

自发产生相干对探测场的色散和吸收影响^{*}

严祥安^{1,2)} 宋建平¹⁾ 尹宝银^{1,3)} 蒋文娟¹⁾ 郑准斌¹⁾ 张彦鹏¹⁾

1) 西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2) 西安工程大学理学院, 西安 710048)

3) 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2007 年 9 月 24 日收到, 2007 年 10 月 16 日收到修改稿)

在 Y 形四能级原子系统中, 分析了自发产生相干对探测场的色散和吸收影响. 结果发现, 随着自发产生相干的增强, 系统呈现的电磁感应透明窗口逐渐变窄, 并在共振处出现反常色散, 吸收从负值变为正值. 同时, 当抽运场和耦合场的相对强度不同时, 共振处附近吸收为零或出现增益, 而两场强相等或接近时, 系统对探测场表现为吸收.

关键词: 非线性光学, 电磁感应透明, 自发产生相干

PACC: 4265, 4255, 4250

1. 引 言

自发产生相干(spontaneously generated coherence, 简称 SGC)指的是自发辐射通道之间的耦合, 通常称为量子干涉, 由于其在量子光学领域中产生了许多新的影响而被广泛应用和研究. 在一般的三能级原子系统中, 从一个激发态到两个空间相隔很近的较低能态(Δ 形)^[1], 或从两个近简并的激发态到一个原子基态(∇ 形)^[2]之间的自发辐射能产生干涉, 而且, 在级联原子系统中, 即等间隔的原子能级之间的自发辐射跃迁与同样的真空模相互作用也会出现自发产生相干(Ξ 形)^[3], 自发产生相干与原子偶极极化的取向有关, 当两偶极子平行时, 干涉效应最大, 正交时最小^[4,5]. Zhou 等人^[2]已经从理论上分析了量子干涉对共振荧光辐射光谱的影响, 同时 Xia 等人^[6]在实验上观察到因量子干涉的影响而出现的荧光猝灭现象. 最近, SGC 在电磁感应透明, 无吸收折射系数的提高, 暗态的形成, 短脉冲传输, 共振荧光等方面^[7-17]的影响已经被广泛的研究.

本文在考虑自发产生相干情况下研究了一种 Y 形四能级原子系统^[9,18]与三个场相互作用的情况, 文献 [9] 在相同的能级系统中讨论了单光子和双光子吸收机制, 文献 [18] 分析了外场强度变化和探测场所对应的拉比频率相位发生改变时, 系统对探测

光的吸收和色散变化问题. 本文则主要分析自发产生相干对探测场吸收和色散的影响, 随着自发产生相干的增强, 系统呈现的电磁感应透明窗口逐渐变窄, 并在共振处出现反常色散, 吸收从负值变为正值. 同时还发现, 外加抽运场和耦合场的相对强度不同时, 共振处出现吸收为零或负的现象. 而两场强相等或接近时, 介质表现吸收.

2. 模型与方程

在如图 1 所示 Y 形原子系统中, 抽运场 Ω_1 作用于能级 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 之间, 共振耦合场 Ω_c 驱动能级 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 之间的跃迁, 而探测场 Ω_p 作用在能级 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 上, 对应的失谐量 $\Delta_p = \omega_{42} - \omega_p$. $2\gamma_2$, $2\gamma_3$, $2\gamma_4$ 分别表示能级 $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$, $|3\rangle \rightarrow |2\rangle$, $|4\rangle \rightarrow |2\rangle$ 的自发衰减系数. 当两个激发态能级 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$ 空间相隔很近时, 它们到同一能态 $|2\rangle$ 上的自发辐射跃迁将与同样的真空模相互作用产生耦合. 在旋波近似条件下, 考虑自发产生相干的影响, 系统在相互作用表象中的密度矩阵运动方程为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{12} = & -\gamma_2\rho_{12} + i\Omega_1(\rho_{22} - \rho_{11}) \\ & - i\Omega_c\rho_{13} - i\Omega_p\rho_{14}, \end{aligned}$$

$$\dot{\rho}_{13} = -\gamma_3\rho_{13} + i\Omega_1\rho_{23} - i\Omega_c\rho_{12} - p\sqrt{\gamma_3\gamma_4}\rho_{14},$$

$$\dot{\rho}_{14} = -(\gamma_4 - i\Delta_p)\rho_{14} - p\sqrt{\gamma_3\gamma_4}\rho_{13}$$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60678005), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20050698017)和霍英东教育基金会高等院校青年教育基金(批准号: 106061)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: jpsong@xjtu.edu.cn

