

## AlGaAs/InGaAs PHEMT 栅电流参数退化模型研究\*

万宁 郭春生<sup>†</sup> 张燕峰 熊聪 马卫东 石磊 李睿 冯士维

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2013年3月23日收到; 2013年4月15日收到修改稿)

为定量研究在 PHEMT 栅电流退化过程中, 不同失效机理对应的参数退化时间常数及退化比例, 本文基于退化过程中物理化学反应中反应量浓度与反应速率的关系, 建立了 PHEMT 栅电流参数退化模型. 利用在线实验的方法获得 PHEMT 电学参数的退化规律, 分析参数随时间的退化规律, 得到不同时间段内影响栅电流退化的失效机理, 并基于栅电流参数退化模型, 得到了不同的失效机理对应的参数退化时间常数及退化比例.

**关键词:** PHEMT, 栅电流, 肖特基接触, 退化模型

**PACS:** 72.80.Ey, 73.40.Kp, 73.40.Ns

**DOI:** 10.7498/aps.62.157203

## 1 引言

PHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) 具有高电子迁移率晶体管凭借其低噪声, 低开态电阻, 高功率及良好的高频特性在无线通讯及军用射频 (RF) 通信领域确立独特的优势<sup>[1]</sup>. 随着器件尺寸由微米进入亚微米甚至深亚微米, 器件内部电场强度不断增加, 器件栅极受到的电应力不断增强<sup>[2]</sup>. 当器件工作在高偏压  $V_{DS} \geq 4-5$  V 时, 栅-漏区域存在很高的电场, 直接导致热载流子效应的产生, 最终产生栅击穿和栅电流退化等现象<sup>[3]</sup>. 因此, 栅电流是表征 PHEMT 栅极肖特基特性以及评价其可靠性的关键参数之一.

目前, 国内外对 PHEMT 栅电流退化研究主要集中于对失效机理的定性研究. 文献 [3] 提出 GaAs PHEMT 中碰撞电离 (热载流子效应) 产生的电子空穴对在电场中被分离, 一部分空穴被栅电极收集, 直接导致了栅-漏肖特基反向电流的产生. Huang 等<sup>[4]</sup> 发现栅-漏反向肖特基特性与栅极下耗尽区的扩散宽度和栅极下的载流子陷阱有关, 这些因素使得肖特基势垒的下降和栅-漏反向电流的增加. 刘红侠<sup>[5]</sup> 进一步指出在低栅-漏场下, 隧穿电流占主要地位, 而在高栅-漏电场下, 碰撞电离产生的空穴

被栅极收集, 取代了栅-漏隧穿电流占据主要地位. Chen 等<sup>[6]</sup> 发现栅电流在高温应力下的退化程度比大电流应力下要剧烈, 同时高温应力下观测到了栅下沉现象.

然而, 目前国内外对失效机理对应的 PHEMT 栅电流退化规律以及栅电流退化量的影响研究较少. 针对该问题, 本文基于退化过程中物理化学反应的反应量浓度与反应速率的关系, 建立了 PHEMT 栅电流参数退化模型, 并搭建了在线参数退化平台, 记录 9000 min 的工作状态栅电流  $I_g$ 、栅极漏电流  $I_{gss}$ 、饱和漏极电流  $I_{dss}$  和工作状态漏极电流  $I_d$  等退化数据, 定量的计算出失效机理的参数退化时间常数及退化比例.

## 2 器件结构

本文所研究的 PHEMT 器件为电子科技集团第十三研究所提供, 结构如图 1 所示. 在高掺杂浓度的 GaAs 帽层之下是 AlGaAs 势垒层, 沟道采用缓变掺杂的  $In_xGaAs$ , 其优势在于使器件的跨导在整个工作范围内保持相对稳定的分布, 从而提高器件的线性度,  $In_xGaAs$  的禁带宽度随  $x$  的增加而减小, 同时会影响器件的击穿电压, 并且  $In_xGaAs/GaAs$  之间的晶格会更加失配, 因此  $In_xGaAs$  中的组分

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61204081) 和广东省重大科技专项项目 (批准号: 粤科规划字 [2012]129) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: guocs@bjut.edu.cn

取 0.15—0.25.  $\delta$  掺杂为沟道层提供二维电子气 (2DEG)  $\delta$ , 掺杂层上生长 AlGaAs 隔离层以减少对载流子的库仑散射, 从而获得更高的电子迁移率.

