

氧化 Au/ Ni/ p- GaN 欧姆接触形成的机理^{*}

胡成余¹ 秦志新¹ 冯振兴² 陈志忠¹ 杨 华¹ 杨志坚¹ 于彤军¹
胡晓东¹ 姚淑德² 张国义¹

(1 北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 宽禁带半导体研究中心, 北京 100871)

(2 北京大学物理学院 技术物理系, 北京 100871)

摘要: 用卢瑟福背散射 (RBS) 和同步辐射 X 射线衍射 (XRD) 研究了 p- GaN 上的 Ni/ Au 电极在空气下不同温度合金后的微结构的演化, 并揭示这种接触结构的欧姆接触形成机制. 研究不同温度下比接触电阻 (ρ_c) 的变化, 发现从 450 °C 开始 Au 扩散到 GaN 的表面在 p- GaN 上形成外延结构以及 O 向电极内部扩散反应生成 NiO 对降低 ρ_c 起到了关键的作用. 在 500 °C 时, Au 的外延结构进一步改善, O 进一步向样品内部扩散生成 NiO, ρ_c 也达到了最低值. 但当合金温度升高到 600 °C 时, 金属- 半导体界面 NiO 的大部分或全部向外扩散, 从而脱离与 p- GaN 的接触, 使 ρ_c 显著升高.

关键词: p 型氮化镓; 镍/ 金; 比接触电阻; 同步辐射; 卢瑟福背散射

PACC: 7340N; 7280E; 2920L

中图分类号: TN304. 2⁺ 3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1154-05

1 引言

由于 III- V 族氮化物宽禁带半导体具有高热导率、高迁移率、高击穿电压以及很好的耐腐蚀性, 近年来一直是高频、高功率微电子器件以及短波长光电器件研究中的热点. 在 III- V 族氮化物半导体迅速发展的过程中, 存在的问题之一是如何降低 p- GaN 的欧姆接触电阻, 以提高基于 GaN 的微电子和光电子器件的效率和可靠性^[1,2]. 自从 Ho 等人^[3] 发现 p- GaN 的低电阻欧姆接触可通过在含氧气氛下于 500 °C 合金 Ni/ Au 接触电极实现以来, 这种接触结构一直被广泛采用. 对此欧姆接触的机制的研究也越来越深入, 各种机制模型相继被报道, 例如 Au/ Ni/ p- GaN 接触结构^[4]; 由于 Ga 空位的产生而导致 p- GaN 表面空穴浓度的增加^[5]; Au 在由 Ni 氧化合金反应形成的 p- GaN 清洁表面上直接形成欧姆接触^[6]; Au 和 NiO 在 p- GaN 上形成外延结构^[7,8] 等. 研究电极合金后的微结构是上述研究中普遍采用的

方法^[4,8,9]. 但是, 大多数对这种合金电极微结构的研究都是针对 500 °C 下合金样品的, 对于 Ni/ Au 电极的微结构在氧化合金过程中随着合金温度的变化而演化的图像还缺少足够的认识, 从而限制了对这种欧姆接触形成机制的理解. 基于此, 我们利用同步辐射 X 射线衍射 (XRD) 和卢瑟福背散射 (RBS), 对 Ni/ Au 电极微结构随着氧化合金温度的变化而演化的过程进行了研究. 由于 XRD 具有单色性好、灵敏度高的优点, 因而是一种研究薄膜材料微结构非常有效的手段. 而 RBS 能在不破坏样品的前提下得到表面下不同种类原子的深度分布, 是一种研究电极中金属扩散的有效实验手段. 将两种方法结合, 可以得到材料中的扩散和微结构演化两方面的信息.

