

1. 研究背景

近年、通信情報量の増加に伴い高速でかつ大容量な通信が必要とされてきている。今後、波長分割多重方式と光時分割多重方式を組み合わせた通信方式が検討されている。この方式では高繰り返し周波数で安定した光パルス光源が必要になる。本研究室で研究されている全光ゲート型光クロックパルス発生器 DISC-loop は、長期信頼性が高く、繰り返し周波数などが可変であるため、パルス光源として期待されている。本研究室では、過去にこの DISC-loop によって 10, 40 GHz のパルスの発振に成功している。しかし、今後 DISC-loop で 40 GHz 以上のパルスを発振させるためには光増幅器でのパルスの繰り返し周波数 - 利得特性を調べ、高繰り返し周波数のパルスでの利得の評価方法を調査する必要があると考えた。また、DISC-loop がパルス発振に移り始めるときにエルビウム添加ファイバー増幅器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)で Q スイッチによるジャイアントパルスが発生して半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)が劣化・損傷する現象が当研究室で発生した。このジャイアントパルスは光増幅器のキャリア寿命が長いほど強くなり、EDFA のキャリア寿命は数～十数 ms である。その上、EDFA は長さ数～十数 m と長いファイバーであるため、EDFA を使用した DISC-loop は集積化が困難である。それに対し、SOA はキャリア寿命が数十～数百 ps と非常に短い上、長さが数百 μm ～数 mm と非常に小さい。以上のことから、将来的には EDFA の代わりに集積可能で Q スイッチによるジャイアントパルスが発生しにくい SOA をパルス増幅器として DISC-loop に代用することを考えている。そのためには SOA ではジャイアントパルスが発生しにくいことを実際に示す必要がある。

2. 原理

パルスの繰り返し周波数を f 、SOA のキャリアが回復しきるまでの時間の逆数をキャリア回復周波数 f_0 とする。また、非飽和利得を G_0 、入力パルス 1 つ当たりのエネルギーを E_{IN} 、パルス 1 つ当たりの飽和エネルギーを E_0 、入力パルスの平均強度を $\overline{P_{IN}}$ 、パルスの飽和平均強度を $\overline{P_0}$ とすると SOA の利得 G は以下の式で表せる。

$$G = \frac{G_0}{G_0 - (G_0 - 1)\exp(-E_{IN} / E_0)} \quad (f_0 > f) \quad (1)$$

$$G = \frac{G_0}{G_0 - (G_0 - 1)\exp(-P_{IN} / P_0)} \quad (f_0 < f) \quad (2)$$

式 1, 2 より、パルスの繰り返し周波数がキャリア回復周波数より低いとき、入力パルス 1 つあたりのエネルギーを一定にすると周波数によらず一定になる。また、パルスの繰り返し周波数がキャリア回復周波数より高いとき、入力パルスの平均強度を一定にすると周波数によらず一定になる。

パルス繰り返し周波数－飽和出力エネルギー特性において、以下の式で表せる。

$$E_{sat} = \frac{G_0}{2} E_0 \ln\left(\frac{G_0 - 1}{G_0 - 2}\right) \quad (f_0 < f) \quad (3)$$

$$E_{sat} = \frac{G_0}{2} E_0 \ln\left(\frac{G_0 - 1}{G_0 - 2}\right) \frac{f_0}{f} \quad (f_0 > f) \quad (4)$$

式 3, 4 より、パルスの繰り返し周波数がキャリア回復周波数よりも低い場合、パルスの利得が非飽和利得に比べ 3 dB 下がったときの飽和出力エネルギーは周波数によらず一定になり、飽和出力エネルギーの最大値をとる。また、パルスの繰り返し周波数がキャリア回復周波数よりも高い場合、飽和出力パルスエネルギーは繰り返し周波数に反比例する。そのため、繰り返し周波数が増加するにつれて減少していく。

3. 実験方法

繰り返し周波数依存特性を求めるために、各繰り返し周波数に対する飽和利得特性を測定した。飽和利得特性の実験構成を図 1 に示す。今回測定したパルスの繰り返し周波数は 3.13, 4.17, 6.25, 12.5, 25, 50, 100 GHz であり、パルスの中心波長は 1550 nm に統一し、パルスの FWHM は 2~3 ps、スペクトル幅は 10 nm 以下にした。パルスの入出力光は光スペアナで測定し、ノイズや ASE の部分をカットするため図 2 のように測定したスペクトルからパルスの波長帯域を選択して入出力光の強度求めた。

