

RESEARCH ON THE FABRICATION AND OPTICAL PROPERTIES OF INORGANIC PEROVSKITE QUANTUM DOTS CsPbBr_3 AND THEIR APPLICATION FOR TRANSPARENT COLOR DISPLAY PANELS

Duong Thanh Tung

School of Materials Science and Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	19/3/2025	This study focuses on the fabrication of transparent luminescent panels based on perovskite/PMMA composite materials. CsPbBr_3 quantum dots with a perovskite structure, approximately 10 nm in size and cubic in shape, were successfully synthesized using the hot injection method from PbBr_2 and Cs_2CO_3 precursors. These quantum dots emit green light (526 nm) when excited by a laser source (405 nm) and can be combined with PMMA resin to form transparent luminescent panels with 1, 3, 5, and 7 coating layers. They exhibit a high photoluminescence efficiency of up to 87% and a transmittance of over 90% at a wavelength of 526 nm with 5 coating layers, allowing image display when illuminated by a projector laser beam. The research results indicate that CsPbBr_3 perovskite quantum dots exhibit high stability and durability, meeting the requirements for fabricating transparent luminescent panels and showing potential for application in transparent display devices using a 405 nm laser projector.
Revised:	30/6/2025	
Published:	30/6/2025	
KEYWORDS		
Quantum dots		
Perovskite		
Hot injection method		
Transparent display panel		
CsPbBr_3 / PMMA composite		

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ TÍNH CHẤT QUANG CỦA CHẤM LƯỢNG TỬ PEROVSKITE VÔ CƠ CsPbBr_3 VÀ ỨNG DỤNG CHO TẤM HIỂN THỊ MÀU TRONG SUỐT

Dương Thanh Tùng

Trường Vật liệu - Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	19/3/2025	Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo tấm panel phát quang trong suốt dựa trên vật liệu composite perovskite/PMMA. Các chấm lượng tử CsPbBr_3 có cấu trúc perovskite với kích thước khoảng 10 nm và hình dạng lập phương đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp tiêm nóng (hot injection) từ các tiền chất PbBr_2 và Cs_2CO_3 . Các chấm lượng tử này phát ánh sáng xanh lục (526 nm) khi được kích thích với nguồn laser (405 nm) và có thể kết hợp với keo nhựa PMMA để tạo thành tấm phát quang trong suốt với số lớp phủ từ 1, 3, 5, 7 lớp. Chúng có hiệu suất phát quang cao lên đến 87% và độ truyền qua trên 90% ở bước sóng 526 nm với 5 lớp phủ, cho phép hiển thị hình ảnh khi chiếu tia laser từ máy chiếu projector. Kết quả nghiên cứu cho thấy chấm lượng tử perovskite CsPbBr_3 có độ ổn định và độ bền cao, đáp ứng yêu cầu chế tạo tấm phát quang trong suốt và có tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị hiển thị trong suốt sử dụng máy chiếu với nguồn phát laser 405 nm.
Ngày hoàn thiện:	30/6/2025	
Ngày đăng:	30/6/2025	
TỪ KHÓA		
Chấm lượng tử		
Vật liệu perovskite		
Phương pháp phun nóng		
Tấm hiển thị trong suốt		
CsPbBr_3 / PMMA composite		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12341>

