

短パルス光源を用いた高空間分解能 BOCDA光ファイバセンサの解析

和歌山大学 システム工学部
松本 正行

光ファイバ応用技術研究会
OFT2020-53

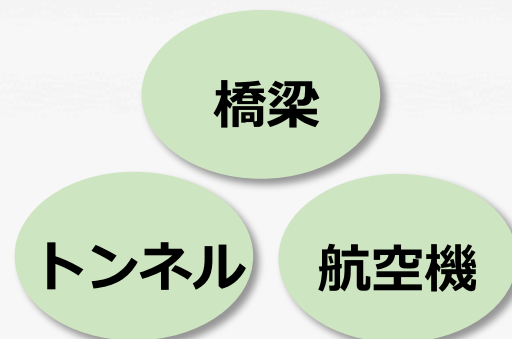
2021年1月15日

- ❖ ブリルアン光相関領域解析 (BOCDA) 光ファイバセンサ
- ❖ 短パルス光源を用いたBOCDA光ファイバセンサ
- ❖ 実験*
- ❖ 数値シミュレーション
 - PRBS位相変調 BOCDA
 - 正弦波周波数変調 BOCDA
- ❖ まとめ

*M. Matsumoto and S. Akai, J. Lightwave Technol., 37, 24, 6007 (2019).
実験を担当していただいた本学卒業生赤井伸伍氏に感謝します

分布型光ファイバセンサ

- 測定範囲が広い
- 電磁誘導の影響を受けない



温度、歪み、および振動の計測に用いられるファイバ中の物理効果

- ✓ レイリー散乱
- ✓ ラマン散乱
- ✓ ブリルアン散乱

ブリルアン光ファイバ相関領域解析法 (BOCDA) [1]
(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)

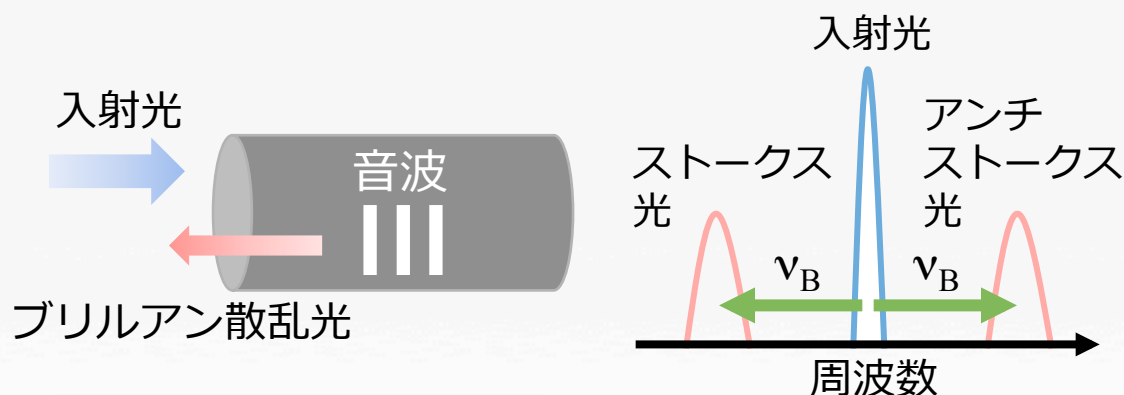
- ◆ 高空間分解能
- ◆ 高感度な分布測定

[1] K. Hotate and T. Hasegawa, IEICE Trans. Electron., E83, 3, 405 (2000).

ブリルアン散乱

自然ブリルアン散乱

ファイバ中の音波によって光が散乱される現象



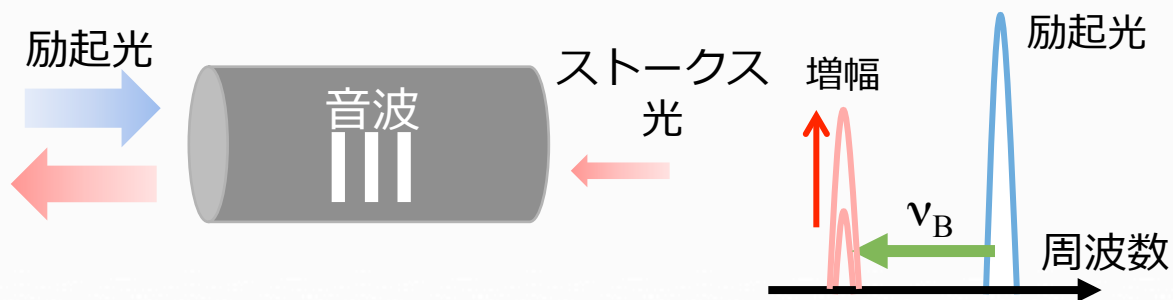
周波数シフト量
(ブリルアン周波数シフト：BFS)

