# 重力波検出器用高出力・高安定光源

# 現状と将来展望

### 電通大レーザー研

満

武者

2008/11/7 重力波交流会@国立天文台



- ・重力波光源開発の流れ
- ・高出力光源

固体レーザーのscalingと各技術

fiber laser, fiber amplifier

・高安定光源

光共振器

分子の飽和吸収

その他の方法

- ・現在開発中の光源
- ・将来展望



- ・超高感度マイケルソン型光干渉計
  - 単一縦モード(単一周波数)
  - 単一横モード(高ビーム品質 TEM00)
- ・高安定性 強度安定度→干渉信号のS/N

周波数安定度→干渉計の非対称性

・高出力 干渉計のショット雑音のS/Nを上げる





- ・第1世代 Ar<sup>+</sup>レーザー TENKO100  $\lambda = 514.5$ nm
- ・第2世代 半導体励起固体レーザー(~2W)

LD-pumped monolithic Nd:YAG laser (NPRO) (20-m, CLIO)



・第3世代 半導体励起固体レーザー(~10W)

注入同期レーザー (TAMA300,LIGO,GEO,VIRGO)

・第4世代 半導体励起固体レーザー(~200W)

宇宙重力波検出器用光源

2008/11/7 重力波交流会@NAO 3

# 光源の高出力&高安定化

### ○高出力光源 加工用 cutting, welding, ablation 高ビーム品質、低安定性~10kW 掘削 methane hydrate エネルギー伝送 レーザー核融合 パルス (kJ) laser guide star Na 589nm-50W パルス、フェムト秒光源、縦マルチ、横.... ○高安定化光源 高分解能分光 LD 小出力 (~100mW) 光周波数標準 通信

2008/11/7 重力波交流会@NAO 4



○効率 排熱が増える、冷却や熱勾配 励起光源の輝度、スペクトル幅 ○冷却 高効率排熱法、付加雑音、発振効率の低下、耐熱 付加位相雑音 OASE (amplified spontaneous emission) 高利得領域での多モード発振 ○寄生発振 横モードでの発振--破壊に繋がる ○ビーム劣化 熱による結晶内不均一

○破壊 レーザー媒質の熱的・機械的・光学的破壊





### ○デザイン

- ・注入同期チェーン
  - 周波数雑音の伝達特性 機械的安定性 高出力光源の制御性、強度雑音
- ・MOPA 寄生発振、付加位相・強度雑音、ビーム品質
- ・コヒーレント加算



安定度、ビーム品質を劣化させずに出力を増強する



タルボット共振器による加算 複数ファイバによる複合共振器加算



<u>高出力化---レーザー媒質</u>

 $4F_{5/2}$ 

 ${}^{4}F_{3/2}$ 

 $4F_{15/2}$ 

 ${}^{4}F_{11/2}$ 

808

 $4G_{7/2}$ 

1.35

○Nd 4準位構造--発振しやすい ランプ励起、高出力 808nm励起 1064nm発振



975nm励起、1030nm発振

- ・ESA,UCが無い--高強度励起が可能
- ・濃度消光が少ない、高濃度添加が可能
- ・量子欠損が少ない
- ・吸収帯が広い--LDの負担軽減
- ・蛍光帯が広い、広帯域発振、超短パルス光源
- ・吸収飽和が必要
- ・吸収遷移と蛍光遷移が重なる:再吸収が起こる
- ・誘導放出断面積が小さい →高強度励起が必要



 $^{2}D_{5/2}$ 

800

900

<u>高出力化---レーザ-</u> 

#### 求められる性質

複屈折
 熱複屈折、熱レンズ
 熱伝導性
 光学損失(吸収・散乱)
 衝撃強度(Young率等)
 濃度消光

YAG結晶 熱伝導率が高い 赤外での吸収が少ない

より高出力化 破壊、熱

- ・他の母材 高い熱伝導率
- ・大型化 強度を下げる 🛛 🖓 ceramic
- hybrid 排熱効率等を上げる

・冷却型 σ<sub>emit</sub>の増大
 再吸収の減少
 熱伝導率の向上

# ceramic laser

多結晶体



- •粒子径(grain size) :10 µ m
- 粒界(grain boundary) : 1nm以下
- 気孔 (porosity): 1 p p m



- ・大型化 beam intensity を下げられる
- ・形成温度 高融点素材を作れる sesquioxide Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等



