

# Study of Thermal-Protective Multilayer Films on Flexible Substrate by ToF-SIMS and Rf-GDOES Depth Profiling

Kai Lv<sup>1</sup>, Gang Zhou<sup>1</sup>, Yunpeng Yu<sup>1</sup>, Yuanpeng Liu<sup>2</sup>, Jiangyong Wang<sup>1\*</sup>, Congkang Xu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Shantou University, Shantou Guangdong

<sup>2</sup>Shantou Wanshun Package Material Stock Co, LTD, Shantou Guangdong

Email: \*wangjy@stu.edu.cn

Received: Dec. 24<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jan. 11<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 18<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In this paper, the elemental in-depth distribution, the layer structure and the optical properties of the thermal-protective multilayer films on flexible PET substrates are explored by using the Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy (ToF-SIMS) and the Radio-frequency Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (Rf-GDOES) depth profiling techniques. The measured depth profiling data are quantitatively analyzed by using the Mixing-Roughness-Information (MRI) model. The results show that the investigated thermal-protective multilayer structure is composed as Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~25 nm)/AZO (Ag) (~10 nm)/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~50 nm)/AZO (Ag) (~10 nm)/ Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~25 nm) with the total thickness of ~120nm. The roughness values at the first interface of the second Ag peak are around 1.2 nm and 4.6 nm, respectively, for ToF-SIMS and Rf-GDOES depth profiling. By spectrophotometer, it shows that the transmittance of the investigated films increases by 11% for visible light and decreases by 66% for infrared light as compared with the PET substrate.

## Keywords

Thermal-Protective Multilayer Films, Depth Profiling, ToF-SIMS, Rf-GDOES, Flexible Substrate

# 利用ToF-SIMS和Rf-GDOES深度剖析技术研究柔性衬底上的隔热多层膜

吕凯<sup>1</sup>, 周刚<sup>1</sup>, 余云鹏<sup>1</sup>, 刘远朋<sup>2</sup>, 王江涌<sup>1\*</sup>, 徐从康<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>汕头大学, 广东 汕头

<sup>2</sup>汕头万顺包装材料股份有限公司, 广东 汕头

\*通讯作者。

文章引用: 吕凯, 周刚, 余云鹏, 刘远朋, 王江涌, 徐从康. 利用 ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 深度剖析技术研究柔性衬底上的隔热多层膜[J]. 材料科学, 2019, 9(1): 45-53. DOI: 10.12677/ms.2019.91007

## 摘要

目的: 探究隔热多层膜VG1的层结构和光学性能。方法: 利用飞行时间二次离子质谱(Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy, ToF-SIMS)和射频辉光放电发射光谱(Radio-Frequency Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, Rf-GDOES)深度剖析技术, 对PET柔性衬底上的隔热多层膜进行了成分分布和层结构的对比研究。利用Mixing-Roughness-Information (MRI)模型对测量的深度剖析谱进行了定量分析, 并利用分光光度计对多层膜的光学性能进行表征。结果: 通过深度剖析的定量分析, 确定了所研究隔热多层膜主要组成元素的成分随深度变化的分布为: Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~25 nm)/AZO (Ag) (~10 nm)/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~50 nm)/AZO (Ag) (~10 nm)/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~25 nm), 整个薄膜厚度约为120 nm。利用深度剖析数据拟合获得的粗糙度参数随深度变化的关系, 估算出ToF-SIMS和Rf-GDOES深度剖析溅射到第二个Ag峰前界面处的粗糙度分别为1.2 nm和4.6 nm。对透过率的表征发现, 该多层膜样品较PET衬底可见光的透过率增加了11%, 而红外光的透过率降低了66%。结论: 利用Rf-GDOES和ToF-SIMS溅射深度剖析定量分析技术, 确定了柔性衬底上隔热功能薄膜的元素成分分布、膜厚及膜层间界面粗糙度, 并利用分光光度计定量确定了该隔热功能多层膜的透过率。