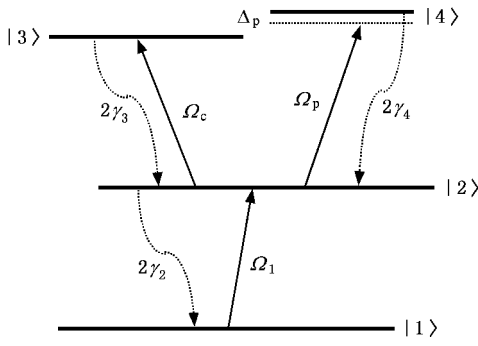


图1 与抽运场 Ω_1 、耦合场 Ω_c 、探测场 Ω_p 相互作用的 Y 形四能级系统 ($2\gamma_2, 2\gamma_3, 2\gamma_4$ 分别为能级 $|2\rangle, |3\rangle, |4\rangle$ 的衰减系数)

$$\begin{aligned}
 & + i\Omega_1 \rho_{24} - i\Omega_p \rho_{12}, \\
 \dot{\rho}_{23} = & -(\gamma_2 + \gamma_3)\rho_{23} + i\Omega_1 \rho_{13} \\
 & + i\Omega_c(\rho_{33} - \rho_{22}) + i\Omega_p \rho_{43} - p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4} \rho_{24}, \\
 \dot{\rho}_{24} = & -(\gamma_2 + \gamma_4 - i\Delta_p)\rho_{24} + i\Omega_p(\rho_{44} - \rho_{22}) \\
 & + i\Omega_1 \rho_{14} + i\Omega_c \rho_{34} - p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4} \rho_{23}, \\
 \dot{\rho}_{34} = & -(\gamma_3 + \gamma_4 - i\Delta_p)\rho_{34} + i\Omega_c \rho_{24} - i\Omega_p \rho_{32} \\
 & - p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4}(\rho_{33} + \rho_{44}), \\
 \dot{\rho}_{11} = & 2\gamma_2 \rho_{22} + i\Omega_1(\rho_{21} - \rho_{12}), \\
 \dot{\rho}_{33} = & -2\gamma_3 \rho_{33} - p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4}(\rho_{34} + \rho_{43}) \\
 & + i\Omega_c(\rho_{23} - \rho_{32}), \\
 \dot{\rho}_{44} = & -2\gamma_4 \rho_{44} - p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4}(\rho_{34} + \rho_{43}) \\
 & + i\Omega_p(\rho_{24} - \rho_{42}). \quad (1)
 \end{aligned}$$

由于 SGC 效应对原子偶极矩阵元 μ_{32}, μ_{42} 的取向非常敏感 (1) 式中的 $p = \mu_{32} \cdot \mu_{42} / |\mu_{32}| |\mu_{42}| = \cos\theta$ 表示这两个偶极矩阵元的共轴调节, θ 是偶极矩阵元 μ_{32}, μ_{42} 之间的夹角. $p\sqrt{\gamma_3 \gamma_4}$ 项代表量子干涉, 来源于态 $|3\rangle \rightarrow |2\rangle$ 和 $|4\rangle \rightarrow |2\rangle$ 自发辐射通道之间的交叉耦合. 显然, 当偶极矩阵元 μ_{32}, μ_{42} 正交时, 量子干涉效应消失, 而两偶极矩阵元平行时, 自发产生相干最强, 故是否存在自发产生相干与两偶极矩阵元的非正交性有关. 作用在各能级之间的激光场对应的拉比频率定义为 $\Omega_l = \epsilon_l \mathbf{e} \cdot \boldsymbol{\mu}_{ij} / \hbar$ ($ij = 21, 32, 42$ 和 $l = 1, p, c$), ϵ_l 为激光场的振幅. 假定每个激光场只作用一种跃迁, 这样拉比频率与角度 θ 也有关, 表示为 $\Omega_l = \Omega_l^{(0)} \sin\theta = \Omega_l^{(0)} \sqrt{1-p^2}$ [457]. 探测场在介质中传输引起的极化强度 P 与探测场 E_p 的关系为 $P = \epsilon_0 \chi E_p$, χ 表征介质对光极化特性的极化张量. 而介质对光的响应是电偶极振子在光电

