

文章编号: 1007-6654(2011)03-0242-06 (2)

## 两类介质对单色激光的吸收系数的测量与比较

韩亚帅<sup>1,2</sup>, 刘岩<sup>2</sup>, 何军<sup>1</sup>, 王军民<sup>1†</sup>

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006; 2. 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 实验测量并比较了铯原子气室和吸收型中性衰减片对852.356 nm 单色激光的吸收系数, 以及两种介质吸收系数随入射光强变化的行为。对选择吸收和普遍吸收作了分析。采用单色光场与二能级原子系统相互作用的模型, 就铯原子气室对852.356 nm 共振光的吸收系数随入射光强的变化规律做了分析和拟合。

**关键词:** 吸收系数; 选择吸收; 普遍吸收; 铯原子气室; 吸收型中性衰减片

中图分类号: O431

文献标识码: A

### 0 引言

介质对光的吸收表现为光强随穿入介质的深度而减弱。介质对光的吸收应区分真正吸收和散射两种情形, 前者是光能被介质吸收后转化为热, 后者则是光被介质中的原子、分子、离子或其他散射中心先吸收然后散射到四面八方。描述物

质对光吸收强弱的物理量为吸收系数  $\alpha$ , 布格尔-朗伯定律总结了均匀介质对光的吸收规律, 即  $I = I_0 \cdot \exp(-\alpha\ell)$ <sup>[1]</sup>, 其中  $I_0$  为入射光强,  $I$  为出射光强,  $\ell$  为介质的长度。对于选择性吸收和普遍吸收, 介质的吸收系数  $\alpha$  随入射光强变化的行为完全不同。

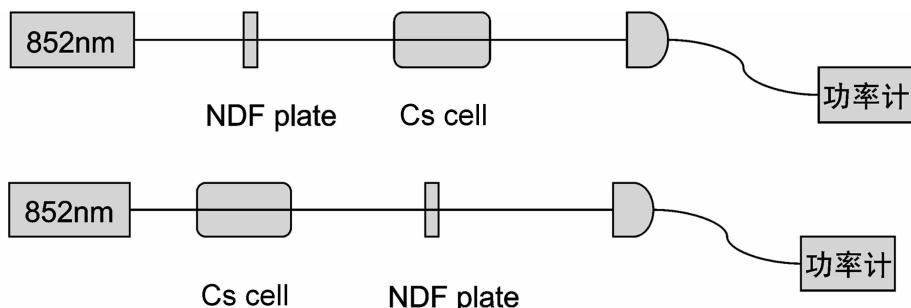


图 1 交换铯原子气室(Cs cell)与吸收型中性衰减片(NDF plate)的顺序, 测量与铯原子  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ ) -  $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ ) 共振的852.356 nm 单色激光的透射功率的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental schematic diagram for measurement of the transmission power of a monochrome 852.356 nm laser tuned to cesium  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ ) -  $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ ) transition for two cases: 1) first passing through a NDF (neutral density filter) plate then a cesium cell; 2) first passing through the cesium cell then the NDF plate.

(2) 收稿日期: 2011-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61078051, 60978017); 国家自然科学基金资助的山西大学国家理科基础科学研究与教学人才(物理学)培养基地本科生科研训练项目(J0730317)

作者简介: 韩亚帅(1988-), 男, 山西古县人, 山西大学国家理科基础科学研究与教学人才(物理学)培养基地本科生, 研究领域: 高分辨光谱。

† 通讯作者: E-mail: wwwjjmm@sxu.edu.cn

我们分析如图1上方所示的实验：激光器输出的852.356 nm 单色激光共振于铯原子  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ )跃迁线，激光先通过透射率为  $T$  的吸收型中性衰减片，再通过铯原子气室，在铯气室后用激光功率计测量透射的激光功率；调换吸收型中性衰减片和铯气室的位置，如图1下方所示，同样用激光功率计测量透射的激光功率。两次测量的结果肯定是不同的，说明这两种介质对852.356 nm 单色激光的吸收特性不同。吸收型中性衰减片在一定的光强范围内，不同波长通过之后几乎按同一比例衰减，对激光是线性吸收，而铯气室对不同的852.356 nm 激光入射功率呈现出不同的吸收特性。

本文介绍我们采用 852 nm 分布反馈式 (DFB) 半导体激光器输出的 852.356 nm 单色激光分别入射到铯原子气室和吸收型中性衰减片两种不同介质，测量它们的吸收系数  $\alpha$  以及吸收系数随入射光强变化的不同行为，并对其作了分析比较和拟合。

