

基于阈上随机共振的弱信号双色中波红外图像融合

蔺素珍^{1,2}, 杨风暴^{1,2*}, 吉琳娜^{1,2}, 李香亭^{1,2}, 李盼^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:提出了基于阈上随机共振的弱信号双色中波红外图像融合方法. 利用阈上随机共振分别增强两幅图像的弱信号, 通过中值滤波对图像降噪, 然后对降噪图像进行支持度变换融合, 得到信息丰富、细节明显的融合图像. 实验结果表明, 融合图像的局部标准差提高了247.7%、局部熵提高了45.52%、峰值信噪比分别提高了6.71%和6.65%, 证明了该方法的有效性.

关键词:中波红外; 图像融合; 弱信号处理; 阈上随机共振

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

Fusion of dual color MWIR images with weak signal based on suprathreshold stochastic resonance

LIN Su-Zhen^{1,2}, YANG Feng-Bao^{1,2*}, JI Lin-Na^{1,2}, LI Xiang-Ting^{1,2}, LI Pan^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A method on fusion of dual color mid-wave infrared (MWIR) images with weak signal is presented based on suprathreshold stochastic resonance (SSR). The weak signals of two images are enhanced by SSR respectively, and the noise of images is reduced with median filter. Then images denoised are fused by support value transform (SVT), and fusion image with more information and clear details is obtained. The experimental results show that local standard deviation, local entropy and peak signal to noise ratios of images obtained by the method proposed increase 247.7%, 45.52%, 6.71% and 6.65%, respectively. The validity of the method proposed is proved.

Key words: mid-wave infrared (MWIR); image fusion; weak signal process; suprathreshold stochastic resonance (SSR)

PACS: 07.57.-C; 07.57.Ty; 85.25Pb; 85.60.Gz

引言

将红外中波段(3~5 μm)细分成两个窄的波段(如3.4~4.1 μm、4.5~5.3 μm)分别成像,是红外双波段(又称双色)探测研究的重要组成部分. 它的目的是利用两个不同细分波段的成像特性差异获得反映同一景物的不同图像,再通过融合增强得到关于景物更清晰、具有双谱段信息的图像,从而获得比原单色成像质量更高的图像,以更利于目标识别和场景理解. 课题组前期分别利用小波包变换^[1]和分

割支持度变换^[2]对双色中波红外图像进行了融合研究,取得了较好的融合效果. 但是,对于深埋在背景噪声中的、信号微弱的双色中波红外图像来说,前述方法的融合效果均很不理想. 事实上,在复杂的真实场景中,强噪声影响是难以避免的,因此,研究背景噪声中弱信号双色中波红外图像融合具有实际意义.

为此,提出了利用阈上随机共振(SSR)方法分别对两个细分波段的红外弱信号图像进行复原,对复原图像滤波后再利用支持度变换^[3](SVT)法进行

收稿日期:2010-11-04,修回日期:2011-03-24

Received date: 2010-11-04, revised date: 2011-03-24

基金项目:中北大学科学基金(20090604);电子测试技术国家重点实验室基金(201003);山西省研究生创新基金(20103082);山西省自然科学基金(2011011015-1);光电成像技术与系统教育部重点实验室开放基金(20100EIOF16)

作者简介:蔺素珍(1966-),女,山西灵石人,副教授,博士研究生,主要研究领域为红外信息处理,E-mail:lsz@nuc.edu.cn.

*通信作者:E-mail:yangfb@nuc.edu.cn.

融合. 实验证明, 与对原图像直接滤波后再用支持度变换法进行融合相比, 无论是主观观察还是利用局部标准差、局部熵、峰值信噪比等客观指标进行评价, 融合效果都较为明显.

