

文章编号:1001-9014(2011)05-0433-05

FY-4 大气垂直探测仪扫描镜的太阳入侵研究

叶荣^{1,2}, 尹球³, 匡定波¹, 胡勇^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100)

摘要:针对 FY-4 三轴稳定静止卫星上遥感器的夜间太阳入侵问题,建立了星上遥感器的太阳辐照模型,由此计算了星上任意面元的太阳入射角系数和太阳辐射. 针对其上的大气垂直探测仪结合遮光罩实际设计参数,分析了扫描镜的每日太阳入射角系数、太阳辐射、太阳入侵的时刻、入侵持续时间以及接受的太阳辐照的年变化曲线,并与 GOES-8(地球静止轨道环境卫星 8 号)实测数据作比较,验证了计算的合理性和正确性.

关键词: FY-4 静止卫星; 大气垂直探测仪; 太阳入侵; 三轴稳定
中图分类号: TP7 **文献标识码:** A

Effect of solar intrusion on scanning mirror of atmosphere vertical sounder onboard the FY-4 geostationary satellite

YE Rong^{1,2}, YIN Qiu³, KUANG Ding-Bo¹, HU Yong^{1*}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Shanghai Center for Satellite Remote Sensing Applications, Shanghai 201100, China)

Abstract: A model of solar irradiation on sensors onboard the FY-4 geostationary satellite in the case of solar intrusion was proposed. Solar radiation and the angle of incidence of the sun light on arbitrary surface of satellite can be calculated at any given time. Considering structure of baffle, the solar radiation, angle of incidence and the solar intrusion duration on scanning mirror of atmosphere vertical sounder on any day of the year can be given. The changes in one year are also given. The simulation results are similar with the measured data of GOES-8 (Geostationary Operational Environmental Satellites), and proved the accuracy of the simulation data.

Key words: FY-4 geostationary meteorological satellite, atmosphere vertical sounder, solar intrusion, 3-axis stabilization
PACS: 42.68-w

引言

FY-2 静止气象卫星自发射以来,为我国气象监测作出了巨大贡献,它采用自旋稳定方式,以 100 r/min 速率旋转,观测效率大约为 5%,为了提高观测效率,作为新一代的气象卫星, FY-4 静止气象卫星将要采用三轴稳定控制方式,其上的遥感器将一直凝视地球,在夜间将会受到太阳照射,且持续时间大约 6 h,如果不采取措施,太阳辐照 (1367 W/m^2)^[1]对遥感器的影响将会很大,影响遥感器成像质量,造成数据无法使用,乃至仪器失灵. 大气垂直探测仪作为 FY-4 卫星上的主要遥感仪器之一,势

必会面临这个问题,为了避免此种情况的发生,需要对它所接收到的太阳辐射进行理论分析和计算机模拟,定量判断太阳对大气垂直探测仪性能影响时空变化特征,为遥感器技术研发和遥感数据应用服务.

美国的 GOES 系列卫星从 GOES-8 开始都是采用三轴稳定方式,他们同样无法避免太阳入侵,因此有一些 GOES 卫星资料可以借鉴. 在国内方面,已经有一些研究机构开始着手于计算机仿真方面的研究,但多是针对已有的航天器和卫星,利用国外的一些技术成熟软件进行计算和研究. 在针对三轴稳定的静止气象卫星方面,基本上因为国内还没有这种对地观测的光学遥感卫星,对它上面的大气垂直探

收稿日期:2009-12-21,修回日期:2011-06-18

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)课题资助(2006AA12Z148)

作者简介:叶荣(1982-),女,安徽铜陵人,博士研究生,研究方向为新型遥感器成像过程仿真分析, E-mail: yerongmail@126.com.