场作用下振动所产生的极化, 其极化强度是 $P = -N\epsilon(t)$, N 为单位体积内的振子数. 对电偶极矩取量子平均得到极化强度与密度矩阵的关系 $P = N\boldsymbol{\mu}_{42} \rho_{24}$. 因此, 可以通过求解密度矩阵元 ρ_{24} 的实部和虚部分析原子系统对探测场吸收和色散影响, 本文在 $\rho_{22} = 1$, 其他对角矩阵元为 0 近似条件下得到了密度矩阵运动方程的稳态解, 通过数值模拟计算出 ρ_{24} 的实部和虚部.

3. 结果与分析

图 2 是在 p 取不同值, 即自发辐射通道干涉强弱不同的情况下, ρ_{24} 的实部 (实线) 和虚部 (虚线) 随探测场失谐量 Δ_p 变化的曲线. 为简便起见, 本文通过衰减系数 γ_2 来定义所有参数. 取 $\Omega_c^0 = 4\gamma_2$, $\Omega_1^0 = 1.5\gamma_2$, $\Omega_p^0 = 1.5\gamma_2$, $\gamma_4 = 0.01\gamma_2$, $\gamma_3 = 0.1\gamma_2$. 从图 2 中变化的曲线可以发现: 当不存在自发辐射通道之间的干涉时 ($p = 0$), 无吸收并伴有增益的区间分布很大, 在 $\Delta_p = -5$ 附近到 $\Delta_p = 5$ 附近之间, ρ_{24} 的虚部曲线表现为增益, 在此区间出现三个吸收为零的位置 ($\Delta_p = \pm 5, \Delta_p = 0$). 由于 $\Delta_p = \omega_{42} - \omega_p$, ρ_{24} 的实部在此区间 (除了 $\Delta_p = 0$ 附近) 随 Δ_p 变化曲线的斜率为负, 但随 ω_p 变化曲线斜率就为正了, 所以呈现了介质的正常色散, 值得注意的是, 在共振处出现了反常色散, 但是因曲线变化比较平缓, 系统表现的吸收仍为零. 随着 p 值的增大, 也即自发产生相干的增强, 系统呈现的电磁感应透明窗口逐渐变窄, 通过比较可以发现, $p = 0$ 所对应的透明窗口大约有 $p = 0.99$ 所对应的 10 倍, 这对如何有效的实现非线性转换和光存储是非常有益的; 而且随着自发辐射通道干涉增强, 在共振处附近实部曲线随 Δ_p 变化的斜率也逐渐变大, 介质的反常色散更加明显, 故出现吸收从负值变为正值的情况. 同时, 随着 p 值的增大, 在吸收为负或零的区间, 色散曲线也变得更加陡峭, 这对吸收为零和色散曲线随 ω_p 变化为正的条件下实现光减速和光延迟也是非常有利的 [19].

