

# リュードベルグ原子励起のための 青色 SHG 光源の開発

中川研究室 福泉 美穂

2007 年 3 月 1 日

## 1 背景

我々の研究室では、シングル原子やシングルフォトンをつらップし、個々の原子の内部及び外部状態を制御して、量子ビットなどといった量子情報処理への応用に向けての研究が行われている。もし、量子コンピュータが実現すれば現在のコンピュータよりも飛躍的に高速に計算できることが理論的に示されている。1994 年に AT & T のショア (Peter W. Shor) は量子チューリング機械上で、整数の因数分解が小さな誤り確率で正確に行えることを数学的に証明し、注目を浴びた。それ以来、量子情報処理に関する研究は盛んである。

ベルグ状態まで励起したリュードベルグ原子を量子ビットとして使えないかと考えている。リュードベルグ状態とは主量子数が大きな電子を持った状態である。量子ビットを実現するためには 2 つの状態に量子的相関関係 (エンタングルメントという) が必要である。図 1 はのエネルギー準位を示している。原子をリュードベルグ状態に励起すると、原子は大きな双極子力を持つ。リュードベルグ原子を 2 つ用意すれば、原子は双極子 双極子相互作用を及ぼしあう。これを用いて、2 量子ビットを実現できないかと考えている。本研究は原子をリュードベルグ状態へ励起するための光源を開発することを目的としている。

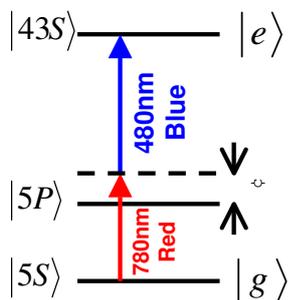


図 1  $^{87}\text{Rb}$  エネルギー準位

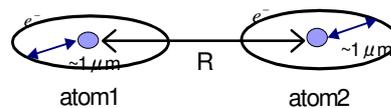


図 2 双極子 双極子相互作用

## 2 目的

我々の実験室ではもうすでに 780nm の光源は用意されているので、本研究ではリュードベルグ原子励起用 480nm 青色光源の開発 (図 1 の波長 480nm 青色光にあたる部分) をした。非線形結晶を用いて 960nm の基本波を 480nm

今我々は原子を磁気光学トラップ (MOT) し、さらに双極子トラップした原子をリュード

の倍波に非線形波長変換した。非線形結晶には、PPKTP (periodically poled  $KTiOPO_4$ ) という周期的反転分布結晶を使用した。

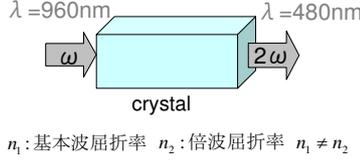


図3 第二次高調波発生

### 3 原理

第2次高調波発生 (second harmonic generation, SHG) の原理について簡単に説明する。基本波、倍波を次のように表す。

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t) \quad (1)$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_1^{(\omega_1)} e^{-i(\omega_1 t - k_1 z)} + \vec{E}_1^{(-\omega_1)} e^{i(\omega_1 t - k_1 z)} \quad (2)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_2^{(\omega_2)} e^{-i(\omega_2 t - k_2 z)} + \vec{E}_2^{(-\omega_2)} e^{i(\omega_2 t - k_2 z)} \quad (3)$$

Maxwell's equation は以下のように書ける。

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \quad (4)$$

( $\sigma$  : conductivity,  $\vec{P}$  : polarization)

