

文章编号: 1005—8893 (2002) 04—0039—03

多孔硅结构电镜图像的数字处理^{*}

李 格

(江苏石油化工学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 多孔硅在光电子和传感器领域是一种具有重要应用价值的材料。多孔硅网络结构的形状纹理直接影响其光学和热学性能。运用数字图像处理分析方法对多孔硅结构电子显微镜图像 (SEM) 进行特征提取, 为多孔化率的测定提供了重要依据。

关键词: 图像处理; 纹理分析; 多孔化率

中图分类号: Q 349.51

文献标识码: A

纹理是图像表面的一个重要特征, 是对于图像中各元素灰度和颜色的空间变化的一种描述, 这种变化与材料本身的电子光子学性质密切相关。

1990 年 Canham 报道了室温下多孔硅可见光发射以来, 多孔硅成为光电子领域内的热门研究课题之一^[1]。电子显微镜图像显示, 多孔硅呈网络结构, 大量的、纵横交错的、粗细不同的柱状或球状结构, 仍然保持着多孔化前单晶硅的晶体取向。较为普遍地认为多孔硅的有效发光是源于电化学腐蚀过程中形成的纳米结构。不同条件下腐蚀制备的多孔硅, 形成不同的多孔度和微结构, 具有不同的入射激发能量和不同的吸收与发射谱。因此多孔硅的微结构对其在光电子领域的应用有着重要影响。另外, 多孔硅的网状多孔结构也为气敏、湿敏和热敏传感器的研制提供了方便。在热敏传感器特别是红外探测器的研制中, 多孔结构可以有效地降低衬底的热导率, 从而明显地提高探测器的电压响应率, 进而有效地提高红外探测器的探测灵敏度^[2]。因此, 对多孔硅结构的多孔化率测定是非常重要的。而用计算机图像处理技术, 如纹理分析可对多孔硅的电子显微镜图像作有效分析, 结合其它方法可对多孔化率作出定量测定。

目前人们对纹理的分析提出了许多特征提取方法, 大致分为统计方法和结构方法 2 类^[3]。结构方法有 Fourier 光谱分析方法、数学形态学等, 适用

于纹理基元排列比较有规则的图像; 统计方法有灰度统计方法、自相关函数、模型分析方法等, 适用于分析不规则的纹理图像。我们使用纹理的灰度分布统计特征分析多孔硅结构的电镜图, 定量地给出纹理的粗细程度、深浅程度等参数描述, 取得的结果为热释电传感器多孔硅衬底的多孔化率测定提供了重要依据。

1 纹理的灰度统计方法

直方图是图像窗口中多种不同灰度的像素分布的概率统计, 可研究单个像素在图像空间的分布规律, 但不能很好地反映像素之间的灰度级空间相关性的规律, 相同的直方图可能会有不同的纹理。基于统计特征的灰度共生矩阵纹理分析方法是一种常用的纹理特征提取方法^[4,5]。在 3 维空间中, 相邻某一间隔的 2 个像素, 它们或者具有相同的灰度级, 或者具有不同的灰度级, 描述这样 2 个像素的联合分布的一个统计形式即灰度共生矩阵, 其定义如下:

设 $f(x, y)$ 为像素 (x, y) 的灰度值, $x, y=0, 1, 2, \dots, N-1$ 为 $N \times N$ 图像中的像素坐标, $P(i, j, \delta, \theta) =$ 集合 $\{(x, y) | f(x, y) = i, f(x+\Delta x, y+\Delta y) = j \text{ 或 } f(x-\Delta x, y-\Delta y) = j\}$, $x, y=$

* 收稿日期: 2002—09—27

作者简介: 李格 (1962—), 男, 江苏张家港人, 讲师, 硕士, 主要从事理论模拟和图像处理方面的研究。

0, 1, 2, ..., $N-1$; $i, j=0, 1, 2, \dots, L-1$, 距离 δ 方向 θ 由 Δx 、 Δy 构成, L 为图像灰度级的数目, P 称为 $f(x, y)$ 的灰度共生矩阵。

灰度共生矩阵反映了图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息, 在灰度共生矩阵的基础上抽取其纹理特征成为二次统计量, 可以较好地反映出图像特征。目前一幅图像的灰度级数目一般是 256, 对于电镜图像的像素数目也比较大, 适当地降低 L 、 N 可以减少计算量。

