# ファイバコムの研究

#### 電気通信大学 先進理工学専攻 中嶋 善晶







#### 中嶋 善晶 1982年8月13日生まれ 福井県坂井市春江町出身

#### 福井大学工学部電気電子工学科出身 M1の後半にファイバコムに出会い、産総研(つくば)に

#### 以降、

ファイバコムの研究 高速制御コムの研究

#### に従事し、

ファイバコム技術の確立と次世代光周波数標準の研究に貢献

その後、民間企業に勤務した後、電通大へ。

趣味: ランニング、ギター







#### 1. モード同期ファイバレーザーによる光コムの開発

#### 2. 高速制御コム(狭線幅コム)の開発

#### 3. 周波数安定化を適用した光コム干渉計の開発







#### 1. モード同期ファイバレーザーによる光コムの開発

#### 2. 高速制御コム(狭線幅コム)の開発

#### 3. 周波数安定化を適用した光コム干渉計の開発







ファイバコム 特長:システムの全ファイバ化 長期連続動作が可能 製作・調整が容易 小型で安価

課題:光周波数計測に適したファイバコムの条件が不明

目的:ファイバコム技術の確立

対策:ファイバコムの分散マネージメント





波長安定化レーザ・

よう素安定化He-Neレーザー



レーザー出力波形(時間軸)  $T=1/v \downarrow laser (fs=10^{-15} s)$ 中 時間

c  $\nu \downarrow laser = \lambda \blacksquare$ 

ノーザー出力波形(空間軸)

波長 :633 nm (=633×10<sup>-9</sup> m) 周波数:474 THz(=474×10<sup>12</sup> Hz)

距離のものさしを精密に決定するには、光の「波長」の精密な測定が必要



UEC The University of Electro-Communications

距離の ものさし

距離

#### 波長安定化レーザーの波長(周波数)の精密測定

■ 光の「波長」を精密に測るのは難しい 空気屈折率のゆらぎは大きい





■ 光の「周波数」は、高すぎて電気的に直接測定できない

100 THz (=10<sup>14</sup> Hz) 10 GHz (=10<sup>10</sup> Hz)

光周波数のものさし「光周波数コム」が必要





## 光周波数コム

超短パルス列







ノーザー周波数の測定方法











### ファイバコムの特徴

#### 利点

- ・ 光源の全ファイバ化が可能 (環境外乱に強い)
- 製作、調整が容易 (自作可能、目的に特化した性能が可能)
- 長期連続動作が可能 (長時間測定が可能)
- 励起光源がLD (小型、安価)
- スペクトル帯域拡大が可能 (f<sub>CEO</sub>の検出が可能)
- 可視波長域もカバー (色々な波長のレーザーの周波数測定が可能)

#### 欠点

- *f*<sub>rep</sub>が固体レーザーに比べて低い



光コムの高速制御により低雑音化が可能(後述)





#### ファイバコムシステム





# Erモード同期ファイバレーザー



- モード同期方法:非線形偏波回転
- 励起光源 : 980 nm or 1480 nm
- 繰返し周波数 : 50 MHz
- 共振器長 : 4 m
- SMF長 : 2.38 m
- EDF1長 : 0.88 m
- EDF2長 : 0.74 m
- 全共振器分散 : 0.002 ps<sup>2</sup> (群速度分散)
- パルス幅 : 70 fs
- スペクトル半値幅: 40 nm
- ・ 平均パワー : 5 mW
- 発振中心波長 : 1560 nm



