

文章编号 1004-924X(2015)06-1598-07

数字化微喷射技术制备聚合物薄膜电阻

杨利军, 陆宝春, 朱晓阳, 朱丽*, 王洪成
(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要:开展了微流体数字化技术制备聚合物薄膜电阻的研究。搭建了聚合物薄膜电阻按需喷射制备系统,将聚乙撑二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸(PEDOT/PSS)聚合物以13.4%的最佳重叠率,按需喷射到RC(Resin-Coating)相纸表面,由聚合物液滴形成的薄膜在相纸表面毛细作用下迅速干燥形成薄膜电阻,并通过退火处理进一步降低薄膜电阻的阻值。实验研究了系统参量对聚合物液滴直径的影响,并通过改变薄膜电阻的行数、列数和层数以及退火处理的条件,制备了阻值为3.5~23.2 M Ω 的薄膜电阻。实验显示薄膜电阻阻值和行数近似线性关系,并且随着制备列数和层数的增大而减小,退火处理可以使薄膜电阻的阻值降低10%~40%。以相同制备参数和退火条件制备的薄膜电阻具有较好的一致性,薄膜电阻的阻值随温度的升高而减小并趋于稳定。实验结果表明,基于微流体数字化技术制备聚合物薄膜电阻具有工艺简单、成本低廉、电阻电学性能优越等优点。

关键词:聚合物薄膜电阻;微流体数字化;按需喷射;RC相纸;重叠率

中图分类号:TM544;TP69 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1598

Fabrication of polymer thin film resistors by a drop-on-demand technology

YANG Li-jun*, LU Bao-chun, ZHU Xiao-yang, ZHU Li*, WANG Hong-cheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: nlgzl@163.com

Abstract: This paper focuses on the fabrication of polymer thin film resistors by the digitalization of microfluids. A fabrication system with drop-on-demand(DOD) jetting for polymer thin film resistors was setup based on the digitalization of microfluids. The poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate)(PEDOT/PSS) was jetted on the Resin Coating(RC) paper substrate at the best overlap of 13.4%, the film consisting of polymer droplets was quickly dried by the capillary action of the paper to form a thin film resistor and the resistance value was reduced by annealing processing. The influences of the system parameters on the diameter of the droplets were researched. The thin film resistors with the resistances varied from 3.5 to 23.2 M Ω were obtained by changing the row number, column number, layer number and the annealing conditions. The results show that the resistance is almost proportional to the row number and decreases with the number of the rows and layers increases. Furthermore, the resistance of the printed thin film resistors has decreased by 10%—40% due to the annealing processing. With the same fabrication parameter and annealing

收稿日期:2014-11-20;**修订日期:**2015-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175268, No. 11102090);中国博士后科学基金资助项目(No. 2014M551584);江苏省三维打印装备与制造重点实验室开放基金资助项目(No. L2014071302)

condition, the thin film resistors show good uniformity. The resistance of the resistors decreases when the temperature increases and reaches a stable level. The experimental results indicate that the fabrication of the polymer thin film resistors based on the drop-on-demand technology has advantages on the simple process, low costs and good electrical properties.

Key words: polymer thin film resistor; microfluid digitalization; drop-on-demand; RC paper; overlap

1 引言

近年来,导电共轭聚合物在印制电子行业中受到了广泛关注和研究^[1]。聚合物薄膜电阻作为最基本的印制电子元件被广泛应用于太阳能电池^[2]、场效应晶体管^[3]和电致变色器件^[4]等领域。聚合物薄膜电阻因其具有更大的设计自由度、电学性质良好、制作过程简单等优点而得到广泛关注。其主要制备方法有喷涂法^[5]、丝网印刷法^[6]、喷墨沉积法^[7]和微喷打印法等。其中,大部分方法工艺过程繁琐、所需设备成本较高,使得微电子器件的制备复杂且昂贵。

