

# 2019 年国家自然科学奖提名公示

## 一、项目名称

中文名称：复杂氧化物低维体系激光法制备及其电磁光新奇物理特性研究

英文名称：Physical property study on low dimensional perovskite oxide

## 二、提名单位意见

项目主要完成人自 1998 年起致力于“复杂氧化物低维体系激光法制备及其电磁光新奇物理特性研究”。该项目组主要科学发现和贡献为：

1) 发展了具有原子级明锐界面的氧化物薄膜和异质结可控生长方法，在国际上首次实现了多种钙钛矿氧化物薄膜和异质结的外延生长。提出的生长方法获得了包括美国橡树岭国家实验室 Plummer 院士和劳伦兹伯克利实验室 Ramesh 院士等同行的多次引用，并在研究中使用。设计的激光分子束外延设备已经被美国、新加坡及国内的 20 余所大学和科研院所采用，推动了该研究领域的发展。

2) 首次发现了基于铋铁氧薄膜的具有二极管反转特性的铁电存储效应，将传统的极化读写模式推进到电阻读取层次。国际铁电存储器之父 Scott 教授在题为“新兴存储器”的综述中高度评价该发现为“电阻存储器上的最新突破”。美国 Ramesh 院士在综述中评价，该发现为发展新的读写原理存储器提供了机遇。推进了氧化物物理到存储器件实现的进程。

3) 首次发现了氧化物异质结中新奇的正磁电阻和超快光电效应，揭示了界面诱导其新奇物性的内在物理机制。提出的理论成为国际同行研究低维氧化物新奇物理现象的重要依据之一。首次研制出新型高灵敏度的钙钛矿氧化物可见盲和日盲光电探测器。美国《激光聚焦世界》在新突破中报道了项目组首次研制出钙钛矿氧化物的光电探测器。

项目组 8 篇代表性论文被他人引用 800 余次。国际学术会议邀请报告 80 余次；受邀在国际刊物上撰写综述性文章 30 余篇；获得新材料、新器件及其制备方法的授权发明专利 40 余项。项目组成员因此曾获得多种荣誉；部分早期工作获 2005 年北京市科学技术一等奖。

鉴于此，中国物理学会郑重提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

### 三、项目简介

钙钛矿氧化物因其丰富的物理性质和多自由度可调控的功能，从上世纪 80 年代开始引起科学界兴趣，尤其是近十年来伴随界面诱导新奇物性的发现，氧化物低维体系的多自由度调控和多功能性不仅引起国际上广泛关注，也是下一代多功能器件的重要候选。然而由于低维氧化物复杂体系在制备生长中的精准控制难于实现，及多关联性导致的物理机制的内在复杂性，使得基于氧化物的功能实现和调控面临系列挑战。项目组率先发展了具有原子级明锐界面的氧化物薄膜和异质结的可控生长与制备技术；提出并发现了基于铋铁氧薄膜的具有二极管反转特性的铁电存储新原理与功能，将传统的铁电存储的极化读写模式，提升到了电阻读取层次；发现并揭示了奇异正磁电阻、铁电电阻存储和光电效应等的内禀机制，推动了钙钛矿氧化物向多功能器件如铁电存储器、光电探测器等发展的研究进程。主要科学发现点如下：

1、发展了具有原子级明锐界面的氧化物薄膜和异质结的可控生长与制备方法。在国际上首次实现了十余种钙钛矿氧化物薄膜和异质结原子尺度控制的外延生长。观测到了上千周期的 RHEED 强度振荡，与同期国际报道相比，为最高指标。项目组报道的生长方法和技术被以著名薄膜领域专家美国 Plummer 院士和 Ramesh 院士为代表的国际同行广泛引用和借鉴，引领了氧化物薄膜异质结的研究，奠定了氧化物多功能器件的发展基础。由项目组设计的激光分子束外延设备已经被美国、新加坡、香港和大陆 20 余所大学和科研院所使用，推动了该领域的研究进程。