## 关键词

隔热多层膜, 深度剖析, ToF-SIMS, Rf-GDOES, 柔性衬底

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的发展和环保意识的增强, 隔热材料的使用日益普及, 被广泛应用在门窗、汽车、建筑等行业。特别是, 贴在玻璃上既能防止玻璃粉粹, 又能阻隔阳光辐射的柔性隔热膜越来越受到关注。阳光辐射的能量主要集中在 200~2500 nm 范围内, 其中紫外波段 200~370 nm、可见光波段 380~780 nm、红外波段 780~2500 nm。而太阳光谱中的能量主要分布在红外波段, 因此能否把红外辐射有效阻隔是衡量隔热材料性能优良的主要指标之一[1]。阳光控制膜从 20 世纪 70 年代兴起, 大约经历了五代的发展, 分别为: “茶纸”、染色膜、金属膜、陶瓷膜、多层光学薄膜[2] [3]。隔热膜本身由隔热的间隔物、薄膜的骨架和热反射层等若干不同的材料或膜层组成[4] [5]。隔热膜一般可分为两类: 一类是包括 Ag、NiCr、不锈钢、Ti 等的金属膜系; 另一类是包括金属氧化物、TiN 等的介质膜系[6] [7]。进入 21 世纪后, 在纳米技术开发和应用的基础上, 纳米分散体涂层隔热膜成为隔热膜最新技术。目前, 市场上诸多隔热膜的隔热功能膜层是采用磁控溅射技术制备[8], 但质量参差不齐, 对红外波段具有非常好阻隔效果的隔热膜不多。因此, 研究出一种对可见光高透, 红外光高阻隔, 性能优异的柔性隔热膜成为行业的研究热点。

对隔热膜制备过程的质量控制, 以及对成分和层结构未知隔热膜的研究来说, 深度剖析技术是最为有效的手段之一。本文将利用 ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 深度剖析定量分析的方法, 对进口优质的柔性隔

热多层膜—VG1 样品中的元素成分分布及其层结构进行定量表征,并结合分光光度计测量其光谱透过率,以对这一优质的柔性隔热多层膜有更为清楚的认识。

## 2. 实验

### 2.1. 样品清洗

为比较 VG1 样品及其 PET 衬底的表面形貌,先将样品和 PET 衬底进行表面超声清洗处理,避免表面污染物对测试结果产生的影响。清洗设备为 KQ2200DE 型超声波清洗机,样品和 PET 衬底放置一个装有分析纯丙酮溶液的烧杯,超声清洗 30 min,然后再用无水乙醇清洗 30 min [9]。

### 2.2. 表面形貌表征

利用 Dimension Icon 扫描探针显微镜(AFM)对清洗后的 VG1 样品和 PET 衬底的表面采用智能模式扫描,扫描范围为  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ ,成像数据点阵为  $256 \times 256$ ,然后通过分析软件对数据进行相应的分析处理。

### 2.3. ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 深度剖析

ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 设备分别是德国 ION-ToF 公司的 ION-ToF SIMS 5 和法国 Horiba 公司的 GD-Profilier2。ToF-SIMS 深度剖析的工作参数为:  $2\ \text{keV}\ \text{O}_2^+$  溅射离子,  $30\ \text{keVBi}^+$  为二次离子源,束流强度为  $30\ \text{nA}$ ,溅射面积为  $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ ,分析面积为  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ,在此工作条件下测量了 Al-Ti 多层膜的标准样品,得到的溅射速率约为  $0.4\ \text{nm/s}$ 。Rf-GDOES 可用于研究材料表面至几百微米深度的元素成分分布,其深度分辨率可至  $1\ \text{nm}$  [10],深度剖析优化的工作参数为:直径  $4\ \text{mm}$  铜阳极,溅射用氩气纯度优于  $99.99\%$ ,压强  $750\ \text{Pa}$ 、功率  $20\ \text{W}$ 、频率  $1000\ \text{Hz}$ 、占空比  $0.0625$ 、合功率  $1.25\ \text{W}$ 。

ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 深度剖析技术是分析膜层结构和成分的有效手段,得到的结果可以互为验证,它们的异同点如下:

1) RF-GDOES 的样品要求表面平整,绝缘和导体均可,通过超声清洗后就可以直接进行测量。ToF-SIMS 要求样品更为平整,不然需采用环氧树脂固定样品,经过切割、抛光达到表面光滑的目的,对于绝缘样品为保证靶面导电还需镀金[11]。

