

Progress on Single Crystals in Substrate Materials

Jingcun Zang

College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Email: zangjc@bjut.edu.cn

Received: Mar. 15th, 2011; revised: Mar. 28th, 2011; accepted: Apr. 1st, 2011.

Abstract: The latest research progress on single crystals in substrate materials was described. In this paper using and application of single crystal substrates in fluorescence, optico-electronics, magnium, superconductor, optical ferro-electrical materials are introduced.

Keywords: Single Crystal; Substrate; Optico-Electronics; Film; Epitaxy

方兴未艾的单晶衬底材料

臧竞存

北京工业大学材料科学与工程学院, 北京

Email: zangjc@bjut.edu.cn

收稿日期: 2011年3月15日; 修回日期: 2011年3月28日; 录用日期: 2011年4月1日

摘要: 介绍了作为衬底材料的一系列单晶的使用状态及其在发光材料、光电子材料、磁性材料、超导材料、光学材料、铁电材料等方面的应用。

关键词: 单晶; 衬底; 光电子; 薄膜; 外延

1. 引言

单晶衬底材料是指用于外延生长晶体薄膜的单晶晶片, 所谓外延是指一定条件下, 一种单晶表面上另一种单晶体的定向生长, 提供外延生长基础的晶体称为衬底^[1]。它本身可能有某种特殊功能和用途, 也可能只是用来作新材料的衬底, 本身并无其它特别用途。以往作为薄膜衬底的材料有玻璃、陶瓷和金属板材。衬底材料的重要性可以从GaN研制和发展看出来。早在70年代初人们就开始探索GaN材料的生长工艺, 但是因为找不到合适的衬底材料, 以及GaN在高温生长时氮的平衡分解压力高, 因此直到1987年以前, 材料的质量进展迟缓。美国政府2002年用于GaN及其衬底材料的相关研发的财政预算超过5500万美金。我国科技部2002年度“科技型中小企业技术创新基金若干重点项目指南”中, 人工晶体及发光二极管均被列入其中, 而发光二极管的衬底材料即为蓝宝石衬底片,

国家计委将其列入“2003年度新材料专项”中。近年来, 衬底材料和GaN发光管才得到快速发展。随着科学技术的不断开拓, 尤其是光电子产业的兴起和发展, 对薄膜性能和质量要求越来越高, 原有的衬底材料已远远不能满足要求, 作为衬底的各种单晶材料应运而生, 方兴未艾, 其产业规模日益扩大, 研究领域也在不断扩展, 研究内容逐步深入。

2. 单晶衬底材料的条件和分类

作为衬底材料的单晶要具备以下基本条件: 1) 物理化学性能稳定; 2) 易于获得大尺寸单晶; 3) 导热率高; 4) 热膨胀系数小; 5) 耐热性好; 6) 加工性能好。衬底单晶材料按导电性可分为: 1) 金属导体, 如铜单晶; 2) 半导体, 如硅单晶、锗单晶、砷化镓、碳化硅等; 3) 绝缘体, 如石榴石, 尖晶石, 宝石等氧化物单晶。按应用类型可分为发光材料, 磁光材料, 超

导材料, 介电材料等。

3. 单晶衬底材料的应用

3.1. 发光材料和激光材料

利用半导体发光二极管(Lighting Emitting Diode, LED)产生白光, 作为普通照明光源, 可用替代白炽灯。因LED节能环保, 已成为本世纪最有价值的新光源^[2]。GaN 作为 LED 的基础材料发展很快, 它具有发光效率高、热导率高、耐高温、抗辐射、耐酸碱、高强度和高硬度等特性。但是 GaN 本身至今无法获得体材单晶, 只能在其它异型支撑单晶衬底上外延生长。衬底材料成为 LED 发展的关键。目前, 常用的衬底有 SiC, Al₂O₃ 和 Si。SiC 单晶熔点很高, 在 2700°C, 单晶生长采用籽晶升华法, 会有 6H 型和 4H 型, 控制难度较大。直到 1991 年 6H-SiC 才形成商品化, 而 4H-SiC 的商品化则是从 1994 年开始。从而为 1996 年发光管的诞生奠定了基础。美国是最先也是目前仍在使用其作为衬底生长 GaN 的国家。我国目前已有中科院物理所, 山东大学晶体所, 西安交大, 湖南大学等单位研制成功。物理所在 2006 年已成功生长出直径为 50.8 mm, 厚度为 25.4 mm 的 6H-SiC 单晶。Al₂O₃ 单晶即蓝宝石, 空间群 $R\bar{3}c$ (167)。日本采用宝石衬底生长 GaN, 工艺比较成熟。我国也主要采用该法并开展了广泛的研究。如丁志博等^[3]在蓝宝石(0001)衬底上采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)法生长 GaN 基 InGaN/GaN 多量子阱结构外延薄膜。方法是先低温生长 20 nm 的 GaN 缓冲层, 然后在 1060°C 恒温生长 2 μm 的 n 型 GaN 单晶再生长量子阱结构层, 并采用沟

