

少数光子非線形光学効果観測に向けた冷却原子集団の作製

丹治研究室 修士2年 高山 泰征

提出日 2021年3月5日

1 研究背景・目的

古典的には光は波であると考えられているが、微弱光などの特殊な場合では波と粒子双方の性質が現れる。このような光子の量子力学的性質を利用する技術が昨今注目されている。特に量子暗号通信は世界中で研究が盛んに行われており、通信技術が普及している現代において重要性が増している。光子により伝達された量子情報を処理する上では、光子により光子を直接制御できることが望ましい。そのためには光子と光子が相互作用する必要があるが、光子同士は真空中で相互作用を起こさないため、他の物質を介することで光子間の相互作用を起こすことが考えられる。しかしながら、単一光子の作る電場は弱いため、光子と物質の相互作用が弱いことが問題として挙げられる。この問題は原子を共振器中にトラップし、共振器中で増強された光子の電場と相互作用させることで解決される。

我々の研究室では共振器内の原子集団を利用し、光子間の相互作用を観測することを目指している。そのためには光子と原子の間の相互作用を増強させるために、共振器モード中に原子をトラップする必要がある。原子をトラップするためには磁気光学トラップ(MOT)[1]を利用する。本論文はMOTを用いた冷却原子集団の作製についてまとめたものである。

2 原理

2.1 磁気光学トラップ(MOT)

2.1.1 ドップラー冷却

波数 \vec{k}_{abs} を持つ光子を吸収するとき、原子は運動

量 $\hbar \vec{k}_{abs}$ を受け取る。その後、原子はランダムな方向に光子を自然放出するため、その際の平均的な運動量変化は0となる。結果として吸収と放出の1サイクルの過程で原子の速度は平均的に $\frac{\hbar \vec{k}_{abs}}{m}$ だけ変化する。これらのことから、原子が対向するレーザー光を吸収することで、原子は冷却される。

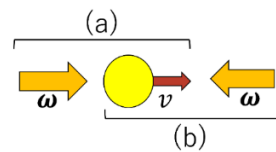


図 2.1 レーザー光と原子の様子

図 2.1 のように右向きに移動する二準位原子に左右からレーザー光を照射する場合を考える。二準位間の共鳴周波数を ω_0 、照射するレーザー光の周波数を $\omega (< \omega_0)$ 、原子の速度を v とする。図 2.1 の(b)のように原子とレーザー光が対向している場合、原子の感じる光の周波数はドップラー効果により ω より大きくなり ω_0 に近づく。逆に、(a)のように原子とレーザー光の進む向きが同じ場合、原子の感じる周波数はドップラー効果により ω より小さくなり ω_0 から遠ざかる。これにより原子は対向するレーザー光をよりよく吸収することとなる。

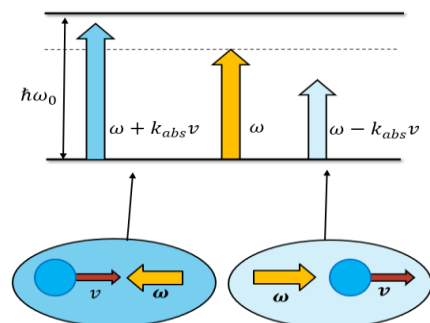


図 2.2 原子が感じるレーザー光の周波数

2.1.2 ゼーマンシフトを利用した復元力

ドップラー冷却によって原子を冷却することは

きるが、原子を空間的に一箇所に留まらせることはできない。そこで、三次元的に不均一な磁場を加え、レーザー光の円偏光とゼーマンシフトを利用することで復元力を生じさせると、原子を空間の特定領域にトラップすることができる。

ここまでは原子を二準位系として扱ってきたが、実際には準位が縮退している場合がある。ここでは上準位においてが三つの磁気副準位が縮退している場合を考え、それらの角運動量子数をそれぞれ $M_J = +1, 0, -1$ とする。磁場をかけることでゼーマンシフトによりこれらの準位の縮退が解ける。座標原点では 0 で、原点から離れるにしたがって距離に比例して大きくなる磁場

$$B = \beta'z \quad (2.1)$$

がかかっている場合、ゼーマンシフトの大きさも原点からの距離に比例して、

$$\Delta E = g_F \mu_B \beta'z \quad (2.2)$$

のように変化する(図 2.3)。ここで、 g_F は Lande の g 因子、 μ_B はボーア磁子である。式(2.1)のように空間変化する磁場は二つの平行なコイルに逆向きに電流を流すアンチヘルムホルツコイルによって作り出すことができる。