2、发现了基于铋铁氧薄膜的具有二极管反转特性的铁电存储效应，揭示了其内在机制为电场诱导下界面肖特基势垒变化，该发现在国际上引起重要影响，国际铁电存储器之父，Scott 教授在综述文章中重点评价，认为该发现获得电阻存储器几项最新突破。美国 Ramesh 院士在综述中认为该发现为发展新的读写原理的存储器提供了机遇。该系列工作推进了氧化物物理到存储器件的研究进程。

3、发现了氧化物异质结中新奇的正磁电阻和超快光电效应，建立了相应理论模型和计算方法，揭示了界面诱导其新奇物性的物理机制，从而实现了多种异质结优化性能的结构设计。提出的磁电阻界面机制成为国际同行理解氧化物界面新奇物理现象的重要依据之一，带动了国际相关研究。基于该发现，项目组首次在国际上研制了新型高灵敏度的钙钛矿氧化物可见盲和日盲光电探测器，不仅对火箭预警等具有重要意义，且为实现新一代氧化物多功能光电器件开辟了新途径。美国《激光聚焦世界》在新突破中报道了项目组首次研制出钙钛矿氧化物的光电探测器。

项目组 8 篇代表性论文被 SCI 他引 733 次、国际会议邀请报告 80 余次、拟写综述性文章 30 余篇，获新原理、新器件及其制备方法的授权发明专利 40 余项。部分早期工作获 2005 年北京市科学技术一等奖。项目组第一完成人 2010 年被评为全国优秀科技工作者，2011 和 2012 年分别当选英国和美国物理学会会士（IOP Fellow and APS Fellow），获中国物理学会谢希德物理奖。

## 四、客观评价

(一)项目组发现点 2 关于铁电薄膜忆阻效应及其机制的工作在国际上产生重要影响，被包括国际铁电存储器之父的众多国际专家评价为“突破”代表译文：

国际铁电存储器之父，Scott 教授在 Rep. Prog. Phys. 75 (2012) 076502 关于新兴存储器的综述性文章中多次高度评价项目组工作为“电致存储器上的最新突破：非常好的存储是另一项突破的实现【156】，而更重要的，它是和 CMOS 可集成的真正的 TE，而不像 CAFM 针尖那样。。最新的一个突破表明这样的转换材料不需要高绝缘性，这样真正的铁电电阻存储就可以不基于 CFs，而是在 SBH 上铺遍整个面积【156】。。该突破证明真正的铁电电阻存储器不是基于导电通道变化，而是在整个区域内均一的肖特基势垒变化”（156 为论文 2）。磁电耦合领域最具影响之一科学家，Ramesh 院士在其综述文章 Rev Mod Phys 84, 119 (2012) (IF 33) 中高度评价该发现：“原先曾经被激烈争论过，认为薄膜导电对存储器(1T1C)读写有害，Jiang 等人反而利用薄膜的导电性，为发展新的读写原理的存储器提供了机遇(论文 2)。P. L. Varo 等在综述 Phys. Rep. 653 1-40 (2016) (IF 16.24)，即引文 1 中重点介绍项目组论文 1 “王等在实验上的系列工作（论文 1）发现了铁电极化能够调控金属与铁电薄膜界面的肖特基势垒，进而获得了铁电薄膜中可翻转的整流电性。。”。Tom. Wu 等在综述文章 APPL. Phys. Rev. (IF 14.31)，即引文 2 中重点点评论文 1：“王等在 BFO 薄膜上实现了非常有趣的电阻反转效应（133），他们发现了电极化调控的电导行为，包括反转二极管效应和铁电诱导电致电阻效应，如图 12 所示”文献 133 和图 12 均为论文 1。D. R. Stewart 等在 Nature Nanotech 8, 13-24, (2013) (IF 35.27) 的综述（引文 3）中重点点评论文 2“铁电隧道节，突出的例子是铁电反转器（97），作为隧穿结中的通道势垒，铁电体中电场导致的极化反转改变了界面导输运性质，以及其导通电流和器件电阻”(97 为论文 2)。Tsymbal, Y 等在 PRL 109, 247601 (2012)，即引文 4 中指出项目组工作在铁电转换中的重要意义：“铁电转换可以通过施加随时间上升足够快的偏压实现，最近一个卓越的工作就是在半导体铁电材料 BFO 中的电阻切换行为(23)”（23 为论文 2）。M. Alexe 等在 Adv. Mater. 26, 7078 2014 (IF 18.9) 即引文 5 中指出该工作的重要性：“室温下，电容电导以一个大约 35%变化的电流分别在两个稳定的高低电流态间转换，见图 2a，大大地再现前面 BFO 的薄膜电致电阻效应的结果（18）”（图 2a 及文献 18 均为论文 2）。

