

1024 × 1 元近红外 InGaAs 线列焦平面组件

李 雪^{1,2} 龚海梅^{1,2} 唐恒敬^{1,2} 刘大福^{1,2} 邵秀梅^{1,2} 危 峻¹ 方家熊^{1,2}

(¹ 传感技术国家重点实验室,中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)
² 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室,上海 200083)

摘要 利用分子束外延方法生长的 InP/InGaAs/InP 双异质结材料,通过台面成型、有效钝化和欧姆接触电极制备等工艺,制作了 512 × 1 元的背照射 InGaAs 光敏芯片,光敏芯片响应波段为 0.95 ~ 1.7 μm,平均峰值响应率约为 0.97 A/W。512 × 1 元光敏芯片与 512 × 1 元电容反馈互导放大器(CTIA)读出电路通过基板间接倒焊互连后形成 512 × 1 元近红外 InGaAs 模块。两个 512 元模块经过有效元交叠的方式拼接形成 1024 × 1 元近红外 InGaAs 线列焦平面组件,并被封装于带热电致冷器的金属管壳中,室温下组件的响应非均匀性为 5.8%,盲元率为 0.6%,平均峰值探测率为 6.10 × 10¹¹ (cm · Hz^{1/2})/W。采用热电致冷器可以稳定组件工作温度,在 5 °C 时组件功耗为 3.10 W。

关键词 光学器件;近红外;InGaAs;线列焦平面

中图分类号 TN213 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100305

1024 × 1 Elements Near-Infrared InGaAs Linear Focal Plane Arrays Assembly

Li Xue^{1,2} Gong Haimei^{1,2} Tang Hengjing^{1,2} Liu Dafu^{1,2}

Shao Xiumei^{1,2} Wei Jun¹ Fang Jiexiong^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
² Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The double hetero-junction InP/InGaAs/InP material is grown by molecular beam epitaxy. The back-illuminated 512 × 1 elements InGaAs photo-detectors are fabricated using the improved process including the profile etching, effective passivation and ohmic contacts. Response spectra of 512 × 1 elements InGaAs photo-detectors range from 0.95 to 1.7 μm and the average peak responsivity is 0.9 A/W. 512 × 1 elements InGaAs photo-detectors are connected to readout circuit with capacitive transimpedance amplifier (CTIA) input stage by transitional base plane using In bump flip chip so that 512 × 1 elements InGaAs module is fabricated. The 1024 × 1 elements InGaAs FPA are fabricated using the two 512 × 1 elements InGaAs modules joint by interlaced effective pixels and are sealed in metal package with thermal electrical cooler (TEC). The response non-uniformity, blind pixels ratio and average peak detectivity of 1024 × 1 elements InGaAs FPAs are 8%, 1% and 7 × 10¹¹ (cm · Hz^{1/2})/W, respectively at room temperature. The working temperature of FPAs assembly is stabilized by using TEC, power consumption of FPAs assembly at 5 °C is 3.10 W.

Key words optical devices; near infrared; InGaAs; linear focal plane arrays

OCIS codes 040.3060; 160.1890; 040.1240

1 引 言

近红外镉镓砷(InGaAs)线列焦平面组件在 0.9 ~ 1.7 μm 波段具有非制冷室温工作、探测率高和均匀性好等优点,是小型化、低成本和高可靠性的短波红外成像系统的最佳选择之一^[1]。InGaAs 线

列焦平面组件首先进行空间遥感应用是在法国陆地卫星(SPOT4)的高分辨率可见近红外光谱仪(HRVIR)和植被监测仪器^[2],其线列规模为 3000 元,采用 10 个 300 元子模块直线拼接而成,用于土壤特性和植被信息的监测。2002 年欧空局环境卫

