

透明电介质/金属(铁电)薄膜/受限原子系统的 缀饰选择反射光谱

李莉¹ 赵小侠¹ 李院院^{1*} 张彦鹏²

(¹ 西安文理学院应用物理研究所, 陕西 西安 710065
² 西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 研究了透明电介质/金属(铁电)薄膜/受限原子双界面系统的缀饰选择反射(DSR)光谱。考虑了三种不同的薄膜材料: $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$, Ag 及 Fe。当受限原子蒸气厚度与探测光的波长比 $L/\lambda=0.25, 0.75$ 时 DSR 为典型的对称色散曲线; $L/\lambda=0.9$ 时其对称性减弱, 线型表现为吸收与色散的叠加; 而当 $L/\lambda=1$ 时, DSR 峰几乎消失。当薄膜为 $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$ 时, 随着薄膜厚度的减小, DSR 峰略有下降。当薄膜为金属材料时, DSR 峰随着厚度的减小得到了很大的增强。对于理想的金属 Ag 薄膜, 这种增强最为显著。在强耦合光的作用下, 由于两个缀饰态之间的量子相干效应以及交流斯塔克分裂产生的电磁诱导反射峰具有很高的光谱分辨率(可达约 10MHz)。这种电磁诱导反射峰对应的高分辨率光谱可用于表面薄膜的光学参数测量及集成光学元件的检测等领域。

关键词 光谱学; 缀饰选择反射光谱; 迪克窄化; 电磁诱导反射

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.103001

Dressed Selective Reflection Spectra of a Transparent-Dielectric/Metal (Ferroelectric)-Layer/Confined-Atoms System

Li Li¹ Zhao Xiaoxia¹ Li Yuanyuan¹ Zhang Yanpeng²

(¹ Institute of Applied Physics, Xi'an University of Arts and Science, Xi'an, Shaanxi 710065, China
² Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract Dressed selective reflection (DSR) spectra in a two-interface system of transparent-dielectric/metal (ferroelectric)-layer/confined-atoms are investigated. Three different films of $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$, Ag and Fe are considered in our discussion. Symmetry dispersion DSR lines are shown for $L/\lambda=0.25$ and 0.75 , where L is the thickness of the atomic vapor, and λ the wavelength of the probe field. This symmetry decreases with a combination of absorption and dispersion for $L/\lambda=0.9$, however, DSR lines almost disappear for $L/\lambda=1$. There is a slight decrease of the DSR amplitude when the thickness of $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$ layer decreases. However, the DSR amplitude can be largely enhanced for metal layers, and this enhancement is the most manifest case when an ideal metal Ag layer is used. Electromagnetically induced reflection with high resolution (up to about 10 MHz) can be achieved due to the quantum interference of two dressed states and alternating current (ac) Stark splitting created by a coupling field. This high-resolution electromagnetically induced reflection dip can probably be used in the measurement of the optical parameters of surface layers, as well as the detection of optoelectronic devices in integrated optics.

Key words spectroscopy; dressed selective reflection spectra; Dicke narrowing; electromagnetically induced reflection

OCIS codes 300.6320; 020.3690; 270.1670

1 引言

选择反射(SR)光谱因其高分辨率的特点在探测介质分界面附近的共振媒质,尤其是稠密媒质的特性等

收稿日期: 2013-05-31; 收到修改稿日期: 2013-06-05; 网络出版日期: 2013-08-26

基金项目: 西安市科技计划(CXY1134WL02, CX12189WL02)

作者简介: 李莉(1972—),女,实验师,主要从事高分辨率光谱方面的研究。E-mail: lilinxcn@aliyun.com

* 通信联系人。E-mail: liyynxcn@aliyun.com

方面得到了广泛的应用^[1-10],如 Papageorgiou 等^[1]在高密度 Cs 蒸气中得到了消多普勒增宽的 SR 光谱,并研究了蒸气内部 Kr 与 Cs 原子的碰撞行为;Rabi 等^[2]通过 Cs 原子气体/电介质系统的 SR 光谱,研究了电介质界面对原子的吸附行为;光谱学方法还可用于测量原子与固体表面的范德瓦耳斯作用,而提高这一测量的灵敏度是物理学等领域一直关注的重要问题之一。采用高分辨率的 SR 光谱对原子与固体表面的范德瓦耳斯作用进行测量,可以大大提高其测量的灵敏度^[1,4-5,7]。

