

# 产生纳米级暗中空光束的方法研究<sup>\*</sup>

闫长春<sup>1,2)†</sup> 薛国刚<sup>1)</sup> 刘 诚<sup>1)</sup> 陈 浩<sup>1)</sup> 崔一平<sup>2)</sup>

1) 徐州师范大学物理系 徐州 221116)

2) 东南大学电子工程系 南京 210096)

(2006 年 3 月 12 日收到, 2006 年 4 月 13 日收到修改稿)

用时域有限差分法, 给出光纤头近场区电场强度模的空间分布, 讨论了当光纤纤芯分别取不同尺寸时, 对此空间光场强度的影响. 要想得到较大范围的暗中空光束, 必须增加光纤纤芯尺寸, 并且, 对光纤纤芯尺寸取一较大值和光纤中空区域尺寸取一较小值时的情况进行讨论, 可得在光纤头附近可以出现与光纤中空区域尺寸大小相当的暗斑(10<sup>1</sup> nm 量级). 但是, 暗中空光束中背景光较强. 为此, 将光纤的空心设计为金属, 发现此时中心暗斑的背景光明显减弱, 在近场区域可获得较为理想的暗中空光束. 如进一步缩小光纤中空区域尺寸, 可以在光纤头附近获得暗斑更小甚至纳米量级的暗中空光束. 为获得一种纳米量级的暗中空光束提供一种方法.

关键词: 时域有限差分法, 中空光纤, 暗中空光束, 纳米量级

PACC: 3280P

## 1. 引 言

上世纪 80 年代以来, 随着激光冷却技术的不断发展, 中性原子的获得与控制已变得较为容易. 由于中性原子的能量极低, 其德布罗意波长比较长, 原子的波动性较为明显, 从而形成了原子光学这一新兴的研究领域<sup>[1]</sup>. 为了对中性原子的波粒二象性及其应用进行理论和实验研究, 人们必将遇到一个新的实际问题, 即如何对中性原子样品进行各种精确的操纵和控制. 因此, 近年来国内外许多物理学学者对中性原子的操纵和控制产生了极大的兴趣. 光操纵是主要的方案之一, 而暗中空光束<sup>[2-7]</sup>是其中方法之一. 它的光束在中心轴线地方消失, 横截面图形呈圆环状图形. 暗中空光束较红失谐高斯光束的优点是在中心囚禁域原子受到的光的作用后的破坏性小. 产生暗中空光束的方法很多, 如几何光学方法<sup>[8]</sup>、模式变换方法<sup>[9]</sup>、光学全息方法<sup>[10]</sup>、计算全息方法<sup>[11]</sup>、横模选择方法<sup>[12]</sup>、非线性方法<sup>[13]</sup>等. 在这些方法中, 产生的暗中空光束的尺寸都相对较大, 尽管 Shin 等人提出用中空光纤方法<sup>[14-16]</sup>、采用瑞利-索末菲衍射原理讨论在近场域可产生暗中空光束, 但是, 暗斑尺寸仍要在微米量级以上, 是原子大小的上万倍, 难以真正实现对个别原子的俘获. 本文采用时域有限

差分法(FDTD)给出中空光纤头近场区电场强度的空间分布, 避免瑞利-索末菲衍射原理的复杂理论计算, 并对中空光纤结构进行改造, 在近场区域可获得较为理想的暗中空光束. 而且暗斑尺寸可达 10<sup>1</sup> nm 甚至 nm 量级的暗中空光束. 为获得一种 nm 量级的暗中空光束提供一种方法. 也为真正实现对个别原子的操纵和控制提供一种手段.

## 2. FDTD 计算方法

FDTD 作为一种主要的近场计算方法<sup>[17, 18]</sup>, 是 1966 年由 Yee<sup>[19]</sup>提出的. 这种方法是将 Maxwell 旋度方程化为有限差分公式后, 直接在时域中求解, 通过建立时间离散的递进序列, 在相互交织的网络空间中计算交替电场和磁场.

