

薄膜介质内慢光现象及其理论研究

吕毅¹ 吴九汇¹ 李丽丽²

(¹ 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049
² 西安财经学院信息与教育技术中心, 陕西 西安 710061)

摘要 针对薄膜介质内的慢光现象,研究了它的产生机理及影响因素。由于薄膜介质的厚度很小,因此假设磁场沿厚度方向的分量与厚度无关,从而得到薄膜介质中光传播的色散关系,推导出光在薄膜中传播的群速度表达式。深入分析了光的频率、薄膜介质的折射率以及薄膜介质的厚度对群速度的影响,得到了这些影响因素对光在薄膜介质中群速度的影响曲线。研究表明选取适当的光频率、薄膜折射率和薄膜厚度可以大幅度地降低光在薄膜介质中的传播速度,为薄膜介质中的慢光技术提供了理论依据。

关键词 薄膜;慢光;色散关系;群速度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0831002

Slow Light Phenomenon and Its Theory in Thin Film Media

Lü Yi¹ Wu Jiuhui¹ Li Lili²

(¹ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
² Information and Education Technology Center, Xi'an University of Finance and Economics,
Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract Aiming at slow light phenomenon in the thin film, the mechanism of slow light and its influence factors are investigated. Because the thickness of the thin film is extremely small, an assumption that the component of the magnetic field in the thickness direction is independent of the thickness is proposed. Then the dispersion relation in the thin film media is obtained. The expression of the group velocity of the light in the thin film media is deduced. Then the influences of the frequency of the light, the refractive index of the thin film media and the thickness of the thin film media on the group velocity are analyzed. The influence curves of the group velocity in the thin film media are acquired. The research shows that speed of the light in the thin film media can be greatly reduced by selecting the appropriate influence factors. It provides a theoretical basis for the slow light technology in thin film media.

Key words thin films; slow light; dispersion relation; group velocity

OCIS codes 310.6860; 260.2110; 260.2030

1 引言

超慢光速是指光的群速度远远小于光在真空中的速度 c 。人们研究超慢光速,是因为超慢光速可以应用在例如控制光信号在时间上的延迟、储存光信号的光存储器等方面。而实际的信号往往是由多个频率的光波所组成的波群,因此这里光的速度应

是指其群速度。

近年来,人们对于超慢光速的研究取得了较大的进展^[1]。1999年,Hau等^[2]应用电磁感应透明原理,在超冷钠原子气体中进行实验,首次观察到17 m/s的光脉冲传播速度。2001年,Liu等^[3]指出,应用电磁感应透明可使光脉冲完全停止。同年,

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51075325)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0644)

作者简介: 吕毅(1988—),男,硕士研究生,主要从事薄膜光学方面的研究。E-mail: lvyi.lvyi@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 吴九汇(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光子晶体方面的研究。

E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

Phillips 等^[4]也得到了减速并贮存在铷原子蒸汽中的光脉冲。这些研究主要是基于电磁感应透明现象而进行的。但随后,不同的慢光机理也随之产生。比如掌蕴东等^[5]将氙离子激光束入射到红宝石晶体中,用相干布居振荡效应产生烧孔,然后利用光谱烧孔使介质折射率发生急剧变化,导致光的群速变慢现象;Song 等^[6]研究发现,在光纤中使用受激布里渊散射可使光脉冲延迟;Vlasov 等^[7]在硅芯片上的硅光子晶体波导中实现了光波群速度的有效控制等。现在,越来越多的慢光现象被发现,更多的慢光机理也随之产生。

本文介绍了一种在薄膜介质中的慢光速现象及其理论研究。光在薄膜介质中传播时,根据薄膜介质内控制方程可得到其色散关系,并由色散关系可以得出光在薄膜介质中的群速度表达式。当所得到的群速度小于在真空中的光速时,就会产生慢光现象。且群速度的大小与薄膜介质材料的折射率、厚度以及光频率有关。随后得到了这些影响因素对群速度的影响曲线,并能够得到远小于光速的群速度。

2 薄膜介质内慢光现象的理论模型

图 1 是光波在薄膜介质中传播的示意图。其中厚度为 h 的介质位于真空中,光波在薄膜介质中沿水平方向传播。介质为均匀介质,其折射率恒定。设电场、磁场沿 x, y, z 三个方向上的分量分别为 E_x, E_y, E_z 和 H_x, H_y, H_z 。由于厚度 h 极小,因此可以假

