ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

شماره مجوز مجله:۸۰۴۰۰ زمان چاپ:۱۴۰۲/۰۶/۲۰

یک بررسی کامل و اجمالی بر علل خرابی و مکانیسم های مقاوم سازی لامپ های کم مصرف (LED)

امیر شاطری*[۱]

فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز

Amir.sh۱۹۷۷۹۹@gmail.com

چکیده

این تحقیق و مقاله مطالعه ای دقیق و موثر بر تخریب لامپ های مقاوم سازی شده بر اساس دیودهای گسیل نور سفید GaN را توصیف می کند. نتایج این تحقیق و مطالعه نشان می‌دهد که طول عمر لامپ‌های LED بیشتر به پایداری درایور و عناصر نوری بستگی دارد، نه به تخریب تراشه‌های LED، که خروجی پایداری در زمان تنش دارند. با مقایسه لامپ های چهار تولید کننده مختلف که در دمای اتاق و دمای بالا استرس داشتند، می توان متوجه شد که: ۱-تنش طولانی مدت باعث تغییر خواص رنگی لامپ ها می شود که به تخریب فسفرها یا بازتابنده LED داخلی نسبت داده می شود. ۲-در طول کهنه شدن، درایور LED ممکن است به تدریج و/یا به طور فاجعه بار تخریب شود و باعث کاهش توان نوری خروجی یا خرابی کامل شود. ۳-مدیریت حرارتی مناسب و اتلاف گرما میزان تخریب را کاهش می دهد. ۴-اندازه‌گیری‌های انتقال طیفی و بازرسی بصری، تخریب عناصر نوری پراکنده را نشان می‌دهند که توسط سمت طول موج کوتاه طیف انتشار LED ایجاد می‌شود.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، لامپ های کم مصرف LED مقاوم سازی شده، لامپ انتشاری، فسفر، درایور LED

۱- مقدمه

LED های سفید بر اساس تراشه های GaN آبی و تبدیل فسفر زرد دستگاه های کارآمدی هستند که قابلیت اطمینان و پایداری آنها تا ده ها هزار ساعت ثابت شده است [۱،۲]. به منظور بهره برداری از این عملکرد، چندین کشور و انجمن در حال ترویج تولید لامپ های LED مقاوم سازی هستند که می توانند در یک سوکت پیچی معمولی ادیسون قرار گیرند، که مشهورترین نمونه آن مسابقه "L Prize" در سال ۲۰۰۸ توسط وزارت ایالات متحده بود. انرژی با صندوق جایزه ۱۰ میلیون دلاری [۳]. لامپ های مقاوم سازی شده در حال حاضر معمولاً در فروشگاه ها فروخته می شوند. با توجه به هزینه اولیه بالاتر، مهم است که اطمینان حاصل شود که شدت و خواص رنگی آنها در طول عمر قابل استفاده پایدار باقی می مانند مزیت کاهش مصرف برق و طول عمر بیشتر در مقایسه با لامپ های رشته ای یا فلورسانس سنتی [٤]. اگرچه چندین مقاله تخریب LED های تراشه را در دمای بالا [٥،٦]، جریان بالا [٧،٩] و تنش بایاس معکوس [٧،١٣] تجزیه و تحلیل کرده اند، تا به امروز تقریبا هیچ مقاله ای تخریب طولانی مدت لامپ های کامل را توصیف نکرده است. در این تحقیق و مقاله؛ مطالعه و تحقیقی ارائه می شود که مکانیسم های لامپ های تجاری موجود؛ نتایج نشان دهنده بخش‌های حیاتی سیستم کلی را که شناسایی شده و حالت‌های شکست را با مکانیسم‌های خرابی خاص مرتبط شده؛ آن ها پیدا و جست و جو شده اند: ۱-

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

دمای عملیاتی فرآیندهای تخریب را تسریع می‌کند که مربوط به آن است. ۲-تیره شدن لامپ پخش کننده پلاستیکی، به. ۳-تغییر در خواص رنگی فسفر داخلی و/یا بازتابنده و ۴-تخریب درایور LED.

