

电流孔的尺寸对双氧化限制垂直腔面 发射激光器阈值的影响^{*}

赵红东[†] 张卫华 李文超 刘会丽 孙 梅

(河北工业大学信息工程学院, 天津 300401)

(2008 年 9 月 14 日收到; 2010 年 1 月 21 日收到修改稿)

通过双氧化限制垂直腔面发射激光器中电场、载流子密度、光场和热场空间耦合方程自洽数值求解, 研究了垂直腔面发射激光器中阈值特性. 得到了氧化层及有源区附近的电势, 模拟电流孔的边缘效应, 给出了不同双氧化限制电流孔半径下阈值电流密度、载流子密度、基模光场和热场的空间分布. 发现了实现最小阈值电流的最佳限制电流孔半径, 进而设计了双氧化限制垂直腔面发射激光器的结构.

关键词: 双氧化限制垂直腔面发射激光器, 自洽, 阈值

PACC: 4260, 4255P, 0365, 7360

1. 引 言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 与边发射激光器相比具有极低的阈值、较小的远场发散角、调制频率高、易实现双纵模工作和二维集成、不必解理就能完成工艺的制作和检测等优点, 在光纤通信、光互连、并行光信号处理、光集成元件等方面有着广泛的应用^[1-5].

自 Soda 等^[1] 提出制作 VCSEL 的设想以来, 对这种激光器的研究已取得了很大的进展, 报道了相关的理论模型来分析质子轰击型 VCSEL 的电、光、热特性^[5], 但忽略了 n 型分布布拉格反射镜 (DBR) 和衬底对 VCSEL 电势特性的影响, 这就必然会引起误差. 文献[5, 6] 指出, 高阻区限制电流孔的半径增大, 阈值电流、载流子扩展变宽, 因此制约了激光器阈值的降低, 但是并没有说明很小孔径对器件是否产生不利的影响, 更没有指出最佳阈值的范围. 文献[7] 研究了电注入参数对弱折射率导引 VCSEL 横模行为的影响, 文献[8] 研究了电流空间分布对激光近场模式的影响, 但没有考虑热场特性. 人们注重质子轰击 VCSEL 光电热的研究, 但对双氧化层 VCSEL 的仿真较少. 文献[9] 报道了阈值存在局部

极小值, 但阈值电流仍然随孔径减小而下降. 我们使用有限差分法对 Poisson 方程、载流子密度和光场方程自洽求解, 发现忽略下 n 型 DBR 会影响质子轰击型 VCSEL 的仿真结果^[10]. 本文在文献[10] 的基础上, 研究了双氧化限制 VCSEL 的阈值电流随氧化限制电流孔半径的变化, 发现过小和较大电流孔半径都不利于激光器达到最低阈值电流和最低阈值功率.

2. 理论模型

选择图 1 所示典型的双氧化限制 VCSEL 的结构, n 型 DBR 和 p 型 DBR 分别由 30 和 20 个周期的 AlAs/Al_{0.16}Ga_{0.84}As 组成, 3 个 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 应变量子阱夹在 Ga_{0.5}Al_{0.5}As 中间组成有源区, 阱和垒的厚度分别为 8 和 10 nm, 所有以上各层生长在 n⁺-GaAs 衬底上. 双氧化层在 p 型 DBR 和 n 型 DBR 中形成高阻区限制电流扩展, 在有源区中形成增益区. 激光从顶部沿一个圆形窗口出射, w 是输出光窗口半径, s 是双氧化限制电流孔的半径.

在 VCSEL 中电势 V 分布满足柱坐标系下的 Poisson 方程, 即

$$\frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

^{*} 河北省自然科学基金 (批准号: F2007000096) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070080001) 资助的课题.