(二) 发现点 3 氧化物正磁电阻及光电效应工作产生重要国际影响。代表摘译：

国际著名领域专家 J. G. Ekerdt 等在其综述性文章 Appl. Phys. Rev 2 41301 2015 (IF 14.3 (引文 6)中重点以项目组工作为代表论述领域进展：“在持续 20 多年的氧化物薄膜生长技术的发展中，氧化物异质结和超晶格的生长已经使得氧化物薄膜和超晶格具有联合的磁、电、光多种功能性（29）”（29 即论文 4）。Thakare 等 (APL 100, 172412 (2012)) 中重点论述依据项目组提出理论机制：“正磁阻(MR)已经在掺杂钛酸锶(Nb-STO)和 LSMO 异质结中被报道，异质结界面处的电子相互作用被认为是引起正磁电阻的原因[15]...这方面研究工作可以从金的工作中获得线索[15]...自旋向上的电子被  $t_{2g}$  自旋向下的电子散射而导致正磁阻效应[15]”（文献 15 为论文 3）。Vachhani 等 (APL 92, 043506 (2008)) 认为论文 3 报道了最具冲击力的结果：“无论如何，在  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$

(LSMO)/0.01 wt % SNT0 p-n 结上观察到了 p-n 结**最具冲击力的特性**，文献[6]报道了一个大的正磁电阻变化率：在 255 K 为 94%，290 K 为 26%。大的正磁电阻变化率改进了器件的场灵敏度，不同机制的假设已被用于解释所观测到的大的正磁电阻变化率[7]。（即论文 4 和 3）。著名专家 **H. L. Tuller** 等在 **Adv. Mater. 23 4543 2011**（引文 7）中以**论文 4 工作为领域进展**，摘录译文如下：“复杂氧化物薄膜最新的进展例如 PLD 和 MBE 已经激发了由制备生长氧化物超晶格或特殊界面所促成的关于电的、磁的、和离子性的新奇特性研究[12]。。。 ” 12 是论文 4。

Wang 等评价项目组光电工作时称“为国际上最高的光电灵敏度，**60mV/mm** 被金的小组在氧化物异质结（LSMO）中获得（Wang., IEEE ED 33, 414 (2012)）。 **Laser Focus World 45, No.7 (2009)**，对项目组发现点 3 作为新突破转载报道，称：“中国的研究者第一次制造出了基于钙钛矿氧化物的 **LaAlO<sub>3</sub>** 日盲光电探测器”。

（三）发现点 1 激光法生长获得国际高度评价，和借鉴使用。例如：

国际铁电薄膜领域著名专家劳伦兹伯克利国家实验室 **Ramesh** 院士在他的文章“(APL 92, 202113)中重点借用项目组报道的生长中界面应力调控的方法与结论：“STO 上的氧化物薄膜倒易空间 013 峰揭示了所有厚度的薄膜在 a/b 方向上都与 STO 的晶格常数一致（但在其它衬底上却未必如此），但在面外的 c 轴方向却与 STO 的晶格常数相比变化了大约 2.5%，这一点与其它衬底一样（14 即论文 5）。”。薄膜领域国际著名专家 **Plummer** 院士（美国）在他的工作 **APL 91, 202901 (2007)** 中依据了项目组报道的生长中氧空位调控方法和结论：“外延生长的获得可以通过对薄膜化学计量的改变，例如，通过生长过程中低氧压来引入氧空位（14）。。。 ”（14 即论文 5）。领域著名专家 **L. Bellaiche** 在 **Phy. Rev. Lett. 91 11 (2003)**，即引文 8 中重点引用：“。。。这样，在大约 200K 下，会出现向另一个铁电相转化的二阶相变， $u_x > u_y = u_z$ ，这个相是三斜的（13）”13 为论文 6。