Maxwell 旋度方程为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \sigma_m \mathbf{H}, \quad (2)$$

其中,  $\epsilon$  为介电电容率,  $\mu$  为介质磁导率,  $\sigma$  为介质电导率,  $\sigma_m$  为介质导磁率.

直角坐标系中, 各向同性介质, 将(1)(2)两式展成六个偏微分方程, 将电磁场置于 Yee 网络中, 并用中心差分方程代替偏微分方程, 最后可得六个微

<sup>\*</sup> 江苏省教育厅自然科学基金(批准号:04KJD140196)和徐州师范大学自然科学基金(批准号:04XLB09)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yance@xznu.edu.cn

分迭代公式 即

$$\begin{aligned}
 & H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) \\
 &= CP(m) H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) \\
 &+ CQ(m)\left[E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k+1\right)\right. \\
 &- E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)-E_z^n\left(i, j+1, k+\frac{1}{2}\right) \\
 &\left.+E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)\right],
 \end{aligned}$$

其他微分迭代方程与此相似 其中

$$CP(m)=\frac{1-\frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0\mu_r(m)}}{1+\frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0\mu_r(m)}}$$

$$CQ(m)=\frac{CQ(m)}{\delta}=\frac{\frac{\Delta t}{\mu_0\delta}}{\mu_r(m)+\frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0}}$$

$$\Delta x=\Delta y=\Delta z=\delta.$$

且空间增量  $\delta \leq \frac{\lambda}{10}$ ,  $v_{\max} \Delta t \leq \frac{\delta}{\sqrt{3}}$  ( $v_{\max}$  为空间中

