

文章编号: 1005-5630(2015)05-0452-04

## 用于植物培育实验的宽带负滤光片的研制

傅晶晶<sup>1</sup>, 徐永<sup>2</sup>, 冯利<sup>2</sup>

(1. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 机电工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 植物生长过程中对太阳光谱的吸收具有选择性。由于植物在光合作用和生长发育中对蓝紫光和红光较为敏感, 因此设计并镀制了一种滤光片, 目的是从太阳光谱中过滤掉植物吸收很少、且可能有害的黄绿光, 从而采集植物生长所需要的蓝紫光和红光。通过离子源辅助电子枪蒸镀的物理沉积方式在大尺寸的K9玻璃基底上镀制了宽带负滤光片, 镀膜后的滤光片在400~470 nm和630~750 nm波长范围内平均透过率大于90%, 而500~580 nm波长范围内平均透过率小于0.2%。结果表明该宽带负滤光片膜系的镀制满足植物培育实验的使用要求。

**关键词:** 光学介质薄膜; 电子枪蒸镀; 植物生长; 截止黄绿光

**中图分类号:** TB 43 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.015

### Fabrication of broadband negative filter for plant cultivation

FU Jingjing<sup>1</sup>, XU Yong<sup>2</sup>, FENG Li<sup>2</sup>

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Fu Zhou 350002, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fu Zhou 350002, China)

**Abstract:** Plant growth is selective to the absorption of the solar spectrum. Plants in the process of photosynthesis and growth are more sensitive to blue-violet light and red light. This paper designed and fabricated an optical filter to filter out yellow and green light with minimal absorption rate of photosynthesis so as to collect blue-violet light and red light which are necessary for plant growth. The broadband negative filter was prepared on the K9 substrate with large size through electron-beam evaporation system and ion assisted deposition system. The transmittance was over 90% at 400~470 nm and 630~750 nm wavelength band, and the reflectance at 500~580 nm wavelength band was less than 0.2%. The test results show that the broadband negative filter meet the requirements of the plant cultivation.

**Keywords:** optical dielectric filter; electron-beam evaporation; plant growth; yellow-green bands cutoff

### 引言

植物生命活动以光照作为能量的源泉。光合作用是绿色植物吸收太阳光的能量, 通过二氧化碳和水, 制造出有机物并释放氧的过程, 它是植物生长的基础。从光谱上看, 太阳光谱是个连续光谱。有研究表明, 植物并不是对所有波长的太阳光都均匀吸收, 而是有选择性的, 植物的叶绿素在蓝光和红光部分有两个很强的

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 福建省农业科技重大专项(2014NZ0002)

作者简介: 傅晶晶(1983—), 女, 工程师, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: healin@fjirsm.ac.cn

吸收峰,而绿光及黄光则大多被叶子所反射或透过,很少被利用<sup>[1-3]</sup>,并且黄绿光还有可能抑制植物的生长<sup>[4]</sup>。因此现有的研究多采用LED光源人工补充红蓝光的方法来提高植物的光合作用效率以达到增产增收的目的<sup>[5]</sup>,然而对农作物生长最为廉价而有效的还是自然光,但在自然光中如何滤出植物生长所需的红蓝光则是一个新的挑战。因此,本文设计并镀制了一种光学宽带负滤光片,直接从太阳光中分离出满足植物生长所需要的红蓝光波段,来研究从太阳光谱中滤除黄绿光部分后对植物生长的影响。

## 1 技术要求

根据所设计的植物栽培的实验方案,要求从太阳光谱中有效地采集出植物光合作用最敏感、最佳的光波段:400~470 nm的蓝紫光以及630~750 nm的红光,同时要求从太阳光谱中过滤掉光合作用吸收极少并可能会抑制植物生长的黄绿光(500~580 nm)。因此,要求在边长为100 mm、厚度为4 mm的K9玻璃基片上设计和镀制光学薄膜。具体的膜系设计参数如表1所示。

## 2 膜系设计与材料选择

根据所提出的技术要求,首先考虑将高反膜系作为初始基础膜系。具体膜系为:sub | H (H L)<sup>9</sup> | air,其中,sub为K9玻璃基底,air为入射介质空气,H为高折射率材料,L为低折射率材料,(H L)<sup>9</sup>表示(H L)作为一个周期膜系重复9次。首先试用常规的高折射率材料TiO<sub>2</sub>和常规的低折射率材料SiO<sub>2</sub>通过膜系软件进行模拟计算,按照设计要求,选择中心波长 $\lambda_0 = 530$  nm。通过膜系软件的模拟计算,得到如图1所示的透射率曲线。

