

UNEXPECTED PHOTOLUMINESCENCE ENHANCEMENT OF RED-EMITTING CdTe QUANTUM DOTS BY Cu²⁺ IONS

Hoang Quang Bac^{1*}, Vu Anh Duc¹, Nguyen Thi Nhan¹,
 Nguyen Van Hao², Nguyen Van Quang¹, Mai Xuan Dung^{1*}

¹Hanoi Pedagogical University 2, ²TNU - University of Sciences

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 07/12/2021 Revised: 20/01/2022 Published: 11/02/2022	Size-dependent reactivity of semiconductor quantum dots (QDs) is of importance to deploy QDs to diverse applications such as photocatalysts, chemosensors, and QDs synthesis. Herein, we studied the effects of Cu²⁺ on the absorption and photoluminescent properties of water-soluble CdTe QDs in order to demonstrate the application potential of CdTe QDs as a photoluminescent sensor for Cu²⁺ detection. Unexpectedly, while the photoluminescence (PL) of small CdTe QDs, such as green or yellow emitting CdTe QDs changed slightly with increasing Cu²⁺ concentration from 10⁻⁸ M to 10⁻⁵ M the PL intensity of red-emitting QDs increased by about 3.3 times. In the higher concentration regime, PL intensity of the small QDs decreased while that of red-emitting QDs unchanged with Cu²⁺. Our results advise the uses of CdTe QDs of suitable size for Cu²⁺ detection in the aqueous medium.
KEYWORDS CdTe quantum dots Photoluminescent sensing Copper ions Photoluminescence Water-soluble	

CƯỜNG ĐỘ HUỖNH QUANG CỦA CHẤM LƯỢNG TỬ CdTe PHÁT XẠ ĐỎ TĂNG BẤT THƯỜNG BỞI ION Cu²⁺

Hoàng Quang Bắc¹, Vũ Anh Đức¹, Nguyễn Thị Nhân¹,
 Nguyễn Văn Hào², Nguyễn Văn Quang¹, Mai Xuân Dũng^{1*}

¹Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2, ²Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 07/12/2021 Ngày hoàn thiện: 20/01/2022 Ngày đăng: 11/02/2022	Sự phụ thuộc của hoạt tính hóa học theo kích thước của chấm lượng tử bán dẫn (QDs) có vai trò quan trọng trong triển khai ứng dụng QDs vào các lĩnh vực như quang xúc tác, cảm biến hóa học và tổng hợp QDs. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của ion Cu²⁺ đến tính chất hấp thụ và phát xạ huỳnh quang (PL) của chấm lượng tử CdTe tan trong nước để làm sáng tỏ tiềm năng ứng dụng của CLT CdTe làm cảm biến huỳnh quang phát hiện ion Cu²⁺. Nằm ngoài dự đoán ban đầu, trong khi CLT nhỏ, phát xạ màu xanh lá cây hoặc phát xạ màu vàng cường độ PL không thay đổi khi tăng nồng độ của Cu²⁺ từ 10⁻⁸ M lên 10⁻⁵ M, cường độ PL của CLT CdTe phát xạ đỏ tăng lên khoảng 3,3 lần. Ở vùng nồng độ Cu²⁺ lớn hơn, cường độ PL của CLT nhỏ giảm dần, trong khi PL của CLT lớn không thay đổi đáng kể. Kết quả này gợi ý việc sử dụng CLT CdTe với kích thước phù hợp để phát hiện ion Cu²⁺ trong nước.
TỪ KHÓA Chấm lượng tử CdTe Cảm biến huỳnh quang Ion đồng Huỳnh quang Tan trong nước	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5323>

