

嵌入式宽光谱在线膜厚监控系统设计

李春喜¹ 邓华秋¹ 任豪²

(¹华南理工大学物理系, 广东 广州 510640
²广州市光机电技术研究院, 广东 广州 510663)

摘要 通过对宽光谱膜厚监控原理分析,设计出一套便携的嵌入式宽光谱在线膜厚监控系统。该系统基于 ARM9 内核微控制器 S3C2440, 采用 Linux 操作系统,使用跨平台 Qt2 开发可实时监控界面。系统通过 USB 光纤光谱仪采集光谱数据,S3C2440 微控制器对采集的光谱数据通过宽光谱扫描、评价函数、单波长极值等多种方法进行综合处理,最终达到监控镀膜过程中的光学膜厚的目的。系统测试表明,该系统测量精度高、测量速度快且便于携带。

关键词 薄膜;光学镀膜;嵌入式 Qt;宽光谱;膜厚监控

中图分类号 O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.123101

Design of Embedded Wide Spectrum Online Monitoring System of Film Thickness

Li Chunxi¹ Deng Huaqiu¹ Ren Hao²

(¹Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)
(²Guangzhou Institute of Optics, Mechanics and Electricity, Guangzhou, Guangdong 510663, China)

Abstract We analyze the principle of wide spectrum film thickness monitoring and design a portable embedded wide spectrum monitoring system of film thickness. This system is based on ARM9 core processor S3C2440 and Linux operating system with real-time monitoring interface developed on cross platform Qt2. The system collects spectral data by the USB fiber spectrum instrument, and the S3C2440 processor processes spectral data by methods such as wide spectral scanning, evaluation function, and single wavelength extremum. Thus the purpose of monitoring the film thickness of optical coating is reached. The testing result of the system indicates that this system has high precision, fast response and convenience in carrying and operating.

Key words thin films; optical coating; embedded Qt; wide spectrum; film thickness monitoring

OCIS codes 310.0310; 310.6845; 310.6188; 310.6860

1 引言

近年来宽光谱膜厚监控技术逐步成熟并得到广泛应用,德国、美国、日本等多个国家的企业相继开发出了此类产品^[1,2]。但国产镀膜设备仍普遍以单波长极值法和石英晶体振荡法监控膜层厚度,传统的单波长极值法^[3]只监控一个波长点的光度值,对其他波长无法兼顾。由于薄膜的镀制是一个复杂的过程,薄膜的折射率和色散往往和理论值有一定的出入,因此极值法监控宽带膜系镀制很困难。为了提高国产设备的整体性能,上海理工大学、北京理工大学、国防科学技术大学、华南理工大学等高校相继开展了这方面的研究工作,并取得了一定的研究进展,但监控过程中膜层厚度的精确控制一直是难关。本文设计出一个基于嵌入式 Linux 的宽光谱在线膜厚监控系统,它采用宽光谱扫描^[4,5]、评价函数、单波长极值等多种方法综合监控光学膜厚,并利用 Qt/Embedded 软件建立人机交互界面,从而丰富了光学镀膜过程中获取的数据和信息量,提高膜厚监控的准确性,实现了镀膜过程中膜厚的实时精确监测。

收稿日期: 2011-07-03; **收到修改稿日期**: 2011-08-07; **网络出版日期**: 2011-10-13

作者简介: 李春喜(1985—),男,硕士研究生,主要从事光通信传输技术方面的研究。E-mail: lchx0520@163.com

导师简介: 邓华秋(1963—),男,副教授,主要从事物联网中关键光子技术和光通信传输技术等方面的研究。

E-mail: eehqdeng@scut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

2 宽光谱膜厚监控原理

设没有监控比较片时系统接收到的光源能量为 $E_A(\lambda)$, 并设放置监控比较片后, T_r 和 R_r 分别为监控比较片后表面的透射率和反射率; T_0 、 R_0 和 T_i 、 R_i 分别为监控比较片前表面镀膜前和镀膜过程中的透射率和反射率^[6]。在镀膜开始前透过的光能量为

$$E_0(\lambda) = \frac{E_A(\lambda) T_r T_0}{1 - R_r R_0}, \quad (1)$$

在镀膜过程中的光能量为

$$E_i(\lambda) = \frac{E_A(\lambda) T_r T_i}{1 - R_r R_i}. \quad (2)$$

结合(1)式和(2)式可以得到

$$\frac{E_i(\lambda)}{E_0(\lambda)} = \frac{T_i(1 - R_r R_0)}{T_0(1 - R_r R_i)}. \quad (3)$$