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-08-30

基金项目: 上海市科技人才计划项目(09XD1404500)资助课题。

作者简介: 李 雪(1976—),女,博士,副研究员,主要从事新型光电探测器方面的研究。E-mail: lixue@mail.sitp.ac.cn

星大气吸收光谱仪上采用 3 个 1024 元 InGaAs 焦平面组件,用于了解大气成分分析^[3]。目前了解到的最大规模的 InGaAs 焦平面组件在航天遥感中的应用是印度的资源卫星,其规模达到了 6000 元,用于资源分布、土壤水分监测、农作物估产等^[4]。

线列焦平面探测器可用于推扫或摆扫成像系统,随着成像系统扩大视场、提高地面分辨率的需求,扩大焦平面组件的规模是重要的发展方向^[5]。本文报道了 1024 元近红外 InGaAs 线列焦平面组件的研制,该组件结构可根据应用需求进一步扩大规模。

2 实验过程

2.1 背照射 512×1 元 InGaAs 光敏芯片研制

512×1 元近红外 InGaAs 线列光敏芯片是在 InP 衬底分子束外延方式(MBE)生长的 p-InP/i-In_{0.55}Ga_{0.45}As/n-InP 双异质结上采用台面结构实现

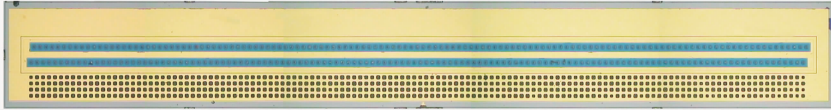


图 1 背照射 512×1 元近红外 InGaAs 线列光敏芯片照片

Fig. 1 Photograph of back illuminated 512×1 elements near infrared InGaAs photodetector

2.2 1024×1 元近红外 InGaAs 长线列焦平面组件的研制

512×1 元 InGaAs 线列光敏芯片、512 元读出电路分别和设计匹配的过渡基板通过倒装焊的方式互连,如图 2 所示。该读出电路的输入级采用电容反馈互导放大器(CTIA)式运放积分型,积分电容为 0.5pF,开始脉冲起始扫描过程,并将储存的电荷信号经采样,差分放大和多路传输后顺序输出,扫描结束时给出结束信号 EOS^[8]。两个 512×1 元 InGaAs 模块采用有效元交叠的方式实现长线列的无盲元拼接,拼接精度控制在 5 μm 以内,两个模块的行中心距离控制在 1.25 mm,拼接过程在平整度优于 5 μm 的电极板上进行,电极板起到机械支撑、热学传导和电学输出的功能。为实现稳定 InGaAs

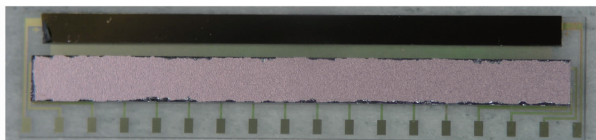


图 2 背照射 512×1 元 InGaAs 焦平面

Fig. 2 Photograph of back illuminated 512×1 elements InGaAs focal plane array

的^[6],该外延材料由上海微系统所提供,光敏芯片采用背入射结构,光敏元成“品”字形排布,面积为 25 μm×25 μm,如图 1 所示。外延材料经过常规表面清洗后,采用离子束刻蚀结合化学腐蚀的方式获得低损伤的台面成型,采用等离子体增强化学汽相沉积(PECVD)方法在合适温度下生长 SiN 作为有效钝化膜,随后采用电子束蒸发的方式以 Ti/Pt/Au 复合金属体系制备 P-InP 区电极,该金属体系经过快速热退火形成了较好的欧姆接触^[7],之后生长用于和过渡基板倒焊的 In 柱,最后进行 InP 衬底抛光工艺并镀增透膜。

利用 Keithley236 测量单元对光敏芯片开展室温下光电性能测试,样品封装于高阻抗测试盒中并置入暗的金属屏蔽盒,以减少干扰。利用傅里叶短波红外光谱仪测试 InGaAs 光敏芯片的响应光谱,用于计算 InGaAs 探测器的 G 因子,获得峰值响应率和探测率。

