

半绝缘 GaAs 光电导开关体内热电子的 光电导振荡特性^{*}

施 卫^{1)†} 薛 红^{1)‡} 马湘蓉¹⁾

1) 西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

2) 渭南师范学院物理与电子工程系, 渭南 714000)

(2009 年 3 月 2 日收到, 2009 年 4 月 27 日收到修改稿)

用波长为 532 nm、脉冲宽度为 5 ns 的超短激光脉冲触发电极间隙为 4 mm 的半绝缘 GaAs 光电导开关, 开关偏置电压从 500 V 开始以步长 50 V 逐渐增加, 直到开关出现非线性电脉冲输出. 研究表明, 线性和非线性电脉冲波形均呈现出在经历一个主脉冲之后, 其后跟随几个幅值较小且具有周期性和不同程度的减幅振荡. 分析了开关体内载流子(热电子)的微观状态和输运过程, 在直流偏置电场作用下, 开关体内的热电子在电子-电子、电子-声子相互作用过程中, 当它们的弛豫时间大于载流子的寿命时, 光电子的输运可通过迁移率变化引起光电导振荡, 这是开关输出电脉冲出现振荡的原因.

关键词: 光电导开关, 热电子, 弛豫, 光电导振荡

PACC: 7220H, 7240, 7220J

1. 引 言

半导体光电导开关(photoconductive semiconductor switches, PCSS)是利用超快脉冲激光器与光电导体(如 Si, GaAs, InP 等)相结合形成的一类新型器件^[1]. 近 10 年来, PCSS 是发展比较迅速的一种光电子器件^[2-9]. 作为一种光敏器件, 光电导开关是通过光生载流子对材料的电阻率控制来实现器件功能的. 器件在不同的激励光控制作用以及在不同的偏置电场条件下, 表现出线性与非线性两种导通工作模式. 在小于 3.5 kV/cm 的低电场作用下, PCSS 工作于线性模式, 即每个入射光子产生一对电子-空穴对, 电流脉冲形状与触发光脉冲形状相同, 其光生载流子复合随时间呈指数变化, 光脉冲过后, 开关电阻立即恢复. 在超过一定阈值的高偏置电压情况下, 光电导开关工作于非线性模式, 即光电导开关材料每吸收一个光子, 产生一对电子-空穴对, 这些光生电子-空穴对在“类雪崩”复杂机制作用下获得了巨大的倍增, 形成比光生载流子数高几个数量级的载流

子数目, 从而产生很大的电脉冲输出, 并且在光脉冲熄灭后, 开关并不立即恢复到光照前的高阻状态, 而是仍然保持导通状态. 此时, 开关内的平均电场保持在一个与初始偏置电压以及入射光能量均无关的固定数值上, 即发生了电场的锁定(lock-on)现象. 通常认为, 上述两种工作模式不相关联. 非线性工作模式是 GaAs, InP 等 III-V 族化合物半导体光电导开关特有的现象, 并且锁定电场强度与外电路所加的偏置电压无关, 与触发光能量也无关, 只与光电导开关本身材料有关.

在有关 GaAs 的 PCSS 实验中, 相继报道了有关 PCSS 的一些独特的工作模式, 如混合模式、临界模式、超线性模式等非线性工作模式^[3,4]. 本文在采用 532 nm 激光脉冲触发横向型半绝缘 GaAs 光电导开关的实验中, 观察到了在保证满足一定的光能和电场阈值的条件下, 开关在线性和非线性工作状态下的电脉冲波形均呈现出在达到峰值后具有不同程度的小幅周期性振荡现象. 根据量子理论的光与物质相互作用规律, 从半导体结构微观状态的过程出发, 对实验结果进行详细分析后认为, 振荡现象发生在

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB310406)、国家自然科学基金(批准号: 50837005, 10876026)、陕西省教育厅专项科研基金(批准号: 09JK431)和渭南师范学院科研基金(批准号: 08YKF022, 09YKZ021)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

开关导通工作的状态下,其原因主要来自于体内自由载流子的行为.在偏置电场作用下光生载流子将获得较高的能量,使光电子成为远离导带底的热电子,并在体内产生主要由热电子效应引起的光电导振荡,从而引起输出电脉冲信号的部分振荡现象.

