زمینهٔ علمی جایزهٔ نوبل فیزیک ۲۰۱۴

دیودهای نورآبی گسیل کارآمد، چشمه‌های نورسفید کم‌مصرف تولید می‌کنند

منیژه رهبر

کلیدواژه‌ها: دیود نور گسیل، نیمرسانا، LED فرو سرخ، پیوندگاه، گالیم نیترید، LED مرئی، آلایش GaN

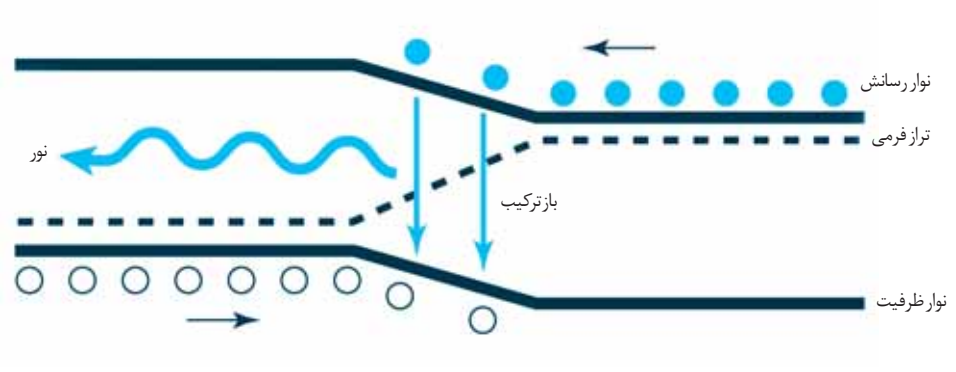
دیودهای نورگسیل (LEDS) چشمه‌های نور در نواری باریک و مبتنی بر قطعات نیمرسانا هستند که طول موج آن‌ها در گسترهٔ فروسرخ تا فرابنفش قرار دارد. اولین LEDها در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ ابتدا در چند آزمایشگاه بررسی و سپس ساخته شدند. آن‌ها نور را در طول موج‌های متفاوت، از فروسرخ تا سبز، گسیل می‌کردند. اما گسیل نور آبی کار دشواری بود که دستیابی به آن پس از بیش از سه دهه امکان‌پذیر شد؛ چراکه این کار به توسعهٔ روش‌هایی برای رشد بلورهای باکیفیت، همچنین کنترل آلایش p نیمرساناهای با گاف نوار پهن نیاز داشت که فقط در پایان سال‌های ۱۹۸۰ با ساخت گالیم نیترید (GaN) از قوه به فعل درآمد. توسعهٔ LEDهای آبی کارآمد نیازمند تولید آلیاژهای مبتنی بر GaN با ترکیب‌های مختلف و قرار دادن آن‌ها در ساختارهای چند لایه مانند پیوندگاه‌های ناهمگن و چاه‌های کوانتومی نیز بود.

اختراع LEDهای آبی کارآمد به تولید چشمه‌های نور سفید، برای روشنایی، انجامید، به این شکل که، با برانگیختن مواد فسفری با یک LED آبی، در گستره‌های طیفی سبز و قرمز نوری گسیل می‌شود که در ترکیب با نور آبی سفید به‌نظر می‌رسد. شق دیگر، استفادهٔ همزمان از چند LED با رنگ‌های مکمل (قرمز، سبز و آبی) است. هر دو فناوری در چشمه‌های نور سفید الکترولیان با کارآیی زیاد کنونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکنون این چشمه‌های نور با عمر بسیار طولانی، برای روشنایی، کم‌کم جایگزین لامپ‌های فلوئورسان و التهابی می‌شوند. از آنجا که روشنایی، ناشی از فقط ۲۰ تا ۳۰ درصد مصرف انرژی الکتریکی است و به خاطر اینکه مصرف انرژی این چشمه‌های نور سفید ده بار کمتر از لامپ‌های معمولی است، استفاده از LEDهای آبی کارآمد به صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در انرژی انجامیده است.

