

基于 Micro-LED 芯片的可调角度发光器件模拟计算

Simulation and Calculation of Adjustable Angle Automotive Lamp Devices Based on Micro-LED Chip

魏伟^{1*} 邹军² 宋金德³ 乐刚⁴ 仇成群¹ 林金填⁵ 陈磊⁵ 熊敬康⁶ 郭浩中⁷ 张国义⁸

Wei Wei¹, Jun Zou², Jinde Song³, Gang Le⁴, Chengqun Qiu¹, Jintian Lin⁵, Lei Chen⁵, Jingkang Xiong⁶,
Haozhong Guo⁷, Guoyi Zhang⁸

(¹江苏省智能光电器件与测控工程研究中心, 盐城师范学院; ²上海应用技术大学; ³江苏杏杰科技有限公司; ⁴上海复瞻智能科技有限公司; ⁵旭宇光电(深圳)股份有限公司; ⁶常州市武进区半导体照明应用技术研究院; ⁷半导体所鸿海研究院; ⁸北京大学东莞光电研究院)

¹Jiangsu intelligent optoelectronic device and measurement and Control Engineering Research Center, Yancheng Normal University, Yancheng City, Jiangsu Province, 224007, China;

²Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

³Jiangsu Singular Technology Ltd Company, China;

⁴Shanghai Fulllight Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 200433, China;

⁵Xuyu Optoelectronics Co., Ltd, Shenzhen 518101, China;

⁶Changzhou Wujin District Semiconductor Lighting Application Technology Research Institute changzhou 213164, China;

⁷Semiconductor Research Center, Hon Hai Research Institute, New Taipei city 236, China;

⁸Department, Dongguan Institute of Optoelectronics, Peking University, Dongguan 523808, China;

摘要: 针对目前可调角度光束照明-尤其是车灯的不同角度的需求, 将 Micro-LED 光源的出光角度调到合适的角度, 但现有的 Micro-LED 由于其小尺寸结构的因素, 其出光角度比较大, 跟目前车灯特定角度的要求不是很匹配。传统调光采用透镜或者反射镜方式来调光, 从物理原理上来说采用折射或者反射来调光, 此技术必产生较多杂散光和界面光损失, 本文采用全反射调光方式, 光学原理上可以避免调光界面光损失。本文针对这一难题, 提出了倾斜封装体结构调节 Micro-LED 的出光角度, 本文模拟计算了不同封装体高度对于 Micro-LED 出光角度和效率的影响, 不同倾斜体角度对于 Micro-LED 出光角度和出光效率的影响, 不同倾斜体材料构成对于 Micro-LED 出光角度和出光效率的影响。最终本文通过设计多次侧面全反射调光方式, 避免了调光界面的光损失, 实现了光源任意角度的调节。

关键词: 3D 打印; Micro-LED; 倾斜体结构; 光线追迹法

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A

Abstract

In response to the current demand for different angles of car lights, it is necessary to adjust the output angle of Micro-LED light sources to an appropriate angle. However, due to its structural factors, the output angle of existing Micro-LEDs is relatively large and does not match the current requirements for car light angles. This article proposes a tilted packaging structure to adjust the output angle of Micro-LEDs. This article simulates and calculates the effects of different packaging heights on the output angle and efficiency of Micro-LEDs, the effects of different tilted body angles on the output angle and efficiency of Micro-LEDs, and the effects of different tilted body materials on the output angle and efficiency of Micro-LEDs.

