

# 全反射镜结构对 AlGaInP 发光二极管 发光效率的影响\*

孙 昊<sup>†</sup> 韩 军 李建军 邓 军 邹德恕 宋小伟 宋欣原 沈光地

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022)

**摘要:** 采用计算机模拟的方法, 计算了 SiO<sub>2</sub>/Al, ITO/Al, SiO<sub>2</sub>/Au 和 ITO/Au 全方位反射镜结构和分布式布拉格反射镜的反射特性. 用 PECVD 和溅射设备制作了 Glass/SiO<sub>2</sub>/Au 结构, 用 LP-MOCVD 生长了 DBR 结构, 并测量了其反射特性, 实验与模拟结果基本吻合. 从模拟和实验的结果得到, SiO<sub>2</sub>/Au ODR 结构在波长为 630nm 的垂直入射光下反射率很高, 达到 91% 以上. 对于不同角度的入射光, SiO<sub>2</sub>/Au 在 20°~85° 都有很高的反射率, 远高于 DBR 结构的反射率. 在实际器件测试中, ODR 结构的 AlGaInP 红光 LED 比无 DBR 结构的 LED 提高了 115%, 比 DBR 结构的 LED 提高了 28%. 这说明, ODR 结构与 DBR 结构相比可以大幅提高红光 LED 的出光效率.

**关键词:** 全方位反射镜; 模拟计算; 发光二极管  
EEACC: 4260D

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)12-1952-05

## 1 引言

近几年, AlGaInP 高亮度发光二极管 (light emitting diode, LED) 得到了广泛的应用, 在各种显示系统、照明系统、汽车尾灯等领域起着越来越重要的作用<sup>[1,2]</sup>. 以 (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P 材料作为有源区的 LED 具有较高的内量子效率<sup>[3]</sup>. 对于传统设计的 LED 来说, 有很多因素限制它的外量子效率: 内部的全反射、金属电极的阻挡、GaAs 等半导体材料对光的吸收. 这些 LED 生长在 GaAs 衬底上, 而最终有很大一部分光被衬底吸收. 所以对于这种传统的 LED 结构而言, 即使内部的光电转化效率很高, 它的外量子效率也不会很高. 当前有很多种方法来提高 LED 出光的提取效率, 如加厚窗口层、表面粗化、透明衬底、倒金字塔结构等.

在这些提高提取效率的方法中, 全方位反射镜 (omni-directional reflector, ODR) 结构以其独有的特点引起了更多的关注. 一般而言, ODR 结构是由半导体、低折射率的电介质和具有复折射率的金属组成<sup>[4]</sup>. 相对于透明衬底 LED (transparent substrate LED, TS-LED) 的制造工艺复杂、量产困难和

成本高<sup>[5]</sup>, ODR 的制造过程相对简单. 而相对于分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 而言, DBR 的反射率会受到入射角度的影响. 而 ODR 反射率对入射角的要求便没有那么苛刻, 它在 0°~85° 的范围内反射率都很高<sup>[4]</sup>, 而且 ODR 可以选择电介质、金属层的种类较多.

本文便是利用计算机模拟, 计算了 SiO<sub>2</sub>/Al、镉锡氧化物 (indium tin oxide, ITO)/Al, SiO<sub>2</sub>/Au 和 ITO/Au ODR 结构以及 DBR 结构的光谱特性, 并比较了不同结构 ODR 的优劣和其适用范围, 得出适合于 AlGaInP 材料红光 LED 的 ODR 结构. 用 PECVD 和溅射设备制作了 Glass/SiO<sub>2</sub>/Au ODR 结构, 用 LP-MOCVD 制备了 DBR 结构, 测量其反射特性, 得到了 ODR 结构反射率高于 DBR 结构的结论.

## 2 计算模型

利用干涉矩阵<sup>[6]</sup>  $M$ , 可以计算得到结构的反射率  $R$ .

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta_r & j\sin\frac{\delta_r}{\eta_r} \\ j\eta_r\sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

\* 北京市科委重点项目 (批准号: D404003040221), 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB604902), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03A121), 国家自然科学基金 (批准号: 60407009), 北京市自然科学基金 (批准号: 4032007) 和北京工业大学第五届研究生科技基金资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: ssd1929@gmail.com  
2007-06-07 收到, 2007-08-07 定稿

其中 薄膜的相位厚度  $\delta_r = \frac{2\pi}{\lambda} \eta_r d_r \cos\theta_r$ ; 对于 P 偏振  $\eta_{rp} = n_r / \cos\theta_r$ , 对于 S 偏振  $\eta_{rs} = n_r \cos\theta_r$ ;  $n$  为折射率;  $\theta$  为入射角.

