

文章编号: 0253-2239(2005)12-1682-5

高精度纯相位液晶空间光调制器的研究*

刘永军^{1,2} 宣丽¹ 胡立发¹ 曹召良¹ 李大禹¹ 穆全全¹ 鲁兴海¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研制了平行排列液晶空间光调制器(LC SLM)。论述了平行排列液晶相位调制的理论,进行了计算模拟。对液晶空间光调制器相位调制特性和振幅调制特性进行了测量,实验结果表明,在整个灰度级范围内是纯相位调制的空间光调制器,并且调制的范围可达到 0.6λ 。在 ZYGO 菲佐干涉仪上进行了精度特性的研究,得到了非常好的结果,在 1 cm^2 的面积上,进行了畸变波前的调制,其精度峰谷值可达 0.098λ ,均方根值可达 0.017λ 。在此精度的基础上产生了 π 相位差的栅结构,证明了这种液晶空间光调制器可以很好的进行相位调制。

关键词: 光学器件; 空间光调制器; 液晶; 平行排列; 纯相位

中图分类号: O753; O436 文献标识码: A

Investigation on the Liquid Crystal Spatial Light Modulator with High Precision and Pure Phase

Liu Yongjun^{1,2} Xuan Li¹ Hu Lifa¹ Cao Zhaoliang¹ Li Dayu¹

Mu Quanquan¹ Lu Xinghai¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A liquid crystal spatial light modulator (LC SLM) with parallel alignment TFT is prepared, the theory of which is also discussed. And properties of the modulation are theoretically calculated. Measurements are conducted on properties of the phase modulation and the amplitude modulation. The results indicate that it is a pure phase modulator in the range of the gray level. Its precision is measured on a ZYGO interferometer. The experiments show that on the area of $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ the peak to valley (PV) value is up to 0.098λ , RMS up to 0.017λ , and the depth of modulation up to 0.6λ after correction. A grating configuration with the phase differences of $\pi/2$ is accordingly generated, which shows that the phase of light can be modulated with it quite well.

Key words: optics devices; spatial light modulator; liquid crystal; parallel alignment; pure phase

1 引 言

空间光调制器广泛地应用于光逻辑运算、高速光互联、输入存储、输出显示等诸多应用领域^[1~3]。空间光调制器的种类很多,例如微通道板、可变形反射镜、磁光器件等五六十种。光学相位在光学信息处理系统、干涉和光互联中起着重要的作用,二维纯相位空间光调制器在光学信息处理方面起着更为重

要的作用,如光学相关联、光互连、相位比较技术等^[4]。液晶空间光调制器以制作简单,价格低,耗能低,易控制,易制成二维器件,且易构成并行光学信息处理器件等优点,倍受国内外研究学者的关注。但大多数的学者由于制作液晶屏条件的限制,仅研究扭曲型液晶电视作为相位型空间光调制器^[5~9]。这种液晶电视在相位调制的时候伴有振幅调

* 国家自然科学基金(50473040, 59973020, 60277033, 19974046)和吉林省科委基金(20020603, 20010579)资助课题。

作者简介: 刘永军(1977~),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事液晶物理以及液晶器件方面的研究。E-mail: liuyj@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2004-12-24; 收到修改稿日期: 2005-05-10

制^[5,6,10],在这种条件下通常解决的办法是利用整个驱动电压的一部分,使得在这一部分电压内保证振幅调制尽量的小^[5,8]。因此减少了相位调制的范围,且不是严格意义上的纯相位调制。

本文研制了平行排列、电寻址的二维阵列 TFT 型的液晶纯相位空间光调制器,从根本上解决了上述扭曲型液晶电视作为相位调制时的缺点,并对此液晶空间光调制器的光学特性进行了研究。

2 液晶相位调制理论与计算模拟

2.1 液晶相位调制的理论

向列相液晶呈细长棒状,极化率和电导率等有明显的各向异性。对于平行排列的液晶来说,在电场的作用下液晶分子易发生偏转^[11],不同的电场使液晶分子的倾斜角度不同,且沿盒厚方向不同位置处的液晶倾角也不同,如使入射光的偏振方向与液晶排列方向相同,就会引起此方向的有效折射率不同,进而影响了光束在液晶中的有效光程,因此可以通过给液晶施加电压的方法控制出射光的相位。

根据液晶连续弹性体理论,电场作用下液晶体系的吉布斯自由能可表示为^[12]

$$F = \frac{1}{2} \int_V \{ K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22} [\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]^2 + K_{33} [\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^2 - \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \} dv, \quad (1)$$