2) Rf-GDOES 在测量样品时,离子溅射的面积较大( $\sim$ 几十  $\text{mm}^2$ ),而 ToF-SIMS 离子溅射的面积较小( $\sim$ 几百  $\text{nm}^2$ ); Rf-GDOES 不需要超高真空的工作环境[12],溅射速率可高达 $\sim\mu\text{m/s}$ ,特别适合较厚( $\sim$ 几百  $\mu\text{m}$ )的膜层;而 ToF-SIMS 需要超高真空环境,溅射速率 $\sim\text{nm/s}$ ,溅射深度一般小于  $\mu\text{m}$ 。

### 2.4. 透过率表征

利用 Lambda950 分光光度计对样品进行紫外-可见光-红外透过率的测量。光电传感器交替探测到光透过置于样品池 VG1 样品和置于对比池空白玻璃衬底的光强度,然后以透过 VG1 样品光强信号除去透过空白玻璃光强信号,即得到 VG1 样品透过率。加入厚度相同的 PET 衬底进行实验对比,以证明薄膜对透过率产生的效果。

### 2.5. 隔热膜的设计原则

一般为了减小材料本身的导热系数,发挥金属材料表面的高反射率,减小辐射热,一般选用导热系数较小的 PET 膜为衬底[13]。由热传导的基本理论可知在两个存在温差的表面插入反射屏可使传递的热量成倍的下降,在绝热空间放置 N 层隔热屏,通过该空间的辐射热就可以减少到原来的  $1/(n+1)$  [4]。

优质隔热膜中,往往会考虑加入 Ag 层。Ag 多层隔热膜的设计主要是: 1) 使隔热膜具有较高的可见

光透过率,并能阻隔大部分的红外线[14]; 2) Ag膜具有抗硫化和抗氧化的特点,因此在自然环境下能保持稳定。另外,为了使PET形成微观平滑的表面,通常需要在PET表面上镀一层底膜。

### 3. 实验结果及讨论

#### 3.1. 形貌分析

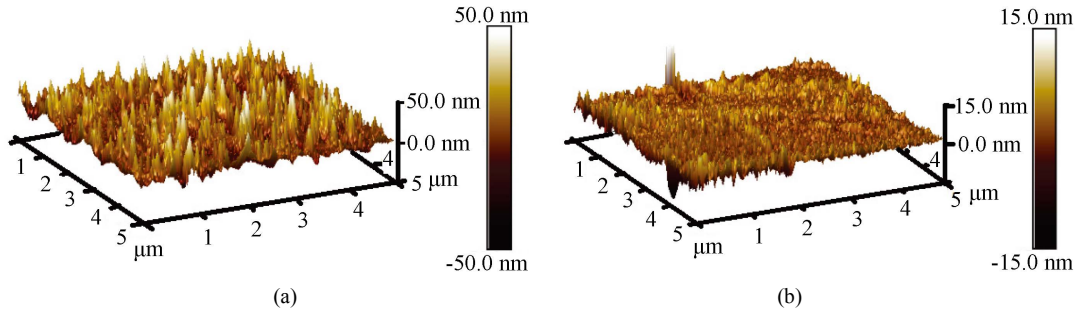


Figure 1. Topography of PET substrate (a) and VG1 sample (b)

图 1. PET 衬底(a)与 VG1 样品(b)的表面形貌图

图 1 给出 PET 衬底(a)与 VG1 样品(b)的表面形貌,比较可以看出 PET 的表面粗糙度明显大于 VG1 样品,测量得到 PET 和 VG1 样品表面粗糙度(算术平均值)分别为:  $Ra(\text{PET}) = 4.588 \text{ nm}$  和  $Ra(\text{VG1}) = 1.08 \text{ nm}$ 。

#### 3.2. Rf-GDOES 深度剖析结果

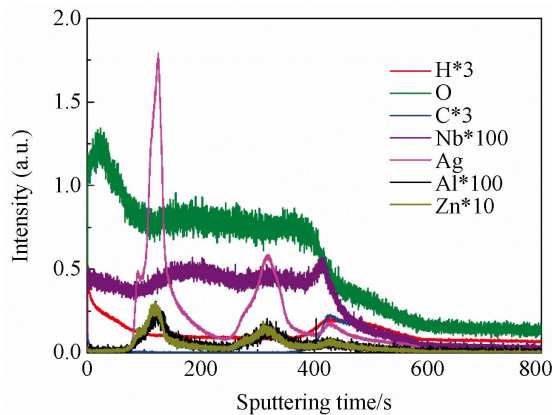


Figure 2. The measured Rf-GDOES intensity-sputtering time depth profiles of VG1 sample