[†] E-mail: zhaohd3000@sina.com.cn

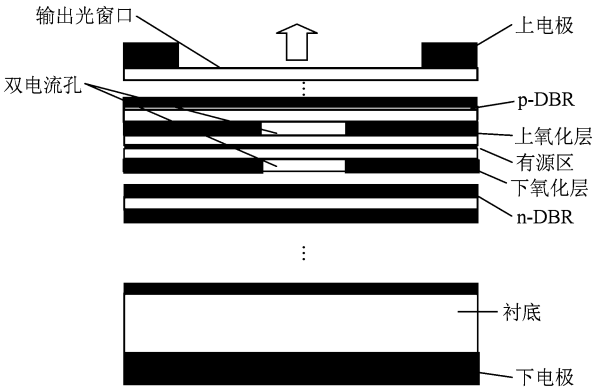


图 1 双氧化限制 VCSEL 结构示意图

我们同时考虑了 p 型 DBR 和 n 型 DBR 及衬底中的电势,由方程(1)和边界条件可以确定电势,由此求出注入电流密度为

$$\mathbf{J}(r,z) = -\sigma_{\text{act}} \nabla V(r,z), \quad (2)$$

其中 σ_{act} 表示有源区的电导率。

载流子密度分布对增益半导体激光器的性质起着重要的作用,根据电子和空穴连续性方程,稳态时 VCSEL 有源区的非平衡载流子密度 N 应满足

$$D_n \left[\frac{\partial^2 N(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial N(r)}{\partial r} \right] - BN^2(r) - \frac{N(r)}{\tau} - \frac{g(N(r))P_a |\bar{E}_t|^2}{h\nu} + \frac{J}{ed} = 0, \quad (3)$$

其中 D_n, B, τ 和 d 分别为扩散系数、自发发射系数、载流子寿命和有源层厚度, $g(N(r))$ 为腔增益, P_a 为腔内平均光功率。

在柱坐标系中半导体激光器径向光场强度 ψ 应满足

$$\frac{\partial^2 \psi(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} + \left(k_0^2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \frac{m^2}{r^2} - \beta_z^2 \right) \psi(r) = 0. \quad (4)$$

VCSEL 中稳态热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,z)}{\partial z^2} + \frac{1}{\kappa_i} Q_i = 0, \quad (5)$$

其中 Q_i 表示有源区、p 型 DBR 和 n 型 DBR 及衬底中的热流密度。

3. 计算方法及结果

采用有限差分法和矩阵特征值法求解以上方

程的自洽解. 首先通过有限差分法把方程(1), (3)—(5)离散化,再把方程(4)转化成求解代数特征值的问题,通过自洽计算得到稳定解. 计算中所用物理参数如下:p 型 DBR 电导率和 n 型 DBR 电导率分别为 $4.348 \times 10^2 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$, $3.13 \times 10^4 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$, 自发发射内量子效率和受激发射内量子效率分别为 0.5 和 0.9,其他参量取值同文献[5,10].

图 2 为同时考虑 p 型 DBR 和 n 型 DBR 时双氧化限制 VCSEL 中的等势线,电势线疏密程度表示了流过电流的大小,其中氧化限制电流孔的半径分别为 0.6, 1.2, 3 和 6 μm . 由于双氧化层靠近有源区,所以图 2 只绘制出氧化层和有源区附近的电场. 由图 2 可以看出,随着氧化限制电流孔半径的减小,器件的电阻增加,需要阈值电压增加,并且在双氧化限制孔附近电势变化较大,因此小电流孔径 VCSEL 中,在电流孔附近的电势成为电源电压的主要部分. 当电流孔半径接近 1 μm 时,上氧化层电流孔附近的电势变化缓慢,限制层下面 p 型半导体材料的电势成为承担电源电压主要部分. 从我们的模拟结果可以看出,下氧化层同样存在的电势,对电流等参量有一定的影响。