$$\nu_B = 2n\nu_A/\lambda$$

n : ファイバの屈折率
 ν_A : 音速
 λ : 光の波長

誘導ブリルアン散乱

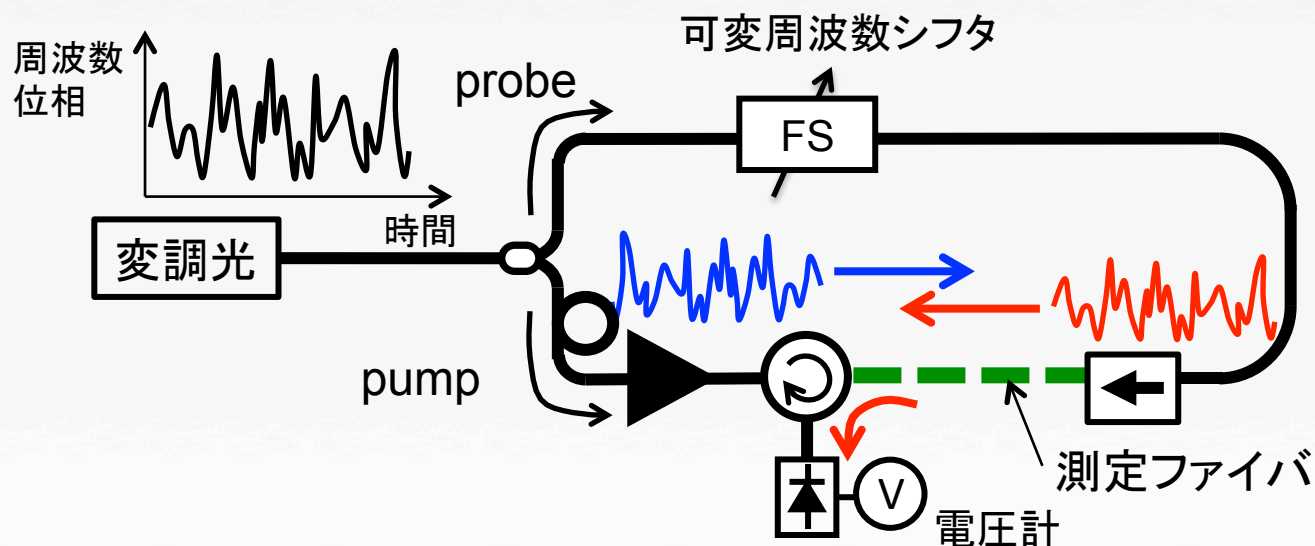
音波の誘導的な励起を伴いながら励起光とストークス光が相互作用する現象
(ストークス光が増幅される)



プローブ光 (ストークス光) の利得が最大になるプローブ光周波数からBFSを読み取る

BFSは光ファイバ中の歪と温度変化に比例して変化

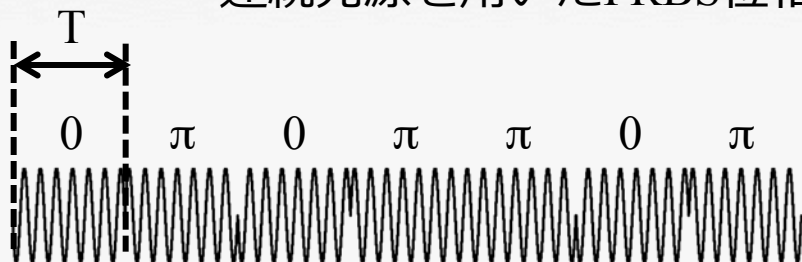
BOCDAの構成



BOCDAで用いられる光源

- 正弦波状に周波数変調された連続光
- 擬似ランダム(PRBS)位相変調された連続光
- 増幅自然放出光(ASE)
- ランダム (カオス) レーザ
- 擬似ランダム(PRBS)変調された短パルス光

連続光源を用いたPRBS位相変調BOCDA (従来)



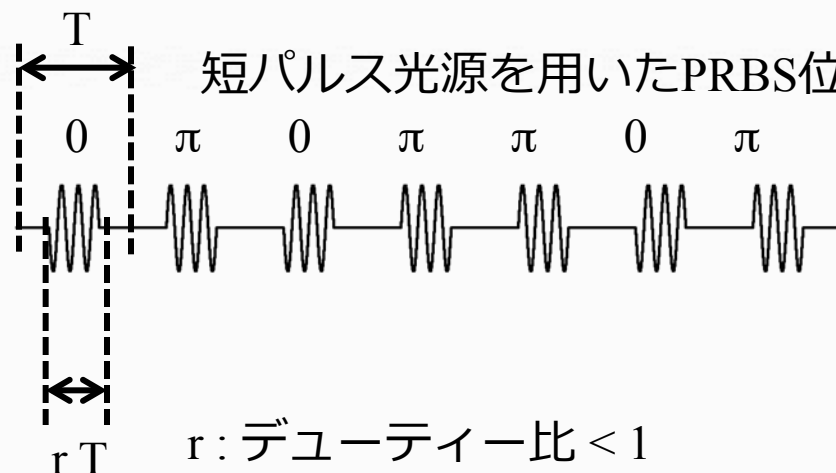
空間分解能 $\Delta z = v_g T/2$

測定範囲 $d_m = NTv_g/2$

T : PRBSのビット時間

v_g : ファイバ中の光の群速度

N : PRBSの周期



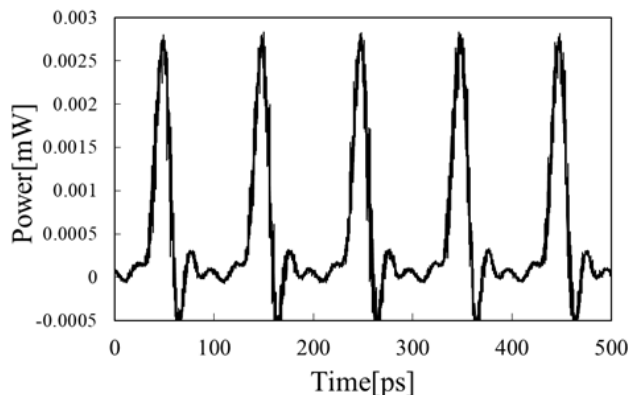
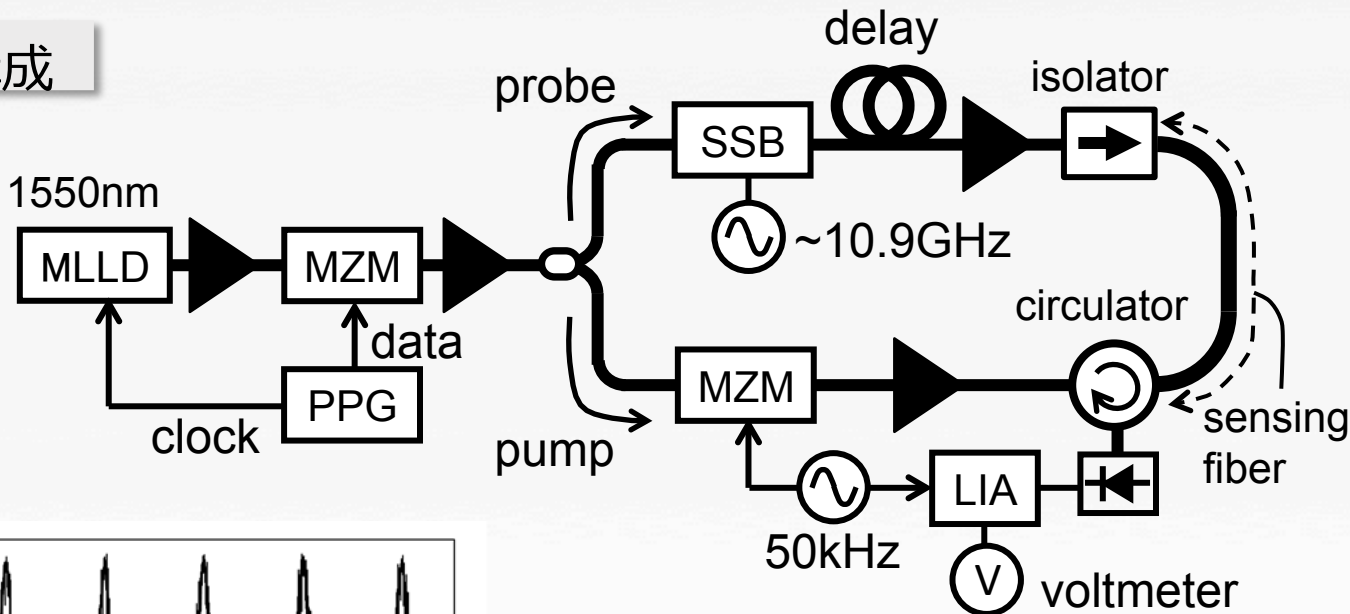
短パルス光源を用いたPRBS位相変調BOCDA (本研究)