۲- جزئیات نتایج تجربی

لامپ‌های مقاوم‌سازی موجود در بازار از چهار سازنده مختلف (از A تا D در زیر) به آزمایش‌های مادام‌العمر در دمای اتاق (RT) و آزمایش‌های تسریع‌شده در دمای بالاتر (HT) ارسال شدند. لامپ های تجزیه و تحلیل شده دارای شار نوری بین ۷۶۵ و ۸۱۰ lm و دمای رنگ مرتبط ۲۷۰۰-۳۰۰۰ K هستند. دمای تنش واقعی به دلیل راهبردهای مختلف رانندگی و اتلاف گرما که توسط سازندگان اتخاذ شده است، به طور متوسط دمای HT متفاوت است. لامپ ها ۱۵ درجه سانتی گراد بالاتر از لامپ های RT است. جدول ۱ مقایسه میانگین دما در مناطق مختلف لامپ را برای هر سازنده و دمای آزمایش (دمای اتاق یا دمای بالا) گزارش می‌کند. این دماها با استفاده از دوربین حرارتی مادون قرمز FLIR Systems i۵۰ اندازه گیری شد. در طول تنش، لامپ‌ها در شرایط کارکرد عادی خود بایاس می‌شوند، یعنی در یک سوکت پیچ می‌شوند و به دوشاخه برق متصل می‌شوند. در هر مرحله تنش، ما یک مشخصه اپتیکی و طیفی کامل را در یک Labsphere LMS ۶۵۰ با قطر ۱,۵ متر انجام دادیم. با استفاده از طیف‌سنج Ocean Optics USB۲۰۰۰، کره‌ای ایجاد کنید. ما یک کالیبراسیون رادیومتری کل راه اندازی را انجام دادیم تا توزیع دقیق توان نوری در طول موج های مختلف و چگالی طیفی توان صحیح را در واحدهای سیستم بین المللی (SI) بدست آوریم. علاوه بر این، پس از هر دوره تنش، مصرف برق سیستم کامل را اندازه‌گیری کردیم، یعنی توان جذب شده توسط درایور LED از شبکه توزیع برق به منظور راه‌اندازی LEDها، با استفاده از توان سنج Rohde & Schwarz HAMEG HM۸۱۱۵-۲ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. دمای عملیاتی مناطق مختلف لامپ برای هر سازنده در هنگام تنش در دمای اتاق (RT) یا دمای بالا (HT).

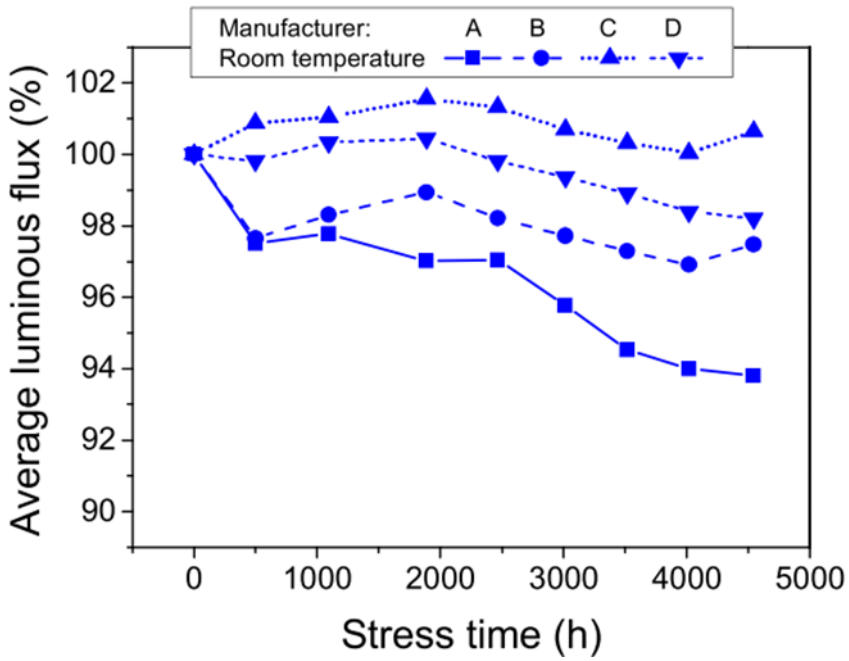
شرایط استرس		دمای لامپ (درجه سانتی گراد)	دمای خنک کننده (درجه سانتی گراد)
کمینه دما	A	۳۸,۱	۸۲,۶
	B	۳۵,۲	۷۵,۳
	C	۳۹,۲	۶۴,۴
	D	۳۶	۸۸,۱
بیشینه دما	A	۴۲,۶	۹۸,۵
	B	۳۸,۱	۸۹,۱
	C	۴۲	۸۰,۷
	D	۳۸,۴	۹۹,۸

۳- سینتیک تخریب

شکل های ۱و ۲ سینتیک تخریب خروجی نوری را گزارش می دهند قدرت برای تمام نمونه های تحت آزمایش به ترتیب در دمای اتاق و در دمای بالا. هر خط نشان دهنده روند متوسط تمام لامپ های تولید کننده یکسان است که در دمای خارجی یکسان تحت فشار قرار گرفته اند. قابلیت اطمینان در شرایط عملیاتی معمولی بالا است، در بدترین حالت پس از ۴۵۰۰ ساعت افت ۶ درصدی دارد و برای سازنده C تقریباً هیچ تخریبی وجود ندارد. این ارقام نشان دهنده بهبود کلی سیستم ها در مقایسه با گزارش های اولیه در مورد تخریب لامپ های مقاوم سازی شده است. تکرارهای قبلی فرآیند