电磁波的最大速度)。

### 3. 模型计算及讨论

如图 1 所示取一段中空光纤(过轴心的剖面图),中心为真空,直径  $2a$  相对折射率  $n=1$  纤芯的

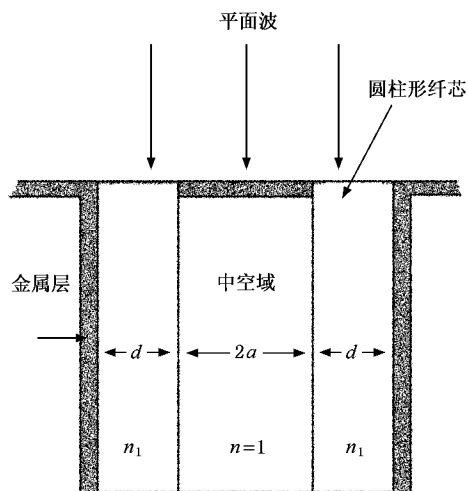


图 1 中空光纤示意图

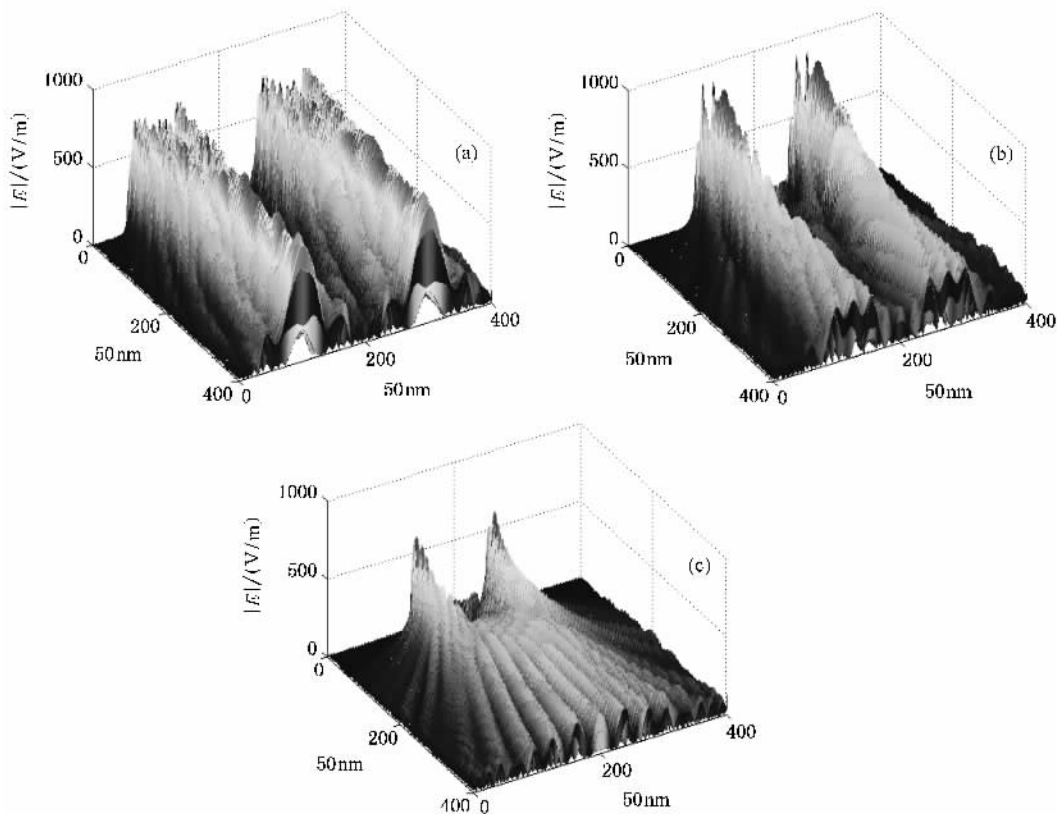


图 2 (a)  $d=5.0 \times 10^3$  nm  $2a=5.0 \times 10^3$  nm 近场电场强度模的三维分布 (b)  $d=2.5 \times 10^3$  nm  $2a=5.0 \times 10^3$  nm 近场电场强度模的三维分布 (c)  $d=1.0 \times 10^3$  nm  $2a=5.0 \times 10^3$  nm 近场电场强度模的三维分布

内外圆柱面的距离  $d$ , 相对折射率  $n_1 = 1.45$ , 并设纤芯外层为金属. 假设波长  $\lambda = 500 \text{ nm}$  的单色平面波垂直入射到光纤界面上, 假设图中灰色区域均为金属层(如银).

通过 FDTD 方法, 可以求出光纤头外附近任意剖面的电场强度模在某一时刻的空间分布. 图中水平方向的两个坐标轴每一个单位表示  $50 \text{ nm}$ . 图 2 (a)(b)(c) 是光纤纤芯的径向尺寸  $d$  分别为  $5.0 \times 10^3 \text{ nm}$ ,  $2.5 \times 10^3 \text{ nm}$ ,  $1.0 \times 10^3 \text{ nm}$  时, 光纤头外附近(三幅图中的水平平面反映的区域)的电场强度模的空间三维分布. 从图 2(a)–(c) 可看出光纤纤芯的径向尺寸  $d$  越小, 光纤头外附近出现的暗斑的区域越小, 说明衍射效应越明显. 图 2(a) 中距离光纤头  $2.0 \times 10^4 \text{ nm}$  处在光束的中间仍会出现明显的暗斑, 图 2(b) 中距离光纤头  $1.5 \times 10^4 \text{ nm}$  处在光束的中间的暗斑变得更加模糊, 图 2(c) 中距离光纤头  $5.0 \times 10^3 \text{ nm}$  处在光束的中间暗斑便消失.

