

单轴应力对一维镜像光子晶体光子局域态透射峰的影响*

李乾利¹⁾ 温廷敦^{1)2)3)†} 许丽萍¹⁾ 王志斌⁴⁾⁵⁾

1) (中北大学理学院物理系, 太原 030051)

2) (中北大学微米纳米技术研究中心, 太原 030051)

3) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

4) (中北大学, 电子测试国家重点实验室, 太原 030051)

5) (中北大学, 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

(2013年4月9日收到; 2013年5月6日收到修改稿)

利用传输矩阵法研究了镜像异质三周期一维光子晶体中的光子局域态随单轴应力发生变化的特性. 对于镜像异质三周期光子晶体, 由于其镜像结构, 破坏了光子晶体的有序性, 产生了一个缺陷态, 使其在较宽的光子禁带中心有一个光子局域态透射峰. 研究表明: 当对镜像异质三周期光子晶体施加单轴应力时, 其中的光子局域态透射峰会随着应力的改变而发生剧烈的变化. 当外部微弱的机械应力施加到光子晶体上时, 对光子晶体形成一个拉伸应变, 拉伸应变引起光子晶体结构的变化, 进而大幅度影响光子局域态透射峰的透射率. 结果表明: 透射峰的透射率明显受单轴应力的影响. 这些特性可为用此结构的光子晶体设计超高灵敏度压力传感器提供理论参考.

关键词: 光子晶体, 单轴应力, 光子局域态, 传输矩阵

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.184212

1 引言

1987年 Yoblonovitch 和 John 分别独立地提出了光子晶体 (photonic crystal) 这个物理概念. 光子晶体是指一类不同介电常数 (或张量) 呈周期性排列的非均匀人工电磁介质材料, 光子禁带和光子局域态是光子晶体的两个重要特征^[1-4]. 由于光子晶体可以控制光子的运动, 形成光子禁带, 以及抑制材料的自发辐射等特性, 国内外对光子晶体的研究十分活跃, 理论研究和应用研究都取得了很大进步, 光子晶体的制备也得到了长足发展^[5-10]. Xu 等^[11]在 2007 年提出了介观压阻效应. 在此理论的基础上, 有人设计出了高灵敏的压阻膜, 并将这种压阻膜应用到各种新型传感器上, 传感器灵敏度明显高

于一般硅材料制作的压阻膜传感器的灵敏度^[12,13]. 光子晶体和电子晶体存在很多类似的物理现象. 因此, 用光子晶体代替一般的电子晶体材料, 能很大程度上提高传感器的灵敏度. 本文类比于电子晶体的介观压阻效应, 以镜像异质三周期光子晶体为基本参考材料, 探究镜像异质三周期光子晶体在受到单轴应力的作用下, 其光子局域态透射峰随单轴应力发生变化的介观压光效应, 并求出不同有效弹光系数下的介观压光系数. 另外, 与镜像异质双周期光子晶体的局域态透射峰对比, 镜像异质三周期光子晶体有更高的透射率和更宽波长范围的光子局域态透射峰, 能测量出更大范围的应力变化. 本文可为用光子晶体代替传统压阻膜设计高灵敏度压力和加速度传感器提供一种理论参考.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60776062, 50730009) 和国家自然科学基金仪器专项基金 (批准号: 61127015) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tdwen@nuc.edu.cn

2 模型建立与理论依据

2.1 镜像异质三周期一维光子晶体模型

如图 1, 组成镜像异质三周期一维光子晶体的 A, B, C 三介质薄层是由 TiO₂ (折射率为 $n_1 = 2.29$) 和 SiO₂ (折射率为 $n_2 = 1.45$) 两种晶体材料构成的. 如图 2 所示, A, B, C 三介质层整体又以 N 个周期的方式对称交替排列生长成具有镜像对称结构, 类似固体能带理论中的 Kroning-Penney 模型结构 [14]. Z 轴为单轴应力的方向.

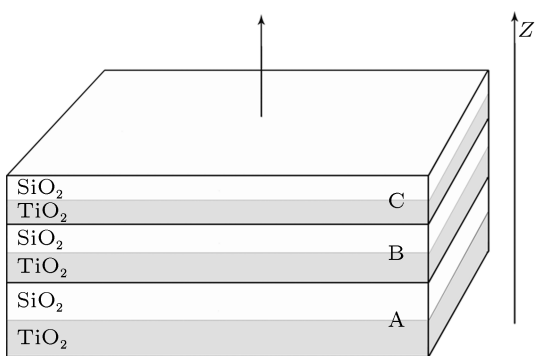


图 1 三介质层结构

2.2 理论分析

光子晶体的主要特性之一就是光子局域. 1987 年 John [15] 提出: 在一种经过精心设计的介电常数组成的超晶格中, 光子呈现出很强的 Anderson 局域态. 如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷, 和缺陷态频率符合的光子有可能被局域在缺陷态位置, 一旦其偏离缺陷态位置就将速度衰减 [16].

