

Z427/1033(2009)-(36)



NUAA2010055234

Z427
1033(2009)-(36)

理 学 院

082



2010055234

(36)

理学院 09 年论文目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	原森 刘文友 赫崇君	博士 教授 副高	理学院	多重散射方法模拟梯度折射率光子晶体的透镜效应	光学学报	200929
2	王东生 于涛 胡安 吴迪 李爱东 刘治国	副高 教授 教授 教授 教授	理学院	氮氢混合气氛对 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 铁电薄膜和粉末性能的影响	无机材料学报	20092404
3	戴存礼 刘曙娥	硕士 副高	理学院	随机阿波罗网络的动力学同步研究	计算机工程与应用	200902
4	肖杨 颜晓红	副高 教授	理学院	Surface and quantum-size effects on the specific heat of layered and nonlayered nanotubes	The European Physical Journal B	20086604
5	郭艳华 颜晓红	硕士 教授	理学院	First-principles study of narrow single-walled GaN nanotubes	Physics Letters A	20093730 3
6	邓宇翔 颜晓红	博士 教授	理学院	Influences of multiterminal and time-dependent magnetic field on the Transport properties triple quantum dots	Physica E	20094103
7	朱志海 颜晓红	硕士 教授	理学院	Half-metallic properties of perovskite BaCrO_3 and $\text{BaCr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ superlattice: LSDA+U calculations	Journal of Applied Physics	20091060 2
8	郭朝晖 颜晓红	博士 教授	理学院	Dissociation of water molecule on the molybdenum doped fullerene	Physics Letters A	20093730 4
9	樊济宇 凌浪生 洪波 皮雳 张裕恒	副高 讲师 副高 教授	理学院	Magnetocaloric effect in perovskite manganite $\text{Nd}_{0.6}\text{La}_{0.1}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	2009321
10	林玮	中级	理学院	An Oscillator Using High Order Lamb Wave Modes	Applied Acoustics	20097012
11	朱陈平	副高	理学院	Congestion patterns of traffic studied on nanjing city dul graph	IEEE XPLORE	20091008
12	王黎 朱陈平	硕士 副高	理学院	Modeling mobile ad hoc communication networks on two-dimensional square lattice	RESEARCH ARTICLE	20090404
13	官山			跨越多个实际科学领域的合作网	力学进展	20081125

	何大韧 朱陈平	副高	理学院	络与合作-竞争网络		
14	陈红霞 施大宁	博士 教授	理学院	Electronic and mechanical properties of ZnS nanowires with different surface adsorptions	PHYSICA E	20094232
15	陈红霞 施大宁	博士 教授	理学院	The stability and electronic properties pf wurtzite and zinc-blende ZnS	PHYSICS LETTER A	20093733 71
16	齐景山 施大宁	博士 教授	理学院	Different mechanical properties of pristine and hydrogen passivated ZnO nanowires	COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE	20094630 3
17	齐景山 施大宁	博士 教授	理学院	Structures and Electronic Properties of the Bi-Sb superlattice Nanowires and Core-shell Structural Bi/Sb Nanowires	American Chemical Society	20091135 8
18	杨世波 潘风明 杨玉娥 张卫纯	硕士 教授 讲师 讲师	理学院	Effects of flow ratios on surface morphology and structure of hydrogenated amorphous carbon films prepared by microwave plasma chemical vapor deposition	Applied Surface Science	200907
19	王长顺 阚彩侠 李红臣	硕士 教授 学生	理学院	Anisotropic Growth of Gold Nanoplates with Well-defined Shapes and Optical Resonances	International conference on nanoscience and technology	200909
20	阚彩侠 朱杰君 王长顺	教授 讲师 学生	理学院	Ag nanoparticle-filled polymer shell formed around Au nanoparticle core viaultrasound-assisted spherulite growth	Journal of Crystal Growth	20093110 6
21	赵志敏 陈远 郑敏 李洪均	正高 博士 硕士 博士	理学院	人体微小管状血管血液流速自动测量方法研究	计量学报	20093101
22	王开圣 杨雁南 赵志敏	中级 教授 教授	理学院	用数值模拟方法研究面光源劈尖干涉问题	物理与工程	20091905
23	王田虎 赵志敏 张林 季雷	博士 教授 博士 博士	理学院	Study on the interaction Between Tangerine Peel and Beer by Absorption Spectrum	生物医学工程学学报	20091804
24	王田虎 赵志敏	博士 教授	理学院	Spectroscopic studies on the interaction between troxerutin and bovine serum albumin	Journal Molecular Structure	2009937
25	金小东	硕士	理学院	激光二极管的光功率数字可调控	应用激光	20092906

	赵志敏	教授		制系统设计与仿真		
26	魏本征 赵志敏 宋一中	博士 教授 博士后	理学院	基于 IPSO 和综合信息的医学图像配准新方法	光电子激光	20092010
27	宋一中 赵志敏	博士 后 教授	理学院	网络基任向偏导实现及层析应用	光子学报	20083711
28	李鹏 赵志敏 洪小芹	博士 教授 硕士	理学院	基于光谱分析方法的光引发剂量子效率评估	光子学报	20093811
29	朱卫华 赵志敏	博士 教授	理学院	Study of blood fat concentration based on serum ultraviolet absorption spectra and neural network	JBISE	20090206
30	王乐新 赵志敏 陈会	博士 教授 硕士	理学院	血清浓度变化对血清荧光光谱的影响	光谱学与光谱分析	20092905
31	朱卫华 赵志敏	博士 教授	理学院	基于血清紫外-可见吸收光谱的胆固醇含量研究	光谱学与光谱分析	20092904
32	宋一中 赵志敏	博士 后 教授	理学院	基于偏折光谱的非线性迭代层析数值模拟	光谱学与光谱分析	20092902
33	宋一中 赵志敏	博士 后 教授	理学院	激光莫尔干涉谱投影信息提取	光谱学与光谱分析	20092901
34	张小齐 刘文友 翁文乐 赫崇君	硕士 正高 硕士 副高	理学院	锰掺杂近化学计量比铈酸锂晶体的电荷输运过程	光子学报	20093810
35	张霞萍 刘文友	博士 正高	理学院	强非局域介质中传输光束的高阶模孤子解	光子学报	20083712
36	张霞萍 刘文友	博士 正高	理学院	强非局域介质中传输光束的 Ince-Gauss 解	物理学报	20095812
37	张霞萍 刘文友	博士 正高	理学院	依据强非局域介质中光孤子相互作用实现全光互联	应用光学	20093002
38	李季平 梁大开	副高 教授	理学院	非相关双图像法研究物体离面大位移及应变	计量学报	20093002
39	李香莲 陈蕾	副高 学士	理学院	基于混沌振子的微弱振动信号频变跟随器仿真设计	中国机械工程学会	20092002
40	胡冬生 卢秀娟 张永梅 朱陈平	副高 初级 副高 副高	理学院	Transport properties of a random binary side-coupled chain	Chinese Physics B	20061806

