

利用 p-n<sup>+</sup> 结反向 *I-V* 特性计算 p-GaN 载流子浓度的方法

周梅 李春燕 赵德刚

A new method to estimate the p-GaN carrier concentration by analyzing the reversed current-voltage characteristic curve of p-n<sup>+</sup> junction diode

Zhou Mei Li Chun-Yan Zhao De-Gang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 197302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.197302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

阶梯 AlGa<sub>0.25</sub>N 外延新型 Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN HEMTs 器件实验研究

Experimental research on the new Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN HEMTs with a step AlGa<sub>0.25</sub>N layer

物理学报.2015, 64(23): 237302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237302>

具有半绝缘多晶硅完全三维超结横向功率器件

Complete three-dimensional reduced surface field super junction lateral double-diffused metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with semi-insulating poly silicon

物理学报.2015, 64(18): 187303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.187303>

具有 P 型覆盖层新型超级结横向双扩散功率器件

New super junction lateral double-diffused metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with the P covered layer

物理学报.2015, 64(16): 167304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167304>

开态应力下电压和电流对 AlGa<sub>0.25</sub>N/GaN 高电子迁移率晶体管的退化作用研究

Degradation induced by voltage and current for AlGa<sub>0.25</sub>N/GaN high-electron mobility transistor under on-state stress

物理学报.2015, 64(12): 127303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.127303>

阶梯氧化层新型折叠硅横向双扩散功率器件

New folding lateral double-diffused metal-oxide-semiconductor field effect transistor with the step oxide layer

物理学报.2015, 64(6): 067304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.067304>

# 利用 p-n<sup>+</sup> 结反向 *I-V* 特性计算 p-GaN 载流子浓度的方法\*

周梅<sup>1)</sup> 李春燕<sup>1)</sup> 赵德刚<sup>2)†</sup>

1) (中国农业大学理学院应用物理系, 北京 100083)

2) (中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2016年1月1日收到; 2016年5月2日收到修改稿)

提出了一种利用 p-n<sup>+</sup> 结反向 *I-V* 特性随偏压变化的关系计算 p-GaN 载流子浓度的方法. 研究发现, 当 p-n<sup>+</sup> 中的 p-GaN 层没有完全耗尽时, 反向电流比较小, 属于正常的 p-n 结电流特性, 当反向偏压增加到一定值时, p-GaN 层就完全耗尽, p-n<sup>+</sup> 结特性就变成了肖特基结特性, 反向电流显著增加. 找到达到稳定反向电流的临界电压值, 就可以计算出 p-GaN 的载流子浓度. 模拟结果验证了这个思想, 计算得到的 p-GaN 载流子浓度与设定值基本一致.

**关键词:** p-n<sup>+</sup> 结, 反向 *I-V* 特性, p-GaN 载流子浓度

**PACS:** 73.40.Kp, 73.30.+y

**DOI:** 10.7498/aps.65.197302

## 1 引言

作为第三代半导体, 氮化镓 (GaN) 基材料在光电子学和微电子学领域都有重要的应用价值, 也是当今国际半导体的研究热点之一. 由于与衬底的晶格失配大, 在很长一段时间内, GaN 外延材料质量很差, 不能满足器件的要求. 自从两步生长法的提出及 p 型的实现<sup>[1-3]</sup>, GaN 材料和器件才取得实质性的突破, 经过多年的努力, 高亮度的 GaN 基蓝绿光发光二极管、高性能的 GaN 基蓝光激光器都已研制成功, 很多器件已经实现了商业化<sup>[4-8]</sup>. 尽管如此, 还是有许多科学问题需要进一步解决. p-GaN 是氮化镓光电子器件的重要组成部分, 其质量对器件性能有重要的影响, 准确测量 p-GaN 载流子浓度非常重要. 霍尔测量是一种常规测量 p-GaN 的方法, 然而由于欧姆接触难做, 测量结果有时候误差比较大. 探索新的测量或计算 p-GaN 载流子浓度的方法, 对于 p-GaN 的研究及器件的发展都具有十

分重要的意义.