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

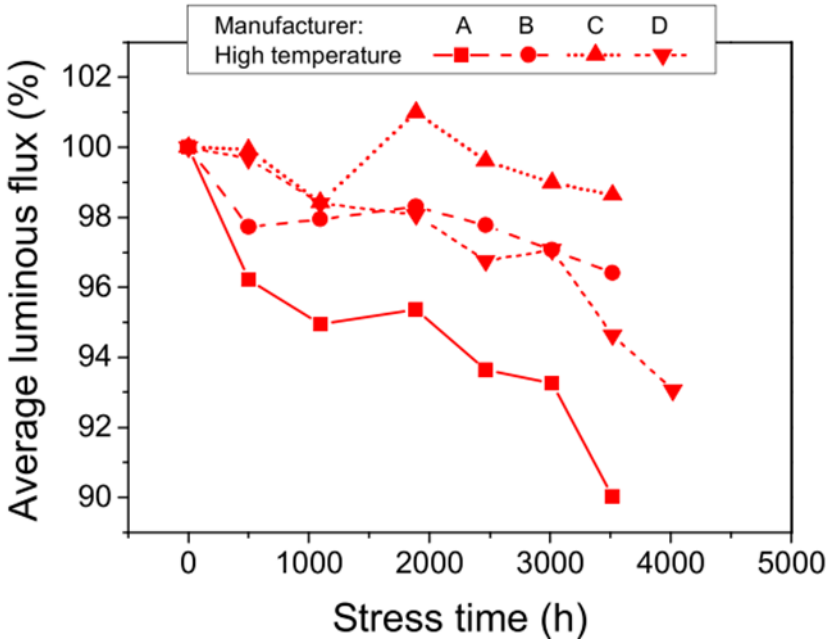
تکنولوژیکی [۱٤]، و می تواند از تحقیقات اضافی برای دستیابی به بهبودهای بیشتر و گسترش بازار هدف این موتورهای روشنایی پشتیبانی کند. تحلیل و بررسی. این نشان دهنده نقش مهم دما به عنوان یک عامل تسریع کننده تخریب است که برای تراشه های LED [۹]، فسفرها [۷] و بازتابنده [۱۵] گزارش شده است. ما توزیع دما در لامپ ها را با استفاده از ترموگرافی IR اندازه گیری کردیم که نتایج آن در شکل ۳ در کنار یک عکس نوری ارائه شده است. ما می‌توانیم ببینیم که حتی اگر لامپ پخش‌کننده کمی با دمای اتاق متفاوت باشد، ویژگی‌های اتلاف گرما به دمای بسیار بالایی می‌رسند (۷۵ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر). ما می‌توانیم دمای اتصال را برای LEDها بالاتر از این مقدار انتظار داشته باشیم، که می‌تواند مشکلات قابلیت اطمینان را برای کل سیستم ایجاد کند، زیرا LEDها برای حداکثر مقادیر تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد رتبه‌بندی می‌شوند [۱٦]. با مقایسه این سینتیک های تخریب با تنش متوسط دماهای گزارش شده در جدول ۱، می توانیم یک همبستگی دقیق را مشاهده کنیم بین میزان کاهش توان نوری و دما در طول تنش توسط کل لامپ می رسد. هیت سینک های طراحی شده توسط سازنده C (و تا حدودی توسط سازنده B) دارای تعداد زیادی حفره هستند که می توانند جریان هوا را از طریق بدنه لامپ افزایش دهند و تبادل حرارتی بین قسمت های داغ و محیط خارجی را به طور موثرتری افزایش دهند. این در دمای عملیاتی پایین‌تر، همانطور که در جدول ۱ گزارش شده است، و در قابلیت اطمینان بالاتر منعکس می‌شود (شکل‌های ۱ و ۲ را ببینید)، بنابراین این ممکن است یک راه‌حل طراحی خوب برای بهبود طول عمر سیستم باشد.



شکل ۱. کاهش توان نوری خروجی لامپ های تحت آزمایش در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی گراد).

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

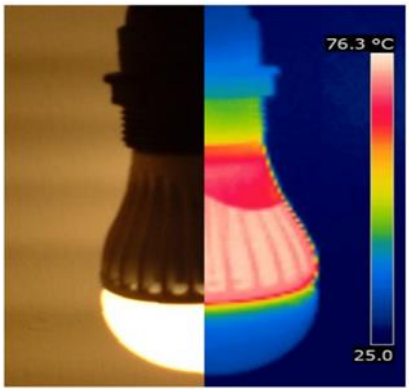
۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN



شکل ۲. کاهش توان نوری خروجی لامپ های تحت آزمایش در دمای بالا.