* 通讯作者: huyong@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2009-12-21, revised date: 2011-06-18

测仪的研究更是少之又少. 游思梁等人就 FY-4 上的星载扫描辐射计的太阳入侵情况给出了仿真算法流程, 并采用了近似的简化方法, 将午夜太阳入侵角简化成相应地球正面的太阳高度角的计算^[2]. 本文采用了更为直接的方法, 根据图形学的一些知识, 采用空间坐标变换方法来计算.

1 FY-4 大气垂直探测仪太阳光照模型

1.1 太阳与地球的相对位置模型

静止卫星的高度 35800 km 比起太阳与地球的距离来说是很小的, 因而由于卫星高度不同而引起的太阳辐射强度的变化可以忽略不计. 同时, 在工程计算上一般也不考虑太阳常数由于太阳自身的变化引起的波动. 另外, 由于太阳和地球的距离约为 1.5×10^8 km, 从地球上, 太阳只占有半度立体角, 因此在日地距离的量级上, 太阳可以当作点光源处理. 在这个距离上, 地球卫星的体积相对来说是很小的, 所以可以有如下假设:

- 假设太阳是一个均匀的热辐射平衡体, 且其表面的红外辐射强度相同, 太阳光以平行光入射;
- 一天中太阳赤纬保持不变;
- 地球是一圆球体, 地球半径 R_e 为 6370 km;
- 地球的阴影为一圆柱体, 其半径等于地球半径.

地球的极轴与黄道面不是垂直相交, 而是呈 66.5° 角, 且角度在公转中始终维持不变, 如图 1 所示^[3], 日地中心的连线与赤道面间的夹角每天均处在变化中, 此夹角即为太阳赤纬 δ .

采用精度较高的 VSOP87 理论^[4], 考虑章动影响, 计算某时刻太阳的赤纬 δ 、赤经 Θ 和日地距离 D , 得到太阳和地球的相对位置关系, 如图 2 所示, 图中坐标系 X 轴所在的经圈为 0° 经圈, Z 轴为地轴, Y 轴垂直于 ZOY 平面.

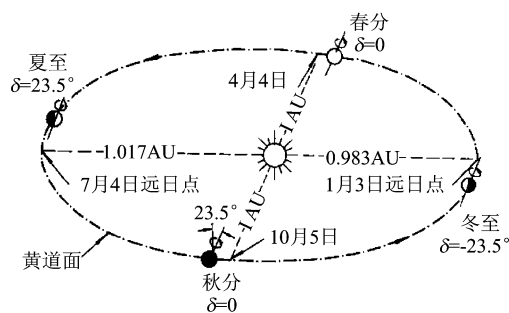


图 1 地球绕太阳运行轨迹
Fig. 1 The earth moves around the sun

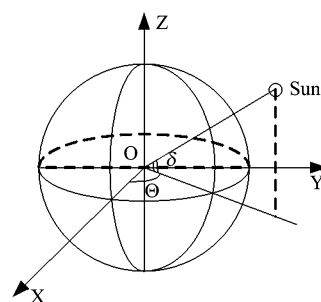


图 2 地球和太阳的相对位置
Fig. 2 The relative position of the earth and the sun

设 t 时刻日地距离为 D_t , 日地平均距离为 D_0 , 则此时地球大气层上空的太阳辐照 S_t 为:

$$S_t = S_0 \times D_0^2 / D_t^2 \quad (1)$$

式中 S_0 为太阳常数.

1.2 地球与卫星的相对位置模型

卫星的轨道参数有: 轨道倾角 i , 时角 h , 升交点时刻 t_0 , 轨道半径 R .

