

共振隧穿二极管近红外探测器的电流抑制方法研究

裴康明^{1,2} 詹 锋¹ 倪海桥^{2*} 董 宇² 牛智川²

¹广西大学有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 南宁 530004

²中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100084

摘要 针对共振隧穿二极管近红外探测器焦平面阵列本征电流较大的问题, 提出了一种通过对共振隧穿二极管近红外探测器双势垒结构(DBS)进行p型掺杂来抑制电流的方法, 并用有限元软件对探测器进行了模拟。研究了单势垒p型掺杂、双势垒p型掺杂、双势垒结构p型掺杂及p型掺杂浓度对探测器本征电流抑制效果的影响。模拟结果显示, 对双势垒结构进行p型掺杂后, 探测器的隧穿峰值电流比非掺杂的双势垒结构的探测器的隧穿峰值电流小将近3个数量级。随着双势垒结构p型掺杂浓度的增加, 器件本征电流会相应地减小。对器件进行了制备以及测试, 结果表明, 将双势垒结构进行p型掺杂, 对探测器的本征电流有明显的抑制作用。

关键词 探测器; 共振隧穿二极管; 本征电流; 有限元仿真; 双势垒结构

中图分类号 TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020402

Current Suppression of Resonant Tunneling Diode Photodetector Working at Near-Infrared Wavelengths

Pei Kangming^{1,2} Zhan Feng¹ Ni Haiqiao² Dong Yu² Niu Zhichuan²

¹Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials and New Processing Technology of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

²State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China

Abstract Aiming at the problem of oversize eigen current of resonant tunneling diode photodetector focal plane array working at near-infrared wavelengths, a method that using p-doped type in double barriers structure (DBS) of resonant tunneling diode photodetector working at near-infrared wavelengths to suppress eigen current is presented. The current-voltage characteristics are simulated by finite element software. Effects of single barrier p-doped, double barriers p-doped, DBS p-doped and concentrations of p-doping on the eigen current suppression are researched. Simulation results show that the peak tunneling current of the detector with p-doped in DBS reduces about 3 orders of magnitude compared with that of the detector with undoped DBS. It is also found that the eigen current reduces with the increasing of the doping concentration of the DBS. The proposed device has been fabricated and tested. The results demonstrate that the eigen current is effectively suppressed when the DBS is doped in p-type.

Key words detectors; resonant tunneling diode; eigen current; finite element simulation; double barriers structure

OCIS codes 040.5160; 130.0250; 230.5590; 270.5570

1 引言

共振隧穿二极管广泛应用于各种电子器件, 比如高频振荡器^[1-2]、多元逻辑电路^[3]、光电子电路^[4]。最近研

收稿日期: 2015-06-05; 收到修改稿日期: 2015-08-25; 网络出版日期: 2016-01-12

基金项目: 国家973计划(2013CB932904, 2012CB932701)、国家自然科学基金(11364003, 61274125, 61274013, 61435012, 2012YQ140005)、河北省自然科学基金(A2015506019)、广西自然科学基金(2013GXNSFBA019019, 2014GXNSFAA118025)、广西有色金属及特色材料加工省部共建国家重点实验室培育基地开放基金(GXKFJ12-01)、中国工程物理研究院高功率激光器实验室开放基金(2013HEL03)

作者简介: 裴康明(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型半导体器件等方面的研究。E-mail: peikm@semi.ac.cn

导师简介: 詹 锋(1980—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事太阳能电池、LED光电器件以及相关半导体器件等方面的研究。E-mail: fengz.sunlights@yahoo.com

*通信联系人。E-mail: nihq@semi.ac.cn

究表明,通过在共振隧穿二极管中加入吸收层,可以实现室温下的近红外光电探测^[5-8],这为共振隧穿二极管近红外探测器焦平面阵列的研究打下了基础。然而,由于共振隧穿二极管近红外探测器的本征电流较高,在实现共振隧穿二极管近红外探测器焦平面阵列时,过大的本征电流增大了探测器的功耗,同时给读出电路的设计带来了极大的困难。