本文提出了利用 p-n<sup>+</sup> 结反向 *I-V* 特性计算 p-GaN 载流子浓度的方法: 当 p-n<sup>+</sup> 中的 p-GaN 层没有完全耗尽时, 反向电流比较小, 属于正常的 p-n 结电流特性, 反向偏压超过某个值时, p-GaN 层完全耗尽, 那么就变成了肖特基结特性, 反向电流明显变大. 确定达到稳定的大反向电流的临界电压值, 就可以计算出 p-GaN 的载流子浓度. 其原理可简单解释如下: 由于 n<sup>+</sup>-GaN 载流子浓度很高, 耗尽区基本集中在 p-GaN 层, 随着反向偏压的增加, p-GaN 耗尽区逐步向表面扩展, 一旦 p-GaN 完全耗尽, 此时 p-n 结特性就变成了肖特基结特性, 反向电流显著增加到一个稳定的值, 由于此时 p-GaN 层完全耗尽, 那么根据半导体器件物理中耗尽区宽度 (此时刚好等于 p-GaN 层厚度)、载流子浓度与反向偏压的基本关系式, 就可以计算出 p-GaN 载流子浓度了. 模拟结果验证了这个思想, 计算得到的 p-GaN 载流子浓度与设定值基本一致.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61474142, 21403297 和 11474355) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dgzhao@red.semi.ac.cn

## 2 计算 p-GaN 载流子浓度所用的器件结构及基本思想

图 1 是计算 p-GaN 载流子浓度所采用的器件示意图。如图所示, 器件结构为 p-n<sup>+</sup> 结, n<sup>+</sup>-GaN 层与电极形成欧姆接触, 考虑到 p-GaN 的欧姆接触很难实现的情况, p-GaN 层与电极形成肖特基接触。我们认为可以利用这种 p-n<sup>+</sup> 结构的反向 I-V 特性就可以计算 p-GaN 载流子浓度。其基本思想如下: 在这个结构中存在着两个背靠背的结, 分别为金属与 p-GaN 形成的“金属/p-GaN 肖特基结”和“p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN p-n<sup>+</sup> 结”, 在零偏压下, 两个电场区没有连接到一起, 所以在较小的反向偏压下, 反向电流还是由 p-n<sup>+</sup> 结特性决定, 反向电流值比较小, 随着反向偏压的增加, 当 p-n<sup>+</sup> 结耗尽区完全合并肖特基结耗尽区时, 反向电流突然增加并达到一个稳定的值, 一旦确定这个临界电压, 就可以根据基本的器件物理计算出 p-GaN 层载流子浓度。

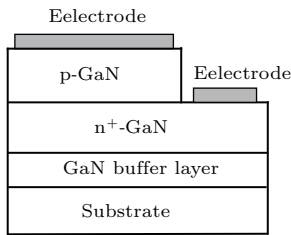


图 1 计算 p-GaN 载流子浓度所采用的 p-n<sup>+</sup> 结器件示意图

Fig. 1. The schematic diagram of p-n<sup>+</sup> device structure using to estimate the carrier concentration of p-GaN.

为了证明我们的这一思想, 我们采用美国宾州大学提供的 AMPS (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) 软件进行模拟计算分析, 该软件通过数值求解泊松方程和连续性方程, 得到器件的物理性质, 是一个对半导体器件进行性质分析的有力工具<sup>[9-11]</sup>。在本文的模拟计算中, n<sup>+</sup>-GaN 层的载流子浓度和厚度固定为  $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $1 \mu\text{m}$ 。我们设定了一个 p-GaN 层浓度, 最后的模拟结果计算出载流子浓度与设定值基本一致, 验证了这个思想的正确性。

## 3 模拟计算结果与讨论

在模拟计算中, 我们首先假设 p-GaN 层的载流子浓度和厚度分别为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.335 \mu\text{m}$ ,

表面电极与 p-GaN 层之间的肖特基势垒高度为  $1.64 \text{ eV}$  (费米能级距离 p-GaN 价带为  $1.64 \text{ eV}$ , 距离导带  $1.76 \text{ eV}$ ), 表面复合速率为  $1 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 。我们计算了该器件的 I-V 特性, 如图 2 所示。反向 I-V 特性曲线可以分成三个部分: (I) 偏压为  $-5 \sim 0 \text{ V}$  范围, 反向电流基本上不变; (II) 偏压为  $-8.5 \sim -5 \text{ V}$ , 这个范围内, 反向电流明显增加; (III) 偏压小于等于  $-8.5 \text{ V}$ , 这个范围内, 反向电流达到一个稳定值。

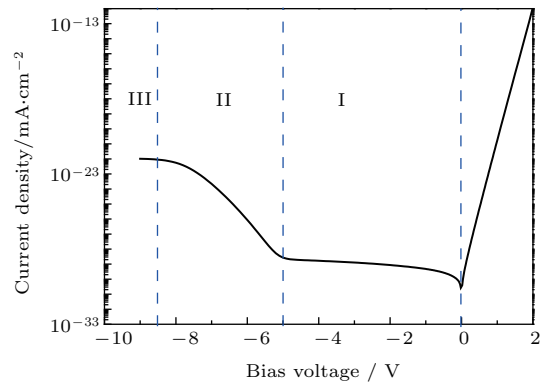


图 2 模拟计算得到的 GaN 基 p-n<sup>+</sup> 结器件 I-V 特性曲线  
Fig. 2. The calculated current-voltage curve of p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN diode, where the carrier concentration and thickness of p-GaN is  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and  $0.335 \mu\text{m}$ , respectively.

