در دسترس بصورت الکترونیک @ www.jscw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۸، شماره ۲، (۱۳۹۷)۵۴-۴۵

مروری بر توسعه منابع نوری رنگ سفید

آتشه سلیمانی گرگانی*[۱]، راضیه جعفری[۲]، سعیده گرجی کندی[۳]

۱- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، مؤسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

۲- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، مؤسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ایران، صندوق پستی۴۴۱۳-۱۵۸۷۵.

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۲۳ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۴ در دسترس به‌صورت الکترونیک: ۹۷/۰۶/۱۰

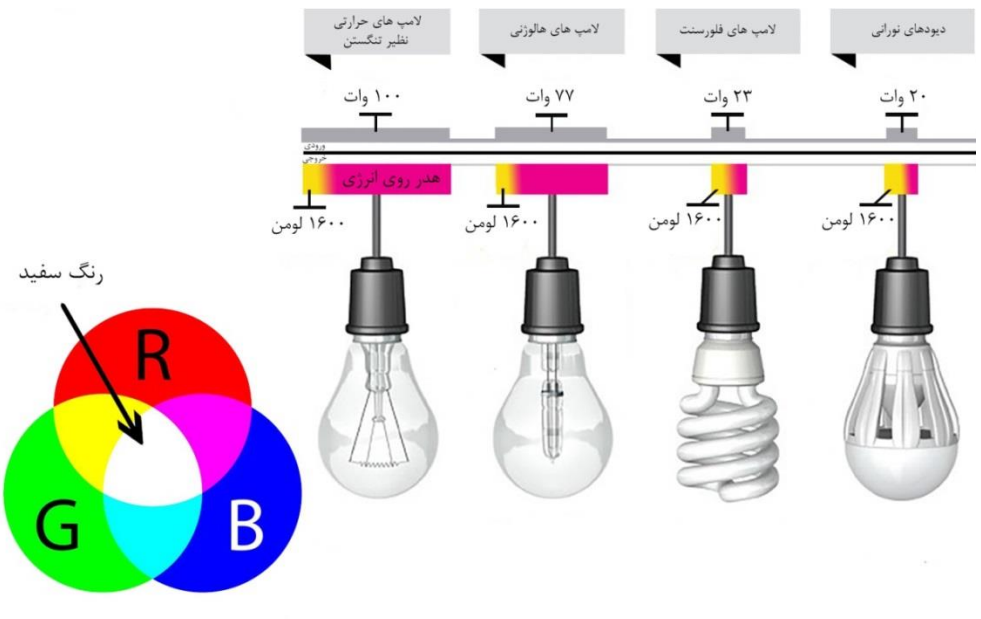
چکیده

توسعه منابع نوری با هدف تامین روشنایی و توجه به جنبه های اقتصادی و تجاری همواره مورد توجه محققین بسیاری بوده است. در ابتدا با توجه به هدر رفت بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی به انرژی تابشی و گرمایی به تدریج لامپ‌های فلورسنت با بازده انرژی بالاتر جایگزین لامپ‌های رشته‌ای شدند. در همین راستا و در جهت صرفه‌جویی بیشتر، توسعه منابع نوری منجر به تولید لامپ‌های کم مصرف و در نهایت دیودهای نورانی غیرآلی و آلی (منابع نوری حالت جامد[۱]) گردید. در مقاله حاضر، ابتدا پیشینه ساخت و توسعه منابع نوری مختلف مورد توجه قرار گرفته و در ادامه به توصیف خواص و کاربردهای نورهای سفید حالت جامد پرداخته می‌شود. در این راستا، ساختار و عملکرد دیودهای نورانی آلی و غیرآلی تشریح شده و به پیشرفت‌های صورت گرفته در لوازم روشنایی حالت جامد اشاره می گردد. در پایان ضمن اشاره به روشهای کمی نمودن ویژگی‌های دیودهای نورانی و بررسی تاثیر رنگی آن‌ها به توصیف ایده‌هایی جهت بهبود عملکرد روشنایی و دوام منابع نور سفید پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی

منابع نوری، لامپ‌های حالت جامد، دیودهای نورانی، لامپ‌های فلورسنت، نور سفید.

چکیده تصویری



[1] Solid-state

*نویسنده مسئول: asoleimani@icrc.ac.ir

Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science and Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir

Journal of Studies in Color World, Vol. 8, No. 2, (2018) 45-54

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

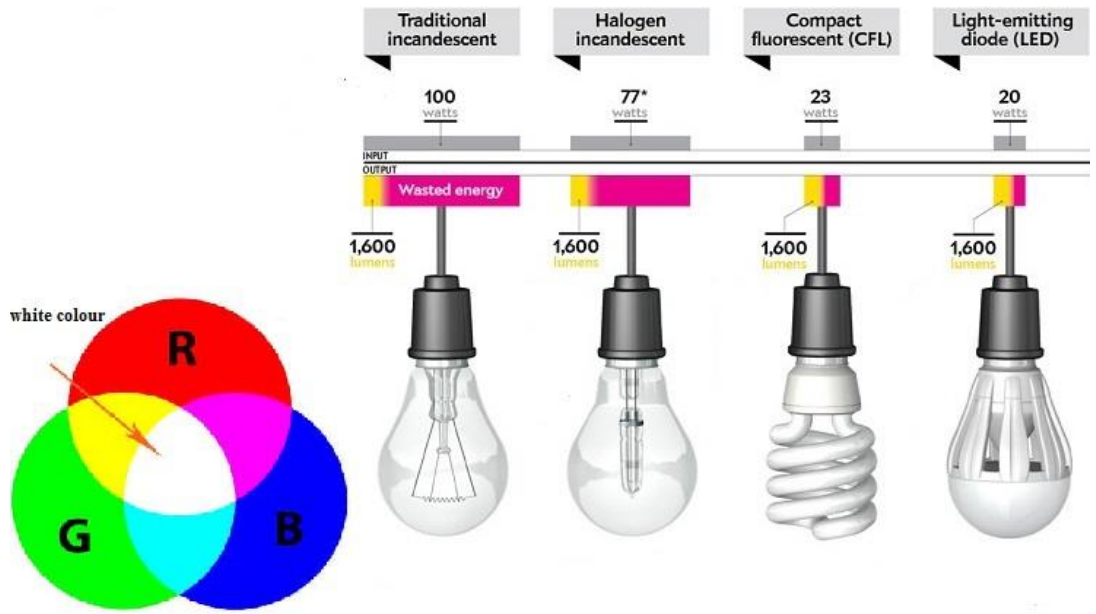
A Review on Development of White Light Sources

Atasheh Soleimani- Gorgani*[1], Razieh Jafari [2], Saeideh Gorji- Kandi[3]
1- Department of Printing Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.
2- Department of Colour Physics, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654 , Tehran, Iran.
3- Department of Polymer & Color Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytecnic), Tehran, Iran. P. O. Box: 15875-4413.

Abstract
Many researchers are concerned about the light sources development to consider in the economic and commercial aspects of lighting supply. Initially, the bulb lamps were gradually replaced by fluorescent lamps with higher energy efficiency to reduce in conversion of electrical energy to thermal energy. Afterwards, the need of more energy saving caused the development of the solid state white lights with low consumption energy. These solid-state white light emitting diods are sufficiently durable and competent to apply for home and general usages. In addition, the high energy saving of solid state white light emitting diods headed them to replace incandescent bulbs. In the first part of this paper, the history of the light source development has been considered and then the white solid state properties and applications are described. Incidentally, the structure and performance of organic and inorganic light emitting diods are explained and the solid state lighting devices developments are clarified. Futhermore, some quantization methods to characterise the light emitting diods and investigation on their color effect with some ideas introduce to improve the LEDs lightness performance and durability have been reviewed.

Keywords
Light sources, Solid state lamps, LEDs, Flourescent lamps, White light.

