光源（レーザー）第1稿

武者　満
電通大レーザー研

2001年7月2日

Abstract

将来の高感度重力波干渉計において観測帯域での感度を制限するshot雑音を低減することが肝要であり、光源であるレーザーの高出力化により実現される。現在はLD励起注入同期Nd:YAGレーザーにより出力10Wが実現されているが、現行形式のレーザーでは熱レンズ等の影響により同程度の安定度・ビーム品質を保ったまま目標とする100Wへのスケーリングは困難である。本reviewでは高出力を実現する為の励起方法、レーザーの形式から、他の波長でのレーザーの可能性まで、他の重力波検出グループの方法の紹介を含めて考察する。

目 次

1 光源への要求 **2**

1.1 出力 2

1.2 周波数安定度 3

1.3 強度安定度 3

2 レーザー高出力化への課題 **3**

2.1 熱効果 3

2.1.1 熱レンズ 3

2.1.2 熱複屈折 4

2.2 媒質内のGain不均一分布 4

2.3 冷却 4

3 レーザーの種類 **5**

3.1 励起方法 5

3.1.1 端面励起 5

3.1.2 側面励起 5

4 レーザー構成 **6**

4.1 **注入同期** 6

4.2 MOPA 7

4.3 **コヒーレント加算法** 7

4.4 3 **方式の比較** 8

5 100W レーザーへの展望 **8**

6 技術展望 **9**

6.1 Nd:YAG **セラミック** 9

6.2 Adaptive optics 9

7 Nd:YAG 以外の光源 **9**

8 他のグループのレーザー **10**

8.1 Stanford (Byer **研**) 10

8.2 LZH 11

8.3 Adelaid 11

8.4 **産業用** kW **レーザー** 12

1 光源への要求

1.1 出力

100W、TEM00、**単一縦モード、直線偏光**

産業用のレーザーではLD **励起により出力は**10kW **以上が実現されている。しかし多周波数発振、周波数・強度安定度、空間モード等の品質は非常に悪い。**

1.2　周波数安定度

周波数安定化を行った上で1×10^{-8} Hz/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$ @100Hz以下の周波数安定度が必要とされる。周波数制御帯域は共振器制御のみで100kHz以下、EOM等の補助を受けても1MHzが限界である。制御帯域1MHzの場合1kHz以下での制御ゲインはせいぜい120dB程度であることを考えると、現行の２段制御を用いたとしても無制御時の周波数雑音は1×10^{2}Hz/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$以下であることが望ましい。

1.3　強度安定度

検出帯域で$1\times10^{-8}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$（一説では$1.2\times10^{-9}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$）、変調周波数帯域でshot雑音以下が要求される。検出帯域での強度安定化は現行のEOM等の偏光を用いた方法やLDの注入電流制御方法とが考えられるが、高出力レーザーの場合EOMを用いる方法は光学部品損傷の問題で上困難であると考えられる。LD電流制御では注入同期の場合もMOPAの場合も高出力部（従レーザー、光増幅器）を制御する必要があるので制御帯域は数100kHz程度である。従って観測帯域での無制御時の強度雑音は現在の一桁上の$1\times10^{4}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$@100Hz程度であることが望ましい。変調周波数帯域(15MHz以上)での強度雑音は、shot雑音より増えてしまっては出力増大のメリットが無くなる。そこで変調周波数帯域での強度雑音が増えない出力増強法を用いるか、光共振器のフィルター特性を使った強度雑音抑圧が必要である。

2　レーザー高出力化への課題

- **引き出し強度**　4.5x4.5x152mmのサイズの結晶から100W以上は可能
- **破壊限界**　Thermal shock parameter 700W/m〜ただし形状(応力集中)や表面処理(micro crack)により実際はこの値より低くなる。

2.1　熱効果

2.1.1　熱レンズ

静的な値であり、共振器設計時に組み込める。しかし安定条件が狭くなる（特定の励起時しか安定なモードが立たない）欠点がある。ロッドで発生する軸対称の熱レンズはリレー光学系で

処理できる。高次の項はadaptive mirrorによる補正が必要となる。またスラブで発生する非対称の熱レンズは2焦点収束や非点収差を起こし、高次横モードが惹起される。このような場合は共振器内部の空間フィルターなどによる解決が必要となる。

