簡易モデルによるAVLISシステムのイオン化率計算-1(共鳴媒質)

滝沢 靖史, 井澤 靖和

大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Simple Model for Calculating Photoionization Rate in AVLIS System -1 Photoionization in Resonant Medium

Yasushi TAKIZAWA and Yasukazu IZAWA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received June 19, 2001)

A simple model for calculating the photoionization rate in AVLIS system is proposed. It was found that, for the different incident laser conditions, the dependence of photoionization rate of target atom on the propagation distance estimated by the model represents well the simulation result. It has been confirmed that this model is useful for analyzing the performances of AVLIS plant without simulation.

Key Words: Laser isotope separation, AVLIS, beam propagation, Multi-step photoionization

1. はじめに

原子レーザー法同位体分離 (Atomic Vapor Laser Isotope Separation, 以下AVLISと呼ぶ) システムでは, 目的とする同位体原子 (以下標的原子と呼ぶ) の遷移周波数に同調した複数のレーザーパルスを原子蒸気中に入射し, 蒸気中を長距離にわたって伝播させながら, 標的原子を選択的にイオン化する. レーザーパルスのエネルギーは標的原子の光イオン化に費やされて伝播とともに減少し, 光イオン化率も伝播距離に依存して低下する. 一方, レーザーパルスは, 標的原子以外の同位体原子 (以下, 非標的原子と呼ぶ) の遷移周波数と同位体シフトだけ離調した近共鳴状態にあり, 遷移周波数近傍での異常分散や非線形屈折率のため, 伝播速度の低下, 波形の変形, 周波数変調, 自己集束などの近共鳴相互作用を受けながら, 原子蒸気中を伝播することになる.

以上のように, AVLISシステム中でのレーザーパルスと原子蒸気との相互作用は多くの効果を含み, それらが同時にレーザーパルスの伝播に影響を及ぼすため, 標的原子の光イオン化特性を解析的に取り扱うことは極めて困難であり, シミュレーションコードを用いた評価が必要となる. このため, 筆者らのグループでは, 標的原子による共鳴効果と非標的原子による近共鳴効果を含めたレーザーパルスの伝播と多段階光イオン化過程を解析できるシミュレーションコードCEALIS-P¹⁾やCEALIS-P-2D³⁾を開発した. CEALIS-Pはレーザーパルスの伝播速度の低下や周波数変調など時間的な近共鳴効果の影響を解析できるコードであり, CEALIS-P-2Dは自己集束のような空間的近共鳴効果をも含めて光イオン化特性を解析できるコード

である. これらのコードを用いてレーザーパルスの伝播効果が標的原子のイオン化特性に及ぼす影響を解析し¹⁻⁴⁾, 近共鳴効果による選択励起段レーザーパルスの伝播速度の低下はイオン化特性の変化を引き起こすこと¹⁾, 入射レーザーパルスの空間強度分布に不均一性があると, 自己集束効果によって不均一性は成長しイオン化特性はさらに劣化すること³⁾などを明らかにした. また, レーザー光の伝播軸に沿って, 単位面積あたりの標的原子数と入射レーザー光子密度で規格化した規格化伝播距離¹⁾を用いて整理すると, 伝播速度の低下によるイオン化特性の劣化は入射レーザーパルス幅にほとんど依存しないが, 空間強度不均一性の影響はパルス幅に比例することを指摘した³⁾.

コードを用いた解析は, 標的原子の光イオン化特性に及ぼすレーザーパルスの伝播効果を定量的に評価できる一方, 計算に多大な時間を必要とするという欠点がある. このため, 近共鳴効果を含めて標的原子の光イオン化特性を近似的に評価できる簡易計算手法について検討してきた.

簡易手法では伝播に伴うレーザーパルスの波形変形を単純なモデルで仮定し, まず共鳴媒質中でのイオン化特性を計算する. 続いて波形変形モデルに伝播速度の低下や空間強度不均一性の成長などの近共鳴効果を導入し, 共鳴媒質中のイオン化特性からの劣化を求めようとするものである. 本論文では, まず, 標的原子だけからなる共鳴媒質中での光イオン化特性に及ぼす伝播効果を解析できる簡易モデルについて検討し, 標的原子と非標的原子を含む混合媒質中での近共鳴効果の影響を解析する手法については次の論文⁵⁾で検討する.

2節ではシミュレーション解析結果を, 3節では簡易モデ

Fig.1 Atomic model of three-step photoionization system used in the simulation codes CEALIS-P and CEALIS-P-2D.