光敏芯片工作温度,一级热电致冷器被置于金属管壳中,把热电致冷器和电极板、测温电阻和电极板胶接固化后,对组件进行除气密封。研制的 1024×1 近红外 InGaAs 长线列焦平面组件如图 3 所示,其被置于屏蔽盒中,在短波 InGaAs 焦平面测试系统上进行测试。

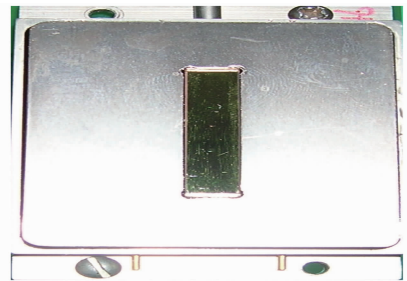


图 3 1024×1 近红外 InGaAs 长线列焦平面组件

Fig. 3 Photograph of 1024×1 elements near infrared InGaAs linear focal plane array assembly

3 测试结果与分析

3.1 背照射 512×1 元 InGaAs 光敏芯片光电性能测试

对线列光敏芯片进行室温伏安曲线和响应光谱

测试。伏安曲线结果如图 4 所示,结果表明光敏芯片具有良好的结特性,在反向偏压 10 mV 时,暗电流 I_d 达到 5.45×10^{-11} A,动态零偏压电阻 $R_0 = 1.08 \times 10^9 \Omega$ 。图 5 是研制的背照射 InGaAs 光敏芯片典型的相对响应光谱,响应光谱在 $0.95 \sim 1.72 \mu\text{m}$ 范围,峰值响应在 $1.60 \mu\text{m}$ 处,按 50% 计算截止波长在 $1.72 \mu\text{m}$ 处。根据相对响应光谱按下式计算 900 K 黑体下器件的 g 因子:

$$g = \frac{\int_0^\infty G(\lambda_p) \int_0^\infty \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1\}} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T^4}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1\}} d\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$; $T_B = 900 \text{ K}$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $G(\lambda)$ 是随波长变化的信号相对值, $G(\lambda_p)$ 是峰值波长对应的信号的相对值,计算的 g 因子为 71^[9]。

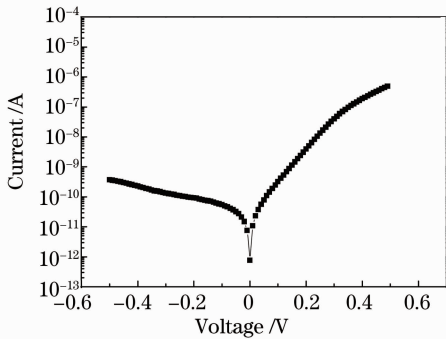


图 4 光敏芯片典型的伏安曲线

Fig. 4 Typical I-V curve of photodetector

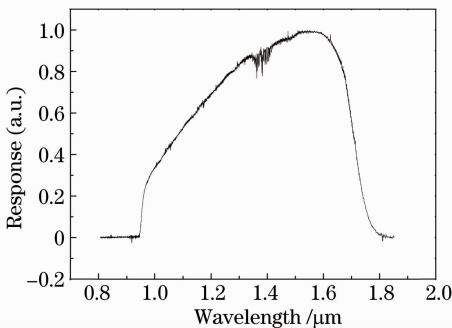


图 5 光敏芯片典型响应光谱曲线

Fig. 5 Typical optical responsivity of photodetector

在 512×1 元光敏芯片中随机抽测 10 元的信号,根据下式计算相应各元峰值响应率:

$$R_{bb} = \frac{I_s}{P \times \tau} = \frac{I_s \times 4L^2}{\sigma(T_B^4 - T_0^4) \times d \times A_D}, \quad (2)$$