## 1 原理概述

测量铯原子气室和吸收型中性衰减片的吸收系数，依据的是布格尔—朗伯定律<sup>[1]</sup>：

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha\ell) \quad (1)$$

考虑到激光通过这两种介质前后的光斑大小基本不变，对(1)式左右同乘以光斑的面积可得：

$$P = P_0 \cdot \exp(-\alpha\ell) \quad (2)$$

对上式而言， $P_0$  是入射功率， $P$  是出射功率， $\ell$  是介质的长度。可根据(2)式求得吸收系数  $\alpha$ ：

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (3)$$

对于吸收型中性衰减片而言，可以直接根据实验测得的入射功率  $P_0$  和出射功率  $P$  带入(3)式求出其吸收系数  $\alpha$ 。而对于铯原子气室而言，入射到铯气室上的激光除被铯原子吸收外，还有玻璃泡壁的吸收、反射和散射，因此计算铯气室的吸收系数时必须要扣除掉这些因素。我们可以先使激光大失谐于铯原子的  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ )跃迁线，此时光强的减弱是由玻璃泡壁吸收、反射和散射造成的，可直接测出铯气室玻璃泡壁对激光的损耗  $P_{loss}$ 。然后再使激光与铯原子  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ ) 跃迁线共

振，测量入射到铯气室的功率  $P_{in}$  和透射功率  $P_t$ 。玻璃泡前后壁对光强的损耗基本相等，那么实际上入射到铯原子气室上的功率  $P_0 = P_{in} - P_{loss}/2$ ，透射功率  $P = P_t + P_{loss}/2$ ，则铯原子气室的吸收系数可根据下式求得。

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \cdot \ln\left(\frac{P_{in} - P_{loss}/2}{P_t + P_{loss}/2}\right) \quad (4)$$

在实验中，在不同的入射激光功率下可测得两种介质对激光的吸收系数随输入功率的变化。近似地，我们可以采用单色光场与二能级原子系统相互作用的模型来拟合实验曲线：将铯气室中的铯原子近似看作二能级原子，将激光看作理想的单色光，且认为单色激光共振于二能级原子。铯原子吸收852.356 nm 共振光从基态  $6S_{1/2}$  被激发到  $6P_{3/2}$ ，然后原子自发辐射跃迁回基态，向空间  $4\pi$  立体角内辐射出荧光光子。每个原子单位时间内吸收的光子数  $\Gamma_s$  可表示为<sup>[2,3]</sup>：

$$\Gamma_{sc} = \frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{I/I_s}{1 + I/I_s + 4\Delta^2/\Gamma^2} \quad (5)$$

式中  $\Gamma$  为原子跃迁线的自发辐射衰减率， $I_s$  为原子跃迁线的饱和光强， $\Delta$  为激光频率相对于原子跃迁线的失谐量(角频率)。

设铯气室中在激光束的体积内铯原子数目为  $N$ ，铯原子所吸收的功率  $P_{abs}$  为：

$$P_{abs} = N \cdot \hbar\omega \cdot \Gamma_{sc} \quad (6)$$

其中  $\omega$  为激光的角频率。而  $P_{abs} = P_{in} - P_t - P_{loss}$  可由实验测得。

在激光共振情形下 ( $\Delta = 0$ )，用  $A$  表示激光束在铯气室内的横截面积，则联立(4)(5)(6)就可以得到在入射激光功率为  $P_{in}$  时对应的铯原子气室的吸收系数  $\alpha$ ：

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{N \cdot \hbar\omega \cdot \Gamma/2}{I_s \cdot A + P_{in} - P_{loss}/2}} \quad (7)$$

我们可以用(7)式对实验测得的吸收系数  $\alpha$  随实际输入激光功率的变化曲线作拟合，可以得到其中的参数  $N$  和  $A$ ，从而可以反解出激光光斑的面积和铯气室中铯原子数密度。

铯气室内的铯原子蒸气可以近似看作理想气体，根据理想气体的状态方程<sup>[4]</sup>：

$$P \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T \quad (8)$$

可以得出铯气室中的铯原子数密度  $n$ ：

$$n = \frac{P \cdot N_A}{R \cdot T} \quad (9)$$

其中  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,  $R$  为普适气体常量。根据铯原子蒸气的温度及对应的饱和蒸气压, 可以从理论上求得铯气室中铯原子数密度, 并可与实验拟合的数值作比较。