其中 K_{11}, K_{22}, K_{33} 分别是液晶分子的展曲弹性常量、扭曲弹性常量和弯曲弹性常量, $\mathbf{n}(x, y, z)$ 是液晶分子的指向矢, \mathbf{D}, \mathbf{E} 分别是电位移矢量和电场强度矢量。

由于我们研制的摩擦取向的液晶屏对液晶来说是强锚定,在这种情况下平行排列液晶的吉布斯自由能可写为^[13]

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 dz - \frac{1}{2\epsilon_0} \int_0^d \frac{D_z^2}{\epsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \theta} dz, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 是真空中介电常量, $\epsilon_{\perp}, \epsilon_{\parallel}$ 分别是垂直和平行液晶分子轴方向的介电常量, D_z 是 z 轴方向电位移矢量即是外部电场的方向,盒厚沿 z 轴方向, d 为液晶层厚度, θ 是液晶分子的倾角。

由(2)式可得沿 z 轴方向上某一位置与该位置处液晶倾角的关系为:

$$\left(\frac{dz}{d\theta} \right)^2 = \frac{K_{11} (1 + K \sin^2 \theta)}{C - D_z^2 / [\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta)]}, \quad (3)$$

其中

$$K = \frac{K_{33} - K_{11}}{K_{11}}, \quad r = \frac{\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\perp}},$$

$$C = \frac{D_z^2}{\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta_m)},$$

θ_m 是液晶分子的最大倾角,通过两边界层的边界条件解方程(3)就可以得到在给定的电压下液晶盒内部分子倾角的分布。根据各向异性介质的折射率椭球的公式

$$n_e(\theta_z) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta_z + n_e^2 \sin^2 \theta_z)^{1/2}}, \quad (4)$$

就可以得到有效光程为

$$L = d \cdot n_{\text{eff}} = \int_0^d n_e(z) dz, \quad (5)$$

所以得到相位为

$$\phi = 2\pi L / \lambda. \quad (6)$$

2.2 计算模拟

根据所用日本油墨公司生产的 RDP-92975 型液晶参量, $K_{11} = 11.9 \text{ PN}, K_{33} = 13.6 \text{ PN}, \epsilon_{\parallel} = 12.3, \epsilon_{\perp} = 4.1, n_o = 1.516, n_e = 1.714$,拟定液晶盒的厚度是 $5 \mu\text{m}$,并且液晶盒的上下基板是相同的强锚定摩擦。根据以上理论我们进行了计算模拟。如图 1 所示,计算模拟了不同外加电压条件下液晶盒中不同厚度处的倾角分布情况,从图 1 中可以看出液晶的倾角随着所加电压的增加而增加,另外,沿液晶层的垂直方向,由层外向层内倾角逐渐加大到达中间时达到最大,且相对与中间层成对称分布。图 2 是在 $0.6328 \mu\text{m}$ 波长下,计算模拟光波相位随电压变化的关系,可以看出在外加电压低于 1 V 时,由于低于液晶的阈值电压所以相位基本保持不变,高于 1 V 时相位随电压的增大而减小。

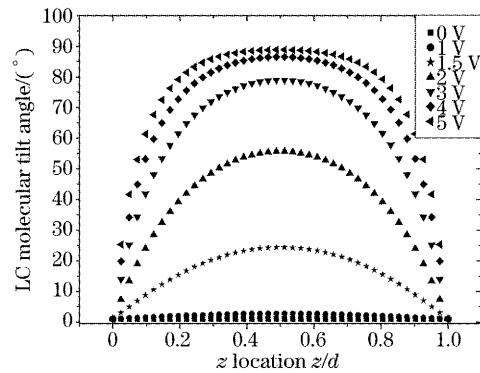


图 1 计算模拟不同电压下液晶倾角与其所在盒内位置的关系

Fig. 1 The simulated result of the tilt angle along the normal of LC cell as a function of z at different applied voltages

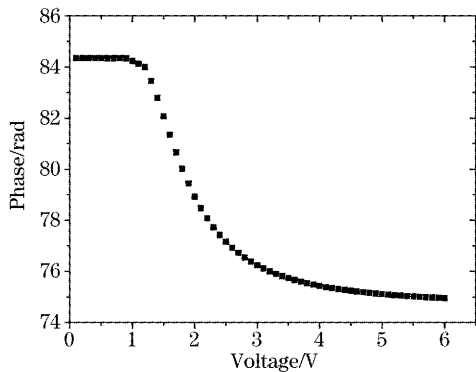


图 2 计算模拟电压与相位的关系

Fig. 2 The simulated result of the phase as a function of the voltage

3 实 验

3.1 液晶空间光调制器的设计

我们研制了 TFT 透射型 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的液晶空间光调制器,其像素单元 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,像素间距 $10 \mu\text{m}$,摩擦过的液晶取向膜呈反平行排列,注入的是在 2.2 中计算模拟时用的日本油墨公司生产的 RDP-92975 型液晶,液晶层厚为 $5 \mu\text{m}$,驱动电路采用 8 位控制器控制。