图 3—图 5 给出了双氧化限制电流孔半径分别为 0.6, 1.2, 3 和 6 μm 的阈值电流密度 J_{th} 、有源区载流子密度 N_{th} 和基模光场 ψ_{th} 的空间分布. 有源区中的载流子沿径向扩散,从而形成的增益波导为激光模式提供了必要的条件,同时电流和激光产生热量,引起的温度场向外扩散. 另一方面,载流子和温度的扩散影响电势和光场,它们相互依赖并在有源区内耦合. 从电极流出的电流经过 p 型 DBR 后,通过氧化限制孔向下扩展流向有源区. 相对于质子轰击型 VCSEL 而言,由于双氧化限制 VCSEL 中氧化层只有 1/4 波长的厚度,并且靠近有源区,因此电流扩展远远小于质子轰击型 VCSEL,并且电流流过氧化限制电流孔的长度变短,降低了整体电阻,提高注入电流的效率. 同时质子轰击型 VCSEL 中电流的最大值一般出现在轴心区域,而双氧化限制 VCSEL 中电流最大值出现在氧化限制孔边缘. 这是由于边缘区域电流涌向氧化限制孔时,氧化层靠近有源区,其距离小于电流的扩散长度,因此导致边缘区域电流增加。

随着双氧化限制电流孔半径的增大,可以在较大的区域内提供 VCSEL 阈值需要的电流,因此降低了阈值电流密度的最大值,但是由于不同电流孔半

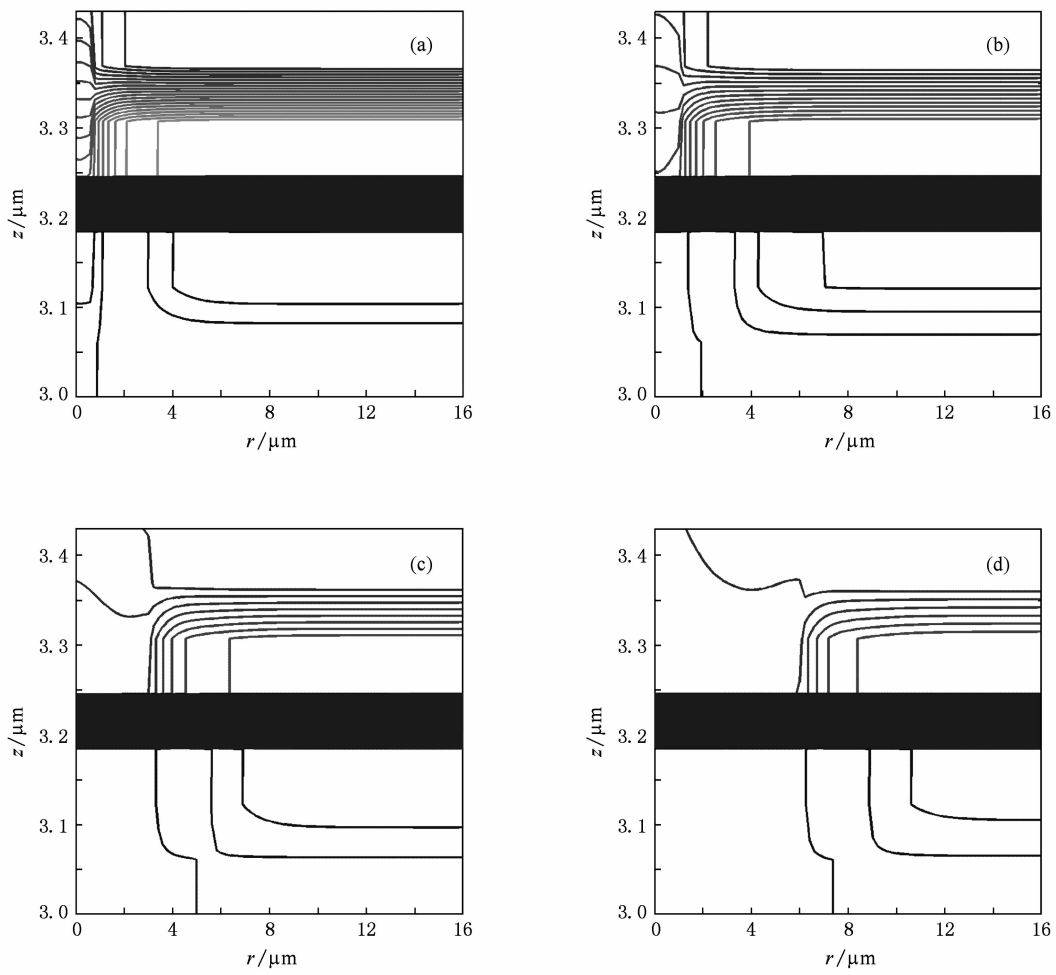


图2 双氧化限制 VCSEL 阈值时的电势分布 (a) $s=0.6\text{ }\mu\text{m}$, (b) $s=1.2\text{ }\mu\text{m}$, (c) $s=3\text{ }\mu\text{m}$, (d) $s=6\text{ }\mu\text{m}$