* Corresponding author. Email: xdmai@hpu2.edu.vn and hoangquangbac@hpu2.edu.vn

1. Giới thiệu

Chấm lượng tử (CLT) của chất bán dẫn đã và đang được nghiên cứu, triển khai ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như vật liệu chuyển đổi ánh sáng trong đèn LED [1], [2], chế tạo bán dẫn nhiệt độ thấp [3], [4], pin mặt trời [5], [6] và nhiều lĩnh vực khác. Dựa vào hiệu ứng giam hãm lượng tử, các tính chất quan trọng của CLT như vùng hấp thụ, vùng phát xạ, mức năng lượng của vùng dẫn hay vùng hóa trị có thể được điều chỉnh cho phù hợp với các mục đích ứng dụng khác nhau bằng cách thay đổi kích thước của CLT. Xét về mặt cấu trúc, khi kích thước của CLT giảm dần, tỷ lệ các nguyên tử/ion trên bề mặt so với tổng số nguyên tử/ion của CLT tăng dần làm cho hoạt tính hóa học của CLT cũng thay đổi theo. Chẳng hạn, đối với CLT PbS, khi kích thước của CLT giảm mật độ ion S^{2-} trên bề mặt CLT cũng giảm theo làm cho CLT trở nên bền vững hơn với oxy [7]. Sự thay đổi của hoạt tính của CLT theo kích thước xuất phát từ sự thay đổi về diện tích bề mặt phân cách pha (diện tích càng lớn khi kích thước hạt CLT càng nhỏ) và “môi trường” hóa học của nguyên tử/ion trên bề mặt của CLT. Mặc dù các nguyên tử/ion trên bề mặt một phần được bền hóa bởi các phối tử, ví dụ các ion Cd^{2+} trên bề mặt của CLT CdTe được bền hóa bởi các nhóm thiol của glutathione (GSH), thioglycolic acid (TGA), mercaptopropionic acid (MPA) hay 1-thioglycerol (TGH) [8], [9] như khi xuất hiện chất lạ hay chất phân tích (CPT) các tương tác cạnh tranh: nguyên tử/ion bề mặt - phối tử và nguyên tử/ion bề mặt - CPT có thể thay đổi theo kích thước của CLT. Sự thay đổi cấu trúc hóa học bề mặt của CLT khi có mặt CPT dẫn tới những thay đổi đáng kể về tính chất phát xạ (cường độ và bước sóng) của CLT và có thể được khai thác để ứng dụng CLT làm cảm biến huỳnh quang trong phân tích [2], [7], [10].

CLT CdTe tan trong nước đã được nghiên cứu làm cảm biến phát hiện, phân tích các ion kim loại trong nước như Hg^{2+} [11]-[14], Pb^{2+} [15], Cr^{3+} [16], [17], Cu^{2+} [18], [19] dựa vào sự suy giảm cường độ huỳnh quang theo nồng độ của các ion này. Một số cơ chế dập tắt huỳnh quang của CLT CdTe đã được đề xuất bao gồm: Ion cản phân tích liên kết mạnh với phối tử của CLT tới mức tách phối tử khỏi bề mặt của CLT; CPT nhận điện tử của CLT ở trạng thái kích thích làm giảm quá trình tái tổ hợp phát xạ electron – lỗ trống; CPT thâm nhập vào mạng lưới của CLT làm thay đổi cấu trúc, cơ chế tái tổ hợp electron – lỗ trống. Trong nghiên cứu gần đây về ảnh hưởng của kích thước đến độ nhạy của CLT CdTe trong phân tích Hg^{2+} và Pb^{2+} [20], chúng tôi nhận thấy Hg^{2+} và Pb^{2+} đều làm tăng cường độ huỳnh quang của CLT; mức độ tăng không tuyến tính với nồng độ của ion kim loại và tăng nhiều hơn ở CLT kích thước nhỏ hơn.