1 阈上随机共振

随机共振是指非线性系统、弱的周期信号和适量的噪声三者在一定条件下协作时, 噪声通过非线性系统对信号起积极作用的现象^[4]. 目前已经证实: 随机共振现象不仅存在于周期信号中, 在非周期信号中也会发生; 而且, 传统的认为随机共振现象主要是针对阈下信号的观念已被打破, 已有研究表明阈上信号情况下的随机共振可能是人类听觉^[5]和视觉感知^[6-7]的潜在机制. 还有学者基于神经元模型探讨了非周期阈上信号随机共振及其在语音信息处理和图像信息处理中的应用^[8], 文献^[9]和^[10]分别通过添加高斯白噪声进行灰度图像复原和语音增强, 均取得了较好的效果. Stocks 基于神经网络提出了一种阈上非周期随机共振模型, 如图 1 所示^[11], 图中的并列阵列可以看作半连续化信道, 每个节点可以看作 heaviside 函数.

图 1 中的各个量如下:

$$y_i(t) = \begin{cases} 1 & x(t) + \eta_i(t) > T_i \\ 0 & x(t) + \eta_i(t) \leq T_i \end{cases}, \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(t), \quad (2)$$

其中 $x(t)$ 是符合一定概率分布的输入信号, $\eta_i(t)$ 是相互独立的噪声, T_i 是阈值, $y(t)$ 是输出信号. $\eta_i(t) = 0$ 时, 输出是 0 或 N , 增加 $\eta_i(t)$ 时, 输出多样化, 说明噪声能增强信息能力.

中波红外图像和其他图像信号一样, 大多以阈上非周期信号的形式出现, 来自红外成像仪和复杂场景条件的噪声不可避免, 过强的噪声有可能淹没信号, 而滤波在弱信号条件下作用有限, 且由于噪声本身不会改变两个细分波段各自的特性, 所以利用

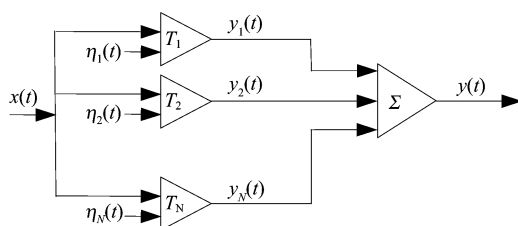


图 1 阈上随机共振模型图

Fig. 1 Sum model of threshold units in parallel

阈上神经元随机共振机制先对弱信号双色中波红外图像通过添加合适的噪声进行复原, 再对复原过的图像利用传统的滤波和支持度变换法进行融合, 可以利用目标在两个细分波段不同的辐射、传输、成像等特性得到消除噪声影响的、具有双谱信息的、效果更好的图像.

2 融合方法

2.1 融合过程

基于阈上随机共振的弱信号双色中波红外图像融合过程如图 2 所示, 步骤如下:

- (1) 利用阈上随机共振法分别求出两个细分波段图像的随机共振图像;
- (2) 对随机共振图像分别进行中值滤波;
- (3) 利用 SVT 法对两个滤波后图像进行融合.

2.2 主要算法

2.2.1 阈上随机共振

通过多次随机共振从被背景噪声淹没的双色中波红外图像中“拣”出有用的弱信号, 而发生随机共振需要有合适的噪声. 所以, 面临的问题是添加何种类型的噪声、如何获得合适的噪声强度.

前期研究表明, 双色中波红外图像主要受均匀、椒盐等类型噪声影响, 其中均匀噪声干扰更为严重. 因此这里选用了均匀噪声函数.

第 $(n+1)$ 次添加的噪声强度表示为

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n + h \text{sign}(dP/d\sigma), \quad (3)$$

式中 h 为步长, 梯度算子 $dP/d\sigma$ 表示为

$$dP/d\sigma \approx (P_n - P_{n-1}) / (\sigma_n - \sigma_{n-1}), \quad (4)$$

式中 P_n 是第 n 次添加噪声后图像的峰值信噪比, 其表示为

$$P_n = -10 \lg(M^2/m), \quad (5)$$

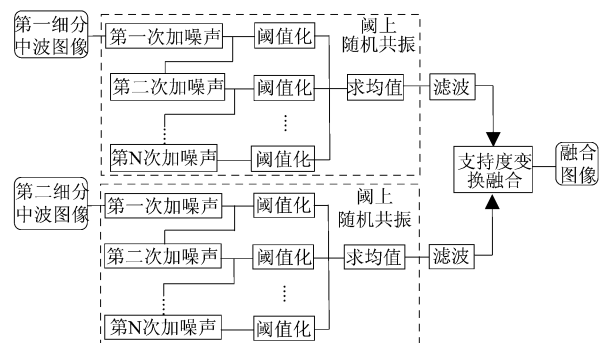


图 2 基于随机共振的弱信号双色中波红外图像融合示意图

Fig. 2 Framework of fusion of dual color MWIR images with weak signal based on SSR

$$M = \max(\max(f_n(x, y))) \quad , \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{(L-1)^2} \sum_{x=0}^{s-1} \sum_{y=0}^{r-1} (f_n(x, y) - f_0(x, y))^2 \quad , \quad (7)$$