2.1.2　熱複屈折

空間モード・発振モードの乱れを誘起し、直線偏振を困難にする。また内部損失による出力低減、ビーム品質の低下を招く。
ロッドの場合は複数のロッドと90度偏光子・偏光板を組み合わせることにより解消できる。スラブの場合、特にzigzag slabでは原理的には幅方向の熱複屈折は相殺される。高さ方向の熱複屈折は熱勾配により生じ、実際には幅方向の熱複屈折も完全には打ち消せない。

2.2　媒質内のGain不均一分布

励起強度分布により起こり、軸方向分布は位相雑音に、径方向はモード・強度雑音にむすびつく。

2.3　冷却

高励起時には熱の排出が特に大きな問題となる。水流による冷却が最も効率的であるが、渦による振動が強度雑音・周波数雑音と結合する。

- conduction cooling　　金属を媒介として水冷する方法で振動が緩和される
- 無添加結晶の接着　振動の緩和、熱勾配の減少の効果がある
- 長期的な熱による共振器長変化　　位相同期用アクチュエーターのダイナミックレンジを越えると長期運転が不安定になる。

3　レーザーの種類

3.1　励起方法

3.1.1　端面励起

共振器中のレーザーのモードと励起光軸がオーバーラップするので高効率励起が可能である。問題点はレーザー媒質中での励起光強度が非常に高くなるのでロッド中で熱レンズや熱複屈折が起こることである。熱レンズは16W-LDを300 μ m に集光して注入した場合f=300mm 程度である。複屈折は20W 以上の励起時には問題になってくるが、上述のように複数のロッドを用いた場合は90 度偏光子により相殺できる。端面強励起の場合ロッドの破壊より、破壊閾値の低い端面の光学薄膜の損傷が問題となる。

3.1.2　側面励起

レーザーを横方向から励起する方法で、ロッドの側面を多方向から励起する方法とスラブの片面から励起する方法がある。いずれの方法も端面励起に比べて効率が落ちるので冷却方法を工夫しなければならない。また2 軸焦点や熱複屈折の問題も起こる

- ロッド側面励起

  端面励起に比べて効率は落ちるが長い励起長に渡り均一励起が可能となるので高励起が可能となる。LD バーで励起する場合はスラブ状の光導波路でロッド側面に導入するが、均一に励起するためにdiffusion cavity 等を用いている。またこの方式では熱レンズ・熱複屈折が生じるので上述のように複数ロッドと偏光子により補償する必要がある。

- スラブ側面励起

  LD-bar を直接側面に並べて円筒レンズ等で集光する方法とファイバカップルLD を並べる方法がある。破壊限界が高い。スラブ中の光路を多重折り返しにするzigzag slab では励起方向の熱勾配による熱効果を相殺することができるので、高励起には適している。また結晶表面近くで吸収するので比較的高効率。ただし熱レンズ補償が水平方向のみなのであり、垂直方向は励起面積を拡げて、レーザー光軸上の励起分布を一様にする必要がある。熱レンズは垂直方向と水平方向が独立に生じるため、両方向での共振器設計が必要になる。

4　レーザー構成

高安定・高出力のレーザーを実現するには、不安定な高出力レーザーを安定化するより種となる安定なレーザーの出力を増幅する方法が、安定度面・制御面で有利である。
具体的な方法には注入同期、光アンプ(MOPA)、コヒーレント加算がある。以下にその方法を比較する。

