

量子级联波长上转换系统红外响应特性研究

罗毅¹, 郝智彪¹, 王磊¹, 康健彬¹, 汪莱¹, 熊兵¹, 孙长征¹, 王健¹, 韩彦军¹, 李洪涛¹,
王禄², 王文新², 陈弘²

- (1. 清华大学 电子工程系 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;
2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190)

摘要: 通过对波长上转换红外探测过程的分步测试和理论计算, 对量子级联波长上转换器件与系统的红外响应特性进行了深入的研究。结果表明: 量子级联波长上转换红外探测器件可以在较低的本底发光下实现较强的红外响应。上转换器件的响应度在平带偏压附近迅速增加, 且红外光转换为上转换器件电流的线性度良好。对于波长上转换器件的近红外发光过程, 文中应用 ABC 模型, 获得了与测试结果非常一致的系统响应电流与电流转换效率, 并合理地解释了波长上转换红外探测系统的非线性响应特征。

关键词: 上转换; 级联运输; 响应特性; 线性度; ABC 模型

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0102001

Study of response characteristics for cascade infrared up-conversion system

Luo Yi¹, Hao Zhibiao¹, Wang Lei¹, Kang Jianbin¹, Wang Lai¹, Xiong Bing¹, Sun Changzheng¹,
Wang Jian¹, Han Yanjun¹, Li Hongtao¹, Wang Lu², Wang Wenxin², Chen Hong²

- (1. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Through testing the detection process of infrared (IR) up-conversion step by step along with theoretical calculation, the IR response characteristics of the cascade IR up-converter (CIUP) and the whole up-conversion system were thoroughly studied. Test results show that CIUPs can achieve considerable IR responsivity under weak background luminescence. The responsivity of the CIUP rises very fast under the flat-band bias and the conversion process from IR light signal into CIUP's electrical signal displays excellent linearity. By applying the ABC model to the near-infrared radiation process of the CIUP, the fitted response current of the up-conversion system and the fitted current conversion efficiency agree well with the measured data, which gives a reasonable explanation for the non-linearity of the system's IR response.

Key words: up-conversion; cascade carrier transport; response characteristics; linearity; ABC model

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2015-12-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB632804, 2012CB315605); 国家自然科学基金(61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024, 61176059); 国家高技术研究发展计划(2012AA050601)

作者简介: 罗毅(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事半导体光电器件方面的研究。Email: luoy@tsinghua.edu.cn

0 引言

半导体波长上转换红外探测器件和系统具有外延材料质量高、与成熟的制作工艺兼容以及可实现多色探测等优点,并且无需与硅基读出电路进行键合,是实现超大面阵红外成像探测的优选方案^[1-5]。提出了量子级联波长上转换红外探测器件(CIUP),利用具有定向输运光生载流子能力的级联输运结构,有效地解决了红外响应与器件在工作偏压下自身发光之间的矛盾,获得了优于传统上转换器件的探测性能,使其有望成为第三代大面阵红外成像技术的有力竞争者^[6-7]。

在量子级联波长上转换红外探测系统的工作过程中,涉及复杂的光-电-光-电转换机制,每一步光电或电光转换过程都会对上转换系统的响应特性和工作性能造成影响。目前,对于影响量子级联波长上转换系统红外响应特性的物理机制仍缺少系统而深入的研究,这将严重制约波长上转换红外探测技术的发展。

文中将量子级联波长上转换系统对红外信号的探测分为以下两个过程进行研究:首先,上转换器件将红外光转换为自身的光电流;然后,通过近红外发光将上转换器件的光电流转换为后置硅基探测器的光电流。结合实验数据与理论分析,文中研究了这两个过程的主要物理机制。特别地,通过将辐射复合的 ABC 模型应用于后一个过程,获得了与测试数据相符的计算结果,合理地解释了上转换系统的响应特征。在此基础上,系统分析了影响波长上转换红外探测系统响应特性的主要因素。