如图 3 所示, 建立两个坐标系: 地球本体坐标系 $XYZO$ (X 指向会日点, Z 垂直于赤道平面, Y 按右手定则) 和卫星本体坐标系 $xyzo$ (x 背离地心, y 指向飞行方向, z 按右手定则). ϕ 为卫星到会日点的地心角距 (此处约为时角 h). 由图中可以看出, 坐标系 $XYZO$ 和 $xyzo$ 之间有一个变换关系, $xyzo$ 坐标系相当于 $XYZO$ 坐标系先绕着 Z 轴逆时针旋转 ψ , 再绕 X 轴逆时针旋转 i , 再绕着 Z 轴逆时针旋转 $\phi - \psi$, 为此坐标系变换矩阵 M 为:

$$M = R_z(\psi) \cdot R_x(i) \cdot R_z(\phi - \psi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi - \psi) & -\sin(\phi - \psi) & 0 \\ \sin(\phi - \psi) & \cos(\phi - \psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

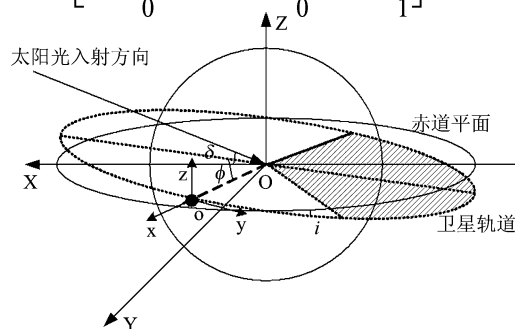


图 3 地球和静止卫星的相对位置
Fig. 3 The relative position of the Earth and the geostationary satellite

其中 $\phi = h, \psi = (t_0 - 12) \times \frac{\pi}{12}$.

1.3 卫星上的太阳辐射角系数和太阳辐射计算

设 t 时刻卫星上任一面元 Δs 在卫星本体坐标系上的外法线矢量方向余弦为 $n_i = (\cos\alpha_i, \cos\beta_i, \cos\gamma_i)$, 此时逆太阳入射光线在地球本体坐标系上的方向矢量为 $S = (\cos\delta, 0, \sin\delta)$, 结合上文提到的坐标系变换矩阵 M , 则面元 Δs 的太阳辐射角系数为 F_i :

$$F_i = M \cdot n_i \cdot S = M \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \cos\beta_i \\ \cos\gamma_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\delta \\ 0 \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

当 $F_i < 0$ 时表示太阳从背面射向面元, 即此时面元不受太阳照射, 故有 $F_i = 0$. 由于在春秋分的附近几天内, 卫星在午夜时可能进入地影, 此时面元受地球遮挡无法接收太阳照射, 故此时也有 $F_i = 0$.

面元 Δs 所受的太阳辐射为 Q_i :

$$Q_i = S_i \cdot F_i \cdot \Delta s \quad (4)$$

对于大气垂直探测仪来说, 它的扫描镜部分一直对着地球, 故其外法线矢量方向余弦为 $n_{1st} = (-\cos(\frac{1}{4}\pi + \alpha), -\sin(\frac{1}{4}\pi + \alpha), 0)$, 其中 α 为第一块扫描镜的摆角.

1.4 进、出地影角计算

地球的地影如图 4 所示^[5], 当太阳光与卫星轨道平面的夹角 i_θ 在 $0 \sim 90^\circ$ 时地球阴影在卫星轨道上的投影为半个椭圆, 椭圆的半短轴为地球半径 R_e , 半长轴为 $R_e/\sin i_\theta$. 可以看出, 卫星轨道进入阴影的条件是 $R < R_e/\sin i_\theta$.

$$\text{由 } \begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ \frac{x^2}{(R_e/\sin i_\theta)^2} + \frac{y^2}{R_e^2} = 1 \end{cases} \text{ 可以解出进、出地影}$$

角 v_{in}, v_{out} 为:

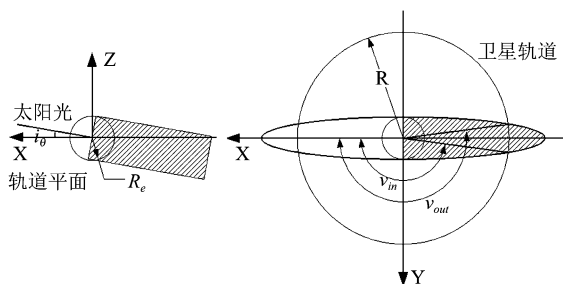


图 4 地影在卫星轨道面的投影
Fig. 4 The projection of the earth's shadow onto orbit-plane

$$\begin{cases} v_{in} = \pi - \arctan\left(\sqrt{\frac{R_e^2 - R^2 \sin^2 i_\theta}{R^2 - R_e^2}}\right) \\ v_{out} = \pi + \arctan\left(\sqrt{\frac{R_e^2 - R^2 \sin^2 i_\theta}{R^2 - R_e^2}}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

其中 $i_\theta = \delta - i$.

1.5 考虑遮光罩的光照模型

为了计算太阳光在扫描镜中的入侵光斑轨迹, 还得结合遮光罩的形状考虑光线的遮挡. 设大气垂直探测仪的视场角为 ξ .

在不考虑反射的情况下, 如图 5 所示, 太阳在一定的入射范围内对大气垂直探测仪的扫描镜照射部分标示为阴影区域, 当太阳入射方向改变时, 它会随着遮光罩和地球的遮挡而改变范围. 只有当太阳光的入射角 ρ 满足 $\rho_2 < \rho < \rho_1$ 时, 才有可能入侵到二维扫描系统中 (ρ_1, ρ_2 由遮光罩的尺寸和日、地、卫三者位置关系决定). 受照范围也由遮光罩的尺寸和镜面安装位置尺寸决定.

将太阳光按东西、南北方向进行分解, 则在南北方向上的太阳入射角即为太阳光与卫星轨道平面的夹角 i_θ , 在东西方向上的太阳入射角即为 $|\pi - \phi|$, 只有当南北方向入射角满足 $0 \leq \rho < \rho_1$ 时, 东西方向的入射角满足 $\rho_2 < \rho < \rho_1$ 时, 太阳才能入射到扫描镜上, 以上考虑的是卫星轨道处在有地影区域中时. 对于东西方向来说, 太阳高度角的变化造成了相对地球半径的不断变化, 如图 6 所示. 阴影部分即为太阳高度角为 i_θ 时, 一个相对地球直径 d' 有:

$$d' = 2 \times \sqrt{R_e^2 - R^2 \sin^2 i_\theta}, \quad (6)$$

此时 ρ_2 的大小跟进出地影角有关.

当卫星轨道不在有地影区域时, 只有当南北方向的入射角满足 $\rho_2 < \rho < \rho_1$, 东西方向入射角满足 $0 \leq \rho < \rho_1$ 时, 太阳才可能入射到扫描镜上.

由上可知, 如果要避免太阳光入侵造成仪器的损毁, 可以从遮光罩入手, 在不影响仪器视场角的情况下, 尽量减少 ρ_1, ρ_2 之间的差距, 使太阳入侵的持续时间缩短和光斑范围减小. 尤其当太阳入侵时, 由

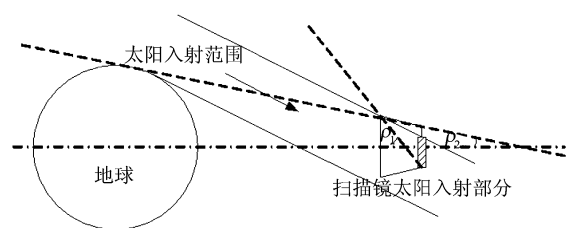


图 5 太阳入射扫描镜区域
Fig. 5 The solar intrusion of scanning mirror

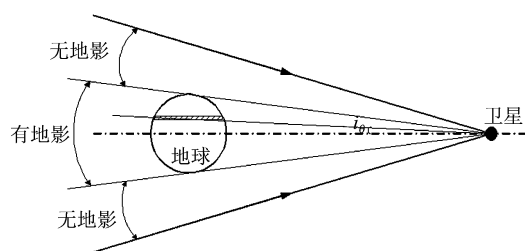


图6 相对地球直径

Fig. 6 The relative diameter of the earth

于太阳辐射相对于地球自身的辐射要大得多,这时候仪器所获得的图像基本上不可用,可以考虑将遮光罩收起,关闭仪器,确保仪器不受损伤.

