

文章编号: 1672-8785(2021)12-0015-06

II 类超晶格探测器芯片背增技术研究

任秀娟 崔 戈 李春领 冯晓宇 李海燕
宁 提 祁娇娇 刘 铭

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 主要介绍了 II 类超晶格探测器芯片双波段背增膜在探测器中的作用及其膜系设计与制备工艺。该膜的作用是减小探测器芯片表面在响应波段(3~5 μm 及 7~9 μm)对红外光的反射率, 增强芯片的光响应率, 从而提高芯片性能。研究并解决了背增膜在设计与制备工艺中的主要技术问题。根据探测器的使用环境对薄膜进行了相应的牢固性实验及测试。结果表明, 此薄膜的光谱响应率和牢固度能充分满足探测器的要求。目前这项背增透薄膜制备工艺已是 II 类超晶格探测器生产中不可缺少的工艺步骤, 应用前景良好。

关键词: 双色红外探测器; II 类超晶格; 铟化镓; 背增膜

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.12.003

Research on the Back-adding Technology of Type-II Superlattice Detector Chip

REN Xiu-juan, CUI Ge, LI Chun-ling, FENG Xiao-yu, LI Hai-yan,
NING Ti, QI Jiao-jiao, LIU ming

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: It mainly introduces the function of the dual-band back-adding film of type-II superlattice detector chip in the detector and its membrane system design and preparation process. The function of the film is to reduce the reflectivity of infrared light on the surface of the detector chip in the response band (3~5 μm and 7~9 μm), enhance the light response rate of the chip, that is, improve the performance of the chip. The main technical problems in the design and preparation of the back-adding film are studied and solved. According to the use environment of the detector, the corresponding firmness experiment, test and analysis of the film are carried out to draw conclusions. The results show that the spectral responsivity and firmness of this film can fully meet the requirements of the detector. At present, the preparation process of the back-adding film is an indispensable process step in the production process of type-II superlattice detector. The application prospect is good.

Key words: dual-band infrared detector; type-II superlattice; GaSb; back-adding film

收稿日期: 2021-08-12

作者简介: 任秀娟(1978-), 女, 北京人, 工程师, 主要从事薄膜光学研究。

E-mail: renxiujuan@cetc.com.cn

0 引言

InAs/GaSb II 类超晶格是一种多用途的半导体材料。用其制备的探测器具有以下优点：(1)量子效率高，可吸收正入射辐射，响应时间短，暗电流小。(2)通过调节应变及能带结构，使重轻空穴分离大；降低了俄歇复合以及有关的暗电流，提高了焦平面工作温度；电子有效质量大，是碲镉汞探测器的三倍。(3)隧穿电流小，可获得高探测率(尤其在甚长波段)；带隙可调，响应波长从 $3\ \mu\text{m}$ 到 $30\ \mu\text{m}$ 可调，可制备中波、长波、甚长波、双色及多色器件等。InAs/GaSb II 类超晶格探测器在光纤通信及其他领域都有非常大的应用价值和前景，比如石化和环境保护行业的气体探测器，一氧化氮、丁烷、甲烷、二氧化氮的成像探测器，腐蚀气体及有害气体的泄露传感器，监控系统中的红外成像器件以及火灾报警传感器等。

当红外光辐射到芯片表面上时，会产生光的反射和透射现象。由这两种现象产生的光通常称为反射光和透射光。芯片表面反射光的强弱决定了光到达 InAs/GaSb 芯片吸收层的光的能量大小。光的能量大小是影响探测器响应率的重要因素。为了减小 InAs/GaSb 芯片表面的反射光和增大透射光，通常在芯片表面镀上相应厚度的单层、双层或多层薄膜材料的增透膜，从而人为干涉光的反射与透射能量分配比(即反射光与透射光的能量分配比)。芯片增透膜即背增膜的作用是通过减少器件表面的反射光来减小入射光的损失，从而提高器件在特定响应波段的响应率及量子阱效应。