## 2 实验装置及实验步骤

我们测量铯原子气室吸收系数的实验装置示意图如图(2)所示, 实验中使用输出功率 50 mW 线宽约 2 MHz 的 852 nm 分布反馈式(DFB)半导体激光器, 采用 ThorLabs 公司生产的 LDC-205C 型恒流源驱动, 采用 ThorLabs 公司生产的 TED-200C 型控温仪精密控制半导体激光器的温

度。调节激光器的注入电流和温度, 当用红外线测仪观察铯气室时可看到荧光亮线, 并且亮度最强时, 激光与铯原子共振, 此时激光波长为 852.356 nm。虽然我们的 DFB 半导体激光器并未锁定在铯原子的  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $F_e=5$ ) 跃迁线, 但从图(3)可以看出此跃迁线处于铯原子吸收线的最底部, 对应着荧光最强的位置, 而且 DFB 半导体激光器在自由运转的情况下一分钟之内频率漂移小于 10 MHz, 此时激光可近似看作与铯原子的  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $F_e=5$ ) 跃迁线共振。此时控温仪热敏电阻示数为 4.964 kΩ (对应温度约为 41.6 °C), 注入电流为 120.35 mA。

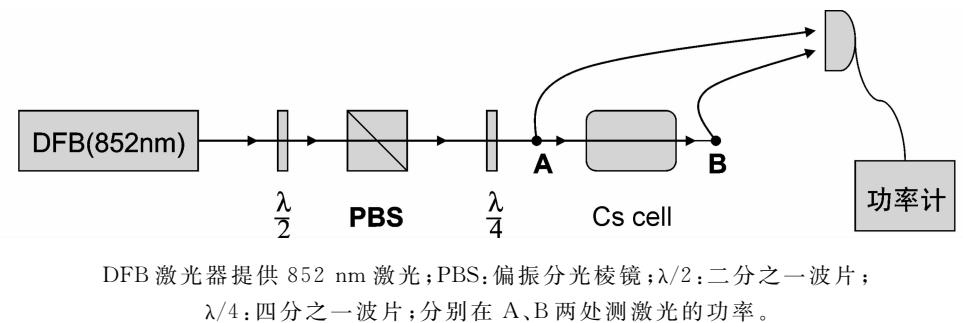


图 2 实验装置图

An DFB diode laser provides the 852 nm laser beam; PBS: polarizing beam splitter cube;  $\lambda/2$ : half-wave plate;  $\lambda/4$ : quarter-wave plate; We measure the power of the laser beam at point A and B, respectively.

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

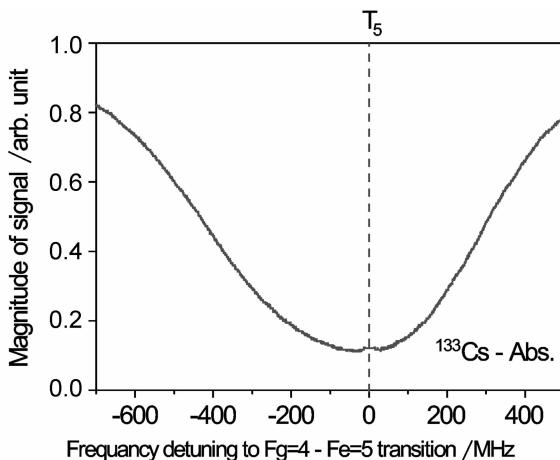
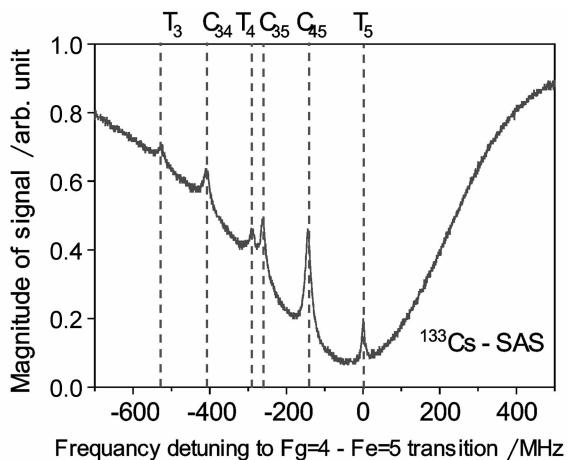


图 3 铯原子  $6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $F_e=3, 4, 5$ ) 的吸收谱和饱和吸收谱