$$R_\lambda = gR_{bb} \quad (g = 71).$$

如图 6 所示,其平均峰值响应率为 0.97 A/W ,光敏芯片的量子效率达到 76%。

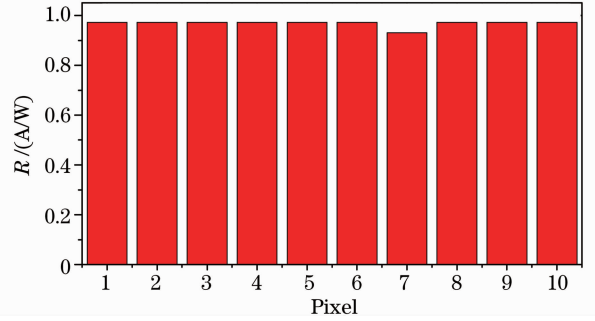


图 6 在 512×1 元光敏芯片中随机抽测 10 元器件的响应率

Fig. 6 Responsivity of the random 10 pixels in 512 elements linear photodetectors

3.2 近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面组件性能测试

3.2.1 近红外 512×1 元 InGaAs 线列焦平面模块性能测试

在短波红外焦平面测试系统上对 512×1 元 InGaAs 线列焦平面模块性能进行测试,其信号、噪声与积分时间的关系如图 7 所示,焦平面信号随积分时间的增加线性增加,如图 7(a)所示,饱和电压为 1.80 V ,对应的饱和电子数为 5.66×10^6 ,对其进行线性度拟合,InGaAs 线列焦平面的非线性度为 0.16%。焦平面噪声电压的平方随积分时间的增加而线性增加,如图 7(b)所示,这表明 InGaAs 光敏芯片的暗信号引起的噪声是焦平面噪声的主要来源^[10]。由焦平面的信号与噪声计算焦平面的信噪比,如图 8(a)所示,信噪比随积分时间增加而增加,其动态范围如图 8(b)所示,其随积分时间的增加而减小,在 25 ms 时信噪比优于 1700,动态范围达到 65 dB,在 1 ms 时信噪比优于 200,动态范围达到 74 dB。

3.2.2 近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面性能测试

近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面组件的测试参数如表 1 所示。其中 $T_1(K)$ 为黑体温度, d 为黑体孔径, $T_0(K)$ 为环境温度, a 为光敏元边长, C_{int} 为积分电容, f 为时钟频率, T_{int} 为积分时间, Δf 为带宽, L 为测试距离, P 为黑体功率。

