

# 调制掺杂 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料持久光电导 及子带电子特性研究\*

舒 强<sup>1)</sup> 舒永春<sup>1)†</sup> 张冠杰<sup>1)</sup> 刘如彬<sup>1)</sup> 姚江宏<sup>1)</sup> 皮 彪<sup>1)</sup>  
邢晓东<sup>1)</sup> 林耀望<sup>1)‡</sup> 许京军<sup>1)</sup> 王占国<sup>1)‡</sup>

1) 南开大学泰达应用物理学院, 南开大学弱光非线性光子学材料及先进制备技术教育部重点实验室, 天津 300457)

2) 中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

(2005 年 7 月 12 日收到, 2005 年 8 月 3 日收到修改稿)

在掺 Si 的 GaAs/AlGaAs 二维电子气(2DEG)结构中, 得到  $\mu_{2K} = 1.78 \times 10^6 \text{ cm}^2 (\text{V} \cdot \text{s})$  的高迁移率. 在低温(2K)和高磁场(6T)的条件下, 对样品进行红光辐照, 观察到持久光电导(PPC)效应, 电子浓度在光照后显著增加. 通过整数量子霍尔效应(IQHE)和 Shubnikov-de Haas(SdH)振荡的测量, 研究了 2DEG 的子带电子特性. 样品在低温光照后 2DEG 中第一子带和第二子带的电子浓度同时随电子总浓度的增加而增加, 而且电子迁移率也明显提高. 同时, 通过整数霍尔平台的宽度对光照前后电子的量子寿命变短现象作了理论分析.

关键词: 二维电子气, 量子霍尔效应, SdH 振荡, 持久光电导效应

PACC: 7230D, 7220J, 7340H

## 1. 引 言

在过去的 20 年里, 人们已经对掺 Si 的 GaAs/AlGaAs 高电子迁移率二维电子气(2DEG)结构的持久光电导效应进行了大量的实验及理论研究<sup>[1,2]</sup>. 发现在一些 III-V 族化合物半导体中, 当样品在低温(2K)下被光照(红外或者可见光)后, 其电子浓度会明显增加. 这主要是由于 DX 中心的存在. DX 中心是一个复杂的深能级缺陷, 涉及到施主(Donor)和某个未知的缺陷(X). 在低温时 DX 中心的能级在费米能级之下, 被电子占据. 光照后吸收能量被激发而进入量子阱的导带内, 光照停止后, 电子在低温中没有足够的能量越过势垒, 所以量子阱中的导带内电子增加. 这种现象被称为持久光电导(PPC)效应. 1968 年, Craford 在研究 GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> 时观察到这个现象<sup>[3]</sup>. 随后人们相续又在 AlGaAs(Te)<sup>[4]</sup>, ZnCdTe(Cl)<sup>[5]</sup>和 AlN(Si)<sup>[6]</sup>结构中得到了 PPC 效应. 1977 年, Nelson 在 n 型 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 结构中观察到了 PPC 效应<sup>[7]</sup>. 随后人们对于这个现象进行了大量的实验

和理论研究<sup>[8]</sup>. 由于和 PPC 效应相关的 DX 中心是一个深能级缺陷, 它的存在对于器件的性能有很大的影响, 所以人们对于 PPC 的研究有很大的兴趣.

在调制掺杂 GaAs/AlGaAs 异质结构中, 垂直于界面电子的运动被限制在紧靠界面的极窄的势阱中, 而在平行于界面的方向上可做自由运动, 形成 2DEG. 横向磁阻的 Shubnikov-de Haas(SdH)振荡曲线和量子霍尔效应曲线是研究半导体中电子迁移性质的很好工具. Fang 和 Howard 在研究掺 Si 金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)时发现, 在低温下, 由于电子对阳离子杂质的屏蔽作用, 电子浓度的增加导致 2DEG 的迁移率增加<sup>[9]</sup>. 在 AlGaAs/GaAs 结构中的 2DEG 更容易研究, 因为在掺 Si 的 MOSFET 结构的一些例如谷间散射和表面粗糙度散射等散射机理在这些结构中可以被忽略. Stomer 等人发现当电子浓度超过一定数值时, 霍尔迁移率由于子带间散射的开始而减小了<sup>[10]</sup>. 他们认为迁移率的下降是由于第二子带比第一子带有更低的迁移率, Mori 和 Ando 通过理论计算给予了证明<sup>[11]</sup>. 在进一步的研究中, 人们得到第二子带的散射时间比第一子带的散射时间更短<sup>[12]</sup>. 但 Smith 和 Fang 认为一般第一

