



·高功率微波技术·

SiC 光导开关衬底与电极界面场强仿真与优化设计*

罗 燕, 丁 蕾, 赵 毅, 姚崇斌, 王立春

(上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 研究电极结构、SiC 与电极连接结构对界面场强的影响, 通过电极边缘以及 SiC 晶体结构的优化降低界面处的电场增强, 并通过高压试验测试优化电极结构的击穿电压。结果表明, 优化电极倒角以及 SiC 晶体与电极的界面下埋可有效降低电场增强, 在电极为圆倒角及界面使用焊料连接的结构下, 使用介质环的器件在电压 22 kV 时击穿。

关键词: 光导半导体; SiC 开关; 电极; 界面; 击穿场强

中图分类号: TN256

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210360

Optimization design and simulation of electric field at interface between substrate and electrode of photoconductive switch

Luo Yan, Ding Lei, Zhao Yi, Yao Chongbin, Wang Lichun

(Shanghai Aerospace Electronic and Communication Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Photoconductive switch can be used in high power microwave system. The breakdown resistance field strength of SiC photoconductive switches is mainly limited by packaging. The packaging method cannot effectively solve the problem of electric field accumulation when the copper electrode leaves the SiC substrate, which leads to the application field strength of SiC far lower than the breakdown resistance strength of SiC crystal. The effects of the structure of the electrode and the connection structure of SiC to the electrode on the interfacial field intensity are studied. The electric field enhancement at the interface is reduced by optimizing the edge of the electrode and the SiC crystal structure. The breakdown voltage of optimized electrode structure is tested. The results show that the electric field enhancement can be effectively reduced by optimizing the electrode chamfering and burying under the interface between SiC crystal and electrode. Under the structure of circular chamfering and interface connecting with solder, the SiC photoconductive switch breaks down at the voltage of 22 kV.

Key words: photoconductive semiconductor, SiC switch, electrode, interface, breakdown field

光导开关(PCSS)具有极快的响应速度(响应时间为 ps 量级)、极小的触发动抖(ps 量级)、较小的器件体积以及光电隔离不受电磁干扰等优良特性, 在超宽带电磁波产生、微波、超快电子学等领域有着极其广泛的应用^[1-4]。目前制约大功率光导开关实用化的关键问题之一是开关的使用寿命^[5-6], 这主要与开关衬底电极附近的局部电场增强有关。对于正对电极结构开关, 预击穿主要是由碰撞离子化和随之在阳极附近的载流子聚集造成的, 在电极-半导体-绝缘介质“三结合点”周边发生电场畸变^[7]。电极处电场分布对开关动作时延和稳定性也有影响^[8-10]。国外对此进行了研究, C. Hettler 等人^[11]对电极处电场进行仿真, 通过 SiC 晶体加工凹槽可降低三结合点处的电场畸变, 由于凹槽加工难度大, 通过改变封装介质材料来提升电场均匀性。C. M. Fessler 等人^[12]通过机械加工方式进行凹槽加工, 并同时探索湿法腐蚀和激光加工的方案, 在凹槽上制备欧姆接触的研究不充分。本文对 SiC 晶体与电极界面电场进行仿真, 通过电极结构及封装结构优化来提升电场均匀性, 回避了凹槽加工的难题以及加工所带来的一系列后续抛光、欧姆接触制备等问题。

* 收稿日期: 2021-08-20; 修订日期: 2021-12-31

基金项目: 国防科工局基础科研项目

联系方式: 罗 燕, luoyan1120@qq.com。

1 封装结构设计

如图 1 所示, 电极异面正对接的光导开关耐压高, 响应比较快, 该结构广泛应用于 SiC 光导开关^[13-14]。目前该结构的应用场强约为 30 kV/mm, 远小于 SiC 的理论击穿场强 300 kV/mm^[15-16]。其主要原因包括: SiC 晶体正对电极对位偏差、绝缘材料不完全封装、焊接部位存在锯齿状凸起等, 以及电极几何形状在三结合点处引起的电场增强^[17-18]。