本文主要介绍 II 类超晶格 GaSb 芯片在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 及 $7\sim 9\ \mu\text{m}$ 双波段增透膜(即背增膜)方面的设计与制备方法，并根据探测器组件的使用环境对背增膜制定了相应的光谱及牢固度测试方案。实验结果表明，本文制备的背增膜的光谱响应率和牢固度能充分满足探测器组件的使用要求。目前，此背增透薄膜已应用于探测器芯片的生产工艺中。

1 背增膜的膜系设计及制备技术

1.1 超晶格芯片的结构图

超晶格芯片是由芯片管芯与读出电路通过钢柱倒装互连组成的芯片，其结构示意图如图 1 和图 2 所示。

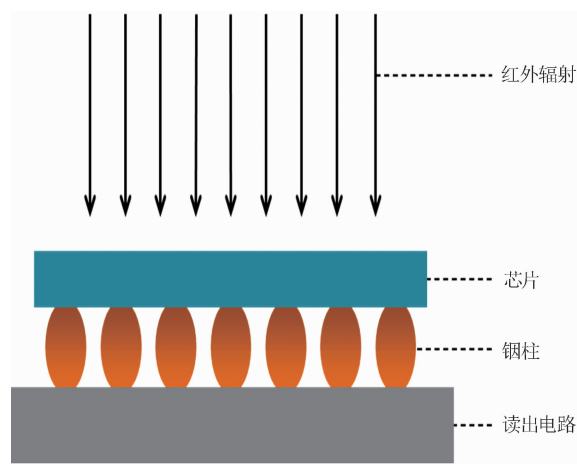


图 1 背增前的芯片结构示意图

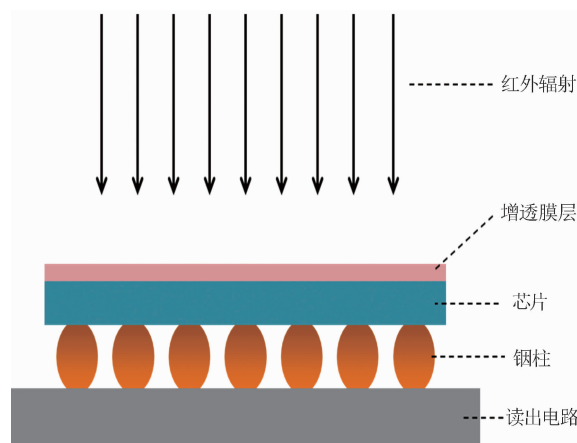


图 2 背增后的芯片结构示意图

1.2 光学薄膜的膜系设计

在 InAs/GaSb 面阵探测器芯片制备完成后，为了进一步改善探测器芯片的光电转换能力和提高探测器芯片在响应波段的光响应特性，通常需要对探测器芯片的衬底背面进行相应的衬底减薄、抛光、增透膜(背增膜)制备等工艺处理。衬底减薄工艺的主要方法是机械研磨和化学腐蚀减薄。其中，机械研磨通常采用 $9\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 研磨；化学腐蚀减薄通常通过配比相应的化学液，并采用化学腐蚀方法将衬底减薄。抛光工艺的主要方法为化学机械

抛光。无论采用哪种探测器芯片衬底减薄工艺, 增透膜(背增膜)制备方法都是在真空条件下采用气相沉积、电子束、热蒸发、离子辅助沉积、磁控溅射法等。减薄的主要目的是提高特定响应波段的量子效率。背面抛光的作用是使探测器芯片背表面更加光滑、平整且光洁度高, 从而减小探测器芯片背面光的漫反射。虽然探测器芯片在响应波段的量子效率相对于减薄、抛光前有较大的提高, 但是其性能还不能满足探测器组件的使用要求。表面增透的目的是利用增透膜制备工艺人为干涉红外光的反射与透射分配比, 减小探测器芯片背表面光的反射, 增加光的透射, 从而提高探测器芯片的响应率。

当光从空气(即大气)中垂直入射到折射率为 n_1 的 GaSb 衬底表面时, 由菲涅耳公式可以得到反射率 R 和透射率 T :

$$R = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (1)$$

$$T = 1 - R \quad (2)$$

通常空气的折射率为 1, 即 $n_0 = 1$ 。在响应波段内, GaSb 衬底的折射率约为 3.7。通过计算得到探测器芯片背表面的反射率约为 33%, 即入射到探测器芯片背表面的光有 33% 的损失。为了减少光的反射损失、提高透过率和增强光的响应率, 必须在探测器芯片背表面制备单层、双层或多层薄膜材料的增透膜。由于 InAs/GaSb 面阵探测器芯片要求的响应波段在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $7 \sim 9 \mu\text{m}$, 响应波段宽, 导致传统的单层和双层薄膜材料的增透膜无法满足要求, 因此需设计多层薄膜材料的增透膜(背增膜)。

