



## Evaluation of the Efficiency of Polypyrrole Nanotubes/Carbon Nanotubes Nanocomposite for Visible Light-emitting Diodes

Mahsa Mahdavinia<sup>1</sup>, Gholamreza Kiani<sup>2\*</sup>, Ayub Karimzad Ghavidel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Organic and Biochemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>3</sup>Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 01.04.2024

**Revised:** 02.25.2024

**Accepted:** 04.15.2024

#### Keyword:

Polypyrrole  
Polymer Visible Light Emitting Diode  
Conductive Polymer  
Carbon Nanotube  
Polyvinylcarbazole

#### \*Corresponding Author:

Gholamreza Kiani

**Email:** [g.kiani@tabrizu.ac.ir](mailto:g.kiani@tabrizu.ac.ir)

### ABSTRACT

The main advantages of polymer LEDs include easy manufacturing, low cost, flexibility, and transparency of resulting products which have a special place in the world today. The purpose of this research was to design and manufacture polymer LEDs in the field of visible light based on conductive nano-polymers. In this research, a polypyrrole/carbon nanotube nanocomposite was synthesized and its structural characteristics were examined by a scanning electron microscope. The results of this evaluation showed that carbon nanotubes are attached to the surface of polypyrrole nanotubes and have good dispersion and uniformity on the surface of the substrate. Continuing with this nanocomposite, polyvinyl carbazole (PVK) was combined to create a doped LED polymer, particularly for its illuminant component. Characterization was evaluated using the energy diagram and the current-voltage diagram of the fabricated diode and was analyzed with the LED fabricated by pure polyvinyl carbazole. The results showed that more current was obtained by using polypyrrole/carbon nanotube nanocomposite to the extent that at a constant voltage of 6 V, the current intensity was approximately 15 times. Converting the invisible light of LEDs into visible light by creating nanostructures was one of the achievements of the present research.



---

**EXTENDED ABSTRACT**

---

**Introduction**

In recent years, the demand for efficient lighting has surged, prompting a shift towards light-emitting diodes (LEDs) due to their energy efficiency, extended lifespan, and environmental compatibility. To further enhance LED performance and versatility, attention has turned towards the development of LEDs based on nanostructured conductive polymers. These materials, characterized by high electrical conductivity and the flexibility of polymers, offer cost-effectiveness, lightweight properties, and ease of manufacturing compared to traditional mineral semiconductors. Conductive polymers, thanks to their conjugated polymer chains, can undergo doping processes that allow for the manipulation and adjustment of their electrical properties. LED applications based on conductive polymer nanostructures extend to flexible displays, wearable electronic devices, optical-electronic devices, and sensors, providing lightweight, flexible, and cost-efficient lighting and display solutions for various industries.

Polyvinyl carbazole (PVK) has garnered significant attention in the LED field due to its exceptional charge transfer characteristics, facilitating efficient electron injection and brighter light emission, thereby enabling LED performance optimization and color adjustment. Despite these advantages, PVK exhibits relatively low carrier mobility compared to other materials, potentially impacting LED performance, especially in high-current applications. Moreover, the complexity of synthesis may pose challenges for large-scale production and commercialization, necessitating further research and optimization to overcome these limitations. Continued research and innovation in this field are expected to yield exciting developments in LED technology, paving the way for enhanced LED performance and expanded applications in lighting and display technologies.

Based on investigations and research from scientific sources, the study delves into enhancing the electrical conductivity of LEDs to boost their external quantum efficiency (EQE). Consequently, this research marks the inaugural focus on utilizing a nanocomposite of carbon nanotubes (CNT) with the conductive polymer, polypyrrole, aiming to elevate the conductivity of LED components. The anticipation is that this nanocomposite, when combined with LED materials, will yield favorable outcomes by enhancing charge carrier transfer, amplifying current density, and ultimately improving conductivity and overall efficiency.

**Methodology**

The preparation of the polypyrrole nanotube/carbon nanotube nanocomposite involved a meticulous chemical process. Initially, a mixture of nitric acid and sulfuric acid was created in a 3:1 ratio, taking precautions due to gas production during mixing. Multi-walled carbon nanotubes were added to the solution and subjected to ultrasonic treatment for 8 hours, while in a separate container, methyl orange was dissolved in deionized water and ethanol. Subsequently, pyrrole monomer was added dropwise to the solution containing functionalized carbon nanotubes, followed by the gradual addition of ammonium persulfate initiator. The resulting compound was then washed, dried, and

separated, yielding the polypyrrole/carbon nanotube nanocomposite. A glass substrate coated with ITO, with specific areas treated to serve as connections for the anode, underwent a meticulous cleaning process involving adhesive tape, acid solution, and ultrasonic bathing with various solvents. Following this, the hole transport layer (HTL) was formed using PEDOT:PSS, with the layering process involving the spreading of the solution on the substrate and subsequent drying.

The subsequent layering process involved the creation of the light-emitting layer, a combination of PVK with the polypyrrole/carbon nanotube nanocomposite. This step required the dissolution of PVK in tetrahydrofuran, followed by the dispersion of the nanocomposite in the solution. The layering process was carried out under vacuum conditions to prevent PVK oxidation. Finally, the aluminum cathode was prepared through thermal evaporation, utilizing a mask, evaporation device, and aluminum placed inside a crucible. The entire process involved careful temperature control and investigation of thickness and growth rate, resulting in a meticulously layered aluminum cathode.

## Results and discussion

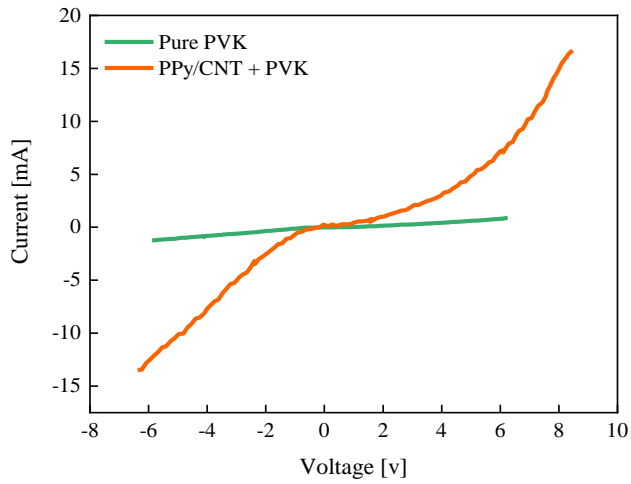
The results and discussion section provides critical insights into the current analysis of the fabricated diodes. Initially, the section emphasizes the challenges associated with hole mobility and the resulting energy loss and reduced efficiency. The energy diagram of the manufactured part illustrates the facilitation of hole transfer due to the presence of PPyNT/CNT, leading to increased flow within the component. Moreover, the formation of conductor paths and improved hole entry into the light-emitting layer are identified as pivotal factors in enhancing the presence of charge carriers, amplifying recombination, and subsequently boosting internal and external quantum efficiency.

Furthermore, the stability and lifecycle of PPyNT/CNT are highlighted, indicating its suitability for PLED manufacturing. Although luminescence measurement was not feasible due to the damage caused by high current, the I-V tests yielded significant results, showcasing the diode properties of the manufactured parts. The comparison between the pure PVK and the PPyNT/CNT-infused PVK demonstrates a substantial increase in current flow, signifying the potential for enhanced light emission, even with a low percentage of PPyNT/CNT. These findings underscore the promising impact of PPyNT/CNT in augmenting the performance of the diodes and its potential to increase light emission.