1 器件工作原理与结构

量子级联波长上转换红外探测器件的工作原理如图 1 所示。器件核心结构包括三部分,即红外吸收区、级联输运区和发光区。在红外吸收区量子阱中进行 n 型掺杂,使得该量子阱基态能级被大量电子占据。当入射红外光子能量 $h\nu_{IR}$ 等于吸收区量子阱激发态能级 E_{1e} 与基态能级 E_{1g} 的能量差时,该基态能级上的电子可被泵浦至激发态能级上。然后,这些光生电子将通过共振隧穿的方式进入级联输运区,并借助声子辅助的隧穿过程快速通过输运区的各个量

子阱。输运区各个量子阱的宽度逐渐增加,使得能级高度逐个降低一个纵向光学声子的能量,以保证较高的级联输运效率。最终,到达输运区末端量子阱的光生电子再次通过共振隧穿进入发光区量子阱中,并与 p 型区注入的空穴进行带间辐射复合,发出可被后置硅基探测器探测的近红外光。

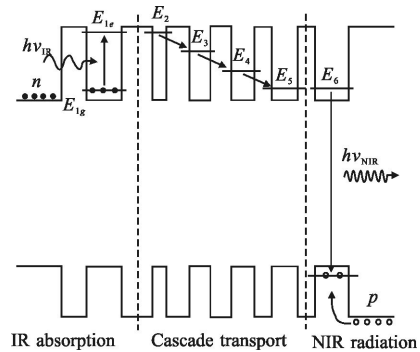


图 1 量子级联波长上转换红外探测器件的工作原理示意图

Fig.1 Principle of CIUP

实验中的量子级联波长上转换器件采用之前报道的中红外 InGaAs/AlGaAs 波长上转换器件结构设计参数^[6],该器件在 78 K 下的设计响应中心波长约 $4.5 \mu\text{m}$ 。外延材料由分子束外延系统生长,使用 2 in (1 in=2.54 cm)的(100)面半绝缘 GaAs 衬底。生长完的外延材料被进一步加工成 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的台面器件,并且在器件的衬底面打磨出 45° 角,以满足量子阱红外响应测试的要求。

需要指出的是,如图 1 所示,上述设计的级联输运过程是在平带情况下实现的。对于实际的 p-n 结型量子级联波长上转换器件,至少需要施加一个足以抵消 p-n 结内建电场的外加偏压,才能使级联输运结构开始发挥功效。在文中将该外加偏压称为平带偏压。根据计算,上述中红外波长上转换器件在 78 K 下的平带偏压约为 1.5 V。

2 测试方法与结果

为了探测波长上转换器件的近红外发光,将器件与一个 Hamamatsu 公司的 S2386-45K 型硅基光电二极管共同安装在液氮杜瓦的冷指上,从而组成一个完整的红外上转换系统,如图 2(a)所示。在测试中,对硅基探测器恒定施加零偏压。入射红外光引起上转换器件的响应电流,并发出近红外发光,从而增

大了后置硅基探测器零偏压下的电流。该硅基探测器中增加的光电流被定义为上转换系统的响应电流。通过测试上转换器件和系统在不同条件(偏压、入射光强、入射光波长等)下的响应电流大小,就可以获得上转换器件和系统的响应特性。

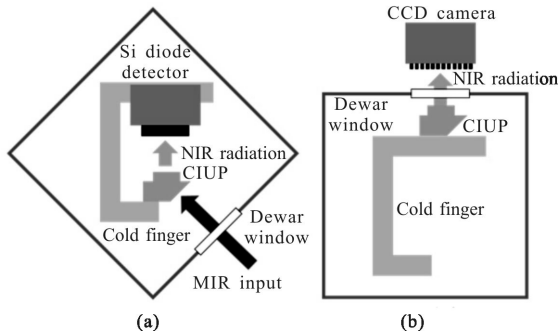


图 2 含硅基光电二极管的测试系统示意图(a)和含 CCD 相机的测试系统示意图(b)

Fig.2 Experiment setup with Si diode detector (a) and with CCD camera (b)

图 3 为量子级联中红外波长上转换器件与系统在 78 K 和 3.3 V 偏压下的绝对响应谱。响应谱测试在 Bruker 公司 VERTEX 80 型傅里叶变换红外光谱仪中进行,并使用一台 1 223 K 的标准黑体完成校正,该黑体发出的宽谱红外光在器件响应峰值波长处的等效(单色光)入射功率为 2.1 μ W。