当制备多层膜时,第 i 层的透射率 T_i 不但与该层的折射率 n_i 和膜厚 d_i 以及波长 λ 有关,而且与前 $i-1$ 层膜中每层的折射率和膜厚有关。如果前 $i-1$ 层膜中每层的折射率和膜厚已知,并且第 i 层膜的折射率 n_i 是稳定的,则 T_i 仅与波长 λ 和所测膜厚 d_m 有关,即 $T_i = T_i(\lambda, d_m)$ 。

如果第 i 层的理论设计膜厚要求为 d_i ,则第 i 层的理论设计透射率为 $T'_i = T'_i(\lambda, d_i)$ 。于是,在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的整个宽光谱区间内,膜厚变量 d_m 与理论设计值 d_i 所表现出的光谱透射差异为

$$f_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T'_i(\lambda, d_i) - T_i(\lambda, d_m)| d\lambda, \quad (4)$$

式中 f_i 为第 i 层的评价函数。

3 系统硬件结构

系统选用 Samsung 公司的 16/32 位 RISC 处理器 S3C2440,主频最高可达 400 MHz,具有独立 16 kB 指令 Cache 和 16 kB 数据 Cache、SDRAM 控制器、LCD 控制器、4 通道 DMA、3 通道 UART、2 通道 SPI、I2C 接口、I2S 接口、2 端口 USB 主机、1 端口 USB 设备、4 通道 PWM 的计时器、8 通道 10 位 ADC、触摸屏接口、130 个通用 I/O 口、24 通道外部中断源,具有普通、慢速和空闲掉电模式 3 种功耗控制模式。由于该处理器价格低、功耗小、性能高,从而降低了整个系统的成本,便于市场的推广^[7,8]。

显示与输入模块为 NEC256k 色 3.5 inch(1 inch = 2.54 cm) TFT 真彩液晶屏(240 pixel × 320 pixel),带触摸屏,通过相关接口与 S3C2440 相连接。

USB2000 光纤光谱仪的光学分辨率为 0.3 ~ 10.0 nm(半峰全宽,FWHM),探测波长范围为 200 ~ 1100 nm,用于采集光谱数据并通过 USB 接口输入 S3C2440 的主板。系统的硬件框图如图 1 所示。

系统的工作流程是:镀膜过程中光源发出的光透过监控比较片后,所产生的实时光谱信号被光纤光谱仪采集,然后通过 USB 接口送到 S3C2440 处理器进行处理分析,最后在触摸屏上显示实时光谱。

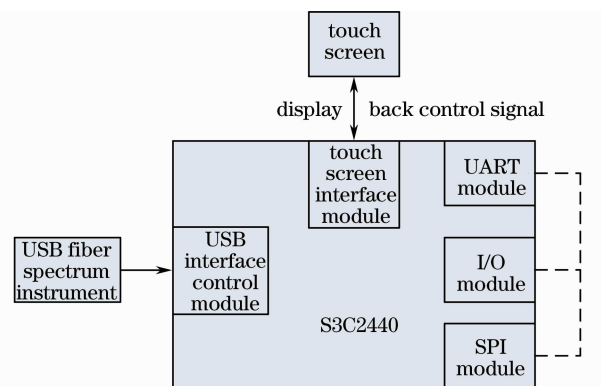


图 1 系统硬件框图

Fig. 1 Diagram of the system hardware

4 系统软件设计与实现

4.1 总体设计

系统选择 S3C2440 处理器芯片和 Linux 嵌入式系统为平台。作为稳定的开源系统, Linux 为开发工作提供了很强的自主性和便利性^[9]。基于 Linux 的主界面系统运行环境如图 2 所示,底层由 Linux 内核和驱

