

文章编号: 1000-7032(2025)06-0981-14

氧化锌纳米冷阴极及其 X 射线源应用

陈毅聪^{1,2}, 陈 军^{1*}

(1. 中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510275;

2. 广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 氧化锌纳米冷阴极兼具优良的场发射特性、稳定的化学性质和易于低成本大面积制备等特点, 在大面积冷阴极电子源器件上有重要应用。经过多年的研究, 关于氧化锌纳米冷阴极的场发射机制、性能调控、电子源器件应用等工作都相继被报道。要进一步推进氧化锌纳米冷阴极的实际应用, 有必要对其发展现状及挑战进行总结。本文将大面积冷阴极电子源器件的性能需求为出发点, 从场发射特性调控、栅极结构与制备以及 X 射线源器件应用探索三个方面总结氧化锌纳米冷阴极研究进展, 最后展望了未来研究趋势及挑战。

关键词: 氧化锌纳米线; 冷阴极; 平板电子源; 平板 X 射线源

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240306

CSTR: 32170.14. CJL.20240306

ZnO Nanowire Cold Cathode and Its Application in X-ray Sources

CHEN Yicong^{1,2}, CHEN Jun^{1*}

(1. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding Author, E-mail: stscjun@mail.sysu.edu.cn

Abstract: Due to its excellent field emission properties, stable chemical properties, and ease of low-cost large-area preparation, zinc oxide nanowire has important applications in large-area cold cathode electron source devices. Many works on the field emission mechanism, performance modulation, and electron source device applications of ZnO nanowire cold cathodes have been reported in the past decades. To further advance the practical applications of ZnO nanowire cold cathodes, it is necessary to summarize the current status and challenges of their development. In this paper, we review the progress of ZnO nanowire cold cathode in aspects of field emission property, gate structure design and fabrication, and the X-ray source application, from the point of view of the performance requirements of large-area cold cathode electron source. Finally, a perspective on future research trends and challenges is given.

Key words: ZnO nanowire; cold cathode; flat panel electron source; flat panel X-ray source

1 引 言

与传统点电子源相比, 大面积冷阴极阵列电子源是一种由大量点电子源阵列构成的面电子源。在原理上, 它能够通过寻址开关控制不同区域发射电子, 从而实现如平板显示器^[1-5]、平板光源^[6-9]、平板可寻址 X 射线源及其静态 CT 成像^[10-12]、

并行电子束曝光^[13-16]、平板探测器^[17-19]等应用。电子发射均匀性是评价大面积冷阴极阵列电子源最重要的性能指标之一, 其与冷阴极阵列的形貌、表面功函数及电学输运性质的一致性有关。如何实现高发射均匀性的冷阴极阵列一直是大面积冷阴极阵列电子源器件研究的重要挑战之一。

氧化锌纳米冷阴极被认为是目前实现大面积

收稿日期: 2025-02-25; 修订日期: 2025-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1204200)

Supported by National Key R&D Program of China (2022YFA1204200)

冷阴极阵列电子源的重要冷阴极材料之一^[20]。其原因主要有两点:一是已发展出大面积均匀的氧化锌纳米线阵列的可控制备方法,这保证了氧化锌纳米冷阴极阵列形貌上的高度一致性;二是与氧化锌纳米线的半导体特性有关。与 Spindt 型冷阴极^[21-23]和碳纳米管^[24-28]等金属发射体不同,氧化锌具有较大的电阻,使得其在发射时具有自限流效应,即发射电流引起的纳米线的自身压降起到调节电流的作用。由于冷阴极的表面功函数容易受表面吸附气体的影响^[29],自限流效应的存在可以大幅提高氧化锌纳米冷阴极的电流稳定性和发射均匀性。因此,尽管单根氧化锌纳米线的发射电流一般不超过 $1\ \mu\text{A}$,但其阵列在 $10\ \text{cm}^2$ 以上的平板电子源中的发射电流密度和总发射电流分别可以达到 $\sim 1\ \text{mA}/\text{cm}^2$ 和 $10\ \text{mA}$ 以上,从而在大面积平板电子源中具有重要应用前景。

氧化锌纳米冷阴极的研究大致可分为三个方面。第一方面是对氧化锌纳米冷阴极场发射特性的研究。自氧化锌纳米冷阴极被研究以来^[30-32],早期的大量工作均主要集中在如何通过调控纳米线的形貌^[33-45]、表面功函数^[46-55]和电学输运特性^[56-70]来提高其场发射特性的研究上。其中,由于纳米线的电导与其场发射电流呈正相关关系^[71],研究人员通常会通过提高电导来研制高性能氧化锌纳米冷阴极。然而,进一步的研究发现,适当的电导所引入的自限流效应有助于提高冷阴极的稳定性和发射均匀性。如何平衡自限流效应对稳定性、均匀性、发射电流等多个方面的影响,是当前该方面研究的重要课题之一。第二方面是对带栅结构氧化锌纳米冷阴极电子源的研究。对于大面积器件

而言,通常需要采用点阵图案的纳米线阵列来避免屏蔽效应。如何设计更高效的点阵结构以及对应的栅极结构,使得栅极电场能够作用到更多的纳米线上,从而获得高跨导的栅控,是该方面研究的核心。第三方面则是大面积氧化锌纳米冷阴极电子源器件应用方面的研究。针对不同应用需求,冷阴极电子源需要匹配器件规格和工作条件。在前两方面的研究基础上,如何设计并制备满足应用要求的大面积氧化锌纳米冷阴极电子源器件是这方面研究的主要内容。

尽管目前已有不少关于氧化锌纳米冷阴极的文献综述,但是这些综述主要聚焦在其材料制备^[72-73]和场发射特性^[20]上。因此,本文将从大面积氧化锌纳米冷阴极电子源器件应用的角度出发,分别对上述三个方面的研究进展进行介绍,最后给出对存在的挑战及未来研究趋势的展望。

2 场发射特性

对氧化锌纳米线场发射特性的研究始于 Lee 等^[32]和 Wan 等^[30]的工作。在研究初期,人们主要关注其开启电场、发射电流密度、最大电流、稳定性等特性。随着对氧化锌纳米冷阴极在大面积平板电子源的应用定位越来越清晰,人们也开始关注其大面积场发射特性以及发射均匀性。表 1 列举了近年来不同阴极面积的氧化锌纳米冷阴极的场发射特性研究现状。对于场发射的均匀性,一般采用发射面积率均匀性或灰度均匀性指数来进行评价。本研究组的结果表明,得益于氧化锌纳米冷阴极的自限流效应,其均匀性指数可达 85% 以上,满足大面积真空微电子器件(如平板 X 射线源)应用要求。如果进一步结合驱动电路补偿和

表 1 不同尺寸氧化锌纳米冷阴极的场发射特性

Tab. 1 Field emission characteristics of ZnO nano cold cathode with different size

冷阴极材料	阴极面积/ cm^2	开启电场/ $(\text{MV} \cdot \text{m}^{-1})$	最大发射电流/ mA	发射电流密度/ $(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
掺镓 ZnO 纳米线 ^[58]	~ 0.001	$\sim 4\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 0.09	90
石墨烯/ZnO 纳米线 ^[50]	0.15	$5.4\ (1\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 0.07	~ 0.5
ZnO 纳米线 ^[32]	1	$6\ (0.1\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 0.4	~ 1
ZnO 纳米线 ^[74]	1	$1.6\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	1	1
ZnO 纳米线 ^[75]	20.25	$5.7\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	1	~ 0.3
ZnO 纳米线 ^[76]	22.1	$\sim 6\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	12.9	0.58
ZnO 纳米线 ^[77]	23.04	$\sim 5\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	3.16	~ 0.4
ZnO 纳米线 ^[78]	36	$6.21\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 2.1	~ 0.5
ZnO 纳米线 ^[79]	36	$4.5\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 2	~ 0.5
掺铟 ZnO 纳米线 ^[80]	23.04	$7.1\ (10\ \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	~ 20	~ 1

成像校正方法,可完全满足X射线成像等应用。已有文献综述对纳米冷阴极的形貌、功函数和电学输运特性对其场发射特性的影响进行了详细介绍^[20],本文主要从平板冷阴极阵列器件的角度,介绍氧化锌纳米冷阴极在阵列结构优化和电学输运调控的研究进展。