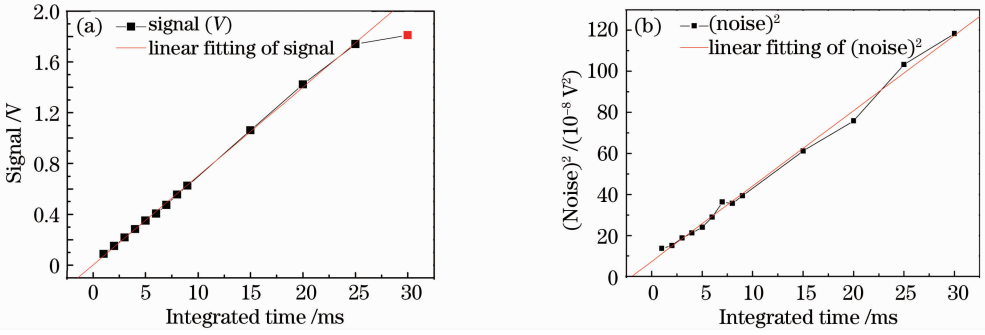


图 7 InGaAs 线列焦平面信号、噪声与积分时间的关系

Fig. 7 Relation of signal and noise with variation of the integration time

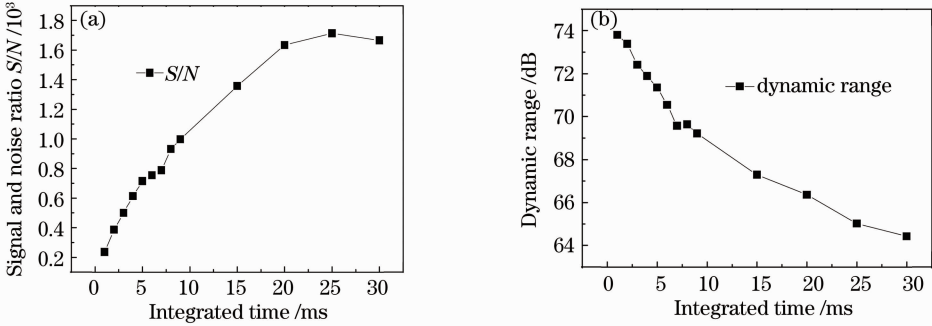


图 8 InGaAs 线列焦平面信噪比和动态范围与积分时间的关系

Fig. 8 Relation of S/N and dynamic range with variation of the integration time

表 1 1024×1 元 InGaAs 焦平面性能测试系统参数

Table 1 Measurement parameters of 1024×1 elements

InGaAs linear focal plane arrays

Parameter	Value
T_1/K	900
T_0/K	290
C_{int}/pF	0.5
$T_{int}/\mu s$	2000
L/cm	35
d/mm	10
$a/\mu m$	25
f/kHz	100
$\Delta f/Hz$	250
P/W	8.588×10^{-9}

室温下 1024×1 元焦平面响应信号和噪声直方图如图 9 所示,均匀性 U_s 可表示为

$$U_s = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_s - \bar{V}_s)^2}, \quad (3)$$

式中 N 为 1024 元, V_s 和 \bar{V}_s 分别为输出信号及其平均值,其响应不均匀性 U_s 和盲元率分别为 5.8% 和 0.6%。

平均峰值探测率 D^* 可表示为

$$D^* = g \cdot \frac{V_s}{V_N \cdot P} (A_D \cdot \Delta f)^{1/2}, \quad (4)$$

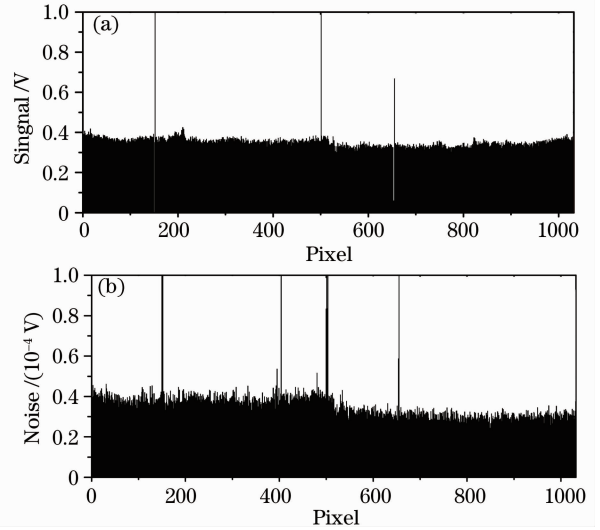


图 9 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面响应信号和噪声直方图

Fig. 9 Histogram of response and noise of 1024×1 elements linear InGaAs detector module

式中 V_N 为噪声电压, P 为黑体功率, A_D 为光敏芯片的面积, Δf 为焦平面测试带宽, g 因子为 71, 计算获得焦平面平均峰值探测率为 $6.10 \times 10^{11} (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2})/W$ 。

3.3 近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面组件集成与扫描成像

近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面组件采

用金属管壳密封,管壳内集成的热电致冷器可以稳定组件工作温度,图 10 为组件控温温度与功耗的关系,在 5 ℃时组件功耗为 3.10 W。

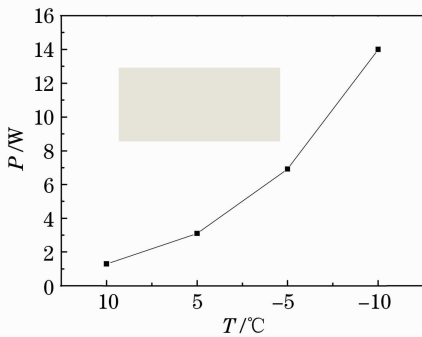


图 10 1024×1 元 InGaAs 焦平面组件控温温度与功耗的关系

Fig. 10 Relation between temperature and power of 1024×1 elements InGaAs focal plane array assembly