41	杨玉荣 颜晓红	博士 教授	理学院	Coaxial nanocables of codoped double-walled carbon nanotubes	American Institute of Physics	20091312 1
42	邓宇翔 颜晓红	博士 教授	理学院	A scheme for accurate detection molecular bonds in quantum dots	Europhysics Letters	20098806
43	吴平 何湘	正高	理学院	Research on the ultraweak photon emission from anti-cancer plants	Journal of Biomedical Science and Engineering	20090203
44	翁文乐 刘文友 张小齐	硕士 教授 硕士	理学院	Temperature-dependent Sellmeier Equation for 1.0mol%Mg-doped Stoichiometric Lithium Tantalate	Chinese Physics Letters	20082512
45	李培宁 刘文友	硕士 正高	理学院	Multichannel filtering properties of photonic crystals consisting of single-negative materials	Physics Letters A	2009373
46	陈凌 赵洪涌	硕士 教授	理学院	New LMI conditions for global exponential stability of cellular neural networks	ElsevierB.V	20091001
47	赵洪涌 毛白森	正高 硕士	理学院	Boundedness and stability of nonautonomous cellular neural networks with reaction-diffusion terms	ElsevierB.V	20097905
48	赵洪涌 丁楠 陈凌	正高 讲师 硕士	理学院	Almost sure exponential stability of stochastic fuzzy cellular neural networks	ElsevierB.V	20094004
49	王东红 赵宁 胡偶 刘剑明	中级 教授	理学院	A GHOST FLUID BASED FRONT TRACKING METHOD FOR MULTIMEDIUM COMPRESSIBLE FLOWS	中国科学院武汉物理与数学研究所	200929 (B) 06
50	王东红 赵宁 王永健	中级 教授	理学院	一维多介质可压缩流动的守恒型界面追踪方法	中国核协会	20093102
51	王东红 赵宁 刘剑明	中级 教授	理学院	界面追踪方法中的激波限制器研究	中国科学院数学与系统科学研究院	20092604
52	文杰 姜长生 钱承山 周丽	中级 教授	理学院	Robust adaptive fuzzy controller for a class of non-affine nonlinear		
53	文杰 姜长生 钱承山 周丽	中级 教授	理学院	非仿射非线性系统的自适应模糊输出反馈控制	系统工程与电子技术	20093107
54	宋国强	博士	理学院	Existence of global weak solutions to a symmetrically hyperbolic system with a source	Revista Colombiana de Matematicas	20084202

55	宋国强 肖箭 盛立人	博士 教授 教授	理学院	含有源项的特殊欧拉方程组整体弱解存在性 (I): 特殊源项	安徽大学学报	20093301
56	宋国强 杨瑞芳 赵磊 李丽娜	博士 副高 学生 学生	理学院	扩散占优的 2*2 双曲平衡律奇异松弛极限与其应用	吉林大学学报	20094703
57	宋国强 肖箭	博士	理学院	Existence of global weak solutions to a symmetrically hyperbolic system with a source (II): General case	Journal of Mathematical Analysis and Applications	20093520 2
58	肖光世	副高	理学院	On strongly regular rings and SF-rings	Far East Journal of Mathematical Science	20093203
59	袁泉 戴华	中级 教授	理学院	有限元模型修正中的最佳矩阵逼近	高等学校计算数学学报	20093102
60	袁泉 殷洪友	中级 教授	理学院	隐互补问题的极小化变形及其稳定点分析	高等学校计算数学学报	20093101
61	刘峰 袁永新	中级 教授	理学院	结构动力模型修正中的一类对称矩阵反问题	工程数学学报	20092606
62	刘峰 袁永新	中级 教授	理学院	New model updating method for damped structural systems	Computers and Mathematics with Applications	200957
63	周良强 陈芳启	博士 教授	理学院	Chaos in the triple-well Φ_6 -Vander Pol oscillator driven by periodically external and nonlinear parametric excitations	Journal of Physics: Conference Series 96(2008),012041.(SCI 收录:IDS:BIT50)	200896
64	王霞	博士	理学院	Si'Inikov chaos and Hopf bifurcations analysis of Rucklidge system	Chaos,Solitons and Fractals 42(2009)2208-2217(SCI 已收录)	200942
65	王霞	博士	理学院	Stability and bifurcation for a flexible beam under a large linear motion with a combination parametric resonance	Nonlinear Dynamics,56(2009),101-119	200956

多重散射方法模拟梯度折射率光子晶体的透镜效应

原 森 刘友文 赫崇君

(南京航空航天大学应用物理系, 江苏 南京 210016)

摘要 建立了空气孔径呈现横向线性变化的三角形网格梯度折射率光子晶体平板透镜二维模型,应用多重散射方法(MSM),对该模型在波长平面光入射的情况下,TE模式的电磁场分布进行了数值模拟,从而验证了该光子晶体透镜的聚焦效果;再通过横向延拓的方法,将上述两个透镜并联,并在并联后结构的双光轴的焦点位置放置一对折射率光子晶体管道波导,得到了一个新型的分光装置模型。数值模拟结果表明,该装置能很好地实现聚焦、分光和准直的效果。

关键词 光学器件;多重散射方法;梯度折射率透镜;光子晶体波导

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s2.0106

Simulating of Lens Effect of Graded-Index Photonic Crystals by Multiple-Scattering Method

Yuan Sen Liu Youwen He Chongjun

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract A 2D triangular-lattice photonic crystal (PC) with graded-index (GRIN) structure was presented. The multiple-scattering method (MSM) was applied to simulate the distribution of the electromagnetic field of TE mode with an input plane wave, by which the focusing effect of the model was proved. Through connecting two GRIN lens and combining with two conventional PC waveguides (PCW), a light splitting element was designed. The results show that it is effectively to focus, split and collimate an incident plane wave with a short simple structure.

Key words optical devices; multiple-scattering method (MSM); graded-index lens; photonic crystal waveguide (PCW)

1 引 言

近年来,光子晶体(PC)器件设计方兴未艾,通过在光子禁带材料中引入缺陷或者改变内部微结构的尺寸,可以将人工晶体设计为波导、透镜、滤光镜和微谐振腔等器件,从而实现对不同频率光波的准直、聚焦、选频滤波和放大等功能^[1~8]。通过在光传播方向或垂直于光传播方向按一定规律改变构成光子晶体的电介质晶柱的折射率、晶柱或空气孔半径或光子晶体周期,可以得到性能媲美传统梯度折射率材料的光子晶体,这些光子晶体可以被设计成各种平板透镜^[2,3]、球面透镜^[5,6]或会聚型波导^[9,10]。另外,梯度折射率光子晶体还可实现光学成像和光路扭转^[11,12]。在二维光子晶体理论模型的构建和

数值仿真实验中,时域有限差分法(FDTD)是光子晶体数值模拟中一种最常见的方法^[1,3~7,10~13],它适用于边界条件相对简单的结构,多应用于等步长网格的场求解问题,有限元方法(FEM)由于其对特征值计算的优势,多用于解决一些微光腔设计中腔内微小结构边界的散射问题^[11]。另处,Hakansson等应用多重散射方法(MSM)设计了大量实用新颖的光子晶体器件,并提出了散射光学单元(SOE)的概念。由于采用多重散射的方法,光子晶体中的各个微柱(微孔)被理想化为各自独立的散射源,因而,光学散射单元更易于应用优化的方法来对格点位置固定的微柱(微孔)的有无进行优化,因而多重散射方法表现出了更强的适应性和实用性^[13,19]。

基金项目: 教育部博士点专项基金(200802871028)、江苏省六大人才高峰项目(07-A-011)和归国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 原 森(1976—),男,博士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: forrestys@hotmail.com

导师简介: 刘友文(1966—),男,博士,教授,主要从事信息光学和微纳米光子学等方面的研究。

E-mail: ywliu@nuaa.edu.cn(通信联系人)

