

多色相干光学烧孔的动态生成与调控

李东康¹, 刘玉娟², 田杏霞¹, 王涛¹, 付长宝¹

(1. 通化师范学院 物理学院 量子科学计算实验室, 吉林 通化 134002;
2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对四能级 N 型原子系统, 研究了与原子跃迁相关的量子相干烧孔现象。通过密度算符运动方程、拉氏变换法以及量子回归理论, 求得了探测场的吸收谱。采用两束耦合光和一束饱和光同时作用, 随后分别研究了在两束耦合光同时与探测光同向传播, 饱和光与探测光反向传播, 以及耦合光、饱和光、探测光均沿着同一方向传播的两种典型的传播机制和不同参数的调节下相干光学烧孔的形成特点, 最后通过缀饰态理论计算并分析了结果的正确性。最多观测到六个相干光学烧孔。耦合光的拉比频率的大小影响着相干光学烧孔的形成位置, 而饱和光拉比频率的大小将决定着形成相干光学烧孔的深度。该结果完善了相干光学烧孔的理论研究, 对于以后应用到光学量子存储有理论指导意义。

关键词: 量子干涉; 相干光学烧孔; 缀饰态

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1106007

Dynamic generation and manipulation of multi-color coherent hole-burnings

Li Dongkang¹, Liu Yujuan², Tian Xingxia¹, Wang Tao¹, Fu Changbao¹

(1. Laboratory of Quantum Sciences Computing, School of Physis, Tonghua Normal University, Tonghua 134002, China;
2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China)

Abstracts: Coherent hole-burning effect in four-level N-style atoms vapors with level transitions was discussed. The absorption spectrum was in detail studied through density operator motion equations, Laplace transformation and quantum regression theorem. In the model two coupling light and one saturated light were adopted to interact. The features of the optical hole-burning were investigated via various adjusting parameters in two optical routing: one was that the two coupling lights co-propagated with the probe light but the saturated light was opposite, and another was that they all propagated on the same direction. And the calculation results were analyzed with the dressed states theory. At most six coherent hole-burning could be simultaneously observed. The depth of the coherent hole-burning could be changed by adjusting the reference parameters and the Rabi frequency of the saturated laser. The positions of the coherent hole-burning could be changed by modulating the Rabi frequency of the probe light. The understanding of the coherent hole-burning was deepened by these result.

Key words: quantum interference; coherent hole-burning; dressed state

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(11404242)

作者简介: 李东康(1982-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事理论光学方面的研究。Email: 430931@qq.com

通讯作者: 刘玉娟(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光学系统设计与开发方面的研究。Email: xuliuyujuan@163.com

0 引言

所谓原子相干效应是利用相干光场使原子的不同能级之间发生关联,从而使不同通道跃迁之间产生量子干涉现象。1924年,Hanle实验最早观测到了这一现象的实例,之后,在量子光学领域引起了一场新的革命,引发了很多有趣的物理现象,都十分具有研究价值。其中基于电磁感应光透明的单光子巨交叉调制、光学谱烧孔、受激拉曼绝热路径转移都是由于量子干涉现象引起的近些年来人们研究的热点问题^[1-4]。2000年,董坡等人在总结前人经验的基础上,提出了相干光学烧孔概念^[5]。所谓的相干光学烧孔是在原有的产生光学烧孔的能级结构基础上,再加一强相干场,使得能级发生耦合作用,形成Autler-Townser劈裂,此时,激发光通过非均匀加宽的介质时,将原子激发至饱和状态,当另一束探测光通过同一介质时,它的吸收光谱在与激发光频率相应的位置出现下凹,就形成了相干光学烧孔。这种通过相干场控制下形成的相干光学烧孔可以在数量、位置以及深度上都可以得到相应的调整。此后,人们做了大量的研究,并在实验中得到了验证^[6-8],推动了相干光学烧孔技术在光存储、光通信等方面的广泛应用^[9-10]。

文中以铷原子蒸汽为非均匀展宽介质,在一个四能级N模型原子系统中,通过光路的调制,理论计算,最后由数值模拟验证,进一步完善相干光学烧孔现象的理论研究。

1 原子系统模型描述

在如图1所示的原子模型中,一束频率为 ω_p 的弱相干光(探测光)作用于 $|1\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁之上;一束频