空間分解能 $\Delta z = r v_g T/2$

r : デューティー比 < 1

M. Matsumoto and S. Akai, "High-spatial-resolution Brillouin optical correlation domain analysis using short-pulse optical sources", J. Lightwave Technol., 37, 24, 6007 (2019).

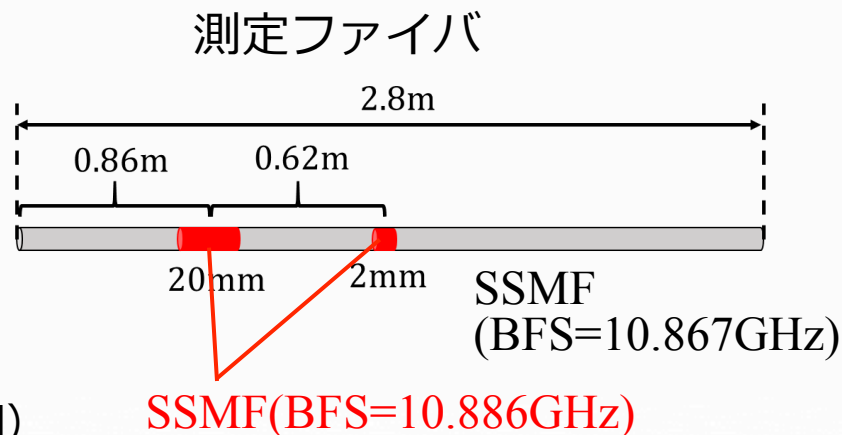
実験構成



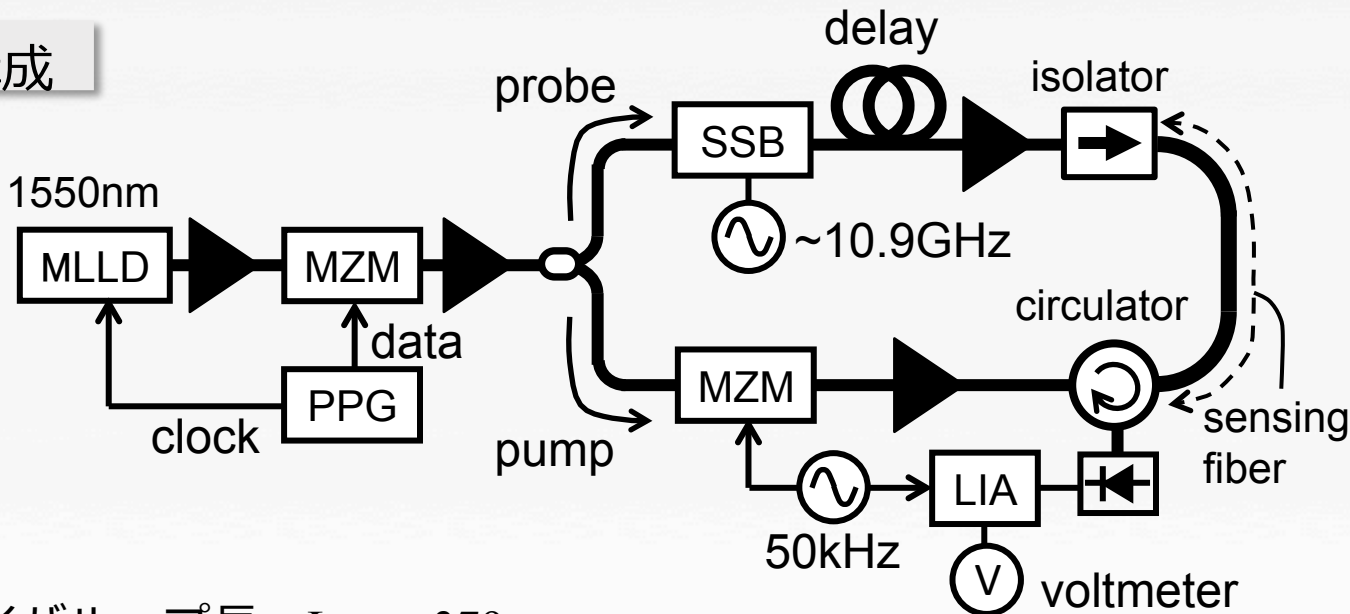
モード同期半導体レーザー出力波形

パルス幅~3ps

繰り返し周波数~10GHz (PPGのクロックと同期)



