

PARAMAGNETIC CHARACTERISTICS OF DETONATION NANODIAMONDS

ĐẶC TRƯNG THUẬN TỪ CỦA NANO KIM CƯƠNG TỔNG HỢP BẰNG PHƯƠNG PHÁP SÓNG XUNG KÍCH

Nguyễn Thị Thanh Bình
Trường Đại học Quảng Bình

ABSTRACT: Detonation nanodiamond (DND) powder samples synthesized via shock wave methods were doped during the synthesis process and studied using the electron paramagnetic resonance (EPR) technique. The paramagnetic origin of DND was analyzed based on EPR signals. The primary contribution to the measured signals comes from loose C-C bonds on the surface and within the core of the DND particles. The presence of P1 paramagnetic centers (nitrogen atoms substituting carbon atoms in the diamond lattice) in the nanodiamond particles was confirmed using the saturation effect of the EPR signal.

Keywords: Electron paramagnetic resonance (EPR), detonation nanodiamonds (DND), loose C-C bonds, P1 centers, saturation effect.

TÓM TẮT: Các mẫu bột nano kim cương được tổng hợp bằng phương pháp sóng xung kích (detonation nanodiamond DND) bị biến tính trong quá trình tổng hợp nhờ đưa vào các nguyên tố pha tạp được nghiên cứu bằng phương pháp cộng hưởng thuận từ điện tử (EPR). Nguồn gốc thuận từ của DND, dựa trên các tín hiệu EPR, được phân tích. Đóng góp cơ bản vào tín hiệu đo được là các liên kết lỏng lẻo C-C trên bề mặt và bên trong lõi của các hạt DND. Sự có mặt của các tâm thuận từ P1 (nguyên tử nitrogen thay thế nguyên tử carbon trong nút mạng kim cương) trong hạt nano kim cương được chứng minh sử dụng hiệu ứng bão hòa của tín hiệu EPR.

Từ khóa: cộng hưởng thuận từ điện tử (EPR), nano kim cương DND, liên kết lỏng lẻo C-C, tâm P1, hiệu ứng bão hòa.

1. GIỚI THIỆU

Kể từ khi bắt đầu các nghiên cứu về nano kim cương được tổng hợp bằng phương pháp sóng xung kích (detonation nanodiamond DND) sự quan tâm đối với loại vật liệu này ngày một tăng [1]. Nano kim cương kế thừa tập hợp các tính chất quan trọng đặc trưng cho kim cương khối, như độ cứng cao, độ dẫn nhiệt cao, độ bền bức xạ cao, trở về mặt hóa học của lõi tinh thể nano kim cương [2] và sở hữu các đặc trưng khác liên quan đến kích thước nano - sự tương đương về số lượng các nguyên tử trên bề mặt và bên trong hạt DND và cấu

trúc lõi - vỏ (core-shell) của hạt nano kim cương [2]. Ngoài ra, khi kích thước lõi tinh thể lớn hơn 2 nm, nano kim cương có độ rộng vùng cấm tương tự như của kim cương khối [3], điều này có thể đảm bảo sự tương ứng về các tính chất quang học, điện tử, từ của nano kim cương với kim cương khối. Cần lưu ý là những đặc biệt trong tính chất quang học, điện tử và từ của kim cương khối gắn liền với sự có mặt của các nguyên tố tạp chất trong mạng tinh thể kim cương như nitrogen, boron, phosphorus, silicon... [4, 5]. Tâm NV (NV - center, nguyên tử nitrogen thay thế nguyên tử carbon ở nút

mạng tinh thể và liên kết với nó là một nút trống) đang được xem như là một phần tử logic cơ bản với tiềm năng sử dụng trong máy tính lượng tử và các ứng dụng khác của điện tử học spin [6]. Thông thường, tâm NV được tạo ra bằng cách chiếu xạ electron kim cương có chứa tâm P1 (nguyên tử nitrogen thay thế nguyên tử carbon ở nút mạng kim cương) với sự ủ nhiệt tiếp sau đó. Nếu tâm NV này được hiện thực hóa trong hạt nano kim cương thì có thể nói kỹ nguyên của điện tử học spin dựa trên kim cương sẽ mở ra. Vì vậy, nghiên cứu khả năng tạo ra tâm NV trong nano kim cương đang thu hút nhiều sự quan tâm [7]. Trong đó, bước đầu tiên sẽ là thiết lập sự có mặt của tâm P1 trong hạt nano kim cương.