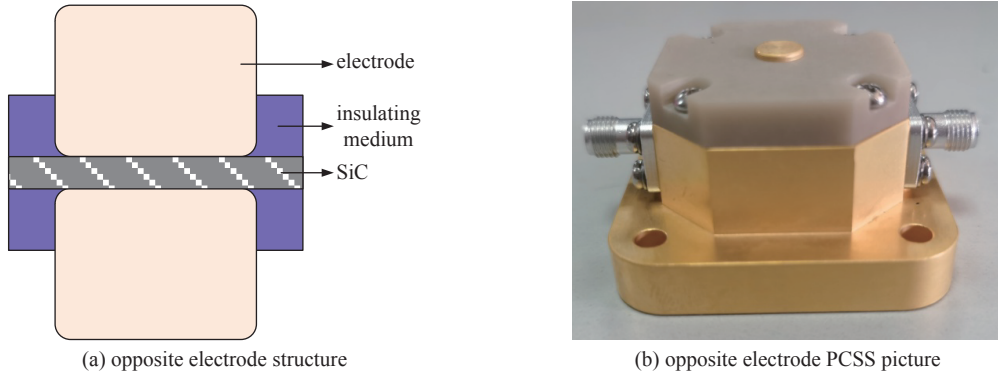


Fig. 1 Photoconductive switch with opposite electrodes

图 1 异面正对结构光导开关

如图 2 所示, 本文拟在电极封装结构上加入介质环来实现电极的近似下埋, 通过研究电极的电场分布优化电极倒角, 来降低三结合点处的电场强度。

2 模型的建立

晶体通过上下表面的两个铜柱与外电路相连接, 使用 Ansys Maxwell 软件进行仿真, 建立包含电极、晶体、绝缘介质的模型, 如图 3 所示。电极材料为铜, 直径为 8 mm, 晶体为半导体 SiC, 尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm, 绝缘介质为绝缘胶。优化铜柱与晶体接触处的构型, 分别设置圆柱电极的底部为 53°切角(底部边长 0.5 mm)、45°切角(底部边长 0.5 mm)和 0.5 mm 半径圆倒角进行仿真比较。对于介质环材料, 热膨胀系数相近、耐击穿强度高的绝缘材料如表 1 所示, 通过电场仿真, 为材料的选择提供指导。

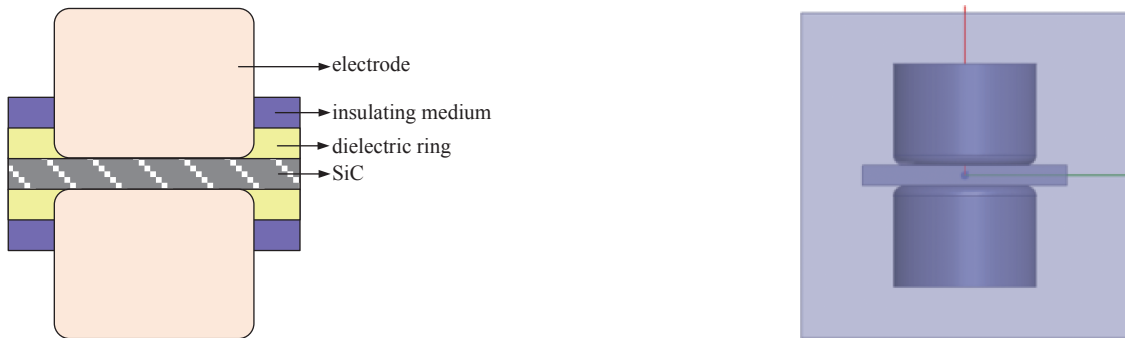


Fig. 2 Dielectric ring electrode package structure

图 2 介质环电极封装结构

Fig. 3 Diagram of device model

图 3 器件模型示意图

表 1 介质环绝缘材料性能表

Table 1 Insulation material performance

material	dielectric strength/(kV·mm ⁻¹)	dielectric constant	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	CTE/(K ⁻¹)
CVD diamond	1000	5.7	1000~2000	1.1×10 ⁻⁶
fused silica	25~40	3.75	1.3	0.55×10 ⁻⁶
undoped SiC	300	10	300~500	4.0×10 ⁻⁶
AlN	17	9	140~180	4.5×10 ⁻⁶
epoxy glue	20~40	3.8~6.2	1.1	(20~60)×10 ⁻⁶
Al ₂ O ₃	16.9	9.8	35	8.4×10 ⁻⁶
silicone	30~40	2.5~4	1.2	300×10 ⁻⁶
ZrO ₂	9	29	2.2	10.3×10 ⁻⁶