# 全共振器分散による光スペクトルの違い

ファイバの群速度分散を用いてErモード同期ファイバレーザーのモードを制御





UFC The University of Electro-Communications

14





時間的に変化する現象





## アンプの出力特性



分散マネージメントによりパルス増幅を<mark>高効率化</mark>





### 増幅後のパルスの光スペクトル



最適入射チャープ量では断熱圧縮によるスペクトル拡大が発生 高効率パルス増幅の原因









#### 広帯域光コムの発生



#### 表 高非線形ファイバ (HNLF) の特性

	伝送損失 [dB/km]	ゼロ分散波長 [nm]	波長分散 [ps/nm/km]	分散スロープ [ps/nm <sup>2</sup> /km]	カットオフ波長 [nm]	<mark>実効コア</mark> 面積 A <sub>eff</sub> [mm <sup>2</sup> ]	非線形定数 <i>g</i> [/W/km]
HNLF	0.62	1447	3.91	0.032	1560	10.4	21
SMF	0.22	1310	18	0.092	1260	84.9	1



## Octave-spanning comb





<u>fco</u>の検出(1f-2f干渉計)



T.R.Schibli, et al., Opt. Lett. 29, 2467, 2004





**ERATO** 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer Project

### ヨウ素安定化He-Neレーザーの周波数測定







### レーザーの周波数を測定





#### 可視波長域光コムの発生





### ヨウ素安定化He-Neレーザーとのビート信号<sup>26</sup>



可視波長域レーザー(633 nm)とのビート信号を高SN比で検出



#### ヨウ素安定化He-Neレーザーの光周波数計測結果



ファイバコムで可視波長域の波長安定化レーザーの周波数計測に成功







#### 1. モード同期ファイバレーザーによる光コムの開発

#### 2. 高速制御コム(狭線幅コム)の開発

#### 3. 周波数安定化を適用した光コム干渉計の開発







#### ファイバコム 特長:システムの全ファイバ化 長期連続動作が可能 製作・調整が容易 小型で安価

- 課題: 位相雑音が比較的大きい
- 目的:ファイバコム技術の確立
- 対策: 高速制御が可能なファイバコムを開発





# ファイバコムのf<sub>ceo</sub>信号の線幅







# ファイバコムの位相雑音に関する研究

ファイバコムの位相雑音が大きい要因(他グループの研究内容)

- ファイバレーザーが高損失、高利得である
- 励起レーザーが半導体レーザー(LD)であり、その強度雑音が大きいため
- HNLFによる光コムの広帯域化をしているため

産総研での主な研究成果

- モード同期ファイバレーザーの共振器分散が大きいと位相雑音が大きい
- Ti:sapphireレーザー(固体レーザー)よりも位相雑音が小さくなる
- 高速制御により極限の低雑音化(狭線幅化)が可能





# 共振器分散によるモード同期の違い



ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクト MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer Project

# 共振器分散による f.e. 信号の線幅の違い





# ファイバコムとTi:sapphireコムの比較

未制御時のfcoo信号を比較



ファイバレーザーを最適化すればTiサフコムよりも低雑音になる



## ファイバコムの位相雑音発生源



それぞれのゆらぎを制御すればで抑制・低雑音化できるのでは?



美濃島知的光シンセサイザプロジェクト MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer Project