对于多层膜系统而言, 我们只要把上式的  $M$  连乘即可得到反射率  $R$ .

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \times \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (2)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_r & j\sin\frac{\delta_r}{\eta_r} \\ j\eta_r \sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $\eta_0$  为入射介质的修正的光学导纳,  $\eta_{k+1}$  为出射介质的修正的光学导纳.

应用此模型时, 需要知道每层材料的  $n, k$ , 厚度  $d$  和入射光的角度. 其中, 要注意的是  $n$  和  $k$  均为入射波波长的函数, 对于电介质  $k = 0$ .

### 3 ODR 的结构设计和模拟计算

我们设计了  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$ ,  $\text{ITO}/\text{Au}$  结构的 ODR. Al 层和 Au 层的厚度均为 300nm, 通过计算可知在这样的厚度下, 反射率将不再因金属层厚度的变化而变化. 因为当金属层厚度达到一定值后, 由于金属对光的吸收, 从电介质/金属界面入射的光, 将会在金属体内消失, 而不会再反射出来.  $\text{SiO}_2$  和 ITO 的厚度, 要先计算电介质/金属界面的反射光相移, 之后再计算光程, 方可得出相应的厚度.  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  中的  $\text{SiO}_2$  厚度为 308nm,  $\text{ITO}/\text{Al}$  中的 ITO 厚度为 154nm,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  中的  $\text{SiO}_2$  厚度为 290nm,  $\text{ITO}/\text{Au}$  中的 ITO 厚为 137nm. 入射介质均为玻璃.

通过计算机模拟计算出  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$ ,  $\text{ITO}/\text{Au}$  结构的 ODR 的光谱特性. 其中, 玻璃的  $n = 1.52$ ;  $\text{SiO}_2$  在 630nm 处  $n = 1.45$ ; ITO 在 630nm 处  $n = 1.860, k = 0.057$ ; Al 在 630nm 处  $n = 1.38, k = 7.65$ ; Au 在 630nm 处  $n = 0.18, k = 3.07$ . 如图 1, 共有 4 条曲线, 分别为  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  和  $\text{ITO}/\text{Au}$  结构的 ODR 结构的反射率随入射波长的变化曲线. 从图中看到,  $\text{ITO}/\text{Au}$  在入射光波长为 400~500nm 时, 反射率在 10% 左右, 当入射光波长为 550~750nm 时, 反射率为 65% 左右.  $\text{ITO}/\text{Al}$  结构, 在整个入射光波长 400~750nm 的范围内, 反射率为 50%~65%. 当铜锡氧化物 (ITO) 作为电介质层时, 反射率普遍不理想. 而对于  $\text{SiO}_2$  作为电介质层的 ODR 结构,  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  在 400~550nm 范围内有接近于 90% 的反射率, 而在 550~780nm 范围内反射率略有下降;  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  结

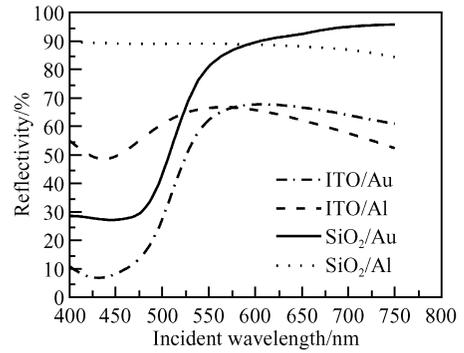


图 1 模拟的  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  和  $\text{ITO}/\text{Au}$  ODR 结构的反射率随入射波长的变化

Fig. 1 Simulated reflectivity spectra as a function of wavelength at the incident angle of zero for  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$ , and  $\text{ITO}/\text{Au}$  ODR

构在 400~500nm 反射率不高, 而在波长为 630nm 处反射率很高, 在 91% 以上. 如图 2, 共有 4 条曲线, 分别为  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  和  $\text{ITO}/\text{Au}$  结构的 ODR 结构的反射率随入射角度的变化.  $\text{ITO}/\text{Al}$  与  $\text{ITO}/\text{Au}$  的反射率相似, 从  $0^\circ$  的 65% 下降到  $78^\circ$  的 45%.  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  在入射光角度为  $0^\circ, 65^\circ$  时保持接近 90% 的反射率, 之后急剧下降, 到  $80^\circ$  时达到最小值 55%, 而  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  结构可以在这个入射角度内保持 90% 以上的反射率. 通过分析我们得到, 与图 1 的情况类似, 当 ITO 作为电介质层时, 反射率普遍不理想. 而以  $\text{SiO}_2$  作为电介质层的反射率要高很多, 其中  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  要比  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  略高, 达到 90% 以上.

