

超高速全光ゲートを利用した
モード同期パルス発生器の
4ps, 10GHz, 単一縦モード発振

上野研究室

中本 亮一 (M) 竹内 宏幸 (M2) 稲富 友一 (B)

2008年4月4日
木村・一色研 上野研 合同セミナー

研究の背景: 将来の光通信と全光ゲート

将来の光通信

通信需要の増大により

波長分割多重(WDM)

(1波長あたり 10 ~ 40 Gb/s)

WDM + 光時分割多重(OTDM)

(1波長あたり 40 ~ Gb/s)

OTDM用光源

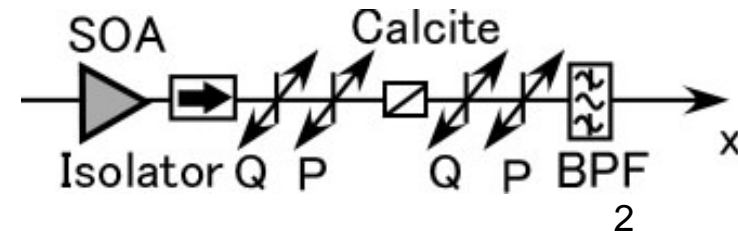
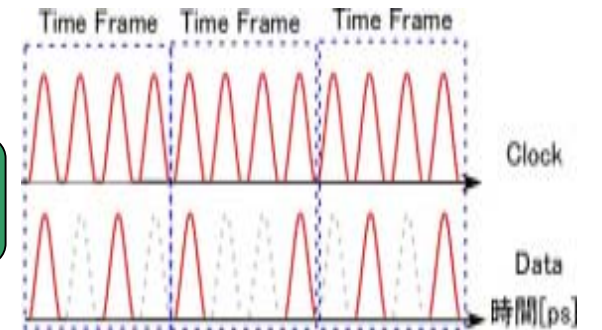
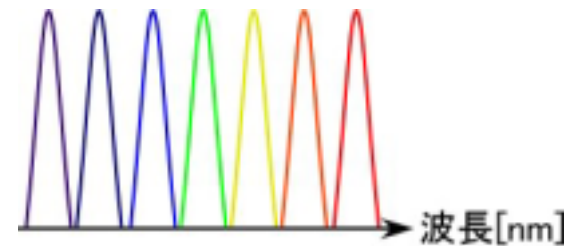
- 40 ~ GHzの高繰り返し周波数
- 繰り返し周波数に対応した数ps ~ fsのパルス幅
- 集積化可能 高い信頼性

期待される光源

全光ゲートを用いたモード同期パルス発生器

全光ゲートの利点

- 電気的変調不要の為、100 GHz以上の動作が可能
- 光 - 電気 - 光の処理より低消費電力
- 部品数の削減、信頼性



研究の背景: DISC-loop型パルス発生器

DISCとは

遅延干渉型波長変換器(Delayed Interference Signal-wavelength Converter: DISC)の略称

- 波長変換
- 多重分離(時間領域)
- 論理動作(AND, OR, etc)

本パルス発生器の特徴

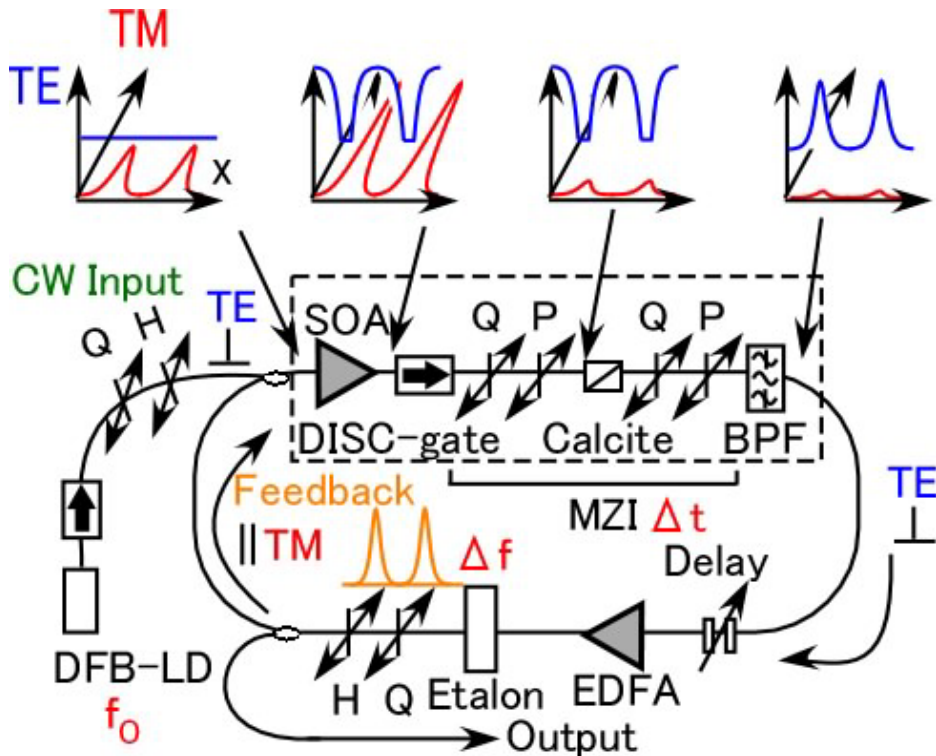
・パルスのパラメータをそれぞれ独立に設定できるため柔軟にシステムが構築可能

パルス幅, Δt , マッハツェンダ干渉計 (MZI)

繰り返し周波数, Δf , エタロン (自由スペクトル間隔, FSR)

中心光周波数, f_0 , 分布帰還型レーザダイオード (DFB-LD)

・汎用光部品 (SOA, etc) で、パルス発生器が構築可能
集積化可能 (EDFAはSOAに交換可能)



DISC-loop型パルス発生器の構成と原理

SOA: 半導体光増幅器, P: 偏光子

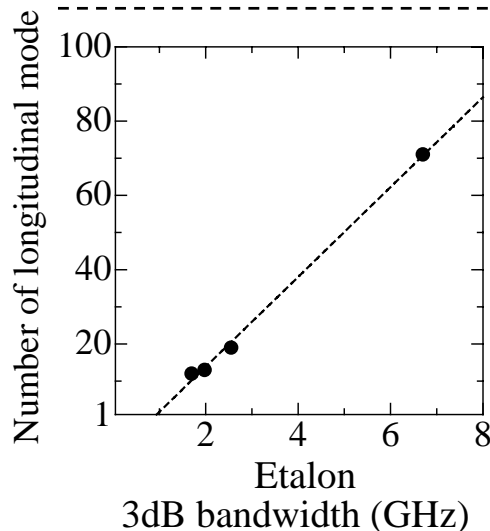
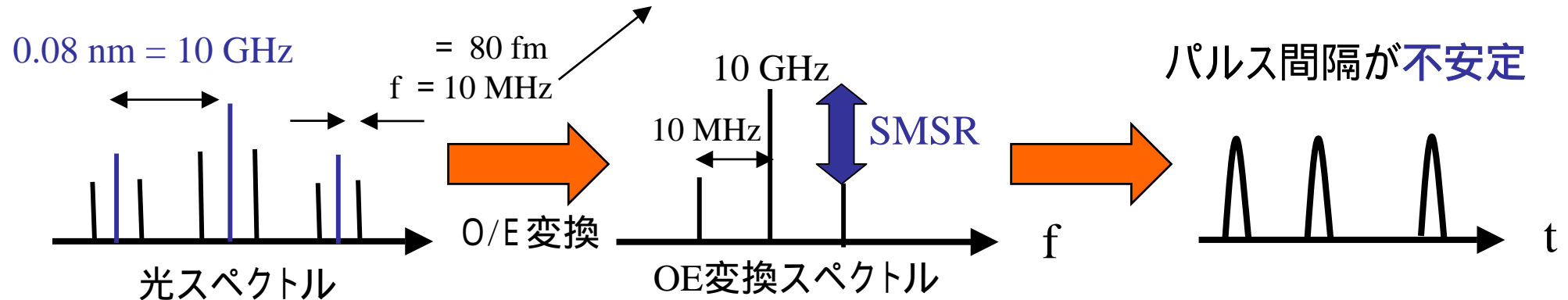
EDFA: エルビウム添加ファイバ増幅器

Q: $\lambda/4$ 波長板, H: $\lambda/2$ 波長板

背景：マルチ縦モード発振

これまでの研究報告：マルチ縦モード発振(横モードはシングル)
サイドモード抑圧比 (SMSR) : 0 ~ 10 dB

共振器周波数(loop 1周での共振周波数)



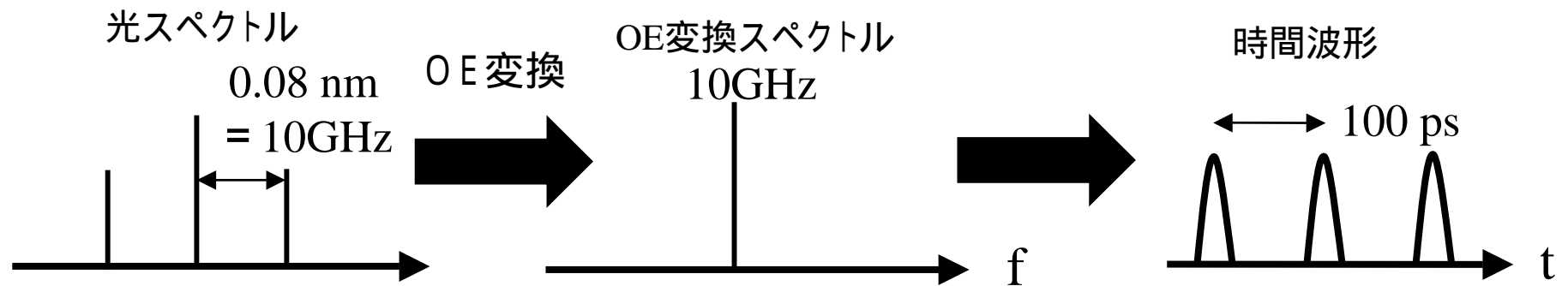
(R. Suzuki, UEC, 2006)

点：測定点
破線：近似曲線

通信用途には、安定動作が必要なので
単一縦モード発振化が必須

**単一縦モード発振になるエタロンの3 dB帯域幅の予想値
400 MHz – 1000 MHz**

DISC-loop型パルス発生器における単一縦モード発振



方法: エタロンの3 dB帯域幅の狭窄化

高フィネスエタロンの設計と評価

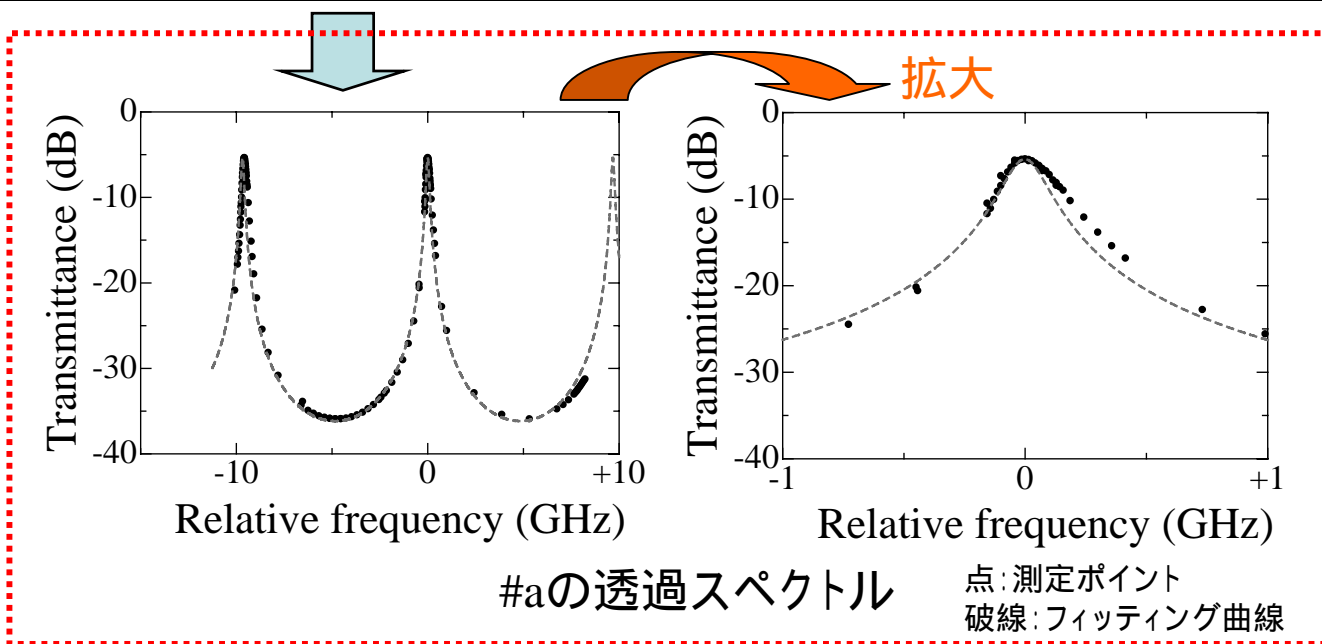
設計値 (板厚 10.3 mm (FSR: 10 GHz))