Graphical abstract



Corresponding author: asoleimani@icrc.ac.ir

۱- مقدمه

بدیهی است نخستین منبع نورانی مورد استفاده بشر، خورشید بوده است. انسان‌ها در طول روز، نور و گرما را از خورشید و در شب از آتش می‌گرفتند. غارنشینان به تدریج، نحوه استفاده از چراغ‌هایی را که با چربی حیوانی می‌سوخت را آموختند و از دوده چراغ نیز برای خلق آثار هنری بر دیوار غارها بهره گرفتند. بعدها، چراغ‌ها با روغن‌های گیاهی روشن شدند تا این که سرانجام نوعی از هیدروکربن‌های معدنی (زغال سنگ) مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در اروپا، شمع‌ها (برای مردم فقیر) و چراغ‌های پیزوری طی قرن‌های متمادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند تا اینکه در اواخر سال ۱۷۹۰ به دنبال اکتشاف گاز زغال سنگ توسط اسکاتزمن[۱] و ویلیام مورداچ[۲]، گاز بطور فزآینده‌ای به سوخت برتر برای مصارف روشنایی تبدیل شد درحالی‌که در بسیاری از مناطق چراغ‌های نفتی همچنان مورد استفاده بودند. به مدت چند دهه گاز در یک محفظه باز مانند مشعل[۳] می‌سوخت. شدت این نور پس از اختراع ایور وان ولسبچ[۴] (۱۸۹۰) و در نتیجه استفاده از توری گازی گداخته از نوع اکسید توریم به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. این مخترع همچنین، تولید سیم‌های هادی از فلزاتی مانند اسمیم (که بعدها با تانتالوم و سپس رشته‌های تنگستن جایگزین شدند) را آزمایش کرد. فلزاتی مانند اسمیم نسبت به رشته‌های کربنی مورد استفاده در لامپ‌های برق خلأ[۵] که نخستین بار توسط توماس ادیسون[۶] و جوزف سوان[۷] (اواخر سال ۱۸۷۰) ساخته شدند موادی کارآمدتر و بادوام‌تر هستند. در قرن بیستم لامپ‌های رشته‌ای پیشرفته که از گاز پرشده بودند متداول شدند درحالیکه اتصالات و آباژورها چندین سال بود که تحت دو نوع نورپردازی همگام با مد و فناوری روز دائماً تغییر می کردند [۱].

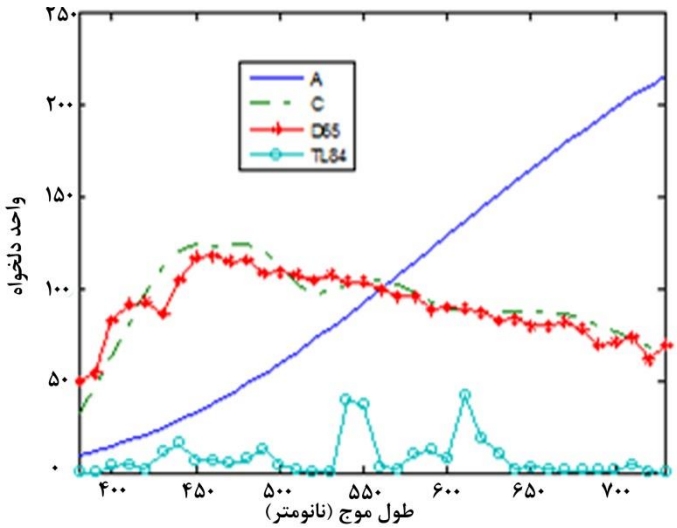
اگرچه عملکرد لامپ قوسی کربنی[۸] در سال ۱۸۰۲ توسط هامفری دیوی[۹] معرفی گردید اما حدود شش دهه طول کشید تا این لامپ بصورت تجاری به بازار ارائه گردد. با اختراع تصاویر متحرک، یک لامپ پرقدرت برای نمایش عمومی آن‌ها مورد نیاز بود و لامپ‌های قوسی کربنی برای این منظور و نیز برای چراغ نورافکن صحنه استفاده شدند [۲]. پس از اختراع یک منبع نور قوسی با قابلیت کنترل بیشتر بر پایه قوس گاز زنون پر فشار[۱۰] (آلمان سال ۱۹۴۰) [۲] ، لامپ‌های قوس کوتاه زنون[۱۱] به طور کامل جایگزین لامپ‌های قوسی کربنی در پروژکتورهای سینما شدند [۳]. پیش از ابداع لامپ تخلیه الکتریکی زنون[۱۲]، نور فیلترشده از یک لامپ قوس کربن اساس آزمایش ثبات نور منسوجات بود. امروزه لامپ‌های بسیار کوچک تخلیه الکتریکی زنون و هالوژن/ زنون (HID[۱۳]) با شدت بالا به طور گسترده ای در چراغ‌های جلوی اتوموبیل به کار می‌روند. هرچند بسیاری از مردم شدت نور سفید مایل به آبی این نوع لامپ‌ها را کورکننده می دانند این مشکل می‌تواند با بکارگیری یک رنگ فتولومینسانس با پرتو نور زرد در پوشش لنز پلی کربنی قالب‌گیری شده تا حدودی حل شود [۳].

به دنبال کشف گازهای کمیاب توسط ویلیام رامسی[۱۴] نوع دیگری از لامپ تخلیه الکتریکی گازی که به لامپ نئونی معروف است توسط جورج کلاد[۱۵] (۱۹۱۰) اختراع شد و از سال ۱۹۲۰ به بعد لامپ تخلیه الکتریکی نئون نارنجی-مایل به قرمز برای استفاده در آگهی‌های تبلیغاتی رایج گردید. ازآنجاکه در صورت استفاده از ترکیب گازها تخلیه الکتریکی در ولتاژ اعمالی پایین‌تری آغاز می‌شود معمولاً نئون به‌همراه مقدار کمی آرگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه گاز غالب آرگون باشد برافروختگی نهایی به رنگ سبز خواهد بود. اگرچه لامپ‌های نئون کوچک در ابتدا بطور گسترده‌ای به عنوان نشانگر روشن بودن وسایل الکتریکی مورد استفاده قرار گرفتند نوع رشته‌ای آنها اساس روشنایی شبیه‌أسازی شده برای صفحه نمایش تلویزیون‌های اولیه بودند که توسط جان لاژی بیرد[۱۶] (۱۹۲۰) ابداع شد [۴، ۵].

در ابتدا ، لامپهای بخار جیوه کم فشار ابداع شد و به دنبال آن لامپ‌های فشار بالای تجاری مورد استفاده قرار گرفت [۶]. ازآنجاکه یک لامپ فشار پایین، تابش فرابنفش قابل توجهی تولید می‌نمود با پوشش دهی سطح داخلی محفظه شیشه ای آن با یک لایه مناسب از فسفر امکان کسب نور سفید روشن فراهم می گردید. امروزه لامپ‌های فلورسنت (مهتابی) علاوه بر مصارف خانگی به‌دلیل دوام و بازدهی بهبود یافته آن‌ها در مقایسه با لامپ‌های رشته ای بطور عمده برای مصارف تجاری و در فروشگاه‌ها استفاده می شوند [۷]. همچنین قابلیت آنها در کاهش مصرف انرژی منجر به ترویج گسترده استفاده از لامپ‌های کوچک فلورسنت خانگی تحت عنوان لامپ کم مصرف یا CFL[۱۷] شده است. بیشتر لامپ‌های کم مصرف خانگی از فسفرهای پهن باند با انتشار نور سفید استفاده می‌کنند اما کاربرد لامپ‌های پوشیده شده با مخلوط متعادلی از سه فسفر با پهنای باند کم باعث می شود که ظاهر رنگی اشیاء به زمانیکه تحت نور روز دیده می شوند نزدیک‌تر شود [۸]. درحالی‌که همواره بحث تعادل میان بازده نوری[۱۸] (یعنی هزینه‌های جاری) و ظاهر خوب رنگ مطرح است گفته می شود که لامپ TL84 با کاربرد گسترده جهت روشنایی فروشگاهها، یک استثناء در این زمینه است چراکه رنگی نزدیک‌تر به رنگ مشاهده شده تحت نور روز را در مقایسه با نمونه‌های قدیمی‌تر لامپ‌های فلورسنت با بازدهی کمتر تضمین می‌کند [۹]. توزیع انرژی طیفی منابع نوری مختلف جهت مقایسه در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Scotsman
[2] William Murdoch
[3] Batswing
[4] Aur Von Welsbach
[5] Vacuum light bulb
[6] Thomas Edison
[7] Joseph Swan
[8] Carbon arc lamp
[9] Humphrey Davy
[10] High pressure xenon arc
[11] Xenon short arc lamps
[12] Xenon discharge lamp
[13] High Intensity Discharge
[14] William Ramsay
[15] Georges Claude
[16] John Logie Baiyr
[17] Compact Fluorescent Lamp
[18] Luminous efficiency

مقاله



شکل ۱- توزیع انرژی طیفی منابع نوری مختلف [۱۰].

