文章编号 2095-1531(2018)04-0677-07

梯度掺杂结构 GaN 光电阴极的稳定性

李 飙[1*],任 艺[2],常本康[3]
(1. 商丘师范学院 电子电气工程学院,河南 商丘 476000;
2. 商丘职业技术学院 机电系,河南 商丘 476000;
3. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘要:利用 GaN 光电阴极多信息量测试评估系统,对反射式梯度掺杂和均匀掺杂 GaN 光电阴极样品进行了激活及衰减后的量子效率测试,并测试衰减速率。在同样的衰减时间内,和均匀掺杂样品相比,梯度掺杂样品的衰减比例较小,衰减速率较慢,其原因在于梯度掺杂结构可在其发射层内部产生系列内建电场,致使其能带连续向下弯曲,导致其表面真空能级比均匀掺杂样品下降得更低,发射层表面形成的负电子亲和势更明显,造成发射层内的光生电子更易逸出,阴极量子效率的衰减变慢,从而使其稳定性强于均匀掺杂结构。

关 键 词:氮化镓;光电阴极;梯度掺杂;内建电场;稳定性
中图分类号:O433; TN203 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20181104.0677

Stability of gradient-doping GaN photocathode

LI Biao[1*], REN Yi[2], CHANG Ben-kang[3]
(1. *School of Electronic and Electrical Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu* 476000, *China*;
2. *Department of Electrical and Mechanical Engineering, Shangqiu Polytechnic, Shangqiu* 476000, *China*;
3. *Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: libiao*2006@126.*com*

Abstract: The GaN photocathode multi-information measurement and evaluation system is used to test the quantum efficiency of the reflective gradient-doped and uniformly doped GaN photocathode samples after activation and attenuation, and the attenuation rate test is performed. The gradient-doped sample has a smaller attenuation ratio and a slower decay rate than the uniform-doped sample within the same decay time because the gradient-doped structure can generate a series of built-in electric fields inside the emissive layer. As a result, the energy band can be continuously bent downwards, resulting in a lower surface vacuum level than that of

收稿日期:2017-12-27;**修订日期**:2018-01-30
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61171042)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61171042)

the uniformly doped sample, and the negative electron affinity formed on the surface of the emission layer is more pronounced, resulting in easier escape of photogenerated electrons in the emission layer. The decay of the cathode quantum efficiency becomes slower, making it more stable than uniform-doped structures.

Key words: GaN; photocathode; gradient-doping; built-in electric field; stability

1 引 言

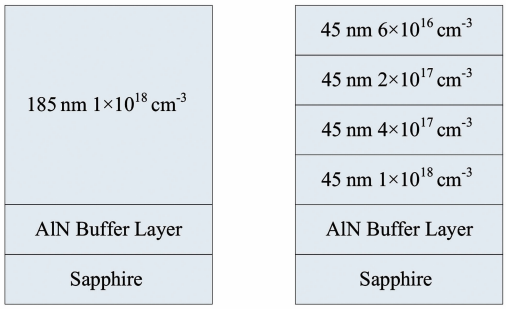
GaN 基紫外光电阴极具有日盲、高量子效率和高抗辐射等内在属性,使其在宇宙探测、火情监测和火箭羽烟探测等领域得以广泛应用[1-6]。GaN 光电阴极在使用过程中不但要求阴极具有高的灵敏度和良好的发射性能,还要求阴极具备较高的稳定性,也就是其量子效率衰减速率越小越好。影响阴极稳定性的外部条件主要有两个,系统真空度和真空残气,系统真空度越高阴极表现出的稳定性越强[7],而不同类别的真空残气也会对阴极稳定性造成不同的影响[8,9];影响阴极稳定性的内因也主要有两个,即阴极材料性能和阴极结构,阴极的稳定性是阴极材料内在属性的外在体现[10],而同一材料,如采用不同的结构,阴极性能亦随之变化,如采用梯度掺杂结构可明显提升阴极的量子效率[11-12]。

目前,基于均匀掺杂结构的稳定性结论[10,13]能否同样适用于梯度掺杂结构 GaN 光电阴极,尚需用实验来验证。本文利用 GaN 光电阴极测试与评估系统[14],对阴极样品进行了量子效率衰减测试,依据测试结果的差异,对均匀掺杂和梯度掺杂样品的稳定性进行了比较与分析。