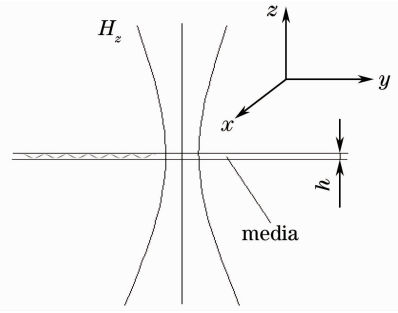


图 1 光波在薄膜介质中传播示意图

Fig. 1 Light propagates in thin film media

设 H_z 与 z 的变化无关。

根据以上假设可得到 x, y 方向上磁场分量与 z 方向上的磁场分量有如下关系^[8]: $H_x = z\partial H_z/\partial y, H_y = -z\partial H_z/\partial x$ 。在此基础上可得到薄膜中的电磁场的形式为

$$\begin{cases} \mathbf{H}(x, y, z) = [H_x(x, y, z), H_y(x, y, z), H_z(x, y)], \\ \mathbf{E}(x, y, z) = [E_x(x, y), E_y(x, y), E_z(x, y, z)]. \end{cases} \quad (1)$$

又根据麦克斯韦方程 $\nabla \times \mathbf{H} = -i\epsilon\omega\mathbf{E}$ 可得

$$\begin{cases} -i\epsilon\omega E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ -i\epsilon\omega E_y = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ -i\epsilon\omega E_z = -z \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} - z \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 ω 是电磁波频率, i 为虚数单位, ϵ 是介电常数。

因此,电磁波的电场能量 U 和磁场能量 T 可表达为

$$\left\{ \begin{aligned} U &= \iint \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{2} \epsilon |\mathbf{E}|^2 dx dy dz = \iint \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{2} \epsilon (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) dx dy dz = \\ &\quad \frac{1}{2\omega^2 \epsilon} \iint \left\{ 2h \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} \right)^2 \right\} dx dy, \\ T &= \iint \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{2} \mu |\mathbf{H}|^2 dx dy dz = \iint \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{2} \mu (H_x^2 + H_y^2 + H_z^2) dx dy dz = \\ &\quad \frac{\mu}{2} \iint \left\{ \frac{h^3}{12} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right)^2 \right] + h H_z^2 \right\} dx dy, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中 μ 是磁导率, ϵ 是介电常数, h 为薄膜厚度。

根据变分原理 $\delta(T-U) = 0$ 可得到

$$\frac{h^3}{12\omega^2 \epsilon} \left(\frac{\partial^4 H_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 H_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 H_z}{\partial y^4} \right) - \left(\frac{2h}{\omega^2 \epsilon} - \frac{\mu h^2}{12} \right) \left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} \right) + \mu h H_z = 0. \quad (4)$$

又因为亥姆赫兹定理可得 $\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = -k_0^2 H_z$, 此时 $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon\mu}$, 代入(4)式可得

$$\frac{\partial^4 H_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 H_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 H_z}{\partial y^4} - \frac{(\mu\epsilon\omega^2 h^2 - 36)\mu\epsilon\omega^2}{h^2} H_z = 0. \quad (5)$$

(5)式为薄膜介质内磁场沿 z 方向的分量 H_z 的控制方程。又由于电磁场其他的分量都可由 H_z 得到,因此其他分量的控制方程也可得到。令

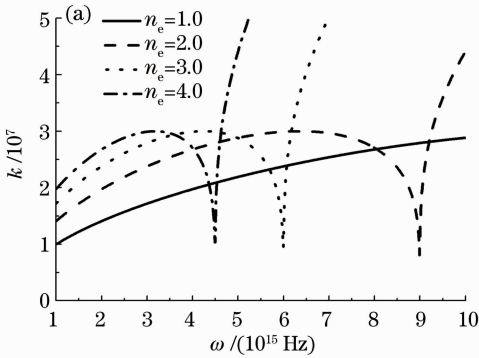
$$k^4 = \frac{(\mu\epsilon\omega^2 h^2 - 36)\mu\epsilon\omega^2}{h^2}, \quad (6)$$

