

碳纳米管薄膜的制备及其宽频域吸光特性研究

李钧颖 朱永 王宁 张洁

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 利用真空抽滤法制备出具有宽频域吸光性能,且可应用于金属和塑料等多种环境的自支持碳纳米管薄膜(CNF);利用表面活性剂辅助制备了稳定的碳纳米管分散液,利用真空抽滤法在混合纤维素滤膜上得到了不同厚度的碳纳米管薄膜,并利用氙灯加热法实现了薄膜的完美分离。结果表明:碳纳米管分散液经真空抽滤后可在滤膜上形成具有纠缠交错呈平面网状结构的连续均匀各向同性薄膜,薄膜厚度与抽滤碳纳米管沉积量成正比关系;薄膜的光吸收率随着方阻的增大而增大,实验观察结果与用电磁场理论分析结果相符;350~2500 nm 波段宽频域的光吸收率为 94%~98%,并具有一定的提高空间。

关键词 薄膜;碳纳米管薄膜;真空抽滤法;吸光性能;电磁场理论

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s107001

Research of Preparation and Light Absorption Property in Wide Frequency Region of Nanotube Films

Li Junying Zhu Yong Wang Ning Zhang Jie

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Self-supporting carbon nanotube films (CNFs) with light absorption in broadband frequency field are prepared by the method of vacuum filtration, and the films can be applied to a variety of environments, such as metal and plastic. Carbon nanotubes aqueous solutions with stable dispersion are prepared with the assist of surfactant. CNFs with different thicknesses are prepared on mixed cellulose membrane filter by vacuum filtration method. Perfect separation of the films is achieved with xenon lamp heating method. The results show that entangled and continuous isotropy CNFs with staggered planar mesh structure are formed from carbon nanotube dispersion solution and the film thickness is proportional to the amount of deposition carbon nanotubes; the light absorption rate increases with the increase of sheet resistance, which is consistent with optical absorption characteristics in electromagnetic field theory. The light absorption rate in the wavelength region of 350~2500 nm is 94%~98%, which has certain potential.

Key words thin films; carbon nanotube film; vacuum filtration method; light absorption performance; electromagnetic field theory

OCIS codes 310.6860; 300.1030; 260.2110

1 引言

由呈六边形排列的碳原子构成的单层或多层同轴圆管称为碳纳米管(CNT),由多根CNT有序或无序排列所构成的薄膜称为碳纳米管薄膜(CNF)。由于其优异的电学和光学特性,如高迁移率、载流能力、柔韧性等独特性质,CNF可应用于互补金属氧化物

半导体(CMOS)集成电路和高温器件,替代传统硅材料作为沟道进而提高器件迁移率和抑制短沟道效应,并且CNF能最大限度减小单壁碳纳米管性质、位置、方向的不均匀性带来的器件性质离散,可以实现中等规模集成电路应用^[1-4],并开始应用于薄膜晶体管、传感器、透明电极材料以及纳米多孔能源存储等领

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61376121)、中央高校基本科研业务费科研专项(106112013CDJZR120008)

作者简介: 李钧颖(1992—),女,硕士研究生,主要从事微米/纳米器件及系统等方面的研究。

E-mail: juneliptics@gmail.com.

导师简介: 朱永(1973—),男,博士,教授,主要从事光微纳器件及系统、光电仪器等方面的研究。

E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn(通信联系人)

域。近几年,国内也针对碳纳米管的阴极场发射特性和碳纳米管在脉冲激光器等领域的应用开展了相应的研究^[5-7]。2011年,美国宇航局(NASA)的工程师利用化学气相沉积法(CVD)制备了垂直取向的CNF,薄膜厚度约为40~100 μm,该取向薄膜实现了对紫外、可见光、红外以及远红外波段光超过99%的吸收率,其中一项重要的应用是杂散光抑制:附着在材料表面的纳米碳管可以收集并阻滞背景光线,从而阻止其从表面反射出去,降低对需要观测目标光线的干扰,在航天领域具有广泛的应用前景^[8]。

CNF的制备方法主要包括CVD直接生长法和溶液法,其中CVD直接生长法可用于生长一致/随机取向的CNF,但其制备工艺复杂,生长效率低且成本较高;而溶液法包括电泳法,旋涂法,L-B法和真空抽滤法等。其中真空抽滤法被认为是制备由纯CNT组成的均匀导电CNF最简单的方法^[9]。该方法的优点:1)随着薄膜的生长,较厚处的薄膜由于网孔密集,抽滤速率下降,从而可实现均匀成膜的目的;2)在真空抽滤的作用下,纳米管趋于垂直沉淀的方式,从而在纳米管之间产生了最大程度的重叠和渗透,带来了高电导率和机械完整性;3)薄膜厚度的可控性。