Mục đích của bài báo này là nghiên cứu tính chất thuận từ của nano kim cương tổng hợp bằng phương pháp sóng xung kích DND và thiết lập sự có mặt của tâm P1 trong hạt DND sử dụng phương pháp cộng hưởng thuận từ điện tử.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phổ cộng hưởng thuận từ điện tử EPR được đo bằng phổ kế RadioPAN SE/X-2543 cải tiến sử dụng bộ cộng hưởng (BCH) H_{102} ở dải X. Từ trường phân cực được biến điệu với tần số 100 kHz và biên độ 0,01 mT. Trong phổ kế, tần số của máy phát sóng siêu cao tần (super high frequency SHF) được ổn định theo tần số của BCH H_{102} nhờ hệ thống điều chỉnh tần số tự động. Kiểm soát hệ số phẩm chất của BCH, điều chỉnh pha biến điệu của từ trường và hiệu chuẩn thành phần từ trường của bức xạ SHF được thực hiện bằng cách sử dụng tín hiệu EPR của tinh thể ruby

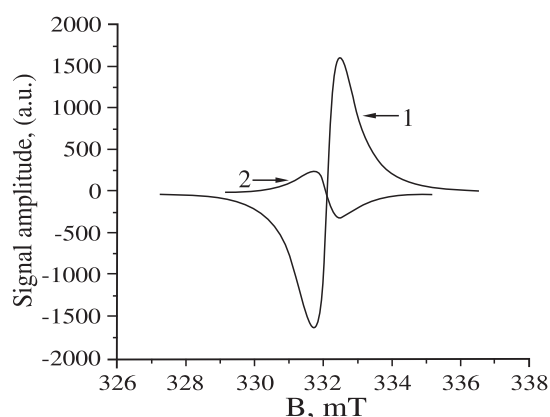
($Al_2O_3: Cr^{3+}$), được cố định trên tường của BCH. Độ nhạy của phổ kế $\sim 3 \cdot 10^{12}$ spin/mT.

Các mẫu nano kim cương DND bị biến tính trong quá trình tổng hợp thông qua việc đưa các nguyên tử pha tạp vào lớp vỏ nước bao bọc vật liệu nổ (T/RDX) hoặc trực tiếp vào trong vật liệu nổ nhằm mục đích đưa các nguyên tử pha tạp vào tinh thể nano kim cương được nghiên cứu. Mẫu được tổng hợp tại Tekhnolog FSUE SDTB, Liên bang Nga. Đặc trưng của các mẫu được trình bày trong Bảng 1.

Hàm lượng các nguyên tố tạp chất được đánh giá nhờ hệ phân tích SUPRA 55VP WDS với hệ phân tích vi mô INCA WAVE của công ty Oxford (Anh).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đối với toàn bộ 10 mẫu nghiên cứu tiến hành ghi tín hiệu EPR đồng pha và vuông pha (so với pha của tín hiệu biến điệu 100 kHz). Các tín hiệu EPR thu được là đạo hàm bậc nhất của đường hấp thụ (Hình 1), có dạng đối xứng với hệ số g nằm trong khoảng 2,0027 - 2,0043 và độ rộng phổ 0,69 - 0,94 mT phụ thuộc vào tạp chất được đưa vào trong quá trình tổng hợp mẫu.