具有复折射率的稠密介质与原子蒸气界面处的 SR 表现出吸收及色散叠加的线型^[8]。在低密度近似条件下,这种 SR 信号可用简单的线性光学定律解释,其线型取决于原子蒸气的有效共振极化系数^[4]。由于超薄样品室中的原子与电介质表面碰撞的消激发效应和稀薄蒸气膜中的慢原子效应,以及双光子光谱的消多普勒配置,双光子选择反射(TSR)光谱在很多情形下表现为亚多普勒结构,且随蒸气膜层的厚度与探测光波长的比值周期性变化。在拉曼失谐量为 0 的区间附近,TSR 光谱极高的变化率表明探测光具有显著的群速变慢效应及很高的光谱分辨率,并对应电磁诱导反射的增强与抑制^[8,10]。

以上研究结果主要限于单界面的情形,而双界面缀饰选择反射(DSR)光谱可用于复杂界面及薄膜光学常数等精密测量领域^[11-14],其研究报道较少。本文主要研究样品室电介质内表面镀以金属或铁电材料薄膜时稀薄原子蒸气的 DSR 光谱。与透射及荧光等光谱相比,这种增强的 DSR 光谱具有更高的分辨率,适合测量稠密介质分界面处共振媒质的特性,且可用于集成光学元件的检测^[15]及在实验上实现复杂界面介质光学特性的光谱测量与分析。

2 理 论

如图 1(a)所示,假定原子蒸气薄层囚禁于两透明(无吸收和散射损耗)电介质 1 与 2 之间。电介质 1 及 2 分别位于 $z < -d$ 及 $z > L$ 的区域,其中 1 内表面金属(铁电介质)薄膜的厚度为 d ,电介质 2 内表面涂以消反射层。原子蒸气处于 $0 < z < L$ 的区域。 Λ 型三能级原子的能级位形图如图 1(b)所示, ω_{31} 及 ω_{32} 分别对应于 $|1\rangle - |3\rangle$ 及 $|2\rangle - |3\rangle$ 的跃迁频率。探测光 E_p 和耦合光 E_c 的角频率分别为 ω_p 及 ω_c ,波矢分别为 \mathbf{k}_p 及 \mathbf{k}_c , $\Delta_p = \omega_p - \omega_{31}$ 及 $\Delta_c = \omega_c - \omega_{32}$ 分别为其失谐因子。图 1(c)为原子缀饰态示意图。

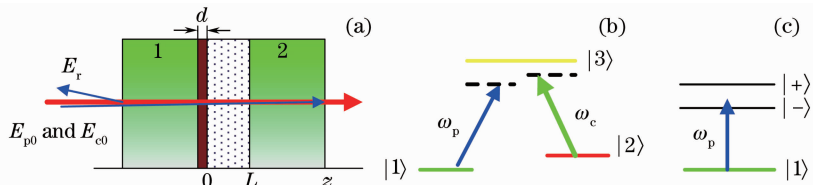


图 1 (a) 双界面受限原子系统; (b) 原子的能级位形图; (c) 原子缀饰态示意图

Fig. 1 (a) Confined atomic system with two interfaces; (b) atomic level structure;

(c) dressed state picture of atomic system

以 E_{p0} 表示入射探测光的场振幅,探测光的反射系数 R 可表示为

$$R = |E_{nr} + E_r|^2 / |E_{p0}|^2, \quad (1)$$

式中 E_{nr} 及 E_r 分别为非共振及共振反射场的振幅,前者来自于金属(铁电)薄膜与蒸气界面的反射,后者来自于蒸气中原子的宏观极化强度产生的辐射反射。

在稀薄原子蒸气中,由于共振反射 $|E_r| \ll |E_{nr}|$, (1) 式可近似为

$$R = |E_{nr}|^2 / |E_{p0}|^2 + 2\text{Re}[|E_{nr} \cdot E_r|] / |E_{p0}|^2, \quad (2)$$

