

氮化钽薄膜换能元低能化研究

任小明, 刘 兰, 余可馨, 解瑞珍, 刘 卫, 薛 艳

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安, 710061)

摘 要: 为了实现 TaN 薄膜换能元的低能化, 设计制作了不同桥膜厚度、不同桥区尺寸、不同桥区形状的 TaN 薄膜换能元, 依据 GJB/z 377A-94 感度试验用兰利法, 对其进行了发火感度测试。结果表明: 当桥区尺寸、形状一定时, 随着桥膜厚度的增加, 换能元的发火电压先减小后增加, 当桥膜厚度为 $0.9\mu\text{m}$ 时, 发火电压最小。通过优化桥区尺寸和桥区形状, 获得的 TaN 薄膜换能元最小平均发火电压低于 5V。

关键词: 换能元; TaN 薄膜; 桥区参数; 发火感度

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.002

Study on the Energy Reduction of TaN Thin Film Transducers

REN Xiao-ming, LIU Lan, YU Ke-xin, XIE Rui-zhen, LIU Wei, XUE Yan

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: In order to realize the energy reduction of TaN thin film transducers, TaN thin film transducers with different bridge film thickness, different bridge sizes, and different bridge shapes were designed and manufactured. According to the Langley method for sensitivity test of GJB/z 377A-94, the ignition sensitivity test was performed. The results showed that when the size and shape of the bridge are constant, as the thickness of the bridge film increases, the firing voltage of the transducer element firstly decrease and then increase. When the thickness of the bridge film is $0.9\mu\text{m}$, the firing voltage is the lowest. By optimizing the size and shape of the bridge, the minimum average firing voltage of the obtained TaN thin film transducer is below 5V.

Key words: Energy transducer element; TaN thin film; Bridge parameters; Ignition sensitivity

MEMS 火工品具有结构微型化、换能信息化和序列集成化等特征, 是新一代火工品的重要发展方向。微结构换能元作为 MEMS 火工品的核心部分, 决定了 MEMS 火工品的发火性能、安全性和可靠性, 进而影响武器弹药的作战性能^[1-3]。

微结构换能元主要是将金属或半导体等材料沉积到绝缘基片上制作而成。氮化钽 (TaN) 具有优良的电学性能、稳定的热性能、抗氧化腐蚀性能好等特点, 在航空航天、微电子、生物医学、动力机械等领

域有着重要应用^[4-5]。与金属材料相比, TaN 的电阻温度系数 (TCR) 为负值, 电阻随温度的增加而减小, 有利于实现微结构换能元的低能化。国外维歇 (Vishay) 公司披露了一种基于 TaN 薄膜技术的电起爆器薄膜芯片, 发火能量降至 $50\mu\text{J}$; 国内蔡贤耀等制备的 TaN 薄膜发火能量为 $1\sim 30\text{mJ}$ ^[6], 陕西应用物理化学研究所制备的 TaN 薄膜发火能量为 0.6mJ ^[7]。国内外相关领域研究成果差距较大。

本文设计制作了不同桥膜厚度、不同桥区尺寸、

不同桥区图形的 TaN 薄膜换能元,并对其发火感度进行了测试,获得了桥区参数对换能元发火性能的影响,为微结构换能元的低能化提供基础参数。

1 实验部分

1.1 氮化钽薄膜换能元的设计与制备

氮化钽薄膜换能元整体结构由基体、中间层、发火层、焊盘层组成,示意图如图 1 所示。基体的作用是支撑载体,基体材料选用 7740 玻璃;中间层的作用是增加材料之间的黏附力,中间层材料选用钛或镍铬;发火层材料为氮化钽;焊盘层的作用是提高导电性能,焊盘材料选用铜。桥区在发火层上两个焊盘之间裸露出来的部分,示意图如图 2 所示。

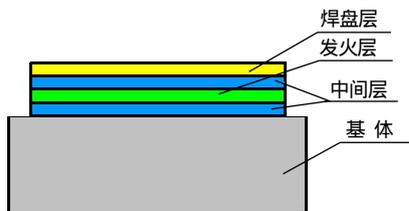


图 1 氮化钽薄膜换能元整体结构设计示意图
Fig.1 Structure diagram of TaN thin film transducer

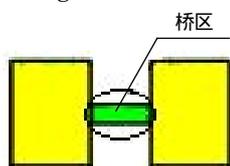


图 2 桥区示意图
Fig.2 Diagram of the bridge

氮化钽薄膜换能元采用 MEMS 工艺制备,氮化钽薄膜采用磁控溅射工艺制备,选用意大利 KENO-SISTEC 公司 KS60VR 型磁控溅射设备。本文选用 99.9%的氮化钽作为靶材,腔体真空度为 5×10^{-6} Pa,溅射功率为 200W,溅射时间为 50min,Ar 流量为 60 sccm,基底温度为 70° 。通过匀胶、光刻、显影、剥离技术等一系列 MEMS 工艺完成换能元图形的制备。