実験構成



ファイバループ長 : $L_{loop} = 379\text{m}$

分岐カプラから測定ファイバまでのプローブ光経路長 $L_1 = 346\text{m}$

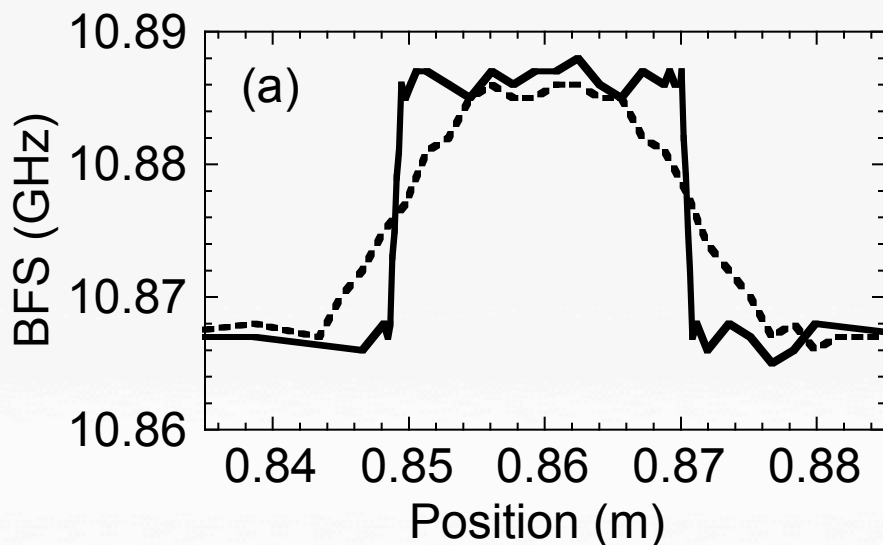
PRBSの周期 : $N = 2^9 - 1 = 511$

$$\text{測定ファイバ内の計測位置 } x = nNTv_g/2 + L_{loop}/2 - L_1$$

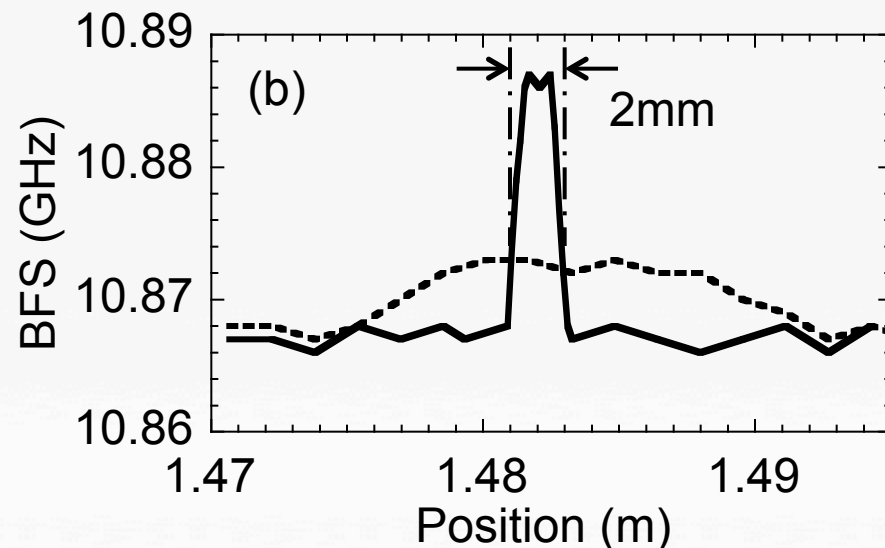
T : PRBSのビット時間, v_g : ファイバ中の光の群速度, n : 相関ピークの次数 (n=30)

- ✓ PRBSのビット速度 $B=1/T$ (PPGのクロック周波数) を変えることで計測位置を走査できる ($B=9.9265\sim 9.929\text{GHz}$)

◆ 20mm区間の計測結果



◆ 2mm区間の計測結果

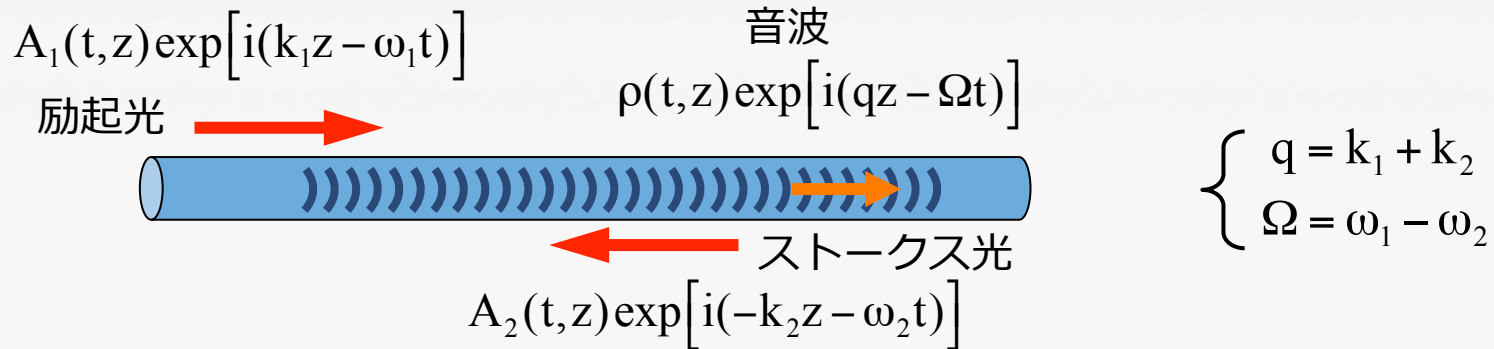


点線：連続光源 + PRBS位相変調、実線：短パルス光源 + PRBS位相変調

短パルス光源を用いた場合の距離分解能 < 1mm

- ASE光源を用いたBOCDAセンサにおける分解能 0.8mm
(A. Zarifi, et al., APL Photon., 3, 036101 (2018))
- 傾斜利用BOCDRにおける分解能 2mm
(H. Lee, et al., JJAP, 57, 020303 (2018))