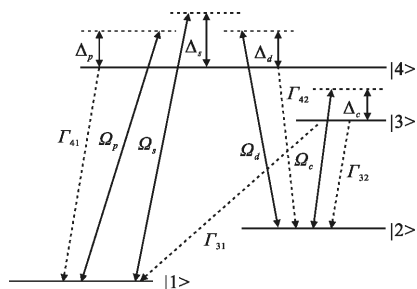


图1 四能级N模型原子系统相干烧孔效应能级图

Fig.1 Four level N-type atomic system for coherent-burning

率为 ω_s 的相干光(饱和光)作用于 $|1\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁之上;一束频率为 ω_c 的强相干光(耦合光)作用于 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 跃迁之上;另一频率为 ω_d 的相干光(耦合光)作用于 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 跃迁之上。 $\Delta_p = \omega_p - \omega_4$ 和 $\Delta_s = \omega_s - \omega_4$ 分别为探测光和饱和光的失谐; $\Delta_c = \omega_c - (\omega_3 - \omega_2)$ 和 $\Delta_d = \omega_d - (\omega_4 - \omega_2)$ 分别为两束耦合光的失谐。

在两束耦合光、一束饱和光和一束探测光的共同作用下的四能级原子系统中,通过密度算符运动方程、拉氏变换法以及量子回归理论,最后考虑原子的多普勒效应得出探测光的总吸收谱为^[8]:

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} A(\Delta_p, \nu) N(\nu) d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} A(\Delta_p, \nu) \frac{N_0}{u\sqrt{\pi}} e^{-\nu^2/u} d\nu \quad (1)$$

式中: N_0 为单位体积内的原子数; u 为最可几速率。

2 数值模拟与定性分析

文中将在所获得探测光的吸收谱方程的基础上,采用两种截然不同的光路安排,通过数值模拟,分析在不同的光路安排下,不同的参数调节下形成的相干光学烧孔。

(1) 耦合光 c 和 d 同时与探测光 p 同向传播,饱和光 s 与探测光 p 反向传播。在这种光路安排下,根据以往的经验,将在探测光的吸收谱中同时观测到一个电磁感应光透明窗口和六个相干光学烧孔。与以往不同的是,笔者将在改变饱和光和耦合光的拉比频率的情况下分析烧孔的形成特点,数值模拟如图2(a)~(d)所示($\gamma_{41}=3$ MHz, $\gamma_{42}=3$ MHz, $\gamma_{43}=3$ MHz, $\gamma_s=0.01$ MHz, $u_p=250$ m/s, $\Delta_s=\Delta_c=\Delta_d=0$, $\lambda_{41}=\lambda_{42}=\lambda_{43}=794$ nm 文中图参数均相同)。图2中四种情况为在保持饱和光拉比频率不变,同时加大两束耦合光的拉比频率。其中饱和光 $\Omega_s=3$ MHz不变,耦合光分别改变为:(a) $\Omega_c=\Omega_d=50$ MHz;(b) $\Omega_c=\Omega_d=80$ MHz;(c) $\Omega_c=\Omega_d=100$ MHz;(d) $\Omega_c=\Omega_d=120$ MHz。可以观察到,随着耦合光拉比频率的增大,所形成烧孔的数量和深度上都基本没有变化,而改变的是烧孔的形成位置,分布在EIT(Electromagnetically Induced Transparency)两侧的烧孔逐渐向远离EIT窗口的方向移动。这一现象说明,耦合光拉比频率的大小对于烧孔的形成位置有直接影响。换言之,在保持两束耦合光拉比频率不变,逐渐加大饱和光拉比频率。其中,(a) $\Omega_s=2$ MHz;(b) $\Omega_s=4$ MHz;(c) $\Omega_s=6$ MHz;(d) $\Omega_s=8$ MHz; $\Omega_c=\Omega_d=80$ MHz。数值模拟如图3所示。可以看到,烧孔