\* 国家自然科学基金(批准号: 60476042), 长江学者和创新团队发展计划和南开大学泰达学院资助的课题.

† E-mail: shuyc@nankai.edu.cn

子带的电子一般更靠近界面,因而更靠近 AlGaAs 层的电离杂质,它们将有比第二子带更强的散射,所以,第二子带中电子的弛豫时间比第一子带的更长,迁移率比第一子带的更大<sup>[13]</sup>.

## 2. 样品结构

实验中使用的样品是通过分子束外延(MBE)的方法生长的调制掺杂(Si)的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As( $x = 0.28$ )结构.其结构为半绝缘的 GaAs 衬底(S. I. Substrate);1.2 $\mu\text{m}$ 的 GaAs 缓冲层;220 $\text{\AA}$ 的不掺杂的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As( $x = 0.28$ )隔离层;上面是 550 $\text{\AA}$ 的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的 Si 掺杂层、最上面是 75 $\text{\AA}$ 的 Si-GaAs 盖层.结构图如图 1 所示. AlGaAs 的禁带宽度大于

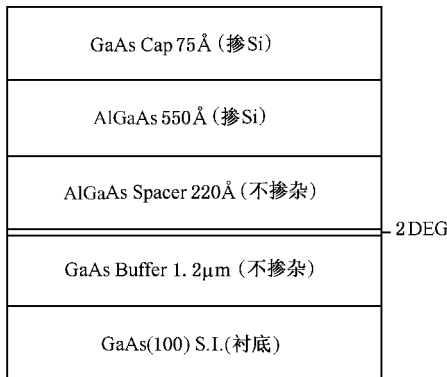


图 1 样品结构示意图

GaAs( $E_g | \text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As} = 1.70\text{eV}$ ,  $E_g | \text{GaAs} = 1.24\text{eV}$ )这种带隙的差异导致了在异质界面带边断续,重掺杂的 AlGaAs 层中的电子将转移到非掺杂的 GaAs 一侧,而电离施主仍留在 AlGaAs 一侧.界面附近能带发生弯曲,AlGaAs 一侧形成势垒,GaAs 一侧

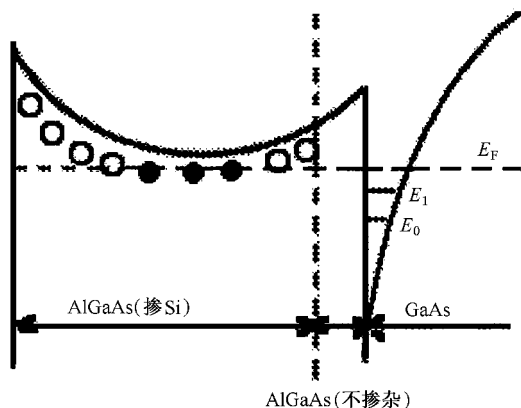


图 2 样品导带示意图

形成准三角势阱.其中不掺杂的 AlGaAs 层减弱了势阱中电子与电离施主之间的库仑作用(杂质散射),使电子的迁移率增加.光照后得到  $\mu_{2K} = 1.78 \times 10^6 \text{cm}^2 (\text{V} \cdot \text{s})$  的高迁移率.其导带示意图如图 2 所示.