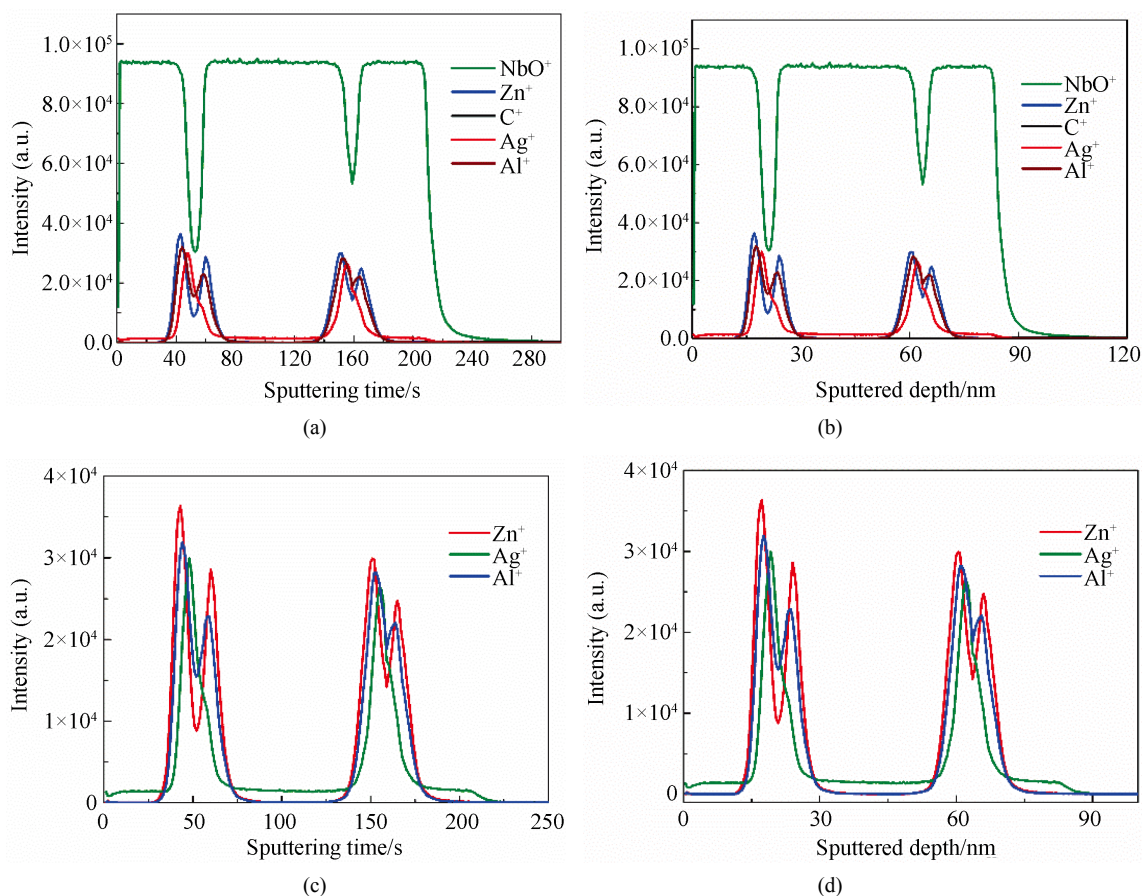
图 2. Rf-GDOES 深度剖析测量的 VG1 样品中各元素强度和溅射时间的关系

图 2 给出了 Rf-GDOES 深度剖析对 VG1 样品中所有元素的测量结果。很明显,样品中含有 Al、Zn、Ag、Nb 等金属元素,同时还有 H、O、C 等非金属元素。Al、Zn、Ag 信号峰均出现在同一时间处,意味着它们处在同一层; Nb 从表面贯穿直至 PET 衬底表面; H 源于样品的污染,其强度自表面始先下降直至衬底开始上升,然后再次下降直至平稳; O 信号从表面一直贯穿至衬底; C 信号经溅射从表面(污染层)迅速衰减直至衬底开始上升,然后再次下降直至平稳。由此可以推断 VG1 样品层结构如下:表面污染层(以 C 信号衰减为特征)/Nb 与 O (含少量的 H)层/Zn, Al, Ag 与 O (含少量的 H)层/Nb 与 O (含少量的 H)层/Zn, Al, Ag 与 O (含少量的 H)层/Nb 与 O (含少量的 H)层/极薄的 Zn, Al, Ag 与 O (含少量的 H),