Gần đây, chúng tôi nghiên cứu tương tác giữa CLT CdTe với các ion kim loại nặng, độc tính cao như Pb^{2+} và Hg^{2+} trong nước và nhận thấy CLT CdTe kích thước nhỏ tương tác mạnh hơn với các cation này [20]. Cường độ phát xạ huỳnh quang (PL) của CdTe tăng khi có mặt Pb^{2+} hay Hg^{2+} ; tuy nhiên mức độ tăng không tuyến tính với nồng độ của các cation và PL của CLT nhỏ hơn thì PL tăng nhiều hơn so với CLT lớn. Sử dụng CLT CdTe kích thước nhỏ, phát xạ màu xanh lá cây (G-CdTe) để thử nghiệm với các ion khác như Ag^+ , $Cr_2O_4^{2-}$ và Cu^{2+} cho thấy chỉ có Cu^{2+} làm giảm tín hiệu huỳnh quang. Để làm sáng tỏ ảnh hưởng của kích thước CLT đến độ nhạy trong phát hiện ion Cu^{2+} , chúng tôi đã tiến hành nghiên cứu một cách hệ thống ảnh hưởng của ion Cu^{2+} đến tính chất hấp thụ và phát xạ của CLT CdTe có kích thước khác nhau, bao gồm: CLT kích thước nhỏ, phát xạ ở 510 nm (G-CdTe); CLT kích thước trung bình, phát xạ ở 565 nm (Y-CdTe) và CLT kích thước lớn, phát xạ ở 655 nm (R-CdTe). Kết quả so sánh cường độ huỳnh quang giữa các dung dịch CLT có hay không có ion Cu^{2+} cho thấy, Cu^{2+} làm tăng bất thường cường độ huỳnh quang của R-CdTe ở khoảng nồng độ từ 10^{-8} đến 10^{-5} M trong khi cường độ huỳnh quang của G- hay Y-CdTe không thay đổi. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong việc triển khai ứng dụng CLT CdTe làm cảm biến huỳnh quang phát hiện ion kim loại trong nước.

2. Thực nghiệm

2.1. Tổng hợp chấm lượng tử CdTe

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng CLT CdTe có phối tử là GSH, được tổng hợp bằng quy trình đã công bố trên [20]. Cụ thể, hỗn hợp dung dịch A được chuẩn bị bằng cách hòa trộn 45

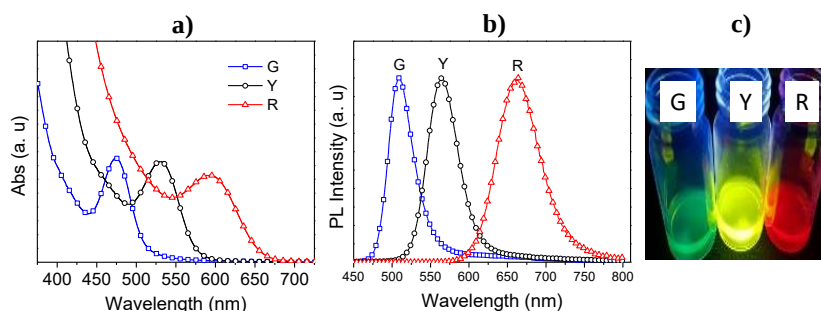
ml dung dịch CdCl_2 0,02M, 5 ml dung dịch ZnCl_2 0,02M và 100 ml dung dịch chứa 0,38 (g) GSH trong một bình cầu 3 cổ (có gắn một ống sinh hàn, một bộ cấp nhiệt có điều chỉnh nhiệt độ và một máy khuấy từ) kết nối với hệ tổng hợp kín (Schlenk line). Dung dịch B được chuẩn bị bằng cách cho 0,75 g NaBH_4 vào 40 ml dung dịch có chứa 0,04 g Na_2TeO_3 trong môi trường khí N_2 . Chuyển toàn bộ dung dịch B và A; điều chỉnh pH của hệ phản ứng tới 10,5 bằng dung dịch NaOH 0,5M rồi tiến hành đun hồi lưu trong môi trường khí N_2 . G-CdTe thu được sau 10 phút đun hồi lưu; Y-CdTe thu được sau 90 phút và R-CdTe thu được sau 200 phút phản ứng. Để làm sạch CLT, CLT được kết tủa từ hỗn hợp phản ứng bằng acetone; ly tâm ở tốc độ 6000 vòng/phút trong thời gian 6 phút ở nhiệt độ phòng để lấy CLT; CLT sau đó được hòa tan trong nước cất hai lần và lưu giữ trong tủ lạnh ở 4°C .

2.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của ion Cu^{2+}

Đối với từng loại CLT CdTe, các dung dịch hỗn hợp của CLT CdTe với Cu^{2+} được chuẩn bị từ một dung dịch CLT gốc, một dung dịch CuSO_4 chuẩn và nước cất hai lần sao cho nồng độ của CLT trong các dung dịch hỗn hợp là bằng nhau, trong khi nồng độ của Cu^{2+} thay đổi trong khoảng từ 10^{-8} M đến 10^{-3} M; riêng mẫu so sánh, nồng độ Cu^{2+} là 0 M. Sau khi ủ qua đêm, các dung dịch hỗn hợp được đo phổ hấp thụ trên máy UV-2450 (Shimadzu, Japan) và phổ phát xạ huỳnh quang trên máy FLS1000 (Edinburgh, UK). Các số liệu thực nghiệm được xử lý bằng phần mềm Origin Prof 8.0.