从图1中可以看到,对于常规的高反膜系来说,截止带符合设计要求,但是在两旁的通带波纹起伏较大,达不到设计要求,因此必须考虑消除通带内的波纹。通过膜系设计软件将高反膜系进行优化修改,具体膜系为:sub | (0.5H L 0.5H)<sup>9</sup> | air,其透射率曲线如图2所示。从图2(a)的理论曲线可以看到,修改后的长波通膜系很好地压缩了长波通带内的波纹,但是短波通带的波纹并没有消除。而同样地,如果修改膜系变为图2(b)所示的短波通膜系sub | (0.5L H 0.5L)<sup>9</sup> | air,则情况刚好相反。因此,单纯的使用长波通膜系或者短波通膜系都不能同时压缩截止带两边的波纹。

为了达到同时压缩两侧通带波纹的目的,尝试在基础高反膜系的两侧增加对称膜系等效匹配层。通过计算,在高反基础膜系的两边分别加入周期对称膜系(3H 3L)<sup>2</sup>来消除通带的波纹,并在最后增加一个减反膜系2H L来优化波纹的透过率<sup>[6]</sup>。通过膜系软件的模拟和计算发现如果只选用高折射率TiO<sub>2</sub>和低折射率SiO<sub>2</sub>这两种膜料代入周期对称膜系和减反膜系,模拟出来的膜系还是达不到设计要求,这时,就需要选择三种或以上不同的膜料来设计负滤光片膜系。在光学薄膜的设计和镀制过程中,常用的膜料一般有以下几种,表2列出了它们的一些基本特性<sup>[7]</sup>。

考虑到设计所需的折射率要求,以及各膜层之间的应力匹配,最后选取了TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgF来设计负滤光片膜系<sup>[8-9]</sup>。通过软件模拟计算设计的膜系具体为:sub | (3H<sub>2</sub> 3M)<sup>2</sup>(3H<sub>1</sub> 3M)<sup>6</sup>(3H<sub>2</sub> 3M)<sup>2</sup>2H<sub>2</sub> L | air。其中H<sub>1</sub>为折射率 $n_{H_1} = 2.34$ 的TiO<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>为折射率 $n_{H_2} = 1.97$ 的ZrO<sub>2</sub>,M为折射率 $n_M = 1.56$ 的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,L为折射率 $n_L = 1.38$ 的MgF,中心波长 $\lambda_0 = 530$  nm。膜系理论曲线如图3(a)所示。

表1 膜系设计参数

Tab. 1 Design specification of the coating	
波长/nm	透过率/%
400~470	>90(平均)
500~580	<0.2
630~750	>90(平均)

