

南极大型天文望远镜主镜膜层防霜方法

王晋峰^{1,2}, 王烨儒^{1,3}, 田 杰^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 我国将在南极建设 2.5 m 光学红外望远镜 KDUST, 为了解决镜面结霜问题, 提出了氧化铟锡(ITO)薄膜加热的防霜方法。利用该方法, 密封透射结构的南极巡天望远镜(AST)已经成功地应用于南极冰穹 A。讨论了 ITO 薄膜集成于反射膜系用于防霜的可行性、防霜反射镜的制备工艺以及防霜反射镜在不同加热功率下的面形变化情况。实验结果表明, 集成了 ITO 薄膜的反射镜具有防霜功能且对镜面面形的影响较小, 有望应用于南极大型反射式望远镜系统中。

关键词 薄膜; 防霜反射镜; 氧化铟锡薄膜; 南极 2.5 m 光学红外望远镜

中图分类号 O484;P111.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0431002

Anti-Frosting Method for Primary Mirror Film Coating of Large Astronomical Telescope in Antarctica

Wang Jinfeng^{1,2}, Wang Yeru^{1,3}, Tian Jie^{1,2}

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The 2.5-m optical infrared telescope KDUST will be built in Antarctica by our country. In order to solve the problem of mirror frosting, the anti-frosting method by heating the indium tin oxide (ITO) film is proposed. With this method, the Antarctic Survey Telescope (AST) with sealed transmission structure has successfully been applied at the Antarctic Dome A. The anti-frosting feasibility of ITO thin films integrated in the reflecting film system, the preparation process and the surface shape variation of the anti-frosting reflector at different heating powers are discussed. The experimental results show that the ITO thin film integrated reflector has anti-frosting ability and little influence on the shape of the reflector surface, which can be applied to the large telescope system with reflection configuration in Antarctica.

Key words thin films; anti-frosting reflector; indium tin oxide film; Antarctic 2.5-m optical infrared telescope

OCIS codes 310.6845; 310.4165; 310.7005

1 引 言

2009 年 2 月, 中国南极昆仑站在南极内陆冰盖的最高点冰穹 A 地区建站。南极冰穹 A(Dome A)是地球上最好的天文观测地点之一^[1-2], 其优点主要包括: 大气视宁度极佳, 人工光源干扰最少, 天空视角最大, 大气稀薄、干燥、尘埃少, 可连续 3~4 个月无间断观测^[3], 且热红外波段的背景天光只有非极地台址的 1/50~1/100。南极台址为亚毫米波段天文观测打开了许多新的频率窗口。

收稿日期: 2016-10-28; **收到修改稿日期:** 2016-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(11103049)

作者简介: 王晋峰(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大口径光学元件镀膜、特种光学薄膜方面的研究。

E-mail: jfwang@niaot.ac.cn

2011年初,中国南极天文台正式建台。2012年南极巡天望远镜(AST3)运抵南极 Dome A,正式开始用于观测^[4-5]。已列入国家重大科技基础设施建设中长期规划主干设备的南极 2.5 m 光学红外望远镜 KDUST 的主镜口径达 2.5 m,工作波段为 0.4~2.5 μm ,视场可达 1.5°,可用于研究暗能量、暗物质和搜寻系外行星^[6]。

南极 2.5 m 光学红外望远镜的分辨本领接近空间望远镜水平,特别是在热红外波段,其灵敏度远远超过哈勃空间望远镜(HST)的。南极 2.5 m 光学红外望远镜的视场比 6 m 詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)的大很多,它的建成将为我国天文学家对下一代空间和地面超大望远镜的研究及国际合作提供必要的条件。但是,南极的极端环境条件使其在研制及运行中面临巨大的挑战。镜面结霜问题就是南极天文仪器面临的一个必须克服的难题。虽然南极 Dome A 是全球水汽含量最低的地区,但是其相对湿度却常常达到饱和状态,镜面温度比环境温度低时将会结霜^[7-8]。镜面上凝结的冰霜不仅降低了膜层的使用寿命,还严重影响望远镜的科学观测。因此,克服镜面防霜问题非常重要。