2.1 阵列结构

纳米线阵列薄膜在平板电场中存在电场屏蔽效应,从而影响其开启电场和发射电流。对纳米线薄膜进行图案化是解决该问题的主要途径。对于

单个点阵而言,其内部的纳米线同样存在电场屏蔽效应。为此,有研究提出了使用环形结构的点阵图案来增加边缘位置的纳米线数量,从而获得更高的发射电流及更低的开启电场^[81]。此外,通过缩小点阵面积同样可以减少点阵内部的纳米线数量,从而增加边缘纳米线的比例。研究发现,当点阵尺寸缩小到直径为5 μm 的圆形图案时,纳米线的生长由于受锌源数量的减少而开始受到影响。进一步的研究发现,在该点阵结构下,其模拟和实验测量的最优点阵间距分别为20 μm 和25 μm (见图1)^[76]。

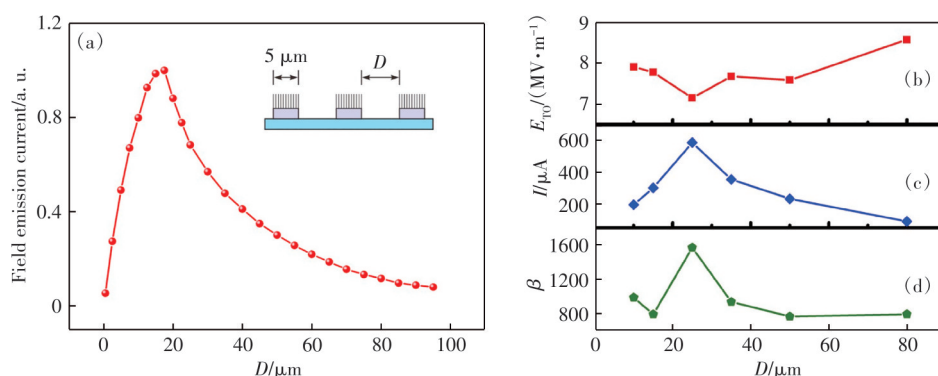


图1 不同点阵间距的氧化锌纳米冷阴极的场发射特性对比。(a)场发射电流模拟结果;(b)~(d)实验测量的开启电场、发射电流和场增强因子对比^[76]

Fig. 1 Comparison of ZnO nano cold cathode field emission characteristics with different pattern space. (a)Simulation result on field emission current. (b)~(d)Experimental result on turn-on field, field emission current and field enhancement factor^[76]

2.2 电学输运

通常来说,纳米线冷阴极的电导越高,其发射电流越大,开启电场越低。然而,研究表明氧化锌纳米冷阴极遵从场致热电子发射机制^[82-83]。拥有更低电导的氧化锌纳米线由于能产生更高能量的场致热电子,因而其开启电场更低。然而,当发射电流增大到一定程度后,自限流效应成为制约其发射电流的主要因素,从而导致低电导纳米线的饱和发射电流更低。该原理示意图如图2(a)所示,其中区域I和II分别对应场致热电子和自限流效应起主导作用的区域。为了获得稳定的发射电流,纳米线一般需要工作在自限流限制的区域。自限流效应的存在会引起纳米线自发热,使得其温度上升,发射电流增加。通常来说,发射电流的增加会正反馈于纳米线所产生的焦耳热,使得其温度进一步上升,进而热失控。然而,由于氧化锌电阻随温度上升而下降,其焦耳热的增量会受到抑制,使得纳米线能够在一定温度下稳定工作。因此,如何合理利用自限流效应是进一步提

高氧化锌纳米冷阴极场发射电流的重要方向。

结合氧化锌纳米线环形场发射像的亮度分布实验结果和数值仿真,可推算出氧化锌纳米冷阴极能够稳定工作在900 K下^[84]。其仿真结果如图2(c)、(d)所示,可以看到电导更低的纳米线虽然有更高的最大发射电流,但是其会在更低的电场下发生热失控从而击穿。由于纳米线阵列不可避免地存在几何形貌和电学特性上的差异,即使在相同工作电压下,其表面电场和击穿电场都有所不同。要获得好的发射均匀性,就需要纳米线能够承受更高的击穿电场,使其能够稳定工作在自限流区域。仿真结果表明,在增加杂质浓度(N_d)的同时提高杂质激活能(E_d),能够兼顾击穿电场与发射电流两方面的提高。其中,激活能(E_d)增加虽然降低了电导,但是能够提高热失控的临界温度,提高纳米线的击穿电场。热氧化制备的氧化锌纳米线天生具备氧空位杂质。通过变温电学特性测试,可以拟合出其杂质激活能约为0.23 eV,满足上述高激活能的条件。这使得该方

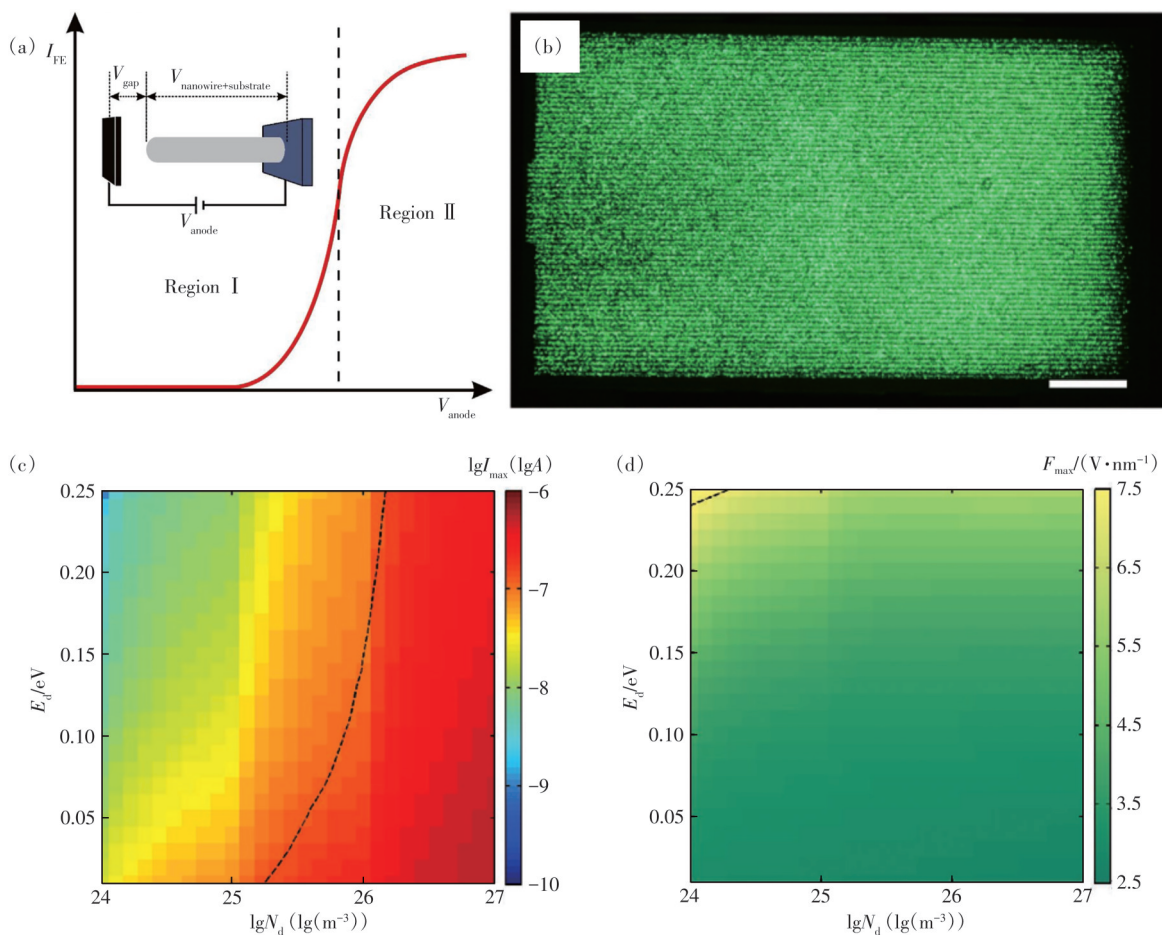


图2 电学运输对氧化锌纳米冷阴极场发射特性的影响。(a)自限流效应示意图;(b)氧化锌纳米冷阴极场发射像;(c)最大发射电流与电学特性的仿真关系;(d)击穿电场与电学特性的仿真关系^[82,84]

