

KEKにおけるレーザーの進捗状況

2011.5.13

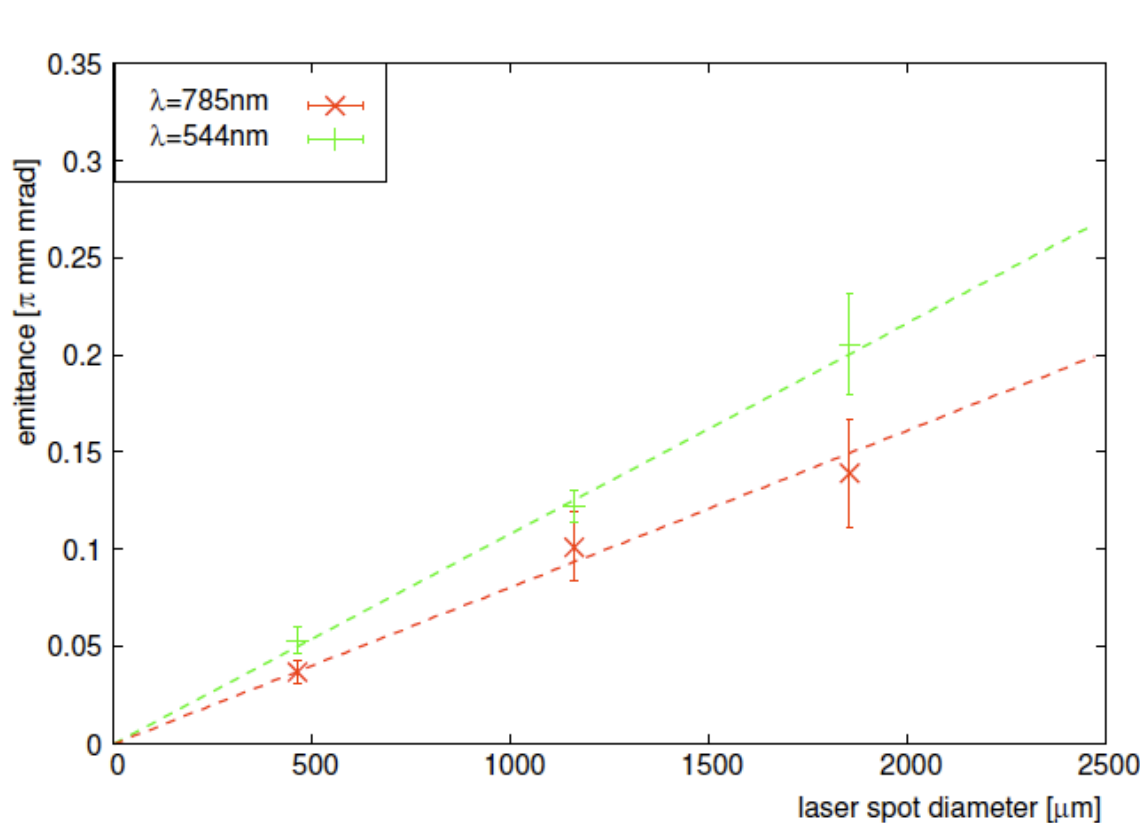
ERL検討会

本田洋介

- ビーム測定の結果を反映して、レーザー波長に関する考察。
- 産総研と相補的な方向を模索する、KEKでの検討状況。

AR南棟でのエミッタンス測定

- ソレノイドスキャンによるエミッタンス測定。
- 空間電荷の効かない低電流での測定。カソードとレーザーで決まる初期エミッタンスを示す。
- レーザースポット径を変えての変化率から、横方向運動エネルギーが得られる。
- この例は、Bulk-GaAsのレーザー波長544nmと785nmの結果。



$$\varepsilon_{n,rms} = \frac{D}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\langle E_{k_x} \rangle}{m_0 c^2}}$$

図 1: Bulk-GaAs の測定結果。Q.E.=3~0.5% (λ=785nm), Q.E.=10~5% (λ=544nm) の範囲で測定した全てのデータの平均のプロット。(有意な Q.E. 依存性は見られなかった。) 破線は、ゼロを通る直線でのフィット。

励起波長とエミッタンス

- 励起波長と横方向運動エネルギーの関係。
- 結果の傾向は、コーネル大の結果と一致し、名古屋大の結果とは合わない。
- 544nmと785nmでは、大した差は無い。非緩和モデル(点線)で扱ってはいけない。
- CDRでは、非緩和モデルで考えて800nmのレーザーを要求しているが、実は緩和するので、500nmで励起しても十分低いエミッタンスが可能。