氮化钽薄膜厚度通过调节磁控溅射时间来控制,实际测量值与设计值误差极小,所以本文氮化钽薄膜厚度统一采用设计值。桥区形状通过光刻工艺制备,线条尺寸在 $10\mu\text{m}$ 以上,实际测量值与设计值误差极小;线条尺寸 $10\mu\text{m}$ 以下,实际测量值比设计值小,线条容易出现断裂等现象,工艺成品率不高,本文涉及数量只有 1 个,故本文桥区尺寸统一采用设计值。

1.2 氮化钽薄膜换能元的发火感度测试

依据 GJB/z 377A-94 感度试验用兰利法,对不同桥区参数的氮化钽薄膜换能元发火感度进行测试,选用的仪器分辨率为 0.1V,试验数据分布假设为正态分布。测试用起爆电路如图 3 所示,采用 $33\mu\text{F}$ 发火电容,含能材料采用斯蒂芬酸铅。

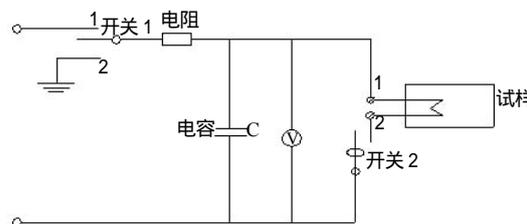


图 3 起爆电路示意图
Fig.3 Schematic diagram of initiation circuit

2 结果与讨论

2.1 桥膜厚度对 TaN 薄膜换能元发火感度的影响

在桥区选用图形 1 (如图 4 所示) 桥区尺寸为 $0.2\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 情况下,对不同桥膜厚度的换能元进行发火感度测试,结果如表 1 所示。

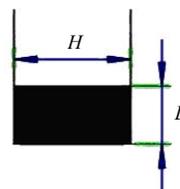


图 4 桥区图形 1 示意图
Fig.4 Diagram of bridge shape 1

表 1 不同桥膜厚度的换能元发火感度测试结果

Tab.1 Test results of ignition sensitivity of transducers with different bridge film thickness

序号	桥区图形编号	桥膜厚度/ μm	数量/个	平均发火电压/ V	方差	99%发火电压/ V	0.1%发火电压/ V
1		0.3	15	7.1	0.09	7.4	6.8
2		0.6	15	6.7	0.46	8.1	5.3
3	1	0.9	15	6.4	0.18	6.9	5.8
4		1.2	15	7.3	0.27	8.2	6.5
5		1.5	15	8.5	0.67	10.6	6.4

表 1 结果表明:当桥区形状、尺寸一定时,随着桥膜厚度的增加,换能元的发火电压先降低再升高,当桥膜厚度为 $0.9\mu\text{m}$ 时,平均发火电压最小,为 6.4V。

2.2 桥膜尺寸对 TaN 薄膜换能元发火感度的影响

根据表 1 测试结果,选用厚度为 $0.9\mu\text{m}$ 的桥膜,桥区选择图形 1,通过改变桥区尺寸 ($H \times L$),研究其对发火感度的影响规律。不同桥区尺寸的换能元发火感度测试结果如表 2 所示。

表2 不同桥区尺寸的换能元发火感度测试结果
Tab.2 Test results of ignition sensitivity of transducers with different bridge sizes

序号	桥区图形编号	桥区尺寸/mm	数量/个	平均发火电压/V	方差	99%发火电压/V	0.1%发火电压/V
1		0.1×0.1	15	6.4	0.18	6.9	5.8
2		0.2×0.2	15	7.6	0.37	8.8	6.5
3	1	0.3×0.3	15	8.7	0.16	8.7	7.8
4		0.4×0.4	15	11.1	0.76	13.5	8.8
5		0.5×0.5	15	15.7	0.59	17.5	13.8