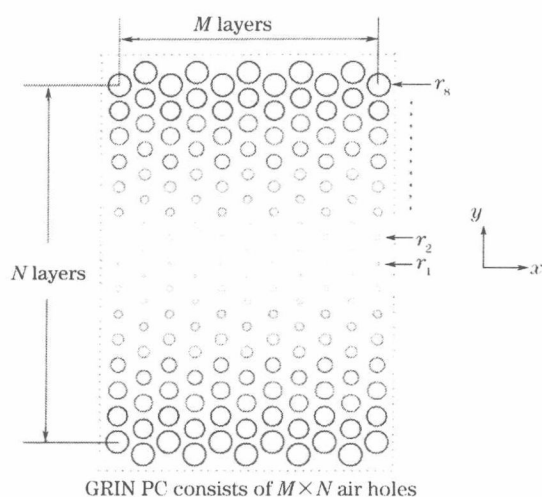
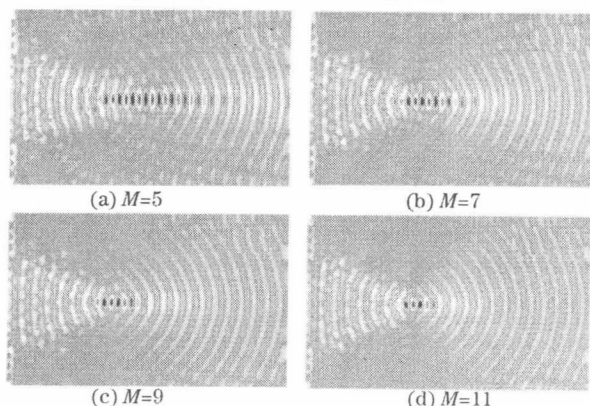


图 1 光子晶体中空气孔结构图

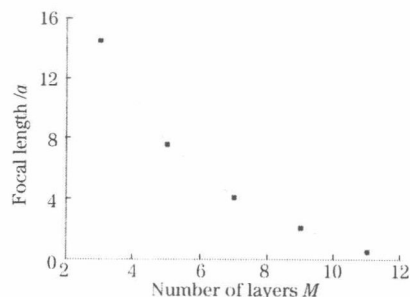
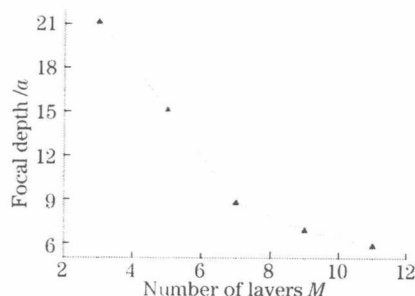
Fig. 1 Air holes structure in PC

4 梯度折射率光子晶体透镜的聚焦特性

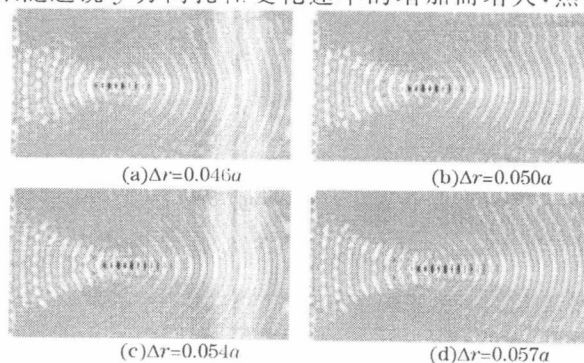
对会聚透镜单元来说,焦距和焦深是描述透镜聚焦特性的重要参数,对应用于集成微光子学器件和系统具有重要的价值。在光轴上采样场强最大值作为焦点位置,将采样点与透镜出射端面的距离定义为焦距,沿光轴取焦点前后大于最大场强值的 50% 的采样点横坐标宽度作为焦深。在如图 1 所示的光子晶体模型中,引入从左向右水平入射的平面波,波长为 1731 nm,从而得到归一化的频率 $a/\lambda = 0.26$,此频率与参考文献[2]中的梯度折射率光子晶体透镜一致。首先,选取固定的 $\Delta r = 0.05a$,应用 MSM 方法,分别对轴向层数 $M=3, 5, 7, 9$ 和 11 的光子晶体透镜进行了数值模拟,得出 TE 模磁场(磁场沿空气柱的方向,在计算过程中都只对 TE 模态的磁场进行模拟)分布的稳态场场强分布。结果如图 2 所示。

图 2 轴向不同层数 M 的光子晶体透镜的磁场稳态分布Fig. 2 Steady state magnetic-field distribution for the PC lens with different axial layer number M

通过对比发现,在孔径变化速率不变的情况下,焦距随透镜轴向层数 M 的增加而减小,焦深变小,图 3 和图 4 分别给出了焦距和焦深的随透镜轴向层数 M 变化关系的曲线。

图 3 焦距和轴向层数 M 的关系Fig. 3 Relation between focal length and axial layer number M 图 4 焦深和轴向层数 M 的关系Fig. 4 Relation between focal depth and axial layer number M

其次,选取固定的轴向层数 $M=7$,分别对孔径变化速率 $0.046a, 0.050a, 0.054a$ 和 $0.057a$ 的光子晶体透镜进行了数值模拟,场强分布如图 5 所示。通过对比发现,在透镜轴向层数 M 不变情况下,焦距随透镜 y 方向孔径变化速率的增加而增大,焦深

图 5 y 方向不同空气孔径变化速率 Δr 的光子晶体透镜的磁场稳态分布Fig. 5 Steady state magnetic-field distribution for the PC lens with different change rates of the air hole's radius Δr

- 6 P. Vodo, P. V. Parimi, W. T. Lu, Focusing by planoconcave lens using negative refraction [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201108
- 7 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong, Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters [J], *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79~84
欧阳征标, 李景镇, 张道中, 多层光子晶体滤波器研究[J], *光学学报*, 2002, **22**(1): 79~84
- 8 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*, Analysis of photonic crystal filter[J], *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 700~703
朱志宏, 叶卫民, 季家榕等, 光子晶体滤波特性分析[J], *光子学报*, 2004, **33**(6): 700~703
- 9 Pottier Pierre, Gnan Marco, Rue Richard M. De La, Efficient coupling into slow-light photonic crystal channel guides using photonic crystal tapers [J], *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6569~6575
- 10 Kurt Hamza, D. S. Citrin, A novel optical coupler design with graded-index photonic crystals [J], *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 1532~1534
- 11 Centeno Emmanuel, Cassagne David, Graded photonic crystals [J], *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2278~2280
- 12 Centeno Emmanuel, Cassagne David, Jean-Paul Albert, Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals [J], *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(23): 235119
- 13 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*, Study of transmission characteristics of 2D photonic crystals by the finite difference time domain method [J], *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 511~515
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东等, 用时域有限差分方法研究二维光子晶体传输特性[J], *光学学报*, 2003, **23**(5): 511~515
- 14 Lee Chengkuo, Radhakrishnan Rohit, Chen Chiuchang, Resonant modes of two-dimensional photonic bandgap cavities determined by the finite-element method and by use of the anisotropic perfectly matched layer boundary condition [J], *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(8): 2316~2324
- 15 Hakansson Andreas, Sanchez-Dehesa Jose, Inverse designed photonic crystal de-multiplex waveguide coupler [J], *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 5140~5149
- 16 Hakansson Andreas, Cloaking of objects from electromagnetic fields by inverse design of scattering optical elements [J], *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 4328~4334

氮氢混合气氛对 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 铁电薄膜和粉末性能的影响王东生¹, 于涛², 胡安², 吴迪², 李爱东², 刘治国²

(1. 南京航空航天大学应用物理系, 南京 210016; 2. 南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 用金属有机物分解法分别制备了 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 薄膜和粉末样品。XRD 和 SEM 结果显示 SBT 粉末经历氮氢混合气氛 400℃ 退火处理后发生了还原反应, 金属 Bi 和 $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 析出, 成针状结构聚集在表面, 晶体结构没有被破坏。SBT 薄膜在 500℃ 退火处理时, 表面出现 Bi 的球形及针状结构聚集体, 相对于薄膜结构, SBT 粉末中的 Bi 元素在较低温度时更容易被还原。Bi 的大量缺失严重影响薄膜的铁电性能, 当退火时间为 5.5min 时, SBT 薄膜剩余极化强度 P_r 下降了约 43%, 但是在 10^9 极化反转后仍然保持了良好的抗疲劳特性; 退火时间超过 8.5min 时, 薄膜被击穿, 铁电性能消失。

关键词: SBT 铁电薄膜; 氮氢混合气氛; 还原; 退化

中图分类号: TH145; TN384

文献标识码: A

Effect of Forming Gas on Properties of $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ Ferroelectric Thin Film and PowderWANG Dong-Sheng¹, YU Tao², HU An², WU Di², LI Ai-Dong², LIU Zhi-Guo²

(1. Department of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) ferroelectric thin film and powder samples were fabricated by using metal-organic decomposition (MOD) method. XRD and SEM results show that SBT powders still remain polycrystalline perovskite structure and amounts of Bi and $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ are reduced from SBT annealed in the forming gas at 400℃. Spherical and needle structures form on the surface of SBT thin films annealed in the forming gas at 500℃. Bi element in powders is more easily reduced at lower temperature compared with that of thin films and form needle structures on SBT surface. Bi deficiency derived from forming gas annealing causes serious ferroelectricity degradation on the SBT capacitors. Annealed in the forming gas ambient at 400℃ for 5.5min, the remnant polarization of SBT films drop about 43%. If annealing time is longer than 8.5min, films are breakdown and ferroelectricity disappears totally. However, no obvious polarization fatigue with 10^9 electric field cycling could be observed.