2 实验与测试

实验样品为均匀掺杂样品 A 和梯度掺杂样品 B,其结构如图 1 所示。两种样品均采用蓝宝石衬底,AlN 缓冲层[15],Mg 掺杂[16]和 185 nm 厚度的 GaN 光电发射层。区别为掺杂方式不同,样品 A 采用均匀掺杂,而样品 B 采用梯度掺杂。

对样品 A 和 B 利用相同工艺进行了阴极制备实验。首先对样品进行化学清洗[17],以去除样品表面的玷污[18],然后进行热清洗,以去除残存



(a) 样品 A (b) 样品 B
(a) Sample A (b) Sample B

图 1 反射式均匀掺杂样品 A 和梯度掺杂样品 B 结构图

Fig. 1 Structure of reflection-mode uniform-doping sample A and gradient-doping sample B

于样品表面的碳和氧[19],最后进行了 Cs/O 激活,使样品对入射光形成有效的响应[20]。在激活结束后,利用 GaN 光电阴极测试与评估系统对实验样品进行了多项对比测试:

(1)样品 A 和 B 在激活后的量子效率对比测试曲线如图 2 所示。

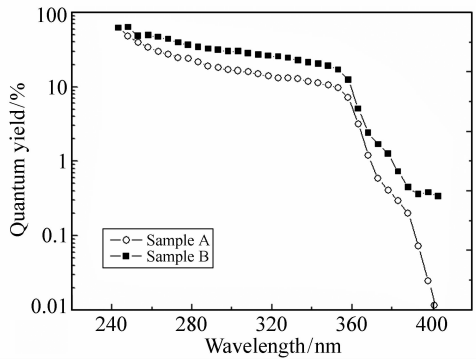
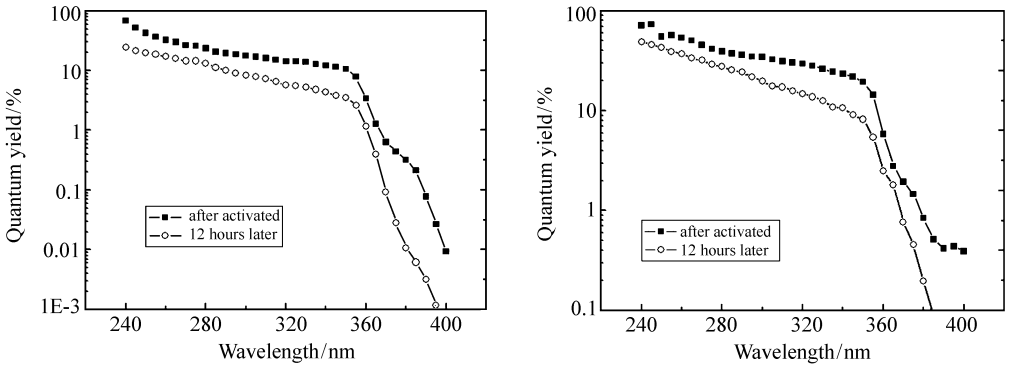