3 计算结果及讨论

3.1 三种面型电极电场分析

当圆柱电极的底部为 53°切角、45°切角和 0.5 mm 半径圆倒角时, 结构尺寸如图 4 所示, 对比在空气(介电常数 1)、油(介电常数 1.89)、硅胶(介电常数 4) 以及环氧树脂胶(介电常数 6) 绝缘介质中的电场强度。同时分析在厚 1 mm、介电常数为 10 的绝缘 SiC 介质环中的电场分布, 可以发现, 由于其与晶体相同的介电常数因此能最好的达到电极下埋效果。边界条件为阳极电极施加电压 20 kV, 仿真得电极处最大场强如图 5 所示。由图 5 可知: 当电极 为圆倒角时, 电场随着绝缘介质介电常数的增大而减小; 当光导开关直接暴露于空气之中, 电场场强有近 20 倍的 增加; 当电极切角为 45°和 53°时, 电场场强约有 5 倍的增加, 可见电极结构对三结合点处的场强有着重要影响; 当 电极切角为 45°和 53°时, 三结合点场强均随着绝缘介质介电常数的增加而减少, 但在空气和油的环境中, 45°切角 电极下的场强高于 53°切角电场, 当绝缘介质介电常数大于 4 时, 45°切角电极下的场强低于 53°切角电场。因此, 在空气和油的绝缘介质中, 优选 53°切角电极, 在灌封胶中, 优选 45°切角电极, 且增加 SiC 介质环可有效降低三结合点处电场, 最低达到 37.6 kV/mm 的电场强度。

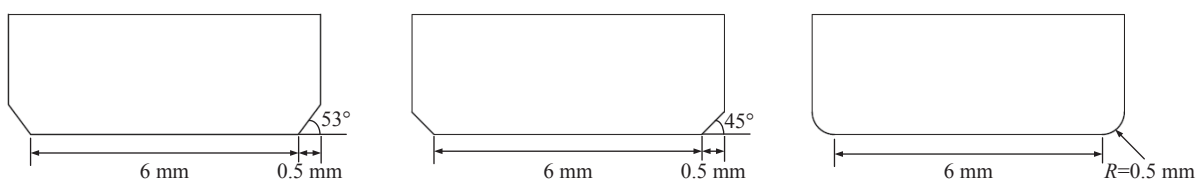


Fig. 4 Electric field intensity distribution
图 4 圆柱电极结构尺寸

不同电极结构的电场强度如图 6 所示, 45°切角与 53°切角的电场分布相似, 图中列出了圆倒角和 45°切角两种电极结构在空气和 SiC 介质 2 种情况下的电场分布。

如图 6 所示, 电场的最大值在三结合点处, 在圆倒角的电极结构中, 由于圆角与 SiC 晶片的表面相切, 形成了一个尖角缝隙, 因此电场畸变严重, 相比 45°切角在尖角处场强要高得多, 并且在尖端集中, 分布极度不均匀, 45°切角在空气中电场的分布也主要集中在尖端, 集中情况有所缓解。当加入 SiC 介质片, 形成电极下埋结构, 电场最大处仍在三结合电处, 但电场分布相对均匀, 均布在电极周围。

3.2 不同焊料厚度电场分析

由电极结构的电场分布分析可知, 在三结合点处形成尖端易造成电场的严重畸变, 由于在真实装配中, 电极通过焊料焊接, 并不会出现圆倒角与 SiC 晶片相切的尖锐尖端的极端情况, 因此需在电极与 SiC 晶片间考虑焊料的情况。设置焊料是润湿的并向 SiC 晶片表面铺展, 对不同焊料厚度下三结合点处场强进行仿真, 当电极切角为 45°, 加有 SiC 薄片, 焊料厚度分别为 0.1 mm、0.08 mm、0.05 mm 和 0.03 mm 时, 仿真结果如图 7 所示。可知, 电场最大值集中在焊料与晶片的边界处, 而电极底部的电场反而很小, 且随着焊料厚度的减薄, 三结合点处的电场分布越均匀, 电场畸变越小。