と同程度以上の距離分解能



SVEA (包絡線が緩やかに時間変化するという近似) のもとでの方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_1}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} A_1 + i\kappa\rho A_2 \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial A_2}{\partial t} = \frac{\alpha}{2} A_2 - i\kappa\rho^* A_1 \end{array} \right.$$

音波による光の散乱

電歪効果による音波の励起

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\Gamma_B}{2} + \frac{i\Delta\Omega(z)}{2} \right] \rho = i\Lambda A_1 A_2^* + f(t, z)$$

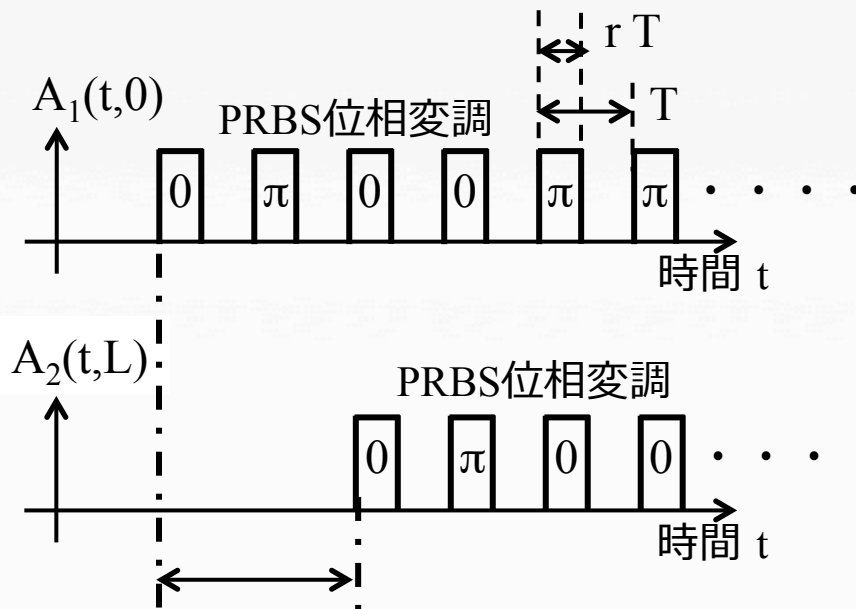
ω₁ - ω₂ からのBFSのずれ

音波の自然励起をもたらすガウス雑音
(実部および虚部のそれぞれの分散が $k_B T_e \rho_0 \Gamma_B / (v_a^2 A \delta z \delta t)$)