真空抽滤法是在滤膜上沉淀生长CNF,在实际应用时需要将薄膜与滤膜分离,过渡转移至目标基底上。聚二甲硅氧烷基(PDMS)法为目前最常用的CNF分离转移法,该方法利用PDMS作为过渡转移层,利用PDMS和CNF之间的粘附力将薄膜转移至PDMS上,再将带有薄膜的PDMS转移至目标基底上,并将PDMS固化剥离即可完成薄膜的转移工作^[10-12]。该方法的突出优点为可制备图形化的CNF,而缺点则在于转移过程对碳纳米管薄膜的污染,工艺的复杂性以及目标基底的选择局限性。本文建立了一种CNF的分散、真空抽滤以及滤膜分离方法,可制备出厚度均匀可控的单独自支持、各向同性的碳纳米管薄膜,对中红外到紫外宽频域波段均具有很强的吸光特性。

2 实验制备

2.1 碳纳米管分散液的制备

真空抽滤法利用真空负压,将CNT从溶液中过滤出来,并在滤膜上形成CNF。抽滤的效率和薄膜的成膜质量取决于CNT的分散程度,若CNT未完全分散,出现团聚,抽滤效率会降低,且所形成的薄膜均匀性较差,表面粗糙。因此稳定CNT分散

液的制备是真空抽滤制膜的前提。

将购买的羧化(CNT-COOH)和纯化多壁碳纳米管(中国科学院成都有机化学有限公司)粉末分别适当研磨并加入去离子水在超声清洗机内预超声分散1 h。加入碳纳米管水分散剂(TNWDIS,中科时代化学有限公司)作为辅助分散剂继续超声震荡12 h,并间隔4 h取样。12 h超声震荡样品静置共72 h以检验分散体系的稳定性,间隔12 h取样。利用美国Brookhaven公司生产的型号为90Plus的激光散射仪对CNT的粒度进行测量。

CNT分散液中CNT等效粒径随超声时间的变化关系如图1所示,预分散1 h后CNT-COOH分散颗粒的等效直径为277.4 nm,添加辅助分散剂后超声震荡12 h降至205.2 nm。纯化多壁碳纳米管预分散1 h后的等效粒径为356.7 nm,添加辅助分散剂后超声震荡12 h降至121.7 nm。TNWDIS对于亲水性较好的CNT-COOH的辅助分散作用比纯化CNT低,主要是因为前者的羧基削弱了一端是亲水基,另一端是亲油基表面活性剂的作用。