Fig. 2 Influence of electric transport on field emission characteristics of ZnO nano cold cathode. (a)Schematic diagram of self-heating effect. (b)Field emission pattern of ZnO nano cold cathode. (c)Simulated relationship between maximum current and electrical properties. (d)Simulated relationship between breakdown field and electrical properties^[82,84]

法制备的氧化锌纳米冷阴极易于实现大面积均匀发射,其典型场发射像如图2(b)所示。除了调控氧空位杂质之外,对氧化锌纳米冷阴极进行其他元素(如铜^[80])的掺杂工作也有报道。然而,关于这些掺杂纳米线的电学特性仍缺少深入研究,其对纳米线自限流及自发热现象的影响还需要进一步探究。

3 栅极结构

栅极结构是大面积冷阴极电子源实现寻址功能的重要途径。尽管集成有源控制器件(如晶体管)也能够实现器件的开关功能^[85-87],但栅极结构的氧化锌纳米冷阴极是目前实现其大面积寻址发射的主要途径。下面介绍氧化锌纳米冷阴极栅极结构的研究进展。

根据栅极和阴极的位置关系,冷阴极栅极结

构可以分为顶栅(栅极位于阴极上方)、平栅(栅极与阴极在同一平面)和背栅(栅极位于阴极下方)三类。一般来说,在顶栅结构的制备中通常需要刻蚀绝缘层到阴极表面,这不利于氧化锌纳米线的生长,因此目前未有相关报道。第一个实现行列寻址功能的带栅结构氧化锌纳米冷阴极是基于平栅和背栅相结合的插指栅极结构^[78],其形貌和结构示意图如图3(a)、(b)所示。之所以采用平栅与背栅相结合的结构,是因为栅极电极必须与阴极电极相交排列才能实现行列寻址功能。相较于顶栅电极,背栅电极能够减少阴极电极表面所受到的微加工工艺的影响,更有利于氧化锌纳米线的生长。而平栅结构则能更好地控制点阵中纳米线的电子发射。由于在该结构中,每个点阵只有一侧的纳米线是靠近栅极的,因此,在后续的改进结构中^[88],相邻栅极之间的冷阴极点阵从两列

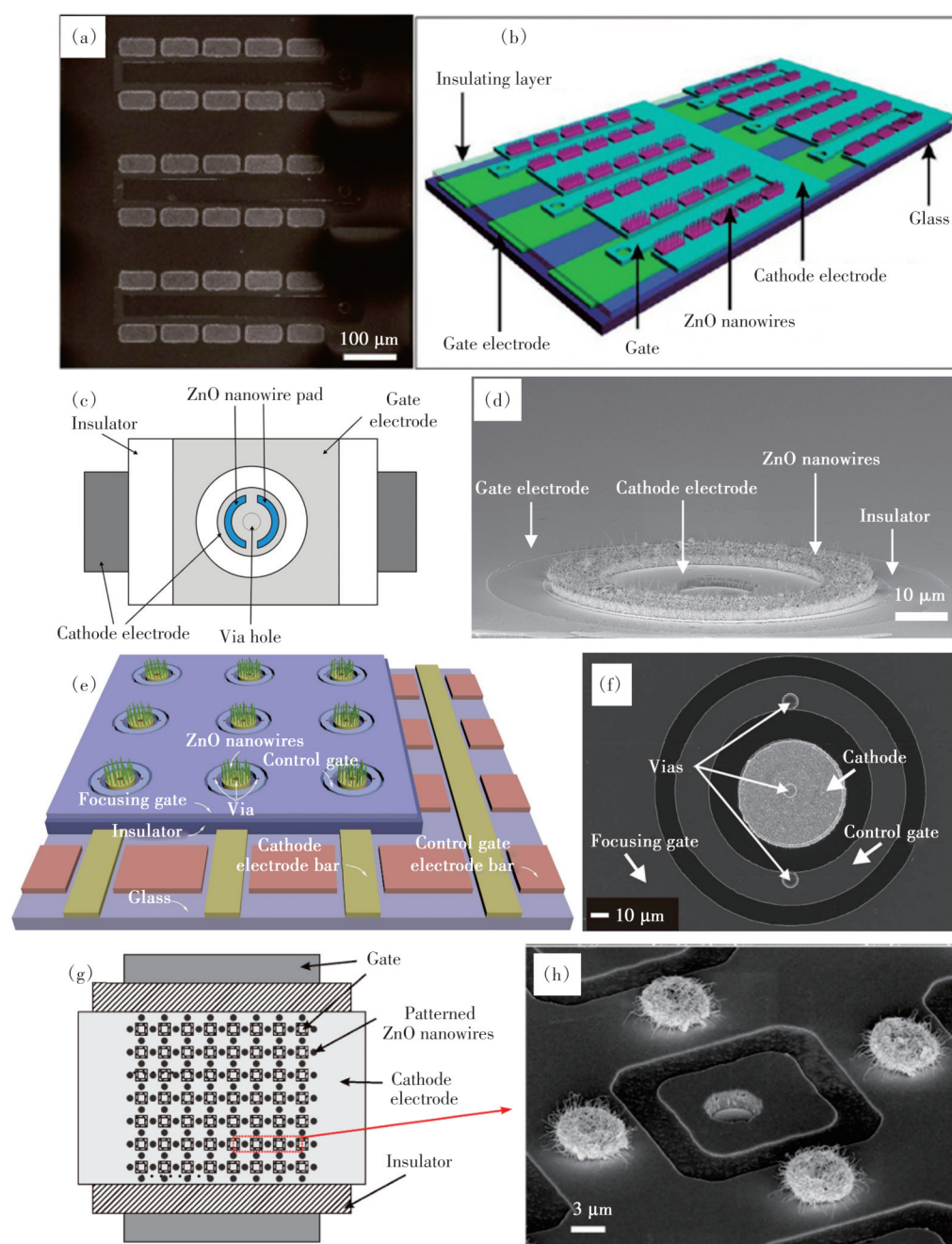


图 3 氧化锌纳米冷阴极阵列栅极结构。(a)~(b)插指栅极结构;(c)~(d)共面栅极结构;(e)~(f)共轴栅极结构;(g)~(h)密集点阵栅极结构^[78, 89-90, 93]

Fig. 3 Gated structure of ZnO nano cold cathode. (a)–(b)Insert fingers gated structure. (c)–(d)Coplanar-gated structure. (e)–(f)Coaxis-gated structure. (g)–(h)Multi-micro size pattern gated structure^[78, 89-90, 93]

减少到一行,从而使栅极能够控制点阵两侧的纳米线。插指栅极结构的制备流程如下:首先制备背栅电极和绝缘层,然后对绝缘层进行刻蚀开孔,接着先后制备平栅与阴极电极、锌薄膜图形点阵,最后热氧化生长氧化锌纳米线。详细工艺步骤可参考文献[78]。

考虑到插指结构中相邻点阵之间的纳米线难以被栅极控制,进一步提出了共面栅极结构^[89],其

结构示意图和形貌如图 3(c)、(d)所示。共面栅极也是一种结合平栅和背栅的栅极结构。其与插指结构的主要区别在于每一像素为一个圆形点阵,并且为了减少电场屏蔽效应,点阵图案可设计为环形结构。此外,共面栅极结构还可以进一步加入聚焦结构,从而实现对电子束的聚焦功能^[90-92]。这一结构又被称为共轴栅极结构,其结构示意图与 SEM 照片如图 3(e)、(f)所示。该结构以

阴极点阵的中心为对称轴,环形栅极位于阴极点阵外,而聚焦极则位于最外层。共面/共轴栅极结构的制备流程与插指栅极结构的相似,其主要差异在于共轴结构的栅极底电极与背栅电极需要同时制备。

由于栅极电场主要作用在点阵边缘的纳米线上,对于大点阵来说,栅极对其内部的纳米线控制作用较弱。为了提高冷阴极发射效率,研究人员提出了密集点阵栅极结构^[93],其结构示意图和 SEM 照片如图 3(g)、(h)所示。通过在相同像素面积内制备更多的点阵,并且在各个点阵之间制备平栅结构,可以使得更多的纳米线能够被栅极所控制。密集点阵栅极结构的制备流程与插指结构相似,其主要差异在于电极与点阵的设计图案。