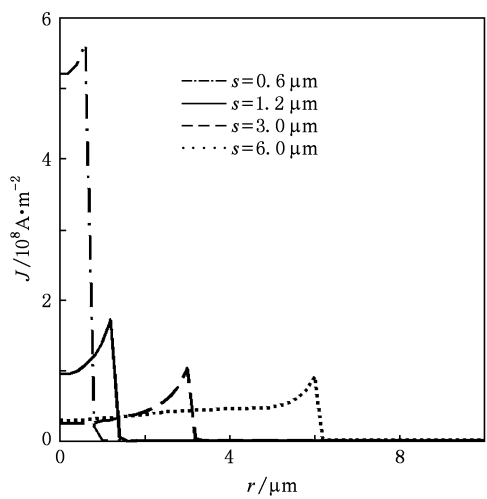


图3 不同双氧化限制电流孔半径下 VCSEL 阈值时的电流密度

径下 VCSEL 所需的阈值电流不同, 阈值电流密度的最大值并非是单调地下降. 当双氧化限制电流孔的半径较小时, 电流主要集中在电流孔附近, 载流子

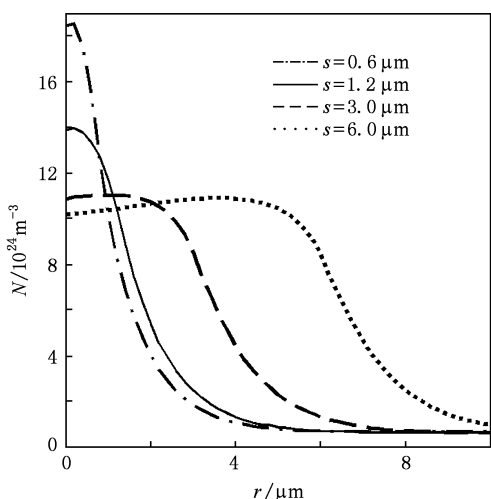


图4 不同双氧化限制电流孔半径下 VCSEL 阈值时的载流子密度

扩散的结果使得轴心区域的载流子密度最大. 当双氧化限制电流孔的半径较大时, 电流峰值远离轴心

区域,载流子向轴心扩散的同时还向边沿扩散,因此载流子极大值并非在轴心区域.载流子提供了增益波导,电流和载流子的扩展引起基模变宽(图 5).