表2结果表明：当桥膜厚度、桥区形状一定时，随着桥区尺寸的减小，换能元的发火电压也不断减小，当桥区尺寸为0.1mm×0.1mm时，平均发火电压最小，为6.4V。

2.3 桥区夹角对 TaN 薄膜换能元发火感度的影响

根据表1~2的测试结果，选用厚度为0.9μm的桥膜，桥区尺寸为0.1mm×0.1mm，改变桥区形状和桥区形状夹角得到桥区图形2，如图5所示。

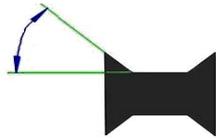


图5 不同夹角的桥区图形2

Fig.5 Diagram of bridge type 2 with different included angles

夹角θ设计为30°、45°、60°，对其进行发火感度测试，测试结果如表3所示。表3结果表明：相同厚度和桥区尺寸的情况下，桥区图形2的平均发火电压比桥区图形1平均发火电压低；夹角θ为45°时，换能元的平均发火电压最小，为5.6V。

表3 不同夹角的换能元发火感度测试结果

Tab.3 Test results of ignition sensitivity of transducers with different included angles

序号	桥区图形编号	夹角/°	数量/个	平均发火电压/V	方差	99%发火电压/V	0.1%发火电压/V
1		30	15	5.9	0.98	8.9	2.9
2	2	45	15	5.6	0.29	6.5	4.7
3		60	15	5.8	0.35	6.9	4.7

2.4 桥区形状对 TaN 薄膜换能元发火感度的影响

选用厚度为0.9μm的桥膜，桥区图形2，桥区尺寸为0.5mm×0.5mm，夹角θ为45°，通过对桥区图形2中间部分进行等分，研究不同桥区形状下，TaN薄膜换能元的发火感度变化。桥区图形4等分的桥区形状（桥区图形3）如图6所示。

不同桥区等分的换能元发火感度测试结果如表4所示，表4结果表明：在相同桥膜厚度、桥区尺寸及桥区夹角的情况下，将桥区中间部分等分为8时，平均发火电压最低，为11.9V；当桥区等分数增加到30

时，桥区线条容易出现断裂等现象，线条实际测量值与设计值误差较大，工艺成品率不高。结合制造工艺水平和发火感度测试结果，桥区等分数在4~8之间最优。



图6 桥区图形2的4等分示意图（桥区图形3）
Fig.6 Diagram of bridge type 2 in 4 equal divisions (bridge type 3)

表4 不同桥区等分的换能元发火感度测试结果
Tab.4 Test results of ignition sensitivity of the transducer with different equal divisions of the bridge

序号	桥区图形编号	桥区等分数	数量/个	平均发火电压/V	方差	99%发火电压/V	0.1%发火电压/V
1		0	15	15.7	0.59	17.5	13.8
2		2	15	13.1	0.02	13.2	13.0
3		4	15	12.0	0.12	12.4	11.6
4	3	8	15	11.9	0.78	14.3	9.5
5		12	15	12.1	0.22	12.8	11.4
6		20	15	12.8	0.38	14.0	11.6
7		30	15	13.9	0.40	15.1	12.6

在以上研究的基础上进一步优化桥区图形，选用桥膜厚度为0.9μm，桥区尺寸0.5mm×0.5mm，夹角为45°，桥区等分为4，对图6所示桥区图形3添加了锯齿形状，如图7所示。

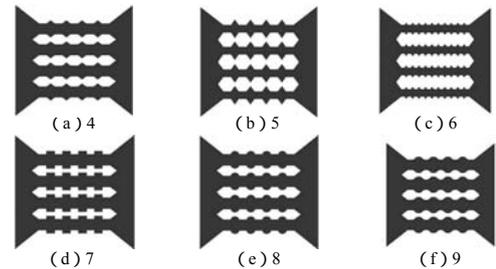


图7 优化设计的桥区图形示意图

Fig.7 Diagram of the optimal designed bridge type

优化后桥区图形为6种，桥区图形4锯齿数为4，尖角为90°；桥区图形5锯齿数为4，尖角为60°；桥区图形6锯齿数为10，尖角为60°；桥区图形7锯齿形状为正方形，锯齿数为4；桥区图形8锯齿形状为半圆形，锯齿数为4；桥区图形9锯齿形状为梯形，锯齿数为4；桥区图形4、5、7、8、9中，锯齿左右、上下间距均相同。优化后不同桥区形状的换能元发火感度测试结果如表5所示。表5结果表明：相同厚度和桥区尺寸的情况下，总体上锯齿为尖角形状图形（桥区图形4、桥区图形5、桥区图形6）的发火电压低于优化前不带锯齿形状图形的发火电压，锯齿尖角为60°（桥区图形5）发火电压低于锯齿尖角为90°（桥区图形4）的