3.2 液晶空间光调制器的纯相位特性

利用干涉原理测量了相位延迟随灰度级变化的关系,使用的是美国 ZYGO 公司的生产的菲佐型 GPI1000 干涉仪,实验的光路如图 3。

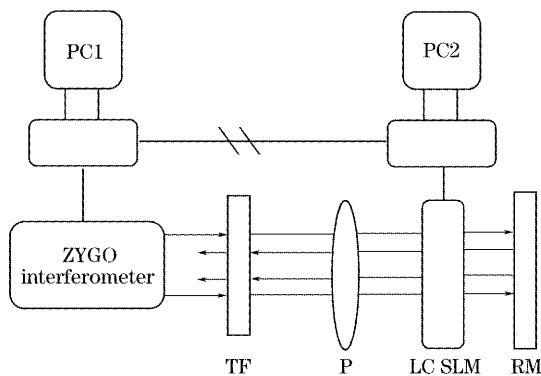


图 3 测量相位的实验光路图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup for the phase measurement. PC: computer; TF, RM: partial reflector; P: polarizer; LC SLM: liquid crystal spatial light modulator

ZYGO 菲佐干涉仪的 632.8 nm He-Ne 激光被部分反射镜 TF 分成反射和透射两束光:反射光被反射回干涉仪内部称为参考光;透射光经偏振片 P 后变为与液晶的排列方向相同的线偏振光,垂直经

过液晶空间光调制器(LC SLM)后被部分反射镜 RM 反射回干涉仪内部,称为物光。物光与参考光发生干涉,通过分析干涉条纹可以计算求得物光波的相位变化,这些变化由计算机 PC1 算出,计算机 PC2 根据计算机 PC1 算出相位变化,通过控制驱动电路施加相应的灰度级信号于液晶空间光调制器上。

液晶空间光调制器的透过率随灰度级的变化关系在液晶综合测试仪 LCD-5016 上进行了测量,实验时起偏器的起偏方向与液晶的取向方向相同。

3.3 液晶空间光调制器的精度特性

利用图 3 的光路和 3.2 节中得到的相位延迟随灰度级的变化关系,并根据共轭相位的原理进行了畸变波前调制的实验。由于在整个液晶空间光调制器的范围内,屏的不平整度达到几个波长,这主要是由于玻璃基板的平整度和加工的工艺造成的,所以我们选取其中 1 cm^2 的面积,包括 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。调制实验不是在实时的条件下进行的。

4 实验结果与讨论

图 4 是实验得到的相位延迟和透过率随灰度级变化的关系。图中实心三角表示相位延迟随灰度级变化关系,调制的范围达到 0.6λ ,要比理论值小,这是由于我们在选用折射率较大液晶的同时没有根据相应的液晶更换驱动电路,反映出了驱动电路与液晶的参量不匹配的问题。主要原因是在原电路灰度级相对应的电压大小和电压范围没有改变的情况下,更换了液晶,所用液晶的阈值和饱和值的范围相应的改变了,导致电路相对所用液晶的驱动电压过小或不匹配,没有充分利用液晶的调制范围,使得调制范围减

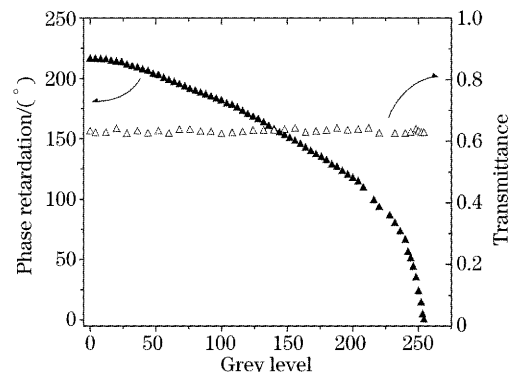


图 4 相位延迟和透过率随灰度级变化的关系

Fig. 4 The phase retardation and transmittance as functions of the gray level

小了。如果改进驱动电路是可以增加相位调制范围，可以达到理论值，同时增加液晶层的厚度和增大液晶的各向异性差值都可以增大相位调制量的范围，但是会影响响应速度，要根据实际应用选择合适的参量。而扭曲型液晶电视原理上是不能得到大的相位调制的。图中的空心三角表示透过率随灰度级变化的关系，可以看出在整个灰度级变化范围内透过率基本保持不变，这就保证了纯相位的调制特性。