由自相关函数:

$$p(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) f(i+x, j+y)}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j)^2}$$

可以估计图像纹理的周期, 进而选取合适的 N 和 Δx 、 Δy 值。 Δx 、 Δy 采用 4 种形式:

$$\Delta x=d, \Delta y=0; \Delta x=d, \Delta y=d; \Delta x=0, \Delta y=d; \Delta x=-d, \Delta y=d.$$

程序采用正规化共生矩阵 $H(i, j) = P(i, j) / R$, R 为正规化常数。由 $H(i, j)$ 选取比较常用的 4 个数字特征: 能量 Q_1 、对比度 Q_2 、熵 Q_3 、相关性 Q_4 。

能量用来度量图像灰度分布均匀性程度, Q_1 较大, 纹理较粗, 反之纹理较细。

对比度用于度量图像纹理的清晰程度, Q_2 越大, 沟纹越深, 反之沟纹越浅。

熵值是图像所具有的信息量的度量, 若图像无任何纹理则熵值接近为零。

相关性用来衡量灰度共生矩阵的元素在行的方向或列的方向的相似程度。

2 灰度统计对多孔硅结构的应用

图 1 是多孔硅样品的电子显微镜 (SEM) 照片。多孔硅的制备采用电化学方法^[6]。在氢氟酸: 酒精 = 1 : 1 的溶液中, 以铂为阴极, P 型硅为阳极, 通以需要的恒定电流, 电化学反应使与溶液接触的硅表面形成需要厚度的多孔硅。多孔化率的高低与电流密度、反应时间和溶液浓度有关。本实验采用 35 mA/cm^2 的电流密度和 15 min 的电化学反应条件, 多孔硅的厚度约 $10.5 \mu\text{m}$ 。多孔硅层厚度用数字式 α 台阶仪结合 SEM 照片测定。我们对该多孔硅样品的电镜图像进行了灰度统计分析, 选取 $L=32$, $N=32$, 获得的纹理特征数据如表 1。

表 1 图象的纹理特征数值

能量	对比度	相关性	熵值
0.035 7	66.002 0	8.963 3	5.236 1

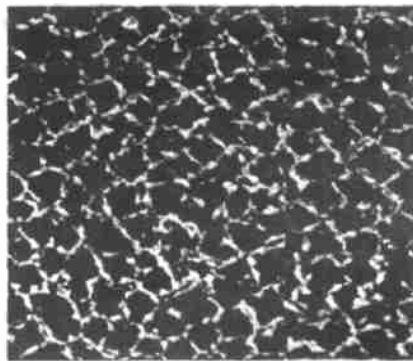


图 1 多孔硅样品的 SEM 照片

表 1 是纹理分析结果。从表可见, 该样品的能量很小, 能量体现了多孔硅网络中硅实体的粗细, Q_1 较大硅线较粗, 反之硅线较细, 多孔化率较高。样品的熵值较高显示它具有较高的纹理信息, 而高达 8.963 3 的相关性显示了样品多孔化程度的均匀性, 即在样品不同的方向, 具有比较均匀的纹理特征。样品的对比度较高, 说明图象纹理的灰度差别大, 沟纹深。这一方面表示多孔硅层的厚度大, 同时也表示多孔化率高。结合 SEM 照片, 由于多孔硅网络的非规则性, 当电子显微镜聚焦于样品表面, 发光强度最大。随着多孔结构深度的增加, 照片相应部位的发光强度减弱。照片上的黑暗部分与多孔硅层的底部对应。所以, 对比度反映了多孔硅的空隙深浅, Q_2 越大空隙越深, 反之空隙越浅。我们可以通过样品的能量、对比度来估算多孔化率的高低, 结合图形的形状分析, 取适当的阈值, 得到的多孔硅 SEM 图像的二值图如图 2 所示。