2. 实验装置与结果

实验所用的半绝缘 GaAs (SI-GaAs) PCSS 为横向结构,如图 1 所示.材料中载流子浓度 $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,暗态电阻率 $\rho > 5 \times 10^7 \Omega \text{ cm}$,电子迁移率 $\mu > 5500 \text{ cm}^2 / (\text{Vs})$.开关芯片厚度为 0.6 mm,两电极间隙为 4.0 mm, GaAs PCSS 的最小触发电场阈值为

4.1 kV/cm.本征击穿强度为 250 kV/cm.用 Nd:YAG 超短脉冲激光照射芯片来触发开关导通,激光脉冲宽度为 5 ns,波长为 532 nm,其光能可在微焦到毫焦范围内变化.触发光能量为 0.5 和 1.0 mJ 两种,偏置电压分别从 500 V 开始以步长 50 V 逐渐增加,直到出现非线性电脉冲.

图 2 为用 0.5 mJ 光脉冲能量触发 4 mm 间隙光电导开关,开关输出两种工作模式的电脉冲.图 2 (a) 为偏置电压为 2500 V 时输出的开关在线性工作状态下输出的电脉冲,可以看出线性电脉冲不是单一的脉冲,电脉冲在经历一个 Gauss 型的主脉冲之后,跟随几个不同程度的幅值较小的减幅振荡,但开关仍处于线性工作状态而并不引起非线性.图 2 (b) 为偏