传统的光学薄膜设计方法有两种, 分别是矩阵法和矢量法。运用它们有两个理论前提: 第一, 膜层没有吸收; 第二, 在确定多层膜的特性时, 只考虑入射波在每个界面的单次反射。随着科学发展及技术革新, 人们对各类光学薄膜(如反射膜、增透膜、半透半反膜、偏振膜、带通滤光片、窄带滤光片等)提出了更

高的要求, 采用传统薄膜膜系设计方法已经无法满足需求。目前, 用计算机自动设计光学薄膜系统已成为光学薄膜设计的一个重要手段。这是自动合成及最优化的设计方法。本文采用计算机自动优化方法设计多层薄膜材料的探测器芯片背表面增透膜(以下称为背增透膜)。

II 类超晶格 GaSb 材料为人工单晶, 当其厚度为 1 mm 时, $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的最高透过率为 14%, 波长大于 $9 \mu\text{m}$ 后的光透过率慢慢衰减至接近为 0。该材料的折射率约为 3.7, 其基底的光谱曲线如图 3 所示。

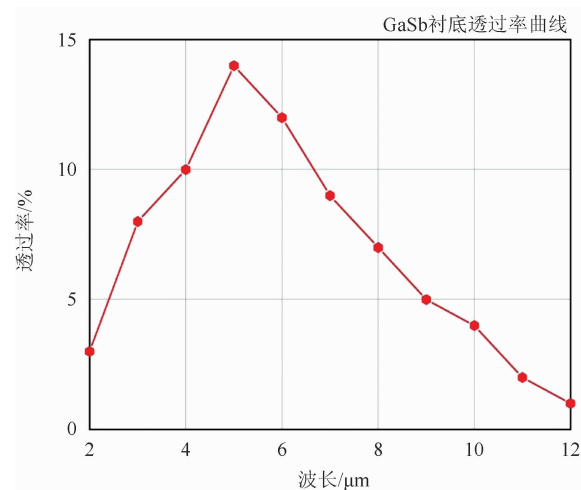


图 3 超晶格双色基片的光谱图

使用 KIDGE R OPTICS “FILM-2000” 设计软件进行 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $7 \sim 9 \mu\text{m}$ 背增膜模拟设计。设定基底材料 GaSb 的折射率为 3.7; 选取高折射率薄膜材料 H, 设其折射率为 2.6; 选取低折射率薄膜材料 L, 设其折射率为 1.55; 设计中心波长为 $5.5 \mu\text{m}$ 。输入标准膜系 HLHL 后, 通过自动合成优化曲线方法, 得到 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $7 \sim 9 \mu\text{m}$ 双波段背增透薄膜系结构为 G/2.979H0.922L0.93H3.216L/Air (G 为 GaSb 基底材料, Air 为空气)。理论设计曲线如图 4 所示。

通过分析 GaSb 双波段背增膜的理论设计光谱图可知, 只要能找到折射率接近 2.6 和 1.55 的薄膜材料, 就能镀制 InAs/GaSb 面阵探测器芯片 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $7 \sim 9 \mu\text{m}$ 双波段响应的背增膜。

