

490 nm 阵列发光二极管黄疸光疗仪光源系统

于莉媛^{1,3*}, 韩斌², 何金刚², 杨磊², 舒刘琴¹, 牛萍娟³

¹天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津 300387;

²天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;

³天津工业大学大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387

摘要 设计了一种基于蓝绿光发光二极管光源的黄疸光疗仪光源系统。根据光线在皮肤和组织中的传递过程及胆红素和光红素之间的转化过程,通过光谱匹配,建立与目标光谱匹配度较高的光源光谱。对光源阵列进行设计和仿真,建立了光源系统,并进行照度测试,照度平均值达 $32.9 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,均匀度达 81%。为进一步提高光源系统均匀度,在光源系统中采用菲涅耳透镜阵列,当菲涅耳透镜的环距为 1 mm、透镜到光源的距离为 1 cm 时,均匀度提升至 85%,照度为 $31 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,与设计要求的相符。

关键词 光学器件; 发光二极管阵列光源; 黄疸光疗; 菲涅耳透镜; 光谱匹配; 透镜光学设计

中图分类号 R318.51

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.122302

490 nm Array Light-Emitting Diode Light Source System for Jaundice Phototherapy Instrument

Yu Liyuan^{1,3*}, Han Bin², He Jingang², Yang Lei², Shu Liuqin¹, Niu Pingjuan³

¹School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

²School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

³Engineering Research Center of High Power Solid State Lighting Application System, Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract This study proposes a blue-green light-emitting diode light source system for jaundice phototherapy instrument. Based on the process of light transmission through skin and tissues and the process of conversion between bilirubin and phosgene, a light spectrum with a higher matching degree to the target spectrum is established via the spectral matching method. In addition, the light source array is designed and simulated, followed by the fabrication and illumination test of the corresponding light source system. The results indicate that the system achieves an average illumination of $32.9 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ with 81% uniformity. The uniformity is further improved by adding a Fresnel lens array to the light source system. When the ring distance of the Fresnel lens is 1 mm and the distance from the lens to the light source is 1 cm, the uniformity is increased to 85% and the illuminance is $31 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, which are in accordance with the design requirements.

Key words optical devices; light-emitting diode array light source; jaundice phototherapy; Fresnel lens; spectral matching; lens optical design

OCIS codes 230.3670; 170.3890; 220.3630

1 引言

黄疸是新生儿常见的症状,是由新生儿血液中

过量的 4Z,15Z-胆红素 IX α (Z-Z 型)异构体分子引起的。光疗法由于简便且疗效好在临床上成为一种常用的方法^[1-3],患儿的皮肤和组织中有 Z-Z 型胆红

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-11-25; 录用日期: 2019-01-21

基金项目: 天津市教委科研计划(2017ZD06)、天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)、天津市高等学校国家级大学生创新创业训练计划(201810058024)

* E-mail: yuliyuan1219@126.com

素异构体分子、4Z,15E-胆红素 IX α (Z-E 型)异构体分子和光红素(LR)。其中 Z-Z 型和 Z-E 型胆红素异构体分子在光照射下可以转化成 LR,LR 的亲水性高,与其他几种异构体相比更易溶于水,可以通过胆汁、体液、尿液排出体外,达到治疗目的。

由于发光二极管(LED)光源的优越性,国内外已经开展了对 LED 光源光疗仪的研究。Sebbe 等^[4]通过小白鼠实验将卤素灯光源的光疗仪与 LED 光疗仪相比较,发现 LED 光疗仪使白鼠体内胆红素降解的速度更快。Agati 等^[5]通过临床实验将蓝光和蓝绿光相比较,发现蓝绿光的治疗效果比单纯的蓝光好。Ebbesen 等^[6]发现主波长为 450 nm 的蓝光与主波长为 490 nm 的青光相比,由 Z-Z 胆红素异构体转化为 LR 的转化率没有明显的差异。在胆红素光照实验中发现 460 nm 左右波长的蓝光最易被胆红素吸收。但胆红素位于皮下血管的血清中,光需要穿透皮肤和血管壁等才能到达血管内部使胆红素发生反应。因此,胆红素异构化效率与皮肤的穿透及白蛋白的含量等有重要联系^[5,7]。研究人员采用紫外-可见光分度计在避光条件下测定 420~800 nm 波段内标准胆红素的吸收光谱曲线作为光谱匹配的目标光谱^[8]。由于光线要通过皮肤和组织才能照射进血液,并且光线在皮肤和组织中的传递过程更复杂。Lisenko 等^[9]在对胆红素异构化效率进行理论仿真研究时,建立胆红素光致异构化的模型,并通过模型来计算 LR 的合成率。同时,他们在研究中考虑了皮肤的精细组织和 ZZ \rightarrow LR、ZZ \leftrightarrow ZE 的转换率^[10],仿真得到使胆红素异构化效率最高的光谱范围为 484~496 nm。本课题组也应用阵列透镜进行了光谱范围在 490 nm 左右的黄疸光疗仪光源系统的设计研究^[11]。