可视为 PET 表面上的底膜)层/PET 衬底(C, H, O)。虽然 Rf-GDOES 深度剖析可以对薄膜样品中各元素进行快速的整体测量,但由于其坑道效应分辨率随着溅射时间(深度)增加迅速衰减[15] [16],很难给出膜层的精细层结构及膜材料的化学成分构成,而高分辨率的 ToF-SIMS 深度剖析可以弥补这些缺陷。

### 3.3. ToF-SIMS 深度剖析结果



**Figure 3.** The measured ToF-SIMS intensity-sputtering time depth profiles (a), (c) and intensity-sputtered depth profiles (b), (d) of VG1 samples

**图 3.** ToF-SIMS 深度剖析测量的 VG1 样品中主要元素强度 - 溅射时间谱(a), (c)和强度 - 深度谱(b), (d)

图 3(a)给出了 ToF-SIMS 深度剖析对 VG1 样品中元素强度随溅射时间变化的测量结果。由测量 Al-Ti 多层膜标样获得的溅射速率 $\sim 0.4$  nm/s, 可将图 3(a)的强度 - 时间谱转换成强度 - 深度谱, 如图 3(b)所示。为了使夹层观察得更清楚, 将 Al、Zn、Ag 等金属元素信号单独提取出来, 用图 3(c)和图 3(d)分别表示其测量的强度 - 时间谱和强度 - 深度谱。由图 3 可知: 功能膜层是由 NbO<sup>+</sup>层与含 Al、Zn、Ag 金属元素的夹层所组成。考虑到 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>具有较高的折射率、较低的可见光吸收、并具有抗腐蚀性, 以及良好的热稳定性和化学稳定性, 被广泛应用于光学功能薄膜, 再结合 Cs<sup>+</sup>溅射的 ToF-SIMS 深度谱(本文未给出), 可以推断 VG1 样品的主要膜层是 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。对于其中的夹层, 由于 Zn<sup>+</sup>与 Al<sup>+</sup>完全处在同一深度(见图 3(d)), 而 Ag<sup>+</sup>居于其中。考虑到 ZnO 掺 Al (即 AZO)优越的透光及导电性[17] [18], 可以推测 VG1 样品中的夹层是由 AZO 与 Ag 共溅射生成。由图 3(c)或图 3(d)进一步发现 Ag 峰是位于 AZO 两个峰之间(更靠近第一个峰), 因此可以推测, AZO 开始溅射后, 紧接着是 Ag 的溅射, 而 Ag 的溅射停止后, AZO 仍继续溅射了一段时间。

对于二次离子质谱而言，测量的信号满足质量守恒定律，可选择将测量的强度-深度谱峰面积的 1/2 处作为估算相应元素所对应层的厚度。由此得到 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的厚度两边为~25 nm，中间为~50 nm；夹层(AZO 和 Ag)得到厚度为~10 nm，整个薄膜厚度约为 120 nm。更精细的膜层结构信息可利用以下测量深度谱的定量分析所获得。

### 3.4. ToF-SIMS 与 Rf-GDOES 测量深度谱的定量分析

溅射深度剖析谱的定量分析基于测量的归一化信号强度  $I(z)/I^0$  可以表示为真实的成分深度分布  $X(z')$  与一个深度分辨率函数(DRF)  $g(z-z')$  的卷积，即：

$$\frac{I(z)}{I^0} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(z')g(z-z')dz' \tag{1}$$

其中， $z$  是溅射深度， $z'$  是积分参数，深度分辨率函数  $g(z-z')$  包含在深度剖析过程中所有导致真实成分分布发生失真的各种因素，并且满足归一化条件。若已知深度分辨率函数，测得样品的归一化强度，就可根据式(1)得出真实的成分分布  $X(z)$  [19]。