构成共振隧穿二极管近红外探测器的本征电流,除了隧穿电流外,还包括过剩电流^[9]。过剩电流主要包含非弹性隧穿电流和热电子发射电流,尤其在较高电压下,热电子发射电流会成为过剩电流的主要成分。减小过剩电流是抑制共振隧穿二极管近红外探测器本征电流的关键。现在用于 1.31 μm 或 1.55 μm 通讯波段探测的共振隧穿二极管的双势垒结构主要为 GaAs/Al(Ga)As 和 (In)GaAs/AlAs,两种形式的双势垒结构都是采用非掺杂的形式^[10-11]。传统的共振隧穿二极管主要是以 n-i-n 型掺杂半导体的形式存在,即在集电极与发射极采用 n 型掺杂,而在中间的隔离层以及双势垒结构等采用非掺杂的形式。这种 n-i-n 型掺杂结构具有高频率、低电压、双稳态等优点。但在 n-i-n 型掺杂结构中,因其势垒较低及费米能级与势阱基态能级接近,使得电流密度很大,造成了隧穿电流和噪声电流很大,器件输出本征电流很大。

本文提出了一种对共振隧穿二极管双势垒结构进行 p 型掺杂从而抑制探测器本征电流的方法。通过对共振隧穿二极管双势垒结构进行 p 型掺杂,能够改变二极管的能带结构,使得双势垒结构导带升高,势垒增高,势垒的增高能够阻止载流子以热电子激发的形式通过势垒,进而减小过剩电流,达到抑制探测器本征电流的目的;另一方面,通过对双势垒结构进行 p 型掺杂,在发射极和集电极为 n 型掺杂的前提下,器件将形成两个反向 pn 结,pn 结的反向截止特性起到了整流的作用,进一步抑制探测器本征电流。

2 探测器工作原理

图 1(a)为探测器结构图。探测器的主体结构为共振隧穿二极管,沿外延生长方向依次包括:500 nm n 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为接触极,100 nm n 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为发射极,3 nm $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为隔离层,3 nm AlAs,6 nm $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 3 nm AlAs 组成双势垒结构,600 nm $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为吸收层,50 nm n 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为集电极。

图 1(b)为探测器工作原理图。光入射后被吸收层吸收并产生电子空穴对,正向偏压时,在外部电场作用下,光生空穴在双势垒结构靠近集电极处堆积,产生额外电压降,额外电压降使得电流-电压特性曲线左移,实现探测器光电探测。反向偏压时,光生电子在双势垒结构靠近集电极处堆积,此时感应空穴在双势垒结构靠近发射极处堆积,产生额外电压降,额外电压降使得电流-电压特性曲线左移,实现探测器光电探测。除隧穿电流外,探测器本征电流还包含过剩电流。过剩电流主要为热电子发射电流,在高压下,能直接越过双势垒结构。减小热电子发射电流是抑制器件本征电流的主要手段。发射极(集电极)费米能级与基态能级对齐时,载流子通过双势垒结构的概率最大,此时的探测器电流为隧穿峰值电流。隧穿峰值电流在研究探测器电流-电压特性时具有很好的代表性,故在研究共振隧穿二极管近红外探测器的本征电流抑制方法时,选择隧穿峰值电流作为本征电流的代表。