Email: tungduong1084@yahoo.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

312

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Các chấm lượng tử perovskite halide kim loại là vật liệu bán dẫn đã thu hút sự quan tâm to lớn trong những năm gần đây đối với các thiết bị quang điện thể hệ tiếp theo nhờ vào các đặc tính quang điện vượt trội, chẳng hạn như vật liệu rẻ tiền và quy trình chế tạo đơn giản. Chúng đã được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như pin mặt trời thể hệ mới, đi-ốt phát quang (LED), cảm biến quang có độ nhạy cao, laser, v.v. [1] – [5]. So với perovskite hữu cơ - vô cơ lai (OIHP), perovskite vô cơ hoàn toàn có độ ổn định nhiệt và độ ẩm tốt hơn [6]. Trong số đó, CsPbBr₃ ở cấu trúc lập phương là một trong những vật liệu perovskite vô cơ ổn định nhất, đã được nghiên cứu cho nhiều ứng dụng như bộ phát tia X (X-ray scintillators) [7], phim tăng cường màu sắc cho màn hình tinh thể lỏng có dải màu rộng [8], và cảm biến quang sử dụng làm lớp hấp thụ hoặc lớp chuyển đổi màu [9], [10]. Các tinh thể nano và màng số lượng lớn của CsPbBr₃ đã được chế tạo bằng nhiều phương pháp khác nhau, chẳng hạn như phủ quay (spin coating), phủ phun (spray coating) [11], phủ bay hơi nhiệt (thermal evaporation coating) [12], v.v. Ngoài trừ tinh thể đơn, perovskite đa tinh thể với liên kết hóa học-ion yếu có thể biến đổi giữa các hệ tinh thể khác nhau, bao gồm hệ lập phương và trực thoi, làm cho nó trở nên kém ổn định [13]. Màng mỏng được lắp ráp từ các tinh thể nano perovskite đã nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho màng số lượng lớn để ngăn chặn quá trình di chuyển ion. Hạt nano trong màng perovskite giúp ngăn chặn sự chuyển pha từ perovskite sang pha không có hoạt tính quang học, sự phân tách pha do ánh sáng gây ra và sự phân hủy vật liệu [14]. Một ứng dụng đáng chú ý khác là màn hình hiển thị phát xạ trong suốt. Trong nghiên cứu trước đây, chúng tôi đã sử dụng một máy chiếu với nguồn laser có bước sóng ngắn (405 nm) và một tấm nano tinh thể perovskite phát xạ màu xanh lam (470 nm) làm màn hình phát xạ trong suốt [15].

Trong nghiên cứu này, các chấm lượng tử CsPbBr₃ có kích thước ~ 10 nm đã được chế tạo bằng quy trình tổng hợp nhiệt phân một bước đơn giản với khả năng phát xạ xanh lục mạnh. Các tính chất cấu trúc và quang phát xạ của chúng được nghiên cứu thông qua việc đo phổ kích thích quang phát xạ (PLE) và phổ phát xạ quang (PL), hiệu suất phát xạ quang, nhiễu xạ tia X (XRD) và kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM). Các hạt nano sau chế tạo được kết hợp với máy chiếu với nguồn phát là laser 405 nm cho ứng dụng màn hình phát xạ trong suốt, cũng đã được nghiên cứu.

2. Thực nghiệm

2.1. Hóa chất

Các hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm: Cesium carbonate (Cs₂CO₃) 99,9%, Oleylamine (OLA) (C₁₈H₃₅NH₂) 98%, Oleic acid (OA) (C₁₈H₃₄O₂) 90%, Lead bromide (PbBr₂) 99,9%, Iso-Octane (C₈H₁₈), Methyl methacrylate MMA 99,8%, Poly (methyl methacrylate) PMMA. Các hóa chất này được sử dụng trực tiếp trong các bước thí nghiệm, và không cần tinh chế thêm.

2.2. Các bước thực hiện

2.2.1. Tổng hợp chấm lượng tử perovskite

Đầu tiên, cân 32,6 mg Cs₂CO₃, 330,3 mg PbBr₂ cho vào bình cầu 50 ml, sau đó cho thêm 1 ml OLA và 1 ml OA vào bình cầu. Lấy 10 ml iso-Octane cho vào bình cầu 50 ml ở trên. Lấy bình cầu chứa toàn bộ hóa chất vào bể dầu 85 °C, khuấy trong 25 phút. Sau đó, làm lạnh đột ngột trong bể nước đá. Để toàn bộ dung dịch thu được tại điều kiện thường 12 giờ, sau đó, mang đi ly tâm với tốc độ 5000 vòng/phút. Bỏ phần dung dịch phía trên, cho thêm 5 ml iso-Octane vào ống ly tâm có giữ lại phần chất rắn sau ly tâm, mang ống ly tâm đi rung siêu âm. Cuối cùng, mang đi ly tâm tại 5000 vòng/phút, lấy phần dung dịch phía trên.