在以上多种栅极结构中,共轴栅极结构由于能够集成聚焦极结构,并且拥有较好的栅控功能,因此是目前氧化锌纳米冷阴极主要使用的栅极结构。原理上,密集点阵结构应具有更好的栅控功能,然而,如何将聚焦极集成到该结构中仍有待研究。

除了栅控能力外,栅极结构的响应速度也是器件应用的一个重要参数^[94]。为了更好地进行器件结构设计,针对栅极结构 ZnO 纳米线冷阴极器件的电流-电压关系^[93, 95]和电流-时间关系^[96-98]建立了相应的器件模型。如何将各个模型整合并建立相应的自动化设计程序是未来设计高性能大面积 ZnO 纳米冷阴极电子源器件的关键。

4 X 射线源器件应用

大面积冷阴极电子源的研究最初源于要实现现场发射平板显示器以替代传统阴极射线管(CRT)显示器的愿景。然而,随着液晶显示器成为主流平板显示器技术,大面积冷阴极电子源的应用落在了平板 X 射线源上。平板 X 射线源由大面积冷阴极电子源和金属透射靶组成,实现了大量的微 X 射线源阵列的集成,具有可大面积寻址发射 X 射线特点。基于平板 X 射线源可实现结构紧凑的静态 CT,有望发展出下一代快速、低剂量、高分辨率静态 CT 成像技术。同时,基于冷阴极平板 X 射线源,进一步研发出面向术中放疗、相位衬度成像等应用新型冷阴极 X 射线源。ZnO 纳米冷阴极能以较低成本实现大面积均匀发射,并且拥有良好的电流密度和稳定性,是实现平板 X 射线源的重要阴极。目前器件总发射

电流可达十毫安以上,满足微焦斑成像和乳腺成像等应用要求。

图 4 总结了面向各种应用的 ZnO 纳米冷阴极 X 射线源的发展历程。最早的氧化锌平板 X 射线源是由氧化锌纳米冷阴极和金属透射靶组成的二极管结构^[75, 99-101]。在该结构基础上,采用条形电极寻址结构,可发展出二极管结构可寻址平板 X 射线源^[102]。由于该器件具有透射和反射两种 X 射线出射方式,可实现双面出光器件(图 4(a))^[77];得益于该种器件可以同时两个成像物体成像,其能应用于高通量的 X 射线工业无损检测。利用平板 X 射线源阳极热负载小的优势,采用透明 ITO 阳极靶可发展出光学透明的平板 X 射线源器件(图 4(b))^[103];该种器件可应用于光学 X 射线双模成像和新型可视化术中放疗。利用氧化锌纳米线可以在金属衬底上直接生长的特点,可以发展出任意形状发光的 X 射线源,我们称之为异形器件。例如,通过在球形衬底上直接制备 ZnO 纳米线冷阴极并与相应形状的阳极集成,研制出了半球形发射的 X 射线源(图 4(c))^[104];该种器件可以适配肿瘤瘤床形状,在术中放疗中有应用前景。在阳极结构上,通过制备周期结构的阳极靶,可获得在空间上周期性发射的 X 光,发展出可以用于相位衬度成像的结构光平板 X 射线源(图 4(d))^[105]。

另一方面,采用栅极结构 ZnO 纳米冷阴极电子源阵列,可发展出可寻址平板 X 射线源器件(图 4(e))^[106]。可寻址平板 X 射线源器件在下一代无需机械扫描的静态 CT 成像方面有重要应用前景。采用栅极结构 ZnO 纳米冷阴极电子源阵列和透明阳极,可发展出透明可寻址平板 X 射线源(图 4(f))^[107],可以实现可视化放疗的基础上,同时实现剂量、放疗区域的精确可调。进一步地,如果将可寻址 ZnO 纳米冷阴极电子源阵列制作在环形衬底上并集成环形透射靶阳极,可以发展出环形出光的可寻址 X 射线源器件(图 4(g))^[108],可以实现全角度扫描的静态全身 CT。同样地,结合栅极结构和周期结构的阳极靶,可实现可寻址的结构 X 光源(图 4(h)),从而可以发展出无需机械运动的相位衬度成像技术。上述两种器件目前尚在开发中。

下文具体介绍面向 X 射线静态 CT 成像、术中放疗、相位衬度成像三方面应用的平板 X 射线源的研究进展。

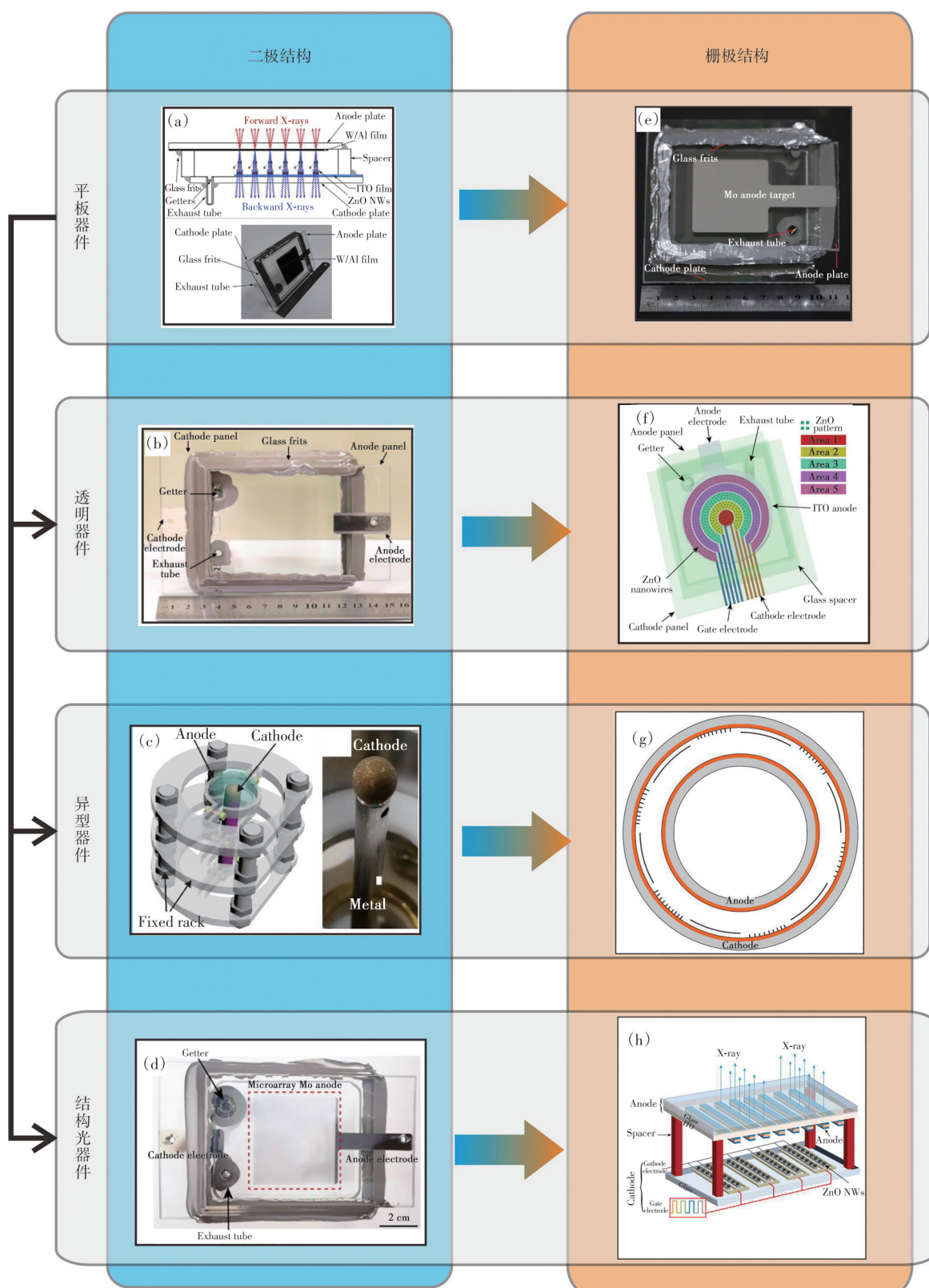


图4 氧化锌冷阴极X射线源发展历程示意图。(a)二极管平板器件;(b)透明二极管平板器件;(c)球形二极管结构器件;(d)周期阳极二极管结构器件;(e)可寻址发光平板器件;(f)光学透明的可寻址发光平板器件;(g)环形寻址器件示意图;(h)可寻址结构光器件示意图^[77,103-108]