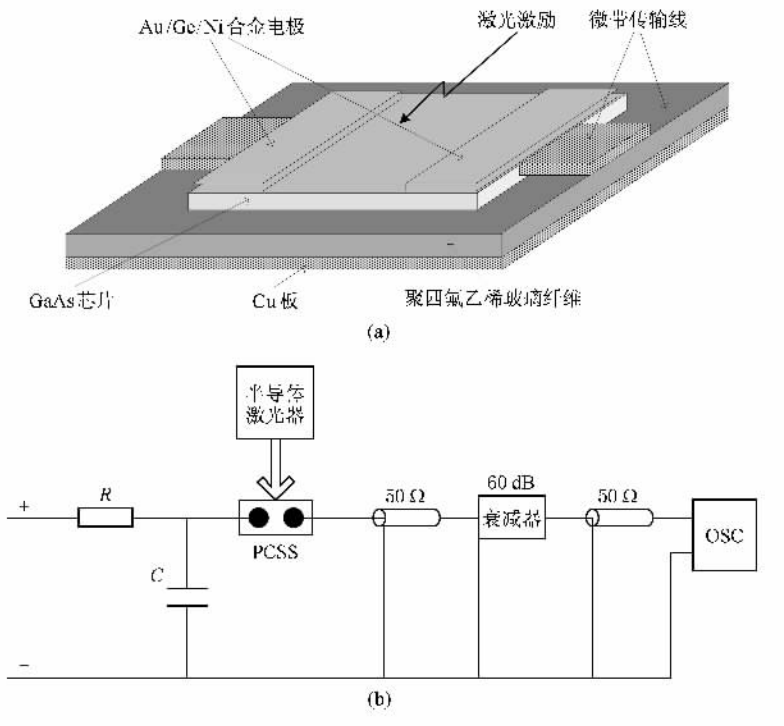


图 1 GaAs 光电导开关结构示意图和测试线路图 (a) 结构示意图 (b) 测试电路简图

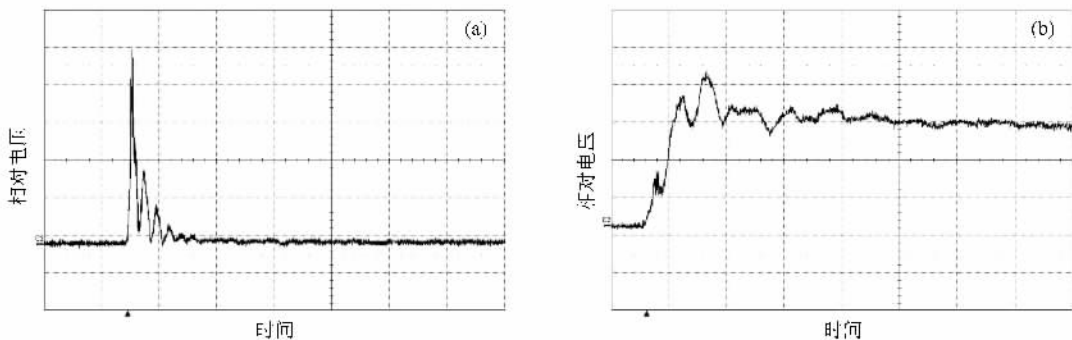


图 2 不同偏置电压下波长为 532 nm,单脉冲能量为 0.5 mJ 的激光脉冲触发 4 mm 间隙 SI-GaAs 开关输出电脉冲 (a) 2500 V (b) 3000 V

置电压为3000 V时开关输出的非线性工作状态下的电脉冲,这一电脉冲也表现为在主峰过后呈现出不同程度的周期性减幅振荡现象,并随着时间的推移振荡逐渐消失,最后进入稳定的锁定状态,属于典型的非线性电脉冲.图3为1 mJ光脉冲能量触发4 mm

间隙开关,在偏置电压分别为2500和3800 V条件下,10次触发SI-GaAs开关输出的线性和非线性两种工作模式的电脉冲波形,在主峰过后均呈现出不同程度的周期性减幅振荡现象.

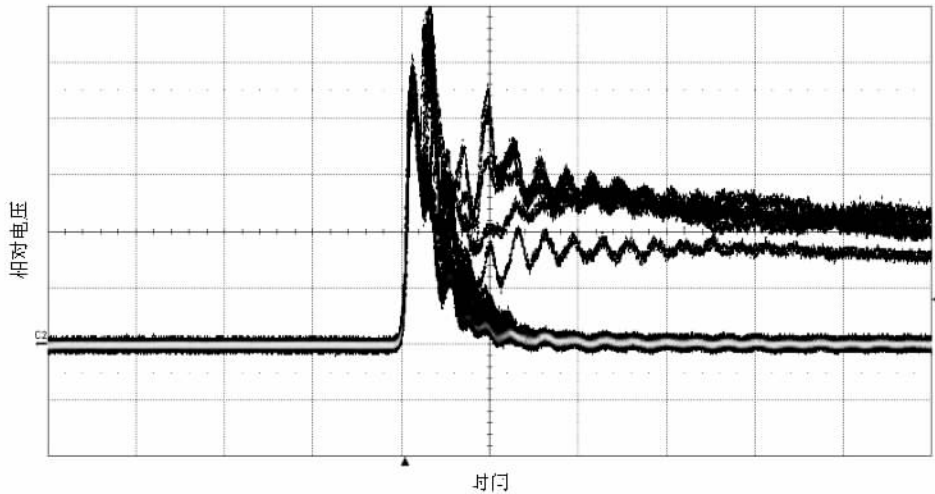


图3 10次触发SI-GaAs开关输出的线性和非线性周期性的减幅振荡电脉冲波形的叠加

3. 理论分析

光电导开关工作的物理机制分为线性和非线性两种.半导体光电子学理论认为,其工作模式的本质就是光子与电子相互作用产生光生载流子,而光生载流子在产生、弛豫与复合的竞争过程中由于迁移率的变化而产生光电导,在偏置电场的作用下呈现出输出电流的线性和非线性工作模式.

3.1. 光电导效应的物理过程

光电导效应包括光吸收和载流子的激发、热载流子弛豫、电荷载流子的迁移和复合等,发生在激发载流子的整个寿命时间内^[10,11].在这一时间内,光激发载流子可在内场、外场或浓度梯度场等影响下运动,从而使人们观察到各种不同的与光电导过程有关的光电导效应.

3.2. 光激发热载流子的输运与复合

实验用波长为532 nm的超短脉冲激光照射GaAs芯片,将在芯片被照射表面附近产生光生电子-空穴对.由于光子能量较大($h\nu \gg E_g$),光激发的

导带电子和价带空穴均产生在远离能带边缘的高激发状态(热激发态,或称热载流子),这些高激发态的热载流子通过辐射或无辐射跃迁的复合过程回到基态.对于GaAs材料而言,空穴的有效质量是电子的数倍,因而空穴对光电信号变化的影响非常小.在上述光激发形成载流子的过程中,主要考虑光生热电子的产生与输运.处于高激发态的热电子在与GaAs芯片材料的相互作用过程中,最大概率的是热电子将首先通过电子-电子,电子-声子的相互作用,弛豫掉过剩的动能而达到带边缘附近的冷激发态,然后经复合过程回到基态.