道散射产额与随机入射产额之比来表征单晶的结晶品质。样品中 GaN 的结晶品质为 $\chi = 2.1\%$, 在完美结晶品质(1%~3%)范围内。浙江巨化集团, 上海光机所, 深圳奥普光电子公司等可提供成熟 2 英寸宝石晶片, 宝石晶棒直径最大尺寸可达 150 mm^[4]。

Si 单晶上生长 GaN 制备 LED 是我国江西最早研制成功, 发光效率已达宝石衬底生长的 90%。2009 年晶能光电(江西)有限公司自主研发“硅衬底发光二极管材料及器件技术”。它成为中国最大的 LED 制造中心。

上海光机所研制出 2 英寸等径长度大于 100 mm 的铝酸锂(LiAlO₂)晶体用于高效发光非极性 GaN 基 LED 衬底。并发现(302)LiAlO₂ 衬底在抛光、外延、稳定性等方面优于(100)LiAlO₂ 晶面衬底。

表 1 给出生长 GaN 的主要衬底单晶基本性能。探索新型单晶衬底仍然是发展 GaN 的重要任务。

氧化锌 ZnO 被认为是性能更好的制备发光管的材料, 体材单晶的制备主要有水热合成法, 作为产业化尚需时日^[5]。国家特种矿物材料工程技术研究中心(桂林)张昌龙小组采用温差水热合成法, 以块状氧化锌陶瓷为培养料, KOH、LiOH 和 H₂O₂ 的混合水溶液为矿化剂体系, 在大直径的高压釜中生长出了尺寸为 30 mm × 38 mm × 8 mm 的氧化锌晶体。氧化锌晶体+c(0001)和-c(0001)方向的生长速度分别为 0.17, 0.09 mm/day。+c 面的颜色为浅绿色, 而-c 面的颜色为深褐色, 晶体呈六边形厚板状^[6]。氧化锌每年全球产量为数千吨, 德国科学家认为氧化锌将是创造高性能 LED 的突破点。ZnO 不仅本身是非常有前途的半导体

Table 1. Properties of substrate crystals grown GaN

表 1. 生长 GaN 的主要衬底性能

衬底单晶	晶系	空间群	晶胞参数/Å	失配度*/%	发光强度	热导率/Wm ⁻¹ k ⁻¹	价格
Substrate crystals	Crystal system	Space group	Cell parameter	Lattice mismatch	Fluorescence	Thermo-conductivity	Price
GaN	6 mm	$P6_3mc$ (186)	a = 3.189, c = 5.185				
6H-SiC	6 mm	$P6_3mc$ (186)	A = 3.081, c = 15.12	3.4	高	4.9	高
α -Al ₂ O ₃	$\bar{3}m$	$R\bar{3}c$ (167)	a = 5.12, c = 13.0	大	高	25.12	中
Si	m3m	$Ia\bar{3}d$ (230)	a = 5.436		中		低
ZnO	6 mm	$P6_3mc$ (186)	a = 3.2533, c = 5.2073	2	高	0.54	高

*晶格失配度 $f_s = \left| \frac{a_s - a_f}{a_f} \right|$, 其中 a_s , a_f 分别表示衬底和薄膜的晶胞参数。