ここに、 σ^+ 円偏光と σ^- 円偏光のレーザー光を対向させて入射させる。角運動量の保存により、 σ^+ は $J=0, M_J=0 \rightarrow J=1, M_J=1$ への遷移だけを起こし、 σ^- は $J=0, M_J=0 \rightarrow J=1, M_J=-1$ への遷移だけを起こす。レーザー光の周波数が原子の共鳴周波数より少し赤方離調している時、ゼーマンシフトの結果、 z が正の領域では、 $J=0, M_J=0 \rightarrow J=1, M_J=-1$ の遷移がより共鳴に近く、 z が負の領域では、 $J=0, M_J=0 \rightarrow J=1, M_J=1$ の遷移がより共鳴に近くなる。したがって、 z が正の領域の原子は σ^- の円偏光の光を吸収しやすく、負の領域の原子は σ^+ の円偏光の光を吸収しやすい。このいずれの場合にも、原子は磁場が 0 である原点に向かう復元力を受け、原点付近にトラップされる。これを磁気光学トラップ(MOT)と呼ぶ[1]。

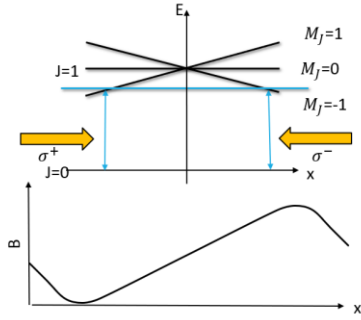


図 2.3 四重極磁場と原子の準位図

2.2 MOT に必要な光源

ここでは MOT を作成する際に必要となる光源について説明する。図 2.4 は ^{87}Rb 原子の準位図である。

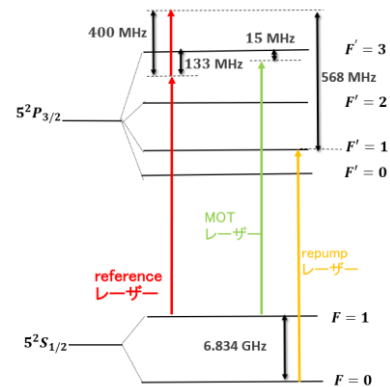


図 2.4 ^{87}Rb 原子の準位図

MOT レーザーは ^{87}Rb 原子を冷却するためのレーザーであり、 D_2 線 ($|5^2S_{1/2}, F=2 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=3 \rangle$) に対して安定化させ 15 MHz 程度の離調をとる。

Repump レーザーは冷却サイクル中に $|5^2S_{1/2}, F=1 \rangle$ に脱励起した原子を冷却サイクルに戻すためのレーザーであり、 $|5^2S_{1/2}, F=1 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=2 \rangle$ に対して安定化を行う。

Reference レーザーは MOT レーザーと repump レーザーの安定化に用いる参照用レーザーであり $|5^2S_{1/2}, F=2 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=2 \rangle$ と $|5^2S_{1/2}, F=2 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=3 \rangle$ のクロスオーバーに対して安定化させた上で音響光学素子を用いて 400 MHz 周波数をシフトさせる。

2.3 Doppler-free dichroic atomic vapor

laser locking (DAVLL)

Reference レーザーの周波数安定化は、Doppler-free DAVLL 法 [2] によって行う。Doppler-free DAVLL 法は後述の飽和吸収分光法と DAVLL 法を組み合わせたもので、比較的簡単にスペクトル幅の狭いエラー信号を得ることが可能である。

2.3.1 飽和吸収分光法

飽和吸収分光法は原子のドップラー効果の影響を取り除いた吸収スペクトルを得る手法である。室温の Rb 原子の飽和ガスセルにレーザー光を入射させる場合について考える。まず、ガスセルに一方からレーザー光を入射させる場合には、図 2.5 のような自然幅よりもはるかに大きいドップラー広がりを持つスペクトルが観測される。