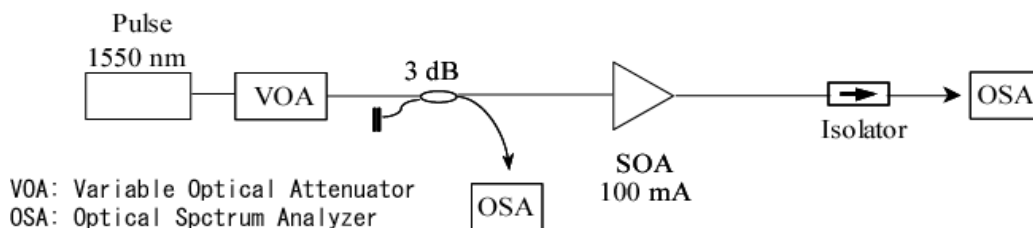


図 1 飽和利得特性の実験構成

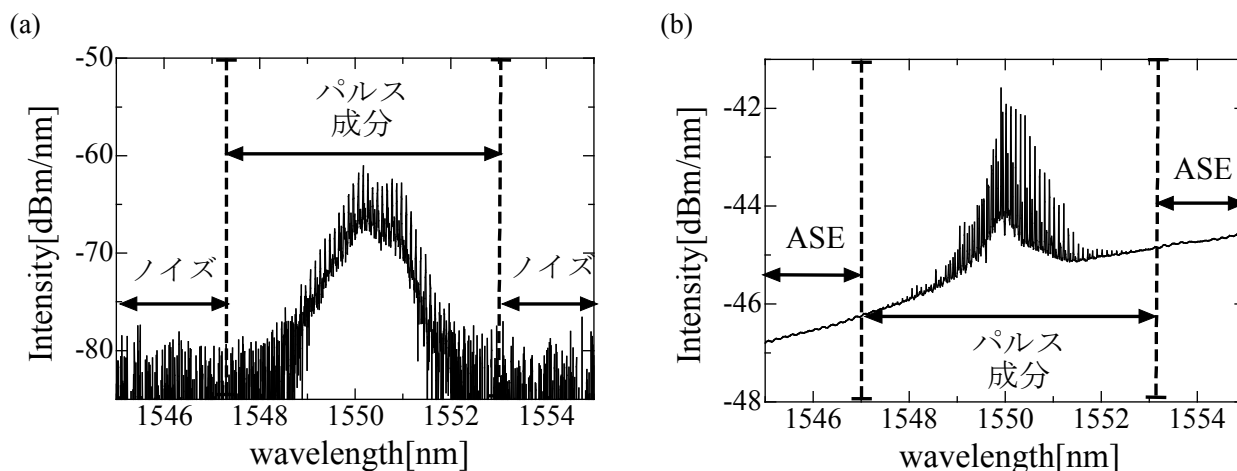


図 2 入出力の光強度の測定方法

- (a) 入力パルスの光スペクトル
- (b) 出力パルスの光スペクトル

図 3(a)のように飽和利得特性のグラフから測定したい入力パルスのエネルギーまたは平均強度のときの利得を測定する。この手順を各繰り返し周波数で同様に測定し、繰り返し周波数 - 利得特性を求めた。また、図 3(b)のように飽和利得特性のグラフから非飽和利得から利得が 3 dB 下がったときのパルスの飽和出力エネルギーを測定する。この手順を各繰り返し周波数で同様に測定する。この測定結果から、繰り返し周波数 - 飽和出力エネルギー特性を求めた。

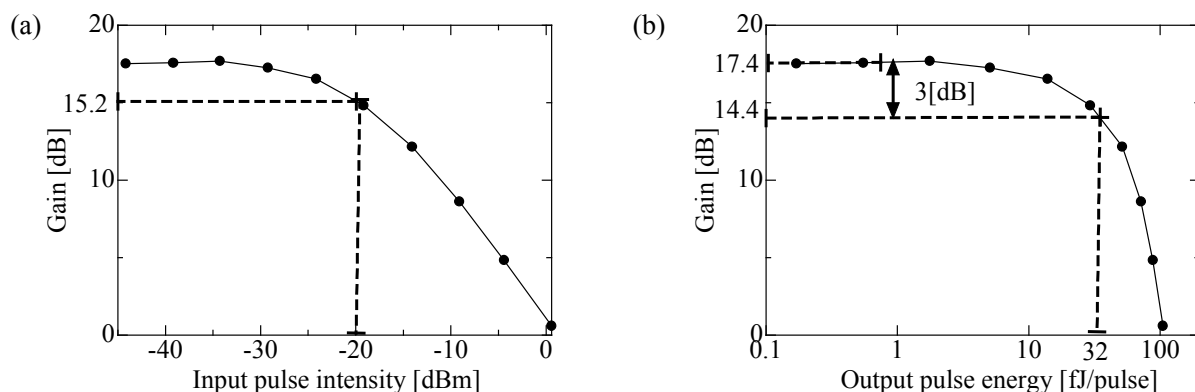


図 3 繰り返し周波数依存特性の測定方法

- (a) 繰り返し周波数 - 利得特性
- (b) 繰り返し周波数 - 飽和出力パルスエネルギー

4. 測定結果

繰り返し周波数 - 利得特性を図 3 に示す。図 3 より、キャリア回復周波数が 12.5 GHz であることが分かる。また、非飽和利得 G_0 を 22.57 dB、パルスの飽和エネルギー E_0 を 125 fJ/pulse、パルスの飽和平均強度 \bar{P}_0 を 1.93 dBm に設定すると理論値とほぼ一致する。