2 氧化铟锡防霜反射膜系的设计与制备

由南京天文光学技术研究所研制的南极小望远镜阵(CSTAR)^[9]与 AST3 已成功安装至南极 Dome A,并正式开始用于观测。CSTAR 与 AST3 为密封式结构设计,属于透射式望远镜,使用氧化铟锡(ITO)膜层,通过控制膜层表面温度略高于环境温度来达到防霜的效果^[10]。ITO 薄膜在可见光与近红外波段具有较高的透射率,而在红外波段具有很强的吸收率,如图 1 所示。南极 2.5 m 光学红外望远镜工作波段为 0.4~2.5 μm ,若采用密封式结构设计方案,如此大口径的密封窗口材料几乎无法获得,而若采用开放的反射结构,则会造成包括主镜在内的多块反射镜直接暴露于极端低温环境下。南极 2.5 m 光学红外望远镜光路如图 2 所示,暴露于外部环境的反射镜有 4 块,分别为主镜、副镜、中继镜与转折镜 1,因此至少这 4 块反射镜会遇到镜面结霜的问题。图 3 为南极 2.5 m 望远镜效果图。

为了解决极端低温环境下地面光学望远镜反射镜的结霜问题,本文提出了包含 ITO 膜层的反射膜系方案。

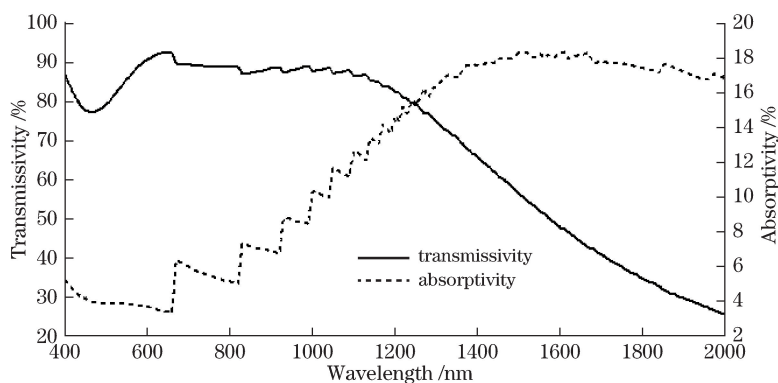


图 1 ITO 薄膜在可见光与红外波段的透射率与吸收率曲线

Fig. 1 Transmissivity and absorptivity of ITO film in visible and infrared wavebands

2.1 ITO 薄膜防霜原理

对镀制有 ITO 薄膜与电极的镜面适当通电加热,可使镜面温度略高于环境温度,破坏结霜条件,从而达到防霜效果。实践证明,当温差控制在 2 °C 左右时^[11-12],既可实现防霜,又能显著减少温差造成的空气对流,从而保证成像质量。因此,调节 ITO 薄膜的发热功率,使镜面平均温度比环境温度高约 2 °C。图 4 为防霜反射镜结构示意图。

2.2 ITO 防霜反射膜系的设计

包含有 ITO 层的反射膜系设计方案主要有两种。

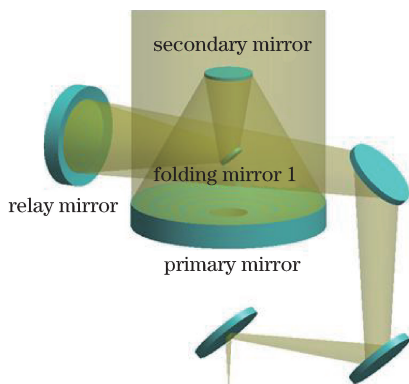


图 2 南极 2.5 m 望远镜光路图

Fig. 2 Optical path of 2.5-m telescope in Antarctica

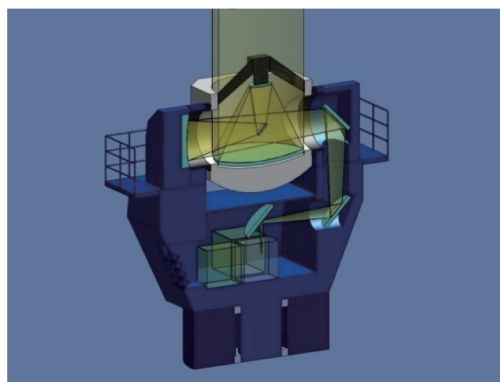


图 3 南极 2.5 m 望远镜效果图

Fig. 3 Effect drawing of 2.5-m telescope in Antarctica

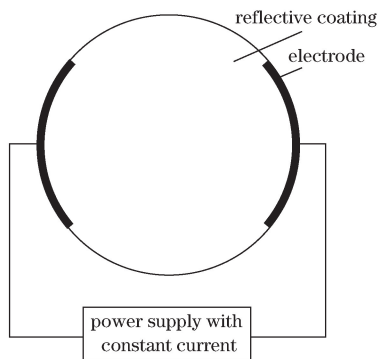


图 4 防霜反射镜结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of anti-frosting reflector