4.1　注入同期

注入同期は第二世代重力波干渉計用の10W光源として主流の方法であり、以下の特徴を持っている。

- 数MHzの注入同期幅(Locking range frequency=flock)を持ち、従レーザーと主レーザーの縦モードをその幅内に保てば注入同期がかかる 。
- 周波数雑音　注入同期幅以下の周波数域では主レーザーに追従するので残差位相雑音がそれ以下であれば主レーザーと同じ周波数雑音特性を持つ（観測帯域)。主レーザーを制御することにより、残差位相雑音も含めて安定化が可能である。
- 強度雑音　従レーザーの緩和振動周波数以下では従レーザー（特に励起LDの強度雑音）の影響を受ける。このため比較的強度雑音の低い従レーザーを準備する必要がある。そのため低周波数領域では励起用LDの電流を制御することにより強度雑音を制御できる。ただ高電流を制御する為に制御帯域を広くとることが困難であり、またLDへダメージを与える危険もある。LD-array中の一部のLDのみの制御が効果的であるが、Gain分布の不均一を誘起するおそれがある。
  緩和振動周波数以上では強度雑音は主レーザーに支配されるが、主レーザーより低い値を示す（従レーザーの共振器のcut-off周波数より高い帯域では主レーザーは従レーザーで増幅されないので、注入同期レーザーの相対強度雑音は主レーザーの相対強度雑音より低くなる。図1)。

以上の点より注入同期レーザーは制御性、雑音特性ともに優れているが、従レーザーと主レーザーの出力比(Pm/Ps)が大きいと注入同期幅が狭くなり、周波数制御帯域、安定度共に下がる欠点が

ある。より高出力を目指すには複数段の注入同期チェーンが必要である。

4.2 MOPA

主レーザーの光をレーザー媒質に入射し、誘導放出により出力を増強する方法である。飽和利得による増幅率は小信号利得より低いが、ロッドの長さに比例して出力を上げることができる。また multipass にして小信号利得増幅と飽和利得増幅を組み合わせることにより高 Gain、高効率の増幅が可能となる。注入同期と比べた利点は

- 位相同期の必要が無い
- 共振器設計の必要がない
- 大きなモードで励起することにより熱効果を減少させることができる

欠点は、共振器が無いことに起因するもので

- 増強自然放出により強度雑音が増える
- 励起分布による波面の乱れが生じる。

特に強度雑音は変調周波数域でも Gain の分だけ増加するので（図 2）、MC 等で抑圧する必要がある。

4.3 コヒーレント加算法

同一主レーザーにより注入同期された複数台の注入同期レーザーの出力を Mach-Zender 干渉計により位相を揃えて干渉加算させる方法である。

- 出力加算効率　90%以上
- 周波数雑音　加算前の注入同期レーザーと同じ(加算による付加位相雑音の影響はほとんど無し)。注入同期レーザーと同じ制御性
- 強度雑音

  低周波数域　ほぼ同じ、10Hz 以下で増える程度（加算時の空気ゆらぎ等の影響)。従レー

ザー励起LDの電流制御で抑圧できる。

高周波数域　加算前の注入同期レーザーと同じ

- 欠点　波面の乱れが加算される。

4.4　3方式の比較

- 周波数雑音　　どの方法も原理的には増加しないが、注入同期では従レーザーの位相雑音が大きいと影響を受け、光増幅器では励起強度分布ゆらぎが位相雑音になる可能性がある。

- 強度雑音　低周波数域では後段部の雑音特性で決定されるので低雑音、高制御性の光増幅器や従レーザーが必要である。また高周波数域の強度雑音はMOPAでは増加する(MCでの低減が必要)

- 空間モード

  注入同期　○

  光アンプ　悪化する(gain分布の不均一)のでactive mirror等の補正が必要

  光加算　悪化する(加算時のwavefronの不一致による)

5　100Wレーザーへの展望

主レーザーには1.5W (LZH)のNPROを使用する。

(1)従レーザー(30W)を4台加算する(120W)

(2)光アンプ(60W)を2台加算する。

励起方法は端面励起のmulti-rodか側面励起のslabが良い。

30W従レーザーの実現)

端面励起方法では熱効果・破壊限界によりロッド1本あたり20W励起が限界

マルチロッド側面or端面励起+90度回転子(共振器長が長くなる)が最も有望

slab 方式では技術開発に困難を伴う（結晶の作製、冷却・励起方法の確立）

6　技術展望

将来の高出力レーザーに応用可能な技術を紹介する

6.1　Nd:YAG セラミック

多結晶集合体のセラミック構造の Nd:YAG 結晶 。以前は光学損失が多くレーザー発振できなかったが、製造法の進歩により散乱が減り単結晶に近いレーザー発振特性が得られている (図 3)。特徴