Key words: SBT ferroelectric thin films; forming gas; reduction; degradation

用铁电薄膜材料研制的非挥发铁电随机存储器 (NVFFRAM) 和传统的半导体存储器相比, 具有非挥发性、耐辐射以及密度高的独特优点, 是一种理想的存储器^[1]。早期的铁电薄膜研究主要集中在 $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ 材料上, 1995 年, Araujo 等^[2] 发现了无铅 Bi 系层状钙钛矿氧化物 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 薄膜材料的抗疲劳极化反转次数高达 10^{12} , 且具有优越的保持性质和极低的漏电流, 由此引发了国内外对于 SBT 材料研究的热潮^[3,4]。无疑 SBT 是应用在 NVFFRAM 中一种理想的候选铁电薄膜材料, 但是要实现铁电薄

膜存储器的商业化还面临着严重的挑战。SBT 铁电存储器必须在含氢的还原性气氛中经历 300 ~ 500℃ 的高温退火处理过程, 这种处理会引发铁电薄膜性能的严重退化: 如 P_r 电极的脱落、漏电流的急剧增加、剩余极化强度 P_r 的显著降低等问题^[5]。目前研究工作重点主要集中在铁电性能退化机制的澄清以及铁电性能恢复方面, 也已经取得了一些较有价值的理论和实验成果, 如实验研究表明, 由于 SBT 薄膜中 Bi_2O_3 层在氢的作用下被还原, 导致了薄膜内部缺氧, 从而造成了薄膜铁电性能的退化, 退化的 P_r 可以通

收稿日期: 2008-09-22, 收到修改稿日期: 2008-12-03

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2006197)

作者简介: 王东生 (1970-), 男, 博士, 副教授。E-mail: wdsnju@sina.com

过在氧气气氛中退火处理后得到恢复,退火温度的高低也是影响薄膜性能的一个重要因素^[6-13]。理论研究还表明,还原反应中由于 O—H 键结合,造成铁电性能下降^[14-15]。应该说这些结果都有意义,但仅提供了间接证据。

为了在纳米尺度上提供更为直接的证据,本工作制备了相同化学成分的 SBT 薄膜和粉末样品进行对比实验研究,通过研究 SBT 薄膜和粉末在氮氢混合气氛中经历高温退火处理后结构、形貌、电性能的变化,为氢还原理论提供了更为直接的证据,并进一步分析了 SBT 铁电材料经历氮氢混合气氛退火后的退化机制。

1 实验

SrBi₂Ta₂O₉ (SBT) 薄膜和粉末样品采用金属有机物分解法制备,使用的金属有机源全为异辛酸盐,即异辛酸锶((C₇H₁₅COO)₂Sr)、异辛酸铋((C₇H₁₅COO)₃Bi)、异辛酸钽((C₇H₁₅COO)₃Ta),使用的溶剂是异辛酸(C₇H₁₅COOH)。为了弥补易挥发的 Bi 元素在制备过程中的损失,溶液中添加 10mol% 的过量异辛酸铋。SBT 溶液的一部分通过加热蒸馏去除挥发性物质得到 SBT 粉末样品,为促使晶化,将样品放在通入氧气的石英管式炉中经历了 1h 的退火处理,退火温度为 750℃。

采用甩胶的方法将 SBT 溶液的另外一部分涂在 Pt/TiO₂/SiO₂/Si 衬底上成膜,转速为 3000r/min,时间为 20s。在热台上先将甩胶后的湿膜烘烤 4min,使低沸点的溶剂挥发,得到干膜。然后放入预先升温到 750℃ 的石英管式炉中热分解,10min 后取出,重复甩胶、烘干和热分解过程,以增加膜厚。最后一层湿膜被烘干后,直接在 750℃ 退火处理 1h,就得到了结晶膜。上述过程中的热分解和退火处理过程都是在氧气气氛中进行的。用磁控溅射的方法外加小孔直径为 0.2mm 的不锈钢掩模板,将 Pt 沉积到薄膜的表面作为顶电极,制备了 Pt/SBT/Pt 结构薄膜电容用来测量电学性能。

所有样品的退火处理均在氮氢混合气氛(forming gas, 95% N₂ + 5% H₂)石英管式炉中进行,通过事先设定的智能程序控制退火处理温度,氮氢混合气氛的气体流量由玻璃转子流量计控制保持在 0.016m³/h。

用 X 射线衍射(XRD)方法确定薄膜的晶体结构,采用 $\theta \sim 2\theta$ 扫描,所用仪器是日本产的 Rigaku-D/Max-rA 转靶 X 射线衍射仪,光源为 CuK α 线(波长 $\lambda = 0.1542\text{nm}$)。采用日本产的 JEOL-JSM6300 扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜的表面形貌。使用美国 Radiant Technologies 公司生产的 RT66A 标准铁电测试仪测量薄膜的铁电性能。

2 结果和讨论

SBT 粉末样品经历氮氢混合气氛退火处理前后的结构变化由 XRD 谱确定,如图 1 所示。从图中可以看到,退火处理前,没有出现萤石、焦绿石等杂相,样品呈现标准的层状钙钛矿结构。(006)、(111)、(115)、(200)、(220)、(2010)、(315)和(2210)等诸多衍射峰的出现揭示了样品在随机取向状态下的多晶性。而(115)和(200)两峰强度明显高于(001)等峰,表明 SBT 呈现良好的铁电性能。因为高度的 *c* 轴取向会减弱 SBT 铁电材料的极化强度,所以在随机取向状态下样品晶面一般沿 *a* 轴或 *b* 轴方向,*c* 轴取向容易被抑制^[16-17]。经过 400℃ 氮氢混合气氛退火处理后,原有钙钛矿衍射峰的位置和强度并未发生变化,这表明样品的晶体结构在低于 400℃ 的氮氢混合气氛中不会遭受破坏。而众多 $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 及 Bi 的衍射峰的出现则表明 SBT 在 H₂ 的作用下发生了还原反应,其中沿着 *c* 轴的(Bi₂O₂)²⁺ 层部分被还原成 Bi₂O₃ 和 Bi。

为了确定还原出来的 Bi 的具体分布,对 SBT 粉末及薄膜表面形貌进行了观测,图 2 是 SBT 粉末在氮氢混合气氛退火处理前后的 SEM 图像。图 2(a) 显示未经退火处理的粉末中存在大量气孔,孔的直径范围在 0.1~0.6 μm 之间,这些气孔显然是在样品的晶化过程中形成的。图 2(b) 显示了粉末在氮氢混合气氛经历 400℃ 退火处理 1h 后的形貌,从图中箭头所指处可以观察到直径分别为 1.0 μm 和 0.5 μm 的针状结构,微区扫描 EDX 分析表明其主要成分是 Bi^[18],说明 SBT 中的氧化物和 H₂ 作用发生了还原反应,其中 Bi 被还原后会在粉末周围聚集并形成大小不一的针状结构。