为此, 要获得大范围且尺寸较小的暗中空光束的暗斑, 必须保证光纤纤芯的径向尺寸(即  $d$  的值)为一个较大的值, 而后再适当减小光纤中空区域的

径向尺寸(即减小  $2a$  的值). 如图 3(a)–(d), 是当  $d = 7.5 \times 10^3 \text{ nm}$ ,  $2a = 50 \text{ nm}$  时, 轴心的截面上距光纤头四个不同距离处交线上电场强度模的空间分布. 此时, 可以在光纤头近场区出现尺寸为  $10^1 \text{ nm}$  量级大小的暗斑(与光纤中空区域的径向尺寸相当). 从图 3(a) 可以看出, 在外部到光纤头距离为  $50 \text{ nm}$  的地方, 中心区域与周围区域的电场强度模平均值之比近似为  $7.5:1$ , 相应的光强之比为  $56.25:1$ , 说明此距离处中心会出现暗中空光束; 从图 3(b) 可知, 在外部到光纤头距离为  $1.0 \times 10^2 \text{ nm}$  的地方, 中心区域与周围区域的电场强度模平均值之比近似为  $5.5:1$ , 相应的光强之比为  $30.25:1$ , 说明此距离处中心也会出现暗中空光束; 而从图 3(c) 可知: 在外部到光纤头距离为  $5.0 \times 10^2 \text{ nm}$  的地方, 中心区域与周围区域的电场强度模平均值之比近似为  $3:1$ , 相应的光强之比为  $9:1$ , 说明此距离处中心会仍出现暗中空光束, 只是光束质量下降; 从图 3(d) 可知: 在外部到光纤头距离为  $2.5 \times 10^3 \text{ nm}$  的地方, 中心暗斑消失. 同时, 从四个分布图也可以看出: 随着外部到光纤头的距离增大, 中心暗斑处的光也在变强. 因此要

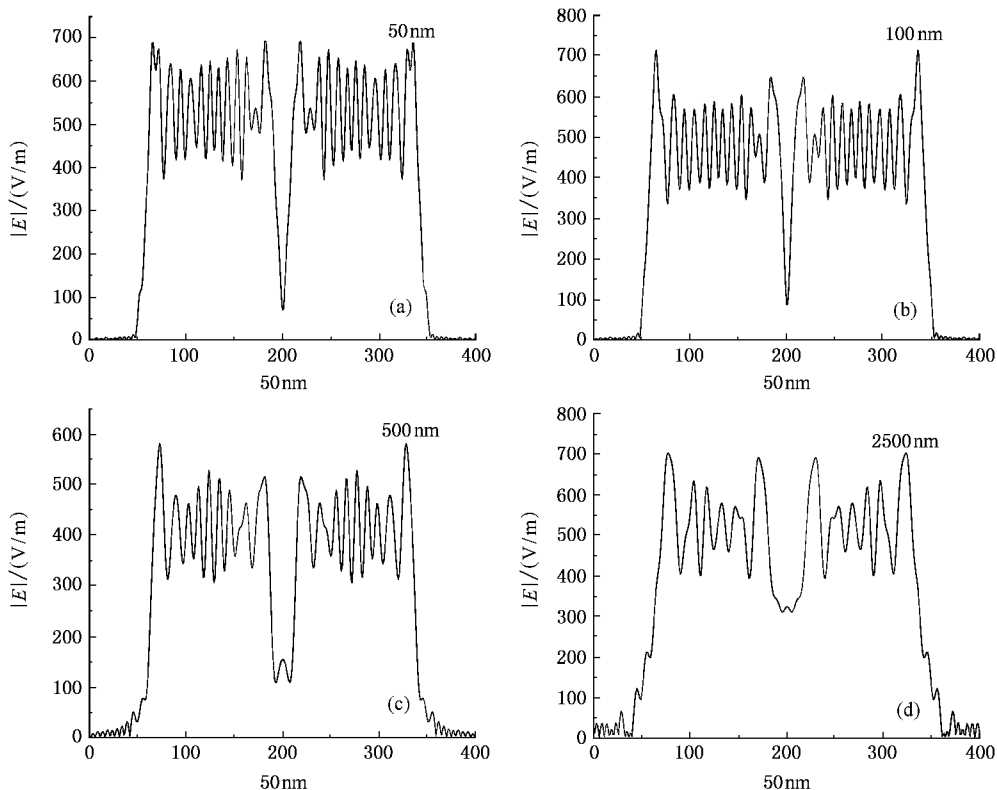
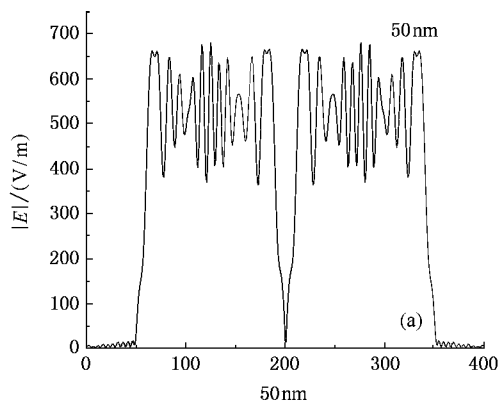