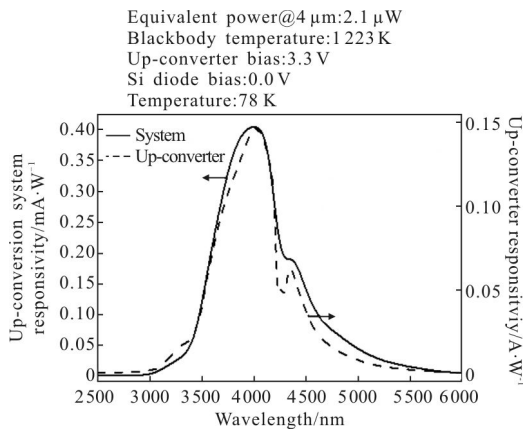


图 3 波长上转换红外探测器件与系统的绝对响应谱

Fig.3 Responsivity spectra of CIUP and the up-conversion system

由图 3 可见,上转换系统与上转换器件的响应谱谱型几乎完全相同,两者的峰值波长均在 4 μ m,响应峰的半高全宽均为 0.65 μ m,从而验证了量子级联中红外波长上转换系统作为一个整体的红外探测功能。此外,上述两个响应谱在 4.3 μ m 附近都存在

一个凹坑,这是由于测试系统中二氧化碳吸收引起的。由于傅里叶光谱仪一次只能测得一个响应谱,因此,不同测试时光谱仪中二氧化碳浓度的变化会导致上述凹坑具有不同的深度。

图 4 为量子级联中红外波长上转换器件在不同温度下的峰值响应度、光电转换效率与器件偏压关系曲线,其中上转换器件的光电转换效率被定义为在上转换器件中的光生载流子数量与入射红外光子数量的比值。由图 4 可以看出,在所测试的温度范围内,上转换器件的峰值响应度在随工作偏压升高而增大的过程中,存在一个明显的拐点电压。当工作偏

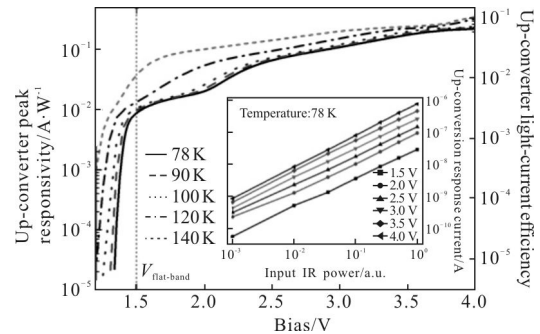


图 4 波长上转换器件的峰值响应度-偏压曲线及光电转换效率-偏压曲线;插图为不同偏压下上转换器件响应电流随入射红外光功率的变化曲线

Fig.4 Bias-dependent peak responsivity and light-current efficiency of CIUP; Inset: IR-power-dependent CIUP response current under different bias

压增大至该拐点电压附近时,上转换器件的峰值响应度迅速增加;当工作偏压超过该拐点电压以后,上转换器件峰值响应度的增速明显降低。在 100 K 以下,该拐点电压在 1.5 V 左右,与理论计算的平带偏压几乎完全一致。这合理地解释了图 4 中响应度与偏压的对应关系:当上转换器件偏压增加至该拐点电压(即平带偏压)附近时,器件的能带结构接近平带结构,如图 1 中所示的“声子台阶”式级联输运通道逐渐形成,在吸收区量子阱中产生的光生电子开始可以通过级联输运效应被有效地输运到发光区中参与辐射复合,从而使得上转换器件的响应电流迅速上升。在 78 K 下,上转换器件在 1.5 V 下的峰值响应度为 8.8 mA/W,与已报道的中红外量子级联探测器在平带结构下的响应度处于同一量级^[9]。从图 4 的插图可以发现,在工作偏压大于平带电压时,上转换

