

**真空沟道结构GaAs光电阴极电子发射特性**

郝广辉 韩攀阳 李兴辉 李泽鹏 高玉娟

**The electron emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure**

Hao Guang-Hui Han Pan-Yang Li Xing-Hui Li Ze-Peng Gao Yu-Juan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 108501 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191893

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191893>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

反射式变掺杂负电子亲和势GaN光电阴极量子效率研究

Quantum efficiency for reflection-mode varied doping negative-electron-affinity GaN photocathode

物理学报. 2017, 66(6): 067903 <https://doi.org/10.7498/aps.66.067903>

表面形貌对热阴极电子发射特性的影响

Effect of surface topography on emission properties of hot-cathode

物理学报. 2019, 68(3): 037901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181725>

大功率磁控管用新型 $Y_2Hf_2O_7$ 陶瓷阴极研究

A novel  $Y_2Hf_2O_7$  ceramic cathode applied to high power magnetron tube

物理学报. 2020, 69(3): 037901 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191496>

微腔效应对顶发射串联蓝光有机电致发光器件性能的影响

Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices

物理学报. 2020, 69(9): 096104 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191576>

电磁场中施主中心量子点内磁极化子态寿命与qubit退相干

Magnetopolaron-State Lifetime and Qubit Decoherence in Donor-Center Quantum Dots with the Electromagnetic Field

物理学报. 优先发表 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200242>

# 真空沟道结构 GaAs 光电阴极电子发射特性\*

郝广辉<sup>†</sup> 韩攀阳 李兴辉 李泽鹏 高玉娟

(北京真空电子技术研究所, 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

(2019 年 12 月 15 日收到; 2020 年 3 月 9 日收到修改稿)

光电阴极的发射电流密度和寿命限制了其在功率器件和大科学装置中的应用. 本文结合光电阴极和场发射阴极电子发射理论, 设计了大电流密度的真空沟道结构光电阴极组件, 并使用覆膜和刻蚀技术制备了以 GaAs 衬底为阴极材料的光电阴极组件. 光电阴极组件电子发射特性测试结果显示, 常温状态下随入射光功率增加, 阴极发射电流增加幅度逐步增大. 光功率为 5 W 时, 发射电流达到 26.12 mA, 电流密度达到 5.33 A/cm<sup>2</sup>. 随光电阴极组件工作温度增加, 阴极材料内的载流子浓度也会相应地增加, 提高了负极对阴极材料内发射电子的补充效率, 增强了阴极组件的电子发射能力. 当光电阴极组件为 400 °C 时, 其发射电流可达到 89.69 mA. 由于阴极表面不存在激活原子, 在光电阴极组件连续 144 h 的寿命试验中, 阴极的发射电流为 4.5 ± 0.3 mA, 阴极发射性能并未出现明显衰减. 真空沟道是光电阴极组件电子发射的主要区域, 通过改善真空沟道结构参数可以直接调整阴极组件发射电子束的形状, 增强大电流密度光电阴极在真空电子器件和设备中的适用性.

**关键词:** 光电阴极, 电流密度, 真空沟道, 寿命**PACS:** 85.60.Ha, 79.70.+q, 85.45.-w**DOI:** 10.7498/aps.69.20191893

## 1 引言

光电阴极具有工作温度低、响应速度快、发射电子能量分布集中和发射电流特性易受光源调制等优点, 是一种理想的电子源, 基于大电流密度光电阴极的电子源可广泛应用于真空微波器件、大科学装置和自由电子激光器等真空器件和设备<sup>[1-9]</sup>. 传统光电阴极仅工作于低温和微光环境中, 发射电流密度较小, 耐离子轰击能力较差, 所以无法满足上述真空器件和设备对阴极电子发射性能的要求<sup>[10-13]</sup>. GaAs 晶体材料具有响应光谱范围宽、制备工艺成熟和电子扩散长度大等优点, Cs/O 激活的 GaAs 光电阴极拥有较高的量子效率和灵敏度. 但是光电阴极工作过程中, Cs 和 O 原子比例失衡和原子脱附是阴极性能衰减的主要原因, 所以在

大电流密度光电阴极研制过程中必须摒弃 GaAs 光电阴极的 Cs/O 激活工艺<sup>[14,15]</sup>. 场发射阴极同样工作于常温环境, 其利用栅极提供的强电场来降低阴极材料的表面功函数, 最终实现电子发射<sup>[16-19]</sup>. 为此, 在结合 GaAs 光电阴极材料特性和场发射阴极组件结构的基础上, 提出了一种真空沟道结构的大电流密度光电阴极, 可以大幅度提高光电阴极的电子发射能力, 从而达到真空器件对高性能阴极的需求.