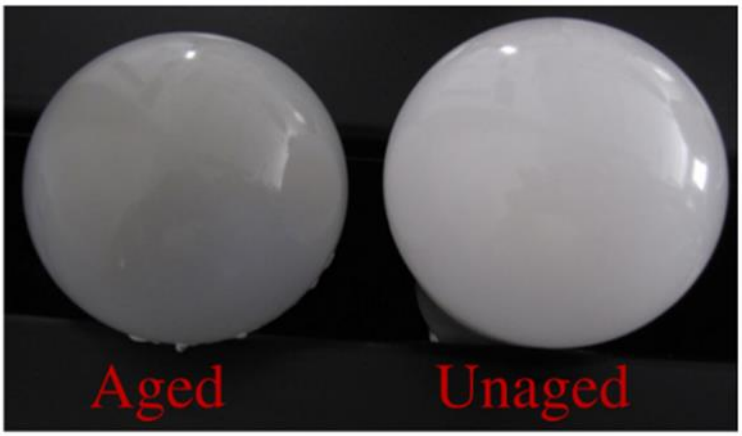
۴- تیره شدن پراکنده حباب لامپ

با آزمایش های مکرر تیره شدن تدریجی لامپ پخش کننده را در طول زمان تنش برای لامپ های سازنده D شناسایی شد. در شکل ۴ یک لامپ درمان نشده با یک گنبد تحت فشار برای ۲۵۰۰ ساعت مقایسه شده است. هر دو لامپ از همان مجموعه لامپ، در شکل لامپ قدیمی کوچکتر است زیرا از بدنه اصلی بریده شده است تا LED های زیرین را برای مشاهده بصری در معرض دید قرار دهد. تنوع رنگ به وضوح قابل مشاهده است که در سطح گنبد یکنواخت نیست. از آنجایی که اثر در مرکز قوی‌تر و در مرزها ضعیف‌تر است، تخریب احتمالاً مربوط به تابش طول موج کوتاهی است که از طریق لامپ انتشاری جریان می‌یابد، که شدت آن در جهت عادی به سطح LED به دلیل انتشار معمولی لامبرتی بیشتر است. مشخصات. احتمالاً می‌توان دما را به عنوان تنها علت کنار گذاشت، زیرا بالاترین مقدار آن را می‌توان در لبه‌های حباب گنبدی شکل یافت (شکل ۳ را ببینید) که همان‌طور که در شکل ۵ گزارش شده است، قسمت‌هایی هستند که کمترین تاریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.



۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

شکل ۳. ترموگرام مادون قرمز حباب لامپ در هنگام استرس.



شکل ۴. عکس تولید کننده لامپ جدید (نو) و لامپ کهنه (با ۲۵۰۰ ساعت کارکرد)؛ تیره شدن پس از استرس به وضوح قابل مشاهده است.

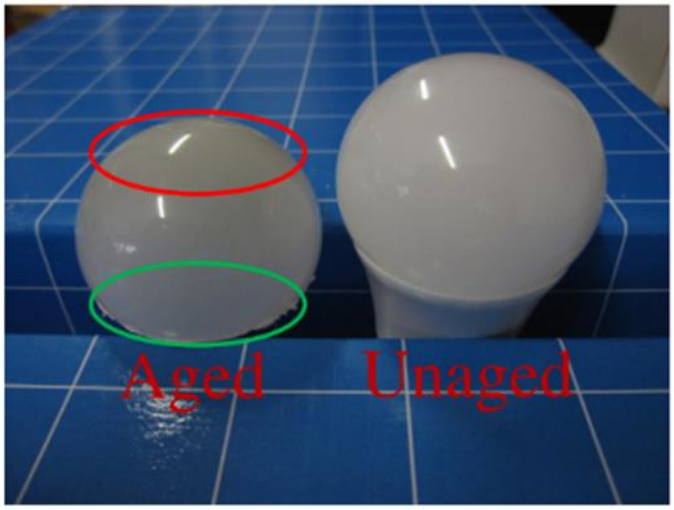
شکل ۶ مقدار متفاوت نور عبوری بین a را توضیح می دهد تاریک شده (منطقه قرمز در شکل۵) و یک قسمت شفاف (ناحیه سبز در شکل ۵) از همان لامپ کهنه زیر نور با لامپ کالیبراسیون رادیومتری Ocean Optics LS-۱-CAL. استفاده از منبع نور خارجی از هر گونه اثر مربوط به LED یا درایور آنها جلوگیری می کند. تاریکی به طور موثر قابلیت انتقال گنبد را کاهش می دهد و بنابراین مسئول (حداقل بخشی از) کاهش شار نور است. به منظور تخمین اثر تیرگی بر روی خواص رنگی لامپ، منحنی های شکل ۶ و طیف لامپ ارائه شده توسط سازنده را در بالاترین مقدار آنها عادی کردیم. سپس می‌توان منحنی‌های دو قسمت گنبد را بر منحنی لامپ تقسیم کرد و درصد تغییر قابلیت انتقال را نسبت به حداکثر مقدار آن بدست آورد. با کم کردن دو انتقال نسبی، می‌توانیم اعوجاج طیفی ناشی از فرآیند تاریک شدن را که در شکل ۷ گزارش شده است، تخمین بزنیم. طیف، منجر به تغییر در خواص رنگی لامپ می شود.