为了解释这个现象, 我们给出了器件导带结构随反向偏压变化的示意图, 如图 3 所示: 在这个结构中存在着两个背靠背的结, 表面的金属与 p-GaN 形成的肖特基结、p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN 结, 这两个结电场方向相反。由于 n<sup>+</sup>-GaN 的掺杂浓度很高, 绝大部分电场区都在 p-GaN 层 (靠近 n<sup>+</sup>-GaN 一侧), 表面的肖特基结电场区也在 p-GaN 层 (靠近表面一侧)。在零偏压下, 如图 3 的黑色曲线所示, 两个电场区没有连接到一起, 当器件处于较小的反向偏压下 (偏压为  $-5 \sim 0 \text{ V}$  范围), 此时 p-n<sup>+</sup> 处于反偏, p-GaN 与表面电极形成的肖特基结处于正偏, 由于表面的肖特基结处于正偏状态, 可以近似认为更多的电压加在 p-n<sup>+</sup> 结上, 此时反向电流还是由 p-n<sup>+</sup> 结特性决定, 反向电流值比较小。随着反向偏压的增加, 由于 p-n<sup>+</sup> 结处于反偏, 耗尽区不断扩展, 如果肖特基结的耗尽区和 p-n<sup>+</sup> 结的耗尽区连接到一起 (偏压为  $-8.5 \sim -5 \text{ V}$ ), 那么 p-n<sup>+</sup> 结就变成了肖特基结, 但是势垒高度比一般的肖特基结势垒高度更高 (也称为肖特基势垒高度增强结构)<sup>[9]</sup>。根据半导体器件物理, 我们知道, 理想情况肖特基结的反向电流要比 p-n 结的反向电流大得多 (这主要

是因为肖特基结的反向电流是多子电流, 而 p-n 结的反向电流是少子电流, 理想情况下少子电流要小得多), 所以此时反向电流就会显著增加. 当反向偏压进一步增加时, p-n<sup>+</sup> 结的耗尽区进一步向表面扩展, 那么肖特基势垒高度也同时降低, 反向电流也进一步增加, 当 p-n<sup>+</sup> 结耗尽区完全合并肖特基结耗尽区时 (偏压小于等于 -8.5 V), 此时就形成了正常的肖特基结 (对应的肖特基结势垒高度为 1.76 eV), 反向电流达到一个稳定的值.

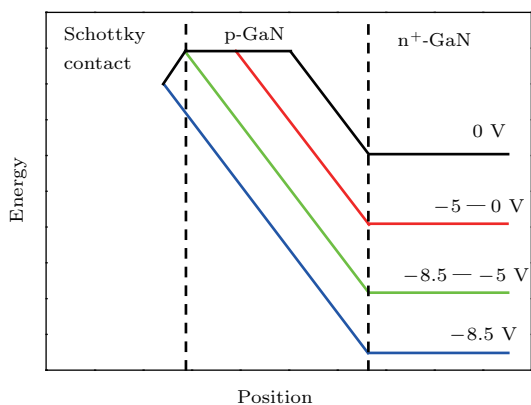


图3 (网刊彩色) p-n<sup>+</sup> 结 GaN 器件导带结构随反向偏压变化的示意图

Fig. 3. (color online) The schematic diagram of conduction band of p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN diode under different reversed bias voltage.

根据上述理论, 我们可以推测: 如果把 p-GaN 层换成 n-GaN 层, 并把电极与 n-GaN 层之间的肖特基势垒高度设定为 1.76 eV 时, 这个肖特基结的反向电流应该与 p-n<sup>+</sup> 结在 -8.5 V 以后的值大致相同. 为了验证这个想法, 我们还计算了“金属/n-GaN”肖特基结的 *I-V* 特性, 并与 p-n<sup>+</sup> 结特性进行了比较. 这里 n-GaN 层的载流子浓度和厚度分别为  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.335 \mu\text{m}$ , 表面电极与 n-GaN 层之间的肖特基势垒高度为 1.76 eV (费米能级距离 n-GaN 导带为 1.76 eV). 图 4 中黑色曲线为“金属/n-GaN”肖特基结的 *I-V* 特性, 红色曲线为 p-n<sup>+</sup> 结的 *I-V* 特性, 显然, 两者最终的反向电流值几乎一样, 说明我们对 p-n<sup>+</sup> 结 *I-V* 特性曲线分析正确. 图 4 中的插图为两个结构零偏压下的导带结构图, 可以看出, 当 p-n<sup>+</sup> 结在一定反向偏压下完全变成肖特基结构时, 两者的肖特基势垒高度完全相同, 这也验证了我们想法的正确性.