由于电场的最大值不在电极底部, 对底部为 53°切角、45°切角和 0.5 mm 半径圆倒角电极结构在不同焊料厚度下的电场进行仿真, 仿真得电场最大值如图 8 所示。由图可知, 随着焊料厚度的降低, 三结合点处场强越来越低。值得注意的是, 圆倒角电极的电场最大值在任何焊料厚度下均低于 45°切角和 53°切角的电场最大值, 分析原因是加入焊料后圆倒角与 SiC 晶片的相切窄缝隙被焊料填满, 且圆倒角过渡平滑, 无尖角, 因此电场更均匀, 最大场强最小。

3.3 介质环介电常数影响

由前面的分析可知, 随着绝缘介质介电常数越大, 三结合点处场强越小, 在铺展焊料的情况下, 圆倒角电极的电场更加均匀。由于灌封胶多为硅胶树脂或环氧树脂, 加之高耐压、热膨胀系数匹配等要求, 介电常数可调节空

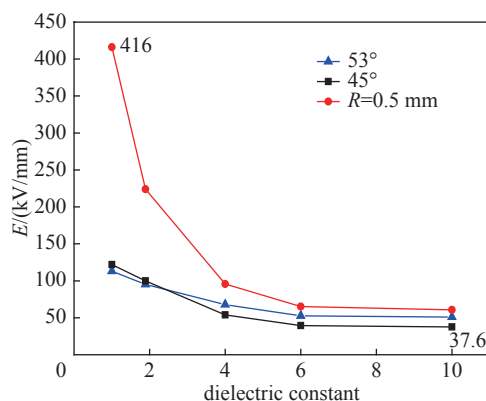


Fig. 5 Electric field intensity of different cylindrical electrode structures
图 5 不同圆柱电极结构场强