Key words

3D printing; Micro-LED; Italic structure; ray tracing

1. 引言

对于不同的照明场景，需要光源的出光角度也常常不同。多角度光束照明，用途非常广泛，包括商品展示，深海集鱼，舞台照明，摄像头辅助精准识别照明，舞台灯，探照灯，车灯，路灯等用途^[1-10]。

目前部分小角度照明场景可以使用激光光源来实现，但是激光价格昂贵，需要配合复杂的光学调节系统和控制系统，很多情况下实用性不太高。其中市场规模比较大的是车灯照明，已经有名企使用激光来照明^[11-16]。传统车灯的作用主要用于车辆行进过程中，为司机照明，为路人示警，但是不能实现信息化显示和智能化显示。目前很多大厂发布了基于激光或者 Micro-LED 的车灯产品，通过像素光控制，可实现信息的相互展示，比如说可以实现拐弯照明，人行道照明，防眩光功能等信息化、智能化特色照明。目前汽车大灯的产品多数采用激光照明，比如说激光+DMD 或者激光+LBS 或者 LED/OLED+LCD 等方式^[17-22,25]，其控制方式多采用扫描或者 LCD 的方式来显示，如果采用 LED 或者 OLED 一般会结合微透镜阵列^[23,24]，需要复杂的光学系统和控制系统，一般辅助的光学系统或者控制系统都带来不少的光损失，这些都导致了车灯价格很昂贵，现有的信息化、智能化车灯多用在高端的车型上。传统的路灯角度调节多采用类似花生米的自由曲面透镜来实现，对于加工工艺来说，需要高精度模具，模具曲面复杂，精度要求高，透镜硬度高，制作加工困难，需要大批量生产才能降低成本。如果将自由曲面适用于车灯照明，目前很多车的种类繁多，多数车的某一型号的销量有限，很多只有几万辆、几千辆，对于大批量降低成本有限，并且如果车灯像素数比较多，如果透镜不是直接刻蚀而成的，对于后期透镜的对齐也存在难点。

为了将信息化、智能化车灯做到广泛的普及，需要进行技术升级，进一步地降低成本，简化车灯系统，提高可靠性。其中可能的解决方案是采用 Micro-LED 车灯来解决，预计能实现低成本和高可靠化，但是仍然有很多技术问题需要解决。

其中，由于 Micro-LED 小尺寸参数的原因，其芯片出光角度很大，很多不同类型车灯需要不同角度照明，很多角度都远远小于 Micro-LED 的出光角度，两者相互矛盾，为了解决这一问题，目前的解决方式是采用透镜的方式来实现，一般透镜位于芯片之上，所以透镜能收集的光线和调节的角度有限，侧面的光很难搜集，且由于透镜距离芯片位置比较近，导致杂散光比较多，造成了光浪费，还降低了可靠性（因为透镜的阵列匹配芯片的阵列具有很多的误差），增加了成本，增加了体积，增加了重量等缺点^[26-32]。

所以为了解决目前可调角度光束照明-尤其是车灯照明的成本高，控制复杂，低可靠性的难题，本文提出了一种基于倾斜器件的方式来解决。本文模拟了不同倾斜体高度对于 Micro-LED 的出光效率和出光角度的影响，不同倾斜体角度对于 Micro-LED 的出光效率和出光角度的影响，不同倾斜体填充材料对于 Micro-LED 的出光效率和出光角度的影响。

2. 实验仿真

2.1 Micro-LED 芯片结构和参数

本实验通过光线追迹法和蒙特卡洛的方法，对基于 Micro-LED 芯片的倾斜体封装进行了模拟计算。本实验模拟计算的微米 LED 的结构如图 1 和图 2 所显示，包括 ITO, P-GaN, MQW, N-GaN, 蓝宝石，其中蓝宝石采用 PSS 结构，以上材料的折射率、吸收系数具体参数见

表1；本实验模拟计算倾斜体调光器件的结构如图3所显示，包括底部中间位置的芯片6，以及芯片四周的倾斜体的反射面3，以及位于底部的较高折射率的反射面52和51，倾斜调光器件为底部边长为2mm，倾斜角度为5度至25度，倾斜体的长度为10mm至300mm，倾斜体底部的反射体的材料和倾斜体的材料折射率、吸收系数具体参数见表2。ITO，P-GaN，MQW，N-GaN，蓝宝石，