方案 I: 导电膜堆位于底层, 如图 5(a) 所示, 从基板开始膜层依次为导电膜堆、绝缘层、反射膜堆, 电极直接与导电膜堆连接且不能接触反射膜堆。该方案的优点是反射效率不受 ITO 层的影响, 缺点是成膜工装过程较为复杂。膜系结构为 substrate/ITO(180 nm)/insulating layer/Al(100 nm)/SiO₂(89 nm)/TiO₂(56 nm)。

方案 II: 反射膜堆位于底层, 如图 5(b) 所示, 从基板开始膜层依次为反射膜堆、透明导电膜, 其中透明导电膜属于反射膜系中的一层, 位于反射膜系的最外层, 电极直接与导电膜连接。该方案的优点是成膜过程简单, 缺点是反射率受到影响, ITO 层在红外波段吸收严重。膜系结构为 substrate/Al(100 nm)/SiO₂(89 nm)/TiO₂(56 nm)/ITO(180 nm)。

图 6 为两种防霜反射膜系对应的反射率曲线。

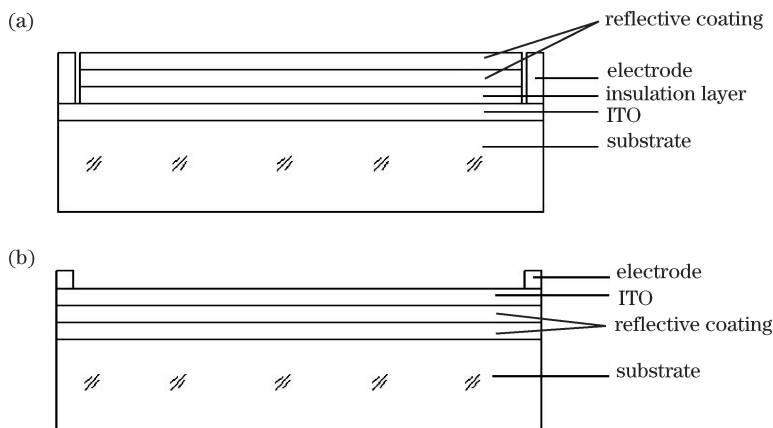


图 5 防霜反射膜系的两种方案。(a) 方案 I; (b) 方案 II

Fig. 5 Two anti-frosting schemes of reflecting film system. (a) Scheme I; (b) scheme II

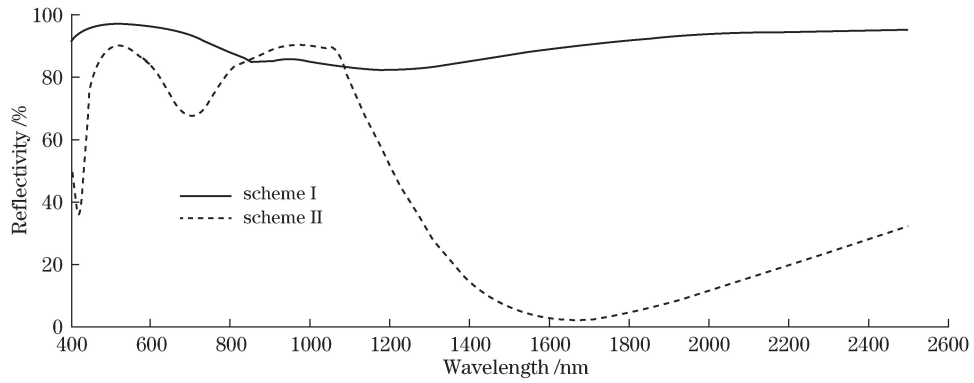


图 6 两种防霜反射膜系的反射率曲线

Fig. 6 Reflection curves of two anti-frosting reflecting film systems

2.3 ITO 防霜反射膜系的制备

利用北京北仪创新真空技术有限公司生产的 ZZSX1600 电子束蒸发设备进行膜系制备,金属膜采用电阻加热蒸发方式获得,氧化物保护膜及 ITO 薄膜采用离子辅助电子束蒸发方式获得^[13-18],设备本底真空度低于 6×10^{-4} Pa。