# ファイバコムを低雑音化するには?





# ファイバコムを低雑音化するには?



#### 次数nの影響はほとんど無し 安定化するには共振器長の高速制御が必要

N. R. Newbury et. al. JOSA B 24, 1756 (2007).



### 高速制御コム

電気光学位相変調器(EOM)挿入型ファイバコムを開発



繰り返し周波数:43 MHz 出力平均パワー:6~8 mW













## ファイバコムを高速制御した結果

#### 高速制御時の fceo スペクトル



#### 高速制御時の fb スペクトル



#### 制御ループ内の線幅7.6 mHz以下を達成 高速制御により、 $f_{CEO} \geq f_b$ のスペクトルを狭窄化

Y. Nakajima et al., CLEO CMX1 (2010).



## 高速制御コムの相対評価

5

励起LD







f<sub>CEO</sub>検出

評価系へ

fb検出



相対線幅30 mHz以下



#### 高速制御により、ファイバコムの狭線幅化を実現

H. Inaba et al., CLEO CTh4A.6 (2012).





#### 1. モード同期ファイバレーザーによる光コムの開発

#### 2. 高速制御コム(狭線幅コム)の開発

#### 3. 周波数安定化を適用した光コム干渉計の開発











## 光コム干渉計





# 光コム干渉計での光路長走査方法







G. Wu et al., Sci. Rep, **3**, 1891 (2013).



#### 測定距離にあわせて参照光路を長光路化

























#### ファイバノイズキャンセルによる参照光路の安定化

AOMによる周波数シフトにより参照光路を安定化



f<sub>rep</sub> = 54 MHz 光路差:22.2 m(4つ隣のパルスと干渉) 分散補償ファイバ(DCF):4.7 m





52

### 参照光路の安定化を実現



ファイバノイズキャンセルによる参照光路の安定化を実現



## 光コムの制御による干渉縞の安定化

光コムのf<sub>rep</sub>とf<sub>ceo</sub>を用いた干渉縞の安定化



f<sub>rep</sub> = 54 MHz 光路差:16.7 m(3つ隣のパルスと干渉) DCF:2.1 m





## 光コムの制御による干渉縞の安定化を実現

frepの制御による干渉縞安定化

fceoの制御による干渉縞安定化







## 光コムの制御による干渉縞の安定化を実現

frepの制御による干渉縞安定化

fceoの制御による干渉縞安定化







## 光コムの制御による干渉縞の安定化を実現

frepの制御による干渉縞安定化

fceoの制御による干渉縞安定化



光コムのfrepおよびfceoによる干渉縞の安定化を実現





まとめ



課題:参照光路の長尺ファイバ化による 干渉縞測定の安定性低下

- 結果1:ファイバノイズキャンセル による参照光路の安定化 を実現
- 結果2:光コムの制御による 干渉縞の安定化を実現















コムの時間軸・空間軸への応用に適したファイバコムを開発し、最先端を切り開く











可飽和吸収体を用いた受動モード同期



強度の弱い光ほど吸収され、 発振閾値以下になる

強度の弱い光には<mark>損失</mark>を与えているのと同じ効果



## 非線形編波回転モード同期法

非線形偏波回転型モード同期法







超短パルスの発生

#### 光周波数コム=モード同期レーザーの出力パルス列





光周波数コムの発生

光周波数コム=モード同期レーザーの出力パルス列





# 光コムの光源

- ・ 超短パルスモード同期レーザー
  ・ 広く用いられている。市販品
- 基準CWレーザー+変調器+共振器
- ・非線形コム
  - ・波長変換、ラマン



Ti:Sapphire laser

ERATO

http://www.thorlabs.com/

美濃島知的光シンセサイザプロジェクト

**MINOSHIMA Intelligent Optical Synthesizer Project** 





monolithic microresonator

P. Del'Haye, et. al, *Nature* 450, 1214-1217(2007)



http://www.optocomb.com/eng/index.html

## 狭線幅コムの応用

光時計(究極精度の時計、137億年に1秒しか狂わない)





スペクトル線幅の狭い 可視波長域の時計遷移観察用レーザーが必要

#### 従来法

高フィネスな光共振器にCWレーザーを安定化

#### 欠点

- 可視波長域のレーザーが必要⇒光共振器が難しい
- AOMが必要⇒システムの複雑化
- 複数の光時計には、複数の光共振器が必要





n



#### 狭線幅Nd:YAGレーザ(1064 nm)の線幅を、ファイバコムを介して、他(多)波長に転送







## ファイバコムによる線幅転送の原理







#### Yb原子の時計遷移を観察

ERATO



#### Yb原子の時計遷移を観察

線幅転送されたレーザを用いて、<sup>171</sup>Yb原子の4 つのZeeman componentsの観察に成功

р

s+

p

Ω

Clock laser frequency /Hz

光共振器を用いた場合

Single scan

4000

s-

2000





-2000

0.25

0.20

0.15

0.10

0.05

0.00

-4000

Excitation rate