动程序构成,内核是经过简化的,其中包括电源管理系统,驱动程序提供对各种接口硬件的支持,其中 USB 驱动程序用于驱动 USB2000 光纤光谱仪。中间层是基于 Qt/Embedded 的嵌入式 Qt 库,它精简和优化了各种图形操作,程序运行时无需额外系统的支持,可以有效减少内存消耗和 CPU 负担^[10],最顶层是嵌入式宽光谱在线膜厚监控系统的应用程序。

4.2 主界面设计

根据系统设计要求,主界面包含 3 个子模块:1) 实时宽光谱子模块,对比显示理论光谱和实时光谱曲线,方便直接观察判断;2) 评价函数子模块,对比理论光谱数据和实时光谱数据,计算和显示评价函数的变化;3) 单波长子模块,通过计算实时光谱数据,对比和显示单波长的光谱特性变化。主界面设计流程如图 3 所示。

4.3 基于 Qt 主界面的实现

4.3.1 窗口的创建及汉化

首先在主函数中创建 QApplication 对象,利用 Qt Linguist 工具对界面进行汉化产生翻译文件(lang_zh.qm),并用 QTranslator 类创建一个对象加载之前生成的翻译文件。

程序实现如下:

```
int main(int argc, char * * argv)
{
    QApplication app(argc, argv);
    QTranslator * translator=new QTranslator();
    translator->load("lang_zh.qm", ".");
    app.installTranslator(translator); ...
}
```

4.3.2 按钮实现

主界面中的按钮功能通过信号/槽通信机制实现^[11]。按钮控件接收到正确的触摸屏信号后,将发送信号,之后与该信号通过 connect() 函数建立连接的槽函数被执行,控制工作在槽函数中完成。比如本系统主界面“实时曲线”按钮通过信号槽通信机制来实现如下:

```
connect(b1, SIGNAL(clicked()), this, SLOT(updateIt0()))
```

其中 b1 为“实时曲线”按钮, SIGNAL(), SLOT() 分别是定义信号和槽函数的 Qt 宏。当该按钮按下, b1 的信号 clicked() 将被发送,该信号将触发与其建立连接的槽函数 updateIt0(), 在该槽函数中实现按钮响应。

4.3.3 数据的采集与处理

在启动镀膜设备及监控软件后,首先进行初始化设计,对设备条件和控制方式等进行设定和选择,同时导入理论膜系的光谱曲线然后进入主控界面。先进行暗底定标,在未打开光源的条件下,将光纤光谱仪采集的背景光光谱数据每 3 个取平均平滑处理后存入 gBackScaler.txt 文档中,暗底定标数据用于消除背景光暗底的影响。程序实现如下:

```
void DrawView::Back() {short int temp1[2048],temp2[2048],temp3[2048];
read(gSpecDesc, temp1, 2048); read(gSpecDesc, temp2, 2048); read(gSpecDesc, temp3, 2048);
for( int i=0;i<2048;i++) gBackScaler[i]=int((temp1[i]+temp2[i]+temp3[i])/3);
QFile Background("gBackScaler.txt"); if(! Background.open(IO_WriteOnly)) return;
QTextStream streambackscaler(&Background); for(int i=0;i<2048;i++)
```