目前使用最为广泛的溅射深度谱定量分析的模型是 Mixing-Roughness-Information (MRI)模型[20]。在 MRI 模型中，DRF 由三部分组成，分别用三个参数(即原子混合长度  $w$ ，粗糙度  $\sigma$ ，信息深度  $\lambda$ )来表征：

$$g(z) = g_w \otimes g_\sigma \otimes g_\lambda$$

$$\begin{cases} g_w(z) = \frac{1}{w} \exp\left(-\frac{z+w}{w}\right) & z > -w \\ g_\sigma(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \\ g_\lambda(z) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) & z \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中， $w$  为溅射导致的原子混合长度， $\sigma$  为样品表面的粗糙度， $\lambda$  为来自测量信号的信息深度，这三个物理参数不仅表征了测量深度剖析谱失真的三个主要因素，其值还可以通过理论计算或者实验测量得到。MRI 模型可以应用于确定各种深度剖析谱的分辨率和局域性的扩散系数[16]。

选择 ToF-SIMS 的 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Ag 深度谱作为 MRI 模型的拟合对象，拟合的结果如图 4(a)和图 4(b)所示。通过拟合不仅获得了 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Ag 的层结构厚度的信息，而且还获得了膜层间的界面粗糙度值。

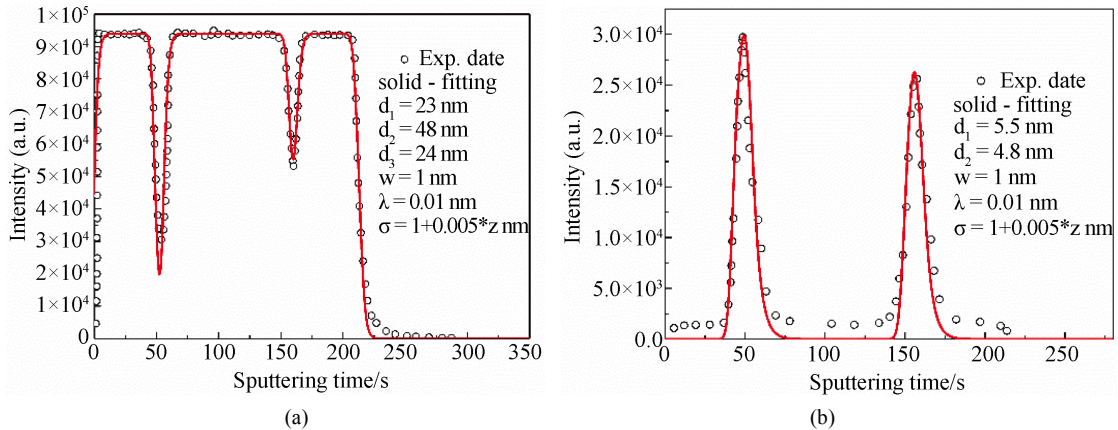
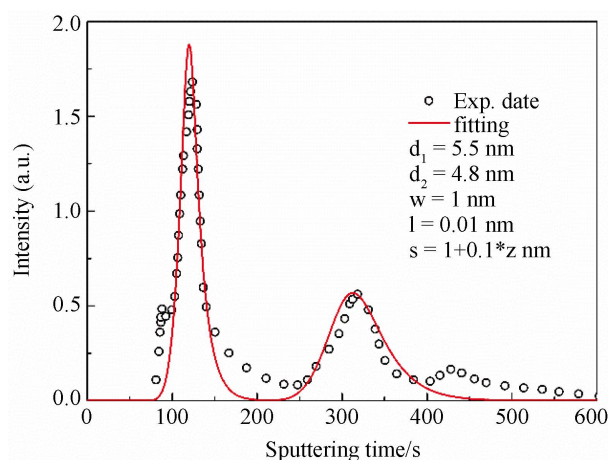


Figure 4. Fits of the Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (a) and Ag (b) ToF-SIMS depth profiles by the MRI model

图 4. ToF-SIMS 的 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 深度谱(a)和 Ag 深度谱(b)MRI 模型的拟合

利用拟合 ToF-SIMS Ag 获得的层结构参数, 再对测量的 Rf-GDOES Ag 层深度谱进行拟合, 结果如图 5 所示。与图 4(b) ToF-SIMS 的拟合结果比较, 最大的差别就是由于 GDOES 中溅射的坑道效应, 拟合得到的粗糙度参数随着溅射时间(深度)的增加而大幅增加。利用拟合获得的粗糙度参数随深度变化关系, 可以估算在 ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 深度剖析中, 当溅射达到第二个 Ag 峰前的界面处时, 界面粗糙度分别为 1.2 nm 和 4.6 nm。这也解释了为什么在 GDOES 深度剖析中, 第二个 Ag 峰的强度较 ToF-SIMS 测量的结果衰减更大[15]的原因。溅射诱导粗糙度的增加不仅会使得谱峰峰值降低, 而且导致测量深度谱展宽, 深度分辨率降低[15] [16]。