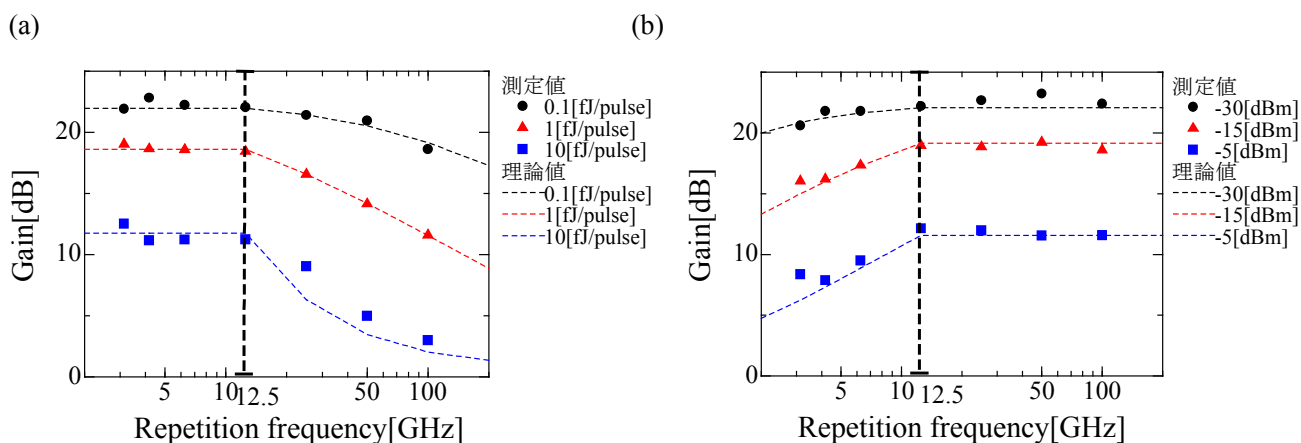


図4 繰り返し周波数 - 利得特性

- (a) 入力パルス1つあたりのエネルギー一定
- (b) 入力パルスの平均強度一定

繰り返し周波数-飽和出力エネルギー特性を図5に示す。キャリア回復周波数 12.5 GHz より低いとき、周波数によらず飽和出力エネルギーが一定になり最大値 56 fJ/pulse をとっていることが分かる。この値は、過去の研究で SOA に入力したパルスのエネルギー 3 pJ/pulse に比べはるかに小さい。SOA ではジャイアントパルスが発生しにくいと考えられる。

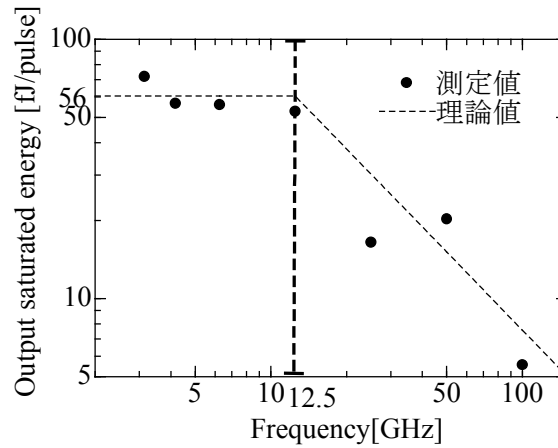


図5 繰り返し周波数 - 飽和出力エネルギー特性

5. 結論

入力パルスエネルギーが一定のとき、パルスの繰り返し周波数がキャリア回復周波数 12.5 GHz 以下のときでは繰り返し周波数によらず利得は一定であった。また、キャリア回復周波数以上のとき繰り返し周波数が高くなるほど利得が小さくなる傾向が見られた。特に、入力パルスエネルギーが大きいときではその特性が顕著に現れた。入力パルスの平均強度が一定のとき、パルスの繰り返し周波数が 12.5 GHz よりも低いとき、繰り返し周波数が高くなるほど利得が大きくなった。また、12.5 GHz 以上になると繰り返し周波数によらず利得が一定になる特性が得られた。このことから、高繰り返し周波数のパルスでの利得の評価方法は入力パルス強度を基準にすると評価しやすいことが分かった。

繰り返し周波数 - 飽和出力エネルギーにおいて、パルスの繰り返し周波数が低くなるほど飽和出力パルスエネルギーが大きくなった。また、12.5 GHz 以下のときでは飽和出力エネルギーは 56 fJ/pulse で周波数によらず一定になった。よって、最大飽和出力エネルギーは 56 fJ/pulse となった。この値は過去の他の研究で入力したパルスのエネルギー 3 pJ/pulse に比べはるかに小さく、SOA ではジャイアントパルスが発生しにくいと考えられる。