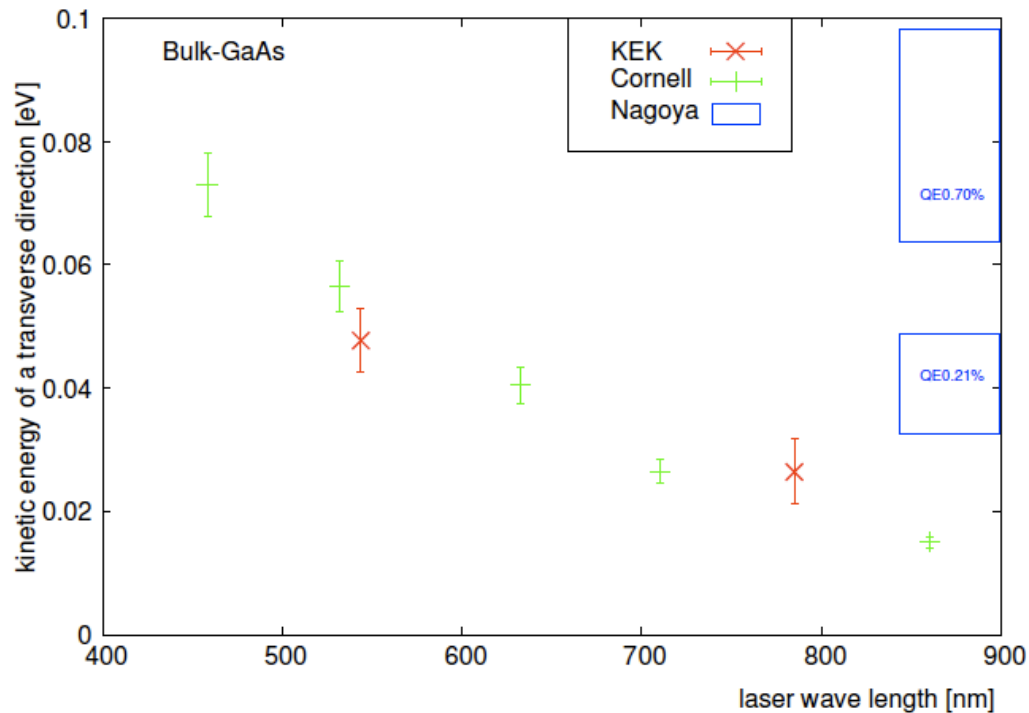


図 7: Bulk-GaAs について、他のグループの結果との比較。

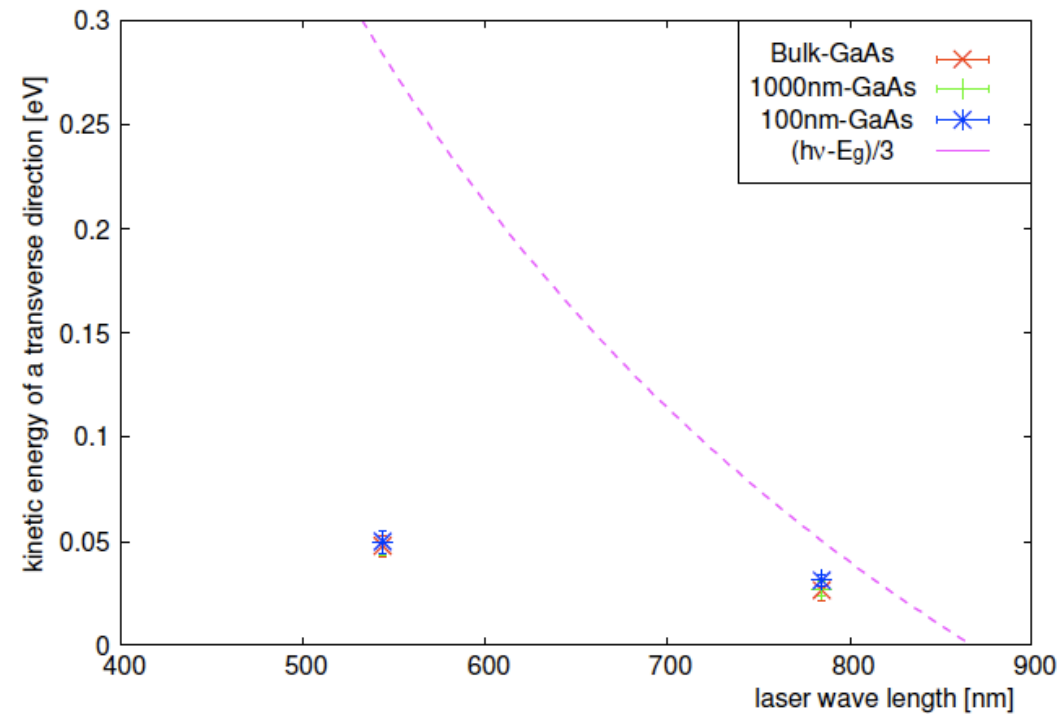
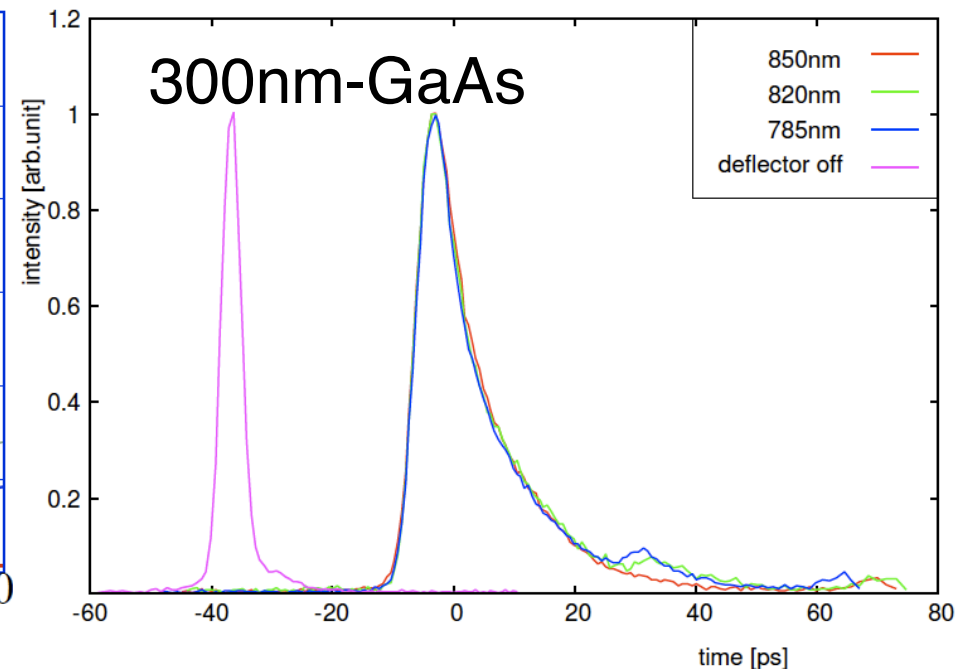
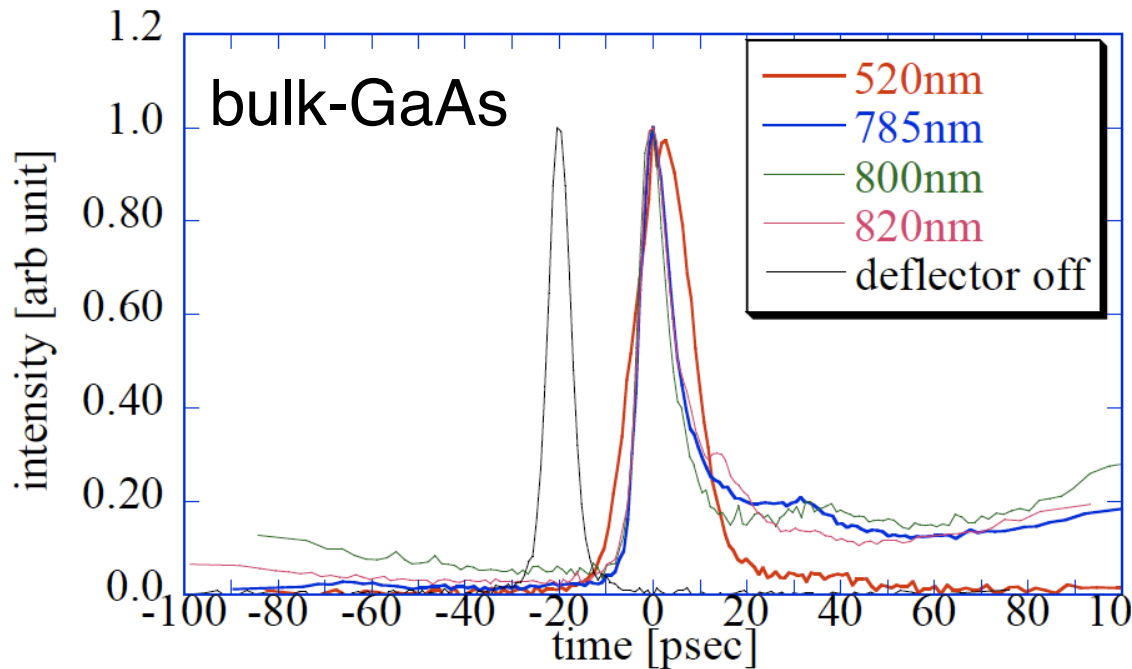