2 实验

用金属氧化物气相沉积 (MOCVD) 方法制备掺 Mg 的 p- GaN 薄膜. p 型层厚度为 2.4 μm. 为了激活 Mg 原子, 将样品在氮气氛下 750 °C 退火 20min, 接

^{*} 国家高技术研究发展计划 (批准号: 863-2001AA313110, 2001AA313060 和 2001AA313140), 北京市科技项目 (批准号: H030430020230), 和国家自然科学基金 (批准号: 60276010, 60276034, 60406007, 60476028) 资助项目

胡成余 男, 1977 年出生, 博士研究生. Email: Chengyu_hu@water.pku.edu.cn

2004-08-06 收到, 2004-11-18 定稿

着通过霍尔测量得到 p-GaN 的空穴浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 为了用线性传输线方法 (TLM)^[10] 测量比接触电阻, 用反应离子刻蚀 (BCl₃/Ar) 将样品表面刻蚀出台阶. 光刻后, 在蒸镀电极金属前, 将样品在 HCl-H₂O(1:1) 的溶液中浸泡 1min 以除去 GaN 表面的氧化膜. 然后用电子束蒸发设备依次在 p-GaN 样品上镀 Ni(20nm)/Au(20nm), 镀电极时的背景真空度为 $4.3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$. 电极的大小为 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$, 间距依次为 7, 12, 17, 22, 33 和 $37\mu\text{m}$. 电极镀好后, 接着在空气下进行合金, 合金温度从 350 到 700 变化, 合金时间都为 10min. 合金后, 在间距为 $37\mu\text{m}$ 的电极之间测量了接触的电流电压 (I-V) 曲线. 比接触电阻 (ρ_c) 通过 TLM 测量方法得到. XRD 测量是在北京同步辐射装置漫反射站进行的. 我们所采用的 X 射线的波长为 0.154nm. 在扫描模式中, 入射 X 射线和探测器的方向对称的位于样品表面的法线两侧, 先以 θ 扫描方式找到需要观察的衍射峰的位置. 然后, 固定入射 X 射线和探测器的方向, 让样品绕着垂直于 X 射线入射平面的轴来回作小角度旋转. 这种模式经常被用来评价 GaN 的晶体质量, 而在本实验中, 则被用来评价 p-GaN 上的接触金属的外延质量.

最后, RBS 的测量是在北京大学技术物理系的小型串列静电加速器 5SDH-2 上进行的, 入射氦离子垂直样品表面入射, 能量为 2.07MeV, 背散射探测角是 165°, 采用的是 Au-Si 面垒探测器.

3 结果与讨论

3.1 电学特性

如图 1 所示, 未合金和 350 合金样品的 I-V 曲线都不是直线, 说明欧姆接触尚未形成. 当合金温度升高到 450 时, I-V 曲线开始变直, 说明欧姆接触开始形成. 在 500 时, I-V 曲线的斜率达到最大值, 继续升高合金温度, I-V 曲线的斜率开始降低. 当合金温度升到 700 时, I-V 曲线再次表现出非线性, 说明欧姆接触已被破坏. 所以, 图 1 说明氧化合金 Ni/Au 电极的接触特性受合金温度变化的影响很大.

表 1 给出了氧化合金 Ni/Au 欧姆接触的 ρ_c 随合金温度的变化. 在 350 时 ρ_c 为 $6.87 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$; 而 450 时 ρ_c 迅速降低到 $1.08 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$.

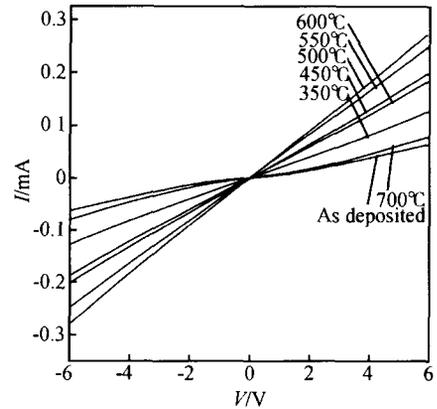


图 1 p-GaN 上 Ni(20nm)/Au(20nm) 电极在空气下合金后的 I-V 特性随合金温度的变化

Fig. 1 I-V curves of the Ni(20nm)/Au(20nm) contacts on p-GaN alloyed at various temperatures for 10min under air

cm^2 , 约为 350 时的 $1/6$ (参看表中第三列); 再到 500 时, 合金温度仅升高 50 就使 ρ_c 进一步降低到原来 (450) 的 $1/4$, 达到最低值 $2.73 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$; 此后, 随着合金温度的升高, ρ_c 开始升高, 但在 550 时仅升高了不到 $1/2$, 为 $3.8 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$; 到 600 时, ρ_c 却迅速升高了将近 10 倍, 达到 $2.85 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$; 再到 700, ρ_c 升高的趋势开始减缓, 升高了不到 2 倍, 为 $6.89 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$. 所以, 由表 1 可看出氧化合金 Ni/Au 电极的比接触电阻在 450, 500 和 600 都有比较大的变化. 由于欧姆接触的质量和接触电极的微结构有着直接的联系, 相应地, 在这些温度下合金的电极样品应当有不同的微结构.