至今为止，项目组关于外延生长方法和结论仍在做为实验依据得到学者们借鉴，例如：**ACS Appl Mater. Inte. 8, 25379 (2016)** 中重点引用论文 5：“局域应力条件和热振动依赖于氧分压而变化（40），这应该是我们在所生长的薄膜里观测到的畴结构形成的原因。”文献(40)为论文 5。著名专家 **J. Fontcuberta** 在 **Adv. Electron. Mater. 1, 1500171 (2015)**中重点引用项目组关于氧化物体系生长条件选择的结论：“生长条件的选取已经被用来诱导面外原胞晶格参数的巨大改变，通常和氧八面体中氧空位的出现相关联（56）。。。 ”文献 56 是项目组论文 5。

2004 年科学院专家鉴定会认为：“在氧化物薄膜层状外延生长过程中，观测到上千周期 RHEED 强度振荡，这一关键技术达到目前国际最高水平。SCI 国际检索表明，该工作居于国际前列。”部分前期工作获 2005 年北京市科学技术一等奖。（附件评价 6、7、获奖证明）

## 五、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称/ 刊名/ 作者	年卷页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯作者 (含共 同)	第一作者 (含共 同)	国内 作者	SCI 他 引 次 数	他 引 总 次 数	论 文 署 名 单 位 是 否 包 含 国 外 单 位
1	Switchable diode effect and ferroelectric resistive switching in epitaxial BiFeO <sub>3</sub> thin films/Apl. Phys. Lett./ Can Wang, Kui-juan Jin, Zhong-tang Xu, Le Wang, Chen Ge, Hui-bin Lu, Hai-zhong Guo, Meng He, Guo-zhen Yang	2011 年 98 卷 192901 页	2011 年 05 月 10 日	Kui-juan Jin	Can Wang	王灿, 金奎 娟, 徐 中堂, 王乐, 葛琛, 吕惠 宾, 郭 海中, 何萌, 杨国 桢	180	180	否
2	A Resistive Memory in Semiconducting BiFeO <sub>3</sub> Thin-Film Capacitors/ Adv. Mater. /An Quan Jiang, Can Wang, Kui Juan Jin, Xiao Bing Liu, James F. Scott, Cheol Seong Hwang, Ting Ao Tang, Hui Bin Lu, Guo Zhen Yang	2011 年 23 卷 1277 页	2011 年 01 月 31 日	An Quan Jiang, James F. Scott, Cheol Seong Hwang	An Quan Jiang, Can Wang	江安 全, 王 灿, 金 奎娟, 刘小 兵, 唐 霆傲, 吕惠 宾, 杨 国桢	210	233	是
3	Positive colossal magnetoresistance from interface effect in p-n junction of La <sub>0.9</sub> Sr <sub>0.1</sub> MnO <sub>3</sub> and SrNb <sub>0.01</sub> Ti <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub> / Phys. Rev. B/ Kui-juan Jin, Hui-bin Lu, Qing-li Zhou, Kun Zhao, Bo-lin Cheng, Zheng-hao Chen, Yue-liang Zhou, Guo-Zhen Yang	2005 年 71 卷 184428 页	2005 年 05 月 31 日	Kui-juan Jin	Kui-juan Jin	金奎 娟, 吕惠 宾, 周 庆莉, 赵昆, 程波 林, 陈 正豪, 周岳 亮, 杨 国桢	67	79	否