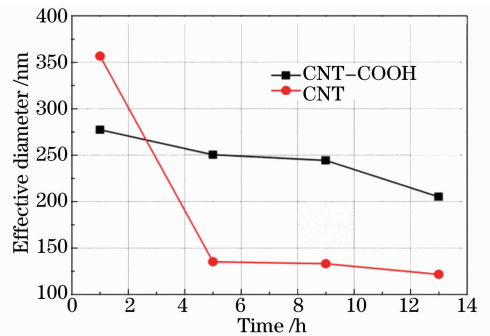


图1 不同超声时间的等效粒径变化关系

Fig. 1 Relationship between equivalent particle size and ultrasound time

超声溶液72 h的静置实验未发现有絮状物或沉淀产生,其等效粒径与静置时间的关系如图2所示。

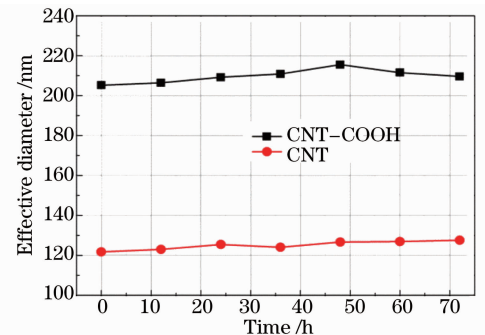


图2 不同静置时间的等效粒径变化关系

Fig. 2 Relationship between equivalent particle size and standing time

示,等效粒径随着静置时间的延长并未出现明显变化,只呈现小幅度的动态平衡,说明经过 TNWDIS 辅助超声的碳纳米管分散体系非常稳定。

2.2 真空抽滤法制备碳纳米管薄膜

利用真空泵、布氏漏斗和上嘴滤瓶搭建真空抽滤系统。采用混合纤维素酯滤膜(MCE),滴加稳定的

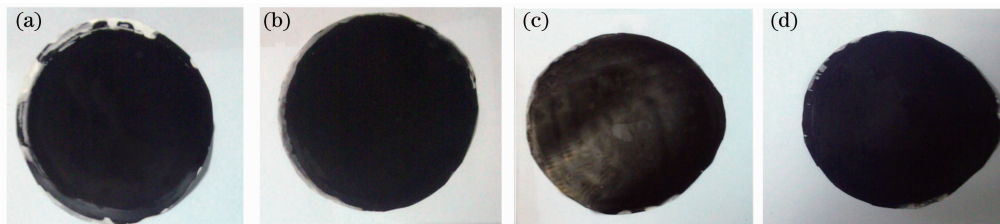


图3 MCE 滤膜上不同沉积量的羧化 CNF。(a) 50 mg; (b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

Fig. 3 Carboxylation CNFs on MCE filters with different deposit amounts. (a) 50 mg; (b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

2.3 薄膜与滤膜的分离

PDMS 转移法在分离转移 CNF 和滤膜时,工艺较为复杂。由于制备的 CNF 较厚,在滴加分散液时薄膜内部易形成分层结构,层与层之间的附着力相对较小,在 PDMS 转移时容易破碎断裂,难以分离出完整均匀的 CNF。

MCE 材料为纤维素酯类,包括硝酸纤维素和醋酸纤维素,也称为硝化纤维,易燃且燃烧生成物大多为气体。而多壁 CNT 燃点则在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,在空气中 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下都非常稳定,二者之间燃点的差别以及 MCE 燃烧气体生成物的特点,决定了燃烧去除 MCE 滤膜的可行性。考虑采用一种缓慢加热,直至 MCE 滤膜燃烧,从而可完整保留 CNF 的方法。

CNF 在可见光区域为纯黑体,具有较高的可见光吸收率。采用模拟太阳光源氙灯加热薄膜和滤膜基底,数秒内即可见 MCE 滤膜急速完全燃烧,而 CNF 未受到任何影响。分离后的 CNF 可以任意裁剪或弯曲,可单独使用或转移到其他基底上。图 4 是用此方法与滤膜分离并将圆弧剪裁后的 CNF,分离后薄膜表面没有任何变化,背面也非常平整,没有

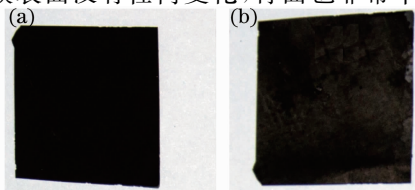


图4 与 MCE 滤膜分离后经剪裁的自支持 CNF。

(a) 背面;(b) 正面

Fig. 4 Self-supporting CNF without MCE filters after cutting. (a) Front side; (b) back side

CNF 分散液并控制抽滤速度,使 CNT 均匀沉积在滤膜上,并在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干。以 TNWDIS 辅助分散的质量浓度均为 1 mg/mL 的 50、100、150、200 mL 的 CNF-COOH 分散液分别在 MCE 滤膜上沉积了 CNT 含量为 50、100、150、200 mg 的 CNF,如图 3 所示。肉眼观察 CNF 呈现纯黑色,表面光滑平整。

灼烧痕迹,肉眼观察不到燃烧残留物。

3 结果及分析

3.1 薄膜的形貌观察

利用日本 KEYENCE 公司的 VHX-500FE 超景深三维显微系统观察分离后 CNF 横截面,如图 5 所示,从厚度上观察薄膜平整均匀,测得 CNF 厚度分别为 10.36 、 20.90 、 30.19 、 $39.98\text{ }\mu\text{m}$,其厚度与沉积碳纳米管量成正比关系,表现出较好的厚度可控性。

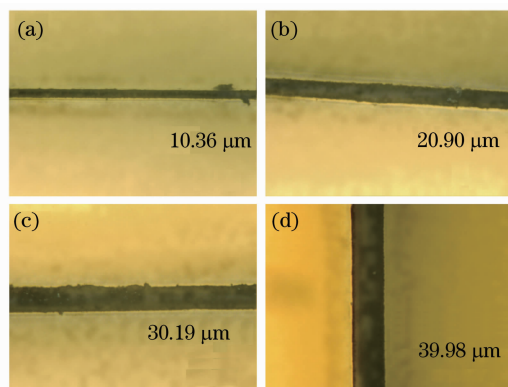


图5 不同沉积量的 CNF 截面图。(a) 50 mg;

(b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

Fig. 5 CNF section views with different deposit amounts.