未经 Cs/O 激活的 GaAs 光电阴极仅对高能光子的光束产生微弱的电子发射, 而在可见光波段则不会产生电子发射现象. 虽然场助光电阴极的电子发射能力高于普通阴极的电子发射能力, 但是场助光电阴极同样无法承受长时间、高能量光束照射, 其每平方厘米面积的发射电流也无法达到安培量级. 在场助光电阴极组件中, 随工作电压增加,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61601420, 61971386) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: hghgh@126.com

阴极与栅极之间容易出现打火或短路等现象,增加了器件的封装难度. 场发射阴极组件中,由覆膜工艺制备的绝缘层可保障栅极和阴极之间距离的一致性,使阴极表面的电场强度达到  $10^7$  V/cm 量级,可以有效降低阴极表面势垒,使阴极产生电子发射<sup>[20,21]</sup>. 因此可以通过在 GaAs 晶体表面制作真空沟道结构的方式来制备大电流密度的场助光电阴极. 由于 GaAs 晶体仅在光束照射时才会产生自由扩散的电子,所以 GaAs 晶体作为负极材料制作场发射组件时,只有光束照射到 GaAs 阴极材料上时才会产生电子发射,可以实现光束对阴极电子发射特性的调制作用. 另外光激发电子所拥有的能量高于其他场发射材料中电子的能量,这部分电子运动到阴极材料表面后隧穿表面势垒的几率也较大,所以真空沟道结构光电阴极的工作电压将低于同等条件下其他场发射阴极的工作电压. 本文使用覆膜与刻蚀工艺制备了真空沟道结构光电阴极组件,测试了不同激光功率和工作温度条件下阴极组件的电子发射特性,分析了温度对阴极电子发射稳定性的影响,并仿真了真空沟道结构对阴极组件发射电子束形状的影响.

## 2 实验

大电流密度的真空沟道结构光电阴极组件主要由阴极材料、负极、绝缘层、栅极和真空沟道五部分组成,其工作原理如图 1 所示. 其中真空沟道结构贯穿栅极和绝缘层,只有部分阴极表面暴露于真空沟道内. 阴极组件的栅极和负极分别接电源的

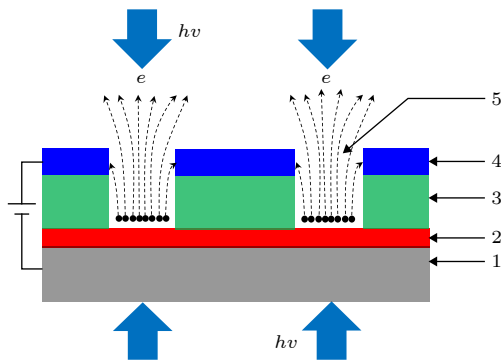


图 1 真空沟道结构光电阴极组件工作原理 (1 为负极, 2 为阴极, 3 为绝缘层, 4 为栅极, 5 为真空沟道)

Fig. 1. Working principle of photocathode with vacuum channel. Symbol 1, 2, 3, 4 and 5 are negative electrode, photocathode material, insulation, grid electrode and vacuum channel, respectively.

正极和负极,为光电阴极组件提供电场环境,降低阴极材料表面势垒,提高运动到阴极材料表面的光电子发射到真空的几率. 当阴极材料衬底对入射光具有较高的透过率时,光电阴极组件可工作于反射式和透射式两种模式,相反光电阴极组件则只能工作于反射式模式.

实验所用的光电阴极材料为 GaAs 衬底材料. 负极和栅极材料均为 Mo, 厚度分别为 150 和 250 nm. 绝缘层材料为  $Al_2O_3$ , 厚度为 150 nm. 为了便于光电阴极组件的制备和性能评估,组件中真空沟道结构设计为长方形,宽度为  $3\ \mu m$ ,长度为  $700\ \mu m$ . 为了提高阴极的发射电流,设计了阵列式真空沟道结构,沟道数量为 100. 真空沟道的中心间距为  $7\ \mu m$ ,即绝缘层和栅极的宽度为  $4\ \mu m$ ,因此阴极组件电子发射区域的尺寸为  $700\ \mu m \times 700\ \mu m$ ,即阴极的面积为  $0.0049\ cm^2$ .