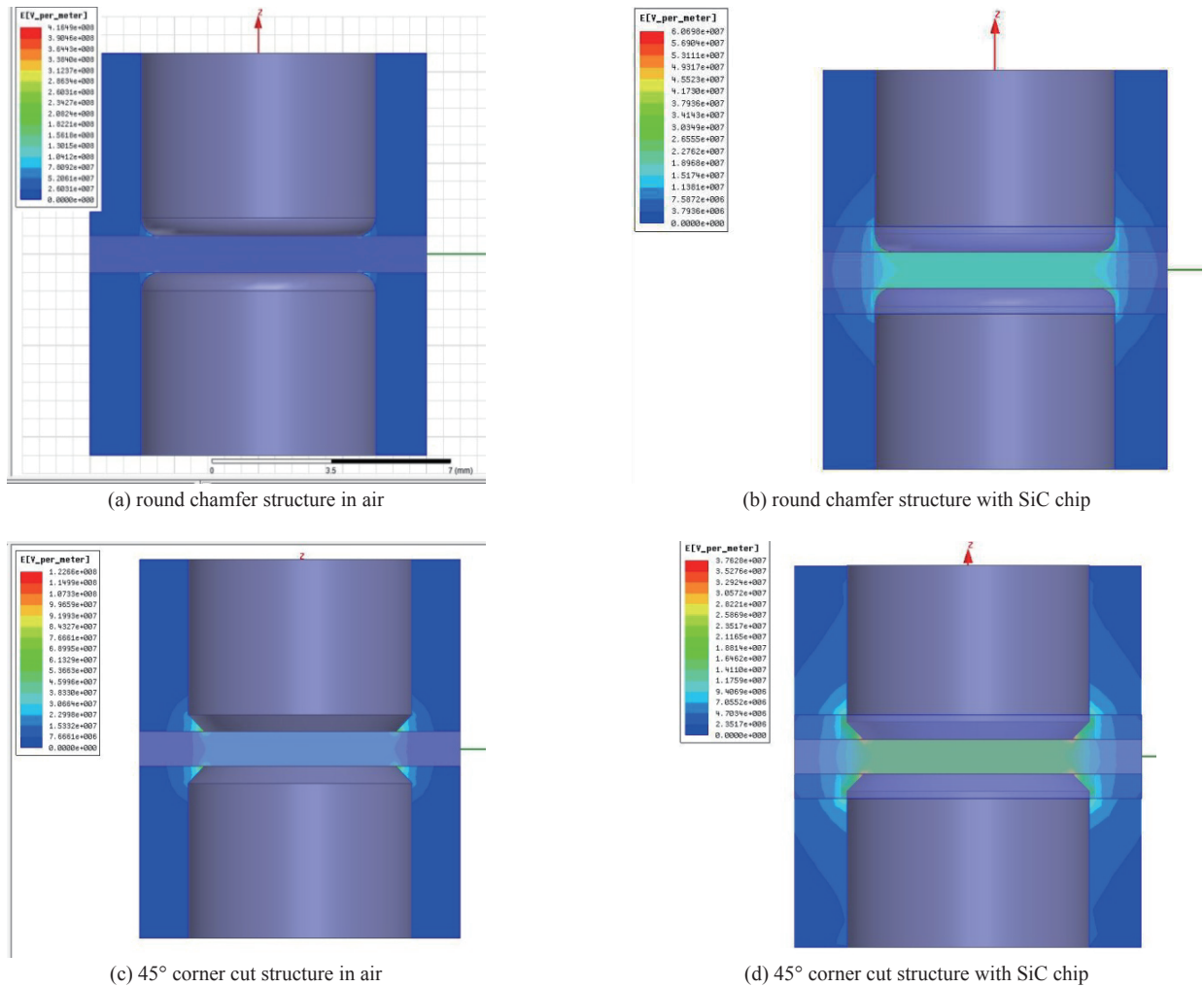


Fig. 6 Electric field intensity distribution
图 6 电场强度分布图

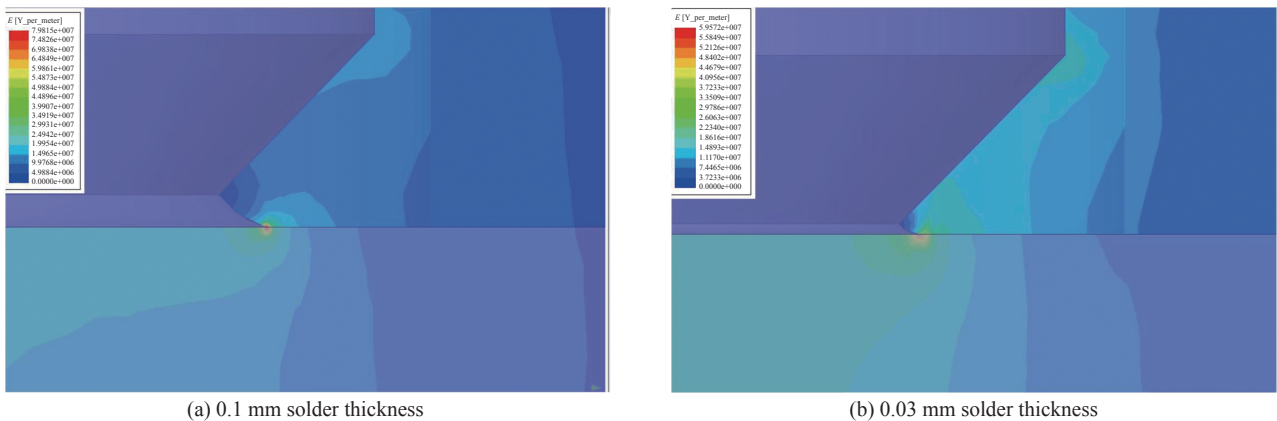


Fig. 7 Electric field intensity distribution with solder interface
图 7 界面加焊料后电场强度分布图

间不大,灌封胶为介电常数为6的环氧胶。对圆倒角电极在不同介电常数绝缘介质环下的电场进行仿真,最大场强如表2所示。由表2可知:当焊料厚度为0.03 mm时,随着绝缘介质环介电常数的增加,电场最大值减小,当介电常数增大到26时,电场最大值最小为24 kV/mm,且随着介电常数的继续增加,电场最大值略有增加,变化不大;当焊料厚度为0.02 mm时,介电常数增大到30时,电场最大值最小为22 kV/mm,如图9所示,且随着介电常数的继续增加,电场最大值略有增加,变化不大。