其厚度、折射率和吸收系数如表1所显示^[33-37]，其中MQW为量子阱，属于发光层，芯片示意图如图1，PSS衬底的半球，直径为3微米，PSS阵列为9*9阵列，芯片的边长为30微米。

如图2，基于Micro-LED芯片的倾斜聚光器件的剖视图：发光芯片或者荧光粉或者量子点或纳米散射颗粒或微米散射颗粒或拉曼待测物质6，位于器件底部的反射面或位于器件底部和侧面的

反射面或位于器件底部和侧面下部的反射面5，具有特定角度的倾斜外侧面的器件3，具有底面1和顶面2面积数值不同的器件，侧面4，反射面为底面51，器件外侧面52。

从图中可以看出，从底部中心位置芯片发出的光线，经过器件的外表面的全反射作用，将光反射到正面，由于侧面倾斜的反射将大角度的光偏折到正面，并且减少了出光角度。

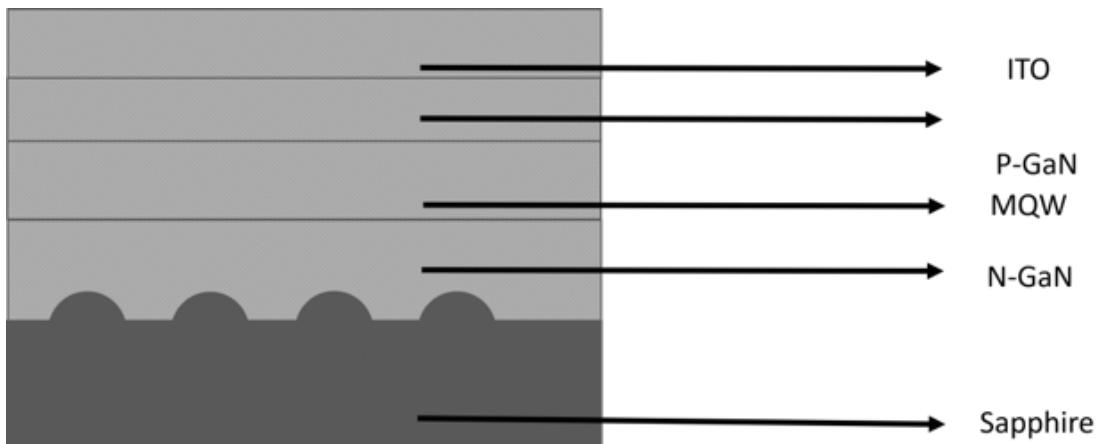


图1 Micro-LED 芯示意图

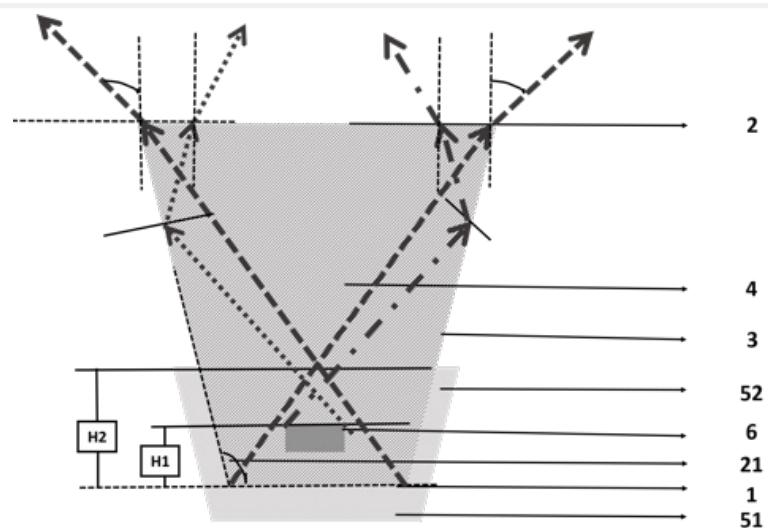


图2 基于 Micro-LED 芯片的倾斜聚光器件的剖视图

表 1 Micro-LED 芯片的尺寸, 折射率和吸收系数
Table 1 Size, refractive index and absorption coefficient of Micro-LED chips