式中第一项为非选择反射系数,第二项为选择反射系数。若以 R_0 及 ΔR 分别表示非选择反射系数及选择反射系数,则(2)式可表示为

$$R = R_0 + \Delta R, \quad (3)$$

式中

$$\Delta R = R_0 \text{Re}[F\chi], \quad (4)$$

这里 $F = \frac{8m_f^2 \exp(\phi)}{(1+n_f)^2(n_f^2-n^2) + 2\exp(\phi)(1-n_f^2)(n^2+n_f^2) + \exp(2\phi)(1-n_f)(n_f^2-n^2)}$, 其中相位因子

$\phi = 2in_f\omega_p d/c$ 。假定电介质1的折射率为实数 n ,其内表面均匀的各向同性薄膜的复折射率为 n_f ,稀薄原子蒸气的复折射率为 $n_v = 1 + \chi/2$ 。原子介质的极化系数 χ 表示为

$$\chi = -\frac{2ik_p}{\epsilon_0 E_p} \int_0^L P(z') \exp(2ik_p z') dz', \quad (5)$$

其中极化强度

$$P(z) = N\mu_{31} \int_{-\infty}^{\infty} dv W(v) \sigma_{31}(z, v), \quad (6)$$

式中 N 为原子密度, μ_{31} 对应 $|1\rangle - |3\rangle$ 的偶极跃迁矩阵元, $W(v)$ 为麦克斯韦-玻尔兹曼速率分布函数

$$W(v) = (u\sqrt{\pi})^{-1} \exp[-(v/u)^2], \quad (7)$$

式中 $u = \sqrt{2k_B T/m}$ 为原子的最可几速率, k_B 为玻尔兹曼常数, m 及 T 分别为原子质量及蒸气的温度。

密度矩阵元 σ_{31} 可通过下列的耦合方程求解:

$$\partial\sigma_{31}/\partial t = -\Lambda_{31}\sigma_{31} + i\Omega_p(\sigma_{11} - \sigma_{33}) + i\Omega_c\sigma_{21}, \quad (8a)$$

$$\partial\sigma_{21}/\partial t = -\Lambda_{21}\sigma_{21} - i\Omega_p\sigma_{23} + i\Omega_c\sigma_{31}, \quad (8b)$$

$$\partial\sigma_{23}/\partial t = -\Lambda_{32}^*\sigma_{23} - i\Omega_p\sigma_{21} - i\Omega_c(\sigma_{22} - \sigma_{33}), \quad (8c)$$

式中 $\Lambda_{21} = \gamma_{21} - i[(\Delta_p - k_p v) - (\Delta_c - k_c v)]$, $\Lambda_{31} = \gamma - i(\Delta_p - k_p v)$ 及 $\Lambda_{32} = \gamma - i(\Delta_c - k_c v)$ 为多普勒失谐,衰变率 $\gamma_{ij} = (\gamma_i + \gamma_j)/2$,其中 γ_i (γ_j)指能级 $|i\rangle$ ($|j\rangle$)($i, j = 1, 2, 3$)的衰变率;拉比频率 Ω_p 及 Ω_c 分别定义为 $\Omega_p = \mu_{31} E_p/\hbar$ 及 $\Omega_c = \mu_{32} E_c/\hbar$,其中 μ_{32} 对应 $|2\rangle - |3\rangle$ 的偶极跃迁矩阵元。

若探测光的强度远小于耦合光的强度,则可忽略(8b)式中的 Ω_p 项,假定初始条件满足 $\sigma_{11}^{(0)} \approx 1$, $\sigma_{11}^{(0)} \approx 1$, $\sigma_{22}^{(0)} = \sigma_{33}^{(0)} = 0$ 及 $\sigma_{31}^{(0)}(t=0) = \sigma_{21}^{(0)}(t=0) = 0$,求解(8)式可得

$$\sigma_{31}^{(0)}(t) = i\Omega_p [D_0 + D_1 \exp(-\lambda_1 t) + D_2 \exp(-\lambda_2 t)], \quad (9)$$