式中 s 和 r 分别是图像的行和列, L 是图像的灰度级数, $f_0(x, y)$ 是原图像, $f_n(x, y)$ 就是经过第 n 次处理后的随机共振图像.

第 n 次噪声添加表示为

$$f'_n(x, y) = f_{n-1}(x, y) + a + (b - a)p(z) \quad , \quad (8)$$

式中 $n = 1, 2, \dots, N$, a, b 表示为

$$a = \mu - \sqrt{3}\sigma \quad , \quad (9)$$

$$b = \mu + \sqrt{3}\sigma \quad , \quad (10)$$

其中 μ, σ 分别是图像 $f_{n-1}(x, y)$ 的均值和方差. $p(z)$ 是噪声函数, 表示为

$$p(z) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq z \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad . \quad (11)$$

对 $f'_n(x, y)$ 进行二值化得到

$$f''_n(x, y) = \begin{cases} 1 & f'_n(x, y) \geq T_n \\ 0 & f'_n(x, y) < T_n \end{cases} \quad , \quad (12)$$

$$\text{其中 } T_n = \frac{1}{s \times r} \sum_{x=1}^s \sum_{y=1}^r f'_n(x, y) \quad . \quad (13)$$

利用式(8)、式(12)经过 N 次计算后, 再求出最后的随机共振结果为

$$f_N(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f''_n(x, y) \quad . \quad (14)$$

2.2.2 中值滤波

除了均匀噪声外, 双色中波红外图像中还有较强的椒盐噪声. 考虑到中值滤波常用来保护图像的边缘信息, 且对椒盐噪声去除有效, 因此, 采用中值滤波再对随机共振图像进行滤波.

2.2.3 支持度变换融合

图像的支持度变换过程如下:

$$\begin{cases} S_j = SV_j \cdot P_j \\ P_{j+1} = P_j - S_j \quad j = 1, 2, \dots, J \\ P_1 = P \end{cases} \quad , \quad (15)$$

其中 J 为分解层数, SV_j 为系列支持度滤波器, S_j 为系列支持度图像, 其可反映图像的细节显著特征, P_j 为原图像的系列近似图像, P 为原图像.

对于两幅要融合的图像, 进行支持度变换分别得到各自的系列支持度图像和近似图像, 设 S_{1j}, S_{2j} 和 P_{1j}, P_{2j} 分别表示第 j 层的支持度图像和近似图像, 则该层融合的支持度图像 S_{Fj} 和近似图像 P_{Fj} 为

$$\begin{cases} S_{Fj} = f_{\max}(S_{1j}, S_{2j}) \\ P_{Fj} = \alpha P_{1j} + \beta P_{2j} \end{cases} \quad , \quad (16)$$

其中函数 f_{\max} 表示 S_{Fj} 的每个像素值选择为 S_{1j}, S_{2j} 两幅图像中对应位置的绝对值大的像素值. 每层都进行类似的处理后, 再进行逆变换, 即可得到最后融合的图像.

由于 P_{1j}, P_{2j} 反映的是图像的低频信息, 简单有效的融合规则是加权平均, α, β 为加权平均系数. 若没有特殊要求, α, β 可取相等; 若要多保留第一幅原图像的低频成分, α 选取的大一些, 反之, β 取值大一些. 具体取值可针对某类图像根据实验来选定.