(a) 50 mg; (b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

利用日本电子株式会社生产的型号为 JSM-7600F 的场发射扫描电子显微镜(SEM)观察 CNF 表面形貌,如图 6 所示。图中可以看到膜内的 CNT 弯曲缠结,形成无序交叠的表面形貌。CNT 的力学性能较好,单根多壁碳纳米管的抗拉强度可达 $150\text{ GPa}^{[13]}$,抽滤过程中纳米管之间的相互缠绕从而可形成柔软且不易碎裂的薄膜。CVD 法制备的

取向碳纳米管薄膜为从基底直接生长而成的膜,薄膜厚度一般即为碳纳米管的长度,而抽滤法所制备的碳纳米管薄膜则展现出面内和面外各向同性的性质,这对于不同方向杂散光的吸收有利。

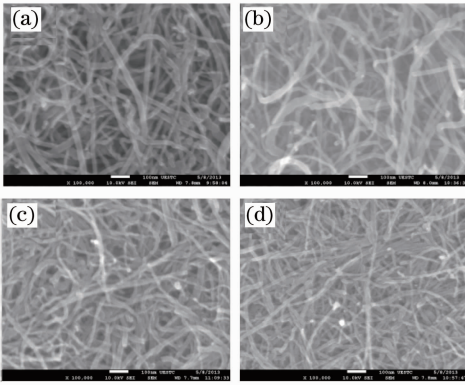


图 6 不同沉积量 CNF 的 1×10^6 倍 SEM 表面形貌。

(a) 50 mg; (b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

Fig. 6 SEM surface morphology magnified 1×10^6 times of CNF with different deposit amounts. (a)

50 mg; (b) 100 mg; (c) 150 mg; (d) 200 mg

图 7 为与滤膜分离后薄膜正反面的 SEM 形貌。分离后薄膜与滤膜的接触面展现与正面相同的高低倍形貌。由于真空抽滤时分散液底部的少量沉淀难以过滤,并最终沉积在薄膜正面,因此薄膜正面在低倍观察时略为粗糙,而滤膜接触面则显得较为光滑平整。在高倍观察时,正反面的 CNT 堆积密度几乎无区别。说明氙灯燃烧分离法并未对薄膜的形貌、结构和完整性带来影响。

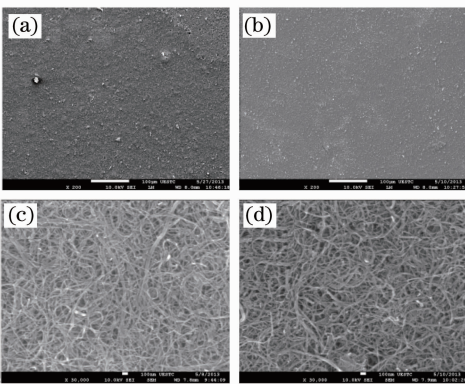


图 7 分离后 150 mg CNF 的 SEM 图。(a)正面 200 倍; (b)反面 200 倍;(c)正面 30000 倍;(d)反面 30000 倍

Fig. 7 SEMs of separated 150 mg CNF. (a) Front side $\times 200$; (b) back side $\times 200$; (c) front side $\times 30000$; (d) back side $\times 30000$

3.2 薄膜的方阻测量

利用苏州百神科技有限公司的 SX1944 型数字式四探针测试仪测量了 CNF 表面均匀分布九个点

的表面方阻值,测量结果如表 1 所示。四张薄膜的九点表面方阻测量结果一致,表明薄膜的厚度与膜内的 CNT 分布状态均匀。随着薄膜厚度的增加,表面方阻逐渐降低。

表 1 CNF 表面九点方阻值

Table 1 Surface resistances of nine-point on CNF

No.	CNF surface resistance / Ω			
	50 mg	100 mg	150 mg	200 mg
1	66	37	23	15
2	67	36	24	14
3	67	36	24	14
4	68	34	25	14
5	67	35	25	15
6	64	37	23	14
7	68	35	24	16
8	65	35	24	14
9	66	36	25	15
Mean	66.44	35.67	24.11	14.56