Fig. 4 Development of ZnO cold cathode X-ray source. (a) Diode flat panel device. (b) Transparent diode flat panel device. (c) Hemispherical diode device. (d) Periodic anode diode device. (e) Addressable flat panel device. (f) Transparent addressable flat panel device. (g) Ring shaped addressable device. (h) Addressable structured ray device^[77,103-108]

4.1 面向静态 CT 成像的可寻址平板 X 射线源

传统医学 CT 成像需要 X 射线球管围绕人体进行高速旋转来获得多个角度的成像。机械转动限制了成像速度,另外,其带来的机械振动也会影响其分辨率。平板 X 射线源由于可通过栅极纳米冷阴极寻址开关实现不同区域的出光,因此不需要机械转动即可获得对物体不同角度的成像,从而实现

静态 CT 成像。我们于 2021 年报道了首个全封装的 ZnO 纳米冷阴极可寻址平板 X 射线源器件,图 5(a)、(b)分别展示了其器件结构示意图和对螺母与垫片的 X 射线成像图片。该器件由 160×160 阵列像素 X 射线源组成,器件实现了寻址发光功能并展示了其成像结果^[106]。近期,也报道了基于平板 X 射线源的静态 CT 方法并且进行了实验验证^[109]。

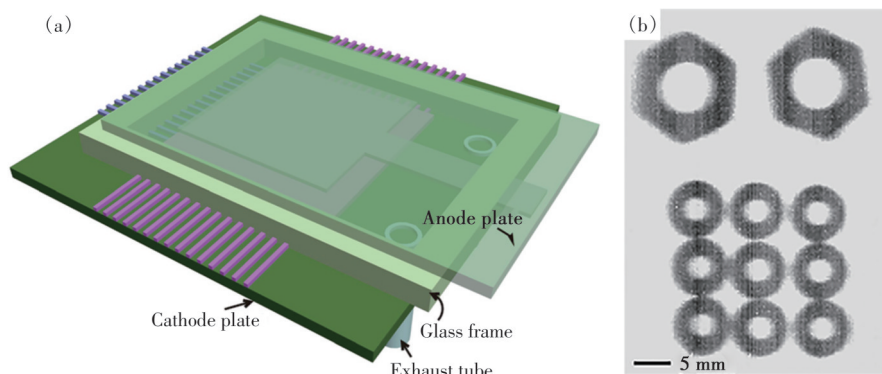


图 5 (a)可寻址 ZnO 纳米冷阴极平板 X 射线源结构示意图;(b)其对螺母和垫片的 X 射线成像图^[106]

Fig. 5 (a)Device structure of addressable ZnO nano cold cathode X-ray source. (b)X-ray projected images of nuts and stainless steel ring^[106]

4.2 面向术中放疗应用的平板和球形 X 射线源

X 射线术中放疗是治疗肿瘤的一种重要方法,平板 X 射线源在术中放疗同样具有应用前景。如果可以将平板 X 射线源做成透明器件,就可以直接透过器件对放疗位置进行光学定位,而区域寻址可以更精确地控制放疗的位置和剂量。我们利用 ZnO 纳米冷阴极的透明特点,结合采用透明阳极基板,研制出了首个透明平板 X 射线源,并实现了光学和 X 射线双模成像^[103]。图 6 是透明平板 X 射线源器件的结构示意图及其对芯片的 X 射线成像图。在此基础上,进一步研制出了透明的区

域寻址平板 X 射线源^[107]。该器件采用平栅结构实现了不同直径大小的圆形或环形区域的区域出光。为了获得高的透明度,器件阴极和阳极均采用 ITO 来制备。测试结果表明,器件在 $400 \sim 750$ nm 的可见光范围内的透射率在 $55\% \sim 78\%$ 之间,在 40 kV 阳极电压下获得 5.76 mGy/s 的剂量率,与 Mo 靶相当。该种器件在可视化引导的放疗具有重要的应用前景^[107]。此外,我们最近也报道了面向放疗应用的 ZnO 纳米冷阴极球形 X 射线源^[104]。采用球形黄铜衬底直接生长氧化锌纳米线,并与具有相应形状的阳极结合,制作出球形出光的 X 射线

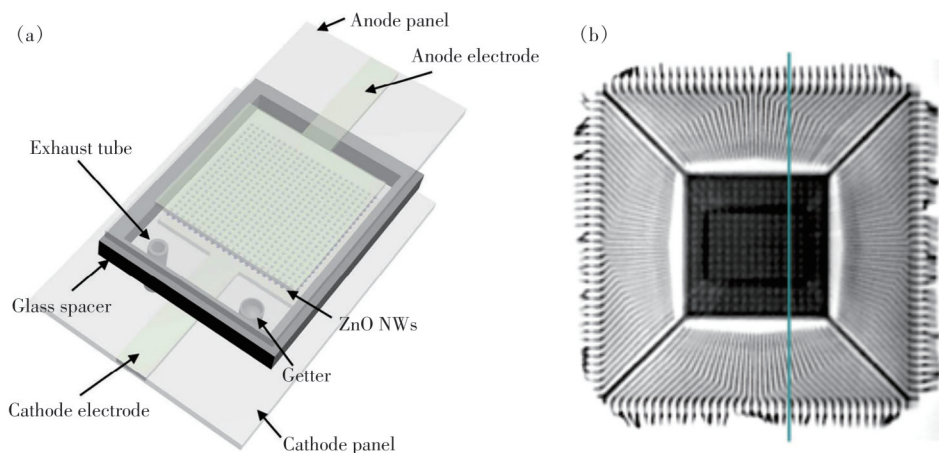


图 6 (a)透明平板 X 射线源器件示意图;(b)其对芯片的 X 射线成像图^[103]

Fig. 6 (a)Device structure of transparent X-ray source. (b)X-ray projected image of chip^[103]

源,其剂量率达到 $240\ \mu\text{Gy/s}$ 。

4.3 面向X射线相位衬度成像的结构光平板X射线源

X射线相位衬度成像的工作原理基于 Talbot-Lau 光栅干涉,能够解决传统X射线成像对低原子序数物质的成像能力低的问题。X射线相位衬度成像采用周期空间结构的X光,通常采用X射线源加束光光栅组成。采用平板X射线源可以简化光源的结构。我们采用氧化锌纳米冷阴极平板X射线源器件实现周期结构出光^[105]。器件结构示

意图如图7所示,采用周期排列的Mo微电极条作为阳极,当ZnO纳米冷阴极电子源中的电子轰击到阳极时,便能在阳极结构图案处出射X射线。在40 kV的工作电压下,该器件实现了 $428\ \text{mGy/s}$ 剂量率发光。图7(d)、(e)展示了该器件对PCB板和线对卡的X射线成像图片。更进一步,如果采用可寻址冷阴极,还可以进一步实现可寻址的结构光,有望实现无需机械运动的X射线相位衬度成像,这对于推进X射线相位衬度成像技术发展具有重要意义。

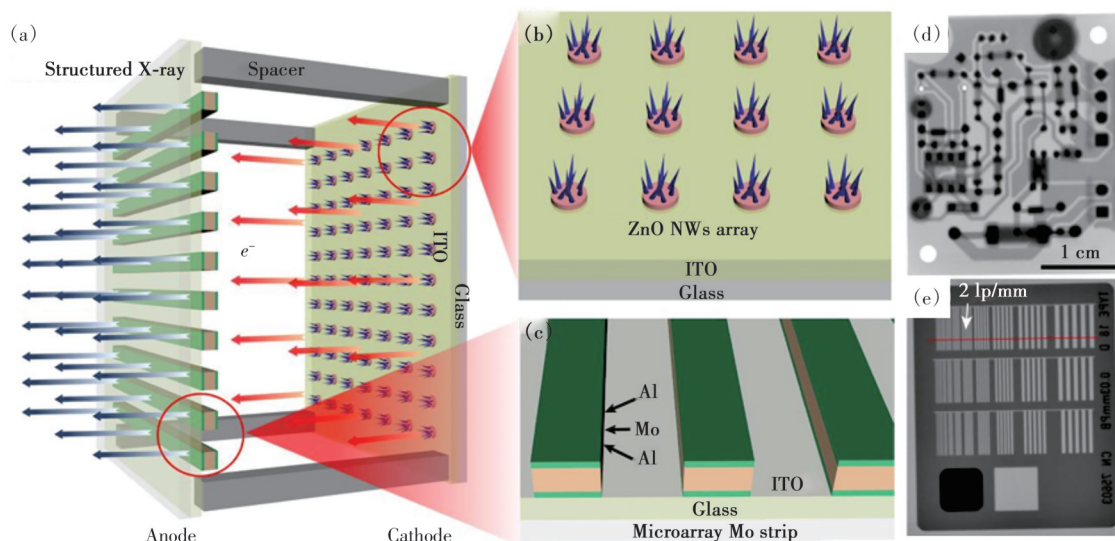


图7 周期结构阳极平板X射线源。(a)器件结构;(b)氧化锌纳米冷阴极;(c)阳极结构;(d)PCB板的X射线成像图片;(e)线对卡的X射线成像图片^[105]