3 融合实验

虽然添加噪声次数和迭代次数多效果更佳, 考虑到随机共振主要与噪声强度关系密切和实验运行速度等原因, 取噪声计算步长 h 为 2、噪声强度的初值为 20、添加次数 N 为 50、迭代次数为 5. 考虑到中值滤波窗口越大滤波效果越好但速度越慢、图像的整体清晰度有可能越差等因素, 实验选用 5×5 中值滤波. 由于两个细分波段图像的低频成分没有重要性上的显著差别, 在融合结果中均有保留价值, 故 SVT 法融合中 α, β 取值均为 0.5. 仿真实验是用 MATLAB7.0 在 Intel(R) Pentium(R)4, CPU 为 2.40 GHz, 内存为 512 M、操作系统为 Microsoft Windows XP 的台式计算机上进行的.

按照融合步骤, 图 3 为原弱信号双色中波红外图像, 图 4 为阈上随机共振处理的结果, 图 5 为中值滤波后的结果, 图 6 为融合的结果. 为了便于效果分析对比, 图 7 给出了未采用 SSR 的融合结果.

4 结果分析

4.1 定性分析

图 3(a) 和图 3(b) 分别是两幅被背景噪声淹没的细分中波红外图像, 图 3(a) 中依稀可以看出有两个亮点(是亮着的车灯)和一个发白的区域(是太阳

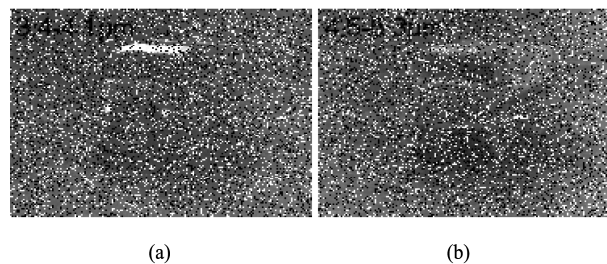


图 3 被噪声淹没的弱信号双色中波红外图像 (a) 第一细分波段图像 (b) 第二细分波段图像

Fig.3 MWIR images inundated with noise (a) image in sub-band 1 (b) image in sub-band 2

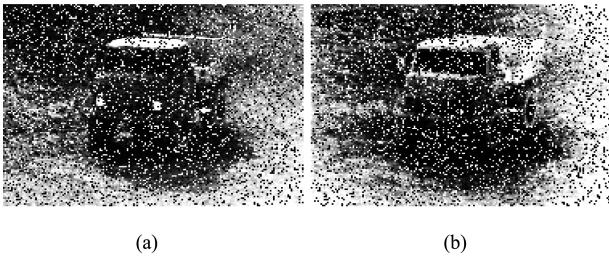


图4 阈上随机共振图像 (a)第一细分波段图像 (b)第二细分波段图像
Fig.4 Images processed by SSR (a)image in sub-band 1 (b) image in sub-band 2

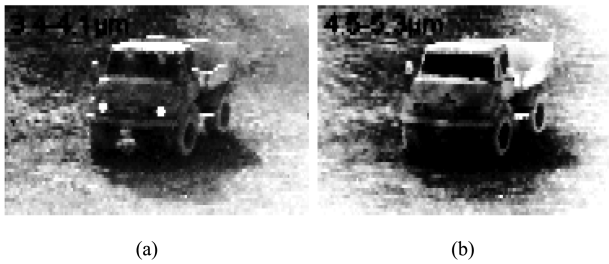


图5 滤波图像 (a)第一细分波段图像 (b)第二细分波段图像
Fig.5 Filtered images (a)image in sub-band 1 (b)image in sub-band 2

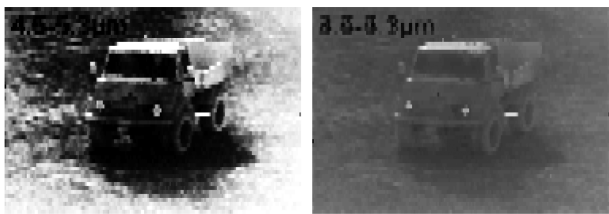


图6 融合图像
Fig.6 Fused image
图7 未采用 SSR 的融合图像
Fig.7 Image fused by method without SSR