3.3 薄膜的宽频域吸光特性

利用美国 Perkin Elmer 公司的 LAMBDA 750UV/VIS/NIR 型分光光度计对不同厚度 CNF 在 350~2500 nm 波长范围内的反射光谱与透射光谱进行测试,发现薄膜的透射光谱在测试波段近似为零,因此薄膜的吸收率曲线可视为 100%与反射光谱的相减值。

图 8 为所制备不同厚度独立 CNF 的吸收率曲线图,可以看出 CNF 对光辐射有极强的吸收能力,并且随着厚度的降低,CNF 对光波的吸收率逐渐升高,10 μm 薄膜测试波段的吸收率在 94%~98%之间。4 条曲线在 850 nm 波长处均出现跳变,这与检测器的切换有关,是测量宽频域光谱特性难以消除的现象。

从图 8 中可以看到,吸收率并不是随着薄膜厚度增加而增加的,而是在薄膜厚度增加时减小。4

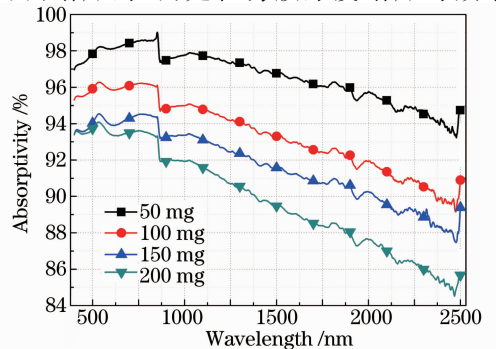


图 8 不同沉积量 CNF 的吸收光谱

Fig. 8 Absorption spectra of CNF with different deposit amounts

者之间厚度最小的薄膜,即 50 mg CNT 沉积量薄膜的透射率近似为零,因此可排除透射因素的影响。一般情况下,厚度的增加可增大薄膜内部光线的传播距离,能带来更好的光吸收效果,或至少表现出等价的吸光特性。因此吸收率随着厚度增加而减小的现象更多与薄膜空气界面处的光学电磁波折射特性相关。为了描述 CNF 在界面处的光吸收特性,定义薄膜的复折射率系数为^[14]

$$\hat{N} = n + ik = \left[\epsilon_1 \mu_1 + i \frac{4\pi \mu_1 \sigma_1}{\omega} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 n 为折射率, k 为消光系数。 ϵ_1 为介电常数, σ_1 为电导率, μ_1 为磁导率。折射率为吸收性介质最主要的光学常数。

复折射系数 \hat{N} 定义了光波在媒质中的传播特性,而阻抗定义为电磁波中某点电场强度与磁场强度的比值,考虑到电场与磁场相互垂直的关系可得阻抗为

$$\hat{Z}_s = \frac{4\pi \mu_1}{c \hat{N}} = \frac{4\pi \mu_1 \omega}{c^2 \hat{q}} = \frac{4\pi}{c} \left(\frac{\mu_1}{\hat{\epsilon}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

空气阻抗 $Z_0 = 4\pi/c = 4.19 \times 10^{-10} \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1} = 377 \Omega$ 。

电磁波的阻抗值也被称为表面复阻抗,利用波矢 q 与频率之间的色散关系可得

$$\hat{Z}_s = \frac{4\pi}{c} \left[\frac{\mu_1}{\epsilon_1 + i(4\pi\sigma_1/\omega)} \right]^{1/2} = R_s + iX_s, \quad (3)$$

式中 R_s 称为表面阻抗,而虚部 X_s 称为表面电抗。由于碳纳米管薄膜具有良好的导电特性,因此可假设 $\epsilon_1 \gg 1$, 可得表面复阻抗为

$$\hat{Z}_s \approx \left[\frac{4\pi\omega\mu_1}{c^2 i(\sigma_1 + i\sigma_2)} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

因此表面阻抗和电抗分别为

$$R_s = \left(\frac{2\pi\omega\mu_1}{c^2} \right)^{1/2} \left[\frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} - \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]^{1/2}, \quad (5a)$$

$$X_s = - \left(\frac{2\pi\omega\mu_1}{c^2} \right)^{1/2} \left[\frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} + \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \right]^{1/2}. \quad (5b)$$