با اهدای جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۴ به مخترعان ژاپنی LEDهای آبی کارآمد، یعنی **ای. آکاساکی**[1]، **اچ. آمانو**[2] و **اس. ناکامورا**[3]، جهان علم و فناوری، این اختراع را ارج نهاد.

تاریخچهٔ اولیه

اولین گزارش تولید نور به‌صورت الکتریکی، به روش گسیل از یک ابزار نیمرسانا، مربوط به **اچ.جی.راند**[4] از آزمایشگاه مارکونی الکترونیکز[5] در سال ۱۹۰۷ است.[۱]. اچ.جی.راند ولتاژی را به دو سر اتصال موجود روی بلور کربوراندوم (SIC) اعمال کرد. در نتیجه، در ولتاژهای کم نور زرد مشاهده شد، و در ولتاژهای بالاتر نورهای بیشتر گسیل شد. **او. لوسف**[6] (۱۹۰۳-۱۹۴۲) یک فیزیک‌دان قطعات، که در سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ چند مقاله دربارهٔ الکترولیانی حاصل از کربوراندوم در مجلات بین‌المللی منتشر کرده بود نیز این پدیده را مطالعه کرد[۲۰]. این تحولات قبل از تدوین نظریهٔ جدید ساختار الکترونی مواد در حالت جامد صورت گرفت.



▲ شکل ۱. اصل گسیل نور در یک پیوندگاه p-n. در یک پیوندگاه p-n با ولتاژ مستقیم، الکترون‌ها از طرف n به طرف p و حفره‌ها در جهت مخالف تزریق می‌شوند. الکترون‌ها با حفره‌ها باز ترکیب و نور گسیل می‌شود (گسیل خود به خود). برای دیودهای کارآمد مهم است که مواد نیم‌رسانا دارای گاف‌های نوار مستقیم باشند. LEDهای با گاف‌های نوار غیرمستقیم به باز ترکیب با کمک فونون‌ها نیاز دارند که کارایی آن‌ها را محدود می‌کند. کارآیی کوانتومی یک LED نسبت فونون‌های گسیل شده به الکترون‌هایی است که در زمان یعنی از محل تماس می‌گذرند.

در سال‌های ۱۹۴۰ پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در درک فیزیک نیمرساناها و پیوندگاه‌های p-n صورت گرفت که به اختراع ترانزیستور در آزمایشگاه‌های تلفن بل[۷] در ایالات متحده انجامید، که پیامد آن اهدای جایزهٔ نوبل سال ۱۹۵۶ به **شاکلی**[۸]، **باردین**[۹] و **براتن**[۱۰] بود. معلوم شد که پیوندگاه p-n می‌تواند ابزار جالب توجهی برای گسیل نور باشد. در سال ۱۹۵۱ **کی.لهووک**[۱۱] و همکارانش در آزمایشگاه مهندسی سیگنال کورپز[۱۲] در ایالات متحده[۳] از این ایده‌ها برای توضیح دادن الکترولیانی ناشی از تزریق حاملان بار در یک پیوندگاه و سپس بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها در SIC استفاده کردند. با این همه، انرژی فوتون مشاهده شده کمتر از گاف انرژی SIC بود، پس این فرض مطرح شد که باز ترکیب تابشی احتمالاً ناشی از ناخالصی‌ها یا نقص‌های شبکه است. در سال ۱۹۵۵، الکترولیانی تزریقی در تعدادی از ترکیب‌های III-V نشان داده شد. [۴/۵]. در سال ۱۹۵۵ و ۱۹۵۶ **جی. ار. هینز**[۱۳] در آزمایشگاه‌های تلفن بل نشان داد که الکترولیانی مشاهده شده در ژرمانیم و سیلیسیم ناشی از بازترکیب حفره‌ها و الکترون‌ها در پیوندگاه p-n است[۶] (نگاه کنید به شکل ۱)