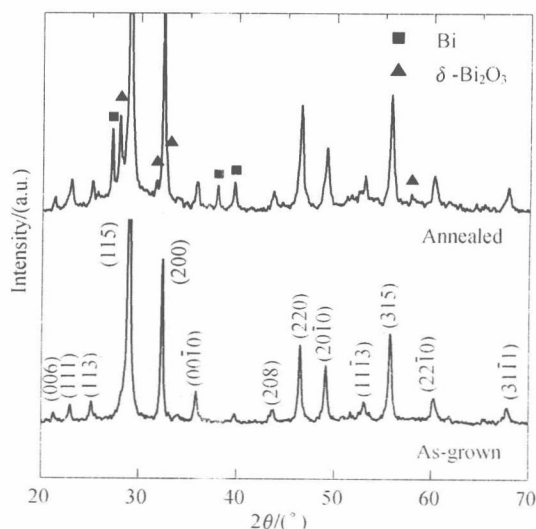


图1 SBT 粉末在 400℃ 氮氢混合气氛中退火处理 1h 前后的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of SBT powder annealed at 400℃ in the forming gas ambient for 1h

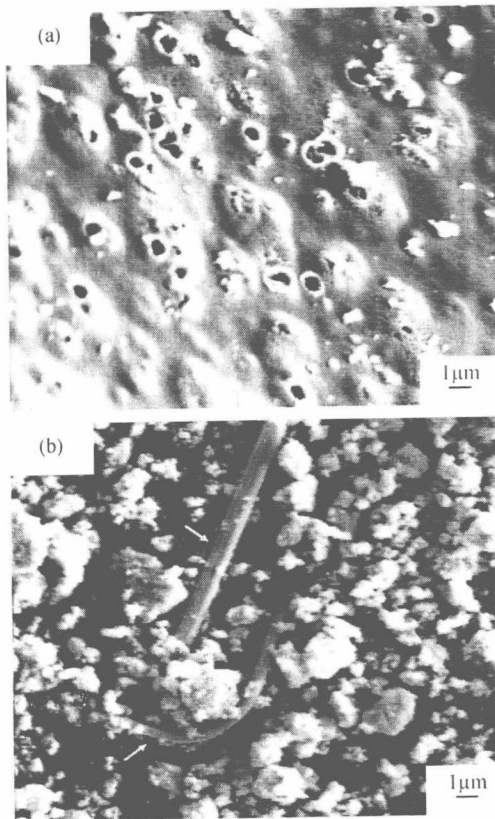


图2 SBT 粉末经氮氢混合气氛退火处理前后的 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of SBT powders annealed in the forming gas ambient

(a) As-grown; (b) Annealed at 400°C for 1h

相似的结果在薄膜样品中也被观察到,区别在于出现聚集体的退火温度有差异. 图3是 SBT 薄膜在氮氢混合气氛中不同温度退火处理后的 SEM 图像. 当退火温度为 400°C 时,可以观察到薄膜表面光滑,没有明显裂缝和空洞,紧密相连的椭球型晶粒大小约为 200nm. 但是当温度升高到 500°C 时,薄膜表面如箭头所指处出现了三种主要成分是 Bi 的不同形状的聚集体:第一种是尺寸较小的球形颗粒,直径约为 0.33μm;第二种是带须的尺寸较大的球形颗粒,直径约为 0.8μm;第三种是直径为 0.25μm 的针状结构. 晶粒之间的空隙明显增大,这是由于 SBT 薄膜中 Bi 的缺失造成的. 聚集体中的 Bi 一部分来源于 SBT 薄膜表面,由于退火温度远远高于金属 Bi 的熔点值 (271°C),还原出来的金属 Bi 会被熔化成液体形态,当温度降到室温后,一般容易形成球形结构. 而另外一部分 Bi 则来源于 SBT 晶粒内部和边界处,致密紧凑的 SBT 薄膜阻碍了 Bi 扩散到表面,被还原的 Bi 只能沿着晶粒边界扩散到 SBT 表面,所以最后只能形成针状结构,这也解释了为什么粉末出现 Bi 针状结构的退火温度要低于薄膜样品,因为粉末的松散程度远高于薄膜. 这表明 Bi 的还原行为除了与退火气氛和退火温度有关外,还与样品的致密度有关,很明显在较低温度时松散的粉末结构中的 Bi 更容易被还原

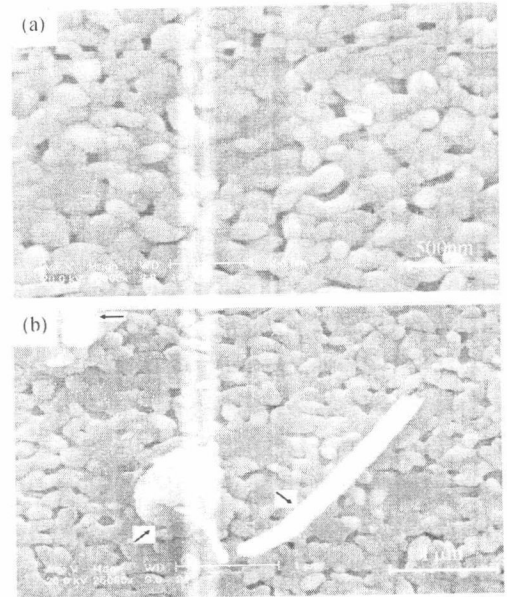


图3 SBT 薄膜在氮氢混合气氛中经不同温度退火处理后的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of SBT thin films annealed at different temperatures in the forming gas ambient for 1h

(a) 400°C; (b) 500°C

并在 SBT 表面聚集. 这些针状导电结构容易在 Pt/SBT/Pt 电容中形成短路点,从而造成 SBT 铁电电容漏电流的增大.

Bi 从 SBT 中还原出来并在薄膜表面聚集,将影响 SBT 薄膜电容器的铁电性能. 图4是厚度为 440nm 的 SBT 薄膜电容器在氮氢混合气氛中经历不同退火处理时间的电滞回线结果. 从图中可以看到未经退火处理的 SBT 具有形状对称、饱和度良好的电滞回线,剩余极化强度 P_r 和矫顽场 E_c 分别为 $6.669\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 和 $20.9\text{kV}/\text{cm}$. 经过 5.5min 退火处理后, SBT 薄膜的 P_r 和 E_c 变为 $3.773\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 和 $18.7\text{kV}/\text{cm}$,分别下降了约 43% 和 10%. 其原因在于 SBT 薄膜电容器的 P_r 和其内部的 Bi 含量有关^[19],由于相当数量的 Bi 在 H_2 的作用下从 SBT 薄膜中被还原出来,导致了 P_r 数值的急剧下降. 到达临界退火时间 7.5min 时,电滞回线变成了开口的近似椭圆形,表明 SBT 的铁电性能即将消失,说明了薄膜中 Bi 含量的进一步减少. 当退火时间达到 8.5min 时,还原出来的 Bi 形成的短路点增多,最终造成 SBT 薄膜电容器被击穿,铁电性能完全消失,无法测出其回线形状,这表明 SBT 薄膜铁电性能退化程度依赖于氮氢混合气氛退火时间的长短.