对于导电薄膜来说, $\sigma_1 \gg |\sigma_2|$, 此时薄膜的趋肤深度可表示为

$$\delta_0 = \left(\frac{c^2}{2\pi\omega\mu_1\sigma_1} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

同时简化(5)式可得到表面阻抗和电抗为

$$-X_s = \frac{1}{\sigma_1} \frac{1}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}} \approx \frac{1}{\delta_0 \sigma_1} \approx R_s - X_s. \quad (7)$$

将阻抗的公式代入界面处的反射率表达式

$$R = \hat{r}^2 = \left| \frac{\hat{N}' - \hat{N}}{\hat{N}' + \hat{N}} \right|^2 = \left| \frac{\hat{Z}_s - \hat{Z}'_s}{\hat{Z}_s + \hat{Z}'_s} \right|^2, \quad (8)$$

式中 \hat{r} 为复反射系数, \hat{N}' 表示空气中的复折射率,

\hat{Z}'_s 表示空气中的阻抗。可得碳纳米管薄膜的反射率与表面方阻之间的关系式为

$$R = 1 - \frac{4R_s}{Z_0} \left(1 + \frac{2R_s}{Z_0} + \frac{2R_s^2}{Z_0^2} \right)^{-1}, \quad (9)$$

对 R_s 进行求导,可得到当表面方阻 $R_s = Z_0/\sqrt{2} = 266\Omega$ 时,光学电磁波在薄膜与空气的界面达到最佳阻抗匹配,光透射率最大,从而在薄膜界面处的光学电磁波反射率最小。当表面方阻小于 266Ω 时,光学电磁波在界面处的反射率随着电阻的增大逐渐减小。

碳纳米管由于能带的带间跃迁和呼吸振动模从而具备了紫外、可见光和红外波段的吸收能力^[15-16],厚度大于趋肤深度时,从薄膜界面处入射至内部的光波均可有效地被衰减吸收。由于(6)式中磁导率和电导率具有一定的频率色散特性,而这种频率色散特性较难通过实验直接测得。在估算材料在不同波段的趋肤深度值时,往往采用另一经验公式^[17],该公式可从材料的静态电导率和磁导率估算出某频率点下对应的趋肤深度值,利用方阻测量结果可求得厚度为 10、20、30、40 μm 的 CNF,其趋肤深度分别为 74.3、77.1、77.6、69.7 nm,远远小于薄膜的厚度,从而光波在薄膜上的透射率近似为零。因此碳纳米管薄膜的吸收率可 $A=1-R$, 即

$$A = \frac{4R_s}{Z_0} \left(1 + \frac{2R_s}{Z_0} + \frac{2R_s^2}{Z_0^2} \right)^{-1}. \quad (10)$$

根据(10)式,当方阻小于 266Ω 时,薄膜的吸收率随着方阻的增大而增大,而 CNT 沉积量减少时,薄膜厚度逐渐降低,表面方阻逐渐升高,因此吸收率逐渐增大,这与图 8 中的实验结果相符。提高表面方阻,可提高 CNF 在宽频域的整体吸收率。

(9)式忽略了薄膜反射率的频率色散关系,并且建立在薄膜连续体假设的基础上,可用于解释薄膜与空气界面处的整体反射率变化,但其忽略了薄膜表面孔洞或颗粒对光波的散射作用。从图 6 电镜照片可以看出,薄膜的表面存在几十到几百纳米的孔洞和间隙,其尺寸与入射光波的波长差别相对较小,特别在可见光和紫外波段。此时光波的表面作用将包含有孔洞的散射效应,这种散射作用有助于提高材料对光波的吸收。从图 8 吸收光谱上可以看出,随着波长的降低,薄膜的光吸收率逐渐增大。因此针对抽滤法制备的面内/面外各向同性 CNF,提高其宽频域吸光能力的主要因素可包括:1) 调整薄膜的表面方阻值,使其表面界面处的光频电磁波达到阻抗匹配,降低表面的反射率,从而可增大进入薄膜内部的入射光强度;2) 适当增大表面与波长相当的