## 3. 实验结果与讨论

在强磁场(6T)和低温(2K)的条件下,我们测量了样品在光照前后的量子霍尔平台和 SdH 振荡曲线,研究了 2DEG 中电子迁移特性.实验中使用的辐照光是红光.辐照前后,均得到了很好的整数量子霍尔平台.在实验中没有发现和分数霍尔效应相关的平台.光照前后的结果如图 3 所示.

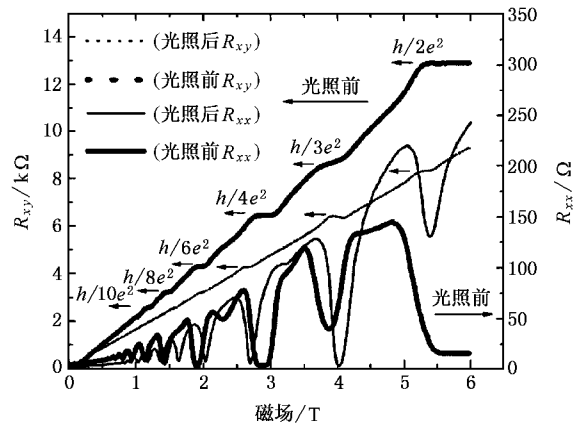


图 3 光照前后霍尔效应及 SdH 振荡曲线

当  $\hbar\omega_c > k_B T$ ,即低温高磁场的条件下,样品横向磁阻由振动项和非振动项组成  $\rho = \rho_{\text{oscillatory}} + \rho_{\text{nonoscillatory}}$ ,其中振荡项  $\rho_{\text{oscillatory}}$  对于 2DEG 的研究起重要作用.这时 2DEG 受到量子阱的限制以及磁场作用,处于由量子阱限制造成的量子化能级和由磁场作用而形成的分立朗道能级中.当朗道能级越过费米能级时,横向磁阻会产生振荡现象.对于一个特定的由量子阱限制造成的量子化子能级( $E_i$ ),磁阻的振荡( $\delta\rho_{xx}$ )能被表达成<sup>[14]</sup>

$$\delta\rho_{xx} = 2\bar{\sigma}_{xx} \frac{(\omega_i\tau_i)^2}{1 + (\omega_i\tau_i)^2} \exp\left[-\frac{\pi}{\omega_i\tau_i}\right] \frac{\xi_i}{\sin(\xi_i)} \times \cos\left[2\pi \frac{E_F - E_i}{\hbar\omega_i} + \phi_i\right], \quad (1)$$

下标  $i$  指的是第  $i$  个子带,这是由量子阱限制造成的量子化子能级. $\omega_i = eB/m_i^*$  是角回旋频率; $m_i^*$  是电子回旋有效质量; $\tau_i$  是电子弛豫时间; $\bar{\sigma}_{xx}$  是平均

磁导率 ; $\phi_i$  是第  $i$  个子带的相 ; $\xi_i = 2\pi^2 k_B T / \hbar \omega_i \cdot k_B$  是玻耳兹曼常数 ; $\hbar = h / 2\pi$  ( $h$  是普朗克常数)。

费米能级和第  $i$  子带最小值的差为

$$\Delta E_i = E_F - E_i = \frac{\pi \hbar n_i}{m_i^*}, \quad (2)$$

$n_i$  是由量子阱限制造成的第  $i$  个量子化子能级的电子浓度。把 (2) 式代入 (1) 式可得到

$$\begin{aligned} \delta\rho_{xx} &= 2\sigma_{xx} \frac{(\omega_i \tau_i)^2}{1 + (\omega_i \tau_i)^2} \exp\left[-\frac{\pi}{\omega_i \tau_i}\right] \frac{\xi_i}{\sin(\xi_i)} \\ &\times \cos\left[2\pi \frac{\hbar n_i}{2e} \frac{1}{B} + \phi_i\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