۵- تنوع رنگی

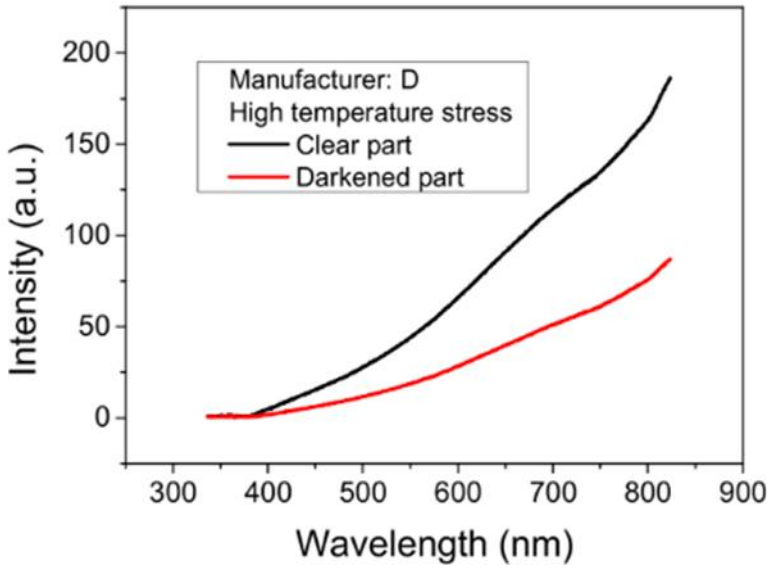
برای لامپ های گروه "A"، متداول ترین مکانیسم تخریب، تغییر سهم نسبی در طیف های خروجی است. یک مثال معرف در شکل ۸ نشان داده شده است، که نشان می دهد که تنش باعث ایجاد تغییراتی در خواص رنگی می شود که ناشی از فروپاشی سریعتر انتشار در ناحیه زرد طیف است. این پوسیدگی ممکن است از سه مکانیسم مختلف سرچشمه بگیرد: تغییر در پاسخ طیفی لامپ منتشر (به بالا مراجعه کنید)، کاهش راندمان تبدیل فسفر یا اکسیداسیون/تاریک شدن بازتابنده داخلی. احتمالاً ممکن است لامپ انتشاری رد شود، زیرا برخلاف مورد گروه "D" هیچ تیرگی مربوطه در لامپ های گروه "A" مشاهده نمی شود. علاوه بر این، ما دریافتیم که تأثیر آن در طول موج‌های کوتاه‌تر قوی‌تر است (شکل ۷ را ببینید)، در حالی که در شکل ۸ تغییرات بزرگ‌تر در مقادیر طولانی‌تر رخ می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که انتشار در ۴۵۵ نانومتر، که مربوط به تراشه آبی است، به طور قابل توجهی تغییر نمی کند، نشان می دهد که LED مبتنی بر GaN پایدار می ماند و بر قابلیت اطمینان سیستم تأثیر نمی گذارد، حتی در دمای بسیار بالایی که در حین کار به دست می آید. شکل ۹ تغییر دمای رنگ همبسته (CCT) را گزارش می کند، کمیتی که دمای معادل جسم سیاه را توصیف می کند که بیشترین شباهت را به طیف های خروجی دارد. از آنجایی که سهم زرد در حال کاهش است، CCT به تدریج به سمت اجسام سیاه معادل

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

داغتر (و سپس مایل به آبی) افزایش می یابد. افزایش CCT می تواند یک مشکل باشد زیرا نور درک شده "سردتر" را تولید می کند، که نمی تواند در کاربردهای خانگی قابل قبول باشد و منجر به جایگزینی زودهنگام یک لامپ فعال می شود.



شکل ۵. عکسی از تولید کننده لامپ منتشر نشده از یک لامپ با کارکرد ۲۵۰۰ ساعت (سمت چپ) و یک لامپ نو (سمت راست)؛ مقادیر مختلف تیره شدن توسط بیضی سبز رنگ (تیرگی کم) و بیضی قرمز رنگ (تیرگی زیاد) مشخص می شود.