实验中使用一块口径为 520 mm 的高精度球面镜,镀制防霜膜系后的面形峰谷(PV)值为 0.11724λ ,均方根(RMS)为 0.0155λ (波长 $\lambda = 632.8$ nm),如图 7 所示。为了在实现防霜功能的同时不影响膜系的光谱反射性能,实验采用了方案 I,膜系反射率测试曲线如图 8 所示。

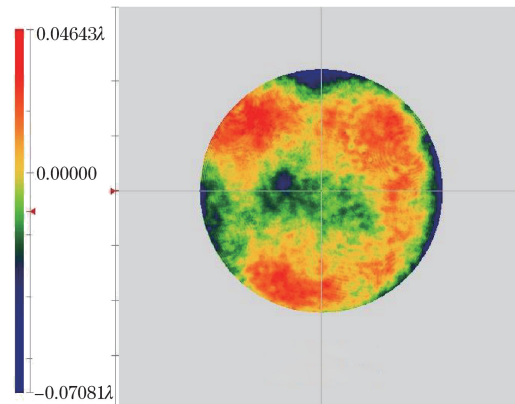


图 7 口径为 520 mm 的高精度防霜球面镜面形

Fig. 7 Surface shape of high precision anti-frosting spherical mirror with diameter of 520 mm

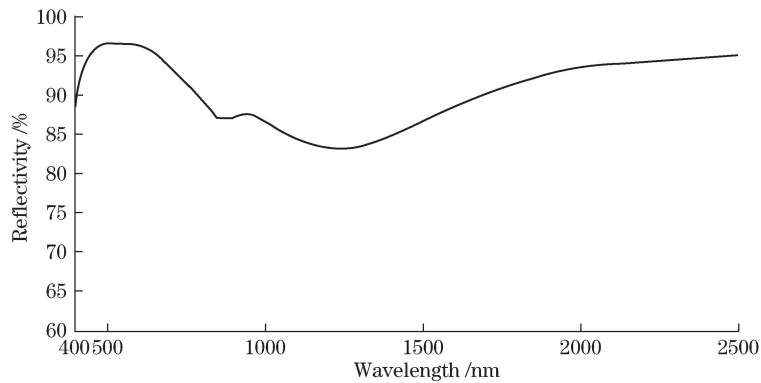


图 8 方案 I 中膜系的防霜反射镜实测反射率曲线

Fig. 8 Measured reflection curve of anti-frosting reflector of film system in scheme I

3 520 mm 口径高精度球面防霜反射镜测试

3.1 520 mm 口径防霜反射镜实验测试

测试镀有防霜反射膜系的 520 mm 口径球面镜时,在电极两端连接恒流电源,在不同加热(防霜)功率下采用美国 4D 公司生产的 PhaseCam4020 干涉仪测量表面面形,了解反射镜面形变化情况,同时使用美国 Fluke 公司生产的 Ti55 红外热像仪测量镜片表面温度分布情况,实验结果如下。

1) 加热功率为 10 W,保持 3 h 后采用 4D 干涉仪测试面形,PV 值为 0.18132λ ,RMS 值为 0.0222λ ;红外热像仪测得镜面中心温度为 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度为 $8.13\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 9 所示。

2) 加热功率为 20 W,保持 3 h 后采用 4D 干涉仪测试面形,PV 值为 0.20660λ ,RMS 值为 0.0267λ ;测得镜面中心温度为 $8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度为 $7.69\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 10 所示。

3) 加热功率为 30 W,保持 9 h 后采用 4D 干涉仪测试面形,PV 值为 0.24878λ ,RMS 值为 0.0289λ ,测得镜面中心温度为 $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度为 $7.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图 11 所示。

