

一种地震子波峰值频率的估计方法

杨森林, 高静怀

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对常规方法估计地震子波峰值频率的精度不高的问题, 提出了一种估计地震子波峰值频率的特征结构(ES)法. 该方法先对地震子波的自相关矩阵进行特征分解, 再用最大特征值对应的特征向量逼近其峰值频率成分子空间, 同时用其余特征向量逼近非峰值频率成分子空间, 然后计算不同频率的正弦谐波在峰值频率成分子空间与非峰值频率成分子空间的投影系数之比, 最后搜索最大比值对应的谐波频率即为检测到的地震子波峰值频率. 与常规方法相比, ES法能更精确地检测地震子波的峰值频率. 采用合成的零偏垂直地震剖面资料进行了仿真实验, 结果表明, 与快速傅里叶变换和 Burg 最大熵相比较, ES法检测到的品质因子精度高, 方差约减少了 43%, 同时估计的峰值频率也更精确.

关键词: 峰值频率; 衰减; 垂直地震剖面; 品质因子

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0660-05

Estimating Method for Peak Frequencies of Seismic Wavelets

Yang Senlin, Gao Jinghuai

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the problem that peak frequencies of seismic wavelets estimated by common methods are imprecise, an eigen-struct (ES) method for estimating peak frequencies of seismic wavelets is proposed, in which the self-correlation matrix of a seismic wavelet is eigen-decomposed firstly, and then the subspace of peak frequency component is approximated by the eigen-vector corresponding to the maximum eigen-value, the subspace of other frequency components is approximated by residual eigen-vectors, and the ratios of projected coefficients for different sine-waves on these two subspaces are computed, finally the harmonic frequency corresponding to maximum ratio is the peak frequency of the seismic wavelet. This method can give more precise peak frequency of a seismic wavelet than common methods. Simulation results of synthetic zero-offset vertical seismic profiles show that the precision of quality factors and peak frequencies estimated by ES method is higher than that of fast Fourier transform and Burg maximum entropy, and the variance of quality factors decreases by about 43%.

Keywords: peak frequency; attenuation; vertical seismic profile; quality factor

在地球物理勘探中, 预测地下油气藏分布需要分析地层对地震波的吸收衰减情况. 从频率域利用峰值频率移动研究地层的吸收衰减(或品质因子), 关键步骤之一是精确地估计地震子波的峰值频率. 对垂直地震剖面(VSP)而言, 当相邻检波器接收信

号中直达波的峰值频率变化较小时, 常规的谱估计方法由于最大谱峰不准确、谱线分裂及频率偏移而有可能直接得不到精确的峰值频率. 本文提出了一种基于子空间分解的方法, 能精确地估计地震子波的峰值频率, 可以改善油气预测过程中地层吸收衰

减估计的精度。

1 问题描述

在地震波传播的过程中,由于地层的黏弹性吸收,地震波的能量会衰减,特别是地层中有油气的地方对地震波的吸收衰减比没有油气的地方大,所以在地震信号处理的过程中,可以通过分析地层对地震波的吸收异常来直接识别油气。为此,首先需要计算地层的吸收衰减量。

在频率域中研究衰减估计问题,地震波峰值频率定义为地震波振幅谱的峰值对应的频率^[1]。根据波在黏弹性均匀介质中的传播理论^[1-2],采用 Kol-sky-Futterman 衰减模型^[3-4],即衰减量和频率近似为线性关系,地震波在地层传播过程中其高频部分比低频部分衰减快,所以传播时间 t 之后直达波的峰值频率就会降低^[5-7]。

通常用 Ricker 子波来模拟地震子波^[6-7]。Ricker 子波频域的表达式为^[1]

$$F(f) = 2\pi^{-0.5} f^2 f_m^{-2} \exp(-f^2 f_m^{-2}) \quad (1)$$

式中: f 为频率; f_m 为 Ricker 子波的峰值频率。假设震源子波为 Ricker 子波,在黏弹性介质中传播时间 t 之后,瞬时频谱为^[6]

$$S(t, f) = G(t) F(f) \exp(-\pi f t Q^{-1}) \quad (2)$$

式中: t 为传播时间; $G(t)$ 表示传播与衰减无关的因子(如几何扩散等); Q 为衡量地层吸收衰减量的品质因子。

由式(1)及式(2)可得地层品质因子为^[6]