图 3 (a) 轴心的截面上距光纤头  $50 \text{ nm}$  交线上电场强度模的空间分布 (b) 轴心的截面上距光纤头  $1.0 \times 10^2 \text{ nm}$  交线上电场强度模的空间分布 (c) 轴心的截面上距光纤头  $5.0 \times 10^2 \text{ nm}$  交线上电场强度模的空间分布 (d) 轴心的截面上距光纤头  $2.5 \times 10^3 \text{ nm}$  交线上电场强度模的空间分布

想得到比较理想的暗中空光束,必须在光纤头附近的区域,而且距离越近,暗中空光束的质量越高。

然而,尽管是在 50 nm 的地方,中心暗斑处的背景光仍然较强。为了减小背景光的影响,将光纤的空



心填充为金属(如银)可采用将金属蒸发浸润方法实现)。图 4(a)(b)分别为距光纤头距离为 50 nm 和 100 nm 的地方电场强度模的空间分布( $d$  和  $2a$  的取值与图 3(a)~(d)中相同),将两图与图 3(a)和图

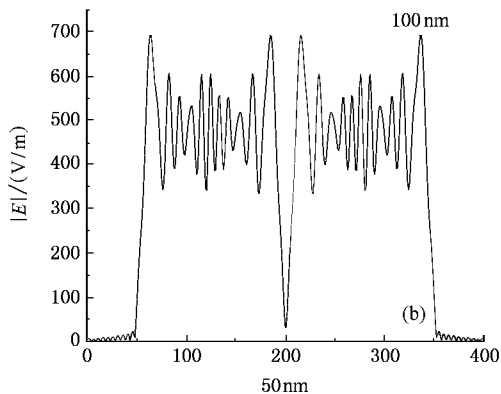


图 4 (a) 轴心的截面上距光纤头 50 nm 交线上电场强度模的空间分布 (b) 轴心的截面上距光纤头  $1.0 \times 10^2$  nm 交线上电场强度模的空间分布

3(b) 进行比较发现:前者中心暗斑的背景光明显降低,在 100 nm 以内区域,可获得较为理想的暗中空光束。

## 4. 结 论

本文考察单色平面波垂直入射到一段中空光纤后,使用时域有限差分法,给出光纤头外部近场区的空间的电场强度模的空间分布。在此过程中,对光纤纤芯分别取不同尺寸时,对光纤头外部近场区光场强度的影响,于是得到:光纤纤芯尺寸越小,出现暗中空光束范围越小。因此,要想得到较大范围的暗中空光束,必须增加光纤纤芯尺寸,减小纤芯中光的衍射效应。并且,又对光纤纤芯尺寸取较大值  $d = 3.75 \times 10^3$  nm 和光纤中空区域尺寸取较小值  $2a = 50$  nm

时的情况进行讨论,由此可得:在大约几百个纳米范围内,可以出现暗中空光束,并且在光纤头外部附近可以出现与光纤中空区域尺寸大小相当的暗斑( $10^1$  nm 量级)。但是,光束由于从光纤中空区域漏出一部分光,在外部近场区会带来一定背景光,从而使近场附近的暗中空光束质量下降。为此,将光纤的空心设计为金属填充(如银)。比较发现:前者此时中心暗斑的背景光明显减弱,在上百个纳米以内区域,可获得较为理想的暗中空光束。当然,如果进一步减小光纤空心的尺寸,在外部近场区可获得暗斑更小甚至达到 nm 量级的暗中空光束。用 FDTD 进行讨论方便快捷,避免使用瑞利-索末菲衍射理论的复杂理论计算。讨论的结果也为获得一种 nm 量级的暗中空光束提供一种方法,同时也为真正实现对个别原子的操纵和控制提供一种手段。

[1] Liu N C, Yin J P 2002 *Chin. J. Quantum Electron* **19** 385 (in Chinese) 刘南春、印建平 2002 量子电子学报 **19** 385