**Figure 5.** Fit of the Ag Rf-GDOES depth profile by the MRI model

**图 5.** Ag Rf-GDOES 强度 - 时间谱及 MRI 模型的拟合

综合 ToF-SIMS 和 Rf-GDOES 测量的深度谱, 以及相应的 MRI 模型拟合结果, 可以得到 VG1 样品的成分分布及相应膜层的厚度值(图 6), 结果列于表 1 中。

**Table 1.** The composition and corresponding thickness values of VG1 sample

**表 1.** VG1 样品的膜层成分及相应的厚度值

层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
膜层成分	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AZO	Ag	AZO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AZO	Ag	AZO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
厚度(nm)	23.0	4.0	5.5	4.0	48.0	4.0	4.8	4.0	24.0



**Figure 6.** Schematic of the VG1 layered structure

**图 6.** VG1 薄膜结构示意图

### 3.5. 透过率

利用分光光度计测量了光谱范围在 200~1800 nm 的透过率。图 7 给出了 23  $\mu\text{m}$ -PET 衬底及 VG1 样品透过率的测量结果。很明显,在可见光(380~780 nm)范围内, VG1 样品较 PET 有较高的透过率,对红外光有极大的阻隔作用。表 2 给出了 23  $\mu\text{m}$ -PET 衬底及 VG1 样品在可见光(550 nm), 紫外(300 nm)及红外(1400 nm)特定波长处所对应的透过率。由此可知:与 PET 衬底相比, VG1 样品可见光的透过率增加了 11%, 而红外光的透过率降低了 66%。由于在太阳光总辐射能量中, 紫外线、可见光、红外线波段的能量分别占 3%、44%、53%, 由此可计算得到 VG1 对太阳辐射总的隔热率为 83.5% [21] [22], 所以, 本文研究的 VG1 多层薄膜样品, 既可以有效的透过可见光, 又能有效的实现对太阳辐射隔热的效果, 属优质的隔热功能膜。

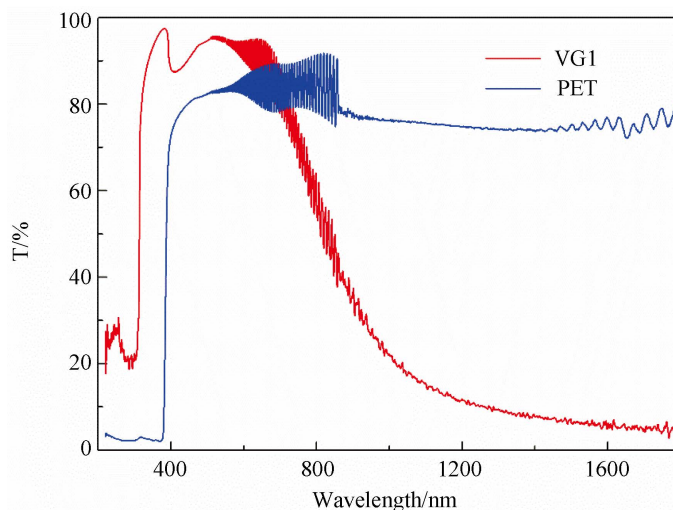


Figure 7. Transmittance of PET substrate and VG1 sample  
图 7. PET 衬底及 VG1 样品的透过率

Table 2. Transmittance of 23  $\mu\text{m}$ -PET substrate and VG1 sample  
表 2. 23  $\mu\text{m}$ -PET 衬底及 VG1 样品的透过率

样品	可见光透过率(550 nm) (%)	紫外光透过率(300 nm) (%)	红外光透过率(1400 nm) (%)
23 $\mu\text{m}$ -PET	83.9	2.2	73.9
VG1	95.4	21.6	7.7

## 4. 结论

利用 Rf-GDOES 和 ToF-SIMS 溅射深度剖析技术, 对 VG1 多层薄膜结构的元素成分分布、膜厚及膜层间的界面粗糙度进行了定性和定量的表征, 得出了 VG1 是一种由 AZO、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、Ag 在 PET 衬底上叠加而成的多层膜, 其中  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  的厚度在膜两边为~25 nm, 中间为~50 nm; 两个主要夹层(AZO 和 Ag)的厚度为~10 nm, 整个 VG1 膜厚约为 120 nm。利用分光光度计验证了 VG1 多层膜样品为优质的隔热功能膜, 对可见光的透过率达到 90%以上, 而对太阳辐射总的隔热率达到 80%以上。