Fig. 7 Periodic anode structure X-ray source. (a) Device structure. (b) ZnO nano cold cathode. (c) Anode structure. (d) X-ray image of PCB panel. (e) X-ray image of line pair^[105]

5 总结与展望

近年来,大面积氧化锌纳米冷阴极及其在平板X射线源的应用方面取得了重要进展。然而,要实现其应用,仍需要进一步提高其器件性能。我们认为可以从以下两个方面入手来提高器件的性能。一是精准调控纳米线的电学特性。根据前面的研究结果,杂质浓度与杂质激活能是影响纳米线自限流和自发热效应的主要因素。然而,目前对氧化锌纳米冷阴极的掺杂仍难以做到精准控制其浓度与激活能。二是设计更高效发射的栅极结构器件。文中提到密集点阵结构具有更多位于点阵边缘位置的纳米线,可以增加发射位置。然而,当前结构中的栅极并没有作用到密集点阵的所有边缘,使得其实际效果变差。结合密集点阵结构和共轴栅极结构可能是一种解决方案。

在X射线源器件应用方面,氧化锌纳米冷阴极平板X射线源实现了X射线源分立器件到集成器件的变革,并衍生出透明器件、球形器件等新的X射线源器件形态,显示出其在医学诊疗、工业检测等领域的重要应用前景。如何进一步提高器件出射的X射线能量和强度、发展适应平板X射线源发光特性的成像方法,是推进以上器件商用化的主要挑战。随着氧化锌纳米冷阴极和其他纳米材料冷阴极的进一步研究,我们相信平板X射线源器件性能将得到进一步提升,并且将发展出更多新形态的X射线源器件,不仅解决现有的X射线应用需求,而且将开拓X射线源的新应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240306>

参 考 文 献:

- [1] CHOI W B, CHUNG D S, KANG J H, *et al.* Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(20): 3129-3131.
- [2] SUZUKI M, KUSUNOKI T, SAGAWA M, *et al.* Field-emission display based on nonformed MIM-cathode array [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2002, 49(6): 1005-1011.
- [3] JUNG J E, JIN Y W, CHOI J H, *et al.* Fabrication of triode-type field emission displays with high-density carbon-nanotube emitter arrays [J]. *Phys. B: Condens. Matter*, 2002, 323(1-4): 71-77.
- [4] ZHAN R Z, CHEN J, DENG S Z, *et al.* Fabrication of gated CuO nanowire field emitter arrays for application in field emission display [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2010, 28(3): 558-561.
- [5] ZHENG K B, SHEN H T, LI J L, *et al.* The fabrication and properties of field emission display based on ZnO tetrapod-like nanostructure [J]. *Vacuum*, 2008, 83(2): 261-264.
- [6] CHEN Y R, HU L Q, SONG H, *et al.* Optimized performances of tetrapod-like ZnO nanostructures for a triode structure field emission planar light source [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(22): 13544-13549.
- [7] XU J L, ZHANG Y, DENG S Z, *et al.* 10 inch screen printed ZnO nanowire cold cathode for flat panel light source [C]. *Proceedings of 2013 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, Roanoke, 2013: 1-2.
- [8] YIN J, CHEN M N, WANG L B, *et al.* Cathodoluminescent properties of polycrystalline Ga₂O₃ thin film and its application UV flat panel light source [C]. *Proceedings of 2020 33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, Lyon, 2020: 1-2.
- [9] YOUH M J, TSENG C L, JHUANG M H, *et al.* Flat panel light source with lateral gate structure based on SiC nanowire field emitters [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 10976.
- [10] ZHANG J, YANG G, CHENG Y, *et al.* Stationary scanning X-ray source based on carbon nanotube field emitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(18): 184104.
- [11] BUSTA H H, CHEN J M, SHEN Z, *et al.* Characterization of electron emitters for miniature X-ray sources [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2003, 21(1): 344-349.
- [12] ZHANG Z P, CHEN D K, CHEN W Q, *et al.* Thermo-enhanced field emission from ZnO nanowires: role of defects and application in a diode flat panel X-ray source [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, 399: 337-345.
- [13] MINH P N, ONO T, SATO N, *et al.* Microelectron field emitter array with focus lenses for multielectron beam lithography based on silicon on insulator wafer [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, 22(3): 1273-1276.
- [14] HE H, SHE J C, HUANG Y F, *et al.* Precisely-controlled fabrication of single ZnO nanoemitter arrays and their possible application in low energy parallel electron beam exposure [J]. *Nanoscale*, 2012, 4: 2101-2108.
- [15] TEEPEN T F, VAN VEEN A H V, VAN'T SPIJKER H, *et al.* Fabrication and characterization of *p*-type silicon field-emitter arrays for lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, 23(2): 359-369.
- [16] KIRLEY M P, ALOUI T, GLASS J T. Monolayer graphene-insulator-semiconductor emitter for large-area electron lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(23): 233109.
- [17] ZHANG Z P, ZHANG Z J, ZHENG W, *et al.* Sensitive and fast direct conversion X-ray detectors based on single-crystalline HgI₂ photoconductor and ZnO nanowire vacuum diode [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, 5(5): 1901108.
- [18] ZHANG Z P, WANG K, ZHENG K S, *et al.* Electron bombardment induced photoconductivity and high gain in a flat panel photodetector based on a ZnS photoconductor and ZnO nanowire field emitters [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(10): 4147-4155.
- [19] ZHANG Z P, WANG K, ZHENG K S, *et al.* A flat panel photodetector formed by a ZnS photoconductor and ZnO nanowire field emitters achieving high responsivity from ultraviolet to visible light for indirect-conversion X-ray imaging [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, 36(20): 5010-5015.
- [20] CHEN Y C, DENG S Z, XU N S, *et al.* Recent progress on ZnO nanowires cold cathode and its applications [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 2150.
- [21] GOTOH Y, NAGAO M, NOZAKI D, *et al.* Electron emission properties of Spindt-type platinum field emission cathodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(3): 1537-1549.
- [22] GOTOH Y, NOZAKI D, TSUJI H, *et al.* Significant improvement of the emission property of Spindt-type platinum field