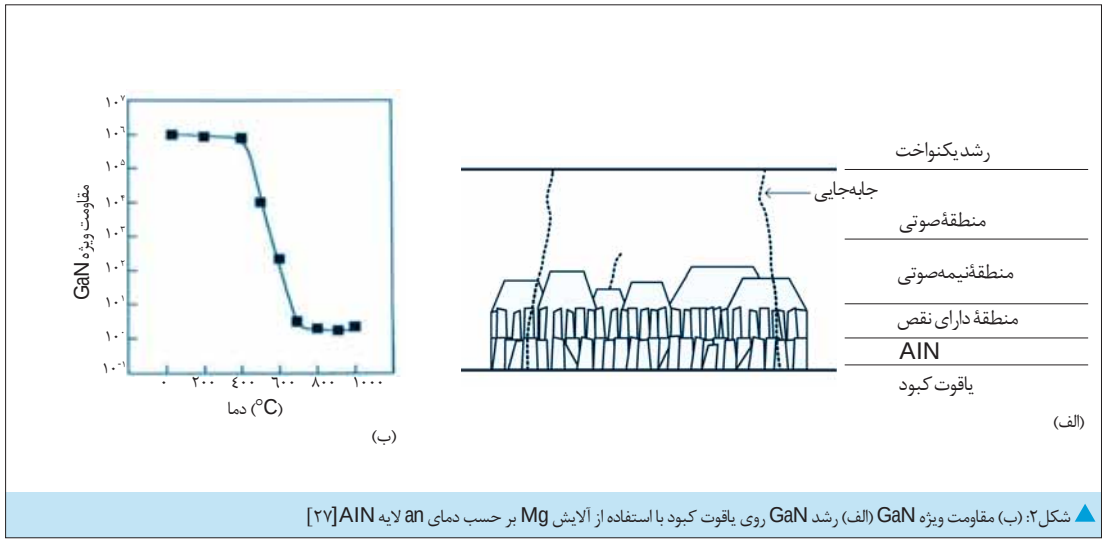
LEDهای فروسرخ

روش‌های کارآمدسازی پیوندگاه‌های p-n با GaAs در سال‌های بعد به سرعت توسعه یافت. GaAs به واسطهٔ گاف نوار مستقیم خود جالب توجه بود و این امکان را به‌وجود می‌آورد که الکترون‌ها و حفره‌ها بدون دخالت فوتون‌ها بازترکیب شوند. گاف نوار ۱/۴ eV متناظر با نور فروسرخ است. در تابستان سال ۱۹۶۲، مشاهدهٔ سیکل نور از پیوندگاه‌های p-n گزارش شد [۷]. چند ماه بعد، سیکل لیزری در GaAs در دمای نیتروژن مایع [۷] به‌طور همزمان و مستقل از یکدیگر توسط سه گروه پژوهشی، در جنرال الکتریک[۱۴]، در IBM و در آزمایشگاه لینکلن[۱۵] MIT، در ایالات متحده نشان داده شد [۸-۱۰]. با این همه چند سال طول کشید تا به واسطهٔ گسترش ناجورساختارها،- که جایزهٔ نوبل ۲۰۰۰ را برای **زد.آی.آلفروف**[۱۶] و **اچ. کرومر**[۱۷] در پی داشت- و چاه‌های کوانتومی محصورسازی بهتر حاملان بار، کاهش اتلاف‌ها امکان کار مداوم دیودهای لیزری در دمای اتاق، کاربرد در حوزه‌های گوناگون بسیار زیادی امکان‌پذیر گردد.

LEDهای مرئی

پس از آزمایش‌های اولیه در پایان سال‌های ۱۹۵۰ [۱۱]، پیشرفت‌هایی در ساخت LEDهای کارآمد، با استفاده از Gap (گاف نوار غیرمستقیم برابر ۲/۲ eV) به‌صورت موازی در سه گروه پژوهشی از آزمایشگاه مرکزی فیلیپس[۱۸] در آلمان (اچ.جی. گریمسیز[۱۹])، آزمایشگاه‌های سرویس الکترونیکز[۲۰] (SERL) در بریتانیا (جی. دبلیو. آلن[۲۱]) و آزمایشگاه‌های تلفن بل در ایالات متحده (ام. گرشنزون[۲۲]) صورت گرفت. گروه‌های یاد شده اهداف متفاوتی داشتند که از مخابرات، روشنایی و تلویزیون صفحه‌های نمایشگر برای دستگاه‌های الکترونیکی و تلفن را دربرمی‌گرفت. استفاده از آلاینده‌های متفاوت (برای مثال zn-o یا N) در غلظت‌های مختلف، طول موج‌های گوناگون در گسترهٔ قرمز تا سبز را تولید می‌کند. در اواخر سال‌های ۱۹۶۰ تعدادی از سازندگان در کشورهای مختلف LEDهای سبز تا قرمز بر مبنای Gap را می‌ساختند.

بلورهای مخلوط از جمله As,Ga، و (Gap_xAs_{1-x}) از این رو جالب توجه‌اند که طول موج گسیلی از آن‌ها می‌تواند کوتاه‌تر از طول موج مربوط به GaAs باشد و به گسترهٔ مرئی می‌رسد در حالی که گاف نوار آن مستقیم و x کوچک‌تر از ۰/۴۵ است. **ان. هولویناک کوچک**[۲۳] و همکارانش در آزمایشگاه جنرال الکتریک در اواخر سال‌های ۱۹۵۰ کار روی Gap_xAs_{1-x} را آغاز کردند و موفق به ساخت پیوندگاه‌های p-n و مشاهدهٔ گسیل LED شدند. گسیل از دیود لیزری در ۷۱۰ nm (قرمز) نخستین‌بار در سال ۱۹۶۲ گزارش شد[۱۵].



▲ شکل ۲: (ب) مقاومت ویژه GaN (الف) رشد GaN روی یاقوت کبود با استفاده از آلایش Mg بر حسب دمای an لایه AlN [۲۷]

کار اولیه روی LEDهای آبی

معلوم شد که برداشتن گام برای رسیدن به نور آبی به‌طور قابل ملاحظه‌ای دشوارتر است. تلاش‌های اولیه با ZnSe و Sic، با گاف‌های نوار غیرمستقیم پهن، به گسیل نور آبی کارآمد نینجامید؛ بلکه ماده‌ای که امکان توسعهٔ LEDهای آبی را فراهم ساخت GaN (گالیم نیترید) بود.

گالیم نیترید

GaN یک نیمرسانا در گروه III-V، با ساختار بلوری ورتزیت[۲۴] است. می‌توان آن را روی بستر یاقوت کبود (Al_2O_3) یا Sic رشد داد، و به رغم تفاوت ثابت‌های شبکه می‌توان GaN را با مثلاً سیلیسیم به نوع n و با منیزیم به نوع p آلایید. متأسفانه، آلایش با فرآیند رشد تداخل می‌کند به‌طوری که GaN شکننده می‌شود. به‌طور کلی، نقص‌های موجود در بلورهای GaN باعث می‌شود که این بلورها رسانای خوبی برای الکترون گردند. یعنی ماده به‌طور طبیعی نوع n است. GaN دارای گاف نوار مستقیم ۳/٤ ev متناظر را طول موج در ناحیهٔ فرابنفش است.

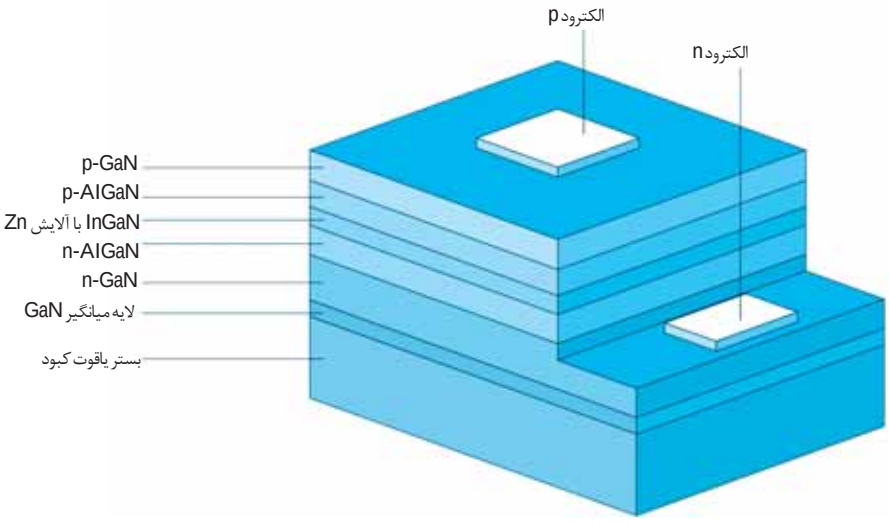
آزمایشگاه‌های پژوهشی فیلیپس، در پایان سال‌های ۱۹۵۰، امکان اختراع یا ابداع یک فناوری روشنایی جدید با استفاده از GaN را به‌طور جدی بررسی کردند که گاف نوار آن به تازگی اندازه‌گیری شده بود. **اچ.جی. گریمسیز** و **اچ. کولمان** موفق شدند با استفاده از فعال‌کننده‌های مختلف فوتولیانی از GaN را در گسترهٔ وسیعی از طیف به‌دست آورند و درخواست ثبت اختراع کردند[۱٦]. با این همه، در آن زمان رشد دادن بلورهای GaN بسیار دشوار بود. فقط امکان تولید بلورهای کوچک به شکل پودر وجود داشت که نمی‌شد در آن‌ها پیوندگاه‌های p-n به‌وجود آورد. پژوهشگران فیلیپس تصمیم گرفتند به جای آن توجه خود را روی Gap متمرکز کنند.

تولید بلورهای GaN با کارآیی بیشتر در پایان سال‌های ۱۹٦۰ با رشد GaN روی یک بستر با استفاده از فناوری HVPE[۲٦] صورت گرفت[۱۷]. تعدادی از آزمایشگاه‌ها در ایالات متحده [۱۸ و ۱۹]، ژاپن[۲۰]، و اروپا[۲۱] روش‌های رشد و آلایش GaN را با هدف توسعه LEDهای آبی بررسی کردند، اما مسائل مربوط هنوز حل‌نشدنی به‌نظر می‌رسید. ناهمواری سطح کنترل نشده بود، و مواد رشد یافته به روش HVPE آلوده به ناخالصی فلزات‌گذاری بودند و آلایش p به علت حضور هیدروژن غیرفعال می‌شد و با آلاینده‌های پذیرنده کمپلکس تشکیل می‌داد. نقش هیدروژن در آن زمان شناخته شده نبود.

جی.آی. پانکوف[۲۷] یک دانشمند پیشگام در این زمینه در یک مقالهٔ مروری، در سال ۱۹۷۳، نوشت[۲۲]: «به رغم پیشرفت زیاد در بررسی GaN در دو سال اخیر، هنوز کار زیادی باید انجام شود. هدف‌های اصلی در فناوری GaN باید عبارت باشد: از ۱- ساخت تک‌بلورهای بدون کرنش، و ۲- وارد کردن پذیرنده‌های کم‌عمق با تراکم زیاد» (برای فراهم آوردن آلایش p مؤثر)، باز هم تلاش‌های پژوهشی به علت عدم پیشرفت متوقف شد.

روش‌های جدید رشد

در سال‌های ۱۹۷۰ روش‌های جدید MBE[۲۸] (برآرایی باریکهٔ مولکولی) و MOVPE[۲۹] (برآرایی بخار فلز- آلی) توسعه یافت. تلاش در جهت تطبیق دادن این روش‌ها با رشد GaN صورت گرفت. ایسامو اکاساکی بررسی GaN را در سال ۱۹۷٤ وقتی آغاز کرد که در انستیتوی پژوهشی مالتوشیتا[۳۰] در توکیو کار می‌کرد. وی در سال ۱۹۸۱ عهده‌دار مقام استادی در دانشگاه ناگویا شد و پژوهش روی GaN را همراه با هیروشی آمانو و سایر همکاران ادامه داد. تولید بلورهای GaN با کیفیت و خواص اپتیکی خوب به روش MOVPE تا سال ۱۹۸٦ طول کشید. پیشرفت در این زمینه حاصل یک سلسله آزمایش‌ها و مشاهده‌های طولانی بود. ابتدا یک لایهٔ نازک (۳۰ nm) ALN



▲ شکل ۳. ساختار یک LED آبی با پیوندگاه ناجور دوتایی InGaN/AlGaN

چند بلوری روی بستر یاقوت کبود در دمای کم ($500^{o}c$) جوانه می‌زد و سپس تا دمای رشد GAN ($1000^{o}c$) گرم می‌شد. در طی فرایند گرم کردن، لایه دارای بافت بلوری ریز با سمتگیری مشخص می‌شد که بلور GaN را می‌شد روی آن رشد داد. چگالی جابه‌جایی‌های رشد بلور GaN ابتدا زیاد است، اما پس از چند μm رشد به سرعت کاهش می‌یابد. می‌شد یک سطح با کیفیت خوب را به دست آورد که برای رشد ساختارهای چندلایه‌ای نازک در گام‌های بعدی توسعهٔ LED اهمیت داشت. به این ترتیب، GaN با کیفیت خوب لازم برای تولید قطعه برای اولین‌بار به‌دست آمد (نگاه کنید به شکل ۲ الف). امکان تولید GaN با زمینهٔ بسیار کمتر آلایش n نیز فراهم شد. شوجی ناکامورا در شرکت شیمیایی نیشیا[۳۱]، یک شرکت شیمیایی کوچک در ژاپن بعداً روش مشابهی را توسعه داد که در آن به جای AlN لایهٔ نازکی از GaN در دمای کم استفاده شده بود[۲۸].

آلایش GaN

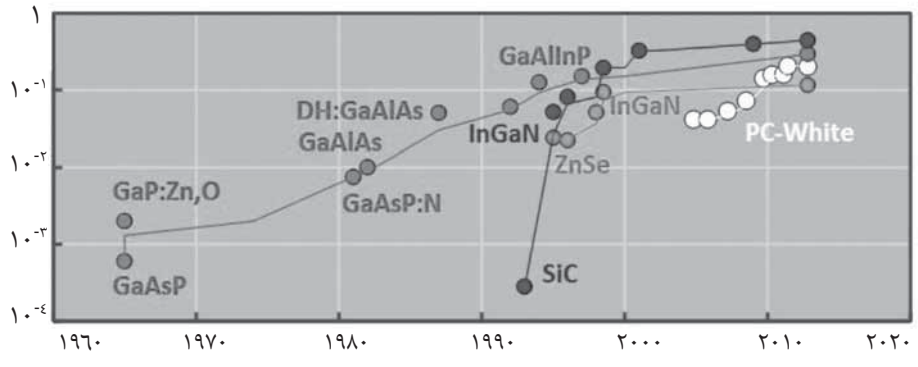
یک مسئله مهم در ساخت پیوندگاه‌های p-n مشکل آلایش p GaN به صورت کنترل شده بود. در پایان سال‌های ۱۹۸۰، آمانو آکاساکی و همکاران موفق به یک مشاهدهٔ مهم شدند. آن‌ها متوجه شدند که وقتی GaN با آلایش Zn را با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی می‌کنند، نور بیشتری گسیل می‌کند[۲۹] که نشان‌دهندهٔ آلایش p بهتری است. به همین ترتیب، وقتی GaN با آلایش Mg تحت تابش الکترون‌های کم‌انرژی قرار گیرد، دارای ویژگی‌های آلایش p بهتری می‌شود[۳۰]. این یک موفقیت مهم بود و راه را برای پیوندگاه‌های p-n در GaN گشود.

اثر تابش الکترون چند سال بعد در یک مقالهٔ ناکامورا و همکارانش توضیح داده شد[۳۱]. پذیرنده‌هایی مانند Mg و Zn با هیدروژن کمپلکس‌هایی را تشکیل می‌دهند و در نتیجه غیرفعال می‌شوند. باریکه‌های الکترون این کمپلکس‌ها را جابه‌جا می‌کنند و پذیرنده‌ها را فعال می‌سازند. ناکامورا نشان داد که حتی یک پرداخت گرمایی ساده (تابکاری) به فعال شدن کارآمد پذیرنده‌های Mg می‌انجامد. تأثیر هیدروژن بر خنثی‌سازی آلاینده‌ها از کار قبلی **پانکوف**[۳۲]، **جی.اف. نومارک روتچیلد**[۳۳][۳۳] و دیگران با مواد دیگر شناخته شده بود.

یک گام مهم در توسعهٔ LEDهای آبی کارآمد رشد و آلایش p آلیاژهای (Al GaN,InGaN) بود که برای تولید پیوندگاه‌های ناجور ضروری هستند. این پیوندگاه‌های ناجور در هر دو گروه پژوهشی آکاساکی و ناکامورا در اوایل سال‌های ۹۰ تحقق یافتند.

پیوندگاه‌های ناجور و چاه‌های کوانتومی

توسعهٔ LEDهای فروسرخ و لیزرهای دیودی نشان داد که پیوندگاه‌های ناجور و چاه‌های کوانتومی برای دست یافتن به کارآیی زیاد ضروری هستند. **در این ساختارها در حجم کوچکی تزریق می‌شوند** که در آن، باز ترکیب با کارآیی بیشتر و کمترین اتلاف صورت می‌گیرد. آکاساکی و همکارانش ساختارهایی را بر مبنای AlGaN/GaN [۳۶/۳۷] به‌وجود آوردند، در حالی که ناکامورا از ترکیب‌های In GaN/ AlGaN, InGaN/GaN برای تولید پیوندگاه‌های ناجور، چاه‌های کوانتومی، و چاه‌های کوانتومی چندگانه با موفقیت زیاد استفاده کرد[۳۸]. در سال ۱۹۹۴ ناکامورا و همکارانش با استفاده از یک پیوندگاه ناجور دوتایی InGaN/AlGaN به کارآیی کوانتومی ۲/۷ درصد دست یافتند (نگاه کنید به



▲ شکل ٤. تحول تاریخی LEDهای تجارتی[٤٢]. PC-White فسفر تبدیل شده به نور سفید و HD ساختار ناجور دوتایی را نشان می‌دهد. کارآیی رولپلاگ نسبت توان نور خروجی به توان الکتریکی تأمین شده است.

شـکل ۳)[۳۹]. با این گام‌های اولیهٔ مهم، راه برای توسـعهٔ LEDهـای آبی کارآمد و اسـتفاده از آن‌ها هموار شـد. هر دو گـروه توسـعهٔ LEDهای آبی بـا هدف کارآیی بیشـتر، چندمنظـوره بودن، و کاربردهـا را ادامه داده‌اند. هر دو گروه گسـیل لیزری آبی مبتنی بر GaN را در سـال‌های ۱۹۹٦-۱۹۹۵ مشاهده کردند.

اکنون LEDهای کارآمد مبتنی بر GaN ناشی از یک رشته موفقیت در فیزیک مواد و رشد بلور، فیزیک قطعات نیمرسانا و طراحی سـاختارهای ناجور پیشرفته، واپتیک فیزیک برای بهینه‌سـازی خروجی نور هستند. توسعهٔ تاریخی LEDهای آبی، سبز، قرمز و «سفید» در تصویر زیر خلاصه شده است.

کاربردها

در حال حاضر فناوریِ روشنایی انقلابی را از سر می‌گذراند و آن گـذار از لامپ‌هـای معمولـی و فلوئورسـان به LED هاسـت. لامپ روشـنایی که **توماس ادیسـون**[۳۳] در سال ۱۸۷۹ اختراع کـرد دارای کارآیی انـدک ≃۱٦lm/w بود چراکـه در آن لامـپ تقریبـاً ٤ درصد انـرژی الکتریکی به نـور تبدیل می‌شـد. لومن (شـمع) یکایی اسـت که برای مشـخص کردن شارنور به کار می‌رود و واکنش طیفی چشم را در نظـر می‌گیرد. لامپ‌های فلوئورسـان حاوی جیوه که **پی.کوپر هیوئیت**[۳٤] در سـال ۱۹۰۰ اختراع کرد به کارآیی ۷۰ lm/w می‌رسـند. LEDهـای سـفید اکنون بـه بیش از ۳۰۰ lm/w رسیده‌اند که کارآیی رولپلاگ بیش از ۵۰ درصد را نشان می‌دهد.