۲- بهبود روشنایی‌های متداول

مقدار قابل توجهی از انرژی الکتریکی در لامپ‌های رشته‌ای استاندارد بجای نور مرئی، تبدیل به تابش زیرقرمز و گرما می‌شود. بنابراین به لحاظ هزینه روزافزون انرژی و مزایای زیست‌محیطی بالقوه یافتن جایگزینی کارآمدتر و بادوامتر همواره مطلوب بوده است. برغم آنکه روشنایی لامپ‌های فلورسنت در مقایسه با لامپ‌های متداول تنگستنی از زیبایی کمتری برخوردار است اما استفاده از آنها همواره مقرون به صرفه‌تر است. لامپ‌های کم‌مصرف، بر خلاف لامپ‌های فلورسنت مهتابی که کل اجزای مدار در پایه لامپ گنجانده شده‌اند، بصورت یک مجموعه کامل آماده بهره برداری هستند. در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای، لامپهای کم مصرف، صرفه انرژی بالاتر و طول عمر بیشتری دارند (جدول ۱). برای نمونه یک لامپ ۱۲ وات کم مصرف می‌تواند با طول عمر بالاتر جایگزین یک لامپ تنگستنی ۶۰ واتی شود.

بیشتر مردم با اصطلاحات نورهای سفید سرد (یخی)، سفید گرم (آفتابی) و نور روز (مهتابی) برای لامپ‌های فلورسنت آشنایی دارند، ولی این دسته‌بندی‌ها با دمای رنگ همبسته (CCT) دقیق‌تر تعریف می شوند (جدول ۱). دمای رنگ همبسته بصورت دمای محاسبه شده برای یک رادیاتور جسم سیاه تعریف می شود که رنگ دیده شده از آن در آن دما بیشترین شباهت را به رنگ منبع نوری مورد ارزیابی دارد و برحسب درجه کلوین بیان می شود. بنابراین، رنگ‌های مهتابی، یخی و آفتابی که به‌عنوان مثال بر روی لامپ‌های فلورسنت نوشته می شوند به ترتیب به دماهای ۶۵۰۰، ۴۲۰۰ و ۳۰۰۰ درجه کلوین مربوط می‌شوند.

یک عیب بزرگ لامپ‌های کم مصرف آن است که علیرغم اینکه بسرعت روشن می شوند اما روشنایی کامل آنها بلافاصله حاصل نمی‌شود. زمان کامل برای گرم شدن این لامپ‌ها (۳ تا ۵ دقیقه) بمیزان زیادی بستگی به دمای محیط دارد. همچنین، دفع این لامپ‌ها در محیط زیست به‌عنوان یک معضل جدی تلقی می گردد چون انواع آنها هنوز هم حاوی مقادیری از جیوه هستند.

پیشرفت‌هایی در زمینه لامپ‌های رشته‌ای تنگستنی بخصوص در ساخت لامپ‌های هالوژن تنگستن کوارتز (QTH)[1] حاصل شده بنحوی‌که رشته تنگستن قادر است دمایی بالاتر از دمای کاربری لامپ‌های معمولی را تحمل کند. دلیل این امر آن است که تنگستنی که از رشته لامپ بخار شده تشکیل یک ترکیب هالید داده و بجای خوردن رشته یا رسوب روی جداره داخلی حباب، دوباره روی خود رشته رسوب می کند. در نتیجه، طول عمر، شدت تابش و بازده لامپ تا حدود ۲۰ لومن بر وات نسبت به لامپ‌های تنگستن معمولی افزایش می‌یابد. حباب‌های QTH بدلیل کوچک‌تر بودن در چراغ‌های جلوی اتومبیل، نورافکن‌های کوچک صحنه، نورافکن‌های امنیتی و پروژکتورهای خانگی بطور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۱۲]. برغم بازدهی بهتر لامپ‌های هالوژن در مقایسه با لامپ‌های تنگستن معمولی، اتحادیه اروپا قصد دارد آنها را از رده خارج کند. در حال حاضر، لامپ‌های کم مصرف می‌توانند بهترین گزینه برای روشنایی خانگی تلقی گردند. اما با توجه به سرعت رشد لامپ‌های حالت جامد و بازده و دوام بهتری که دارند این احتمال هم وجود دارد که این نوع از لامپ‌ها بتدریج در طی ۱۰ سال آتی جایگزین لامپ‌های کم مصرف شوند.

[1] Quartz tungsten halogen (QTH)

جدول ۱- مقایسه لامپ‌های رشته‌ای معمولی و لامپ‌های کم‌مصرف [۱۱].

منبع نوری	متوسط طول عمر (h x 103)	دمای رنگ همبسته (^{o}K)	راندمان نوری (lumens/watt)
لامپ‌های حرارتی نظیر تنگستن	۰/۷۵-۱/۵	۲۸۰۰	۱۰-۱۵
لامپ‌های هالوژنی	۲-۲/۵	۳۰۰۰	۱۵-۲۵
لامپ‌های فلورسنت	۶-۱۲	۲۸۰۰	۵۰-۶۰

۳-پیشرفت‌ها در لوازم روشنایی حالت جامد (دیودهای نورانی)

در ابتدای قرن بیستم، دو دانشمند بطور مستقل، خاصیت الکترولومینسانسی بلورهای کاربوراندوم[1] را درحالیکه ولتاژی بین بلور و سیم فولادی اعمال می‌شد (آشکارسازهای دیودی در رادیوها) ثبت کردند. ولادیمیرویچ لازف[2]، یک تکنسین روسی رادیو به آزمایش جامعی بر روی ویژگی‌های این دیود و نور قرمزی که ساطع می‌کرد پرداخت و آنرا برای استفاده در صنعت ارتباطات از راه دور مناسب تشخیص داد [۱۳]. با اینحال، تجاری سازی این پدیده تا دهه ۱۹۶۰ بطول انجامید. به دنبال تولید نخستین دیود نورانی قرمز رنگ بوسیله فسفید آرسنید گالیم بلورین[3] [۱۴] انواع دیودهای نورانی زرد، نارنجی و سبز هم به بازار آمد اما حدود ۲۰ سال طول کشید تا دیودهای نورانی لاجوردی نیتریدگالیم[4] روانه بازار شدند. بطور اتفاقی، کاربید سیلیسیم[5] به‌عنوان پایه نخستین نوع دیودهای نورانی آبی رنگ در فناوری متعلق به روسها بکار رفت تا خیلی زود جایش را به انواع نیترید گالیم ژاپنیها بدهد که از راندمان خیلی بالاتری برخوردار بود.