虽然经历氮氢混合气氛退火处理后, SBT 薄膜的 P_r 和 E_c 下降幅度较大,但是却对 SBT 铁电薄膜的疲劳特性没有影响. 图5是 SBT 薄膜经历氮氢混合气氛退火处理前后的疲劳特性曲线,从图中可以看到无论是否经历氮氢混合气氛退火处理,疲劳曲线均有一个先升后降的微小变化,但是整体上看近似一条直线,说明 SBT 在经历氮氢混合气氛退火处理前后经过

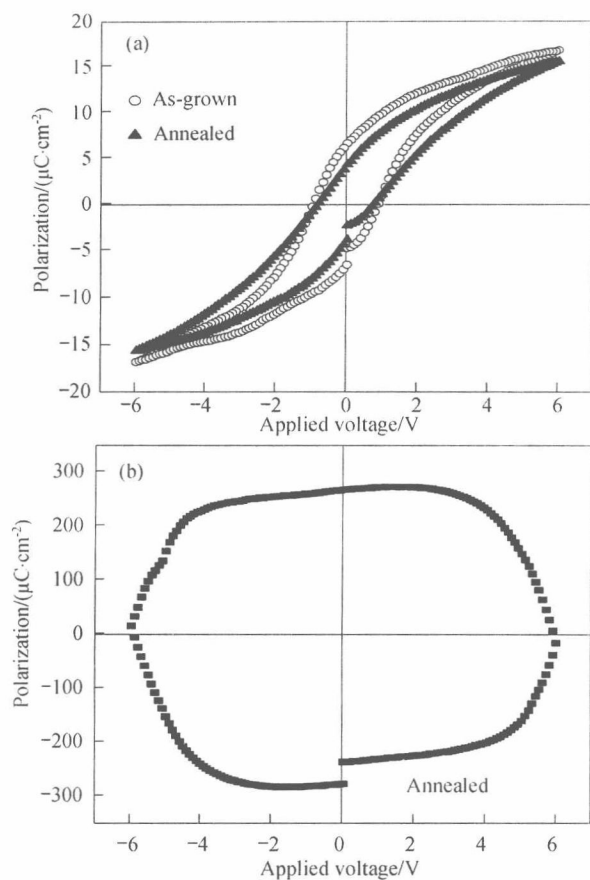


图4 氮氢混合气氛中440nm厚的SBT薄膜经历400℃退火不同时间后的电滞回线

Fig. 4 Hysteresis loops of 440 nm SBT thin films annealed at 400℃ in the forming gas ambient for different times

(a) 5.5min; (b) 7.5min

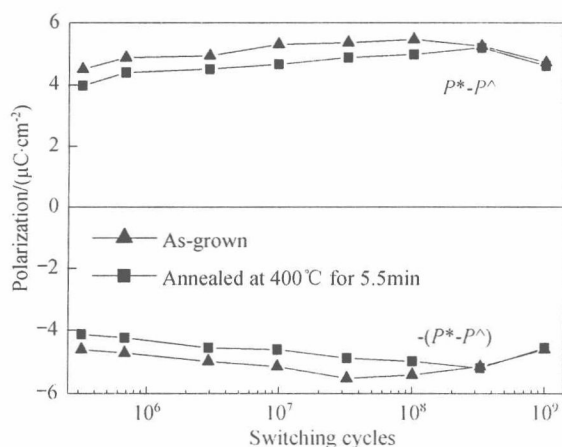


图5 厚度440nm的SBT薄膜经历400℃氮氢混合气氛退火前后的疲劳曲线

Fig. 5 Fatigue properties of 440nm SBT thin films annealed in the forming gas ambient

(a) As-grown; (b) Annealed at 400℃ for 5.5min

10^9 极化反转之后均保持了良好的抗疲劳特性,这源于漏电流增大导致 P_r 的增大和极化反转造成的 P_r 减小之间的竞争^[10]。

3 结论

用金属有机物分解法分别制备了 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 薄膜和粉末样品。样品在氮氢混合气氛中经历400℃以上的退火处理后,内部晶体结构没有发生明显变化,仍然保持典型的多晶钙钛矿结构,但是出现了被还原的 Bi 及 $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 相,被还原的金属 Bi 在粉末表面处聚集形成针状结构。500℃时来自于薄膜表面及晶粒内部的 Bi 在薄膜表面形成球形和针状结构。相对于致密的薄膜材料,松散的粉末结构更加有利于 Bi 的还原析出。还原反应造成了 SBT 薄膜内部 Bi 的缺失,严重影响了 SBT 薄膜的铁电性能,在氮氢混合气氛中经历 5.5min 的退火处理后,SBT 的剩余极化强度 P_r 和矫顽场 E_c 分别下降了约 43% 和 10%。当退火时间达到 8.5min 以后,SBT 的铁电性能完全消失。但是这并未对薄膜疲劳特性造成影响,退火处理后的 SBT 薄膜在经过 10^9 极化反转之后仍然显示出了良好的抗疲劳特性。

参考文献:

- [1] Scott J F, Araujo C A. *Science*, 1989, **246**(4936): 1400-1405.
- [2] Araujo C A, Cuchiaro J D, McMillan L D, et al. *Nature*, 1995, **374**: 627-629.
- [3] Amorin H, Kholkin A L, Costa M E V. *Mater. Res. Bull.*, 2008, **43**(6): 1412-1419.
- [4] Hai L V, Kanashima T, Okuyama M. *Integr. Ferroelectr.*, 2008, **96**(1): 27-39.
- [5] Hase T, Noguchi T, Mivasaka Y. *Integr. Ferroelectr.*, 1997, **16**(1): 29-40.
- [6] Han J P, Ma T P. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(9): 1267-1269.
- [7] Kwon O S, Hwang C S, Hong S K. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(4): 558-560.
- [8] Im J, Auciello O, Krauss A R. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(8): 1162-1164.
- [9] Shimakawa Y, Kubo Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(18): 2839-2841.
- [10] Wang D S, Yu T, Wu D, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(14): 2237-2239.
- [11] Hartner W, Bosk P, Schindler G, et al. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**(3/4): 571-579.
- [12] Moriyoshi C, Sugiura A, Itoh K, et al. *Ferroelectrics*, 2006, **339**(1): 1887-1893.
- [13] Ashikaga K, Takaya K, Kanehara T, et al. *Jpn. J. Appl. Lett.*, 2007, **46**(2): 695-697.
- [14] Xiong K, Robertson J. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(13): 2577-2579.
- [15] Xiong K, Robertson J, Clark S J. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(8): 083710-1-13.
- [16] Amanuma K, Hase T, Miyasaka Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(2): 221-223.
- [17] Desu S B, Vijay D P, Zhang X, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(12): 1719-1721.
- [18] Yu T, Wang D S, Wu D, et al. *Integr. Ferroelectr.*, 2000, **31**(1-4): 333-339.
- [19] Bu S D, Park B H, Kang B S, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(8): 1155-1157.

随机阿波罗网络的动力学同步研究

戴存礼^{1,2}, 刘曙娥¹Dai Cun-li^{1,2}, Liu Shu-e¹

1. 南京航空航天大学 理学院, 南京 210016

2. 南京农业大学 工学院, 南京 210031

1.College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2.College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

E-mail: daicunli@163.com

Dai Cun-li, LIU Shu-e. Dynamics synchronization of random apollonian networks. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(5): 50-52.

Abstract: Study a complex networks named Random Apollonian network (RAN) by using random interchange algorithm to change clustering coefficient C without changing its degree distribution, and find that with the decrease of clustering coefficient C the synchronizability increases in interval, but with the process going on, the synchronizability will decrease however.