首先使用丙酮和无水乙醇等对阴极材料进行清洗,去除阴极材料表面的污染物,提高阴极材料表面的覆膜效率和薄膜的均匀性. 真空沟道结构光电阴极组件制备工艺为使用电子束双向沉积设备依次在材料表面覆  $Al_2O_3$  (绝缘层) 和 Mo 金属膜 (栅极); 利用光刻技术在材料表面曝光出真空沟道结构; 再使用感应耦合反应离子体刻蚀设备对真空沟道中的 Mo 金属薄膜进行刻蚀; 最后使用氢氟酸和氟化铵混合溶液对  $Al_2O_3$  薄膜进行腐蚀,直至阴极材料暴露出来,此时阴极表面就获得了真空沟道结构. 使用扫描电子显微镜观察阴极组件的真空沟道结构,如图 2 所示.

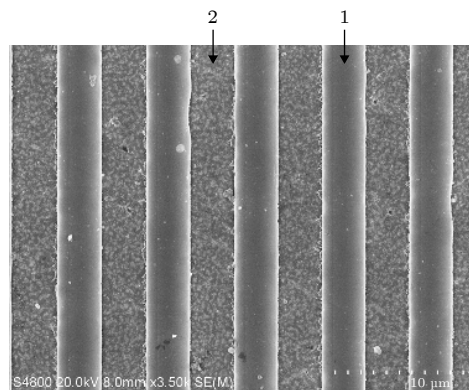


图 2 真空沟道结构显微形貌, 1 为阴极, 2 为栅极

Fig. 2. Surface microtopography of vacuum channel structure. Symbol 1 and 2 are photocathode material grid electrode, respectively.

对制备好的光电阴极组件进行装架, 其中 GaAs 衬底材料作为阴极组件的负极. 使用钼片作为栅极和负极的引线. 将阴极封装于玻壳内, 并在排气台上对阴极组件及玻壳进行除气. 玻壳除气温度为 250 °C, 阴极组件除气温度为 550 °C, 保持玻壳内真空度在  $10^{-6}$  Pa 量级. 待玻壳温度降为常温后将玻壳进行封离. 使用连续激光器对阴极的电子发射性能进行测试, 主要包括光束功率、工作温度对阴极发射电流的影响, 同时也开展了阴极组件寿命试验和贮存试验.

### 3 分析与讨论

刻蚀  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的方法主要分为物理刻蚀和化学腐蚀, 其中化学腐蚀方法为使用化学试剂与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  进行化学反应, 但是腐蚀时间需要严格控制, 腐蚀时间过短会导致  $\text{Al}_2\text{O}_3$  残留, 不能将阴极材料暴露于真空沟道中, 相反腐蚀时间过长则会腐蚀栅极薄膜下方的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 会造成栅极薄膜脱落或栅极薄膜与阴极材料短路. 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的物理刻蚀方法主要为离子刻蚀, 刻蚀过程中不会对栅极下方的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜造成损伤, 但是同样会刻蚀 Mo 金属膜, 影响栅极薄膜的质量. 为此实验中选择了使用化学方法来去除真空沟道中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 并采用分步腐蚀. 光电阴极组件在氢氟酸和氟化铵混合溶液中每腐蚀 30 s, 对真空沟道内  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的残余量进行一次观察. 从图 2 中可看出, 虽然真空沟道内有少部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  残留, 但是真空沟道边缘较为完整平滑. 进一步进行化学腐蚀时, 将会腐蚀栅极薄膜下方的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 对组件结构造成损伤.

使用 532 nm 连续激光器对光电阴极的电子发射特性进行测试, 阴极组件在不同功率的激光光束照射下的直流发射特性如图 3 所示. 栅极电压为 25 V 时, 真空沟道内的最大电场强度为  $1.6 \times 10^6$  V/cm, 低于场发射阴极所需的电场强度, 降低了阴极组件中发生击穿和打火的概率. 随激光光束功率和阴极组件的工作电压增加, 阴极组件的发射电流均逐渐增大. 但是当激光功率较大时, 随着组件工作电压增大, 发射电流增长幅度逐渐变大. 激光功率为 1 和 5 W 时, 阴极组件的发射电流分别为 2.54 和 26.12 mA, 阴极发射电流密度分别为 0.52 和 5.33 A/cm<sup>2</sup>, 对应的光谱响应分别为 5.22 mA/W, 量子效率分别为 0.59% 和 1.22%.