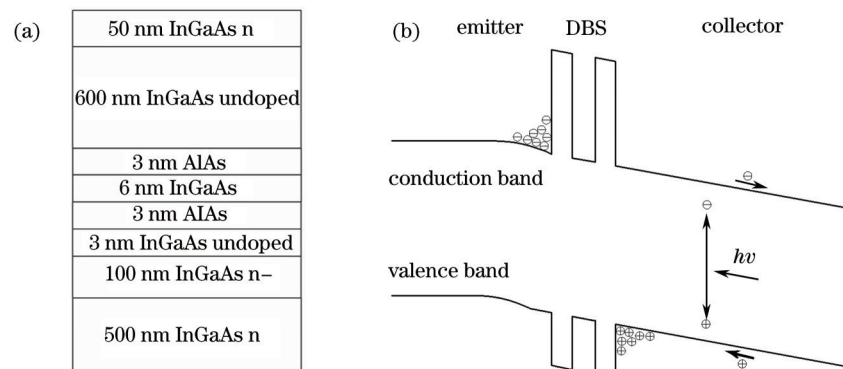


图 1 (a)探测器结构及(b)工作原理图

Fig.1 (a) Structure and (b) schematic of photodetector

3 探测器电流抑制

使用有限元仿真软件对器件的电学特性进行模拟,研究单势垒、双势垒、双势垒结构p型掺杂及其掺杂浓度对探测器本征电流的影响。在模拟的过程中,接触极为n型掺杂,离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,发射极为n型掺杂,离子数分数为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,集电极为n型掺杂,离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,工作温度设置为300 K,器件直径设置为10 nm。模拟采用反向偏压。

3.1 不同形式掺杂时的电流抑制

图2为对DBS进行不同形式掺杂时探测器能带结构(导带)示意图。对DBS的掺杂形式包括单势垒层掺杂、双势垒层掺杂、双势垒结构掺杂,p型掺杂离子数分数均为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。从图2中可以看出,先对集电极一侧势垒层p型掺杂,与非掺杂双势垒结构相比,进行p型掺杂的势垒层导带升高,势垒增高。势垒的增高将会减小热电子发射电流,且形成的反向pn结具有整流作用,探测器本征电流将得到抑制。然后对双势垒层进行p型掺杂,发现两个势垒层导带均升高,势垒增高,但势阱层能带并无明显变化。双势垒层势垒的增高进一步减小了热电子发射电流;p型掺杂层数的增多,使得整流作用增强,本征电流抑制作用更明显。最后对整个双势垒结构都进行p型掺杂,掺杂后势垒势阱导带均升高,势垒增高。双势垒结构势垒增高进一步减小热电子发射电流,整流作用的进一步增强亦使得探测器本征电流得到极大抑制。

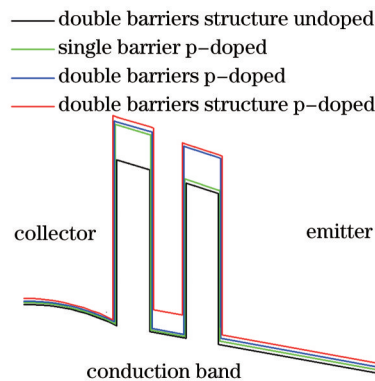


图2 不同掺杂形式探测器能带结构(导带)示意图

Fig.2 Schematic band diagram (conduction band) of structure with different doping types