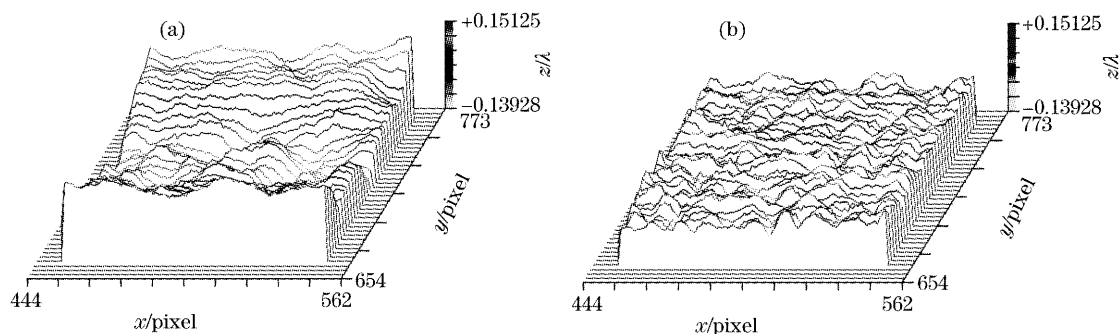


图 5 ZYGO 干涉仪测定的控制相位精度的结果。(a)相位调制前,(b)相位调制后

Fig. 5 The precision of phase controlling with ZYGO interferometer. (a) Before modulation, (b) after modulation

为了能进一步说明液晶空间光调制器的相位调制特性，利用图 3 的光路图，我们在液晶屏的驱动行上每 16 行施加同一灰度级使之成栅形，且使栅之间的相位差是 π 。实验的结果如图 6。由图 6 可以看出凸的顶部和凹的底部都较平，但是可以看出整体有一个小的倾斜量，是由系统本身造成的，去除这个小的倾斜量后凸的顶部和凹的底部的很接近 π 相位差，说明利用我们所研制的液晶空间光调制器可以产生特定的相位，在相移器、相位补偿器、光束偏转器等方面有潜在的应用。

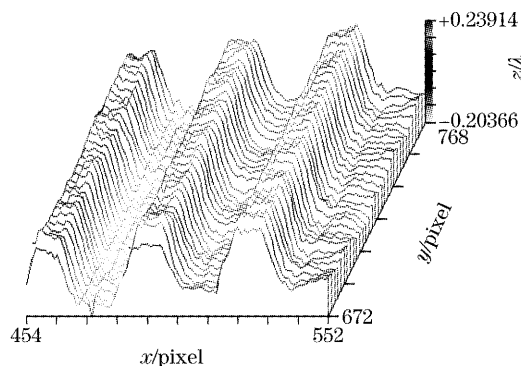


图 6 ZYGO 干涉仪得到的相位差是 π 的栅形结构图

Fig. 6 The obtained grating-shape phase distribution with ZYGO interferometer

图 5 是液晶空间光调制器的精度特性的实验结果，图 5(a)是调制前的光波波前，图 5(b)是调制后的光波波前。 x 轴, y 轴表示干涉仪 CCD 相机的二维像素坐标轴, z 轴表示光波前的相位。从中可以看出在 1 cm^2 的面积上，利用液晶空间光调制器调制后，波面峰谷值由调制前的 0.291λ 达到调制后的 0.098λ ，均方根值由调制前的 0.059λ 达到调制后的 0.017λ 。

5 结 论

研制了平行排列 TFT 投射型液晶空间光调制器，对其光学特性进行了研究，结果表明平行排列液晶空间光调制器可进行纯相位调制，在 ZYGO 干涉仪上进行了精度特性的研究，在 1 cm^2 的面积上，调制波前畸变的精度为峰谷值可达到 0.098λ ，均方根值可达 0.017λ ，调制的范围可达到 0.6λ 。在本器件研制中，由于工艺的限制调制器的像素单元较大，如能研制更高单元数和更小单元尺寸的器件，利用本文提出的平行取向液晶的方法，将能得到更好的实验结果。这种平行排列的液晶空间光调制器在光学相关、相位比较技术等光学信息处理以及在自适应光学方面有着重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 F. T. S. Yu, S. Jutamulia, T. W. Liu *et al.*. Adaptive real-time pattern recognition using a liquid crystal TV based joint transform correlator[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(8): 1370~1372
 - 2 A. D. Fisher, J. N. Lee. The current status of two-dimensional spatial light modulator technology[C]. *Proc. SPIE*, 1986, **634**: 352~371
 - 3 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1119~1122 (in Chinese)
- 云茂金,李国华,王宁. 电压调谐液晶滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1119~1122