器件随红外光入射功率变化(通过插入不同倍数的红外衰减片实现)的响应线性度很好。

图 5 为 78 K、3.3 V 偏压下波长上转换红外探测系统与器件对不同入射红外功率的响应电流大小。与上转换器件相比,上转换系统的响应线性度略有恶化。为了深入分析导致该现象的原因,需要对上转换器件在不同偏压和电流下的发光强度进行更细致的测试。考虑到在如图 2(a)的测试系统中,由于硅基光电二极管与上转换器件被安装在同一个杜瓦中,彼此之间的电学信号容易产生串扰,因此设计了如图 2(b)的测试方案,通过使用低噪声 CCD 相机来更准确地获得上转换器件在不同偏压和电流下的发光情况。测试时使用的 CCD 相机型号为 Photometrics 公司的 Evolve 512 Delta。

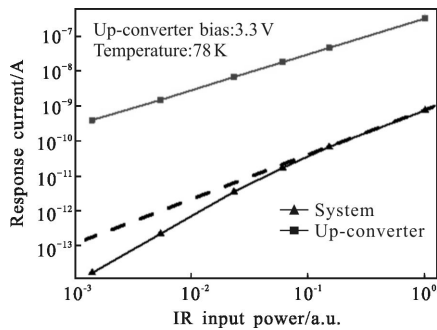


图 5 波长上转换红外探测系统与器件在不同入射红外光功率下的响应电流

Fig.5 Response current of CIUP and the up-conversion system under different IR power

根据图 2 中两种测试方案的设计参数,可以计算出硅基探测器以及 CCD 相机对于上转换器件近红外发光的收集效率分别为 36%和 1.9%。两种探测器在上转换器件荧光波长附近的量子效率均为 85%,因此可以通过 CCD 相机的记数来计算出相同测试条件(器件偏压、电流、红外光强度)下、采用图 2(a)测试系统时硅基光电二极管的等效光电流。图 6 为 78 K 和 120 K 时、在 300 K 背景辐射(90°视角)下,波长上转换系统由硅基光电二极管实测的电流-偏压曲线、由 CCD 相机测试等效的电流-偏压曲线以及上转换器件的电流-偏压曲线。从图中可以看出,上转换系统与器件均存在明显的开启特性。在开启之后,实测的系统电流未被串扰电流(~3 pA)淹没,上述两种方法得到的系统电流与偏压的关系完全一致,

从而验证了从 CCD 相机记数结果等效计算系统电流方法的准确性。在 78 K 下,当上转换器件偏压在 2.0 V 偏压以下时,由于上转换器件发光强度极弱,CCD 相机也无法测到可信的发光强度信号;在 120 K 下,由于更强的非辐射复合效应,在 2.7 V 偏压以下就无法测到可信的发光强度信号。

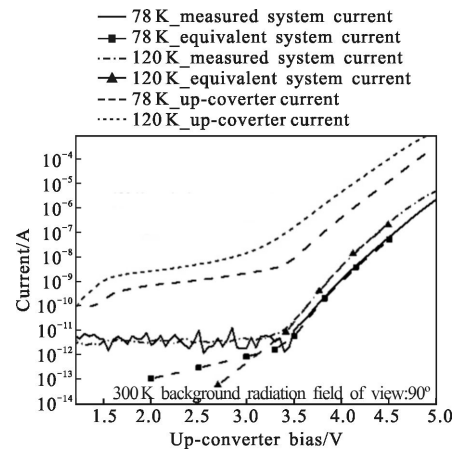


图 6 波长上转换系统的实测电流-偏压曲线、等效电流-偏压曲线以及上转换器件的电流-偏压曲线

Fig.6 Measured system current and equivalent system current along with CIUP current under different bias

3 分析与讨论

如前所述,量子级联中红外波长上转换红外探测系统对红外光的探测包括入射红外光转换为上转换器件的光电流、该光电流通过近红外发光转换为后置硅基探测器的光电流两个过程。图 4 的测试结果已经证明了第一个过程在不同红外光功率下良好的响应线性度。为了阐明上转换系统非线性响应的原理与机制,下面对第二个过程进行更深入的分析。