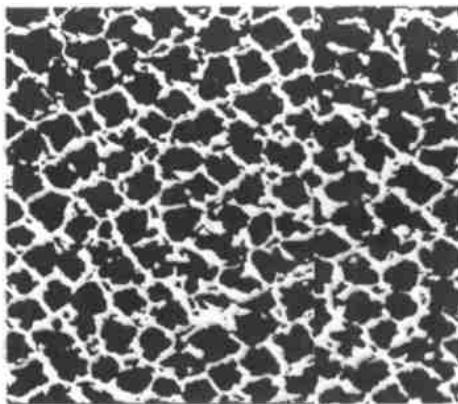


图 2 多孔硅 SEM 图像的二值图

3 用图像区域分割计算多孔化率

简单的门限分割方法对多孔硅材料电镜图像难以准确分割衬底和孔洞，门限的微小变化引起二值图像黑白像素比的变化是非线性的。用灰度和微分算子相结合的方法可以较好地分割图像区域。设原始图像为 I ，梯度图像为 J ，适当的选取比例系数 k ($0 < k < 1$)，对 $k * I + (1 - k) * J$ 进行处理，可以得到理想的数据（见表 2）。图像一般都有 一些噪声，梯度算子和 Laplacian 算子对噪声比较敏感，用 Gauss 二维低通滤波器对图像先进行滤波再作 Laplacian 边缘提取：

$$g(i, j) = G(i, j) * I(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(i^2+j^2)/2\sigma^2} * I(i, j)$$
$$I(i, j) = \nabla^2 [G(i, j) * I(i, j)] = \nabla^2 G(i, j) * I(i, j) = \frac{i^2+j^2-2\sigma^2}{\sigma^4} e^{-(i^2+j^2)/2\sigma^2} * I(i, j)$$

表 2 log 算子下区域分割后的多孔化率 P 值

	$n=0.0$	$n=0.2$	$n=0.5$	$n=1.0$
$k=0.7$	0.720 8	0.702 6	0.702 4	0.721 9
$k=0.6$	0.664 1	0.664 7	0.665 0	0.668 7
$k=0.5$	0.593 0	0.593 7	0.594 1	0.598 1

说明： n 为模板系数。

从表 2 可看出当比例系数 k 取 0.6 时，多孔化率在 66% 左右。实验中样品的多孔化率还用秤重法来确定，得到多孔化率约为 69%。它是在精度为 $10\mu\text{g}$ 的数字天平上完成。多孔硅层厚度用数字式 α 台阶仪结合多孔硅层纵向 SEM 照片测定。由

于多孔硅层底面的不平整，对厚度也对多孔化率的测定带来误差，需要用其它测试方法对其测试结果作出验证。所以，通过对多孔硅 SEM 照片的纹理作灰度统计，得到的多孔化率结果应当是相当有用的印证。

4 结 论

从对作为热释电传感器衬底的多孔硅网络结构的图像分析结果表明，照片图像统计中的信息提供的样品多孔化率的结果与称重法测定的结果基本一致。运用数字图像处理中的纹理分析方法对电子显微图像（SEM）进行特征提取，可以为材料研究提供有效的帮助。

参考文献:

[1] 叶好华，叶志镇，黄靖云．硅发光研究进展 [J]．半导体光电，2002，23（1）：4—7.

[2] Li Jinhua，Yuan Ningyi．Properties of PT/P（VDF—TrFE）Pyroelectric Sensor Based on Porous SiO₂ Substrate [J]．SPIE，2001，4 596：22—28.

[3] Castleman．Digital Image Processing [M]．New Jersey：Prentice Hall Inc，1997.

[4] Mihran Tuceryan，Anil K Jain．Handbook Pattem Recognition and Computer Vision [M]．Singapore：World Scientific Publishing，1999. 235—376.

[5] 田捷，沙飞，张新生．实用图像分析与处理技术 [M]．北京：电子工业出版社，1995.

[6] Steiner P，Lang W．Micromathining Applications of Porous Silicon [J]．Thin Solid Films，1995，255：52—58.

Imaging Processing in Scanning Electron Microscopy Photograph of Porous Silicon

LI Ge

(Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

Abstract: Porous silicon has important application in the field of photoelectron and sensors. The porosity of the porous silicon directly influences its optical and electrical properties. In this paper the imaging analysis in SEM photograph of the porous silicon acting as pyroelectric sensor substrate was used to identify the porosity and other structure characteristics of the porous silicon.

Key words: imaging processing; texture analysis; porous silicon