孔洞或间隙数量,增大表面的微粗糙度,从而可增大孔洞的散射效应,增大光波在薄膜表面附近的传播距离,从而提高光吸收率。

4 结 论

在碳纳米管水分散剂的辅助下,利用超声分散技术制备出粒度分布稳定的碳纳米管分散液,利用真空抽滤法在 MCE 混合纤维素酯滤膜上制备出不同厚度的碳纳米管薄膜,利用氙灯模拟太阳光源照射碳纳米管薄膜,从而加热并燃烧 MCE 滤膜实现薄膜和滤膜的完美分离。所制备出的薄膜厚度与碳纳米管沉积量成正比关系,且薄膜厚度均匀。薄膜内部碳纳米管呈各向同性分布,交错网状结构为形成连续自支持薄膜的主要原因。

所制备的自支持碳纳米管薄膜在紫外到中红外波段均具有很强的吸光特性。利用电磁场的基本理论,计算得出碳纳米管薄膜的吸收率与表面方阻有关。10 μm 厚薄膜在 350~2500 nm 波段的吸收率在 94%~98%之间;真空抽滤与薄膜分离方法工艺简单,成本较低,在太阳能利用和航天领域具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- 1 B H Chen, H C Lin, T Y Huang, *et al.*. Complementary carbon nanotube-gated carbon nanotube thin-film transistor[J]. Applied physics letters, 2006, 88(9): 093502.
- 2 M Kaempgen, C K Chan, J Ma, *et al.*. Printable thin film supercapacitors using single-walled carbon nanotubes[J]. Nano Lett, 2009, 9(5): 1872-1876.
- 3 E S Snow, J P Novak, P M Campbell, *et al.*. Random networks of carbon nanotubes as an electronic material[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(13): 2145-2147.
- 4 E J Bae, Y S Min, U J Kim, *et al.*. Thin film transistors of single-walled carbon nanotubes grown directly on glass substrates [J]. Nanotechnology, 2007, 18(49): 495203.
- 5 Ye Yun, Guo Tailiang, Lin He, *et al.*. Effects of electrophoretic

- Nano-Ag on field emission properties of CNT cathode[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3542-3546.
- 叶 芸, 郭太良, 林 贺, 等. 电泳纳米 Ag 对碳纳米管阴极场发射性能的影响[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3542-3546.
- 6 Qu Zunshi, Ma Baomin, Liu Jie. Research on pulse laser characteristics for 2 μm Tm:YAP laser based on carbon nanotube absorber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102009.
- 曲遵世, 马宝民, 刘 杰. 基于碳纳米管的 Tm:YAP2 μm 脉冲激光特性实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102009.
- 7 Jiang Meng, Zhang Weigang, Yan Aidong, *et al.*. Tentative measurement researches on fiber loop ring-down cavity coated with carbon nanotubes [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1450-1455.
- 姜 萌, 张伟刚, 颜爱东, 等. 碳纳米管涂覆的光纤环荡腔检测技术的初步研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1450-1455.
- 8 J G Hagopian, S A Getty, M Quijada, *et al.*. Multiwalled carbon nanotubes for stray light suppression in space flight instruments [C]. SPIE, 2010, 7761: 77610F.
- 9 Z Wu, Z Chen, X Du, *et al.*. Transparent, conductive carbon nanotube films[J]. Science, 2004, 305(5688): 1273-1276.
- 10 Q Cao, S H Hur, Z T Zhu, *et al.*. Highly bendable, transparent thin-film transistors that use carbon-nanotube-based conductors and semiconductors with elastomeric dielectrics [J]. Advanced Materials, 2006, 18(3): 304-309.
- 11 M A Seo, J H Yim, Y H Ahn, *et al.*. Terahertz electromagnetic interference shielding using single-walled carbon nanotube flexible films[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(23): 231905.
- 12 D R Hines, S Mezheny, M Breban, *et al.*. Nanotransfer printing of organic and carbon nanotube thin-film transistors on plastic substrates[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(16): 163101.
- 13 B G Demezyk, Y M Wang, J Cumings, *et al.*. Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 334(1-2): 173-178.
- 14 M Dressel. Electrodynamics of Solids; Optical Properties of Electrons in Matter [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 15 T Yamabe, K Fukui, K Tanaka. The Science and Technology of Carbon Nanotubes[M]. Oxford: Elsevier Science, 1999.
- 16 M Ichida, S Mizuno, Y Tani, *et al.*. Exciton effects of optical transitions in single-wall carbon nanotubes[J]. J Phys Soc Japan, 1999, 68(10): 3131-3133.
- 17 R H Scott, V A Fassel, R N Kniseley, *et al.*. Inductively coupled plasma-optical emission analytical spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 1974, 46(1): 75-80.

栏目编辑:韩 峰