

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0054-05

# 单片并联式半导体桥换能元能量转换效率影响因素分析

贺孝严<sup>1,2</sup>, 韩忠博<sup>1,2</sup>, 顾伯南<sup>1,2</sup>, 徐建勇<sup>1,2</sup>, 石伟<sup>1,2</sup>, 叶家海<sup>1,2</sup>, 俞春培<sup>1,2</sup>, 张文超<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 2. 微纳含能器件工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京, 210094)

**摘要:** 为了研究激励能量和桥区结构对半导体桥换能元能量转换效率的影响, 设计了两种不同单片并联式桥区结构的半导体桥换能元, 并在电容激励条件下进行测试, 以评估并联式桥区结构的能量转换效率, 进一步得到电压、桥区面积对能量转换效率的影响规律。试验结果表明: 在 47  $\mu$ F 电容和 25~35 V 充电电压条件下, 双桥区并联结构的能量转换效率略优于三桥区并联结构。在同一电容激励条件下, 同一桥区结构半导体桥换能元的能量转换效率随着充电电压的增加而降低; 在相同充电电压下, 同一桥区结构半导体桥换能元的能量转换效率随着桥区面积的增大而提高。

**关键词:** 半导体桥; 换能元; 并联式桥区; 能量转换效率; 电容激励

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.008

## Analysis of Factors Influencing the Energy Conversion Efficiency of Single Chip Parallel Semiconductor Bridge Transducers

HE Xiao-yan<sup>1,2</sup>, HAN Zhong-bo<sup>1,2</sup>, GU Bo-nan<sup>1,2</sup>, XU Jian-yong<sup>1,2</sup>, SHI Wei<sup>1,2</sup>, YE Jia-hai<sup>1,2</sup>, YU Chun-pei<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-chao<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2.

Key Laboratory of Micro/Nano Energetic Devices, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** In order to investigate the influence of excitation energy and bridge area structure on the energy conversion efficiency of semiconductor bridge transducers, two types of semiconductor bridge transducers with different single-chip parallel bridge structures were designed, and the tests were carried out under capacitive excitation conditions to evaluate the energy conversion efficiency of the parallel bridge area structure, then the influences of voltage and bridge area on energy conversion efficiency were further revealed. The test results indicate that under the conditions of 47  $\mu$ F capacitance and 25~35 V charging voltage, the energy conversion efficiency of the dual-bridge area parallel structure is slightly better than that of the triple-bridge area parallel structure. Under the same capacitance excitation condition, the energy conversion efficiency of the semiconductor bridges with same bridge area structure decreases with the increase of charging voltage; Under the same charging voltage condition, the energy conversion efficiency of semiconductor bridges with same bridge area structure increases with the increase of bridge area.

**Key words:** Semiconductor bridge; Transducer; Parallel bridge area; Energy conversion efficiency; Capacitive excitation

火工品是在受到外界能量刺激后用以引发火药、烟火制造、安全防护等领域<sup>[1]</sup>。换能元作为火工品的核心部件, 其性能直接关系到火工品的作用效能,

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 贺孝严 (2002-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事半导体桥换能器件研究。

通讯作者: 张文超 (1977-), 男, 教授, 主要从事先进点火器件及微纳含能材料研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.22275091, No.22205112, No.U2341249)。

引用本文: 贺孝严, 韩忠博, 顾伯南, 等. 单片并联式半导体桥换能元能量转换效率影响因素分析[J]. 火工品, 2024(5): 54-58.

进而影响着整个系统的工作效能<sup>[2]</sup>。半导体桥 (SCB) 火工品换能元是利用半导体膜作为换能材料的一种换能器件<sup>[3]</sup>, 通常采用微电子工艺在硅片上沉积金属或非金属, 形成单层或多层半导体桥膜<sup>[4]</sup>。相较于桥丝式火工品, SCB 因独特的结构和非线性电阻特征, 具有更高的安全性、可靠性、瞬发性和更低的点火能量<sup>[5]</sup>。但随着技术的发展, 对换能元提出了更高的要求, 如何进一步降低点火能量、提高输出能力成为换能元的重要发展方向。国内外的多个研究机构通过优化桥区设计<sup>[6-8]</sup>、覆盖含能薄膜<sup>[9-12]</sup>、采用电泳沉积<sup>[13]</sup>和油墨直写<sup>[14]</sup>等制备方法, 来提高换能元的输出效率。