假定光电子(热电子)刚被产生时能量为 $E_h = h\nu - E_g$,通常和纵光学声子(LO声子)的相互作用最强,弛豫时间为^[12]

$$\tau_{eo} = \frac{1}{\alpha_p \omega_0} \frac{k}{\text{arccosh}(k)} \quad (1)$$

对于极性半导体,如InSb, GaAs等, τ_{eo} 约为 10^{-12} — 10^{-14} s^[12].这时,首先进行热电子-LO声子相互作用,如图4所示,使热电子动能 E_h 迅速下降到小于一个LO声子能量值 $\hbar\omega_0$ (ω_0 为光学声子频率),即当 $0 < E_h < \hbar\omega_0$ 时,能量耗散通过与声学声子的相互作用来实现.弛豫时间为^[12]

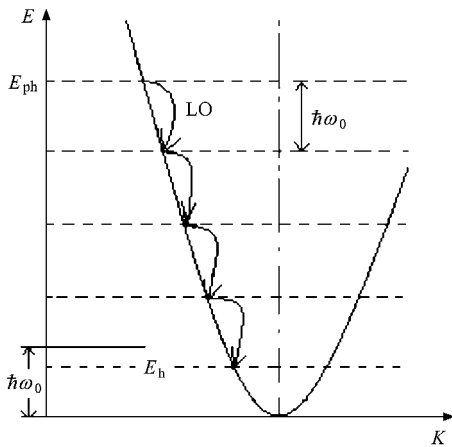


图4 热激发电子弛豫过程示意图

$$\tau_{ep} = \frac{\pi \hbar^4 \rho}{2\sqrt{2} m^{*5/2} E_1^2} E_h^{-1/2}. \quad (2)$$

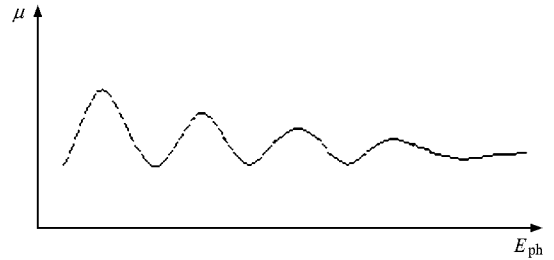
一般而言,热电子-声学声子作用时间会更长,对于 GaAs 材料由(2)式估算 $\tau_{ep} > 10^{-7}$ s. 因此,热电子-声子的相互作用主要发生在热电子已经弛豫到最低带边缘附近能量小于一个光学声子能量 $\hbar\omega_0$ 的情况. 此外,通过电子-电子的相互作用,热电子的能量还可以在自由电子和空穴间再分配,电子相互间也可以交换能量但不影响电子的总能量. 它们能量的分布符合麦克斯韦分布,弛豫时间为^[12],

$$\tau_{ee} = \frac{m^{*1/2} (3k_B T)^{3/2} E^2}{10\pi e^4 \ln \left\{ \frac{3}{2} n [(k_B T)^3 E^3 (\pi n e^6)]^{1/2} \right\}}, \quad (3)$$

其中 T 为热电子温度,弛豫时间 τ_{ee} 随载流子浓度而变化,因而对于开关处于线性与非线性工作状态而不同. 上述弛豫时间与载流子寿命 τ_n 之间关系的不同,可以有不同特征电子分布函数,使载流子具有不同的迁移率.