材料,也是制备 GaN 薄膜的优良衬底。目前,氧化锌薄膜的制备成为当前研究的热点。孙成伟等^[7]采用 n 型(100)取向的单晶 Si 片,反应射频磁控溅射方法,制备 ZnO 薄膜,ZnO 薄膜表面岛具有比较规则的形状,呈长方形,大多数表面岛之间彼此平行,薄膜中 ZnO 晶粒与 Si 基体之间存在一定的外延关系。刘红霞等^[8]在镀有 ZnO 先驱薄膜的(0001)蓝宝石上,利用水热合成法制备出了柱状 ZnO 阵列薄膜,基于蓝宝石衬底沿 c 轴择优生长。ZnO 阵列薄膜具有很强的紫外发射光谱(PL)。作者曾仔细分析了钨酸锌 $ZnWO_4$ 晶体结构,发现 $ZnWO_4$ (100)面 O 呈 ABAB 型近六方密堆积,其氧平面与 ZnO 的 c 面氧平面极为接近, $ZnWO_4$ 晶体的(100)平面与 ZnO 的(0001)平面最佳方位的晶格失配率为 0.83%。 $ZnWO_4$ 与 ZnO 在该平面有相同的化学组成。 $ZnWO_4$ 单晶很可能是除 ZnO 体材单晶以外外延生长 ZnO 薄膜的最佳衬底。 $ZnWO_4$ 晶体的熔点低(1220°C),同成分熔融,可采用提拉法(Czochralski)生长,易于获得大尺寸单晶,位错密度可以做到低于 $10^4/cm^2$ 。采用溶胶-凝胶法在 $ZnWO_4$ 单晶晶片上制备出 ZnO 薄膜。通过调整衬底温度和沉积速率,可以有效控制 ZnO 薄膜的成核和生长,获得较高质量的薄膜。光谱实验表明,其荧光发射在 396 nm,与体材单晶接近^[9-12]。

日本 Sophia 大学的研究人员利用不同的 II-VI 族半导体化合物在 InP 衬底上制造激光二极管及发光管。他们在 InP 衬底上制造(MgSe) / (BeZnTe)超晶格包层以及 BeZnSeTe 有源层,从而制成光泵激光二极管,该激光器能够发射 548 nm 绿光^[13]。瑞典林雪平大学开发了一种快速升华生长工艺,以 SiC 为衬底生长 AlN,位错密度低至 $2 \times 10^6/cm^2$,有望开发水处理所需要的 185 nm 或 265 nm 的 LED 光源。

3.2. 磁光材料

磁光材料在新型器件等领域有着广泛的应用。早期制备块体 YIG 单晶遇到了困难,但鉴于 YIG 单晶在微波应用以及磁性能研究方面的重要性^[14],于是 YIG 单晶薄膜材料的制备得到了发展。同时随着器件集成化的发展,找到一种具有巨磁光法拉第效应的磁光薄膜材料成为实现薄膜波导型器件的关键,各国都对具有巨磁光法拉第旋转效应 YIG 薄膜材料进行了深

入广泛的研究^[15]。

YIG 薄膜材料的研究可以大致分为三个阶段:1) 未掺杂 YIG 薄膜基本性能的研究;2) 各种元素掺杂对 YIG 磁光薄膜的物理性能及磁光性能的影响;3) 选用 Bi 或 C 元素掺杂的 YIG 薄膜构造薄膜波导型磁光隔离器和磁光环行器。20 世纪 80 年代的研究重点是薄膜材料。进入 90 年代后,研究的重点转移到薄膜器件和各种新的制备工艺^[16]。在这些研究方面,日美走在了前列。

YIG 单晶薄膜通常是通过液相外延法(liquid phase epitaxial,简称 LPE)获得的。该方法将拟生长的单晶组成物质直接熔化或熔化在适当溶剂中保持液体状态,将用作衬底的单晶薄片浸渍在其中,缓慢降温使熔化状态的溶质达到过饱和状态,在衬底上析出单晶薄膜。单晶薄膜的生长厚度由时间和液相过饱和度和来控制。