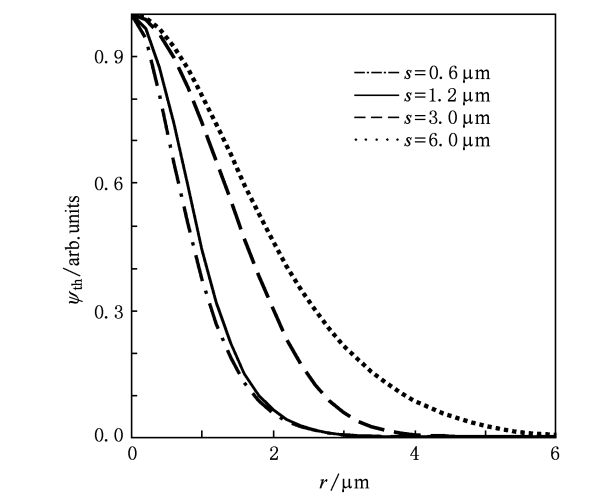


图 5 不同双氧化限制电流孔半径下 VCSEL 阈值时的基模光场

光场的空间扩展受到载流子的限制,同时光场也要满足自身规律,因而光场会影响载流子的分布.只有载流子与光场的空间分布达到一致,才能降低阈值电流.过小的双氧化限制电流孔(半径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$),电流分布区域小于光场,而双氧化限制电流孔较大的 VCSEL 中(例如半径大于 $3\text{ }\mu\text{m}$),电流空间分布区域大于光场,并且载流子的极大值并没有在轴心区域,因此过大和过小的电流孔都不会使光电达到很好的耦合.减小电流孔径提高耦合效率的观点已经被文献[5,6]论证,但是从上面分析可以看出,并不是减小氧化限制电流孔的半径阈值电流会永远降低,必然存在一个最佳的电流控制范围.图 6 和图 7 分别给出了不同双氧化限制电流孔半径的阈

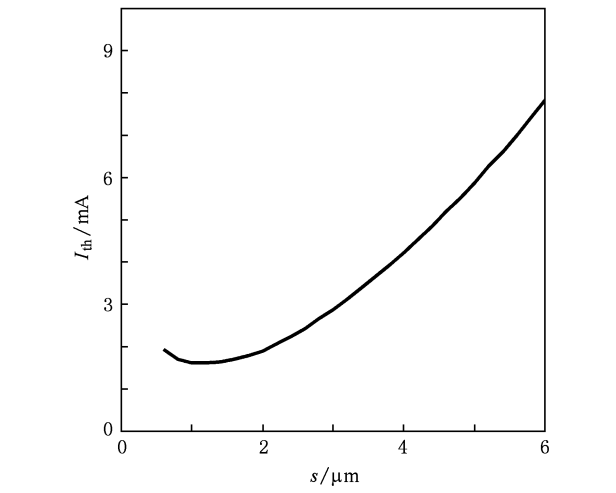


图 6 不同双氧化限制电流孔半径的 VCSEL 阈值电流

值电流 I_{th} 和阈值功率 $W_{th} = I_{th} \times V_{th}$ (其中 V_{th} 为阈值电压),表明最佳双氧化限制电流孔半径应该在 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右.

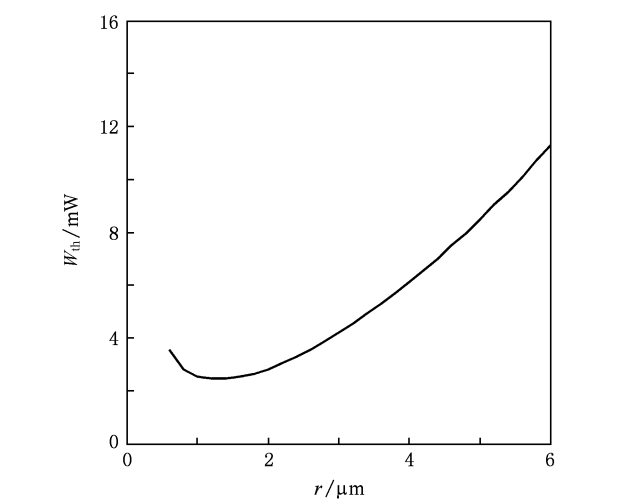


图 7 不同双氧化限制电流孔半径的 VCSEL 阈值功率

电流是产生热量的主要途径,会导致半导体激光器温度升高,半导体芯片中的热量可以通过传入热沉和空气中并达到动态平衡.大面积存在电流必然会产生很多热量,由此导致器件温度上升,同时局部的电流增加同样也可以使该区域的热量不能有效地散发.大电流孔径下激光器需要高电流才能达到阈值,因此产生的温升高;对于较小电流孔径的双氧化限制 VCSEL,由于电流扩展与载流子扩展区域存在偏差,激光器激射时需要局部的电流密度会增加,导致 VCSEL 阈值时的中心区域温度上升(图 8).从以上分析可以看出,当 VCSEL 最佳限制电流孔径时,需要的阈值电流最小,并且有效地集