表 1 Ni/Au 接触电极在不同氧化合金温度下的比接触电阻值
Table 1 Variation of ρ_c with different annealing temperatures for the oxidized Ni/Au contacts to p-GaN

Temperature / °C	$\rho_c / (\text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\rho_c / (2.73 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2)$ (normalized at 500 °C)
350	6.87×10^{-2}	25.16
450	1.08×10^{-2}	3.96
500	2.73×10^{-3}	1
550	3.8×10^{-3}	1.39
600	2.85×10^{-2}	10.44
700	6.89×10^{-2}	25.24

3.2 电极金属的扩散

图 2 所示为实验中得到的 RBS 谱的典型曲线. 图中用箭头指示了本实验中该种元素若位于样品表

面时而散射出的氮离子应该具有的能量,由于被探测元素实际上在样品内部,所以实际信号位于更低能量位置处.右边较高的信号是 Au 的信号,左边的台阶是 Ga 信号的台阶,Ni 由于原子序数比 Ga 小,散射出的氮离子的能量比 Ga 的小,所以其信号就叠加在 Ga 信号的台阶上.由于 N 原子序数更小,散射出的氮离子的能量更低,所以其信号叠加在 Ga 台阶的更低的能量位置上,但由于其散射截面小,所以产额也低,因而 N 信号不是很明显.O 与 N 一样,也只有微弱的信号.

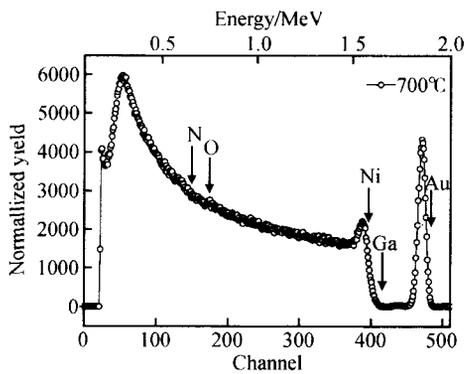


图 2 空气中 Au (20nm)/ Ni (20nm)/ p- GaN 在 700 合金 10min 后的 RBS 谱

Fig.2 Rutherford Backscattering Spectra for the samples with a contact of Au(20nm)/ Ni(20nm)/ p- GaN annealed at 700 for 10min in air

为了观察电极金属间的扩散,将各温度下合金后样品的 RBS 谱局部放大示于图 3 中.图 3(a)显示了 Ni 信号随合金温度的变化,图中箭头所指为 Ni 若在表面时散射出的氮离子的能量.通过对比可以明显地看到 Ni 逐渐向外扩散的趋势(Ni 信号逐渐向高能方向移动).特别是在未合金样品的 RBS 谱中的 Ni 信号的高能边缘,可以很明显地看到 Ga 信号的台阶形成的小肩,但 350 合金后由于 Ni 信号向高能方向移动,此小肩消失.可见,在空气下合金过程中 Ni 向外扩散是很容易发生的,350 时就已有明显的扩散现象,这主要是因为 O 与 Ni 很容易形成稳定的 NiO,于是在反应生成 NiO 的化学动力驱动下,Ni 向外扩散就更容易.但在显微镜下观察 350 合金后电极的颜色,可以看到主要仍是 Au 的颜色,说明此时 Ni 还没有扩散到表面.图 3(b)显示了沟道谱中 O 信号随合金温度的变化.沟道谱中由于 Ga 信号的产额明显降低,所以可以看到较明显的 O 信号.如图所示,从 350 到 500 ,O 信号逐渐向低能方向移动,说明 O 元素在不断向样品内部扩散,以与 Ni 反应,所以,在 Ni 的扩散中,当合金温度小于 500 时,在金属-半导体界面始终有未氧化的 Ni,以使 O 不断向里扩散.但当合金温度高于 500 时,O 信号又开始向高能方向移动,这可能是由于此时 Ni 已经完全氧化,O 元素就不再向电极内部扩散,反而随着金属-半导体界面的 NiO 一起向外扩散.