3.3. 热电子的光电导振荡效应

用波长为 532 nm 的超短脉冲激光照射 GaAs 芯片时,在芯片被照射表面附近产生热电子,假定热电子刚被产生时能量为 $\hbar\nu - E_g$,经级联发射 LO 声子过程后,热电子能量减小为 $E_h = \hbar\nu - E_g - n\hbar\omega_0$. 由此可见,随着热电子能量的增加,级联过程后的热电子能量可以在 $0 - \hbar\omega_0$ 之间振荡,使迁移率随热电子能量的变化而出现振荡,从而呈现出光电导振荡现象,如图 5 所示. 当 $\tau_n < \tau_{ep}, \tau_{ee}$ 时,在载流子的整个寿命时间内光电子是热电子,迁移率与热电子能

图5 迁移率 μ 与光电子能量 E_{ph} 的依赖关系

量有关,并以 $\hbar\omega_0$ 为周期随热电子能量的增大出现振荡,且迁移率的极小值(光电导的极小值)发生在 $E_{ph} = n\hbar\omega_0$ 的能量位置上. 当 $\tau_{ee} < \tau_n < \tau_{ep}$ 时,则在光生载流子的整个寿命时间内定义一个热电子分布函数,仍可能通过迁移率调制引起光电导的振荡. 动量损失可能导致光电导振荡. 在热电子能量刚好低于光学声子能量 $\hbar\omega_0$ 时,载流子可以从偏置电场中获得能量并立即通过发射 LO 声子被散射到原点附近,于是在电势梯度方向上有净的动量损失,从而导致光电流下降,因而出现光电导振荡现象. 另外,俘获机制不同导致的寿命调制也可能引起光电导振荡,带间激发和激子激发情况下也可能出现振荡光电导现象^[13-15].

3.3.1. 开关在线性工作状态下情形

用波长为 532 nm 的超短脉冲激光照射 GaAs 芯片,将在芯片被照射表面附近产生大量的光激发热载流子. 光激发的电子和空穴具有比相应带中载流子的热平衡能量大得多的动能,这些热电子在芯片体内将相继发生下列情况:在偏置电场中获得能量 $\Delta\epsilon$; 电子-电子相互作用; 电子-声子相互作用. 上述过程中热电子的能量 $E = \Delta\epsilon + \hbar\nu - E_g$,处于高激发态的热电子首先经过与 LO 声子相互作用,能量很快减小为 $E_h = E - n\hbar\omega_0$. 根据(3)式可估算出热电子在线性状态下的弛豫时间 $\tau_{ee} \approx 10^{-8}$ s,即热电子弛豫时间与载流子寿命之间将满足 $\tau_n < \tau_{ee} < \tau_{ep}$ (GaAs 材料载流子的寿命为纳秒量级),电子分布处于热电子状态. 随着热电子在置偏电场下获得能量的增加,级联发射 LO 声子过后的热电子能量总可以在 $0 - \hbar\omega_0$ 之间振荡,因而引起载流子迁移率的振荡,可能通过迁移率调制引起光电导的振荡. 同时,热电子弛豫又伴随着载流子的复合而引起振荡减弱直至导通截止,使我们观察到线性电脉冲在经历一个高斯型的主脉冲之后呈现出规律的、不同程度的减幅振荡,开关电阻同时恢复高阻状态.

3.3.2. 开关在非线性工作状态下的情形

在偏置电场及光能阈值均较强的情况下,芯片体内的载流子数将出现雪崩倍增,其浓度比线性状态时载流子的浓度大 3—5 个数量级,且在偏置电场的作用下与线性状态一样,载流子同样将经历在电场中加速获得能量 $\Delta\epsilon$ 、电子-电子及电子-声子相互作用的过程.由(3)式估算载流子的弛豫时间 $\tau_{ee} < 10^{-9}$ s,即热电子弛豫时间与其寿命之间满足 $\tau_{ee} < \tau_n < \tau_{ep}$,热载流子和晶格系统不再处于热平衡状态,将迅速发射 LO 声子使其能量在 $0—\hbar\omega_0$ 之间振荡,通过迁移率调制引起光电导的振荡.而且在非线性工作状态下开关体内热电子由于雪崩倍增使其浓度非常大,电子-电子相互作用达到平衡的弛豫时间很短($\tau_{ee} < \tau_n$),在热电子弛豫与复合的竞争中,体内热电子的能量及浓度将达到稳定的热平衡状态,振荡逐渐消失并进入导通维持状态.因此,电脉冲在主

峰过后呈现出不同程度的周期性减幅振荡现象,并随着时间的推移振荡逐渐消失,最后进入稳定的锁定状态.