### 4 ODR 与 DBR 模拟反射谱的比较

我们设计 DBR 结构, 并用其比较 ODR 的反射谱. DBR 结构采用  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  和 AlAs 材料, 周期

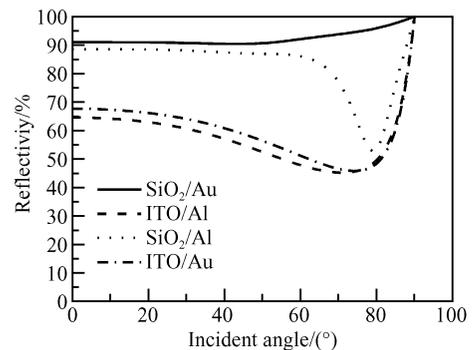


图 2 入射光为 630nm 时, 模拟的  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  和  $\text{ITO}/\text{Au}$  ODR 结构的反射率随入射角度的变化曲线

Fig. 2 Simulated reflectivity spectra as a function of the incident angle of 630nm incident light for  $\text{SiO}_2/\text{Al}$ ,  $\text{ITO}/\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Au}$ ,  $\text{ITO}/\text{Au}$  ODR structure

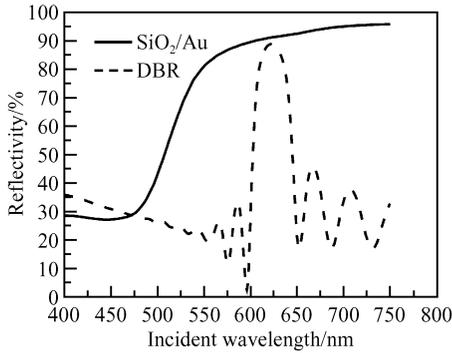


图 3 入射光垂直入射时,模拟的  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR 和 DBR 结构反射率随入射波长的变化

Fig.3 Simulated reflectivity spectra as a function of incident wavelength with zero incident angle for the  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR and DBR structure

为 15 对.衬底为 GaAs,厚度为  $350\mu\text{m}$ .ODR 采用  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  结构,入射介质为玻璃.如图 3 所示,共有两条曲线,分别为  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  结构、DBR 结构的反射率随入射波长的变化,实线为 ODR 的反射特性,虚线为 DBR 反射特性.在入射波长为  $400\sim 470\text{nm}$  时,ODR 和 DBR 的反射率均不高,在 30%左右,只是 DBR 的反射率略高于  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR 结构.在入射波长为  $550\sim 750\text{nm}$  时,DBR 的反射率出现了振荡,在  $550\sim 600\text{nm}$  和  $650\sim 750\text{nm}$  反射率在 2%~44%,在 630nm 附近处达到了最大值 89%.而 ODR 在  $550\sim 750\text{nm}$  的反射率远远高于 DBR 结构.如图 4 所示,共有两条曲线,分别为  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  结构和 DBR 结构的反射率随入射光角度的变化.在  $50^\circ\sim 90^\circ$  时,DBR 的反射率下降到 60%~70%,而 ODR 的反射率仍然在 90%以上.从上面的模拟分析中,我们看出 ODR 结构的反射率无论是垂直入射,还是斜入射都表现出了比 DBR 更好的反射能力.

