

文章编号:1001-9014(2011)06-0551-05

基于光子学处理技术的被动毫米波成像

张跃东, 江月松, 何云涛, 王海洋
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:提出了一种采用电光调制和光子学处理技术的被动毫米波扫描成像方法. 该成像方法中辐射计通过电光调制将毫米波信号转换到光波频率, 采用光子学滤波器和光电探测器进行信息获取和处理. 阐述了毫米波辐射信号光子学处理的工作原理, 研究了器件参数对信号转换的影响, 分析了该处理方法中系统的噪声特性. 依据上述原理设计了一个基于光子学技术的机械扫描式被动毫米波成像系统, 获取了基于光子学技术的被动毫米波图像. 研究表明, 所提出的光子学被动毫米波成像方法可以获得类似传统毫米波辐射计成像的效果, 并具有带宽高、抗电磁干扰等优点.

关键词:被动毫米波成像; 微波光子学; 辐射计; 电光调制; 光电探测; 锁相放大器
中图分类号: TM931 **文献标识码:** A

Passive millimeter-wave imaging using photonic processing technology

ZHANG Yue-Dong, JIANG Yue-Song, HE Yun-Tao, WANG Hai-Yang
(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A passive millimeter-wave scanning imaging method using electro-optic modulation and photonic processing is presented. In this imaging method, the millimeter-wave signal in the radiometer is transformed to optical frequency by electro-optic modulation, and processed by photonic filter and photodetector. The principle of this millimeter-wave signal photonic processing method is described, and the relationship between component parameters and signal conversion is analyzed. The noise characteristics of this processing method are discussed. A passive millimeter-wave scanning imaging system using this photonic processing method was designed, and passive millimeter-wave images acquired using this method were first presented in China. The results show that the proposed passive millimeter-wave imaging method is effective and can obtain comparable imaging quality as that of traditional millimeter-wave radiometer imaging. This passive millimeter-wave imaging method has advantages such as large bandwidth and immunity to electromagnetic interferences.

Key words: passive millimeter-wave imaging; microwave photonics; radiometer; electro-optic modulation; photodetection; lock-in amplifier

PACS: 07. 57. Kp, 84. 40. - x

引言

被动毫米波成像系统能在恶劣天气或烟尘条件下工作, 具有全天候工作能力, 在遥感、侦查、导航、环境监测等领域发挥着重要作用^[1-3]. 近年来, 随着微波/毫米波光子学的发展, 采用光子学技术传输和处理毫米波信号得到了广泛的研究^[4-5]. 通过电光调制(或电吸收调制), 可将毫米波信号上变频至光波

频率, 由光纤传输并用光学方法处理. 光纤传输毫米波信号具有带宽高、衰减小、重量轻、抗电磁干扰等优点. 利用光子学技术处理毫米波信号的方法已应用在 RoF (Radio over Fiber) 系统、光控相控阵雷达^[4-5]和被动毫米波成像^[6-9]的研究中.

提出了基于光子学处理技术的毫米波辐射计, 并将其应用于被动毫米波扫描成像. 在辐射计中, 使用电光调制器把毫米波能量加载到光载波的边带

收稿日期: 2010-09-15, 修回日期: 2011-06-22

Received date: 2010-09-15, revised date: 2011-06-22

基金项目: 武器装备探索研究项目(7130730); 国家“863”计划项目(2007AA12Z114); 国家“973”计划项目(2011CB707001)

作者简介: 张跃东(1985-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事光电成像、微波光子学与综合孔径成像等方面的研究, E-mail: zyd@ee.buaa.edu.cn.

上,由光学滤波器滤除载波信号,保留的边带信号由光电探测器检测.对毫米波辐射信号的光子学处理方法进行了理论分析,讨论了器件参数对探测性能的影响.利用该处理方法,设计了机械扫描式被动毫米波成像系统,进行了验证实验.