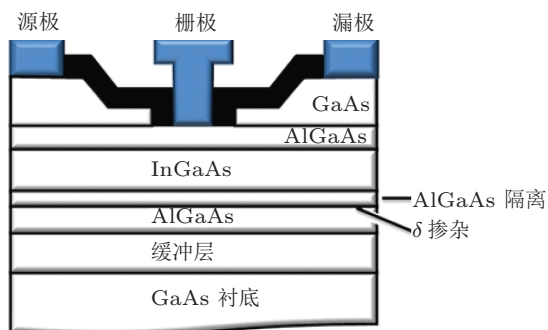


图 1 PHEMT 材料结构示意图

### 3 实验

以电子科技集团第十三研究所提供的某型 GaAs PHEMT 器件为实验样品. 对器件施加的应力为: 恒定漏极电压  $V_{DS} = 5 \text{ V}$ , 栅极电压  $V_{GS} = -1.2 \text{ V}$ , 温度应力为壳温  $T_c = 193 \text{ }^\circ\text{C}$ . 由于施加的电应力在器件内部产生结温升, 测得其结壳热

阻  $R_{j-c} = 18 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , 结温升  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , 结温  $T_j = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ .

由于在线参数退化实验消除了线下参数退化实验带来的温度及电流冲击误差, 能够提高退化数据的准确性, 有利于参数退化模型的准确性 [7], 因此采用自动化测量系统, 以计算机作为控制端, 以国际通用接口 IEEE-488 总线为数据通信基础, 用 HP-VEE 程序控制电源, 实现电应力及测量条件的准确加载以及测量结果的实时记录. 测量的参数包括工作状态下的栅电流  $I_g$  (测试条件为  $V_{DS} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{GS} = -1 \text{ V}$ ),  $I_{gss}$  (测试条件为  $V_{GS} = -8 \text{ V}$ ,  $V_{DS} = 0 \text{ V}$ ) 和  $I_{dss}$  (测试条件为  $V_{DS} = 3 \text{ V}$ ,  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ),  $I_d$  (测试条件分别为  $V_{DS} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{GS} = -1.2 \text{ V}$  和  $V_{DS} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{GS} = -2.2 \text{ V}$ ) 测试间隔设为 1 min, 取得了 9000 min 的退化数据.

### 4 结果及分析

对于设计和制作良好的 PHEMT, 肖特基的反向偏置电流主要取决于两种失效机理 [8], 1) 栅电子的隧穿 (场发射 FE) 或者热电子场发射 TFE, 2) 沟道电子的碰撞电离 (热电子发射 TE). 描述两种击穿机理的示意图如图 2 所示.