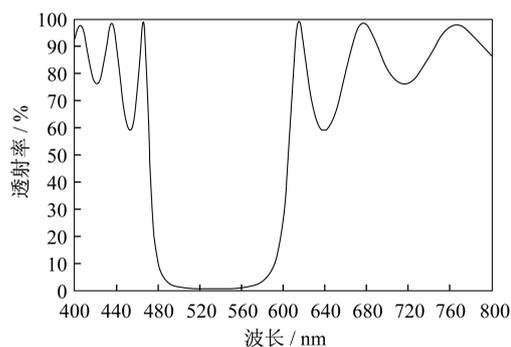


图1 高反膜系的理论曲线

Fig. 1 Theoretical curve of high-reflecting film

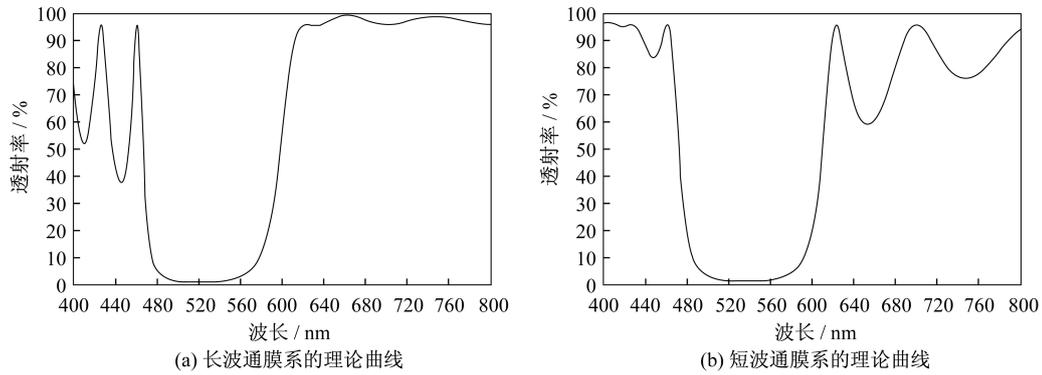


图 2 带通滤光片膜系的理论曲线

Fig. 2 Theoretical curves of band pass filter

从图中可以看到截止带两边的通带区波纹已经很好地被压缩,可以满足平均透过率大于 90%的要求,但是截止带的宽度减小了,不能满足截止带带宽的要求。因此将该膜系中心波长移到 515 nm,在此基础上叠加一个中心波长为 560 nm 的相同膜系,并增加高反膜系的周期数,通过软件优化后,将截止带展宽至符合设计的要求。最终展宽之后的负透

表 2 膜料参数

Tab. 2 Parameters of the film materials

材料	分子量	密度	熔点/℃	透明区/ $\mu\text{m}$	折射率( $\lambda=550\text{ nm}$ )
TiO <sub>2</sub>	79.88	4.29	1 850	0.35~12	2.2~2.4
ZrO <sub>2</sub>	123.22	5.49	2 700	0.34~12	1.97
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	441.89	8.74	1 800	0.30~10	2.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.96	3.97	2 045	0.20~8	1.53~1.60
SiO <sub>2</sub>	60.08	2.2~2.7	1 730	0.16~9	1.46
MgF	62.31	2.9~3.2	1 395	0.21~10	1.38

光片理论膜系曲线如图 3(b)所示。可以看到,由于叠加了一个不同中心波长的膜系,截止带中心的透射率有所上升,534 nm 和 542 nm 处的透射率分别为 1.38% 和 1.67%,但还是基本能满足平均透射率小于 0.2% 的设计要求,而通带区的波纹也变密了,这是因为两个高反膜系叠加相互影响而产生的。

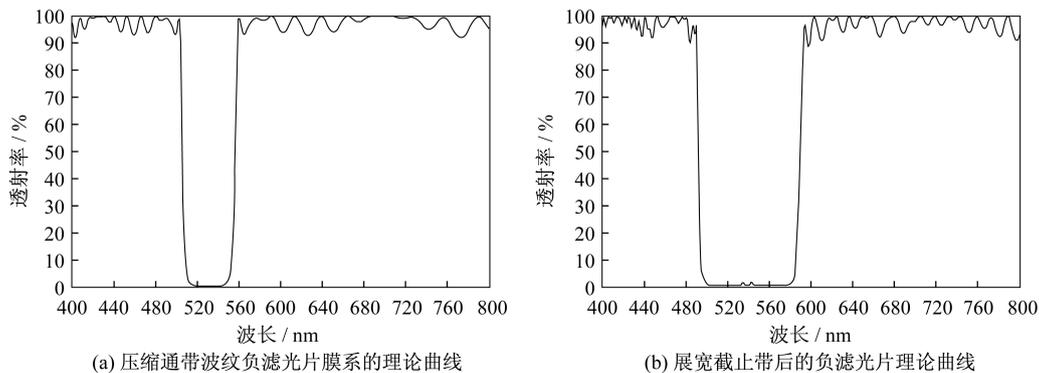


图 3 优化后的理论曲线

Fig. 3 Theoretical curves of the optimized filter

### 3 膜系镀制工艺

该膜系使用成都现代南光真空设备有限公司生产的 ZZS660 型箱式真空镀膜机,采用电子枪蒸镀的物理沉积方式来完成。

由于该滤光片用于植物培养研究,要求镀制在边长为 100 mm 大尺寸的 K9 玻璃基底上,因此为了避免在基底不同区域上沉积膜厚的不均匀,在镀制过程中使用了修正挡板,通过前期实验来修剪修正挡板的形状,以便在镀制过程中使膜料在基底上各个区域沉积的厚度达到均匀一致<sup>[10]</sup>。因为基底尺寸较大,所以在镀制过程中烘烤的温度不宜过高,过高的温度会使基底内部应力不均匀而破裂,因此将实验温度控制在 150 ℃,但是由于 MgF 在低温下膜层较软,所以在镀制 MgF 膜层时将温度适当缓慢提高到

180 °C,并在镀制结束后将降温过程的时间适当延长,避免基底因降温过快而破裂。同时在镀制薄膜过程中为了防止氧化物膜料失氧而游离出金属离子,所以通入氧气,并采用辅助的霍尔离子源来辅助沉积,它可以通过对薄膜材料的轰击从而给沉积的薄膜材料粒子以额外的能量,使沉积的膜层在光学机械等性能上有所提高<sup>[11-13]</sup>。