(4) に (1) を代入すると、

$$|E^{(\omega_2)}|^2 = \frac{\omega_2^2}{4\epsilon_0^2 n_2^2 c^2} |P^{(2\omega_1)}|^2 \frac{\sin^2(\Delta k z / 2)}{(\Delta k z / 2)^2} z^2 \quad (5)$$

$$\Delta k \equiv k_2 - 2k_1$$

$\Delta k = 0$  ならば  $|E^{(\omega_2)}|^2 \propto z^2$  となり、倍波は増幅されていく。したがって位相整合条件は

$$\Delta k \equiv k_2 - 2k_1 = 0 \quad (6)$$

のときである。位相整合、不整合の様子を図4、図5に示す。

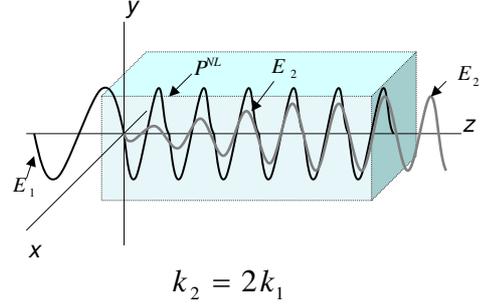


図4 (a) phase-matching

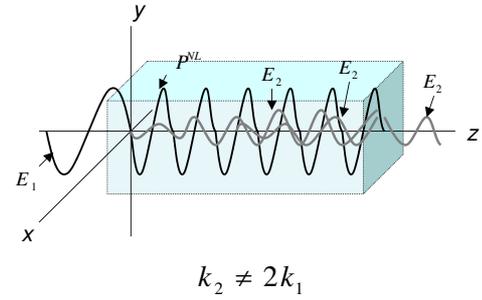


図5 (b) phase-mismatching

使用した非線形結晶は周期的分極反転結晶という結晶で、結晶の周期を調節することで位相整合をとる。このことを擬位相整合 (quasi-phase-matching) という。通常のパルク結晶では温度整合や角度整合をとるが、擬位相整合素子はあらかじめ結晶の周期構造により位相整合されている。擬位相整合条件を以下に示す。

$$\Delta k(T) = k_2(T) - 2k_1(T) - 2\pi/\Lambda(T) \quad (7)$$

( $\Lambda(T)$  : PPKTP grating period)

### 4 実験

図6は用意した光学系である。960nm 基本波には外部共振器型半導体レーザーを使用している。波長960nmの基本波はテーパアンプ (tapered amp) で増幅した後、結晶に入射して

Optimum beam waist:  $w_0 = 25.8 \mu\text{m}$

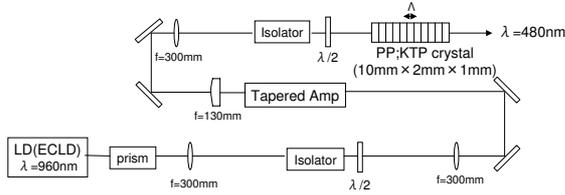


図 6 光学系

いる。テーパアンプは 20 ~ 30mW の入力パワーに対して約 1000mW まで増幅できるようなものを使用している。結晶に入射する光は s 偏光である。

また、光学系を用意するのに当たって、外部共振器型半導体レーザーの組み立てや温度コントローラー、テーパアンプの製作も行った。

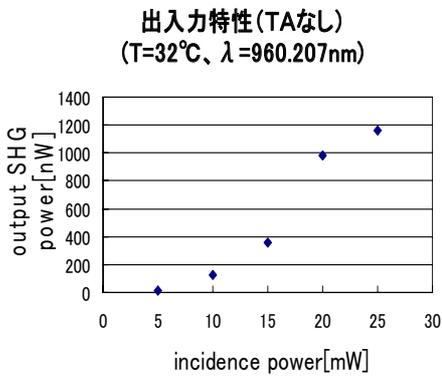


図 7 出力特性 (TA なし)

図 7、図 8 はそれぞれテーパアンプを使わずに SHG パワーを測定したものと、基本波をテーパアンプを使って増幅してから SHG パワーを測定したものである。テーパアンプを使用した場合には数百 mW の入力に対して、数  $\mu\text{W}$  の SHG パワーが得られた。最適化やテーパアンプの電流を上げることで、さらに