事实上,对于半导体发光二极管,在不同的电流下,器件的发光强度可以由以下的 ABC 模型来描述^[9-10]:

$$\eta_{inj}I = A\sqrt{\Phi} + B\Phi + C(\sqrt{\Phi})^3 \quad (1)$$

式中: η_{inj} 为发光二极管的载流子注入效率; I 为发光二极管电流; Φ 为单位时间内在发光二极管内部发出的光子数量; A 、 B 、 C 分别为与 Shockley-Read-Hall 复合过程速率、辐射复合过程速率和俄歇复合过程速率相关的常数。考虑到在图 2(a)的测试系统中,上转换器件的光提取效率、后置硅基探测器的光收集效率以及硅基探测器的量子效率均为与上转换器件电流无关的常数,因此上式可以被进一步写为:

$$I_{up} = C_1 \sqrt{I_s} + C_2 I_s + C_3 (\sqrt{I_s})^3 \quad (2)$$

式中： I_{up} 为上转换器件的电流； I_s 为上转换系统的电流（即硅基探测器电流）； C_1 、 C_2 和 C_3 为三个常数。由此，可以对图 6 中相同偏压时上转换系统电流与上转换器件电流的对应关系进行拟合。

拟合结果如图 7 所示。从图中可以看出，基于 ABC 模型的拟合曲线与实验测得的上转换系统电流非常一致，从而为上转换系统红外响应的非线性特性给出了合理的解释：该响应非线性主要来源于上转换器件在近红外发光过程中不同复合机制之间的竞争结果。另一方面，图 7 也给出了在上转换器件电流转换为硅基探测器电流过程中的电流转换效率。在 78 K 下，当上转换器件电流较小时，系统的电流转换效率较低，此时非辐射复合过程占据了上转换器件中载流子复合过程的主导位置；当上转换器件电流增大时，系统的电流转换效率也逐渐增大，并趋于饱和，此时辐射复合过程开始占据上转换器件中载流子复合过程的主导位置。在 120 K 下，由于更为显著的非辐射复合效应，因此在所测试的上转换器件电流范围之内，系统的电流转换效率没有出现饱和的趋势。

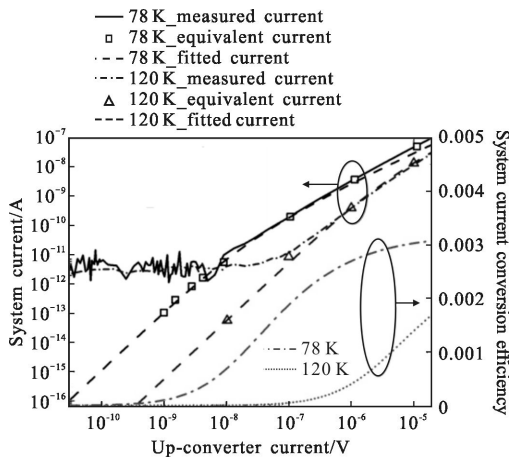


图 7 不同上转换器件电流下，波长上转换系统的实测电流值、等效电流值、拟合电流值和电流转换效率

Fig.7 Measured system current, equivalent system current, fitted system current and current conversion efficiency under different CIUP current

将图 4 中波长上转换器件的峰值响应度以及图 7 中拟合得到的上转换系统电流转换效率相乘，即可以计算出上转换系统在不同偏压和入射红外光

功率下的峰值响应度。图 8 为 78 K 及 2.1 μW 等效 (4 μm 单色光) 入射功率下量子级联中红外波长上转换系统实测的峰值响应度与计算得到的峰值响应度。从图中可以看出，实测值与计算值基本符合。在 2.0 V 偏压以上，两者符合得很好；在 2.0 V 偏压以下，实测的系统响应度迅速下降，这可能是由于小偏压下迅速降低的载流子注入效率造成的^[10]。如前所述，即便是 CCD 相机也没能测得上转换器件在 2.0 V 偏压以下可信的发光强度信息。在 2.8 V 附近，实测的系统响应度存在一个小凹坑，这可能是由于吸收区电子激发态能级与输运区末端量子阱激发态能级对齐，从而使得部分光生电子直接通过隧穿越过了发光区量子阱。此外，基于上述拟合结果，对于图 5 中不同入射红外功率下的上转换系统响应电流进行了计算，如图 8 中插图所示，计算结果与实验数据非常一致。