式中 $D_0 = \Lambda_{21}/(\lambda_1 \lambda_2)$, $D_1 = (-\lambda_1 + \Lambda_{21})/[\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_2)]$, $D_2 = -\lambda_2 + \Lambda_{21}/[\lambda_2(-\lambda_1 + \lambda_2)]$,其中 $\lambda_{1,2} = [p_{1,2} - (\Lambda_{21} + \Lambda_{31})]/2$, $p_{1,2} = \pm \sqrt{|q|} \{ \cos[\arg(q)/2] + i \sin[\arg(q)/2] \}$, $q = (\Lambda_{31} - \Lambda_{21})^2 - \Omega_c^2$ 。

原子在经历与电介质(薄膜)内壁的非弹性碰撞后马上回到基态,则对 $v > 0$ 及 $v < 0$ 的情形,(9)式中的 t 可分别表示为 $t = z/v$ 及 $t = (z - L)/v$ 。联立(5)、(6)式并改变 v 与 z 的积分次序后对 z 积分可得^[9]

$$\chi = C \int_{-\infty}^{\infty} H(v) dv W(v) \text{Im}(S_0 + S_1 + S_2), \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} C &= -2iN\mu_{31}^2 k_p / \epsilon_0 \hbar, S_0 = D_0 [\exp(2ik_p L) - 1] / (2k_p), \\ S_{1,2}(v < 0) &= D_{1,2} v \exp(2ik_p L) [1 - \exp(-2ik_p L + \lambda_{1,2} L/v)] / (2k_p v + i\lambda_{1,2}), \\ S_{1,2}(v > 0) &= -D_{1,2} v [1 - \exp(2ik_p L - \lambda_{1,2} L/v)] / (2k_p v + i\lambda_{1,2}). \end{aligned}$$

(10)式中含 $\exp(\pm 2ik_p L)$ 及 $\exp(\pm \lambda_{1,2} L/v)$ 的项表示DSR与膜的厚度有关的调制及衰减,因此光谱线型应随膜的厚度有一定的周期性变化。不含衰减因子的项则反映了原子和光场作用的内部机制。由(4)式可知DSR还受到相位因子 ϕ ,即薄膜折射率 n_f 及厚度 d 的调制。

3 数值结果

选择⁸⁷Rb的D₁线进行数值计算,假定 $\omega_{32} \approx \omega_{31} = 2\pi \times 377.11$ THz,衰变率 $\gamma_{31} = 2\pi \times 4.79$ MHz, $\gamma_{32} = 2\pi \times 2.87$ MHz, $\gamma_{21} = 2\pi \times 10$ kHz。探测光及耦合光分别对应 $|1\rangle(F=1, 5^2S_{1/2}) - |3\rangle(F=2, 5^2P_{1/2})$ 及 $|2\rangle(F=2, 5^2S_{1/2}) - |3\rangle(F=2, 5^2P_{1/2})$ 的跃迁。考虑耦合光的缀饰效应,可取其拉比频率为 $\Omega_c = 0.3\gamma$ 。这里仅讨论耦合光失谐因子 $\Delta_c = 0$,即耦合光精确调谐时的情形。对一个典型的稀薄原子蒸气系统,可选电介质的折射率 $n = 1.82$,原子密度 $N = 6 \times 10^{12}$ cm⁻³,原子的平均速率 $u = 274$ m/s。

图2(a)、(b)、(c)分别考虑了厚度为 $d = \lambda/10$ 的三种不同的薄膜材料:KTa_{0.65}Nb_{0.35}O₃, Ag及Fe,其典型的折射率分别为 $n_f = 2.325 - i0.002$, $0.1 + i5.85$ 及 $3.69 + i3.94$ 。可以发现 $L/\lambda = 0.75$ 时DSR光谱为典型的对称色散曲线; $L/\lambda = 0.9$ 时其对称性减弱,线型表现为吸收与色散的叠加;而当 $L/\lambda = 1$ 时,DSR几乎