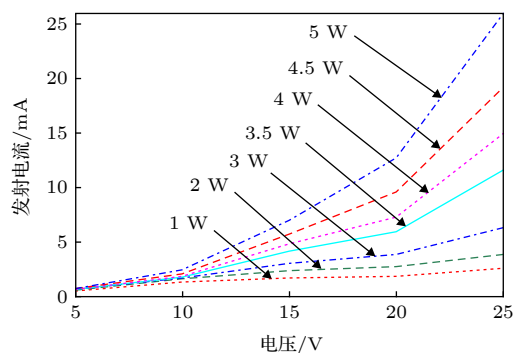


图 3 不同功率的激光光束照射下光电阴极组件的直流发射特性

Fig. 3. DC emission characteristics of photocathode module with different laser beam power.

在阴极电子发射特性测试过程中, 当激光光束照射到阴极组件上时, 阴极的发射电流并非直接到达一个相对稳定的数值, 而是随测试时间增加, 电流逐渐增大, 最终到达一个稳定值, 持续时间约为 20 min. 这是由于阴极材料为半导体材料, 激光光束的能量密度较大, 对阴极组件具有一定的加热作用. 随着 GaAs 晶体温度增加, 晶体内的载流子浓度增大, 其电导率也相应地增大, 提高了负极对阴极材料内电子的补充效率, 此时负极对真空沟道附近区域的补充电流逐渐增大. 另外, 随着 GaAs 晶体材料内电流增加, 电子与晶格碰撞的次数也大幅度增大, 因碰撞而损失的能量将转化为晶体的内能, 进一步提高阴极的温度. 所以才出现了光束功率和阴极组件工作电压越高, 阴极的发射电流就越大这一现象.

为了验证温度对阴极性能的影响, 分别测试了不同温度条件下阴极电子发射特性. 测试过程中, 激光光束功率为 3 W, 波长为 532 nm, 阴极组件的温度分别为室温、200 °C 和 400 °C, 测试结果如图 4 所示. 测试过程中, 随着阴极组件温度升高, 阴极发射电流到达稳定值所需时间逐渐增大. 为了避免测试电流过大对阴极组件造成损伤, 三次测试的最大电流和电压分别为 27.49 mA@40 V, 78.22 mA@35 V 和 89.69 mA@26 V. 由此可知, 工作温度对光电阴极组件的电子发射特性存在较大程度的影响, 光电阴极组件发射连续电子束时需要对阴极组件的工作温度进行适当控制. 同时提高阴极工作温度也成了提高光电阴极组件电子发射电流的有效途径.

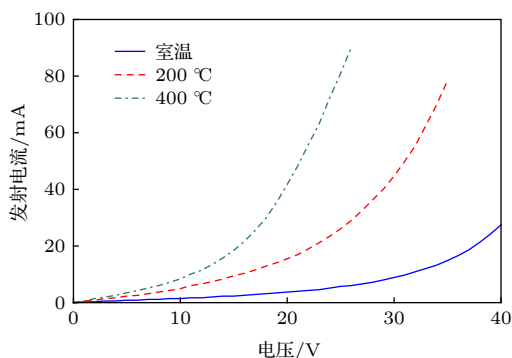


图 4 不同温度条件下光电阴极组件的直流发射特性  
Fig. 4. DC emission characteristics of photocathode module with different temperature.

实验中所用的光电阴极材料为 GaAs 衬底材料, 入射光可被衬底材料完全吸收, 除发射到真空的电子所携带的小部分能量外, 大部分能量转化为材料的内能. 即光电阴极工作过程中, 只有距阴极表面的距离小于电子扩散长度的光激发电子才能运动到阴极材料表面, 参与阴极电子发射. 而距阴极表面距离大于电子扩散长度的电子最终将跃迁至导带, 而无法参与阴极电子发射, 其能量也会转化为阴极的内能.