- hybrid、多機能
- ・散乱損失小
- ・結晶軸がランダム 均質





結晶vsセラミックvsガラス

	Nd:YAG	Nd:YAG	Nd:glass
	X-tal	ceramic	
σ	$\bigcirc$	0	×
τ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	0
α	0	0	$\bigtriangleup$
fracture limit	0	$\bigcirc$	×
thermal shock	0	$\bigcirc$	×
scalability	×	0	$\bigcirc$
mass production	×	0	$\bigcirc$
possible cost	×	0	$\bigcirc$

出力変遷





2008/11/7 重力波交流会@NAO

冷却面積/体積比 端面冷却--thin disk、側面冷却--> fiber laser

# レ<u>ーザーの種類---active mirror</u>



- ・薄くすることで排熱効率が高まる
- ・熱流が一方向
- ・rod型に比べて熱レンズ、熱複屈折が1桁低い
- beam品質がよい
- ・利得引き出しが大きくコンパクト(1MW/cm<sup>3</sup>) cw:100~4kW
  - multidiskで 6.5kW

micro-chip laser



形状より増幅器には向かない



励起光多重反射 再吸収が少ない





# レーザーの種類---composite型



# レ<u>ーザーの種類---fiber laser</u>

### core中にレーザー媒質-----利得+導波路構造

### ファイバレーザーの利点

- ・double-clad、FBG,Yb 高輝度LD により高出力化
- ・小型、機械的安定性
- ・石英の内部破壊閾値 2~5GW/cm<sup>2</sup>CW 1.5~4kW@φ=10μm
- ・端面破壊(信号光、励起光) multimode -fiber でkW以上
- ・利得/損失比が大きい 高効率のレーザー発振・増幅特性
- ・横モード制御 伝搬モードで決まるのでビーム品質が高い
- ・冷却効率が高い
- ・共振器長が長い

FSR=C/(2L) //

Δf=FSR/Finesse 小→線幅が細い





### スペクトル幅が狭い場合 P<sub>SBS</sub><P<sub>SRS</sub>



有効コア径(mode-field diameter)を大きくする シングル横モード条件を維持するため

- ・LMAファイバを使う(low NA fiber, Photonic fiber)
  - $V = k_0 A_{eff} (n_1^2 n_2^2) < 2.4$
- ・MMFの高次伝搬モードを抑圧
  - ・コアの屈折率分布を工夫
  - ・ファイバを巻いて高次モードを抑圧
  - ・コア中に損失部を作り高次モードを抑圧

#### ● 相互作用長を短くする

- ・吸収効率を上げる →添加濃度を上げる (Yb)
- ・高強度励起 →double-clad fiber、ESA等(Yb)
- ・ Clad 形状の工夫 →非対称 clad

fiber photodarkening Ybの吸収、発振過程で伝送損失が増える(発振領域でも) )原因--上準位密度増加により起こる $\propto$  $\mathrm{N_2}^7$ 伝導体まで励起されてcolor centerを作る(Yb<sup>2+</sup>→Yb<sup>3+</sup>) ●解決法 ・Al共添加によるphotodarkening抑制 ・紫外光(355nm)によるphoto breaching photo darkening photo breaching e <sub>b</sub>1.0 0 0 r p0.8 未使用時 0 PD時 d е**0.6** Z 0 i l a0.4 PB-power大 0 m r <sub>0</sub>0.2 Ν 0 1200 100 000 1600 0.0 400 800 1200 0 1600 Time [sec.] 透過損失スペクトル 透過強度(PB時)

2008/11/7 重力波交流会@NAO 19

・PM fiber 偏光保持



low-NA fiber
 LMAfiberで単一横モード出射
 コア形状、屈折率差を少なくする

高励起

・ photonic crystal fiber (PCF):周期空孔により cladに波長分散

零分散制御(広帯域光発生) 広帯域単一横モード伝搬 LMA 単一横モード



・ photonic bandgap 2D周期構造による伝搬制御
 →周波数フィルター(ASEの抑制)



- ・air clad: cladのNAを増大
- parallel-side pumping





## photonic bandgap fiber (PBGF)



\_\_\_\_\_fiber\_laser---単一モード発振\_\_\_\_

### ●波長選択素子を用いる

narrow band FBG等の組み合わせ



mode-hop-free tuning 制御が複雑 、低出力

●能動空間ホールバーニング

•fiber DFB



## FL単一モード発振---active grating fiber laser

(植田研 黄氏)