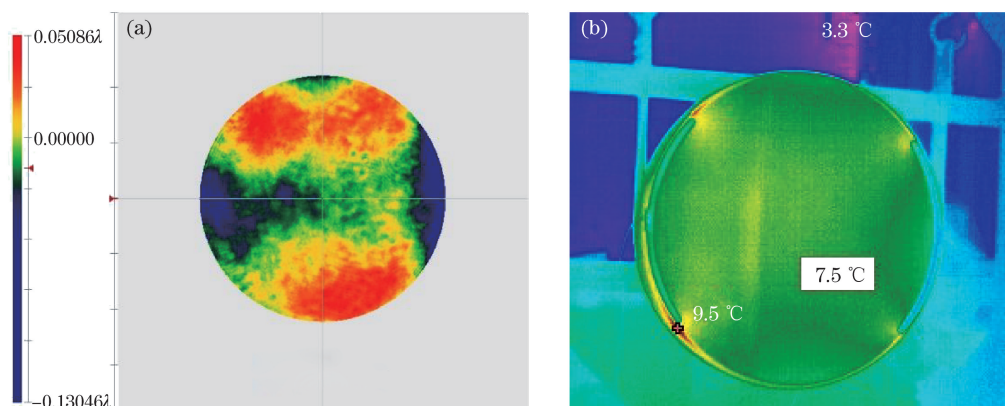


图 9 在功率 10 W 下加热 3 h 后镜片(a)面形及(b)温度分布图

Fig. 9 (a) Surface shape and (b) temperature distributions of reflector after heating at power of 10 W for 3 h

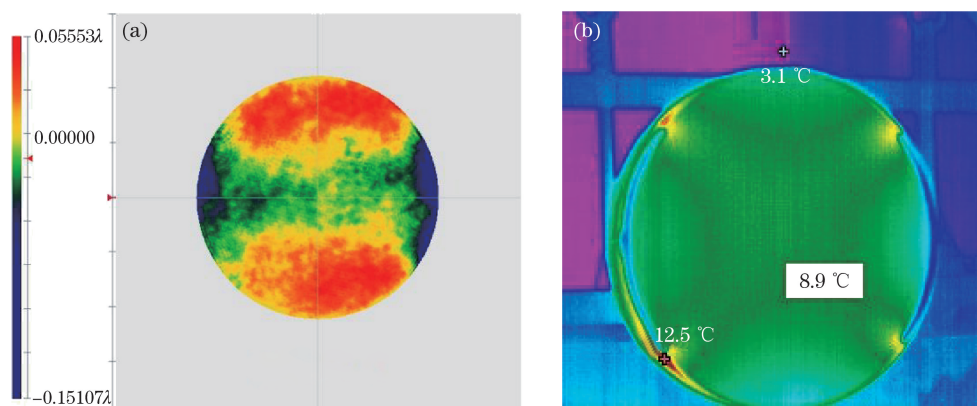


图 10 在功率 20 W 下加热 3 h 后镜片(a)面形分布图及(b)温度分布图

Fig. 10 (a) Surface shape and (b) temperature distributions of reflector after heating at power of 20 W for 3 h

3.2 520 mm 口径防霜反射镜实验结果分析

根据结霜条件以及镜面温升情况可知,520 mm 口径的球面反射镜所需防霜功率为 20 W 左右,此时,面形由 PV 值 0.11724λ 、RMS 值 0.0155λ 变为 PV 值 0.20660λ 、RMS 值 0.0267λ ;当加热功率为 30 W 时,球面反射镜仍然可以保持较好的面形,PV 值为 0.24878λ ,RMS 值为 0.0289λ 。随着加热功率的增加,防霜反射镜面形虽有所恶化,但仍在可接受范围内。

实验证明,防霜反射镜面形对镜面温度变化比较敏感,因此,提高镜面温度分布均匀性,采取优化电极排布、优化 ITO 膜层面电阻分布等措施,可进一步改善防霜反射镜面形。此外,实验中两条铜电极的 4 个端点温升最高,是电极附近电流产生的热效应所致。

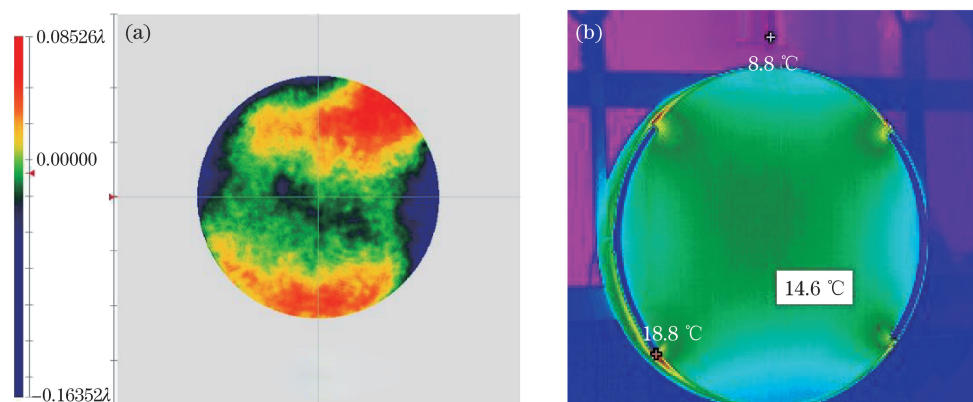


图 11 在功率 30 W 下加热 9 h 后 (a) 镜片面形分布图及 (b) 镜片温度分布图

Fig. 11 (a) Surface shape and (b) temperature distributions of reflector after heating at power of 30 W for 9 h