2 仿真结果和分析

在 Matlab 的环境下编制程序,实现上述计算,模拟卫星的在轨情况.假设卫星在东经 105° 上空,由于 FY-4 还没发射,为了与相似卫星的实测数据作比较,需要假设其在轨运行情况.现以 1995 年 6 月 21 号为例,得到考虑遮光罩时第一块扫描镜面上单位面元一天内的太阳辐射角系数日变化曲线.由于扫描镜成 45° 扫描,则它在卫星本体坐标系中的外法线矢量方向余弦为: $n_{1st} = (-\cos(\frac{1}{4}\pi + \alpha), -\sin(\frac{1}{4}\pi + \alpha), 0)$,其中 α 为第一块扫描镜的摆角,设此时 $\alpha = 0$,此时如图 7(a) 中蓝线所示,可以看出只有在北京时间 21 点 20 分左右至午夜 3 点 05 分左右才有太阳入侵问题.

考虑地影的时候,以 1995 年 3 月 20 日为例,得到考虑遮光罩时第一块扫描镜面上单位面元一天内的太阳辐射角系数日变化曲线.如图 7(a) 中红线所示,可以看出同 6 月 21 日一样,在北京时间 21 点 20 分左右至午夜 3 点 05 分左右有太阳入侵问题,但是在 0 点 26 分至 1 点 34 分之间时,由于卫星处于地影位置,受不到太阳的照射.图 7(a) 为考虑遮光罩遮挡情形,图 7(b) 为不加遮光罩时情形.

考虑到遮光罩的形状参数,太阳光即便入射到第一块扫描镜上,受照面积也会随时间而改变,如图 8 所示,为第一块扫描镜分别在 1995 年 3 月 20 日和 1995 年 6 月 21 日的受照面积日变化曲线,图 9 为相应的所接受的太阳辐射变化情况.

由于 FY-4 和 GOSE-8 都是地球静止卫星,而且都采用三轴稳定方式,虽然二者的仪器结构参数不同,具体的数据不可能相同,但是二者的变化趋势应该相近,由于温度变化受内能影响,而太阳辐射又会

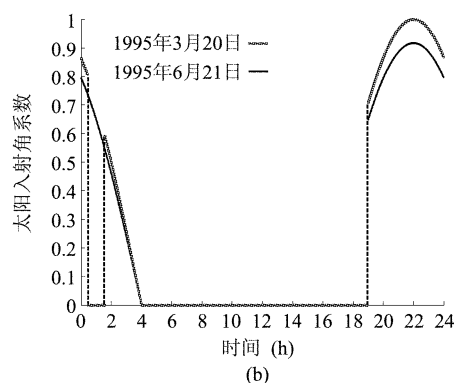
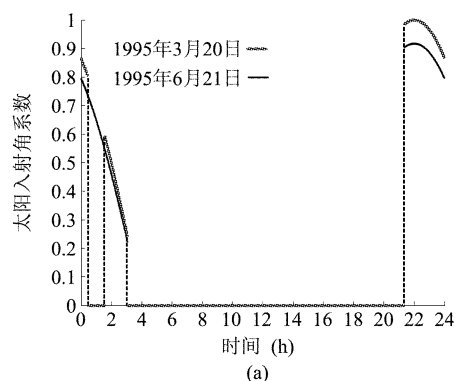


图7 第一块扫描镜太阳光入射角系数日变化曲线 (a) 考虑遮光罩 (b) 不考虑遮光罩

Fig. 7 the daily change of the solar incidence angle of the first scanning mirror (a) with baffle (b) without baffle