不同掺杂形式的探测器电流-电压特性模拟结果如图3所示。图3(a)对应非掺杂的双势垒结构的探测

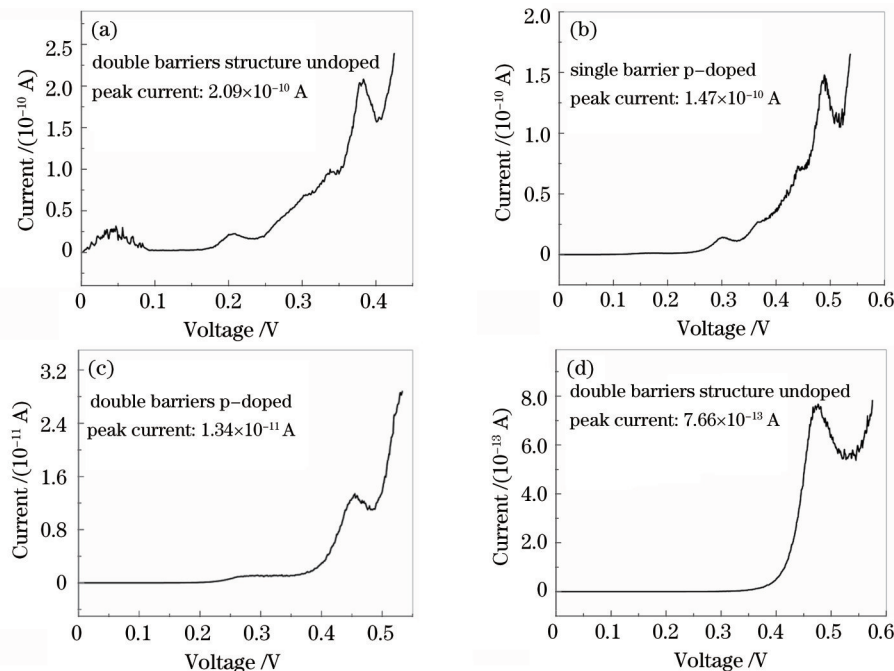


图3 不同形式掺杂时器件获得的电流-电压特性图

Fig.3 Current-voltage characteristics of photodetectors with different doping types

器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 2.09×10^{-10} A。图 3(b)对应单势垒层进行 p 型掺杂的探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 1.47×10^{-10} A。图 3(c)对应双势垒层进行 p 型掺杂的探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 1.34×10^{-11} A。图 3(d)对应整个双势垒结构都进行 p 型掺杂的探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 7.66×10^{-13} A。单势垒层 p 型掺杂所获得隧穿峰值电流 (1.47×10^{-10} A) 比非掺杂的双势垒结构所获得隧穿峰值电流 (2.09×10^{-10} A) 有所减小,势垒增高及 2 个反向 pn 结的整流作用抑制了本征电流。增加 p 型掺杂势垒层数,即对双势垒层 p 型掺杂,整流作用加强,所获得的隧穿峰值电流进一步得到抑制,为 1.34×10^{-11} A。最后对整个双势垒结构都进行 p 型掺杂,整个双势垒结构势垒的增高以及整流作用的进一步增强,所获得隧穿峰值电流为 7.66×10^{-13} A,是 4 种掺杂类型中电流最小的。对整个双势垒结构进行 p 型掺杂所获得的隧穿峰值电流 (7.66×10^{-13} A) 比非掺杂的双势垒结构所获得的隧穿峰值电流 (2.09×10^{-10} A) 要小将近 3 个数量级,证明双势垒结构 p 型掺杂对抑制共振隧穿二极管近红外探测器本征电流有显著作用。

3.2 不同浓度掺杂时的电流抑制

进一步研究了不同掺杂浓度对本征电流抑制的效果。由于整个双势垒结构 p 型掺杂对减小器件本征电流作用最明显,故研究掺杂浓度对暗电流的影响时选择的 p 型掺杂区域为整个双势垒结构。

图 4 为不同浓度掺杂时探测器能带结构(导带)示意图。随着掺杂浓度的增加,双势垒结构导带升高,势垒增高,说明对减小热电子发射电流的作用越突出,器件过剩电流越小,本征电流抑制效果越明显。掺杂浓度的增加,使得反向 pn 结整流作用更明显,在反向截止特性下,探测器的本征电流得到进一步抑制。

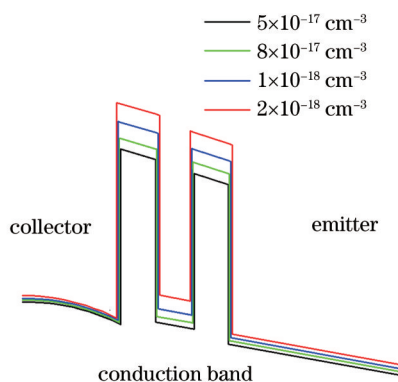


图 4 不同浓度掺杂时器件能带结构(导带)示意图

Fig.4 Schematic band diagram (conduction band) of structures with different doping concentrations