图 2 样品 A 和 B 在激活结束后的量子效率测试曲线

Fig. 2 Quantum efficiency curves of sample A and sample B after activation

(2) 样品 A 和 B 的量子效率衰减曲线如图 3 所示。



(a) 样品A
(a) Sample A

(b) 样品B
(b) Sample B

图 3　样品 A 和 B 的量子效率测试曲线

Fig. 3　Quantum efficiency curves of GaN photocathodes in variable conditions

(3)样品 A 和 B 的相对稳定性测试曲线如图 4所示。

(4)样品 A 和 B 的衰减测试结果如表 1、表 2 和表 3所示。

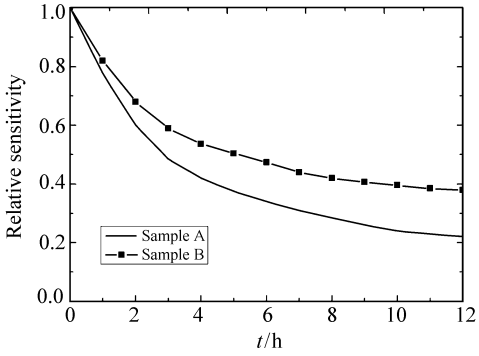


图 4　样品 A 和 B 的相对稳定性测试曲线

Fig. 4　Curves of relative sensitivity for sample A and B

表 1　均匀掺杂样品 A 的衰减测试结果

Tab. 1　Quantum efficiency attenuation test results of sample A

波长/nm	240	260	280	300	320	340
激活后 QE/%	51	36	27	20	16	14
12 h 后 QE/%	42	25	16	9.8	6.2	4.9
衰减比例/%	17.6	30.6	40.7	46	61.2	65

注:衰减比例为(激活后 QE-12 h 后 QE)/激活后 QE。

表 2　梯度掺杂样品 B 的衰减测试结果

Tab. 2　Quantum efficiency attenation test results of sample B

波长/nm	240	260	280	300	320	340
激活后 QE/%	57	44	36	28	24	21
12 h 后 QE/%	48	32	24	18	13	10
衰减比例/%	15.8	27.3	33.3	35.7	45.8	52.4

注:衰减比例为(激活后 QE-12 h 后 QE)/激活后 QE。

表 3　样品 A 和样品 B 的衰减速率测试结果

Tab. 3　Attenuation rate test results of decadence rate for uniform-doping sample A and gradient-doping sample B

	衰减速率(a. u/h)					
测试时间/h	2	4	6	8	10	12
梯度掺杂样品 B	32	19.1	12.7	10.4	4.7	4.6
均匀掺杂样品 A	40	30	19.1	17.6	14.3	8.3

注:衰减速率为(测试值 1-测试值 2)×100/测试值 1。

3 讨论与分析

3.1 GaN 光电阴极的衰减特性

由图 3 可知,阴极衰减时,其量子效率测试曲线随衰减过程而整体下移,量子效率明显下降,且短波辐射区域下移幅度小,而长波辐射区域下移幅度则相对较大。也就是说,短波区域所对应的量子效率损失较少,而长波辐射区域的量子效率衰减较大,即样品在衰减过程中入射光长波段区域的量子效率损失比例偏大(参见表 1 和表 2 衰减比例测试结果)。

GaN 光电阴极衰减曲线在不同波段内具有不同的变化趋势与高能光电子的隧穿逸出有关。GaN 光电阴极受入射光辐照后,所发射光电子的能量分布随入射光子能量的升高而趋向高能端偏移,依据双偶极层模型,阴极衰减时,其表面势垒会产生如图 5 中虚线所示的变化,表面势垒的高度和宽度都有所加大。由于势垒变化对高能光电子的逸出影响不是太大,却使低能光激发电子逸出几率降低,就导致了阴极光谱响应测试曲线随入射光波长改变而产生相应的变化[21]。

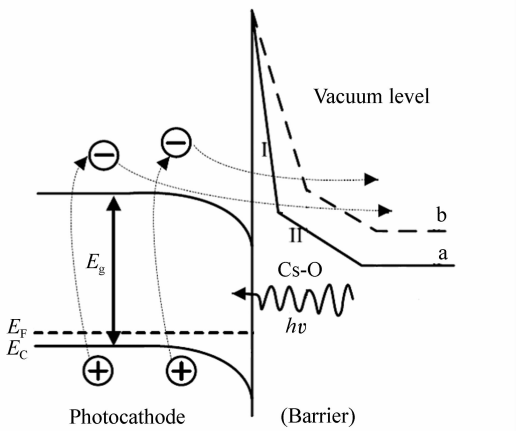


图 5 反射式 GaN 光电阴极的表面势垒示意图

Fig. 5 Surface potential barrier of reflection-mode GaN photocathode

3.2 阴极结构对稳定性的影响

由于两种样品采用不同的掺杂结构,使得其能带结构也不相同,如图 6 所示[11]。与均匀掺杂样品 A 相比,在样品 B 中,掺杂浓度从体内到表面依次下降,呈阶梯状分布(参见图 1(b)),浓度