$$Q = 0.5\pi t f_p f_m^2 (f_m^2 - f_p^2)^{-1} \quad (3)$$

式中: f_p 表示目标深度处检波器接收的直达波的峰值频率。但是,在实际地震勘探中,比如垂直地震剖面资料中,纵波的传播速度一般为 $1 \sim 10$ km/s 左右,检波器距离通常为 $5 \sim 20$ m 左右,由于传播时间只有几毫秒,所以上下 2 个检波器接收到的直达波的峰值频率变化很小。因此,用峰值频率移动法估算 Q 值,就需要精确地估计地震子波的峰值频率。

2 常规方法及其存在的问题

对于一个离散采样的地震子波信号,要估计其峰值频率,常规方法是通过快速傅里叶变换(FFT)得到频谱^[8-9],再搜索谱峰位置得到信号的峰值频率。当峰值频率不是频率采样间隔的整数倍时,快速离散傅里叶变换有可能直接得不到最大的频谱分量^[9],而且其计算精度还与窗函数及窗宽度有关^[10]。为了提高频率分辨率,一些学者提出了在待

分析信号后补零延拓的方法^[11],可以改善峰值频率的估计精度,但该方法计算量大、分辨率有限。对于一些现代谱估计方法,如 Burg 最大熵谱估计^[12],则存在谱线分裂和频率偏移等问题,限制了峰值频率的估计精度。

为了精确地估计地震子波的峰值频率,本文采用特征结构(ES)法。

3 特征结构法

假设信号序列 $\Psi[n]$ 为绝对可和函数,对其做离散时间傅里叶展开^[8]

$$\Psi[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} \hat{\Psi}(\omega) \exp(j\omega n) d\omega \quad (4)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

$$\hat{\Psi}(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \Psi[n] \exp(-j\omega n) \quad (5)$$

式中: j 为虚数单位; ω 为角频率; $\hat{\Psi}$ 为 Ψ 的离散时间傅里叶变换。式(4)的物理意义即把序列 $\Psi[n]$ 看作是幅度为 $\hat{\Psi}(\omega) d\omega/2\pi$ 的复指数信号的线性组合,这些复指数信号的频率连续变化,而幅度绝对值最大的复指数信号的谐振频率就是要求的峰值频率。

假设实测信号为有效信号叠加理想高斯白噪声组成

$$X[n] = \Psi[n] + w[n], \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

式中: $X[n]$ 为实测信号序列; $w[n]$ 为高斯白噪声序列。首先计算序列 X 的自相关矩阵 $\mathbf{R}_{XX}$,如果 $\mathbf{R}_{XX}$ 对称正定,则对其进行特征值分解^[14],并将特征值按非递增顺序重排得

$$\mathbf{R}_{XX} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (7)$$

式中:特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$; $\mathbf{v}_i$ 是 λ_i 对应的特征向量,且为 $N \times 1$ 的列向量。在式(7)中,称 $\mathbf{R}_{XX}$ 的较大的 K 个特征值及其对应的特征向量为信号特征值和信号特征向量,相应地称 $\mathbf{R}_{XX}$ 的较小的 $(N-K)$ 个特征值及其对应的特征向量为噪声特征值和噪声特征向量。 $\mathbf{R}_{XX}$ 的特征向量所张成的空间 $\mathbf{U}$ 可以分解为 2 个子空间的直和 $\mathbf{U} = \mathbf{U}_s \oplus \mathbf{U}_w$,其中 $\mathbf{U}_s = \text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_K\}$ 为信号子空间, $\mathbf{U}_w = \text{span}\{\mathbf{v}_{K+1}, \mathbf{v}_{K+2}, \dots, \mathbf{v}_N\}$ 为噪声子空间, $\oplus$ 表示直和, span 表示张成。如果 $\mathbf{R}_{XX}$ 不对称正定则进行奇异值分解也可以得到类似的结论^[13-14]。