式中 k 为波数。又根据材料的不同,可令 $k_c = n_c\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$,其中 n_c 为材料的折射率, ω 为电磁波频率, ϵ_0 为真空中的介电常数, μ_0 为真空中的磁导率。代入(6)式中可得到波数 k ,可表示为

$$k = (n_c^4\omega^4\epsilon_0^2\mu_0^2 - 36n_c^2\omega^2\epsilon_0\mu_0/h^2)^{1/4}, \quad (7)$$

(7)式是薄膜内光传播的色散关系。由(7)式可以看出,其色散关系并不是线性的,能够得到 ω 和 k 的对应关系,从而求出它的群速度。

群速度是指合成波振幅恒定点的移动速度,也就是振幅调制包络线的移动速度。群速度的表达式是 $v_g = d\omega/dk$,是频率对波数的一次导数。因此根据(7)式可求得群速度为



$$v_g = \frac{4 \times [\epsilon_0^2\mu_0^2 n_c^4 \omega^4 - (36\epsilon_0\mu_0 n_c^2 \omega^2)/h^2]^{3/4}}{4\epsilon_0^2\mu_0^2 n_c^4 \omega^3 - (72\epsilon_0\mu_0 n_c^2 \omega)/h^2}. \quad (8)$$

当群速度 v_g 远远小于光速 c 时,就会出现超慢光速现象。下面将利用(8)式来研究光在薄膜介质中传播的慢光现象。

3 薄膜内慢光速的影响因素分析及计算

由波数 k 的表达式(7)式可知,薄膜介质的折射率 n_c ,薄膜的厚度 h 以及光频率 ω 对 k 的变化起到主要的影响。

图2表示的是波数 k 与光频率 ω 之间的关系。其中图2(a)是当厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$,折射率 n_c 取不同值时,光波频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 范围内的变化;图2(b)表示的是当折射率 n_c 取 1.5 ,厚度 h 取不同值时,光波频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 的范围内的变化。

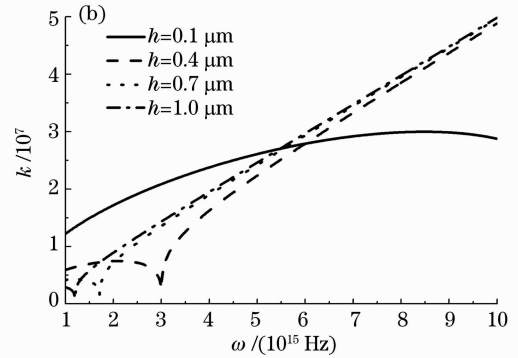


图2 波数 k 与频率 ω 的关系。(a) $h=0.2 \mu\text{m}$, n_c 取不同值; (b) $n_c=1.5$, h 取不同值

Fig. 2 Relationship between k and ω . (a) $h=0.2 \mu\text{m}$, n_c is changed; (b) $n_c=1.5$, h is changed

在图2(a)中,波数 k 的曲线随着折射率的增大而向左移动;在图2(b)中,波数 k 的曲线随着厚度的增大而向左移动。而且波数 k 还存在不连续的现象。

根据波数 k 的表达式可知,这是因为当 ω 大于 $6/(n_c h \sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ 时,波数值为实数;当 ω 小于 $6/(n_c h \sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ 时,波数值为虚数,这里应取它的实数部分来研究。 $6/(n_c h \sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ 则称为波数 k 的虚实分界点。

当光频率对波数求一次导数时,就可得到光波的群速度表达式(8)式。同样,光的群速度与光频率 ω 、薄膜介质的折射率 n_c 以及薄膜介质的厚度 h 有关,且可以分为虚数的实部、实数两个部分来研究。

3.1 光频率对薄膜内慢光速的影响

图3表示了光波的群速度随光频率的变化情况。其中图3(a)是薄膜介质折射率 n_c 取 1.5 ,厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$ 时,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz

范围内的变化;图3(b)表示厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$,薄膜介质折射率 n_c 分别取不同值时,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 范围内的变化;图3(c)表示薄膜介质折射率 n_c 取 1.5 ,厚度 h 分别取不同值时,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 范围内的变化。