由于焊接中焊料太薄影响连接强度,且焊接工艺难以控制,因此不对进一步降低焊料厚度进行仿真。根据仿

真结果,可选择介电常数为 30 左右的陶瓷片取代 SiC 介质片,如氧化锆陶瓷,另一方面优选高耐压灌封胶,有效降低电场强度。此仿真主要针对低电频的开关应用场景,针对高频需同时考虑电容效应对开关的影响进行仿真。

对使用氧化锆陶瓷介质环和无介质环的封装进行静态电压试验,试验场景如图 10 所示,试验从 1 kV 电压开始,以 1 kV 递增施加在器件的两端,每一级电压施加时间为 2 min。无介质环的器件在电压增加至 13 kV 时击穿,使用氧化锆陶瓷介质环的器件在电压增加至 22 kV 时击穿。可见,介质环可降低电场畸变,降低电极处最大场强,从而提升应用电压。

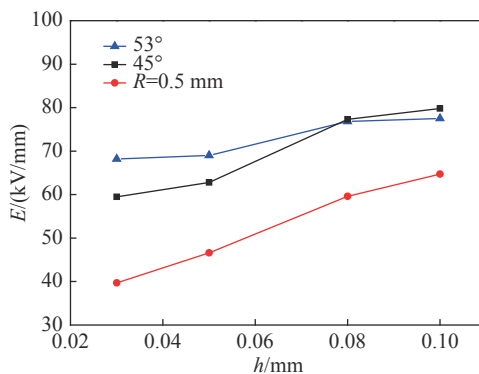


Fig. 8 Maximum electric field intensity under different solder thickness

图 8 不同焊料厚度电场最大值

表 2 不同介电常数绝缘介质环材料最大场强

Table 2 Maximum electric field intensity of different dielectric constant insulation rings

material	dielectric constant	maximum electric field / (kV·mm ⁻¹)	
		thickness of the solder is 0.03 mm	thickness of the solder is 0.02 mm
CVD diamond	5.7	39.7	36.8
Al ₂ O ₃	9	37.1	32.1
undoped SiC、AlN	10	34.4	27.6
CdWO ₄	12.8	32.3	28.9
MnWO ₄	15	30.4	27.3
ZnWO ₄	17.6	27.7	26.1
CoNb ₂ O ₆	20	27.2	25.7
Ba ₅ Ta ₄ O ₁₅	26	24.0	24.1
ZrO ₂	30	24.8	22.0
ZrO ₂	32	24.2	23.5

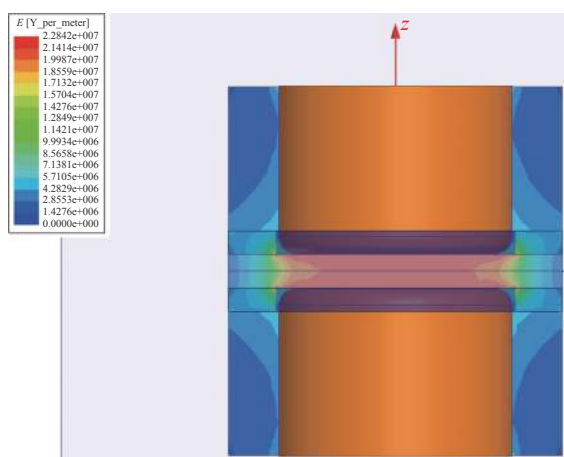


Fig. 9 Electric field distribution of dielectric constant 30 of insulating medium

图 9 绝缘介质介电常数 30 的电场分布

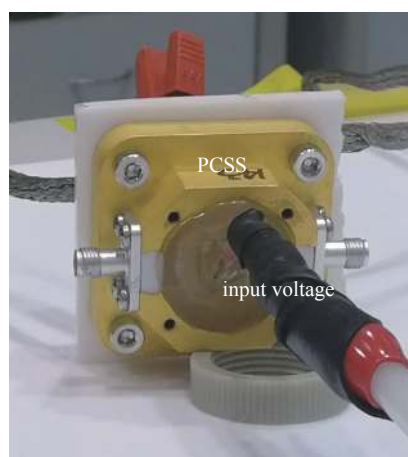


Fig. 10 Static high voltage test

图 10 静态高压试验现场图

4 结 论

本文针对 SiC 光导开关三结合点处电场畸变所导致的器件易失效、寿命低的问题,开展关于电极结构、焊料厚度、绝缘介质环对器件电场分布及电场强度的影响。通过仿真优化得出,在施加电压为 20 kV 时,圆倒角电极包围于介电常数 30 的绝缘材料,焊料厚度控制于 0.02 mm 可获得电场最大值为 22 kV/mm 的场强,有效降低三结合点处电场畸变,提升其应用电压。