Fig. 3 The absorption spectra and the saturated absorption spectra of cesium

$6S_{1/2}$  ( $F_g=4$ )— $6P_{3/2}$  ( $F_e=3, 4, 5$ ) transitions

如图 2 所示, 为了调节  $\lambda/4$  波片光轴角度使入射到铯气室的光束为圆偏振, 我们在  $\lambda/4$  波片



后加上全反镜, 激光前后两次经过  $\lambda/4$  波片, 相当于经过一个  $\lambda/2$  波片, 我们用功率计监测反射回

来的光通过 PBS 后 s 光的功率, 调节  $\lambda/4$  波片, 当功率计示数最大时, 线偏振光的偏振方向和  $\lambda/4$  片的光轴方向成  $45^\circ$ , 即出射的为圆偏振光。然后撤掉全反镜和功率计, 将激光器的注入电流调为 110 mA, 此时激光频率大失谐与铯原子, 将功率计放到铯气室前后测量入射功率  $P_{in}$  和出射功率  $P_t$ , 通过调节  $\lambda/2$  波片光轴的角度改变入射到铯泡的功率, 每组数据测多次求均值, 我们可以得到输出功率  $P_t$  随输入功率  $P_{in}$  的变化曲线。测完后再将激光器的注入电流调回到 120.35 mA, 此时光与原子共振, 用同样方法测出输入  $P_{in}$  和输出  $P_t$ , 将得到的  $P_{in}$ 、 $P_t$  以及  $P_{loss}$  带入(4)式可以得到吸收系数  $\alpha$ , 从而可以得到吸收系数  $\alpha$  随输入功率  $P_{in}$  变化的曲线。将图(2)中的铯气室换成吸收型中性衰减片, 用同样方法得到衰减片的吸收系数  $\alpha$  随输入功率  $P_{in}$  变化的曲线。

### 3 实验结果

我们测得铯原子气室的输入窗及输出窗对激光的损耗  $P_{loss} = 0.17486 P_{in}$  (参见图 4), 而根据理论上每层玻璃泡壁约 4% 的反射, 可以求出理想状态下玻璃泡壁对激光损耗  $P_{loss} = [1 - (1 - 4\%)^4] P_{in} = 0.1506 P_{in}$ , 比较两值可以看出铯原子气室的输入窗及输出窗内壁吸附的铯原子对激光的散射损耗很小, 不会对实验造成很大误差; 对图(5)而言, 这里的吸收系数是在对输入激光功率和输出激光功率各自扣除铯原子气室未镀消反射膜的输入和输出光学窗对激光的反射损耗后得到的, 所以这里的横轴  $P_{in} - P_{loss}/2$  实际就是输入激光功率扣除铯原子气室未镀消反射膜的输入光学窗对激光的反射损耗后得到的真正入射进入铯原子蒸气的激光功率。

将  $\hbar = h/2\pi = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 真空中的光速  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 激光的真空波长  $\lambda = 852.356 \text{ nm}$ , 激光角频率  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , 实验中使用的铯原子气室扣除输入窗和输出窗厚度之后的激光束所经过的铯原子蒸气的长度  $\ell = 4.8 \text{ cm}$ , 铯原子  $6S_{1/2}$  ( $Fg=4$ ) -  $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ ) 超

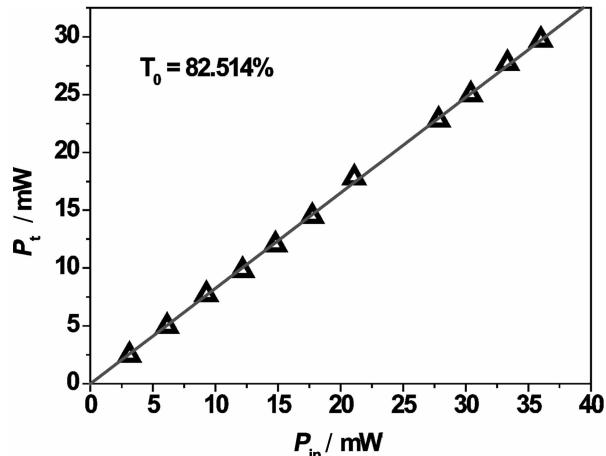


图 4 激光频率大失谐与铯原子时铯气室的输出功率  $P_t$  随输入功率  $P_{in}$  的变化曲线

Fig. 4 The curve of output power  $P_t$  of the cesium cell with the variation of the input power  $P_{in}$  when the laser frequency is large detuning with cesium atoms.