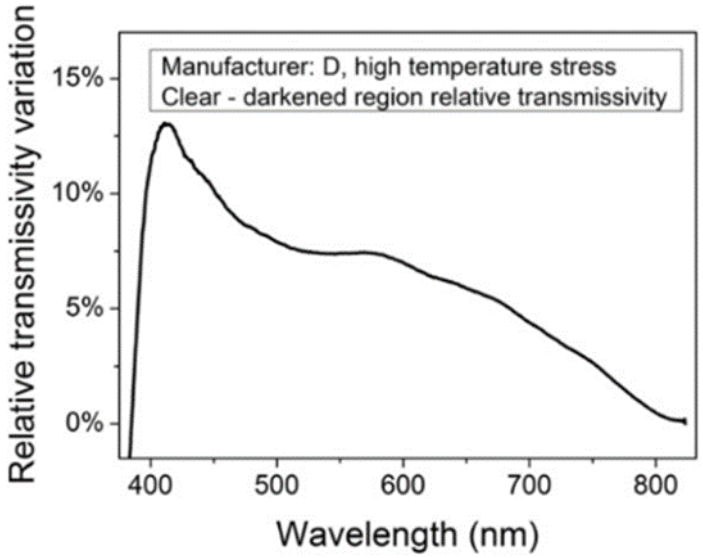


شکل ۶. نور را در دو ناحیه لامپ با سطوح تاریکی متفاوت منتقل می کند؛ منبع نور: لامپ کالیبراسیون رادیومتریک.

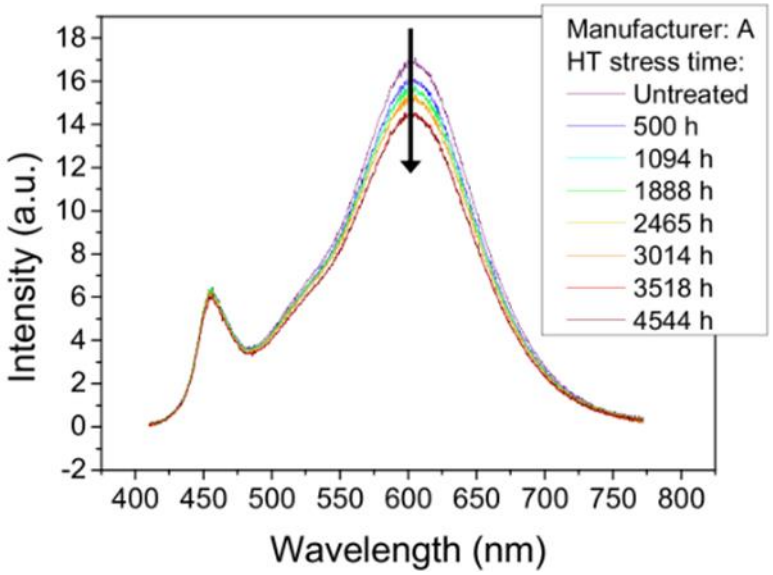
۶- عملکرد درایور لامپ

آخرین زیرسیستم لامپ که بر عملکرد لامپ تأثیر می گذارد، درایور LED است، یعنی تمام مدارهای اضافی مورد نیاز برای تبدیل توان الکتریکی گرفته شده در ولتاژ بالا از شبکه به برق یک سطح پایین تر سازگار با حداکثر ولتاژ و جریان عملیاتی محدود LED های سفید. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در لامپ های سازنده D، توان نوری خروجی دقیقاً از تغییر مصرف برق پیروی می کند.

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN



شکل ۷. تنوع طیف انتقالی نرمال شده با مقایسه شده با مقایسه دو ناحیه لامپ با سطوح تاریکی متفاوت؛ منبع نور: لامپ کالیبراسیون رادیومتریک.



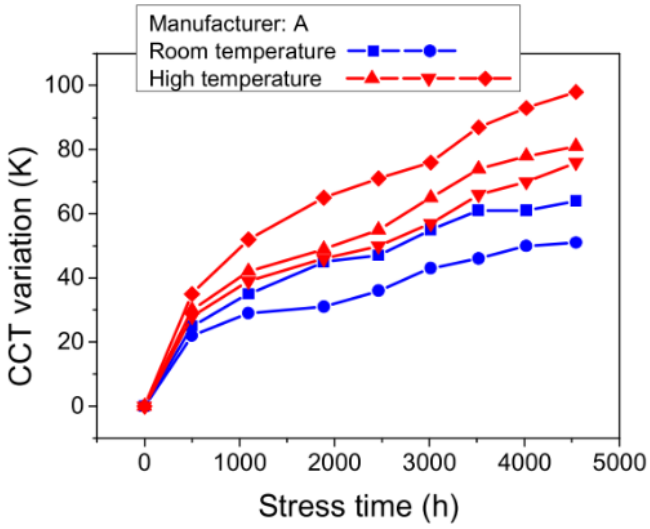
شکل ۸. تغییرات طیفی در طول زمان تنش کاهش پیک زرد باعث تغییر خواص رنگی است؛ در حالی که خروجی تراشه LED (پیک در ۴۵۵ نانومتر) ثابت می ماند.