Key words: random apollonian networks; clustering coefficient; eigenratio; synchronization

摘要:应用随机交叉边法在不改变网络度分布的情况下研究了随机阿波罗网络(Random Apollonian network)的拓扑结构与其上所加的动力学系统同步行为间的关系,发现在一定范围内,随着网络聚集系数的减小,网络的同步能力增加,但当继续减小聚集系数时,同步能力又会迅速减弱。

关键词:随机阿波罗网络;聚集系数;特征值比;同步

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.05.015 文章编号: 1002-8331(2009)05-0050-03 文献标识码: A 中图分类号: O469

1 引言

自然界中存在的大量复杂系统都可以通过形形色色的复杂网络加以描述^[1-3],而复杂网络的诸多统计特征中最重要的是小世界 (small world) 效应^[4]和无标度 (scale free) 特性^[5-9]。同步现象是宇宙中很普遍的现象,研究复杂网络同步的目的之一就是认识网络的拓扑结构如何影响加在其上的动力学过程,如交通堵塞、疾病传播等等,以方便人们更好地控制网络的同步。这方面的研究是近几年复杂网络研究的热点之一。目前虽然还没有完全确定的结论,但大部分研究表明,聚集系数是决定复杂网络同步能力的一个很重要的结构参数,而且很多研究^[6-8]表明大的聚集系数会阻碍复杂网络达到同步状态。一般的观点认为聚集系数越小,网络的同步能力越强。但通过本文的研究却发现,随机阿波罗 (RAN) 网络在一定范围内服从以上规律,但更大范围内却有别于一般结论。

2 模型

2.1 模型的建立

Random Apollonian network (RAN) 网络是由 Andrade 等人创建的, RAN 网络由一个节点分别为 1、2、3 的相互连接的三角形开始,每一次,随机选择一个三角形,把新的节点加入三

角形内部,并且让新的节点和这个三角形的三个顶点连接。图 1 显示了该模型的增长过程。4 幅图分别为 RAN 网络在 $t=1$ 、 $t=2$ 、 $t=3$ 和 $t=4$ 时网络的可能增长过程,在第一步时,第 4 个节点加入网络中,并且让它和 1、2、3 节点连接,在第二步时,选择了三角形 Δ_{134} ,将第 5 个节点加入该三角形中,并让它和节点 1、3、4 连接。在第三步,第四步分别选择了 Δ_{234} 和 Δ_{124} ,让第 6、7 个节点加入其中,继续这样的过程,就可以得到网络规模 N 为任意值的 RAN 网络。

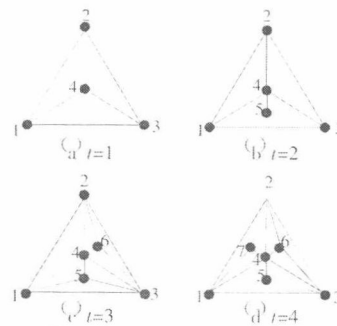


图 1 RAN 网络的增长过程图

基金项目: 南京农业大学青年科技创新基金 (No.KJ08031); 南京航空航天大学引进人才科研基金 (No.S0709-081)

作者简介: 戴存礼 (1980-), 女, 助教, 主要研究领域为复杂网络; 刘曙娥 (1977-), 女, 博士, 讲师, 主要研究领域为凝聚态物理

收稿日期: 2007-10-15 修回日期: 2007-12-28

2.2 模型的一些性质

周涛^[10]等人的研究发现, RAN 网络同时具有无标度特性和小世界效应这两个复杂网络的所具有的共同特性, 其无标度性由图 2 所示, 从图中可以看出当 RAN 网络规模比较大时, 该网络节点的度服从幂律分布, 近似满足式 (1), 式 $\gamma = (3N-5)/N \approx 3$, 中, 这个结果可以由数值模拟及理论分析两方面得出, 详见参考文献^[10]. 图 2 中 $p(k)$ 是度为 k 的节点的数目, 图中虚线斜率为 2.5, 用于比较, 网络规模 $N=2\ 000$.

$$p(k) \propto k^{-\gamma} \quad (1)$$

图 3 为 RAN 网络聚集系数 C 随网络规模 N 变化的关系图, 从图中可以看出, 随 N 的增加, 该网络的聚集系数 C 基本保持 0.76 左右而不发生变化, 该网络的聚集系数比较大且平均距离比较小, 所以该网络具有小世界效应, 理论分析可得该网络的聚集系数可表示为式 (2), 理论结果与数值模拟结果很接近.

$$C = \frac{46}{3} - 36 \ln \frac{3}{2} \approx 0.74 \quad (2)$$

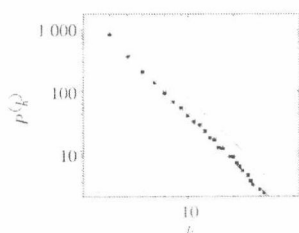


图 2 RAN 网络度分布曲线

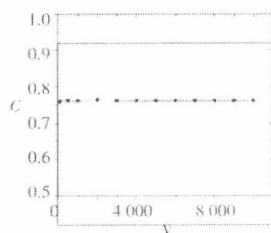


图 3 RAN 网络 C 与 N 的关系
(图片选自参考文献^[10])

3 复杂网络的同步

研究复杂网络的动力学同步一般是采取研究节点与节点间的耦合矩阵特征值的办法. 如果在网络的每个节点上加上一个动力学系统, 这个动力学系统既可以是极限环也可以是混沌的; 而让有边相连的两个节点的动力学系统之间存在相互的耦合作用, 就形成了一个动力学网络. 严格地说, 设网络有 N 个节点, 第 i 个节点在 n 时刻的 m 维状态变量是 $x_i(n)$. 单个节点在不考虑耦合作用时所满足的状态方程可表示为式 (3):

$$\dot{x}_i^{(n+1)} = F(x_i^{(n)}) \quad (3)$$

设 H 是每个节点状态变量的函数, 用于对其它节点进行耦合. 这样, 在存在耦合作用的情况下, 第 i 个节点所满足的状态方程表示为式 (4):

$$\dot{x}_i^{(n+1)} = F(x_i^{(n)}) + \eta \sum_j G_{ij} H(x_j^{(n)}) \quad (4)$$

对于连续系统, 第 i 个节点所满足的状态方程如式 (5):

$$\dot{x}_i = F(x_i) + \eta \sum_j G_{ij} H(x_j) \quad (5)$$

其中 η 是耦合强度, G_{ij} 表示耦合矩阵 G 的矩阵元, 定义如式 (6):

$$G_{ij} = \begin{cases} k_i, & i=j \\ -1, & j \in A_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中 k_i 是节点 i 的度, A_i 是与节点 i 相邻的节点的集合. 耦合矩阵 G 包含了网络结构的全部信息. 在耦合的作用下, 经过一段时间的演化, 使得 $x_1 = x_2 = \dots = x_N$, 网络就进入了同步状态. 由于 RAN

网络的耦合矩阵是拉普拉斯矩阵, 它有且仅有一个重数为 1 的零特征根 θ_1 , 而其余的特征值均为非负实数. 因此, 特征值按大小可排列为 $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_{N-1}$. 最大特征值 θ_{N-1} 与最小非零特征值 θ_2 的比值经常用来衡量网络的同步能力^[11], 如果耦合矩阵的特征值比 $R = \theta_{N-1}/\theta_2$ 满足式 (7), 网络就达到了同步状态, 式 (7) 右边是由单个节点的状态方程和变量的耦合方式决定的, 而特征值比 R 仅依赖于拉普拉斯矩阵 G , 所以特征值比 R 可以描述网络的同步能力, 特征值比 R 越小, 它能使更多的动力学系统同步, 我们说这样的网络同步能力越强.

$$R < \alpha_2 / \alpha_1$$

4 随机交叉边法

为了观察网络结构对其上动力学同步行为的影响, 利用随机交叉边法来改变网络的聚集系数.