在图3(a)中,当 $n_c=1.5$, $h=0.2 \mu\text{m}$,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 范围内变化时,波数 k 的虚实分界点与群速度 v_g 的虚实分界点相同,都为 $6/(n_c h \sqrt{\epsilon_0\mu_0})$,此时 $6/(n_c h \sqrt{\epsilon_0\mu_0}) = 5.997 \times 10^{15}$ Hz。当 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 5.997 \times 10^{15}$ Hz 时,群速度 v_g 的取值为虚数的实部,并且在这个范围内,当 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 2.887 \times 10^{15}$ Hz(1区)时,可看出群速度的值小于光速,此时为慢光速,且群速度随着光频率 ω 的增大而增大;当 ω 在 $2.887 \times 10^{15} \sim 4.245 \times 10^{15}$ Hz(2区)时,可看出群速度的值大于光速,此时

为超光速,且群速度随着光频率 ω 的增大而增大;当 ω 在 $4.245 \times 10^{15} \sim 4.958 \times 10^{15}$ Hz(3区)时,可以看出群速度为负数,且群速度大于光速,此时为反向的超光速,且群速度随着光频率 ω 的增大而减小;当 ω 在 $4.958 \times 10^{15} \sim 5.997 \times 10^{15}$ Hz(4区)时,群速度为负数,且群速度小于光速,此时为反向的慢光

速,且群速度随着光频率 ω 的增大而减小。而当 ω 在 $5.997 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz(5区)时,群速度 v_g 的取值为实数,在这个范围内,群速度为正数,且群速度小于光速,此时为慢光速,且群速度随着光频率 ω 的增大而增大。在这里要研究的是正向的慢光速,因此主要研究1区和5区。

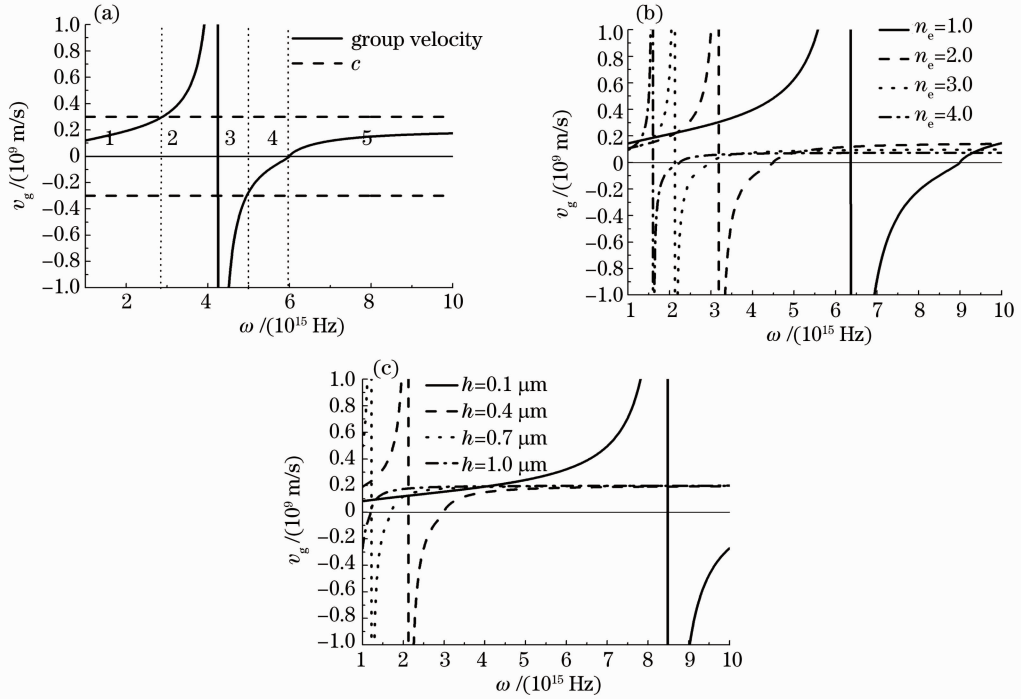


图3 群速度 v_g 与光频率 ω 的关系。(a) $n_e = 1.5, h = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $h = 0.2 \mu\text{m}$, n_e 取不同值;
(c) $n_e = 1.5, h$ 取不同值

Fig. 3 Relationship between v_g and ω . (a) $n_e = 1.5, h = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $h = 0.2 \mu\text{m}$, n_e is changed;
(c) $n_e = 1.5, h$ is changed