照射的车顶),但目标的形状等信息都被淹没了,图3(b)隐隐约有目标,但难以确定是什么。

图4(a)和图4(b)是仅仅经过5次迭代、50次加噪声处理、噪声强度初值为20的两个细分中波段的弱信号红外图像的阈上随机共振图像,可以看出两个波段的目标均能准确辨认出是卡车.其中第一波段的图4(a)依然保留并更加清楚了车灯和车顶、卡车的马槽、前后右轮胎也能看出(“左”、“右”均以驾驶员方位来描述,下同);第二细分波段的图4(b)的右倒车镜和左后轮胎可以看到,车头、车轿的整体轮廓优于图4(a).但仍存在较多的椒盐噪声。

图5(a)和图5(b)是对两个细分波段随机共振图像用5×5中值滤波后的图像.图5(a)中的车灯、

两前轮胎间隙可以看到、左侧两个轮胎、马槽沿均比较清楚,可以看出整体轮廓;图5(b)的右倒车镜清楚、车头形状、车头前两灯之间的标识部分均优于图5(a),但是两前轮胎之间的空隙和马槽沿不及图5(a)清楚.总的来说,两个细分波段图像依然存在特征差异,因此有必要进行融合。

图6不仅两个倒车镜、三个车轮胎、车后马槽更清晰了,而且就连卡车车头两灯之间的标识部分、背景草地也更清楚,图像的层次感和太阳照射的真实感也能看出;图7中虽然部分细节比较明显,但整体效果较差,如左倒车镜、马槽、车前标牌、右前轮胎等并不清楚,但比原图像则要好得多.总之,通过图6和图7对比可以看出,随机共振后再融合效果更明显。

4.2 定量分析

图像的标准偏差可以反映图像细节的多少,值越大说明图像中细节越多^[1]. 图像的信息熵能够反映图像信息的多少,其值越大说明细节信息越丰富.但由于对整幅图像进行统计,所以二者有时无法准确反映两幅图像细节信息的差别.考虑到在比较图像之间的细节信息时,人眼往往是采用局部对照的办法,所以采用图像的局部标准差和局部熵来反映图像的细节信息更可靠一些.图像的峰值信噪比可以反映图像的处理效果,其值越大表明信号复原效果越好.这三项指标可以从不同角度度量图像中的细节信息,从而反映图像的处理效果.所以,下面通过局部标准差、局部熵和峰值信噪比来对图6、图7两幅融合图像进行比较,如表1所示。

表1 图6和图7的指标比较
Table 1 Image parameters comparison between Fig. 6 and 7

	局部标准差	局部熵	峰值信噪比	
			与第一细分波段图像比	与第二细分波段图像比
经随机共振后的融合图像(a)	13.0790	3.9616	42.7363	42.7559
未经随机共振的融合图像(b)	3.7616	2.7224	40.0501	40.0903
结果对比	247.70%	45.52%	6.71%	6.65%

局部计算的窗口为9×9.由表1可以看出,经随机共振后再融合图像的局部标准差、局部熵和峰值信噪比均有不同程度的提高,其中局部标准差提高最为显著,提高了247.70%;局部熵的提高也很明显,提高了45.52%;峰值信噪比分别提高了6.71%和6.65%.充分说明经随机共振后的融合图

像信息更多了、细节更清楚了,这与定性分析中人眼的主观观察结果一致。但是,实验中也发现图像处理时间因阈上随机共振而延长,而且,随机共振次数增加,效果随之改善,但耗时更长。

5 结论

对于弱信号双色中波红外图像的融合,增加随机共振环节,可以使原弱信号图像得到复原,融合图像的细节更清楚、信息更丰富,更利于目标识别。但是本方法的执行效率较低,下一步将研究在保证一定融合效果的条件下降低算法复杂度的方法。

REFERENCES

- [1] YANG Feng-Bao, NI Guo-Qiang, ZHANG Lei. Images fusion of subdivision band MWIR based on wavelet packet transform[J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (杨风暴,倪国强,张雷. 红外中波细分波段图像的小波包变换融合研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(4): 275 - 279.
- [2] YANG Feng-Bao, LIN Su-Zhen, LENG Min. Fusion of dual color MWIR images based on segmentation and support value transform[J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (杨风暴, 蔺素珍, 冷敏. 双色中波红外图像的分割支持度变换融合. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(5): 362 - 366.
- [3] Zheng S, Shi W Z, Liu J, et al. Multisource image fusion method using support value transform[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(7): 1831 - 1839.
- [4] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochas-