1 基于光子学技术的毫米波信号处理

1.1 工作原理

基于光子学技术的毫米波信号处理方法通过电光调制(或电吸收调制)将毫米波信号上变频至光波频率进行处理.该信号处理方法的原理如图1所示.毫米波天线接收到的频率为 f_m 毫米波信号,传输到电光调制器中调制激光.经过电光调制后,在频率为 f_0 的激光载波上产生边带, ± 1 级边带的频率为 $f_0 \pm f_m$.处理过程中的光谱变化如图1所示.在输入毫米波功率较小时,调制信号满足小信号近似,调制后的一级光边带的功率和输入到电光调制器的毫米波功率成正比^[10].电光调制后的光信号通过光纤传输到光学滤波器中,以滤掉载波,保留两个边带或其中的一个边带.保留的边带信号由光电探测器检测.利用光电探测器的平方律特性,把保留的光边带信号转化为与其功率成正比的电流信号.

1.2 信号处理过程

频率为 f_m 的毫米波信号传输到电光调制器中产生调制电压 $V_m \cos(2\pi f_m t)$.由于电光效应,在电光调制器中传输的光波产生相位变化.

$$\Delta\phi(t) = \pi(V_m \cos(2\pi f_m t)/V_\pi) = m \cos(\omega_m t) \quad (1)$$

式中 V_π 表示电光调制器的半波电压, m 表示调制系数.对于电光相位调制器,假设调制器输入光场的振幅为 E_i ,角频率为 ω_0 ,则输出光场为^[11]

$$E_o = E_i \exp(j\omega_0 t + j\Delta\phi(t)) = E_i \exp(j\omega_0 t + jm \cos(\omega_m t)) \quad (2)$$

对式(2)采用Jacobi-Anger级数展开可得:

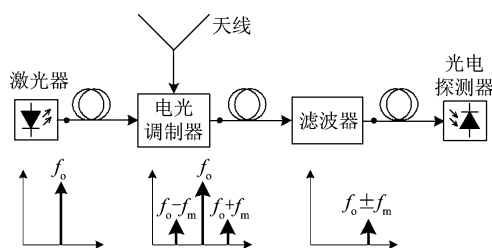


图1 基于光子学技术的毫米波信号处理原理图

Fig.1 Schematic diagram of millimeter-wave signal processing using photonics technology

$$E_o = E_i \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(m) \cdot \exp(j(\omega_0 t + n\omega_m t)) \quad (3)$$

式中 J_n 是 n 阶1类Bessel函数.由上式可得电光调制后输出光信号各频率分量的功率为

$$P(\omega_0 \pm n\omega_m) = P_i J_n^2(m), \quad (4)$$

$$n = 0, \pm 1 \dots$$

式中 P_i 表示输入的光功率.由于被动毫米波探测中信号的调制电压远小于 V_π ,可以使用Bessel函数的近似,即当 $m \ll 1$ 时, $J_1(m) \approx m/2$.考虑光在调制器中传输衰减,一级边带光功率可以近似为

$$P_{\text{FSB}} \approx C_{\text{mod}} P_i \left(\frac{m}{2}\right)^2 = C_{\text{mod}} P_i \left(\frac{\pi^2 Z_{\text{mod}} P_m}{2V_\pi^2}\right) \quad (5)$$

式中 C_{mod} 表示光在调制器中的传输率, Z_{mod} 表示电光调制器的阻抗, P_m 表示输入毫米波信号功率.由上式可以得出电光调制时毫米波信号向光信号的转换增益

$$G_{\text{mod}} = P_{\text{FSB}}/P_m = C_{\text{mod}} \left(\frac{\pi^2 Z_{\text{mod}}}{2V_\pi^2}\right) P_i = \eta_{\text{mod}} P_i \quad (6)$$

式中 η_{mod} 表示电光调制器的转换效率.对于Mach-Zehnder强度调制器,输出光场可表示为

$$E_o = \frac{E_i}{2} \exp(j\omega_0 t) \{ \exp[jm_1 \cos(\omega_m t)] + \exp[jm_2 \cos(\omega_m t) + j\phi] \} \quad (7)$$

则输出光功率为

$$P(\omega_0 \pm n\omega_m) = \frac{P_i}{4} [J_n^2(m_1) + J_n^2(m_2) + 2J_n(m_1)J_n(m_2)\cos(\phi)] \quad (8)$$