本文设计了一个蓝绿光 LED 黄疸光疗仪光源模块,其光谱范围在 484~496 nm 之间。利用光谱匹配

方法,获得与目标光谱相近的光谱光源,并结合菲涅耳透镜增加光照均匀度,使光源模块符合设计要求。

2 光源模块的设计

2.1 目标光谱

人体的皮肤由真皮和表皮组成。光穿透皮肤的深度与光波长有关,皮肤通常有几毫米厚,计算光致异构化率需要考虑全部深度的真皮组织。假设所有的胆红素都在真皮中,血管在深度上均匀分布,一种胆红素 a 转化为另一种胆红素 b 的转换率与表皮表面垂直方向的辐射密度 $E(z, \lambda)$ 成正比。照射组织深度表示为 z 。最初的胆红素异构体 a 的摩尔分数表示为 C_a ,对光的吸收系数为 $\delta_a(\lambda)$;转化后的胆红素异构体 b 的摩尔分数表示为 C_b 。在波长为 λ 的光照下,胆红素异构体 a 的光致异构化产率为 $\theta_{ab}(\lambda)$ 。

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = C_a \frac{\lambda \ln 10}{L_d N_u h c} \times \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(z, \lambda) \delta_a(\lambda) \theta_{ab}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为光波长的上、下限; z_1 和 z_2 为照射组织深度的上、下限; t 为照射时间; h 为普朗克常数; c 为光速; N_u 为阿伏伽德罗常数; L_e 和 L_d 分别指表皮和真皮的厚度, $z_1 = L_e$, $z_2 = L_e + L_d$ 。

在光照条件下产生的胆红素异构体 LR 可以快速排出体外,光照时间决定了 LR 的产生率。但是 LR 的产量很低,并且由光致异构化产生的 ZZ \rightarrow LR 的转换速度很慢。与此同时,在光照下 ZZ \leftrightarrow ZE 的转换是可逆的(ZZ \rightarrow ZE, ZE \rightarrow ZZ)。在光照区域内 ZZ 胆红素分子与 ZE 胆红素分子之间存在动态平衡,即 ZZ \leftrightarrow ZE 在同一方向上的转化率相同。在光疗系统下 Z-Z 胆红素异构体转化为无毒水溶性的 LR 的产生率可表示为

$$M_{LR} = \frac{C_T \lambda}{L_d N_u h c} \frac{\int_{z_1}^{z_2} dz \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(z, \lambda) \delta_{ZZ}(\lambda) \theta_{LR}(\lambda) d\lambda}{1 + \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(z, \lambda) \delta_{ZZ}(\lambda) \theta_{ZE}(\lambda) d\lambda / \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(z, \lambda) \delta_{ZE}(\lambda) \theta_{ZZ}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中: $C_T = C_{ZZ} + C_{ZE}$ 为组织中的总胆红素摩尔分数, C_{ZZ} 和 C_{ZE} 分别为 ZZ-胆红素和 ZE-胆红素的摩尔分数; δ_{ZZ} 和 δ_{ZE} 分别为 ZZ-胆红素和 ZE-胆红素的摩尔吸光系数; θ_{ZZ} 和 θ_{ZE} 分别为 ZZ-胆红素和 ZE-胆红素的光异构量子化产率。

Lisenko 等^[9-10]获得的胆红素异构体 LR 的产生率与波长的关系如图 1 所示。

2.2 光谱匹配

光谱匹配是由波长、强度、半峰全宽均不同的两个光谱合成一个目标光谱,即

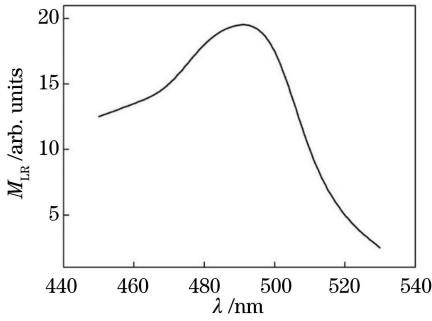


图 1 LR 的生成率 M_{LR} 与光波长的关系

Fig. 1 Relationship between LR generation rate M_{LR} and light wavelength

$$A = \exp\left\{\left[\frac{-(\lambda - \lambda_p)}{\Delta\lambda}\right]^2\right\}, \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{3 \times (A + 2 \times A^5)}, \quad (4)$$

