技術, 初版(丸善, 東京, 1990) pp. 17-20.
- 13) M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto and K. Nishizawa: "Array of distributed-index planar microlenses prepared from ion exchange technique," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) L296-L298.
- 14) K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda and T. Kishimoto: "Multiple imaging and multiple Fourier trans-

formations using planar microlens arrays," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4064-4070.

## 付録 ビームプロファイルの解析

アレイイルミネーターから  $k$  番目に出射するビームに関して  $x$  軸からビームの出射面までの距離を  $d_k$  とする。 $d_k$  は、幾何学的考察から次式で与えられる。

$$d_k = \frac{a(2k-1)}{4N} \quad (\text{A-1})$$

出射面での複素パラメーターを計算し、このときのスポットサイズ  $\omega_k$  を求めると、次式で表すことができる。

$$\omega_k = \sqrt{\left[ \frac{\lambda \left\{ \frac{a(2k-1)}{4nN} \right\}}{\pi\omega_0} \right]^2 + \omega_0^2} \quad (\text{A-2})$$

ビームの振幅プロファイルをガウス分布<sup>10)</sup> とすると2次元対称形であるので、簡単のために  $u$  軸方向についてのみのプロファイルを解析する。ただし、 $u$  軸はプリズム1の頂点を原点にとり、アレイイルミネーターが装着されている辺上においてアレイイルミネーターがある方向を正方向に定めた座標軸である。このとき、1つの入射光パルスから作られる光パルス列のうち  $k$  番目 ( $k=1, 2, \dots, N$ ) のビームの強度プロファイル  $I_k$  はビームウェストからのビームの伝搬距離を考慮して、次式で表すことができる。

$$I_k = \left| \frac{\omega_0}{\omega_k} \exp \left[ - \left\{ \frac{u - \frac{\sqrt{2}a(2k-1)}{4N}}{\omega_k} \right\}^2 \right] \right|^2 \quad (\text{A-3})$$

次に、ビームプロファイル整形部を設定しない場合の出射ビームの強度プロファイルを解析する。

$k$  番目のビームの出射位置での複素ビームパラメーター  $q_k'$  を計算し、このときのスポットサイズ  $\omega_k'$  とビームの強度プロファイル  $I_k'$  を求めるとそれぞれ次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \omega_k' &= \sqrt{\left[ \frac{\lambda \left\{ 2(k-1) \left( \frac{a}{n} + b \right) + \frac{d_k}{n} \right\}}{\pi\omega_0} \right]^2 + \omega_0^2} \\ &= \sqrt{\left[ \frac{\lambda \left\{ 2(k-1) \left( \frac{a}{n} + b \right) + \frac{a(k-1)}{4nN} \right\}}{\pi\omega_0} \right]^2 + \omega_0^2} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

$$I_k' = \left| \frac{\omega_0}{\omega_k'} \exp \left[ - \left\{ \frac{u - \frac{\sqrt{2}a(2k-1)}{4N}}{\omega_k'} \right\}^2 \right] \right|^2 \quad (\text{A-5})$$