بسیاری از لوازم روشنایی حالت جامد را براحتی می توان دیودهای نورانی خواند ولی دیودهای نوری به تنهایی بیشتر اشاره به دیودهای نورانی غیرآلی (ILED)[6] دارد تا دیودهای نورانی آلی (OLED)[7]. دیودهای نورانی آلی خود به دو نوع دیودهای نورانی کوچک ملکول (SMOLED)[8] و دیودهای نورانی پلیمری که در آن ها لایه ساطع کننده نور از جنس پلیمر است تقسیم می‌شوند. در ساده ترین شکل، تمام دیودهای نورانی را می توان طوری ساخت که نور رنگی را در یک پهنای موج[9] نسبتاً باریک ساطع کنند. در این حالت، آنها جایگزینی مناسب برای ترانزیستورهای لایه نازک (TFT)[10] در نمایشگرهای رنگی هستند که به نور پس زمینه سفید و فیلترهای قرمز، سبز و آبی (RGB)[11] برای هر پیکسل نیاز دارند [۱۵]. برای اینکه یک دیود نورانی، نور سفید رنگ منتشر سازد باید به یکی از طرق زیر تهیه گردد:

استفاده از سیستمی که نوری با طول موج کوتاه (فرابنفش تا آبی) تولید کند تا یک یا دو فسفر پوشش داده شده به رنگ‌های فلورسانس زرد، نارنجی، سبز یا قرمز را تهییج نماید.

ساخت یک وسیله کامپوزیتی از سه ماده ساطع کننده نور به رنگ‌های قرمز، سبز و آبی که بعداً با هم ترکیب شوند [۱۶].

دیودهای نورانی و دیودهای نورانی آلی که نور سفید ساطع می‌کنند بترتیب با عناوین WLED[12] و WOLED[13] نامیده می‌شوند.

۳-۱- دیودهای نورانی غیرآلی

دیودهای نورانی بر پایه بلورهای نیترید گالیم (GaN) که نور آبی روشنی را در طول موج ۴۴۰ نانومتر از خود ساطع می‌کنند، نخستین بار در حدود ۴۰ سال پیش بصورت تجاری تولید شدند [۱۷]. بدنبال آنها چیپ‌های الکترونیکی بر پایه نیترید ایندیم (InN, ۴۷۰ نانومتر) و نیترید گالیم آلومینیم (AlGaN) با طول موج صدور بین ۳۹۸-۳۷۵ نانومتر نیز ساخته شدند. نیترید گالیم ایندیم (InGaN) بسته به نسبت ایندیم و گالیم می‌تواند نورهایی با طول موج نزدیک به فرابنفش تا طول موج‌های نور سبز را ساطع کند [۲۰-۱۸].

دیودهای نورانی نور سفید که امروزه بطور گسترده‌ای برای لامپ‌های کوچک ولتاژ پایین، مشعل‌های دستی، دکوراسیون‌های شاد، چراغ‌های دوچرخه و غیره استفاده می شوند، با قرار دادن یک چیپ نیترید گالیم (ساطع‌کننده نور آبی) در زمینه‌ای حاوی فسفر زرد بر پایه یک عنصر خاکی کمیاب (به طور معمول سریم) که با گارنت آلومینیم یتریوم[14] (AlYGa) دوپ شده است، ساخته می‌شوند. خروجی نور هر یک از دیودهای نورانی بوسیله سر گنبدی شکل محفظه در یک پرتو باریک (معمولاً بین ۲۵-۵۰ درجه) متمرکز می‌شوند که در این محفظه چیپها نیز کپسوله شده‌اند. چیپ‌های دیودهای نورانی که تولید انبوه شده‌اند را می توان بصورت گروهی در کنار هم نصب کرد تا لامپ خیلی پرنورتری را بدست آورد. به این ترتیب آرایه دیودهای نورانی ممکن است دارای لنزهای ثانویه برای متمرکز ساختن تابش نور باشند تا به طور مثال الگوی نور بیضی شکل مورد نیاز را برای روشنایی خیابان و تونل ایجاد نمایند. گروه‌های کوچک‌تر از دیودهای نورانی نیترید گالیم که داخل لامپ‌های روکش فسفری نصب می‌شوند نیز بعنوان یک جایگزین عاری از جیوه برای لامپ‌های فلورسنت معمولی تولید می‌شوند. محدوده آنها از لامپ‌های فلورسنت بزرگ تا لامپ‌های فلورسنت مینیاتوری تغییر می‌کند که برای روشنایی یدک‌کش‌ها و قایق‌های کوچک کاربرد دارند. مواد تشکیل دهنده چیپ‌های دیودهای نورانی دارای ضرایب شکست بزرگی هستند (۲/۵ =η یا حتی بیشتر)، بنابراین مقداری از نور در داخل خود چیپ دیودهای نورانی در اثر چندین مرحله بازتابش داخلی تلف می‌شود. کاهش بیشتر در تابش نور ممکن است با بازتابش برگشتی از لایه سطحی ذرات فسفر با توزیع یکنواخت ذرات یا از دیواره‌های محفظه لامپ ایجاد شود هرچند استفاده از سطوح پخش‌کننده نور در دیواره‌ها می‌تواند تا اندازه‌ای از میزان کاهش تابش نور جلوگیری کند. در نتیجه بازده دیودهای نورانی بوسیله چگونگی هدایت نور در ساختار داخلی آنها محدود می‌شود که با تغییر ساختار از طریق کاربرد الگوهای ویژه هندسی در بین سطوح شیشه‌ای یا در فصل اشتراک اکسید قلع ایندیم (ITO) و سطح زیرآیند (عموما شیشه) بازده نهایی قابل افزایش است. با استفاده از مدلسازی ریاضی می توان الگوی تابش انواع دیودهای نورانی سفید رنگ را پیش‌بینی نمود [۲۳-۲۱].

در مورد دیودهای نورانی، بهترین شبیه‌سازی برای روشنایی روز (مهتابی) استفاده از ترکیب یک دیودنورانی فرابنفش (UV) و مخلوطی از دو یا سه فسفر جهت ایجاد یک طیف پهن‌تر است (شکل ۲). این لامپها بازده خیلی

[1] Carborundum (silicon carbide)
[2] Vladimirovich losev
[3] Crystalline gallium arsenide phosphide
[4] Gallium nitride
[5] Silicon carbide
[6] Inorganic Light Emitting Diode
[7] Organic Light Emitting Diode
[8] Small Molecules Light Emitting Diode
[9] Wave band
[10] Thin Film Transistors
[11] Red, Green,Blue
[12] White Light Emitting Diode
[13] White Organic Light Emitting Diode
[14] Yttrium aluminum garnet

مقاله

کمتری داشته و از یک دیود نورانی آبی با یک فسفر گران‌تر تشکیل شده‌اند [۲۴]. ذرات فسفر موجود در دیودهای نورانی ممکن است بصورت مخلوط وجود داشته باشند و یا در دو یا چند لایه مشخص قرار گرفته باشند.

روش دیگر در تولید دیودهای نورانی، کاربرد نیترید گالیم ایندیم In/GaN بر پایه فسفر و یا استفاده از مخلوط فسفرهای معمولی و فسفرهای بهره‌مند از نانوفناوری نوین با نقاط کوانتومی (QD) است [۲۵]. این نوع دیودهای نورانی با بازده بالا می‌توانند از ماده نیترید گالیم ایندیم InGaN بر پایه نیترید گالیم GaN باشند یا اینکه نقاط کوانتومی‌ای باشند که بر روی نیترید گالیم ایندیم InGaN قرار گرفته اند [۲۶]. نقاط کوانتومی بر پایه سولفید روی یا کادمیم، براساس اندازه‌شان که تعیین کننده رنگ نور ساطع شده از آنهاست انتخاب می‌شوند [۲۹-۲۷]. بطور مشابه، کپسوله کردن نقاط کوانتومی بر پایه نانوبلورهای فسفید ایندیوم که نور قرمز ساطع می‌کند با یک دیود نورانی سفید بر پایه فسفر زرد نیز نوری خیلی نزدیک به نور روز (مهتابی) می‌دهد [۳۰]. آنچه که بیشتر مورد توجه قرار گرفت، کشف اتفاقی این مسأله بود که پوشش‌دهی یک دیود نورانی رنگ آبی با نقاط کوانتومی از نوع نانوبلورهای سلنید کادمیم منجر به تابش نور سفید گرم (آفتابی) شبیه به لامپ رشته‌ای می‌گردد [۳۱، ۳۲].