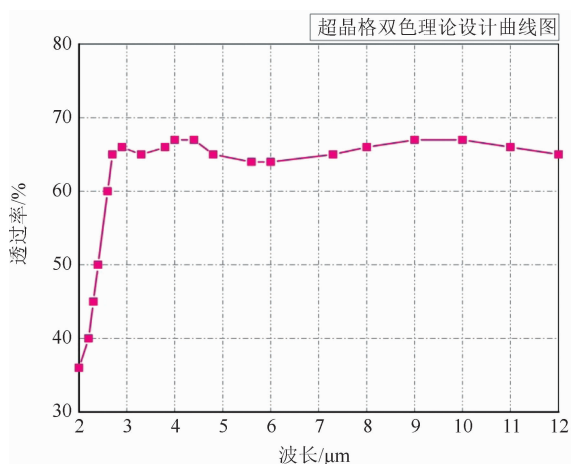


图 4 超晶格基片双波段背增膜的理论设计曲线图

1.2 背增膜的制备

光学镀膜技术和其他领域一样, 近几十年来得到了快速迅猛的发展。光学薄膜制备方法有多种, 但大体上可分为利用液体或气体成膜两种方法。液体成膜方法包括酸腐蚀法、溶液沉积法、电镀法等。气体成膜方法包括化学气相沉积法和物理气相沉积法。化学气相沉积法是将两种或两种以上的气态原材料导入到反应腔室里, 控制好反应气体流量及反应腔室的真空度, 使其在反应腔室内相互发生化学反应, 从而形成一种沉积在基片表面上的新材料。所谓物理气相沉积法是指利用物理方法将固体材料变成气体, 并使其沉积在基板上。将薄膜材料由固体变为气态, 然后沉积在基板上。根据不同的物理作用可分为热蒸发、电子束蒸发、离子束溅射和磁控溅射方法等。本文采用热蒸发与电子束相结合的方法来制备背增膜。

1.2.1 背增膜薄膜材料的选择

光学薄膜材料是镀制光学薄膜的基础。介质薄膜材料是光学薄膜制备中应用最广的一类材料。选择光学薄膜材料的条件是, 材料在使用范围内的透明度高, 吸收少, 折射率稳定, 机械附着力、硬度及应力良好, 堆积密度高, 化学性质稳定, 受环境影响小, 且材料在镀制过程中蒸发稳定、放气量小、不喷溅等。

目前, 虽然可用作光学镀膜材料的介质薄膜材料很多, 但从光学性质、力学性质和化学

稳定性全面考虑, 真正能批量用于光学薄膜的材料却十分有限。通过查阅薄膜材料相关书籍和资料可知, 折射率在 2.6 左右的薄膜材料是硒化锌(ZnSe), 其透明波段为 0.6~15 μm; 折射率在 1.55 左右的材料是氟化镱(YbF₃), 其透明波段为 0.2~12 μm。因此选择高折射率 ZnSe 及低折射率 YbF₃ 作为制备 II 类超晶格器件背增膜的薄膜材料。

1.2.2 背增膜的制备工艺

将 InAs/GaSb 面阵探测器芯片及测试陪片的抛光面朝下放到特制的夹具上, 然后将其装入具有冷凝泵真空系统和行星转动装置的真空镀膜设备中进行镀制。利用阻蒸和电子束蒸发薄膜材料, 并用光探测与石英晶体结合的方法控制蒸发速率和膜厚。薄膜材料 ZnSe 的控制速率为 20 Å/s, YbF₃ 的控制速率为 15 Å/s。其中每层薄膜材料的物理厚度分别为 H4076 Å、L2157 Å、H1272 Å 和 L7521 Å (H 为硒化锌, L 为氟化镱)。

2 背增膜光谱测试及薄膜牢固度试验

2.1 光谱测试

制备完成后, 用傅里叶红外光谱仪对陪片进行光谱特性测试。该方法的基本原理是, 光源发出的光被光束器(类似半透半反镜)分为两束, 其中一束经透射到达动镜, 另一束经反射到达定镜。两束光分别经定镜和动镜反射, 再回到分束镜。动镜以某一恒定速度做直线运动, 因而经分束器分束后, 两束光形成光程差, 产生干涉。干涉光在分束器会合并通过样品池的样品后含有样品信息, 到达检测器, 接着通过傅里叶变换对信号进行处理, 最终得到透光率或吸光度随波数或波长变化的红外吸收光谱图。GaSb 陪片在制备背增膜前后的光谱曲线如图 5 所示。

通过对比陪片镀膜前后的透过率曲线可以看出, 陪片从镀膜前的最高透过率 14% 提高到 19% (增幅为 36%)。由以上计算的数据可知, 采用 ZnSe 和 YbF₃ 两种薄膜材料制备的 GaSb 芯片背增膜已达到了良好的增透效果。