Hình 1. Tín hiệu EPR của mẫu nano kim cương số 1: 1- tín hiệu đồng pha, 2- tín hiệu vuông pha

Bảng 1. Điều kiện tổng hợp và các đặc trưng của các mẫu DND

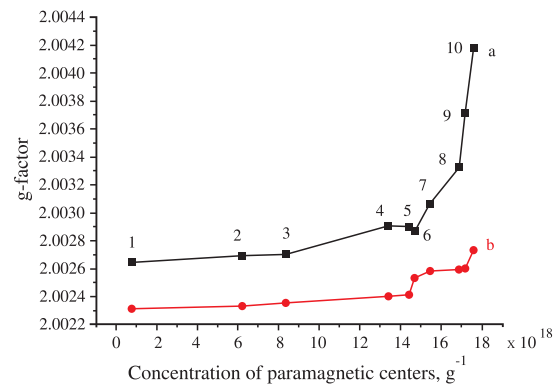
Mẫu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thành phần chất nổ, % (theo khối lượng)	T/RDX/ hợp chất Ge = 47/47/6	T/ RDX /Si = 48/48/4	T/ RDX /S = 47/47/6	T/ RDX / hợp chất P = 45/45/10	T/ RDX/ hợp chất P = 47/47/6	T/ RDX / hợp chất B = 47/47/6	T/ RDX = 50/50	T/ RDX /B = 49/49/2		T/ RDX = 50/50
Các điều kiện nổ	I	I	I	I	I	I	II	I	III	IV
Số lượng tạp chất không cháy, % (theo khối lượng)	0,37	1,24	1,24	0,18	0,63	0,43	1,1	1,76	0,77	0,63
Thành phần nguyên tố các tạp chất trong DND, % (theo khối lượng) (>0.01%):										
Na	0,034	0,143	0,043				0,112		0,020	0,013
Mg			0,010				0,015		0,019	
Al	0,050	0,048	0,044		0,015		0,034	0,033	0,019	0,010
Si	0,028	0,100	0,151		0,020		0,079	0,152	0,087	0,045
P				0,010	0,027		0,026			
K			0,026							
Ca			0,025		0,010		0,031		0,030	0,045
Ti	0,043	0,251	0,123	0,050	0,102	0,156	0,120	0,351	0,120	0,052
Fe	0,021	0,039	0,035	0,032	0,177	0,058	0,154	0,021	0,124	0,079
Cu			0,010							
Zn										
W	0,015	0,017	0,054			0,034	0,084	0,363	0,027	0,078
Ge	0,010									

T – Trinitrotoluene, RDX – hexogen. Điều kiện nổ: I – dung dịch nước của trilon B; II – dung dịch nước hợp chất của phosphourus; III – Vô nước; IV – dung dịch nước hợp chất của boron

Hệ số g là đại lượng đặc trưng cho mỗi tâm thuận từ và phản ánh tương tác giữa các tâm thuận từ với môi trường. Trong kỹ thuật EPR hệ số g được xác định từ biểu thức $g = 71,448f/B$ với f là tần số cộng hưởng (được đo bằng GHz) và B là cảm ứng từ tại vị trí tín hiệu hấp thụ đạt cực đại (được đo bằng mT). Hệ số g đối với điện tử tự do $g_e = 2,0023$. Nguồn gốc tín hiệu EPR với hệ số $g = 2,0027$ trong kim cương liên hệ với các sai hỏng về cấu trúc không liên quan đến tạp chất, xuất hiện trong biến dạng dẻo cũng như trong các liên kết C-C lỏng lẻo (tâm S1) trên bề mặt và bên trong tinh thể kim cương khối khi bị chiếu xạ bởi neutron và ion [8, 12]. Các giá trị lớn hơn của hệ số g là do sự có mặt của các nhóm chức khác nhau trên bề mặt các hạt DND, bao gồm C-O, C-H, và các trạng thái ứng suất trong chính hạt DND. Ngoài ra giá trị hệ số g thay đổi mạnh đối với các mẫu được đưa vào các tạp chất khác nhau trong quá trình tổng hợp. Cấu trúc đặc trưng cho các tâm thuận từ P1 không xuất hiện trên phổ ghi được.

Nồng độ các tâm thuận từ được xác định dựa trên phổ EPR của các mẫu nghiên cứu. Phát hiện thấy có sự tương quan giữa nồng độ tâm thuận từ và giá trị của hệ số g (Hình 2-a): khi giảm số lượng các liên kết lỏng lẻo C-C trong nano kim cương, hệ số g tiến gần đến giá trị 2,0027. Sự phụ thuộc như vậy là đặc trưng cho hệ tinh thể và có thể chứng tỏ về sự nâng cao chất lượng của các hạt nano kim cương. Do đó, có thể nói rằng các liên kết lỏng lẻo phân bố ở bên trong lõi nano tinh thể hoặc ở vùng tiếp xúc giữa lõi tinh thể và lớp vỏ. Ngoài ra, phát hiện thấy sự giảm giá trị hệ số g từ khoảng giá trị (2,0027 - 2,0043) đến khoảng giá trị (2,00235 - 2,0027) sau một năm bảo quản trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ phòng.