针对当前半导体桥能量转换效率研究相对匮乏的状况, 本研究设计并制作两种并联式桥区结构的换能元, 以探索在电容激励条件下, 半导体桥能量转化效率的影响因素及其规律。研究分析了桥区面积、充电电压等因素对能量转化效率的具体影响, 以期对相关领域的理论研究与实际应用提供更为详实的数据支持和理论依据。

## 1 试验样品及准备

### 1.1 试验样品

本研究设计并制作了三桥区并联和双桥区并联两种不同并联结构的半导体桥换能元, 如图 1 所示。

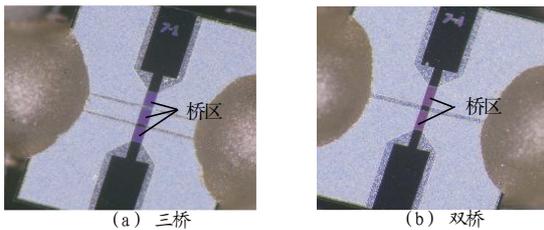


图 1 并联桥型换能元结构图

Fig.1 Schematic of parallel bridge type energy transducers

在并联桥区的基础上, 设计了 3 种不同尺寸的桥区面积, 具体数值如表 1 所示。试验开始前, 使用万用表检测半导体桥的电阻, 确保所有桥型的电阻均约为 1 Ω, 误差不超过 10%。

### 1.2 试验准备

首先, 在半导体桥表面均匀涂覆 1 层斯蒂芬酸铅 (LTNR) 起爆药, 其中硝化纤维素 (NC) 作为粘结

剂, 含量 4%, 并加入适量的乙酸乙酯。涂覆药浆后的换能元需在水浴烘箱中干燥不少于 4 h, 以确保乙酸乙酯完全挥发。

表 1 不同换能元的桥区尺寸

Tab.1 Bridge area dimensions of different energy transducers

桥型	型号	面积/ $\mu\text{m}^2$	电阻/ $\Omega$
三桥区	7-1	30 600	0.9~1.1
	7-2	41 325	
	7-3	50 400	
双桥区	7-4	22 120	
	7-5	29 600	
	7-6	38 700	

能量转换效率测试流程如下: 将换能元试样与测试系统按照规定进行安装和对准; 依据待测火工品换能元的发火特性, 设置示波器的触发方式为自触发 (即检测到信号上升沿后触发采集), 采集时间为 2~60 ms; 使用万用表确认发火电源和测试系统内各器件连接正常, 无短路和断路, 且各绝缘性能良好; 然后连接发火系统, 测试仪器复检; 启动发火系统, 开启电容充能, 待充能电压 (电流) 达到设定标准后, 起爆换能元; 起爆后, 采集卡在检测到信号上升沿后, 采集时间长度为 2~60 ms 的数据, 将数据存储, 导入计算机进行换能效率计算, 得出测试结果。电容激励换能效率测试采用 47  $\mu\text{F}$  钽电容。电容激励点火试验原理图如图 2 所示。基于电容激发电源和高分辨率示波器等火工品换能元能量转换效率发火测试系统如图 3 所示。

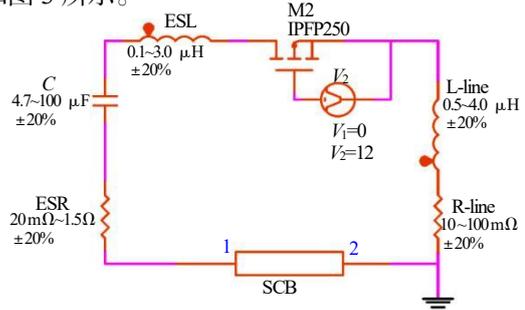


图 2 电容激励点火试验原理图

Fig.2 Schematic diagram of the capacitance excitation ignition test



图 3 能量转换效率测试系统

Fig.3 Energy conversion efficiency testing system

该系统由电容激励电源模块和数据采集模块两大核心部分构成。电容激励电源模块的作用在于模拟换能元的工作过程，通过输入相应的能量来实现。而数据采集模块的作用是对换能元在工作过程中的电压和电流变化进行快速响应和精确采集，以获得详尽的电压、电流曲线数据。

## 2 电容激励下能量转换效率研究

### 2.1 计算方法

以 7-1 型和 7-4 型换能元为例，研究单片并联式多桥区半导体桥在 47  $\mu\text{F}/25\text{V}$  充电电压条件下发火的电流、电压、功率、能量随时间的变化，如图 4~5 所示。

