



Ảnh hưởng của Ethanol lên cấu trúc và tính chất quang của chấm lượng tử Graphene pha tạp Nitơ

Effect of Ethanol on the Structure and Optical Properties of Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots

Phạm Thu Nga^{a, b}, Phạm Nhật Quang^c, Trần Ngo^{b, d}, Lê Xuân Hùng^{b, d*}
Pham Thu Nga^{a, b}, Pham Nhat Quang^c, Tran Ngo^{b, d}, Le Xuan Hung^{b, d*}

^a*Viện Nghiên cứu Lý thuyết và Ứng dụng, Đại học Duy Tân, Hà Nội, Việt Nam.*

^a*Institute of Theoretical and Applied Research, Duy Tan University, Hanoi, Vietnam*

^b*Khoa Môi trường và Khoa học Tự nhiên, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Department of Environment and Natural Science, Duy Tan University, Da Nang, Vietnam*

^c*Nhà nghiên cứu độc lập*

^c*Independent Researcher*

^d*Viện Nghiên cứu và Phát triển CNC, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^d*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, Vietnam*

(Ngày nhận bài: 12/3/2026, ngày phản biện xong: 14/6/2026, ngày chấp nhận đăng: 03/8/2026)

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của dung môi chế tạo lên cấu trúc và tính chất phát quang của các chấm lượng tử graphene pha tạp nitơ (N-GQDs) được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt từ axit citric và urea. Các mẫu N-GQDs được chế tạo trong hai dung môi khác nhau: nước và ethanol, nhằm làm rõ vai trò của dung môi trong việc điều chỉnh màu phát xạ huỳnh quang. Cấu trúc của vật liệu được đặc trưng thông qua phổ Raman và phổ hồng ngoại biến đổi Fourier, trong khi các tính chất quang được phân tích qua phổ hấp thụ UV-Vis và phổ huỳnh quang. Kết quả cho thấy sự hiện diện của ethanol trong quá trình tổng hợp làm tăng mật độ khuyết tật cấu trúc (tỉ số I_D/I_G tăng từ 1,06 lên 1,20) và hình thành các nhóm chức mới trên bề mặt GQDs, đặc biệt là các liên kết C=O và C-N tại các vị trí biên và khuyết tật. Sự xuất hiện thêm đỉnh phát quang ở ~590 nm và làm dịch chuyển màu phát xạ từ xanh lam sang đỏ có liên quan đến các trạng thái điện tử của mạng sp^2 và các trạng thái bề mặt này. Những kết quả thu được cho thấy ethanol đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh tính chất quang của N-GQDs, mở ra khả năng kiểm soát màu phát xạ thông qua lựa chọn dung môi trong quá trình tổng hợp.

Từ khóa: chấm lượng tử graphene, N-GQDs, ethanol, phổ hấp thụ, phổ huỳnh quang, Raman

Abstract

In this study, we investigate the effect of the synthesis environment on the structure and photoluminescence properties of nitrogen-doped graphene quantum dots (N-GQDs) prepared by a hydrothermal method using citric acid and urea as precursors. The N-GQDs were synthesized in two different solvents, water and ethanol, to clarify the role of the solvent in tuning the fluorescence emission color. The structural properties of the materials were characterized by Raman spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy, while the optical properties were analyzed through UV-Vis absorption and photoluminescence spectra. The results demonstrate that the presence of ethanol during synthesis increases the structural defect density (with the I_D/I_G ratio rising from 1.06 to 1.20) and promotes the formation of new functional

*Tác giả liên hệ: Lê Xuân Hùng
Email: lexuanhung@duytan.edu.vn

groups on the GQDs surface, particularly C=O and C–N bonds at edge and defect sites. The emergence of an additional emission peak at ~590 nm and the shift in emission color from blue to red are attributed to the electronic states of the sp^2 network and these surface states. These findings demonstrate that ethanol plays a critical role in tailoring the optical properties of N-GQDs, offering a straightforward approach to controlling emission color through solvent selection during synthesis.

Keywords: graphene quantum dots, N-GQDs, ethanol, absorption, photoluminescence, Raman

1. Giới thiệu

Chấm lượng tử graphene (graphene quantum dots - GQDs) với các tính chất quang học đặc biệt, đã thu hút sự chú ý đáng kể trong nhiều lĩnh vực bao gồm hình ảnh sinh học, cảm biến và điện tử quang học [1, 2]. Việc pha tạp GQDs bằng các dị nguyên tử như nitơ (N) đã được coi là một chiến lược hiệu quả để điều chỉnh các tính chất huỳnh quang (PL) của chúng [3]. Đáng chú ý, màu phát xạ của GQDs có thể được điều khiển từ màu xanh lam đến màu đỏ thông qua quá trình pha tạp, điều này có tầm quan trọng đặc biệt trong các ứng dụng thiết bị phát sáng và nhãn sinh học [4, 5].