$$P_{LED} = K_B \times P_B + K_G \times P_G, \quad (5)$$

式中: K_B 和 K_G 分别为蓝光和绿光的量; P_B 和 P_G 分别为蓝光和绿光的光谱线型; $\Delta\lambda$ 为光谱半峰全宽; A 为相对光谱功率分布; λ_p 为峰值波长; P_{LED} 为混合光谱功率分布。

LED 选择常见的主波长约为 480 nm 的 3 W 蓝光 LED(总光通量为 90 lm)和主波长约为 520 nm 的 3 W 绿光 LED(总光通量为 160 lm)。改变蓝光和绿光的比例绘制光谱图,使绘制的光谱与目标光谱匹配度达到最好。由此得出在最佳匹配光谱下两种光的峰值波长、光谱半峰全宽以及蓝光绿光的比例。图 2 是目标光谱(虚线)和匹配光谱(实线)的比较图。可以看出,经光谱匹配计算后,得到与目标光谱匹配度较好的光谱形式,其中,蓝光峰值波长 $\lambda_{PB} = 477$ nm,光谱半峰全宽 $\Delta\lambda_B = 60$ nm;绿光峰值波长 $\lambda_{PG} = 510$ nm,光谱半峰全宽 $\Delta\lambda_G = 40$ nm。绿光的比例 $K_G = 0.4$,蓝光的比例 $K_B = 0.6$,其匹配度达到 90%。因此,光谱匹配得到的所需蓝绿光 LED 的波长与实验选取的 LED 在最大程度上相似。利用绿光与蓝光为 2 : 3 的比例即可获得 Lisenko 等^[9-10] 仿真得到的 LR 的生成率最高的蓝绿光 LED 光源。

2.3 光源模块的设计

根据黄疸患儿体征和理想光疗标准^[12],设计的光斑面积为 $S = 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,受照面总辐照度 $E \geq 30 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,光均匀度不小于 80%。对于绿光,根据理想光疗标准,设辐照密度 $E_G = 2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,视见函数约为 0.5,光通量 Φ 约为 1024 lm。而对于蓝光,由于蓝光的视见函数约为

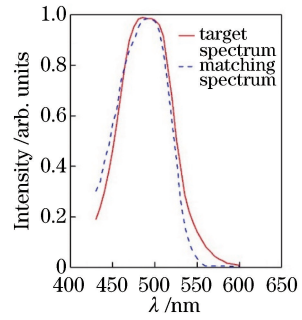


图 2 目标光谱和匹配光谱之间的比较

Fig. 2 Comparison between target spectrum and matching spectrum

0.09,用相同的方法计算,其光通量远小于 1024 lm。为了提高光疗的效果,将蓝光的最低光通量也设定为 1024.5 lm。根据上文得出蓝光与绿光的比值约为 1.5,定义蓝光的光通量为 1536.8 lm。

由上文得出光源由 20 个功率为 3 W 蓝光 LED 和 8 个功率为 3 W 绿光 LED 组成,如图 3 所示,其中 4、10~12、17~19、25 为绿光 LED,其他为蓝光 LED。采用铝基板做灯板以达到较好的散热效果。



图 3 蓝绿光 LED 阵列形式

Fig. 3 Blue-green LED array form

利用光线追迹原理对光源模型进行光学模拟,如图 4 所示,根据仿真的结果,在距离光源为 400 mm,面积为 $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的受照面上的照度均匀度达到 82.8%,达到了设计要求。