3. Kết quả và thảo luận

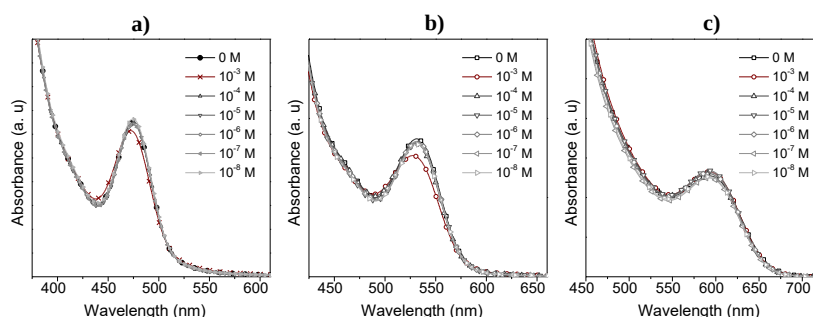
Các nghiên cứu trước đây [9], [20], [21] cho thấy, việc cho một lượng nhỏ Zn^{2+} vào tiền chất ban đầu có tác dụng rất lớn làm tăng hiệu suất phát xạ huỳnh quang của CLT thu được do ion Zn^{2+} , vừa làm bền hóa tinh thể CdTe vừa kết hợp với ion S^{2-} (tạo ra từ sự phân hủy nhiệt của GSH) tạo thành lớp vỏ ZnS trên bề mặt CdTe. Do đó, có một số thuật ngữ khác nhau được sử dụng để gọi tên CLT thu được như CdTe pha tạp Zn, CdTe/ZnS cấu trúc lõi/vỏ, CdZnTeS cấu trúc đồng pha [20]. Trong bài báo này, chúng tôi gọi vắn tắt là CLT CdTe; trên thực tế CLT có chứa cả ion Zn^{2+} và S^{2-} trong mạng lưới tinh thể, từ lõi CLT đến bề mặt thì nồng độ của Zn^{2+} và S^{2-} tăng dần [20]. Đường kính trung bình của G-, Y- và R-CdTe lần lượt là 3,3 nm, 4,0 nm và 4,7 nm [20]. Các CLT này được bền hóa bởi phối tử GSH làm cho CLT tan tốt trong nước; GSH liên kết với CLT thông qua các liên kết S-Cd hay S-Zn [9], [20].



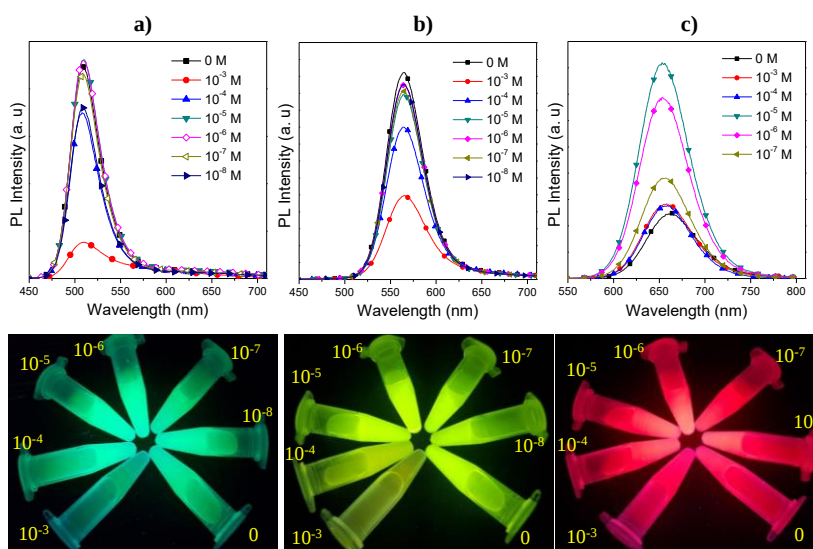
Hình 1. Phổ hấp thụ (a) và phổ phát xạ huỳnh quang (b) của CLT CdTe. (c) ảnh chụp dung dịch CLT CdTe dưới đèn UV (365 nm)