在强光照条件下, 光电阴极材料的最优厚度完全依赖于阴极材料的电子扩散长度. 当光电阴极材料为薄膜材料且衬底为透光率较高的材料时, 光电转换过程仅存在于阴极薄膜内, 衬底材料将不再是热源, 阴极组件的热量传导方向为自阴极薄膜向衬底方向. 在此条件下, 阴极薄膜的温度可迅速达到平衡状态, 也使阴极的发射电流在短时间内达到稳定状态.

真空沟道结构 GaAs 光电阴极组件结构与传统 GaAs 光电阴极组件结构存在较大的差异, 传统光电阴极表面吸附着单层的 Cs/O 激活原子, 强光工作环境和离子轰击过程中, Cs 和 O 原子会迅速从阴极表面脱附, 导致阴极性能衰减. 而在真空沟道结构 GaAs 光电阴极组件中, 除部分阴极材料暴露于真空沟道外, 其他部分被  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Mo 金属层覆盖. 由于真空沟道结构占整个阴极组件面积的比例比较小, 所以离子轰击到阴极材料表面的几率也相应地会降低. 因此在阴极工作过程中, 大部分离子会轰击到 Mo 金属膜上, 对阴极材料起到一定的保护作用. 由于 GaAs 晶体表面不存在激活原子, 当部分离子轰击到 GaAs 晶体表面时, 不会造成阴极性能大幅度衰减. 即使部分 GaAs 晶体在离子轰

击作用下出现破损, 只要阴极组件中仍有足够厚度的 GaAs 晶体可吸收入射光, 阴极组件的性能就不会衰减.

为了研究光电阴极电子发射特性的稳定性, 开展了阴极寿命测试实验. 实验中连续激光光束功率为 3.5 W, 波长为 532 nm, 栅极电压为 15 V. 测试时间为 144 h, 测试结果如图 5 所示, 虽然测试过程中阴极发射电流出现波动, 但是发射电流并未出现衰减, 阴极发射电流基本保持在  $4.5 \pm 0.3$  mA. 造成阴极发射电流变化的主要原因是激光器长时间工作过程中光束功率稳定性变差, 光束功率范围为  $3.0 \pm 0.1$  W. 由此可推断, 如果激光器可提供功率稳定的光束, 真空沟道结构光电阴极就可以产生稳定的发射电流.

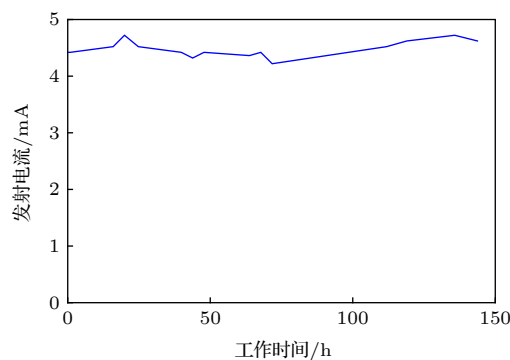


图 5 光电阴极组件寿命测试曲线  
Fig. 5. The lifetime test curve of photocathode module.

另外对光电阴极组件进行了贮存实验, 高温贮存温度为  $85\text{ }^\circ\text{C}$ , 时间为 48 h, 低温贮存温度为  $-55\text{ }^\circ\text{C}$ , 时间为 24 h. 在贮存期间阴极组件封装在玻壳中且为非工作状态, 实验前激光光束功率为 2.8 W, 电源电压为 15 V 时, 阴极的发射电流为 5.50 mA. 经高温和低温贮存后, 相同测试条件下阴极的发射电流分别为 5.63 和 5.68 mA. 虽然在贮存实验前后阴极发射电流出现变化, 但是发射电流并未出现衰减的现象.

上述实验所用阴极组件的真空沟道为  $1 \times 100$  的阵列式结构, 单个真空沟道的尺寸为  $700\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m} \times 0.4\text{ }\mu\text{m}$ , 使用 CST 对上述阴极组件的电子发射特性进行仿真模拟. 建立的仿真模型如图 6 所示, 绝缘层和栅极的厚度为  $0.4\text{ }\mu\text{m}$ , 阳极距阴极之间的距离为  $30\text{ }\mu\text{m}$ . 栅极和阳极电压分别为 100 和 1000 V. 阴极组件发射电子束中横向截面电子分布如图 7 所示, 由于阴极组件发射的电子均源

于真空沟道区域,所以阴极发射的电子束形状与真空沟道结构形状相似.随距栅极距离增加,电子束中的电子将趋于均匀分布.由此可知,可通过改变真空沟道结构的方式,来获得不同形状的电子束,如圆形电子束、椭圆形电子束或带状电子束等.