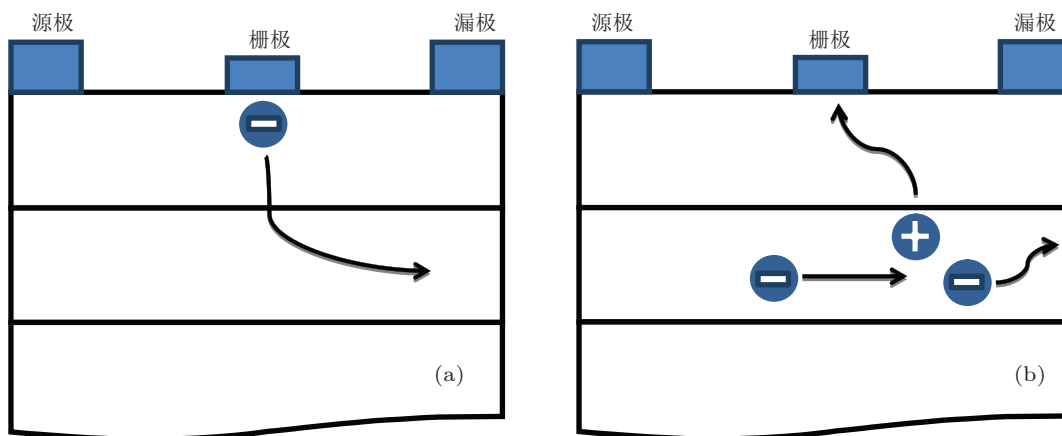


图 2 PHEMT 器件中 (a) 热电子场发射或隧穿和 (b) 沟道电子碰撞电离的示意图

为了更好的确定两种机理在栅电流退化中的作用, 图 3(a) 对比分析了  $I_g$  和  $I_{gss}$  的退化曲线.  $I_g$  和  $I_{gss}$  由于高温以及反向栅压, 同时包含了热电子场发射和隧穿产生热电子场发射电流和隧穿电流, 而  $I_g$  测试条件中由于还施加了较高的漏压, 产生了由于沟道电子碰撞电离 (热载流子效应) 产生的空穴电流.

首先, 在 0—300 min 内, 应力条件下, 由碰撞

电离产生的空穴由价带跃迁至导带进入施主层以及栅的附近, 一部分被栅收集形成栅电流, 另一部分填充入已经存在的陷阱中 [4], 降低了肖特基势垒的高度, 使得阈值电压发生漂移. 由于阈值电压 ( $V_g = -2.2 \text{ V}$ ) 附近漏极电流  $I_d(V_g = -2.2 \text{ V})$  对栅压较为敏感, 从图 3(b) 观测到 0—300 min 内  $I_d(V_g = -2.2 \text{ V})$  的上升趋势, 这也表明了肖特基势垒的高度和阈值电压的变化情况. 同时,  $I_{dss}$  工作在

$V_g = 0\text{ V}$  沟道全部打开的状态, 基本不受肖特基势垒的高度变化影响, 所以没有变化.  $I_d(V_g=-1.2\text{ V})$  工作在饱和区, 受肖特基势垒的高度变化影响较小, 仅有 2.5% 的退化. 由于热电子场发射电流大小受肖特基势垒的影响, 如图 3(a) 所示  $I_{gss}$  和  $I_g$  均产生了退化. 而碰撞电离产生的空穴电流是克服势垒产生的热电子发射现象, 同样受势垒高度变化, 因此  $I_g$  较  $I_{gss}$  的退化幅度更大, 达到 71%.

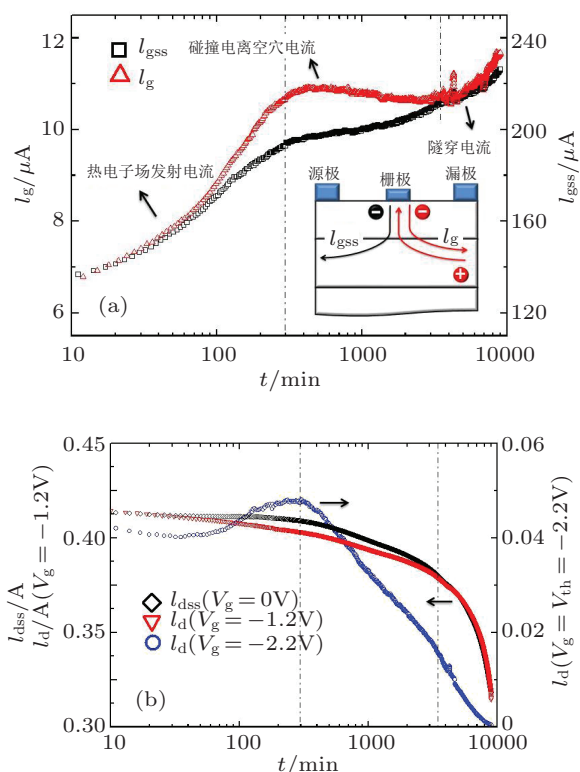


图 3 (a)  $I_g$  和  $I_{gss}$  的退化曲线; (b)  $I_{dss}$ ,  $I_d(V_g=-1.2\text{ V})$  和  $I_d(V_g=-2.2\text{ V})$  的退化曲线