## Conclusion

This research aimed to explore the impact of incorporating PPyNT/CNT nanocomposite into the LED structure and to assess its performance. To achieve this, two samples with similar structures were prepared, one including the nanocomposite and the other without it, and the disparity in current flow, indicative of efficiency variance, was examined. By comparing the I-V diagrams of the two samples produced in this study, the beneficial influence of PPyNT/CNT in the component fabrication process becomes evident. The heightened current density engendered by PPyNT/CNT has the potential to elevate the efficiency of the component, a pivotal consideration in the design and production of PLEDs. This research incorporated 10 percent by weight of PPyNT/CNT nanocomposite, but it is anticipated that altering the PVK and PPyNT/CNT ratio or even adjusting the CNT and

PPyNT ratio, could yield different outcomes, a prospect deserving further investigation based on findings from the existing scientific literature.



**Figure 1. The voltage-current diagram of the manufactured polymer LED related to the sample made with PVK and the combination of PVK with PPyNT/CNT.**

## ارزیابی کارایی نانوکامپوزیت نانولوله‌های پلی‌پیرول/نانولوله‌های کربنی به‌عنوان دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی

مهسا مهدوی‌نیا<sup>۱</sup>، غلامرضا کیانی<sup>۲\*</sup>، ایوب کریم‌زاد قویدل<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- ۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

با توجه به مزایای عمده دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری از جمله قابلیت ساخت آسان، هزینه‌ی کم، قابلیت انعطاف‌پذیری و شفاف بودن، این قطعات جایگاه ویژه‌ای در دنیای امروزی دارند. هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت دیوده‌های ساطع‌کننده نور پلیمری، در حوزه‌ی نور مرئی بر پایه‌ی نانوپلیمر رسانا است. در این تحقیق، نانوکامپوزیت پلی‌پیرول/نانولوله کربنی سنتز و مشخصات ساختاری آن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نشان داد نانولوله‌های کربنی به سطح نانولوله پلی‌پیرول متصل شده و از پراکندگی و یکنواختی مناسبی در سطح بستر برخوردار است. در ادامه این نانوکامپوزیت، با پلی‌وینیل کاربازول ترکیب شد تا یک پلیمر دوپ شده، به‌خصوص برای جزء روشن‌کننده آن ایجاد شود. مشخصه‌یابی با استفاده از دیگرام انرژی و نمودار جریان-ولتاژ دیود ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت و با دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی ساخته شده توسط پلی‌وینیل کاربازول خالص مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که جریان‌دهی بیشتری با به‌کارگیری نانوکامپوزیت پلی-پیرول/نانولوله کربنی حاصل شد تا حدی که در ولتاژ ثابت ۶ ولت، شدت جریان در حدود ۱۵ برابر بود. تبدیل نور نامرئی دیوده‌های ساطع‌کننده نور به نور مرئی با ایجاد نانوساختارها از دستاوردهای تحقیق حاضر بود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

### کلید واژگان:

پلی‌پیرول  
دیود ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری  
پلیمر رسانا  
نانولوله کربنی  
پلی‌وینیل کاربازول

\*نویسنده مسئول: غلامرضا کیانی

پست الکترونیکی:

[g.kiani@tabrizu.ac.ir](mailto:g.kiani@tabrizu.ac.ir)

## مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش قابل توجهی در تقاضا برای روشنایی کارآمد به وجود آمده است [۱]. دیودهای ساطع کننده نور<sup>۱</sup> به عنوان یک فناوری امیدوارکننده در این زمینه ظاهر شده‌اند و مزایای بسیاری نسبت به سیستم‌های روشنایی رشته‌ای و فلورسنت<sup>۲</sup> سنتی از خود عرضه نموده‌اند [۱]. شهرت دیودهای ساطع کننده نور مرئی به دلیل راندمان انرژی بالا، عمر طولانی و سازگاری با محیط زیست است [۲]. به منظور افزایش عملکرد و تطبیق پذیری دیودهای ساطع کننده نور مرئی با کاربردهای جاری، محققان توجه خود را به توسعه دیودهای ساطع کننده نور مرئی بر پایه پلیمرهای رسانا بساختار نانویی معطوف کرده‌اند [۲].

پلیمرهای رسانا<sup>۳</sup> دسته‌ای از مواد آلی هستند که رسانایی الکتریکی بالایی داشته و در عین حال، موجب حفظ انعطاف پذیری و فرایندپذیری پلیمرها می‌گردند [۱]. برخلاف نیمه‌هادی‌های معدنی سنتی، پلیمرهای رسانا از مزایایی همچون قیمت مناسب، وزن سبک و سهولت ساخت برخوردار هستند [۳]. این مواد از زنجیره‌های پلیمری مزدوجی تشکیل شده‌اند که می‌توانند تحت فرآیندهای دوپینگ<sup>۴</sup> یا دوپینگ‌زدایی قرار گیرند و در نتیجه خواص الکتریکی آن‌ها دستکاری و تنظیم شود [۴].

دیودهای ساطع کننده نور مرئی مبتنی بر نانوساختارهای پلیمری رسانا، پتانسیل بسیار زیادی برای طیف وسیعی از کاربردها دارند [۴؛ ۵]. از جمله این کاربردها می‌توان به نمایشگرهای منعطف، لوازم الکترونیکی پوشیدنی، دستگاه‌های الکترونیک نوری و حسگرها اشاره نمود [۷-۵]. خواص منحصر به فرد پلیمرهای رسانا، همراه با مزایای نانوساختارها، امکان توسعه راه‌حل‌های نورپردازی و نمایشگر سبک، انعطاف‌پذیری و تقلیل هزینه‌های تمام شده محصول را فراهم می‌کند [۷].

کاربردهای دیودهای ساطع کننده نور مرئی پایه پلیمری فراتر از نورپردازی رایج است و زمینه‌های مختلفی را دربر می‌گیرد که در آن دستگاه‌های الکترونیک نوری سبک، انعطاف‌پذیر و با انرژی کارآمد مورد نظر هستند [۸؛ ۹]. ادامه تحقیقات و نوآوری در این زمینه، بدون شک منجر به پیشرفت‌های هیجان‌انگیزی در زمینه فناوری دیودهای ساطع کننده نور مرئی خواهد شد [۹]. در این بین، پلی‌وینیل کاربازول<sup>۵</sup>، به دلیل خواص منحصر به فرد و کاربردهای بالقوه خود، توجه شایانی را در زمینه دیودهای ساطع کننده نوری خود جلب کرده است و سبب بهبود عملکرد آن‌ها شده است [۸]. این پلیمر، ویژگی‌های انتقال بار عالی از خود نشان می‌دهد [۱۰] و تزریق الکترون، کارآمدی آن را تسهیل کرده و منجر به انتشار نور روشن‌تر می‌شود. در عین حال، امکان بهینه‌سازی عملکرد دیودهای ساطع کننده نور مرئی و تنظیم رنگ را فراهم ساخته و طیف وسیعی از کاربردها را در فناوری‌های نورپردازی و نمایش دارد [۱۰]. اگرچه پلی‌وینیل کاربازول، خواص انتقال بار خوبی را از خود نشان می‌دهد، اما تحرک حامل آن در مقایسه با برخی مواد دیگر نسبتاً کم است [۱۱]. این محدودیت می‌تواند بر کارایی کلی دیودهای ساطع کننده نور مرئی، به ویژه در کاربردهایی با جریان بالا، تأثیر گذارد. همچنین پیچیدگی در سنتز، ممکن است مانع تولید و تجاری‌سازی در مقیاس بزرگ شود. برای غلبه بر این چالش، به تحقیقات و بهینه‌سازی بیشتری نیاز است [۱۱].