因而 SdH 曲线随  $1/B$  振荡的频率仅同 2DEG 的电子浓度  $n_i$  有关系，

$$f_{\text{SdH}} = \frac{\hbar n_i}{2e}. \quad (4)$$

在磁场从 0.3T 到 5.2T 的范围内,从对应的  $1/B$  的区间里取 1024 个点,对 SdH 振荡曲线做了以相等的  $1/B$  为间距的快速傅里叶变换(FFT)。经快速傅里叶变换后的图中有两个峰值振幅,这说明 2DEG 中有两个子带被占据<sup>[15]</sup>。由 (4) 式知其对应的两个频率是由这两个子带的电子浓度决定的。结果如图 4(光照前)和图 5(光照后)所示。

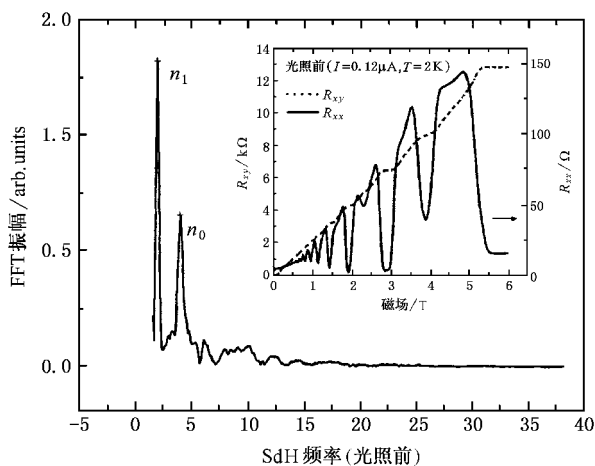


图 4 光照前的 SdH 数据的傅里叶变换图(小图为辐照前的 SdH 及霍尔效应图)

在实验测量中,得到光照前 2DEG 的总电子浓度( $n_T$ )为  $2.28 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,而光照后为  $3.76 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加为将近原来的 1.65 倍。根据方程 (4) 和傅里叶变换的结果可得到,光照后第二子带的电子浓度( $n_1$ )从  $0.94 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加到了  $1.30 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ; 而第一子带的电子浓度( $n_0$ )从  $1.94 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加到  $2.46 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。如表 1 所示。

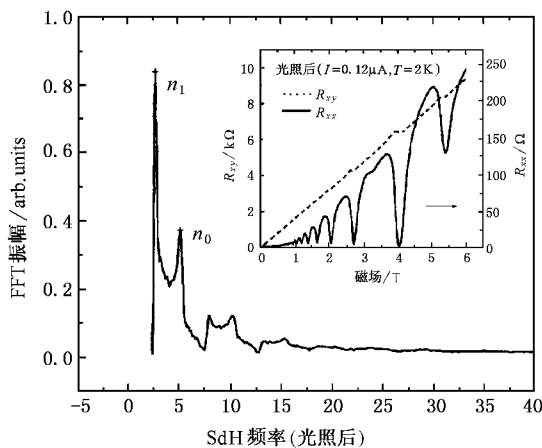


图 5 光辐照后的 SdH 数据的傅里叶变换图(小图为辐照前的 SdH 及霍尔效应图)

表 1 电子浓度

	$n_0/\text{cm}^{-2}$	$n_1/\text{cm}^{-2}$	$n_T/\text{cm}^{-2}$
光照前	$1.94 \times 10^{11}$	$0.94 \times 10^{11}$	$2.28 \times 10^{11}$
光照后	$2.46 \times 10^{11}$	$1.30 \times 10^{11}$	$3.76 \times 10^{11}$