- 単結晶とほぼ同じ光学特性 (熱伝導率、破壊強度、吸収断面積）
- 自由な形状が可能であり、また大型結晶が作製できる。
- 高濃度添加〜4%(単結晶では 1%が限界）
- Non-dope+doped 等 Hybrid 結晶ができる

  放熱特性向上、熱勾配緩和に使える。

6.2　Adaptive optics

透過型 (液晶)、反射型 (PZT,membrane) があり、制御帯域 100Hz 以上の波面補正が可能。特に高次の収差補正に有効である。

7　Nd:YAG 以外の光源

Yb:YAG

- 量子効率が高い (978nm 励起、1050nm 蛍光)
- 上準位寿命が長く、パルス動作に適する。

- 準３準位構造なので高強度励起が必要であり、また発振周波数での再吸収がおこるので発振周波数が不安定

Nd:YVO4

- 閾値が低く、発振効率が高い(誘導　放出断面積が広く蛍光寿命が短い)
- 励起波長が広い(5nm) 励起LDのスペルトル安定性が必要ない
- 不安定な結晶で、不均一になりやすい
- 内部損失が大きい
- 破壊閾値が低い

これらの欠点は技術改善により克服される可能性が高い

8　他のグループのレーザー

他の重力波グループによる高出力レーザーと、産業界のkW級レーザーの紹介

8.1　Stanford (Byer研)

- 側面励起のzigzag slab

  レーザー発振　1.7x1.8x58.9mmのslabを212W励起で40W出力を得ている端面をテフロンコーティングして全反射条件を作り、その外側を水冷しているが、テフロンコーティングの品質に問題あり上面はconduction coolingによる高効率冷却を実現

- MOPA

  3パスのzigzag slabで励起126WでG=4.5を実現21*10W 126W-fiber coupled LD 3pass 700mWNPRO-modecleaner -ampで　gainが4.5 強度雑音は8倍

- Galileo計画

  注入同期10Wレーザーを種光に2段のdouble-pass ampで130W出力を計画437W励起の

zigzag slab amp を用いる。小信号利得(1.6/pass) で 2pass+飽和利得で 2pass。主(10W)-拡大-flattop に-1st で 50W-2nd で 130W zigzag slab の光アンプより高効率にパワーを引きだす為にに空間フィルターにより Top Hat 型のビームにする（増幅後また空間フィルターによりガウス型に戻す)。Active mirror による空間モード補正を計画

- LIGO2
  注入同期 20W レーザーを種光に 6 パスアンプ+10 パスアンプと２台のリング型 M.C. を用いて 180W 出力を計画している。slab の励起方法が、上方よりの励起にかわる（以前は冷却水を通じての横方向からの励起)

8.2 LZH

rod の側面励起 340W 励起で 20W 低効率（1995 年)

2 本 rod の端面励起　475W 励起で 100W 出力へ 90 度偏光子による熱レンズ補正を行っている。また rod 端面に無添加 YAG を diffusion bonding して端面の損傷を避けている。

8.3 Adelaid

zigzag slab を用いている 51bar あたり 629mWx24=15W　fiber coupled 3x12 層で 540W 励起破壊限界の 60stable-unstable 共振器

- 励起長を延ばす-共振器損失が大きくなる。
- 励起強度を上げる-熱効果、破壊が問題になる。
- mode-volume を増やす-¿不安定共振器を用いる。
- 縦方向は熱効果が残るので beam を拡げる
- 横方向は安定共振器
- 出力鏡は不安定共振器の hardedge による高次モード抑圧のため反射率分布鏡(VRM) を出力鏡に用いる