## 致 谢

感谢斯洛文尼亚斯特凡研究所 Dr. J. Kovac 对样品进行的 ToF-SIMS 深度剖析的测量。



## 基金项目

广东省汕头市科技局横向项目(“柔性衬底上镀金属隔热膜”)。

## 参考文献

- [1] 高超, 秦长喜, 牛娟妮, 等. 隔热膜的性能测试及评价[J]. 信息记录材料, 2012, 13(6): 22-25.
- [2] 张明, 潘永强, 陈佳, 等. 光谱选择反射型太阳隔热膜研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 79-83.
- [3] 刘志海. 我国玻璃贴膜工业发展回顾与展望[J]. 玻璃, 2018, 45(7): 1-12.
- [4] 倪星元, 程银兵, 马建华, 等. SiO<sub>2</sub> 气凝胶柔性保温隔热薄膜[J]. 功能材料, 2003, 34(6): 725-727.
- [5] 吕宏洋. 汽车隔热膜结构及性能[J]. 汽车与配件, 2011(16): 46-46.
- [6] 蒋恒, 戴彬, 饶敏. 磁控溅射技术沉积 NSN70 隔热膜的实验研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2017, 37(3): 361-365.
- [7] 陈晓琴, 黄安畏. 轻薄柔性多层隔热材料的应用分析[J]. 中国新技术新产品, 2013(21): 133-134.
- [8] 牛娟妮, 杜彦飞, 秦长喜, 等. 纳米隔热膜的研究[J]. 信息记录材料, 2013, 14(1): 51-55.
- [9] 丁泽良, 林长生, 董运超, 等. 基材清洗工艺对 SiO<sub>2</sub>/PET 膜基结合强度的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 44-47.
- [10] Liu, Y., Jian, W., Wang, J.Y., Hofmann, S. and Shimizu, K. (2015) Quantitative Reconstruction of the GDOES Sputter Depth Profile of a Monomolecular Layer Structure of Thiourea on Copper. *Applied Surface Science*, **331**, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.065>
- [11] 包泽民. ToF-SIMS 二次离子检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [12] 梁家伟, 韩逸山, 庄素娜, 等. 辉光放电发射光谱在材料成分 - 深度分析中的应用[J]. 真空, 2017, 54(5): 39-46.
- [13] 程岚. 超薄柔性多层复合膜及其隔热性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2008.
- [14] 李丹之. 掺杂半导体/金属膜系的光谱透射反射特性[J]. 物理学报, 1999, 48(12): 2349-2356.
- [15] Liu, Y., Yu, W.H. and Wang, J.Y. (2015) A Model for Quantification of GDOES Depth Profiles. *Vacuum*, **113**, 5-10. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.11.015>
- [16] 刘毅, 王江涌. 溅射深度剖析的定量分析及其应用[J]. 真空, 2012, 49(2): 71-76.
- [17] 穆慧慧. 铝掺杂量对氧化锌薄膜光电性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [18] Wang, Y., Xu, M., Li, J., et al. (2017) Sol-Combustion Synthesis of Al-doped ZnO Transparent Conductive Film at Low Temperature. *Surface & Coatings Technology*, **330**, 255-259. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.018>
- [19] 康红利, 劳珏斌, 刘毅, 等. SIMS 溅射深度剖析的定量分析[J]. 真空, 2015, 52(2): 44-49.
- [20] Hofmann, S. (2010) Atomic Mixing, Surface Roughness and Information Depth in High Resolution AES Depth Profiling of a GaAs/AlAs Superlattice Structure. *Surface & Interface Analysis*, **21**, 673-678. <https://doi.org/10.1002/sia.740210912>
- [21] 干蜀毅, 赵腾, 陈大鹏, 等. 汽车前挡风玻璃隔热膜的研究进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(1): 48-53.
- [22] 翟玉涛, 戴彬, 王军生, 等. 大面积 PET 基中频反应磁控溅射沉积 TiN 隔热薄膜实验研究[J]. 真空, 2011, 48(6): 40-45.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)