SHG パワーを ~ 1mW 位まで出力することが目標である。

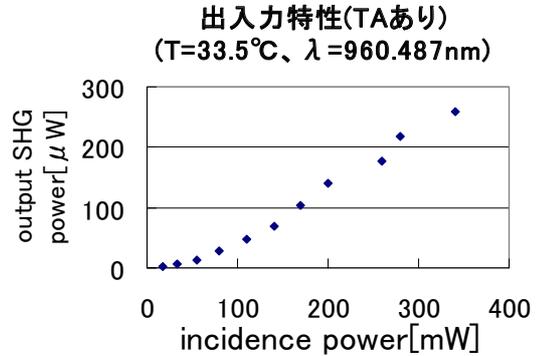


図 8 出力特性 (TA あり)

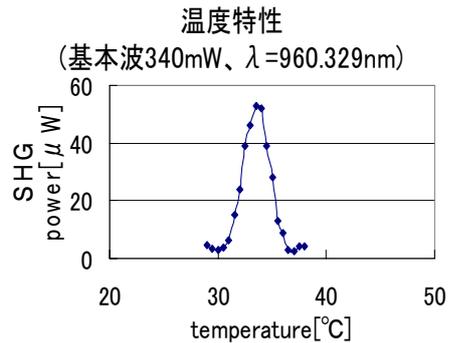


図 9 温度特性

図 9 は基本波パワー、波長を一定にしたときの温度特性である。温度幅  $\Delta T = 3$  程度で SHG パワーが最大となる場所がある。図 10 は温度を挿変えていったとき SHG パワーが最大となる波長を測定していったものである。室温付近で温度を約 30 度変えると、波長が約 1nm 可変であることが分かった。

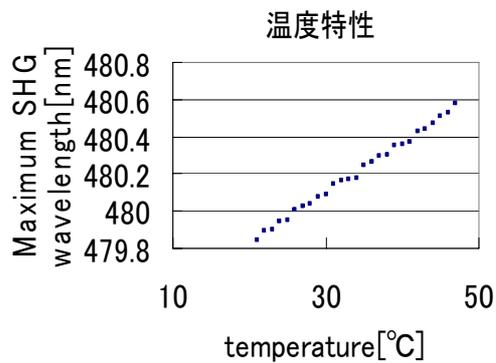


図 10 入力パワー最大時の温度特性

- 参考文献

R.LeTargat, J.-

J.Zondy, P.Lemonde; arXiv:physics/0408031

松岡 正浩 ; 量子光学

- 謝辞

中川先生、中川研究室の皆さんに大変お世話になりました。

## 5 まとめと展望

非線形光学結晶を用いて 480nm 青色光をつくることができた。また、結晶の温度を制御して出力可能な波長範囲を調べることができた。今後は、磁気光学トラップで冷却された Rb 原子を双極子トラップによって捕獲し、作った青色光を照射してリユードベルグ状態を用意していく予定である。

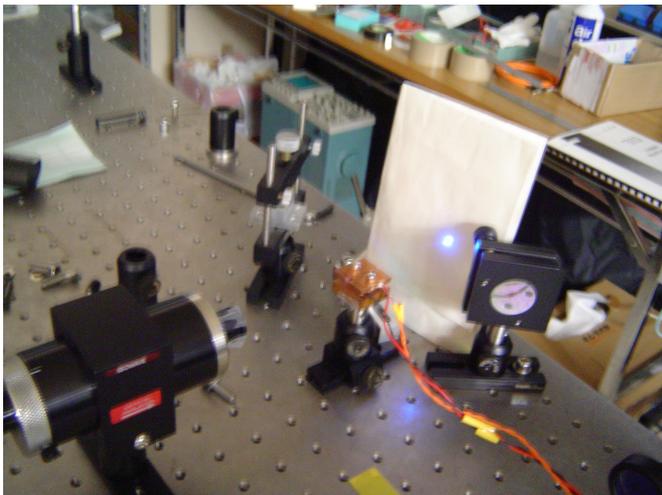


図 11 青色光