微喷打印法既可以制备单一薄膜电阻,也可以制备薄膜电阻、电容、导线等形成印制电子电路,工艺简单、节约材料、基底适应性广,具有较大的发展潜力。目前,按照液滴成型的原理,用于印制电子领域的微喷打印法主要有容积式压电驱动和热气泡式驱动。国外最具代表性的研究机构为韩国汉阳大学、美国路易斯安娜大学^[8]等。韩国汉阳大学的 KANG B J 等采用压电式喷墨打印机,用聚乙撑二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸(PEDOT/PSS)聚合物在镀有疏水化薄膜的PI基板上制备了长度和宽度均为400 μm的3层薄膜电阻,阻值约为5 MΩ^[9],但该工艺存在着制备过程较复杂、对基底需进行疏水化表面处理、打印过程中薄膜电阻需要反复干燥等问题。国内的江南大学史永晶等使用热气泡式驱动的爱普生喷墨打印机在RC(Resin Coating)相纸基底上打印出了有机薄膜晶体管^[10],但打印过程中的聚合物液滴间距不能连续调节,不能对特定的重叠率进行设置。

微流体脉冲驱动-控制技术(也称微流体数字化技术)作为一种无内嵌微可动件、控制方法简单、对流体物理性质无影响的微流体驱动方法,以脉冲流动为微流动基本形态,以脉冲惯性力为主动力,适用于各种液体和粉体,液体喷射量分辨率可达飞升级^[11-12]。近年来,南京理工大学微系统研究室对微流体脉冲驱动-控制在生物、化学等领域的应用以及微流体器件、微光学器件的制

备方面展开了大量研究^[13-16]。

本文基于微流体数字化技术搭建了PEDOT/PSS聚合物薄膜电阻数字化微喷射制备系统,在微流体脉冲惯性力的驱动下,将PEDOT/PSS聚合物液体喷射到RC间隙型相纸基底表面,并通过设置薄膜电阻制备参数,形成了具有一定阻值的薄膜电阻。对制得的薄膜电阻进行退火处理,进一步降低了薄膜电阻的阻值。

2 材料和方法

2.1 实验材料

实验材料包括:PEDOT/PSS溶液,其浓度为1.4%,蓝色,黏度值为40 m·Pa·s,表面张力系数为65 mN/m,上海泰坦科技有限公司生产;PEDOT/PSS具有高导电性能、高均匀性和高稳定性等特点,常被用于制备薄膜电阻的材料。RC间隙型相纸,防水,中国乐凯集团有限公司生产;RC间隙型相纸的表面涂层材料为纳米硅颗粒,其颗粒直径小于200 nm。硼硅酸盐玻璃毛细管(1.0 mm×0.6 mm×100 mm),北京正天易科贸有限公司生产;玻璃微喷嘴是聚合物薄膜电阻制备的核心器件,实验中玻璃微喷嘴是将硼硅酸盐玻璃毛细管先经过拉针仪拉制,再由锻针仪截断并锻制至所需的出口内径制得的,制得的玻璃微喷嘴为内构双锥型,不同出口内径的玻璃微喷嘴如图1所示。

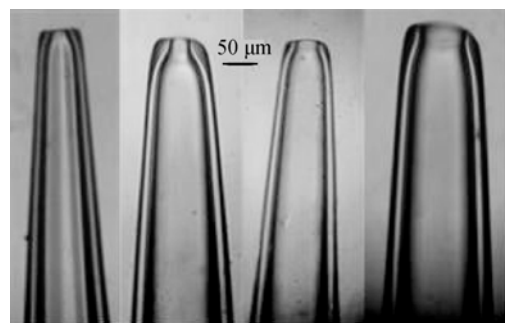


图1 不同内径的玻璃微喷嘴显微照片
Fig. 1 Micrograph of glass micro-nozzles with different inner diameters