هر چند که عمده دیودهای نورانی سفید موجود در بازار از چیپ‌های نیترید گالیم ایندیم In/GaN استفاده می‌کنند ولی یک نوع دیود نورانی متفاوت بر پایه سلنید روی (ZnSe) نیز مورد بررسی قرار گرفته و ابداع شده است [۳۴، ۳۳]. بلورهای سلنید روی را می توان روی خود سلنید روی یا گرافیت به روش فاز بخار گازی (MOVPE)[1] و با استفاده از واکنش‌گرهای روی و هیدروژن سلنید رشد داد [۳۵، ۳۶]. زمانیکه ولتاژ مشخصی به بلورهای سلنید روی اعمال می‌شود آنها نور آبی رنگی از خود ساطع می‌کنند ولی اگر زیرایندی که روی آن رسوب داده می‌شوند نیز از جنس سلنید روی باشد، آنگاه زیرایند مقداری از نور آبی را جذب کرده و در اثر فتولومینسانس داخلی، باند پهنی را در نور زرد/قرمز منتشر می‌سازد که سبب یک نور ترکیبی سفید رنگ در خروجی می شود که بسیار شبیه به منحنی A نشان‌داده شده در شکل ۲ می‌باشد.

۳-۲-دیودهای نورانی آلی

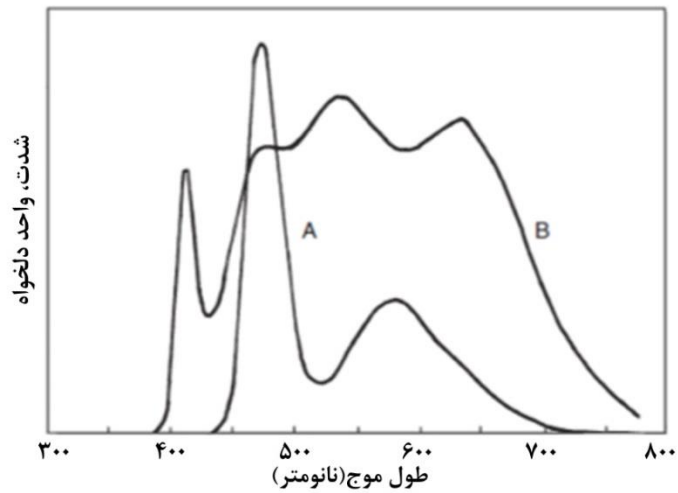
دیودهای نورانی آلی از لایه‌های بسیار نازک حاوی مواد شیمیایی مخصوص [۳۷] مابین لایه‌های بیرونی کاتد و آند [۳۸] ساخته می‌شوند. لایه آند از پوشش شفاف بسیار نازکی از جنس ایندیم تین اکساید ITO (حدود ۱ میکرومتر) تشکیل می‌شود [۳۹]. سطح بیرونی یک دیود نورانی پلیمری حاوی یک کاتد بازتابنده و رسانا (معمولاً کلسیم/آلومینیوم، کلسیم یا فلوراید لیتیم/آلومینیم) می‌باشد. بین آند و کاتد لایه‌هایی بر روی هم قرارگرفته‌اند که از ماده‌ای که نقش ساطع کننده الکترون (اتصال نوع n) را دارد و دیگری نقش انتقال بار مثبت (اتصال نوع p) را برعهده دارد تشکیل شده‌اند. بین این لایه‌ها یک ماده آلی لومینسانس قرار دارد که می‌تواند یک ماده شیمیایی خاص با ملکولی نسبتاً کوچک و یا پلیمر رسانا باشد. چنانچه ولتاژی از ساختار کامپوزیت عبور داده شود، بسته به نوع ماده شیمیایی یا پلیمر بکار رفته نورهایی به رنگ‌های مختلف ایجاد می‌شوند. پیشتر اشاره شد که دیودهای نورتاب آلی به دو گروه کوچک مولکول و پلیمری تقسیم می شوند. مطابق شکل ۳، ساختار اصلی دیودهای نورانی آلی پلیمری، ساده‌تر از دیودهای نورانی آلی کوچک ملکول می باشد [۴۰].

جهت تهیه دیودهای نورانی آلی با نور سفید، دیود نورانی آلی توسط لایه‌هایی ساخته می‌شود که دارای عناصری جهت تابش نورهای قرمز، سبز و آبی بوده و یکی روی دیگری نصب می‌شود. استفاده از دوپنت‌های RGB اجازه تولید دیودهای نورانی آلی نور سفید (WOLED)[2] را با شاخص نمود رنگ[3] خوب می‌دهد، نمونه‌ای از طیف انتشار این دیودهای نورانی آلی در شکل ۴ نمایش داده شده است [۴۱].

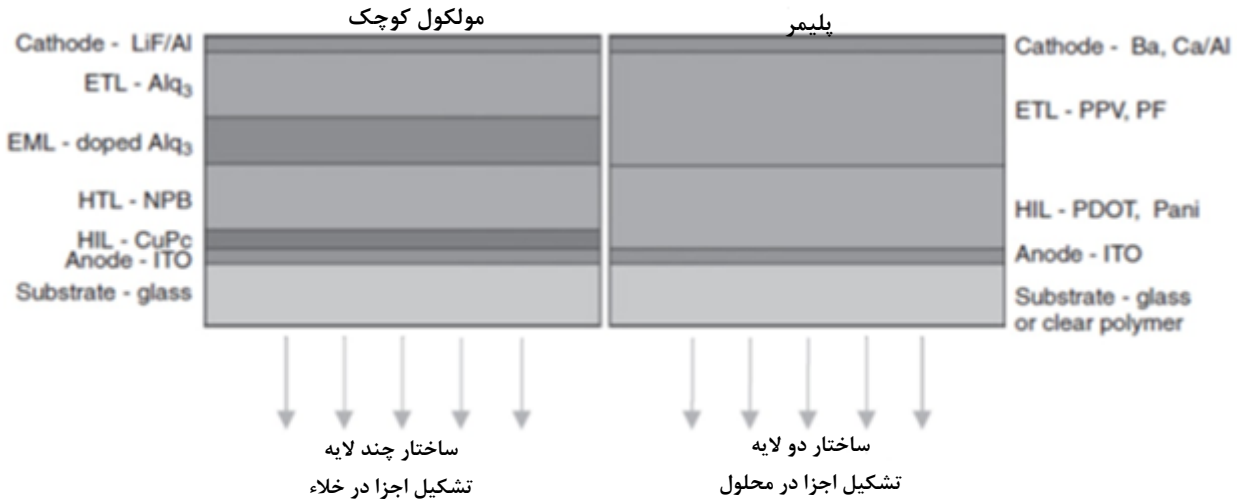
[1] Metalorganic Vapour Phase Epitaxy

[2] White Organic Light Emitting Diode

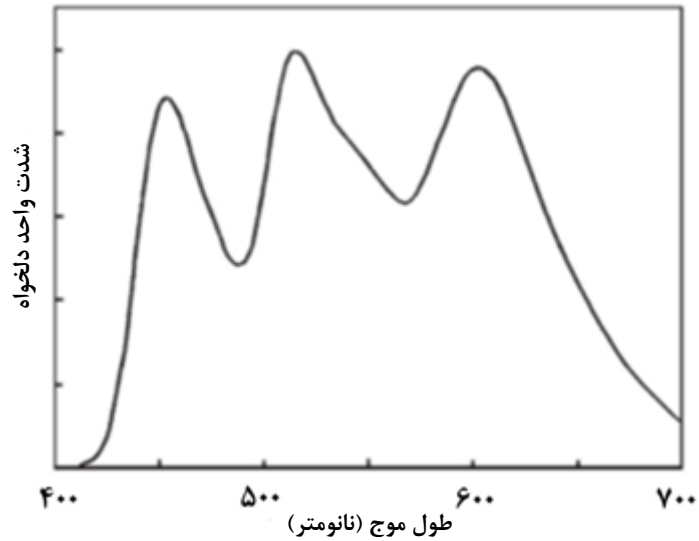
[3] Color rendering



شکل ۲- انتخاب فسفرها برای دیودهای نورانی سفید: منحنی A، دیود نورانی آبی + فسفر زرد، منحنی B، دیود نورانی فرابنفش + فسفرهای RGB [۲۴].