図 9: 非緩和モデルと GaAs カソードの測定結果との比較。

時間応答測定

- パルスレーザーで励起して、偏向空洞により空間方向に射影してバンチ長を測定した。
- Bulk-GaAs、および、300nm-GaAsの結果。
- 520nmでは、ほぼレーザーの時間構造でビームがでるが、800nm帯では100psあたりまでつづくテイル部がかなりある。カソードを薄くすると、テイルは短くなる。
- テイル部は加速位相にのれずに、どこかでビームロスになる。
- RMS2ps程度のパルスの重ね合わせでバンチの時間整形を考えているので、その程度の時間応答が欲しい。
- 時間応答は、厚みの2乗で効くので、800nm帯なら、100~300nm以下 (境界条件にもよる)が必要、すると、量子効率はかなり下がりそう。



ビーム測定を踏まえてとKEKでのレーザー状況

- 結果をまとめると、
 - エミッタンスは、500nmでも800nmでも、さほど変わらない。いずれにせよ、空間電荷効果で決まる。
 - 800nm付近(あるいはバンドギャップ付近)では、時間応答が悪い。時間整形による空間電荷対策がやりにくい。ビームロスになる、放射線あるいはカソードの寿命に問題。
 - 量子効率やカソード寿命の点では500nmのほうが有利。
 - レーザーについても500nmのほうが有利。
- 800nm付近で波長可変、との要求は再考すべきではないか。
 - SC+OPAは本当に必要なのか。むしろ2倍波の高効率化のほうが重要ではないか。
- KEKでのレーザー開発
 - ビーム試験に必要な十分なレーザーを用意している、という立場なので、実質的に開発は行っていない。
 - 産総研と相補的なところで、手持ちの材料で予備的な試験をすすめている。

ERLで要求されるレーザーの特徴を踏まえて

- 高ピーク強度ではなく、高繰り返し高平均出力であるところが特徴。高平均出力ゆえ、最終的には熱の問題になるので、できるだけ効率の良い設計にするのが肝要なはず。
- 高平均出力が必要なので、効率のよいファイバ増幅器を用いる。
- 問題は、波長変換
 - 非線形効果なので、ピーク強度が高いほど効率が良い。しかし今の場合は、高繰り返しであるために、必然的にピークが低い。
 - 産総研の結果(85MHz, 0.4ps, 10Wで50%)を、そのままスケールすると、1.3GHz, 10Wでは変換効率は3%しか得られないことになってしまう。つまり、せっかく増幅したパワーをほとんど捨てることになる。
 - ひたすら強度を上げて対応するのもやりかたではあるが。
- 増幅したエネルギーを回収して再度利用することで、効率良く波長変換する方法を検討。
 - 共振器型の波長変換
 - 理想的には、入力パワーを全て波長変換することが可能。
 - パワーを上げる事無く、高い効率が得られるのが特長。
 - 共振器なのでビームサイズの自由度が制限。
 - 制御が若干難しいが、問題なるレベルではない。