2.2 实验系统

图 2 所示为聚合物薄膜电阻数字化微喷射制备系统,由压电驱动-控制系统、压电致动器、X-Y-Z 工作台及其控制器、CCD、玻璃微喷嘴等构成。其中,压电致动器由德国 PI 公司生产,安装在可以 Z 轴调节的固定装置上。通过调节压电驱动-控制系统驱动波形^[17]、驱动电压幅值(U)和驱动频率(f)等控制参数,使微喷嘴内的 PEDOT/PSS 聚合物液体在压电致动器作用下,获得足够大的脉冲惯性力并克服黏性力以液滴的形式喷射到 RC 相纸基底上。通过改变压电驱动-控制系统的控制参数和步进电机的运动参数,可实现液滴的数字化微喷射并在 RC 基底连接成线。

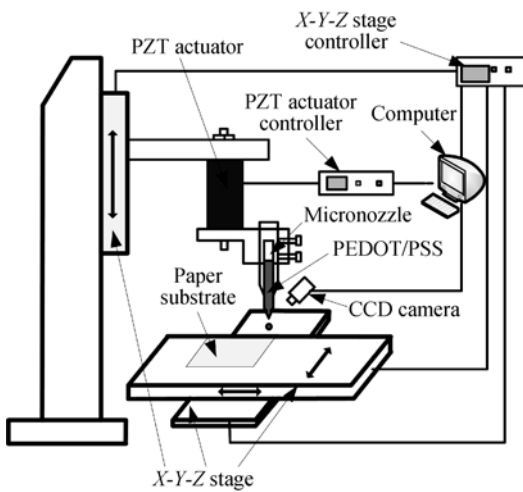


图 2 聚合物薄膜电阻按需喷射制备系统图

Fig. 2 Schematic of PEDOT/PSS jetting system for fabrication of polymer thin film resistors

2.3 实验过程

聚合物薄膜电阻数字化微喷射制备过程主要分为聚合物液滴的数字化微喷射形成、电阻薄膜成型和电阻薄膜退火处理。首先利用毛细管毛细现象原理将 PEDOT/PSS 聚合物溶液吸入玻璃微喷嘴并将其固定在系统中,然后将 RC 型相纸平放在系统工作台上,通过调节压电驱动-控制系统的控制参数和三维工作台的运动参数,使聚合物液滴定点、定量地喷射在相纸基底表面上,并以一定的重叠率连接在一起形成电阻薄膜。电阻薄膜成型后,将其放在恒温干燥箱中,经过 30 min 的退火处理,进一步降低薄膜电阻的电阻值。

聚合物薄膜电阻的成型与微喷打印的基底材料和表面性质密不可分。目前用于微喷打印的基底材料主要为喷墨相纸、塑料薄膜(PET、PI)和玻璃等。喷墨相纸具有廉价、环保、可弯曲的特点,在印制电子中具有较大优势,RC 间隙型相纸是目前最高档的喷墨相纸,纸基是以树脂涂布的相纸,涂层采用纳米级 SiO_2 固体颗粒,粒径小于 200 nm,表面形成致密的微孔结构,具有毛细作用,能使表面的液滴很快干燥,避免了基底需要疏水化表面处理和多层打印过程中薄膜电阻需要反复干燥等问题。

为了实现不同阻值薄膜电阻的制备,研究了薄膜电阻制备参数和退火条件对电阻阻值的影响。制备参数是指聚合物液滴直径 D 、重叠率 K 、聚合物薄膜的行数 l 、列数 m 、层数 n 。为了获得稳定的数字化微喷射,避免卫星液滴及散喷等现象,驱动频率设置为 2 Hz,驱动选择利于液体微喷射的缓升缓降波形^[13]。为了获得不同的液滴直径,研究了系统参量对聚合物液滴直径 D 的影响,系统参量主要包括压电驱动电压幅值 U ,微喷嘴内径 d 。退火条件是指退火处理的温度 θ 和时间 t 。