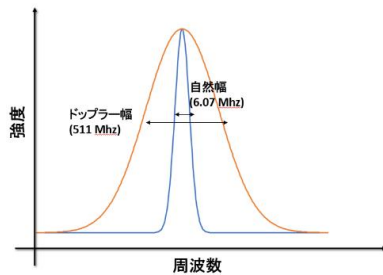


図 2.5 ドップラー広がり と 自然幅

次に、図 2.6 のようにレーザー光を原子の飽和強度以上のパワーを持つポンプ光と、ポンプ光に比べ十分低いパワーのプローブ光に分割し、ガスセルに対向させて入射させる場合を考える。この場合、図 2.7 のように原子の共鳴周波数付近にくぼみを持つスペクトルを観測することができる。

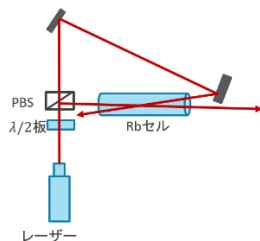


図 2.6 飽和吸収分光法のセットアップ

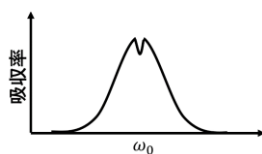


図 2.7 飽和吸収スペクトル

ここでは簡単のために二準位原子について考える。ガスセル中の気体原子は速度分布を持ち、そのうちのある特定の速度を持つ原子のみがレーザーと共鳴する。そのため、レーザーの周波数を ω 、原子の共鳴周波数を ω_0 とすると、レーザーと共鳴する原子の速度はプローブ光の進行方向を正の方向としてそれぞれ式(2.2)のようになる。

$$\begin{cases} \text{ポンプ光} & v_1 = \frac{\omega - \omega_0}{k} \\ \text{プローブ光} & v_2 = -\frac{\omega - \omega_0}{k} = -v_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

レーザーの周波数と原子の共鳴周波数が異なる時、式(2.2)よりポンプ光とプローブ光は異なる原子と共鳴するため、ポンプ光の存在は原子によるプローブ光の吸収率に影響を及ぼさない。一方でレーザーの周波数と原子の共鳴周波数がほぼ等しい時には、レーザー光の光軸に対して垂直方向に運動する原子がポンプ光とプローブ光の両方を吸収することができる。そのため、共鳴周波数付近ではポンプ光により原子の吸収が飽和し、図 2.7 のようにプローブ光の吸収率が減少する。このようにして飽和吸収スペクトルに生じるくぼみはラムディップと呼ばれ、その線幅は原子の自然幅程度になることが知られている [3]。

2.3.2 DAVLL (dichroic atomic vapor laser locking) 法

周波数安定化に用いるエラー信号は、周波数変化に対応する電圧値が安定化させたい周波数で零点となり、その付近で線形に変化している必要がある。飽和吸収分光法で得られるスペクトルは共鳴周波数に対して左右対称であるため、そのままでは共鳴周波数に対してレーザーを安定化させることができない。この解決策の一つとして DAVLL 法が挙げられる。磁場が存在しない場合に縮退していた上準位の磁気副準位は、磁場をかけることでゼーマン効果により縮退を解くことができる (図 2.8(a))。この時のエネルギーシフト量は式(2.3)で表すことができる。

$$\Delta E = g_F \mu_B B \quad (2.3)$$

B は磁場である。

また、選択則により σ^- 偏光は $m_j = -1$ の状態への遷

移と共鳴し、 σ^+ 偏光は $m_j = +1$ の状態への遷移と共鳴する。これによって円偏光の向きによって共鳴する周波数がシフトし、図 2.8(b)のような、逆方向にシフトした二つのスペクトルが得られる。

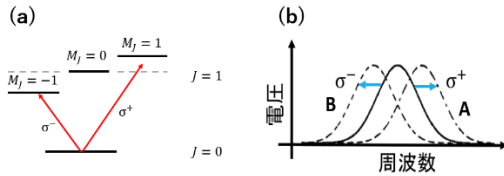


図 2.8 円偏光によるスペクトル変化

さらにこれらのスペクトルの差分を取ることで、図 2.9 のような、共鳴周波数で零点とクロスし線形に変化する微分信号を作成することができる[4]。

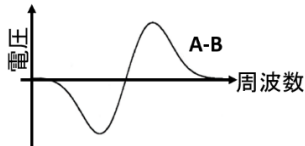


図 2.9 エラー信号

2.3.3 Doppler-free DAVLL 法

Doppler-free DAVLL 法では飽和吸収分光で得られる飽和吸収信号に DAVLL 法を適用することで、図 2.10 のようにスペクトル幅の狭いエラー信号を得ることができる。