栅极电压为 100 V 时,阴极材料表面电场强度的峰值达到  $2.5 \times 10^6$  V/cm,阴极组件的平均发射电流密度达到 21.3 A/cm<sup>2</sup>.将栅极电压增加至 150 V 时,阴极组件的平均发射电流密度可达到 65.7 A/cm<sup>2</sup>.通过计算仿真,栅极与绝缘层的总厚度  $h$  与真空沟道宽度  $l$  的比值为 0.5 时,阴极组件

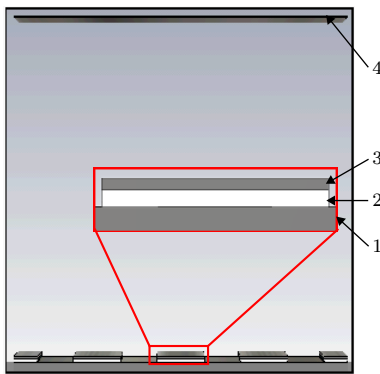


图 6 长方形真空沟道结构光电阴极仿真模型,1 为阴极材料,2 为绝缘层,3 为栅极,4 为阳极

Fig. 6. Simulation model of photocathode module with rectangular vacuum channel. Symbol 1, 2, 3 and 4 are photocathode material, insulation, grid electrode and positive electrode, respectively.

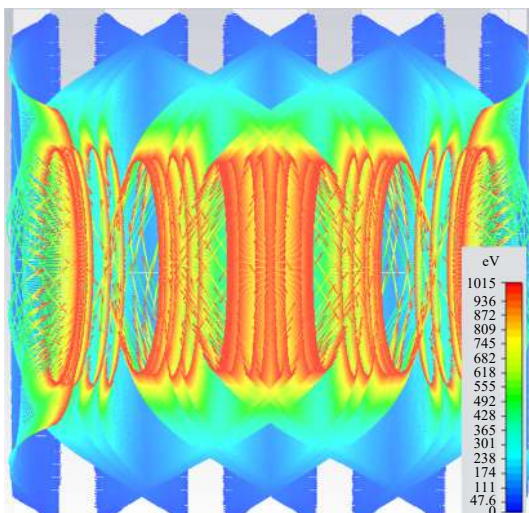


图 7 长方形真空沟道结构阴极组件电子束中横向截面电子分布

Fig. 7. Electronic distribution of lateral interface of photocathode module electron beam with rectangular vacuum channel.

的发射电流密度达到最大值,即栅极电压为 100 V 时,发射电流密度达到 115.9 A/cm<sup>2</sup>.当  $h/l$  值远小于 0.5 时,真空沟道中心位置的电场强度最低,此时在阴极材料表面仅在靠近真空沟道边缘的区域才存在电子发射,如图 7 所示.随  $h/l$  值逐渐增大,真空沟道中心位置的电场强度逐渐增强,阴极材料表面参与电子发射的区域面积逐渐增大,阴极的电子发射能力也相应地逐渐增强.但是当  $h/l$  值大于 0.5 时,真空沟道结构对栅极所提供的电场产生了屏蔽作用,其影响最严重的区域为阴极材料表面靠近真空沟道边缘的位置.随  $h/l$  值增加,其影响区域逐渐向真空沟道的中心位置扩大.当  $h/l$  值约为 2 时,阴极组件几乎丧失电子发射能