重叠率是液滴连接成线、成面的重要参数,液滴通过一定大小的重叠率连接成面是制备薄膜电阻的基本原理。重叠率 K 是指相邻两个液滴间重叠部分的宽度 L 和一个完整液滴直径 D 的比值,如图 3 所示, D 为液滴直径, L 为重叠区域的宽度。重叠度可以写成: $K = L/D \times 100\%$ 。当 $K = 13.4\%$ 时,相邻液滴之间实现了全覆盖,并且没有出现 2 次以上的重叠的部分,实现了最佳重叠效果。

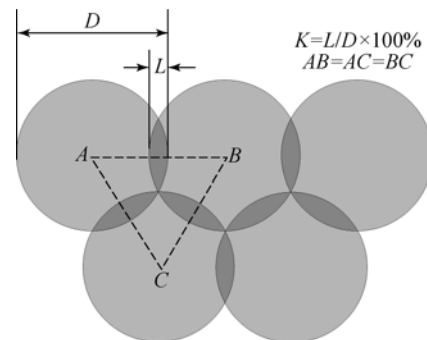


图 3 相邻液滴重叠度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of overlapped neighboring droplets

3 结果与讨论

3.1 系统参量对液滴直径的影响

实验条件:驱动电压 U 为 $40\sim 80\text{ V}$,微喷嘴出口内径 d 为 $30\sim 120\ \mu\text{m}$ 。

图 4 所示为在驱动电压为 55 V ,微喷嘴内径为 $80\ \mu\text{m}$ 下,RC 间隙型相纸上 PEDOT:PSS 聚合物液滴的显微照片。液滴形状规则且具有较好的一致性,液滴直径约为 $120\ \mu\text{m}$,液滴间距约为 $200\ \mu\text{m}$ 。

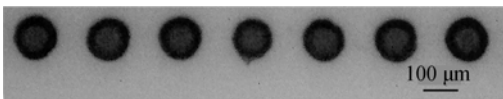


图 4 PEDOT/PSS 聚合物液滴的显微照片
Fig. 4 Micrograph of PEDOT/PSS polymer droplets

图 5 所示为聚合物液滴的直径与微喷嘴内径和驱动电压的关系图,液滴的直径可由玻璃微喷嘴的出口内径和系统的驱动电压控制,当系统的驱动电压和微喷嘴的出口内径增大时,液滴的直径也增大。实验中,相纸基底上的液滴直径变化为 $35\sim 240\ \mu\text{m}$ 。

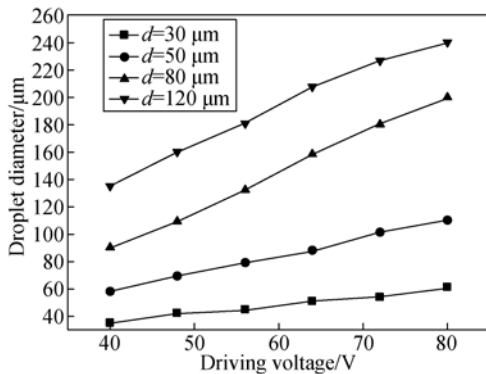


图 5 液滴直径与微喷嘴内径和驱动电压的关系
Fig. 5 Relation between droplet diameter and driving voltage for micro-nozzles with different inner diameters

3.2 制备参数对薄膜电阻阻值的影响

3.2.1 液滴直径对薄膜电阻阻值的影响

实验条件: $K=13.4\%$, $l=15$, $m=3$, $n=1$, D 为 $60\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

图 6 所示为在液滴直径 $100\ \mu\text{m}$ 条件下制得的薄膜电阻部分显微照片,该薄膜电阻的阻值为 $12.1\ \text{M}\Omega$ 。电阻薄膜中各液滴重叠状况较好,既