Phổ hấp thụ và phát xạ của G-, Y- và R-CdTe được trình bày trong hình 1. Phổ hấp thụ của G-, Y- và R-CdTe trên hình 1a đều có một cực đại hấp thụ ở các vị trí tương ứng là 475, 531 và 595 nm; các cực đại hấp thụ này còn gọi là cực đại hấp thụ excitonic thứ nhất tương ứng với quá trình dịch chuyển điện tử từ trạng thái $1S_h$ lên trạng thái $1S_e$. Phổ PL của CLT trên hình 1b cho thấy, các mẫu G-, Y- và R-CdTe đều có phổ phát xạ hình quả chuông với cực đại phát xạ tại các vị trí tương ứng là 510, 565 và 655 nm. Độ rộng ở nửa chiều cao tối đa (FWHM) của phổ PL nằm trong khoảng từ 38,3 nm hay 18,2 meV ở G-CdTe đến 108,3 nm hay 32,7 meV ở R-CdTe. Các giá

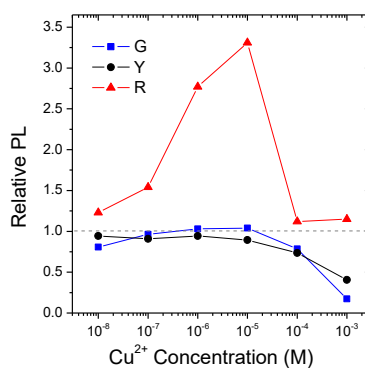
trị này tương đồng với các giá trị FWHM của CLT CdTe đã công bố trước đây [19], [22], [23], chứng tỏ CLT CdTe tổng hợp được có kích thước hạt đồng đều. Ngoài ra, dung dịch CLT phát xạ huỳnh quang mạnh như có thể nhìn thấy ở hình 1c cho thấy, CLT có tính chất huỳnh quang tốt cho các ứng dụng làm cảm biến huỳnh quang.



Hình 2. Ảnh hưởng của nồng độ Cu^{2+} đến phổ hấp thụ của G-CdTe (a), Y-CdTe (b) và R-CdTe (c)



Hình 3. Ảnh hưởng của nồng độ Cu^{2+} đến cường độ huỳnh quang của G-CdTe (a), Y-CdTe (b) và R-CdTe (c). Ảnh phía dưới các đồ thị chụp các dung dịch hỗn hợp dưới đèn UV (365nm)



Hình 4. Sự thay đổi cường độ huỳnh quang (I/I_0) của G-, Y- và R-CdTe theo nồng độ ion Cu^{2+}

Ảnh hưởng của nồng độ ion Cu^{2+} đến tính chất hấp thụ và phát xạ của CLT CdTe được trình bày trên hình 2 và hình 3; ảnh phía dưới các đồ thị PL trên hình 3 thu được khi chụp hỗn hợp

dung dịch với nồng độ Cu^{2+} khác nhau dưới đèn UV. Kết quả trên hình 2 cho thấy chỉ có phổ hấp thụ của G-CdTe và Y-CdTe bị ảnh hưởng bởi Cu^{2+} ở nồng độ cao (10^{-3} M); trong khi phổ hấp thụ của R-CdTe gần như không thay đổi. Vị trí cực đại hấp thụ của G-CdTe giảm từ 475 xuống 473 nm (tương đương 11,0 meV); của Y-CdTe giảm từ 531 xuống 528 nm (tương đương 13,2 meV). Phổ huỳnh quang trên hình 3 cho thấy ion Cu^{2+} không làm thay đổi vùng phát xạ của CLT nhưng có làm thay đổi cường độ phát xạ theo các xu hướng khác nhau. Với nồng độ Cu^{2+} là 10^{-3} M, cường độ phát xạ của G- hay Y-CdTe có thể nhận thấy bằng mắt thường. Ion Cu^{2+} làm giảm cường độ PL của CLT CdTe đã được mô tả trước đây [16], [19] và được giải thích dựa vào liên kết cạnh tranh giữa GSH với Cu^{2+} và GSH với Cd^{2+} trên bề mặt CLT làm suy giảm mật độ GSH trên bề mặt CLT. Tuy nhiên, cơ chế này không phù hợp với trường hợp của R-CdTe, vì cường độ PL của R-CdTe tăng khi có mặt Cu^{2+} như trình bày trên hình 3c.