این اثر نشان می دهد که انتشار کاهش یافته مربوط به آسیب تراشه LED یا تغییر در خواص رنگی فسفر یا لامپ انتشاری نیست، بلکه به مقدار کمتری از توان الکتریکی موجود برای تبدیل به نور بستگی دارد. همین اثر در دستگاه‌های تولیدکنندگان دیگر نیز وجود دارد، اما در این موارد یکی از دلایل کاهش شار نوری است تا مکانیسم اصلی تخریب. در یک مورد لامپ دچار خرابی اولیه شد. تجزیه و تحلیل بصری درایور درایور را به عنوان قسمت شکست خورده برجسته می کند (شکل ۱۱ را ببینید). بیضی قرمز یک خازن الکترولیتی با یک ترک قابل مشاهده در لایه عایق بیرونی حلقه می زند. این ظاهر معمول آسیب ناشی از تبخیر الکترولیت است که احتمالاً ناشی از نوسانات خط برق یا فشار بیش از حد الکتریکی است. ترکیدن آن به حدی قوی بود که باعث سوختن مواد پوششی شد که به جای سفیدی مانند سایر مناطق، تیره به نظر می رسد (فلش قرمز). فلش آبی رنگ مورد انتظار ماده پرکننده را هنگام برداشتن ناحیه سوخته نشان می دهد. همه این مشکلات تأیید می کنند که اگر سطوح ولتاژ

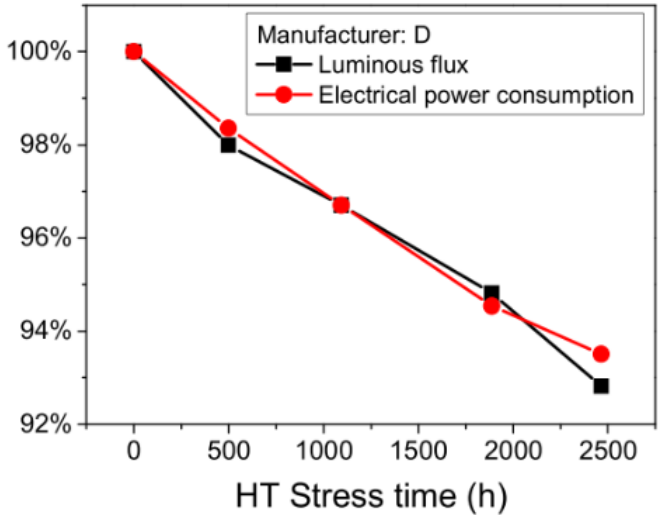
ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

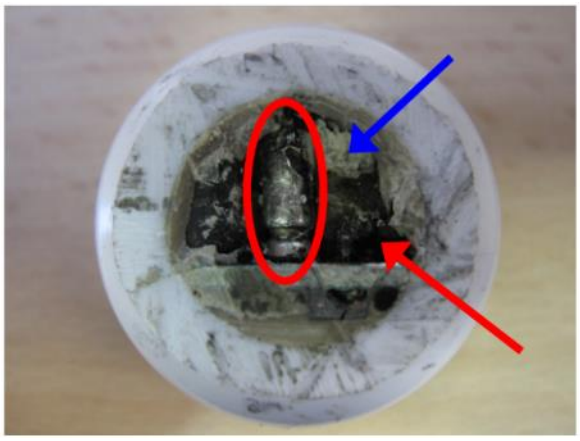
بسیار متفاوت، فضای کمتر موجود و دمای عملیاتی بالا را در نظر بگیریم، طراحی مناسب درایور LED یک ویژگی حیاتی برای یک لامپ قابل اعتماد است.



شکل ۹. تغییر دمای رنگ مرتبط در طول عمر؛ لامپ های تحت فشار در دمای بالا تحت تاثیر تخریب قوی تر قرار می گیرند.



شکل ۱۰. همبستگی بین کاهش توان نوری خروجی و کاهش مصرف برق در یکی از لامپ های مورد آزمایش



شکل ۱۱. عکسی از درایور لامپ معیوب.

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

۷- نتیجه گیری

آزمایش های مادام العمر روی لامپ های LED تجاری مقاوم سازی شده انجام شده است نقش مهم دما را به عنوان یک عامل تسریع کننده برای تخریب و مدیریت حرارتی صحیح و دقیق به منظور جلوگیری از آسیب تایید می کند. مکانیسم های اصلی که می تواند منجر به کاهش عملکرد شود عبارتند از: ۱-تیره شدن لامپ انتشار، که قابلیت انتقال کلی گنبد را کاهش می دهد و باعث ایجاد اعوجاج در طیف ساطع می شود، بنابراین کیفیت رنگی درک شده را تغییر می دهد. ۲-تغییر خواص رنگی فسفرها و/یا بازتابنده، که کارایی لامپ را کاهش می دهد و باعث تغییر شدید دمای رنگ همبسته (CCT) می شود. ۳-تغییر در عملکرد درایور LED، که در صورت عدم طراحی دقیق به دلیل نوسانات خط برق یا فشار بیش از حد الکتریکی می تواند منجر به خرابی های اولیه شود.