1965 年 Linares 等^[17]报道了助熔剂 LPE,20 世纪 70 年代该方法应用于磁光材料的研究之中。在磁泡存储器、磁光现象和静磁表面波研究中,需要在非磁性钆镓石榴石($Gd_3Ga_5O_{12}$,简称 GGG)基片上外延一层磁性石榴石薄膜。液相外延获得的薄膜质量较好,生长速度比汽相快,掺杂容易控制,成本低重复性好,特别是在许多情况下,获得质量大的块状单晶很困难时,这种技术更显得重要。目前只有日本和美国已经成熟地掌握了这种技术,磁光晶体薄膜已规模化生产。这是因为两国在这方面进行了长期的技术积累。例如占据我国磁光晶体材料市场很大份额的日本 Granopt 公司的母公司之一三菱瓦斯化学株式会社早在 1989 年就申报了一系列有关 LPE 生长 YIG 薄膜材料的专利^[18-21],将 LPE 生长优质石榴石单晶薄膜中的关键材料和环节都申报了专利保护。并且其与法拉第效应相关的专利数量到 2004 年已经达到了 50 项,相互之间形成了专利族,为可能的竞争对手设置了专利技术壁垒。针对欧盟 2006 年 7 月 1 号实施的欧盟有害物质限制指令(RoHS),日本 Granopt 公司也对 LPE 工艺进行了技术改进,减少助熔剂中铅的含量^[22]以使产品获得市场准入。而另一大磁光材料供应商美国的 Integrated Photonics Inc(IPI)早在 2007 年 2 月已在其网站发布申明其产品已经满足 RoHS 的要求,表明自己技术的全球领先性。我国的磁光材料的研究主体仍然是高校或

研究所，其产品的核心——磁光晶体基本依靠进口。

另外两种制备 YIG 石榴石薄膜的制备方法是射频溅射法和脉冲激光沉积法。

射频溅射法制备的薄膜是在非热力学平衡的条件下形成的。它既可以用来制备 Ce:YIG 薄膜，也可以用来制备 Bi:YIG 薄膜。不过用该法制备的 Bi:YIG 薄膜晶体与用 LPE 法制备的薄膜晶体相比，存在着晶体的缺陷或位错较多，因而 T_c 较低。因此，在制备 Bi:YIG 薄膜时一般选用 LPE 法。而在制备高掺杂 Bi:YIG 薄膜时，射频溅射法有着其特有的优势。对于 Ce:YIG 薄膜，由于轻稀土离子 Ce 的扩散系数很小，Ce 元素在石榴石薄膜中的浓度受到了限制，因此用 LPE 法来制备存在技术上的困难。射频溅射法是制备 Ce:YIG 薄膜的最主要的方法。

脉冲激光沉积法这种技术使用 Nd:YAG 激光($\lambda = 355 \text{ nm}$)，脉冲频率为 10 Hz，脉冲宽度为 10 ns。具体的方法是：将能量密度为 90 mJ/pulse 的 Nd:YAG 激光束照射在不停旋转的多晶 Ce:YIG 的靶材上，衬底为 (111)取向的 GGG 单晶，其表面涂有一层导电的银泥，放置在离靶材约 4 cm 的加热装置上，衬底温度设置为 790°C，淀积时间为 30 min。该法是制备高品质铁氧体薄膜材料的一种简捷有效的方法。但用 PLD 制备 YIG 薄膜还存在着一些问题，如薄膜的表面存在着类似于小液滴状的微米量级的小颗粒，这些颗粒降低了薄膜的结晶性能，导致薄膜光吸收的增大。

3.3. 超导材料

超导材料一般在超光滑表面单晶衬底上制备，所谓超光滑表面是指粗糙度小于 1 nm 的表面，其特征为表面无任何破损、划痕；亚表层无破坏；无表层应力。这种加工正逐步渗透到诸如超导、巨磁阻、铁电薄膜等诸多领域。常温相呈准立方结构的 LaAlO_3 ，其晶格常数是 0.379 nm，与高温超导材料 YBCO 的晶格常数相匹配并且与 YBCO 材料间的化学稳定性也很好。由于 LaAlO_3 晶体的介电常数($\epsilon = 23$)较小，介电损耗($\text{tg}\delta = 3 \times 10^{-5}$)也很低，非常适合作为高温超导微波器件的衬底材料。尽管其它一些晶体材料也可作为高温超导的薄膜衬底材料，但用晶格匹配、热膨胀系数、化稳性、介电常数和介电损耗等综合指标衡量， LaAlO_3 晶体在高温超导衬底材料中有其独特的地位。此外，

LaAlO_3 晶体还是较好的铁电及巨磁阻等薄膜的衬底材料，对 LaAlO_3 衬底材料的超光滑表面加工的研究具有重要的实用意义^[23]。

3.4. 介电材料

接文静^[24]采用脉冲激光沉淀法，在制备有 LaNiO_3 电极的 $\text{LaAlO}_3(\text{LAO})(001)$ 衬底上制备了锆钛酸钡 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3(\text{BZT})$ 薄膜，具有较高的介电可调性 (49.1%) 和较低的介电损耗 (2.5%)，优质因子 (figure of merit, FOM) 达到 19.8。