شکل ۳- مواد شیمیایی متداولی که در ساختارهای لایه‌ای دیودهای نورانی آلی بکار می روند: Alq_3، کمپلکس آلومینیم ۸- هیدروکسی کوئینولین؛ CuPc، فتالوسیانین مس؛ EML، لایه منتشرکننده نور؛ ETL، لایه انتقال الکترون؛ HIL، لایه تزریق حفره؛ HTL، لایه انتقال حفره؛ ITO، اکسید قلع ایندیم؛ NPB، نفتیل فتیل بنزیدین؛ pani، پلی آنیلین؛ PDOT، پلی اتیلن دی اکسی تیوفن؛ PF، پلی فلورین؛ PPV پلی فنیلن وینیلیدین [۴۰].



شکل ۴- طیف یک لامپ دیود نورانی آلی معمول از نوع RGB [۴۱].

امروزه دیودهای نورانی آلی مسطح با بازده ۵۰ لومن بر وات در بازار موجودند. انتظار می‌رود تا بازده آنها در آینده بیشتر افزایش یابد.

۴-اندازه‌گیری ویژگی‌های منابع نور دیودهای نورانی

۴-۱-تابندگی[1]

اندازه‌گیری شدت و شار[2] نورتابی دیودهای نورانی با روش‌های متفاوت از آنچه برای سایر منابع نوری ارائه شده‌است انجام می‌شود. از جمله ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری منابع نوری عبارتند از: شار تابندگی (L)[3]، شدت تابندگی (cd)[4] و روشنایی (cd/m^2)[5]. عوامل مذکور عموماً شدت تابندگی یک منبع نقطه‌ای را توصیف می‌کنند درحالیکه هیچیک از دیودهای نورانی آلی و غیر آلی شامل چنین توصیفی نیستند. لذا جهت اندازه‌گیری عوامل مذکور از استاندارد CIE127:2007 استفاده می‌شود که هندسه اندازه‌گیری خاصی را معرفی می کند. در این استاندارد روزنه نورسنج دایره ای با مساحت $1\ cm^2$ در نظر گرفته شده و فاصله منبع نور تا نورسنج ۱۰۰ تا ۳۱۶ میلی‌متر پیشنهاد می شود. انواع مختلفی از

[1] Luminousity
[2] Flux
[3] Luminous flux
[4] Luminous intensity
[5] Luminance

مقاله

طیف‌سنج‌ها و نورسنج‌های کوچک برای اندازه‌گیری این عوامل وجود دارند. شار تابندگی جزئی در یک فضای مخروطی تعریف و اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری شار تابندگی کلی از اسپکتروورادیومتری که دارای کره می باشد، استفاده می‌کنند. شار تابندگی کلی یک منبع نوری گاهاً به عنوان بازده نوری[1] تابندگی نیز شناخته می شود. ساختار سطحی برخی از دیودهای نورانی آلی بعضا به نحوی اصلاح شده است که بازده نوری را افزایش دهد [۴۲، ۴۳].

۴-۲-تاثیر رنگی دیودهای نورانی نور سفید

یکی از ویژگی‌های منابع نوری، اثر رنگی آنها بر رنگ اجسام است که بیانگر درجه تغییر رنگ یک سری فامهای استاندارد تحت منبع مورد بررسی نسبت به منبع نوری استاندارد با دمای رنگ‌همبسته مشابه است. این اثر که تحت عنوان شاخص نمود رنگ منبع نوری بر رنگ اجسام[2] (CRI) نامیده می‌شود با روش‌های مبتنی بر تغییرات توزیع انرژی طیفی و نیز تغییرات ظاهر رنگی نمونه‌های آزمایشگاهی سنجیده می‌شود [۴۵، ۴۴، ۱۰]. درواقع یک منبع نوری با خواص تاثیر رنگی خوب منبعی است که توزیع انرژی طیفی آن نزدیک به نور روز باشد. در نتیجه ظاهر رنگی اجسام تحت آن منبع، مشابه ظاهر رنگی‌شان تحت نور خورشید خواهد بود. یک مثال بارز در این زمینه استاندارد روشنایی D65 است که توزیع انرژی طیفی آن تقلیدی از متوسط توزیع انرژی نور روز است [۱۰]. طبق تعریف کمیته بین المللی CIE اندیس عمومی تاثیر رنگ منبع نور بر رنگ اجسام را می‌توان با اندازه‌گیری مقادیر محرکه‌های رنگی تعدادی نمونه رنگی استاندارد (معمولا هشت رنگ کمرنگ/اشباع متوسط از مجموعه مانسل و اخیرا مکبث) تحت منبع نور D65 و همچنین منبع نور سفید مورد آزمایش بدست آورد [۱۰]. اندیس عمومی تأثیرگذاری رنگی منبع نوری با توجه به متوسط اختلاف رنگ هشت نمونه استاندارد تحت منبع نوری D65 و منبع سفید مورد آزمایش محاسبه و درحالت ایده‌آل مقدار آن برابر ۱۰۰ می‌گردد [۴۶، ۴۵، ۱۰]. درحالیکه مقادیر بالای ۸۰ تا ۸۵ اندیس عمومی تأثیر رنگی منبع نوری نسبتاً رضایت‌بخش تلقی می‌گردند مقدار اندیس تاثیر رنگی برابر با ۹۰ یا بیشتر برای مصارف ارزیابی فام مطلوب بوده و مقادیر کمتر هنوز برای روشنایی صنعتی و محیط بیرون مناسب تشخیص داده می‌شوند. شاخص تأثیر رنگ لامپ‌های کم مصرف، فلورسنت و دیودهای نورانی در جدول ۲ مقایسه شده‌اند.

محاسبه اندیس تأثیر رنگی منبع نور بر رنگ اجسام براساس اختلاف رنگ در فضارنگ CIE U*V*W* و پس از اعمال مدل تطبیق رنگی ون کریس[3] انجام می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های مستمر در روش‌های محاسبه اختلاف رنگ، کمیته‌های فنی بعدی CIE که جهت بروزرسانی محاسبه این اندیس تشکیل شدند لزوم انجام اصلاحات خاص جهت اندازه‌گیری منابع نوری LED را مورد بحث قرار دادند. در این خصوص پیشنهادهایی مبنی بر استفاده از فضارنگ CIE L*a*b* و یک مدل ظاهر رنگی پیشرفته نظیر CIECAM02 ارائه گردیده است [۴۵، ۴۷].

یکی از مشکلات مرتبط با ارزیابی دیودهای نورانی سفیدرنگ نوع RGB آن است که اگرچه مقدار CRI ممکن است با نمونه‌های آزمایش معمولی قابل قبول بنظر برسد اما ظاهر رنگ‌های خیلی اشباع، تحت چنین منابع نوری ممکن است بسیار نامطلوب باشند (مثال: قهوه‌ای بنظر رسیدن قرمز تیره و برعکس). یک پیشنهاد جهت حل این مشکل استفاده از محدوده وسیع‌تری از رنگ‌های مورد ارزیابی، فضارنگ‌های بروزرسانی شده و انتقال‌های تطبیق رنگی بکار رفته در دستورالعمل‌های CIE2007 است [۴۸]. جهت دستیابی به مقدار قابل قبولی از CRI، لامپ‌های کم مصرف اروپایی با انتخاب مخلوطی از سه فسفر نورتاب با پهنای طیف باریک طراحی شده‌اند.