没有出现空洞,也没有过度重叠的部分。实验中,通过改变液滴的直径,制得不同液滴直径条件下形成的薄膜电阻如表 1 所示。

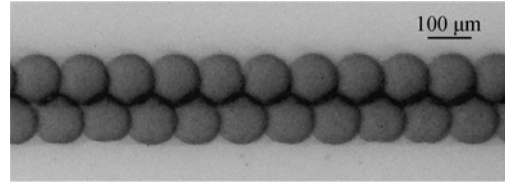


图 6 薄膜电阻部分显微照片
Fig. 6 Part micrograph of thin film resistor

表 1 不同液滴直径的薄膜电阻的阻值

Tab. 1 Resistances of resistors with different droplet diameters

直径 $D/\mu\text{m}$	50	100	150	200
阻值 $R/\text{M}\Omega$	11.2	12.1	12.8	13.2

3.2.2 行数、列数、层数对薄膜电阻阻值的影响

实验条件: $K=13.4\%$, $D=130\ \mu\text{m}$, l 为 $10\sim 30$, m 为 $2\sim 7$, n 为 $1\sim 3$ 。

通过改变薄膜电阻的制备行数 l 、列数 m 和层数 n ,制得的电阻如图 7 所示。其中 a 为 10 行 3 列 1 层,b 为 20 行 3 列 1 层,c 为 20 行 3 列 2 层,d 为 20 行 3 列 3 层,e 为 20 行 5 列 1 层,f 为 20 行 7 列 1 层。

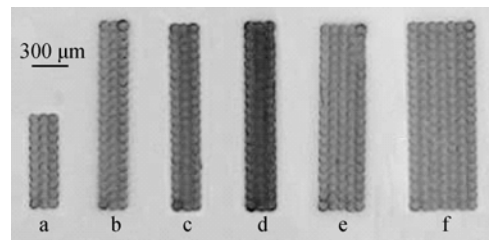
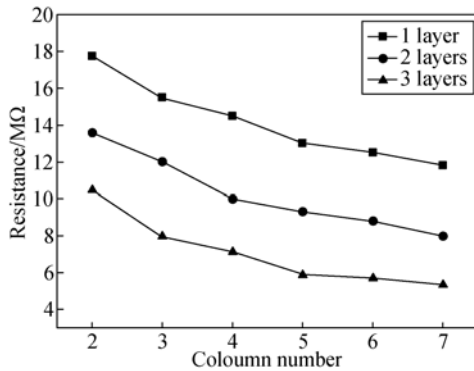


图 7 不同制备行数、列数和层数的薄膜电阻显微照片
Fig. 7 Photomicrograph of printed thin film resistors with different row numbers, column numbers and layer numbers

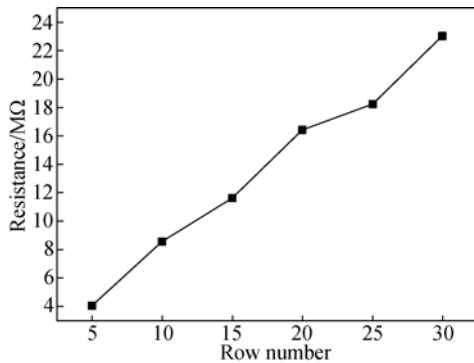
电阻 R 的计算公式为: $R=\rho\times l/S$,其中: ρ 为电阻材料的电阻率, l 为电阻的长度, S 为电阻横截面的面积。实验中制备薄膜电阻的材料为 PEDOT/PSS 聚合物,电阻横截面的尺寸由液滴直径 D 、列数 m 和层数 n 决定,电阻长度由液滴直径 D 和行数 l 决定。薄膜电阻的阻值和行数、列数和层数的关系如图 8 所示。

在图 8(a)中,所有的薄膜电阻制备行数均为 20,但制备层数的变化为 1~3,列数的变化为 2~7。当制备列数和层数增加时,薄膜电阻的阻值减小,这主要是因为薄膜电阻的横截面积也随着制备列数 m 和层数 n 的增大而增大,从而减小了阻值。图 8(b)中的薄膜电阻均为 3 列 1 层,制备行数的变化为 5~30,薄膜电阻的阻值和制备行数 l 近似呈线性关系。



(a)阻值和制备列数

(a) Resistances vs number of columns



(b)阻值和制备行数

(b) Resistances vs number of rows

图 8 薄膜电阻的阻值和制备行数、列数及层数的关系

Fig. 8 Relation between resistances and row numbers, column numbers and layer numbers