传输矩阵法 [17,18] 是研究一维光子晶体最广泛的方法之一, 其理论基础是电磁场的麦克斯韦方程. 将各层膜的边界条件从麦克斯韦方程推导出矩阵表达式, 避免了递推中计算各个界面菲涅耳系数的烦琐, 省略了许多不影响结果的中间环节, 直接用矩阵相乘形式求出透射率, 适用于多层介质膜和金属膜.

对于有限多层介质膜系统, 传输矩阵表示如下:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $\delta = (2\pi/\lambda)nd \cos \theta$ 为介质的相对厚度, $\eta = n \cos \theta$, 逐层应用 (1) 式, 就能得到整个一维周期性

光子晶体的传输矩阵:

$$M(Z_N) = M_1(Z_1)M_2(Z_2 - Z_1) \times M_3(Z_3 - Z_2) \cdots M_N(Z_N - Z_{N-1}), \quad (2)$$

$$M(z_N) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

光透过光子晶体的透射系数表示如下

$$t(\lambda) = \frac{2 \cos \theta}{(M_{11} + M_{22}) \cos \theta + M_{21} + M_{12} \cos^2 \theta}, \quad (4)$$

则透射率为

$$T = |t(\lambda)|^2. \quad (5)$$

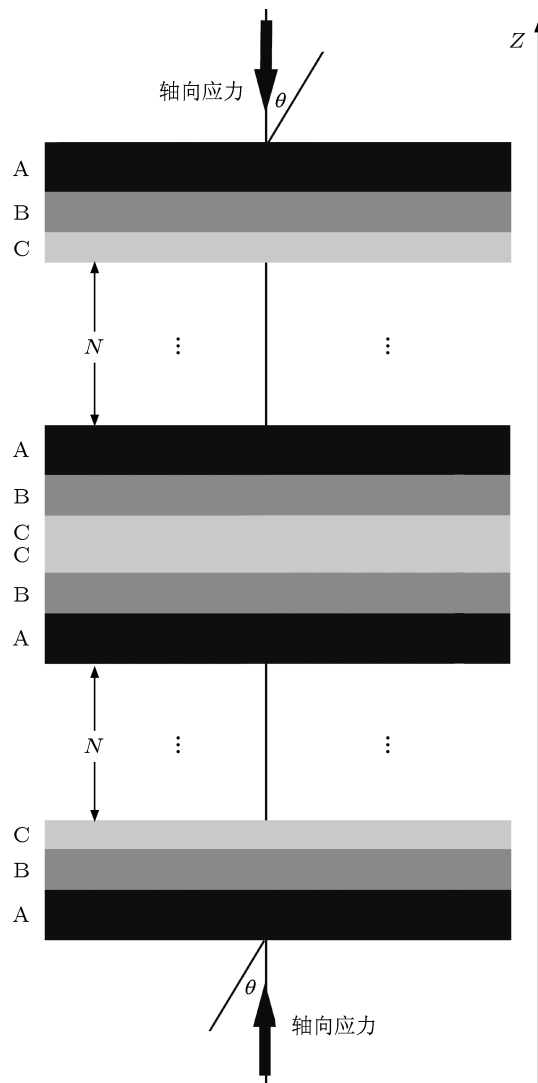


图 2 镜像异质三周期结构光子晶体模型

我们知道, 轴向应力不仅会改变介质层材料的厚度, 其折射率也会相应地发生变化, 即晶体的弹光效应. 这些量在晶体学中是用张量表示的, 计算

起来很复杂. 为了简化计算同时又保持其准确的物理意义, 这里引入线性等效应变和有效弹光系数的概念. 一维轴向上应力与应变的关系可以简化为:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

由弹光效应简化得折射率的相应变化为

$$\Delta n/n_0 = (1 - P_e)\varepsilon, \quad (7)$$

其中, σ 为应力, E 为弹性模量, ε 为应变, P_e 为有效弹光系数, n_0 为原折射率, Δn 为折射率的变化量.