当 ω 在1区时, ω 越小,光波的群速度越慢,因此当 ω 取 1×10^{15} Hz时,可得到1区最小的慢光速 $v_{g\omega 1} = 1.197 \times 10^8$ m/s。当 ω 在5区时, ω 越小,光波的群速度越慢,因此当 ω 取 5.997×10^{15} Hz时,可得到5区最小的慢光速 $v_{g\omega 5} = 7.804 \times 10^5$ m/s。显然,5区的最小慢光速要小于1区的最小慢光速。

在图3(b)中,当薄膜介质厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$ 而薄膜介质折射率 n_e 分别取不同值时,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz范围内变化。可以看出当折射率从小到大变化时,群速度曲线向左移动。而在图3(c)中,当薄膜介质折射率 n_e 取1.5而薄膜介质厚度 h 分别取不同值时,光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz范围内变化。可以看出当厚度从小到大变化时,群速度曲线同样向左移动。

3.2 薄膜介质折射率对薄膜内慢光速的影响

图4显示了光波的群速度随薄膜介质折射率的变化情况。其中图4(a)表示的是光频率 ω 取 5×10^{15} Hz,薄膜厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$ 时,薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 的范围内的变化;图4(b)表示厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$,光频率 ω 分别取不同值时,薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 的范围内的变化;图4(c)表示光频率 ω 取 5×10^{15} Hz,厚度 h 分别取不同值时,薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 的范围内的变化。

在图4(a)中,当 $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, $h = 0.2 \mu\text{m}$ 时,薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 范围内变化。根据波数 k 的表达式可知,当 n_e 大于 $6/(\omega h \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 时,波数值为实数;当 n_e 小于 $6/(\omega h \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 时,波数值为虚数,这里取它的实数部分来研究。对于波数 k 和群速度 v_g 来说 $6/(\omega h \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 都称为虚实分界点,此时

$6/(\omega h \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}) = 1.7992$ 。当 n_e 在 $1.0 \sim 1.7992$ 时，群速度 v_g 的取值为虚数的实部，在这个范围内，当 n_e 在 $1.0 \sim 1.273$ (1区) 时，可看出群速度的值大于光速，此时为超光速，且群速度随着折射率 n_e 的增大而增大；当 n_e 在 $1.273 \sim 1.487$ (2区) 时，可以看出群速度为负数，且群速度大于光速，此时为反向的超光速，且群速度随着折射率 n_e 的增大而减小；当 n_e

在 $1.487 \sim 1.7992$ (3区) 时，群速度为负数，且群速度小于光速，此时为反向的慢光速，且群速度随着折射率 n_e 的增大而减小。而当 n_e 在 $1.7992 \sim 4.0$ (4区) 时，群速度 v_g 的取值为实数，在这个范围内，群速度为正数，且群速度小于光速，此时为慢光速，且群速度随着折射率 n_e 的增大而先增大后减小。在这里主要研究的是正向的慢光速，因此主要研究 4 区。