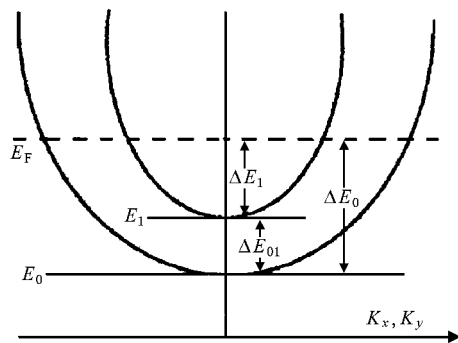


图 6 样品结构能级示意图

这说明当 2DEG 中总电子浓度增加时,两个子带的电子浓度都增加<sup>[13]</sup>。说明电子在进行子能级填充时,第一子带还没全部填满第二子带已经开始填充。但光照使 DX 中心的深能级杂质被激发,第一子带得以继续填充。我们利用  $m^* = 0.067m_0$  ( $m^*$  为 GaAs 材料中的电子有效质量,  $m_0 = 9.108 \times 10^{-31} \text{ kg}$  为电子的惯性质量),以及方程 (2),可粗略估计两个子带和费米能级的能量间隔。费米能级和第一子带和第二子带的能级间隔分别为  $\Delta E_0 = 8.88 \text{ meV}$  和  $\Delta E_1 = 4.69 \text{ meV}$ 。两能级间隔  $\Delta E_{01} = 4.19 \text{ meV}$ 。其能级关系如图 6 所示。

在经过 FFT 后的图中,其峰值的高低代表着各自能带中电子量子寿命的长短。从图 4 和图 5 中可

得到,第二子带的峰值(对应于  $n_1$ )要比第一子带的峰值(对应于  $n_0$ )高,所以第二子带中电子的量子寿命比第一子带中的长,受到的散射比第一子带小,样品经光照后,各自能带的峰值均较光照前有所减小,说明光照前后电子的量子寿命减小.在具有两个子带的系统中,影响电子量子寿命的主要是子带间散射的大小和电子对阳离子的屏蔽作用的强弱.由于两个子带的电子浓度的增加所引起电子子带间散射的影响超过了对阳离子屏蔽作用的影响<sup>[16]</sup>.

当载流子的量子寿命  $\tau_q$  减小时,说明 2DEG 中载流子的散射增加.因此,朗道能级展宽了,电子自旋态的相对空间分布就减小.磁场中电子的自旋分裂是由于塞曼能  $E_s$  引起的,

$$E_s = s(\mu_B B + E_{ex}), \quad (5)$$

这里  $s$  是自旋量子数 ( $\pm 1/2$ ),  $\mu_B$  是波尔磁子,  $E_{ex}$  是交换能量.并且  $E_{ex}$  由其朗道能级中两个自旋态的布局的不同决定,

$$E_{ex} \propto n_N \uparrow - n_N \downarrow. \quad (6)$$

电子自旋态空间分布的减小导致  $E_{ex}$  的减小.所以电子自旋分裂朗道能级对应的磁场范围减小,即自旋分裂量子霍尔平台所对应的磁场范围减小.故霍尔平台的宽度也减小<sup>[17]</sup>.

从实验结果中可看到(如图 1),光照后,整数霍尔平台的宽度变窄.以填充因子  $i = 6$  为例.光照前,其平台宽度(这里以平台处磁阻的变化同磁阻的比值小于 0.1% 为标准来计算其宽度)是 0.0577T;而

在光照后是 0.0352T.减小将近 64%.而光照前后,第一子带的峰值从 0.651 减小到 0.372,减小 75%;第二子带的峰值从 1.323 减小到 0.838,减小 58%.光照前后峰值变化的均值同平台宽度的变化值相当.说明光照前后电子量子寿命变短(FFT 图中的峰值变小)和整数霍尔平台宽度变窄相符.

## 4. 结 论

在低温(2K)下,对掺 Si 的 GaAs/AlGaAs 高电子迁移率 2DEG 结构进行光照,其具有明显的持久光电导(PPC)效应,电子浓度在光照后从  $2.28 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加到  $3.76 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .测量样品的霍尔电阻和横向磁阻,得到了整数量子霍尔效应(IQHE)和 SdH 振荡曲线;对 SdH 振荡曲线进行快速傅里叶变换后,得到样品在低温光照后第一子带和第二子带的电子浓度同时增加;分别从  $1.94 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加到  $2.46 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  和从  $0.94 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  增加到  $1.30 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .估算了费米能级和两个子带之间的能级间隔  $\Delta E_{01} = 4.19 \text{ meV}$ .光照后两个子带中电子的量子寿命均有所减小,以光照前后  $i = 6$  为例的整数霍尔平台宽度变化进一步解释了这个现象.