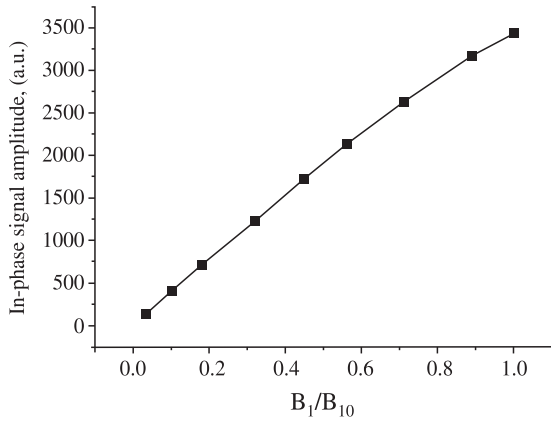
Hệ số $g = 2,00235$ thông thường đặc trưng cho tâm thuận từ của nguyên tử nitrogen trong mạng tinh thể kim cương lý tưởng [9]. Từ Hình 2 có thể thấy rõ hệ số g giảm trung bình $0,00034 \pm 0,00005$, trong đó khi nồng độ tâm thuận từ lớn hơn $1,6 \cdot 10^{19}$ spin/g sự thay đổi giá trị của hệ số g trở nên rõ rệt hơn và bằng 0,0015. Điều này cho phép nói về sự loại bỏ các ứng suất xuất hiện trong quá trình tổng hợp DND và sự tái tổ chức của các nguyên tử trong hạt DND trong thời gian bảo quản. Giả thiết rằng những biến đổi xảy ra ở chính lớp vỏ của hạt DND sau thời gian bảo quản là nguyên nhân dẫn đến sự giảm giá trị của hệ số g .



Hình 2. Sự phụ thuộc tương quan giữa giá trị hệ số g và nồng độ tâm thuận từ trong các mẫu nghiên cứu (mẫu 1 đến mẫu 10): a - Các mẫu ban đầu, b - Sau một năm bảo quản trong phòng thí nghiệm

Các thời gian phục hồi thuận từ đã được tính toán đối với một trong những mẫu DND hoàn thiện nhất (mẫu 1) sử dụng đường cong bão hòa của tín hiệu đồng pha (Hình 3) có tính đến đặc trưng bão hòa của tín hiệu vuông pha [13]. Tính toán trên cơ sở các phép đo EPR ở nhiệt độ phòng đã đi đến các kết quả sau về thời gian phục hồi thuận từ: thời gian phục hồi spin - spin $T_2 = 8,92 \cdot 10^{-8}$ s và thời gian phục hồi spin - mạng $T_1 = 2,18 \cdot 10^{-5}$ s. Sau thời gian bảo quản một

nằm ở điều kiện phòng thí nghiệm thời gian phục hồi thuận từ tăng lên: thời gian phục hồi spin - spin $T_2 = 9,27 \cdot 10^{-8}$ s, thời gian phục hồi spin - mạng $T_1 = 1,21 \cdot 10^{-4}$ s. Kết quả này là phù hợp với giả thiết về sự loại bỏ các ứng suất và tái tổ chức của các khuyết tật cấu trúc trong DND.