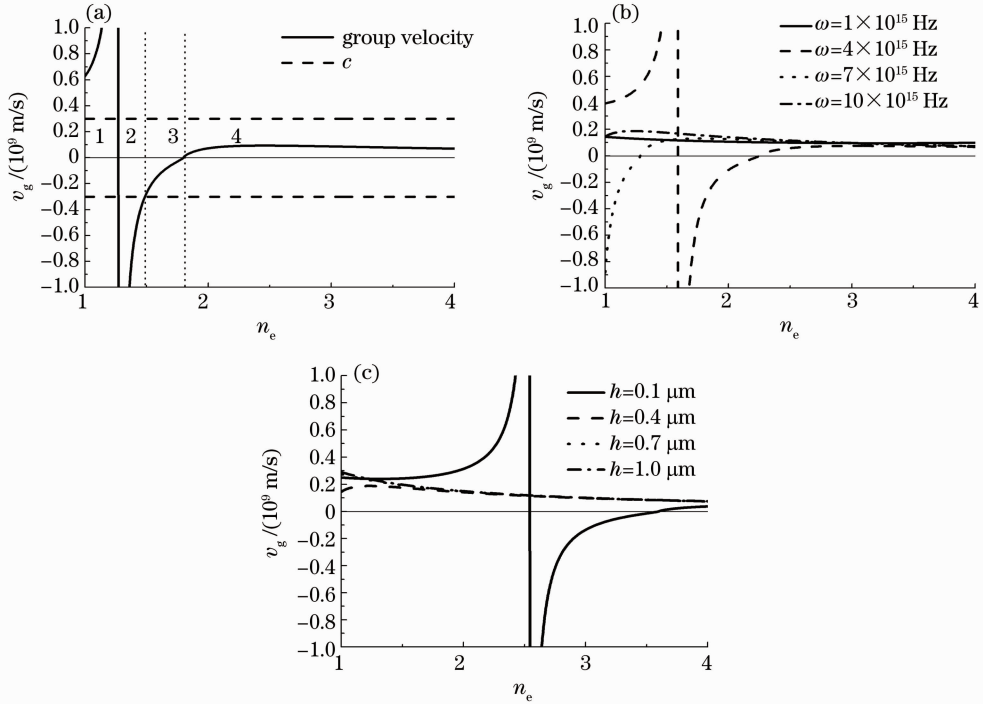


图 4 群速度 v_g 与薄膜介质折射率 n_e 的关系。(a) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, $h = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $h = 0.2 \mu\text{m}$, ω 取不同值；
 (c) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, h 取不同值
 Fig. 4 Relationship between v_g and n_e . (a) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, $h = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $h = 0.2 \mu\text{m}$, ω is changed;
 (c) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, h is changed

当 n_e 在 4 区时，当 n_e 增大时，光波的群速度先增大而后减小。因此当 n_e 取 1.7992，群速度 $v_{gn41} = 1.745 \times 10^6$ m/s；当 n_e 取 4.0 时，群速度 $v_{gn42} = 7.0397 \times 10^7$ m/s。此时最小慢光速为 $v_{gn41} = 1.745 \times 10^6$ m/s。

在图 4(b) 中，当薄膜厚度 h 取 $0.2 \mu\text{m}$ 而光频率 ω 分别取不同值时，薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 的范围内变化。可看出当光频率从小到大变化时，群速度曲线向左移动。而在图 4(c) 中，当光频率 ω 取 5×10^{15} Hz 而薄膜厚度 h 取不同值时，薄膜介质折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 范围内变化。可看出当厚度从小到大的变化时，群速度曲线同样向左移动。并且取不同的光频率 ω 以及薄膜厚度 h ，也能在薄

膜介质折射率 n_e 较小时得到正向的慢光速，即群速度也可分为 5 个区。

3.3 薄膜厚度对薄膜内慢光速的影响

图 5 表示了光波的群速度随薄膜厚度的变化情况。其中图 5(a) 表示的是薄膜介质折射率 n_e 取 1.5，光频率 ω 取 5×10^{15} Hz 时，薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内的变化；图 5(b) 表示光频率 ω 取 5×10^{15} Hz，薄膜介质折射率 n_e 分别取不同值时，薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内的变化；图 5(c) 表示薄膜介质折射率 n_e 取 1.5，光频率 ω 分别取不同值时，薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内的变化。