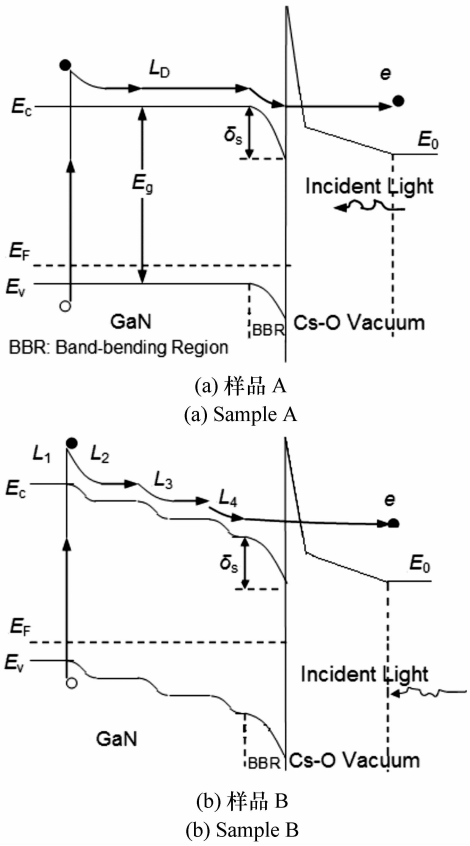


图 6 均匀掺杂样品 A 和梯度掺杂样品 B 能带结构示意图(E_c为导带能级,E_v为价带能级,E_F为费米能级,E_0为真空能级,E_g为 GaN 的禁带宽度)

Fig. 6 Energy band structure of uniform-doping sample A and gradient-doping sample B(E_C is the conduction band minimum, E_V is the valence band maximum, E_F is the Fermi level, E_0 is the vacuum level, E_g is the band gap)

差的存在导致各区域界面处产生内建电场,且所有内建电场的方向都是由体表指向体内,使得体内的光生电子向表面传输时可获得附加能量,可促使更多且能量偏高的光电子能够输运至阴极表面,这不但提高了光生电子传输至阴极表面的几率,而且使到达阴极表面的光生电子高能化。输运至阴极表面的光电子越多也就意味着有更多的光电子可隧穿表面势垒逸入真空,高能光电子的对应解释是更容易越过表面势垒而逸出(参见图 5),两种因素的共同作用使得阴极一方面表现出较高的光谱响应能力,可获得更高的量子效率,

另一方面又会使阴极的衰减变缓,表现出较高的稳定性(参见图 4)。

对于梯度掺杂样品,由于其电子扩散漂移长度 L_{DE} 及电子表面逸出几率 P 均大于均匀掺杂样品,使得其光电发射性能明显优于均匀掺杂样品,灵敏度、长波响应和稳定性都得以大幅提升,解释如下:(1)由于梯度掺杂样品的掺杂浓度存在渐次变化,由体内处 10^{18} cm^{-3} 量级渐次降低到表面处的 10^{16} cm^{-3} 量级(参见图 1(b)),其平均掺杂浓度要比均匀掺杂样品的掺杂浓度(10^{18} cm^{-3} 量级)低,所以其电子扩散长度 L_D 相应较大,L_D 越大则输运至阴极表面的光电子数量越多;(2)由于梯度掺杂样品中存在内建电场,光生电子可在内建电场的作用下向表面定向漂移,使电子的输运长度 L_{DE} 增加,可使输运至阴极表面的电子数目增多并且能量得以增强,数量多则逸出的几率也就大一些,能量高则更易逸出[22];(3)梯度掺杂样品的能带向下弯曲倾斜(参见图 6(b)),和均匀掺杂样品相比,E_0 能够下降得更低,表面势垒的阻挡作用下降,使得低能电子也有可能隧穿势垒而逸出,电子表面逸出几率 P 得以提高[23]。因此,由于内建电场的存在:(1)可以提高输运至样品表面的电子能量,使高能电子比例增大,光生电子更易隧穿势垒,逸入真空的光电子几率得以提高,相应也使阴极的光谱响应能力更加灵敏,可获得更高的量子效率;(2)在样品衰减时,Cs 脱附等因素会使表面势垒发生变化,但由于内建电场使输运至阴极表面的电子能量得以提高,光生电子隧穿表面势垒时受到这种变化的影响并不大,衰减速率较慢(参见表 3),梯度掺杂样品相对于均匀掺杂样品可表现出更好的稳定性。