消失。这种变化来自样品室中的原子产生的受激辐射在不同样品室厚度时产生的相干增强或抑制。在许多情形下 DSR 线型具有明显的亚多普勒结构,这种窄化一方面来自于蒸气中的原子与电介质表面碰撞的消激发和稀薄蒸气膜中的慢原子效应(Dicke 窄化),另一方面来自于双光子光谱的消多普勒配置。

从图 2 还可发现,薄膜的折射率对 DSR 线型也具有明显的调制作用。对应理想金属 Ag 薄膜, $L/\lambda = 0.75$ 时线型的对称性减弱,而 $L/\lambda = 0.9$ 时其对称性增强。在强耦合光的作用下,由于两个缀饰态之间的量子相干效应以及交流斯塔克分裂[图 1(c)]产生的电磁诱导反射,在 $\Delta_p = 0$ 的区间附近色散峰具有很高的光谱分辨率(可达约 10 MHz)。

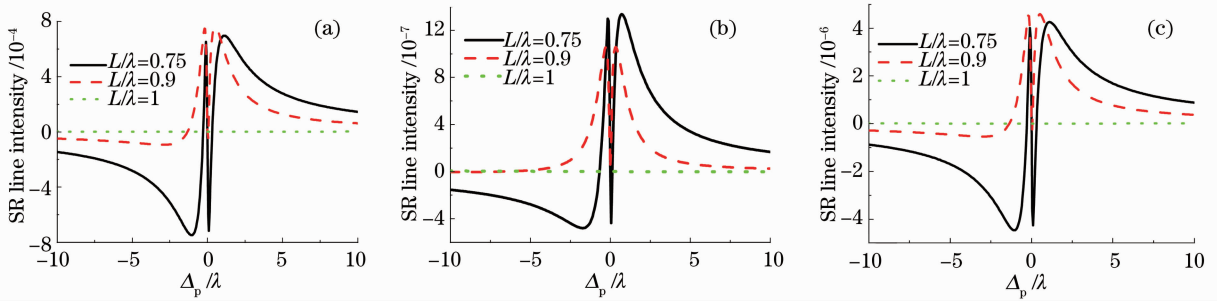


图 2 $d=\lambda/10$ 时不同 L/λ 的 DSR 线型

Fig. 2 DSR line shapes corresponding to different L/λ for $d=\lambda/10$

图 3 给出了薄膜厚度为 $d=\lambda/10, \lambda/20$ 及 $\lambda/40$ 时的 DSR 线型。图 3(a), (b) 对应 $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$ 薄膜, (c), (d) 对应 Ag 薄膜, (e), (f) 对应 Fe 薄膜。图 3(a), (c), (e) 及 (b), (d), (f) 分别对应 $L/\lambda=0.25$ 及 0.9 的情形。由图可知薄膜厚度是调制 DSR 的主要因素之一。当薄膜为 $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$ 时,随着薄膜厚度的减