ルにもとづく解析結果を、4節では簡易モデルの有効範囲について述べる。

2. シミュレーション解析結果

シミュレーションコードCEALIS-PおよびCEALIS-P-2Dで考えている原子系は、Fig.1に示すように、2種類の同位体原子を含む縮退のない3準位2段階光イオン化系である。2つのレーザーパルスAとBが、それぞれ、準位1から2, 2から3へと標的原子を選択励起、中間励起する。イオン化は準位3から速度 γ の、系外への減衰として取り扱っている。レーザー周波数は標的原子の遷移周波数に同調し、非標的原子の遷移周波数とは同位体シフト Δ_1 , Δ_2 分だけ異なっている。原子の励起速度はラビ周波数 $\Omega_i = \mu_i E_i / \hbar$ で取り扱う。ここで、 μ は遷移の双極子モーメント、 E はレーザー光電界、 $\hbar$ はプランク定数、 $i=A$ または B である。以下の検討においては、 $\mu_A = \mu_B$, $\Omega_A = \Omega_B = \gamma$ を仮定する。コードの詳細は文献1)を参照されたい。

シミュレーション解析によって得られた伝播に伴うレーザーパルス波形の変化をFig.2に示す。入射パルスはピークラビ周波数 Ω_0 ($\Omega_A = \Omega_B = \gamma$) = 1GHz, 半値全幅25nsの8次のスーパーガウス型で、実線は選択励起段、破線は中間励起段のレーザーパルスである。またFig.2でレーザーパルス強度は入射位置 ($Z_{\text{eff}}=0$) におけるピーク強度で規格化した。伝播距離には次式で定義される規格化伝播距離 Z_{eff} を用いた¹⁾。

$$Z_{\text{eff}} = \beta N Z / N_{\text{photon}} \quad (1)$$

Fig.2 Temporal intensity profiles of laser A and B at different propagation distances.

Fig.3 The photoionization rate estimated by simulation.

ここで、 β は標的原子同位体の存在比率、 N は全原子密度、 N_{photon} は入射レーザーパルスの光子密度である。規格化伝播距離 Z_{eff} は伝播距離 Z までのレーザー光路中に存在する標的原子数と入射レーザー光子数の比をあらわす。本論文では標的原子のみからなる共鳴媒質を対象としているので $\beta=1$, また N は標的原子密度となる。

レーザーパルスのエネルギーは原子の励起によってパルスの立ち上がり部から消費されはじめる。伝播の初期にはピーク強度はほとんど変化せず、パルス幅のみが減少する。伝播距離が大きくなるにつれてパルス幅だけでなく、ピーク強度も減少する。選択励起段のレーザーA(実線)ではパルス立ち上がり部からエネルギーが完全に消費されるのに対し、中間励起段のレーザーB(破線)では、選択励起に必要な時間分だけ立ち上がり部でエネルギーの未利用分が残る。

伝播に伴う標的原子のイオン化率の変化をFig.3に示す。伝播距離の増大とともに、イオン化率は初期にはゆっくりと、その後急激に減少し、 $Z_{\text{eff}}=1.2$ 付近でイオン化率は0となる。

3. 簡易モデルによる解析

本節では、標的原子のイオン化率の伝播距離依存性を近似的に解析できる簡易モデルについて検討する。解析にあたっては、Fig.4に示されているように、蒸気入口 ($Z_{\text{eff}}=0$) におけるイオン化率の時間発展に関してのみコード解析の結果を利用する。

入射レーザーパルス波形は矩形とし、伝播に伴う波形の変形をFig.5のように2種類のモデルで考える。第一のモデル

Fig.4 Temporal behaviors of photoionization rate for different incident laser intensities, which are used in this analysis.

A) Constant pulse width model

B) Constant intensity model

Fig.5 Changes of laser pulse shape assumed in two models.