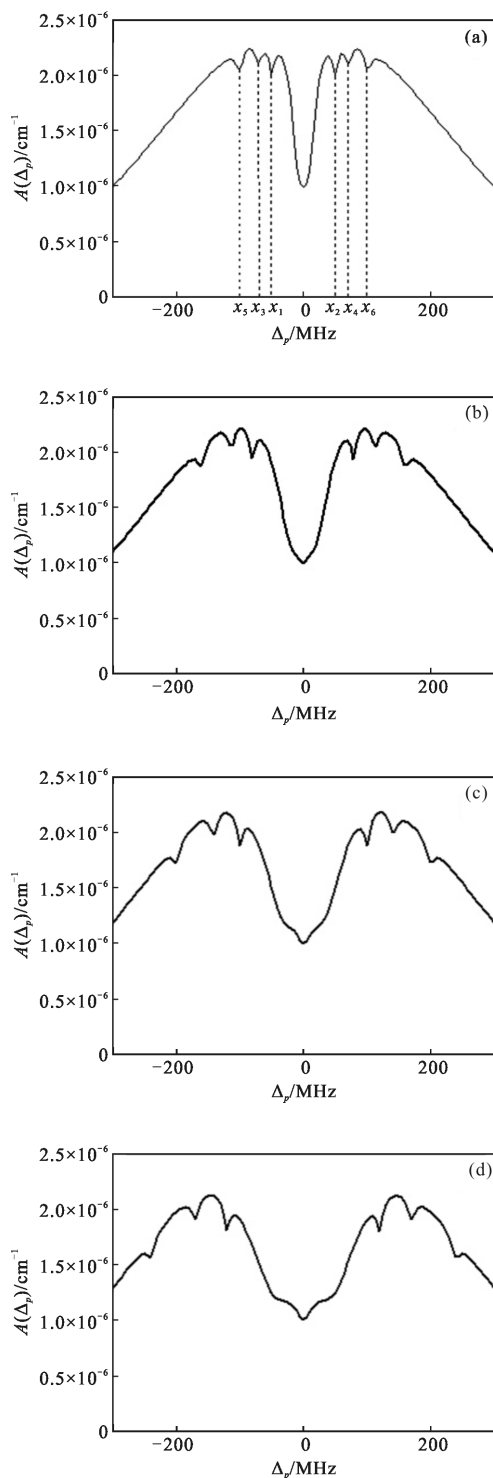


图 2 探测光吸收光谱

Fig.2 Absorption spectra for the probe light

的形成个数仍然没有变化,这是因为,虽然改变了饱和光的拉比频率,但是原子的模型系统没有改变,所加的光场没有改变,且形成的烧孔没有叠加。但是随着饱和光拉比频率的逐渐加大,无论是 EIT 还是相

干光学烧孔都逐渐加深,这说明饱和光拉比频率的大小直接影响烧孔形成的深度。从图中还可以看到,由图 3(a)~(d)的变化过程中,整个吸收谱的幅度也在慢慢降低,这无疑对光的传输情况更有利。

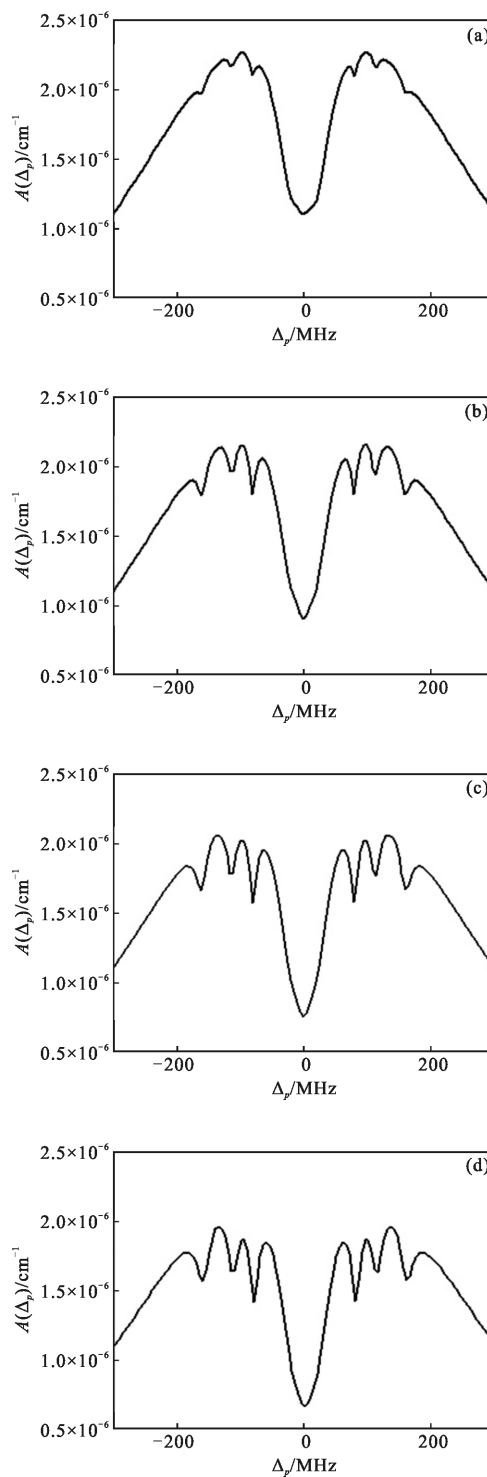


图 3 探测光吸收光谱

Fig.3 Absorption spectra for the probe light

(2) 耦合光 c 、 d , 饱和光 s , 探测光 p 均沿着同一方向传播。这样的传播机制下, 耦合光和探测光处于相消多普勒状态, 所以会有电磁感应光透明现象产生, 如图 4 所示。在图中探测光的吸收谱线上, 在 $\Delta_p=0$ MHz 处, 出现深而窄的下凹, 即 EIT 窗口; 同时, 在两侧还对称分布两个相对较浅的下凹。由于在原子系统中还加入了饱和光的作用, 且此时强相干场的作用不足以使得其完全抑制饱和光的吸收作用, 因此, 两侧的下凹是形成的相干光学烧孔。这里, 可以采用缀饰态的理论计算形成烧孔的位置来验证分析的结论。其中: $\Delta_s=\Delta_c=\Delta_d=\Delta=0$, $\Omega_c=\Omega_d=60$ MHz, $\Omega_s=3$ MHz。根据光路设计列出方程组^[8]:

$$\Delta_s + \frac{v}{c} \omega_{41} = \frac{\left(\Delta + \frac{v}{c} \omega_{42}\right) \pm \sqrt{\left(\Delta + \frac{v}{c} \omega_{42}\right)^2 + 4(\Omega_c^2 + \Omega_d^2)}}{2}$$

$$\Delta_s + \frac{v}{c} \omega_{41} = 0 \quad (2)$$

由上述方程组中解除速度 v , 代入下列方程组中:

$$\Delta_p + \frac{v'}{c} \omega_{41} = \frac{\left(\Delta + \frac{v'}{c} \omega_{42}\right) \pm \sqrt{\left(\Delta + \frac{v'}{c} \omega_{42}\right)^2 + 4(\Omega_c^2 + \Omega_d^2)}}{2}$$

$$\Delta_p + \frac{v'}{c} \omega_{41} = 0 \quad (3)$$

由方程组(3)解得所形成烧孔的位置分别为:

$\Delta_p = \pm \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_d^2}$, $\Delta_p = 0$ MHz。代入两束耦合光拉比频率, 即 $\Delta_p \approx \pm 84.85$ MHz 和 $\Delta_p = 0$ MHz。从计算结果得知, 在这种光路安排下, 应该形成三个相干光学烧孔, 所以, 没有观察到的相干光学烧孔是落入了中间形成的电磁感应光透明窗口中, 即中间深而窄的下凹是由电磁感应光透明和相干光学烧孔共同作用的结果。

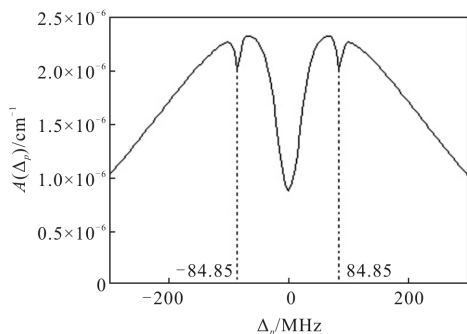


图 4 探测光吸收光谱

Fig.4 Absorption spectra for the probe light

3 结论

综上所述, 通过光路的安排笔者可以在探测光的吸收谱中同时最多观测到六个相干光学烧孔。并且, 通过数值模拟总结出, 耦合光的拉比频率的大小影响着相干光学烧孔的形成位置; 而饱和光拉比频率的大小将决定着形成相干光学烧孔的深度。通过参数调整所形成相干光学烧孔的位置和深度, 无疑对于相干光学烧孔的研究是一项很有价值的工作。最后, 通过缀饰态的计算还可以找到在吸收谱中不能直接观察到的相干光学烧孔, 使得计算过程更有意义。

参考文献:

- [1] Feizpour A, Hallaji M, Dmochowski G, et al. Observation of the nonlinear phase shift due to single post-selected photons [J]. *Nat Phys*, 2015, 6: 2-6.
- [2] Krimer D O, Hartl B, Rotter S. Hybrid quantum systems with collectively coupled spin states: suppression of decoherence through spectral hole burning[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 033601.
- [3] Putz S, Angerer A, Krimer D O, et al. Spectral hole burning and its application in microwave photonics [J]. *Nat Photo*, 2017, 225(11): 36-39.
- [4] Vitanov N V, Rangelov A A, Shore B W, et al. Stimulated Raman adiabatic passage in physics, chemistry, and beyond [J]. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 015006.
- [5] Dong P, Gao J Y. Appearance and disappearance of hole-burning behind an electromagnetically induced transparency window [J]. *Phys Lett A*, 2000, 265(1): 52-57.
- [6] Wei X G, Wu J H, Wang H H, et al. First principles experimental observation of coherent hole burnings in atomic rubidium vapor [J]. *Phys Rev A*, 2006, 74(6): 278-281.
- [7] He Q Y, Zhang B, Wei X G, et al. Slow light by coherent hole burnings[J]. *Phys Rev A*, 2008, 77: 37163832.
- [8] Tian Xingxia, Li Dongkang, Wu Jinhui. Coherent induced hole-burnings in a Doppler broadened four-level atomic system[J]. *Opt Comm*, 2010, 283(12): 2561-2565.
- [9] Brennen G, Giacobino E, Simon C. Focus on quantum memory [J]. *New J Phys*, 2015, 17(5): 050201-050203.
- [10] Pirandola S, Eisert J, Weedbrook C, et al. Advances in quantum teleportation[J]. *Nat Photo*, 2015, 9(10): 641-645.