	反射率 [%] (フィネス)	3dB 帯域幅 [MHz]	損失(計算値) [dB]
#a	96.9 (100)	100	1.5
#b	99.7 (500)	20	5.6

エタロンの製作協力
日本航空電子工業(株)



ミラーホルダによる
入射光角調節 <math>< 0.1^\circ</math>

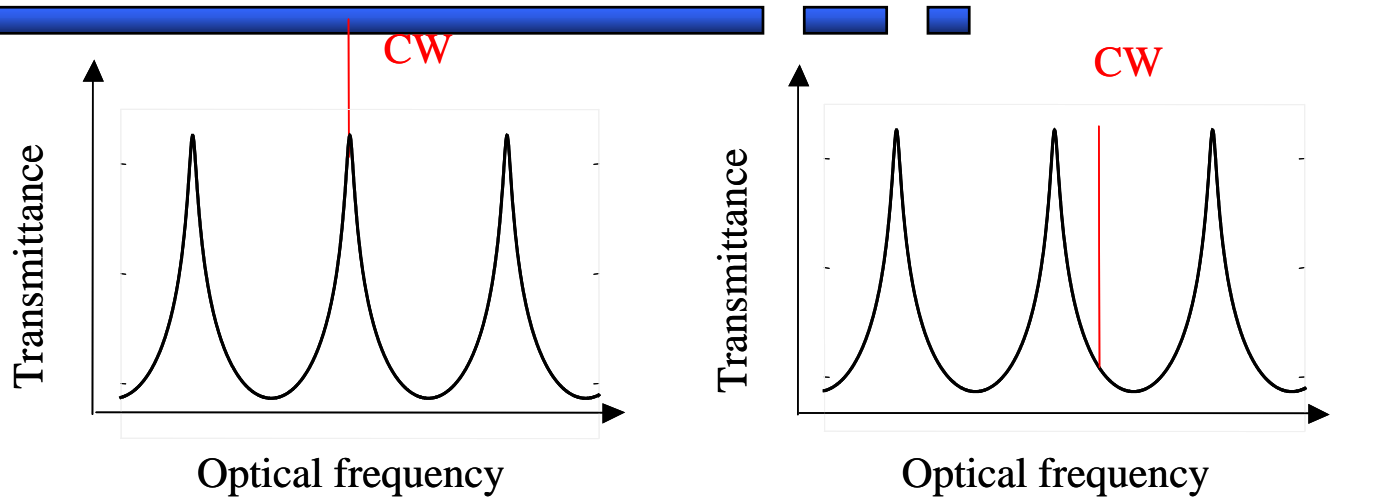


実測値

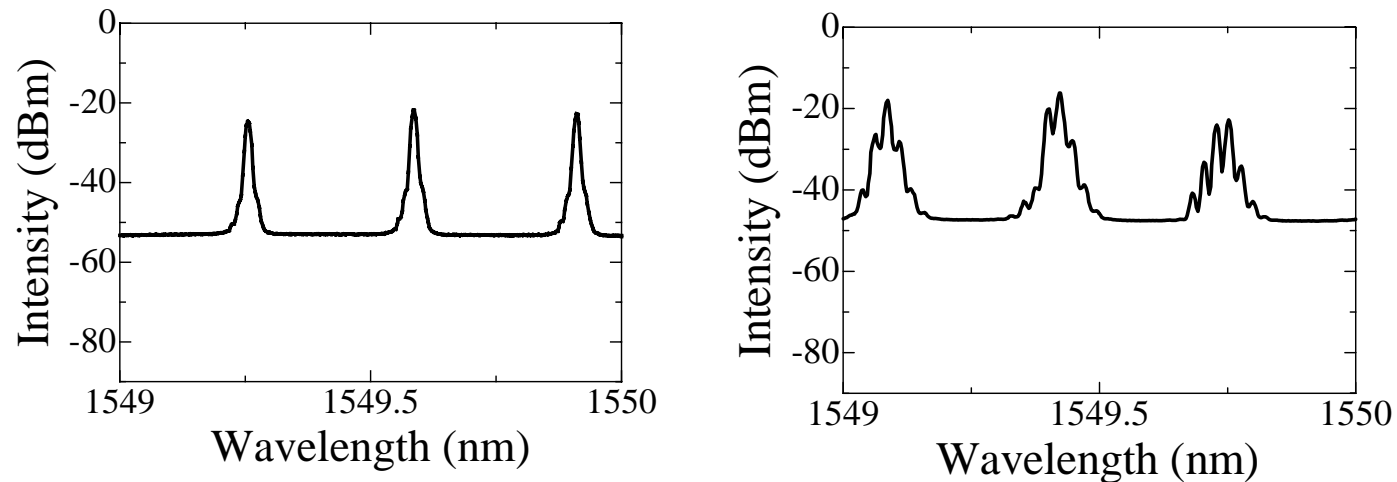
	3dB 帯域幅 [MHz]	損失(実測値) [dB]
#a	180	5.5
#b	120	17.0

目標値(R. Suzuki, UEC, 2006 より)
3 dB帯域幅: <math>< 400</math> MHz
損失 <math>< 10</math> dB