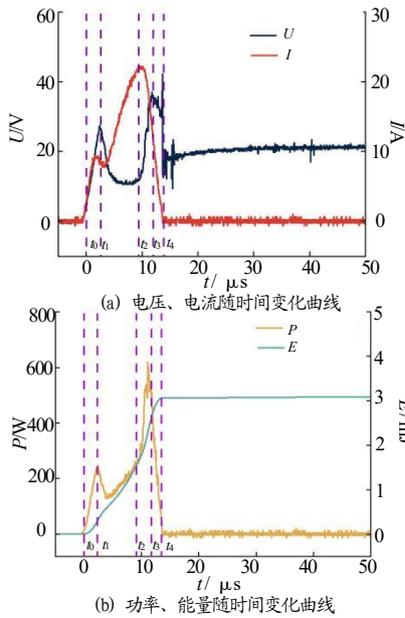


图 4 三桥区并联结构在 25 V 充电电压下发火的电流、电压、功率、能量随时间的变化

Fig.4 The changes of current, voltage, power and energy vs time of the triple-bridge area parallel structure ignited under 25 V charging voltage

由图 4~5 可知，多桥区半导体桥的发火过程与单桥类似，发火过程可分为 4 个阶段：多晶硅受热、多晶硅融化、汽化电离、加热等离子体。

半导体桥的发火参数主要包括以下 5 项<sup>[15]</sup>：电阻  $R$ ，临界发火时间  $t_c$ （从  $t_0$  到  $t_3$ ），临界发火能量  $E_c$ ，电容作用于半导体桥的作用总时间  $t_t$ （从  $t_0$  到  $t_4$ ），以及电容作用于半导体桥的总能量  $E_t$ 。其中， $t_c$  为半

导体桥从开始通电到桥区电离发火形成等离子体的时间； $t_t$  为半导体桥从开始通电至桥区电爆结束、桥区完全断开的时间。

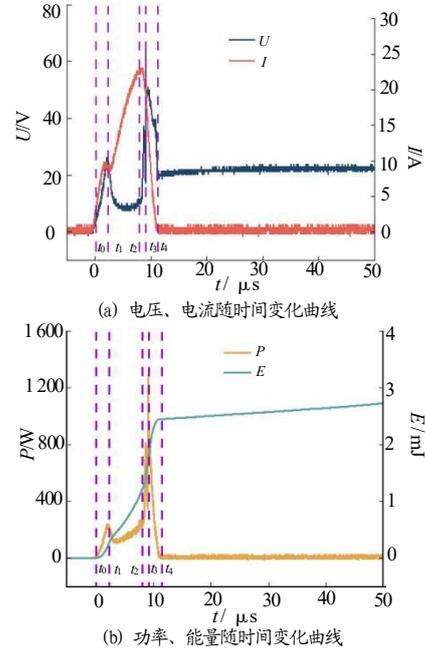


图 5 双桥区并联结构在 25 V 充电电压下发火的电流、电压、功率、能量随时间的变化

Fig.5 The changes of current, voltage, power and energy vs time of the dual-bridge area parallel structure ignited under 25 V charging voltage

依据文献<sup>[8,15]</sup>，将换能元作用总能量  $E_t$  与激发电容的总储能  $Q$  之比定义为换能元在电容激励条件下的能量转换效率。通过不同半导体桥的  $U(t)$ — $t$ 、 $I(t)$ — $t$  曲线得到  $P(t)$ — $t$  曲线，随后积分得到半导体桥作用总能量  $E_t$ ，再根据式 (3) 计算电容的总储能  $Q$ ，最后根据式 (4) 计算换能元能量转换效率  $\eta$ 。

$$P = UI \quad (1)$$

$$E_t = \int_{t_0}^{t_4} U(t)I(t)dt \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{E_t}{Q} \quad (4)$$

式 (1)~(4) 中： $E_t$  为换能元作用总能量，J； $P$  为功率，W； $t$  为电源作用桥区的时间，s； $Q$  为电源输入的能量，J； $C$  为电容，F； $U$  为充电电压，V； $\eta$  为能量转换效率。

### 2.2 电压对换能元能量转换效率的影响

在 47  $\mu\text{F}$  电容条件下，三桥区并联结构及双桥区

并联结构换能元在不同输入电压下发火的能量转换效率如表 2~3 所示。

表 2 三桥区并联结构换能元在不同电压下发火的能量转换效率

Tab.2 Energy conversion efficiency of energy transducer with triple-bridge area parallel structure ignited under different voltages