对于单个地震子波,考察分解后得到的各个特征向量,注意到特征向量为调幅正弦波,并且越大的特征值对应的特征向量的谐振频率越靠近序列的峰

值频率. 将各特征向量投影到峰值频率对应的复指数信号上, 发现最大的特征值对应的特征向量的投影系数最大. 图1给出了峰值频率为50 Hz的Ricker子波的自相关矩阵分解后的各特征向量的分析结果. 定义投影比值为

$$P(f) = \frac{\sum_{i=1}^K |\mathbf{u}^H(f) \mathbf{v}_i|^2}{\sum_{m=K+1}^N |\mathbf{u}^H(f) \mathbf{v}_m|^2} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{u}(f) = [1 \quad \exp(j2\pi f) \quad \cdots \quad \exp(j2\pi(N-1)f)]^T$. 从信号和噪声空间正交性可知: 当 $\mathbf{u}(f) \in \mathbf{U}_s$ 时, 由于分子不为0而分母为0, $P(f)$ 的值很大; 当 $\mathbf{u}(f) \in \mathbf{U}_w$ 时, 由于分母不为0而分子为0, 因此 $P(f)$ 的值很小.

要估算地震子波的峰值频率, 用最大特征值对应的特征向量子空间去近似信号峰值频率成分对应的子空间, 而其余的特征向量构成的子空间近似信号的非峰值频率成分对应的子空间, 即在式(8)中可取 $K=1$, 得

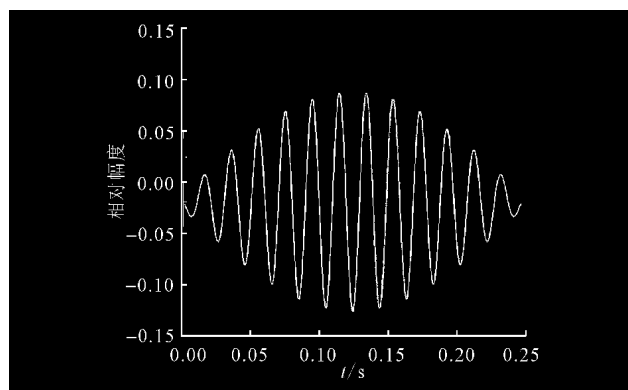
$$P(f) = \frac{|\mathbf{u}^H(f) \mathbf{v}_1|^2}{\sum_{i=2}^N |\mathbf{u}^H(f) \mathbf{v}_i|^2} \quad (9)$$

由于这两个子空间是相互正交的, 所以采用式(9)计算不同频率的正弦谐波的投影比值, f 越接近峰值频率其投影比值越大, 在峰值频率处的比值最大, 而在非峰值频率处的投影比值较小. 搜索最大值对应的正弦波频率就检测到了地震子波的峰值频率.

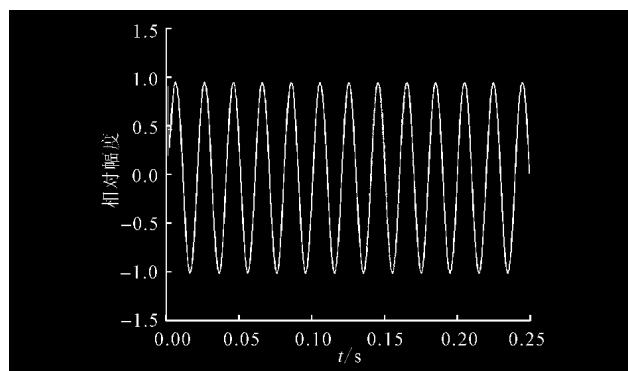
由于这种方法需要特征分解, 所以称为特征结构法, 简记为ES法. 因为Ricker子波和一般地震子波都是绝对可和的, 所以可以用ES法估算它们的峰值频率.

由耐奎斯特采样定理^[8-9]可知, 最高的搜索频率为信号采样频率的一半. 应用ES法时, 在信号有效频率范围内, 等间隔搜索, 步长小时, 搜索的时间长; 步长大时, 搜索的峰值频率精度低. 在信号有效频率范围内恰当地构造目标函数, 采用优化算法(如牛顿法等)求解时, 迭代初值的选择可能会影响收敛性能. 本文采用先粗后精的搜索方法, 即用快速傅里叶变换估计出峰值频率的初值, 再用优化算法精细搜索. 限于篇幅, 此处不再详细讨论.