注入CW光の光周波数制御



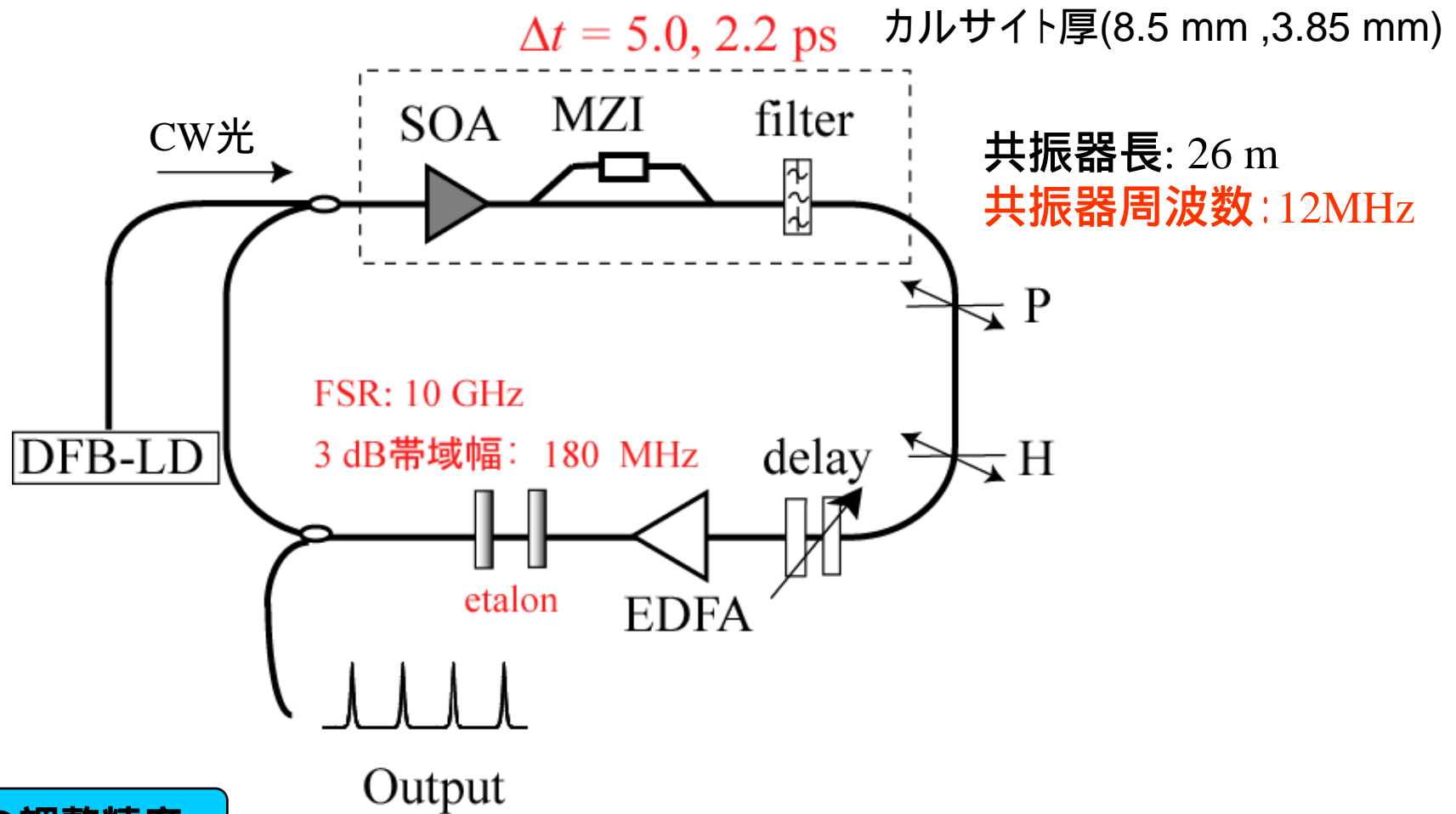
エタロンの透過スペクトルと注入CW光周波数



パルスの光スペクトル

エタロンが狭帯域になるほどCW光の光周波数をエタロンの透過波長に精度よくあわせなければならない

パルス発生の実験構成

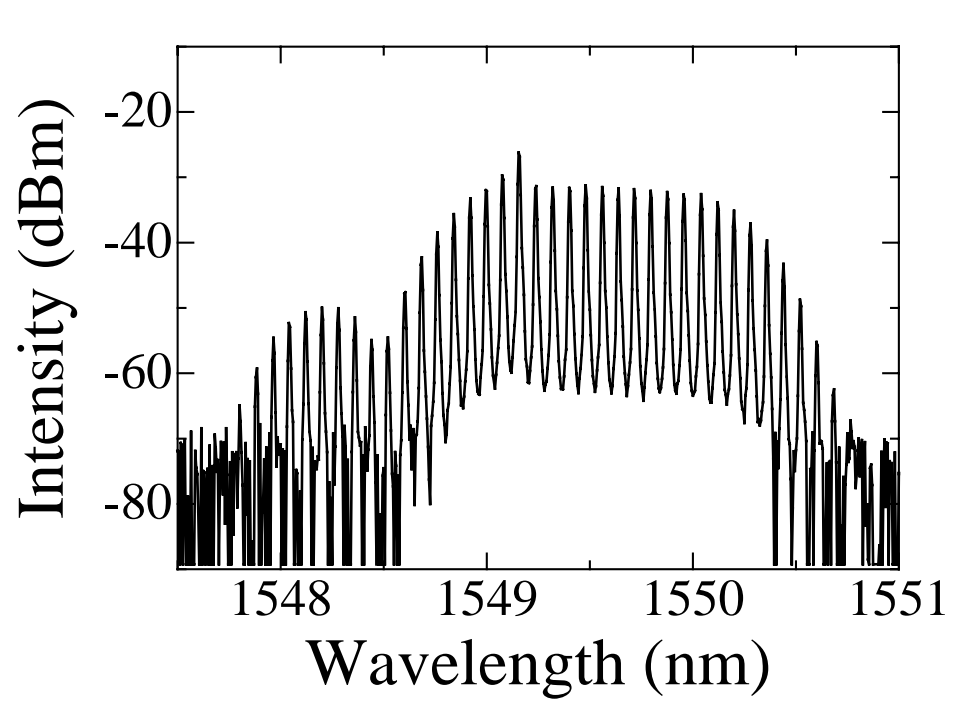


DFB-LDの調整精度

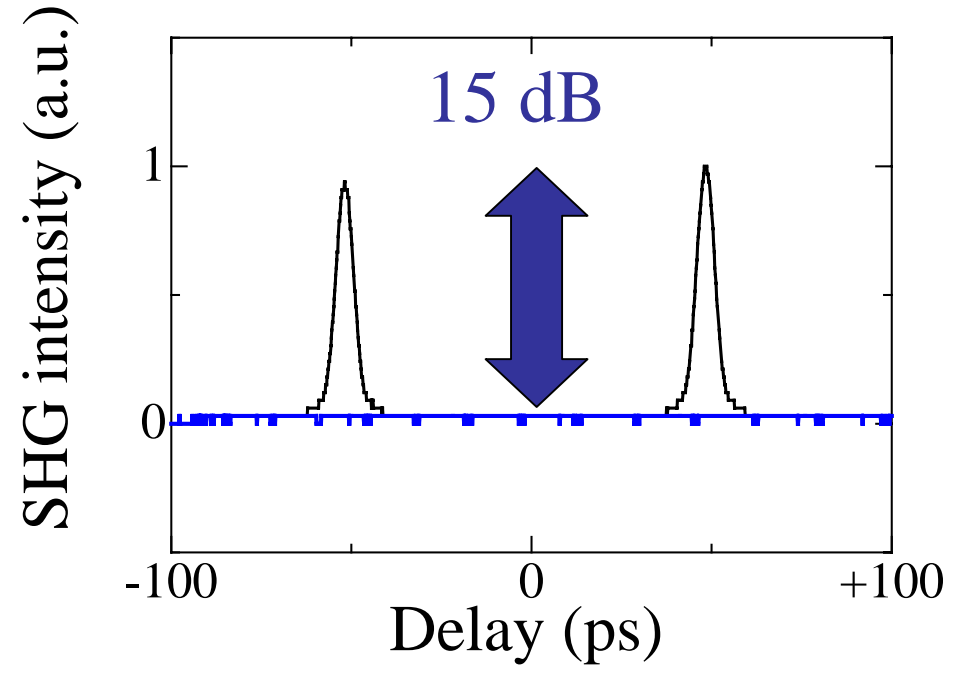
温度コントローラによる時間安定度: $< 1 \text{ mK}$
直流電流の設定分解能: $7 \mu\text{A}$

発振光周波数の時間安定度: 3 MHz
発振光周波数の設定分解能: 4 MHz

パルス発生結果 遅延時間 = 5.0 ps (1)



光スペクトル

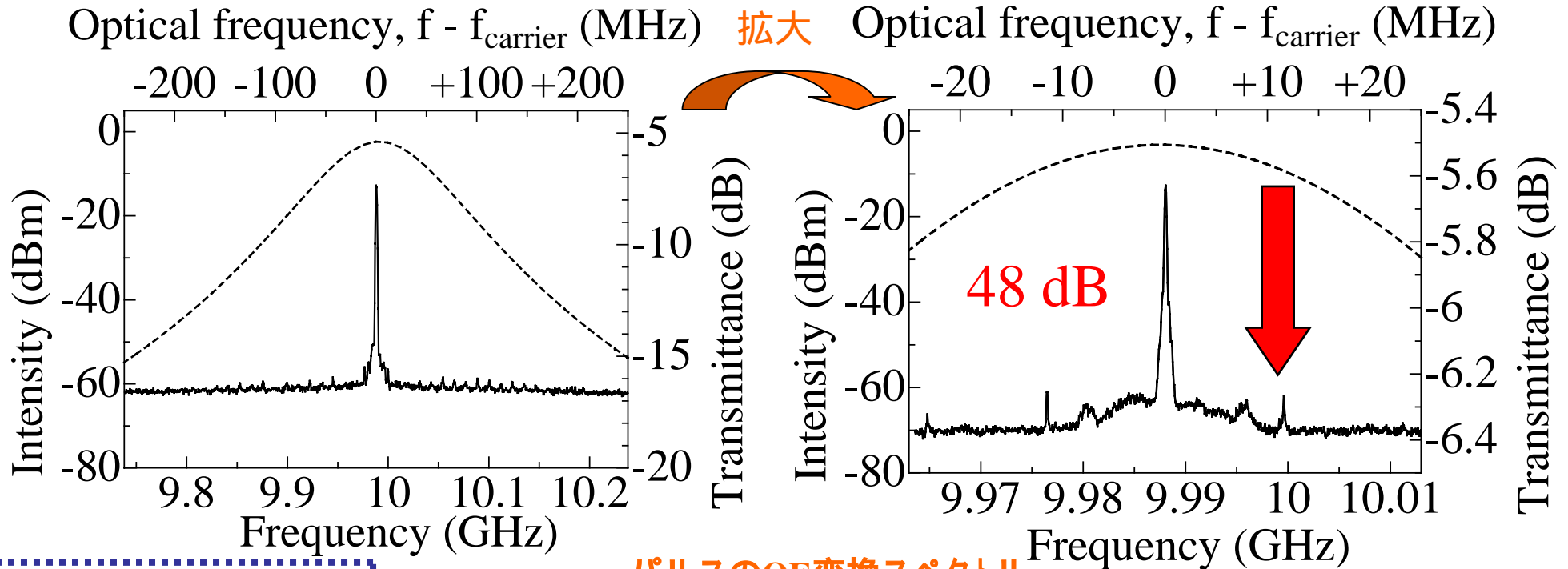


自己相関波形

中心光周波数 : 193.52 THz
(中心光波長 : 1549.2 nm)
パルス幅 : 3.9 ps
パルス消光比 : > 15 dB

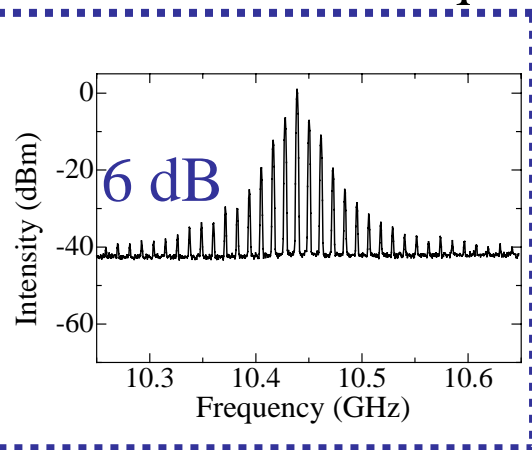
黒線 : パルスの測定結果
青線 : 測定系のバックグラウンド

パルス発生結果 遅延時間 = 5.0 ps (2)



パルスのOE変換スペクトル

実線: 測定結果, 破線: エタロンの透過スペクトル

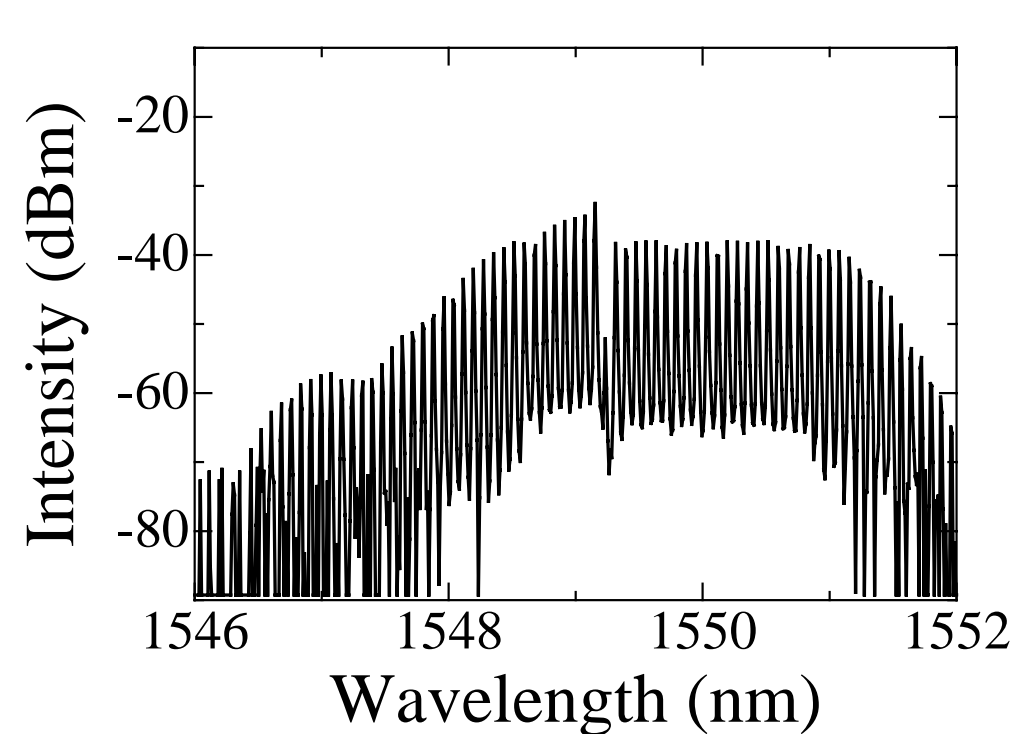


本研究以前の結果

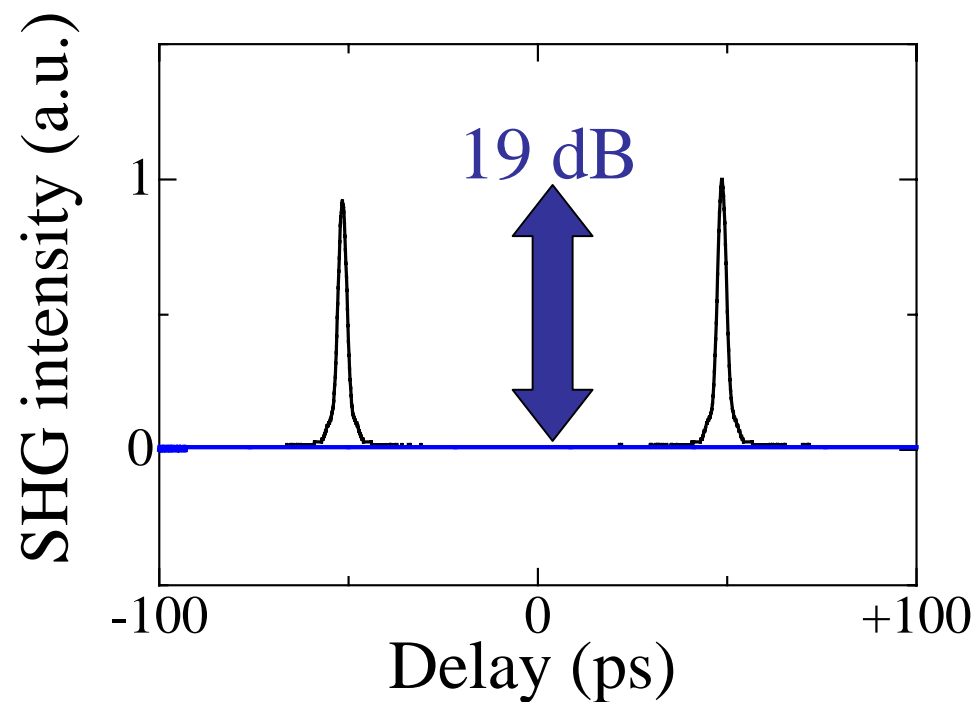
ピーク周波数: 9.9891 GHz
 共振器周波数, f_c : 11.7 MHz
 エタロンの3 dB帯域幅, BW: 180 MHz

サイドモード抑圧比(SMR)を本研究以前より42 dB 改善 ¹⁰

パルス発生結果 遅延時間 = 2.2 ps (1)