Material	Thickness	Refractive index	Absorption index (mm ⁻¹)
ITO	300 nm	1.5	0
p-GaN	100 nm	2.45	2.3
Activelayer	100 nm	2.54	25
N-GaN	6.75 μ m	2.45	2.3
Al ₂ O ₃	30 μ m	1.7	0.004

表 2 倾斜调光器件的尺寸, 折射率和吸收系数
Table 2 Size, refractive index and absorption coefficient of tilted Micro-LED chips

Material	Thickness	Refractive index	Absorption index (mm ⁻¹)
底部反射材料	0.3mm	1.5	0
倾斜体	10nm-300mm	1.605	0.0078

如图 2, 基于 Micro-LED 芯片的倾斜聚光器件的剖视图: 发光芯片或者荧光粉或者量子点或纳米散射颗粒或微米散射颗粒或拉曼待测物质 6, 位于器件底部的反射面或位于器件底部和侧面的

反射面或位于器件底部和侧面下部的反射面 5, 具有特定角度的倾斜外侧面的器件 3, 具有底面 1 和顶面 2 面积数值不同的器件, 侧面 4, 反射面为底面 51, 器件外侧面 52。

从图中可以看出, 从底部中心位置芯片发出的光线, 经过器件的外表面的全反射作用, 将光反射到正面, 由于侧面倾斜的反射将大角度的光偏折到正面, 并且减少了出光角度。

2.2 基于 Micro-LED 芯片的围坝吸收器件阵列的模拟计算

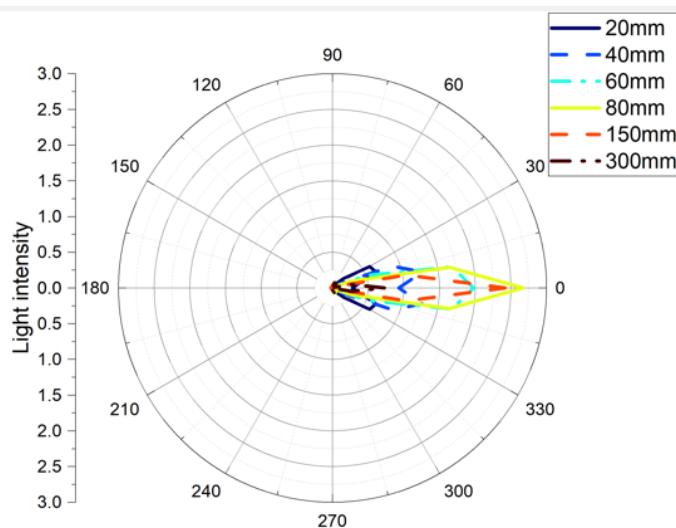


图 3 倾斜体侧面角度在 5 度下, 不同倾斜体长度下其调光器件的远场光分布

表 3 不同部件长度对应的出光效率
Table 3 Light output efficiency corresponding to different parts of the length

器件的长度 (mm)	出光角度 (度)	出光效率
20	>160 且 <180	0.568
40	>140 且 <160	0.497
60	>20 且 <40	0.462
80	>20 且 <40	0.432
150	<20	0.343
300	<20	0.262

从图中可以看出，随着倾斜体高度的增加，其调光器件的出光角度在变小，其出光效率在降低。当器件长度分别为 20、40、60、80、150、300mm 时，其出光角度分别为 >160 度且 <180 度、 >140 度且 <160 度、 >20 度且 <40 度、 >20 度且 <40 度、