由以上关系, 可以得到材料厚度和折射率的变化关系为

$$d = (1 - \varepsilon)d_0, \quad (8)$$

$$n = (1 + p_e\varepsilon)n_0. \quad (9)$$

3 数据模拟分析

3.1 镜像异质三周期光子晶体光子禁带中的透射峰

对于镜像异质三周期结构的一维光子晶体, 忽略晶体中色散和晶体对光吸收的影响, 且不考虑光学厚度, 只关注物理厚度. 光子晶体 ABC 的厚度满足每层的厚度 (光程) 为 $1/6$ 波长, 即: $n_1d_{a1} = n_2d_{a2} = \lambda_1/6$, $n_1d_{b1} = n_2d_{b2} = \lambda_2/6$, $n_1d_{c1} = n_2d_{c2} = \lambda_3/6$, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为禁带中心波长. 取 $\lambda_1 = 1000 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 800 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 600 \text{ nm}$, 三层介质的循环周期数 $N = 10$. 当平面波正入射 (即入射角度为 $\theta = 0^\circ$), 暂不考虑偏振问题, 其透射谱线如图 3 所示. 此结构的光子晶体能在 1400 nm 至 2000 nm 的波长范围内形成一个明显的光子禁带. 其波段为 $1490\text{--}1760 \text{ nm}$. 由于镜像异质三周期光子晶体的对称性, 使其在光子晶体中出现了一个缺陷态, 形成了一个光子局域态, 图 3 所示为一个以 1655 nm 为中心波峰的透射峰, 透射峰波段为 $1630\text{--}1680 \text{ nm}$.

3.2 缺陷态透射峰随应变的变化

对于结构为 $(ABC)^N(CBA)^N$ 的镜像异质三周期光子晶体, 当均匀施加轴向应力 (Z 轴方向) 时, 光子晶体发生弹性应变. 由前面的原理分析知, 晶体的每层材料厚度和折射率都会发生变化, 在此把晶体的拉伸应变近似看成线性变换变化, 遵循 (8),

(9) 两式. 取有效弹光系数 $P_e = 0.5$, 入射光垂直入射光子晶体 (即入射角度为 0°), 得到 1655 nm 处缺陷态透射峰随应变的变化图 4. 由图 4 可以看到, 随着应变从万分之一到万分之一百变化, 透射峰的透射率显著减小. 对于这种在介观纳米数量级光子晶体中光子局域态透射峰的透射率随应变而发生剧烈变化的力光耦合现象, 我们称之为介观压光效应.

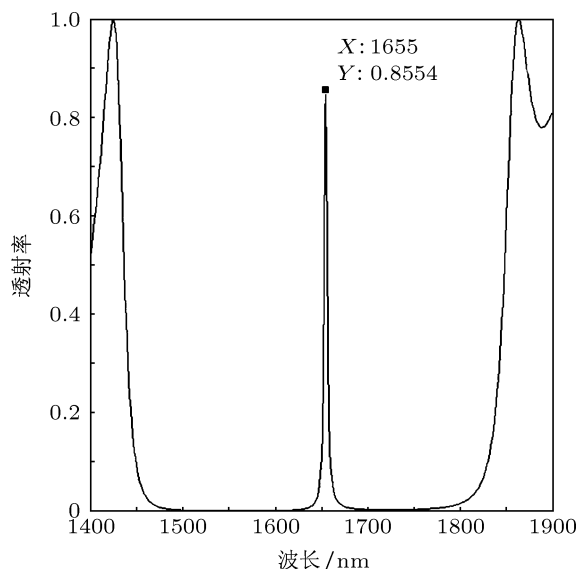


图 3 镜像异质三周期结构光子晶体局域态透射峰

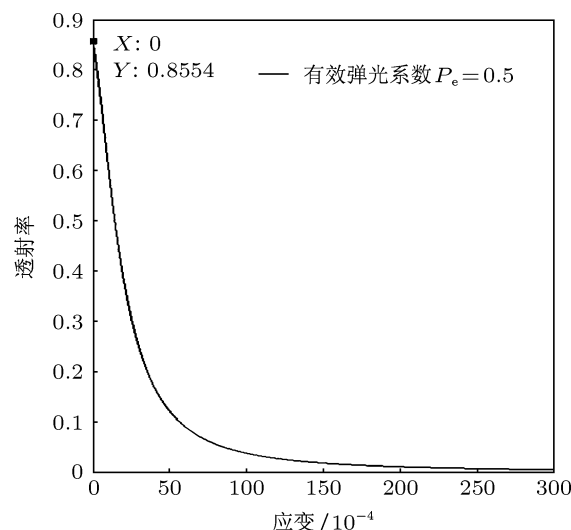


图 4 1655 nm 透射峰随应变变化

3.3 有效弹光系数对缺陷态透射峰的影响

对于 1655 nm 处缺陷态的透射峰, 以入射光垂直入射光子晶体 (即入射角度为 $\theta = 0^\circ$), 均匀施加轴向应力, 观察有效弹光系数对介观压光效应的影

响. 当有效弹光系数 P_e 从 0.1 到 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 逐渐增大时, 从图 5 中可见, 当 $P_e = 0.1$ 时, 缺陷态的透射峰较之其他曲线变化较为平缓; 当 $P_e = 0.9$ 时, 缺陷态的透射峰随晶体应变的变化减小的速度最为剧烈, 即介观压光效应最为明显, 即随着 P_e 的增加, 缺陷态透射峰的减小速度随之增大. 运用这一点可为超灵敏传感器的设计提供理论依据.