简言之,由于内建电场的作用,梯度掺杂样品的性能要优于均匀掺杂样品,梯度掺杂结构能够明显提升光电阴极的量子效率和稳定性。

4　结　论

梯度掺杂和均匀掺杂 GaN 光电阴极的稳定性存在诸多相似之处,如:(1)在高真空环境中皆表现出超强的稳定性(参见图 3,放置 12 h 后仍具有高达 30% 的量子效率);(2)阴极衰减过程中长波段量子效率损失比例较大等。但二者的稳定性也存在差异,梯度掺杂结构可明显提升阴极的稳定性。两种样品在稳定性方面所显现出的较多共性是由同种材料的内在属性所决定的,而结构的不同又会使两种阴极的稳定性表现出相应的不同点。梯度掺杂结构中,阴极发射层内产生了系列内建电场,内建电场的存在使光激发电子向阴极表面传输时获得附加能量,逸出几率更高,使阴极的量子效率衰减变慢,从而使阴极的稳定性得以提高。

参考文献:

[1] 洪国彬,杨钧杰,卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器[J]. 中国光学,2014,7(4):559-571.
HONG K B,YANG CH CH,LU T CH. Blue-violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers[J]. *Chin. Opt.*, 2014,7(4):559-571. (in Chinese)

[2] 秦华,黄永丹,孙建东,等. 二维电子气等离激元太赫兹波器件[J]. 中国光学,2017,10(1):51-67.
QIN H,HUANG Y D,SUN J D,*et al.*. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas[J]. *Chin. Opt.*,2017,10(1):51-67. (in Chinese)

[3] 蔡丽娥,张保平,张江勇,等. GaN 基蓝光 VCSEL 的制备及光学特性[J]. 发光学报,2016,37(4):452-456.
CAI L E,ZHANG B P,ZHANG J Y,*et al.*. Fabrication and characteristics of GaN-based blue VCSEL[J]. *Chinese J. Luminescence*,2016,37(4):452-456. (in Chinese)

[4] 邹水平,吴柏禧,万珍平,等. 电-热应力对 GaN 基白光 LED 可靠性的影响[J]. 发光学报,2016,37(1):124-129.
ZOU SH P,WU B X,WAN ZH P,*et al.*. Effect of current-temperature stress on the reliability of GaN LED[J]. *Chinese J. Luminescence*,2016,37(1):124-129. (in Chinese)

[5] 李志全,王聪,李文超,等. 利用 Ag/P-GaN 双光栅改善 LED 发光特性[J]. 光学 精密工程,2017,25(5):1185-1191.
LI ZH Q,WANG C,LI W CH,*et al.*. Improving LED luminescence properties by using Ag/P-GaN double grating[J]. *Opt. Precision Eng.*,2017,25(5):1185-1191. (in Chinese)

[6] 王永进,张锋华,高绪敏,等. 面向可见光波段的非周期悬空 GaN 薄膜光栅[J]. 光学 精密工程,2017,25(12):3020-3026.
WANG Y J,ZHANG F H,GAO X M,*et al*.. Freestanding non-periodic GaN gratings in visible wavelength region[J]. *Opt. Precision Eng*.,2017,25(12):3020-3026. (in Chinese)

[7] SOMMER A H. Stability of photocathode[J]. *Appl. Opt*.,1973,12(1):90-92.

[8] 徐江涛. 真空残气对 GaAs 阴极发射性能的影响[J]. 应用光学,2003,24(2):13-15.
XU J T. Effect of residual gas on emission property of Gallium Arsenide cathode in vacuum[J]. *J. Appl. Opt*.,2003,24(2):13-15. (in Chinese)

[9] WADA T,NITTA T,NOMURA T. Influence of exposure to CO, CO_2 and H_2O on the stability of GaAs photocathodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys*.,1990,29(10):2087-2091.

[10] MACHUCA F. A Thin Film p-type GaN Photocathode:prospect for a high performance electron emitter[D]. Stanford:University Stanford,2004.

[11] ZOU J J,CHANG B K. Gradient-doping negative electron affinity GaAs photocathodes[J]. *Opt. Eng*.,2006,45(5):054001.