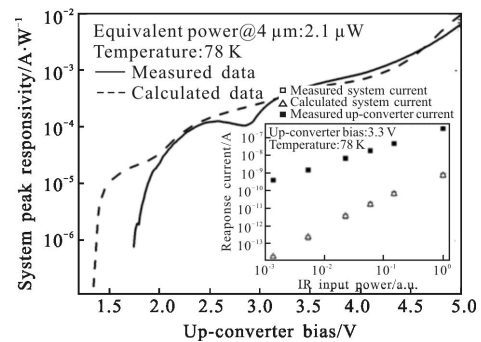


图 8 78 K、2.1 μW 等效入射功率下，波长上转换系统实测与计算的峰值响应度-偏压曲线；插图为不同入射红外功率下上转换系统响应电流的实测值与计算值

Fig.8 Measured and calculated system peak responsivity under 78 K and 2.1 μW equivalent IR power; Inset: measured and calculated system response current under different IR power

最后需要指出，对于文中提出的量子级联中红外波长上转换探测系统，其第一步的红外光电转换效率在 3.3 V 和 78 K 下可达 3% 左右(图 4)，这与量子阱红外探测器的光电转换效率已处于同一量级 (~10%)^[11]。然而同条件下，其第二步发光过程中的电流转换效率却只有 0.03% (图 7)，其主要原因包括半导体表面全反射造成的光提取效率低下(只有 2%~3%)以及非辐射复合。因此，对于电流转换效率的优化是进一步提升量子级联波长上转换红外探测系统性能的关键。

4 结 论

文中对量子级联波长上转换红外探测器件与系统的红外响应特性进行了细致的理论和实验研究。实验结果验证了上转换器件与系统的红外探测功能, 在平带偏压附件开始形成的级联输运通道大幅地提高了上转换器件的红外响应效率, 此时上转换器件自身尚未开启, 器件本底发光得到极大的抑制。将 ABC 模型应用到波长上转换器件发光过程的分析中, 拟合计算结果与实验数据完全相符, 并且对上转换系统红外响应的非线性特征给出了解释。

参考文献:

- [1] Kruse P W. Solid-state infrared-wavelength converter employing high-quantum-efficiency Ge-GaAs heterojunction [J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, 38(4): 1718.
- [2] Liu H C, Li J, Wasilewski Z R, et al. Integrated quantum-well intersub-band photodetector and light-emitting diode[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(10): 832-833.
- [3] Ban D, Luo H, Liu H C, et al. Midinfrared optical upconverter[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 201103.
- [4] Cheng Liqun, Zheng Huandong, Zhang Xiyang, et al. Manufacturing of an coupled short wavelength infrared detector using infrared upconversion screens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3872-3876. (in Chinese)
程利群, 郑焕东, 张希艳, 等. 利用红外转换屏研制短波红外探测器[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3872-3876.
- [5] Chen Qingshan, Niu Chunhui, Lv Yong, et al. Long range detection and recognition of IR upconversion material $Y_2O_3:S:Yb,Er$ [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2603-2608. (in Chinese)
陈青山, 牛春晖, 吕勇, 等. 对镱共掺硫氧化钇红外上转换材料的远场探测与识别 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44 (9): 2603-2608.
- [6] Wang L, Hao Z, Luo Y, et al. Semiconductor up-converter based on cascade carrier transport for infrared detection/imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(13): 131107.
- [7] Kang Jianbin, Hao Zhibiao, Wang Lei, et al. Studies on carrier-blocking structures for up-conversion infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (17): 178501-178502. (in Chinese)
康健彬, 郝智彪, 王磊, 等. 红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(17): 178501-178502.
- [8] Giorgetta F R, Baumann E, Theron R, et al. Short wavelength (4 μm) quantum cascade detector based on strain compensated InGaAs/InAlAs [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(12): 121101.
- [9] Dai Q, Shan Q, Wang J, et al. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(13): 133507.
- [10] Ban D, Luo H, Liu H C, et al. Optimized GaAs/AlGaAs light-emitting diodes and high efficiency wafer-fused optical up-conversion devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(9): 5243.
- [11] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(8): R1-R81.