由于在膜系设计过程中,最终确定选择的膜料有四种,而且层数较多,普通的光学监控法难以逐一监控,所以在镀制过程中采用 MDC-360 晶控设备来监控膜料的沉积速率和膜层的物理厚度。实验数据如表 3 所示。

表 3 实验工艺参数

Tab. 3 Parameters in the experiment

膜料	沉积速率/nm·s <sup>-1</sup>	束流/mA	烘烤温度/°C	离子源
TiO <sub>2</sub>	0.35	220	150	Yes
ZrO <sub>2</sub>	0.25	180	150	Yes
Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.4	200	150	Yes
MgF	1.05	25	180	No

#### 4 镀制结果和分析

用 Lambda900 紫外可见近红外分光光度计进行测试,测试结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看到,截止带 500~580 nm 波长处的透射率和理论设计曲线的差别不大,但两侧的通带波纹有所起伏,透射率有所下降,486 nm 处的透过率出现了较大幅度的降低,这是因为在镀制过程中膜层数量太多,由于各层膜厚控制误差的累积而造成的,但是在 400~470 nm 波长和 630~750 nm 波长区域内的平均透射率还是可以达到大于 90%的要求。

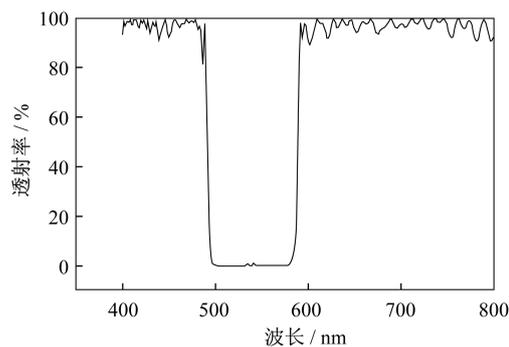


图 4 实测曲线

Fig. 4 Spectrum curve measured of the filter

#### 5 结论

通过电子枪蒸镀的物理沉积方法在大尺寸的 K9 玻璃基底上设计并镀制了黄绿光截止,蓝紫光和红光高透的宽带负滤光片。在镀制过程中对膜层结构和镀制温度进行了优化设计并使用了修正挡板可以避免膜料在大尺寸基底上不同区域沉积厚度的不均匀。同时在温度较低的环境中使用了离子源辅助沉积来提高成膜的牢固度。所制备的光学薄膜在要求波段的透过率达到使用要求。

#### 参考文献:

- [1] 徐景智,李同错,廖祥儒,等. 温室大棚作物生长发育对光色选择性吸收的研究进展[J]. 河北大学学报:自然科学版,2002,22(2):202-207.
- [2] 高荣孚,张鸿明. 植物光调控的研究进展[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):235-243.
- [3] 王艺,韦小丽. 不同光照对植物生长、生理生化和形态结构影响的研究进展[J]. 山地农业生物学报,2010,29(4):353-359,370.
- [4] FOLTA K M, MAROHNICH S A. Green light: a signal to slow down or stop[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(12): 3099-3111.
- [5] 马汶伟. 光学薄膜在照明领域的应用[J]. 光学仪器, 2004, 26(2): 222-224.
- [6] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006:161-167.
- [7] 钟迪生. 真空镀膜光学材料的选择与应用[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,2001:181-245.
- [8] 陈焘,罗崇泰,王多书,等. 电子束蒸发制备二氧化钛薄膜应力测量[J]. 真空科学与技术学报,2007,27(2):168-171.
- [9] 潘永强,吴振森,杭凌侠,等. 二氧化锆薄膜表面粗糙度的研究[J]. 应用光学,2008,29(4):606-609.
- [10] 王小辉,卫红,曹一鸣,等. 大面积户外照明光学薄膜膜厚均匀性研究[J]. 光学仪器,2006,28(4):172-175.
- [11] 陈焘,罗崇泰,王多书,等. 离子束轰击对电子束蒸发制备二氧化钛薄膜应力的影响[J]. 真空科学与技术学报,2009,29(2):164-167.
- [12] 齐红基,程传福,袁景梅,等. 沉积工艺对二氧化锆薄膜生长特性影响的研究[J]. 光学学报,2003,23(8):974-979.
- [13] 高鹏,阴晓俊,赵帅锋,等. 光学薄膜技术标准发展综述[J]. 光学仪器,2014,36(5):465-470.

(编辑:张磊)