近红外 1024×1 元 InGaAs 线列焦平面组件被安装在推扫式成像系统上进行演示成像,窗口放置滤光片,透过波长为 1.58~1.64 μm,在室温下对外景成像,测试时,物距定为无穷远,电路积分时间为 2 ms,读出速率为 500 kHz,其成像图片如图 11 所示,图片清晰。



图 11 1024×1 元 InGaAs 焦平面组件演示成像

Fig. 11 Picture obtained by using 1024×1 elements InGaAs focal plane array assembly

4 结 论

利用分子束外延方法生长的 InP/InGaAs/InP 双异质材料研制了 512×1 元的背照射 InGaAs 光敏芯片,其平均峰值响应率为 0.97 A/W,量子效率达到

76%。采用 512×1 元光敏芯片与 512×1 元 CTIA 读出电路通基板倒焊互连后形成 512×1 元模块,其响应非线性度为 0.16%,动态范围达到 74 dB。两个 512×1 元模块经过有效元交叠方式拼接形成 1024×1 元线列焦平面,室温下组件的响应非均匀性为 5.8%,盲元率为 0.6%,平均峰值探测率为 $6.10 \times 10^{11} (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2})/\text{W}$,组件被封装于带热电致冷器的金属管壳中,5 ℃时组件功耗为 3.10 W。实现了该组件的演示成像,成像图片清晰。

参 考 文 献

- 1 Jan Vermeiren, Urbain Van Bogget, Guido Vanhorebeek *et al.*. Low-noise, fast frame-rate InGaAs 320 × 256 FPA for hyperspectral applications[C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 72983N-1
- 2 X. Hugon, O. Amore, S. Cortial *et al.*. Near-room operating temperature SWIR InGaAs detectors in progress[C]. *SPIE*, 1995, **2552**: 738~747
- 3 Ruud W. M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P. H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0~2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the earth atmosphere [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**(1): 1~16
- 4 Himanshu Dave, Chirag Dewan, Sandip Paul *et al.*. AWiFS camera for resourcesat[C]. *SPIE*, 2006, **6405**: 64050X
- 5 Cai Haijiao, Xu Meng, Wei Jun. Principle and design of data process system of push-broom infrared camera[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(3): 447~450
蔡海蛟, 徐 蒙, 危 峻. 推扫式红外相机数据处理系统原理与设计[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(3): 447~450
- 6 Li Xue, Tang Hengjing, Fan Guangyu *et al.*. 256×1 Element linear InGaAs near-infrared detector arrays[C]. *SPIE*, 2007, **6835**: 683505
- 7 Gong Haimei, Zhang Kefeng, Tang Hengjin *et al.*. Developments of near IR linear InGaAs FPAs in China [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 14~18
龚海梅, 张可锋, 唐恒敬 等. InGaAs 近红外线列焦面阵的研制进展[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 14~18
- 8 Yaoqiao Li, Hui Zhu, Xue Li *et al.*. Design and simulation of A 512×1 readout circuit for focal plane array[C]. *SPIE*, 2007, **6835**: 68350H
- 9 Tang Dingyuan, Mi Zhengyu *et al.*. Photoelectric Device [M]. Shanghai: Shanghai Technological Literature Publishing Company, 1989
汤定元, 糜正喻 等. 光电器件概论 [M]. 上海: 上海科技文献出版社, 1989
- 10 Li Xue, Tang Hengjing, Wang Yang *et al.*. Study on the dark signal of near-infrared InGaAs linear detector arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 377~381
李 雪, 唐恒敬, 汪 洋 等. 近红外 InGaAs 线列焦平面组件暗信号研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 377~381