铁电薄膜材料由于具有铁电性、压电性、热电效应、电光效应、弹光效应、光折变效应和非线性光学效应等多种不同性能引起人们广泛关注。王英龙等基于 Landau-Devonshire 公式，考虑位错应力场和极化场之间的耦合，建立了基本热力学模型，研究了在 $\text{SrTiO}_3(001)$ 面衬底上外延生长的 $\text{PbZr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_3$ 薄膜的自发极化强度、电滞回线对其厚度的依赖关系^[25]。

尖晶石 MgAl_2O_4 熔点超过 2000°C，热膨胀系数为 7.5 ppm/°C，可用于弛豫铁电 PMN-PT (65% $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$:35% PbTiO_3) 的外延薄膜沉积的衬底材料。D Keogh 等^[26]采用脉冲激光沉积技术，在 (100) MgAl_2O_4 制备出 PMN-PT 薄膜，PMN-PT 薄膜的热膨胀系数为 8 ppm/°C，匹配近乎完美。薄膜微结构呈单晶形态，薄膜衬底间界面清晰，表面光滑平整。晶格失配度小于 0.5%，显示出立方-立方外延和很好的方向性。这一类材料将是制备新一代超声换能器、高性能微位移和微驱动器的理想材料。

3.5. 非线性光学材料

$\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (简称 $\beta\text{-BBO}$) 晶体是 1984 年由福建物质结构研究所发现的一种新型非线性光学材料，它具有倍频系数高、透射波段宽、损伤阈值高、相位匹配范围宽、折射率温度系数小等特点。但随着激光技术的集成化小型化，为克服因晶体厚度带来的基频光与倍频光之间群速度失配问题以及脉宽展宽问题，需要较薄的 $\beta\text{-BBO}$ 晶体，但其加工时易碎裂。刘君芳^[27]等采用取向为 (001) 面的掺 Sr^{2+} 的 $\alpha\text{-BBO}$ 晶体作为衬底以 $\text{BaB}_2\text{O}_4:\text{Na}_2\text{O} = 70:30 \text{ mol}\%$ 为助熔剂，液相外延法成功制备出 $\beta\text{-BBO}$ 。尽管其晶格失配度高达 15.5%，但是，由于 $\alpha\text{-BBO}$ 和 $\beta\text{-BBO}$ 同属于三方晶系，空间

群分别为 $R\bar{3}c(167)$ 和 $R3c(161)$ 外延层与衬底之间存在化学共性, 因此外延生长成核和长大比较容易。

在光学性能中要求镀膜材料有合适的光谱范围和折射率, 在透光范围有足够小的吸收。苏伟涛等^[28]使用 0.2 mm 厚的锗(111)基片作为衬底, 采用热蒸发技术制备了氟化铒(ErF_3)薄膜, 在 10 μm 处, 结晶薄膜的折射率和消光系数最小值分别为 $n = 1.32$ 和 $k = 0.006$ 。

4. 几种重要的单晶衬底

4.1. Si

由于微电子尺寸的不断缩小, 高介电常数氧化物薄膜在微电子器件中起着重要作用。唐秋文等^[29]利用 248 nm KrF 准分子激光器在 Pt/Ti/SiO₂/Si(100)衬底上沉积(Ba, Sr)TiO₃薄膜, 并得到两种性质不同的 BSTO 薄膜。一种是在 450°C, 20 Pa 氧气氛下沉积, 可得到由于结构相变引起的铁电弛豫; 另一种是在 550°C, 1 Pa 氮气氛下沉积, 获得由热激发迟滞造成的高介电常数薄膜。

SiN_x 薄膜具有硬度高、抗腐蚀、耐高温、热导性与绝缘性好, 光电性能优良, 因而在微电子领域、机械系统等领域都得到了广泛应用。丁万昱等^[30]采用经过抛光处理(100)取向单晶硅片, 依次经过丙酮、酒精、去离子水超声清洗, 然后冲干, 微波 ECR 等离子体增强磁控溅射制备出具有较好结构及性能的无氢 SiN_x 薄膜, x 最佳值为 1.33。