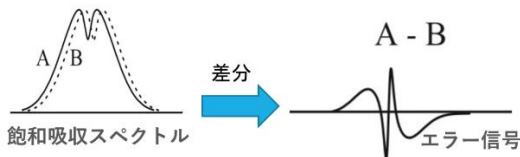


図 2.10 DAVLL 法

2.4 Delay-line 法を用いた周波数オフセットロック

MOT レーザーと repump レーザーについては、Delay-line 法[5]を用いて、reference レーザーに対して周波数オフセットロックを行う。Delay-line 法では、二つのレーザー光を干渉させることで得られるビート信号を二経路に分け、光路差を生じさせることで二つのレーザーの周波数差に対応するエラー信号を得ることができる。本研究では、このエラー信号を利用して reference レーザーに対して MOT レーザーと repump レーザーの周波数安定化を行う。図 2.11 に Delay-line 法の概略図を示す。

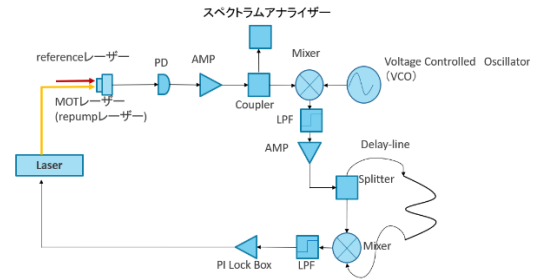


図 2.11 Delay-line 法のセットアップ

この系では、入力電圧によって発信周波数が変化する voltage-controlled oscillator(VCO)を組み込むことで任意のオフセット周波数での安定化を実現している。二つのレーザーのビート信号を $A \cos(\omega_{in}t)$ 、VCO からの入力信号を $B \cos(\omega_{VCO}t)$ とし、二つの信号をミキサーで干渉させると、

$$A \cos(\omega_{in}t) \times B \cos(\omega_{VCO}t) = \frac{AB}{2} [\cos(\omega_{in} + \omega_{VCO})t + \cos|\omega_{in} - \omega_{VCO}|t] \quad (2.4)$$

となる。第一項の成分はその後のローパスフィルターによって取り除かれ第二項の成分のみが残る。

さらに、これを光路差のある二経路に分離し、再びミキサーで干渉させる。片側の経路の信号を $\alpha \cos \omega t$ 、他方の信号を $\beta \cos \omega(t + \tau)$ とすると(ただし、 $\omega = \omega_{in} - \omega_{VCO}$)、

$$\alpha \cos \omega t \times \beta \cos \omega(t + \tau) = \frac{\alpha\beta}{2} [\cos \omega\tau + \cos \omega(2t + \tau)]$$

となる。周波数 ω で振動する第二項の成分はローパスフィルターで取り除かれ

$$\frac{\alpha\beta}{2} \cos \omega\tau = \frac{\alpha\beta}{2} \cos|\omega_{in} - \omega_{VCO}|\tau \quad (2.7)$$

で表される成分のみが残る。以上によりレーザー光の周波数差に対応するエラー信号が得られる。また、VCO の入力電圧を変化させることでエラー信号の位相を変化させることが可能であり、レーザーの周波数を任意の値でロックすることができる。

3 実験結果

3.1 光源の周波数安定化

図 3.1 にレーザー光の安定化に用いたセットアップを示す。まず、Doppler-free DAVLL 法を用いて

reference レーザーを ^{87}Rb 原子に対して安定化させ、その後、Delay-line 法による周波数オフセットロックによって MOT レーザーと repump レーザーを reference レーザーに対して安定化させた。