<20 度、 <20 度，是因为在调光器件内部较大角度的光，被侧面全反射，改变了较大角度的光的出射方向，具体如图 3 所示，芯片出射较大角度 A1 的光被全反射后，其角度变为了 A2，其角度大大减少了。其出光效率降低，是因为随着倾斜体高度的增加，光在

器件内部走过的路径变长，由于器件材料具有一定的吸收系数，会吸收部分的光，所以出射光的强度会降低。表格 3 为不同器件长度对应的出光效率，从表中可以看出，随着长度的增加，出光效率降低，当长度为 300mm 时最小，当长度为 20mm 时最大。

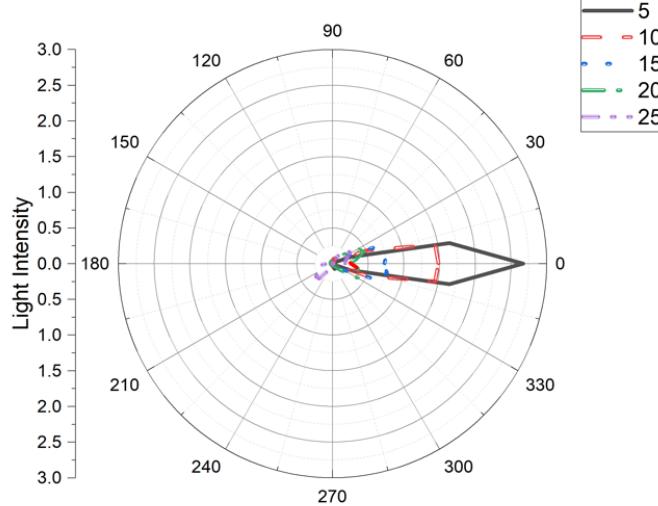


图 4 倾斜体侧面角度在 5 度至 25 度下，倾斜体长度为 80mm 时，其调光器件的远场

表 4 不同部件倾角对应的出光效率
Table 4 Light output efficiency corresponding to the inclination of different parts

器件的长度 (mm)	出光角度 (度)	出光效率
5	>20 且 <40	0.431
10	>20 且 <40	0.398

15	>40 且 <60	0.386
20	>60 且 <80	0.379
25	>80 且 <100	0.369

从图中可以发现，随着其倾斜体侧面角度的变化，其出光角度和出光效率都会变化。随着倾斜角度的减少，其出光角度也减少，其出光效率也会增加。当器件倾斜角度分别为 5、

10、15、20、25 度时，其出光角度分别为 >20 度且 <40 度、>20 度且 <40 度、>40 度且 <60 度、>60 度且 <80 度、>80 度且 <100 度，芯片出射的光从侧面出射的更少，更多的

光被全反射从顶部出射了。表格 4 为不同部件倾角对应的出光效率，从表中可以看出，随着倾角的增加，出光效率降低，当倾角为 25 度时最小，5 度时最大。

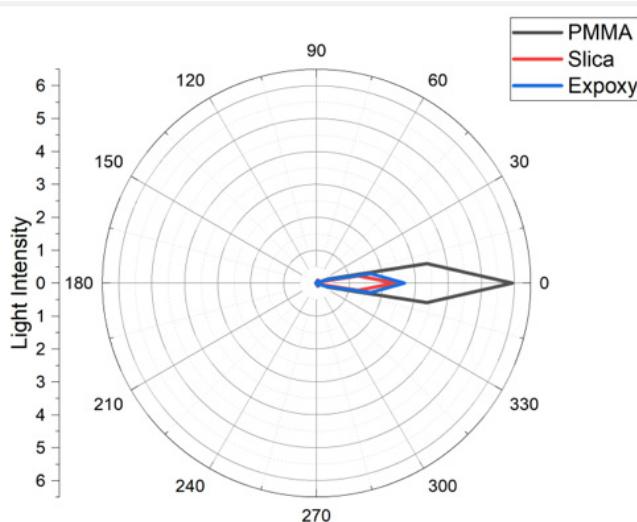


图 5 倾斜体侧面角度在 5 度下，倾斜体长度为 80mm 时，其倾斜体在不同填充物质下，其调光器件的远场光分布

表 5 不同部件对应材料的出光效率
Table 5 Light output efficiency corresponding materials for different components