式中 m_1 和 m_2 是两个干涉臂上的调制系数, ϕ 是两个干涉臂的相位差.对于单驱动调制器, $m_2 = 0$,可得

$$P(\omega_0 \pm n\omega_m) \approx \frac{P_i}{4} \begin{cases} 2 + 2\cos\phi, n = 0 \\ (m/2)^2, n = \pm 1 \end{cases} \quad (9)$$

因此,一级边带功率为

$$P_{\text{FSB}} \approx C_{\text{mod}} \frac{P_i}{4} \left(\frac{m}{2}\right)^2 = C_{\text{mod}} P_i \left(\frac{\pi^2 Z_{\text{mod}} P_m}{8V_\pi^2}\right) \quad (10)$$

由式(5)和式(10)得出,电光调制后一级边带光功率与输入毫米波功率成正比,影响毫米波信号功率到一级边带光功率转换增益的主要因素为输入光载波功率和电光调制器的半波电压.因此提高转换效率需增加输入光载波的功率,或者减小电光调制器半波电压.另外,相位调制和强度调制的转换效

率不同,相位调制器具有较高的转换效率,但强度调制器可以进行载波抑制。

电光调制后的信号经过光学滤波器滤除载波,保留一级边带信号.由光电探测器检测后,一级边带产生的电流为

$$i_{\text{sig}} = \alpha \Re P_{\text{FSB}} = \alpha \Re (G_{\text{mod}} P_m) = G_{\text{det}} P_m \quad (11)$$

式中 α 表示光的传输率, \Re 表示光电探测器的响应率, G_{det} 表示毫米波功率与电流之间的转换增益因子.使用增益为 R 的跨阻放大器对光电流进行放大,可得输出的电压为

$$V_{\text{sig}} = R i_{\text{sig}} = R G_{\text{det}} P_m = G_v P_m \quad (12)$$

式中 G_v 表示放大器输出电压与输入毫米波功率之间的增益因子。

假设输入激光载波功率为 100 mW,电光相位调制器的半波电压 V_π 为 10 V,电光调制器阻抗 Z_{mod} 为 50 Ω ,光传输率 α 为 0.5,探测器响应度 \Re 为 0.9 A/W.则根据式(11)可得毫米波信号功率与输出电流之间的转换增益因子 G_{det} 约为 0.11 A/W.该增益因子值为近似值,与实际值的相对误差随输入毫米波信号功率的变化如图 2 所示.输入功率小于 3.2 mW 时,误差小于 0.1%.因此在输入毫米波信号功率较小时,增益因子 G_{det} 近似为常数,即毫米波信号功率与光电检测后输出信号电流成线性关系。

在毫米波信号的处理过程中,增益因子 G_{det} 还与输入毫米波信号的频率有关.影响信号处理的频率特性的主要参数是电光调制器的转换效率 η_{mod} 和光学滤波器的光传输率 α .电光调制器和光学滤波器都具有较高的带宽,因此采用光子学方法对毫米波信号处理具有较高的带宽。

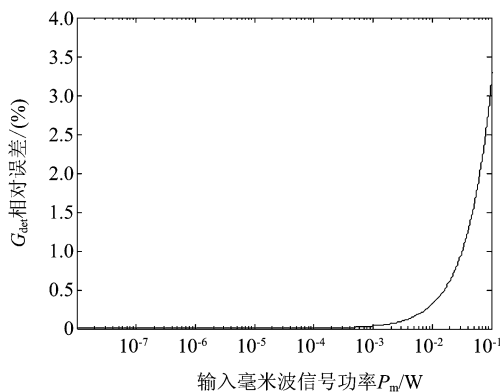


图 2 增益因子 G_{det} 相对误差随输入毫米波信号功率的变化图

Fig. 2 Relative error of gain factor G_{det} vs. power of input millimeter-wave signal

1.3 噪声特性

在信号处理过程中,光学器件由于自身的特性会产生一些噪声.首先,用于产生载波信号的激光光源会在边带频率产生一些自发辐射的光噪声.其次,在滤波过程中,经过滤波器后残留的部分载波能量也会成为噪声源.另外,光电探测器的暗电流也是主要的噪声源.这些噪声是光电探测中的直流噪声源.被动毫米波探测中,毫米波信号非常微弱,电光调制后产生的光边带功率很小.因此需抑制直流噪声,改善检测信噪比。