光スペクトル

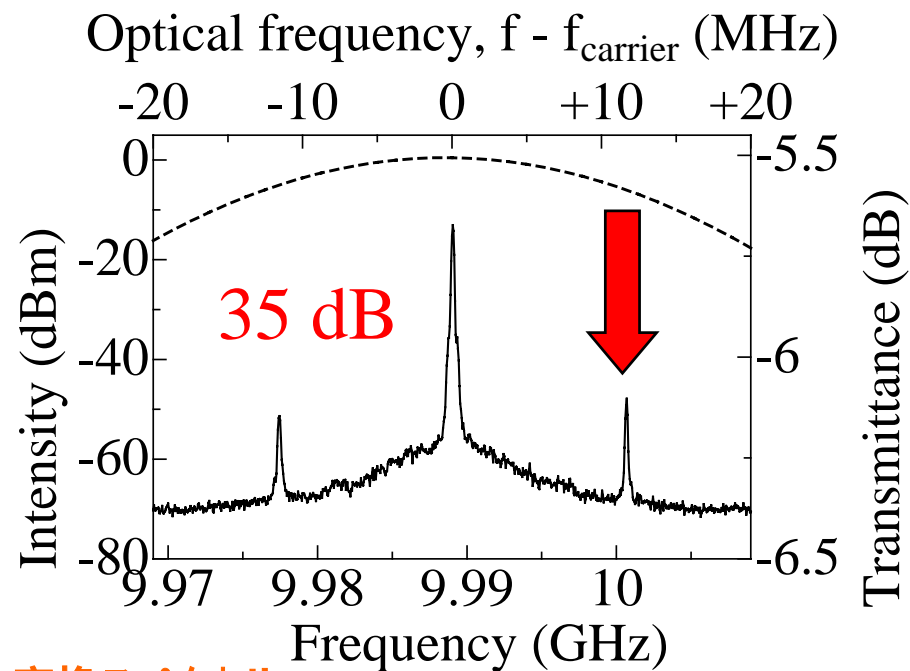
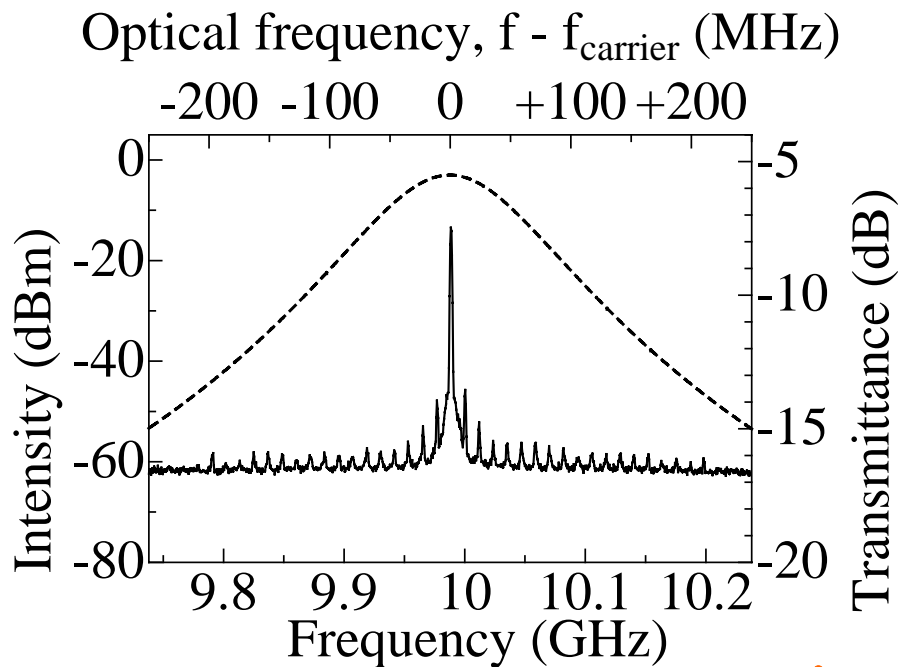


自己相関波形

中心光周波数: 193.52 THz
(中心光波長: 1549.2 nm)
パルス幅: 2.1 ps
パルス消光比: >19 dB

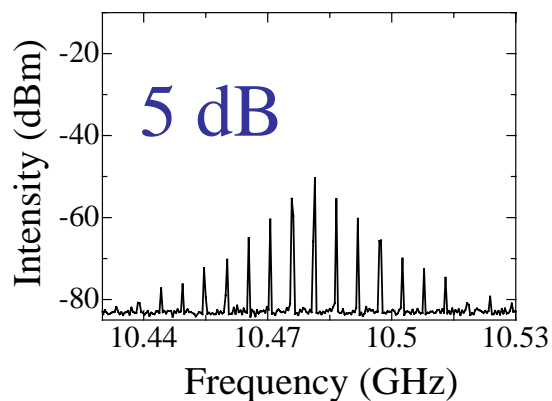
黒線: パルスの測定結果
青線: 測定系のバックグラウンド

パルス発生結果 遅延時間 = 2.2 ps (2)



パルスのOE変換スペクトル

実線: 測定結果, 破線: エタロンの透過スペクトル



本研究以前の結果

ピーク周波数: 9.9891 GHz
 共振器周波数, f_c : 11.7 MHz
 エタロンの3 dB帯域幅, BW: 180 MHz
 BW/ f_c : 15

サイドモード抑圧比(SMSR)を本研究以前より30 dB 改善

高フィネスエタロンを使用し、DISC-loop型パルス発生器 において単一縦モード発振を初めて実証

条件

- ・エタロンの3 dB帯域幅 / 共振器周波数 = 15.4
(共振器周波数: 11.7 MHz、エタロンの3 dB帯域幅: 180 MHz)
- ・注入連続光の光周波数を共振器周波数以下の精度で制御

今後の課題

- ・短パルス化 (< 1.5 ps)
- ・高繰り返し周波数 (> 40 GHz)での単一縦モードの実現
- ・パルス発生器の小型、集積化

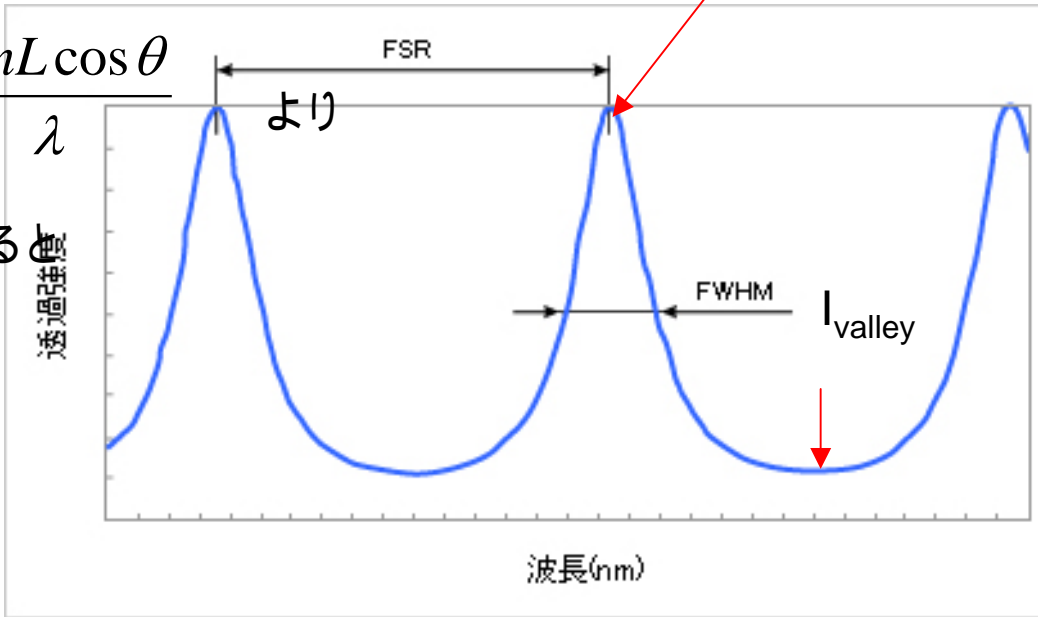


8/21 フィネスを用いて反射率を出すのは、問題がある??? のエタロンの定義最終版
 カルサイトの透過スペクトルのpeakとvalleyを使って、反射率Rを導出する。

I_{peak}

$$\frac{I_{trans}}{I_{input}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)}$$

$$\delta = \frac{4\pi nL \cos \theta}{\lambda}$$



単純に考えて、 I_{peak} が最大、 I_{valley} が最小になるとすれば、

$$I_{peak} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \times 0}$$

$$I_{valley} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \times 1}$$

となる。これより

$$\frac{I_{valley}}{I_{peak}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R} = \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2$$

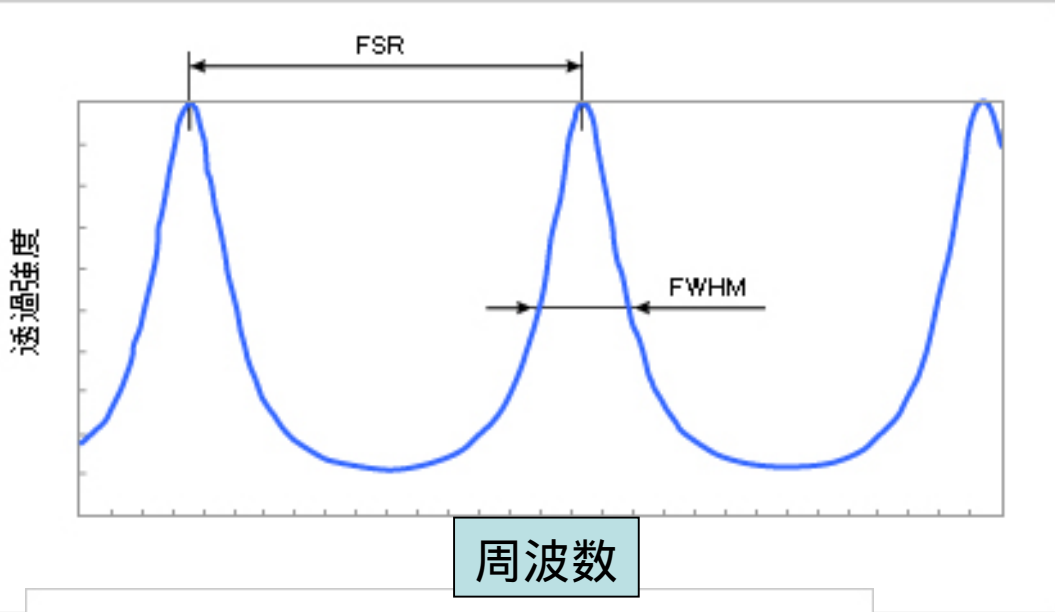
となる。この I_{valley} と I_{peak} の比率は、透過強度 I が[dBm]の場合、結局それぞれの差分が、その比になるのでグラフから求めた最大-最小がこの I_{valley}/I_{peak} である。その値をとすると。

$$\gamma = \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2 \quad \text{変形して} \quad R = \frac{1-\sqrt{\gamma}}{1+\sqrt{\gamma}} \quad \text{となる。}$$

この式でも以前の式と同じ結果が得られ。この方が単純で分かりやすいといえる。計算ミスも少なくすむのでこちらを使ったほうが良いようだ。

7/26 エタロンとしての厚さについて

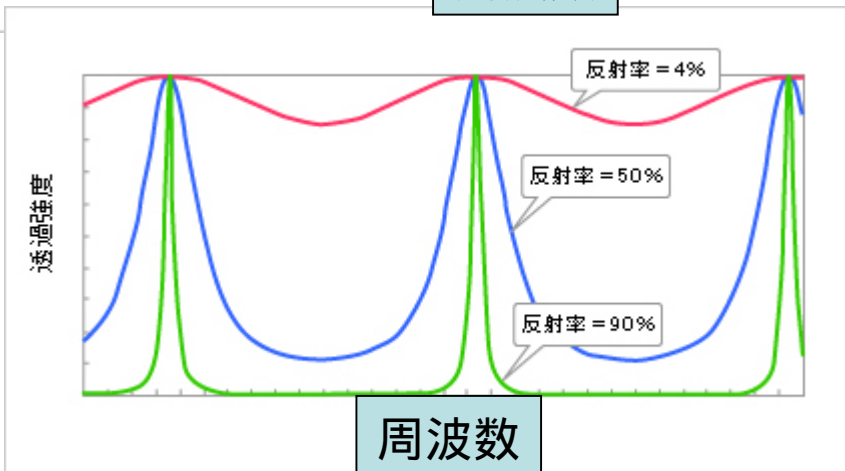
先日の偏光子無しの際のデータを用いて、修正した計算式で、少し計算したが、なんだかおかしい。エタロンとしての影響をカルサイトと同じように計算しているのは問題のようだ。遅延時間を求めるならば、カルサイトと同じ方法でよいが、エタロンとしての厚さや、反射率を求めるに違う方法が必要なようだ。