4. 结 论

从 SI-GaAs 中电子-电子,电子-声子相互作用的微观状态和过程出发,分析了用 532 nm 激光脉冲触发 SI-GaAs 光电导开关产生振荡输出的实验现象.分析认为,实验中输出电脉冲出现振荡的主要原因来自于开关体内的热电子效应,开关芯片内的载流子寿命及其与电子、声子的弛豫时间满足 $\tau_n < \tau_{ep}$, τ_{ee} 条件.在偏置电场作用下,热电子将从电场中获得能量,随着热电子能量的增加,光电子输运将通过迁移率调制引起光电导振荡现象,从而导致输出电脉冲出现不同程度的周期性减幅振荡.

- [1] Islam N E , Schamiloglu E , Fleddermann C B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1988
- [2] Loubriel G , Zutavern F , O'Malley M , Nuss M C 1995 *Proc. SPIE* **2343** 21
- [3] Shi W , Dai H Y , Zhang X B 2005 *Chin. J. Semicond.* **26** 460
- [4] Li Q , Zhang X B , Shi W 2002 *Acta Photon. Sin.* **31** 1086 (in Chinese) [李琦、张显斌、施卫 2002 光子学报 **31** 1086]
- [5] Shi W , Tian L Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 202103
- [6] Jia W L , Ji W L , Shi W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2042 (in Chinese) [贾婉丽、纪卫莉、施卫 2007 物理学报 **56** 2042]
- [7] Shi W , Wang X M , Hou L , Xu M , Liu Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7185 (in Chinese) [施卫、王馨梅、侯磊、徐鸣、刘峥 2008 物理学报 **57** 7185]
- [8] Shi W , Qu G H , Wang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 477 (in

Chinese) [施卫、屈光辉、王馨梅 2009 物理学报 **58** 477]

- [9] Liang L , Yu Y H , Peng Y B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2627
- [10] Mazzola M S , Roush R A , Stoudt D C , Tukres J D 1991 *IEEE Pulsed Power Conf.* **71** 114
- [11] Lacassie F 1999 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **2** 189
- [12] Shen X C 2002 *Optical Spectrum and Optical Properties of Semiconductor* (2nd Ed.) (Beijing : Science Press) p407 (in Chinese) [沈学础 2002 半导体光谱和光学性质(第二版) (北京 科学出版社) 第 407 页]
- [13] Godik E E 1968 *J. Phys. C* **30** 127
- [14] Novikov B V , Sokolov N S , Gastev S V 1976 *Phys. State Sol.* **B 74** 81
- [15] Li J X , Zhang M J , Niu S X , Wang Y C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4516

Characteristics of photoconductivity oscillation in semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switches^{*}

Shi Wei^{1)†} Xue Hong^{1)✉} Ma Xiang-Rong¹⁾

^{1)✉} Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

^{2)✉} Department of Physics and Electronic Engineering, Weinan Teachers University, Weinan 714000, China)

(Received 2 March 2009 ; revised manuscript received 27 April 2009)

Abstract

The 4 mm gap and 5 ns pulse width semi-insulating GaAs photoconductive switches were triggered by 532 nm laser pulse with gradual increase of bias voltage from 500 V in steps of 50 V until the emergence of nonlinear electrical pulse. The experimental results showed that the linear and nonlinear electrical pulse waveforms had smaller amplitude and varying degrees of oscillation reduction after going through a main pulse. Then the microscopic state and transport process of carriers (hot-electron) in the switch material were studied in detail using the quantum theory. It was found that in the DC bias electric field, when the relaxation time of the hot-electrons in the electron-electron and electron-phonon interaction process is longer than the carrier life, the photoconductivity oscillation can be caused by the change of mobility in the process of optoelectronic transport, which is the main cause for the output electrical pulse to show oscillations.

Keywords : photoconductive semiconductor switch, hot-electron, relaxation, photoconductivity oscillation

PACC : 7220H, 7240, 7220J

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB310406), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50837005, 10876026), the specialized scientific Research Foundation of Educational Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 09JK431) and the Scientific Research Foundation of Weinan Teachers University, China (Grant Nos. 08YKF022, 09YKZ021).

[†] E-mail : swshi@mail.xaut.edu.cn