LEDهای سفید مورد استفاده در روشنایی اغلب مبتنی بر LEDهای آبی‌اند که یک فسـفر را برانگیخته می‌کنند تا نور آبی به نور سفید تبدیل شود. این LEDهای باکیفیت با طول عمرهای بسیار زیاد (۱۰۰۰۰۰ سـاعت) ارزان‌تر می‌شوند و فعلاً بازار در حال انفجار است. شاید در آینده به جای LED های سـه رنگ از ترکیب LED آبی و فسـفر برای روشنایی کارآمد اسـتفاده شود. این فناوری کنترل پویایی ترکیب نور را امکان‌پذیر می‌سازد.

جایگزین شـدن لامپ‌های معمولی و فلوئورسـان با LED هـا به کاهش قابـل ملاحظهٔ الکتریسـیته مورد نیـاز برای روشنایی می‌انجامد. از آنجا که در اقتصاد صنعتی تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد الکتریسـیتهٔ مصرفی به روشنایی تبدیل می‌شود، اکنون کوشش قابل ملاحظه‌ای صرف جایگزینی فناوری‌های روشنایی قدیمی با LEDها می‌شود.

امروز LEDهای مبتنی بر GaN فناوریِ غالب برای روشن کـردن صفحه‌های نمایـش بلور مایع بسـیاری از تلفن‌های همراه، تبلت‌ها، لپ‌تاپ‌ها و نمایشـگرهای رایانه، صفحه‌های تلویزیـون و مانند آن به شـمار می‌رونـد. لیزرهای دیودی گسیل‌کنندهٔ نورهای آبی و فرابنفش در DVDهای با چگالی زیاد که سطح فناوری ضبط کردن موسیقی، تصاویر و فیلم‌ها را بسـیار بالا برده‌اند نیز مورد اسـتفاده قرار می‌گیرند. شاید کاربردهای آتی آن شـامل اسـتفاده از LEDهای AlGaN / GaN نور فرابنفش گسـیل بـرای تصفیه آب باشـد، چون نـور فرابنفـش DNA باکتری‌هـا، ویروس‌هـا و موجـودات زندهٔ ذره‌بینی را از بین می‌برد. در کشـورهای با شـبکه‌های بـرق ناکافی یا ناموجود، الکتریسـیتهٔ تولیـدی از صفحات خورشـیدی را می‌توان در طول روز ذخیره کرد و توان لازم جهت LEDها در طول شـب را تأمین کرد. در اینجا، شاهد گذار از چراغ‌های نفتی به LEDهای سفید خواهیم بود.

پی‌نوشت‌ها

1. I. Akasaki
2. H.Amano
3. S. Nakamura
4. H.J.Round
5. Marconi Electrouics
6. O.Losev
7. Bell Telephone Laboratories
8. Shockley
9. Bardeen
10. Brattain
11. K. Lehovec
12. Signal Corps Engineering Laboratory
13. J.R. Haynes
14. General Electric
15. Lincoln Laboratory
16. Z.I. Alfrov
17. H.Kromer
18. Philips Central Laboratory
19. H.G. Grimmeiss
20. Services Electronics Laboratories
21. J.W. Allen
22. M. Gershenzon
23. N. Holonyak Jr
24. Wurtzite
25. H. Koelmans
26. Hydricle Vapour Phase Expitaxy
27. J.I.Pankov
28. Molecular Beam Epitaxy
29. Metalorganic Vapour phase Expitaxy
30. Matsushita
31. Nichia Chemical Corporation
32. G.F. Neumark Rothschild
33. Thomas Edison
34. P. Cooper Hewitt