在该项研究工作中,得到中国科学院物理研究所吕力教授和国家纳米技术与工程研究院牟诗诚高级工程师的大力支持,在此表示深深的谢意.

- [1] Chadi D J, Chang K J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 873
- [2] Xiao X F, Kang J Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **51** 138 (in Chinese)  
[肖细凤、康俊勇 2001 物理学报 **51** 138]
- [3] Craford M G, Stillman G E, Rossi J A, Holonyak N 1968 *Phys. Rev.* **168** 867
- [4] Lang D V, Logan R A, Jaros M 1979 *Phys. Rev.* **B 19** 1015;
- [5] Burkey B C, Khosla R P, Fischer J R, Losee D L 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 1095
- [6] Zeisel R, Bayerl M W, Goennenwein S T B et al 2000 *Phys. Rev.* **B 61** 16283
- [7] Nelson R J 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 351
- [8] Fletcher R, Zarembo E, D'Iorio M, Foxon C T, Harris J J 1990 *Phys. Rev.* **B 41** 10649
- [9] Fang F F, Howard W E 1966 *Phys. Rev. Lett.* **16** 797;
- [10] Stormer H L, Gossard A C, Weigmann W 1982 *Solid State Commun.* **41** 707
- [11] Mori S, Ando T 1980 *J. Phys. Soc. Jpn.* **48** 865
- [12] Lrui S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2263
- [13] Smith III T P, Fang F F 1988 *Phys. Rev.* **B 37** 4303
- [14] Ikai Lo, Mitchel W C, Perrin R E, Messham R L, Yen M Y 1990 *Phys. Rev.* **B 43** 11787
- [15] Ando T 1982 *J. Phys. Soc. Jpn.* **51** 3893
- [16] Ikai Lo, Mitchel W C, Ahoujja M, Cheng J P, Fathimulla A, Mir H 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 755
- [17] Gottwaldt L, Pierz K, Schweitzer L, GoBel E O 2003 *J. Phys. : Condens. Matter* **15** 5073

# Study of persistent photoconductivity and subband electronic properties of the two-dimensional electron gas in modulation doped GaAs/AlGaAs structure<sup>\*</sup>

Shu Qiang<sup>1)†</sup> Shu Yong-Chun<sup>1)†</sup> Zhang Guan-Jie<sup>1)</sup> Liu Ru-Bin<sup>1)</sup> Yao Jiang-Hong<sup>1)</sup>  
Pi Biao<sup>1)</sup> Xing Xiao-Dong<sup>1)</sup> Lin Yao-Wang<sup>1)2)</sup> Xu Jing-Jun<sup>1)</sup> Wang Zhan-Guo<sup>1)2)</sup>

1) *Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials of Ministry of Education, and TEDA Applied Physics School, Nankai University, Tianjin 300457, China*

2) *Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

(Received 12 July 2005; revised manuscript received 3 August 2005)

## Abstract

We obtained the high mobility of  $\mu_{2K} = 1.78 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  in Si-doped GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas (2DEG) structures. After the sample was illuminated by a light-emitting diode in magnetic fields up to 6 T at  $T = 2\text{K}$ , we did observe the persistent photoconductivity effect and the electron density increased obviously. The electronic properties of 2DEG have been studied by Quantum-Hall-effect and Shubnikov-de Haas (SdH) oscillation measurements. We found that the electron concentrations of two subbands increase simultaneously with the increasing total electron concentration, and the electron mobility also increases obviously after being illuminated. At the same time, we also found that the electronic quantum lifetime becomes shorter, and a theoretical explanation is given through the widths of integral quantum Hall plateaus.

**Keywords** : two-dimensional electron gas, quantum Hall effect, SdH oscillations, persistent photoconductivity

**PACC** : 7230D, 7220J, 7340H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60476042), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University and TEDA School Nankai University.

<sup>†</sup> E-mail : shuyc@nankai.edu.cn