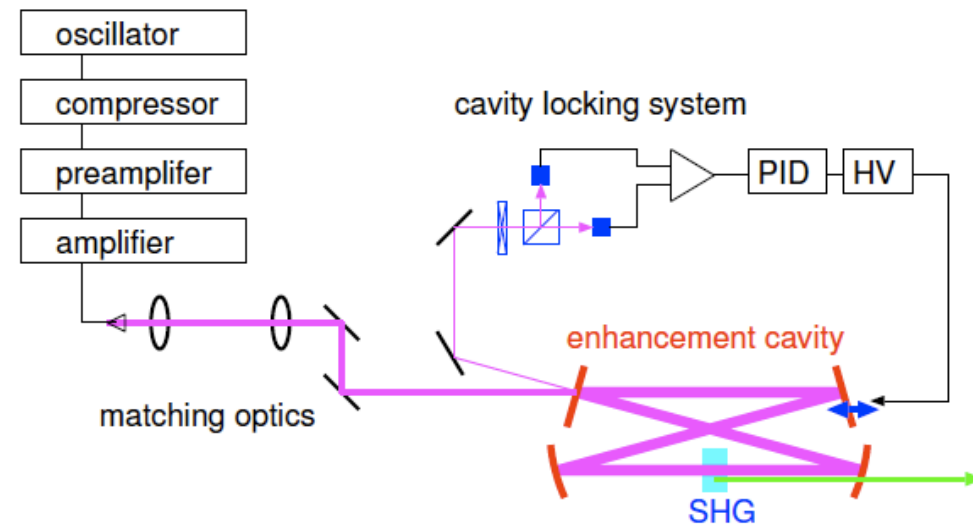


図 1: 共振器型 2 倍波発生スキーム

計算

設計の最適化

- 波長変換は、共振器(空洞)にとって損失(ビーム負荷)に対応。
- 入射ミラー(入力カップラ)の透過率(カップリング)を合わせる。
- ビーム強度によって変換効率が変わるのであらかじめどのパワーに最適化するかを考慮する必要がある。
- それなりに現実的なパラメータで、10Wで50%程度の効率を得られる見込みがある。

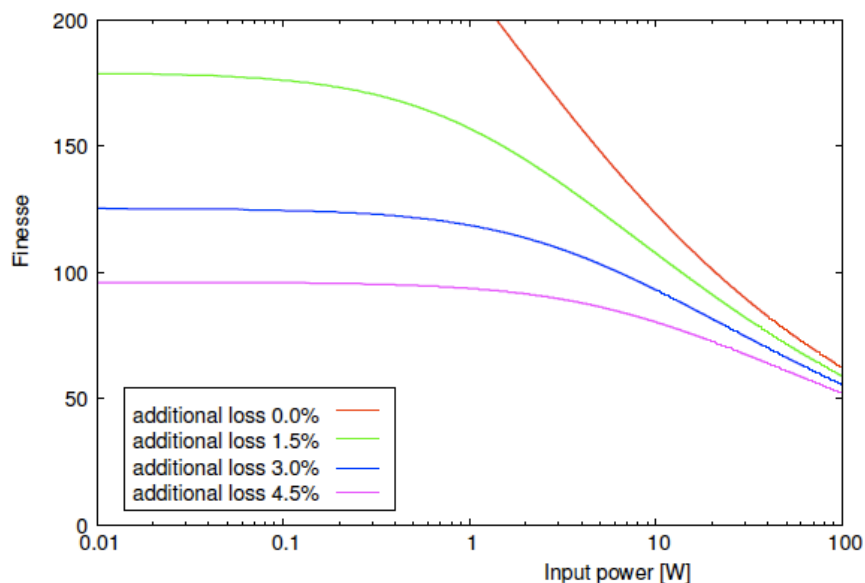
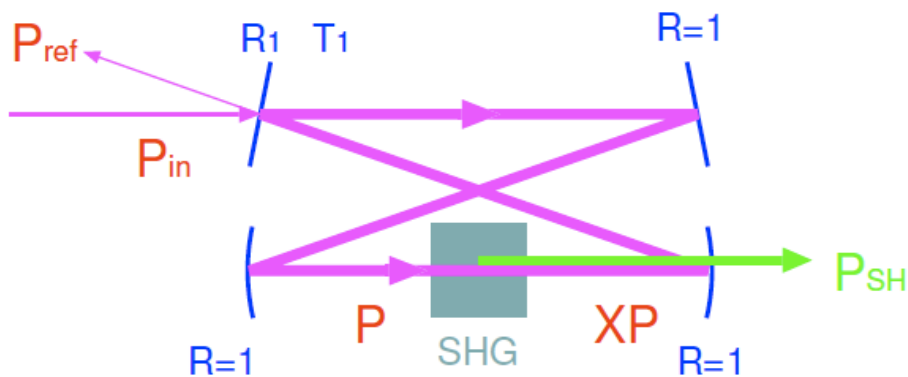