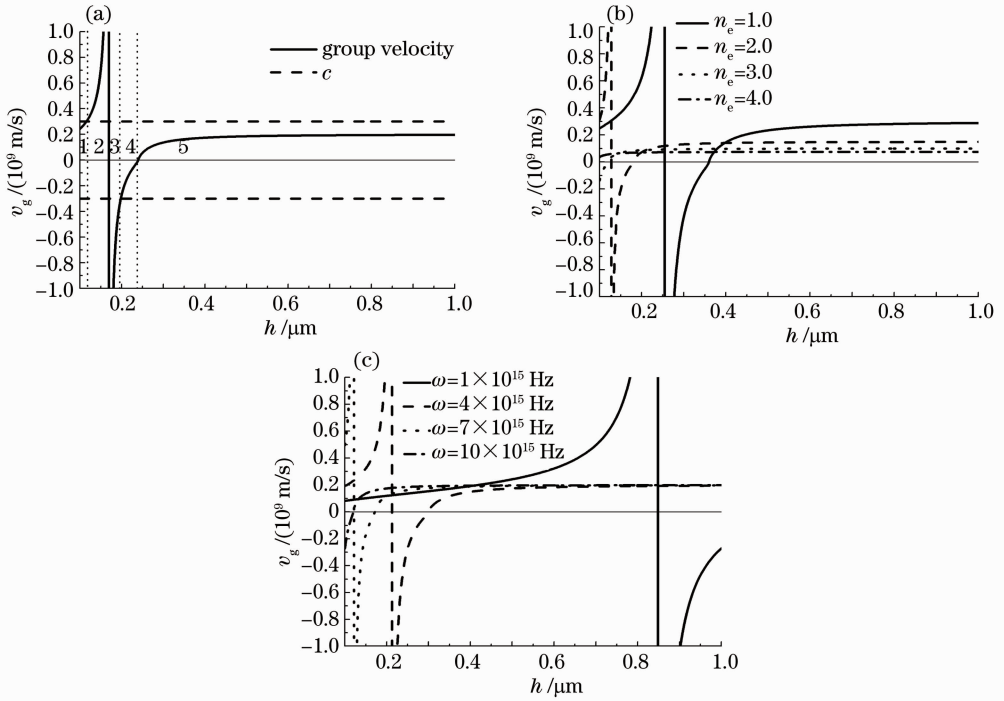


图 5 群速度 v_g 与薄膜厚度 h 的关系。(a) $n_e = 1.5, \omega = 5 \times 10^{15}$ Hz; (b) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, n_e 取不同值; (c) $n_e = 1.5, \omega$ 取不同值

Fig. 5 Relationship between v_g and h . (a) $n_e = 1.5, \omega = 5 \times 10^{15}$ Hz; (b) $\omega = 5 \times 10^{15}$ Hz, n_e is changed; (c) $n_e = 1.5, \omega$ is changed

在图 5(a)中,当 $n_e = 1.5, \omega = 5 \times 10^{15}$ Hz 时,薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内变化。根据波数 k 的表达式可知,当 h 大于 $6/(n_e \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 时,波数值为实数;当 h 小于 $6/(n_e \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 时,波数值为虚数,这里取它的实数部分来研究。对于波数 k 和群速度 v_g 来说 $6/(n_e \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})$ 都称为虚实分界点,此时 $6/(n_e \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}) = 0.2399 \mu\text{m}$ 。当 h 在 $0.1 \sim 0.2399 \mu\text{m}$ 时,群速度 v_g 的取值为虚数的实部,在这个范围内,当 h 在 $0.1 \sim 0.1155 \mu\text{m}$ (1区)时,可看出群速度的值小于光速,此时为慢光速,且群速度随着薄膜厚度 h 的增大而增大;当 h 在 $0.1155 \sim 0.1697 \mu\text{m}$ (2区)时,可看出群速度的值大于光速,此时为超光速,且群速度随着薄膜厚度 h 的增大而增大;当 h 在 $0.1697 \sim 0.1982 \mu\text{m}$ (3区)时,此时可以看出群速度为负数,且群速度大于光速,此时为反向的超光速,且群速度随着薄膜厚度 h 的增大而减小;当 h 在 $0.1982 \sim 0.2399 \mu\text{m}$ (4区)时,群速度为负数,且群速度小于光速,此时为反向的慢光速,且群速度随着薄膜厚度 h 的增大而减小。而当 h 在 $0.2399 \sim 1.0 \mu\text{m}$ (5区)时,群速度 v_g 的取值为实数,在这个范围内,群速度为正数,且群速度小于光速,此时为慢光速,且群速度随着薄膜厚度 h 的增大而增大。在这里所要研究

的是正向的慢光速,因此主要研究 1 区和 5 区。

当 h 在 1 区时, h 越小,光波的群速度越慢,因此当 h 取 $0.1 \mu\text{m}$ 时,可得到 1 区最小的慢光速 $v_{gh1} = 2.424 \times 10^8$ m/s。当 h 在 5 区时, h 越小,光波的群速度越慢,因此当 h 取 $0.2399 \mu\text{m}$ 时,可得到 5 区最小的慢光速 $v_{gh5} = 3.302 \times 10^5$ m/s。显然,5 区的最小慢光速要小于 1 区的最小慢光速。