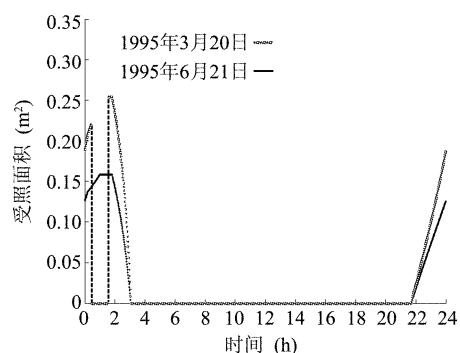


图8 第一块扫描镜受照面积日变化曲线

Fig. 8 The daily change of the exposed area of the first scanning mirror

造成内能的变化,温度的变化又直接导致形变,故受到的太阳辐射量可以一定程度上反映温度的变化和形变情况,图 10 为 GOES-8 的扫描镜面在一天内的镜面变形随时间变化情况^[6].在夜间 20 点左右由于受到太阳光的直接照射,导致镜面形变逐渐增大,而后随着太阳辐射的减少,形变也逐渐减少,凌晨 2 点左右降到最低点,对比图 9 和图 10,可知两者由于所处经度和时区不同,在时间坐标轴上相差 2 个小时左右,但总体变化趋势相同.

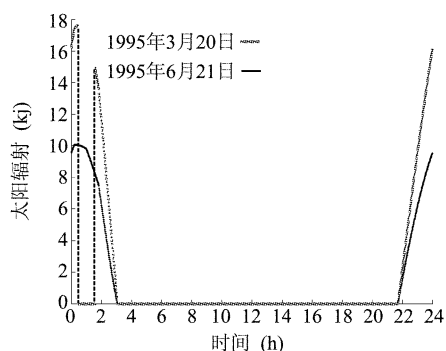


图9 第一块扫描镜受到的太阳辐射日变化曲线
Fig.9 The daily change of the solar radiation energy of the first scanning mirror

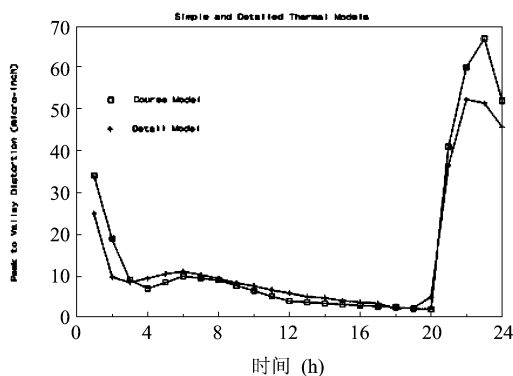


图10 GOES 扫描镜面变形一天内随时间变化
Fig.10 The distortions of the GOES-8 scan mirror as a function of time

图11为1995年1年内第一块扫描镜每日所受的总太阳辐射变化情况,与图12中GOES-8的扫描辐射计扫描镜的每日最高温度变化情况^[7]相比较,由两图对比可知总体变化趋势相似,认为模拟计算可以较为逼真的仿真仪器的在轨受照情况。

从图7左右两侧图像对比可知,由于遮光罩的遮挡,使得太阳入侵时间急剧减少,但是不能完全避免太阳入侵现象,需要进一步的分析解决。

3 结束语

本文针对FY-4三轴稳定静止卫星夜间太阳入侵问题,采用了精度较高的VSOP87算法和坐标系相对变换矩阵,计算了日、地、卫三者的相对位置关系以及星上任意面元的太阳入射角系数和太阳辐射,并对其上的大气垂直探测仪扫描镜结合实际设计时的遮光罩,分析了太阳入射角系数、太阳辐射、太阳入侵的时刻、入侵持续时间,并跟实测数据对比,验证了计算的合理性和正确性。

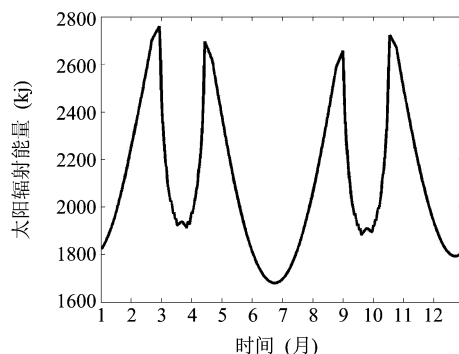


图11 1995年第一块扫描镜每日受到太阳辐射总量的年变化曲线
Fig.11 The change of the daily solar radiation energy of the first scanning mirror in 1995

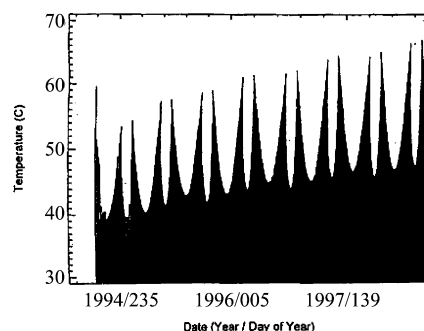


图12 GOES-8扫描辐射计扫描镜每日最高温度变化曲线
Fig.12 Maximum temperature of the GOES-8 Imager's scan mirror as a function of time

REFERENCES

- [1] LIAO Guo-Nan. *An introduction to atmospheric radiation: 2nd edition* [M]. China Meteorological Press((美)廖国男著,郭彩丽,周诗健译.大气辐射导论:第2版.气象出版社),2004,10.
- [2] YOU Si-Liang, WANG Gan-Quan, CHEN Gui-Lin. Mid-night Solar Intrusion Simulation of Imager in FY-4 Satellite Based on Matlab [J]. *Aerospace Shanghai* (游思梁,王淦泉,陈桂林.基于Matlab的FY-4星载扫描辐射计午夜太阳入侵模拟.上海航天),2006,5:46-49.
- [3] WANG Bing-Zhong. Calculation of solar radiation [J]. *Solar Energy* (王炳忠.太阳辐射计算讲座.太阳能),1999(2),8-10.
- [4] Ibrahim Reda, Afshin Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications [J]. *Solar Energy*, 2004, 76(5):577-589.
- [5] DENG Gui-Jun, WU Ke-Yong. Calculation on Space External Thermal Flow of Sun for Space Camera in Sun Synchronous Round Orbit [J]. *Optics and Precision Engineering* (邓桂俊,吴克用.太阳同步圆形轨道空间相机太阳辐射外热流的计算.光学精密工程),1997.12,5(6):107-112.
- [6] Zurmehly G E, Hookman R A. Thermal and structural analysis of the GOES scan mirror's on-orbit performance [J]. *SPIE Analysis of Optical Structures*, 1991 (1532): 170-176.

[7] James C Bremer, Jeanette G Baucom, Hung Vu, *et al.* Estimation of long-term throughput degradation of GOES 8&9

visible channels by statistical analysis of star measurements [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3439**(145):145-154.

(上接 408 页)

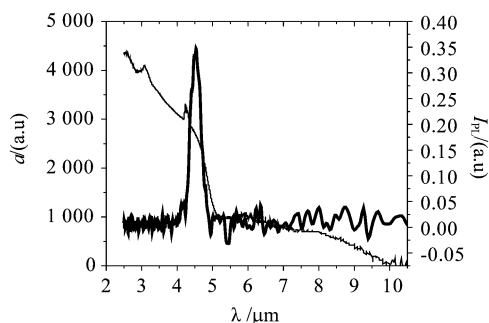


图5 InAs/GaSb 超晶格材料的 PL 谱和吸收光谱
Fig.5 PL spectrum and absorption spectrum of the SL samples

采用衬底温度 450℃ 和最优的界面结构条件, 生长了 400 周期的 InAs/GaSb (9ML/12ML) 超晶格材料, 获得吸收光谱曲线在图 5 中以细线表示. 图 5 中粗线是 PL 谱曲线, 测试的样品是 100 周期 InAs/GaSb (9 ML/12 ML) 超晶格材料, 样品测试温度均为 77 K. 可以看出, PL 谱峰值波长在 4.55 μm , 吸收光谱 50% 截止波长大约在 4.84 μm , 与 PL 谱基本一致.