結局周波数軸とスペクトル軸は、線形に変換できるので ($f = \nu / \lambda$ なので) $\nu \propto \lambda$ (ただし、波長による屈折率変化が急激では非線形になるはず $\nu = c / n$ なので)

スペクトルのフリンジからFSRとFWHMを求めそこから計算すべきようだ。

$$FWHM = \frac{FSR}{F} \quad F \equiv \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$$



$$FWHM(\Delta \nu(1/2)) = \frac{FSR(\Delta \nu)}{F} = \frac{c}{2nLF \cos \theta}$$

$$FSR(\Delta \nu) = \frac{c}{2nL \cos \theta} \quad L = \frac{c}{2nFSR(\Delta \nu) \cos \theta}$$

は光軸とエタロンとの角度なので 16
垂直になっているから $\theta = 0 \quad \cos \theta = 1$

エタロンの式は問題なく、問題は波長から周波数軸に変えてから、グラフからパラメータを読み取る必要があることだったようだ。

グラフからpeak to peakでFSR()を求める。そこからまずエタロンとしての厚さを求めると

$$L = \frac{c}{2nFSR(\Delta\nu)\cos\theta}$$

ここで大まかにカルサイトの厚さと合ってるか確認した後
グラフからMZIの効果を検討に入れつつ半値幅を求める。
半値幅FWHM,FSRが分かったのでフィネスFを求めると

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad F \equiv \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

これから反射率を求めると

計算が間違っていたので右に修正

$$R = \frac{2F^2 + \pi^2 \pm \pi\sqrt{1+4F^2}}{2F^2}$$



$$R = 1 + \frac{\pi^2}{2F^2} \pm \sqrt{\frac{\pi^2}{F^2} + \frac{\pi^4}{4F^4}}$$

このRは反射率、また反射係数rを求めると

$$r = \sqrt{R}$$

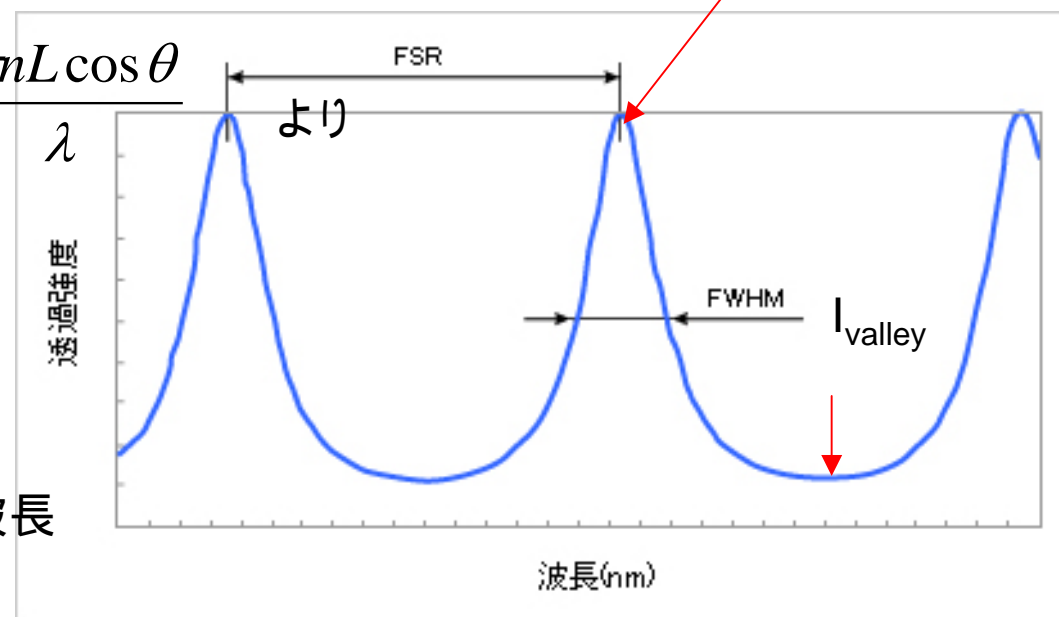
反射率Rは最高1まで。1以上になっているのは
計算上発生してしまうため。

フィネスを用いて反射率を出すのは、問題がある???ので エタロンの定義最終版
 カルサイトの透過スペクトルのpeakとvalleyを使って、反射率Rを導出する。

I_{peak}

$$\frac{I_{trans}}{I_{input}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)}$$

$$\delta = \frac{4\pi nL \cos \theta}{\lambda}$$



$$\frac{I_{peak}}{I_{valley}} = \frac{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta(\lambda_2)/2)}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta(\lambda_1)/2)}$$

$$[dBm] = 10 \log_{10} \frac{[mW]}{1mW} \quad [W] = 10^{10} [dBm]$$

ここで λ_1, λ_2 はそれぞれpeakとvalleyでの波長
 ここから変形すると

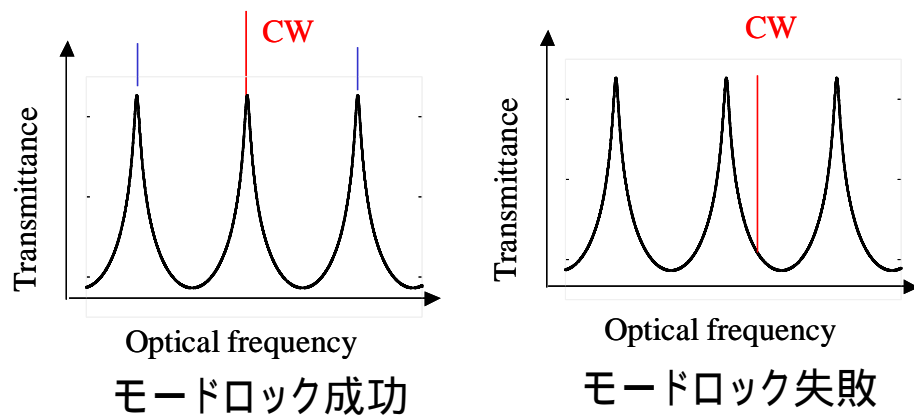
$$R^2 + \left[4 \frac{\sin^2(\delta(\lambda_1)/2)I_{peak} - \sin^2(\delta(\lambda_2)/2)I_{valley}}{I} - 2 \right] R + 1 = 0 \quad (I = I_{peak} - I_{valley})$$

$$R = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad b = \left[4 \frac{\sin^2(\delta(\lambda_1)/2)I_{peak} - \sin^2(\delta(\lambda_2)/2)I_{valley}}{I} - 2 \right]$$

$$r = \sqrt{R}$$

この式でも反射率Rは2通り出てくる。ただしR>1は実際に存在しないので、ひとつに絞れる。
 MZIとエタロンの効果を完全に分離しないと、振幅からではきれいにしなそうさそうだ。

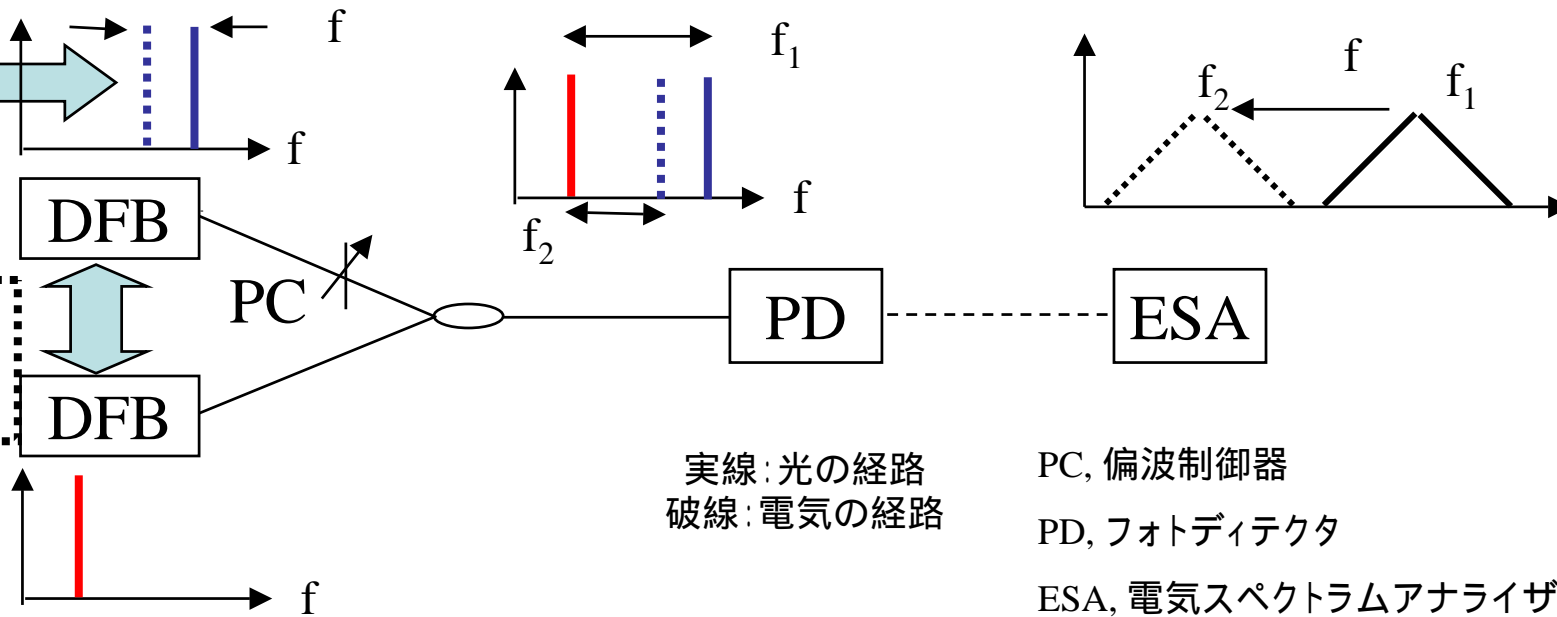
注入連続光の光周波数制御



エタロンの透過スペクトルのピークに
10 GHz間隔の高調波成分が立つ

印加電圧の変化による
光周波数シフト

同じ仕様のレーザと
駆動&制御システム
(直流電源 & 温度コントローラ)

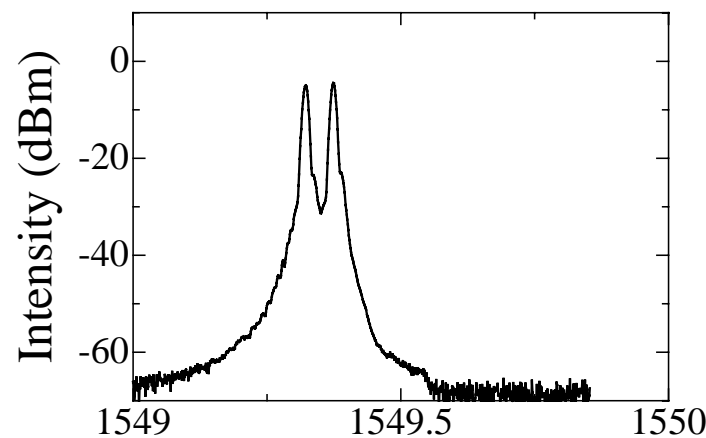


実線: 光の経路
破線: 電気の経路

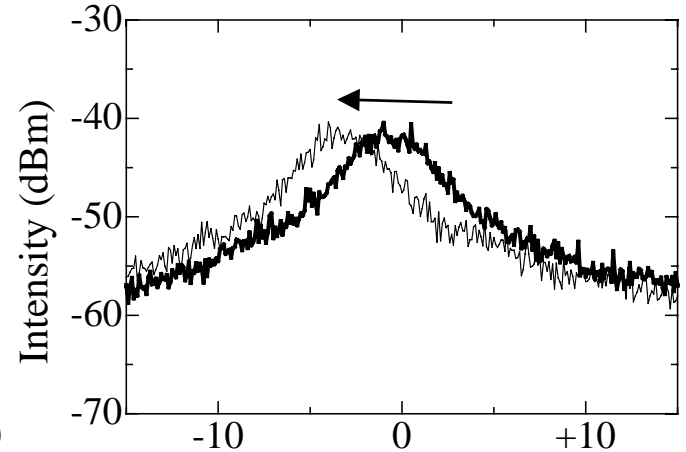
PC, 偏波制御器
PD, フォトディテクタ
ESA, 電気スペクトラムアナライザ