(上接 513 页)

论计算值大^[10-12],除了算法的近似外,主要是由于理论计算采用了一系列的理想化假设,如理想的超晶格、晶格完全匹配、界面陡峭、光滑、无缺陷等^[6]。而实际中是不可能达到这种理想效果的,因此,实验值和理论值之间存在一定的差异。

3 结论

采用自制的 LP—MOCVD 技术,在(100)面 n 型 GaSb 衬底上外延生长了 II 型 InAs/GaSb 超晶格材料。合理设计了生长温度、过渡层、界面层、源流量控制等影响超晶格质量的生长参数。分别用 AFM 法和 XRD 法对其表面形貌和超晶格质量进行了分析,并得到其在 77K 温度下的 PL 谱。这些分析说明生长的超晶格材料可以响应到 10 μm 的长波,且具有较好的表面形貌和外延层质量。

致谢 感谢中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室在 PL 谱测试方面给予的帮助。

tic resonance[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1981, **14**(11): 453 - 457.

- [5] Das A, Stock N G, Hins E L. Enhanced coding for exponentially distributed signals using supra-threshold stochastic resonance[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, **14**(1): 223 - 232.
- [6] Sasaki H, Sakane S, Ishida T, et al. Supra threshold stochastic resonance in visual signal detection[J]. *Behavioral Brain Research*, 2008, **193**(1): 152 - 155.
- [7] Sasaki H, Todorokihara M, Ishida T, et al. Effect of noise on the contrast detection threshold in visual perception[J]. *Neuroscience Letters*, 2006, **408**(2): 94 - 97.
- [8] XUE Ling-Yun. Study on application of neural stochastic resonance in speech and image processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University (薛凌云. 神经元随机共振机制及其在语音与图像处理中的应用研究. 杭州:浙江大学), 2008: 67 - 83.
- [9] XIANG Xue-Qin, FAN Ying-Le, PANG Quan, et al. Research on gray-scale image restoration based on neuron supra-threshold a periodic stochastic resonance mechanism[J]. *Journal of Image and Graphics* (向学勤, 范影乐, 庞全, 等. 基于神经元阈上非周期随机共振机制的灰度图像复原研究. *中国图象图形学报*), 2009, **14**(1): 77 - 81.
- [10] GUO Zhe-Wei, PANG Quan, FAN Ying-Le. Application of stochastic resonance mechanism to speech enhancement in strong noise environment[J]. *Computer Simulation* (郭浙伟, 庞全, 范影乐. 随机共振在强噪声环境中语音增强应用. *计算机仿真*), 2009, **26**(7): 351 - 353.
- [11] Stocks N G. Supra-threshold stochastic resonance: an exact result for uniformly distributed signal and noise[J]. *Physics Letters A*, 2001, **279**(1): 308 - 312.

REFERENCES

- [1] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors[J]. *J. Appl. Phys*, 1987, **62**(6): 2545 - 2548.
- [2] Sullivan G J, Ikhlassi A, Bergman J, et al. Compositional variations in MBE grown InAs/GaSb superlattices for infrared detector applications[J]. *Infrared Technology and Applications*, 2005, **5783**: 131 - 137.
- [3] Grein C H, Young P M, Ehrenreich H. Minority carrier life-times in ideal InGaSb/InAs superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1992, **61**(24): 2905 - 2907.
- [4] Miles R H, Chow D H, Schulman J N, et al. Infrared optical characterization of InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1990, **57**(8): 801 - 803.
- [5] Johnson J L, Samoska LA, Goddard AC, et al. Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb [J]. *J. Appl. Phys*, 1996, **80**(2): 1116 - 1127.
- [6] Johnson N F, Ehrenreich H, Hui PM, et al. Electronic and optical properties of III-V and II-VI semiconductor superlattices[J]. *Phys. Rev*, 1990, **B41**(6): 3655 - 3669.
- [7] Shao J, Lu W, Lu X, et al. Modulated photoluminescence spectroscopy with a step-scan Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 2006, **77**(6): 063104-6.

(下转 555 页)