从上述分析我们可以知道, 当 p-n<sup>+</sup> 结的反向电流在一定偏压下达达到稳定值时, 此时 p-GaN 刚

好完全耗尽. 根据耗尽层宽度与反向偏压的关系, 我们很容易计算出 p-GaN 层的载流子浓度, 具体公式如下 [12]:

$$N_A = \frac{2\epsilon_s (V_R + V_{bi})}{qW^2}, \quad (1)$$

这里  $N_A$  是 p-GaN 层的载流子浓度;  $W$  是耗尽区宽度, 这里  $W$  在 -8.5 V 偏压下等于  $0.335 \mu\text{m}$ ;  $q$  是电子电荷;  $\epsilon_s$  是 GaN 材料的介电常数, 等于  $8.9 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ ;  $V_{bi}$  是 GaN 的 p-n<sup>+</sup> 的内建电势差, 可以近似等于 3 V,  $V_R$  是外加的反向偏压, 从图 2 中可以得知, 这里的  $V_R$  大约为 8.5 V 左右.

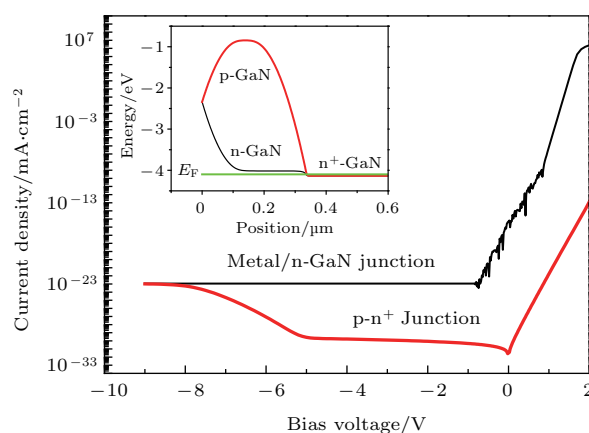


图4 (网刊彩色) 金属/n-GaN 肖特基结和 p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN 结的 *I-V* 特性曲线

Fig. 4. (color online) The calculated current-voltage curve of metal/n-GaN Schottky junction and p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN junction.

根据 (1) 式计算出的 p-GaN 层的载流子浓度大约为  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 这个值基本上等于计算中设定的值  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 这说明我们提出的想法正确合理. 为了进一步确定这种计算方法的有效性, 我们把 p-GaN 层的载流子浓度设定为  $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 其他参数与图 1 相同, 又计算了一次 p-n<sup>+</sup> 结器件的 *I-V* 特性. 如图 5 所示, 可以看出当反向偏压在 -2.5 V 时达到一个稳定值, 按照 (1) 式进行计算, 得到 p-GaN 载流子浓度约为  $4.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 与设定值基本一致.

综上所述, 我们提出了一种利用反向电流随偏压变化的关系对 p-GaN 层载流子浓度进行计算的方法, 该方法有一定的新颖性, 模拟计算也验证了该方法的正确性.

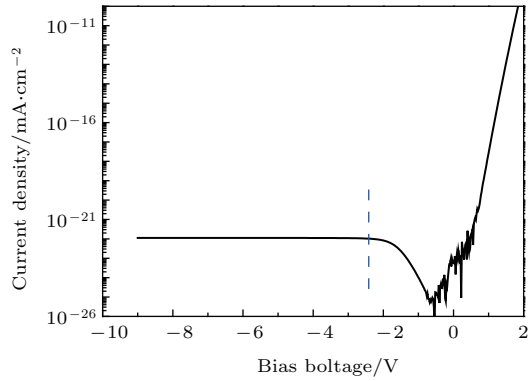


图5 模拟计算得到的GaN基p-n<sup>+</sup>结器件I-V特性曲线, p-GaN的载流子浓度设定为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Fig. 5. The calculated current-voltage curve of p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN diode, where the carrier concentration and thickness of p-GaN is  $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and  $0.335 \mu\text{m}$ , respectively.