目標値
光周波数設定分解能、時間安定性が共振器周波数(12 MHz) 以下

DFBの光周波数制御性の測定結果

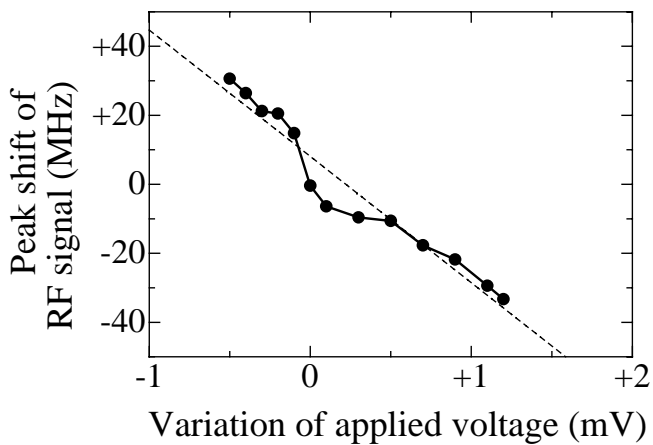


Wavelength (nm)
光スペクトル



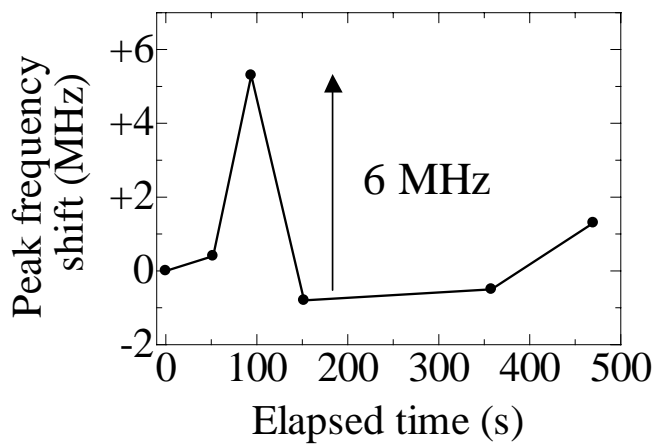
Frequency (MHz)
電気スペクトル

**+0.1 mV 変えることで
約4 MHzシフト**



実線:測定結果
破線:近似曲線
= -3.7 MHz / 0.1mV

光周波数設定分解能

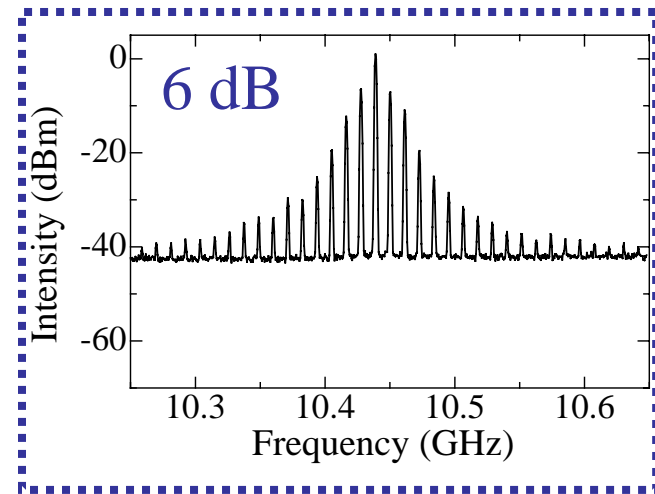


**DFB1台あたりの
時間安定性:3 MHz**

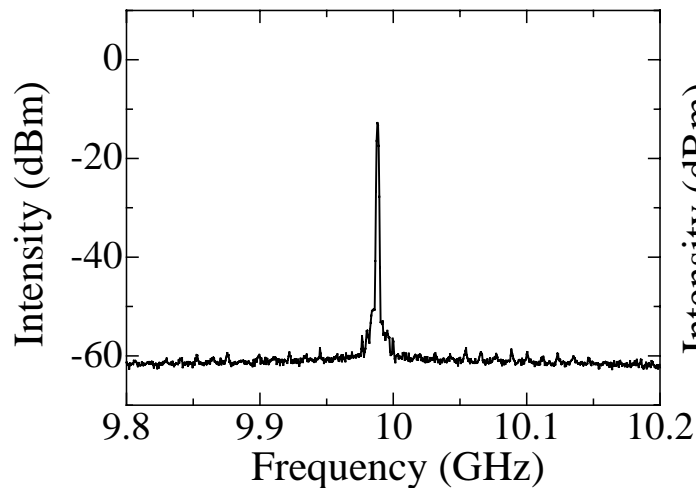
光周波数の時間安定性

共振器周波数以下の精度で連続光の光周波数を制御可能

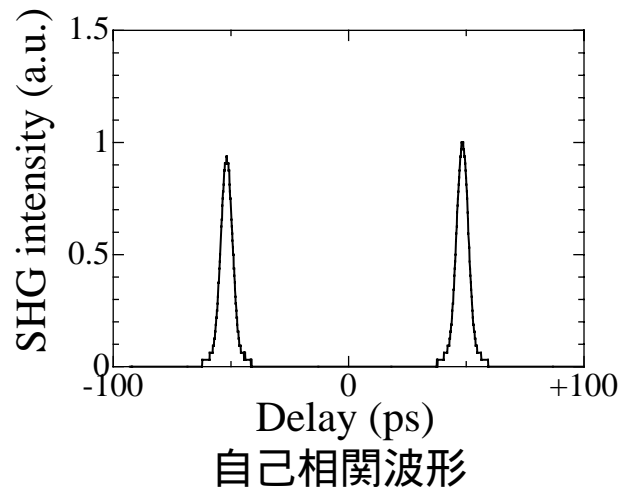
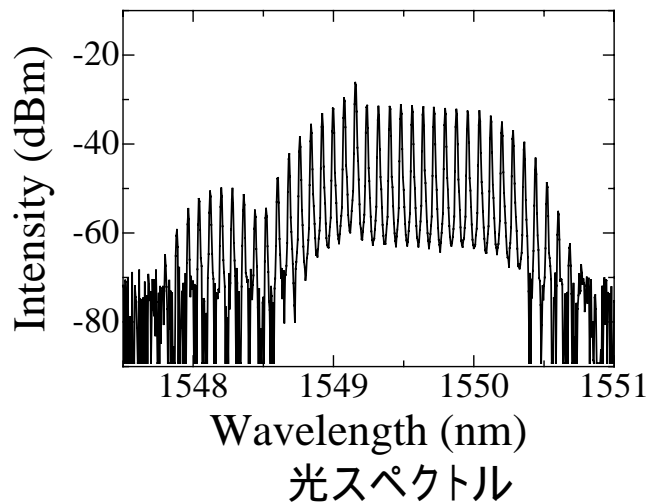
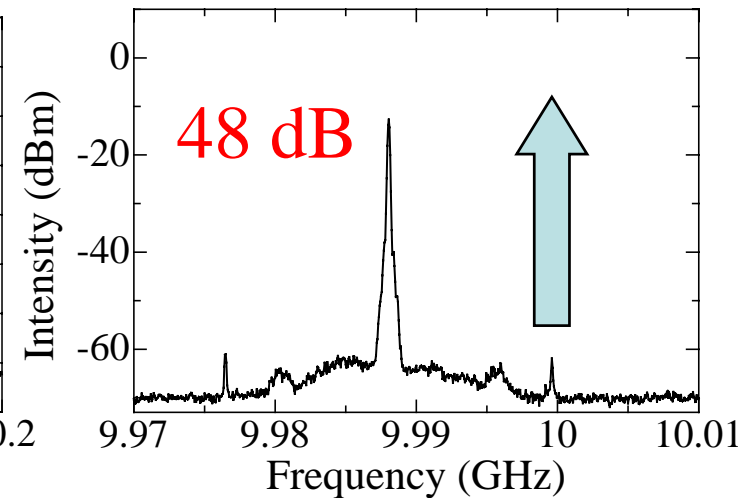
単一縦モード発振, 遅延時間 = 5.0 ps



本研究以前の結果



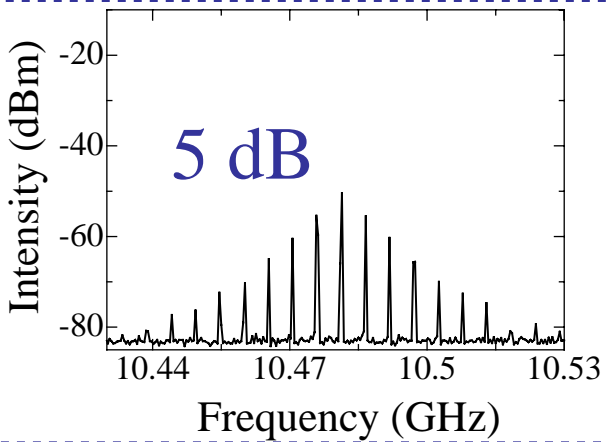
パルスのOE変換スペクトル



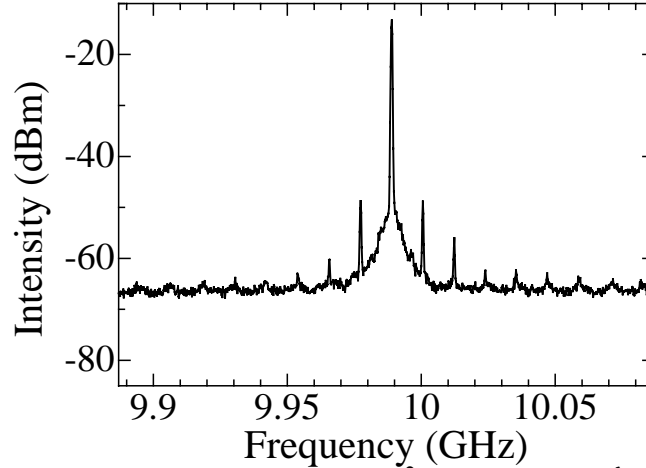
ピーク周波数: 9.9881 GHz
共振器周波数: 11.7 MHz
中心光周波数: 193.52 THz
(中心光波長: 1549.2 nm)
パルス幅: 3.9 ps
パルス消光比: 15 dB