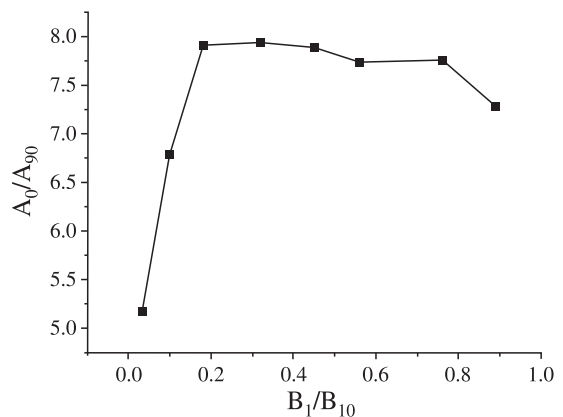
Hình 3. Sự phụ thuộc của biên độ tín hiệu đồng pha EPR (mẫu 1) vào thành phần cảm ứng từ B_1 của sóng SHF (B_{10} là cảm ứng từ B_1 khi hệ số suy giảm công suất siêu cao tần là 0dB)

Như đã nói ở trên trong mẫu DND không quan sát thấy tín hiệu EPR từ tâm thuận từ P1. Điều này có thể là do nồng độ rất lớn của các tâm thuận từ ở trong mẫu, khi đó xuất hiện tương tác trao đổi lưỡng cực - lưỡng cực, ảnh hưởng đến quá trình phục hồi. Cần lưu ý rằng, trong các mẫu DND có rất ít các tâm NV⁻ và NV⁰ còn các tâm P1 và tâm A (2 nguyên tử nitrogen chiếm 2 nút mạng liền kề trong mạng tinh thể kim cương) là khá phổ biến [10, 11]. Vì vậy, ở đây bài báo đặt ra một mục tiêu là chứng minh sự có mặt của tâm P1 trong DND sử dụng công cụ EPR.

Như đã biết phổ EPR của tâm P1 đã bão hòa ngay ở những giá trị nhỏ của công suất sóng SHF do thời gian phục hồi thuận

từ lớn của tâm này. Trong kỹ thuật EPR hiệu ứng bão hòa là sự suy giảm hoặc không thay đổi của biên độ tín hiệu EPR khi tăng công suất sóng SHF. Trong các mẫu kim cương chứa tâm thuận từ P1 hiệu ứng bão hòa được quan sát thấy đối với cả tín hiệu EPR đồng pha và vuông pha: Tín hiệu đồng pha đạt cực đại khi công suất sóng SHF đạt tỉ lệ $B_1/B_{10} < 0,1$ (công suất sóng SHF tương ứng < 2 mW) và giảm mạnh khi tiếp tục tăng giá trị công suất sóng SHF; tín hiệu vuông pha đạt cực đại khi công suất sóng SHF đạt tỉ lệ $B_1/B_{10} > 0,4$ (công suất sóng SHF tương ứng > 32 mW) và gần như không suy giảm hoặc giảm không nhiều khi tiếp tục tăng công suất sóng SHF. Tính đến những đặc trưng bão hòa của tâm thuận từ P1, hiệu ứng bão hòa cần phải được quan sát thấy đối với tín hiệu đồng pha chuẩn hóa theo tín hiệu vuông pha A_0/A_{90} trong các mẫu kim cương có chứa tâm P1.

Sự phụ thuộc của biên độ tín hiệu đồng pha (A_0) chuẩn hóa theo biên độ tín hiệu



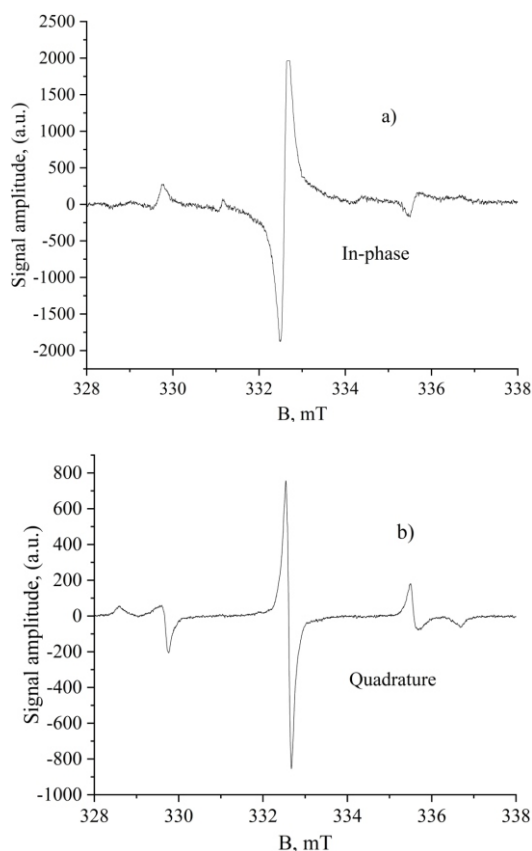
Hình 4. Sự phụ thuộc của biên độ tín hiệu đồng pha (A_0) chuẩn hóa theo biên độ tín hiệu vuông pha (A_{90}) vào công suất sóng SHF đối với mẫu DND số 1 (B_{10} là cảm ứng từ B_1 khi hệ số suy giảm công suất siêu cao tần là 0 dB)