8.4 産業用kWレーザー

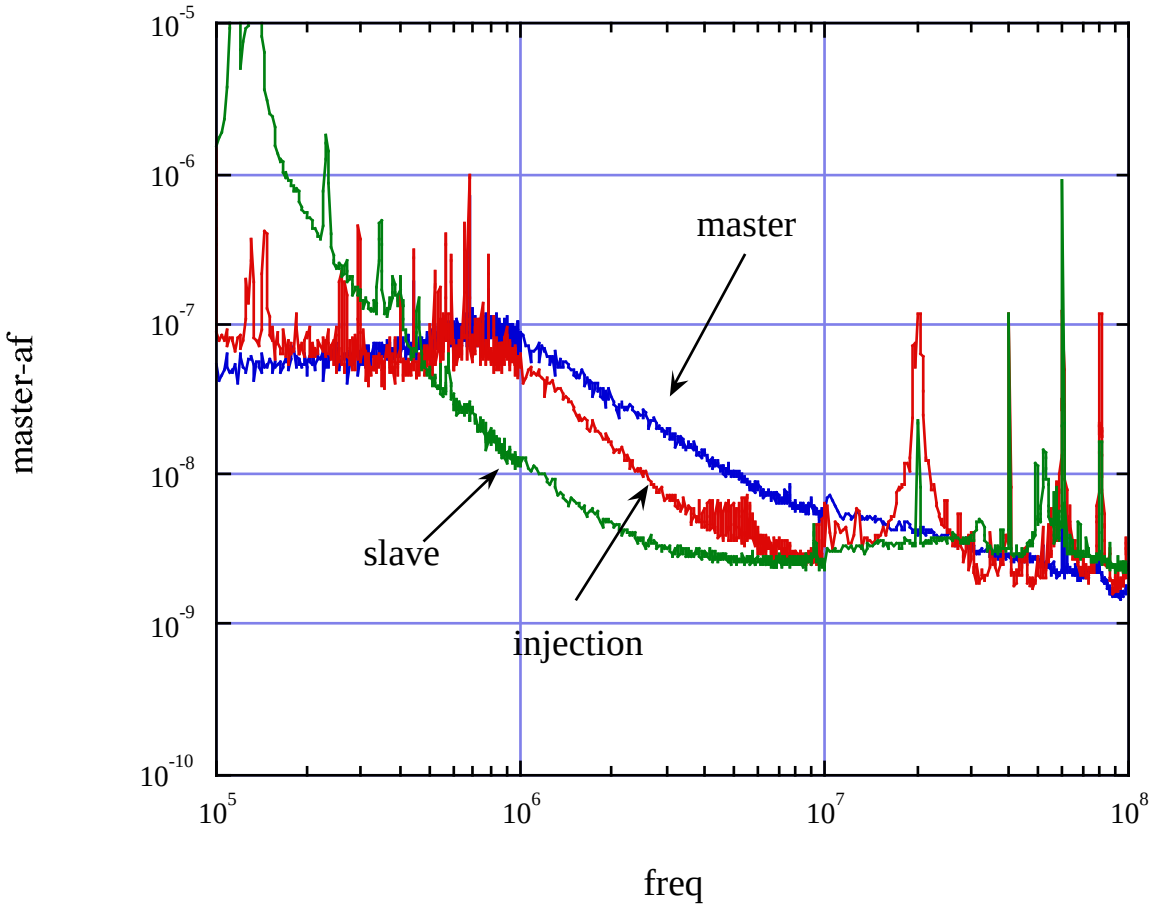
- **三菱電機**

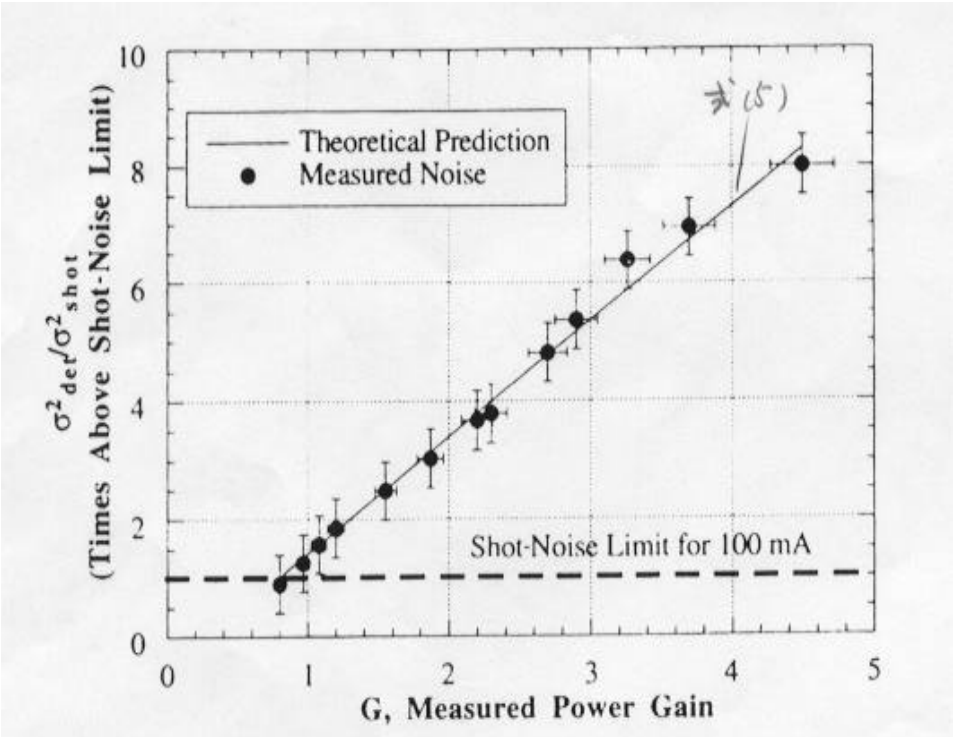
  rodの側面励起960W LDbar出力をwedge lenseを用いてP偏光入射。ロッドの周囲は拡散反射面で励起光を散らして均一励起を実現している。

- **東芝**

  rodの側面励起　118mm長のロッドより1kWの出力を得ている

- FANAC zigzag slabの側面励起


master-af
freq
master
slave
injection


Theoretical Prediction
Measured Noise
Shot-Noise Limit for 100 mA
(Times Above Shot-Noise Limit)
G, Measured Power Gain