برای افزایش بازدهی کوانتومی خارجی در دیودهای ساطع کننده نور مرئی تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است. از آنجا که این بازدهی یکی از اصول تعیین کننده و مهم در دیودهای ساطع کننده نور مرئی می‌باشد، لذا این عامل اساسی به پارامترهای بسیاری وابسته است [۱۲؛ ۱۳]. در راستای تلاش محققین در این حوزه، یک تیم تحقیقاتی در پژوهشی،

<sup>1</sup> Light-Emitting Diode (LED)

<sup>2</sup> Fluorescent

<sup>3</sup> Conductive polymer

<sup>4</sup> Doping

<sup>5</sup> Polyvinyl carbazole (PVK)

ترکیب نانولوله کربنی با بخش نورهنده در دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری توانست به دلیل افزایش انتقال حامل‌ها و چگالی جریان، راندمان را بهبود بخشد، بدون آن‌که کاهشی در پایداری ماده ایجاد نماید [۱۴]. در بررسی دیگر، توسعه پلیمرهای جدید فلورسانس فعال شده با حرارت<sup>۱</sup>، پلی(۴-فنیل کاربازول سیانو)<sup>۲</sup> و پلی(۴-فنیل کاربازول سیانو)<sup>۳</sup> مورد بحث قرار گرفت که دارای شکاف انرژی کوچکی بین اولین حالت‌های برانگیخته منفرد و سه‌گانه بودند [۱۵]. در این تحقیق، حداکثر بازده کوانتومی خارجی ۱۱/۹٪ برای دیوده‌های نورگسیل ارگانیک<sup>۴</sup> آبی، ۱۴/۱٪ برای دیوده‌های نورگسیل ارگانیک سبز و ۱۶/۲٪ برای دیوده‌های نورگسیل ارگانیک سفید حاصل شد. همچنین نتایج نشان داد پلی(۴-فنیل کاربازول سیانو) حاصل از روش پلیمریزاسیون با حلال، ساخت یک دیوده‌های نورگسیل ارگانیک انعطاف‌پذیر را بر روی یک بستر پلی‌اتیلن ترفتالات فراهم نمود [۱۵]. گروهی از محققین، توسعه یک روش تک مرحله‌ای به کمک میکروویو را برای سنتز نقاط کربنی عامل‌دار سیلان با فلورسانس حالت جامد تمام رنگی، برای دیوده‌های ساطع‌کننده نور مورد بحث قرار دادند [۱۶]. محققان به سنتز در مقیاس بزرگ سیلیکون کوانتوم دات‌ها<sup>۵</sup> با مقاومت خود خاموش شونده و فلورسانس تمام رنگی قابل تنظیم دست یافتند. براساس نتایج این پژوهش، با کنترل نسبت پیش‌ماده، انتشار نوری سیلیکون کوانتوم دات‌ها را می‌توان در ناحیه مرئی تنظیم کرد. ارتقا بازده کوانتومی بالا در حدود ۵۷-۲۶٪ برای سیلیکون کوانتوم دات‌ها از سایر یافته‌های این تحقیق بود. همچنین انتشار چند رنگ سیلیکون کوانتوم دات‌ها به تغییرات در اندازه ذرات و محتوای نیتروژن گرافیتی نسبت داده شد. خواص نوری عالی سیلیکون کوانتوم دات‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهد که مستقیماً با تراشه‌های فرابنفش ترکیب شوند تا دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی تمام رنگی ایجاد کنند [۱۶].

تحقیقات مختلف در بازده کوانتومی خارجی دیوده‌های ساطع نور پلیمری مورد بحث قرار گرفته‌اند. در دهه گذشته، بازده الکتریکی از یک مدل عددی تعیین شده است. اخیراً، یک مدل نوری برای شبیه‌سازی کسر فوتون‌های متصل به هوا برای دیوده‌های ساطع نور پلیمری با ناحیه بازترکیب وسیع توسعه داده شده است. همراه با دیوده‌های ساطع نور پلیمری که مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان بازده کوانتومی خارجی را تخمین زد. با این حال، مشاهده شده است که بازده کوانتومی خارجی‌های اندازه‌گیری شده دیوده‌های ساطع نور پلیمری‌های فلورسنت، از مقادیر مورد انتظار فراتر می‌روند. به‌طور تجربی، با استفاده از این مدل به دست آمد که بازده تولید تک اکسایتون در پلی(پارا-فنیلین وینیل) بهبود ۴۰ درصدی داشته است کمک می‌کند، که باعث ایجاد بازده کوانتومی خارجی ۴ درصدی به جای مقدار مورد انتظار ۲/۵ درصد می‌شود [۱۷]. در تحقیقی دیگر، برای فعال کردن نمایشگرهای تمام رنگی پوست مانند، فیلم‌های تابش نور اولیه با قابلیت کشش بالا معرفی شد که از ترکیب پلیمری از پلیمرهای ساطع نور قرمز، سبز و آبی و یک الاستومر غیرقطبی ساخته شده‌اند. این فیلم‌ها درخشندگی بیش از  $1000 \text{ cd/m}^2$  را با ولتاژ روشن کم ( $on > 5$ ) نشان دادند. نکته مهم این بود که فیلم‌های ترکیبی انتخابی بر روی بستر سفت و سخت، عملکرد تابش نور را تا ۱۰۰٪ حتی پس از ۱۰۰۰ چرخه کشش چندگانه حفظ می‌کنند [۱۸]. در بررسی دیگر، نانوذرات نقره بر روی اکسید قلع ایندیم با زمان‌های مختلف عملیات پلاسمای اکسیژن رسوب‌شده به‌عنوان بستر آند برای دیوده‌های ساطع نور پلیمری اعمال شد. نتایج نشان داد که در مدت زمان ۱۰ دقیقه، حداکثر راندمان جریان  $3/33 \text{ cd/A}$  حاصل شد که به‌طور قابل توجهی بالاتر از دیود مرجع ۱ اینچ بود. دیوده‌های ساطع نور پلیمری بهینه شده افزایش ۲/۲۴ برابری راندمان متوسط جریان و افزایش ۴۸۰ درصدی در شدت الکترومولومینسانس را در مقایسه با مرجع نشان داد [۱۹].

<sup>1</sup> Thermally activated delayed fluorescence (TADF)

<sup>2</sup> Poly (4-phenylcarbazole cyano) (P-Ph4CzCN)

<sup>3</sup> Poly (5-phenylcarbazole cyano) (P-Ph5CzCN)

<sup>4</sup> Organic light-emitting diode

<sup>5</sup> Silicon quantum dot

باتوجه به بررسی و کاوش‌های صورت گرفته از منابع علمی، بررسی اثربخشی افزایش رسانایی الکتریکی دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی به‌منظور افزایش بازده کوانتومی خارجی آن‌ها<sup>۱</sup> می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، برای نخستین بار، بر روی استفاده از نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی<sup>۲</sup> با پلیمر رسانای پلی‌پیرول، به‌عنوان راه‌حلی برای افزایش رسانایی اجزای دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی تمرکز شده است. انتظار می‌رود ترکیب این نانوکامپوزیت با مواد دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی، نتایج امیدوارکننده‌ای را از نظر بهبود انتقال حامل بار و افزایش چگالی جریان نشان دهد، در نتیجه رسانایی و کارایی کلی را افزایش می‌دهد.