図 11: フィネスの入力パワー依存性。 $\eta = 0.001\%/W$ 、 $R_1 = 0.98$ の場合。

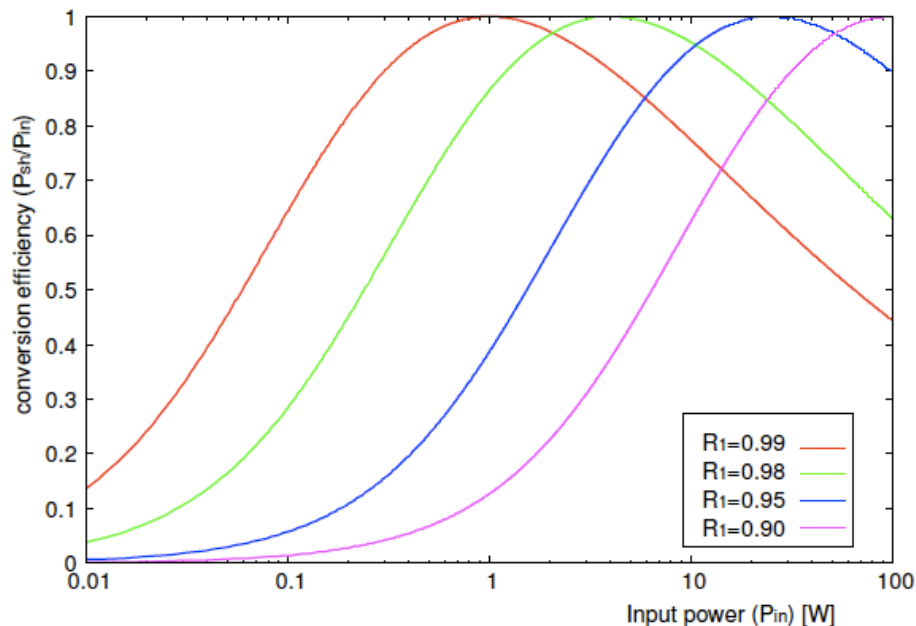


図 3: 入力パワーと変換効率 ($\eta = 0.01\%/W$ の場合)。

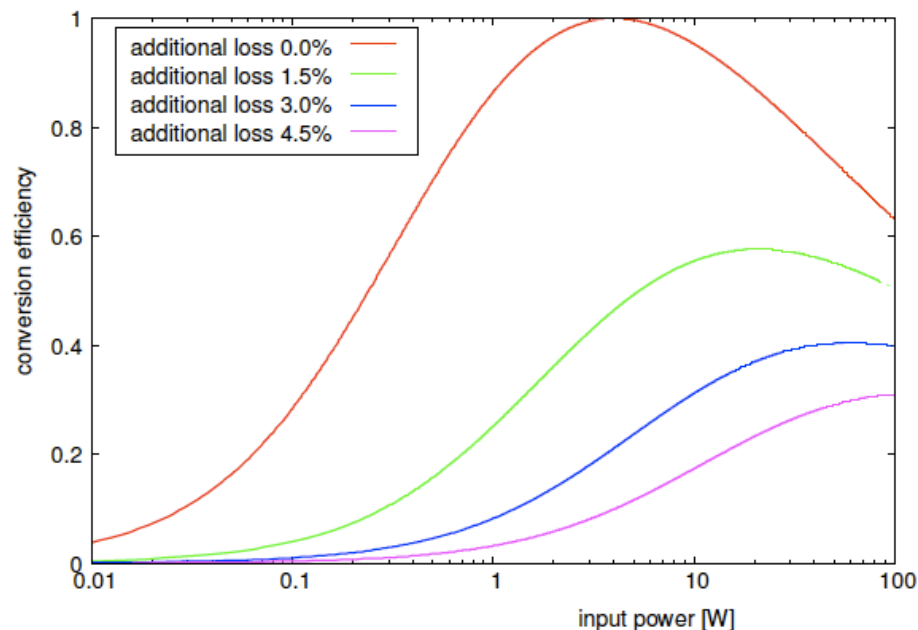


図 8: その他の損失を考慮した変換効率。 $\eta = 0.001\%/W$ 、 $R_1 = 0.98$ の場合。

低出力での予備試験

- 手持ちの物を集めて、組み合わせた
- レーザー：357MHz, 8ps, 300mW
- 結晶でのビーム径: $50\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$
- 3mm LBO結晶
- 共振器内で50倍程度の増大。
- パルス長と繰り返しでスケールすると、1.3GHz, 2psの場合とほぼ同等の条件に相当する。
- まだビーム負荷が見えない領域であるが、計算値に沿った変換効率が得られることを確認した。