## 4 结 论

本文提出了一种利用p-n<sup>+</sup>结反向I-V特性计算p-GaN载流子浓度的方法. 研究发现, 当p-n<sup>+</sup>中的p-GaN层没有完全耗尽时, 反向电流比较小, 属于正常的p-n结电流特性, 在反向偏压下, 一旦p-GaN层完全耗尽, 那么就变成了肖特基结特性, 反向电流变大. 找到这个反向电流最终达到稳定的临界电压值, 就可以计算出p-GaN的载流子浓度.

模拟结果验证了这个思想, 计算得到的p-GaN载流子浓度与设定值基本一致.

## 参考文献

- [1] Amano H, Akasaki I, Toyoda Y 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 353
- [2] Amano H, Akasaki, Hiramatsu K, Koide N, Sawaki N 1988 *Thin Solid Films* **163** 415
- [3] Nakamura S, Mukai T, Senoh M, Iwasa N 1992 *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2* **31** L139
- [4] Nakamura S, Senoh M, Mukai T 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1687
- [5] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, Iwasa N, Yamada T, Matsushita T, Kiyoku H, Sugimoto Y 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** L74
- [6] Nakamura S 1998 *Science* **281** 956
- [7] Hardy M T, Feezell D F, DenBaars S P, Nakamura S 2011 *Mater. Today* **14** 408
- [8] Alaie Z, Nejad S M, and Yousefi M H 2015 *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **29** 16
- [9] Zhou M, Zhao D G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 168402 (in Chinese) [周梅, 赵德刚 2012 物理学报 **61** 168402]
- [10] Zhou M, Zhao D G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4570 (in Chinese) [周梅, 赵德刚 2008 物理学报 **57** 4570]
- [11] Zhao D G, Jiang D S, Zhu J J, Liu Z S, Zhang S M, Yang H 2008 *Semicond. Sci. Technol.* **23** 095021
- [12] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* (2nd Ed.) (New York: John Wiley and Sons) p77



# A new method to estimate the p-GaN carrier concentration by analyzing the reversed current-voltage characteristic curve of p-n<sup>+</sup> junction diode\*

Zhou Mei<sup>1)</sup> Li Chun-Yan<sup>1)</sup> Zhao De-Gang<sup>2)†</sup>

1) (Department of Physics, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

2) (State key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

( Received 1 January 2016; revised manuscript received 2 May 2016 )

## Abstract

GaN and its related nitride materials have been investigated for many years due to their extensive applications in semiconductor optoelectronics and microelectronics. The realization of p-GaN plays a key role in developing the GaN-based optoelectronic devices such as light-emitting diodes, laser diodes and ultraviolet photodetectors. Furthermore, it is very significant to accurately obtain the carrier concentration value of p-GaN layer for device design and fabrication. Usually the Hall measurements are employed to obtain the hole concentration of p-GaN layer. However, this method is not suitable for very thin samples, especially the p-GaN layer in the device structure, which is commonly very thin. Furthermore, the good Ohmic contact to p-GaN is not easy to realize. In consideration of the importance of p-GaN in determining the performance of GaN-based devices, it is necessary to find other new methods to measure or check the carrier concentration data of p-GaN. In this paper, a new method to estimate the carrier concentration of p-GaN by analyzing the current-voltage characteristic curve of p-GaN/n<sup>+</sup>-GaN diode is proposed. The main physical process is as follows: generally the carrier concentration of p-GaN layer is far less than that of n<sup>+</sup>-GaN layer, and the depleted region is mainly located in the p-GaN. When the reversed bias voltage is very small, the diode shows conventional properties of p-n<sup>+</sup> junction and the corresponding reversed current is very low since the p-GaN is not completely depleted. With the increase of reversed bias voltage, the depleted region of p-GaN also increases. Once the p-GaN is completely depleted, the case turns different. The diode will show Schottky junction properties and the corresponding reversed current increases obviously when the p-GaN is completely depleted under a certain reversed bias voltage since the ideal reversed current of Schottky junction is larger than that of p-n<sup>+</sup> junction. The hole concentration could be derived according to the device physics if the bias voltage is discovered, which leads to the properties changing from the p-n<sup>+</sup> junction to conventional Schottky junction. The simulation results confirm the idea, and the calculated p-GaN carrier concentration is almost equal to the originally assumed value. The proposed method is interesting and may be helpful to accelerate the research of p-GaN and related optoelectronic devices.

**Keywords:** p-n<sup>+</sup> junction, current-voltage characteristic curve, carrier concentration of p-GaN

**PACS:** 73.40.Kp, 73.30.+y

**DOI:** 10.7498/aps.65.197302

\* Projects Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61474142, 21403297, 11474355).

† Corresponding author. E-mail: dgzhao@red.semi.ac.cn