## روش انجام آزمایش

### تهیه نانوکامپوزیت نانولوله پلی‌پیرول / نانولوله کربنی به روش شیمیایی

نخست ترکیب اسید نیتریک/اسید سولفوریک (ساخت شرکت دکتر مجللی) به نسبت ۳:۱ تهیه گردید. باتوجه به تولید گاز حین فرایند ترکیب، این مرحله باید در زیر محفظه هود صورت گیرد. پس از مدت زمان ۱ دقیقه، ۰/۵ گرم از نانولوله کربنی چندجداره (ساخت شرکت نانوسیل NCY۰۰۰) به محلول قبل افزوده شد و به مدت ۸ ساعت در حمام اولتراسونیک به‌منظور کاهش اندازه نانولوله کربنی و ایجاد عامل گروه کربوکسیلیک<sup>۳</sup> بر روی آن توزیع گردید [۲۰]. در ظرف دیگر، مقدار ۰/۰۹۸ گرم متیل اورانژ<sup>۴</sup> (ساخت شرکت دکتر مجللی گرید ACS) به‌عنوان الگوی نرم<sup>۵</sup>، در ۱۲۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه و ۲۵ میلی‌لیتر اتانول حل گردید. سپس ۰/۶ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک (ساخت شرکت دکتر مجللی) به ترکیب حاوی متیل اورانژ اضافه شد. در این مرحله تغییر رنگ محلول به قرمز تیره کاملاً مشهود بود [۲۱].

پس از ۵ دقیقه هم‌زدن محلول، مونومر پیرول<sup>۶</sup> (ساخت شرکت مرک آلمان) به‌صورت قطره‌ای با نسبت ۱:۹ بر روی محلول حاوی نانولوله کربنی عامل‌دار شده، افزوده شد. در ظرف دیگری، ۱/۶۴ گرم آغازگر آمونیوم پرسولفات<sup>۷</sup> (ساخت شرکت مرک آلمان)، در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید و سپس آهسته به محلول قبلی اضافه شد. از آن‌جا که در این مرحله به دمای پایین‌تر از ۵ درجه نیاز است، لذا محلول به همراه همزن (به‌منظور هم‌زدن ماده) به مدت ۲۴ ساعت درون یخچال قرار داده شد. در نهایت، ترکیب سیاه رنگ حاصل شده، ۶ بار توسط اتانول و آب دیونیزه (با نسبت برابر) صاف و تحت شستشو قرار گرفت. محلول خروجی از فیلتر بی‌رنگ و خنثی بود. در ادامه محصول نهایی، جهت خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در نهایت، با جدا کردن ماده از کاغذ صافی، نانوکامپوزیت پلی‌پیرول/نانولوله کربنی تهیه شد [۲۱].

<sup>1</sup> External quantum efficiency (EQE)

<sup>2</sup> Carbon nanotube

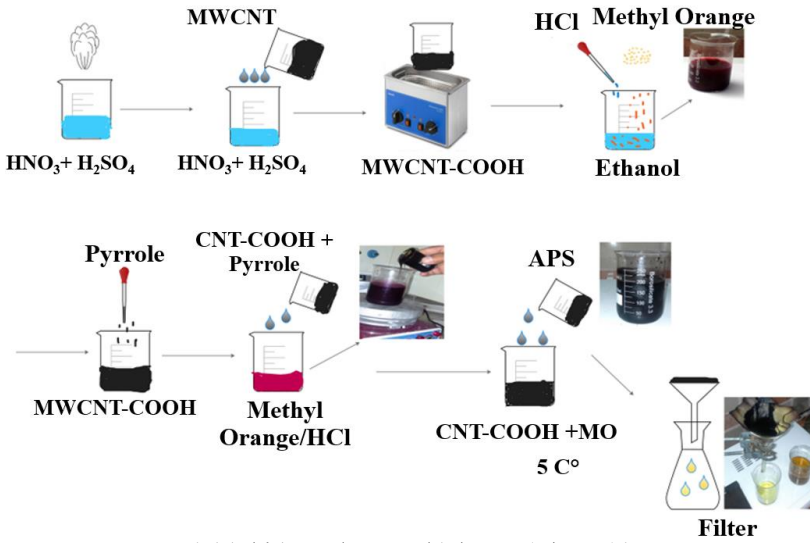
<sup>3</sup> Carboxyl groups

<sup>4</sup> Methyl orange

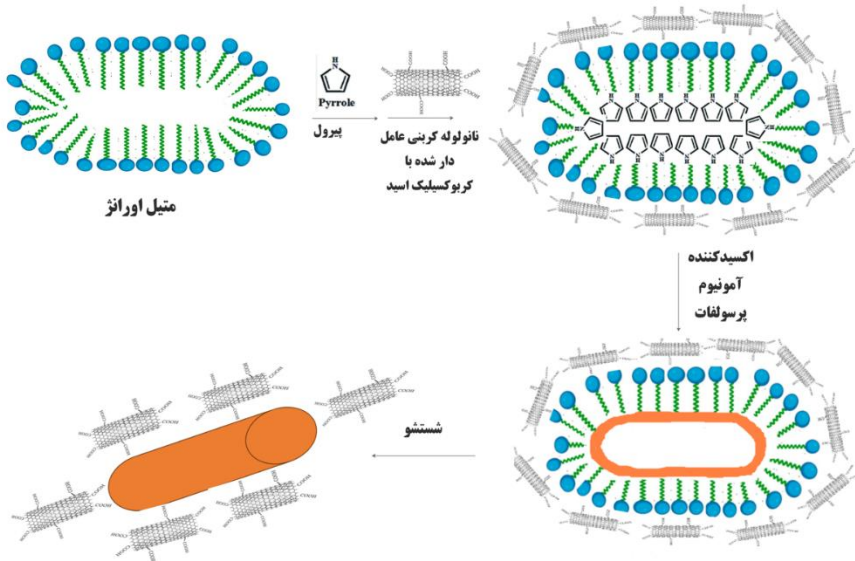
<sup>5</sup> Soft template

<sup>6</sup> Pyrrole

<sup>7</sup> Ammonium persulfate



شکل ۱. مراحل تهیه نانوکامپوزیت پلی‌پیرول/نانولوله کربنی.



نانوکامپوزیت نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی عامل دار شده با گروه کروکسیلیک اسید

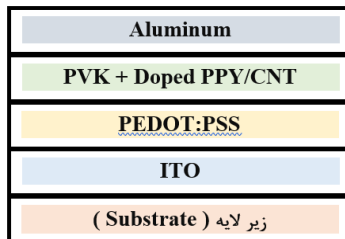
شکل ۲. شماتیک فرایند سنتز نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی‌پیرول.

## روند ساخت پلیمر<sup>۱</sup> دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی

### ساختار کلی

در تحقیق حاضر، از لایه‌های زیر با هدف بهینه‌سازی عملکرد و عملکرد دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی استفاده شده است.

- **(الف) لایه فرعی:** از شیشه شفاف به‌عنوان بستر دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی برای ایجاد استحکام و پایداری ساختاری استفاده شد. هدف اصلی این لایه، به حداکثر رساندن شفافیت و به حداقل رساندن بازتاب و در نتیجه افزایش عملکرد قطعه نهایی است [۱۹].
- **(ب) ایندیوم قلع اکساید<sup>۲</sup>:** از این ماده به‌عنوان یک آند استفاده شد. این ماده حفره‌هایی را به قطعه تزریق می‌کند. شفافیت استثنایی (۹۲٪) آن را علیرغم شکننده بودن به یک ماده آند ایده‌آل تبدیل می‌کند.
- **(ج) پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات<sup>۳</sup>:** از این ترکیب به‌عنوان یک ماده بسیار موثر برای لایه انتقال‌دهنده حفره<sup>۴</sup> با نشان دادن تحرک حفره عالی و مانع از عبور الکترون‌هایی با تحرک الکترون کم استفاده شد.
- **(د) پلی‌وینیل کاربازول:** این ماده به‌دلیل درخشندگی خوب، پایداری و حلالیت در تتراهیدروفوران<sup>۵</sup> معمولاً برای دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری آبی استفاده می‌شود. در این تحقیق، از نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی صرفاً برای افزایش رسانایی استفاده شد، در حالی‌که لایه انتقال حفره تشکیل شده توسط پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات برای بهبود عملکرد و سازگاری اجزا بین ایندیوم قلع اکساید و پلی‌وینیل کاربازول گنجانده شده است.
- **(و) نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی:** ترکیب نانولوله پلی‌پیرول و نانولوله کربنی منجر به یک کامپوزیت با رسانایی بالاتر از نانولوله کربنی به تنهایی می‌شود و همچنین در تتراهیدروفوران محلول است.
- **(ی) آلومینیوم:** از آلومینیوم به‌دلیل رسانایی عالی و سهولت استفاده به‌عنوان کاتد استفاده شد. در نهایت، قطعه تهیه شده دارای یک آند از جنس ایندیوم قلع اکساید جهت تزریق حفره، یک لایه انتقال حفره از جنس پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات، یک لایه نورددهنده با پایه پلی‌وینیل کاربازول دوپ شده با نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی و یک کاتد از جنس آلومینیوم است.



شکل ۳. ساختار کلی دیوده‌های ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری طراحی شده [۱۹].

<sup>1</sup> Polymer Light-Emitting Diode (PLED)

<sup>2</sup> Indium tin oxide (ITO)

<sup>3</sup> Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS)

<sup>4</sup> Hole transport layer (HTL)

<sup>5</sup> Tetrahydrofuran (THF)

## آماده‌سازی زیرلایه

نخست شیشه‌ای با ابعاد  $2 \times 2/5$  سانتی‌متر با ضخامت ۵ میلی‌متر که لایه‌ای از ایندیوم قلع اکساید با مقاومت سطحی ۱۵ اهم، بر روی آن لایه‌نشانی شده بود، انتخاب گردید و با دقت با آب و صابون جهت رفع چربی‌ها شستشو داده شد. بخش‌هایی از سطح که قرار بود به‌عنوان اتصال برای آند به‌کار گرفته شوند، باید از بقیه سطوح مجزا شوند. بدین منظور، بخش کل سطح به‌جز بخش‌هایی که باید حذف گردند، توسط چسب شیشه‌ای پوشانده شد. سپس کل زیرلایه، به‌مدت ۵ الی ۷ دقیقه در محلول اسید کلرید ۳۷٪ قرار داده شد تا محل‌های مشخص شده از ایندیوم قلع اکساید زدوده شوند. پس از برداشتن کل نوار چسب‌ها، زیرلایه مذکور، مجدداً با آب و صابون تحت شستشو قرار گرفت و پس از آن، هر بار به‌مدت ۱۰ دقیقه زیرلایه توسط حمام فراصوت به‌ترتیب توسط استون، اتانول و آب مقطر شستشو داده شد تا هرگونه آلودگی از سطح برطرف گردد و در نهایت، در ظرفی مخصوص به دور از آلودگی و گرد و غبار، جهت خشک شدن در آن تحت دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

## لایه‌نشانی لایه انتقال‌دهنده حفره

لایه انتقال‌دهنده حفره با استفاده از پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات (ساخت شرکت سیگما آلدريج) شکل گرفت. این ماده که به‌صورت محلول آبی رنگ است، پس از خشک شدن به‌صورت پلیمر باقی می‌ماند. به‌همین منظور، برای شکل‌دهی این لایه، ابتدا محلول توسط لایه‌نشانی چرخشی<sup>۱</sup> بر روی سطح زیرلایه پخش گردید. پس از آن، توسط دمای صفحه داغ، خشک شد [۲۲].

جهت لایه‌نشانی ابتدا زیرلایه، بر روی دستگاه لایه‌نشانی چرخشی قرار گرفت. سپس توسط یک سر سرنگ، مقداری از ماده بر روی سطح زیرلایه‌ی درحال چرخش با سرعت چرخش  $r. p. m$  ۳۲۰۰ و مدت زمان ۵۰ ثانیه چکانده شد. ضخامت این لایه ۴۰ تا ۵۰ نانومتر تخمین زده شد [۱۴]. حال زیرلایه به‌مدت ۱۵ دقیقه بر روی هیتر با دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا حلال اضافی آن تبخیر شود [۲۳].

## لایه‌نشانی لایه نشردهنده نور

این لایه ترکیبی از پلی‌وینیل کاربازول با نانوکامپوزیت پلی‌پیرول/نانولوله کربنی می‌باشد، به نحوی که پلی-پیرول/نانولوله کربنی با درصد‌های مشخص و دلخواهی در پلی‌وینیل کاربازول دوپ می‌شود. بدین منظور، ابتدا پلی‌وینیل کاربازول با نسبت ۵:۱ (۱ به ۵) با تتراهیدروفوران<sup>۲</sup> ترکیب و جهت حل شدن کامل این ماده در تتراهیدروفوران به‌مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه فراصوت قرار گرفت. با توجه به درصد ترکیب مورد نظر، نانوکامپوزیت پلی‌پیرول/نانولوله کربنی با پراکنده کردن در محلول آماده شده به‌مدت ۲۰ دقیقه پخش و پراکنده گردید [۲۴].

روند این مرحله نیز مشابه با مرحله قبل بود، با این تفاوت که این مرحله در شرایط خلاء انجام گرفت تا از اکسید شدن پلی‌وینیل کاربازول جلوگیری شود. خلاء مذکور درون دستگاه محفظه ایزوله گلوباکس شکل گرفت و تمامی این مراحل، داخل این دستگاه دنبال شد. ابتدا سرعت چرخش دستگاه در  $r. m. p$  ۲۰۰۰ و زمان چرخش ۱۵ ثانیه تنظیم گردید. پس از آن زیرلایه در دستگاه لایه‌نشانی چرخان قرار گرفت. سپس توسط یک سرنگ، مقدار مشخصی از ماده بر روی زیرلایه چکانده شد. مشابه با مرحله قبل، جهت تبخیر حلال اضافه، زیرلایه به‌مدت ۱۰ دقیقه بر روی هیتر با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. تخمین مدنظر از ضخامت این لایه حدود ۱۰۰ نانومتر بود.

<sup>1</sup> Spin coating

<sup>2</sup> Tetrahydrofuran

### لایه‌نشانی تبخیر حرارتی

جهت تهیه کاند آلومینیومی، از دستگاه تبخیر حرارتی (ساخت شرکت HINDHIVAC کشور هندوستان) برای لایه‌نشانی استفاده شد. جهت لایه‌نشانی ابتدا ماسک (از جنس استیل) بر روی زیرلایه قرار داده شد، سپس زیرلایه درون دستگاه تبخیر قرار گرفت و آلومینیوم در داخل بوته گذاشته شد. دستگاه در فشار خلا  $10^{-5} \times 2$  میلی بارت تنظیم شد و عملیات اعمال ولتاژ به بوته صورت پذیرفت. در ولتاژهای کمتر که دمای اندکی تولیدی می‌نمایند، آلومینیوم ذوب می‌گردد و با بالا بردن دما، آلومینیوم شروع به تبخیر و رشد بر روی سطح زیر لایه که بالاتر از سطح بوته قرار گرفته است، می‌کند. ضخامت و سرعت رشد نیز توسط کوارتز تعبیه شده (با ضخامت آلومینیوم ۵۰ نانومتر و آهنگ متوسط رشد ۰/۲ نانومتر بر ثانیه) بررسی گردید [۱۴].



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

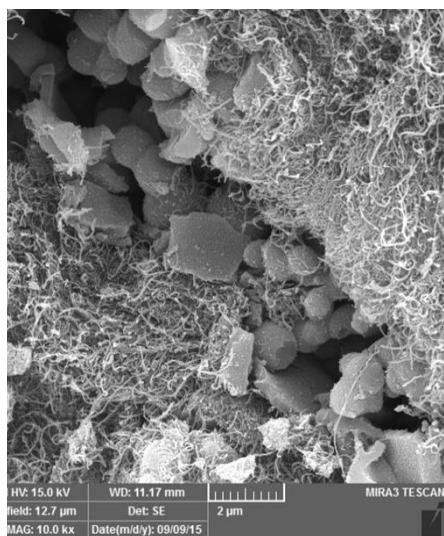
شکل ۴. مراحل لایه‌نشانی و روند ساخت دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری (الف) انجام لایه‌نشانی توسط گلاوباکس، (ب) آماده‌سازی پودر آلومینیوم از شمش آلومینیوم، (پ) ماسک لایه‌نشانی آلومینیوم، (ت) دستگاه تبخیر حرارتی.

### نتایج و بحث

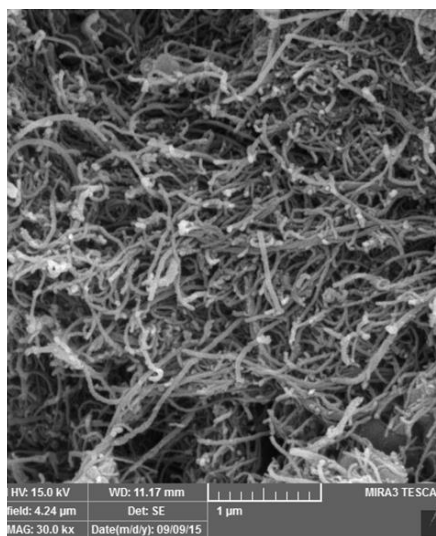
#### آنالیز میکروسکوپی

در شکل ۵، تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی/پلی پیرول آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نانولوله‌های کربنی به سطح نانولوله پلی پیرول متصل شده و از پراکندگی و یکنواختی

مناسبی در سطح بستر برخوردار است. همچنین مقداری ناخالصی بر روی سطح نانولوله‌های پلی‌پیرول قرار دارد که در فرایند سنتز طبیعی بوده و اختلالی در روند کار ایجاد نمی‌کنند.



(ب)

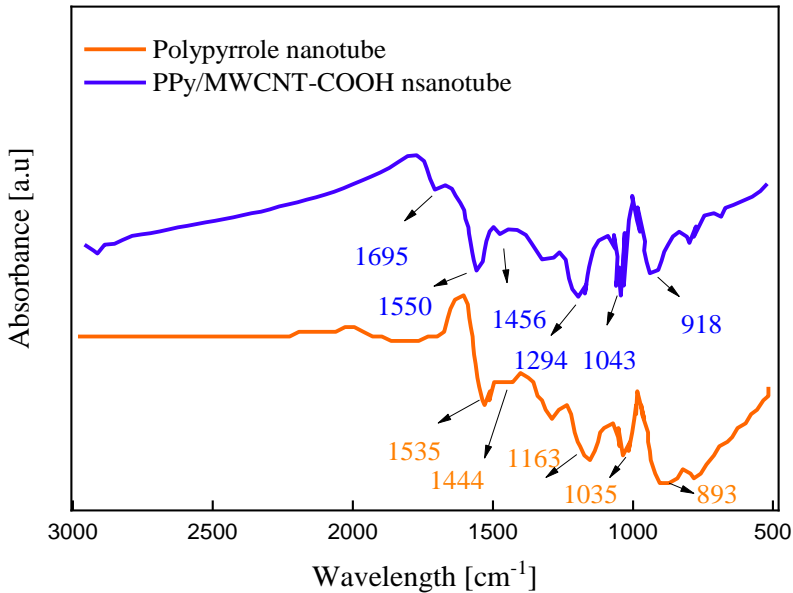


(الف)

شکل ۵. میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / پلی‌پیرول (الف و ب) نانولوله‌های کربنی در بستر پلی‌پیرول در بزرگنمایی‌های مختلف.

### طیف‌شناسی زیرقرمز تبدیل فوریه

به‌منظور بررسی تغییرات ایجادشده در ساختار نانوکامپوزیت تهیه‌شده از طیف‌شناسی زیرقرمز تبدیل فوریه به کمک طیف‌سنج Bruker-TENSOR۲۷ بهره گرفته شد. در شکل ۶، طیف جذبی FTIR، برای نانولوله پلی‌پیرول و نانوکامپوزیت نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی نشان داده شده است. در مورد نانولوله‌های پلی‌پیرول، پیک مشخصه پلی-پیرول در  $1535$  و  $1444$   $\text{cm}^{-1}$  قرار دارند که به‌ترتیب به‌دلیل حالت‌های کشش حلقه نامتقارن و متقارن هستند [۲۵]. قله‌های  $1163$ ،  $1035$  و  $893$   $\text{cm}^{-1}$  به ارتعاشات درون صفحه و ارتعاشات خارج از صفحه گروه C-H= نسبت داده می‌شود. در مقایسه با نانولوله‌های پلی‌پیرول، برای نانوکامپوزیت تهیه‌شده به وضوح مشاهده می‌شود که اکثر پیک‌های مشخص شده جایجا شده‌اند که نشان‌دهنده ادغام نانولوله‌های کربنی چندجداره با نانولوله پلی‌پیرول می‌باشد. این به‌دلیل پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های MWCNT‌های اصلاح شده با گروه کربوکسیلیک اسید و گروه‌های آمینی از پلی-پیرول و انباشتگی قوی پیوند P-P در زنجیره مزدوج پلی‌پیرول و دیواره جانبی گرافیتی نانولوله‌های کربنی چندجداره باشد [۲۵].



شکل ۶. طیف FT-IR مربوط به نانولوله پلی پیرول خالص و نانوکامپوزیت نانولوله پلی پیرول/نانولوله کربنی سنتز شده.

### بررسی عملکرد نمونه‌ها

#### نمودار ولتاژ-جریان (I-V)

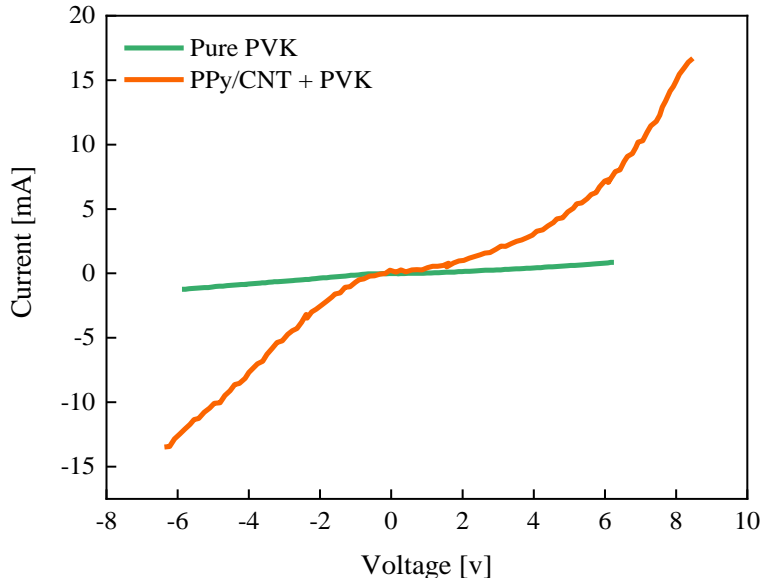
پایداری ماده در طول زمان و چرخه عمر ماده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. با توجه به منابع علمی می‌توان مشاهده نمود که نانولوله پلی پیرول/نانولوله کربنی دارای سیکل عمر مناسبی در حد نانولوله کربنی است که کاربردی بودن این قطعه را جهت ساخت دیودهای ساطع کننده نور مرئی پلیمری نمایان می‌سازد [۲۰].

در آزمایشات انجام شده، اندازه‌گیری لومینسانس قطعات میسر نبود. چراکه قطعه تهیه شده با پلی وینیل کاربازول خالص دارای نور کافی برای آشکارسازی نبود و قطعه ساخته شده با ترکیب پلی وینیل کاربازول و نانولوله پلی پیرول/نانولوله کربنی نیز که دارای نور آبی رنگ قابل مشاهده با چشم غیرمسلح بود، در حین انجام آزمایش ولتاژ-جریان، در ولتاژ بالا به دلیل جریان‌دهی بالا دچار آسیب شد و امکان اندازه‌گیری لومینسانس فراهم نگردید. در مجموع آزمایش ولتاژ-جریان بر روی قطعات انجام گرفت و نتایج مطلوبی حاصل گردید و عملکرد قطعات را به‌طور کامل آشکار نمود.

با انجام آزمایش جریان-ولتاژ بر روی دو قطعه یاد شده نتایجی مطابق با نمودارهای شکل ۷ حاصل شد. همانطور که از نمودارها مشخص است، هر دو قطعه ساخته شده به‌صورت کامل خاصیت دیودی از خود نشان می‌دهند. این بدان مفهوم است که قطعه در بایاس مستقیم، نمودار نمایی حاصل می‌شود و در بایاس معکوس، همانند یک مقاومت رفتار می‌کند. این دو نمودار به‌تنهایی عملکرد دیودی و کارکرد قطعه را آشکار می‌سازند.

در نمودار مربوط به پلی وینیل کاربازول خالص در شکل ۸، مشخص است که قطعه ساخته شده با پلی وینیل کاربازول خالص از جریان‌دهی بسیار پایینی برخوردار است. این جریان‌دهی پایین، خود نمایانگر عدم توانایی قطعه در تابش نور می‌باشد. از طرف دیگر، قطعه‌ای که دارای ترکیب نانولوله پلی پیرول/نانولوله کربنی در پلی وینیل کاربازول است، جریان‌دهی بسیار بیشتری را حاصل کرده است، به‌نحوی که، در ولتاژ ۶ ولت، بیش از ۱۵ برابر افزایش جریان خواهیم داشت. این

درحالی است که میزان نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی در پلی‌وینیل کاربازول درصد بسیاری پایینی است و در عملکرد نوردی پلی‌وینیل کاربازول اختلالی ایجاد نکرده است. افزایش جریان خود عاملی است که مشخص می‌کند نور بیشتر توسط نمونه ساطع خواهد شد [۳].



شکل ۷. نمودار ولتاژ-جریان دیودهای ساطع کننده نور مرئی پلیمری ساخته شده مربوط به نمونه ساخته شده با پلی‌وینیل کاربازول و ترکیب پلی‌وینیل کاربازول با نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی.

### تحلیل جریان دیودهای ساخته شده

ابتدا لازم به یادآوری است که حفره‌ها به دلیل وزن بیشتر، دارای تحرک کمتری هستند. این تحرک کمتر، معمولاً تناسب حضور برابر الکترون‌ها و حفره‌ها را در بخش نوردنده به هم می‌ریزد و باعث ایجاد اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش راندمان می‌شود [۲۴].

باتوجه به دیگرام انرژی در حالت بدون حضور نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی، انتقال حفره‌ها از پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات به پلی‌وینیل کاربازول به دلیل اختلاف زیاد بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده<sup>۱</sup> آن‌ها کار دشواری است. اما همانطور که در دیگرام انرژی قطعه ساخته شده مشاهده می‌گردد، شکاف انرژی نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی در دل شکاف انرژی پلی‌وینیل کاربازول قرار دارد و بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده آن به دلیل داشتن اختلاف کمتری با پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن) پلی‌استایرن سولفونات موجب تسهیل انتقال حفره‌ها به لایه نوردنده می‌شود. این موضوع خود باعث افزایش جریان دهی قطعه می‌گردد [۲۶].

<sup>1</sup> Highest occupied molecular orbital

از طرفی دیگر، با توجه به تئوری آستانه تراوایی<sup>۱</sup>، ارتباطات درونی بین هادی‌ها منجر به شکل‌گیری مسیرهای هادی در قطعه می‌شوند که این امر خود، موجب افزایش جریان‌دهی قطعه شده‌اند. وجود مسیرهای هادی، در افزایش تحرک حامل‌های بار و جریان‌دهی قطعه ساخته شده مؤثر هستند [۲۷].

یکی از فاکتورهای مهم جهت بهبود عملکرد دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی، ایجاد چگالی بالای حامل‌های بار در ناحیه بازترکیب است [۲۳؛ ۲۴؛ ۲۸]. در تحقیق صورت گرفته، هر دو عامل شکل‌گیری مسیرهای هادی و تسهیل ورود حفره‌ها به درون لایه نوردننده، موجب افزایش حضور هرچه بیشتر حامل‌های بار بویژه حفره‌ها، در ناحیه بازترکیب می‌شود که این تجمع بیشتر حامل‌ها جهت بازترکیب را حاصل می‌شود. این افزایش جریان‌دهی قطعه و همچنین افزایش تجمع بارها در ناحیه بازترکیب، خود باعث افزایش راندمان کوانتومی داخلی قطعه و به تبع آن افزایش راندمان کوانتومی خارجی قطعه می‌گردد [۲۵؛ ۲۷؛ ۲۸].

### نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی تاثیر ترکیب نانوکامپوزیت نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی در ساختار دیودهای ساطع نور مرئی و ارزیابی عملکرد آن بود. دو نمونه با ساختار مشابه، یکی شامل نانوکامپوزیت و دیگری بدون آن، برای مقایسه تفاوت در جریان، تهیه شد که به عنوان شاخص کارایی عمل می‌کند.

با تجزیه و تحلیل نمودارهای جریان-ولتاژ دو بخش، تأثیر مثبت نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی بر ساختار قطعه مشهود بود. افزایش چگالی جریان نسبت داده شده به این نانوکامپوزیت پتانسیل افزایش کارایی قطعه را دارد که یک جنبه حیاتی در طراحی و تولید دیودهای ساطع‌کننده نور مرئی پلیمری است.

این تحقیق یک نانوکامپوزیت نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی ۱۰ درصد وزنی را به کار برد. با این حال، پیش‌بینی می‌شود که تغییر نسبت نانولوله پلی‌وینیل کاربازول و پلی‌پیرول به نانولوله کربنی یا حتی تنظیم نسبت ترکیب نانولوله کربنی و نانولوله پلی‌پیرول، ممکن است نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشد که تحقیقات بیشتر براساس منابع علمی موجود را تضمین می‌کند.

در رابطه با یافته‌ها، نور ساطع شده از قطعه با نانولوله پلی‌پیرول/نانولوله کربنی با چشم غیرمسلح قابل مشاهده بود، در حالی که جزء دیگر به دلیل جریان کم قادر به انتشار نور مرئی نبود.