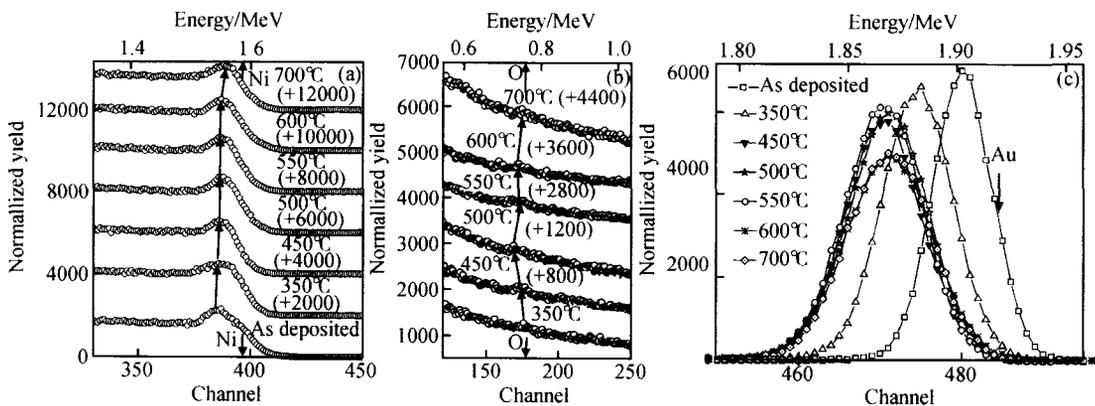


图 3 空气中不同温度下 10min 合金后的 Au(20nm)/ Ni(20nm)/ p- GaN 样品的 RBS 谱的局部放大曲线 (a) Ni 的信号; (b) O 在沟道谱中的信号; (c) Au 的信号

Fig.3 Partially magnified RBS spectra for Au(20nm)/ Ni(20nm)/ p- GaN annealed at different temperature in air (a) Signals of Ni; (b) Signals of O in aligned spectra; (c) Signals of Au

图 3(c) 显示了 Au 的信号随合金温度的变化. 图中箭头所指为 Au 若在表面时将散射出的氦离子的能量. 由于 RBS 谱中元素信号高能边缘的半高位置处所对应的能量, 表示了该种元素在实验中散射出的氦离子的能量^[11], 所以未合金样品的 RBS 谱正反映了 Au 位于样品的表面. 当样品经过 350 合金后, Au 的信号开始向低能端移动; 450 合金则使 Au 的信号移动到最低的能量位置; 更高温度合金后, Au 的信号均不再进一步移动. 这说明, 450 合金后 Au 就已到达了 GaN 的表面, 进一步向内部扩散已很困难, 所以更高温度合金后, Au 几乎不再向样品内部扩散. 根据 RBS 谱数据计算可知此时 Au 向内的扩散深度为 22.5nm, 而电极中 Ni 层的厚度为 20nm, 而 NiO 的形成会使 Ni 层厚度增加, 所以计算所得的 Au 的扩散深度, 反映了 NiO 向外扩散的层翻转反应. 在显微镜下观察 450 合金后电极的颜色, 可以看到 Au 的颜色已不明显, 而主要显现的是 NiO 的浅绿色, 这从另一方面印证了此时大部分的 Au 已扩散到了电极的内部. 从未合金到 450 合金, 除了 Au 信号的移动外, 还可以看到 Au 信号的产额随着合金温度的升高而逐渐降低, 这意味着 Au 的信号逐渐展宽, 同样说明了 Au 的扩散^[6]. 但在 450, 500, 550 合金下 Au 信号产额基本不变, 而 600, 700 合金后 Au 信号的产额明显降低, 一种可能的解释是, 由于 NiO 向外扩散的翻转反应, Au 此时已明显不是层状结构, 变成分立的块状^[9], 由于一部分氦离子会打到块状的 Au 的间隙, 相应就降低了 Au 信号的产额.