モデルAは、レーザー光が媒質中を伝播していく間パルス幅は一定で、標的原子のイオン化によるレーザーエネルギーの減少は強度の減少として考える。第二のモデルBは、レーザーパルスの強度が一定で、標的原子のイオン化によるエネルギーの減少はパルス幅の減少として考えるというものである。モデルAはレーザー光強度が飽和強度より小さく、レーザー光の吸収を線形と考えてよい場合、モデルBは飽和強度よりずっと大きく、パルスの立ち上がり部でイオン化が完了してしまう場合に相当する。

微小伝播距離内で標的原子のイオン化に費やされるレーザーエネルギーの減少は次の式で表わされる。

$$dW = P_{ion} \cdot \hbar\omega \cdot \beta NdZ = P_{ion} I_0 \tau_0 dZ_{eff} \quad (2)$$

ここで P_{ion} はその位置でのイオン化率、 $\hbar\omega$ は光子エネルギー、 I_0 と τ_0 は各々入射レーザーパルスの初期強度とパルス幅である。レーザーパルスが規格化伝播距離 $Z_{eff}=0$ から $Z_{eff}=Z_r$ まで伝播する間に、イオン化に費やされて減少するエネルギーは

$$\Delta W_r = P_r I_0 \tau_0 Z_r \quad (3)$$

であるから、 $Z_{eff}=Z_r$ におけるレーザーエネルギーは

$$W_r = W_0 - \Delta W_r = I_0 \tau_0 (1 - P_r Z_r) \quad (4)$$

と表わすことができる。ここで、 P_r は $Z_{eff}=0$ から $Z_{eff}=Z_r$ までの平均イオン化率、 W_0 は入射レーザーパルスのエネルギーである。モデルAおよびBに対し $W_r = I_r \tau_0$, $W_r = I_r \tau_r$ であるから、 $Z_{eff}=Z_r$ においてモデルAに対するピークラビ周波数とモデルBに対するパルス幅は、それぞれ次のように表わされる。

$$\Omega_r = \Omega_0 (1 - P_r Z_r)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_r = \tau_0 (1 - P_r Z_r) \quad (6)$$

式(5)、(6)およびFig.4を用い、それぞれのモデルに対して計算した、レーザーパルスのピーク強度(a)、パルス幅(b)、パルスエネルギー(c)、ならびにイオン化率(d)の伝播距離依存性をFig.6に示す。図にはシミュレーション結果もあわせて示した。シミュレーションによれば、ピーク強度は伝

Fig.6 Laser intensity, pulse width, energies, and photoionization rate by two models and simulation are compared as a function of normalized propagation distance.

播初期にはほとんど減少せず、モデルBがその特性を比較的よく再現しているものの、伝播距離の増大とともに急速に減少し、モデルAに近づく。パルス幅に関しては、 $Z_{eff} = 0.5$ までの範囲ではモデルBがシミュレーション結果をよく再現しているといえる。ピーク強度やパルス幅の伝播距離依存性はモデルに依存し、また、シミュレーション結果と必ずしも一致していないが、レーザーエネルギーの変化は両モデルともシミュレーション結果をよく再現している。

イオン化率に関しては、 $Z_{eff} = 0.9$ までの範囲では、モデルAにより導出された結果がシミュレーションよりやや小さく、逆にモデルBによる結果はシミュレーションよりやや大きくなる。各伝播距離におけるレーザーパルスエネルギーの差は、Fig.6 (c)に見られるように、これら3つの場合でごくわずかであるが、パルス幅の違いがイオン化率の差となってあらわれているものと考えられる。 $Z_{eff} > 1.0$ では両モデルともシミュレーション結果より大きなイオン化率を与えている。

パルスエネルギーの異なる4つの場合について、イオン化率のパルス幅依存性をFig.7に示す。図中、●, ■, ◆, ×はパルス幅がそれぞれ25ns, 18.75ns, 12.5ns, 8.45nsでピーク周波数が1GHzとなるレーザーパルスに対するイオン化率で、各曲線○, □, ◇, ×はそれぞれ、●, ■, ◆, ×と同じエネルギーを持ちつつパルス幅が異なるレーザーパルスに対するイオン化率を示す。この条件内では、同じエネルギーのレーザーパルスに対し、パルス幅の短いレーザーほどイオン化率が高くなる。また、レーザーエネルギーが充分大きい場合にはイオン化率の違いはそれほど大きくないが、エネルギーの減少とともにパルス幅がイオン化率に与える影響が顕著になることがわかる。

Fig.6から明らかなように、シミュレーションによるパルス幅はモデルAとモデルBの間にあり、これが3つの場合のイオン化率の違いの原因である。モデルAとモデルBから得られるイオン化率の平均値を用いて、イオン化率の伝播距離依存性を評価した結果をシミュレーション結果とともにFig.8にまとめた。図中(a) (b) (c)は $\Omega_0 = 1\text{GHz}$ で、 $\tau_0 = 12.5, 18.75, 25\text{ns}$ の場合である。(d)は(a)と同じエネルギーながら $\Omega_0 = 0.5\text{GHz}$, $\tau_0 = 50\text{ns}$ の場合である。モデルによる解析値を(■)で、シミュレーション結果を(□)で示している。図から解るとおり、両モデルによるイオン化率の平均

Fig.7 Dependence of photoionization rate on pulse width for different laser energies.