在信号探测中可以使用锁相放大技术抑制直流噪声^[12].锁相放大器利用与被测信号有相同频率的参考信号作为比较基准,只对被测信号本身和与参考信号同频的噪声分量有响应.因此能抑制无用噪声,改善检测灵敏度.在该工作模式中,主要的噪声是探测器工作带宽内的波动.光电探测系统工作带宽内的主要噪声为光电探测器的散粒噪声和电路中的热噪声。

光电探测器的散粒噪声电流 i_{sn} 均方值,可以表示为

$$\langle i_{\text{sn}} \rangle^2 = 2q i_{\text{ph}} B = 2q (i_{\text{sig}} + i_n + i_d) B \quad (13)$$

式中 q 表示电荷电量, B 是探测器工作带宽. i_{ph} 是总的光电流,它包括信号光电流、由探测中光噪声 P_n 产生的噪声电流 i_n 、光电探测器暗电流 i_d 。

热噪声电流主要由跨阻放大器电阻 R 、探测带宽和温度 T 决定,如下式所示:

$$\langle i_{\text{th}} \rangle^2 = 4kTB/R \quad (14)$$

式中 k 为波尔兹曼常数.因为这两种噪声是不相关的,总噪声的均方值可以写成各个噪声均方值之和.由信号电流和噪声电流可得出信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{(G_{\text{det}} P_m)^2}{2q(G_{\text{det}} P_m + i_n + i_d)B + 4kTB/R} \quad (15)$$

在输入毫米波信号功率较小,信号电流远小于直流噪声电流的情况下,探测系统能够检测出的最小输入功率变化量为

$$\Delta P_N = \frac{\sqrt{B(2q(\Re P_n + i_d) + 4kT/R)}}{G_{\text{det}}} \quad (16)$$

在毫米波辐射测量应用中,需要尽可能减小系统中的噪声.通过光学滤波减小直流光噪声,能降低系统中的散粒噪声.探测器非高速工作时,可以工作非偏压状态下,暗电流较小.在对光电流放大时,提高跨阻放大器电阻,可以减小热噪声。

2 基于光子学技术的毫米波辐射计

采用光子学处理技术的毫米波辐射计的原理图

如图 3 所示. 辐射计中毫米波信号经电光调制转换至光学频率, 采用光电探测的方法进行处理. 辐射计采用 Dicke 式辐射计结构, 在信号检测中采用锁相放大技术. 输入开关在天线与参考负载之间周期性转换. 锁相放大器实现同步检波, 滤除系统中的直流噪声, 同时可以减小系统增益起伏对辐射计灵敏度的影响.

由接收机接收到的黑体辐射功率与热力学温度 T 和接收机带宽 B_{RF} 的关系 $P_m = kTB_{RF}$, 式(12)可写为

$$V_{sig} = G_v k B_{RF} T \quad (17)$$

采用 Dicke 辐射计结构时, 开关在天线与参考负载之间进行周期性切换, 因此经光电探测和放大后输出电压为周期信号. 由锁相放大器对该信号与同频参考信号进行互相关运算, 检测输入信号. 锁相放大器输出直流信号为

$$V_o = C_{LI} G_v k B_{RF} G_{RF} (T'_A - T_{REF}) \quad (18)$$

式中 T'_A 为天线温度, T_{REF} 为参考负载温度, G_{RF} 为毫米波放大器增益. C_{LI} 为比例系数, 由输入信号和参考信号的波形及锁相放大器的工作模式共同确定. 由上式得出, 辐射计输出的直流电压与输入天线温度成线性关系.