GQDs có độc tính tế bào thấp, độ hòa tan trong nước cao, khả năng ghép tốt, huỳnh quang ổn định và chi phí sản xuất thấp, là một loại QDs mới đầy hứa hẹn để thay thế QDs vô cơ trong một số ứng dụng [6, 7]. Khác với các phân tử thuốc nhuộm, GQDs sở hữu độ ổn định hóa - nhiệt và khả năng chống tẩy quang vượt trội. Bên cạnh đó, bề mặt GQDs có thể được biến tính nhằm kiểm soát quá trình tự lắp ráp, từ đó điều chỉnh cấu trúc của vật liệu. Tuy nhiên, tương tự như thuốc nhuộm, hiện tượng kết tụ của GQDs vẫn chịu tác động từ các yếu tố ngoại cảnh như độ pH [3]. Khác với phát xạ màu xanh lam được báo cáo bởi Qu et al. [8], nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy GQDs có thể phát xạ đa màu và có thể điều chỉnh. Sự thay đổi màu trong các GQDs pha tạp, đặc biệt là N-GQDs, bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, bao gồm loại vật liệu tiền chất, sự hiện diện của các nhóm chức cụ thể và hiệu ứng giam giữ lượng tử. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc pha tạp bằng nguyên tử nitơ tạo ra các trạng thái điện tử mới trong cấu trúc vùng năng lượng

của GQDs, dẫn đến sự thay đổi các mức năng lượng trong vùng cấm. Sự thay đổi các mức năng lượng này có thể dẫn đến sự dịch chuyển đỏ trong phổ phát xạ [9].

Hơn nữa, việc lựa chọn vật liệu tiền chất đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các tính chất quang học của N-GQDs. Các tiền chất khác nhau góp phần vào việc hình thành các nhóm chức khác biệt trên bề mặt của GQDs, từ đó điều chỉnh thêm màu phát xạ PL. Ví dụ, việc sử dụng melamine và p-phenylenediamine làm tiền chất đã được báo cáo là dịch chuyển phát xạ từ màu xanh sang màu đỏ do sự xuất hiện của các khuyết tật liên quan đến nitơ và sự hình thành các mức năng lượng bổ sung [10]. Bên cạnh việc lựa chọn tiền chất, bản chất của dung môi tổng hợp cũng đóng vai trò quyết định đến quá trình hình thành các nhóm chức trên bề mặt. Do đó, nghiên cứu này nhằm mục đích khảo sát ảnh hưởng của dung môi (H_2O và ethanol) lên sự thay đổi màu phát xạ trong N-GQDs. Thông qua việc phân tích cấu trúc, chúng tôi giả thuyết rằng sự dịch chuyển màu sắc có liên quan đến các nhóm chức liên kết tại các vị trí biên hoặc khuyết tật, từ đó tạo ra các trạng thái năng lượng mới chi phối quá trình phát quang.

Nghiên cứu này nhằm mục đích khảo sát sự thay đổi màu của N-GQDs được tổng hợp trong môi trường có dung môi là H_2O và ethanol. Bằng cách phân tích cấu trúc phân tử của các tiền chất này và các phổ FTIR tương ứng, chúng tôi giả thuyết rằng sự dịch chuyển màu có liên quan đến các nhóm chức liên kết với các cạnh hoặc khuyết tật của GQDs. Các nhóm này tạo ra các trạng thái năng lượng mới trong vùng cấm, từ đó gây ra sự dịch chuyển đỏ được quan sát trong phát xạ.

2. Thực nghiệm

2.1. Chế tạo N-GQDs

Các mẫu N-GQDs được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt dựa trên các nghiên cứu trước đây [8, 11]. Nghiên cứu này tiến hành khảo sát quá trình thủy nhiệt trong hai dung môi khác nhau là H₂O và ethanol nhằm đánh giá vai trò của dung môi lên quá trình hình thành nhóm chức bề mặt và tính chất quang của vật liệu. Cụ thể, N-GQDs được tổng hợp thông qua phương pháp kết hợp nhiệt phân và thủy nhiệt với axit citric (CA) và ure làm tiền chất. Hỗn hợp gồm 2,0 g CA và 0,6 g urea được đưa vào cốc chịu nhiệt rồi xử lý bằng vi sóng ở 720W trong 5 phút, tạo thành tiền chất rắn. Chất rắn này sau đó được phân tán trong 80 ml nước cất hai lần hoặc cồn tuyệt đối (ethanol), sau đó chuyển vào cốc Teflon và xử lý thủy nhiệt ở 200°C trong 6 giờ để tạo ra N-GQDs. Sau phản ứng, dung dịch được lọc để loại bỏ các vật liệu chưa phản ứng, tiếp theo là thẩm tách để tinh chế.

2.2. Đặc trưng N-GQDs

Để xác định các tính chất của N-GQDs được chế tạo, chúng tôi đã sử dụng các thiết bị sau: Phép đo phổ Raman được thực hiện bằng hệ micro-Raman HORIBA XploRA, được trang bị cách tử 1200 vạch/mm cho độ phân giải phổ 2 cm⁻¹. Các mẫu được kích thích bằng laser bước sóng $\lambda = 532$ nm qua vật kính 50×. Kích thước vết laser ước tính khoảng 1 μ m ở mức công suất 0,2 mW. Để nhận dạng và đánh giá chất lượng các mẫu N-GQDs, phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) được ghi lại bằng máy quang phổ FTIR Nicolet iS10 của Thermo Scientific, Mỹ, trong dải số sóng từ 500 đến 4000 cm⁻¹. Máy quang phổ Cary 60 UV-Vis (Agilent) được sử dụng để đo phổ hấp thụ của N-GQDs trong nước; hệ đo Fluorolog-322 (Horiba Jobin-Yvon) sử dụng đèn Xenon 450W để ghi lại phổ PL.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Cấu trúc của N-GQDs

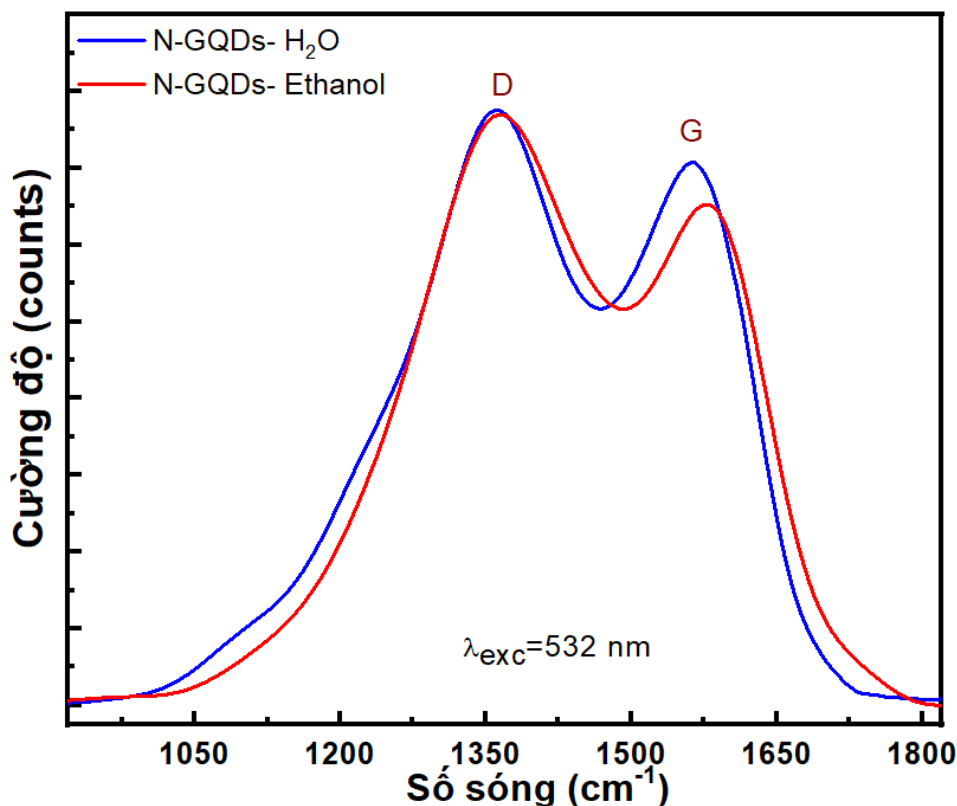
Để nghiên cứu về các tính chất cấu trúc của N-GQDs thu được, phổ Raman được ghi lại

trong vùng 1000–1850 cm⁻¹ và kết quả được trình bày trong Hình 1. Phổ xuất hiện hai dải D và G đặc trưng cho các vật liệu có cấu trúc từ carbon. So với graphene nguyên chất, nơi dải G thường xuất hiện ở ~1580 cm⁻¹ và tương ứng với dao động kéo giãn trong mặt phẳng của các nguyên tử carbon liên kết sp² [12], dải G của các mẫu được chế tạo xuất hiện ở ~1566 cm⁻¹. Sự dịch chuyển đỏ này cho thấy ảnh hưởng của việc pha tạp nitơ và sự thay đổi môi trường điện tử cục bộ do sự xuất hiện ethanol trong quá trình tổng hợp. Ngoài ra, một dải D rõ rệt ở ~1362 cm⁻¹ được quan sát thấy trong tất cả các mẫu, liên quan đến các khuyết tật cấu trúc và sự mất trật tự tại các cạnh trong khung graphene. Trong vật liệu GQDs, dải D xuất hiện chủ yếu do mật độ cạnh cao và sự đưa vào của các dị nguyên tử như nitơ, làm gián đoạn mạng lưới sp² [12]. Việc đưa ethanol trong quá trình chế tạo có vẻ gây ra sự giãn nở mạng tinh thể, làm giảm năng lượng phonon và góp phần thêm vào sự dịch chuyển đỏ trong các đỉnh Raman.

Bên cạnh vị trí đỉnh, tỉ số cường độ của dải D và dải G (I_D/I_G) thường được dùng để đánh giá mức độ mất trật tự hoặc khuyết tật biên trong các vật liệu trên nền graphene. Cường độ dải D cao hơn dải G, cho tỉ số $I_D/I_G > 1$, cho thấy mức độ khuyết tật cấu trúc cao và độ kết tinh graphit thấp. Điều này là điển hình đối với GQDs pha tạp nitơ có kích thước nano, nơi các trạng thái cạnh đa dạng và các khuyết tật do nitơ gây ra chi phối tín hiệu Raman [13, 14]. Dựa vào phổ Raman (Hình 1), các giá trị I_D/I_G được ước tính là 1,06 và 1,20 tương ứng với mẫu chế tạo trong môi trường H₂O và mẫu trong môi trường ethanol. Tỉ số I_D/I_G thấp hơn ở mẫu chế tạo trong môi trường H₂O cho thấy cấu trúc sp² có trật tự cao với ít khuyết tật hơn, tăng cường độ ổn định của trạng thái bề mặt nên chỉ phát xạ trong vùng xanh lam, trong khi tỉ số I_D/I_G cao hơn ở mẫu có chứa ethanol (1,20) cho thấy sự gia tăng tái hợp không bức xạ, góp phần vào hiện tượng dịch đỏ của mẫu. Những khuyết tật cấu trúc này, đặc biệt

là những khuyết tật được tạo ra bởi pha tạp nitơ và chức năng hóa cạnh, có thể tạo ra các trạng thái điện tử cục bộ hóa, hay còn gọi là trạng thái bẫy, trong vùng cấm của vật liệu. Các trạng thái

bẫy này được biết là có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái phát quang của GQDs bằng cách tạo ra các đường tái hợp bức xạ mới [15].

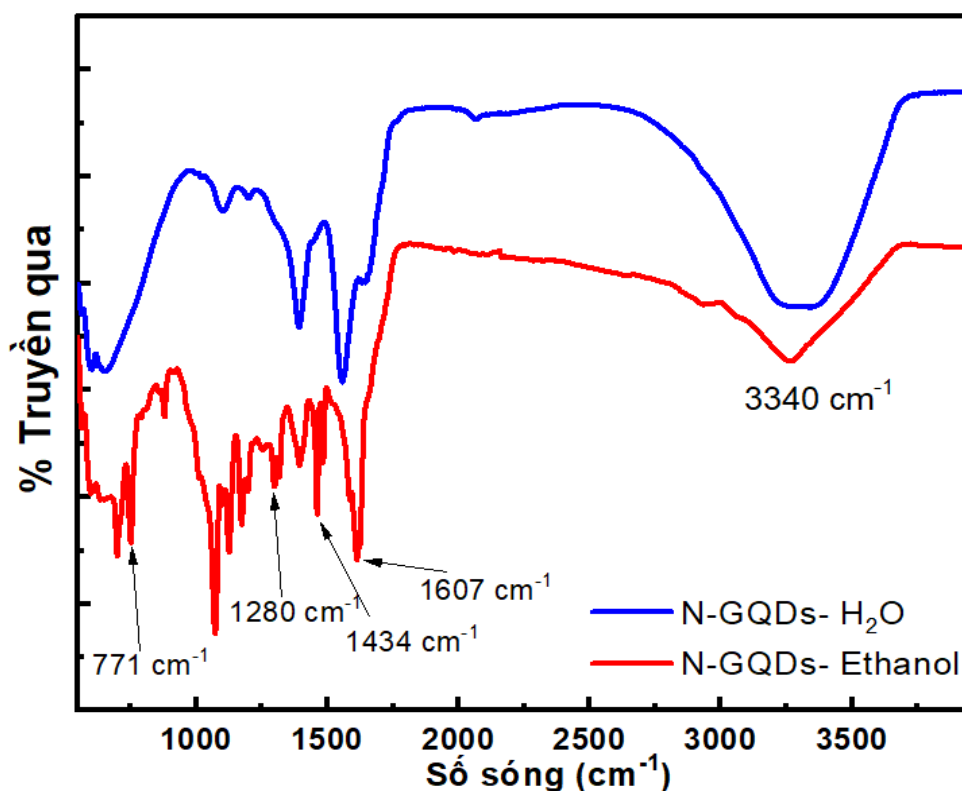


Hình 1. Phổ Raman của mẫu N-GQDs tổng hợp trong điều kiện môi trường H₂O và ethanol

Hình 2 trình bày phổ FTIR của các mẫu được tổng hợp với các môi trường khác nhau. Kết quả cho thấy, với mẫu chế tạo trong môi trường H₂O, nhiều dải hấp thụ ở các số sóng khác nhau tương ứng với các dao động khác nhau được quan sát. Dải ở $\sim 3345\text{ cm}^{-1}$ tương ứng với dao động kéo dài của O-H trong khi dải ở 3290 cm^{-1} tương ứng với dao động N-H, cho thấy sự hiện diện của nhóm chức N gắn vào GQDs [16]. Dải ở $\sim 1646\text{ cm}^{-1}$ có thể được quy cho C=O trong các nhóm axit carboxylic, là bằng chứng về phản ứng của các nhóm -COOH thông qua việc hình thành liên kết amide giữa -NH₂ và -COOH khi có mặt amine trong phản ứng nhiệt phân. Các đỉnh ở 1646 cm^{-1} và 1534 cm^{-1} có thể được quy cho C=O trong dải hấp thụ dao động amide (CONH)

và dao động khung của vòng thơm C=C tương ứng.

Khi N-GQDs được chế tạo trong môi trường ethanol, phổ FTIR có sự thay đổi rõ rệt. GQDs sở hữu các liên kết nitơ và oxy như O-H (3340 cm^{-1}), N-H (1607 cm^{-1} và 3212 cm^{-1}), C-O (1280 cm^{-1}) và C-N (1417 cm^{-1}) [17]. Bên cạnh đó, C=C (1507 cm^{-1}) cũng hiện diện, thể hiện cấu trúc graphite của GQDs. Đồng thời có thể thấy đỉnh ở 1434 cm^{-1} (liên quan đến dao động biến dạng của C-H trong nhóm -CH₂ hoặc -CH₃) và 771 cm^{-1} (dao động ngoài mặt phẳng của liên kết C-H trong các hợp chất thơm) xuất hiện rõ nét. Ngoài ra xuất hiện thêm một đỉnh hấp thụ tại 1721 cm^{-1} đặc trưng cho liên kết C=O trong nhóm chức carboxyl.



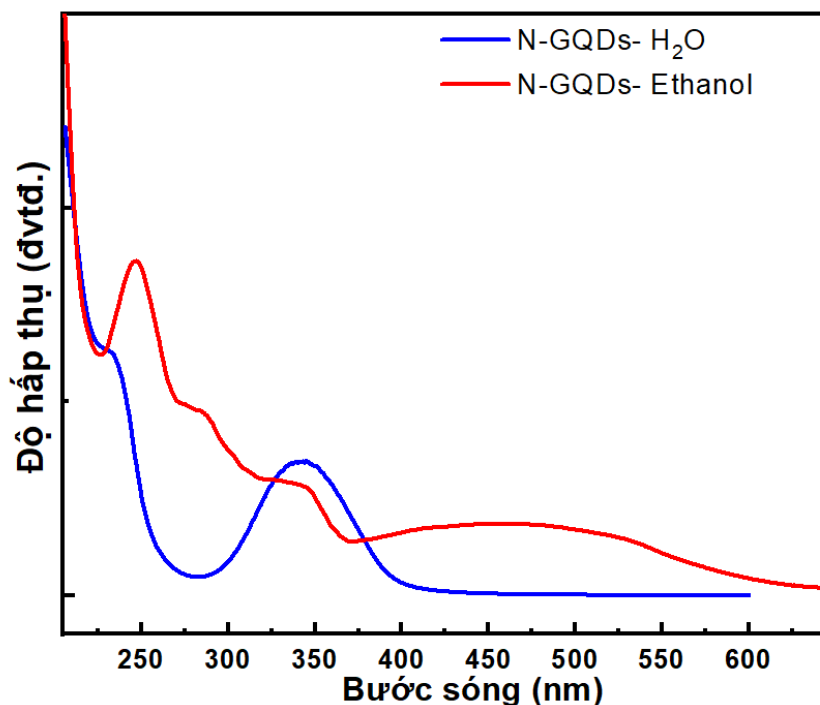
Hình 2. Phổ FTIR của các mẫu N-GQDs tổng hợp trong điều kiện môi trường H₂O và ethanol

Tóm lại, khi có ethanol, phổ FTIR cho thấy sự giảm rõ rệt của các đỉnh đặc trưng cho nhóm hydroxyl (-OH), điều này có thể phản ánh sự suy giảm hàm lượng nước hoặc mức độ tương tác của dung môi với bề mặt vật liệu. Vùng dao động của C=O và C-O-C cũng có sự thay đổi nhẹ, cho thấy khả năng tương tác của dung môi với các nhóm chức trên bề mặt vật liệu GQDs. Các đỉnh đặc trưng cho liên kết C-H trong vòng thơm cũng giảm nhẹ. Những kết quả này gợi ý rằng ethanol ảnh hưởng đến thành phần hóa học và bề mặt của vật liệu GQDs.

3.2. Tính chất quang của các mẫu N-GQDs

Hình 3 là phổ hấp thụ UV-Vis của các mẫu N-GQDs với các môi trường tiền chất khác nhau. Như thể hiện trong hình, phổ hấp thụ của mẫu chế tạo trong môi trường H₂O xuất hiện hai đỉnh

hấp thụ: một đỉnh ở 344 nm do chuyển dời $n \rightarrow \pi^*$ của nhóm C=O/C-N và một vai ở 230 nm do đóng góp của chuyển dời $\pi \rightarrow \pi^*$ của mạng graphite sp^2 . Với mẫu chế tạo chứa ethanol, có 4 đỉnh hấp thụ tại các bước sóng 247 nm, 283 nm, 338 nm và một dải hấp thụ rất rộng từ 380 đến 550 nm. Trong đó, đỉnh hấp thụ tại 247 nm đặc trưng cho chuyển dời $\pi \rightarrow \pi^*$ của mạng graphite sp^2 [18, 19]. Các đỉnh hấp thụ tại 283 nm, 338 nm và 460 nm tương ứng với các chuyển dời $n \rightarrow \pi^*$ trong các orbital phân tử chứa các nhóm chức như C=C, -COOH, C-OH hoặc do việc phá tạp nitrogen như C-N/C=N. Như vậy, bằng việc chế tạo N-GQDs trong dung môi ethanol, cấu trúc có khả năng xuất hiện vòng nitơ dẫn đến sự xuất hiện các đỉnh hấp thụ mới trên phổ UV-Vis [20].

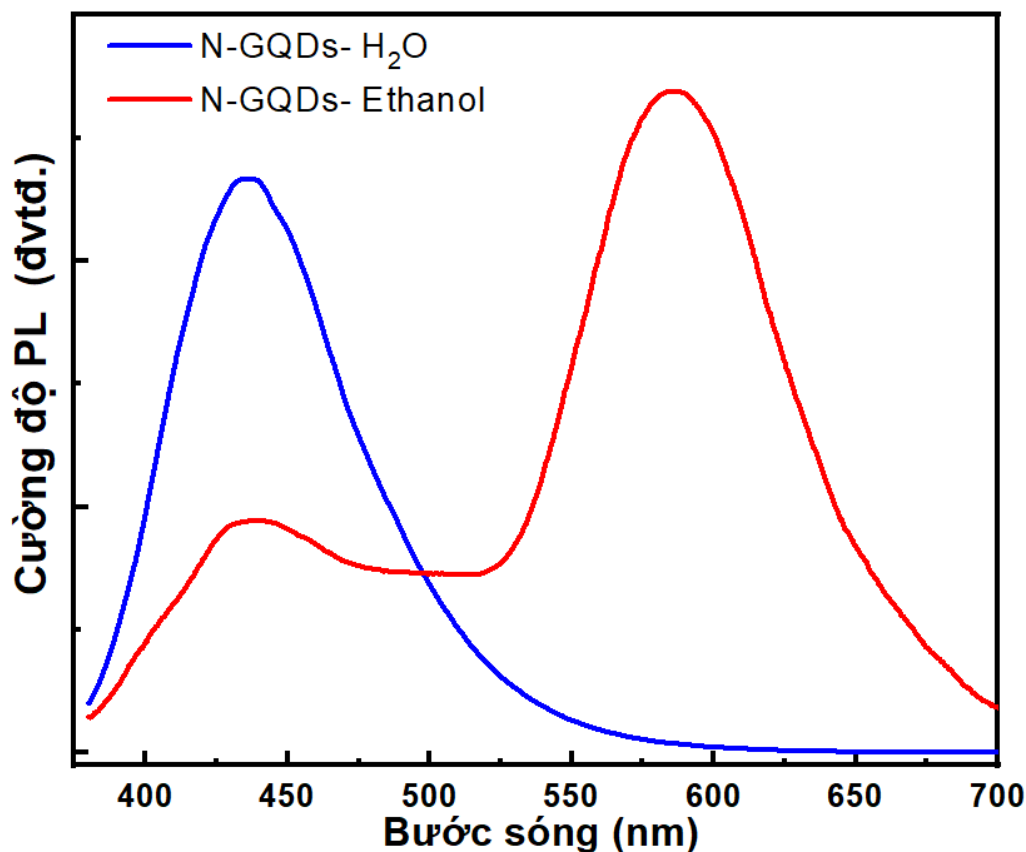


Hình 3. Phổ hấp thụ UV-Vis của các mẫu N-GQDs được chế tạo trong các dung môi khác nhau

Phổ phát quang (PL) được thực hiện để nghiên cứu các đặc tính quang học của vật liệu như cấu trúc điện tử và các trạng thái liên quan cũng như cho thấy kích thước của hạt và các nhóm chức hóa học ảnh hưởng đến quá trình phát quang. Hình 4 là phổ phát quang của các mẫu được chế tạo với các dung môi khác nhau. Về vị trí đỉnh phát quang, mẫu chế tạo trong môi trường H_2O chỉ có đỉnh phát quang ở vùng bước sóng ngắn (~ 440 nm), phản ánh các GQDs có ít nhóm chức hóa học phát quang. Mẫu chế tạo trong môi trường ethanol hiển thị hai đỉnh chính: một ở 440 nm và một đỉnh ở khoảng 590 nm và cường độ của đỉnh này cao hơn nhiều so với cường độ đỉnh tại 440 nm, nhờ đó màu sắc của mẫu cũng thay đổi từ màu xanh lam sang màu đỏ nhạt. Từ kết quả trên cho thấy bằng cách thay đổi dung môi tổng hợp, màu phát quang của vật liệu có thể được điều chỉnh từ xanh lam đến đỏ nhạt. Sự thay đổi màu sắc của các mẫu N-GQDs đến từ việc thay đổi cường độ của hai đỉnh huỳnh

quang ở 440 nm và 590 nm mà có thể do sự suy giảm trong cấu trúc hoặc nhóm chức phát quang. Kết quả này đã được minh chứng trong phổ FTIR mà cho thấy sự giảm rõ rệt của các đỉnh đặc trưng cho nhóm hydroxyl ($-OH$), phản ánh sự thay đổi các mức năng lượng trong vùng cấm để tạo ra sự dịch đỉnh phát quang.

Từ phân tích trên, có thể kết luận rằng bằng việc chế tạo N-GQDs trong ethanol, cường độ và vị trí đỉnh phát quang có thể thay đổi, do đó có thể điều chỉnh sự phát quang sang vùng đỏ. Sự thay đổi cường độ và vị trí đỉnh phản ánh sự ảnh hưởng mạnh mẽ của ethanol đến cấu trúc và nhóm chức của N-GQDs [9]. Cơ chế phát quang của N-GQDs phụ thuộc trực tiếp vào các nhóm chức bề mặt (nitơ và oxy). Trong khi đó, phát xạ ổn định ở bước sóng ngắn liên quan đến các trạng thái phát xạ từ lõi graphitic và nhóm carbonyl. Phát xạ huỳnh quang ở bước sóng dài thay đổi do các trạng thái bẫy từ nhóm chứa nitơ và oxy [21].



Hình 4. Phổ PL của các mẫu N-GQDs được chế tạo với các tiền chất khác nhau

Từ các kết quả trên, cơ chế hấp thụ, huỳnh quang của N-GQDs với môi trường tiền chất thay đổi được đề xuất như sau: Khi ánh sáng chiếu vào, các electron trong trạng thái cơ bản (HOMO) được kích thích lên trạng thái kích thích (LUMO) thông qua các chuyển dời điện tử, chẳng hạn như $C\pi \rightarrow C\pi^*$ hoặc $N\pi \rightarrow N\pi^*$. Sau khi được kích thích, các electron giảm năng lượng qua các quá trình không phát xạ, như dao động hoặc tương tác giữa các mức năng lượng, trước khi trở về trạng thái cơ bản và phát ra ánh sáng huỳnh quang [9].

Phát xạ huỳnh quang này bao gồm hai cơ chế chính: phát xạ xanh lam từ các chuyển dời $\pi \rightarrow \pi^*$, đặc trưng cho cấu trúc graphitic sp^2 , và phát xạ đỏ từ các trạng thái bề mặt liên quan đến nhóm chức như C=O, C-N, N-H [22]. Hiệu ứng kích thước lượng tử khiến kích thước hạt khác nhau tạo ra các mức năng lượng khác nhau, ảnh hưởng đến bước sóng ánh sáng phát ra. Trong khi đó,

các nhóm chức bề mặt như hydroxyl hoặc carbonyl tạo ra các trạng thái bẫy năng lượng, dẫn đến phát xạ ổn định ở bước sóng dài.

4. Kết luận

Nghiên cứu này cho thấy rằng dung môi ethanol đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh cấu trúc và tính chất quang của N-GQDs tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt từ axit citric và urea. Sự hiện diện của ethanol làm tăng mật độ khuyết tật cấu trúc (I_D/I_G tăng từ 1,06 lên 1,20) và thúc đẩy hình thành các nhóm chức C=O, C-N tại các vị trí biên. Sự thay đổi về các trạng thái điện tử của mạng sp^2 và các trạng thái bề mặt này được cho là nguyên nhân dẫn đến sự xuất hiện đỉnh phát quang mới ở ~ 590 nm, làm dịch chuyển màu phát xạ từ xanh lam sang đỏ. Kết quả cho thấy việc lựa chọn dung môi là một thông số đơn giản nhưng hiệu quả để điều chỉnh màu phát xạ của N-GQDs mà không cần thay đổi thành phần tiền chất, mở ra tiềm năng ứng dụng

trong hiển thị màu sắc, cảm biến quang học và hình ảnh sinh học.

Tài liệu tham khảo

- [1] Milenkovic M., Ciasca G., Bonasera A., et al. (2024). "Blue-light-driven photoactivity of L-cysteine-modified graphene quantum dots and their antibacterial effects". *J Photochem Photobiol B*, 250, 112818.
- [2] T. Vu Tuyet Nhung, H. Van Tuyen, N. Tran, et al. (2023). "S, N co-doped graphene quantum dots fabricated by rapid microwave-assisted pyrolysis and their optical properties". *Materials Today Communications*, 37, 107282.
- [3] Selvakumar T., Rajaram M., Natarajan A., et al. (2022). "Highly Efficient Sulfur and Nitrogen Codoped Graphene Quantum Dots as a Metal-Free Green Photocatalyst for Photocatalysis and Fluorescent Ink Applications". *ACS Omega*, 7 (15), 12825-12834.
- [4] Zhu W., Feng X., Zhao M., et al. (2021). "Scalable and atom economic preparation of red-near-infrared emitted N-doped graphene quantum dots with a high quantum yield". *Diamond and Related Materials*, 116, 108395.
- [5] Pramanik A., Biswas S., Tiwary C.S., et al. (2018). "Colloidal N-Doped Graphene Quantum Dots with Tailored Luminescent Downshifting and Detection of UVA Radiation with Enhanced Responsivity". *ACS Omega*, 3 (11), 16260-16270.
- [6] Zhu S., Zhang J., Tang S., et al. (2012). "Surface Chemistry Routes to Modulate the Photoluminescence of Graphene Quantum Dots: From Fluorescence Mechanism to Up-Conversion Bioimaging Applications". *Advanced Functional Materials*, 22 (22), 4732-4740.
- [7] Yan Y., Gong J., Chen J., et al. (2019). "Recent Advances on Graphene Quantum Dots: From Chemistry and Physics to Applications". *Adv Mater*, 31 (21), e1808283.
- [8] Qu D., Zheng M., Zhang L., et al. (2014). "Formation mechanism and optimization of highly luminescent N-doped graphene quantum dots". *Sci Rep*, 4, 5294.
- [9] P.T. Nga, N.T.M. Huong, N.H. Yen, et al. (2025). "Tunable photoluminescence from blue to red in nitrogen-doped graphene quantum dots: structural characterization and emission mechanism". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36 (25).
- [10] Rabeya R., Mahalingam S., Manap A., et al. (2022). "Structural defects in graphene quantum dots: A review". *International Journal of Quantum Chemistry*, 122 (12), e26900.
- [11] L.X. Hung, N.H. Yen, T.T. Hue, et al. (2022). "Fabrication and optical properties of sulfur- and nitrogen-doped graphene quantum dots by the microwave-hydrothermal approach". *Journal of Nanoparticle Research*, 24 (10), 206.
- [12] Eda G., Chhowalla M.. (2010). "Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics". *Adv Mater*, 22 (22), 2392-2415.
- [13] Li Y., Zhao Y., Cheng H., et al. (2012). "Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots with Oxygen-Rich Functional Groups". *Journal of the American Chemical Society*, 134 (1), 15-18.
- [14] Ruammitree A., Praphanwong K., Taiphon A.. (2023). "Facile one-step hydrothermal synthesis of monolayer and turbostratic bilayer n-doped graphene quantum dots using sucrose as a carbon source". *RSC Adv*, 13 (34), 23700-23707.
- [15] Pan D., Zhang J., Li Z., et al. (2010). "Hydrothermal route for cutting graphene sheets into blue-luminescent graphene quantum dots". *Adv Mater*, 22 (6), 734-738.
- [16] Omar W.I.W., Yamaoka O., Soon C.F., et al. (2019). "Quantization of Energy Gap of Nitrogen Doped Graphene Quantum Dots". *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 63 (2), 329-335.
- [17] Das R., Parveen S., Bora A., et al. (2020). "Origin of high photoluminescence yield and high SERS sensitivity of nitrogen-doped graphene quantum dots". *Carbon*, 160, 273-286.
- [18] Al-Shawi S.G., Alekhina N.A., Aravindhana S., et al. (2021). "Synthesis of NiO Nanoparticles and Sulfur, and Nitrogen co Doped-Graphene Quantum Dots/ NiO Nanocomposites for Antibacterial Application". *J Nanostruct*, 11 (1), 181-188.
- [19] Carrera C., Galan-Gonzalez A., Maser W.K., et al. (2025). "Multifaceted role of H₂O(2) in the solvothermal synthesis of green-emitting nitrogen-doped graphene quantum dots". *Chem Sci*, 16 (8), 3662-3670.
- [20] Ozyurt D., Shafqat S., Pakkanen T.T., et al. (2021). "Aggregation induced emission transformation of liquid and solid-state N-doped graphene quantum dots". *Carbon*, 175, 576-584.
- [21] Yang Y., Tang S., Chen D., et al. (2021). "Multifunctional red-emission graphene quantum dots with tunable light emissions for trace water sensing, WLEDs and information encryption". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 622, 126593.
- [22] Siddique A.B., Hossain S.M., Pramanick A.K., et al. (2021). "Excitation dependence and independence of photoluminescence in carbon dots and graphene quantum dots: insights into the mechanism of emission". *Nanoscale*, 13 (39), 16662-16671.