$$A_2(t,L) \exp(i2\pi Ft)$$

励起光とストークス光の周波数差 F を変えてストークス光の利得を計算し、利得が最大になる F を求める。そのときの $F = \text{BFS}$ 。



時間差を変えてBFS計測位置をスキャンする。

ビット速度 $B = 1/T = 10.3 \text{ Gb/s}$

ファイバ長 $L = 1 \text{ m}$

デューティー比 r

励起光平均電力 400 mW

ストークス光平均電力 100 mW

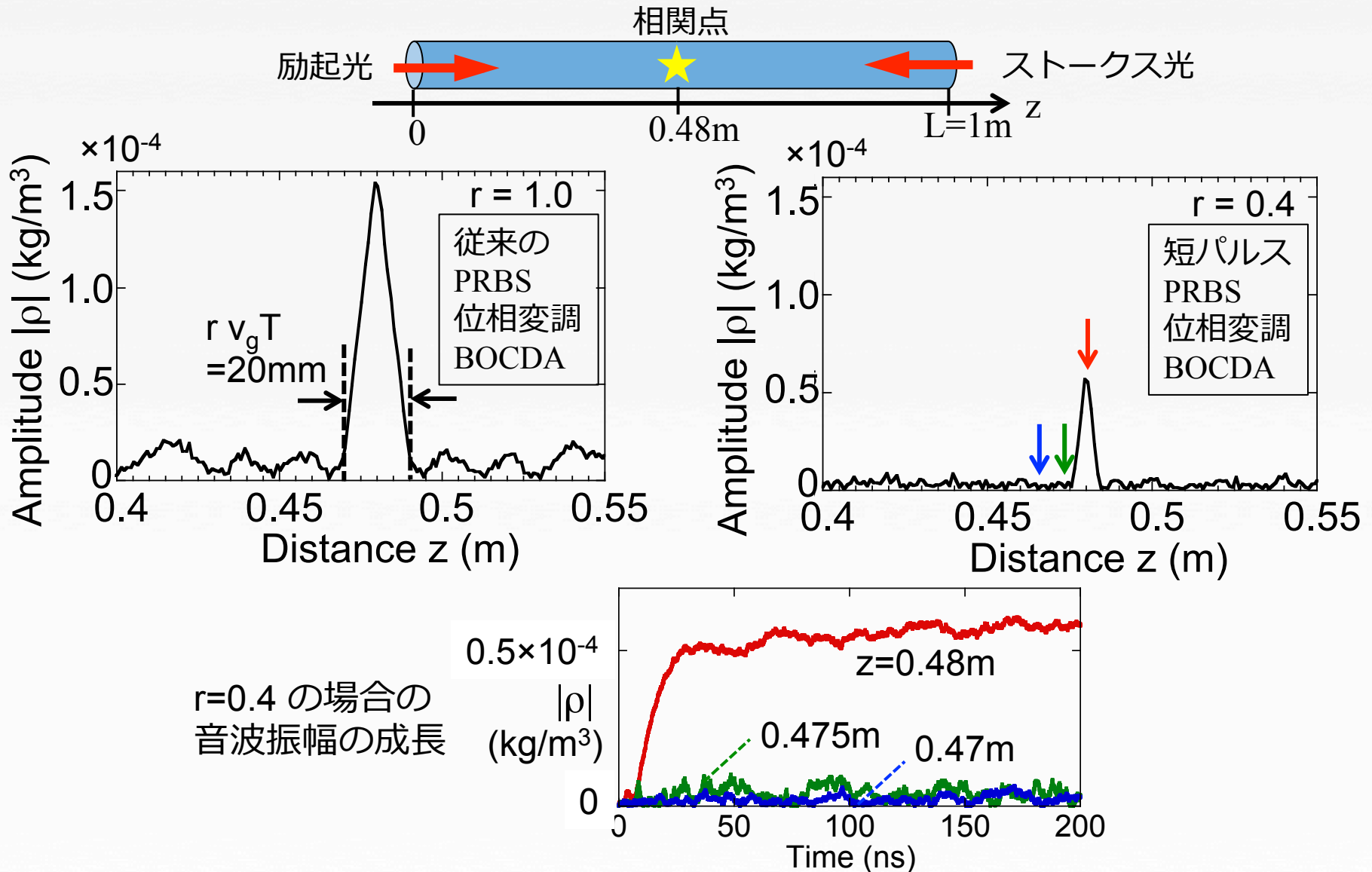
ファイバ諸定数

$$g_p = 1.9 \times 10^{-11} \text{ m/W}$$

$$n = 1.45$$

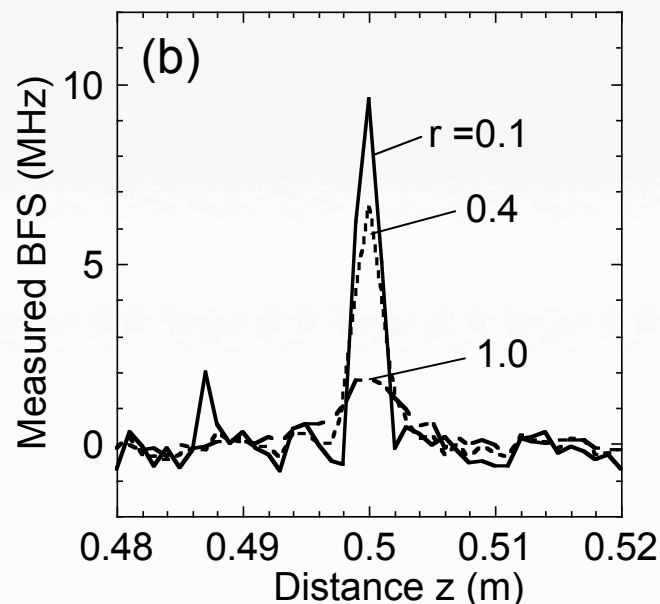
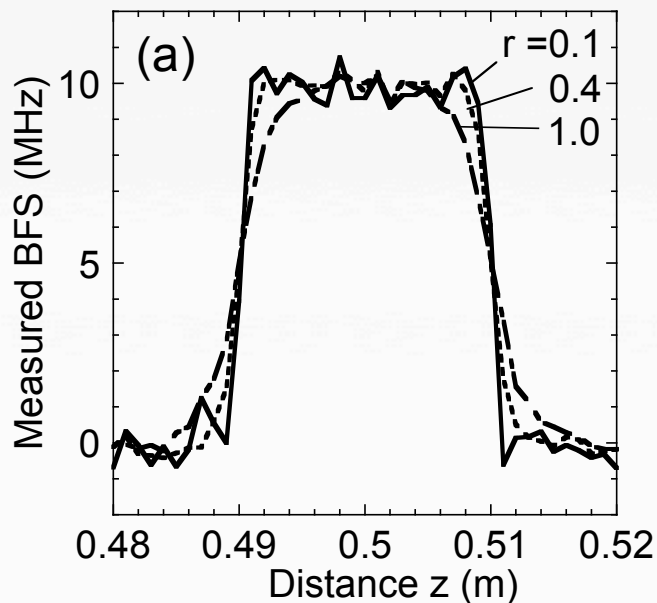
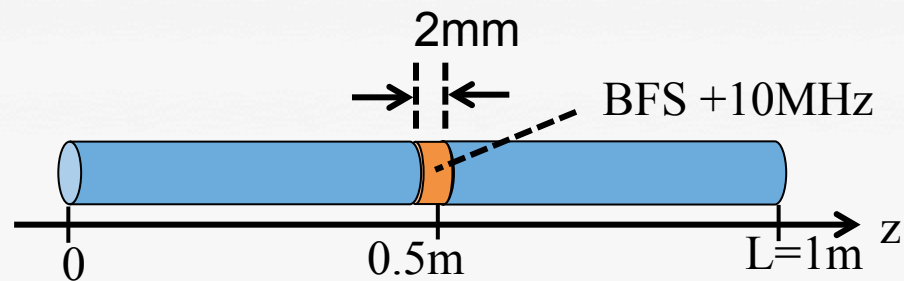
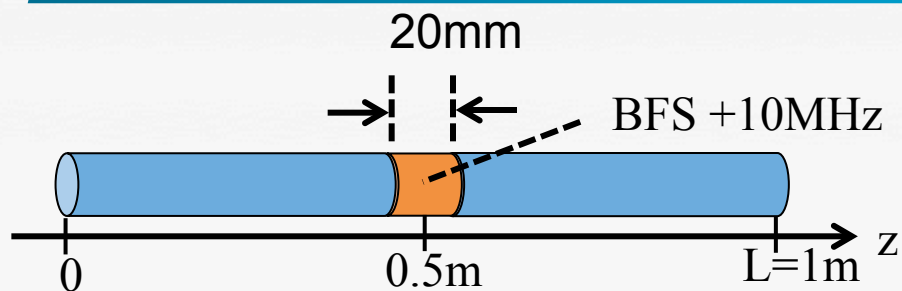
$$A_{\text{eff}} = 85 \mu\text{m}^2$$