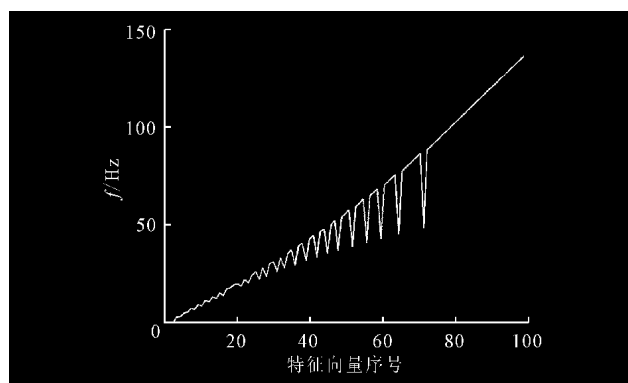
总之, 采用峰值频率移动法估计VSP资料品质因子的步骤为: 首先计算各层的旅行时间, 然后用ES法计算各道直达波的峰值频率, 最后计算各层的品质因子.



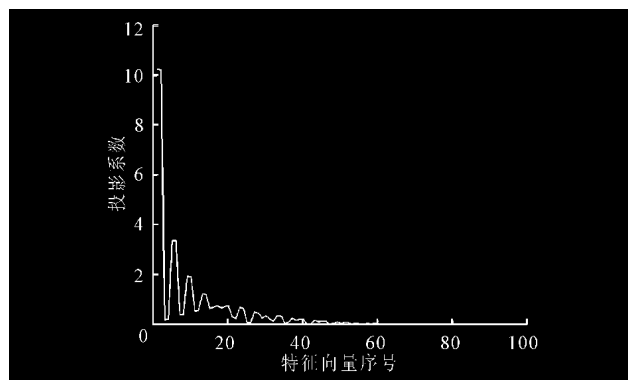
(a) 第一个特征向量



(b) 50 Hz 的复指数信号



(c) 前100个特征向量的谐振频率和50 Hz的绝对差值



(d) 前100个特征向量在50 Hz复指数信号上的投影系数

图1 50 Hz Ricker子波的自相关矩阵分解后特征向量的分析

4 实验结果与分析

4.1 合成的单层零偏 VSP 记录

图2为一个合成的单层介质零偏VSP资料^[15],检波器间隔10 m,从0~100 m一共有11道数据,信号采样点数为1 024,采样时间间隔为2 ms,震源为50 Hz的Ricker子波,Q值为40.对图2中的合成VSP记录采用FFT、Burg最大熵以及ES 3种方法估计的峰值频率如图3a所示,用图3a中3种峰值频率计算的Q值如图3b~3d所示.从图3a可以看出,采用ES法估算的各道峰值频率与采用FFT或Burg最大熵法并经过插值处理后的峰值频率之间的差别较小.由于采用Kolsky-Futterman衰减模型^[3-4],即衰减量和频率近似为线性关系,因此地震波在地层传播过程中其高频部分比低频部分衰减快,在VSP资料中表现为直达波的峰值频率随着深度的增加会逐步下降,而采用ES法估计的峰值频率的变化和此趋势一致.在图3b~3d中,用FFT、Burg最大熵法以及ES法估算的Q值平均误差分别为2.570 6、-2.765 0和1.377 8,方差分别为2.672 1、2.701 6和0.629 7,ES法Q值的方差比FFT法小76%,比Burg最大熵法小77%,也说明了ES法估计的峰值频率比较精确.

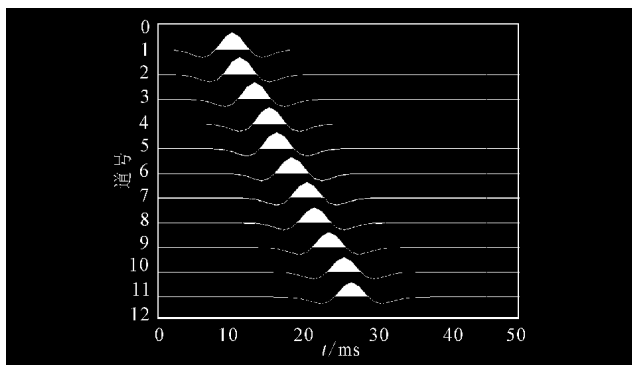
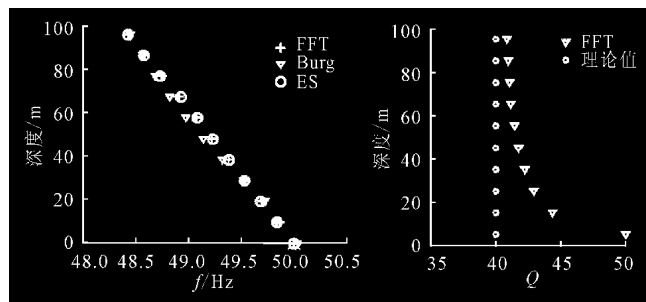