- emitters by operation in carbon monoxide ambient [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(4): 588-590.
- [23] SPINDT C A, BRODIE I, HUMPHREY L, *et al.* Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones [J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, 47(12): 5248-5263.
- [24] ZHU W, BOWER C, ZHOU O, *et al.* Large current density from carbon nanotube field emitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(6): 873-875.
- [25] NILSSON L, GROENING O, EMMENEGGER C, *et al.* Scanning field emission from patterned carbon nanotube films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(15): 2071-2073.
- [26] PURCELL S T, VINCENT P, JOURNET C, *et al.* Hot nanotubes: stable heating of individual multiwall carbon nanotubes to 2 000 K induced by the field-emission current [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(10): 105502.
- [27] HUANG N Y, SHE J C, CHEN J, *et al.* Mechanism responsible for initiating carbon nanotube vacuum breakdown [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93(7): 075501.
- [28] BONARD J M, DEAN K A, COLL B F, *et al.* Field emission of individual carbon nanotubes in the scanning electron microscope [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(19): 197602.
- [29] ZHANG H Z, WANG R M, ZHU Y W. Effect of adsorbates on field-electron emission from ZnO nanoneedle arrays [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96(1): 624-628.
- [30] WAN Q, YU K, WANG T H, *et al.* Low-field electron emission from tetrapod-like ZnO nanostructures synthesized by rapid evaporation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(11): 2253-2255.
- [31] ZHU Y W, ZHANG H Z, SUN X C, *et al.* Efficient field emission from ZnO nanoneedle arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(1): 144-146.
- [32] LEE C J, LEE T J, LYU S C, *et al.* Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(19): 3648-3650.
- [33] ZHAO Q, ZHANG H Z, ZHU Y W, *et al.* Morphological effects on the field emission of ZnO nanorod arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(20): 203115.
- [34] PAN N, XUE H Z, YU M H, *et al.* Tip-morphology-dependent field emission from ZnO nanorod arrays [J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(22): 225707.
- [35] YE Z Z, YANG F, LU Y F, *et al.* ZnO nanorods with different morphologies and their field emission properties [J]. *Solid State Commun.*, 2007, 142(8): 425-428.
- [36] XIAO J, ZHANG X X, ZHANG G M. Field emission from zinc oxide nanotowers: the role of the top morphology [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(29): 295706.
- [37] YANG Y H, WANG B, XU N S, *et al.* Field emission of one-dimensional micro- and nanostructures of zinc oxide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(4): 043108.
- [38] BANERJEE D, JO S H, REN Z F. Enhanced field emission of ZnO nanowires [J]. *Adv. Mater.*, 2004, 16(22): 2028-2032.
- [39] WANG X D, SUMMERS C J, WANG Z L. Large-scale hexagonal-patterned growth of aligned ZnO nanorods for nano-optoelectronics and nanosensor arrays [J]. *Nano Lett.*, 2004, 4(3): 423-426.
- [40] WEI A, SUN X W, XU C X, *et al.* Stable field emission from hydrothermally grown ZnO nanotubes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(21): 213102.
- [41] WANG X D, ZHOU J, LAO C S, *et al.* *In situ* field emission of density-controlled ZnO nanowire arrays [J]. *Adv. Mater.*, 2007, 19(12): 1627-1631.
- [42] CHEN J, LEI W, CHAI W Q, *et al.* High field emission enhancement of ZnO-nanorods *via* hydrothermal synthesis [J]. *Solid-State Electron.*, 2008, 52(2): 294-298.
- [43] LIU J, SHE J C, DENG S Z, *et al.* Ultrathin seed-layer for tuning density of ZnO nanowire arrays and their field emission characteristics [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(31): 11685-11690.
- [44] ZENG H B, XU X J, BANDO Y, *et al.* Template deformation-tailored ZnO nanorod/nanowire arrays: full growth control and optimization of field-emission [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, 19(19): 3165-3172.
- [45] ZHAO C X, LI Y F, ZHOU J, *et al.* Large-scale synthesis of bicrystalline ZnO nanowire arrays by thermal oxidation of zinc film: growth mechanism and high-performance field emission [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2013, 13(7): 2897-2905.
- [46] LIAO L, LI J C, WANG D F, *et al.* Field emission property improvement of ZnO nanowires coated with amorphous

- carbon and carbon nitride films [J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(6): 985-989.
- [47] ZHAO C X, LI Y F, CHEN J, *et al.* Tunable field emission characteristics of ZnO nanowires coated with varied thickness of lanthanum boride thin films [J]. *Ultramicroscopy*, 2013, 132: 36-40.
- [48] YUAN L Y, FANG G J, LI C, *et al.* Field emission enhancement of ZnO nanorod arrays with hafnium nitride coating [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, 202(15): 3480-3484.
- [49] SANKARAN K J, AFSAL M, LOU S C, *et al.* Electron field emission enhancement of vertically aligned ultrananocrystalline diamond-coated ZnO core-shell heterostructured nanorods [J]. *Small*, 2014, 10(1): 179-185.
- [50] YANG Z C, ZHAO Q, OU Y X, *et al.* Enhanced field emission from large scale uniform monolayer graphene supported by well-aligned ZnO nanowire arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(17): 173107.
- [51] ZHAO Q, XU X Y, SONG X F, *et al.* Enhanced field emission from ZnO nanorods *via* thermal annealing in oxygen [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(3): 033102.
- [52] CHEN Y C, DENG S Z, XU N S, *et al.* Origin of the ring-shaped emission pattern observed from the field emission of ZnO nanowire: role of adsorbates and electron initial velocity [J]. *Mater. Res. Express*, 2014, 1(4): 045050.
- [53] CHEN Y C, LIU L W, ZHENG K S, *et al.* Highly stable field emission from a tungsten diselenide monolayer on zinc oxide nanowire by geometrically modulating hot electrons [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2019, 5(8): 1900128.
- [54] YEONG K S, MAUNG K H, THONG J T L. The effects of gas exposure and UV illumination on field emission from individual ZnO nanowires [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(18): 185608.
- [55] DARDONA S, PELES A, WROBEL G, *et al.* Gas adsorption and high-emission current induced degradation of field emission characteristics in solution-processed ZnO nanoneedles [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108(12): 124318.
- [56] ZHANG Z S, HUANG J Y, HE H P, *et al.* The influence of morphologies and doping of nanostructured ZnO on the field emission behaviors [J]. *Solid-State Electron.*, 2009, 53(6): 578-583.
- [57] AHMAD M, SUN H Y, ZHU J. Enhanced photoluminescence and field-emission behavior of vertically well aligned arrays of in-doped ZnO nanowires [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2011, 3(4): 1299-1305.
- [58] LIANG Y. Ge-doped ZnO nanowire arrays as cold field emitters with excellent performance [J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(37): 375603.
- [59] CHEN Z H, TANG Y B, LIU Y, *et al.* ZnO nanowire arrays grown on Al:ZnO buffer layers and their enhanced electron field emission [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106(6): 064303.
- [60] CHEN S, CHEN J T, LIU J L, *et al.* Enhanced field emission from ZnO nanowire arrays utilizing MgO buffer between seed layer and silicon substrate [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, 387: 103-108.
- [61] HSIAO C H, HUANG C S, YOUNG S J, *et al.* Field-emission and photoelectrical characteristics of Ga-ZnO nanorods photodetector [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, 60(6): 1905-1910.
- [62] MAHMOOD K, PARK S B, SUNG H J. Enhanced photoluminescence, Raman spectra and field-emission behavior of indium-doped ZnO nanostructures [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1(18): 3138-3149.
- [63] HUANG Y H, BAI X D, ZHANG Y, *et al.* Field-emission properties of individual ZnO nanowires studied *in situ* by transmission electron microscopy [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2007, 19(17): 176001.
- [64] HUANG Y H, ZHANG Y, GU Y S, *et al.* Field emission of a single in-doped ZnO nanowire [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111(26): 9039-9043.
- [65] LIAO L, ZHANG W F, LU H B, *et al.* Investigation of the temperature dependence of the field emission of ZnO nanorods [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(22): 225703.
- [66] XU C X, SUN X W, CHEN B J. Field emission from gallium-doped zinc oxide nanofiber array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(9): 1540-1542.
- [67] AL-TABBAKH A A, MORE M A, JOAG D S, *et al.* Energy analysis of field emitted electrons from a ZnO tetrapod [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(16): 162102.
- [68] XIAO Z M, SHE J C, LI Z B, *et al.* Oscillating current observed in field emission from a single zinc oxide nanostructure and the physical mechanism [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106(1): 014310.
- [69] XUE X Y, LI L M, YU H C, *et al.* Extremely stable field emission from AlZnO nanowire arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(4): 043118.
- [70] NAVALE S C, SHEINI F J, PATIL S S, *et al.* Field emission properties of Al-doped ZnO nanostructures [J]. *J. Nano*