精细跃迁的自发辐射衰减率  $\Gamma = 2\pi \times 5.22 \text{ MHz}$  [5], 对应于  $\sigma^+$  或  $\sigma^-$  圆偏振光时铯原子  $6S_{1/2}$  ( $Fg=4$ ) -  $6P_{3/2}$  ( $Fe=5$ ) 超精细跃迁的饱和光强  $I_s = 1.12 \text{ mW/cm}^2$  [5], 以及由图(4)得到的结果代入(7)式, 我们对图中的实验数据点做两参数拟合。拟合的曲线如图(5)的实线所示, 得到参数  $N = 1.05 \times 10^9 \text{ atoms}$  及  $A = 0.61 \text{ mm}^2$  (光斑半径为 0.44 mm), 从而可得到铯气室中铯原子的数密度约为  $3.6 \times 10^{10} \text{ atoms/cm}^3$ 。根据(9)式, 其中  $T = 298.15 \text{ K}$  为室温( $25^\circ\text{C}$ ), 阿伏伽德罗常数  $N_A = 6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$ , 普适气体常量  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 对应的铯原子饱和蒸气压  $P = 1.5 \times 10^{10} \text{ Torr}$  [3], 可求出理论上的铯气室中铯原子的数密度约为  $4.8 \times 10^{10} \text{ atoms/cm}^3$ 。比较两数值可以看出: 实验上得到的铯原子数密度与理论上的数值在量级上基本符合(主要是温度值的差别引起的不同)。从图上可以看到随着输入功率的增加, 铯气室的吸收系数逐渐减小; 图(6)(b)的数据点拟合后是一条近似与横轴平行的直线, 即吸收型中性衰减片的吸收系数不随输入功率变化而变化。

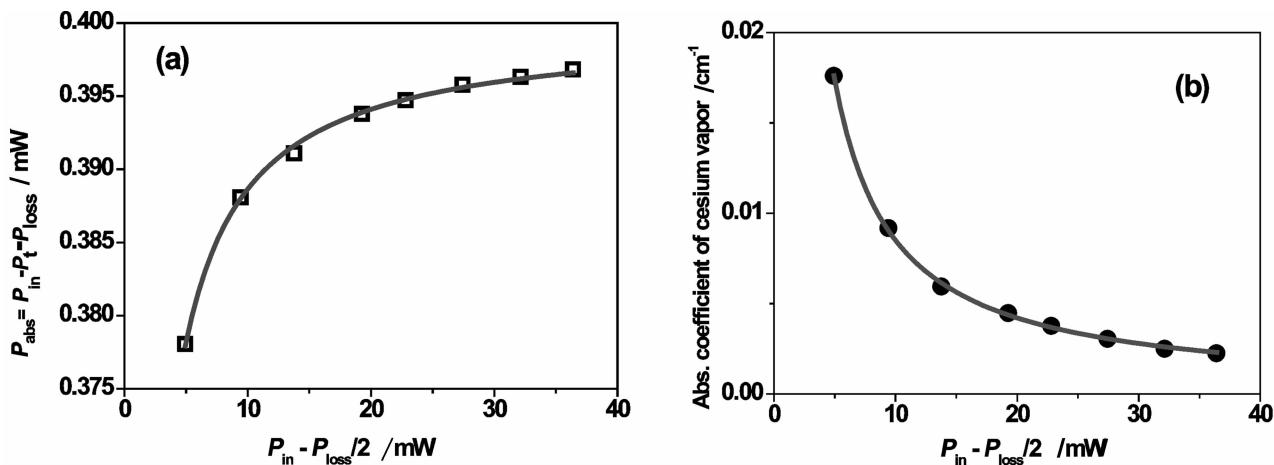


图 5 (a) 铯气室吸收功率  $P_{abs}$  随实际输入功率  $P_{in}-P_{loss}/2$  变化曲线;(b)激光铯原子共振时铯气室的吸收系数  $\alpha$  随实际输入功率  $P_{in}-P_{loss}/2$  的变化曲线。

Fig. 5 (a) The curve of the absorption power of the cesium (Cs) cell with the variation of the input power. (b) the curve of the absorption coefficient of the cesium (Cs) cell with the variation of the input power when the laser is resonated to the cesium atoms.