vuông pha (A_{90}) vào công suất sóng SHF đối với mẫu DND số 1 được trình bày trên Hình 4. Có thể thấy rằng khi tăng công suất sóng SHF xảy ra sự bão hòa của hệ spin. Đây là bằng chứng gián tiếp cho thấy sự tồn tại của các tâm thuận từ với thời gian phục hồi lớn trong mẫu nghiên cứu. Tương tự như các loại kim cương nhân tạo khác, các tâm thuận từ đó có thể là nguyên tử nitrogen thay thế nguyên tử carbon ở nút mạng của nano tinh thể kim cương.

Tín hiệu EPR từ tâm P1 thường được quan sát thấy ở vùng từ trường 328 - 338 mT. Cấu trúc phổ EPR của tâm P1 gồm thành phần trung tâm với hệ số $g = 2,0024$ do phân tách Zeeman và các thành phần nằm hai bên cách đều thành phần trung tâm do sự phân tách siêu tinh tế. Phổ EPR đặc trưng cho tâm P1 ứng với tín hiệu đồng pha và tín hiệu vuông pha quan sát thấy trong mẫu kim cương CVD đa tinh thể được trình bày trên Hình 5.

Sau khi chiếu xạ neutron kim cương CVD tín hiệu từ tâm P1 không còn quan sát thấy, phổ EPR có dạng, như đối với DND, là một đường đạo hàm bậc nhất của đường hấp thụ cộng hưởng dạng singlet. Sự phụ thuộc của biên độ chuẩn hóa A_0/A_{90} vào công suất sóng SHF được dẫn ra trên Hình 6 đối với kim cương CVD ban đầu và sau khi bị chiếu xạ và ủ nhiệt ở nhiệt độ cao.

Có thể nhận thấy rằng trên các đường phụ thuộc ở Hình 6 có các đoạn bão hòa của biên độ chuẩn hóa A_0/A_{90} ở vùng công suất thấp, tương tự như sự phụ thuộc đã được quan sát thấy đối với các mẫu DND nghiên cứu.

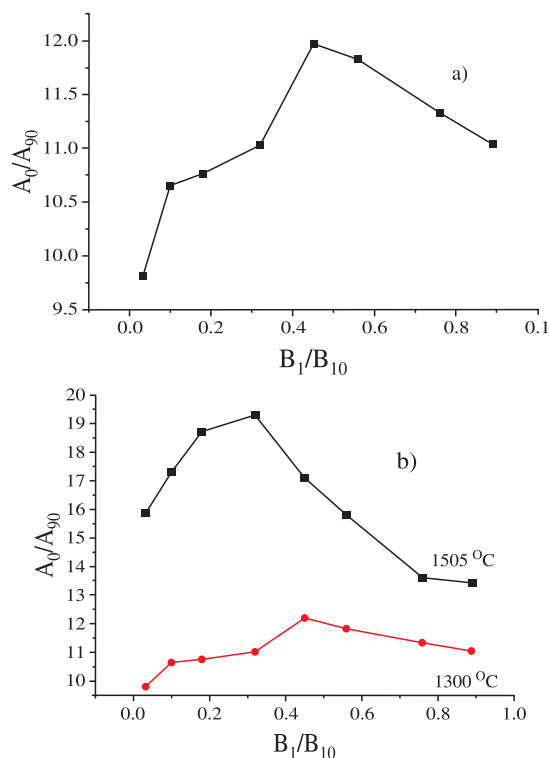


Hình 5. Tín hiệu EPR đồng pha (a) và vuông pha (b) của tâm P1 trong kim cương CVD đa tinh thể