[2] Ni Y, Yin J P 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 131 (in Chinese) 倪、印建平 2006 物理学报 **55** 131

[3] Yin J P, Gao W J 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 4157 (in Chinese) 印建平、高伟建 2004 物理学报 **53** 4157

[4] Ji X M, Yin J P 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 4163 (in Chinese) 纪宪明、印建平 2004 物理学报 **55** 4163

[5] Yin J P, Gao W J, Wang H F, Long Q, Wang Y Z 2002 *Chin. Phys.* **11** 1157

[6] Yin J P, Gao W J, Wang Y Z, Zhu Y F, Wang Y Q 2000 *Chin. Phys.* **9** 347

[7] Yin J P, Wang W, Zhu Y, Wang Y, Jhe W 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 25

[8] Ito H, Sakaki K, Jhe W, Ohtsu M 1997 *Phys. Rev. A* **56** 712

[9] Power W L, Allen L, Babiker M, Lembessis V E 1995 *Phys. Rev. A* **52** 479

[10] Lee H S, Stewart B W, Choi K, Fienichel H 1994 *Phys. Rev. A* **49** 4922

- [ 11 ] Heckenberg N R , McDuff R , Smith C P , White AG 1992 *Opt. Lett.* **17** 221
- [ 12 ] Wang X , Littman M G 1993 *Opt. Lett.* **18** 767
- [ 13 ] Mamaev A V , Saffman , M Zozulya A A 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 4544
- [ 14 ] Shin Y , Kim K , Kim J A , Noh H R , Jhe W , Oh K , Paek U C 2001 *Opt. Lett.* **26** 119
- [ 15 ] Ito H , Sakaki K , Nakata T , Jhe W , Ohtsu M 1995 *Opt. Commun.* **115** 57
- [ 16 ] Yin J , Noh H , Lee K , Kim K , Wang Y , Jhe W 1997 *Opt. Commun.* **138** 287
- [ 17 ] Zhou Q , Zhu X , Li H F 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 210 ( in chinese ) [ 周 庆、朱 星、李宏福 2000 物理学报 **49** 210 ]
- [ 18 ] Wang Z Y , Li Q , Zhao J , Guo J H 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 1959 ( in Chinese ) [ 王子洋、李 勤、赵 钧、郭继华 2000 物理学报 **49** 1959 ]
- [ 19 ] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* AP-14 302

## A method of acquiring a dark hollow beam of nanometer level<sup>\*</sup>

Yan Chang-Chun<sup>1)†</sup> Xue Guo-Gang<sup>1)</sup> Liu Cheng<sup>1)</sup> Chen Hao<sup>1)</sup> Cui Yi-Ping<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Physics , Xuzhou Normal University , Xuzhou 221116 , China )

<sup>2)</sup> Department of Electronic Engineering , Southeast University , Nanjing 210096 , China )

( Received 12 March 2006 ; revised manuscript received 13 April 2006 )

### Abstract

By using the finite difference time-domain ( FDTD ) method , the distribution of the modulus of the electric field intensity is obtained in the near field of an optical fiber head. We found that different dimensions of the cylindrical core in a hollow optical fiber had an influence on the electric field intensity. It is concluded that the size of the cylindrical core must be increased to make the hollow beam to cover a larger area. At the same time , after discussing the two situations that the size of the hollow optical fiber either rather large or rather small , we obtained a dark spot in the near field of the fiber that was almost of the same size as the hollow region ( 10 nanometer level ). However , the background light in the dark hollow beam was brighter , and so the hollow region was designed to be a metal ( such as silver ). We found that the background light in the dark spot became evidently weaker and a cleaner dark hollow beam was acquired in the near field. When the hollow region was made smaller , the dark spot in the near field would become smaller , even reaching the nanometer level , which offered a method of obtaining a dark hollow beam of nanometer level.

**Keywords :** FDTD , hollow optical fiber , dark hollow beam , nanometer level

**PACC :** 3280P

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Educational Committee ( Grant No. 04KJD140196 ) and by the Natural Science Foundation of Xuzhou Normal University ( Grant No. 04XLB09 ).

<sup>†</sup> E-mail : yancc@xznu.edu.cn.