编号	$U/V$	$E_i/mJ$	$Q/mJ$	$\eta/\%$
7-1	25	3.25	14.68	22.14
	30	3.98	21.15	18.82
	35	5.14	28.79	17.84
	40	6.24	37.60	16.60

表 3 双桥区并联结构换能元在不同电压下发火的能量转换效率

Tab.3 Energy conversion efficiency of energy transducer with dual-bridge area parallel structure ignited under different voltages

桥型	$U/V$	$E_i/mJ$	$Q/mJ$	$\eta/\%$
7-4	20	2.30	9.40	24.48
	25	2.95	14.68	20.10
	30	4.19	21.15	19.82
	35	5.07	28.79	17.60

由表 2~3 可以看出,随着充电电压不断增加,半导体桥的发火能量提高,但能量转换效率却逐渐降低。根据表 2~3 中的试验数据,得到能量转换效率与充电电压之间的关系,如图 6 所示。

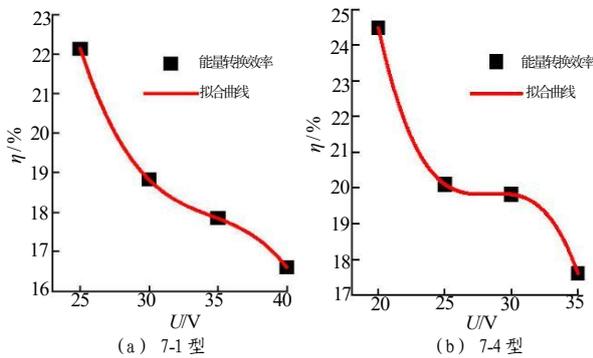


图 6 能量转换效率与充电电压的关系

Fig.6 Relationship between energy conversion efficiency and charging voltage

由图 6(a)可知,对于三桥区并联结构换能元(7-1型),当充电电压在 25~30 V 之间时,能量转换效率  $\eta$  明显下降,而在 30~35 V 区间内,  $\eta$  的下降速率有所减缓,当充电电压在 35~40 V 区间时,  $\eta$  的下降趋势再次加剧。类似地,图 6(b)也展示了双桥区并联结构换能元(7-4型)  $\eta$  的下降趋势。综合分析可知在相同的电容条件下,随着充电电压的升高,能量利用率呈下降趋势,表明在确保半导体桥能够正常发火的前提下,充电电压并非越高越好,选择一个适宜的充电电压值对于提高能量转换效率、实现能量的合理

利用至关重要。

2.3 桥区结构对换能元能量转换效率的影响

在 47  $\mu F$  电容的条件下,分别选取同一电压进行测试,对不同桥区结构换能元的能量转换效率进行了比较分析,具体数据如表 4~6 所示。

表 4 不同桥区结构换能元在 25 V 发火时的能量转换效率

Tab.4 Energy conversion efficiency of the energy transducer with different bridge area structures ignited under 25 V

桥型	$U/V$	$E_i/mJ$	$Q/mJ$	$\eta/\%$
7-1	25	3.25	14.68	22.14
7-5	25	3.37	14.68	22.95

表 5 不同桥区结构换能元在 30 V 发火时的能量转换效率

Tab.5 Energy conversion efficiency of the energy transducer with different bridge area structures ignited under 30 V

桥型	$U/V$	$E_i/mJ$	$Q/mJ$	$\eta/\%$
7-1	30	3.98	21.15	18.82
7-5	30	4.33	21.15	20.48

表 6 不同桥区结构换能元在 35 V 发火时的能量转换效率

Tab.6 Energy conversion efficiency of the energy transducer with different bridge area structures ignited under 35 V

桥型	$U/V$	$E_i/mJ$	$Q/mJ$	$\eta/\%$
7-1	35	5.14	28.79	17.84
7-5	35	5.49	28.79	19.06

由表 4~6 可见,双桥区并联结构换能元的能量转换效率略优于三桥区并联结构换能元。

2.4 桥区面积对换能元能量转换效率的影响

在 47  $\mu F$  电容以及相同的充电电压条件下,不同面积的两种桥区结构换能元能量转换效率如表 7~8 所示。

表 7 不同面积三桥区并联结构换能元发火的能量转换效率

Tab.7 Energy conversion efficiency of the triple-bridge parallel structure energy transducer with different bridge areas ignition

型号	$U/V$	$E_i/mJ$	$\eta/\%$
7-1	25	3.25	22.14
7-2	25	3.34	22.76
7-3	25	3.83	26.11
7-1	30	3.98	18.82
7-2	30	4.63	21.89
7-3	30	4.67	22.10
7-1	35	5.14	17.84
7-2	35	5.87	20.39
7-3	35	6.17	21.45