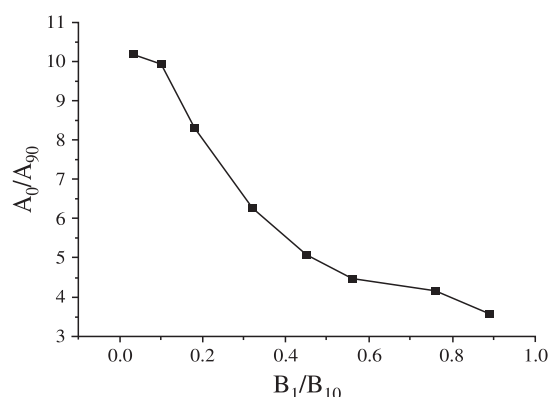
Sự bão hòa của biên độ tín hiệu đồng pha chuẩn hóa theo biên độ tín hiệu vuông pha A_0/A_{90} khi tăng công suất sóng SHF không quan sát thấy đối với các mẫu carbon khác như than đá (Hình 7), carbon nhiệt phân (Đồ thị không được đưa vào).

Như vậy, nếu mẫu hạt DND là lõi tinh thể kim cương với lớp vỏ vô định hình bao quanh thì tín hiệu EPR của DND cần phải được đóng góp từ các tâm thuận từ có thời gian phục hồi ngắn ($<10^{-5}$ s) trong lớp vỏ và các tâm thuận từ có thời gian phục hồi dài ($>10^{-5}$ s) trong lõi tinh thể. Bản chất của các tâm thuận từ trong lớp vỏ có thể gắn liền với các điện tử không ghép đôi trên các liên kết lỏng lẻo C-C, bản chất của các tâm thuận từ

trong lõi tinh thể không chỉ gắn với các liên kết lỏng lẻo C-C mà còn gắn với nguyên tử tạp chất nitrogen thay thế nguyên tử carbon ở nút mạng của tinh thể kim cương.



Hình 6. Sự phụ thuộc của biên độ tín hiệu đồng pha (A_0) chuẩn hóa theo biên độ tín hiệu vuông pha (A_{90}) vào công suất sóng SHF đối với mẫu kim cương CVD đơn tinh thể ban đầu (a) và sau khi bị chiếu xạ neutron và ủ nhiệt (b)



Hình 7. Sự phụ thuộc của biên độ tín hiệu đồng pha (A_0) chuẩn hóa theo biên độ tín hiệu vuông pha (A_{90}) vào công suất sóng SHF đối với than đá

Từ những phân tích ở trên có thể giả thiết về sự có mặt của nguyên tử nguyên tố nitrogen ở dạng tâm P1 trong các hạt DND, phổ EPR của nó không thể phân giải được trên nền tín hiệu cường độ mạnh từ tâm S1. Để ý rằng tâm P1, khác với tâm S1 luôn bão hòa ở công suất SHF nhỏ hơn 2 mW. Vì vậy chỉ cần một lượng nhỏ tâm thuận từ P1 cũng đã dẫn đến sự bão hòa của biên độ chuẩn hóa A_0/A_{90} ở các giá trị nhỏ của công suất sóng SHF.

Như vậy, bằng thực nghiệm đã chứng minh được rằng, sự bão hòa của tín hiệu EPR chuẩn hóa A_0/A_{90} là đặc trưng cho các tâm thuận từ có thời gian phục hồi thuận từ lớn, thậm chí trong trường hợp tinh thể kim cương bị chiếu xạ neutron và không còn quan sát thấy tín hiệu EPR từ tâm P1.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu phổ EPR của mẫu bột nano kim cương DND bị biến tính bằng cách đưa vào các tạp chất khác nhau trong quá trình tổng hợp thu được các kết quả sau đây:

- Tính thuận từ của các hạt DND có nguồn gốc chủ yếu từ các liên kết lỏng lẻo C-C (tâm S1) trên bề mặt hoặc bên trong lõi tinh thể nano kim cương.

- Nghiên cứu các quá trình phục hồi cho thấy sự tồn tại trong tinh thể nano kim cương tâm thuận từ với thời gian phục hồi lớn ($>10^{-5}$ s). Trong kim cương các tâm thuận từ như vậy là tâm P1, nguyên tử nitrogen thay thế nguyên tử carbon ở nút mạng của kim cương.