下面我们来定性分析上面数值模拟的结果, 从方程 (1) 可以发现由于自发产生相干而在 ρ_{24} 的表达式中引入了额外的相干函数 ρ_{34} , 因此使得吸收和色散曲线有所不同. 图 3 显示了相干函数 $|\rho_{34}|$ 随 p 取不同值时随失谐量 Δ_p 变化曲线, 对应的各物理量参数与图 2 相同, 很明显, 当 p 在 $p = 0-0.99$ 变化

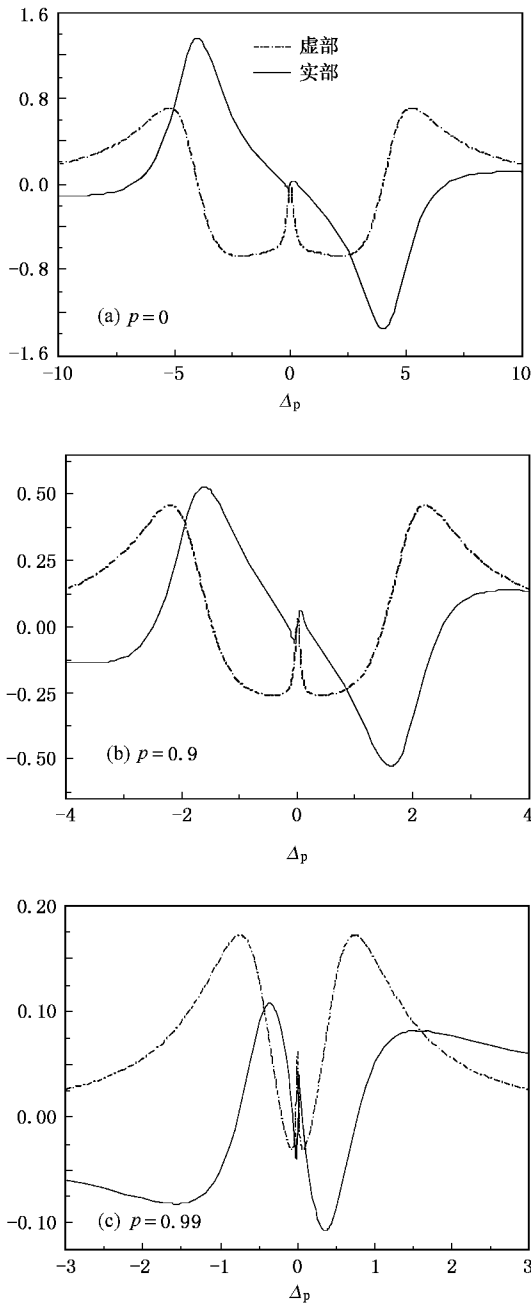


图 2 ρ_{24} 的实部和虚部随失谐量 Δ_p 变化曲线

时,对称峰值间的窗口变窄,同时还发现随着 p 值的增大,相干函数 $|\rho_{34}|$ 也随之变弱,因而对应图 2 中吸收曲线增益区间的增益系数也慢慢变小;在共振处,当 $p = 0.99$ 时,相干函数最小,所以出现反常色散,介质表现吸收现象.因此,自发辐射通道之间的耦合对探测场的吸收和色散存有影响.

值得注意的是在图 2 所示的(a)图中,当 $p = 0$ 时,即不存在自发产生相干时, ρ_{24} 的虚部曲线在共振处出现一个峰值;再仔细观察 Y 形四能级系统,

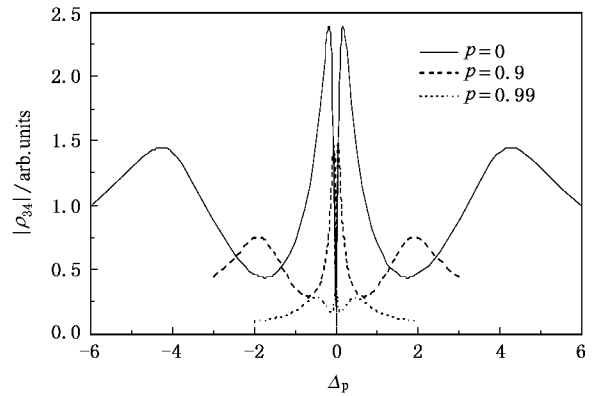


图 3 相干函数 $|\rho_{34}|$ 随失谐量 Δ_p 变化曲线

可以理解为两个三能级系统的叠加,能级 $|1 \rightarrow |2 \rightarrow |4$ 视为级联三能级 (Ξ) 和能级 $|2 \rightarrow |3 \rightarrow |4$ 视为 V 形三能级,相干控制场 Ω_1, Ω_p 与 Ξ 形三能级系统以及耦合场 Ω_c 和探测场 Ω_p 与 V 形三能级相互作用都可以使得系统出现透明的现象^[20],也就是说在 Y 形系统中可能出现两个透明窗口^[21],下面我们就从数值计算的结果来分析抽运场和耦合场在共振处对探测场吸收曲线的影响.