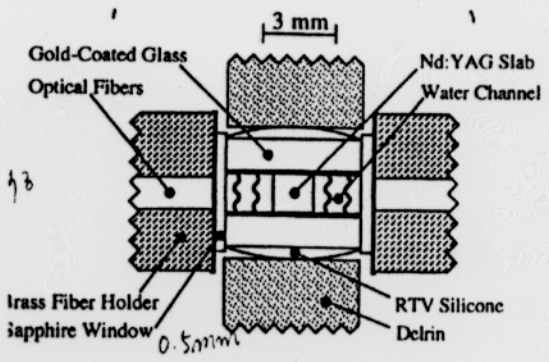
Stanford

zigzag slab

レーザー発振
1.7x1.8x58.9mm slab
235W(P5x25)励起で

端面のテフロンコーティングが問題に
高反射、水流による波面の乱れ防止

F.Pで40W@212W



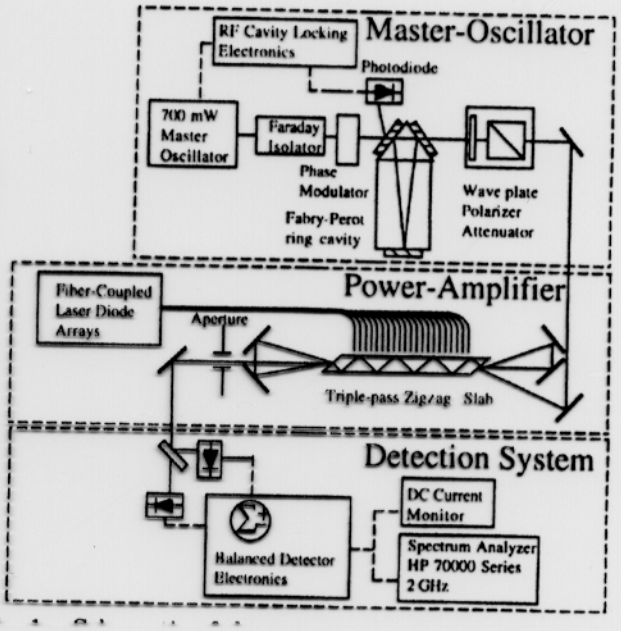
MOPA

126W励起でG=4.5

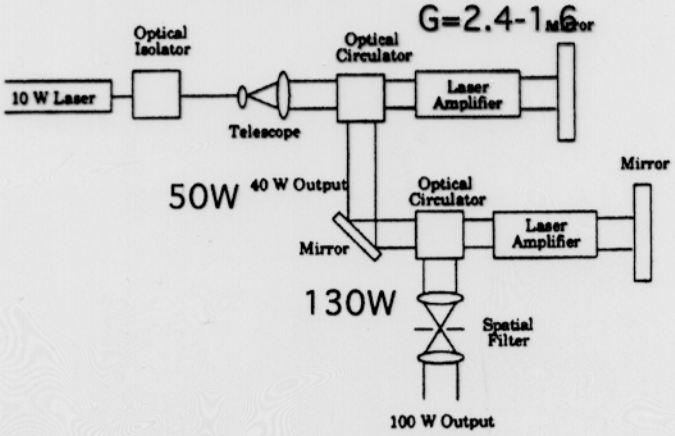
MC :5MHzで100mAのshot-noise

Amp G=4.6 @ 126W

透過効率 83%