サイドモード抑圧比(SMSR)を本研究以前より42 dB 改善²¹

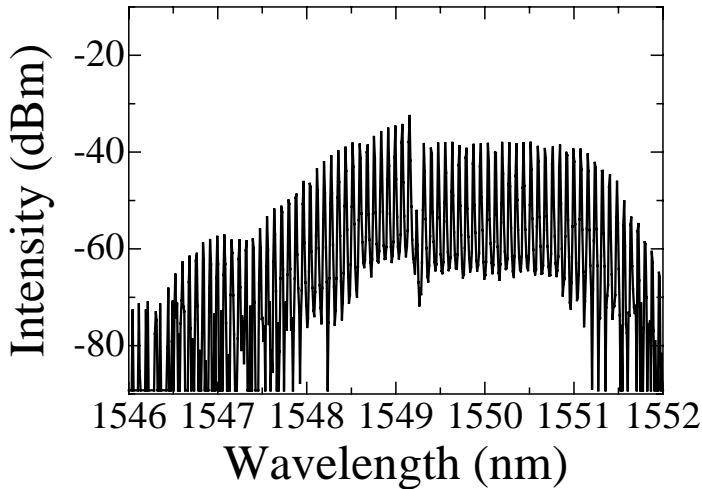
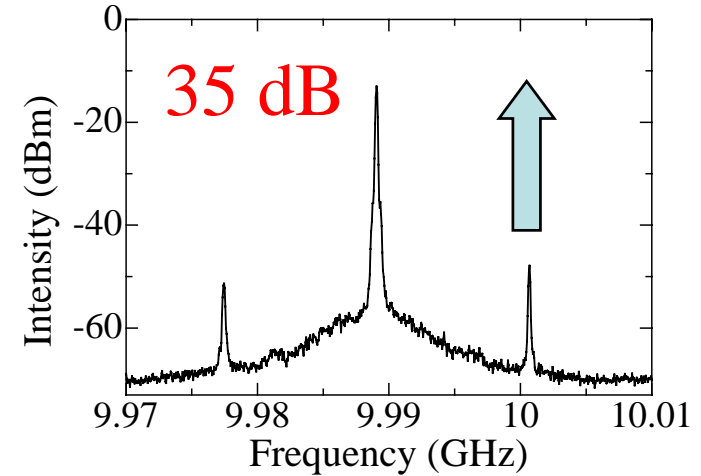
単一縦モード発振, 遅延時間 = 2.2 ps



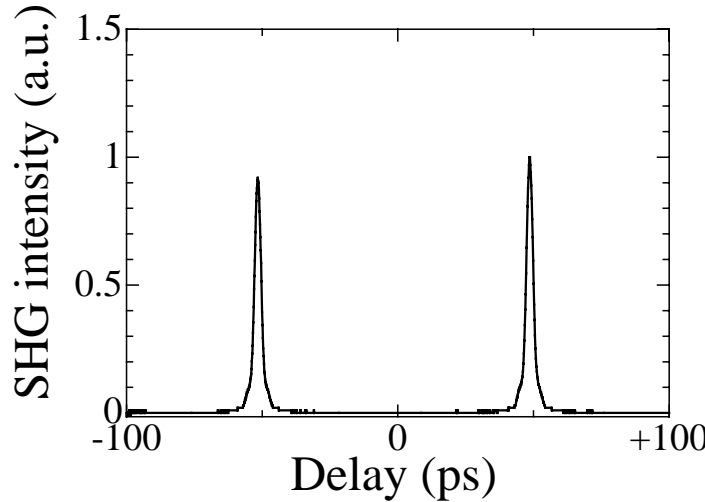
本研究以前の結果



パルスのOE変換スペクトル



光スペクトル



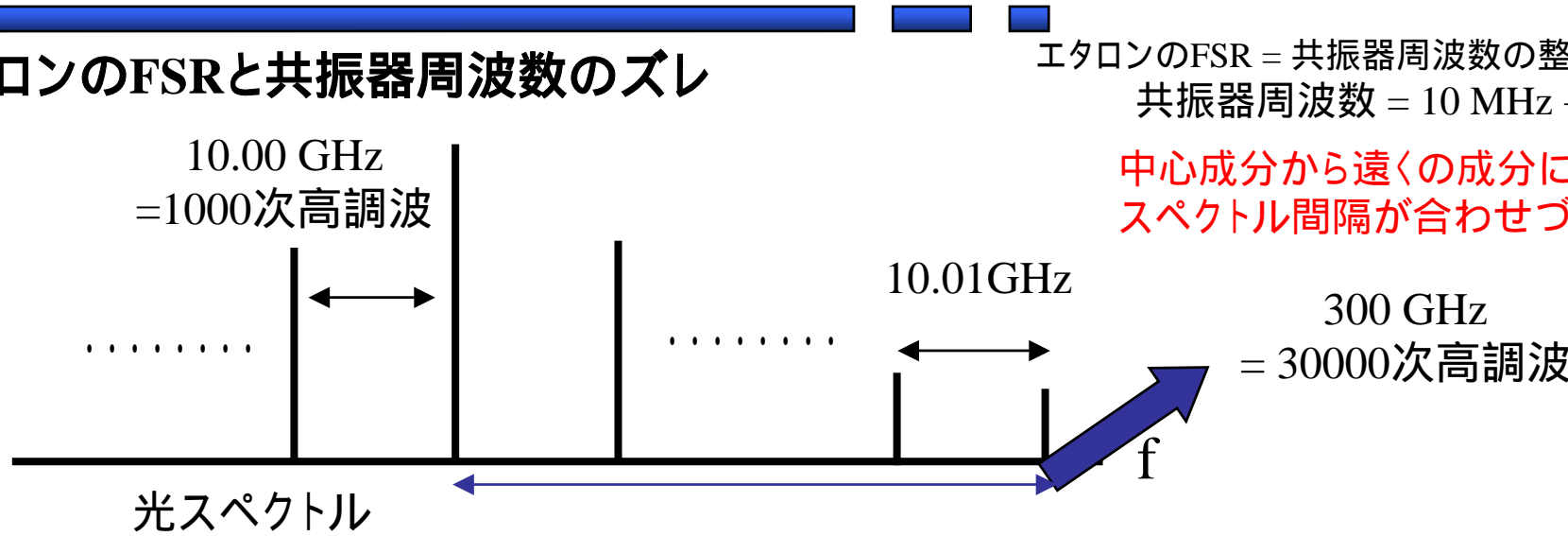
自己相関波形

ピーク周波数: 9.9891 GHz
共振器周波数: 11.7 MHz
中心光周波数: 193.52 THz
(中心光波長: 1549.2 nm)
パルス幅: 2.1 ps
パルス消光比: 15 dB

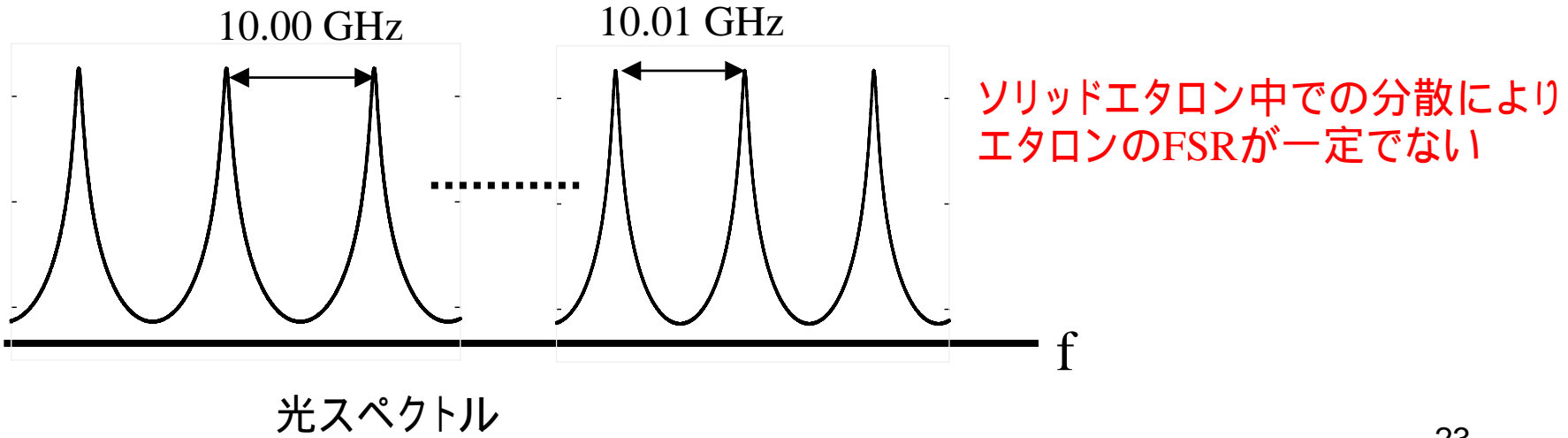
短パルス(繰り返し周波数80 GHz相当)発生時において、30 dB 改善

短パルス発生時のSMSR悪化の推定原因

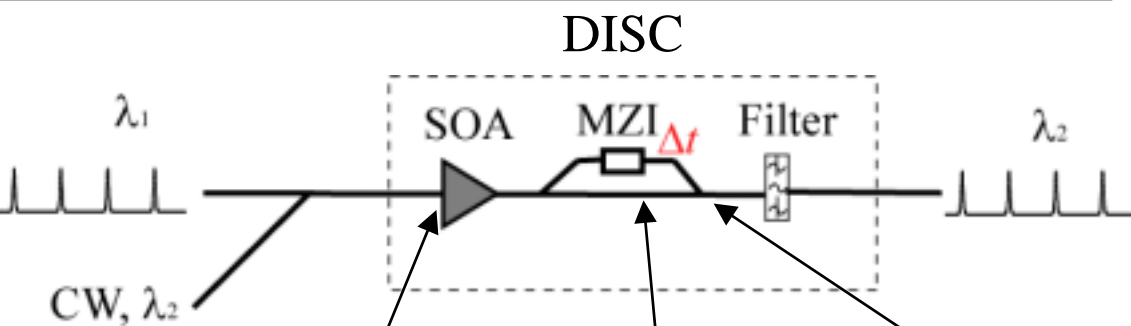
1. エタロンのFSRと共振器周波数のズレ



2. ソリッドエタロンの分散



超高速全光ゲート(DISC)の動作原理



研究報告

- ・ DISCの提案, Y. Ueno, NEC, (1998)
- ・ 320 Gb/sの波長変換
Y. Liu, TU Eindhoven COBRA, (2006)

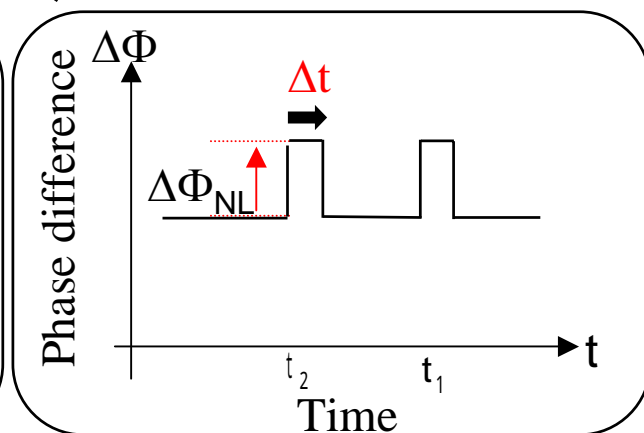
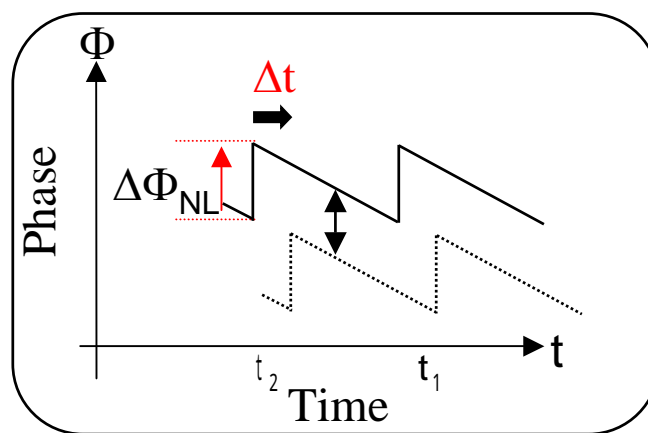
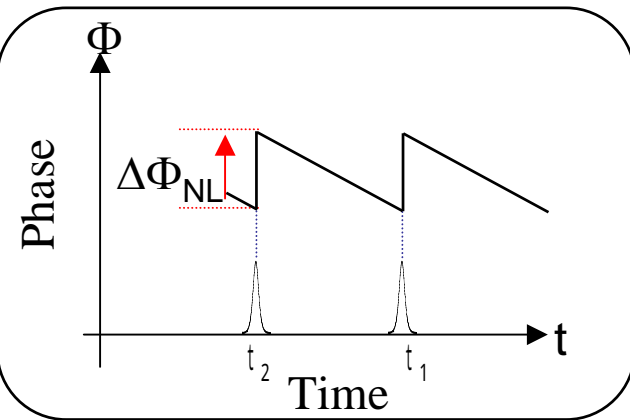
DISC: Delayed Interference Signal wavelength Converter
 SOA: Semiconductor Optical Amplifier
 MZI: Mach-Zehnder Interferometer