Hình 4 trình bày sự thay đổi về cường độ PL tương đối hay tỷ lệ giữa cường độ PL của CLT CdTe khi có và khi không có ion Cu^{2+} . Có thể thấy rằng, trong khoảng nồng độ từ 10^{-8} M đến 10^{-5} M, ion Cu^{2+} không làm thay đổi đáng kể cường độ PL của G- và Y-CdTe; ở nồng độ cao hơn, cường độ PL giảm dần. Trong khi đó, khi tăng nồng độ Cu^{2+} từ 10^{-8} M lên 10^{-5} M, cường độ PL của R-CdTe tăng dần, đạt cực đại khoảng 3,3 lần; ở giải nồng độ cao hơn tới 10^{-3} M, Cu^{2+} không làm thay đổi đáng kể cường độ PL. Cường độ huỳnh quang của R-CdTe tăng khi có mặt ion Cu^{2+} có thể xem là một phát hiện ngoài dự đoán, vì Cu^{2+} là một cation có ái lực mạnh với phối tử GSH [19].

Ảnh hưởng của ion Cu^{2+} khác nhau lên CTL CdTe có kích thước khác nhau có thể xuất phát từ khả năng tương tác khác nhau của Cu^{2+} với CLT. Thứ nhất, Cu^{2+} tương tác cạnh tranh với phối tử GSH làm giảm mật độ GSH trên bề mặt CLT, qua đó giảm cường độ PL. Thứ hai, Cu^{2+} có thể đóng vai trò là chất oxy hóa tiếp nhận electron kích thích từ CLT, qua đó làm giảm cường độ PL do quá trình tái tổ hợp phát xạ trong CLT bị suy giảm. Dựa vào kết quả thực nghiệm của Jacek Jasieniak [24], khi kích thước của CLT CdTe tăng dần, mức năng lượng của electron ở trạng thái kích thích giảm dần từ khoảng -2 eV tới -3 eV, tương đương với từ -2,4 V tới -1,4 V so với điện cực chuẩn hydro (NHE). Mức năng lượng này thấp hơn nhiều so với thế điện hóa của ion Cu^{2+} (trong khoảng từ 0,104 V đến 0,252 V khi nồng độ Cu^{2+} trong khoảng nghiên cứu, 10^{-8} M - 10^{-3} M) làm cho việc khử hóa Cu^{2+} nói trên hoàn toàn có thể xảy ra. Thứ ba, ion Cu^{2+} có thể đóng vai trò như một phối tử dạng Z có vai trò bền hóa các anion như Te^{2-} hay S^{2-} trên bề mặt của CLT làm tăng cường độ PL [25]. Sự tham gia của ion Cu^{2+} vào bề mặt của CLT CdTe có thể nhận thấy từ sự dịch chuyển vị trí cực đại hấp thụ về phía bước sóng ngắn hơn trên mẫu G- và Y-CdTe (hình 2a và 2b), vì CuTe có độ rộng vùng cấm cao hơn so với CdTe. Tương tác hóa học chi tiết giữa ion Cu^{2+} và CLT CdTe ở các kích thước khác nhau cần những nghiên cứu bổ sung trong tương lai. Mặc dù vậy, kết quả trên hình 4 chứng tỏ vai trò là phối tử dạng Z của Cu^{2+} chiếm ưu so với các ảnh hưởng khác trong trường hợp R-CdTe.

4. Kết luận

CLT CdTe tan trong nước, có hiệu suất huỳnh quang cao đã và đang được nghiên cứu làm cảm biến huỳnh quang trong phát hiện và phân tích ion kim loại nặng trong nước dựa vào sự suy giảm cường độ huỳnh quang theo nồng độ của ion phân tích. Tuy nhiên, tương tác giữa CLT và ion kim loại không những phụ thuộc vào loại ion phân tích, nồng độ, mà còn phụ thuộc vào cấu trúc hóa học chi tiết của bề mặt CLT. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chỉ ra rằng, ion Cu^{2+} ở nồng độ thấp hơn 10^{-5} M không làm suy giảm đáng kể cường độ huỳnh quang của G- và Y-CdTe nhưng làm tăng cường độ huỳnh quang của R-CdTe lên khoảng 3,3 lần. Kết quả trình bày trong nghiên cứu này có vai trò quan trọng để định hướng ứng dụng CLT CdTe trong phân tích ion kim loại trong môi trường nước.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2 qua đề tài mã số HPU2.UT-2021.04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] X. D. Mai, P. Mohapatra, J.-K. Choi, J.-H. Kim, S.-H. Jeong, and H.-D. Jeong, "InP Quantum Dot-Organosilicon Nanocomposites," *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 33, pp. 1491-1504, 2012, doi: 10.5012/bkcs.2012.33.5.1491.
- [2] Q. B. Hoang, V. T. Mai, D. K. Nguyen, D. Q. Truong, and X. D. Mai, "Crosslinking induced photoluminescence quenching in polyvinyl alcohol-carbon quantum dot composite," *Mater. Today Chem.*, vol. 12, pp. 166-172, 2019, doi: 10.1016/j.mtchem.2019.01.003.
- [3] X. D. Mai, D. T. Dao, and H. -D. Jeong, "Condensable InP quantum dots solid," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 13, 2013, doi: 10.1016/j.cap.2013.02.017.
- [4] H. Choi, J. -G. Lee, X. D. Mai, M. C. Beard, S. S. Yoon, and S. Jeong, "Supersonically Spray-Coated Colloidal Quantum Dot Ink Solar Cells," *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-00669-9.
- [5] X. D. Mai, H. J. An, J. H. Song, J. Jang, S. Kim, and S. Jeong, "Inverted Schottky quantum dot solar cells with enhanced carrier extraction and air-stability," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, pp. 20799-20805, 2014, doi: 10.1039/C4TA04305G.
- [6] J. H. Song, X. D. Mai, S. Jeong, Y. -H. Kim, "Hysteresis and Photoinstability Caused by Mobile Ions in Colloidal Quantum Dot Photovoltaics," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 8, 2017, doi: 10.1021/acs.jpclett.7b02350.
- [7] V. T. Mai, N. H. Duong, and X. D. Mai, "Effect of chloride treatment on optical and electrical properties of PbS quantum dots," *Chem. Phys.*, vol. 538, 2020, doi: 10.1016/j.chemphys.2020.110895.
- [8] F. O. Silva, M. S. Carvalho, R. Mendonça, W. A. Macedo, K. Balzuweit, P. Reiss, and M. A. Schiavon, "Effect of surface ligands on the optical properties of aqueous soluble CdTe quantum dots," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 7, 2012, Art. no. 536, doi: 10.1186/1556-276x-7-536.
- [9] Q. Wang, T. Fang, P. Liu, B. Deng, X. Min, and X. Li, "Direct synthesis of high-quality water-soluble CdTe:Zn²⁺ quantum dots," *Inorg. Chem.*, vol. 51, pp. 9208-9213, 2012, doi:10.1021/ic300473u.
- [10] X. D. Mai, T. T. H. Dang, T. Q. Nguyen, T. H. Le, Q. T. Le, T. T. H. Do, and T. H. Y. Pham, "The Synthesis of Carbon Polymer Dot and Its Application In Pb(II) Detection," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 189, no.13, pp. 45-51, 2018.
- [11] D. Saikia, P. Dutta, N. Sen Sarma, and N. C. Adhikary, "CdTe/ZnS core/shell quantum dot-based ultrasensitive PET sensor for selective detection of Hg (II) in aqueous media, Sensors Actuators," *B Chem.*, vol. 230, pp. 149-156, 2016, doi: 10.1016/j.snb.2016.02.035.
- [12] S. A. Elfeky, "Facile Sensor for Heavy Metals Based on Thiol-Capped CdTe Quantum Dot," *J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 05, pp. 1-5, 2018, doi: 10.4172/2380-2391.1000232.
- [13] M. Labeib, A. H. Sakr, M. Soliman, T. M. Abdel-Fattah, and S. Ebrahim, "Effect of capping agent on selectivity and sensitivity of CdTe quantum dots optical sensor for detection of mercury ions," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 79, pp. 331-335, 2018, doi: 10.1016/j.optmat.2018.03.060.
- [14] H. Li, W. Lu, G. Zhao, B. Song, J. Zhou, W. Dong, and G. Han, "Silver ion-doped CdTe quantum dots as fluorescent probe for Hg²⁺ detection," *RSC Adv.*, vol. 10, pp. 38965-38973, 2020, doi: 10.1039/d0ra07140d.
- [15] E. M. Ali, Y. Zheng, H. H. Yu, and J. Y. Ying, "Ultrasensitive Pb²⁺ detection by glutathione-capped quantum dots," *Anal. Chem.*, vol. 79, pp. 9452-9458, 2007, doi: 10.1021/ac071074x.
- [16] C. F. Peng, Y. Y. Zhang, Z. J. Qian, and Z. J. Xie, "Fluorescence sensor based on glutathione capped CdTe QDs for detection of Cr³⁺ ions in vitamins," *Food Sci. Hum. Wellness.*, vol. 7, pp. 71-76, 2018, doi: 10.1016/j.fshw.2017.12.001.
- [17] P. Chowdhury, "Functionalized CdTe fluorescence nanosensor for the sensitive detection of water borne environmentally hazardous metal ions," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 111, 2021, Art. no. 110584, doi: 10.1016/j.optmat.2020.110584.
- [18] D. Das and R. K. Dutta, "Photoluminescence lifetime based nickel ion detection by glutathione capped CdTe/CdS core-shell quantum dots," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 416, 2021, Art. no. 113323, doi: 10.1016/j.jphotochem.2021.113323.
- [19] J. Wang, X. Su, D. Gao, R. Chen, Y. Mu, X. Zhang, and L. Wang, "Capillary Sensors Composed of CdTe Quantum Dots for Real-Time In Situ Detection of Cu²⁺," *ACS Appl. Nano Mater.*, 2021, doi:10.1021/acsanm.1c01608.
- [20] Q. -B. Hoang, T. -N. Nguyen, T. -P. Nguyen, A. -D. Nguyen, N. -H. Chu, V. -T. Ta, V. -H. Nguyen, and X. -D. Mai, "Size-dependent reactivity of highly photoluminescent CdZnTeS alloyed quantum