重力波交流会@NAO

2008/11/7

#### ●バルク型固体レーザー

- ・寄生発振の抑制
- 熱問題 熱複屈折、冷却時付加雑音
- ・装置が大型 機械的安定性等に問題
- ・高輝度励起

NdよりもYb → ファイバレーザが最適

●ファイバレーザー

・MOPA方式がよい 主レーザー: NPRO or fiberDFB

注入同期--locking rangeが狭い、縦モード抑圧

- ・高冷却効率
- Ybによる高濃度添加、高輝度励起 数100Wまでなら最適
- ・問題点 SBS限界、端面破壊、モード熱変形 ポリマーの耐熱、下準位熱励起、PD



2008/11/7 重力波交流会@NAO

-26

○制御系(制御利得、雑音) 低雑音光源、制御帯域、制御系雑音○周波数基準

周波数安定化の目的

・重力波干渉計----1kHz近辺 F.P. 光共振器(rigid型、独立懸架型)

・光周波数標準--- 1mHz以下 分子の飽和吸収、冷却イオン・原子

中間領域(10mHz~10Hz 空白地帯

 $\delta f/f < 10^{-15}$ 以上の光周波数標準(optical lattice)

probe用の超狭線幅光源(*Af*<1Hz)

1Hz帯での周波数安定度が必要

#### 要求値

#### TAMA300 10<sup>-6</sup> @300Hz (10<sup>-2</sup> Hz/√Hz) DECIGO/DPF 100 Hz/√Hz@1Hz

#### 各周波数基準の安定度

・F.P.共振器 機械振動、熱膨張、熱雑音 ・分子の吸収線 外乱(電磁場、RAM) 信号のS/N



2-stage pendulum(ILS) M.Musha *et.al*:Opt.Commun**183**(2000)165

周波数基準の安定度

- CORE(U.Konstanz) S.Seel et.al:PRL78(1997)4741
- AVI& temp.cotrl (NPL) S.A.Webster et.al:Opt.Lett.**29**(2004)1497
- wirtical mount(JILA)
  M.Notcutt,et al.:Opt.Lett.30(2005)1815
- PVI &temp.control(NIST)
   pre-stabilized dye-laser
   B.C.Young *et.al.*:PRL82(1999)3799
- thermal noise limit Numata et.al PRL93(2004)250602

2008/11/7 重力波交流会@NAO

-27

周波数安定化---F.P.共振器

高フィネス、防震、断熱が必要



- ・共振型EOMを使わない 共振周波数のずれ--変調位相のずれ
- ・エタロン効果 convex-convex lenz、plate-PBS、変調周波数を下げる
- ・power fluctuations recoil として効く
- ・残留AM (RAM) -noise

2008/11/7 重力波交流会@NAO 28

周波数安定化---分子の共鳴周波数



\_\_\_\_\_*周波数安定化---光コム* 

### self-referenced mode-lock laser

Ti:sapphire laser( $\lambda$ =780nm)の帯域を1octaveまで拡大 Er:fiber laser( $\lambda$ =1550nm)



 $f_{rep}$ と $f_{CEO}$ を固定すれば全てのモードの周波数が安定化

周波数安定度

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta f_{CEO} + n\Delta f_{rep}}{f_{CEO} + nf_{rep}} < \frac{1}{n} \frac{\Delta f_{CEO}}{f_{CEO}} + \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}}$$

 $f_{rep}$ の安定度で決まる $f_{CEO}$ の寄与は1/n倍

2008/11/7 重力波交流会@NAO 30





LD,f-DFBで実証済み

あらゆる波長帯で10-15@1sの安定度が得られる

### LCGT用光源----東大 三尾研



K.Takeno et.al Opt.Lett.30(2005)2110

2008/11/7 重力波交流会@NAO 32

開発中の光源

(1)









周波数雑音 主レーザーとほぼ同じ 主レーザーに負帰還制御により安定化

 $10^{-2}$ Hz/ $\sqrt{Hz}$ @10Hz





2008/11/7 重力波交流会@NAO 35

PPMgOLN結晶を用いた高効率波長変換



内部熱発生による位相不整合 GRIIRA(green-induced infrared absorption)による変換効率飽和

□ コヒーレント加算による高出力化~

### Yb:NPROの周波数を沃素飽和吸収に安定化





2008/11/7 重力波交流会@NAO 36

周波数安定化

### ●共振器安定化

共振器の保持位置最適化 温度制御、輻射シールド





### ●fiber amp 単一モードで数100W可能

SBS,ASEの抑制

偏波消光比の保持

PCF, PBF

### fiber darkening の問題

機械的安定性の向上 多段増幅



●コヒーレント加算による10W-532nm)



2008/11/7 重力波交流会@NAO 37