材料	出光角度 (度)	出光效率
PMMA	>20 且 <40	0.636
Epoxy	>20 且 <40	0.432
Silica	>20 且 <40	0.431

从图中可以看出，改变调光器件的材料时，其出光角度变化不大，但是其包裹的面积变化较大，这是因为三者的吸收系数不同，其中 PMMA 吸收系数最小，所以其出光效率最大，Silica 的吸收系数最大，所以其出光

效率最低，Epoxy 吸收系数处于两者之间，所以其出光效率也处于两者中间。表格 5 为不同部件材料对应的出光效率，从表中可以看出，PMMA 材料的器件的出光效率最高，Silica 材料的器件的出光效率最小，Epoxy 材

料的器件的出光效率居中。当器件材料分别为 PMMA、Epoxy、Silica 时，其出光角度分别为 >20 度且 <40 度、>20 度且 <40 度、>20 度且 <40 度，可以看出，随着器件材料的替换，其出光角度不变。

3 分析与讨论

综上所述，模拟了通过调节不同倾斜封装结构参数来调节 Micro-LED 的出光角度和出光效率，通过器件的不同参数，具体为器件的倾斜面角度、长度、倾斜体吸收材料，可以设计任意出光角度（0 度至 180 度）的器件。通过以上数据可以发现，侧面全反射调光的光损失也受限于材料的吸收系数，且随着需要减少光束角度数值越大则损失也越大，此技术需要选择合适的材料来实现光源出光角度的调节。

4 结论

综上所述，模拟了通过调节不同倾斜封装结构参数来调节 Micro-LED 的出光角度和出光效率，发现在相同高度下，倾斜面角度越小，其出光角度越小，出光效率越高；在相同角度，随着器件高度的增加，其出光角度减小，其出光效率减少；随着器件吸收系数的减少，其调光器件的出光效率增加，但是出光角度基本不变。所以可以通过器件倾斜角度、器件长度来调节器件的出光角度和出光效率，可以通过选择材料的吸收系数来调节器件的出光效率。分析以上模拟结果可以发现，通过设计合适的调光器件的长度，倾斜角度等参数，可以将光源的出光角度从小于 20 度调节到大于 160 度且小于 180 度，可以满足不同车灯对于车灯光源不同出光角度的要求。相比较传统透镜的方式，本方法具有一体化结构，可靠性高，不会存在普通透镜的对齐和一致性难以解决等难点，也能解决传统方式侧面漏光的缺点，且也能大大降低杂散光的影响，具有良好的技术优势和市场前景。