- Res.*, 2009, 5: 231-237.
- [71] SHE J C, XIAO Z M, YANG Y H, *et al.* Correlation between resistance and field emission performance of individual ZnO one-dimensional nanostructures [J]. *ACS Nano*, 2008, 2(10): 2015-2022.
- [72] SUI M, GONG P, GU X Q. Review on one-dimensional ZnO nanostructures for electron field emitters [J]. *Front. Optoelectron.*, 2013, 6(4): 386-412.
- [73] YOUNG S J, YANG C C, LAI L T. Review—growth of Al-, Ga-, and In-doped ZnO nanostructures *via* a low-temperature process and their application to field emission devices and ultraviolet photosensors [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, 164(5): B3013-B3028.
- [74] KANG H W, YEO J, HWANG J O, *et al.* Simple ZnO nanowires patterned growth by microcontact printing for high performance field emission device [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115(23): 11435-11441.
- [75] CHEN D K, SONG X M, ZHANG Z P, *et al.* Transmission type flat-panel X-ray source using ZnO nanowire field emitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107(24): 243105.
- [76] WANG L B, ZHAO Y Y, ZHENG K S, *et al.* Fabrication of large-area ZnO nanowire field emitter arrays by thermal oxidation for high-current application [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 484: 966-974.
- [77] CHEN D K, XU Y, ZHANG G F, *et al.* A double-sided radiating flat-panel X-ray source using ZnO nanowire field emitters [J]. *Vacuum*, 2017, 144: 266-271.
- [78] LI Y F, ZHANG Z P, ZHANG G F, *et al.* Optimizing the field emission properties of ZnO nanowire arrays by precisely tuning the population density and application in large-area gated field emitter arrays [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(4): 3911-3921.
- [79] ZHANG Z P, SONG X M, CHEN Y C, *et al.* Controllable preparation of 1-D and dendritic ZnO nanowires and their large area field-emission properties [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017, 690: 304-314.
- [80] ZHAO Y Y, CHEN Y C, ZHANG G F, *et al.* High current field emission from large-area indium doped ZnO nanowire field emitter arrays for flat-panel X-ray source application [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(1): 240.
- [81] LIU N S, FANG G J, ZENG W, *et al.* Diminish the screen effect in field emission via patterned and selective edge growth of ZnO nanorod arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(15): 153505.
- [82] CHEN Y C, SONG X M, LI Z B, *et al.* Penetration length-dependent hot electrons in the field emission from ZnO nanowires [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2018, 427: 573-580.
- [83] CHEN Y C, ZHANG Z P, LI Z B, *et al.* Investigation of the temperature dependent field emission from individual ZnO nanowires for evidence of field-induced hot electrons emission [J]. *J. Phys. : Condens. Matter*, 2018, 30(31): 315002.
- [84] CHEN Y C, LUO S S, CAO X Q, *et al.* Stable heating above 900 K in the field emission of ZnO nanowires: mechanism for achieving high current in large scale field emitter arrays [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2020, 6(11): 2000624.
- [85] YANG W J, SHE J C, DENG S Z, *et al.* Field emission from a MOSFET-controlled ZnO-nanowire cold cathode [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, 59(12): 3641-3646.
- [86] LI X J, WANG Y, ZHANG Z P, *et al.* Highly stable field emission from ZnO nanowire field emitters controlled by an amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin film transistor [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, 57(4): 045003.
- [87] LI X J, LIU C, LIU C N, *et al.* Kilo-voltage thin-film transistors for driving nanowire field emitters [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2020, 41(3): 405-408.
- [88] ZHAO L, CHEN Y X, LIU Y M, *et al.* Integration of ZnO nanowires in gated field emitter arrays for large-area vacuum microelectronics applications [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2017, 17(1): 85-91.
- [89] ZHAO L, CHEN Y C, ZHANG Z P, *et al.* Coplanar-gate ZnO nanowire field emitter arrays with enhanced gate-control performance using a ring-shaped cathode [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 12294.
- [90] CAO X Q, YIN J, WANG L B, *et al.* Fabrication of coaxial-gated ZnO nanowire field-emitter arrays with in-plane focusing gate electrode structure [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2020, 67(2): 677-683.
- [91] LIU Y M, ZHAO L, ZHANG Z P, *et al.* Fabrication of ZnO nanowire field-emitter arrays with focusing capability [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2018, 65(5): 1982-1987.
- [92] ZHANG S Y, CAO X Q, ZHANG G F, *et al.* Optimizing performance of coaxial planar-gated ZnO nanowire field-emitter arrays by tuning pixel density [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(5): 870.
- [93] CHEN Y C, WANG X Q, WANG L B, *et al.* Quantitative analysis on the field strength in the addressable gated ZnO

- nanowire field emitter arrays: model and experiment [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(9): 5206-5210.
- [94] HUANG D Y, CHEN Y C, WANG C Y, *et al.* Improving the response speed of an active-current controlled field emitter arrays by modifying the controlled current [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(10): 5895-5899.
- [95] OU Z R, WANG C Y, SONG G C, *et al.* A universal model for analytical investigation of electrical characteristics of planar-gate nanowire field emitters [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, 71(12): 7810-7817.
- [96] CHEN Y C, WANG C Y, SONG G C, *et al.* Modeling the temporal response of gated ZnO nanowire field emitter by considering the charging and self-heating effect for improving the response speed [J]. *Electronics*, 2024, 13(4): 796.
- [97] WANG C Y, CHEN Y C, ZHANG G F, *et al.* Modeling the temporal response of gated ZNO nanowire field emitter arrays [C]. *Proceedings of 2023 IEEE 36th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, Cambridge, 2023: 69-71.
- [98] CHEN Y C, ZHANG Y, SHE J C, *et al.* Theoretical analysis of self-heating and cooling processes in the pulsed field emission from ZnO nanowire for achieving high emission current [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(12): 7033-7038.
- [99] WANG K, XU Y, CHEN D K, *et al.* Tungsten target optimization for photon fluence maximization of a transmission-type flat-panel X-ray source by monte carlo simulation and experimental measurement [J]. *IEEE Trans. Radiat. Plasma Med. Sci.*, 2018, 2(5): 452-458.
- [100] WANG L B, XU Y, CAO X Q, *et al.* Diagonal 4-in ZnO nanowire cold cathode flat-panel X-ray source: preparation and projection imaging properties [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2021, 68(3): 338-345.
- [101] ZHAO Y Y, CHEN Y C, ZHANG G F, *et al.* Pulsed voltage driving enhanced electron emission in ZnO nanowire cold cathode flat-panel X-ray source [J]. *Vacuum*, 2022, 199: 110970.
- [102] WANG C Y, ZHANG G F, XU Y, *et al.* Fully vacuum-sealed diode-structure addressable ZnO nanowire cold cathode flat-panel X-ray source: fabrication and imaging application [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 3115.
- [103] KANG S, CHEN Y C, WANG C Y, *et al.* Transparent flat panel X-ray source using ITO transmission anode and ZnO nanowire cold cathode [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2023, 70(6): 3302-3307.
- [104] ZHANG Z P, ZHANG Y Y, ZHANG G F, *et al.* ZnO nanowire cold cathode hemispherical X-ray sources [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2025, 11(5): 2400597.
- [105] KANG S, QI G C, WU W J, *et al.* Cold cathode flat panel X-ray source for Talbot-Lau grating interferometer using zinc oxide nanowire field emitter arrays and periodic microstructured anode [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2024, 7(22): 25439-25446.
- [106] CAO X Q, ZHANG G F, ZHAO Y Y, *et al.* Fully vacuum-sealed addressable nanowire cold cathode flat-panel X-ray source [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(5): 053501.
- [107] KANG S, ZHANG G F, ZHAN R Z, *et al.* Area-addressable ZnO nanowire-based cold cathode transparent flat-panel X-ray sources for visual intraoperative radiotherapy [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2024, 7(23): 26988-26995.
- [108] 陈毅聪, 陈军, 邓少芝, 等. 一种环形可寻址冷阴极 X 射线源器件及其制备方法和应用: 中国, 114188198B [P]. 2024-04-26.
- CHEN Y C, CHEN J, DENG S Z, *et al.* Annular addressable cold cathode X-ray source device and preparation method and application thereof: CN, 114188198B [P]. 2024-04-26. (in Chinese)
- [109] DUAN J Y, LI Y, KANG S, *et al.* Coded array beam X-ray imaging based on spatio-sparsely distributed array sources [C]. *Proceedings of the 17th International Meeting on Fully 3D Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, Stony Brook*, 2023.



陈毅聪(1988–),男,广东佛山人,博士,副教授,2016年于中山大学获得博士学位,主要从事真空微纳电子学研究。
E-mail: chenyc@gdut.edu.cn



陈军(1969–),男,浙江舟山人,博士,教授,2004年于中山大学获得博士学位,主要从事冷阴极电子源及其真空微电子器件应用研究。
E-mail: stscjun@mail.sysu.edu.cn