3.3 电极金属外延结构的演化

图 4 所示曲线是用 XRD 对 GaN 外延方向上的 Au(111) 进行扫描得到的, 显示了 Ni/Au 接触在不同的合金温度下的微结构的演化. 结合表 1, 在 450, 500 和 600 有较大的变化. 那么在这些温度下微结构演化的信息势必对揭示欧姆接触的形成机制有着重要的意义.

如前所述, 450 时 Au 已扩散到了 GaN 的表面, 为 Au 在 GaN 上形成外延结构提供了一个基本的条件. 所以图 4 显示 Au(111) 峰在 450 开始出现, 说明在 450 大量的 Au 开始在 p-GaN 上形成外延结构 (Au(111)//GaN(0002)), 这是一种有利于形成欧姆接触的结构^[6,7]. 所以在 450 时比接触电阻的迅速降低与部分的 Au 在这个温度下开始外

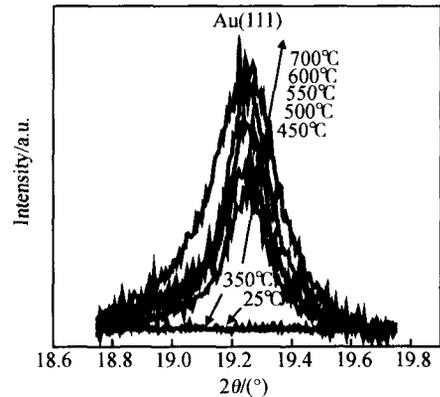


图 4 对 GaN 外延方向上的 Au(111) 进行扫描观察其在空气中不同合金温度下的演化

Fig. 4 Epitaxial structure evolution of Au in Ni/Au contact to p-GaN annealed at different temperature for 10min in air ambient investigated by scan along the surface normal direction of p-GaN

延于 GaN 上有关, 而 Au 的多晶晶粒的增大也有一定的作用, 因为不利于导电的晶粒间界减少了. 在 500 时, 图 4 显示 Au(111) 峰在这个温度下仍继续增强. 同时, 如前所述, 氧进一步向样品内部扩散, 所以 500 时比接触电阻的进一步降低与 Au 外延结构的进一步增强和 Ni 的进一步氧化有关. 在 600 时, Au(111) 峰进一步增强 (图 4), 而如前所述金属-半导体界面的 NiO 开始向外扩散 (图 3(c)). 所以 600 时比接触电阻的显著升高与 NiO 向外扩散而减少了与 p-GaN 的接触有关, 而 Au 在该温度下外延结构的进一步改善对降低接触电阻没有起到太大的作用. 由此可见, NiO 与 Au 之间发生了层翻转反应^[7,9], 大部分或全部 NiO 离开 GaN 表面而翻到 Au 的上面, 是使氧化 Au/Ni/p-GaN 欧姆接触电阻升高的原因之一. 此外, Chen 等人^[8]用透射电子显微镜 (TEM) 观察了 600 合金的 Ni/Au 电极, 发现在金属和 GaN 之间出现了很多空洞, 这些空洞减少了 NiO 和 Au 与 p-GaN 表面的接触, 因而也是使比接触电阻升高的机制之一. 700 时微结构变化趋势与 600 时相同, 从而比接触电阻进一步升高.

4 结论

利用 RBS 和 XRD, 研究了 p-GaN 上 Ni/Au 电极在空气下不同温度合金时微结构的演化. 分析 450, 500 和 600 合金时比接触电阻的变化, 表明

450 和 500 °C 时, Au 在 p-GaN 表面形成外延结构及 NiO 的进一步形成对形成低电阻欧姆接触起到了关键作用. 而在较高温度 (> 550 °C) 下合金时, 由于 NiO 与 Au 之间的层翻转反应, 大部分或全部 NiO 脱离 p-GaN 的表面向外扩散, 使比接触电阻升高.