- dots to mercury and lead ions," *Chem. Phys.*, vol. 552, 2021, Art. no. 111378, doi: 10.1016/j.chemphys.2021.111378.
- [21] O. Adegoke and E. Y. Park, "Size-confined fixed-composition and composition-dependent engineered band gap alloying induces different internal structures in L -cysteine-capped alloyed quaternary CdZnTeS quantum dots," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1-9, 2016, doi: 10.1038/srep27288.
- [22] Y. He, L. M. Sai, H. T. Lu, M. Hu, W. Y. Lai, Q. L. Fan, L. H. Wang, and W. Huang, "Microwave-assisted synthesis of water-dispersed CdTe nanocrystals with high luminescent efficiency and narrow size distribution," *Chem. Mater.*, vol. 19, pp. 359-365, 2007, doi: 10.1021/cm061863f.
- [23] B. Xu, B. Cai, M. Liu, and H. Fan, "Ultraviolet radiation synthesis of water dispersed CdTe/CdS/ZnS core-shell-shell quantum dots with high fluorescence strength and biocompatibility," *Nanotechnology*, vol. 24, 2013, doi: 10.1088/0957-4484/24/20/205601.
- [24] J. Jasieniak, M. Califano, and S. E. Watkins, "Size-dependent valence and conduction band-edge energies of semiconductor nanocrystals," *ACS Nano.*, vol. 5, pp. 5888-5902, 2011, doi: 10.1021/nn201681s.
- [25] N. Kirkwood, J. O. V. Monchen, R. W. Crisp, G. Grimaldi, H. A. C. Bergstein, I. Du Fossé, W. Van Der Stam, I. Infante, and A. J. Houtepen, "Finding and Fixing Traps in II-VI and III-V Colloidal Quantum Dots: The Importance of Z-Type Ligand Passivation," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 140, pp. 15712-15723, 2018, doi: 10.1021/jacs.8b07783.