[12] YANG ZH,CHANG B K,ZOU J J. Comparison between gradient-doping GaAs photocathode and uniform-doping GaAs photocathode[J]. *Appl. Opt*.,2007,46(28):7035-7039.

[13] 乔建良,常本康,杜晓晴,等. 反射式负电子亲和势 GaN 光电阴极量子效率衰减机理研究[J]. 物理学报,2010,59(4):2855-2859.
QIAO J L,CHANG B K,DU X Q,*et al*.. Quantum efficiency decay mechanism for reflection mode negative electron affinity GaN photocathode[J]. *Acta Phys. Sinica*,2010,59(4):2855-2859. (in Chinese)

[14] 高频,王晓晖,杜玉杰,等. NEA GaN 光电阴极的制备与评估[J]. 红外技术,2011,33(6):332-335.
GAO P,WANG X H,DU Y J,*et al*.. Preparation and evaluation of NEA GaN photocthode[J]. *Infrared Technol*.,2011,33(6):332-335. (in Chinese)

[15] IWAYA M,TAKEUCHI T,YAMAGUCHI S,*et al*.. Reduction of etch pit density in organometallic vapor phase epitaxy-grown GaN on sapphire by insertion of a low-temperature-deposited buffer layer between high-temperature-grown GaN[J]. *Jpn. J. Appl. Phys*.,1998,37:L316-L318.

[16] NAKCMURA S,MUKAI T,SENOH M,*et al*.. Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films[J]. *Jpn. J. Appl. Phys*.,1992,31:L139-L140.

[17] MACHUCA F,LIU Z. Fabrication of group III-Nitride photocathode having Cs activation layer:US,0170324 A1[P]. 2006-01-01.

[18] TERESHCHENKO O E,SHAIBLER G ,YAROSHEVICH A S,*et al*.. Low-temperature method of cleaning p-GaN(0001) surfaces for photoemitters with effective negative electron affinity[J]. *Phys. Solid State*,2004,46(10):1949-1953.

[19] KING S W,BARNAK J P,BREMSER M D,*et al*.. Cleaning of AlN and GaN surfaces[J]. *J. Appl. Phys*.,1998,84(9):5248-5260.

[20] 乔建良,田思,常本康,等. 负电子亲和势 GaN 光电阴极激活机理研究[J]. 物理学报,2009,58(8):5847-5851.
QIAO J L,TIAN S,CHANG B K,*et al*.. Activation mechanism of negative electron affinity GaN photocathode[J]. *Acta Phys. Sinica*,2009,58(8):5847-5851. (in Chinese)

[21] 邹继军,常本康,杜晓晴,等. GaAs 光电阴极光谱响应曲线形状的变化[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(8):1465-1468.
ZOU J J,CHANG B K,DU X Q,*et al*.. Variation of spectral response curve shape of GaAs photocathodes[J]. *Spectrosc. Spectral Anal*.,2007,27(8):1465-1468. (in Chinese)

[22] NIU J,ZHANG Y J,CHANG B K,*et al*.. Influence of varied doping structure on photoemissive property of photocathode[J]. *Chin. Phys. B*,2011,20(4):044209.

[23] 张益军. 变掺杂 GaAs 光电阴极研制及其特性评估[D]. 南京:南京理工大学,2012.
ZHANG Y J. Design and characteristic evaluation of varied doping GaAs photocathode[D]. Nanjing:Nanjing University

of Science and Technology,2012. (in Chinese)

作者简介:

李　飙(1974—),男,河南太康人,博士,讲师,主要从事光电材料性能评估与检测方面的研究。
E-mail:libiao2006@126.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

★ 荷兰 Scopus 数据库
★ 美国《乌利希国际期刊指南》
★ 美国《化学文献》
★ 波兰《哥白尼索引》
★ 俄罗斯《文摘杂志》
★ 美国工程索引(Ei)数据库
★ 美国 ESCI 数据库
★ 中国精品科技期刊
★ 中国科技核心期刊
★ 中国光学学会会刊
★ 中国科技论文与引文数据库
★ 中国期刊全文数据库
★ 万方数字化期刊全文数据库
★ 中国科技期刊数据库
★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版:《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics.net.cn
邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061　　传　　真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)