ファイバ内の音波の振幅



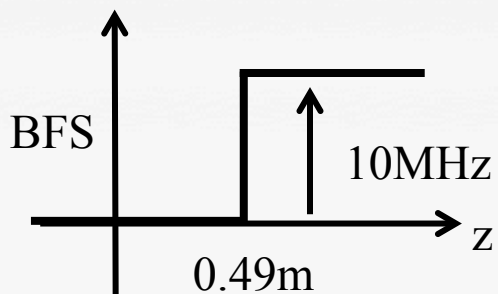
BFSの分布計測シミュレーション

13



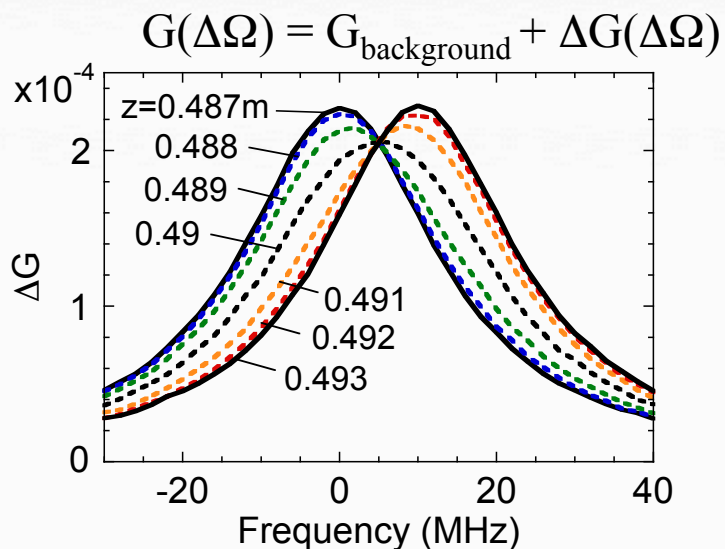
$r=0.1$: パルス幅 $rT=9.7\text{ps}$
 $r=0.4$: パルス幅 $rT=38.7\text{ps}$
 $r=1.0$: NRZ型 $T=96.7\text{ps}$

ストークス光電力積算時間: $2\mu\text{s}$



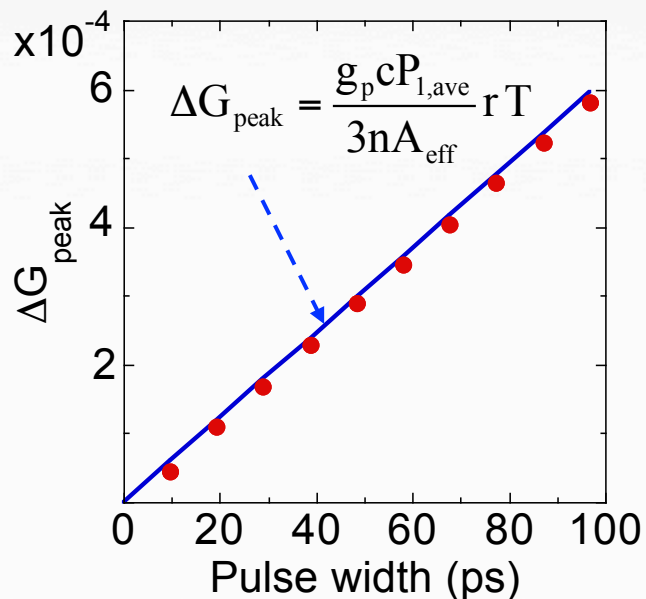
BFSが変化する位置の前後における利得スペクトル

ブリルアン散乱利得



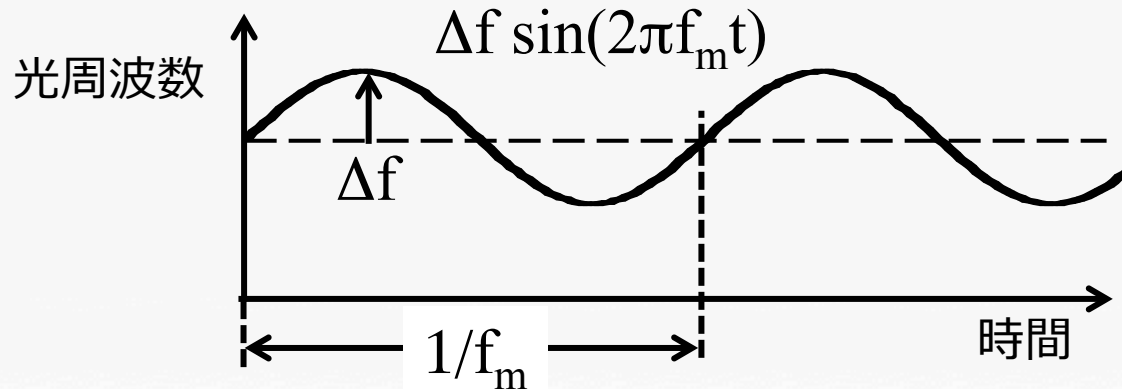
$r=0.4$ (パルス幅 $rT=38.7\text{ps}$)

ブリルアン利得最大値とパルス幅の関係



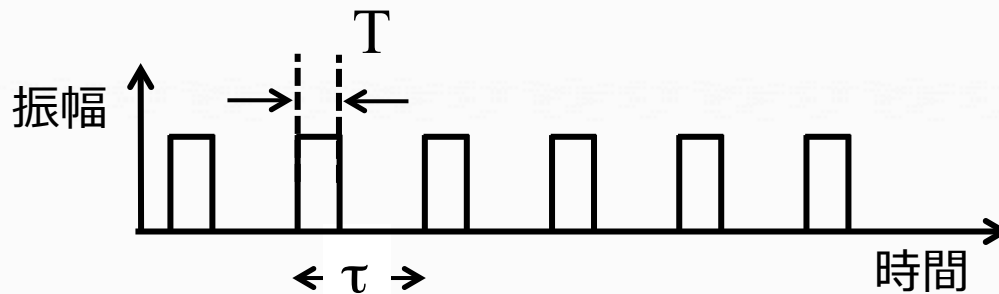
正弦波状周波数変調BOCDA

励起光およびストークス光の周波数を正弦波状に変調するBOCDA
(K. Hotate and T. Hasegawa, IEICE Trans. Electron., E83, 3, 405 (2000).)