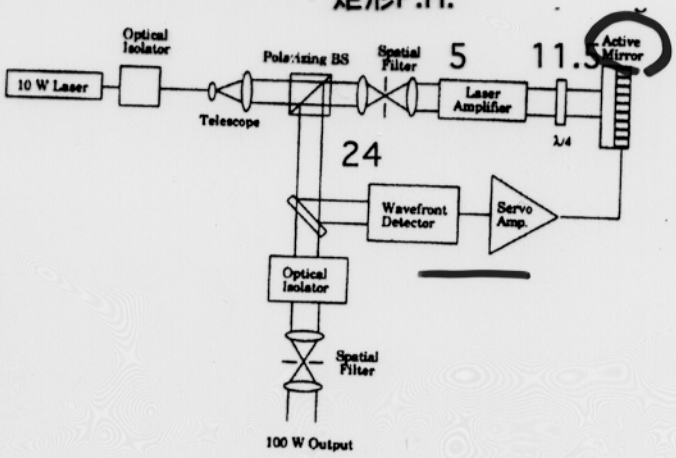
60Wを0.03cm2に入れて飽和



1.8x1.7x56を230W励起

3.6x3.4x110@1000Wで250W

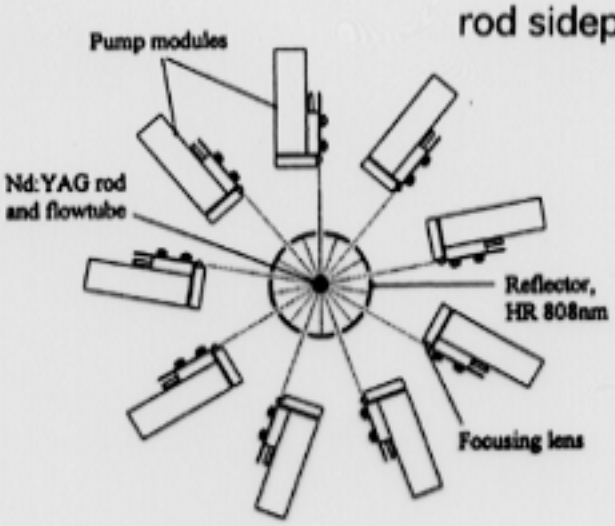
矩形P.H.



LZH

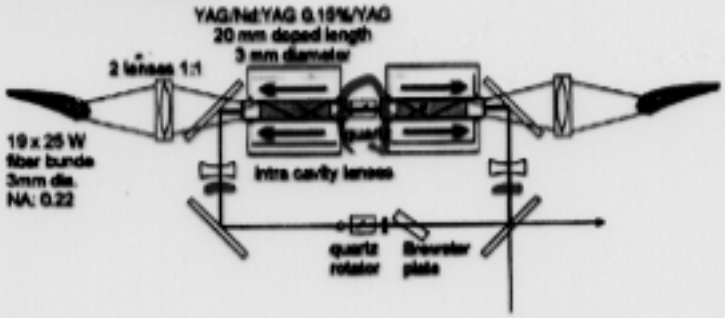
1995年　　6x9 LD　340W励起　注入同期で20W

rod sidepump　低効率



19x25W励起　φ3 l=20　　rod end pump

100@475W励起



周囲にnon-dopeのYAGをdiffusion bondingする