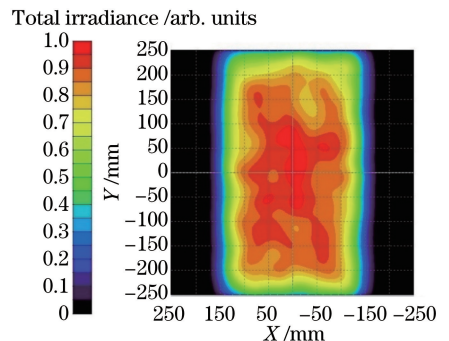


图 4 仿真得到受照面上的照度图

Fig. 4 Simulated illuminance map on illuminated surface

2.4 菲涅耳透镜的设计

为获得更均匀的光照效果,减少眩光效应,需要对透镜进行设计。考虑透镜效果和加工成本,最终确定为阵列形式的菲涅耳透镜。光线照射到菲涅耳透镜的环带面一侧,根据折射定律,光线发生偏转,每个环带面都相当于一个棱镜,光线在环带面处发生偏折,偏折后沿平行于轴线方向出射,最终照射在接收面上。正是菲涅耳透镜不同环带对光线的作用,使 LED 光源发出的光以等光强的形式叠加于接收面上,从而达到受照面照度均匀的目的。

在设计中,每个 LED 对应一个菲涅耳透镜单元,透镜阵列由 7×4 个圆形菲涅耳透镜组成,透镜厚度为 3 mm,环形半径为 40 mm,固定菲涅耳透镜的齿深为 1 mm。从单个菲涅耳透镜的环距和透镜到光源的距离两方面对照明效果进行仿真和分析。图 5 和图 6 分别为透镜环距和透镜到光源间的距离与均匀度的关系。经分析得到,当菲涅耳透镜的环距为 1 mm、透镜到光源的距离为 1 cm 时,均匀度达到最高约为 85%。

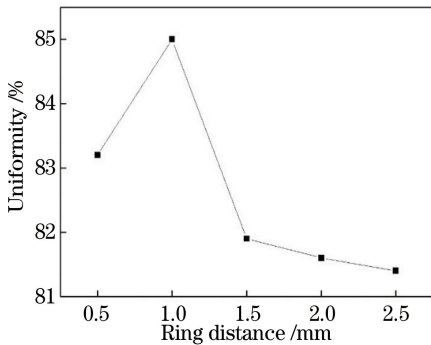


图 5 透镜环距与均匀度的关系

Fig. 5 Relationship between lens ring distance and uniformity

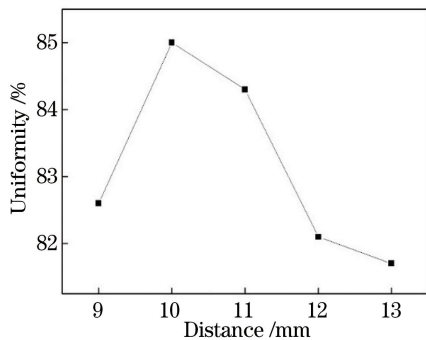


图 6 透镜到光源间的距离与均匀度关系

Fig. 6 Relationship between distance from lens to light source and uniformity

3 光源系统的照明效果测试

对以上设计的光源系统和透镜进行加工,并应用照度计对照明区域进行检测。经测试,光源光谱的主波长为 492 nm,与预期的 490 nm 主波长极为接近。将 $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的有效区域分成 6×10 个 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 正方形区域,测量点为各子区域的几何中心点,测量点间距为 100 mm^[11]。测量结果如图 7 所示。根据测量的数据进行计算得到,照度平均值为 $32.9 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,均匀度达到 81%,满足国家光疗设备安全专用要求中关于黄疸光疗仪均匀度的要求。

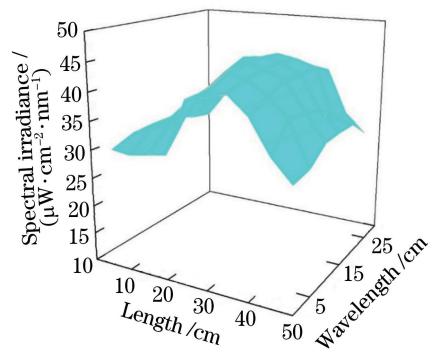


图 7 蓝绿光 LED 阵列的照度分布测试

Fig. 7 Illumination distribution test of blue-green LED array

对安装菲涅耳透镜后的光源系统进行测试,测量距离光源为 40 cm 处受照面的照度分布,如图 8 所示。照度下降为 $31 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,均匀度约为 85%,与仿真结果相符。由图可知,安装透镜后,在受照面上的均匀度有所提高,但是照度下降。其均匀度与未安装菲涅耳透镜相比有所提高,并且达到了设计要求。