参考文献

- [1] Brumbelow M L. Light where it matters: IIHS headlight ratings are correlated with nighttime crash rates[J]. Journal of safety research, 2022, 83: 379-387.
- [2] Sumithra J, Sumalatha A, Vanitha A, et al. A smart and systematic vehicle headlight operations controlling system based on light dependent resistor[C]//2024 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE). IEEE, 2024: 1-6.
- [3] Wyatt L. The Effects of Car Headlight Height on the Amount of Light Reflected and Visibility for Different Reflective Apparel[J]. 2023.
- [4] Begum M, Ullah N, Shuvo M H, et al. Cost-effective IoT-based automated vehicle headlight control system: design and implementation[J]. Int. J. Inform. Commun. Technol, 2024, 99: 325-333.
- [5] Vrabel J, Stopka O, Palo J, et al. Research regarding different types of headlights on selected passenger vehicles when using sensor-related equipment[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1978.
- [6] Novak T, Latal J, Hejduk S, et al. Case study—Modelling of Visible Light Communication on Luminous Intensity Distribution Curve of LED Low Beam Car Headlamps[C]//2021 Joint Conference—11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS: 17). IEEE, 2022: 1-5.
- [7] N k r u m a h J K, C a i Y, Jafaripournimchahi A, et al. The development of a sensor-based automatic headlight beam control system for automotive safety and efficiency[J]. Journal of Optics, 2024: 1-12.
- [8] Gillette J M, McNamara M. Designing with light: an introduction to stage lighting[M]. Routledge, 2019.
- [9] Taisir M, Teo C L, Idris A, et al. Cultivation of *Nannochloropsis* sp. using narrow beam angle light emitting diode in an internally illuminated photobioreactor[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2016, 3(1): 35.
- [10] Bell R, Watson K, Hu T, et al. Searchlight: An accurate, sensitive, and fast radio frequency energy detection system[C]//MILCOM 2023-2023 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). IEEE, 2023: 397-404.
- [11] Juge R, Sisodia N, Larrañaga J U, et al. Skyrmions in synthetic antiferromagnets and their nucleation via electrical current and ultra-fast laser illumination[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 4807.
- [12] Liu S Y, Chen T H, Wu B T, et al. Direct magnetism modulation of CsPbBr₃ quantum dots/cobalt heterostructures by laser illumination for spintronic applications[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(16): 14841-14848.
- [13] Wang Y, Wang L, Bao S, et al. High-performance and heat-resistant Ce: YAG phosphor in glass for laser lighting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 921: 166083.
- [14] Rondelez N, Meuret Y, Ryckaert W, et al. LED and laser diode based illumination systems with a tuneable radiation pattern[J]. 2023.
- [15] Glukhov D, Zalevsky Z, Karsenty A. Author Correction: Picosecond pulsed laser illumination: an ultimate solution for photonic versus thermal processes' contest in SOI photo-activated