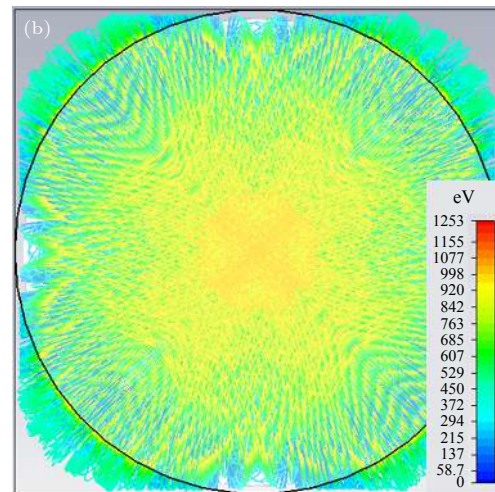
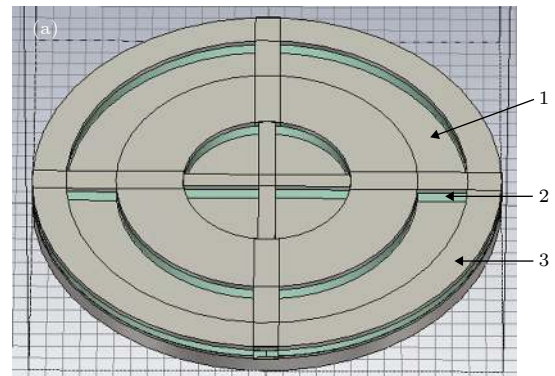


图 8 圆形真空沟道结构阴极组件电子发射特性仿真 (a) 结构模型; (b) 横向截面中电子分布,1 为阴极材料,2 为绝缘层,3 为栅极

Fig. 8. Simulation of electronic emission characteristics of photocathode module with circular vacuum channel: (a) Structure model; (b) electronic distribution of lateral interface. Symbol 1, 2 and 3 are photocathode material, insulation, and grid electrode, respectively.

力. 因此,  $h/l$  值和栅极电压均影响着阴极组件的电子发射能力, 优化阴极组件的真空沟道结构参数和工作条件可有效提高阴极组件的电子发射能力.

目前常用的真空器件中电子束的形状为圆形, 为此使用仿真软件建立的圆形真空沟道结构的光电阴极组件, 对其发射电子束的形状进行仿真, 如图 8(a) 所示. 其中绝缘层和栅极的厚度分别为 150 和 250 nm, 中心部分圆形沟道区域直径为 5  $\mu\text{m}$ , 栅极宽度为 1  $\mu\text{m}$ , 外部环形沟道内径为 9  $\mu\text{m}$ , 外径为 12  $\mu\text{m}$ . 阳极距阴极之间的距离为 30  $\mu\text{m}$ . 计算过程中栅极电压为 100 V, 阳极电压为 1000 V, 计算结果如图 8(b). 由于连接中心圆形沟道和外部沟道的栅极所覆盖的位置未产生电子发射, 所以在电子束中电子的分布呈近似圆形分布. 为了完善阴极发射电子束的形状, 光电阴极真空沟道结构可采用场发射阴极的独立式圆形沟道结构进行设计. 然后根据所需的电子束形状, 对独立式圆形沟道的阵列结构进行合理调整, 即可获得电子分布较为均匀的电子束.

## 4 结 论

本文设计了真空沟道结构的光电阴极组件, 并通过镀膜和刻蚀工艺制备了光电阴极组件, 并对阴极组件的电子发射特性进行了测试. 测试结果显示真空沟道结构光电阴极可在强光照条件下正常工作, 随入射光功率增加, 阴极的发射电流密度逐渐增加, 其发射电流达到了毫安量级. 通过阴极组件温度试验可知, 阴极组件温度较大程度上影响着阴极的电子发射特性, 随阴极工作温度增加, 阴极发射电流密度出现大幅度增长. 通过阴极组件电子发射寿命试验和高低温贮存试验可知, 真空沟道结构的光电阴极组件具有较为稳定的电子发射特性和环境适应性. 使用 CST 仿真软件对真空沟道结构阴极组件的电子发射特性进行了仿真, 结果显示可通过调节真空沟道结构来改变阴极组件发射电子

束形状. 真空沟道结构的光电阴极发射电流可满足部分太赫兹真空器件对阴极发射束流的要求, 可为太赫兹真空器件及大科学装置中电子源设计提供参考.