منابع و مراجع

۱. C.-C. Tsai, W.-C. Cheng, J.-K. Chang, S.-Y. Huang, J.-S. Liou, G.-H. Chen, Y.-C. Huang, J.-S. Wang, W.-H. Cheng, Thermal-stability comparison of glass- and silicone-based high-power phosphor converted white-light-emitting diodes under thermal aging, IEEE Trans. Device Mater. Reliab. ۱۴ (۱) (March ۲۰۱۴) ۴–۸.

۲. M. Meneghini, M. Dal Lago, N. Trivellin, G. Meneghesso, E. Zanoni, Degradation mechanisms of high-power LEDs for lighting applications: an overview, IEEE Trans. Ind. Appl. ۵۰ (۱) (Jan.-Feb. ۲۰۱۴) ۷۸–۸۵.

۳. Competition website at the U.S. Department of Energy, http://www.lightingprize. org/overview.stm.

۴. Fabrício P. Vahl, Lucila M.S. Campos, Nelson Casarotto Filho, Sustainability con-straints in techno-economic analysis of general lighting retrofits, Energy Build. ۶۷ (December ۲۰۱۳) ۵۰۰–۵۰۷.

۵. M. Meneghini, L.R. Trevisanello, U. Zehnder, G. Meneghesso, E. Zanoni, Reversible degradation of ohmic contacts on p-GaN for application in high-brightness LEDs, IEEE Trans. Electron Devices ۵۴ (۲۰۰۷) ۳۲۴۵.

۶. M. Meneghini, L. Rigutti, L.R. Trevisanello, A. Cavallini, G. Meneghesso, E. Zanoni, A model for the thermal degradation of metal/(p-GaN) interface in GaN-based light emitting diodes, J. Appl. Phys. ۱۰۳ (۲۰۰۸) ۰۶۳۷۰۳.

۷. N. Narendran, Y. Gu, J.P. Freyssinier, H. Yu, L. Deng, Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs, J. Cryst. Growth ۲۶۸ (۳/۴) (Aug. ۲۰۰۴) ۴۴۹–۴۵۶.

۸. S. Levada, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni, Analysis of DC current accelerated life tests of GaN LEDs using a Weibull-based statistical model, IEEE Trans. Device Mater. Reliab. ۵ (۲۰۰۵) ۶۸۸.

۹. S. Ishizaki, H. Kimura, M. Sugimoto, Lifetime estimation of high power LEDs, J. Light. Vis. Environ. ۳۱ (۱) (۲۰۰۷) ۱۱–۱۸.

۱۰. M. Meneghini, N. Trivellin, M. Pavesi, M. Manfredi, U. Zehnder, B. Hahn, G Meneghesso, E. ZanoniLeakage current and reverse-bias luminescence in InGaN based light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett. ۹۵ (۲۰۰۹) ۱۷۳۵۰۷.

۱۱. X.A. Cao, P.M. Sandvik, S.F. LeBoeuf, S.D. Arthur, Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses, Microelectron. Reliab. ۴۳ (۱۲) (Dec. ۲۰۰۳) ۱۹۸۷–۱۹۹۱.

۱۲. M. Meneghini, U. Zehnder, B. Hahn, G. Meneghesso, E. Zanoni, Degradation of high brightness green LEDs submitted to reverse electrical stress, IEEE Electron Device Lett. ۳۰ (۲۰۰۹) ۱۰۵۱.

۱۳. F. Manyakhin, A. Kovalev, A.E. Yunovich, Aging mechanisms of InGaN/AlGaN/GaN light-emitting diodes operating at high currents, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. ۳ (۱۹۹۸) ۵۳.

۱۴. M. Cai, D.G. Yang, S. Koh, C.A. Yuan, W.B. Chen, B.Y. Wu, G.Q. Zhang, Accelerated testing method of LED luminaries, ۲۰۱۲ ۱۳th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE) April ۱۶–۱۸, ۲۰۱۲, pp. ۱–۶.

۱۵. E. Jung, M.S. Kim, H. Kim, Analysis of contributing factors for determining the reliability characteristics of GaN-based white light-emitting diodes with dual degradation kinetics, IEEE Trans. Electron Devices ۶۰ (۱) (Jan. ۲۰۱۳) ۱۸۶–۱۹۱.

۱۶. Figures from commercially-available LED datasheets: Cree XREROY, LedEngin LZ۴۰۰B۲۱۰, Lumileds LXML-PR۰۱, Osram LD W۵SM, Seoul Semiconductor D۴۲۱۸۰.