4	Novel Multifunctional Properties Induced by Interface Effects in Perovskite Oxide Heterostructures/Adv. Mater./ Kui-juan Jin, Hui-bin Lu, Kun Zhao, Chen Ge, Meng He, Guo-zhen Yang	2009年 21卷 4636页	2009年 8月 12日	Kui-juan Jin, Hui-bin Lu	Kui-juan Jin	金奎 娟,吕 惠宾, 赵昆, 葛琛, 何萌, 杨国 桢	34	40	否
5	Thickness and oxygen pressure dependent structural characteristics of BaTiO <sub>3</sub> thin films grown by laser molecular beam epitaxy/J. Appl. Phys./ Tong Zhao, Fan Chen, Huibin Lu, Guozhen Yang, Zhenghao Chen	2000年 87卷 7442页	2000年 02月 10日	Tong Zhao	Zhenghao Chen	赵彤, 陈凡, 吕惠 宾,杨 国桢, 陈正 豪	71	86	否
6	Dielectric properties of Pb(Zr <sub>20</sub> Ti <sub>80</sub> )O <sub>3</sub> /Pb(Zr <sub>80</sub> Ti <sub>20</sub> )O <sub>3</sub> multilayered thin films prepared by rf magnetron sputtering/ Appl. Phys. Lett./ Can Wang, Q. F. Fang, Z. G. Zhu, A. Q. Jiang, S. Y. Wang, B. L. Cheng, Z. H. Chen	2003年 82卷 2880页	2003年 03月 06日	Can Wang	Can Wang	王灿, 方前 锋,朱 震刚, 王守 宇, 程柏 林,陈 正豪	54	54	是
7	Effects of interfacial polarization on the dielectric properties of BiFeO <sub>3</sub> thin film capacitors/ Appl. Phys. Lett./ Guo-Zhen Liu, Can Wang, Chun-Chang Wang, Jie Qiu, Meng He, Jie Xing, Kui-Juan Jin, Hui-Bin Lu, Guo-Zhen Yang	2008年 92卷 122903 页	2008年 03月 25日	Hui-Bin Lu	Guo-Zhen Liu	刘国 珍,王 灿,汪 春昌, 仇杰, 何萌, 邢杰, 金奎 娟,吕 惠宾, 杨国 桢	55	58	否
8	Linear and nonlinear optical properties of Ag nanocluster/BaTiO <sub>3</sub> composite films/ Appl. Phys. Lett. / Guang Yang, Weitian Wang, Yueliang Zhou, Huibin Lu, Guozhen Yang, Zhenghao Chen	2002年 81卷 3969页	2002年 9月 27日	Zhenghao Chen	Guang Yang	杨光, 王伟 田,周 岳亮, 吕惠 宾,杨 国桢, 陈正 豪	62	72	否

合 计	733	802	
-----	-----	-----	--

## 六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献
金奎娟	1		二级研究员	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	是项目发现点 1、2、3 的主要贡献者。建立了描述氧化物异质结磁、光、电场下自旋极化载流子运动规律的理论模型和计算方法，揭示了铁磁和非铁磁钙钛矿氧化物 p-n 异质结产生新奇正磁电阻的内在界面诱导机制；发现并揭示了铁电极化可翻转二极管效应和铁电电致电阻等效应内在物理机制；发现了界面诱导光电新奇效应。是代表性论文 1、3、4 的通信作者、3 的第一作者，2 和 7 的合作者。
吕惠宾	2		二级研究员	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	是项目发现点 1 和 3 的主要贡献者。1 生长出从几个原胞层到上万原胞层的氧化物薄膜、超晶格材料，观测到上千周期 RHEED 振荡；2 首次在全氧化物 p-n 结上观测到不同于体材和薄膜的反常低场高灵敏度正磁电阻效应；首次在钛酸锶单晶、掺杂镧锰氧化物体系观测到 ps 的超快光电效应。研制出氧化物可见盲和日盲光电探测器；代表性论文 7 的通讯作者、1-5 及 8 的合作者。
陈正豪	3		研究员	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	是项目发现点 1 和 3 的主要贡献者。1 研究钙钛矿氧化物的动力学过程和结构特性，获得动力学、应变、缺陷等重要信息；2 首次制备了 Te 掺杂 CMR 锰氧化物，并对其磁、电输运性质进行了研究；3 提出以铁电材料为载体，研制出 Au、Ag、(Au:Fe)/BaTiO <sub>3</sub> 等新型纳米金属团簇复合薄膜，并提出一种提高其 $\chi^3$ 优值比的新途径。是代表性论文 5 和 8 的通信作者。
杨国楨	4		院士	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	对发现点 1，组织项目组开展关于氧化物低维体系生长机理和方法的研究，使项目组成为国内率先在此领域开展研究的团队之一。对发现点 2 和 3，提出氧化物薄膜层状外延生长的光反射差法的研究和金属纳米团簇薄膜三阶非线性特性的研究构想，提出用多层模型和蒙特卡罗方法对薄膜的生长机制进行理论及氧化物薄膜新奇物性的理论研究思路，并以此带动了项目组后期一系列低维氧化物体系新型光、电、磁效应的实验发现和机理揭示。是代表性论文 1-5 和 7-8 的合作者。
王灿	5		研究员	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	是项目发现点 1 和 2 的主要贡献者。在项目中主要负责激光分子束外延方法生长多铁性 BiFeO <sub>3</sub> 外延薄膜和异质结等，首次发现了受铁电极化方向控制的可翻转二极管效应和铁电电致电阻等效应，并揭示了相关功能特性的物理机制。代表论文 1 和 6 的第一作者、论文 6 的通讯作者、论文 2 的共同第一作者。