- Sự thay đổi giá trị của hệ số g và thời gian phục hồi thuận từ sau một năm bảo quản mẫu chứng tỏ sự loại bỏ các ứng suất trong hạt DND xuất hiện trong quá trình tổng hợp và sự tái tổ chức của các nguyên tử trong hạt DND.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Anh:

- [1] Dolmatov VYu, Shames AI, Ōsawa E, Vehanen A, Myllymäki V, Dorokhov AO, Martchukov VA, Kozlov AC, Naryzhny SYu, Smirnova AZ (2021), “*Detonation nanodiamonds: from synthesis theory to application practice*”, JAMT, 6(1), 54-80
- [2] Jean-Charles Arnault (2017), “*Nanodiamonds: Advanced Material Analysis, Properties and Applications*”, Elsevier, p. 504
- [3] Andrey A. Fokin, Peter R. Schreiner (2009) “*Band gap tuning in nanodiamonds: first principle computational studies*”, Molecular Physics, 107(8-12), 823-830.
- [4] Dischler, B. (2012), “*Impurity Defects in Diamond*” In: Handbook of Spectral Lines in Diamond. Springer, Berlin, Heidelberg, P. 303-367.
- [5] Yūki Katamune, Akira Izumi, Kimiyoshi Ichikawa, Satoshi Koizumi (2023), “*Heavy phosphorus doping of diamond by hot-filament chemical vapor deposition*”, Diamond and Related Materials, 134, 109789.
- [6] Peter Deák, Bálint Aradi, Moloud Kaviani, Thomas Frauenheim, Adam Gali (2014), “*Formation of NV centers in diamond: A theoretical study based on calculated transitions and migration of nitrogen and vacancy related defects*”, Phys. Rev. B, 89(7), 075203.
- [7] Bethany M. Hudak, Rhonda M. Stroud (2023), “*Atomically Precise Detection and Manipulation of Nitrogen-Vacancy Centers in Nanodiamonds*” ACS Nano, 17(8), 7241-7249.
- [8] P.R. Brosious, J.W. Corbett, J.C. Bourgoin (1974), “*EPR measurements in ion-implanted diamond*”, Physica Status Solidi (a), 21(2), 677-683.
- [9] W. V. Smith, P. P. Sorokin, I. L. Gelles, G. J. Lasher (1959), “*Electron-Spin Resonance of Nitrogen Donors in Diamond*”, Phys. Rev., 115, 1546-1552.
- [10] Stuart Turner, Oleg I. Lebedev, Olga Shenderova, Igor I. Vlasov, Jo Verbeeck, Gustaaf Van Tendeloo (2009), “*Determination of Size, Morphology, and Nitrogen Impurity Location in Treated Detonation Nanodiamond by Transmission Electron Microscopy*”, Adv. Funct. Mater, 19(13), 2116-2124.
- [11] Igor I. Vlasov, Olga Shenderova, Stuart Turner, Oleg I. Lebedev, Artem A. Basov, Ilmo Sildos, Mickel Rähn, Andrey A. Shiryaev, Gustaaf Van Tendeloo (2010), “*Nitrogen and Luminescent Nitrogen-Vacancy Defects in Detonation Nanodiamond*” Small, 6(5), 687-694.

Tiếng Nga:

- [12] А.Б. Ройцин, В.М. Маевский (1989), *Электронный парамагнитный резонанс поверхности твердых тел*, Успехи Физических Наук, 159, 297-333.
- [13] В.Г. Баев, Н.М. Лапчук (2007), “*Релаксационные процессы в кристаллах синтетического алмаза с учетом квадратурного сигнала ЭСР*” Доклады БГУИР, 20(4), 93-100.

Liên hệ:

TS. Nguyễn Thị Thanh Bình

Khoa Sư phạm, Trường Đại học Quảng Bình

Địa chỉ: 18 Nguyễn Văn Linh, Đồng Hới, Quảng Bình

Email: nguyenttbinh125@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/5/2024

Ngày gửi phản biện: 06/5/2024

Ngày duyệt đăng: 23/10/2024