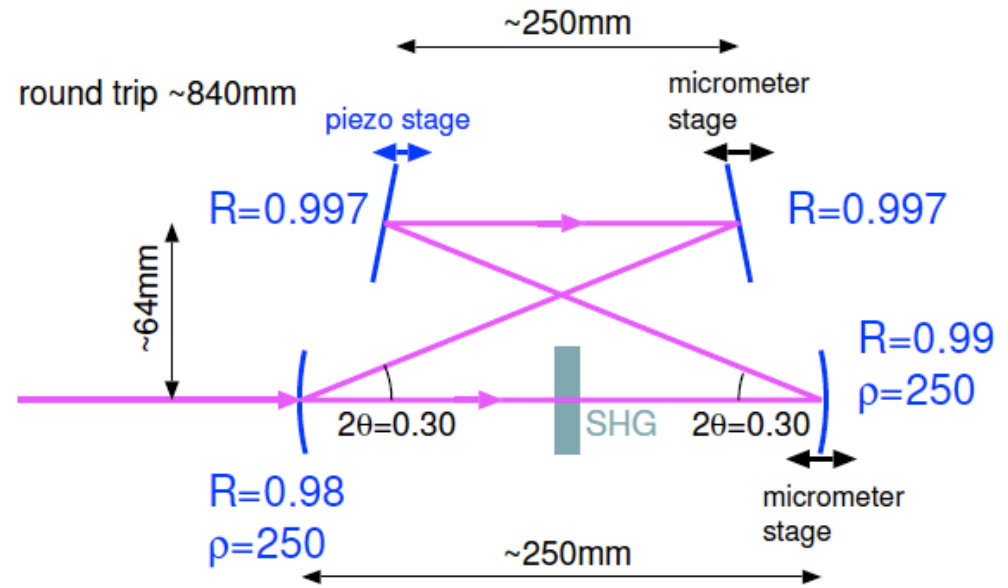


図 2: 共振器の設計

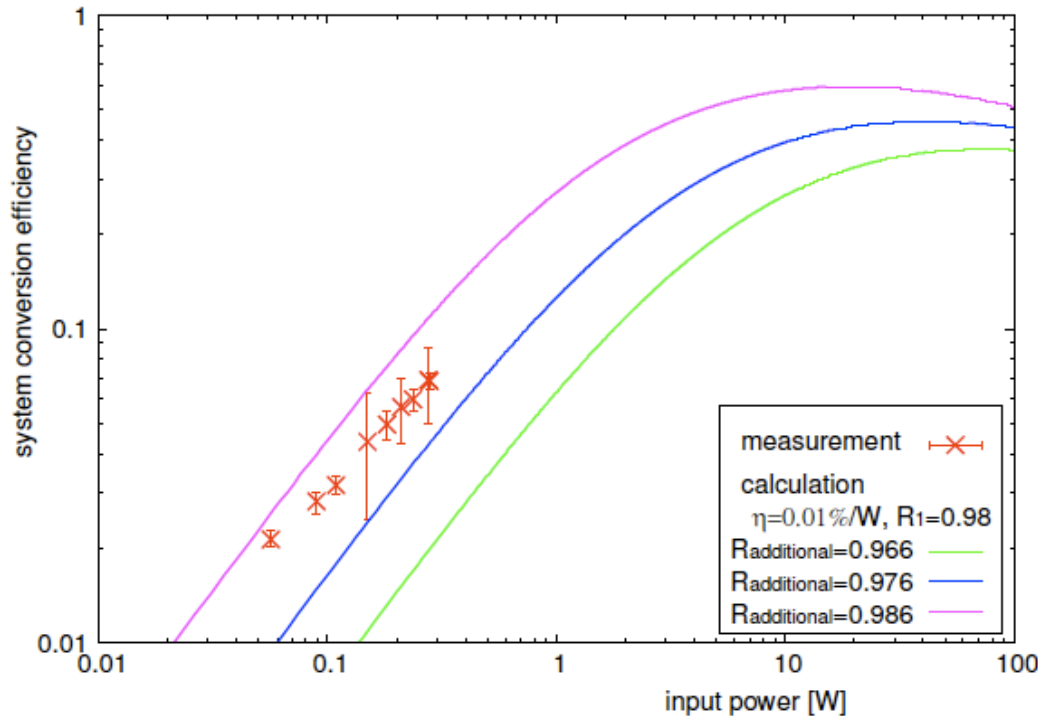
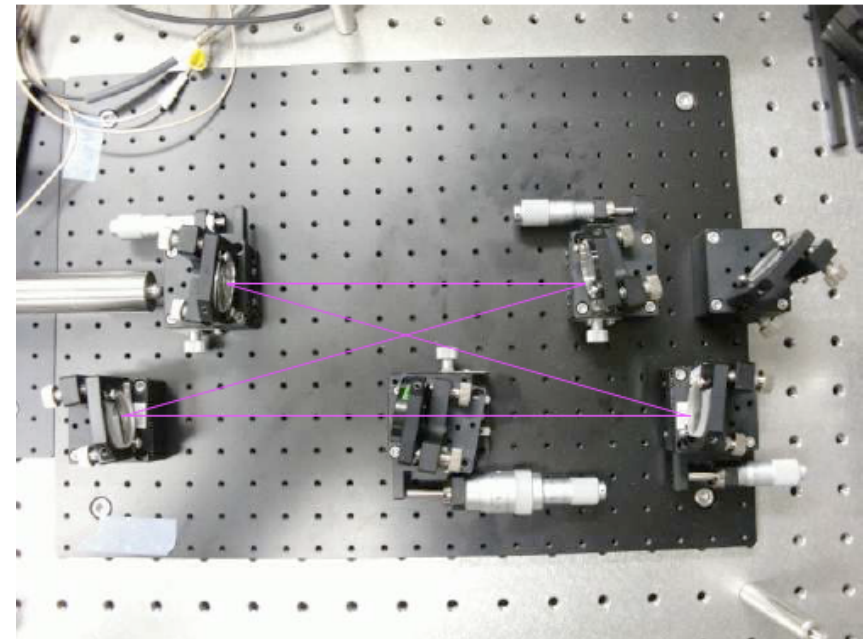