对整个双势垒结构进行不同浓度掺杂时获得的电流-电压特性模拟结果如图 5 所示。图 5(a)对应掺杂离子数分数为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 1.89×10^{-10} A。图 5(b)对应掺杂离子数分数为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 1.78×10^{-10} A。图 5(c)对应掺杂离子数分数为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 2.09×10^{-11} A。图 5(d)对应掺杂离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时探测器的电流-电压模拟曲线,所获得隧穿峰值电流为 7.66×10^{-13} A。随着掺杂浓度的升高,器件的峰值电流逐渐减小,在 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度下获得最小本征电流,为 7.66×10^{-13} A。掺杂浓度越高,双势垒结构势垒越高,反向 pn 结整流作用越明显,则器件输出本征电流抑制效果越明显。

3.3 探测器制备与测试

为验证提出的电流抑制方法,生长并制备了双势垒结构采用 p 型掺杂的共振隧穿二极管近红外探测器。探测器主体为共振隧穿二极管,其结构如图 1(a)所示,接触极为 n 型掺杂,离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,发射极为 n 型掺杂,离子数分数为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,集电极为 n 型掺杂,离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,双势垒结构为 p 型掺杂,离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。探测器样品为台面结构,台面尺寸直径为 $25 \mu\text{m}$ 。

对探测器进行光响应测试,电流-电压响应特性如图 6 所示。测试光源为黑体辐射,探测器光敏面的入射光功率为 0.77 nW 。探测器测试温度为室温。探测器在 0.4 V 偏压下所获得的暗电流为 $2.83 \times 10^{-7} \text{ A}$,在 0.6 V 偏压下所获得的暗电流为 $5.07 \times 10^{-7} \text{ A}$,与双势垒结构非掺杂的同结构器件^[12]相比,对器件双势垒结构

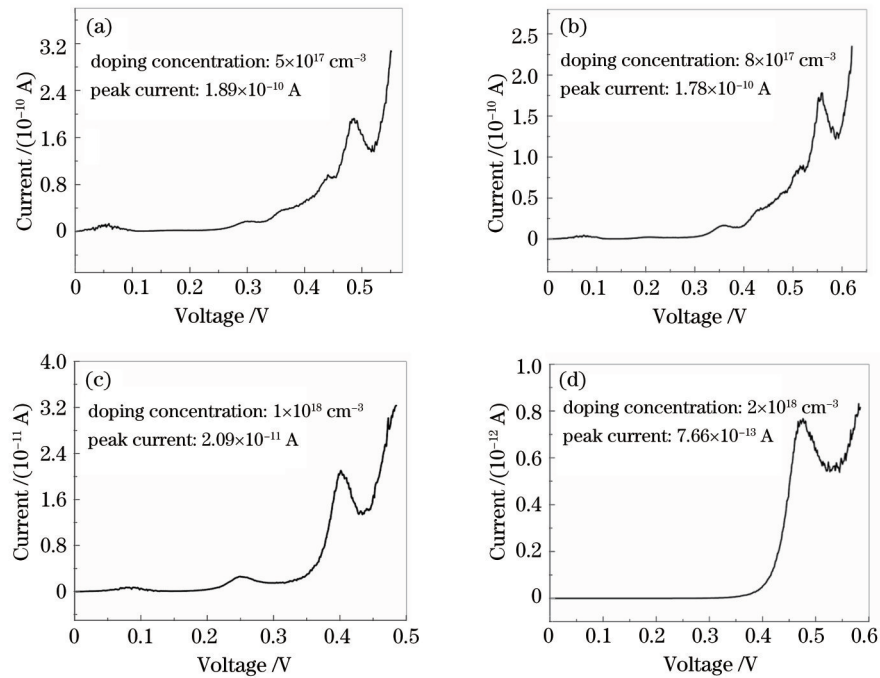


图5 不同浓度掺杂时器件获得的电流-电压特性图

Fig.5 Current-voltage characteristics of photodetectors with different doping concentrations