Fig.8 Photoionization rates estimated by the simple model are compared with those by simulations. In Z_{eff} , both are in good agreements.

値を用いることにより、レーザーパルスエネルギーや強度が異なる場合も含め、モデルによる解析値は $Z_{eff} = 0.9$ までの範囲でシミュレーション結果とよく一致した。

4. 簡易モデルの有効範囲

Fig.8に示したすべての場合について、簡易モデルを用いて求めたイオン化率は伝播距離の増大につれてシミュレーションで得られるイオン化率より大きくなる傾向が見られる。Fig.9に、簡易モデルとシミュレーションによるイオン化率の差を伝播距離の関数として示した。図の縦軸はモデルとシミュレーションのイオン化率の差をシミュレーションによるイオン化率で規格化したもので、値が正の場合モデルによる計算結果の方がイオン化率を過大評価していることを示す。図中○印はピーク周波数1GHz・パルス幅12.5nsの場合、□印は1GHz・18.75nsの場合、◇印は1GHz・25nsの場合である。いずれの場合にお

Fig.9 Normalized differences of photoionization rate between model and simulation.

いても約 $Z_{\text{eff}}=0.9$ までの伝播距離では誤差は10%以内におさまっているが、伝播距離が約 $Z_{\text{eff}}=0.9$ をこえると誤差は急激に増大する。

簡易モデルでは、入射レーザーパルスのエネルギーの内、標的原子のイオン化に費やされたエネルギー分を差し引いた残りのエネルギー全体が、その距離におけるイオン化に寄与するものと考えている。しかしながら、実際には、Fig.2に示した中間励起段レーザーBの波形の変化から明らかなように、選択励起段と中間励起段の励起時間遅れのため、レーザーBの立ち上がり部では標的原子のイオン化に寄与できないエネルギーが残される。有効利用できないレーザーエネルギーの割合は伝播距離とともに増大する。レーザーAのパルス中に占める未利用エネルギーの割合が伝播に伴いどのように変化するかをFig.10に示す。図から明らかなように、伝播初期(<0.3)では未利用部分は全エネルギーの10%以下なのに対し、伝播後期(>1.0)では100%にも達する。簡易モデルではこの分だけレーザーエネルギーを大きく評価しており、これが大きなイオン化率を与える原因となっている。

簡易モデルとシミュレーションによるイオン化率の差が10%以内の範囲を簡易モデルの有効範囲と考えるならば、提案した簡易モデルを適用できる規格化伝播距離は0から約0.9までといえる。Fig.8を用いてイオン化率に換算すると $\tau=18.75\text{ns}$ の場合 $P_{\text{ion}}=100$ から67%、 $\tau=25\text{ns}$ の場合で $P_{\text{ion}}=100$ から58%とパルス幅が大きいほど簡易モデルを適用できるイオン化率の範囲が拡大する。

Fig.10 The dependence of non-effective energy on propagation distance.

5. 結 論

共鳴媒質中におけるイオン化率の伝播距離依存性を簡易に評価できるモデルを提案し、その有効性を検討した。提案したモデルによる解析結果は、イオン化率が100から約70%に低下する伝播距離まで、誤差10%以内で、シミュレーション結果をよく再現できることを示した。この簡易モデルによるイオン化率の評価法をAVLISプラントの設計に用いれば、長時間のシミュレーション解析が不要となり、設計時間の大幅な短縮が期待できるものと考えられる。

謝 辞

本論文のシミュレーション計算にあたっては、大阪大学サイバーメディアセンターの計算機を利用した。

参考文献

- 1) Y.-W. Chen, H. Niki, S. Adachi, Y. Izawa, S. Nakai, and C. Yamanaka: J. Opt. Soc. Am. **B 11** (1994) 1585.
- 2) K. Nomaru, Y. Izawa, and Y.-W. Chen: J. Nucl. Sci. Technol. **34** (1997) 1147.
- 3) K. Nomaru and Y. Izawa: Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) 2386.
- 4) Y. Takizawa, R. Murakami, K. Nagasaka, K. Nomaru, and Y. Izawa: Proc. SPIE AHPLA'99 **3886** (1999) p.704.
- 5) 滝沢 靖史, 井澤 靖和: レーザー研究 **29** (2001) 669.