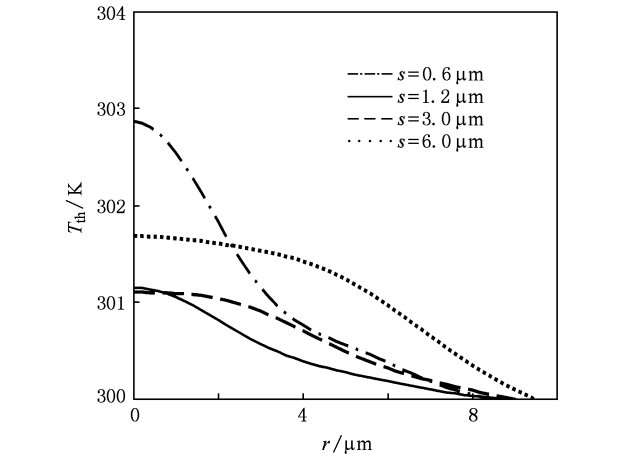


图 8 不同双氧化限制电流孔半径下 VCSEL 阈值时的有源区温度

中在轴心区域,电流引起的器件有源区的温度上升较低.

4. 结 论

通过光电热空间耦合仿真,设计了双氧化限制

VCSEL 的阈值,论证了不同双氧化限制电流孔径对 VCSEL 阈值的影响.研究表明,过大和过小的双氧化电流孔都不利于降低激光器的阈值,氧化限制电流孔的半径在 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近,激光器的基模阈值接近 $2\ \text{mA}$,阈值功耗为 $3.8\ \text{mW}$.

- [1] Soda H, Iga K, Kitahara C, Suematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329
- [2] Zhao H D, Zhu X G, Zhang Y M 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1
- [3] Ronald G, Warrn H E, Choquette K D 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 607
- [4] Wang T X, Guan B L, Guo X, Shen G D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1694 (in Chinese) [王同喜、关宝璐、郭霞、沈光地 2009 物理学报 **58** 1694]
- [5] Zhao Y G, Zhang Y S, Huang X L 1999 *Chin. J. Semicond.* **20** 963 (in Chinese) [赵一广、张宇生、黄显玲 1999 半导体学报 **20** 963]
- [6] Liu S A, Lin S M, Kang X J, Cheng P, Lu J Z, Wang Q M 1999 *Chin. J. Semicond.* **20** 1034 (in Chinese) [刘世安、林世鸣、康学军、程澎、陆建祖、王启明 1999 半导体学报 **20** 1034]
- [7] Cai L G, Wu J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3531 (in Chinese) [蔡鲁刚、吴坚 2008 物理学报 **57** 3531]
- [8] Yang H, Guo X, Guan B L, Wang T X, Shen G D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2959 (in Chinese) [杨浩、郭霞、关宝璐、王同喜、沈光地 2008 物理学报 **57** 2959]
- [9] Robert P S 2007 *Semicond. Sci. Technol.* **22** 113
- [10] Zhao H D, Song D Y, Zhang Z F, Sun J, Sun M, Wu Y, Wen X R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3744 (in Chinese) [赵红东、宋殿友、张智峰、孙静、孙梅、武一、温幸饶 2004 物理学报 **53** 3744]

Influence of current aperture size on threshold in double oxide confined vertical-cavity surface-emitting lasers^{*}

Zhao Hong-Dong[†] Zhang Wei-Hua Li Wen-Chao Liu Hui-Li Sun Mei

(College of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(Received 14 September 2008; revised manuscript received 21 January 2010)

Abstract

In this paper, the coupling equations for electric field, carrier density, optical-field and temperature are simulated self-consistently in double oxide confined vertical cavity surface emitting laser therefore the characteristics threshold are studied. The potentials near the oxide layers and the activity region are obtained and the effect of current aperture edge is simulated. The distributions of threshold injected current density, carrier density, fundamental mode and temperature for different radii of double oxide confined current aperture are obtained. An appropriately confined radius of current aperture for minimum threshold injected current is found, and the structure of vertical cavity surface emitting laser is designed.

Keywords: double oxide confined vertical-cavity surface-emitting laser, self-consist, threshold

PACC: 4260, 4255P, 0365, 7360

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2007000096) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant No. 20070080001).

[†] E-mail: zhaohd3000@sina.com.cn