۵- سایر کاربردهای دیودهای نورانی سفید

۵-۱-محیط‌های رنگ همانندی

بمنظور استانداردسازی شرایط روشنایی جهت ارزیابی رنگ نمونه‌ها بویژه زمان انجام آزمون‌های رنگ همانندی و بررسی پدیده متامریزم[4] از کابینت‌های نوری (جعبه‌هایی با منابع نوری استاندارد) استفاده می‌شود.

[1] Luminous efficiency
[2] Colour rendering index
[3] Von Kries
[4] Metamerism

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های لامپ‌های حرارتی، منابع نور فلورسنت و حالت جامد (دیودهای نورانی) [۱۱].

منبع نوری	متوسط طول عمر ($h \times 10^3$)	دمای رنگ همبسته (^oK)	بازده نوری (lumens/watt)	CRI
لامپ‌های کم مصرف[5]	۸-۱۰	۳۰۰۰	۳۰-۵۰	۸۰
لامپ‌های فلورسنت	۱۰-۱۵	۳۰۰۰-۶۵۰۰	۹۰	۵۰-۹۵
دیودهای نورانی غیرآلی	۳۵-۵۰	۲۷۰۰-۶۵۰۰	۵۰-۱۰۰	۵۰-۹۰
دیودهای نورانی آلی	۳۰-۷۰	۲۷۰۰-۶۵۰۰	۵۰-۱۰۰	۶۰-۹۵

[5] Compact fluorescent lamps (CFLs)

کابینت‌های نوری دارای دیوارهای خاکستری یکنواخت با شماره مانسل N5 یا N7 می‌باشند. همچنین، علاوه بر نور رشته‌ای تنگستن معمولی که جهت شبیه‌سازی استاندارد نوری A بکار می‌رود، لامپ‌های فلورسنت خاص مختلف به منظور شبیه سازی منابع نوری D65 یا D50 (مهتابی)، TL83 یا TL84 (روشنایی فروشگاه) و منبع فرابنفش بر سقف آن جای گرفته‌اند. یک دیود نورانی آلی پایدار از نوع RGB و به شکل مسطح، درصورت تولید تجاری و به شرط شبیه‌سازی نور هر منبع نور مرئی، می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای منابع نور تکی (غیر از منبع UV) در کابینت‌های نوری استفاده شود. همچنین در اتاق‌های ارزیابی رنگ مجموعه‌های صنعتی خاص که هدف، ارزیابی اشیاء بزرگ تحت منابع نوری شبیه‌ساز نور روز است دیودهای نورانی آلی مسطح هم می‌توانند در آینده در اتاق‌های با منابع نوری قابل کنترل، مورد استفاده قرار بگیرند تا هماهنگی‌ای نظیر کابینت‌های نوری بدست آید.

۵-۲-پس روشنایی[1] نمایشگرهای رنگی

نمایشگرهای دیودهای نورانی آلی رنگی که دیودهای نورانی آلی زمینه فعال (AMOLEDs)[2] هم نامیده می‌شوند با قابلیت استفاده در گوشی‌های موبایل و دوربین‌های عکاسی در بازار موجودند. در مقایسه با ال سی‌دی‌ها، AMOLEDها از تباین و زاویه دید بازتری برخوردار بوده (۱۴۰ درجه بجای ۸۰ درجه) و از آنجاکه خودتاب[3] هستند و نیازی به پس روشنایی ندارند از اندازه کوچک‌تری نیز برخوردارند. البته قیمت نمایش‌گرهای دیودهای نورانی آلی رنگی بزرگتر (جهت استفاده در تلویزیون‌های قابل حمل[4] و قاب عکس‌های دیجیتال) خیلی بیشتر از ال سی‌دی‌های با همان اندازه است[۴۹].

امروزه، دیودهای نورانی غیرآلی سفیدرنگ (WLEDs)[5] به جای لامپ‌های تصویر جیوه‌ای جهت ایجاد پس روشنایی نمایشگرهای ال‌سی‌دی مورد استفاده در وسایل الکترونیکی قابل حمل (لپ تاپ، تبلت و نوت‌بوک) استفاده می‌شوند. واضح است که پس روشنایی صفحه نمایش باید بسیار یکنواخت باشد [۵۰]. بدلیل فضای کم موجود، این یکنواختی با استفاده از دیودهای نورانی غیرآلی متعدد نصب شده در لبه بدست می‌آید. لبه صفحه‌ای متشکل از فیلم‌های بازتابنده، پخش‌کننده و شکست‌دهنده نور بین منبع نور و لایه ال‌سی‌دی است. یک راه حل جایگزین هزینه‌بر روشن نمودن صفحه نمایش با یک دیود نورانی غیرآلی پرقدرت است. این دیود نورش را به یک دسته از فیبرهای نوری می‌دهد که نتیجه آن گسترش مستطیلی شکل نور خواهد بود. راه ساده‌تر استفاده از یک صفحه شامل دیودهای نورانی آلی سفید به‌عنوان پس روشنایی است چراکه می توان هر لایه پخش کننده نور ساده دیگری را بین فیلم دیودهای نورانی آلی و لایه ال‌سی‌دی بکار برد. شایان ذکر است که دیودهای نورانی غیرآلی سفید تک فسفری که معمولاً در نمایشگرهای قدیمی‌تر استفاده می‌شوند در طول موج‌های قرمز و سبز، تابشی ضعیف‌تر از دیودهای نورانی آلی دارند.

۶-نتیجه‌گیری

پیشرفت‌ها در توسعه منابع نوری همواره با توجه به رویکردهای اقتصادی و تجاری و با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن صورت گرفته است. به عنوان مثال، به رغم زیبایی کمتر روشنایی لامپ‌های فلورسنت، این دسته از منابع نوری به دلیل صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی جایگزین لامپ‌های متداول تنگستنی شدند. در ادامه لامپ‌های کم مصرف با صرفه انرژی و طول عمر بیشتر مورد توجه قرار گرفتند حال آنکه به رغم آنکه به سرعت روشن می شوند اما روشنایی کامل آنها بلافاصله حاصل نمی‌شد و به لحاظ زیست‌محیطی هم هنوز به عنوان یک معضل جدی تلقی می گردند. به رغم ابداع روشهای مختلف جهت حصول روشنایی مقرون به صرفه‌تر از لامپ‌های رشته‌ای ، توسعه منابع نور سفید حالت جامد به لحاظ دوام و کارآمدی بسیار مورد توجه قرار گرفت. این نکته که آیا دیودهای نورانی آلی به لحاظ فنی و تجاری جایگزین‌های مناسبی برای روشنایی‌های خانگی منصوب می‌گردند یا خیر بستگی کامل به بررسی در گذر زمان و مبتنی بر میزان صرفه‌جویی در انرژی کشورهای توسعه یافته خواهد داشت.

[1] Backlighting
[2] Active Matrix Organic Light Emitting Diodes
[3] Self-luminous
[4] Portable
[5] White Light Emitting Diods

۷- مراجع

1. M. Dillon, "*Artificial Sunshine: A Social History of Domestic Lighting*", illustrated ed., National Trust, **2002**.
2. K. J. Germeshausen, "Gaseous-discharge device", US Patent No. 2, 812,465, **1957**.
3. P. Schottland, B. Terburg, D. S. Bryce, "Automotive headlamps with improved beam chromaticity", WO Patent No. 2005,040,674 A1, **2007**.
4. A. A. Vuylsteke, "Neon lamp flip-flop and binary counter", Electron. 26, 248, **1953**.
5. C. E. Hendrix, R. B. Purcell, "Neon lamp logic gates play tic-tac-toe", Electron. 31, 68-69, **1958**.
6. George E Inman, "Electric discharge lamp", US Patent No. 2,259,040, **1941**.
7. E. Germer, F. Meyer, H. J. Spanner, "Metal vapor lamp", US2182732, **1939.**
8. T. L. Dawson, "It must be green: meeting society's environmental concerns", Color. Technol. 124, 67-78, 2008.
9. J. T. Dolan, M. G. Ury, C. H. Wood, "Lamp including sulfur", US5404076, **1995**.
10. R. McDonald, "Colour Physics for Industry", 2nd Edition, the Society of Dyers and Colourists, **1997**.