図 12: システム全体での変換効率



安定化試験

- フィネスは100程度なので、1nmくらいの精度でよい。
- 余裕なはずだが、一応制御試験をした。

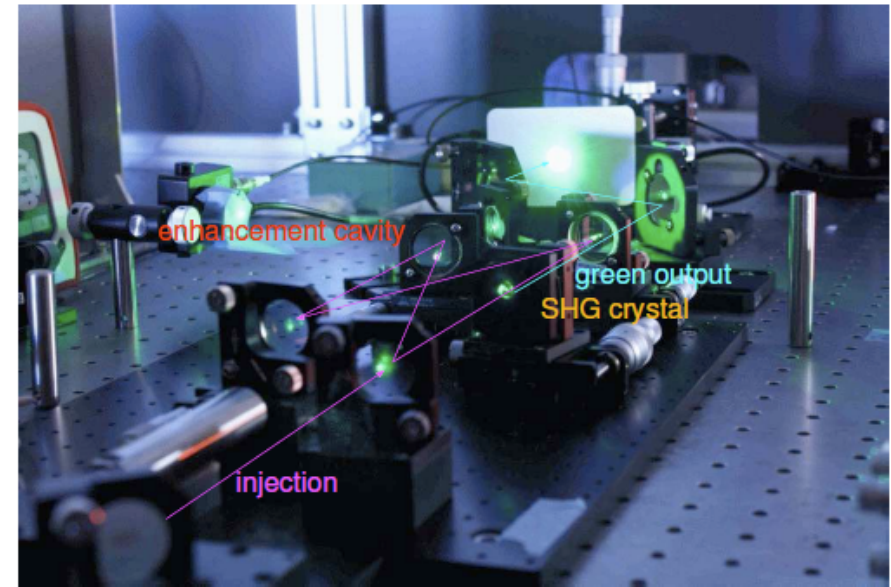
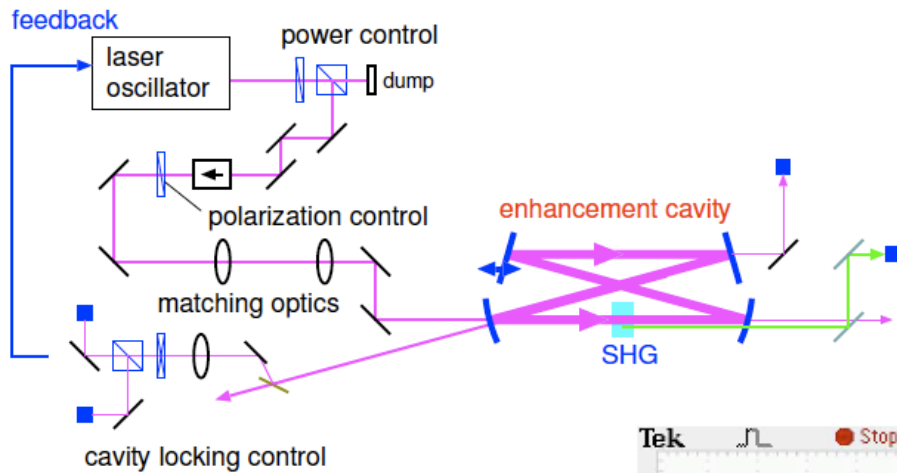
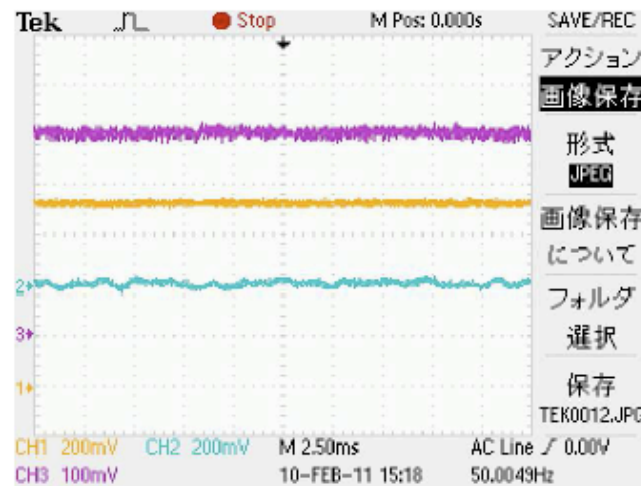
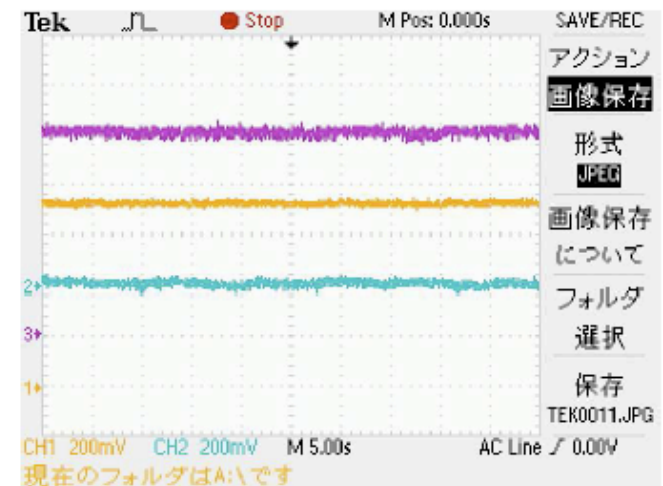


図 1: セ SHG power

stored
power
error
signal



short term (25msec)

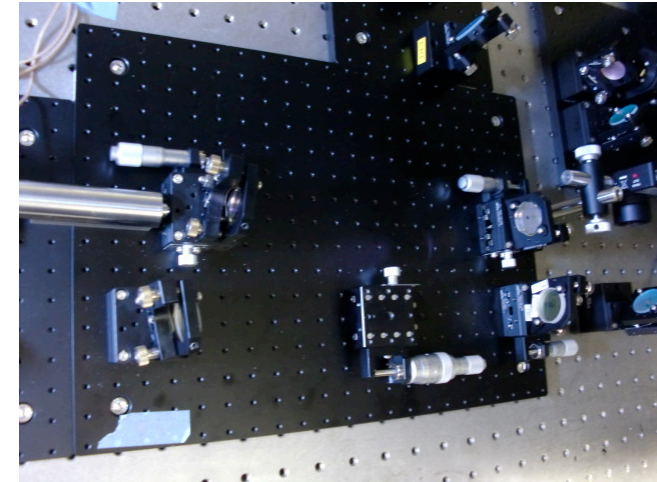


long term (50sec)