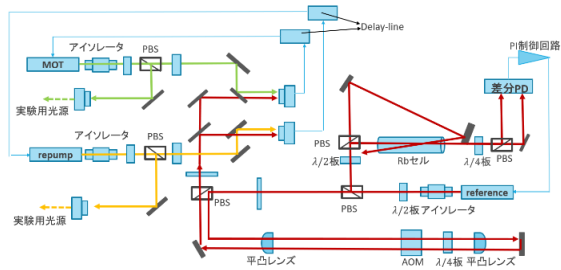


図 3.1 光学系のセットアップ 1

Doppler-free DAVLL 法によって、reference レーザーを ^{87}Rb 原子に対して安定化させる際に、得られたエラー信号を図 3.2 に示す。図 3.2(a) はレーザー周波数を掃引して得られたエラー信号で、図 3.2(b) は安定化後のエラー信号である。

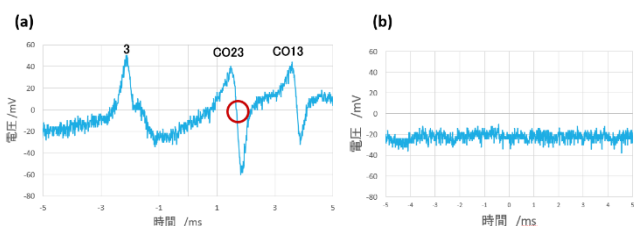


図 3.2 reference レーザーのエラー信号

飽和吸収スペクトルのピーク間の周波数が分かっていることを利用して安定化後の周波数揺らぎを計算した結果 316 kHz となった。

図 3.3((a)周波数掃引、(b)安定化後)は、Delay-line 法を用いて得られた MOT レーザーのエラー信号である。

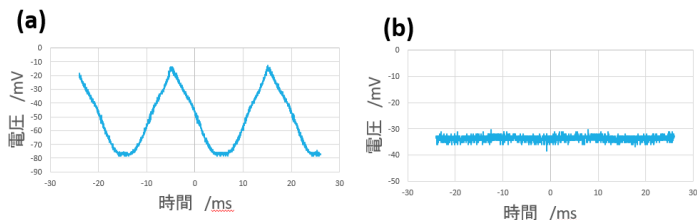


図 3.3 MOT レーザーのエラー信号

Delay-line の長さからピーク間の周波数が分かっていることを利用して安定化後の周波数揺らぎを計算した結果 134 kHz となった。

さらに、MOT レーザーを安定化させた状態で MOT レーザーと reference のビート信号をスペクトラムアナライザーで測定した結果を図 3.4 に示す。横軸はビート周波数であり、reference レーザーとの周波数差が約 287 MHz であると確認できる。ただし、これだけでは二つのレーザーのうちのどちらの周波数の方が高いかは明らかでない。そこで、レーザーの電流値を変化させた際のビート信号の変化から、MOT レーザーの周波数の方が低いことを確認した。

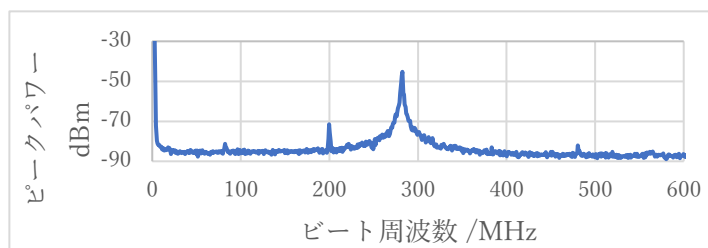


図 3.4 MOT レーザー ロック後のビート信号

同様に、図 3.5(a) は repump レーザーのエラー信号、図 3.5(b) はロック後の信号である。

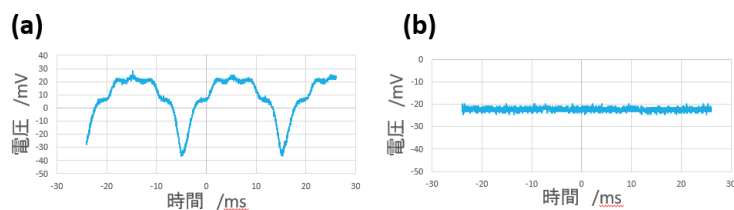


図 3.5 repump レーザーのエラー信号

安定化後の周波数揺らぎを計算した結果 228 kHz となった。図 3.6 はロックした状態でビート信号を観測した様子である。500 MHz 付近にビートが観測された。reference レーザーと repump レーザーの周波数差は 6.301 GHz である。このビート信号 (6.301 GHz) とファンクションジェネレーターの信号 (6.8 GHz) でさらにビートを取っているため、観測されたビート信号 (500 MHz) によって repump レーザーが正しい周波数に安定化できていると確認した。