其次, 在 300—3500 min 退化时间内,  $I_{gss}$  的退化趋于平缓, 说明对于陷阱的填充已经趋于饱和, 势垒高度变化不大. 但是  $I_g$  的退化并不单调, 出现了短暂的“恢复”现象, 这种短暂的“恢复”现象不是器件真正意义上的特性恢复, 而是器件另一种退化机理的表现. 从  $I_g$  和  $I_{gss}$  测试条件的区别分析, 这种退化机理是由于  $I_g$  的测试中施加了较高的漏压. 已有研究发现<sup>[3]</sup> 在工作状态下栅-漏区域存在很高的电场, 高电场产生的碰撞电离产生了深层的能级陷阱, 当深层能级的陷阱被负电荷填充, 会使得漏端的寄生电阻  $R_d$  增加, 使得碰撞电离产生的空穴电流减少, 从而导致  $I_g$  下降. 同时有研究<sup>[4]</sup> 通过深能级瞬态光谱学 (DLTS) 发现这些陷阱存在并导致了  $R_d$  的退化. 图 3(b) 中,  $I_{dss}$  和  $I_d(V_g=-2.2\text{ V})$  也

正是在 300 min 开始出现退化, 这也是  $R_d$  退化的另一种表现, 并且该失效机理导致的漏电流退化持续到实验结束.

最后, 在 3500—9000 min, 如图 3(a), (b),  $I_{dss}$ ,  $I_d(V_g=-1.2\text{ V})$  持续退化, 而  $I_g$ ,  $I_{gss}$  却不断增加, 说明栅电流的主要组成部分已不是碰撞电离产生的空穴电流. 经过 9000 min 长时间的高温及电流退化导致了栅金属与 GaAs 的互扩散 (栅下沉效应)<sup>[6]</sup>, 一方面降低了有源沟道的深度, 改变有效沟道掺杂, 沟道有效载流子下降, 导致漏电流退化, 另一方面金属杂质使得肖特基势垒有源层的复合-产生中心浓度增加, 从而导致栅电流退化.

## 5 退化模型

器件的参数退化规律是器件内部失效机理的表现形式. 失效机理对应着器件内部的物理化学反应. 定温条件下考虑器件内部物理化学的反应量浓度和反应速度, 建立均相反应的动力学方程<sup>[8]</sup>

$$r = k(T)f(c), \quad (1)$$

式中,  $r$  为反应速率,  $c$  是产物的浓度,  $T$  为温度,  $k(T)$  为速率常数的温度效应关系式,  $f(c)$  为反应速率的浓度效应关系式.

其中, 速率常数的温度关系式  $k(T)$  一般常用 Arrhenius 方程表示. 该模型描述了化学反应过程中反应速率和反应温度的关系. 其表达形式为

$$k(T) = A e^{-\frac{E_A}{k_B T}}, \quad (2)$$

其中  $E_A$  为激活能,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $A$  是与温度无关的常数.

考虑简单的一级反应速率方程式, 浓度关系式  $f(c)$  ( $c$  为反应浓度) 整理得

$$f(c) = \frac{c_0}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为反应时间常数,  $c_0$  为初始浓度.

同时考虑电力对器件退化速率的影响<sup>[7]</sup>, 则反应速率方程可以进一步优化为

$$r = \frac{dM}{dt} = \gamma j^n V^m e^{-\frac{E_{Aj}}{k_B T} - \frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

其中,  $M$  为参数退化量,  $t$  为退化时间,  $j$  为电流应力,  $V$  为电压应力,  $n, m$  为常数. 当退化过程中同时存在多个失效机理的情况下, 假设失效机理相互独立, 则由 (4) 式进一步改写

$$r = \frac{dM}{dt} = \sum_i \gamma_i j_i^n V_i^m e^{-\frac{E_{Ai}}{k_B T} - \frac{t}{\tau_i}}, \quad (5)$$

$i$  为退化过程中失效机理的个数,  $E_{Ai}$  为不同失效机理下的激活能,  $\tau_i$  为不同失效机理时间常数,  $\gamma_i$  为常数.