参考文献:

- [1] 张永平. 碳化硅光导开关的制备与性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014: 10-40. (Zhang Yongping. Preparation and properties of SiC photoconductive switch[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014: 10-40)
- [2] Cui H, Yang H, Xu J, et al. Sublinear current-voltage characteristics of linear photoconductive semiconductor switch[J]. *IEEE Electr Device L*, 2016: 1-1.
- [3] 宋朝阳. 半绝缘4H-SiC光导开关研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 20-30. (Song Chaoyang. Study on semi-insulating 4H-SiC PCSS[D]. Xian: Xidian University, 2015: 20-30)
- [4] Cao P, Huang W, Guo H, et al. Performance of a vertical 4H-SiC photoconductive switch with AZO transparent conductive window and silver mirror reflector[J]. *IEEE T Electron Dev*, 2018, 65(5): 2047-2051.
- [5] Daniel M, William S, Alan B, et al. High power lateral silicon carbide photoconductive semiconductor switches and investigation of degradation mechanisms[J]. *IEEE T Plasma Sci*, 2015, 43(6): 2021-2031.
- [6] Sampayan S, Bora M, Brooksby C, et al. High voltage wide bandgap photoconductive switching[J]. *Mater Sci Forum*, 2015, 821-823: 871-874.
- [7] Suproniuk M, Kaminski P, Pawlowski M, et al. Current status of modelling the semi-insulating 4H-SiC transient photoconductivity for application to photoconductive switches[J]. *Opto-Electron. Rev*, 2017, 25(3): 171-180.
- [8] 董妍. 高功率光导开关的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 10-30. (Dong Yan. Research on high power photoconductive semiconductor switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018: 10-30.)
- [9] Majda E, Suproniuk M, Pawlowski M, et al. Current state of photoconductive semiconductor switch engineering[J]. *Opto-Electron Rev*, 2018, 26: 92-102.
- [10] 许世峰, 何晓雄, 孙飞翔. 光导开关欧姆接触电阻率测量方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(7): 929-933. (Xu Shifeng, He Xiaoxiong, Sun Feixiang. Research on measurement methods of ohmic contact resistivity of PCSS[J]. Journal of Heifei University of Technonology (Natural Science), 2016, 39(7): 929-933)
- [11] Hettler C, James C, Dickens J. High electric field packaging of silicon carbide photoconductive switches[C]//Proc of PPC. 2009.
- [12] Fessler C, Kelkar K, Nunnally W, et al. Investigation of high electric fields at the electrode-SiC interface in photo-switches[C]//Proc of PPC. 2008.
- [13] 曹鹏辉. 采用透明电极的垂直型4H-SiC光导开关的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 20-40. (Cao Penghui. Research on vertical 4H-SiC PCSS with transparent electrode[D]. Xian: Xidian University, 2017: 20-40)
- [14] Sullivan J. High power operation of a nitrogen doped, vanadium compensated, 6H-SiC extrinsic photoconductive switch[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(17): 172106.
- [15] 章林文, 夏连胜, 谌怡, 等. 介质壁加速器关键技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1769-1775. (Zhang Linwen, Xis Liansheng, Shen Yi, et al. Technologies of dielectric wall accelerator[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1769-1775)
- [16] James C, Hettler C, Dickens J. High-purity semi-insulating 4H-SiC as a high-voltage switch material[C]//Proc of IPMC. 2010.
- [17] 董妍. 高功率光导开关的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 1-11. (Dong Yan. Research on high power photoconductive semiconductor switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 1-11)
- [18] 刘金进. 碳化硅光导开关耐压结构设计及仿真研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2021: 6-12. (Liu Jinjin. Design and simulation of silicon carbide photoconductive semiconductor switches withstanding high voltage[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2021: 6-12)