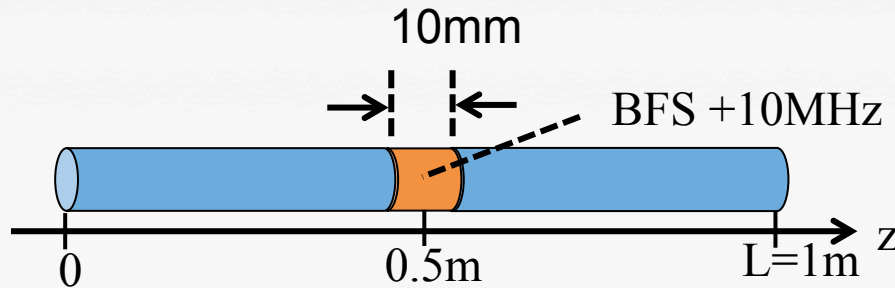
BFS測定の空間分解能

$$\Delta z = \frac{v_g \Delta v_B}{2\pi f_m \Delta f}$$



$T < \frac{2\Delta z}{v_g} \lesssim \tau < t_a$ (音波の寿命) となるようにパルス幅 T とパルス間隔 τ を定める

と、空間分解能が $\Delta z = \frac{v_g \Delta v_B}{2\pi f_m \Delta f}$ から $\Delta z' = \frac{v_g T}{2}$ に改善される



$$f_m = 5\text{MHz}, \Delta f = 5\text{GHz}$$

$$\Delta z = \frac{v_g \Delta v_B}{2\pi f_m \Delta f} = 38\text{mm}$$

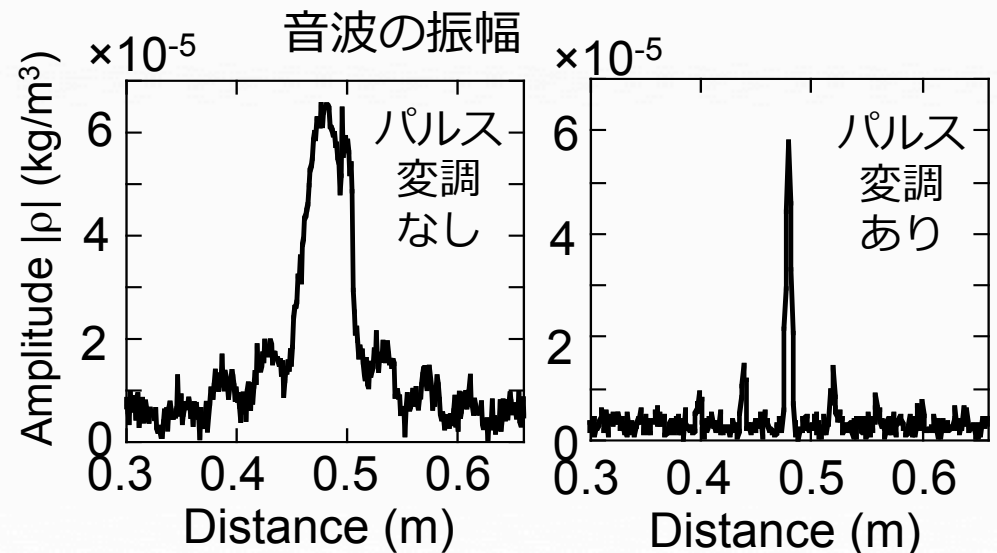
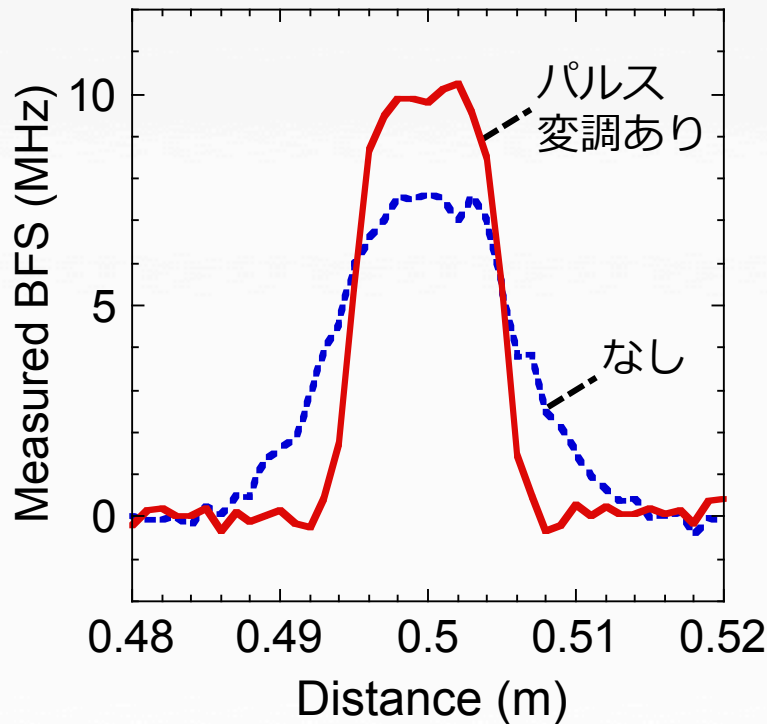
励起光平均電力 400mW

ストークス光平均電力 100mW

パルス変調を行う場合

$$T = 48.4\text{ps}, \tau = 387\text{ps}$$

$$\Delta z' = \frac{v_g T}{2} = 5\text{mm}$$



- ❖ 短パルス光源を用いたBOCDA光ファイバセンサを提案した
- ❖ 約3psの短パルスを用いることによって1mm以下の空間分解能を得ることができる
- ❖ 数値解析の結果は実験結果と定性的に一致する
- ❖ 正弦波周波数変調BOCDAにおいても、光源のパルス化は空間分解能を高めるために有効である
- ❖ 微細構造ファイバや光集積回路導波路の特性測定に適用できる