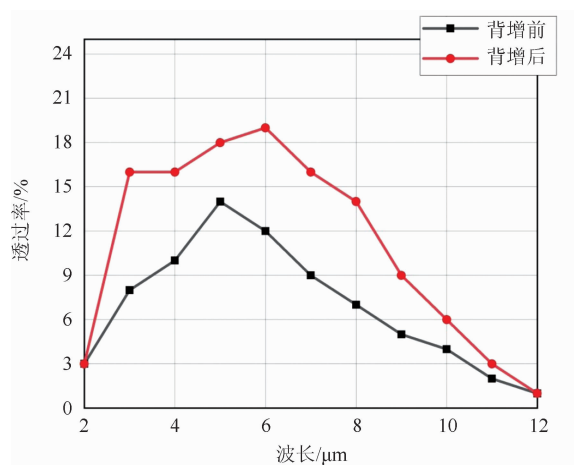


图 5 背增膜制备前后的光谱对比图

2.2 薄膜牢固度实验

为了满足红外探测器的环境使用要求,对制备有背增透薄膜的芯片进行了相应的附着力实验。采用的实验方法为温度冲击和胶带粘揭。

温度冲击方法需根据探测器的测试和使用环境而定。其实验方法是,将已镀背增透膜的芯片背增面朝上,完全没入液氮中,并用秒表计时,1 min 后取出芯片。接着用常温氮气迅速吹干芯片表面,并重复上述步骤 10 次。温度冲击前后的芯片表面如图 6 和图 7 所示。将温度冲击后的芯片放在显微镜下,观察芯片表面。可以看出,芯片表面无脱膜、裂片和划痕现象。