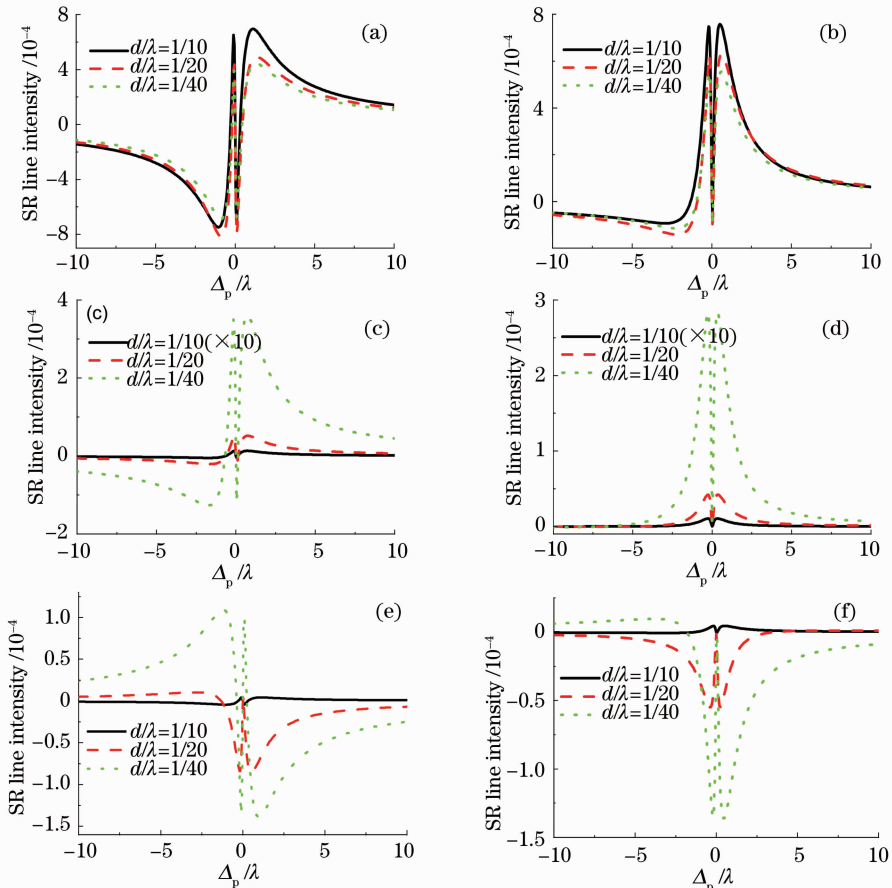


图 3 不同薄膜厚度对应的 DSR 线型

Fig. 3 DSR line shapes corresponding to different thicknesses of the coated layers

小,DSR峰略有下降。当薄膜为Ag及Fe时,DSR峰随着厚度的减小得到了极大的增强。当 $L/\lambda=0.25$ 时,其线型均表现为半抑制半增强的线型。而当 $L/\lambda=0.9$ 时,DSR线型几乎为全抑制或全增强的线型。当薄膜为理想金属Ag时,DSR信号得到了极大的增强。由于厚金属薄膜具有较强的吸收,使得原子蒸气的共振辐射减弱,对于理想金属, F 表现为色散行为, χ 就金属-原子蒸气界面而言则表现为吸收行为。而在双界面系统中,DSR会产生一个相位因子 ϕ ,DSR谱的变化正是这一相位因子调制的结果。当金属薄膜很薄时,相位因子 $\phi \rightarrow 0$,吸收(辐射)分量得到了显著的增加。

在所有谱线中,当耦合光失谐量 $\Delta_c=0$ 时,在 $\Delta_p=0$ 附近出现的电磁诱导反射峰的快速变化表明探测光具有显著的慢群速效应。这种电磁诱导反射峰的另一特点是其具有极高的分辨率。这种高分辨率的光谱可用于表面薄膜的光学参数测量。

4 结 论

研究了透明电介质/金属(铁电)薄膜/原子蒸气双界面系统的DSR特性。对三种不同的薄膜材料 $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$,Ag及Fe,当 $L/\lambda=0.75$ 时DSR光谱为典型的对称色散曲线; $L/\lambda=0.9$ 时其对称性减弱,线型表现为吸收与色散的叠加;而当 $L/\lambda=1$ 时,DSR几乎消失。这种变化来自样品室中的原子产生的受激辐射在不同样品室厚度时产生的相干增强或抑制。薄膜厚度是调制DSR的主要因素之一。当薄膜为 $\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$ 时,随着薄膜厚度的减小,DSR峰略有下降。当薄膜为Ag及Fe时,DSR峰随着厚度的减小得到了极大的增强。当 $L/\lambda=0.25$ 时,其线型均表现为半抑制半增强的线型;而当 $L/\lambda=0.9$ 时,DSR线型几乎为全抑制或全增强的线型。当薄膜为理想金属Ag时,DSR信号得到了极大的增强。在强耦合光的作用下,由于两个缀饰态之间的量子相干效应以及交流斯塔克分裂产生的电磁诱导反射,在 $\Delta_p=0$ 的区间附近色散峰具有很高的光谱分辨率(可达约10 MHz)。这种增强的DSR光谱与透射及荧光等光谱相比具有更高的分辨率,适合测量稠密介质分界面处共振媒质的特性,且可用于集成光学元件的检测及在实验上实现复杂界面介质光学特性的光谱测量与分析。