11. T. L. Dawson, "Development of efficient and durable sources of white light", Color. Technol. 126, 1-10, **2010**.
12. A. M. Childs, "Universal computation by quantum walk", Phys. Rev. Lett. 102, 180501-180504, **2009**.
13. N. Zheludev, "The life and times of the LED a 100-year history", Nat. Photonics. 1, 189, **2007**.
14. J. N. Holonyak, "Use of metallic halide as a carrier gas in the vapor deposition of iii-v compounds", US Patent No. 3,249,473, **1966**.
15. T. L. Dawson, "Developments in colour display devices", Rev. frog. Color. 33, 1-14, **2003**.
16. T. C. Wang, J. T. Hsu, C. C. Chuo, C. E. Tsai, C. M. Lai, "Quantum dot/quantum well light emitting diode", US Patent No. 6,919,582, **2007**.
17. S. Nakamura, T. Mukai, N. Iwasa, "Light-emitting gallium nitride-based compound semiconductor device", US Patent No. 5,578,839, **1996**.
18. G. B. Stringfellow, "O*rganometallic vapour phase epitaxy: theory and practice*", Academic Press , San Diego, **1999**.
19. K. Otsuka, N. Muranaga, K. Takemoto, "Production apparatus for producing gallium nitride semiconductor film and cleaning apparatus for exhaust gas", US Patent No.7,195,022, **2007**.
20. R. A. Oliver, "Critical Assessment 23: Gallium nitride-based visible light-emitting diodes", Mater. Sci. Technol. 32, 737-745, **2016**.
21. Y. Kwon, M. Choi, S. Bott, "Impact of ablation efficiency reduction on post-surgery corneal asphericity: simulation of the laser refractive surgery with a flying spot laser beam", Opt. Express. 16, 11808-11821, **2008**.
22. H. Jeong, R. Salas-Montiel, G. Lerondel, M.S. Jeong, "Indium gallium nitride-based ultraviolet, blue, and green light-emitting diodes functionalized with shallow periodic hole patterns", Sci. Rep. 7, 1-9, **2017**.
23. I. Moreno, C. C. Sun, "Modeling the radiation pattern of LEDs", Opt. Express. 16, 1808-1819, **2008**.
24. S. Pimputkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, S. Nakamura, "Prospects for LED lighting", Nat. Photonics. 3, 180, **2009.**
25. T. L. Dawson, "Nanomaterials for textile processing and photonic applications", Color. Technol. 124, 261-272, **2008.**
26. M. D. Dai, K. Eom, C. W. Kim, "Nanomechanical mass detection using nonlinear oscillations", Appl. Phys. Lett. 100, 179901, **2012**.
27. J. B. Y. Chua, Y. H. Lau, "Phosphor based on a combination of quantum dot and conventional phosphors", US Patent No.7,495,383, **2009**.
28. H. S. Jang, H. Yang, S. W. Kim, J. Y. Han, S. G. Lee, D. Y. Jeon, "White light-emitting diodes with excellent color rendering based on organically capped CdSe quantum dots and Sr3SiO5:Ce^{3+},Li^{+} phosphors", Adv. Mater. 20, 2696-2702, **2008**.
29. N. Q. Lam, "Announcement of new topical section—Organic Electronics and Photonics", Appl. Phys. Lett. 92, 010401, **2008**.
30. J. Ziegler, S. Xu, E. Kucur, F. Meister, M. Batentschuk, F. Gindele, T. Nann, "Silica-coated InP/ZnS nanocrystals as converter material in white LEDs", Adv. Mater. 20, 4068-4073, **2008**.
31. M.J. Bowers, J.R. McBride, S.J. Rosenthal, "White-light emission from magic-sized cadmium selenide nanocrystals", J. Am. Chem.Soc. 127, 15378-15379, **2005.**
32. M.A. Schreuder, J.D. Gosnell, N.J. Smith, M.R. Warnement, S.M. Weiss, S.J. Rosenthal, "Encapsulated white-light CdSe nanocrystals as nanophosphors for solid-state lighting", J. Mater. Chem. 18, 970-975, **2008**.
33. H. Matsubara, K. Katayama, T. Takebe, "White color light emitting diode and neutral color light emitting diode", US6337536, **2002**.
34. H. Chen, "Tri-color ZnSe white light emitting diode", US Patent No. 6,919,582, **2005**.
35. H. Wenisch, M. Fehrer, M. Klude, K. Ohkawa, D. Hommel, "Internal photoluminescence in ZnSe homoepitaxy and application in blue–green–orange mixed-color light-emitting diodes", J. Cryst. Growth. 214-215, 1075-1079, **2000**.
36. K. Takahashi, A. Yoshikawa, A. Sandhu, "*Wide bandgap semiconductors fundamental properties and modern photonic and electronic devices*", Verlag Berlin Heidelberg Springer, **2007**.
۳۷. آ. سلیمانی گرگانی، م. پیشوایی، س. گرجی کندی، ف. نجفی، و. یکه فلاح، "تهیه دیودهای نورتاب آلی به روش انحلالی، بخش اول: لایه‌های فعال"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۵، ۸۶-۷۵، **۱۳۹۴**.
۳۸. آ. سلیمانی گرگانی، م. پیشوایی، س. گرجی کندی، ف. نجفی، و. یکه فلاح، "تهیه دیودهای نورتاب آلی به روش انحلالی، بخش دوم: الکترودها" ، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۵، ۹۶-۸۷، **۱۳۹۴**.
39. C. O'Dwyer, M. Szachowicz, G. Visimberga, V. Lavayen, S.B. Newcomb, C. M. S. Torres, "Bottom-up growth of fully transparent contact layers of indium tin oxide nanowires for light-emitting devices", Nat. Nanotechnol. 4, 239, **2009**.
40. Z. R. Li,"*Organic light-emitting materials and devices*", second edition, CRC Press, **2017**.
41. D. Buchhauser, M. Scheffel, W. Rogler, C. Tschamber, K. Heuser, A. Hunze, G. Gieres, D. Henseler, W. Jakowetz, K. Diekmann, A. Winnacker, H. Becker, A. Buesing, A. Falcou, L. Rau, S. Voegele, S. Goettling, "Characterization of white-emitting copolymers for PLED displays", Proceedings Organic Light-Emitting Materials and Devices VIII; **2004**.
42. Y. Yamauchi, "Standardization activities for OLED for lighting", Optical Society of America, Canberra Australia, **2014**.
43. M. Santaholma, T. Poikonen, J. Askola, T. Pulli, E. Ikonen, Luminous efficacy measurement of OLEDs using an integrating sphere, The NEWRAD 2014 Conference, Espoo, 132-133, Finland **2014**.
44. A. R. Noboru Ohta, "*Colorimetry: Fundamentals and Applications*", USA, John Wiley, **2005**.
45. Commission Internationale de l'Eclairage, "Colour rendering of white LED light sources," CIE Technical Report 177, CIE Central Bureau, Vienna, Austria, **2007**.
46. F. A. S. H. Amirshahi, "Computational colour physics", Arkan Danesh, Isfahan, **2007**.
47. M. R. Luo, G. Cui, C. Li, "Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model", Color Res. Appl. 31, 320-330, **2006.**
48. Y. O. W. Davis, "Toward an improved color rendering metric International Conference on Solid State Lighting (SPIE)", 5941 59411G1-7Bellingham, **2005**.
49. C. W. Sher, K. J. Chen, C. C. Lin, H. V. Han, H. Y. Lin, Z. Y. Tu, H. H. Tu, K. Honjo, H. Y. Jiang, S. L. Ou, R. H. Horng, X. Li, C. C. Fu, H. C. Kuo, "Large-area, uniform white light LED source on a flexible substrate", Opt. Express. 23, 1167-1178, **2015**.