为得到影响  $I_{gss}$  的退化的陷阱填充 (记为失效机理 ①) 和金属半导体互扩散 (记为失效机理 ②) 两种失效机理 (即  $i = 2$ ) 的时间常数, 考虑所施加的电流、电压及温度应力均恒定, 将 (5) 式简化并同时在等式两端时间积分整理并建立  $I_{gss}$  的退化模型表达式

$$I_{gss} = a_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + a_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + y_0, \quad (6)$$

其中,  $\tau_1$  为失效机理 ① 的时间常数,  $a_1$  为失效机理 ① 的退化比例,  $\tau_2$  为失效机理 ② 的时间常数,  $a_2$  为失效机理 ② 的退化比例,  $y_0$  为常数,  $a_1$  和  $a_2$  体现该失效机理对退化量影响的大小.

利用 (6) 式拟合  $I_{gss}$  退化数据如表 1 所示.

表 1  $I_{gss}$  退化模型参数拟合

拟合参数	参数值
$a_1$	$-6.48227 \times 10^{-5}$
$\tau_1$	105.2717
$a_2$	$-4.48215 \times 10^{-5}$
$\tau_2$	8768.52405
$y_0$	$2.40792 \times 10^{-4}$

$I_{gss}$  的退化模型为

$$I_{gss} = -6.48 \times 10^{-5} e^{-\frac{t}{105.2717}} - 4.48215 \times 10^{-5} e^{-\frac{t}{8768.52405}} + 2.40792 \times 10^{-4}.$$

利用  $I_{gss}$  得到与  $I_g$  相同的两种失效机理时间常数, 添加碰撞电离产生深层能级的失效机理 (记为失效机理 ③), 根据 (5) 式建立  $I_g$  退化模型表达式

$$I_g = a'_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + a'_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + a'_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} + y_1, \quad (7)$$

$\tau_3$  为失效机理 ③ 的时间常数,  $a_3$  为失效机理 ③ 的退化比例,  $y_1$  和为常数. 利用 (7) 式对  $I_g$  的拟合参数如表 2 所示.

$I_{gss}$  的退化模型为

$$I_{gss} = -5.2443 \times 10^{-6} e^{-\frac{t}{105.2717}} + 2.98228 \times 10^{-6} e^{-\frac{t}{2665.34139}} - 5.153 \times 10^{-6} e^{-\frac{t}{8768.52405}} + 2.40792 \times 10^{-6}.$$

陷阱填充、碰撞电离产生深层能级和金属半导体互扩散三种失效机理及其时间常数示意图如图 4 所示.

表 2  $I_g$  退化模型参数拟合

拟合参数	参数值
$a'_1$	$-5.2443 \times 10^{-6}$
$\tau_1$	105.2717
$a'_2$	$2.98228 \times 10^{-6}$
$\tau_2$	2665.34139
$a'_3$	$-5.153 \times 10^{-6}$
$\tau_3$	8768.52405
$y_1$	$1.14044 \times 10^{-4}$

栅电流退化模型的优势在于, 能够分辨出导致参数退化的多种失效机理, 并量化每种失效机理的时间常数  $\tau$  及退化比例  $a$ . 其中, 失效机理的时间常数  $\tau$  反应了该失效机理在退化过程中的主要作用时间, 时间常数  $\tau$  越小, 表明该失效机理作用时间越靠前, 时间常数  $\tau$  越大, 表明该失效机理作用时间越靠后. 失效机理的退化比例  $a$  能够衡量失效机理对退化过程的影响程度, 退化比例  $a$  越大, 该失效机理作对退化量的作用越大, 退化比例  $a$  越小, 该失效机理作对退化量作用越小.