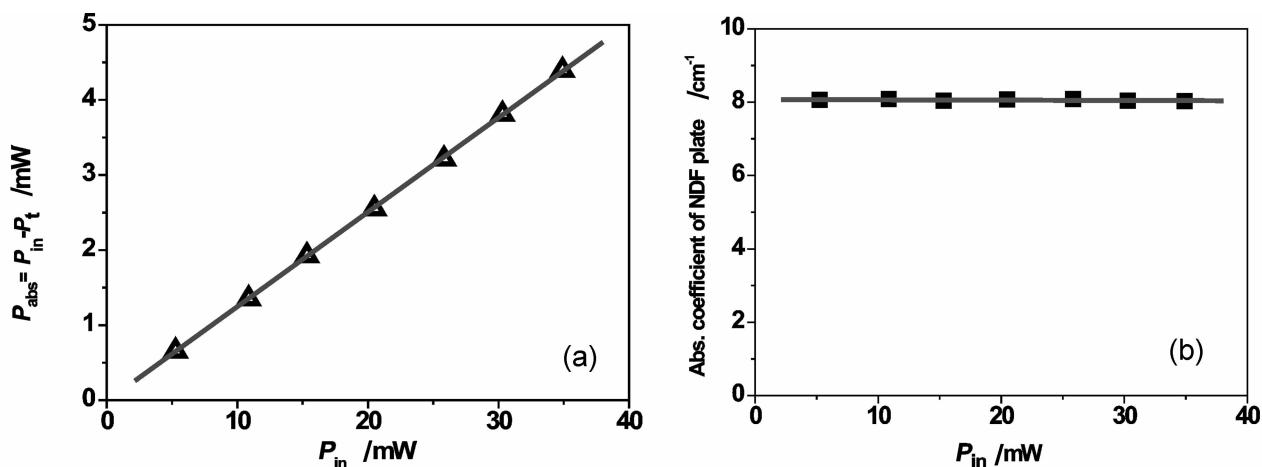


图 6 (a) 吸收型中性衰减片吸收功率  $P_{abs}$  随输入功率  $P_{in}$  变化曲线;(b)衰减片的吸收系数  $\alpha$  随输入功率  $P_{in}$  的变化曲线。

Fig. 6 (a) The curve of the absorption power of the NDF plate with the variation of the input power; (b) The curve of the absorption coefficient of the NDF plate with the variation of the input power.

#### 4 结论

从实验可以看出,铯原子对852.356 nm 单色激光的吸收是非线性的选择性吸收,它对激光的吸收机制可以用单色光场与二能级原子系统相互作用的模型来解释,铯原子吸收852.356 nm 激光从基态  $6S_{1/2}$  被激发到  $6P_{3/2}$ ,短时间内原子又经自发辐射跃迁回基态,向空间  $4\pi$  立体角内辐射出荧光光子。而吸收型中性衰减片对较大光强范围内的 852 nm 激光的吸收则呈线性

吸收,吸收系数不随光强变化,其机制是衰减片吸收激光后转化为介质内原子热振动,与 Cs 原子蒸气的吸收机制完全不同。铯原子蒸气的非线性选择吸收只有在激光与原子共振或近共振时才明显,在其他频率范围内对光几乎不吸收;而吸收型中性衰减片的线性吸收在一定的波长范围内基本相同,因此在一定的波长范围内衰减片对激光的吸收是普遍吸收。

**参考文献：**

- [1] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下册) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 228-229.
- [2] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2009: 4-24.
- [3] FOOT C J. Atomic Physics [M]. Oxford University Press, 2005: 138-144.
- [4] 秦允豪. 热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 31-33.
- [5] STECK D A, Cesium D line data [Z/OL]. <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.4, 23 December 2010).

## Measurement and Comparison of the Absorption Coefficient of Two Different Media for Monochrome Laser

HAN Ya-shuai<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, HE Jun<sup>1</sup>, WANG Jun-min<sup>1</sup>

(1. *The State Key Laboratory of Optics and Quantum Optics Devices, and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;* 2. *College of Physics and Electronical Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

**Abstract:** We measured and compared the absorption coefficient of cesium (Cs) cell and neutral density filter (NDF) plate and the different behavior of the absorption coefficient with the variation of the 852.356 nm light intensity. We analyzed the general absorption and the selective absorption. We analyzed and fit the variation of the absorption coefficient of Cs cell with the variation of the 852.356 nm light intensity using the model of monochrome laser interacting with the two-level atomic system.

**Key words:** absorption coefficient; selective absorption; general absorption; cesium cell; neutral-density-filter plate