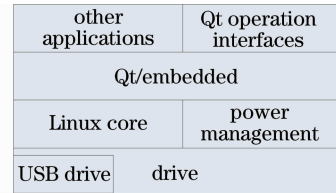


图 2 系统运行环境

Fig. 2 Operation environment of system

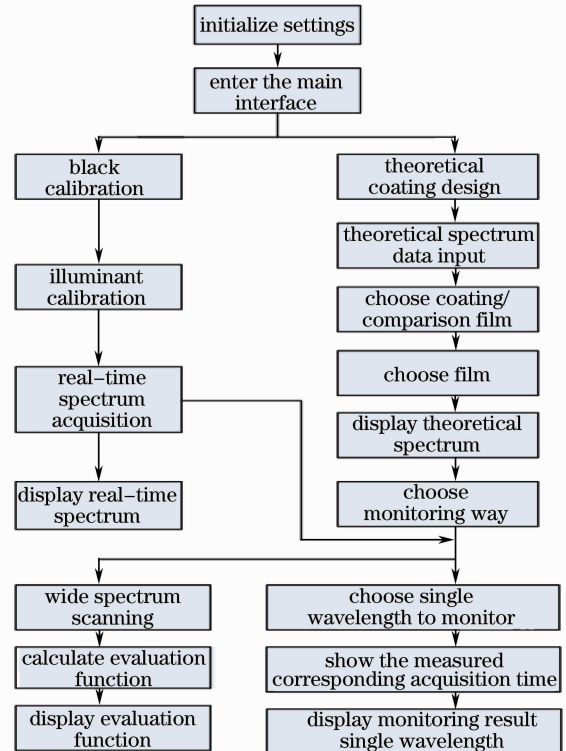


图 3 主界面设计流程图

Fig. 3 Flow chart of interface design

```
{streambackscaler<<gBackgroundScaler[i]<<""; if(i%2) streambackscaler<<"v";}
Background. close();}
```

其中 DrawView 为主界面类对象,由 QWidget 类创建;gSpecDesc 表示 USB 文件描述符,即 $gSpecDesc = open("/dev/usb/s2000", O_RDWR)$ 。

之后将未加监控比较片的光源光谱数据存入 gLampScaler. txt 文档,此数据和背景光光谱数据都用于之后透射率的计算。光源定标设定未放置监控比较片时的系统透射率为 100%。

光源定标后,在光路中放置监控比较片,这时采集的是监控比较片的透射光谱。再导入要制备的膜系的第 1 层理论设计光谱数据,并达到镀膜条件后,开始实时采集比较片镀膜的透射光谱数据。以透镀膜过程中的监控比较片光能量 $E_i(\lambda)$ 和没有监控比较片时系统接收到的光能量 $E_A(\lambda)$ 的比值作为镀膜过程中的实时透射率 $T_i(\lambda)$ 。程序实现如下:

```
for(int i=0;i<2048;i++) {transreal[i]=100 * (gReal[i]-gBackScaler[i])/(gLampScaler[i]-
gBackScaler[i]+0.000001);}
```

其中 transreal[] 表示透射率数据, gReal[] 存放监控比较片镀膜的透射光谱数据, gBackScaler[] 和 gLampScaler[] 分别是 gBackScaler. txt 和 gLampScaler. txt 文档读取的暗底定标和光源定标光谱数据。

对透射率数据压缩平滑后,根据(4)式可以设计评价函数曲线。

5 数据处理与结果分析

在膜系镀制过程中,常常会出现实测曲线和理论曲线吻合不好的现象,其主要原因在于,理论计算的光谱曲线没有考虑色散和吸收的影响,膜料在没有吸收和有吸收时,其反射率和透射率随膜厚变化的曲线形状是不一样的。为了减轻色散和吸收的影响,本系统在镀膜过程中测定了薄膜的实际光学常数,用测定的光学常数代替通用的光学常数来计算镀制过程中的理论曲线。通过实验得出该系统的测量误差能控制在 0.1% 以内。

该系统实现的技术指标如下:1) 波长范围 400 ~ 800 nm;2) 波长分辨率 1 nm;3) 透射率测量精度 0.1%;4) 采集扫描速度每秒 100 次。