致谢 本工作得到集成光电子国家联合重点实验室开放课题部分资助. XRD 实验是在中国科学院高能物理研究所, 北京同步辐射装置漫反射实验站进行的, 在此表示感谢.

参考文献

- [1] Yu E T, Manasreh M O. *GaN nitride semiconductors: applications & devices*. New York: Taylor & Francis, 2003: 2
- [2] Zhou Huimei, Shen Bo, Zhou Yugang, et al. Metal/n-AlGaIn ohmic contact. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23 (2): 153 (in Chinese) [周慧梅, 沈波, 周玉刚, 等. 金属/n型 AlGaIn 欧姆接触. *半导体学报*, 2002, 23 (2): 153]
- [3] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, 76 (9): 1275
- [4] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN achieved by the oxidation of Ni/ Au films. *J Appl Phys*, 1999, 86 (8): 4491
- [5] Kim J K, Lee J L, Lee J W, et al. Effect of Au overlayer on Ni contacts to p-GaN. *J Vac Sci Technol B*, 1999, 17 (6): 2675
- [6] Qiao D, Yu L S, Lau S S, et al. A study of the Au/ Ni Ohmic contact on p-GaN. *J Appl Phys*, 2000, 88 (7): 4196
- [7] Narayan J, Wang H, Oh T H, et al. Formation of epitaxial Au/ Ni/ Au Ohmic contacts to p-GaN. *Appl Phys Lett*, 2002, 81 (21): 3978
- [8] Chen L C, Ho J K, Chen F R, et al. The effect of heat treatment on Ni/ Au Ohmic contacts to p-type GaN. *Phys Status Solidi A*, 1999, 176 (1): 773
- [9] Chen L C, Chen F R, Kai J J, et al. Microstructural investigation of oxidized Ni/ Au Ohmic contact to p-type GaN. *J Appl Phys*, 1999, 86 (7): 3826
- [10] Berger H H. Models for contacts to planar devices. *Solid-State Electron*, 1972, 15 (2): 145
- [11] Zhu Weigan. *Analyzing technology of backscattering*. Beijing: Atomic Energy Press, 1986: 136 (in Chinese) [朱唯干. 背散射分析技术. 北京: 原子能出版社, 1986: 136]

Investigation on Mechanism of Oxidized Au/ Ni/ p-GaN Ohmic Contact *

Hu Chengyu¹, Qin Zhixin¹, Feng Zhenxing², Chen Zhizhong¹, Yang Hua¹, Yang Zhijian¹,
Yu Tongjun¹, Hu Xiaodong¹, Yao Shude², and Zhang Guoyi¹

(1 State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Research Center for Wide Gap Semiconductor, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)
(2 Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: By synchrotron X-ray diffraction (XRD) and Rutherford back scattering (RBS), the microstructure evolution of oxidized Ni/ Au contact to p-GaN annealed at different temperature in air are investigated. Considering a sharp decrease in the ρ_c after 450 °C-annealing, it is suggested that the epitaxial structures of Au on p-GaN and the formation of NiO play a critical role in forming low resistance Ohmic contact to p-GaN. At 500 °C, the epitaxial structure of Au is improved further and the O also diffuses deeper into the samples. At the same time, the ρ_c get the lowest value. At 600 °C, the O begin to diffuse outwards, so it is implied that most or all of the NiO in the metal-semiconductor interface begin to diffuse outwards at this temperature. Therefore, it shows that the degradation of Ohmic contact for oxidized Ni/ Au is related to the full outdiffusion of the NiO in the metal-semiconductor interface, which causes NiO detached from p-GaN.

Key words: p-GaN; Ni/ Au; specific contact resistance; synchrotron XRD; RBS

PACC: 7340N; 7280E; 2920L

Article ID: 0253-4177(2005)06-1154-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 863-2001AA313110, 2001AA313060, 2001AA313140), the Beijing City Science and Technology Project (No. H030430020230), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60276010, 60276034, 60406007, 60476028)

Hu Chengyu male, was born in 1977, PhD candidate. Email: Chengyu_hu@water.pku.edu.cn

Received 6 August 2004, revised manuscript received 18 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics