Tabriz Journal of Electrical Engineering (TJEE), vol. 55, no. 3, 2025 Serial no. 113
DOI: 10.22034/tjee.2024.61975.4858

Enhanced Fault Detection in MicroLEDs through Microphotoluminescence Microscope Construction

Mohammad Hendijanifard[1*]

[1]School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
E-mail: Mohammad.Hendijani@shirazu.ac.ir
[*] corresponding author

Abstract
The microphotoluminescence microscope has been developed by integrating 405 nm excitation lasers into a conventional optical microscope system, enabling enhanced characterization of microLED devices. These lasers excite the photoluminescence bands of blue microLEDs, which emit at a wavelength of 450 nm. Defective or short-circuited microLED quantum wells fail to emit light under excitation and thus appear as dark spots in the captured images. This contrast facilitates the automatic identification and mapping of faulty microLEDs through advanced image processing algorithms. Early detection of defective microLEDs at the wafer processing stage within LED manufacturing facilities is crucial, as it allows manufacturers to promptly discard or reprocess faulty wafers, significantly reducing production costs and improving overall yield. Furthermore, the microphotoluminescence microscope provides a powerful tool for quality assurance by enabling detailed comparisons of microLED quality across different wafer batches. It also enhances the detection of substantial defects that can easily be overlooked by conventional microscopy techniques. Overall, the integration of this technology offers a cost-effective and efficient approach for in-line inspection and quality control in microLED production.

Keywords
Microphotoluminescence, blue microLEDs, early recognition of faulty LEDs.

Introduction
A novel manufacturing method for displays involves producing micro-LEDs and bonding them to a base display using a pick and place tool. However, during the LED manufacturing process, various factors can lead to faulty LEDs. Currently, faulty LEDs are only detectable after the final bonding process and wiring connections are complete, making it too late to rectify the issue. The introduction of a microphotoluminescence microscope could significantly improve the process by enabling early detection of faulty LEDs before the wiring connections are made, allowing for timely corrections and enhancing overall display quality.

Proposed Work and Methodology
A microphotoluminescence microscope has been developed to identify faulty micro-LEDs on the wafer. Utilizing MATLAB image processing, the quality of the micro-LEDs is further assessed, enabling a comprehensive evaluation of the micro-LED manufacturing process.

Conclusion
The photoluminescence emission quality of 1,721 micro-LEDs was examined, revealing that the light emission quality from the periphery and center of the micro-LEDs was lower compared to other regions. It is likely that the lower light quality at the periphery of the micro-LEDs is due to recombination at internal defects. However, the reason for the lower light quality at the center of the micro-LEDs remains unclear to the authors.

توسعه یک میکروسکوپ میکرو فوتولومینسانس برای شناسایی میکروال ای دی های معیوب در فرآیند ساخت

محمد هندیجانی فرد
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده
میکروسکوپ میکرو فوتولومینسانس جدیدی با استفاده از لیزرهای تحریک موج پیوسته ۴۰۵ نانومتر برای بررسی میکرو ال‌ای‌دی‌های آبی که در طول موج ۴۵۰ نانومتر نور فوتولومینسانس تولید می‌کنند، توسعه یافته است. این سیستم قادر است چاه‌های کوانتومی معیوب میکرو ال‌ای‌دی را که به دلیل ناتوانی در تولید نور زیر میکروسکوپ تاریک دیده می‌شوند، شناسایی کند. در این پژوهش نشان داده شده که میکروسکوپ میکرو فوتولومینسانس می‌تواند نقص‌ها را مستقیماً روی ویفر و در حین فرآیند ساخت، پیش از تست الکتریکی، تشخیص دهد. شناسایی زودهنگام چنین ایراداتی از ادامه تولید ال ای دی های معیوب جلوگیری کرده و به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند. همچنین، این سیستم قادر است برخی عیوب پنهان را که با میکروسکوپ‌های معمولی قابل مشاهده نیستند، آشکار کند. این روش پیشرفته امکان ارزیابی و مقایسه کیفیت میکرو ال‌ای‌دی‌ها را در بین ویفرها و حتی درون یک تصویر فراهم می‌آورد و به عنوان روشی غیرتماسی و دقیق برای کنترل کیفیت در خط تولید میکرو ال‌ای‌دی‌ها شناخته می‌شود.

کلمات کلیدی
میکروفوتولومینسنس، میکروال ای دی آبی، تشخیص زودهنگام ال ای دی معیوب.

نام نویسنده مسئول: محمد هندیجانی فرد
ایمیل نویسنده مسئول: mohammad.hendijani@shirazu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳
تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

۱- مقدمه

تحقیقات گسترده‌ای برای افزایش بازدهی ال ای دی ها در جریان است [۱, ۲]. ال ای دی های عادی کاربردهای متعددی از جمله در تولید نمایشگرها دارند. استفاده از میکرو ال ای دی ها بخصوص در تولید صفحات نمایشی مورد توجه جدی قرار گرفته است [۳-۷]. فن‌آوری های نمایشگر مانند نمایشگر کریستال مایع، ال سی دی، و ال ای دی های ارگانیک، اولد، در حال حاضر به صورت کاملا تجاری وجود دارند اما صنعت به سمت نمایش‌گرهایی با میکروال ای دی ها حرکت می کند [۸, ۹]. تمرکز اصلی در فناوری نمایشگر بر روی نمایشگرهایی است که با بازدهی بالاتر ،در نتیجه مصرف باتری پایین تر، و ویژگی های برتر نوری همچون شدت بیشتر نور تابش شده می باشند. از این منظر استفاده از میکرو ال ای دی ها سه رنگ و همچنین استفاده در کاربردهای دیگر مورد توجه می باشد [۱۰-۱۵]. همان‌طور که میکرو ال ای دی ها کوچک تر می شود با توجه به افزایش نقاط حول لبه ال ای دی، افزایشی در نواحی بازترکیب [۱۶]، به‌ویژه دیواره های جانبی نسبت به مناطق انتشار نور وجود دارد. این مطلب می‌تواند منجر به راندمان کوانتومی کمتر در مقایسه با ال ای دی های بزرگ تر شود. علاوه بر این بازترکیب تابشی میکروال ای دی‌ها در دیواره های جانبی می تواند بر زاویه انتشار نور خروجی تاثیر بگذارد. در روند تولید ال ای دی ها یک سری عوامل باعث ایجاد عیوب در ویفر های ال ای دی می شوند. این عیوب بسیار متنوع هستند و در طول فرایند چه در فرایند اپی یا لیزر و یا نقاط دیگر ممکن است رخ بدهند. در حالت معمولی اثر عیوب بر عملکرد ال ای دی ها تا پایان تولید کامل ال ای دی ها قابل مشاهده نمی باشد. به‌عبارت دیگر بعد از تولید کامل ال ای دی ها می توان آن ها را از ویفر جدا کرد و به اتصال الکتریکی متصل نمود و سپس تست الکتریکی و تست شدت تابش را اعمال کرد و از عملکرد صحیح ال ای دی ها اطمینان حاصل نمود. یعنی کل فرایند تولید تا انتهای خط تولید نیازمند است که طی شود. در حالت عادی تست الکتریکی ساده و کم هزینه تر می باشد اما با توجه به این که اتصالات درونی ال ای دی ها برای ایجاد کردن مسیر عبور برق و همچنین اتصالات نهایی برای متصل کردن پروب های تست الکتریکی در طول خط تولید ال ای دی بوجود می آیند، در طول خط تولید ال ای دی ها امکان تست الکتریکی وجود ندارد. به عنوان مثال ویفر سیلیکونی با فرایند مناسب لایه نشانی می شود و به فرض لایه نشانی به درستی صورت نگرفته باشد. در این حالت ممکن است دو لایه در نقاطی از زیر به هم متصل باشند و مسیر باز برای عبور جریان برق ایجاد کنند. سپس ال ای دی ها از یکدیگر جدا شوند و مسیر باز جریان برق در انتها منجر به خرابی چندین ال ای دی شود. بعد از جدا کردن ال ای دی ها از یکدیگر هنوز نمی توان تست الکتریکی انجام داد به این دلیل که هنوز اتصالات مثبت و منفی بر روی ال ای دی ها تشکیل نشده اند و نمی توان پروب تست الکتریکی را متصل کرد. مشکل دیگر این است که در طول خط تولید نمی توان تک تک ویفر ها را از تست الکتریکی عبور داد زیرا تست الکتریکی هم منجر به اثر گذاشتن پروب بر روی ال ای دی های در حال ساخت می شود که می تواند منجر به معیوب شدن آتی آن ها شود و هم یک فرایند اضافی می باشد که عبور از این فرایند اضافی می تواند منجر به نشستن ذرات اضافه تر بر ال ای دی ها و معیوب کردن ال ای دی‌ها شود. بنابراین استفاده از

یک روش تست از راه دور و بدون اتصال به ال ای دی ها مطلوب است. با توجه به این که اتصالات الکتریکی هنوز تشکیل نشده اند و روش فوتولومینسانس، قدرت روشن کردن ال ای دی ها از راه دور را دارد، می تواند یک روش مطلوب برای این کار باشد.

با استفاده از میکروفوتولومینسانس می توان در طول فرایند تولید و پس از جانشانی چاه های کوانتومی و بدون اتصال الکتریکی و فقط بر روی ویفر ال ای دی ها را مجبور به تابش نور فوتولومینسانس کرد. در این فرایند اگر ال ای دی ها دارای عیوب داخلی به عنوان مثال اتصال کوتاه چاه کوانتومی باشند، قابل تشخیص می باشند. یعنی می توان ال ای دی ها را دسته بندی نمود و اگر ال ای دی دارای عیوب داخلی باشد در میانه خط تولید اقدام به حذف ویفرهای معیوب کرد. حذف زودهنگام ویفرهای معیوب می تواند منجر به کاهش قیمت تولید ال ای دی ها شود.

۲- دستگاه تجربی

در حال حاضر محققان از میکرو فوتولومینسانس برای بررسی کیفیت میکروال ای دی ها استفاده می کنند [۶, ۱۷-۱۹]. ما با این حال به طور خاص میکروسکوپ نور فوتولومینسانس خود را ساختیم و از آن در تشخیص زودهنگام میکرو ال ای دی های معیوب در فرایند خط تولید ال ای دی ها استفاده کردیم.

البته بایستی یاداور شد که دستگاه های قابل خریداری از بازار به‌منظور بررسی میکرو ال ای دی ها با روش فوتولومینسانس به عنوان مثال دستگاه فوتولومینسانس هاماماتسو و یا میکروسکوپ فلوروسنس الیمپوس نیز وجود دارد. تیم ما به دلیل این که حداکثر کنترل را بر روی تست های آزمایشگاهی و با حداقل قیمت ممکن داشته باشد اقدام به ساخت مستقیم دستگاه کرده است. دلیل دیگر ساخت دستگاه کنترل بر روی میزان بزرگنمایی می باشد. به علاوه این که می توان دوربین را با یک دستگاه سنجش طیف نوری هم جایگزین کرد. به عنوان مثال برای استفاده از میکرو ال ای دی ها برای ساخت صفحه نمایش های پیشرفته، نیاز است که طیف نوری میکرو ال ای دی ها به دقت تنظیم شود و به مرور زمان هم تغییر نکند. طیف نوری میکرو ال ای دی ها بین دسته های مختلف و ویفرهای مختلف بایستی کاملا با هم تطابق داشته باشند در غیر این صورت طیف نوری ساتع شده از صفحه نمایش ها با هم متفاوت خواهد بود. بدین منظور می توان از طیف سنج به جای دوربین استفاده کرد و طیف خروجی از میکرو ال ای دی ها را مورد آزمایش قرار داد. از دیگر کاربردهای ساخت یک دستگاه، استفاده به منظور کاربردهای متفاوت می باشد. به عنوان مثال یکی از نویسندگان [۲۰] در کاربردی مشابه، طرح مقاله حاضر را به منظور پیدا کردن میکرو ال ای دی های معیوب و سبز رنگ در فرایند تولید صفحه نمایش و بر روی صفحه نمایش پایه هم استفاده کرده است. در مقاله حاضر تمرکز اصلی بر روی میکرو ال ای دی های آبی رنگ و بر روی ویفر و در حین فرایند ساخت می باشند. از آنجا که میکرو ال ای دی های بر روی ویفر فاصله بسیار نزدیک تری نسبت به میکرو ال ای دی های بر روی صفحه نمایش دارند، آنالیز نوری میکرو ال ای دی های بر روی ویفر با کیفیت لنز برابر بسیار مشکل تر از آنالیز میکرو ال ای دی ها بر روی صفحه نمایش می باشد.

همانطور که در شکل ۱ الف نشان داده شده است، دستگاه شامل یک میکروسکوپ معمولی به عنوان هسته مرکزی می باشد. در اطراف میکروسکوپ یک سری لیزر جایگذاری شده است. این لیزرها نور را در انرژی فوتونی بالاتر از طول موج فوتولومینسانس ۴۵۰ نانومتر ساتع می کنند. ۴۵۰ نانومتر، نور فوتولومینسانس قابل ساتع شدن توسط ال ای دی های آبی رنگ می باشد.

لزومی ندارد که حتما از لیزر به عنوان تحریک کننده استفاده کرد. همین که از نور با انرژی فوتونی بالاتر از ۴۵۰ نانومتر استفاده کنیم و شدت تابش به اندازه کافی باشد که تحریک نور در ال ای دی منجر به ایجاد سیگنال کافی برای عبور از فیلتر و بازیابی توسط دوربین شود، کفایت می کند. ما در این پژوهش از لیزرهای با طول موج ۴۰۵ نانومتر استفاده کرده‌ایم و با تنظیم زمان ادغام دوربین به شدت کافی مورد نیاز برای دریافت نور فوتولومینسانس رسیدیم.

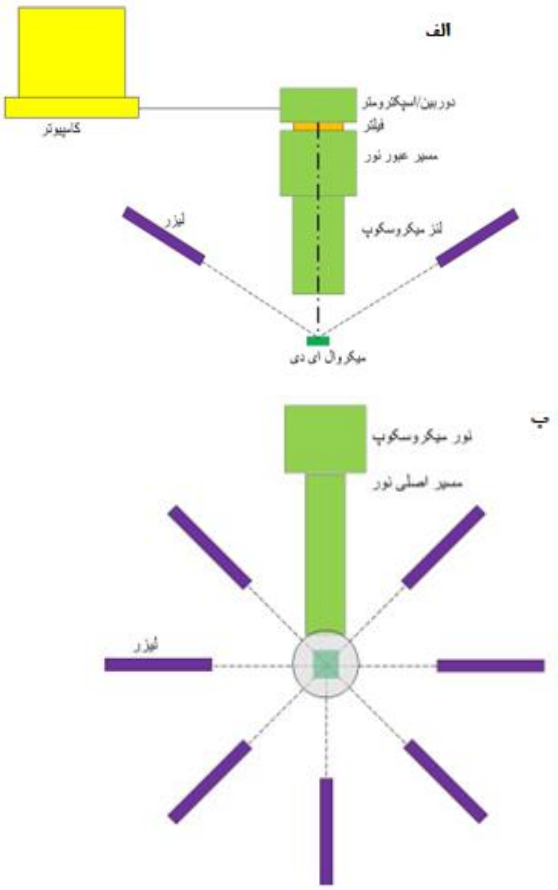
میکروسکوپ در دو حالت نور معمولی و نور فوتولومینسانس کار می‌کند. زمانی که لازم است تابش فوتولومینسانس داشته باشیم، نور میکروسکوپ نوری خاموش می شود و لیزرها تنها منبع روشنایی هستند. میکرو ال ای دی های آبی توسط لیزرها برانگیخته می شوند و باعث می شوند تا در طول موج ۴۵۰ نانومتر تابش فوتولومینسانس داشته باشند.

پس از تابش نور به ال ای دی ها، نور در بازه های موج مختلف از سطح ال ای دی ها بازتابش می شود. یکی از نورهای تولید شده توسط ال ای دی ها نور فوتولومینسانس می باشند. راندمان تولید نور فوتولومینسانس نسبتا پایین است و بنابراین در طول مسیر و پیش از دوربین یک فیلتر از نوع باندگذر در طول موج ۴۵۰ نانومتر جای گذاری شده است. فیلتر همه طول موج های بازتابش شده از ال ای دی ها از جمله نور اصلی تحریک را از بین می برد و بدین طریق اطمینان حاصل می‌شود که فقط نور فوتولومینسانس ساتع شده از ال ای دی ها عبور می کنند و به دوربین می رسند. نور فوتولومینسانس ساتع شده از ال ای دی ها تابع نور ورودی به ال ای دی ها توسط لیزر، راندمان کوانتومی ال ای دی ها، موانع مسیر نوری تا رسیدن به دوربین و زمان ادغام صفحه دوربین می باشد. نور بیش از اندازه می تواند منجر به سفید شدن پیکسل های دوربین شود و نور کمتر از اندازه می تواند منجر به عدم مشاهده نور فوتولومینسانس و سیاه نمایش دادن ال ای دی ها شود. در نتیجه با تنظیم نور در مسیر و با کمک گرفتن از زمان ادغام دوربین می توان به تولید عکس های قابل مشاهده توسط دوربین اقدام نمود.

به‌منظور بهبود نور منتشر شده به‌طرف ال ای دی ها، منابع نوری لیزر به صورت یکنواخت دور میکروسکوپ پخش شده اند. در این نمونه از ۷ لیزر در اطراف سر مرکزی میکروسکوپ استفاده شده است. در طول فرایند عکس برداری فوتولومینسانس، منبع نوری میکروسکوپ خاموش می شود و فقط از منبع نوری لیزر استفاده می شود. از منبع نوری میکروسکوپ، پیش از کاربرد فوتولومینسانس و به منظور پیمایش به نقطه مورد نظر بر روی ویفر استفاده می گردد. پرتو لیزر بر روی هدف (ال ای دی ها) دارای قطر ۱۰ میلیمتر می باشد. لیزرها با ۶۰ درجه از جهت نرمال سطح میکرو ال ای دی چیده شده‌اند. لنزهای میکروسکوپ برای کار فعلی نیکون ۲۰X است.

دوربین مورد استفاده از نوع سیاه و سفید و ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ پیکسل می باشد اما با استفاده از فیلتر باندگذر مطمین می شویم که فقط نور آبی فوتولومینسانس به دوربین می رسد. زمان ادغام دوربین مورد استفاده در این کار ۲۰۰ میلی ثانیه است.

فلورسانس و یا فوتولومینسانس ممکن است در مواد آلی و همچنین غیر آلی مانند ال ای دی ها رخ دهد[۱۴]. نیاز اصلی برای فوتولومینسانس مناسب این است که طول موج ورودی به هدف دارای انرژی فوتونی بالاتری نسبت به نور ساتع شده فوتولومینسانس باشد. در مورد میکرو ال ای دی ها، نور ورودی با انرژی فوتونی بالاتر منجر به تحریک چاه های کوانتومی میکروال ای دی و در نتیجه ساتع کردن نور فوتولومینسانس با انرژی فوتونی کمتر شود. ال ای دی به‌جای تحریک فوتولومینسانسی چاه‌های کوانتومی، می‌توانند به طور فیزیکی به منبع انرژی الکتریکی متصل بشوند و تحریک الکتریکی منجر به تولید نور از نوع الکترولومینسانس شود.

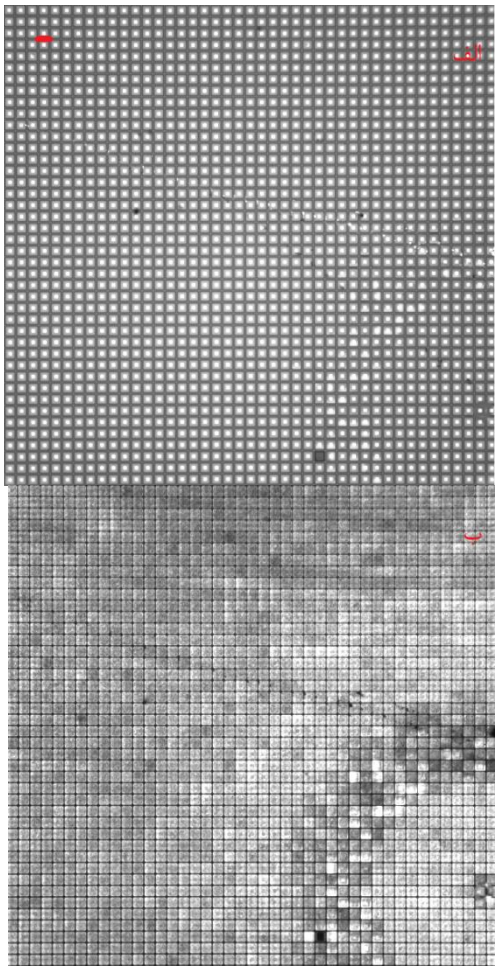


تصویر۱- (الف) نمای‌جانبی میکروسکوپ میکرو فوتولومینسانس: میکروسکوپ از یک عدسی میکروسکوپی با لیزرهای ۴۰۵ نانومتری تشکیل شده است که در اطراف مرکز آن قرار گرفته‌اند. پرتوهای لیزر با خطوط نازک خط چین نشان داده شده اند. پرتو فوتولومینسانس به صورت خط نقطه ضخیم تر نشان داده شده است. (ب) نمای بالای میکروسکوپ فوتولومینسانس: در این نما، هفت لیزر در اطراف مرکز میکروسکوپ قرار گرفته‌اند تا از تحریک یکنواخت اطمینان حاصل کنیم. میکروال ای دی به صورت مستطیلی در مرکز پرتوهای لیزر به تصویر کشیده شده است و مسیر دوربین به صورت دایره‌ای نشان داده شده است.

۳- داده ها و آنالیز

شکل ۲ الف تصویری از میکرو ال ای دی های سوار شده بر روی ویفر در طی فرایند ساخت را نمایش می دهد. این تصویر توسط میکروسکوپ معمولی در حالی که حالت فوتولومینسانس خاموش می باشد تصویربرداری شده است. برخی از عیوب ساخت ال ای دی ها در فرایند تولید در این شکل قابل مشاهده است. با توجه به تضاد پایین تصویر در عکس معمولی، تشخیص اتوماتیک همین مقدار عیوب بر روی ویفر می تواند کمی چالش برانگیز باشد. شکل ۲ ب تصویر همان مکان بر روی ویفر را زمانی که حالت فوتولومینسانس روشن می باشد نمایش می دهد. مشخصا عیوب ساخت میکرو ال ای دی با تضاد تصویری بالا قابل مشاهده است. علاوه بر عیوبی که در تصویر میکروسکوپ معمولی قابل مشاهده است، برخی عیوب به عنوان مثال شکل دایروی گوشه پایین سمت راست تصویر، در تصویر میکروسکوپ معمولی اصلا قابل مشاهده نیست. عیوبی از این دست می تواند در فرایند تولید میکرو ال ای دی و به عنوان مثال در ثابت کردن مکان ویفر، طی فرایند به کمک سوراخ های خلاء به‌وجود آمده باشد. بدون استفاده از فوتولومینسانس چنین عیوبی غیر قابل تشخیص است. ال ای دی تاریک پایین تصویر ۲ در هر دو تصویر معمولی و فوتولومینسانس به شکل متفاوتی از بقیه می باشد. دلیل این امر این است که میکرو ال ای دی از ویفر جدا شده است و در این مکان تاریک میکرو ال ای دی موجود نمی باشد.

در تصویر ۲ب در قسمت بالا و سمت چپ تصویر یک سری میکرو ال ای دی هایی که تحت تاثیر عیوب ساخت و تولید قرار نگرفته اند مشاهده می گردد. همان طور که مشاهده می شود این ال ای دی ها از نظر تولید نور فوتولومینسانس دارای راندمان های متفاوتی می باشند و برخی کمی تیره تر و برخی کمی روشن تر می باشند. این حد از تغییرات در ال ای دی ها احتمالا طبیعی باشد اما می توان با بهبود مراحل ساخت و تولید به بهبود این شرایط نیز کمک کرد.



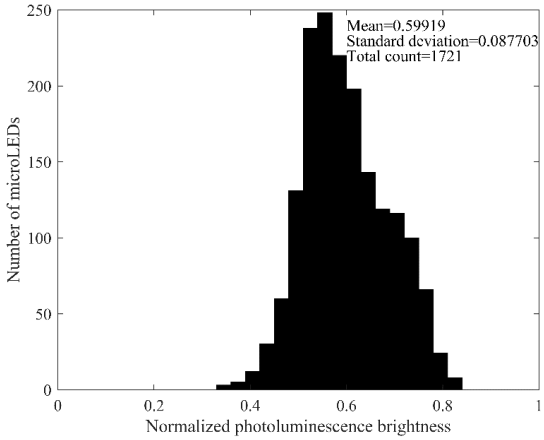
تصویر۲- (الف) میکرو ال ای دی های سوار شده بر روی ویفر در فرایند ساخت. این تصویر توسط میکروسکوپ معمولی گرفته شده است. (ب) همان نما از تصویر ۲ الف که این بار توسط میکروسکوپ فوتولومینسانس تصویربرداری شده است. مقیاس نمایش داده شده بر روی عکس ۱۰ میکرون می باشد. هر یک از مربع ها یک میکرو ال ای دی می‌باشد.

علاوه‌بر عیوب نمایش داده شده در فرایند ساخت و تولید، برخی میکرو ال ای دی های نمایش داده شده در قسمت سمت راست و پایین تصویر خیلی سیاه می باشند و تقریبا نور فوتولومینسانس ضعیفی ساتع می کنند. چنین میکرو ال ای دی هایی احتمالا دارای یکی از عیوب الکتریکی از درون ال ای دی می باشند. به عنوان مثال احتمال دارد این میکرو ال ای دی ها در قسمت چاه کوانتومی دچار اتصال کوتاه شده باشند و در نتیجه در فرایند استفاده توسط

توان الکتریکی نیز روشن نخواهند شد. در صورتی‌که ویفری دارای عیوب بیش از اندازه باشد بدین‌ترتیب قابل تشخیص و حذف زودهنگام از فرایند تولید می باشد. حذف زودهنگام از فرایند تولید می تواند منجر به کاهش هزینه‌های ساخت شود.

کیفیت میکرو ال ای دی ها نیز به این روش قابل ارزیابی می باشد. به عنوان مثال در شکل ۳ با کمک تحلیل تصویر ۲ب توسط نرم افزار متلب، هر یک از میکرو ال ای دی ها از یکدیگر جداسازی شده اند و میزان نور فوتولومینسانس ساتع شده از هر میکرو ال ای دی متوسط گیری شده است.

تحلیل تصویر در متلب توسط ماجول تحلیل تصویر انجام می شود و پس از باز کردن تصویر کلی در متلب، تصویر هر یک از میکرو ال ای دی ها از یکدیگر جدا شدند. سپس میزان شدت هر پیکسل بر حسب نقطه مکانی بر روی میکرو ال ای دی استخراج شد. برای هر میکرو ال ای دی می توان میزان نور متوسط از همه پیکسل ها را معدل گیری کرد و هیستوگرام نور ساتع شده فوتولومینسانس از ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی رسم شده است. نور متوسط ساتع شده از این مجموعه ویفرها قابل مقایسه با نور ساتع شده از دیگر ویفرهای میکرو ال ای دی می باشد و در نتیجه کیفیت هر مجموعه ویفر قابل ارزیابی است.



تصویر۳- شدت نور فوتولومینسانس دریافت شده به کمک آنالیز تصویر و متوسط گیری از ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی.

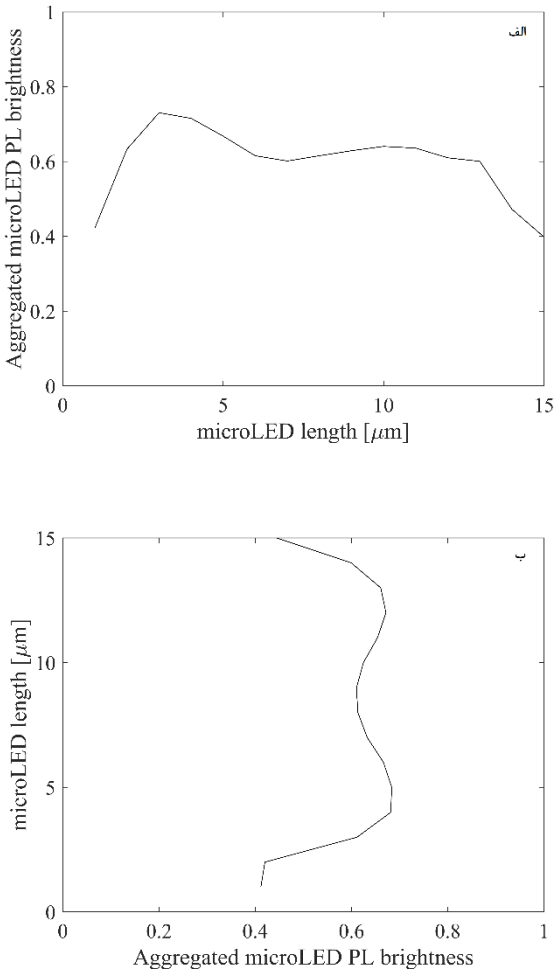
می توان هر پیکسل نوری بر روی میکرو ال ای دی را در جهات افقی و یا عمودی با پیکسل های همان ردیف و یا ستون معدل گیری کرد. بدین ترتیب می توان کیفیت نور ساتع شده ار یک میکرو ال ای دی را بر حسب مکان بر روی میکرو ال ای دی رسم کرد. برای بهبود داده ها همین کار را بر روی یک مجموعه میکرو ال ای دی (در این حالت ۱۷۲۱ عدد) تکرار کرد و نتیجه حاصل از کلیه میکرو ال ای دی ها را در یک شکل رسم کرد.

به عنوان مثال در شکل ۴، کلیه میکرو ال ای دی های تصویر ۲ب توسط متلب استخراج شده اند و نور ساتع شده از نقاط مختلف میکرو ال ای دی ها به تفکیک متوسط گیری در جهت افقی (شکل ۴ الف) و معدل گیری به صورت عمودی (شکل ۴ب) ارایه شده است. در واقع شکل ۴ علاوه بر متوسط گیری بر روی جهت های افقی و عمودی، بر روی کلیه ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی نیز متوسط گیری انجام داده است. بنابراین می توان از کیفیت سطح هر میکرو ال ای دی بر اساس این داده اطلاعات مفیدی کسب کرد.

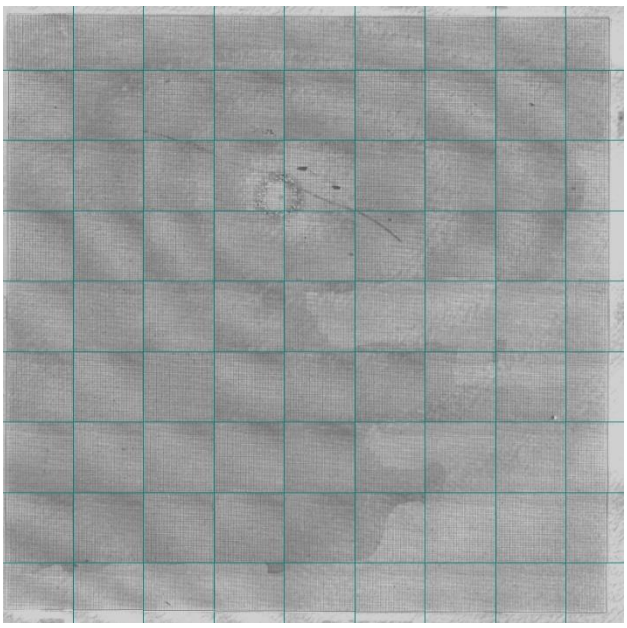
به‌عنوان مثال همان طور که در شکل های ۴ الف و ۴ ب مشاهده می شود و انتظار می رفت، در حول سطح بیرونی میکرو ال ای دی احتمالا ترکیب سطحی بیشتری وجود دارد و در نتیجه میزان نور ساتع شده در سطح بیرونی میکرو ال ای دی به شدت کاهش یافته است. درواقع در صورتی که قدرت تفکیک میکروسکوپی بهتری وجود می داشت، احتمالا می توانستیم تفکیک بهتری از نور ساتع شده در حول سطح بیرونی میکرو ال ای دی داشته باشیم. به دلیل نامعلومی وسط میکرو ال ای دی ها نور ساتع شده فوتولومینسانس کمتری دارند و این مورد قابل بررسی بیشتر می باشد.

از شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که به‌منظور افزایش راندمان میکرو ال ای دی ها می توان بر روی خصوصیات سطح خارجی میکرو ال ای دی ها نیز کار کرد.

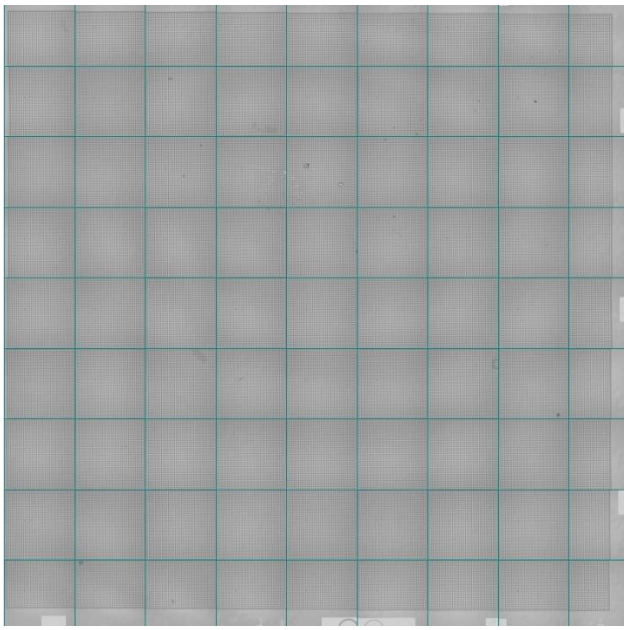
به‌عنوان مثال احتمالا اثر کاهش نور ساتع شده در مرزهای خارجی به خاطر اتصال نامناسب تر در حواشی انتهای چاه کوانتومی باشد. این عدم اتصال مناسب را می توان با لایه نشانی به عنوان مثال فلز روی در اطراف بدنه میکرو ال ای دی ها اصلاح کرد. انتظار می‌رود به مرور زمان میکرو ال ای دی ها در اطراف بدنه از نقطه اتصال به چاه کوانتومی در طولانی مدت اتصال کوتاه برقرار بکنند و از کار بیافتند. بنابراین می توان به روش های به‌منظور بهبود عمر مفید میکرو ال ای دی ها با لایه نشانی مناسب در اطراف بدنه هم کار کرد.



تصویر۴- (الف) شدت نور فوتولومینسانس دریافت شده از متوسط گیری از ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی سوار شده بر روی ویفر در جهت افقی. (ب)- شدت نور فوتولومینسانس دریافت شده از متوسط گیری از ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی سوار شده بر روی ویفر در جهت عمودی.



تصویر۵- تصویر فوتولومینسانس از بخش کوچکی از یک ویفر حاوی میکرو ال ای دی ها در حین پروسه تولید. این بخش حاوی تقریبا ۱۲۳۰۰۰ میکرو ال ای دی می باشد.



تصویر۶- تصویر بازتابشی با میکروسکوپ نوری بدون فوتولومینسانس از همان بخش ارائه شده در تصویر ۵.

شکل ۵ تصویر یک سری عکس فوتولومینسانس بر روی قطعه ای از یک ویفر به عرض و طول تقریبا ۵ در ۶ میلیمتر را نمایش می‌دهد. طرز تشکیل تصویر ۵ مشابه تصویر ۲ می‌باشد با این تفاوت که بعد از تصویربرداری مشابه تصویر ۲، قطعات تصویر با نرم افزار در کنار هم قرار می گیرند به‌نحوی که تصویر شماره ۵ تشکیل شود. انواع عیوب مرتبط با تولید میکرو ال ای دی ها در این تصویر قابل مشاهده است. تشخیص این عیوب در این مرحله مهم می باشد و عامل ایجاد عیوب در خط تولید قابل اصلاح است.

تصویر ۶ همان نمای تصویر ۵ می‌باشد و این بار به کمک میکروسکوپ نوری تصاویر دریافت شده است و توسط نرم افزار به هم چسبانده شده اند. از مقایسه تصاویر ۵ و ۶ مشاهده می شود که تصویر نوری هرچند بسیار مفید است اما برخی عیوب بدون مشاهده اثر فوتولومینسانس قابل تشخیص نمی باشند. همچنان یاداور می شود که در این مرحله میکرو ال ای دی ها به صورت ساخت ناقص بر روی ویفر می باشند و روش های تشخیص عیوب به کمک اتصال الکتریکی قابل بهره برداری نمی باشند.

۴- نتیجه گیری

یک دستگاه تست فوتولومینسانس به منظور تعیین کیفیت میکرو ال ای دی ها در طی خط تولید میکرو ال ای دی ساخته شده است. با استفاده از این دستگاه نشان داده شد که برخی از عیوب که در حالت عادی قابل ردیابی با میکروسکوپ معمولی نیستند قابل شناسایی زودهنگام می باشند. شناسایی زودهنگام میکرو ال ای دی های معیوب می تواند منجر به از رده خارج کردن زودهنگام ویفرهای معیوب و در نتیجه کاهش قیمت تولید شود.

کیفیت میکرو ال ای دی های هر ویفر نیز به کمک این میکروسکوپ قابل اندازه گیری می باشد. به عنوان مثال کیفیت ۱۷۲۱ میکرو ال ای دی از لحاظ تابش نور فوتولومینسانس مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که کیفیت نور تابش شده از محیط و همچنین مرکز میکرو ال ای دی پایین تر از بقیه قسمت ها می باشد. احتمالا کیفیت نور در محیط میکرو ال ای دی به دلیل بازترکیب در عیوب داخلی پایین تر باشد اما برای گروه نویسنده مشخص نیست که چرا مرکز میکرو ال ای دی ها از کیفیت نوری پایین تری برخوردارند.

در مقاله حاضر تمرکز اصلی فقط بر روی میکرو ال ای دی های رنگ آبی و بر روی ویفر بود. برای تولید یک صفحه نمایش میکرو ال ای دی های رنگ قرمز و سبز نیز مورد نیاز است. علاوه بر تست میکرو ال ای دی بر روی ویفر، تست میکرو ال ای دی بر روی صفحه نمایش هم مورد توجه می باشد. با تکنولوژی برداشتن و جایگذاری می توان میکرو ال ای دی ها را بر روی صفحه نمایش پایه منتقل کرد [۷] و در حین تولید صفحه نمایش اقدام به تشخیص زودهنگاه صفحات نمایش معیوب کرد.

۵- نقد کوتاه

رضائی و همکاران [۲۱] یک مدل بهینه سازی انرژی و قیمت نظیر به نظیر برای تولید برق توسط انرژی های تجدیدپذیر ارائه کرده اند. در همین راستا و برای جبران کمبود برق ایران پیشنهاد می شود که دولت مشوقی نظیر افزایش بسیار محدود متراژ قابل ساخت آپارتمان ها در نظر بگیرد و در ازای آن سازنده را ملزم به ارائه مقدار مشخصی نصب برق تجدیدپذیر کند. به عنوان مثال با ساخت ۱۰۰۰۰۰ واحد مسکونی در یک سال و بدون هزینه کرد دولتی می توان ۵۰۰ مگاوات نصب خورشیدی داشت.

محمدیان فرد و همکاران [۲۲] یک مدل المان محدود برای سلول‌های خورشیدی دو وجهی پروسکایتی ارائه داده اند. علی رغم این که هر نوع کار بر روی سلول های خورشیدی جدید و از جمله پروسکایتی می تواند ارزشمند باشد، بایستی توجه داشت که چرا مدل های جدید سلول خورشیدی در مقایسه با سلول های سیلیکونی هر چند با راندمان بالاتر در بازار تجاری به سختی مورد استقبال قرار می گیرند. به نظر می رسد چندین دهه کار بر روی سیلیکون، ارزان تر شدن این ماده و فراهم بودن زیرساخت های ساخت و تولید سیلیکون نقش مهمی در رایج نشدن انواع دیگر سلول خورشیدی داشته باشند.

مراجع

[1] W. Bao, Z. Su, C. Zheng, J. Ning, S. Xu, Carrier Localization Effects in InGaN/GaN Multiple-Quantum-Wells LED Nanowires: Luminescence Quantum Efficiency Improvement and “Negative” Thermal Activation Energy, Scientific Reports, 6(1) (2016) 34545.

[2] B.O. Jung, W. Lee, J. Kim, M. Choi, H.Y. Shin, M. Joo, S. Jung, Y.H. Choi, M.J. Kim, Enhancement in external quantum efficiency of AlGaInP red μ-LED using chemical solution treatment process, Sci Rep, 11(1) (2021) 4535.

[3] Z. Chen, S. Yan, C. Danesh, MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges, Journal of Physics D: Applied Physics, 54(12) (2021) 123001.

[4] Z. Pan, C. Guo, X. Wang, J. Liu, R. Cao, Y. Gong, J. Wang, N. Liu, Z. Chen, L. Wang, M. Ishikawa, Z. Gong, Wafer-Scale Micro-LEDs Transferred onto an Adhesive Film for Planar and Flexible Displays, Advanced Materials Technologies, 5(12) (2020) 2000549.

[5] H.S. Wasisto, J.D. Prades, J. Gülink, A. Waag, Beyond solid-state lighting: Miniaturization, hybrid integration, and applications of GaN nano- and micro-LEDs, Applied Physics Reviews, 6(4) (2019) 041315.

[6] Y. Wu, J. Ma, P. Su, L. Zhang, B. Xia, Full-Color Realization of Micro-LED Displays, Nanomaterials (Basel), 10(12) (2020).

[7] S. Zhang, H. Zheng, L. Zhou, H. Li, Y. Chen, C. Wei, T. Wu, W. Lv, G. Zhang, S. Zhang, Z. Gong, B. Jia, H. Lin, Z. Gao, W. Xu, H. Ning, Research Progress of Micro-LED Display Technology, in: Crystals, 2023.

[8] A.R. Anwar, M.T. Sajjad, M.A. Johar, C.A. Hernández-Gutiérrez, M. Usman, S.P. Łepkowski, Recent Progress in Micro-LED-Based Display Technologies, Laser & Photonics Reviews, 16(6) (2022) 2100427.

[9] Y. Huang, E.-L. Hsiang, M.-Y. Deng, S.-T. Wu, Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives, Light: Science & Applications, 9(1) (2020) 105.

[10] K. Ding, V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür, H. Morkoç, Micro-LEDs, a Manufacturability Perspective, in: Applied Sciences, 2019.

[11] Z. Liu, C.H. Lin, B.R. Hyun, C.W. Sher, Z. Lv, B. Luo, F. Jiang, T. Wu, C.H. Ho, H.C. Kuo, J.H. He, Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology, Light Sci Appl, 9 (2020) 83.

[12] F. Templier, MicroLED technology: A unique opportunity toward “more than displays”, Information display, 39(4) (2023) 13-17.

[13] J. Chen, H. Ding, X. Sheng, Advanced manufacturing of microscale light-emitting diodes and their use in displays and biomedicine, Journal of information display, 25(1) (2024) 1-12.

[14] D. Chen, Y.C. Chen, G. Zeng, D.W. Zhang, H.L. Lu, Integration technology of micro-LED for next-generation display, Research (Wash D C), 6 (2023) 0047.

[15] L. Hu, J. Choi, S. Hwangbo, D.H. Kwon, B. Jang, S. Ji, J.H. Kim, S.K. Han, J.H. Ahn, Flexible micro-LED display and its application in Gbps multi-channel visible light communication, npj Flexible Electronics, 6(1) (2022) 100.

[16] J.J. Wierer Jr, N. Tansu, III-Nitride Micro-LEDs for Efficient Emissive Displays, Laser & Photonics Reviews, 13(9) (2019) 1900141.

[17] F.H. Hsiao, W.C. Miao, Y.H. Hong, H. Chiang, I.H. Ho, K.B. Liang, D. Iida, C.L. Lin, H. Ahn, K. Ohkawa, C.Y. Chang, H.C. Kuo, Structural and optical analyses for InGaN-based red micro-LED, Discov Nano, 18(1) (2023) 77.

[18] Q. Wang, Z. Ji, Y. Zhou, X. Wang, B. Liu, X. Xu, X. Gao, J. Leng, Diameter-dependent photoluminescence properties of strong phase-separated dual-wavelength InGaN/GaN nanopillar LEDs, Applied Surface Science, 410 (2017) 196-200.

[19] J. Zhan, Z. Chen, Q. Jiao, Y. Feng, C. Li, Y. Chen, Y. Chen, F. Jiao, X. Kang, S. Li, Q. Wang, T. Yu, G. Zhang, B. Shen, Investigation on strain relaxation distribution in GaN-based μLEDs by Kelvin probe force microscopy and micro-photoluminescence, Opt. Express, 26(5) (2018) 5265-5274.

[20] M. Hendijanifard, Developing a micro-photoluminescence microscope for identifying faulty micro-LEDs in the fabrication process, Applied Physics B, 129(11) (2023) 182.

[21] N. Rezaei, A. Mohammadi, M. Gholami, "Optimal Peer-to-Peer Energy Trading Framework for Interconnected DC Microgrids Considering Power Loss Constraints", Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, 2023.

[22] A. Mohammadian Fard, S. Matob, R. Yedipour, "Design and Simulation of High Efficiency Bifacial Perovskite Solar Cell", Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, 2024.