4 结 论

集成有 ITO 透明导电薄膜的防霜反射镜, 在加热工作状态下, 镜面面形受影响较小, 有望应用于南极或极寒地区反射式望远镜系统中。在此基础上, 如能优化防霜反射膜系电极与加热均匀性、深入研究防霜状态对整个反射式光学系统成像的影响等问题, 将对更大口径的防霜镜面的应用发挥更大指导作用。

参 考 文 献

- [1] Masciadri E, Lascaux F, Turchi A, *et al.* Optical turbulence: Site selection above the internal Antarctic plateau with a mesoscale model[C]. SPIE, 2010, 7733: 77334F.
- [2] Pei C, Chen H L, Yuan X Y, *et al.* Development of automated small telescopes as Dome A site testing DIMM[C]. SPIE, 2010, 7733: 77334W.
- [3] Lu Haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan. Infrared background radiation removing design and simulation of Antarctic survey telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1122002.
卢海平, 袁祥岩, 张凯元. 南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122002.
- [4] Cui X Q, Yuan X Y, Gong X F. Antarctic Schmidt telescopes (AST3) for Dome A[C]. SPIE, 2008, 7012: 70122D.
- [5] Yuan X Y, Cui X Q, Gu B Z, *et al.* The AST3 project: Antarctic survey telescopes for Dome A[C]. SPIE, 2014, 9145: 91450F.
- [6] Zhu Y T, Wang L F, Yuan X Y, *et al.* Kunlun dark universe survey telescope[C]. SPIE, 2014, 9145: 91450E.
- [7] Wang Jieteng. Theoretical and experimental study on frosting phenomenon on the cold surface[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
王皆腾. 冷表面上结霜现象的理论及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [8] Liu Zhongliang, Huang Lingyan, Gou Yujun, *et al.* A review on frost formation and anti-frosting technology[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 1-13.
刘中良, 黄玲艳, 勾昱君, 等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 1-13.
- [9] Yuan X Y, Cui X Q, Liu G R, *et al.* Chinese small telescope array (CSTAR) for Antarctic Dome A[C]. SPIE, 2008, 7012: 70124G.
- [10] Zhao J L, Wang D X, Yuan X Y, *et al.* The design of mirror's temperature control system of three Antarctic Schmidt telescopes[C]. SPIE, 2010, 7658: 765815.
- [11] Zhang K Y, Li Z Y, Yuan X Y, *et al.* Mirror seeing of the Antarctic survey telescope[J]. Advances in Polar Science, 2014, 25(3): 133-137.
- [12] Yuan X Y, Cui X Q, Gong X F, *et al.* Progress of Antarctic Schmidt telescopes (AST3) for Dome A[C]. SPIE, 2010, 7733: 77331V.
- [13] Bae J W, Kim J S, Yeom G Y. Indium-tin-oxide thin film deposited by a dual ion beam assisted e-beam evaporation system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001, 178(1-4): 311-314.
- [14] Meng L J, Gao J S, Silva R A, *et al.* Effect of the oxygen flow on the properties of ITO thin films deposited by ion beam assisted deposition (IBAD)[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(16): 5454-5459.

-
- [15] Liu C, Mihara T, Matsutani T, *et al.* Preparation and characterization of indium tin oxide films formed by oxygen ion beam assisted deposition[J]. *Solid State Communications*, 2003, 126(9): 509-513.
- [16] Meng L J, Gao J S, dos Santos M P, *et al.* The effect of the ion beam energy on the properties of indium tin oxide thin films prepared by ion beam assisted deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(7): 1365-1369.
- [17] Liu C, Matsutani T, Asanuma T, *et al.* Structural, electrical and optical properties of indium tin oxide films prepared by low-energy oxygen-ion-beam assisted deposition[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2003, 206: 348-352.
- [18] Kim D, Kim S. Effect of ion beam energy on the electrical, optical, and structural properties of indium tin oxide thin films prepared by direct metal ion beam deposition technique[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 408(1-2): 218-222.