## 5 材料实验

在这里,制作了  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR 结构.首先用

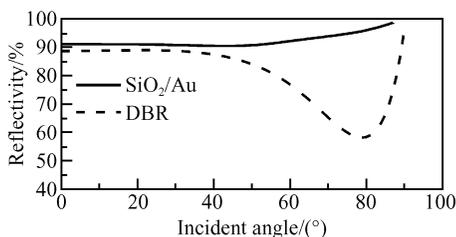


图 4 入射光为 630nm 时,模拟的  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR 和 DBR 结构的反射率随入射角度的变化

Fig.4 Simulated reflectivity spectra as a function of the incident angle of 630nm incident light for  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR and DBR structure

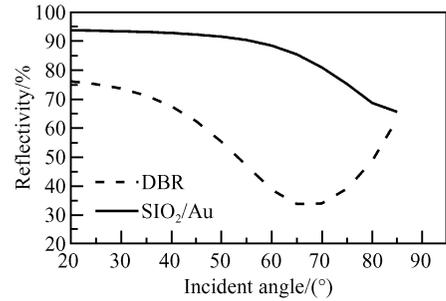


图 5 入射光为 630nm 时, $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR 和 DBR 结构的反射率随入射角度的变化

Fig.5 Experimented reflectivity spectra as a function of the incident angle of 630nm incident light for  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  ODR and DBR structure

Oxford 公司的 Plasmalab 80Plus 在玻璃上生长厚度为 290nm 的  $\text{SiO}_2$ ,之后再用 Denton Vacuum 公司的 Discovery 溅射系统溅射了厚度为 300nm 的 Au 层.同时,我们制作了 DBR,按照第 3 节中结构,用 emcore D125 型 MOCVD 进行生长.反射率随入射角度的变化由 J. A. Woollam 公司的 VB-400 椭圆偏仪测得,测试角度为  $20^\circ\sim 85^\circ$ .

如图 5 所示,并参照图 4,DBR 的模拟数据与实验数据大致相符,只是反射率有所下降,我们认为这是由于在实验结构中增加了  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{InP}$  层所致.DBR 反射率的最大值在入射角为  $20^\circ$  时为 76%,最小值在  $66^\circ$  时为 32%.而对于 ODR 结构,在  $20^\circ\sim 50^\circ$  时,实验数据与模拟数据很吻合,而在  $50^\circ\sim 85^\circ$  时,反射率的实验数据出现了下降,而模拟数据出现了上升.造成不符的原因主要是,模拟的结构与实际的结构略微不同,模拟结构为  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  入射介质为玻璃,而实际结构为  $\text{Glass}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ ,入射介质为 Air,以及溅射金层、退火等工艺的复杂性,导致模拟数据与实验数据的偏差.

## 6 器件实验

根据第 4 节所述的结构,利用 MOCVD 生长了 3 个  $\text{AlGaInP}$  红光 LED 样品.其中样品 1<sup>[7]</sup> 为无 DBR 结构的 LED,样品 2<sup>[7]</sup> 为带有 DBR 结构的样品,样品 3 为带有 ODR 结构的 LED.

ODR 的结构如图 6 所示.首先用 emcore D125 型 MOCVD 设备生长外延片,如图 6(a) 所示.在 GaAs 衬底上生长 50nm 的  $\text{GaInP}$  腐蚀停止层,之后生长 50nm 的 GaAs 层,1000nm  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{InP}$  上、下限制层,最后是 GaP 窗口层.在外延片生长结束后,在 GaP 上用 PECVD 法生长  $\text{SiO}_2$  层,之后光刻并腐蚀出小孔,深度到达 GaP 层,再用 Denton Vacuum 公司的 Discovery 溅射系统溅射 Au 层,最后键合 Si 衬底,如图 6(b) 所示.完成以上步骤之后,

GaP
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
Active Region
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
GaAs
GaNp etching stop layer
GaAs Substrate

(a)

Si substrate
Au
SiO <sub>2</sub>
GaP
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
Active region
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
GaAs
GaNp etching stop layer
GaAs substrate

(b)

GaAs
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
Active region
Al <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> InP
GaP
SiO <sub>2</sub>
Au
Si substrate

(c)

图 6 器件结构图

Fig.6 Structure of the sample LEDs

去掉 GaAs 衬底, 分别在 Si 衬底和上面的 GaAs 层制作电极, 得到最后的器件, 如图 6(c) 所示, 光从 GaAs 层出射.

器件制作完成后, 进行了测试. 如表 1 所示, 在 20mA 的注入电流下, 当主波长约为 620nm, 峰值波长约为 630nm, 裸装在 TO-18 金属管座上时(未封装), 样品 1 的轴向光强为 80.4mcd, 样品 2 的轴向光强为 134mcd, 样品 3 的轴向光强为 172mcd. 这说明带 ODR 结构的 LED 光强比无 DBR 结构的 LED 光强提高了 115%, 比带 DBR 结构的 LED 光强提高了 28%.