随机交叉边法步骤 (如图 4 所示):

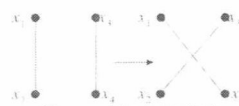


图 4 随机交叉边法

(1) 随机选择网络中的两条边, $e_1 = x_1 x_3$, $e_2 = x_2 x_4$, 要求 $x_1 \neq x_2 \neq x_3 \neq x_4$, 并且节点 x_1 与 x_4 和 x_2 与 x_3 之间没有边相连;

(2) 交叉这两条边, 即连接 x_1 与 x_4 和 x_2 与 x_3 , 并去掉原来的两条边 e_1 和 e_2 ;

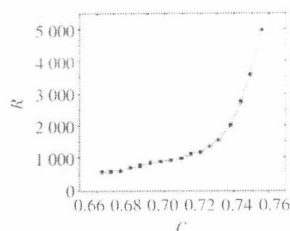
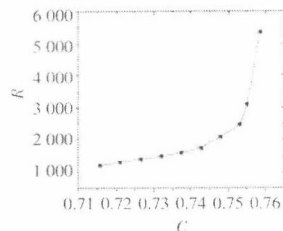
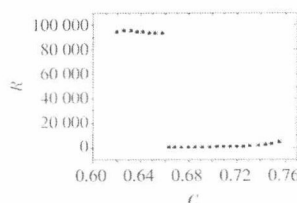
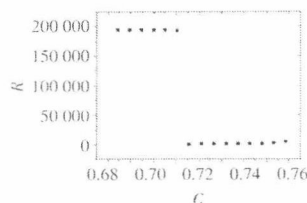
(3) 保证网络依然连通并计算这种交叉边是否提高/降低网络的聚集系数, 如果是, 就保留这种新的网络构型, 否则就恢复为原有的网络构型;

(4) 重复 1~3 步直到达到所需的聚集系数.

该操作在改变了簇系数的同时也改变了网络的平均距离, 但每一节点的度保持恒定, 从而保证了网络的度分布不发生改变.

5 研究结果

图 5 为网络规模 $N=1\ 000$ 时聚集系数与特征值比之间的关系图, 从图中可以看出, 在一定范围内, 特征值比随聚集系数的增加而增加, 在聚集系数为 0.66~0.73 左右时特征值比随聚集系数的变化比较缓慢, 当聚集系数大于 0.73 时, 特征值比随聚集系数的变化非常迅速, 图 6 为 $N=2\ 000$ 时的结果, 与 $N=1\ 000$ 时虽然具体数据有所不同, 但总体变化规律很相似, 说明在一定范围内, 减小聚集系数, 可以在一定程度上增强网络的同步能力, 也说明大的聚集系数会阻碍网络的同步, 因为聚集系数越大, 信息交流会出现阻塞, 因而同步能力也会减弱. 这与目前大部分的研究结果符合, 但是不是聚集系数越小同步能力就越强呢? 对于 RAN 网络的研究结果发现结果并非如此, 如图 7、8 所示, 该图在较大范围内, 聚集系数与特征值比之间的关系图, 从图 7 中可以看出, 随聚集系数的减小, 特征值比也随之减小, 但当聚集系数达到 0.66 附近时, 如果继续减小聚集系数, 特征值比就不会继续减小反而迅速上升到一很大的值并且在一定范围内保持该值不变. 图 8 也显示了相同的规律, 只是因为网络规模 N 的不同, 特征值比的行为突变点有所不同, 其值较 $N=1\ 000$ 时的 0.66 稍大. 因此可以发现, 过大的聚集系数确

图5 $N=1000$ 时 R 与 C 的关系图6 $N=2000$ 时 R 与 C 的关系图7 $N=1000$ 时 R 与 C 的关系图8 $N=2000$ 时 R 与 C 的关系

实会阻碍网络达到同步状态,但并不是聚集系数越小同步能力越强,聚集系数过小时,会使网络的同步能力减弱,这可能是因为聚集系数越大,信息交流会出现阻塞,因而同步能力也会减弱。但若过小,虽然不会出现阻塞现象,但节点间的信息交换能力会下降,故同步能力可能会比大聚集系数时还要弱。

6 结束语

以上对复杂网络聚集系数与其同步能力间关系的研究发现,在度分布不变的情况下,对 RAN 网络而言,并不是聚集系数越小同步能力越强,而是有一定的转折点,转折点以下继续减小聚集系数反而会使同步能力减弱。这一特点是所有复杂网

络共有的还是 RAN 网络特有的还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74: 47-97.
- [2] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45: 167-225.
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [4] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.
- [5] Barabási A L, Albert R, Jeong H. Mean-field theory for scale-free random networks[J]. Physica A, 1999, 272: 173-192.
- [6] McGraw P N, Menzinger M. Clustering and synchronization of oscillator networks[J]. Physical Review E, 2005, 72.
- [7] Zhou T, Zhao M, Wang B H. Better synchronizability predicted by crossed double cycle[J]. Physical Review E, 2006, 73.
- [8] Zhao M, Zhou T, Wang B H, et al. Relations between average distance, heterogeneity and network synchronizability[J]. Physica A, 2006, 371: 773-780.
- [9] Andrade Jr J S, Herrmann H J, Andrade R F S, et al. Apollonian networks: simultaneously scale-free, small world, euclidean space filling, and with matching Graphs[J]. Physical Review Letters, 2005, 94.
- [10] Zhou T, Yan G, Wang B H. Maximal planar networks with large clustering coefficient and power-law degree distribution[J]. Physical Review E, 2005, 71.
- [11] Pecora L M, Carroll T L. Master stability functions for synchronized coupled systems[J]. Physical Review Letters, 1998, 80: 2109-2112.
- [12] Katcher D P, Sathaye S S, Strosnider J K. Fixed priority scheduling with limited priority levels[J]. IEEE Transactions on Computers, 1995, 44: 1140-1144.
- [13] 宾雪莲, 杨玉海, 金士尧. 一种有限优先级的静态优先级分配算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 815-822.
- [14] Bini E, Buttazzo G C. Schedulability analysis of periodic fixed priority systems[J]. ACM, 2004, 1-12.
- [15] Bini E, Natale M D, Buttazzo G. Sensitivity analysis for fixed-priority real-time systems[J]. Real-Time System, 2008, 39: 5-30.
- [16] Krishna C M, Shin K G. Real-time systems[M]. S. I. The McGraw-Hill Companies, Inc, 1997.
- [17] Audsley N, Burns A, Richardson M, et al. Applying new scheduling theory to static priority pre-emptive scheduling[J]. Software Eng J, 1993, 8(5): 284-292.
- [18] 伍微, 刘小汇, 李峥嵘, 等. 实现定点 DSP 汇编层反正切函数的差分进化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 5(27): 926-928.
- [19] Myung S, Yang K. Extension of Quasi-cyclic LDPC codes by Lift-ing[C]. Proc Int Symp Information Theory, Sept. 4-9, 2005: 2305-2309.
- [20] Kim S, No J S, Chung H, et al. Quasi-cyclic low-density parity-check codes with girth larger than 12[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2007, 53: 2885-2891.
- [21] Tanner R M, Sridhara D, Fuja T E. A class of group-structured LDPC codes[C]. Proc Int Conf Inf Syst Technol Its Appl, 2001-07.
- [22] Myung S, Yang K, Kim J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51: 2894-2901.

(上接 35 页)

参考文献:

- [1] Oshana R. DSP software development techniques for embedded and real-time systems[M]. S. I. Newnes, 2005.
- [2] Cedeno W, Laplante P A. An overview of real-time operating systems[J]. Journal of the Association for Laboratory Automation, 2007, 1(12): 40-45.
- [3] 邢建生, 王永吉, 刘军祥, 等. 一种静态最少优先级分配算法[J]. 软件学报, 2007, 18(7): 1844-1854.
- [4] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment[J]. Journal of the ACM, 1973, 20(1): 40-61.
- [5] Lehoczy J, Sha L, Ding Y. The rate monotonic scheduling algorithm: exact characterization and average case behavior[C]. Real Time Systems Symposium, 1989: 166-171.

(上接 42 页)

- [11] Tanner R M, Sridhara D, Fuja T E. A class of group-structured LDPC codes[C]. Proc Int Conf Inf Syst Technol Its Appl, 2001-07.
- [12] Myung S, Yang K, Kim J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51: 2894-2901.