表 8 不同面积双桥区并联结构换能元发火的能量转换效率

Tab.8 The energy conversion efficiency of the dual-bridge parallel structure energy transducer with different bridge areas ignition

型号	$U/V$	$E_i/mJ$	$\eta/\%$
7-4	25	2.95	20.10
7-5	25	3.37	22.95
7-6	25	3.63	25.15
7-4	30	4.19	19.82
7-5	30	4.33	20.48
7-6	30	4.95	23.40
7-4	35	5.07	17.60
7-5	35	5.49	19.06
7-6	35	6.22	21.59

通过分析表 7~8 中的数据,可以得出:在相同的充电电压下,对于任一种桥型换能元,其输出能量会随着桥区面积的增加而提高,进而导致能量转换效率随着桥区面积的增大而上升。这是因为桥区面积的增加意味着需要更多的能量来加热至电离状态,而电容提供的总能量是固定的,因此能量转换效率得以提高。

### 3 结论

本研究通过设计两种不同并联结构的桥区,探讨并联结构对半导体桥换能元能量转换效率的影响,并进一步分析电压和桥区面积对能量转换效率的影响规律,得到以下结论:

(1) 在  $47\ \mu\text{F}$  电容和  $25\sim 35\ \text{V}$  的电压激励条件下,双桥区并联结构的能量转换效率略优于三桥区并联结构。

(2) 在同一电容激励条件下,同一桥区结构半导体桥换能元的能量转换效率随着充电电压的增加而呈现下降趋势。

(3) 在相同的充电电压条件下,同一桥区结构半导体桥换能元的能量转换效率随着桥区面积的增大而相应提高。

桥区结构设计在换能元的能量转换过程中起着关键作用,它不仅决定了电流的分布路径,还影响了热量聚集区的大小及其均匀性,进而直接影响换能元的能量转换效率。通过优化桥区结构,可以有效提升电流传输效率,减少电流散失,确保更多热量集中在目标区域。这种优化设计不仅能够加速点火反应过程,还能显著提升能量转换效率,使整个系统的工作效率更加稳定和高效。

#### 参考文献:

- [1] 祝逢春,徐振相,陈西武,等.半导体桥火工品研究新进展[J].兵工学报,2003(1):106-110.
- [2] 顾伯南,徐建勇,石伟,等.电火工品换能元增效技术研究进展[J].含能材料,2023,31(03):251-265.
- [3] 祝逢春,徐振相,周彬,等.SCB 火工品的研究与发展[J].爆破器材,2003(1):18-23.
- [4] 张文超,叶家海,秦志春,等.半导体桥电爆过程的能量转换测量与计算[J].含能材料,2008(5):564-566,576.
- [5] 周蓉,岳素格,秦卉芊,等.半导体桥(SCB)的研究[J].半导体学报,1998(11):58-61.
- [6] 王广海,李国新,阿苏娜.薄膜桥火工品的制备与性能研究[J].含能材料,2008(05):543-546.
- [7] 郑子龙.微型含能半导体桥的设计及性能研究[D].南京:南京理工大学,2021.
- [8] 张彬,任伟,褚恩义,等.不同桥形微结构换能元的仿真设计与实验研究[J].含能材料,2018,26(12):1 056-1 060.
- [9] 张文超.复合半导体桥电爆特性及桥温变化的研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [10] Barbee Jr T W, Weihs T. Ignitable heterogeneous stratified structure for the propagation of an internal exothermic chemical reaction along an expanding wavefront and method of making same[R]. Univ. of California (United States), 1996.
- [11] 倪德彬,于国强,史胜楠,等.基于 Al/CuO<sub>x</sub> 复合薄膜半导体桥间隙点火性能研究[J].含能材料,2019,27(02):149-154.
- [12] Wang J, Jiang X, Zhang L, et al. Design and fabrication of energetic superlattice like-PTFE/Al with superior performance and application in functional micro-initiator[J]. Nano Energy, 2015(12): 597-605.
- [13] 李家宽.Al-CuO/氧化石墨烯含能点火桥膜的制备与性能研究[D].南京:南京理工大学,2016.
- [14] Yu C P, Zheng Z L, Gu B N, et al. Aluminum/lead tetroxide nanothermites for semiconductor bridge applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2023(451): 138-144.
- [15] 朱朋.基于含能复合薄膜的非线性电爆换能元[D].南京:南京理工大学,2014.