- modulator[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 3269.
- [16] Chang Y P, Li K, Chen A, et al. Integration of LiDAR with smart headlight using a single DMD[C]// Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XIII. SPIE, 2021, 11698: 97-102.
- [17] Kawazu T. Schottky barrier lowering in n-AlGaAs/GaAs/AlGaAs double heterojunctions by local light illumination[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2025, 64(7): 075001.
- [18] Reisinger B, Reinprecht M, Pürstinger J, et al. Potentials of MEMS-based scanners and DMD arrays with high luminance LED and Laser light sources[J]. *ISAL*, 2015: 473-482.
- [19] Jiang H, Wu Y, Sun T, et al. Design of Digitalized Vehicle Light Illumination System Using GaN-Based Semiconductor Laser Diode[C]//2024 21st China International Forum on Solid State Lighting & 2024 10th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS). IEEE, 2024: 528-532.
- [20] Jiang H, Wu Y, Sun T, et al. Design of Digitalized Vehicle Light Illumination System Using GaN-Based Semiconductor Laser Diode[C]//2024 21st China International Forum on Solid State Lighting & 2024 10th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS). IEEE, 2024: 528-532.
- [21] Reiss B, Ripperger J. Laser technology in exterior lighting for vehicles[J]. *ATZ worldwide*, 2017, 119(11): 54-59.
- [22] Wang L, Ma J, Su P, et al. A new integrated led automotive headlight with laser supplement light[C]//Optical Design and Testing X. SPIE, 2020, 11548: 460-466.
- [23] Chen C C, Wu C Y, Wu T F. LED back-light driving system for LCD panels[C]//Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. IEEE, 2006: 5 pp.
- [23] Gao Z, Ning H, Yao R, et al. Mini-LED backlight technology progress for liquid crystal display[J]. *Crystals*, 2022, 12(3): 313.
- [24] Blankenbach K. 46.1: Invited Paper: LCD Innovations vs. OLED Performance for Automotive Applications[C]//SID Symposium Digest of Technical Papers. 2023, 54: 327-330.
- [25] Le H T, Le L T, Liao H Y, et al. Design of low-glared LED rear light of automotive for EU ECE regulation by use of optimized micro-prisms array[J]. *Crystals*, 2020, 10(2): 63.
- [26] Li, Y., Jiang, H., Yan, Y., Liu, Y., Zhou, Z., Chen, E., ... & Guo, T. (2023). Highly efficient and ultra-compact micro-LED pico-projector based on a microlens array. *Journal of the Society for Information Display*, 31(7), 483-493.
- [27] Wocheng, R., Bingqing, L., & Zhaojun, L. (2021, February). P - 12.4: Investigation of Micro-lens to improve the Efficiency of Micro-LED Display System. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 52, pp. 605-608).
- [28] Wu, Y. E., Hsu, J. H., Chen, K. H., Tien, K. C., Chen, L. Y., & Kuo, H. C. (2025). Enhanced micro-LED light efficiency by optical structures on substrate. *Journal of the Society for Information Display*.
- [29] Miao, W. C., Hsiao, F. H., Sheng, Y., Lee, T. Y., Hong, Y. H., Tsai, C. W., ... & He, J. H. (2024). Microdisplays: mini-LED, micro-OLED, and micro-LED. *Advanced Optical Materials*, 12(7), 2300112.
- [30] Bi, X., Xie, T., Fan, B., Khan, W., Guo, Y., & Li, W. (2016). A flexible, micro-lens-coupled LED stimulator for optical neuromodulation. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 10(5), 972-978.
- [31] Choi, H. W., Liu, C., Gu, E., McConnell, G., Girkin, J. M., Watson, I. M., & Dawson, M. D. (2004). GaN micro-light-emitting diode arrays with monolithically integrated sapphire microlenses. *Applied Physics Letters*, 84(13), 2253-2255.
- [32] Di Vito, A., Amiri, P., Bornemann, S., Schöttler, G., Vergin, M., Meierhofer, F., ... & Auf der Maur, M. (2023). Design study of a micro illumination platform based on GaN microLED arrays. *Applied Optics*, 62(28), 7503-7511.
- [33] Tsao C, Freniere E R, Smith L. Improved predictive modeling of white LEDs with accurate luminescence simulation and practical inputs with TracePro opto-mechanical design software[C]//Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XIII. SPIE, 2009, 7231: 124-135.
- [34] Liu, Lusheng, et al. "Light Radiation Simulation of Micro-LED Array for the Optical Neural Interface Targeted Cerebral Cortex in Rhesus Monkey." 2023 11th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI). IEEE, 2023.

[35] Zhou, Shuwei, and Baolin Liu. "Limit calculation of LED luminous efficiency." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2849. No. 1. IOP Publishing, 2024.

[36] Chen, Xindong, et al. "Research on optical and thermal properties of 3D ceramic substrate LED package." *2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2022.

[37] Ke, Hao-chun, Kun Li,

and Rui-feng Cheng. "Simulation and optimization on ultraviolet led nutrient solution sterilization module based on response surface method." (2023): 132-146.

作者简介：魏伟（出生年 1980.07），男，博士，讲师，主要从事 Micro-LED 器件光学模拟方面的研究。E-mail: weiweipaper@126.com

创新点说明：本文通过调控调光器件的长度，倾角和材料，可以实现对 Micro-LED

的出光效率和出光角度进行调控，由于调控采用的是侧面全反射原理，远场可以大大减少杂散光的影响，能够实现非常高的光束质量，具有成本低，效果好，应用领域广泛。

基金项目：盐城市重点研发计划项目 (YCBE202332)；2021 年的“江苏省双创博士”项目 (No.JSSCBS20211145)；

Key R&D Plan in Yancheng City (YCBE202332). Supported by “Dr. Shuangchuang” in the Jiangsu Province in 2021 (No.JSSCBS20211145);