## 七、完成人合作关系说明

五名主要完成人金奎娟、吕惠宾、陈正豪、杨国桢、王灿均属中国科学院物理研究所同一课题研究组，从 1998 年起即长期开展合作研究工作。

1、主要完成人金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿自 2002 年起合作至今，作为合作者于 2011 年发表代表性论文 1；

2、主要完成人金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿自 2002 年起合作至今，作为合作者于 2011 年发表代表性论文 2；

3、主要完成人金奎娟、吕惠宾、陈正豪、杨国桢自 1998 年起合作至 2005 年，作为合作者于 2005 年发表代表性论文 3；

4、主要完成人金奎娟、吕惠宾、杨国桢自 1998 年起合作至今，作为合作者于 2009 年发表代表性论文 4；

5、主要完成人吕惠宾、陈正豪、杨国桢自 1998 年起合作至 2005 年，作为合作者于 2000 年发表代表性论文 5；

6、主要完成人陈正豪、王灿自 2002 年起合作至 2005 年，作为合作者于 2003 年发表代表性论文 6；

7、主要完成人金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿自 2002 年起合作至今，作为合作者于 2008 年发表代表性论文 7；

8、主要完成人吕惠宾、陈正豪、杨国桢自 1998 年起合作至 2005 年，作为合作者于 2002 年发表代表性论文 8。

## 完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文合著	金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿/1、2、4、5	2002年至2018年	Switchable diode effect and ferroelectric resistive switching in epitaxial BiFeO <sub>3</sub> thin films	代表性论文 1	
2	论文合著	金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿/1、2、4、5	2002年至2018年	A Resistive Memory in Semiconducting BiFeO <sub>3</sub> Thin-Film Capacitors	代表性论文 2	
3	论文合著	金奎娟、吕惠宾、陈正豪、杨国桢/1、2、3、4	1998年至2005年	Positive colossal magnetoresistance from interface effect in p-n junction of La <sub>0.9</sub> Sr <sub>0.1</sub> MnO <sub>3</sub> and SrNb <sub>0.01</sub> Ti <sub>0.99</sub> O <sub>3</sub>	代表性论文 3	
4	论文合著	金奎娟、吕惠宾、杨国桢/1、2、4	1998年至2018年	Novel Multifunctional Properties Induced by Interface Effects in Perovskite Oxide Heterostructures	代表性论文 4	
5	论文合著	吕惠宾、陈正豪、杨国桢/2、3、4	1998年至2005年	Thickness and oxygen pressure dependent structural characteristics of BaTiO <sub>3</sub> thin films grown by laser molecular beam epitaxy	代表性论文 5	
6	论文合著	陈正豪、王灿/3、5	2002年至2005年	Dielectric properties of Pb(Zr <sub>20</sub> Ti <sub>80</sub> )O <sub>3</sub> /Pb(Zr <sub>80</sub> Ti <sub>20</sub> )O <sub>3</sub> multilayered thin films prepared by rf magnetron sputtering	代表性论文 6	
7	论文合著	金奎娟、吕惠宾、杨国桢、王灿/1、2、4、5	2002年至2018年	Effects of interfacial polarization on the dielectric properties of BiFeO <sub>3</sub> thin film capacitors	代表性论文 7	
8	论文合著	吕惠宾、陈正豪、杨国桢/2、3、4	1998年至2005年	Linear and nonlinear optical properties of Ag nanocluster/BaTiO <sub>3</sub> composite films	代表性论文 8	