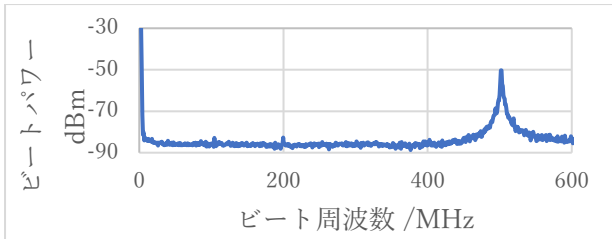


図 3.6 repump レーザー 安定化後のビート信号

3.2 冷却原子集団の観測

図 3.7 は真空チャンバー周りのセットアップ図である。MOT レーザーは PBS によって 3 光路に分割し、真空チャンバーへと入射させる。真空チャンバーを通過後、ミラーによって反射することで、再び真空チャンバーへと入射する。repump レーザーは MOT レーザーの 1 光路と重ね合わせて同様にチャンバーへ入射し、ミラーで折り返す。

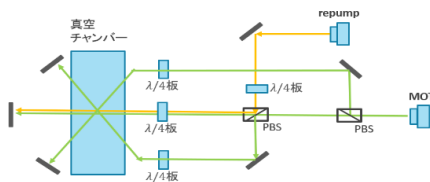


図 3.7 光学系のセットアップ 2

図 3.8 は観測した原子集団の様子である。磁場の ON/OFF の切り替えに伴って明滅する原子からの発光を確認した。また、MOT レーザーの周波数を変化させることで、原子の発光の強さが変化することも確認した。

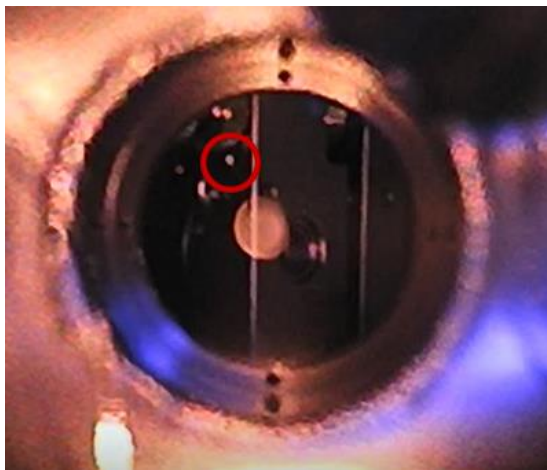


図 3.8 観測した原子集団の様子

4 まとめと今後の展望

本論文では少数光子非線形光学効果の観測に向けて冷却原子集団の作製を行った。原子を冷却する手段として MOT を用いた。そのためには安定化された冷却用(MOT)レーザーと repump レーザーが必要である。⁸⁷Rb原子の遷移に対して安定化された reference レーザーに対して、MOT レーザーと repump レーザーの各レーザーの安定化を行った。さらに、これらの光源を用いて実際に MOT を観測した。

今後の展望としては、観測された冷却原子集団の特性評価を行い、原子数や温度を見積もる予定である。その後は、原子集団を磁気光学トラップから光双極子トラップにロードし、単一光子スイッチの実現を目指す。

5 参考文献

- [1] Pantita Palittapongarnpim, Characterization of Magneto-optical Trap For Experiments in Light-Atom Interfacing, P8-17(2012)
- [2] T. Peteleski, M. Fattori, G. Lamporesi, J. Stuhler, and G.M. Tino Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D, 279-283(2003)
- [3] Christopher J. Foot Atomic Physics, OXFORD MASTER SERIES IN ATOMIC OPTICAL AND LASER PHYSICS (2005)第 8 章
- [4] .Kristan L. Corwin, Zheng-Tian Lu, Carter F. Hand, Ryan J. Epstein, and Carl E. Wieman Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor 25 OSA Publishing Vol.37, Issue15, p.3295-3298 (1998)
- [5]U.Schu nemann,et al. Simple scheme for tunable frequency offset locking of two lasers(REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 70,1,1998)