表 1 3 种器件未封装时的轴向光强

Table 1 Luminous intensity on axis of the three kind of sample LEDs

器件	样品 1	样品 2	样品 3
轴向光强/mcd	80.4	134	172

## 7 结论

应用计算机模拟的方法, 计算了 SiO<sub>2</sub>/Al, ITO/Al, SiO<sub>2</sub>/Au 和 ITO/Au 全方位反射镜结构和分布式布拉格反射镜的反射特性. 用 PECVD 和溅射设备制作了 Glass/SiO<sub>2</sub>/Au 结构, 用 LP-MOCVD 生长了 DBR 结构, 并测量了反射特性, 实验与模拟结果基本吻合. 从模拟和实验的结果得到, SiO<sub>2</sub>/Au ODR 结构在波长为 630nm 的垂直入射光下反射率很高, 达到 91% 以上. 对于不同角度的入射光, SiO<sub>2</sub>/Au 在 20°~85° 都有很高的反射率, 远高于 DBR 结构的反射率. 在实际器件测试中, 具有 ODR 结构的 AlGaInP 红光 LED 比无 DBR 结构 LED 的光强提高了 115%, 比 DBR 结构 LED 的光强提高了 28%. 这说明, ODR 结构与 DBR 结构相比可以大幅提高红光 LED 的出光效率.

## 参考文献

- [1] Tsao J Y. Solid-state lighting lamps, chips, and materials for tomorrow. IEEE Circuits & Devices Magazine, 2004, 20(3): 28
- [2] Streubel K, Linder N, Wirth A. High brightness AlGaInP light-emitting diodes. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8(2): 321
- [3] Altieri P, Jaeger A, Windisch R. Internal quantum efficiency of high-brightness AlGaInP light-emitting devices. J Appl Phys, 2005, 98, 086101
- [4] Kim J K, Xi J Q, Schubert E F. Omni-directional reflectors for light-emitting diodes. Proc SPIE, 2006: 6134
- [5] Jan Wa, Chen T P, Chang C S. AlGaInP light emitting diode with metal reflector structure. Proc SPIE, 2004, 5366: 62
- [6] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principle of optical films. Beijing: National Defence Industry Press, 1990 (in Chinese) [林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990]
- [7] Yu Xiaodong, Han Jun, Li Jianjun. High brightness AlGaInP LED with coupled distributed Bragg reflector. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(1): 100 (in Chinese) [于晓东, 韩军, 李建军. 复合布拉格反射镜高亮度 AlGaInP 发光二极管. 半导体学报, 2007, 28(1): 100]

## Influence of an Omni-Directional Reflector on the Luminous Efficiency of AlGaInP Light-Emitting Diodes<sup>\*</sup>

Sun Hao<sup>†</sup>, Han Jun, Li Jianjun, Deng Jun, Zou Deshu, Song Xiaowei,  
Song Xinyuan, and Shen Guangdi

(*Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

**Abstract:** The reflective spectra of SiO<sub>2</sub>/Al,ITO/Al,SiO<sub>2</sub>/Au,and ITO/Au omni-directional reflector (ODR) structure and the distributional Bragg reflector (DBR) are calculated by computer simulation.The DBR is grown by LP-MOCVD,then the glass/SiO<sub>2</sub>/Au ODR samples are fabricated by PECVD and magnetron sputtering,and finally the reflective spectra of those samples are measured.The experimental results are approximately in agreement with the simulations.The reflectivity of the SiO<sub>2</sub>/Au ODR is as high as 91% for 630nm normal incidence light.The SiO<sub>2</sub>/Au reflectivity remains a high value when the incidence light angle changes from 20° to 85°,which is much higher than the reflectivity of DBR.The results from the LED device indicates that light intensity on axis of the LED with ODR structures increases by 115% compared with that of LED without DBR,and increases by 28% compared with that of the LED with DBR. These results show the ODR structure can strongly increase the luminous efficiency of the red LEDs.

**Key words:** omni-directional reflector; simulation; light-emitting diode

**EEACC:** 4260D

**Article ID:** 0253-4177(2007)12-1952-05

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Program of Science and Technology Commission of Beijing (No. D404003040221), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB604902), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03A121), the National Natural Science Foundation of China (No. 60407009), the Natural Science Foundation of Beijing (No. 4032007), and the Fifth Science and Technology Fund for Post-Graduated Students of the Beijing University of Technology

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: ssd1929@gmail.com

Received 7 June 2007, revised manuscript received 7 August 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics