

SYNTHESIS AND OPTICAL CHARACTERIZATION OF TiO₂ NANORODS COUPLED WITH CdTe QUANTUM DOTS

Pham Thi Thuy^{1*}, Nguyen Thanh Quyen^{1,2}

¹Sai Gon University, ²Le Thi Hong Gam High School

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	11/4/2025	In this study, TiO ₂ nanorods coupled with CdTe semiconductor quantum dots were fabricated by hydrothermal method. The shape, size, vibrational characteristics and optical properties of the samples were studied using SEM, HRTEM, Raman scattering, absorption and fluorescence emission spectra. The results showed that CdTe quantum dots with a size of about 7-8 nm were successfully attached to TiO ₂ nanorods with a diameter of about 70-80 nm. The UV-Vis absorption spectrum shows a significant broadening of the optical absorption band from UV to visible after CdTe doping. The fluorescence spectrum records a characteristic strong emission peak of CdTe quantum dots about ~ 660 nm, demonstrating the effectiveness of the TiO ₂ /CdTe heterojunction preparation. Attaching CdTe quantum dots to TiO ₂ rods significantly improved the optical properties of the material, especially expanding the absorption band to the visible light region and changing the emission characteristics. This is an important premise for the development of highly efficient optoelectronic devices, solar cells, optical sensors or photocatalytic systems.
Revised:	16/6/2025	
Published:	17/6/2025	
KEYWORDS		
TiO ₂ nanorods		
CdTe		
Quantum dot		
Optical properties		
Semiconductor		

CHẾ TẠO VÀ NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT QUANG CỦA CÁC THANH TiO₂ GẮN KẾT VỚI CÁC CHẤM LƯỢNG TỬ BÁN DẪN CdTe

Phạm Thị Thuỷ^{1*}, Nguyễn Thanh Quỳ^{1,2}

¹Trường Đại học Sài Gòn, ²Trường THPT Lê Thị Hồng Gấm

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	11/4/2025	Trong nghiên cứu này, các thanh nano TiO ₂ gắn kết với các chấm lượng tử bán dẫn CdTe được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt. Hình dạng, kích thước, đặc trưng dao động và các tính chất quang của các mẫu được nghiên cứu thông qua ảnh SEM, HRTEM, phổ tán xạ Raman, phổ hấp thụ và phổ phát xạ huỳnh quang. Kết quả cho thấy các chấm lượng tử CdTe có kích thước khoảng 7-8 nm đã gắn kết thành công với các thanh nano TiO ₂ có đường kính khoảng 70-80 nm. Phổ hấp thụ UV-Vis cho thấy sự mở rộng đáng kể vùng hấp thụ quang học từ tử ngoại sang khả kiến sau khi gắn CdTe. Phổ huỳnh quang ghi nhận đỉnh phát xạ mạnh đặc trưng của các chấm lượng tử CdTe ở ~ 660 nm, chứng minh tính hiệu quả của việc tạo dị thể bán dẫn TiO ₂ /CdTe. Việc gắn kết các chấm lượng tử CdTe lên thanh TiO ₂ đã cải thiện rõ rệt tính chất quang học của vật liệu, đặc biệt là mở rộng vùng hấp thụ sang vùng ánh sáng khả kiến và thay đổi đặc tính phát xạ. Đây là tiền đề quan trọng để phát triển các thiết bị quang điện tử, pin mặt trời, cảm biến quang hoặc hệ xúc tác quang hiệu quả cao.
Ngày hoàn thiện:	16/6/2025	
Ngày đăng:	17/6/2025	
TỪ KHÓA		
Thanh nano TiO ₂		
CdTe		
Chấm lượng tử		
Tính chất quang		
Chất bán dẫn		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12554>

* Corresponding author. Email: phamthithuy@sgu.edu.vn

1. Giới thiệu

Chấm lượng tử CdTe là một loại vật liệu bán dẫn thuộc nhóm II-VI, có kích thước chỉ vài nanomet, chúng có các tính chất quang điện độc đáo nhờ hiệu ứng giam giữ lượng tử [1], [2]. Với khả năng hấp thụ ánh sáng mạnh trong vùng khả kiến, CdTe đặc biệt được ưa chuộng trong các ứng dụng như pin mặt trời màng mỏng, LED lượng tử và cảm biến quang [2], [3]. Nhờ hiệu suất phát quang cao và khả năng điều chỉnh độ rộng vùng cấm thông qua kích thước hạt, các hạt nano CdTe có thể phát xạ ra ánh sáng có bước sóng thay đổi và điều chỉnh tính chất điện tử của chúng [3], [4]. Ngoài ra, CdTe còn tương thích với nhiều vật liệu khác, dễ dàng kết hợp để tạo ra các cấu trúc nano lai nhằm tăng hiệu suất ứng dụng.

TiO₂ là một vật liệu oxit bán dẫn được quan tâm rộng rãi trong nghiên cứu khoa học nhờ vào các ưu điểm vượt trội như trữ lượng dồi dào, độ bền hóa học cao và tính thân thiện với môi trường. Vật liệu này đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như xử lý môi trường (khử khuẩn, khử trùng), quang xúc tác và chế tạo các thiết bị điện tử như diode phát quang (LED), pin mặt trời và cảm biến [5], [6]. Ở kích thước nanomet, TiO₂ có thể tồn tại dưới nhiều hình thái cấu trúc như hạt, thanh nano hoặc màng mỏng. Trong đó, cấu trúc thanh nano thể hiện tiềm năng ứng dụng nổi bật trong các thiết bị quang điện tử nhờ khả năng vận chuyển electron hiệu quả hơn [7]. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng, khi sử dụng thanh nano TiO₂ làm lớp truyền dẫn điện tử trong cấu trúc LED, hiệu suất phát quang đạt được cao hơn so với khi sử dụng các cấu trúc TiO₂ dạng hạt [8] – [10]. Tuy nhiên, do TiO₂ là vật liệu bán dẫn có vùng cấm rộng ($E_g > 3$ eV tại nhiệt độ phòng), nên chỉ hấp thụ mạnh ánh sáng trong vùng tử ngoại – vùng vốn chỉ chiếm khoảng 4% tổng bức xạ mặt trời. Điều này dẫn đến hiệu suất quang xúc tác và chuyển đổi quang điện của TiO₂ còn hạn chế. Nhằm khắc phục nhược điểm này, nhiều hướng nghiên cứu đã được triển khai như pha tạp TiO₂ với các kim loại chuyển tiếp, hoặc kết hợp với các chất bán dẫn có vùng cấm hẹp hơn như CdS, CdSe, CdTe và CuInS₂ để mở rộng khả năng hấp thụ sang vùng ánh sáng khả kiến [9], [11] – [13]. Đáng chú ý, việc sử dụng các chấm lượng tử bán dẫn làm chất nhạy quang đã mở ra hướng tiếp cận mới trong việc cải thiện hiệu suất hấp thụ ánh sáng của hệ vật liệu TiO₂. Các chấm lượng tử như CdS, CdSe, CdTe và CuInS₂ đã được chứng minh có khả năng hấp thụ mạnh trong vùng khả kiến, tạo cặp electron – lỗ trống hiệu quả và chuyển electron kích thích sang vật liệu truyền dẫn như TiO₂, qua đó nâng cao hiệu suất của LED và pin mặt trời [5], [7], [12]. Trong cấu trúc pin mặt trời, sự gắn kết của các chấm lượng tử lên thanh nano bán dẫn còn giúp ức chế quá trình tái tổ hợp electron – lỗ trống, từ đó cải thiện hiệu suất chuyển đổi quang điện so với các cấu trúc truyền thống [6], [8], [9].

Mặc dù vậy, việc nghiên cứu hệ vật liệu gồm thanh TiO₂ tích hợp với chấm lượng tử CdTe vẫn còn khá mới mẻ và chưa được khai thác đầy đủ. Những đặc điểm quang học và cơ chế tương tác giữa hai vật liệu này vẫn còn nhiều điểm chưa rõ, cần được tiếp tục nghiên cứu để làm sáng tỏ các cơ chế vật lý và hóa học. Mục đích của nghiên cứu này là tổng hợp và khảo sát hệ vật liệu lai giữa thanh nano TiO₂ và chấm lượng tử CdTe nhằm cải thiện khả năng hấp thụ ánh sáng trong vùng khả kiến và nâng cao hiệu suất quang điện. Thông qua việc kết hợp ưu điểm của TiO₂ về độ bền và khả năng vận chuyển electron với khả năng phát quang và điều chỉnh vùng cấm của CdTe, nghiên cứu hướng tới làm rõ cơ chế tương tác quang – điện giữa hai vật liệu. Đồng thời, nghiên cứu cũng nhằm đánh giá tiềm năng ứng dụng của hệ vật liệu trong các thiết bị quang điện tử như pin mặt trời và LED lượng tử.

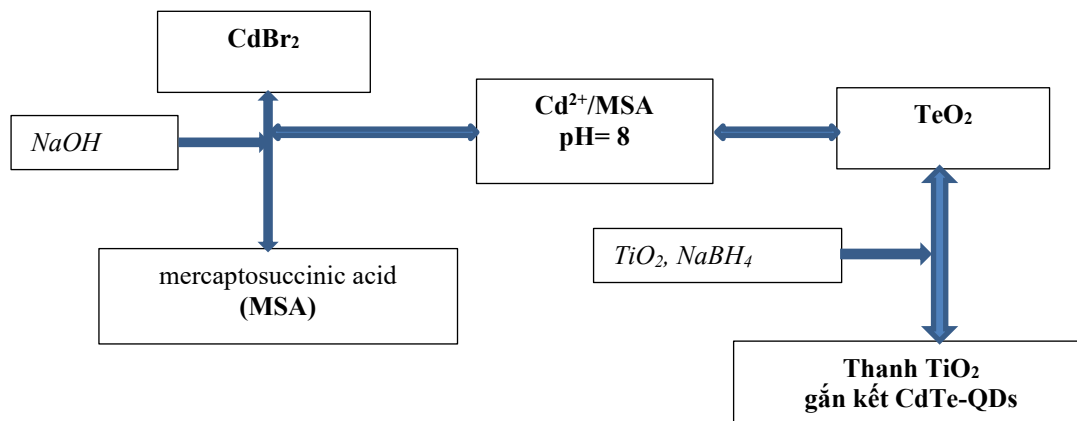
2. Phương pháp nghiên cứu và thực nghiệm

2.1. Quy trình chế tạo

Các chấm lượng tử CdTe gắn kết với thanh nano TiO₂ được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt theo sơ đồ như Hình 1. Quá trình chế tạo cụ thể như sau:

Chấm lượng tử CdTe được chế tạo với các tỉ lệ mol Cd:MSA = 2:3 và Cd:Te:NaBH₄ = 4:1:15. Đầu tiên, phức giữa Cd²⁺ và MSA được tạo thành trong cốc thủy tinh bằng cách bổ sung MSA vào dung dịch chứa Cd²⁺ nồng độ 10 mM, thu được dung dịch trong suốt, không màu có pH = 2÷3, nhỏ

từ từ NaOH 1M vào dung dịch chứa phức $\text{Cd}^{2+}/\text{MSA}$, ban đầu xuất hiện các đám trắng đục đến khi dung dịch trong suốt trở lại ở $\text{pH} = 8$. Tiếp theo, TeO_2 được cho vào cốc chứa dung dịch $\text{Cd}^{2+}/\text{MSA}$, khuấy mạnh bằng máy khuấy từ ở khoảng nhiệt độ $\sim 50\text{-}80^\circ\text{C}$ trong vòng 30 phút. Sau đó, cho NaBH_4 và thanh TiO_2 vào bình phản ứng, dung dịch trong bình phản ứng thay đổi từ không màu sang màu vàng nâu nhạt, chứng tỏ các vi mầm tinh thể CdTe đã được tạo thành. Tiếp tục, cho dung dịch chứa mầm tinh thể CdTe và thanh TiO_2 vào bình thủy nhiệt rồi đặt trong lò ủ ở nhiệt độ khác nhau ($110\text{-}150^\circ\text{C}$) và thời gian khác nhau (60-180 phút) nhằm thu được các thanh TiO_2/CdTe ở điều kiện tổng hợp khác nhau. Cuối cùng, mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng và rửa sạch bằng ethanol.



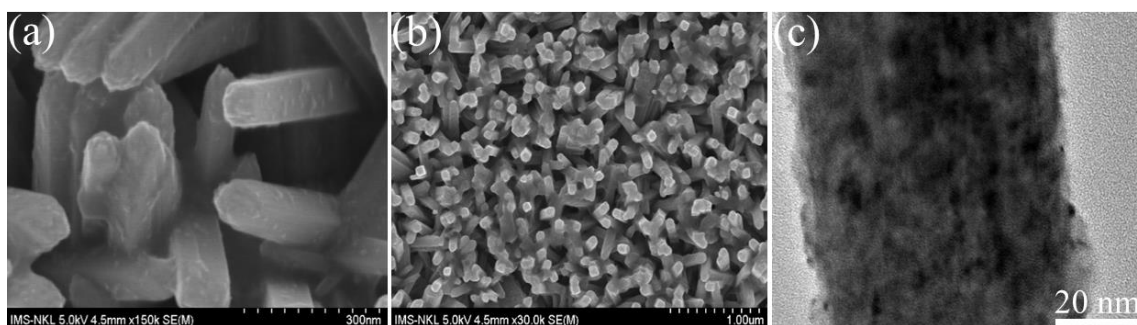
Hình 1. Quá trình chế tạo thanh TiO_2 gắn kết chấm lượng tử CdTe

2.2. Các phương pháp đặc trưng tính chất

Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của mẫu được thực hiện trên hệ đo Hitachi S-4800 với chế độ phóng đại cao lên tới 800000X. Hiển vi điện tử truyền qua độ phân giải cao (HR-TEM) đo trên hệ JEM 2100 – JEOL. Phổ tán xạ Raman của mẫu được ghi trên thiết bị hệ Xplora plus. Phổ hấp thụ của các mẫu được tiến hành trên hệ đo Jasco V-770. Phổ huỳnh quang của các mẫu được tiến hành trên hệ đo iHR550.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả nghiên cứu hình thái



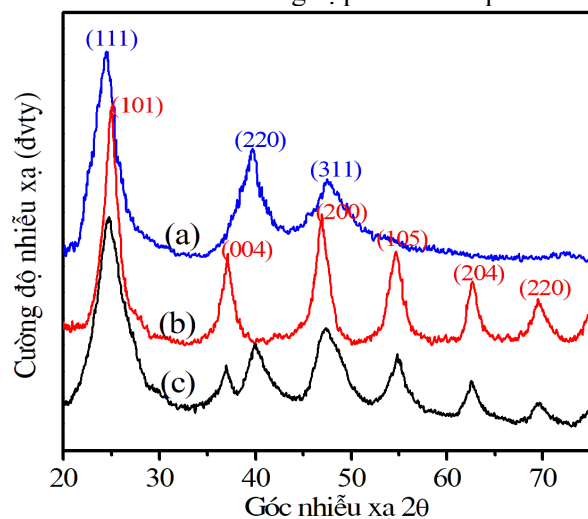
Hình 2. Ảnh SEM của thanh TiO_2/CdTe QDs: (a) Thang đo 300 nm, (b) Thang đo 1000 nm, (c) Ảnh HR-TEM

Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của thanh TiO_2 gắn kết chấm lượng tử CdTe được trình bày trên Hình 2(a,b) với các thang đo 300 và 1000 nm. Các thanh TiO_2 có cấu trúc rõ nét, dài và đều nhau, đường kính vào khoảng 70-80 nm. Các thanh xếp chồng lên nhau dày đặc, thể hiện quá trình phát triển có định hướng tốt. Bề mặt thanh không hoàn toàn trơn láng, có xuất hiện một số vùng gồ ghề hoặc hạt nhỏ đây chính là các chấm lượng tử CdTe đã gắn kết được vào các thanh nano TiO_2 .

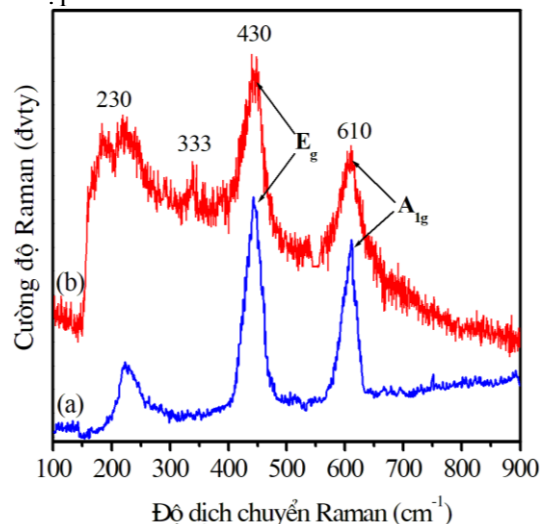
Mẫu TiO_2 gắn kết chấm lượng tử (QDs) CdTe cũng chụp ảnh hiển vi điện tử truyền qua phân giải cao (HR-TEM). Các chấm lượng tử CdTe với kích thước cỡ 7-8 nm đính vào thanh nano TiO_2 được quan sát khá rõ trên Hình 2c. Như vậy, chứng tỏ chấm lượng tử CdTe đã gắn kết được lên thanh TiO_2 và đặc biệt là cả chấm lượng tử CdTe và thanh nano đều có chất lượng tinh thể tốt.

3.2. Kết quả nghiên cứu cấu trúc

Hình 3 biểu diễn giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu: CdTe (a), TiO_2 (b) và tổ hợp TiO_2/CdTe (c). Mẫu CdTe có các đỉnh tương ứng các mặt phẳng (111), (220), (311), phù hợp với cấu trúc tinh thể lập phương (cubic) của CdTe [2], [3]. Mẫu TiO_2 thể hiện các đỉnh tại (101), (004), (200), (105), (204) và (220), đặc trưng cho pha anatase của TiO_2 [13], [14]. Trong mẫu tổ hợp TiO_2/CdTe , các đỉnh của cả TiO_2 và CdTe đều được quan sát, tuy nhiên cường độ suy giảm và độ rộng đỉnh tăng, cho thấy sự tương tác pha tốt giữa TiO_2 và CdTe. Ngoài ra, không phát hiện pha tạp nào trong giản đồ XRD, chứng tỏ các mẫu TiO_2/CdTe chế tạo được có độ tinh khiết cao. Các đỉnh nhiễu xạ trong mẫu tổ hợp TiO_2/CdTe vẫn duy trì ở vị trí góc 2θ đặc trưng của từng pha riêng biệt, cho thấy cấu trúc tinh thể cơ bản không bị phá vỡ sau quá trình kết hợp.



Hình 3. Giản đồ nhiễu xạ tia X của: (a) CdTe, (b) TiO_2 và (c) TiO_2/CdTe



Hình 4. Phổ tán xạ Raman của: (a) thanh TiO_2 và (b) TiO_2/CdTe QDs

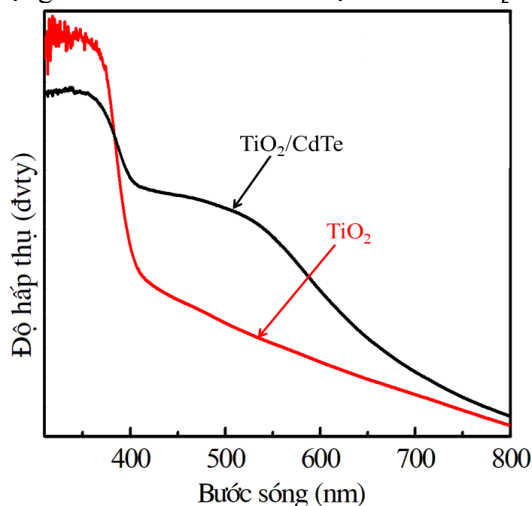
3.3. Kết quả nghiên cứu đặc trưng dao động

Để kiểm tra xem các chấm lượng tử CdTe đã thực sự gắn kết được trên thanh nano TiO_2 hay không, chúng tôi tiến hành nghiên cứu đặc trưng dao động của mẫu bằng phương pháp phổ tán xạ Raman và kết quả đo được trình bày trên Hình 4. Phổ Raman trong Hình 4 cho thấy các đỉnh tán xạ quan sát rõ tại số sóng khoảng 230 cm^{-1} , 333 cm^{-1} , 430 cm^{-1} và 610 cm^{-1} . Trong đó, hai đỉnh tại $\sim 430\text{ cm}^{-1}$ và $\sim 610\text{ cm}^{-1}$ tương ứng với các mode dao động E_g và A_{1g} – là hai mode dao động đặc trưng của cấu trúc tinh thể rutile của TiO_2 [13], [14]. Sự xuất hiện rõ nét của các đỉnh này khẳng định mẫu vật liệu có cấu trúc rutile ổn định, đồng thời loại trừ khả năng tồn tại pha anatase (vốn có đỉnh E_g đặc trưng tại $\sim 144\text{ cm}^{-1}$). Ngoài ra, đỉnh tại khoảng 333 cm^{-1} có thể liên quan đến đỉnh tán xạ dao động quang dọc 2 LO của chấm lượng tử CdTe hoặc các mode dao động bề mặt, xuất hiện do ảnh hưởng của các hạt nano CdTe QDs gắn kết trên bề mặt thanh TiO_2 [15]. Sự hiện diện của CdTe QDs có thể gây ra biến dạng cục bộ trong mạng tinh thể TiO_2 , từ đó dẫn đến sự dịch chuyển nhẹ và/hoặc mở rộng các đỉnh Raman quan sát được [16]. Những thay đổi này phản ánh tương tác vật lý hoặc hóa học giữa TiO_2 và CdTe QDs, cho thấy quá trình gắn kết đã xảy ra thành công và có ảnh hưởng đến đặc tính dao động của hệ vật liệu. Đỉnh yếu xuất hiện tại khoảng $\sim 230\text{ cm}^{-1}$ trong phổ Raman không thuộc về các mode dao động cơ bản của cấu trúc rutile TiO_2 [14],

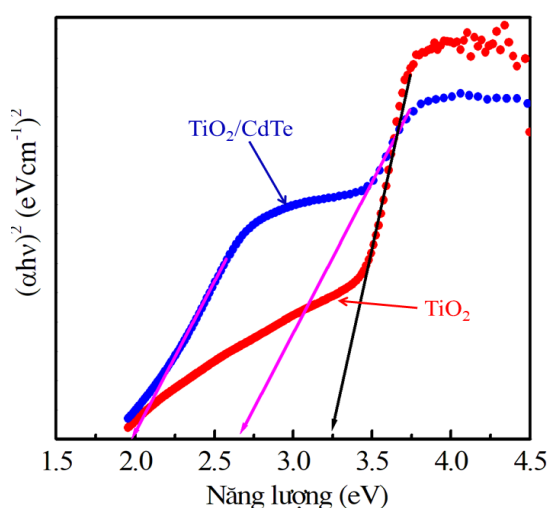
[15]. Sự xuất hiện của đỉnh này có thể liên quan đến dao động tổ hợp giữa các mode phonon năng lượng thấp, hoặc xuất hiện do sự thay đổi cấu trúc cục bộ tại vùng tiếp xúc giữa TiO_2 và CdTe QDs, nơi mà sự khác biệt về hằng số mạng hoặc ứng suất có thể gây ra các mode mới hoặc kích hoạt các mode Raman bị cấm [13].

3.4. Kết quả nghiên cứu tính chất quang

Hình 5 là phổ hấp thụ của mẫu TiO_2 và mẫu TiO_2 gắn kết với các QDs CdTe. Kết quả quan sát cho thấy phổ hấp thụ của thanh nano TiO_2 có bờ hấp thụ rõ ràng trong vùng tử ngoại tại 365 nm. Phổ hấp thụ của thanh nano TiO_2 gắn kết CdTe QDs ngoài bờ hấp thụ tại 365 nm của TiO_2 còn xuất hiện thêm bờ hấp thụ exciton của CdTe ở bước sóng khoảng 650 nm. Kết quả quan sát cho thấy độ hấp thụ trong vùng tử ngoại của mẫu TiO_2 gắn kết CdTe QDs giảm trong khi độ hấp thụ ánh sáng trong vùng khả kiến tăng so với thanh mẫu TiO_2 chưa gắn kết. Sự giảm hấp thụ trong vùng tử ngoại và tăng hấp thụ trong vùng ánh sáng nhìn thấy này là do sự xuất hiện của các chấm lượng tử CdTe dính trên bề mặt thanh TiO_2 [16].



Hình 5. Phổ hấp thụ của mẫu TiO_2 và TiO_2 gắn kết với CdTe QDs



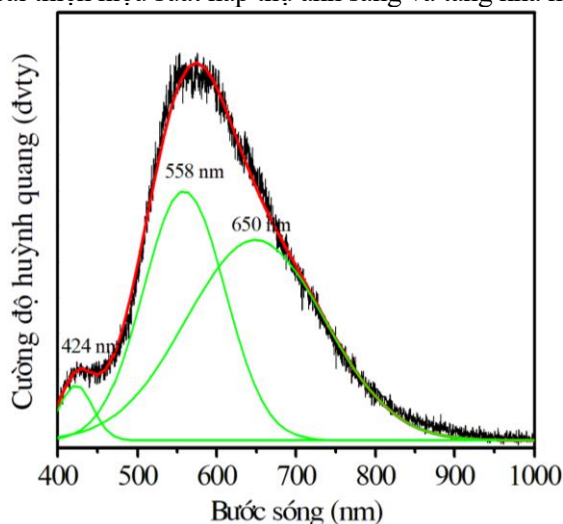
Hình 6. Phổ hấp thụ của mẫu TiO_2 và TiO_2 gắn kết với CdTe QDs

Hình 6 biểu diễn đường cong $Tauc$ $[(\alpha h\nu)^2$ và $(h\nu)]$ nhằm xác định năng lượng vùng cấm (E_g) của mẫu TiO_2 nguyên chất (đường màu đỏ) và mẫu TiO_2 gắn kết CdTe QDs (đường màu đen). Theo phương pháp $Tauc$, E_g được xác định bằng cách kéo dài phần tuyến tính của đồ thị và lấy giao điểm với trục năng lượng ($h\nu$). Kết quả cho thấy mẫu TiO_2 nguyên chất có E_g xấp xỉ 3,25 eV, phù hợp với pha rutile của TiO_2 .

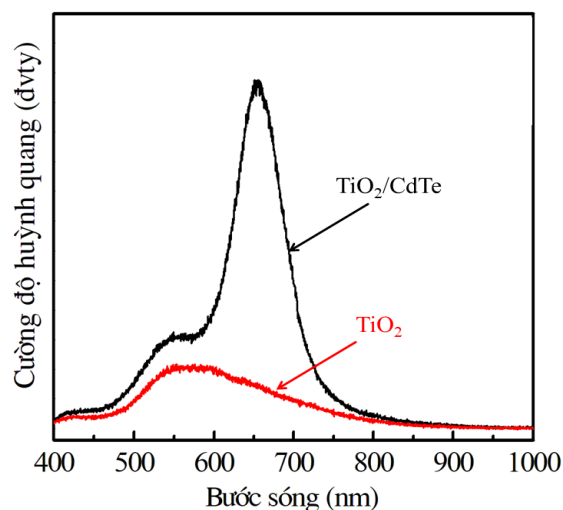
Mẫu TiO_2 gắn kết QDs CdTe cho thấy sự dịch chuyển biên hấp thụ về vùng năng lượng thấp hơn, giá trị E_g của TiO_2 ban đầu khoảng 3,25 eV, đã giảm xuống khoảng 2,65 eV (mức 1) và 2,0 eV (mức 2) trong TiO_2/CdTe . Sự giảm rõ rệt giá trị E_g sau khi gắn kết các QDs CdTe cho thấy rằng CdTe đã mở rộng phạm vi hấp thụ ánh sáng của vật liệu từ vùng tử ngoại sang vùng ánh sáng nhìn thấy. Điều này là do các QDs CdTe – với năng lượng vùng cấm nhỏ hơn (~1,5-2,5 eV tùy kích thước các QDs) – đã tạo ra các trạng thái electron mới hoặc cấu trúc dị thể tại giao diện với TiO_2 , làm giảm năng lượng kích hoạt cần thiết cho sự chuyển tiếp electron. Hiện tượng này mang ý nghĩa quan trọng trong các ứng dụng quang xúc tác, pin mặt trời và cảm biến quang, giúp tận dụng tốt hơn phổ ánh sáng mặt trời, đặc biệt là vùng khả kiến.

Hình 7 thể hiện phổ huỳnh quang (PL) của mẫu TiO_2 được kích thích tại bước sóng 355 nm. Phổ cho thấy một dải phát xạ rộng trong vùng 400–900 nm, với ba đỉnh phát xạ rõ rệt tại 424 nm, 558 nm và 650 nm. Các đỉnh này được phân tích bằng phương pháp tách đường cong Gaussian, phản ánh các cơ chế tái tổ hợp electron – lỗ trống (e^-/h^+) khác nhau trong vật liệu. Đỉnh tại 424 nm (vùng ánh sáng xanh lam) được quy cho sự tái tổ hợp trực tiếp giữa electron trong vùng dẫn và lỗ trống trong vùng

hóa trị – thể hiện đặc trưng do chuyển dời exciton của TiO_2 [6], [7]. Đỉnh tại 558 nm (vùng ánh sáng xanh lục) thường liên quan đến sự tái tổ hợp gián tiếp thông qua các trạng thái bẫy do khuyết tật oxy hoặc sai hỏng mạng tinh thể gây ra [5], [12]. Đỉnh tại 650 nm (vùng đỏ) phản ánh các mức năng lượng sâu hơn trong vùng cấm, có thể liên quan đến các khuyết tật nội mạng hoặc tâm phát xạ nội vùng [9], [13]. Cường độ phát xạ khá mạnh cho thấy sự tái tổ hợp e^-/h^+ xảy ra nhanh, điều này không tốt cho các ứng dụng quang xúc tác do làm giảm hiệu suất phân tách tải điện. Đây cũng là lý do vì sao cần thiết kết hợp TiO_2 với các vật liệu khác như QDs CdTe nhằm giảm thiểu quá trình tái tổ hợp, cải thiện hiệu suất hấp thụ ánh sáng và tăng khả năng chuyển tải electron.



Hình 7. Phổ huỳnh quang của thanh TiO_2



Hình 8. Phổ huỳnh quang của thanh TiO_2 gắn kết các QDs CdTe

Phổ huỳnh quang của mẫu TiO_2 và mẫu TiO_2 gắn kết các QDs CdTe với ánh sáng kích thích có bước sóng 355 nm được quan sát trên Hình 8. Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hình dạng, vị trí đỉnh và cường độ huỳnh quang giữa hai mẫu. Mẫu TiO_2 nguyên chất phát xạ tương đối yếu trong vùng 400–900 nm, với phổ phân bố rộng. Mẫu TiO_2 gắn kết các QDs CdTe, ngoài đỉnh phát xạ ở 558 nm còn xuất hiện một đỉnh phát xạ mạnh tại khoảng ~660 nm. Đỉnh này có cường độ huỳnh quang mạnh hơn đáng kể so với TiO_2 tinh khiết và có nguồn gốc từ chuyển dời exciton của các QDs CdTe [1], [9]. Việc gắn kết CdTe QDs lên TiO_2 đã thay đổi đáng kể đặc tính huỳnh quang của mẫu. Đỉnh mạnh tại ~660 nm chứng tỏ sự hiện diện rõ rệt của CdTe QDs, vốn có năng lượng vùng cấm nhỏ hơn và phát xạ trong vùng đỏ – phù hợp với các nghiên cứu trước đó [2], [3], [11]. Điều này cho thấy CdTe QDs đóng vai trò là trung tâm tái tổ hợp electron–lỗ trống trong cấu trúc dị thể TiO_2/CdTe .

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, hệ vật liệu thanh nano TiO_2 được chế tạo và gắn kết thành công với các chấm lượng tử CdTe bằng phương pháp thủy nhiệt. Kết quả phân tích hình thái bằng SEM và HRTEM cho thấy các chấm lượng tử CdTe kích thước ~7–8 nm phân bố đều trên bề mặt các thanh TiO_2 có kích thước ~70–80 nm. Phổ Raman khẳng định cấu trúc rutile của TiO_2 và sự hiện diện của CdTe thông qua các đỉnh dao động đặc trưng, đồng thời cho thấy sự tương tác tinh thể giữa hai vật liệu. Phổ hấp thụ UV-Vis và phân tích T_{auc} cho thấy sự mở rộng đáng kể vùng hấp thụ quang học từ tử ngoại sang khả kiến, với năng lượng vùng cấm giảm từ 3,25 eV xuống hai mức còn khoảng 2,65 và 2,0 eV sau khi gắn CdTe. Phổ huỳnh quang (PL) ghi nhận đỉnh phát xạ mạnh tại ~660 nm do CdTe QDs, chứng minh tính hiệu quả của việc tạo dị thể bán dẫn TiO_2/CdTe . Những kết quả này cho thấy vật liệu TiO_2/CdTe có tiềm năng lớn trong các ứng dụng quang điện tử như pin mặt trời, cảm biến và xúc tác quang, nhờ khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến tốt hơn và đặc tính quang học được cải thiện rõ rệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. Phalswal, A. P. Raj, V. Singh, D. Khanna, and P. K. Khanna, "Green light emitting hydrophilic CdTe quantum dots with magic size signature," *Next Materials*, vol. 3, 2024, Art. no. 100041.
- [2] J. Yang and X. Zhong, "CdTe based quantum dot sensitized solar cells with efficiency exceeding 7% fabricated from quantum dots prepared in aqueous media," *J. Mater. Chem. A*, vol. 4, pp. 16553-16561, 2016.
- [3] H. Wu, W. Zhang, K. Li, and C. Liu, "Optical properties of CdTe quantum dots in silicate glasses containing CaO," *Optical Materials*, vol. 148, 2024, Art. no. 114897.
- [4] X. C. Nguyen, T. H. Nguyen, T. L. Nguyen, T. K. L. Vu, D. T. Luong, V. D. Phan, Q. B. Nguyen, and T. T. Pham, "Photoluminescence properties of CdTe/CdTeSe/CdSe core/alloyed/shell type-II quantum dots," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 787, no. 30, pp. 823-830, 2019.
- [5] M. A. Mahadik, G.W. An, S. David, S.H. Choi, M. Cho, and J. S. Jang, "Fabrication of A/R- TiO₂ composite for enhanced photoelectrochemical performance: Solar hydrogen generation and dye degradation," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 426, pp. 833-843, 2017.
- [6] Y. Zhao, X. Gu, and Y. Qiang, "Influence of growth time and annealing on rutile TiO₂ single-crystal nanorod arrays synthesized by hydrothermal method in dye-sensitized solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 7, pp. 2814-2818, 2012.
- [7] H. Hafez, Z. Lan, Q. Li, and J. Wu, "High-efficient dye-sensitized solar cell based on novel TiO₂ nanorod/nanoparticle bilayer electrode," *Nanotechnol. Sci. Appl*, vol. 3, pp. 45-51, 2010.
- [8] W. J. Lee and M. H. Hon, "An ultraviolet photo-detector based on TiO₂/water solid-liquid heterojunction," *Appl. Phys. Lett*, vol. 99, no. 25, 2011, Art. no. 251102.
- [9] Z. Zhou, S. Yuan, J. Fan, Z. Hou, W. Zhou, Z. Du, and S. Wu, "CuInS₂ quantum dot-sensitized TiO₂ nanorod array photoelectrodes: synthesis and performance optimization," *Nanoscale Research Letters*, vol. 7, 2012, Art. no. 652.
- [10] B. Liu and E. S. Aydil, "Growth of oriented single-crystalline rutile TiO₂ nanorods on transparent conducting substrates for dye-sensitized solar cell," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 11, pp. 3985-3990, 2009.
- [11] J. Zhang, I. Yang, M. Liu, G. Li, S. Gao, and Y. Luo, "Fabrication of CdTe Quantum Dots Sensitized TiO₂ Nanorod-Array-Film Photoanodes via the Route of Electrochemical Atomic Layer Deposition," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 161, pp. D55-D58, 2014.
- [12] M. Ye, M. Lev, C. Gong, W. Guo, and C. Lin, "Ultralong rutile TiO₂ nanorod arrays with large surface area for CdS/CdSe quantum dot-sensitized solar cells," *Electrochimica Acta*, vol. 121, pp. 175-182, 2014.
- [13] S. Challagulla, K. Tarafder, R. Ganesan, and S. Roy, "Structure sensitive photocatalytic reduction of nitroarenes over TiO₂," *Scientific Reports*, vol. 7, 2017, Art. no. 8783.
- [14] T. V. Yuvaraj, D. Kumar, and R. R. Rao, "Growth of rutile TiO₂ nanorods on TiO₂ seed layer deposited by electron beam evaporation," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 258, pp. 4283-4287, 2012.
- [15] H. L. Ma, J. Y. Yang, Y. Dai, and Y. B. Zhang, "Raman study of phase transformation of TiO₂ rutile single crystal irradiated by infrared femtosecond laser," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, pp. 7497-7500, 2007.
- [16] D. V. Pandi, N. Muthukumarasamy, S. Agilan, and D. Velauthapillai, "CdSe quantum dots sensitized ZnO nanorods for solar cell application," *Materials Letters*, vol. 223, pp. 227-230, 2018.