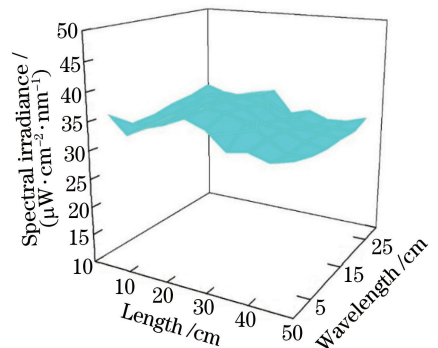


图 8 加透镜的光源系统的照度分布测试

Fig. 8 Illumination distribution test of light source system with lens

4 结 论

提出了一种新型的黄疸光疗光源系统方案。根据光线在皮肤和组织中的复杂的传递过程及胆红素和光红素之间的转化过程,通过光谱匹配建立与目标光谱匹配度较高的光源光谱,并以计算得到的波长、半峰全宽以及蓝绿光的比例为依据选取实际LED光源。对LED光源阵列进行设计、仿真以及加工后,对光源系统进行照度检测,其照度平均值为 $32.9 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,均匀度达到81%。为进一步提高光源系统的均匀度,设计了菲涅耳透镜阵列,当单个菲涅耳透镜的环距为1 mm、透镜到光源的距离为1 cm时,得到最佳均匀效果,经系统加工及测试后得到,照度为 $31 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,均匀度约为85%,与仿真结果相符。符合婴儿光治疗设备安全专用要求中的规定^[12],达到了设计要求。本研究对治疗新生儿黄疸有较高的应用价值,为提高黄疸光疗仪光源系统的光照效果提供了更加经济有效的方法。

参 考 文 献

- [1] Li J F. New progress in the treatment of neonatal jaundice[J]. Today Nurse, 2014(1): 22-24.
李俊芳. 新生儿黄疸治疗方法新进展[J]. 当代护士(下旬刊), 2014(1): 22-24.
- [2] Tan Q, Wei Z Q, Wang H H. Progress on treatment of neonatal jaundice [J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2013, 32(4): 232-235.
谭强, 韦祖巧, 王宏虹. 新生儿黄疸治疗进展[J]. 药学研究, 2013, 32(4): 232-235.
- [3] Hu J, Li X Y. Developments of neonatal jaundice phototherapy system [J]. China Medical Device Information, 2010, 16(7): 22-26.
胡江, 李晓原. 新生儿黄疸光疗仪的发展[J]. 中国医疗器械信息, 2010, 16(7): 22-26.
- [4] Sebbe P F, Villaverde A B, Moreira L M, *et al.* Characterization of a novel LEDs device prototype for neonatal jaundice and its comparison with fluorescent lamps sources: photopublisher-idapy treatment of hyperbilirubinemia in Wistar rats[J]. Spectroscopy, 2009, 23(5/6): 243-255.
- [5] Agati G, Fusi F, Donzelli G P, *et al.* Quantum yield and skin filtering effects on the formation rate of lumirubin [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 1993, 18(2/3): 197-203.
- [6] Ebbesen F, Agati G, Pratesi R. Phototherapy with turquoise versus blue light[J]. Archives of Disease in Childhood - Fetal and Neonatal Edition, 2003, 88(5): F430-F431.
- [7] McDonagh A F, Agati G, Fusi F, *et al.* Quantum yields for laser photocyclization of bilirubin in the presence of human serum albumin. Dependence of quantum yield on excitation wavelength [J]. Photochemistry and Photobiology, 1989, 50(3): 305-319.
- [8] Gan R T, Guo Z N, Lin J B, *et al.* Research for light-emitting diode-based neonatal jaundice therapeutic device light source [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0423003.
甘汝婷, 郭震宁, 林介本, 等. 新生儿黄疸治疗仪用LED光源的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0423003.
- [9] Lisenko S A, Kugeiko M M. Method forestimating bilirubin isomerization efficiency in phototherapy to treat neonatal jaundice [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2014, 81(5): 834-842.
- [10] Lisenko S A, Kugeiko M M. Method for calculation of light field characteristics in optical diagnosis problems and personalized laser treatment of biological tissues [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2013, 80(2): 271-279.
- [11] Niu P J, Zhu W R, Yu L Y, *et al.* Research and design of a blue and green light emitting diode phototherapy system based on fly eye lens for jaundice [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016, 33(4): 698-706.
牛萍娟, 朱文睿, 于莉媛, 等. 基于复眼透镜LED蓝绿光黄疸光疗系统的研究与设计[J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 33(4): 698-706.
- [12] China Food and Drug Administration. Medical equipment: Part 2 special requirements for safety of infant light therapy equipment: YY0669-2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
国家食品药品监督管理局. 医用电气设备: 第2部分: 婴儿光治疗设备安全专用要求: YY0669-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.