在 Si 衬底上沉积制备 HfO₂ 薄膜, 具有较高的介电常数的介质 (High-*k* 材料) 材料替代传统 SiO₂ 栅介质, 以减小微尺寸下的栅漏电流密度^[31]。在 Si(100) 采用溶胶凝胶法和旋转涂敷法制备出高质量的 BaTiO₃ 薄膜^[32]。欧洲半导体研究协会的 Germain 认为硅作为一种大尺寸低成本衬底, 与其它衬底相比, 硅上外延 GaN 是降低 LED 成本的最佳选择。

4.2. GaAs

砷化镓 GaAs 属 III-V 族化合物半导体材料, 禁带宽度 1.428 eV, 故能在更高温度和更大的方向电压下工作, 是制造大功率器件的优选材料。其电子迁移率为 8500 cm²/V·s, 是 Si 的 6 倍, 工作频率高, 是制造高速集成电路和高速电子器件的理想材料。GaAs 属直

接跃迁时自己在发光和激光二极管的优质材料, 也是重要的衬底材料。

用 GaAs 作衬底 LPE 法生长外延层 Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结(DH)提高发光效率。20 mA 下红光量子效率达 15%, 亮度达到 3000 mcd。In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P 与 GaAs 衬底晶格匹配, 黄光和橙光亮度为 1000 mcd。孙征等^[33]采用分子束外延生长以(001)GaAs 为衬底生长了 InAs/GaAs 异质结构。

4.3. Al₂O₃

张开晓等^[34]采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术在蓝宝石衬底上外延生长制备出 Al_{0.32}Ga_{0.78}N/GaN 异质结, 是制备高温、高频、大功率器件最优选的材料体系, 在卫星、雷达、通讯等领域有很大的应用潜力。由于蓝宝石衬底材料热导率较差, 使得器件自热效应非常严重, 从而降低了器件的可靠性, 在采用 Si₃N₄ 钝化引入附加张应变, 使应变弛豫度在 34% 左右。

5. 结论

单晶衬底材料发展很快, 目前往往是利用现有材料加以开发, 这是初期发展的必然选择。随着科技发展, 探索适应广泛的单晶衬底已提到议事日程。单晶硅材料因和微电子器件相容, 是多种薄膜首选衬底材料。而有些是同一种薄膜在各种不同衬底上生长, 以求获得材料的最佳性能或最大经济效益, 如 GaN 薄膜衬底有 SiC、Al₂O₃、ZnO、Si 和 LiAlO₂ 等。单晶衬底材料是光电子产业的基础, 光集成和光计算赖以发展不可或缺的基材。科技人员应关注单晶衬底材料的进展, 主动适应各种新型薄膜的要求, 逐步扩大产业形成规模, 降低成本, 提高质量, 推动产业健康发展。

参考文献 (References)

- [1] 冯端, 师昌绪, 刘治国. 《材料科学导论》[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 臧竞存, 祁阳, 刘燕行. 固体白光照明和稀土发光材料[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 6-9.
- [3] 丁志薄, 王琦, 王坤等. InGaN/GaN 多量子阱的组分确定和晶格常数计算[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2873-2877.
- [4] 王如刚, 陈振强, 胡国永. 几种 LED 衬底材料的特征对比与研究现状[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(2): 121-126.
- [5] 巩锋, 臧竞存, 杨敏飞. 半导体 ZnO 晶体生长及其性能研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(2): 35-37.