### References

- [1] Zhang, X., Bian, Z., Yuan, X., Chen, X., & Lu, C. (2020). A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>
- [2] Parbrook, P. J., Corbett, B., Han, J., Seong, T-Y., & Amano, H. (2021). Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications. *Laser & Photonics Reviews*, 15(5), 2000133. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000133>
- [3] Nezakati, T., Seifalian, A., Tan, A., & Seifalian, A. M. (2018). Conductive Polymers: Opportunities and Challenges in Biomedical Applications. *Chemical Reviews*, 118(14), 6766-6843. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00275>
- [4] Mohd Radzuan, N. A., Sulong, A. B., & Sahari, J. (2017). A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9262-9273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.045>

<sup>1</sup> Percolation

- [5] Zhan, C., Yu, G., Lu, Y., Wang, L., Wujcik, E., & Wei, S. (2017). Conductive polymer nanocomposites: a critical review of modern advanced devices. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(7), 1569-1585. <https://doi.org/10.1039/C6TC04269D>
- [6] Kaur, G., Adhikari, R., Cass, P., Bown, M., & Gunatillake, P. (2015). Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications. *Royal Society of Chemistry Advances*, 5(47), 37553-37567. <https://doi.org/10.1039/C5RA01851J>
- [7] Poddar, A. K., Patel, S. S., & Patel, H. D. (2021). Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(12), 4616-4641. <https://doi.org/10.1002/pat.5483>
- [8] Guner, T., & Demir, M. M. (2018). A Review on Halide Perovskites as Color Conversion Layers in White Light Emitting Diode Applications. *physica status solidi (A) Applications and Materials*, 215(13), 1800120. <https://doi.org/10.1002/pssa.201800120>
- [9] Zhu, Y., Xu, G., Yuan, J., Jo, J., Gandikota, G., Demirci, H., Agano, T., Sato, N., Shigeta, Y., & Wang, X. (2018). Light Emitting Diodes based Photoacoustic Imaging and Potential Clinical Applications. *Scientific Reports*, 8(1), 9885. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28131-4>
- [10] Vu, H-T., Huang, C-Y., Yu, H-C., & Su, Y-K. (2018). Ultrathin PVK charge control layer for advanced manipulation of efficient giant CdSe@ZnS/ZnS quantum dot light-emitting diodes. *Organic Electronics*, 63, 349-354. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.09.036>
- [11] Yu, J. C., Lee, A-Y., Kim, D. B., Jung, E. D., Kim, D. W., & Song, M. H. (2017). Enhancing the Performance and Stability of Perovskite Nanocrystal Light-Emitting Diodes with a Polymer Matrix. *Advanced Materials Technologies*, 2(6), 1700003. <https://doi.org/10.1002/admt.201700003>
- [12] Nardelli, A., Deuschle, E., De Azevedo, L. D., Pessoa, J. L. N., & Ghisi, E. (2017). Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.002>
- [13] Sorbellini, E., Rucco, M., & Rinaldi, F. (2018). Photodynamic and photobiological effects of light-emitting diode (LED) therapy in dermatological disease: an update. *Lasers in Medical Science*, 33(7), 1431-1439. <https://doi.org/10.1007/s10103-018-2584-8>
- [14] Kim, J-Y., Kim, M., & Choi, J-H. (2003). Characterization of light emitting devices based on a single-walled carbon nanotube-polymer composite. *Synthetic Metals*, 139(3), 565-568. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(03\)00277-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(03)00277-7)
- [15] Zhou, T., Zhang, W., Cao, Q., Zhang, K., Ban, X., Pei, M., & Wang, J. (2023). Unveiling the In Situ and Solvent Polymerization Engineering for Highly Efficient and Flexible Thermally Activated Delayed Fluorescence Organic Light-Emitting Diodes. *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces*, 15(21), 25762-25773. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02412>
- [16] Hu, G., Wang, Y., Zhang, S., Ding, H., Zhou, Z., Wei, J., Li, X., & Xiong, H. (2023). Rational synthesis of silane-functionalized carbon dots with high-efficiency full-color solid-state fluorescence for light emitting diodes. *Carbon*, 203, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.048>
- [17] Van Der Zee, B., Li, Y., Wetzelaer, G-J. A. H., & Blom, P. W. M. (2022). Efficiency of Polymer Light-Emitting Diodes: A Perspective. *Advanced Materials*, 34(13), 2108887. <https://doi.org/10.1002/adma.202108887>
- [18] Jeong, M. W., Ma, J. H., Shin, J. S., Kim, J. S., Ma, G., Nam, T. U., Gu, X., Kang, S. J., & Oh, J. Y. (2023). Intrinsically stretchable three primary light-emitting films enabled

- by elastomer blend for polymer light-emitting diodes. *Science Advances*, 9(25), eadh1504. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh1504>
- [19] Chen, S-H., Hong, Y-W., Chau, Y-F. C., Huang, H. J., & Chiang, H-P. (2023). Enhancement of luminous efficacy of polymer light-emitting diodes with silver-nanoparticles by oxygen-plasma treatment. *Microscopy Research and Technique*, 86(6), 725-730. <https://doi.org/10.1002/jemt.24324>
- [20] Yang, L., Li, M., Zhang, Y., Yi, K., Ma, J., & Liu, Y. (2014). Synthesis and characterization of polypyrrole nanotubes/multi-walled carbon nanotubes composites with superior electrochemical performance. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(2), 1047-1052. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1685-1>
- [21] Ziegler, K. J., Gu, Z., Peng, H., Flor, E. L., Hauge, R. H., & Smalley, R. E. (2005). Controlled Oxidative Cutting of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, 127(5), 1541-1547. <https://doi.org/10.1021/ja044537e>
- [22] Salzmann, C. G., Llewellyn, S. A., Tobias, G., Ward, M. A., Huh, Y., & Green, M. L. (2007). The role of carboxylated carbonaceous fragments in the functionalization and spectroscopy of a single-walled carbon-nanotube material. *Advanced Materials*, 19(6), 883-887. <https://doi.org/10.1002/adma.200601310>
- [23] Lee, B. R., Kim, J-w., Kang, D., Lee, D. W., Ko, S-J., Lee, H. J., Lee, C-L., Kim, J. Y., Shin, H. S., & Song, M. H. (2012). Highly Efficient Polymer Light-Emitting Diodes Using Graphene Oxide as a Hole Transport Layer. *American Chemical Society Nano*, 6(4), 2984-2991. <https://doi.org/10.1021/nn300280q>
- [24] Low, J. Y., Merican, Z. M. A., & Hamza, M. F. (2019). Polymer light emitting diodes (PLEDs): An update review on current innovation and performance of material properties. *Materials Today: Proceedings*, 16(1), 1909-1918. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.068>
- [25] Santos, M. R. D., & Oliveira, H. P. D. (2014). Simple method for mass production of polypyrrole/carbon nanotubes hybrid artificial muscle. *Química Nova*, 37(6), 1000-1003. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140161>
- [26] Xue, Q., Sun, J., Huang, Y., Zhu, M., Pei, Z., Li, H., Wang, Y., Li, N., Zhang, H., & Zhi, C. (2017). Recent Progress on Flexible and Wearable Supercapacitors. *Small*, 13(45), 1701827. <https://doi.org/10.1002/sml.201701827>
- [27] Karimzad Ghavidel, A., Zadshakoyan, M., Kiani, G., Lawrence, J., & Moradi, M. (2023). Innovative approach using ultrasonic-assisted laser beam machining for the fabrication of ultrasensitive carbon nanotubes-based strain gauges. *Optics and Lasers in Engineering*, 161, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107325>
- [28] Taki, T., & Strassburg, M. (2020). Review—Visible LEDs: More than Efficient Light. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9(1), 015017. <https://doi.org/10.1149/2.0402001JSS>