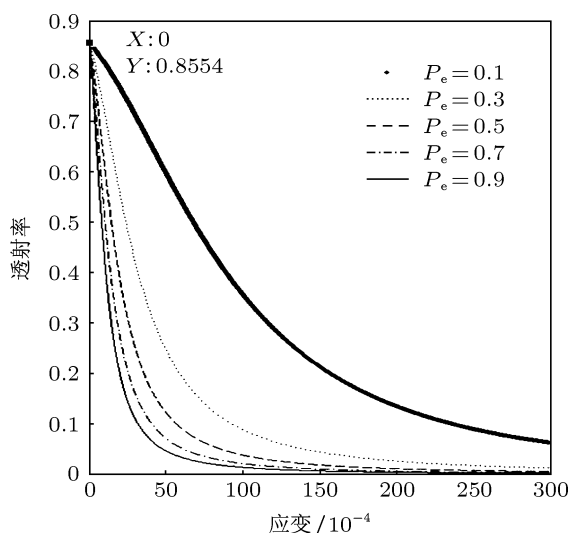


图 5 不同有效弹光系数 P_e 下的 1655 nm 透射峰的透射谱

3.4 介观压光系数

为了能更好地衡量介观压光效应的强弱, 在此引入介观压光系数, 即表示光子局域态透射峰的透射率随应变发生变化的剧烈程度. 如图 6, 以 $P_e = 0.5$ 为例, 通过一阶直线拟合来求出直线的斜率, 并用它来表示介观压光系数.

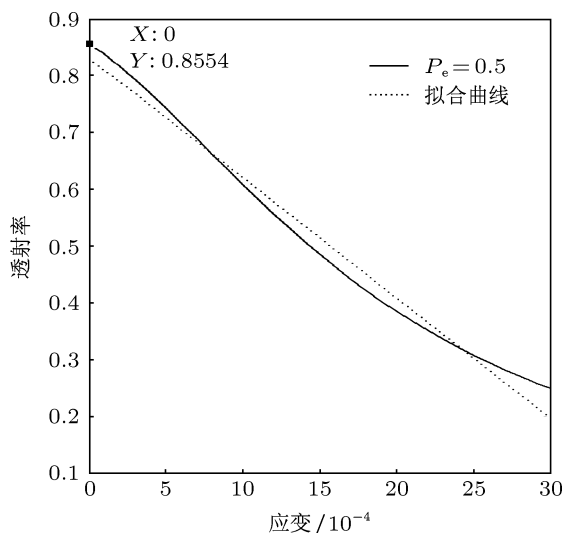


图 6 介观压光系数的拟合

表 1 不同有效弹光系数对应的介观压光系数

		$\lambda = 1655 \text{ nm}$								
P_e		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Y_a		-48	-103	-151	-189	-216	-235	-248	-256	-261
T_0		0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
T_f		0.87	0.88	0.88	0.87	0.86	0.84	0.82	0.80	0.78

表 1 中给出了不同有效弹光系数下镜像异质三周期光子晶体在 1655 nm 处透射峰所对应的介观压光系数 Y_a , 其中 T_0 为光子晶体没有受到单轴应力下的局域态透射峰的透射率, T_f 为没有受到单轴应力时局域态透射峰的透射率的拟合结果. 经过分析得到, 当 $P_e = 0.5$ 时, 拟合曲线与原透射峰重合得较好, 拟合曲线更能反映透射率受应力的变化. 以上数据可为用此结构的光子晶体设计不同应变范围内的超灵敏度传感器提供理论参考.