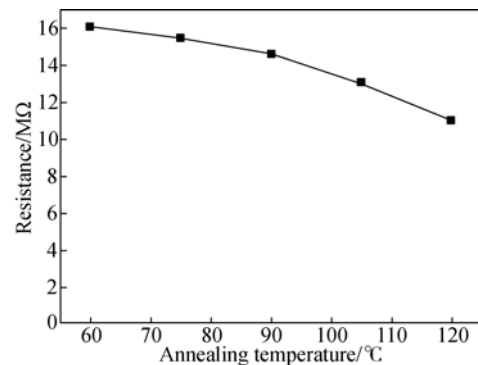
3.3 退火条件对薄膜电阻阻值的影响

薄膜电阻制备完成后,将制备有薄膜电阻的相纸放入干燥箱中进行退火处理。由于 RC 型相纸耐温为 140°C ,达到这个温度,相纸会出现不可逆形变、泛黄等现象。因此,退火温度的上限设定为 120°C 。退火处理实验中用的薄膜电阻制备参数为: $K=13.4\%$, $D=130\ \mu\text{m}$, $l=20$, $m=2$, $n=1$;其阻值在室温下约为 $17.8\ \text{M}\Omega$ 。

如图 9(a)所示,退火时间 t 设定为 30 min。和未做退火处理的室温薄膜电阻相比,在退火温

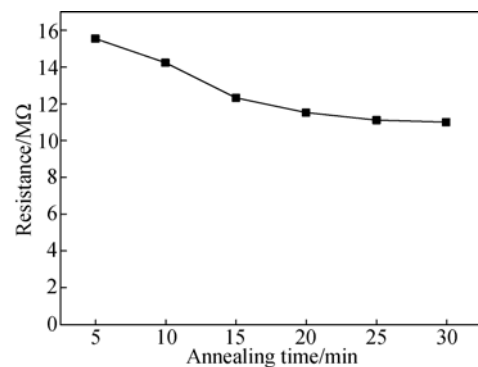
度从 60°C 变化到 120°C 时,薄膜电阻的阻值减小,分别降低了 $10\%\sim 40\%$,这是由于退火处理使 PEDOT/PSS 聚合物薄膜电阻的表面粗糙度降低,有机高分子之间连接更均匀,从而提高了电阻的导电性能,降低了电阻。此外,随着退火温度的升高,薄膜电阻阻值的相对变化量逐渐增大。这是因为退火处理的温度越高,越有利于有机小分子成长为大分子并使其连接更均匀,使得薄膜电阻的阻值更大程度的降低。

如图 9(b)所示,退火温度 θ 设定为 120°C 。和未作退火处理的室温薄膜电阻相比,退火时间从 5 min 增加到 30 min 时,印制薄膜电阻的阻值分别降低了 $15\%\sim 40\%$,当退火时间达到 25 min 时,薄膜电阻的阻值趋于稳定,再延长退火时间对阻值的影响很小。这是由于 120°C 条件下退火时,薄膜电阻间的有机分子互相连接,尺寸增大,最后趋于饱和,再延长退火时间,对阻值影响不大。