图 4 为抽运场取不同值时, ρ_{24} 的虚部随失谐量 Δ_p 变化的曲线,对应的各物理量参数为 $\Omega_c^0 = 4\gamma_2, p = 0.99, \Omega_p^0 = 1.5\gamma_2, \gamma_4 = 0.01\gamma_2, \gamma_3 = 0.1\gamma_2$,整个过程考虑了自发产生相干对探测吸收曲线的影响($p = 0.99$),为了区分线型的方便,我们放在两个图中对结果进行分析:从图 4(a)中可以发现,随着 $\Omega_1^{(0)}$ 值的增加,共振处从吸收为负变化到吸收为正,介质开始出现吸收,这是因为当抽运场与耦合场的比值较小时,在 Y 形系统中出现两个透明窗口,在共振处附近对探测场表现为增益,当两个场强度相同时,两个透明窗口变成一个透明窗口,系统呈现的 EIT 窗口的形状与常见的三能级系统出现的透明窗口相同,如图 4(a)中的短划线,由于有自发产生相干的影响,而表现出小的吸收;在图 4(b)中,随着抽运场与耦合场的比值增加,抽运场和耦合场对能级 $|2$ 都有缀饰的作用,透明窗口又分为两个,所以在共振处表现为增益,这与激光场控制的原子系统中出现的双暗态共振现象比较相似^[21].所以,当外加抽运场和耦合场的相对强度不同时,共振处附近出现吸收为零或负的现象.而两场强相等或接近时,系统对探测场表现为吸收.

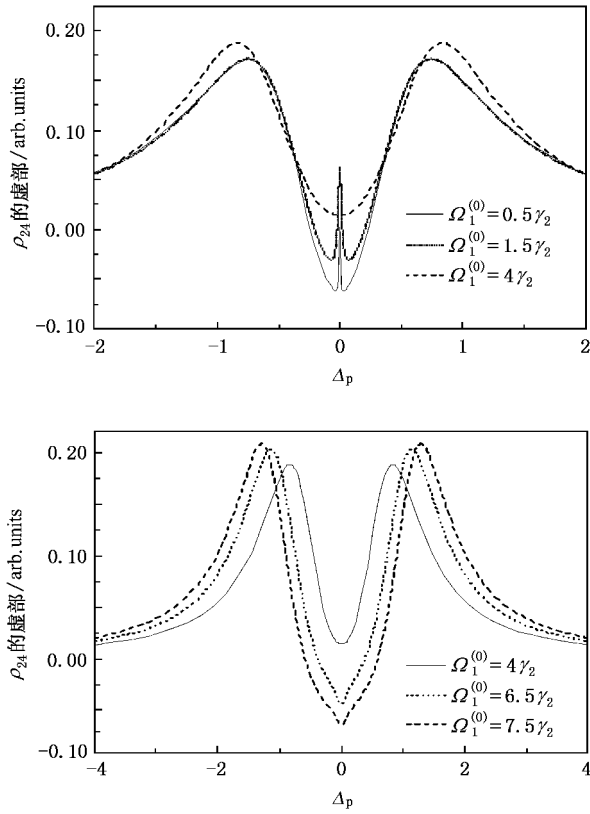


图4 ρ_{21} 的虚部随失谐量 Δ_p 变化曲线

4. 结 论

本文在 Y 形四能级原子系统中,分析了自发产生相干对探测场的色散和吸收影响. 结果发现,随着自发产生相干的增强,系统呈现的电磁感应透明窗口逐渐变窄,并在共振处出现反常色散,吸收从负值变为正值. 定性地分析了自发辐射通道之间的耦合对探测场的吸收和色散的影响. 同时我们还用数值计算的方法分析了抽运场和耦合场在共振处对探测场吸收曲线的影响. 发现当抽运场和耦合场的相对强度不同时,共振处附近出现吸收为零或负的现象,而两场强相等或接近时,系统对探测场表现为吸收. 导致这些有趣现象的原因是外加的相干辐射场与原子系统相互作用出现了两个透明窗口,系统表现为增益或 EIT 效应;而当抽运场和耦合场强度相等时,两个透明窗口变成一个透明窗口,系统呈现普通的透明窗口形状,由于存在自发产生相干的影响,而表现出小的吸收.