最终实现的人机交互触摸屏的监控界面如图 4 所示(图中红线为理论曲线,蓝线为实际曲线)。

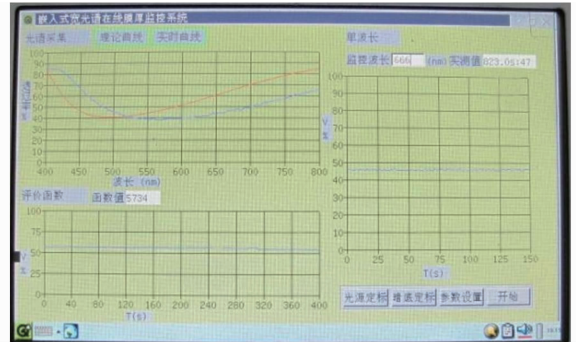


图 4 实时监控界面

Fig. 4 Real-time monitoring interface

6 结 论

设计和实现了一个基于嵌入式 Linux 平台的宽光谱在线膜厚监控系统。它把嵌入式硬件平台、Linux 操作系统、嵌入式 Qt 界面设计工具、光纤光谱仪与光学镀膜技术有机地结合起来。该系统具有测量精度高、响应速度快、数据采集处理快捷方便、体积小、质量轻、便于携带、使用方便等特点,有很好的市场前景和发展潜力。

参 考 文 献

- Zhang Cheng, Lu Weiqiang, Wang Yongtian. Autocontrol technology of optical thin-film manufacture based on *in-situ* broadband optical monitor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1136~1138
张 诚, 卢维强, 王涌天. 基于宽光谱监控的光学薄膜自动控制技术[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1136~1138
- He Caimei, Fu Xiuhua, Sun Yulin *et al.*. Study and fabrication of multi-band laser filter film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1550~1554
贺才美, 付秀华, 孙钰林 等. 多波段激光滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1550~1554
- Wang Haifeng, Huang Guangzhou, Yu Jirong. Study of optical filter film thickness monitoring system based on the method

- of wideband spectrum scanning[J]. *Vacuum Electronics*, 2004, (6): 29~31
- 王海峰, 黄光周, 于继荣. 基于宽光谱扫描法的光学膜厚监控系统的研究[J]. *真空电子技术*, 2004, (6): 29~31
- 4 Gu Zhentian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 5 Liu Xiaoyuan, Huang Yun, Zhou Ningping *et al.*. The system of the wideband monitoring of optical film thickness[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2001, **23**(1): 23~27
- 刘晓元, 黄云, 周宁平等. 光学镀膜宽带膜厚监控系统[J]. *国防科技大学学报*, 2001, **23**(1): 23~27
- 6 Zhou Pengfei, Chen Guilian, Zhang Rongfu. Development the instrument of monitoring the thickness of film by wideband spectrum[J]. *Optical Instrument*, 2001, **23**(6): 35~37
- 周鹏飞, 陈桂莲, 张荣福. 宽光谱膜厚监控仪的研制[J]. *光学仪器*, 2001, **23**(6): 35~37
- 7 Song Baohua. Linux Device Driver Development Solution[M]. Beijing: Posts & Telecommunication Press, 2008
- 宋宝华. Linux 设备驱动开发详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008
- 8 Zhao Shuli, Liao Ningfang, Tan Boneng. Overall design and data acquisition system of miniature color measuring spectrometer[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(6): 848~851
- 赵淑莉, 廖宁放, 谭博能. 微型测色分光光谱仪的总体设计及数据采集系统研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(6): 848~851
- 9 Robert Love. Linux Kernel Development (3rd ed.)[M]. Chen Lijun Transl.. Beijing: China Machine Press, 2006
- Robert Love. Linux 内核设计与实现(第三版)[M]. 陈莉君译. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 10 Ni Jili. Qt and Linux Programing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006
- 倪继利. Qt 及 Linux 操作系统窗口设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 11 Arthur Griffith. KDE2/Qt Programming Bide[M]. Gao Shoufu Transl.. Beijing: Electronic Industry Press, 2002
- A. Griffith. KDE2/Qt 编程宝典[M]. 高寿福译. 北京: 电子工业出版社, 2002