在图 5(b)中,当光频率 ω 取 5×10^{15} Hz 而薄膜介质折射率 n_e 分别取不同值时,薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内变化。可看出当介质折射率从小到大变化时,群速度曲线向左移动。而在图 5(c)中,当介质折射率 n_e 取 1.5 而光频率 ω 分别取不同值时,介质厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内变化。可看出当光频率从小到大变化时,群速度曲线同样向左移动。

由上面得到的结论可以看出,无论当光频率 ω 、薄膜介质的折射率 n_e 以及薄膜厚度 h 怎样变化时,都在满足 ω, n_e, h 乘积稍微大于 $6/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 时,群速度 v_g 最小。

当光频率 ω 在 $1 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Hz 之间变化,薄膜介质的折射率 n_e 在 $1.0 \sim 4.0$ 之间变化,薄膜厚度 h 在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间变化时,利用 Matlab 软件

进行运算,得到当 $\omega = 1 \times 10^{15}$ Hz, $h = 0.645 \mu\text{m}$, $n_e = 2.79$ 时,满足 $n_e h \omega > 6 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$,此时群速度 $v_g = 4.886 \times 10^5$ m/s,约为 0.0016 倍的光速。

显然,光频率 ω 、薄膜介质的折射率 n_e 以及薄膜介质的厚度 h 对光的群速度 v_g 的影响方式上大体相同,且都存在 5 个速度区,只是程度上略有区别。这是因为对于 ω 、 n_e 、 h 来说,它们的虚实分界点规律都是一样的,其中任意一个影响因素都与另外两个成反比的关系,即任意一个影响因素都随着另外两个影响因素的增大而减小,从图像上来看就是影响曲线向左移动。至于其程度上的差别则是由不同影响因素对于光的群速度表达式的影响不同所导致的。

另外,虽然光频率 ω 、薄膜介质的折射率 n_e 以及薄膜介质的厚度 h 都对光的群速度 v_g 有影响,但其实质应是薄膜介质厚度 h 的影响。薄膜介质内慢光速的产生其实可以理解为控制薄膜的厚度 h 小到一定程度后,薄膜介质的结构发生变化,从而光在其中传播时会产生色散,根据其色散关系所得出的群速度在一定范围内就会小于真空中的光速,此时就会产生慢光现象。而当薄膜的厚度 h 大到一定程度时,光就如同在普通的均匀介质内传播一样,并不会产生色散,也因此不会有群速度变化的现象,也就不会有慢光速的产生。这就是薄膜介质中慢光速产生的机理。

4 结 论

建立了薄膜介质内光传播的理论模型,并根据该

模型得出的薄膜介质内光波控制方程,推导出光的群速度的表达式及其影响因素,即光频率 ω 、薄膜介质的折射率 n_e 和薄膜厚度 h 。当光频率 ω 、薄膜的折射率 n_e 和薄膜厚度 h 的值在一定范围内变化时,光的群速度变化一般会分为 5 个区段,即正向慢光区(1 区)、正向快光区(2 区)、反向快光区(3 区)、反向慢光区(4 区)以及正向慢光区(5 区)。并且在 5 区可以得到较小的慢光速。当光频率 ω 取 1×10^{15} Hz,薄膜介质折射率 n_e 取 2.79,薄膜厚度 h 取 $0.645 \mu\text{m}$ 时,可得到光的群速度 v_g 为 4.886×10^5 m/s。

参 考 文 献

- 1 J B Khurgin. Slow light in various media: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(3): 287–318.
- 2 L V Hau, S E Harris, Z Dutton, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397(6720): 594–598.
- 3 C E Liu, Z Dutton, C H Behroozl, *et al.*. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. *Nature*, 2001, 409(6819): 490–493.
- 4 D F Phillips, A Fleischhauer, A Mair, *et al.*. Storage of light in atomic vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(5): 783–786.
- 5 Zhang Yundong, Fan Baohua, Yuan Ping, *et al.*. Observation of slow light propagation in solid state material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1688–1690.
掌蕴东, 范保华, 袁萍等. 红宝石晶体中慢光现象的实验观测 [J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1688–1690.
- 6 K Y Song, M G Herraes, L Thevenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 82–88.
- 7 Y A Vlasov, M Oboyle, H F Hamann, *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 65–69.
- 8 J H Wu, A Q Liu, H H Li. Investigation of resonant modes in thin microcavities by using electromagnetic theory [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(16): 2438–2440.

栏目编辑：韩峰