3 成像实验

基于采用光子学技术的毫米波辐射计, 设计了一个 33 ~ 50 GHz 的被动毫米波扫描成像实验系统, 如图 4 所示. 该实验系统由天线、二维机械扫描装置、斩波装置、毫米波低噪声放大器 (LNA)、电光调制器、激光器、FBG 滤波器、光电探测器、锁相放大器和计算机组成. 该实验系统中, 二维机械扫描装置控制天线对视场进行二维扫描, 使天线接收不同方位角的毫米波辐射. 二维机械扫描装置通过两个电控旋转台实现水平和仰俯转动. 计算机控制扫描和数据采集的同步, 对天线各个方位检测到的信号进行采集和处理后, 得到视场的毫米波辐射图像.

实验系统中使用的毫米波天线为卡塞格伦天

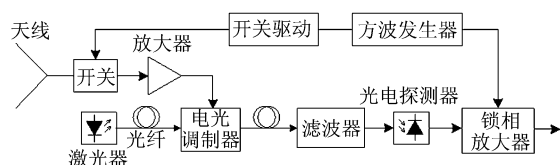


图 3 基于光子学技术毫米波辐射计原理图

Fig. 3 Schematic diagram of radiometer using photonic processing



图 4 被动毫米波成像实验装置图

Fig. 4 Picture of the passive millimeter-wave imaging system

线, 工作频率为 33 ~ 50 GHz, 口径 600 mm. 斩波装置由切口的 WR-22 波导和光学斩波器组成, 代替毫米波开关的功能^[10]. 毫米波 LNA 为 33 ~ 50 GHz LNA, 增益 18 dB. 电光调制器采用 Covega 公司的 40 Gb/s 铌酸锂相位调制器. 激光器采用 NP Photonics 的窄线宽光纤激光器, 中心波长 1536.61 nm, 输出功率 25 mW. 实验系统中载波抑制滤波器采用 FBG 滤波器. FBG 滤波器带宽为 0.2 nm, FBG 滤波器和环形器组成带通滤波器结构, 在实验中使用三级滤波器级联. 光电探测器采用 InGaAs PIN 光电探测器. 锁相放大器采用 SR830 数字锁相放大器. 机械扫描装置中电控旋转台通过步进电机驱动, 水平和仰俯转角分别为 $\pm 60^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$, 角度精度 0.004°. 计算机对扫描装置控制、对锁相放大器数据采集都通过 RS-232 接口通信. 扫描控制和数据采集程序使用 Labview 编程实现.

利用上述实验系统进行了室外扫描成像实验. 实验目标选择建筑物, 背景为天空. 对建筑物仰视成像的实验结果如图 5 所示, 图 5(a) 为可见光图像, 图 5(b) 为毫米波辐射图像, 图中黑色部分表示辐射温度高的区域. 毫米波辐射图像中, 建筑物轮廓清晰可见, 天空辐射温度较低, 建筑物辐射温度较高. 被动毫米波图像能够反映出建筑物和天空背景之间的辐射差异. 另外, 从图中可以看出建筑物中石板墙面有较高的辐射温度. 成像实验结果表明, 采用光子学处理方法的毫米波辐射计能够用于被动毫米波成像.

4 结论

研究了基于电光调制和光子学处理的被动毫米波成像技术, 将毫米波信号加载到光波上, 由光纤传输并使用光电探测的方法进行处理, 在信号的检测中使用锁相放大技术. 对毫米波信号光子学处理过

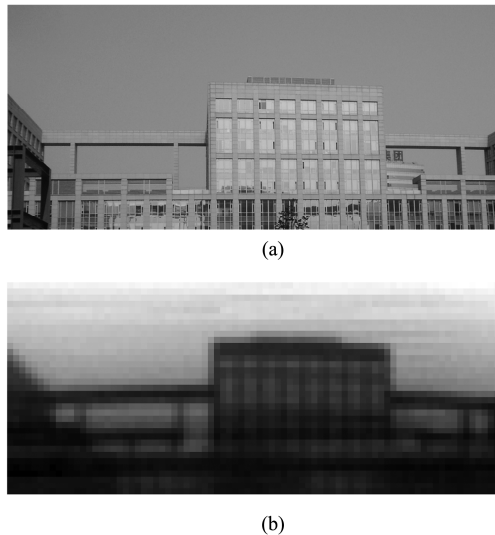


图 5 建筑物被动毫米波成像实验结果 (a) 实物图 (b) 毫米波图像

Fig. 5 Passive millimeter-wave imaging results (a) visible image (b) millimeter-wave image