图2 合成的单层零偏 VSP 直达波

4.2 合成的多层零偏 VSP 记录

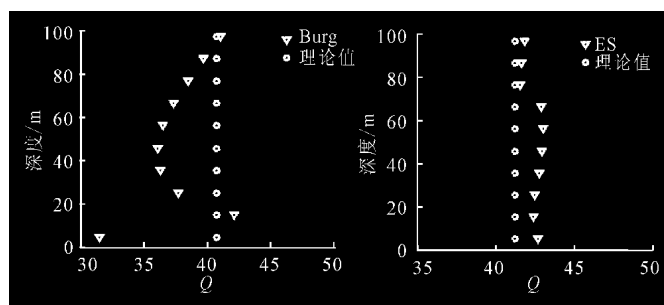
图4是一个合成的4层介质零偏VSP直达波资料^[15],检波器间隔10 m,从0~200 m一共有21道数据,采样时间为2 ms,信号采样点数为1 024.震源仍为50 Hz的Ricker子波,第1层为0~50 m,Q值为100;第2层为50~100 m,Q值为80;第3层为100~150 m,Q值为60;第4层为150~200 m,Q值为40.对图4中的合成VSP记录,采用FFT、Burg最大熵以及ES 3种方法估计的峰值频率如图5a所示,用图5a中的3种峰值频率计算的Q值如

图5b~5d所示.从图5a可以看出,采用ES法估算的各道峰值频率与采用FFT或Burg最大熵法并经过插值处理后的峰值频率之间的差别较小.在图5b~5d中,用FFT、Burg最大熵以及ES估算的Q值平均误差分别为0.751 2、29.635 0和0.266 0,方差分别为13.727 3、152.575 3和7.759 8,ES法的Q值方差比FFT的小43%,比Burg最大熵的小95%,也说明了ES方法估计的峰值频率比较精确.



(a)峰值频率

(b)Q值(FFT)



(c)Q值(Burg最大熵)

(d)Q值(ES)

图3 采用3种方法估计图2中VSP资料的峰值频率及Q值

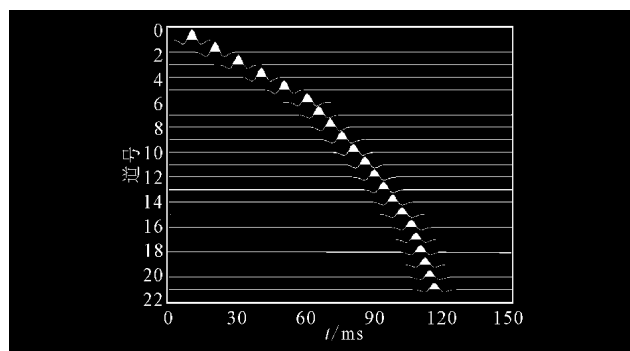
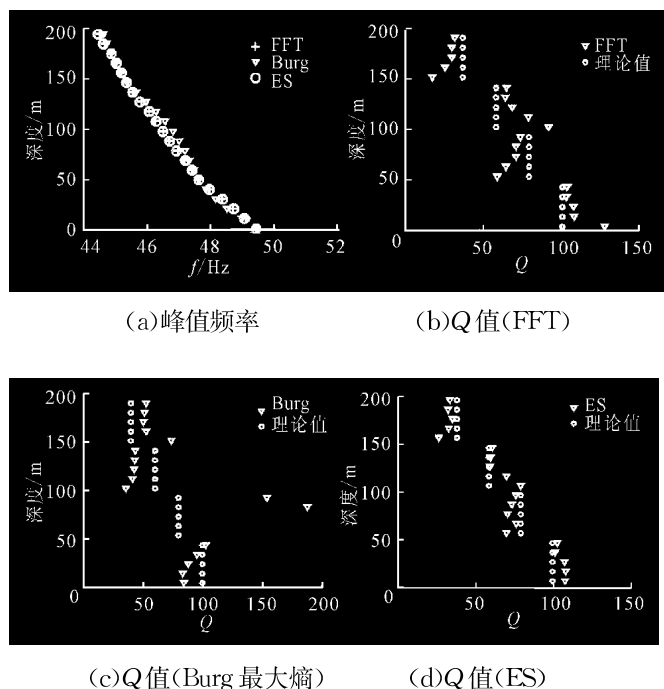