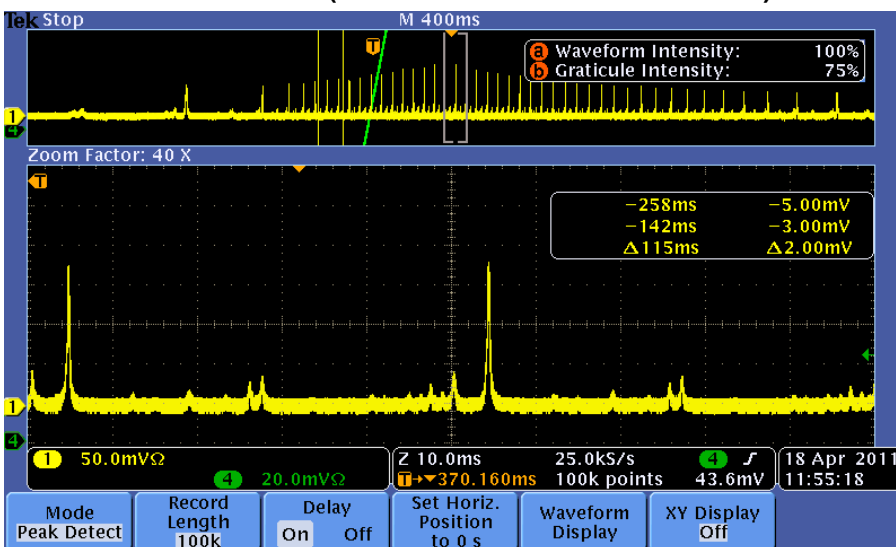
図 6: 共振器ロック時の信号

ファイバ発振器でのテスト

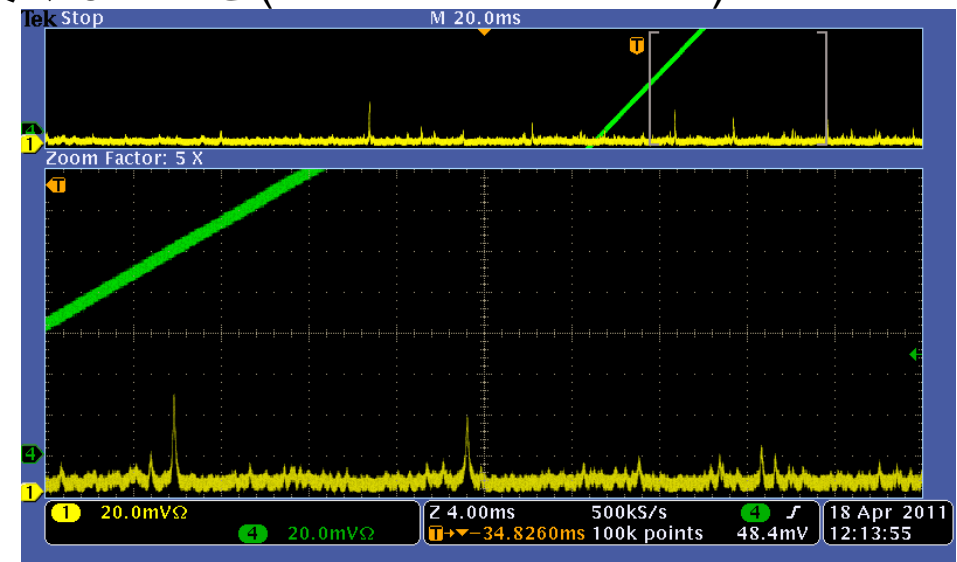
- レーザー発振器との相性が不安。
- ここまでのテストは、受動モードロックの通常の固体レーザー。能動ハーモニックモードロックのファイバレーザーではどうなのか。
- 共振器に蓄積できれば、大丈夫なのだが。
- AR南棟のファイバ発振器を流用してテストした。
 - 共振器長を920mm(1.3GHzの4パルス分)に調整。
 - 良いとき(スーパーモードサイドバンド-60dBc以下)は、問題無く蓄積される。(ある意味、短期的には、0.01fsの時間安定性がある、というか。)
 - パルス発振はしていても、少しずれる(サイドバンド-50dBc)と、蓄積されない。つまり、理想的なモードロック(パルス同士が位相関係を持つ)にはなっていない。



良いとき(RF sideband-60dBc)



良くないとき(RF sideband -50dBc)



現状とまとめ

- 共振器型であれば、高繰り返し低ピーク強度でも、50%の変換効率をえられる見込みがある。
 - 熱の問題がそれほど問題にならない10Wクラスの増幅器でも、共振器のおかげで実効的に50W程度のパワーを利用でき、5W程度の変換光が得られる。
- 多パルスのファイバ発振器でも、良いときには出来そうであるが、悪いときには出来ない。
 - 今のファイバ発振器は、パルス発振が続くという意味では数ヶ月安定であったが、サイドバンド-60dBcの完全なモードロックを維持するという意味では不安定(1日くらいしか持たない)。
 - 偏向空洞によるビーム試験で、悪いときは5psくらいの時間ジッタがみられたのも、このためかも。
 - 発振器はメーカーで調査中。
- 可能性
 - 増幅器も共振器に入れて、注入同期型の共振器で波長変換すると、固体結晶でもCW高ゲイン、高変換効率が可能になる。
 - 共振器型を多段にして、2倍波をさらに共振器型で効率良く4倍波に変換することも可能。
 - 仮に50%の50%とすると、25%の効率で4倍波が得られ、紫外光でもCW運転出来る可能性が見えてくる。
 - GaNやCsTeのカソードが使えるかもしれない。すると、超伝導RF電子銃も。