3 结论

在 GaSb 衬底上分子束外延中波 InAs/GaSb (9

ML/12 ML) 超晶格材料, 最优生长温度为 450℃ 时, 生长的外延材料表面平整, 粗糙度最小可达 1Å. DCXRD 结果显示通过改变界面层来调整衬底和外延材料的失配, 而且四级以上卫星峰的双晶半峰宽均小于 35 弧秒, 超晶格晶体质量完好. 吸收光谱测试表明样品 50% 吸收截止波长在 4.85 μm .

REFERENCES

- [1] Sa-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**:651-653.
- [2] Smith D L, Maihiot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**:2545-2548.
- [3] Johnson J L, Samoska L A, Gossard A C, *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**:1116-1127.
- [4] Razeghi M, Wei Y, Bae J, *et al.* Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs [J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2003, **5246**:501-511.
- [5] Rogalski A. Material consideration for third generation infrared photon detectors [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2007, **50**:240-252.
- [6] Bracker A S, Yang M J, Bennett BR, *et al.* Surface reconstruction phase diagrams for InAs, AlSb, and GaSb [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, **220**:384-392.

(上接 411 页)

片进行研究, 发现光敏芯片表面明显损伤和键压过程可能引入损伤或虚焊是部分无效像元产生的原因; 同时, 光敏芯片侧面钝化膜未能实现台阶边缘的有效覆盖, 从而导致光敏芯片 PN 损伤是部分信号过大无效像元产生的原因. 通过改进光敏芯片结构设计和优化钝化膜设计与工艺, 实现了近红外 256 × 1 元 InGaAs 焦平面探测器的有效像元达到了 100%.

REFERENCES

- [1] Battaglia J, Blessinger M, Enriquez M, *et al.* An uncooled 1280 × 1024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging [C]. *SPIE*, 2009, **7298**:72983C-1.
- [2] Devon G T, Timothy C B, Peter D, *et al.* The Development of, and Applications for, Extended Response (0.7 to 1.7 μm) InGaAs Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2008, **6940**:

694037-1.

- [3] LV Yan-Qiu, HAN Bing, BAI Yun, *et al.* 256 element InGaAs linear IR focal plane array and scanning image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吕衍秋, 韩冰, 白云, 等. 256 元 InGaAs 线性红外焦平面及扫描成像. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**:7-11.
- [4] CHEN Da-Chuan, LIU Chan-Lao, ZHEN Yang-Guang. Algorithm of Blind Pixels Auto-searching and Compensation for IRFPA [J]. *LASER & INFRARED* (陈大川, 刘缠牢, 郑阳光. 红外焦平面阵列盲元检测及补偿算法. *激光与红外*), 2008, **38**(12):1215-1217.
- [5] MU Hong-Shan, DONG Suo, LIANG Jin-Zhi. Study of Dead Pixels in InSb IRFPA Detector [J]. *INFRARED* (牟宏山, 董倾, 梁进智. 碲化铟红外焦平面探测器盲元失效问题的研究. *红外*), 2010, **31**(7):9-13.
- [6] QU Hui-Ming, CHEN Qian, GU Guo-Hua, *et al.* Test System for Measuring Characteristic Parameters of IRFPA [J]. *Laser & Infrared* (屈惠明, 陈钱, 顾国华, 等. 红外焦平面阵列性能参数测试系统. *激光与红外*), 2006, **36**(10):950-952.