## 参考文献

- [1] Han J W, Oh J S, Meyyappan M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 213505
- [2] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97
- [3] Feng J J, Ren D P, Li H Y, Tang Y, Xing J Y 2011 *Terahertz Sci. Technol.* **4** 164
- [4] Stepanov A G, Hebling J, Kuhl J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3000
- [5] Liu J F, Zhou Q L, Zhang C L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 241911
- [6] Kim J, Kim J, Oh H, Meyyappan M, Han J W, Lee J S 2016 *J. Vac. Sci. Technol. B* **34** 042201
- [7] Miao J S, Zhang S M, Cai L, Scherr M, Wang C 2015 *Nano* **9** 9236
- [8] Kim M, Kim H K 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 104504
- [9] Gilad D, Er ez, Le eo 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 262903
- [10] Zhao J, Chang B K, Xiong Y J, Zhang J J, Zhang Y J 2012 *Opt. Commun.* **285** 589
- [11] Zhang Y J, Niu J, Zhao J, Zou J J, Chang B K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 067301 (in Chinese) [张益军, 牛军, 赵静, 邹继军, 常本康 2011 物理学报 **60** 067301]
- [12] Wang X H, Chang B K, Ren L, Gao P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 082109
- [13] Zhang Y J, Zou J J, Niu J, Zhao J, Chang B K 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063113
- [14] Hao G H, Yang M Z, Chang B K, Chen X L, Zhang J J, Fu X Q 2013 *Appl. Opt.* **52** 5671
- [15] Zou J J, Zhang Y J, Yang Z, Chang B K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017902 (in Chinese) [邹继军, 张益军, 杨智, 常本康 2011 物理学报 **60** 017902]
- [16] Takuya H, Lothar M, Andreas L, Peter D, Peter H 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 051109
- [17] Gys T 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **787** 254
- [18] Chao Y C, Hu M C, Tsai W W, Zan H W, Meng H F, Tsai H K, Horng S F 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 223307
- [19] Liu W H, Zhang Y X, Hu M, Zhou J, Liu S G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 127901 (in Chinese) [刘维浩, 张雅鑫, 胡旻, 周俊, 刘盛纲 2012 物理学报 **61** 127901]
- [20] Hsu S H, Kang W P, Wisitsora-at A, Davidson J L 2012 *Diamond Relat. Mater.* **22** 142
- [21] Hsu S H, Kang W P, Raina S, Howell M 2017 *J. Vac. Sci. Technol. B* **35** 032201

# The electron emission characteristics of GaAs photocathode with vacuum-channel structure\*

Hao Guang-Hui<sup>†</sup> Han Pan-Yang Li Xing-Hui Li Ze-Peng Gao Yu-Juan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics,

Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

(Received 15 December 2019; revised manuscript received 9 March 2020)

## Abstract

The photocathode was an ideal electronic source with fast response, centralized distribution of electronic capabilities, and many other advantages. But for its low emission current density and short lifetime at ion bombardment environment, it will not be used in power devices and large scientific devices. Although the emission current of the photocathode can be increased with the aid of electric field, it was not reach the milliampererevel. In the field emission cathode, the strong electric field can effectively reduce the surface barrier of the emitter, so that the cathode produces electron emission. Based on the photoelectric conversion mechanism of photocathode and the electron emission theory of field emission cathode, a vacuum channel structure photocathode module is designed. The cathode modules with GaAs substrate were fabricated by the peritoneal and etching process. The parameters of vacuum channel were  $3\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$ , and its array structure was  $1 \times 100$ . The deep of the vacuum channels were 400 nm. It can be seen from the test result, the emission current of the photocathode was 26.12 mA with the laser beam power 5 W, and its emission current density was  $5.33\ \text{A}/\text{cm}^2$ . During cathode operation, the laser beam and emission will cause the temperature of the photocathode material to rise, and this could increasing the conductivity of the GaAs, the efficiency of electron supplement from negative electrode to electron emission area of the GaAs will also be improving. Its emission current could reach 89.69 mA at 400 °C. Because there is no active atom on the photocathode surface, its lifetime was longer than the traditional photocathode that activated by Cs/O. The life test of the photocathode modules was carried out, its emission current was  $4.5\ \text{mA} \pm 0.3\ \text{mA}$  within the 144 h, and its performance was not attenuate significantly. The vacuum channel was the main area of the photocathode electron emission, and the shape of electron beam can be easily obtained by adjusting the structure of the vacuum channel parameters. This advantage can improve the applicability of high current density photocathode in vacuum electronic devices and equipment.

**Keywords:** photocathode, current density, vacuum channel, lifetime

**PACS:** 85.60.Ha, 79.70.+q, 85.45.-w

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191893

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61601420, 61971386).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hghgh@126.com](mailto:hghgh@126.com)