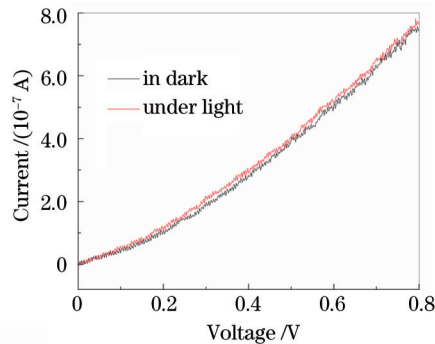


图6 探测器的电流-电压特性图

Fig.6 Current-voltage characteristics of the photodetector

进行p型掺杂之后,测得的暗电流有显著降低。在0.4 V偏压下,探测器灵敏度为21 A/W,在0.6 V偏压下,探测器灵敏度为34 A/W,表明在暗电流显著降低的同时,探测器依然保留了良好的探测能力。

4 结 论

针对实现共振隧穿二极管近红外探测器焦平面阵列时本征电流较大的问题,提出了一种通过对共振隧穿二极管近红外探测器双势垒结构进行p型掺杂来抑制本征电流的方法,并用有限元软件对探测器进行了模拟。模拟结果显示,对整个双势垒结构进行p型掺杂时,探测器的隧穿峰值电流(7.66×10^{-13} A)比非掺杂的双势垒结构所获得的隧穿峰值电流(2.09×10^{-10} A)小将近3个数量级。研究了不同p型掺杂浓度对探测器本征电流的影响,发现本征电流随掺杂浓度增加而减小,在掺杂离子数分数为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,本征电流为 7.66×10^{-13} A,是整个模拟系列中获得的最小本征电流。对所述结构进行了制备与室温测试,在0.4 V偏压下获得的暗电流为 2.83×10^{-7} A,与非掺的器件测试结果相比较,本征电流抑制效果明显。研究结果对于共振隧穿二极管近红外探测器焦平面阵列的研究具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 S Suzuki, A Teranishi, K Hinata, *et al.*. Fundamental oscillation of up to 831 GHz in GaInAs/AlAs resonant tunneling diode [J]. Appl Phys Express, 2009, 2(5): 054501.
- 2 H Kanaya, R Sogabe, T Maekawa, *et al.*. Fundamental oscillation up to 1.42 THz in resonant tunneling diodes by optimized

- collector spacer thickness[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, 35(5): 425–431.
- 3 P Mazumder, S Kulkarni, M Bhattacharya, *et al.*. Digital circuit applications of resonant tunneling devices[J]. *IEEE*, 1998, 86(4): 664–686.
- 4 H I Cantú, B Romeira, A E Kelly, *et al.*. Resonant tunneling diode optoelectronic circuits applications in radio-over-fiber networks[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(9): 2903–2912.
- 5 I Coelho, J Martins, J Figueiredo, *et al.*. Modeling of light-sensitive resonant-tunneling-diode devices[J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(12): 8258–8263.
- 6 J C Blakesley, P See, A J Shields, *et al.*. Efficient single photon detection by quantum dot resonant tunneling diodes[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(6): 067401.
- 7 F Hartmann, F Langer, D Bisping, *et al.*. GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with a GaInNAs absorption layer for telecommunication light sensing[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(17): 172113.
- 8 A Pfenning, F Hartmann, F Langer, *et al.*. Cavity-enhanced resonant tunneling photodetector at telecommunication wavelengths[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(10): 101109.
- 9 M Tsuchiya, H Sakaki, J Yoshino, *et al.*. Room temperature observation of differential negative resistance in an AlAs/GaAs/AlAs resonant tunneling diode[J]. *Jan J Appl Phys*, 1985, 24(6): 466–468.
- 10 H W Li, B E Kardynal, P See, *et al.*. Quantum dot resonant tunneling diode for telecommunication wavelength single photon detection[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(7): 073516.
- 11 B Romeira, L M Pessoa, H M Salgado, *et al.*. Photo-detectors integrated with resonant tunneling diodes[J]. *Sensors*, 2013, 13(7): 9464–9482.
- 12 Dong Yu, Wang Guanglong, Ni Haiqiao, *et al.*. Optimization of molecular beam epitaxy conditions of resonant tunneling diode photodetector[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0817001.
- 董宇, 王广龙, 倪海桥, 等. 共振隧穿弱光探测器的分子束外延生长条件优化[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0817001.

栏目编辑: 刘丰瑞