参 考 文 献

- 1 N Papageorgiou, M Fichet, V Sautenkov, *et al.*. Doppler-free reflection spectroscopy of self-induced and krypton-induced collisional shift and broadening of cesium D_2 line components in optically dense vapor[J]. *Laser Phys*, 1994, 4(2): 392-395.
- 2 O Rabi, A Amy-Klein, S Saltiel, *et al.*. Three-level nonlinear selective reflection at a dielectric/Cs vapor interface[J]. *Europhys Lett*, 1994, 25(8): 579-585.
- 3 T A Vartanyan, D Lin. Enhanced selective reflection from a thin layer of a dilute gaseous medium[J]. *Phys Rev A*, 1995, 51(3): 1959-1964.
- 4 M Chevrollier, M Oria, J de Souza, *et al.*. Selective reflection spectroscopy of a resonant vapor at the interface with a metallic layer[J]. *Phys Rev E*, 2001, 63(4): 046610.
- 5 I Hamdi, P Todorov, A Yarovitski, *et al.*. Laser spectroscopy with nanometric gas cells: distance dependence of atom-surface interaction and collisions under confinement[J]. *Laser Phys*, 2005, 15(7): 987-996.
- 6 Li Yuan-Yuan, Zhou Yu, Zhang Gui-Zhong. Selective reflection combined with Fabry-Perot effects from two-level atoms confined between two dielectric walls[J]. *Chin Phys*, 2006, 15(5): 985-991.
- 7 A Laliotis, I Maurin, M Fichet, *et al.*. Selective reflection spectroscopy at the interface between a calcium fluoride window and Cs vapor[J]. *Appl Phys B*, 2008, 90(3-4): 415-420.
- 8 Li Yuanyuan, Hou Xun, Bai Jintao, *et al.*. Two-photon Dicke-narrowing selective reflection spectroscopy in thin atomic vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1623-1627.
李院院, 侯 洵, 白晋涛, 等. 薄原子蒸气的双光子 Dicke 窄化选择反射光谱[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1623-1627.
- 9 Li Gang, Zhao Jing, Li Jiaying, *et al.*. Visible-infrared reflectance spectroscopy applied in rapid screen of diseases[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0317001.
李 刚, 赵 静, 李家星, 等. 可见-近红外反射光谱用于疾病快速筛查[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0317001.
- 10 Y Li, L Li, Y Lu, *et al.*. Selective reflection of Airy beam at an interface between dielectric and homogeneous atomic medium[J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 8311-8319.
- 11 Yu Kan, Huang Dexiu, Yin Juanjuan, *et al.*. Reflected-intensity distribution of a thin-film filter with oblique incidence of a Gaussian beam under-parallel case[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0807003.
俞 侃, 黄德修, 尹娟娟, 等. 高斯光束斜入射非平行薄膜滤光片的反射光强分布[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0807003.

- 12 Guo Chun, Lin Dawei, Zhang Yundong, *et al.*. Determination of optical constants of LaF_3 films from spectrophotometric measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0731001.
郭春, 林大伟, 张云洞, 等. 光度法确定 LaF_3 薄膜光学常数[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0731001.
- 13 Zhou Jinzhao, Song Yajie, Zeng Xiangyou, *et al.*. Thin film parameters based on polarized light reflected from the multi-point measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1207002.
周进朝, 宋亚杰, 曾宪佑, 等. 基于偏振光反射多点法测量薄膜参数[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1207002.
- 14 Jiang Laixin, Lu Xinmiao, Wang Yang, *et al.*. Optical constants of antimony-bismuth alloy films[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0907001.
姜来新, 逯鑫淼, 王阳, 等. 铋铟合金薄膜的光学常数[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0907001.
- 15 Zhong Zhicheng. Technological Optimization and Study on Nonlinear Optical Properties of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ Thin Film[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
钟志成. 钽铌酸钾薄膜制备工艺优化及非线性光学性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.