发火电压；桥区图形7、8、9的发火电压相近，发火电压略大于桥区图形3（桥区等分为4）的发火电压，说明锯齿为平直的或半圆的图形对通过的电流有阻碍的作用。

表5 优化后不同桥区图形的换能元发火感度测试结果

Tab.5 Test results of ignition sensitivity of transducers with different bridge types after optimization

序号	桥区图形编号	数量/个	平均发火电压/V	方差	99%发火电压/V	0.1%发火电压/V
1	4	15	11.8	0.31	12.7	10.8
2	5	15	10.9	0.30	11.9	10.0
3	6	15	11.3	0.12	11.6	10.9
4	7	15	12.3	0.15	12.7	11.8
5	8	15	12.4	0.17	12.9	11.9
6	9	15	12.4	0.05	12.5	12.2

2.5 TaN 薄膜换能元换能元发火电压

根据以上研究结果，设计4种方案进行低能化试验验证，试验方案如表6所示。TaN 薄膜换能元发火感度测试结果如表7所示。表7试验结果表明：从方案1到方案4，发火电压逐渐减小，方案3与方案4平均发火电压降至5V以下。

表6 TaN薄膜换能元发火感度试验方案

Tab.6 Ignition sensitivity test scheme of TaN thin film transducers

方案	薄膜厚度/ μm	桥区图形编号	桥区尺寸/mm	夹角 $\theta/^\circ$	备注
1	0.9	1	0.1×0.1	-	-
2	0.9	2	0.1×0.1	45	-
3	0.9	3	0.1×0.1	45	桥区4等分
4	0.9	5	0.1×0.1	45	桥区4等分，锯齿数为4，锯齿尖角为 60°

表7 TaN薄膜换能元发火感度测试结果

Tab.7 Ignition voltage of TaN film transducers

方案	数量/个	平均发火电压/V	方差	99%发火电压/V	0.1%发火电压/V
1	15	6.4	0.18	6.9	5.8
2	15	5.6	0.29	6.5	4.7
3	15	5.0	0.81	7.5	2.5
4	15	4.4	0.13	4.8	4.0

3 结论

本研究基于 TaN 优良的电学性能，采用 MEMS 工艺制备了 TaN 薄膜换能元，开展了桥膜厚度、桥区

图形及尺寸对微结构换能元发火感度的影响研究，得到以下结论：

(1) 当桥区形状和尺寸一定时，随着桥膜厚度的增加，TaN 薄膜换能元的发火电压先减小，当桥膜的厚度增加到一定的程度，换能元发火电压又有增大的趋势。桥膜厚度为 $0.9\mu\text{m}$ 时，发火电压最小。

(2) 桥区的形状对 TaN 薄膜换能元的发火电压有显著的影响。本文通过一系列图形的研究，设计出一种整体图形为“工”字形的桥膜，当桥区夹角 θ 为 45° 、桥区4等分、锯齿数为4、锯齿尖角为 60° 时，换能元发火电压低于5V，实现了 TaN 薄膜换能元低能化的目的。

参考文献：

- [1] 褚恩义,张方,等.第四代火工品部分概念初步探讨[J].火工品, 2018(1): 1-5.
- [2] 任炜,赵玉龙.微机电火工品薄膜结构换能元[J].光学精密工程, 2018, 26(9): 2 320-2 326.
- [3] 解瑞珍,任小明,等.NiCr 桥膜换能元的制备[J].含能材料, 2010, 19(5): 584-587.
- [4] 杨俊锋,丁明建,等.退火温度对氮化钽薄膜电阻器性能的影响[J].广州化工, 2018, 46(14): 39-41.
- [5] A.Engel,A. Aeschbacher, K.Inderbitzin, A.Schilling. Tantalum nitride superconducting single-photon detectors with lowcut-off energy[J]. Appl. Phys. Lett, 2012(100): 062601 (1-3).
- [6] 蔡贤耀,蒋洪川,闫裔超,等. (B/Ti)n/TaN 薄膜点火桥的制备及点火性能研究[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 265-269.
- [7] 任小明,苏谦,等.氮化钽换能元的制备工艺研究[J].火工品, 2020 (1): 26-28.