- [1] Javanainen J 1992 *Europhys. Lett.* **17** 407
- [2] Zhou P, Swain S 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3995
- [3] Ficek Z, Dalton B J, Knight P L 1995 *Phys. Rev. A* **51** 4062
- [4] Liu C P, Gong S Q, Fan X J, Xu Z Z 2004 *Opt. Commun.* **231** 289
- [5] Niu Y P, Gong S Q 2006 *Phys. Rev. A* **73** 053811
- [6] Xia H R, Ye C Y, Zhu S Y 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1032
- [7] Xu W H, Wu J H, Gao J Y 2002 *Phys. Rev. A* **66** 063812
- [8] Berman P R 2005 *Phys. Rev. A* **72** 035801
- [9] Hou B P, Wang S J, Yu W L, Sun W L 2004 *Phys. Rev. A* **69** 053805
- [10] Antón M A, Oscar G, Carreño F 2005 *Phys. Rev. A* **72** 023809
- [11] Paspalakis E, Kylstra N J, Knight P L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2079
- [12] Yang L J, Zhang L S, Li X L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5206 (in Chinese) [杨丽君、张连水、李晓莉 2006 物理学报 **55** 5206]
- [13] Paspalakis E, Kylstra N J, Knight P L 2000 *Phys. Rev. A* **61** 045802
- [14] Evers J, Bullock D, Keitel C H 2002 *Opt. Commun.* **209** 173
- [15] Litvak A G, Tokman M D 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 095003
- [16] Dong P, Tang S H 2002 *Phys. Rev. A* **65** 033816
- [17] Han L B, Li G X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 696 (in Chinese) [韩立波、李高翔 2000 物理学报 **49** 696]
- [18] Zhang L Y, Liu Z D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3461 (in Chinese) [张丽英、刘正东 2005 物理学报 **54** 3461]
- [19] Bortman A D, Wilson-Gordon A D, Friedmann H 2001 *Phys. Rev. A* **63** 043818
- [20] Wang H, Goorskey D J, Xiao M 2002 *J. Mod. Opt.* **49** 335
- [21] Niu Y P, Li R X, Gong S Q 2005 *Phys. Rev. A* **71** 043819

Effect of spontaneously generated coherence on absorption and dispersion in probe laser^{*}

Yan Xiang-An^{1,2)} Song Jian-Ping^{1)†} Yin Bao-Yin^{1,3)} Jiang Wen-Juan¹⁾ Zhen Huai-Bin¹⁾ Zhang Yan-Peng¹⁾

1) (Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

3) (College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(Received 24 September 2007; revised manuscript received 16 October 2007)

Abstract

A theoretical investigation is carried into the effect of spontaneously generated coherence on absorption and dispersion in probe laser of Y-type atom system. It is found that the electromagnetically induced transparency window in the system narrows gradually as the spontaneously generated coherence intensifies. Moreover, the anomalous dispersion appears and the absorption changes from negative value to positive value at resonance. At the same time, the absorption is zero or negative near resonance when the relative strength of the coupling field and pump field are different, and the atomic medium shows positive absorption when the two fields are exactly or nearly equal and close.

Keywords: nonlinear optics, electromagnetically induced transparency, spontaneously generated coherence

PACC: 4265, 4255, 4250

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60678005), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher of China (Grant No. 20050698017) and the Fok Ying-Tong Education Foundation for Young Teachers in the Higher Education Institutions of China (Grant No. 106061).

[†] Corresponding author. E-mail: jpsong@xjtu.edu.cn