程中的信号转换及噪声特性进行了分析,讨论了影响信号检测性能的主要因素.通过搭建毫米波辐射计扫描成像实验系统进行了室外成像实验,验证了采用光子学技术的被动毫米波成像的可行性.该成像方法在光波频率处理毫米波信号具有带宽高的优点,辐射计中光信号传输使用光纤,具有体积小和重量小、抗电磁干扰的优点.被动毫米波成像中的图像去噪、图像畸变校正、超分辨率处理等问题需要进一步研究,以提高成像质量.本文所提的方法还可以扩展应用于微波、太赫兹波段并应用于被动综合孔径成像系统,不仅大大降低体积重量,还可以实时成像,在航空航天平台被动成像应用方面具有广阔的应用前景.

REFERENCES

[1] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter-wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, **4**(3): 39-50.

- [2] WANG Hua-Li, LI Xing-Guo, PENG Shu-Sheng, *et al.* Passive millimeter wave imaging techniques[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王华力, 李兴国, 彭树生, 等. 被动毫米波成像技术. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(4): 297-302.
- [3] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Research on 3mm band radiometric imaging[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张光锋, 张祖荫, 郭伟. 3 mm 波段辐射成像研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6): 422-426.
- [4] Seeds A J. Microwave photonics[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 877-887.
- [5] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*. 2009, **27**(3): 314-335.
- [6] Blanchard P M, Greenaway A H, Harvey A R, *et al.* Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(3): 418-425.
- [7] Schuetz C A, Mirotznik M S, Shi S, *et al.* Optical techniques for sparse-aperture, millimeter-wave imaging[J]. *Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IX*. 2006, **6211**: 68004.
- [8] HE Yun-Tao, JIANG Yue-Song, WANG Chang-Wei. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection[J]. *Acta Optica Sinica* (何云涛, 江月松, 王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用. *光学学报*), 2008, **28**(6): 1201-1207.
- [9] Schuetz C A, Samluk J, Chen C, *et al.* Millimeter-wave imaging using optical upconversion detectors[J]. *Proceedings of SPIE - Electro-Optical Remote Sensing, Detection, and Photonic Technologies and Their Applications*. 2007, **6739**: 67390R.
- [10] Schuetz C A, Murakowski J, Schneider G J, *et al.* Radiometric millimeter-wave detection via optical upconversion and carrier suppression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(5): 1732-1738.
- [11] Shi Y, Yan L, Willner A E. High-speed electrooptic modulator characterization using optical spectrum analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(10): 2358-2367.
- [12] ZOU Yan, FENG Li-Shuang, ZHANG Chun-Xi, *et al.* The application of lock-in amplifier in the detection of weak signal[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation* (邹燕, 冯丽爽, 张春熹, 等. 锁定放大器在微弱光信号检测中的应用. *电测与仪表*), 2005, **42**(11): 15-17.

(上接 550 页)

[8] Shao J, Lu X, Lu W, *et al.* Cutoff wavelength of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epilayers by infrared photoreflectance spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2007, **90**(17): 171101-3.

[9] Shao J, Ma L, Lü X, *et al.* Evolution of infrared photoreflectance line shape with temperature in narrow-gap $HgCdTe$ epilayers[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2008, **93**(13): 131914-3.

[10] Brown G. J., Szmulowicz F, Haugan H, *et al.* Design of InAs/Ga(In)Sb superlattices for infrared sensing[J]. *Mi-*

croelectronics Journal, 2005, **36**(3-6): 256-259.

- [11] Rodriguez JB, Christol P, Chevrier F, *et al.* Optical characterization of symmetric InAs/GaSb superlattices for detection in the $3.5\mu m$ spectral region[J]. *Physica E*, 2005, **28**(2): 128-133.
- [12] Haugana HJ, Szmulowicz F, Brown G. J., *et al.* Short-period InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detectors[J]. *Appl. Phys. Lett*, 2005, **87**(26): 261106-3.