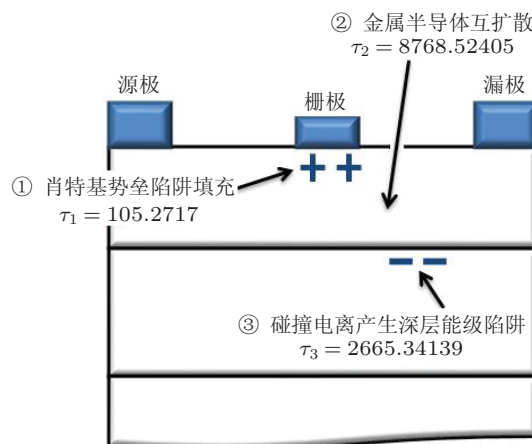


图 4 栅电流退化机理及其时间常数示意图

## 6 结论

为了定量研究 PHEMT 栅电流退化过程中, 不同的失效机理对应的参数退化时间常数及退化比例, 搭建了在线参数退化平台, 记录 9000 min 的  $I_g$ ,  $I_{gss}$ ,  $I_{dss}$ ,  $I_d(V_g = -1.2 \text{ V})$  和  $I_d(V_g = -2.2 \text{ V})$  等参数退化数据. 对比分析参数退化规律, 得到肖特基势垒陷阱填充, 碰撞电离产生深层能级陷阱和金属半导体互扩散是导致器件栅电流退化的主要失效机理. 基于化学反应动力学的反应量浓度与反应速率的关系, 建立 PHEMT 栅电流参数退化模型. 依据  $I_g$ ,  $I_{gss}$  的

参数退化规律, 确定肖特基势垒陷阱填充, 碰撞电离产生深层能级陷阱和金属半导体互扩散的时间常数分别为 105.27, 2665.34 和 8768.52, 时间常数越小, 表明该失效机理作用时间越靠前, 时间常数

越大, 表明该失效机理作用时间越靠后.

感谢李志国教授、吕长志研究员对本文工作给予的指导和帮助.

- 
- [1] Jason B S, Jiann S Y 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 2932
  - [2] Liu H X, Zheng X F, Han X L, Hao Y, Zhang M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2576 (in Chinese) [刘红侠, 郑雪峰, 韩晓亮, 郝跃, 张绵 2003 物理学报 **52** 2576]
  - [3] Gaudenzio M, Alessadro P, Youcef H, Claudio C, Eneico Z 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1411
  - [4] Huang H K, Wang C S, Wang Y H, Wu C L, Chang C S 2003 *Proceedings of GaAs Reliability Workshop* Baltimore, USA, October 21, 2001 p57
  - [5] Gaudenzio M, Eneico Z 2002 *Microelectron. Reliab.* **42** 685
  - [6] Chen K H, Chang C Y, Leu L C, Lo C F, Chu B H 2010 *J. Vac. Sci. Technol. B* **28** 365
  - [7] Guo C S, Wan N, Ma W D, Xiong C, Zhang G C, Feng S W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 128501 (in Chinese) [郭春生, 万宁, 马卫东, 熊聪, 张光沉, 冯士维 2011 物理学报 **60** 128501]
  - [8] Yang Y H 2012 *Physical Chemistry* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [杨永华 2012 物理化学 (北京: 高等教育出版社)]

# Gate current degradation model of the AlGaAs/InGaAs PHEMT\*

Wan Ning Guo Chun-Sheng<sup>†</sup> Zhang Yan-Feng Xiong Cong Ma Wei-Dong  
Shi Lei Li Rui Feng Shi-Wei

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 23 March 2013; revised manuscript received 15 April 2013)

## Abstract

For quantitative study of time constant and degradation ratio of degradation parameters which correspond to different failure mechanisms in pseudomorphic high electron mobility transistor (PHEMT) gate current degradation process, a PHEMT gate current degradation model is established based on the relationship between reaction volume concentration and reaction rate in the process of degradation. The degradation law of PHEMT electrical parameters is obtained using online experiment method. The parameter degradation law with the time is analyzed and the failure mechanism which affects gate current degradation in different time period is obtained. Meanwhile, based on the gate current parameter degradation model, time constant and degradation ratio of degradation parameters, which correspond to different failure mechanisms, are also obtained.

**Keywords:** PHEMT, gate current, Schottky contact, degradation model

**PACS:** 72.80.Ey, 73.40.Kp, 73.40.Ns

**DOI:** 10.7498/aps.62.157203

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61204081), and the Major Science and Technology Special Project of Guangdong province, China (Grant No. Guangdong planning words [2012] 129).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: guocs@bjut.edu.cn