- 4 Y. Sheng, G. Paul-Hus. Optical on-axis imperfect phase-only correlator using liquid-crystal television[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(29): 5782~5785
- 5 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei. Utilizing LCTV's phase modulation characteristics to compensate distorted wavefront[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7): 614~618 (in Chinese)
李大海, 陈怀新, 陈祯培. 利用液晶电视的位相调制特性补偿畸变波前[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 614~618
- 6 N. Konforti, E. Marom, S. T. Wu. Phase-only modulation with twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(3): 251~253
- 7 J. L. Pezzaniti, R. A. Chipman. Phase-only modulation of a twisted nematic liquid crystal TV by use of the eigen polarization states[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1567~1572
- 8 Jeffery A. Davis *et al.*. Polarization eigenstates for twisted nematic liquid crystal displays[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(5): 937~945
- 9 Judit Remenyi, Peter Varhegyi, Laszlo Domjan *et al.*. Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid crystal display at ~ 400 nm[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(17): 3428~3434
- 10 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111 (in Chinese)
陈怀新, 隋 展, 陈祯培 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 11 Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 970~972 (in Chinese)
王 伟, 李国华, 薛 冬. 液晶电挂双折射率与电压关系的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 970~972
- 12 R. N. Thurston, D. W. Berreman. Equilibrium and stability of liquid-crystal configuration in an electric field[J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(1): 508~509
- 13 Wang Xu, Daniel Wilson, Richard Muller *et al.*. Liquid crystal blazed-grating beam deflector[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6545~6555



(上接封四)

七、应用软件开发工程师(仪器设备类):1名

本科及以上学历,电子、自动化或物理相关专业;熟悉工控机原理,有 C/C++、Labview 编程能力;具有较强的独立工作能力;良好的文档撰写能力;熟悉 MatLAB 或数字图像采集处理技术者优先考虑。

八、嵌入式系统软件研发(仪器设备类):1名

本科及以上学历,电子、自动化或物理相关专业;一年以上嵌入式开发或单片机开发经验;精通 C/C++ 编程,具有 Linux 平台软件开发经验;良好的文档撰写能力。

九、准直测量:1名

本科及以上学历,工程测量、大地测量、测量工程或测绘类相关专业;熟悉工程测量仪器操作及测量数据处理工作;具有较好的英语基础;有 2 年以上工作经验、或有大型、精密工程测量经验者优先。

十、低温系统设计、制造、运行与设备管理:2名

硕士及以上(有丰富经验者可放宽至本科),低温制冷工程或其他物理类及机械类相关专业;从事液氮、液氮、液氢或液氧等深低温液体的存储容器及输送管道设计、工艺设计、施工设计,制造技术等相关工作 3 年以上;或从事上述各类深低温液体大型液化设备的研究开发、设计、制造工艺设计、制造技术等相关工作 3 年以上;或从事上述各类深低温液体的液化设备的运行、维护及管理等相关工作 3 年以上。

十一、自动化控制系统:1名

本科及以上学历,自动化控制专业;具有从事相关的流量控制、温度控制的技术工作,有一定的技术经验;熟悉 PLC 可编程控制器系统;能独立进行相关系统的编程和软件设计工作。

十二、束线控制系统软件设计:2名

硕士及以上学历,计算机,电子学,物理或相关专业;有控制或数据采集领域的相关知识与经验;熟悉 c/java 编程;熟悉 PC / Linux 系统。

十三、束线控制系统软件设计:1名

本科及以上学历,机电、电气工程及其自动化或其他相关专业;65 岁以下;具有电学、控制、电磁学的理论基础,5 年以上的工程设计和工程实施经验。

十四、光束线设计:3名

本科及以上学历,精密机械、光学仪器、机械设计、真空专业;具有同步辐射光束线设计、建造经验,较强的独立工作能力;具有较好英语基础。

应聘者需提供下列材料,并注明应聘的岗位名称:

1. 本人的工作简历(包括取得的科技工作成果);
2. 学历、学位证书、专业技术职务任职资格复印件;
3. 其它相关专业工作经历的证明;

联系人:周先生, 通信地址:上海市嘉定区嘉罗公路 2019 号, 邮编:201800, E-MAIL: hr@sinap.ac.cn