(a)阻值和退火温度

(a) Resistances vs annealing temperatures



(b)阻值和退火时间

(b) Resistances vs annealing time

图 9 退火温度与退火时间和薄膜电阻阻值的关系

Fig. 9 Relation between resistance and annealing temperature and annealing time

3.4 薄膜电阻的一致性分析

使用相同的制备参数在 RC 相纸表面分别制备了 10 次薄膜电阻,并将其放置于同一恒温干燥箱内进行退火处理。制备参数及退火条件为: $K=13.4\%$, $D=130\ \mu\text{m}$, $l=20$, $m=3$, $n=2$, $\theta=120^\circ\text{C}$, $t=30\ \text{min}$ 。制备并退火完成后,分别对薄膜电阻的长度、宽度和阻值进行测量,结果显示,聚合物薄膜电阻的平均长度为 $2\ 280\ \mu\text{m}$,标准差为 $21\ \mu\text{m}$,平均宽度为 $203\ \mu\text{m}$,标准差为 $5\ \mu\text{m}$,平均阻值为 $5.1\ \text{M}\Omega$,标准差为 $0.2\ \text{M}\Omega$ 。采用变异系数 $C\cdot V$ 来表征聚合物薄膜电阻的一致性,其计算式为 $C\cdot V=(S/\bar{x})100\%$,其中: S 为样本数据标准差, \bar{x} 为样本数据平均数。计算得聚合物薄膜电阻的长度变异系数为 0.9% ,宽度变异系数为 2.4% ,阻值变异系数为 4.0% 。变异系数表明,制备得到的聚合物薄膜具有较好的一致性。

3.5 薄膜电阻的温度特性分析

聚合物薄膜电阻制备并退火处理后,将薄膜电阻两端用导线连接,放置于恒温干燥箱内,再将导线引出箱体,通过改变箱内温度,测量薄膜电阻在不同温度下的阻值。薄膜电阻制备参数和退火条件为: $K=13.4\%$, $D=130\ \mu\text{m}$, $l=20$, $m=4$, $n=2$, $\theta=120^\circ\text{C}$, $t=30\ \text{min}$;其阻值在室温下约为 $10.3\ \text{M}\Omega$ 。如图 10 所示,随着温度的升高,聚合物薄膜电阻的阻值下降,当温度达到 90°C 时,薄膜电阻的阻值趋于稳定,受温度变化的影响较小。这是因为,随着温度的升高,薄膜电阻间的有机高分子结合更紧密,提高了薄膜的导电性能。经退火处理后的薄膜电阻有机高分子的尺寸已经达到最大饱和值,因此,进一步提高薄膜电阻的环境温度,其阻值变化较小,最终达到一个稳定值。

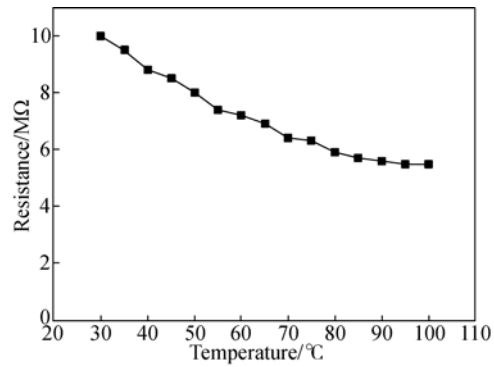


图 10 薄膜电阻阻值和温度的关系

Fig. 10 Relation between resistance and temperature

4 结 论

基于微流体数字化技术搭建了聚合物薄膜电阻数字化微喷射制备系统,该系统可以稳定地将 PEDOT/PSS 液滴喷射到 RC 相纸基底表面形成薄膜电阻。聚合物薄膜电阻具有良好的电阻特性。薄膜电阻制备系统结构简单,对于基底材料不需要进行表面处理,制备过程不需要反复干燥。实验中玻璃微喷嘴容易制作,成本低廉。在液滴直径为 $130\ \mu\text{m}$ 、重叠率为 13.4% 的条件下,制备了阻值变化为 $3.5\sim 23.2\ \text{M}\Omega$ 的薄膜电阻。实验结果表明,薄膜电阻的阻值与制备行数近似呈线性关系,并随着行数的增加而增大,随着列数和层数的增加而减小。此外,当退火处理的温度从 60°C 提高到 120°C 时,薄膜电阻的阻值可以降低 $10\%\sim 40\%$,薄膜电阻阻值随退火时间的增大而减小并趋于稳定。使用相同参数制备的薄膜电阻具有较好的一致性,薄膜电阻的阻值随着环境温度的增大而减小并趋于稳定。

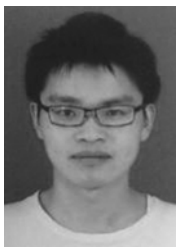
参考文献:

- [1] JOHNSTON J H, MORAES J, BORRMANN T. Conducting polymers on paper fibres [J]. *Synthetic Metals*, 2005, 153(1-3): 65-68.
- [2] KREBS F C, JORGENSEN M, NORRMAN K, et al. A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—first public demonstration [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93 (4): 422-441.