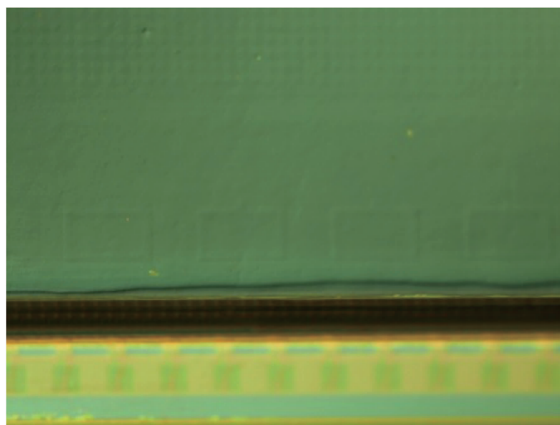


图 6 温度冲击前的芯片表面

粘揭方法是薄膜附着力测试方法,即把已镀背增透膜的芯片的背增面朝上,用粘性强的胶带贴在薄膜面上,确定胶带与膜面间没有气泡;然后一手拿紧芯片,另一手将胶带垂直膜

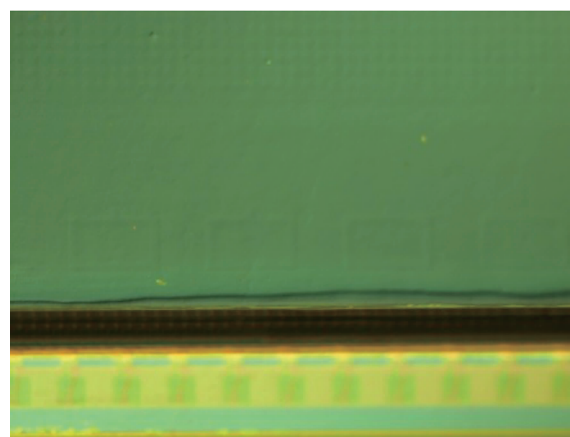


图 7 温度冲击后的芯片表面

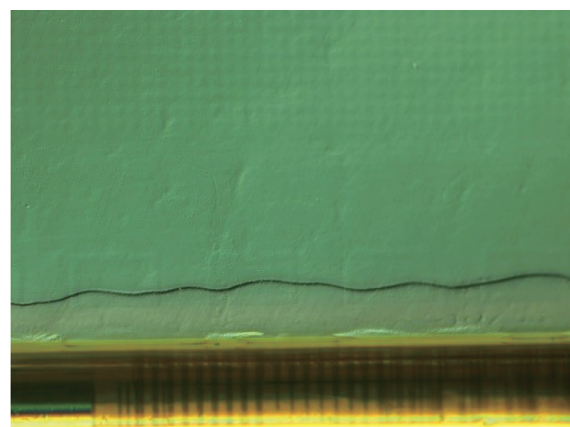


图 8 粘揭前的芯片表面

面并在 3 s 内或 1 s 内快速拉开;接着检查膜是否有小部分脱落或大部分脱落(薄膜无脱落为合格);重复上述步骤 10 次。粘揭实验前后的芯片表面如图 8 和图 9 所示。粘揭实验后,将芯片放在显微镜下,观察芯片表面。可以看出,芯片表面无脱膜、裂片和划痕现象。

通过温度冲击和粘揭实验可知,采用硒化锌和氟化铯薄膜材料制备的复合多层背增透膜的硬度、附着力和应力等都与铟化镓基材料的相关参数相匹配。薄膜的附着力很好,否则在相关实验后膜层会脱落,且芯片会产生裂片现象。

3 结论

采用计算机自动合成优化曲线的方法设计了 II 类超晶格芯片的双波段背增透膜系,并选用透明波段宽、化学性能稳定的硒化锌及氟化铯薄膜材料制备了四膜层 II 类超晶格芯片双波段背增透薄膜。结果表明,该薄膜的响应波

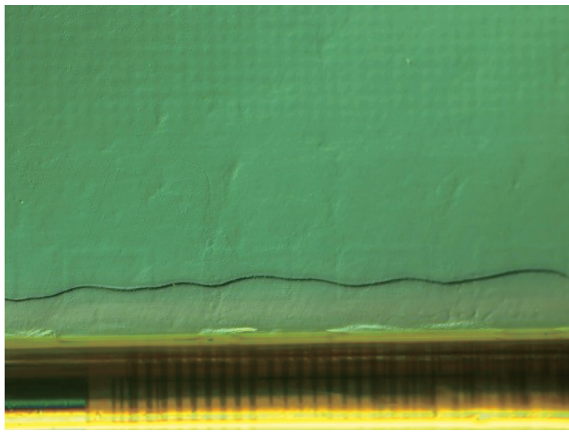


图 9 粘揭后的芯片表面

段、透过率以及牢固度都满足探测器的使用要求。与单层和双层薄膜材料的背增膜相比，此背增膜的响应波段宽，透过率曲线平滑且透过率高；在探测器响应波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $7\sim 9\ \mu\text{m}$ 的光响应率和量子阱水平都有很大提高，与理论设计值高度吻合，充分满足了探测器的使用要求。目前，这项背增透薄膜制备工艺已是 II 类超晶格探测器生产中不可缺少的工艺环节，应用前景良好。

参考文献

[1] 顾晋发, 郑权. 应用薄膜光学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.

- [2] 李正中. 薄膜光学与镀膜技术 [M]. 艺轩图书出版社, 2006.
- [3] 杨波. 可见拓展的短波红外 InGaAs 探测器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [4] 边子夫, 李晖, 徐世海. GaSb 单晶片 CMP 工艺的研究 [J]. 微纳电子技术, 2017, 54(11): 797-783.
- [5] 郭宝增. GaSb 材料特性、制备及应用 [J]. 半导体光电, 1999, 20(2): 73-79.
- [6] 任秀娟, 曹雪峰. 关于蓝宝石减反膜的研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 185-187.
- [7] Rogalski A. Material Considerations for Third Generation Infrared Photon Detectors Infrared [J]. Physics & Technology, 2007, 50(2): 240-252.
- [8] 刘帆. 基于光栅耦合增强型表面等离子体共振传感器的机理研究 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.
- [9] 吉蕾蕾, 耿浩然, 王桂珍. 液态 GaSb 材料的研究现状与展望 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2007, 18(3): 193-196.
- [10] 杨士春. 仪器分析实验教学新模式开发——以傅里叶红外光谱仪教学为例 [J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(8): 113-114.
- [11] 赵利. 电子束蒸发制备 TiO_2 薄膜及光学性能的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.