- [6] 左艳彬, 周卫宁, 张昌龙. 氧化锌晶体的水热合成法生长及其性能表征[J]. 发光学报, 2008, 29(3): 470-473.
- [7] 孙成伟, 刘志文, 秦福文等. 生长温度对磁控溅射 ZnO 薄膜的结晶特性和光学性能的影响[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1390-1397.
- [8] 刘红霞, 周圣明, 李抒智等. 柱状 ZnO 阵列薄膜的生长及其发光特性[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1398-1401.
- [9] 臧竞存, 巩锋, 严建华等. 溶胶凝胶法制备 ZnO 薄膜及其性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(增刊 1): 564-567.
- [10] 臧竞存, 田战魁, 刘燕行等. 溶胶凝胶法制备 ZnO 薄膜的成核-生长和失稳分解研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1358-1362.
- [11] 臧竞存, 田战魁, 刘燕行等. ZnWO₄ 单晶衬底上 ZnO 薄膜的晶核发育与形貌分析[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(6): 1185-1189.
- [12] 臧竞存, 田战魁, 邹玉林等. ZnWO₄ 单晶衬底上制备的 ZnO 薄膜的发光性能[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 948-952.
- [13] J. Wallace. 激光二极管获得绿光输出[J]. 激光世界, 2009, 6(4): 7.
- [14] W. Tolksdorf. Preparation and imperfections of magnetic materials with garnet structure. In: A. Paoletti. Physics of Magnetic Garnets. Amsterdam; New York: North-Holland Pub. Co., 1977.
- [15] 王巍, 兰中文, 姬洪等. YIG 石榴石磁光薄膜材料的最新进展[J]. 电子元件与材料, 2002, 21(6): 23-25, 28.
- [16] 孙敦陆, 张连瀚, 杭寅. 磁光晶体的实际应用及研究新进展[J]. 自然杂志, 2002, 24(2): 91-94.
- [17] R. C. Linares, R. B. McGraw, and J. B. Schroeder. Growth and properties of yttrium iron garnet single-crystal films. J. Appl. Phys., 1965, 36(9): 2884.
- [18] Mitsubishi Gas Chemical co Inc. Material for magneto-optic element-comprises compsn. Contg, yttrium, gadolinium, bismuth, iron and oxygen formed over monocrystalline baseplate. Japan: JP63107900-A, 1988-05-12.
- [19] M. Arii, N. Takeda, and Y. Tagami, et al. Magneto-optic garnet grown by liq. phase epitaxy-having compsn, comprising holmium terbium bismuth iron oxide, has large Faraday rotation coefficient. Japan: JP1217313-A, 1989-08-30.
- [20] Mitsubishi Gas Chemical co Inc. Magneto-optical garnet for temp, compensation change of Faraday device - is bismuth substituted material contg, holmium gadolinium, magnesium, zirconium and gallium. Japan: JP2077719-A, 1990-5-16.
- [21] K. Shirai, T. Shinbo, and N. Takeda, et al. Bismuth substid, magnetic garnet-with low temp, dependence of sensitivity to specific wavelengths, for optical type magnetic field intensity measuring appts. Japan: JP6256092-A, 1994-9-13.
- [22] Y. Hanaki, S. Osumi, and K. Shirai, et al. Manufacture of bismuth substituted rare-earth-iron-garnet single crystal used for Faraday rotator, involves growing garnet single-crystal substrate with liquid-phase epitaxial method, using melt solution containing flux component. Japan: JP2007266152-A, 2007-10-11.
- [23] 张连瀚, 孙敦陆, 钱小波等. 高温超导薄膜衬底材料 LaAlO₃ 单晶的超光滑表面抛光研究[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(2): 121-123.
- [24] 接文静, 张鹰. 生长温度对单晶衬底上生长 Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O₃ 薄膜微结构和介电性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(8): 1424-1428.
- [25] 王英龙, 魏同茹, 刘保亭等. 外延 PbZr_{0.4}Ti_{0.6}O₃ 薄膜厚度对其铁电性能的影响[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2931-2936.
- [26] D. Keogh, Z. Chen, R. A. Hughes, et al. (100)MgAl₂O₄ as a lattice-matched substrate for the epitaxial thin film deposition of the relaxor ferroelectric PMN-PT. Applied Physics A, 2010, 98(1): 187-194.
- [27] 刘君芳, 周国洁, 何晓明等. β-BBO 薄膜的液相外延生长[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(5): 722-725.
- [28] 苏伟涛, 李斌, 刘定全等. 氟化钪薄膜晶体结构与红外光学性能的关系[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2541-2546.
- [29] 唐秋文, 沈明荣, 方亮. 两种不同(Ba, Sr)TiO₃ 薄膜介电-温度特性的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1346-1349.
- [30] 丁万昱, 徐军, 李艳琴等. 微波 ECR 等离子体增强磁控溅射制备 SiN_x 薄膜及其性能分析[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1363-1368.
- [31] 卢红亮, 徐敏, 陈玮等. 四角相 HfO₂(001)表面原子和电子结构研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1374-1378.
- [32] V. R. Chinchamalature, S. A. Ghosh, and G. N. Chaudhari. Synthesis and electrical characterization of BaTiO₃ thin films on Si(100). Materials Sciences and Applications, 2010, 1(1), 187-190.
- [33] 孙征, 徐仲英, 阮学忠等. InAs 单层和亚单层结构中的自旋动力学研究[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2958-2961.
- [34] 张开晓, 陈敦军, 沈波等. 表面钝化前后 Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN 异质结势垒层应变的高温特性[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1402-1406.