- [3] ANDERSSON P, FORCHHEIMER R, TEHRANI P, et al. Printable all-organic electrochromic active-matrix displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(16): 3074-3082.
- [4] SIRRINGHAUS H. Reliability of organic field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(38-39): 3859-3873.
- [5] FUJITA K, ISHIKAWA T, TSUTSUI T. Novel method for polymer thin film preparation: spray deposition of highly diluted polymer solutions [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41

- (1A); L70-L72.
- [6] ARENAS O J, DE LA JARRIGE E L, BOONE F. Creating screen-printed passive components for microwave applications[J]. *Microelectronics International*, 2010, 27(2): 84-92.
- [7] BIDOKI S M, NOURI J, HEIDARI A A. Inkjet deposited circuit components [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(5): 055023.
- [8] CHEN B, CUI T H, LIU Y, *et al.*. All-polymer RC filter circuits fabricated with inkjet printing technology [J]. *Solid-State Electronics*, 2003, 47(5): 841-847.
- [9] KANG B J, LEE C K, OH J H. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 97: 251-254.
- [10] 史永晶, 唐正宁. 基于喷墨印刷的 OTFT 的制备与性能研究[J]. *包装工程*, 2009, 30(1): 84-86.
- SHI Y J, TANG ZH N. Preparation of organic thin film transistors using inkjet printing technology [J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(1): 84-86. (in Chinese)
- [11] 章维一, 侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题 (I): 概念、方法和效果[J]. *科技导报*, 2005, 23(8): 4-9.
- ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part I): concepts, methods and results [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8): 4-9. (in Chinese)
- [12] 章维一, 侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题(II): 物质数字化及物质能量信息统一数字化概念研究 [J]. *科技导报*, 2006, 24(3): 41-47.
- ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part II): Conceptual study of digitalization of matter-energy-information [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(3): 41-47. (in Chinese)
- [13] 朱晓阳, 侯丽雅, 郑悦, 等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 360-368.
- ZHU X Y, HOU L Y, ZHENG Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 360-368. (in Chinese)
- [14] ZHU X Y, ZHU L, CHEN H J, *et al.*. Fabrication of multi-scale micro-lens arrays on hydrophobic surfaces using a drop-on-demand droplet generator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66: 156-165.
- [15] 杨眉, 朱丽, 侯丽雅, 等. 数字化微喷射用玻璃基组合微喷嘴设计及实验[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1580-1586.
- YANG M, ZHU L, HOU L Y, *et al.*. Design and experiment of vitreous combined micro-nozzles used in digital micro injection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1580-1586. (in Chinese)
- [16] LI Z A, HOU L Y, ZHANG W Y, *et al.*. Preparation of paper micro-fluidic devices used in bio-assay based on drop-on-demand wax droplet generation [J]. *Analytical Methods*, 2014, 6: 878-885.
- [17] 王洪成, 侯丽雅, 章维一. 驱动电压波形修圆对微流体脉冲惯性和驱动效果的影响[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2251-2259.
- WANG H CH, HOU L Y, ZHANG W Y. Influence of rounded driving voltage waves on micro-fluidic pulse inertial force and driving effects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2251-2259. (in Chinese)

作者简介:



杨利军(1989—),男,江苏金坛人,博士研究生,2012年于南京理工大学获得学士学位。主要从事微流体-驱动控制技术及其应用、微机电、微流控芯片等方面的研究。E-mail:fulisayang@163.com

导师简介:



陆宝春(1965—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,2002年于南京理工大学获得博士学位。主要从事制造装备自动化与智能化、制造系统的集成控制与智能控制、光机电一体化等方面的研究。