4 结论

由材料 TiO_2 和 SiO_2 组成的镜像异质三周期

一维光子晶体在波长为 1400—2000 nm 的范围内能形成一个比较明显光子禁带, 并且在此光子禁带中存在一个光子局域态透射峰, 使特定波长的光在通过此局域态能形成一个透射率较高的透射峰. 而且, 通过对此晶体施加轴向应力可以改变缺陷态透射峰的透射率. 研究还发现: 这种光子局域态透射峰对单轴应变非常敏感. 当应变发生万分之一变化时, 光子禁带中缺陷膜的透射率发生剧烈的变化, 我们称此现象为介观压光效应, 并用介观压光系数来衡量其效应强烈程度. 另外, 此结构透射峰随着有效弹光系数的增大变化更加剧烈, 本文给出了在不同有效弹光系数下对应的介观压光系数. 本文研究可为设计超灵敏度压力传感器提供理论模型.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Yablonovitch E, Gmitter T J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2295
- [4] Lidorikis E, Soukoulis C M 2000 *Phys. Rev. E* **61** 5825
- [5] Xu J P, Wang L G, Yang Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2765 (in Chinese) [许静平, 王立刚, 羊亚平 2006 物理学报 **55** 2765]
- [6] Su A, Gao Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234208 (in Chinese) [苏安, 高英俊 2012 物理学报 **61** 234208]
- [7] Wu J J, Gao J X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124102 (in Chinese) [武继江, 高金霞 2013 物理学报 **62** 124102]
- [8] Zhang Z R, Long Z W, Yuan Y Q, Diao X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 587 (in Chinese) [张正仁, 隆正文, 袁玉群, 刁心峰 2010 物理学报 **59** 587]
- [9] Li Q L, Wen T D, Xu L P 2012 *Chin. J. Lumin.* **31** 1347 (in Chinese) [李乾利, 温廷敦, 许丽萍 2012 发光学报 **31** 1347]
- [10] Chen X F, Jiang M P, Shen X M, Jin Y, Huang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5709 (in Chinese) [陈宪峰, 蒋美萍, 沈小明, 金钰, 黄正逸 2008 物理学报 **57** 5709]
- [11] Xu L P, Wen T D, Yang X F, Xue C Y, Xiong J J, Zhang W D, Wu M Z, Hochheimer H D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 043508
- [12] Zhang B Z, Li K J, Zhang W D, Xue C Y 2007 *Acta Armamentarii* **28** 2178 (in Chinese) [张斌珍, 李科杰, 张文栋, 薛晨阳 2007 兵工学报 **28** 2178]
- [13] Liu J, Ma Z M, Shi Y B, Du K, Zhang W D, Zhang B Z 2009 *Acta Armamentarii* **30** 5607 (in Chinese) [刘俊, 马宗敏, 石云波, 杜康, 张文栋, 张斌珍 2009 兵工学报 **30** 5607]
- [14] Fang J J, Lu D 1980 *Solid-State Physics* (Vol. 1) (Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers) (in Chinese) [方俊鑫, 陆栋 1980 固体物理学 (上册) (上海: 上海科学技术出版社)]
- [15] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2476
- [16] Xiao Q W 2007 *M. S. Dissertation* (Changsha: Central South University) (in Chinese) [肖清武 2007 硕士学位论文 (长沙: 中南大学)]
- [17] Liu N H, Zhu S Y, Chen H, Xiang W 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046607
- [18] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **50** 2702

Effect of uniaxial stress on photon localization of one-dimensional photonic crystal with a mirror symmetry*

Li Qian-Li¹⁾ Wen Ting-Dun^{1)2)3)†} Xu Li-Ping¹⁾ Wang Zhi-Bin⁴⁾⁵⁾

1) (Department of physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

2) (The Center of Micro/Nano Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

3) (MOE Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

4) (National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

5) (Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 9 April 2013; revised manuscript received 6 May 2013)

Abstract

In this paper, the transfer matrix method is used to study the characteristics of the photon localization in the mirror heterogeneous structure which has three periods and one-dimensional photonic crystal in uniaxial stress change. In a mirror structure triply-periodic photonic crystal system, its mirror structure destroys the orderliness of the photonic crystal and produces a defect state, so the transmission peaks of a photon localization appear in the photonic band gap wider center. The study shows that when a uniaxial stress is exerted on the mirror structure with three-periodic photonic crystal, the photon localization transmittance peak dramatically changes with the stress. When a weak external mechanical stress is applied to the photonic crystal, photonic crystal forms a tensile strain which induces the change in the photonic crystal structure and significantly affects the rate of the transmittance peak transmittance of photon localization. The results show that the transmission peak transmittance is significantly influenced by the uniaxial stress. These features provide a theoretical reference for the design of ultra-high-sensitivity pressure sensor with the photonic crystal structure.

Keywords: photonic crystal, uniaxial stress, photon localization, transfer-matrix method

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.184212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60776062, 50730009) and the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127015).

† Corresponding author. E-mail: tdwen@nuc.edu.cn