2.2.2. Chế tạo tấm panel chứa chấm lượng tử perovskite

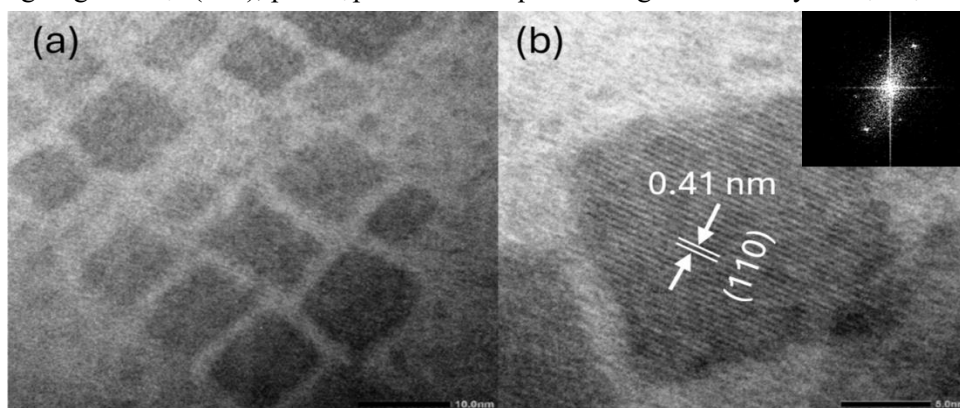
Hòa tan 1 g PMMA trong 10 ml MMA. Sau khi PMMA tan hoàn toàn, nhỏ thêm 1 ml dung dịch vật liệu perovskite và khuấy đều. Nhỏ 30 μl hỗn hợp dung dịch ở trên lên tấm nhựa mica kích thước 3 x 3 cm, dùng phương pháp gạt phủ để tạo màng.

2.3. Các phép đo phân tích

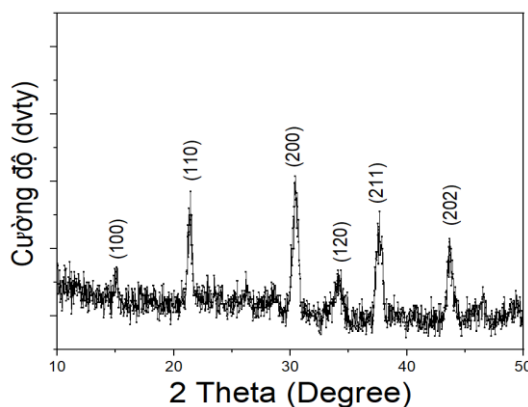
Pha của mẫu được xác định bằng các phép đo nhiễu xạ tia X (XRD) với hệ đo Philips X'Pert với bức xạ Cu-K α trong phạm vi $10^\circ \leq 2\theta \leq 50^\circ$. Hình thái của các hạt được ghi lại bằng kính hiển vi điện tử quét emission trường (FESEM, JEON). Hệ huỳnh quang của Horiba (Mỹ) có thể đo bức xạ huỳnh quang từ 180 nm đến 1550 nm, đo hấp thụ huỳnh quang từ 250 nm đến 750 nm. Hệ đo quang của Gamma Scientific gồm cầu tích phân, bộ xử lý tín hiệu quang Radoma GS-1290 kết nối với PC, phần mềm xử lý và hiển thị quang phổ Gamma Scientific LightTouch LED.

3. Kết quả và thảo luận

Các chấm lượng tử perovskite CsPbBr₃ được chế tạo bằng phương pháp đồng kết tủa, các hạt CsPbBr₃ có chung hình dạng lập phương. Các chấm lượng tử sau chế tạo được bao bọc bởi lớp bên ngoài bằng OLA tránh cho chúng kết tụ và sự phân hủy khi tiếp xúc với môi trường có độ ẩm cao. Hình 1a cho thấy các chấm lượng tử có chung hình dạng lập phương, các hạt sau chế tạo có kích thước phân bố trong khoảng 5 nm – 15 nm, do sự phân bố kích thước hạt rộng cho thấy phổ phát xạ của mẫu cũng rộng hơn. Hình 1b là ảnh TEM phân giải cao của một chấm lượng tử perovskite CsPbBr₃ có kích thước trung bình khoảng 10 nm. Khoảng cách mạng đo được là 0,41 nm, tương ứng với mặt (110), phù hợp với các kết quả đã công bố trước đây về vật liệu này [16].

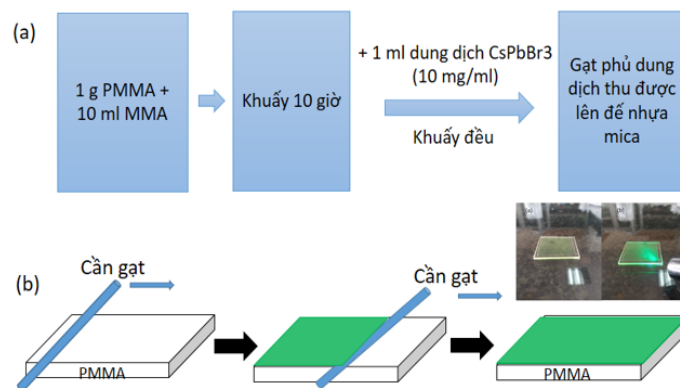


Hình 1. Ảnh TEM (a), ảnh HR-TEM và phổ nhiễu xạ điện tử (b) của perovskite CsPbBr₃