連続光の位相変調

連続光の干渉

2成分の位相の時間依存性

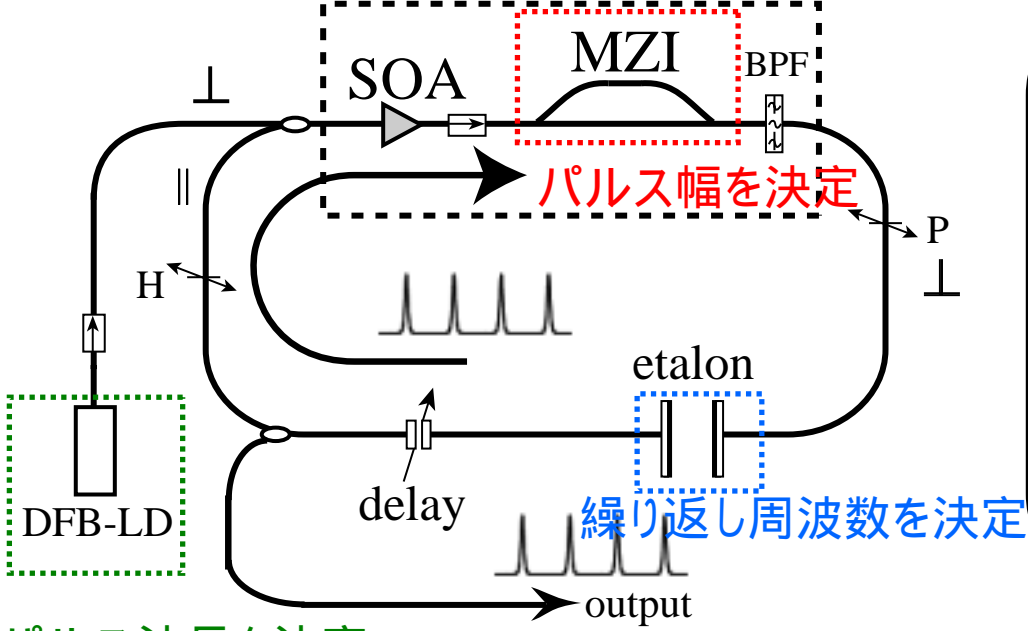
2成分間の位相差の時間依存性



超高速(Δt)のスイッチング動作が可能

パルス周回メカニズム

DISC 型全光偏光変換器



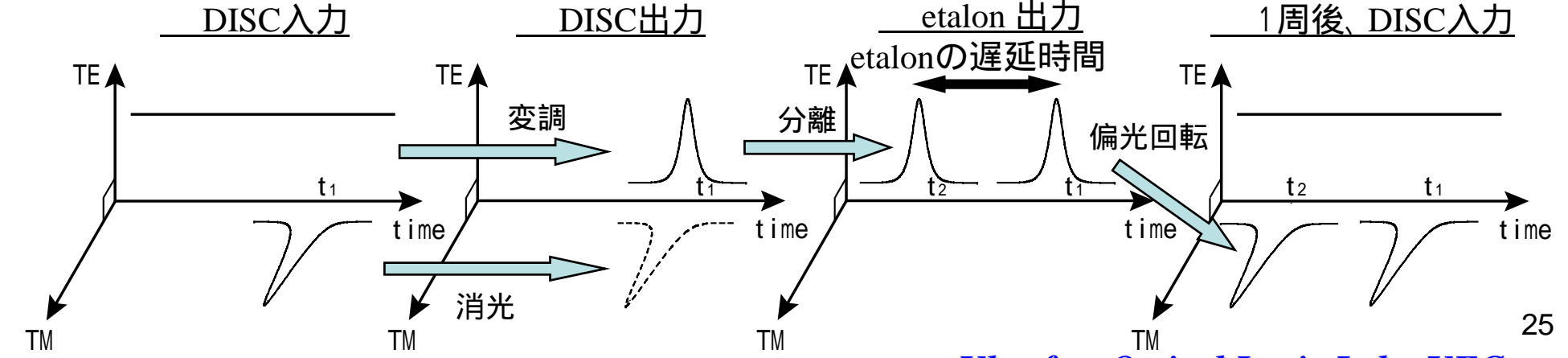
パルス周回メカニズム

定常状態において、**レーザ発振を抑制**

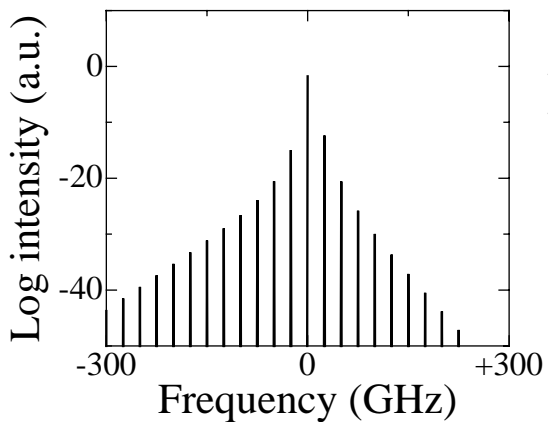
パルスと連続光を互いに
 直交偏光でDISCに入力
 連続光偏光の新しいパルスが発生し
 DISC入力パルスが消光される

etalonにて、パルスが分離して、
 遅延時間を受ける
 偏光が連続光に直交となったパルスが
 SOAに帰還

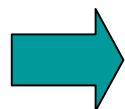
パルス波長を決定



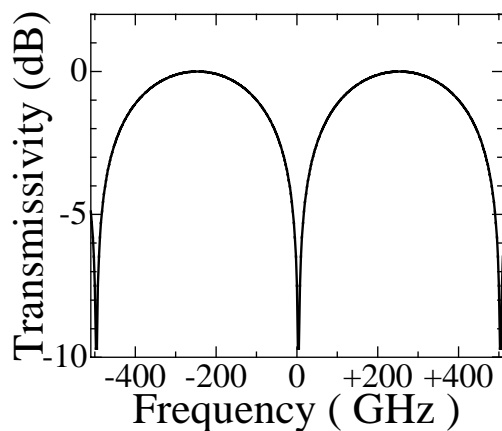
SOA出力スペクトル



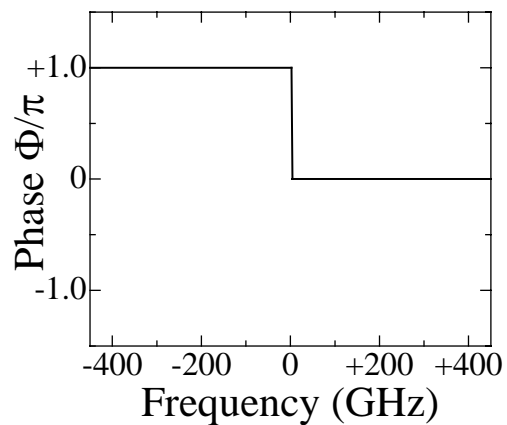
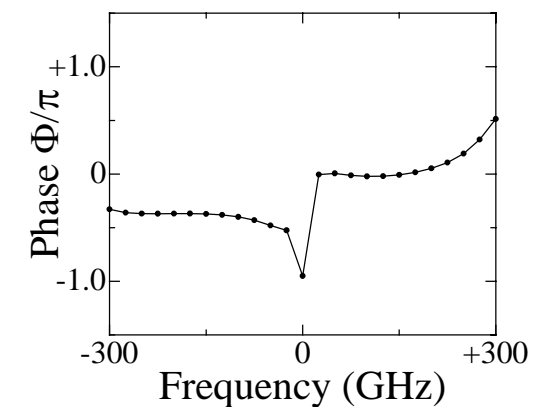
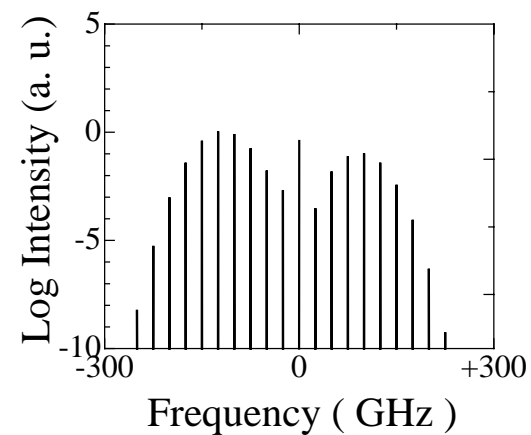
信号パルス幅2.0ps
信号周波数25GHz



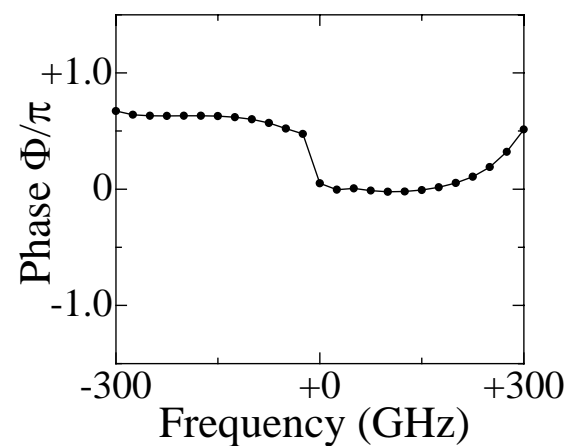
MZIの透過スペクトル



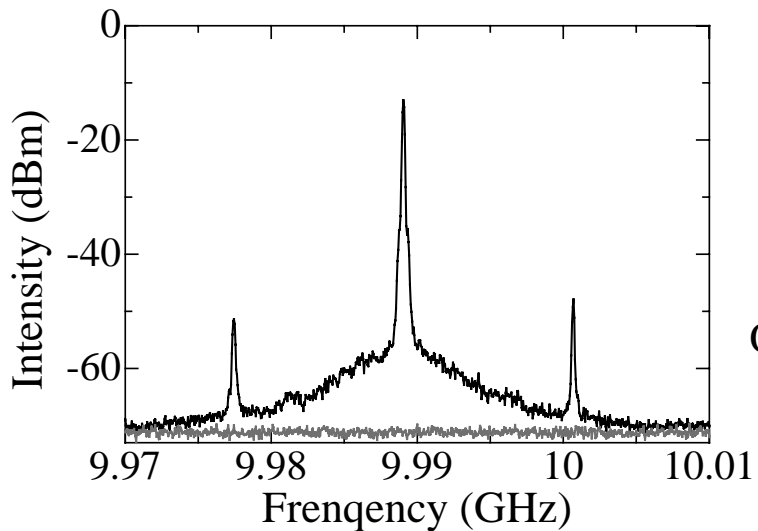
波長変換スペクトル



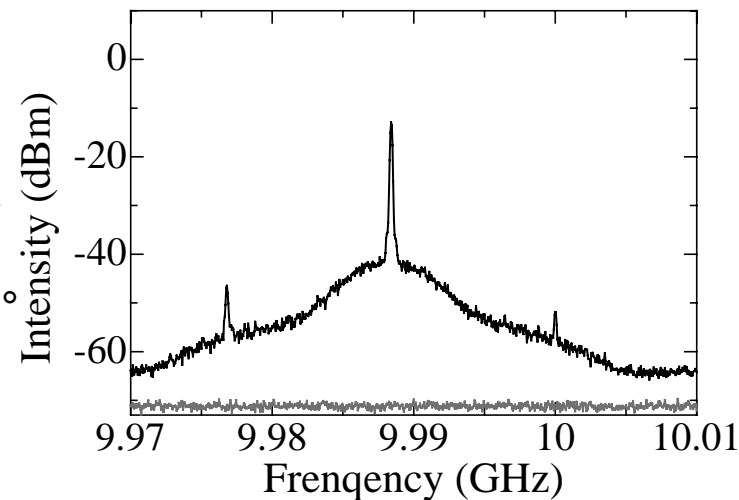
MZI遅延時間:2.0ps
位相バイアス:1.05



予備スライド



Q, Hによる偏光のズレ $< 1^\circ$



集積化の際に、精度の高い偏波制御、偏波消光比が必要