图4 合成的多层零偏 VSP 直达波

5 结 论

对于油气预测中地层的吸收衰减估计问题,峰值频率移动衰减估计法关键步骤之一是地震子波峰值频率的估计.为了高精度估计峰值频率,基于子空间分解算法提出了ES法.分别采用FFT、Burg最



(a)峰值频率 (b)Q值(FFT)

(c)Q值(Burg最大熵) (d)Q值(ES)

图5 采用3种方法估计图4中VSP资料的峰值频率及Q值

大熵及ES3种方法估算了不同的合成的零偏垂直地震剖面直达波资料的峰值频率和品质因子 Q ,结果表明,与FFT和Burg最大熵法相比较,ES法检测的峰值频率和品质因子的精度高,同时估计的品质因子方差约减少了43%。

参考文献:

- [1] Sheriff R E, Geldart L P. 勘探地震学[M]. 2版. 初英,李承楚,王宏伟,等译. 北京:石油工业出版社,1999:227-235.
- [2] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology: theory and methods[M]. San Francisco: Freeman and Company, 1980:167-185.
- [3] Ursin B, Toverud T. Comparison of seismic dispersion and attenuation models[J]. Stud Geophys Geod, 2002, 46(4): 293-320.
- [4] Toverud T, Ursin B. Comparison of seismic attenuation models using zero-offset vertical seismic profiling (VSP) data[J]. Geophysics, 2005, 72 (2):F17-F25.
- [5] Quan Y, Harris J M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method[J]. Geophysics, 1997, 62 (3):895-905.
- [6] Zhang Changjun, Tadeusz J U. Estimation of quality factors from CMP records[J]. Geophysics, 2002, 67 (5):1542-1547.
- [7] Ricker N. The forms and laws of propagation of seismic wavelets[J]. Geophysics, 1953, 18(10):10-40.
- [8] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab H. 信号与系统[M]. 2版. 刘树棠,译. 西安:西安交通大学出版社, 2006:254-261.
- [9] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2001:91-93.
- [10] Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. Proceedings of IEEE, 1978, 66(1):51-83.
- [11] 胡广书. 数字信号处理-理论、算法与实现[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2003:133-150.
- [12] 张明友,吕明. 近代信号处理理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2005:99-118.
- [13] 王宏禹. 现代谱估计[M]. 南京:东南大学出版社, 1991:190-202.
- [14] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:341-378,453-525.
- [15] Ganley D C. A method for calculating synthetic seismograms which include the effects of absorption and dispersion[J]. Geophysics,1981,46(8):1100-1107.

(编辑 刘杨)

[文摘预登]

丝网印刷 ZnO 纳米锥的浆料制备及场发射特性研究

于灵敏^{1,2}, 朱长纯¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安工业大学材料与化工学院, 710032, 西安)

针对现有的丝网印刷碳纳米管薄膜需要各种后处理工艺后才能改善其场发射特性的问题,提出了一种不需任何后处理的丝网印刷 ZnO 纳米锥的浆料配制工艺. 该工艺以羧甲基纤维素为制浆剂,以水为溶剂,所制备的 ZnO 纳米锥薄膜表面上的有机浆料基本分解,ZnO 纳米锥在高温下既不会弯曲也不会团聚,且成本低,工艺简单. 场发射特性测试表明,ZnO 纳米锥与制浆剂质量比为 3:5 的薄膜在电流密度为 0.01 A/m² 时,最低开启场强为 2.25 V/ μ m,在 4 V/ μ m 场强下,阳极荧光粉的发光点亮度高且分布均匀. 该工艺在 ZnO 纳米锥场发射显示器的制作中具有很好的实际应用价值.