Hình 2. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu perovskite CsPbBr₃

Cấu trúc tinh thể của vật liệu được khảo sát thông qua phép phân tích nhiễu xạ tia X. Các đỉnh nhiễu xạ tại góc 2θ là $15,1^\circ$, $21,9^\circ$, $31,01^\circ$, $33,9^\circ$, $37,7^\circ$ và $43,5^\circ$ lần lượt tương ứng với các mặt tinh thể (100), (110), (200), (210), (211) và (202) của pha cấu trúc lập phương CsPbBr_3 (PDF#540752) [8]. Các đỉnh nhiễu xạ của vật liệu tại góc 2θ lần lượt tại $15,1^\circ$, $21,9^\circ$, $31,01^\circ$ (Hình 2) thể hiện cấu trúc trực thoi đặc trưng của chấm lượng tử perovskite, thể hiện đã chế tạo thành công chấm lượng tử CsPbBr_3 với cấu trúc perovskite.



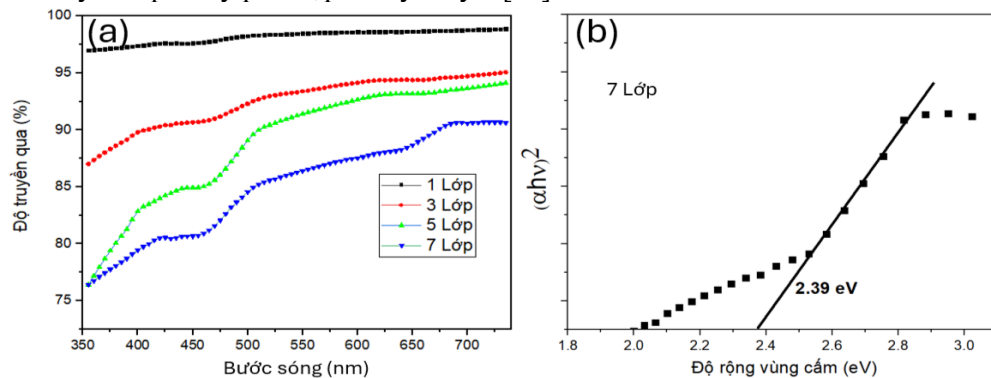
Hình 3. Quy trình phủ gạt tẩm PMMA/ CsPbBr_3 composite

Các hạt nano CsPbBr_3 sau khi được chế tạo được pha trộn với keo PMMA và phủ lên tấm nhựa Mica trong suốt bằng phương pháp gạt phủ như được thể hiện trên Hình 3 với các số lần gạt phủ khác nhau (1, 3, 5, 7 lần). Màng $\text{CsPbBr}_3/\text{PMMA}$ composite sau đó được khảo sát tính chất quang bằng phép đo phổ truyền qua UV-Vis như được thể hiện trong Hình 4a. Hình 4b cho thấy đồ thị $(\alpha h\nu)^2$ theo $h\nu$ của màng được phủ 7 lớp. Từ đồ thị ta có thể xác định được bề rộng vùng cấm quang là $\sim 2,39$ eV thông qua hàm Tauc. Phương pháp này dựa trên giả định rằng hệ số hấp thụ α phụ thuộc vào năng lượng photon $h\nu$ và có thể được biểu diễn bởi phương trình:

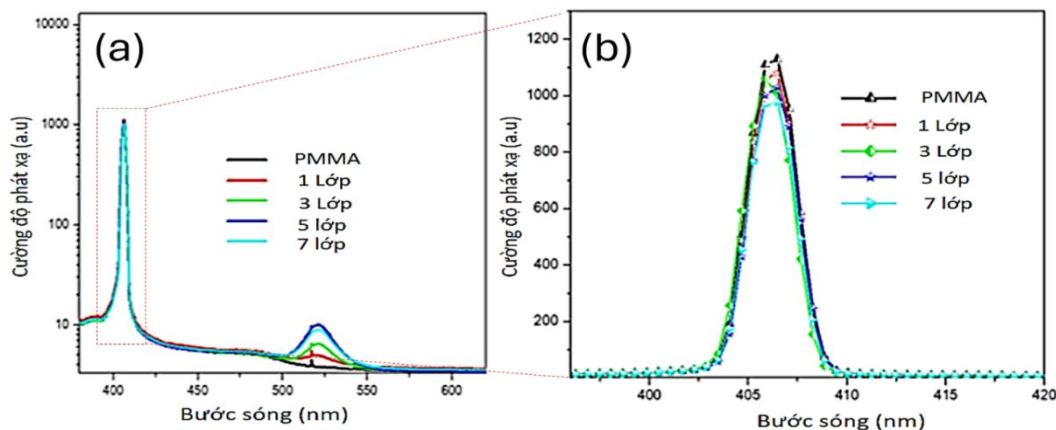
$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{\gamma}} = B(h\nu - E_g) \quad (1)$$

Trong đó, h là hằng số Planck, ν là tần số của photon ánh sáng, E_g là bề rộng vùng cấm, B là hằng số. γ là yếu tố phụ thuộc vào sự chuyển dời tự nhiên của điện tử từ vùng dẫn xuống vùng hóa trị. Vật liệu CsPbBr_3 được biết đến là vật liệu bán dẫn vùng cấm thẳng, với giá trị của γ là $\frac{1}{2}$ [17]. Bước sóng kích thích phát quang trong suốt là khoảng 405 nm, bước sóng phát xạ khoảng 525 nm. Hình 4 cho thấy khi tăng lớp phủ từ 1 lớp lên 7 lớp, cường độ của đỉnh kích thích giảm dần, do khi tăng độ dày thì lượng vật liệu tăng lên dẫn đến lượng photon của ánh sáng kích thích bị hấp thụ nhiều hơn. Khi độ dày lớp phủ từ 1 lớp lên 5 lớp, cường độ phát xạ tăng dần, sau đó khi tăng lên 7 lớp, cường độ phát xạ giảm, vì vậy phủ 5 lớp là tối ưu nhất. Với 1 lớp phủ, tấm phát quang có độ truyền qua luôn lớn hơn 97%; với 3 và 5 lớp phủ, độ truyền qua không chênh lệch nhiều trong khoảng bước sóng từ 520 nm đến 740 nm. Trong khoảng từ 520 nm đến 700 nm, phủ 3 lớp và 5 lớp luôn có độ truyền qua từ hơn 90% đến 95%. Khi được phủ 7 lớp, độ truyền qua giảm xuống rất nhiều so với 1 lớp, độ truyền qua khi phủ 7 lớp trong khoảng từ hơn 75% đến dưới 90%. Có thể thấy độ truyền qua của các tấm được phủ từ 1 lớp đến 5 lớp đều có độ truyền qua hơn 90% trong khoảng 520 nm đến 740 nm, do đó, chúng rất phù hợp trong việc chế tạo tấm phát quang trong suốt ứng dụng làm màn hình hiển thị tốc độ. Trong khoảng bước sóng từ 350 nm đến 500 nm, tấm phát quang được phủ từ 3 lớp đến 7 lớp có sự giảm độ truyền qua mạnh hơn so với một lớp, tấm phủ 1 lớp do có ít vật liệu nên trong khoảng bước sóng từ 350 nm đến 500 nm có sự suy giảm độ truyền qua không đáng kể. Đặc biệt tại bước sóng khoảng 350 nm có sự giảm mạnh độ truyền qua của các tấm phủ 3 lớp đến 7 lớp vật liệu. Việc suy giảm mạnh này là do vật liệu CsPbBr_3 hấp thụ mạnh tại bước sóng 360 nm. Phổ phát xạ (Hình 5a) cũng cho

thấy các đỉnh cố định ở một vị trí (525 nm, tương ứng với giá trị năng lượng $\sim 2,36$ eV) chứng tỏ bề rộng vùng cấm không thay đổi theo độ dày của màng phủ. Phổ phát xạ thường có xu hướng dịch sang bước sóng dài ($\sim 2,36$ eV) so với phổ hấp thụ/truyền qua ($\sim 2,39$ eV) do hiệu ứng stokes shift cho thấy kết quả này phù hợp với lý thuyết [18].



Hình 4. (a) Phổ truyền qua của các độ dày màng phủ khác nhau, (b) thấy đồ thị $(\alpha h\nu)^2$ theo $h\nu$ của màng được phủ 7 lớp

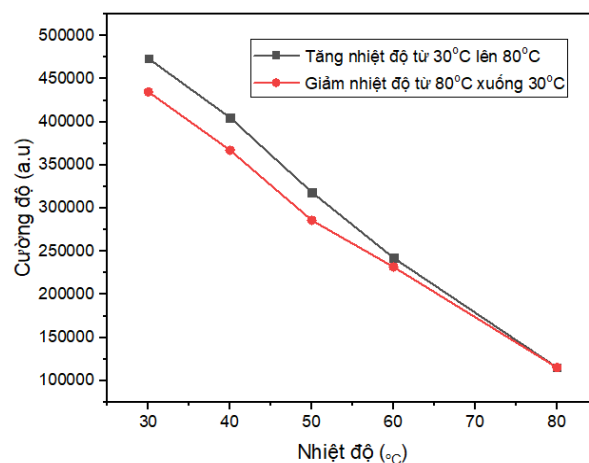


Hình 5. (a) Phổ phát xạ của tấm phát quang trong suốt (500-550 nm) dưới sự kích thích của đèn LED UV (405 nm), (b) Sự suy giảm cường độ quang của đèn LED theo độ dày của tấm panel

Hiệu suất phát quang của các mẫu màng sau chế tạo được khảo sát thông qua hệ cầu tích phân với các mẫu màng được đặt trên chip led 405 nm. Bằng cách lấy cường độ phát xạ chia cho cường độ hấp thụ thì thu được hiệu suất lượng tử của vật liệu. Dựa trên Hình 5, hiệu suất lượng tử cao nhất của mẫu xác định được là 87%. Sử dụng công thức:

$$\delta = \frac{N_E}{N_A} = \frac{S_E}{S_A} \quad (2)$$

N_E và N_A lần lượt là số photon phát xạ và số photon hấp thụ, do tích phân diện tích phần phát xạ S_E và tích phân diện tích phần hấp thụ S_A tỷ lệ thuận với N_E và N_A , nên ta có $N_E/N_A = S_E/S_A$. Việc chế tạo thành tấm phát quang trong suốt giúp tăng cường hiệu suất phát quang, tránh được việc kết tụ hạt khi đo dung dịch do quá trình tỏa nhiệt của chip led làm cho dung môi bay hơi. Tấm phát quang trong suốt được chế tạo đơn giản và dựa trên các vật liệu giá thành thấp, tấm phát quang trong suốt dưới đây được chế tạo từ các chấm lượng tử CsPbBr₃. Chế tạo tấm phát quang trong suốt định hướng ứng dụng trong việc sản xuất đồng hồ hiển thị tốc độ trên ô tô, xe máy, máy bay, v.v. giúp tăng tính an toàn cho phương tiện cũng như tăng tính thẩm mỹ của sản phẩm.



Hình 6. Sự phụ thuộc của cường độ phát quang theo nhiệt độ



Hình 7. Hình ảnh chụp thực tế của tấm phát quang trong suốt sử dụng nguồn kích thích là máy chiếu laser 405 nm

Thực hiện khảo sát cường độ phát quang theo nhiệt độ (Hình 6) cho thấy sự thay đổi của cường độ phát quang khá tuyến tính. Khi tăng nhiệt độ môi trường lên 40 °C, 50 °C, 60 °C và 80 °C lần lượt cho thấy cường độ phát quang của tấm phát quang trong suốt giảm xuống 91,2%; 70,2%; 53,2% và 27,7%. Có thể thấy khi tăng nhiệt độ lên khoảng từ 40 °C đến 50 °C, cường độ phát quang không giảm nhiều. Khi để tấm phát quang quay lại nhiệt độ bình thường cho thấy sự suy giảm của cường độ không đáng kể chỉ từ 1 % đến 6 %. Điều này cho thấy khả năng phù hợp với việc ứng dụng làm màn hình hiển thị tốc độ trên ô tô, do trên ô tô khi có người nhiệt độ bên trong xe luôn dưới 30 °C và khi không có người, nhiệt độ trong xe khoảng từ 30 °C đến 60 °C. Khi xe trong khoảng nhiệt độ này, các tấm phát quang luôn duy trì được khả năng phát quang tốt cũng như không có sự suy giảm nhiều về cường độ phát quang.

Việc khảo sát khả năng phát quang của tấm composite perovskite/PMMA được thực hiện như trên Hình 7. Đầu tiên, sử dụng phần mềm trình chiếu trên một máy tính có kết nối với máy chiếu (projector) giúp truyền thông tin cần hiển thị lên trên tấm phát quang trong suốt. Đèn của máy chiếu được thay bằng đèn laser 405 nm có tác dụng kích thích các chấm lượng tử perovskite trên tấm phát quang trong suốt. Tấm phát quang trong suốt được gắn vào giá và đặt trước máy chiếu. Để thực hiện khảo sát khả năng phát của tấm phát quang, đầu tiên kết nối nguồn điện cho các

thiết bị, sau đó nhập nội dung cần hiển thị lên tấm phát quang qua máy tính. Điều chỉnh tiêu cự sao cho phù hợp để thu được hình ảnh hiển thị trên tấm phát quang trong suốt sắc nét nhất. Trên Hình 7 là ảnh chụp thực tế của tấm phát quang trong suốt khi được chiếu bởi máy chiếu với nguồn laser 405 nm (laser projector). Các số 1, 3, 5, 7 thể hiện số lớp vật liệu composite perovskite/PMMA được phủ lên trên để PMMA. Việc khảo sát số lớp phủ phù hợp lên trên tấm PMMA dựa trên chấm lượng tử perovskite CsPbBr₃ phát xạ màu xanh lục. Các ảnh chụp tấm phát quang trong suốt này đều được thực hiện khi ánh sáng phòng được duy trì, hình ảnh hiển thị trên tấm phát quang trong suốt được hiển thị một cách rõ nét. Đặc biệt, tấm phát quang được phủ bởi lớp CsPbBr₃ phát xạ màu xanh lục cho thấy hình ảnh rõ nét nhất, đó là do mắt người nhạy nhất với ánh sáng màu xanh lục.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chế tạo thành công một tấm hiển thị màu trong suốt dựa trên tổ hợp giữa vật liệu perovskite có kích thước nano và nhựa PMMA. Các chấm lượng tử CsPbBr₃ có cấu trúc perovskite, với kích thước từ 5 đến 15 nm, được tổng hợp bằng phương pháp phun nóng (hot injection) từ các tiền chất PbBr₂ và Cs₂CO₃. Các chấm lượng tử CsPbBr₃ phát ra ánh sáng xanh lục (với đỉnh phát quang tại ~526 nm) khi được kích thích bởi nguồn sáng có bước sóng 405 nm. Sau khi tổng hợp, các chấm lượng tử được phân tán vào nhựa PMMA và phủ lên bề mặt bằng phương pháp gạt phủ, tạo thành các tấm phát quang trong suốt với số lớp phủ lần lượt là 1, 3, 5 và 7 lớp. Các tấm panel phát quang này có khả năng hiển thị hình ảnh khi được chiếu bởi tia laser từ máy chiếu projector, với hiệu suất phát quang cao lên tới 87% và độ truyền qua trên 90% tại bước sóng 526 nm với 5 lớp phủ. Kết quả cho thấy sản phẩm này có tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị thương mại như màn hình hiển thị trên kính lái ô tô (Head-up Display), cũng như trong các lĩnh vực khác như màn hình hiển thị trong suốt, thiết bị thực tế tăng cường (AR), kính thông minh, chiếu sáng cao cấp và các hệ thống hiển thị tương tác hiện đại.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí thuộc đề tài Bộ Giáo dục và Đào tạo mã số “B2025-BKA-02”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] G. Yang, H. Gu, J. Yin, C. Fei, Z. Shi, X. Shi, X. Ying, and J. Huang, “Reductive cation for scalable wide-bandgap perovskite solar cells in ambient air,” *Nat. Sustain.*, vol. 5, pp. 529–535, 2025, doi: 10.1038/s41893-025-01529-5.
- [2] Z. Zeng, Y. Meng, Z. Yang, Y. Ye, Q. Lin, Z. Meng, H. Hong, S. Ye, Z. Cheng, Q. Lan, J. Wang, Y. Chen, H. Zhang, Y. Bai, X. Jiang, B. Liu, J. Hong, T. Guo, F. Li, Y. Chen, and Z. Weng, “Efficient CsPbBr₃ Perovskite Light-Emitting Diodes via Novel Multi-Step Ligand Exchange Strategy Based on Zwitterionic Molecules,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, pp. 10389–10397, 2024, doi: 10.1021/acsami.3c17324.
- [3] T. Duong, P. Tran, T. Van, D. Nguyen, and V. Tran, “A Dense, Pinholes-free Pure Cubic Phase CsPbBr₃ Nanocrystals Film for High-performance Photodetector,” *Electron. Mater. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 217–223, 2023, doi: 10.1007/s13391-023-00448-x.
- [4] H. M. Cho and H. W. Jang, “Inorganic Halide Perovskite Quantum Dots for Memristors,” *Electron. Mater. Lett.*, vol. 21, pp. 291–310, 2025, doi: 10.1007/s13391-025-00560-0.
- [5] X. Zhang, R. Bai, Y. Fu, Y. Hao, X. Peng, J. Wang, B. Ge, J. Liu, Y. Hu, X. Ouyang, W. Jie, and Y. Xu, “High energy resolution CsPbBr₃ alpha particle detector with a full-customized readout application specific integrated circuit,” *Nat. Commun.*, vol. 15, 2024, Art. no. 6333, doi: 10.1038/s41467-024-50746-7.
- [6] H. Sun, J. Zhang, X. Gan, L. Yu, H. Yuan, M. Shang, C. Lu, D. Hou, Z. Hu, Y. Zhu, and L. Han, “Pb-Reduced CsPb_{0.9}Zn_{0.1}I₂Br thin Films for efficient Perovskite Solar cells,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 9, 2019, Art. no. 1900896, doi:10.1002/aenm.201900896

- [7] Z. Yang, J. Yao, L. Xu, W. Fan, and J. Song, "Designer bright and fast CsPbBr₃ perovskite nanocrystal scintillators for high-speed X-ray imaging," *Nat. Commun.*, vol. 15, 2024, Art. no. 8870, doi: 10.1038/s41467-024-53263-9.
- [8] T. Nguyen, T. Luu, D. Nguyen, and T. Duong, "Comparative study on Backlighting Unit using CsPbBr₃ Nanocrystals/KSFM phosphor + blue LED and commercial WLED in Liquid Crystal Display," *J. Electron Mater.*, vol. 50, no. 4, pp. 1827–1834, 2021, doi:10.1007/s11664-021-08775-1.
- [9] J. Miao and F. Zhang, "Recent progress on highly sensitive perovskite photodetectors," *J. Mater. Chem. C.*, vol. 7, pp. 1741–1791, 2019, doi:10.1039/C8TC06089D.
- [10] C. Kang, I. Dursun, G. Liu, L. Sinatra, X. Sun, M. Kong, J. Pan, P. Maitry, E. Ooi, *et al.*, "High-speed colour-converting photodetector with all-inorganic CsPbBr₃ perovskite nanocrystals for ultraviolet light communication," *Light: Science & Applications*, vol. 8, 2019, Art. no. 94, doi: 10.1038/s41377-019-0204-4.
- [11] J. Duan, D. Dou, Y. Zhao, Y. Wang, X. Yang, H. Yuan, B. He, and Q. Tang, "Spray-assisted deposition of CsPbBr₃ films in ambient air for large-area inorganic perovskite solar cells," *Mater. Today Energy*, vol. 10, pp. 146–152, 2018, doi:10.1016/j.mtener.2018.09.001
- [12] J. Li, R. Gao, F. Gao, J. Lei, H. Wang, X. Wu, J. Li, H. Liu, X. Hua, and S. Liu, "fabrication of efficient CsPbBr₃ perovskite solar cells by single-source thermal evaporation," *J. Alloys Compd.*, vol. 818, 2020, Art. no. 152903, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152903.
- [13] H. M. Ghaithan, Z. A. Alahmed, S. M. H. Qaid, M. Hezam, and A. S. Aldwayyan, "Density Functional Study of Cubic, Tetragonal, and Orthorhombic CsPbBr₃ Perovskite," *ACS Omega*, vol. 5, pp. 7468–7480, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c00197.
- [14] K. Ho, M. Wei, E. Sargent, and G. Walker, "Grain Transformation and Degradation mechanism of formamidinium and cesium lead Iodide Perovskite under Humidity and Light," *ACS Energy Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 934–940, 2021, doi: 10.1021/acsenerylett.0c02247.
- [15] X. Pham, B. Tran, D. Nguyen, T. Nguyen, M. Nguyen, C. Nguyen, and T. Duong, "Low-Dimensional CsPbBr₃@CoBr₂ Super-Nanowire Structure for Perovskite/PMMA Composite with Highly Blue Emissive Performance," *Crystals*, vol. 11, 2021, Art. no. 1564, doi: 10.3390/cryst11121564.
- [16] Q. Wang, W. Wu, R. Wu, S. Yang, Y. Wang, J. Wang, Z. Chai, and Q. Han, "Improved thermal stability of photoluminescence in Cs₄PbBr₆ microcrystals/CsPbBr₃ nanocrystals," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 554, pp. 133–141, 2019, doi: 10.1016/j.jcis.2019.06.083.
- [17] X. Zhao, T. Tang, Q. Xie, L. Gao, L. Lu, and Y. Tang, "First-principles study on the electronic and optical properties of the orthorhombic CsPbBr₃ and CsPbI₃ with Cmcm space group," *New J. Chem.*, vol. 45, pp. 15857–15862, 2021, doi: 10.1039/D1NJ02216D.
- [18] L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, "Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut," *Nano Lett.*, vol. 15, pp. 3692–3696, 2015, doi: 10.1021/nl5048779.