

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT



**BÁO CÁO HỌC THUẬT
NĂM HỌC 2021-2022**

**HIỆN TƯỢNG NHÂN HẠT TẢI ĐIỆN TRONG CHẤT
BÁN DẪN**

Người báo cáo: Nguyễn Xuân Chung

Đơn vị: Bộ môn Vật lý, Khoa Khoa học Cơ bản

Hà Nội, 12/2021

BÁO CÁO HỌC THUẬT HỌC KỲ I, NĂM HỌC 2021-2022

Mục đích: Giúp người đọc hiểu về cơ chế nhân hạt tải điện trong chất bán dẫn, phương pháp khảo sát và ý nghĩa của hiện tượng này

Tên báo cáo:

HIỆN TƯỢNG NHÂN HẠT TẢI ĐIỆN TRONG CHẤT BÁN DẪN

Nguyễn Xuân chung

Bộ môn Vật lý, khoa Khoa học Cơ bản

Tóm tắt

Trong ngành khoa học nghiên cứu về điện và điện tử, nồng độ hạt tải điện đóng vai trò rất quan trọng trong việc xác định tính chất điện của vật liệu cũng như các linh kiện điện tử. Trong bài báo cáo này, tác giả sẽ giải thích các cơ chế của hiện tượng nhân hạt tải điện, bao gồm có nhân hạt tải điện cắt lượng tử không gian và đa exciton trong các hạt tinh thể nano bán dẫn, các yếu tố ảnh hưởng tới tốc độ nhân hạt tải điện, các hiện tượng tái hợp hạt tải điện trong chất bán dẫn, đặc biệt là trong các hạt tinh thể nano. Đồng thời, các ứng dụng của hiện tượng nhân hạt tải điện trong nghiên cứu và trong các ngành kỹ thuật điện điện tử cũng được trình bày và giải thích.

1. MỞ ĐẦU

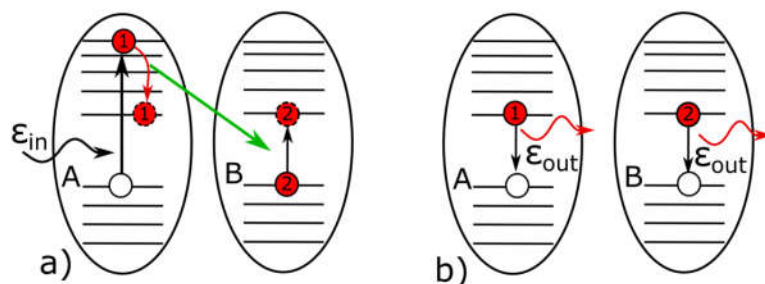
Trong nghiên cứu khoa học cũng như trong đời sống hiện nay, nhiều thiết bị điện tử hoạt động dựa trên hiện tượng quang điện được sử dụng rất nhiều như các photodiode, pin mặt trời, camera, cảm biến hồng ngoại, máy đo công suất... do chúng có nhiều tính năng quan trọng. Nguyên lý hoạt động của các thiết bị này được giải thích như sau: cảm biến của thiết bị hấp thụ photon từ các nguồn phát hoặc các photon tán xạ, phản xạ từ các vật thể, sau đó cảm biến tạo ra các hạt tải điện. Bằng cách đo số hạt tải điện được tạo ra, các thông tin về ánh sáng sẽ được thu và xử lý thông qua các bộ vi xử lý. Một trong những yếu tố quan trọng quyết định chất lượng và hiệu quả làm việc của thiết bị là độ nhạy sáng. Độ nhạy sáng được định nghĩa là tỷ số giữa lượng điện tích tự do được sinh ra dưới tác dụng của ánh sáng kích thích và số lượng hạt photon ánh sáng kích thích. Như vậy, nồng độ hạt tải điện được sinh

ra rất quan trọng. Khi có hiện tượng nhân hạt tải điện, số hạt mang điện được tăng lên và làm cho độ nhạy của thiết bị cao hơn. Nói cách khác, thiết bị sẽ hoạt động được trong điều kiện ánh sáng yếu hơn. Bằng cách kết hợp với các bộ lọc trung tính (ND filter) làm giảm cường độ ánh sáng đi vào cảm biến khi nguồn sáng có công suất quá cao, dải cường độ ánh sáng hoạt động của thiết bị sẽ được tăng lên. Nói cách khác, dải hoạt động của thiết bị được mở rộng về phía cường độ ánh sáng yếu nhờ vào hiện tượng nhân hạt tải điện, và được mở rộng về phía cường độ ánh sáng mạnh nhờ vào việc sử dụng các bộ lọc trung tính. Thời gian diễn ra quá trình nhân hạt tải điện phụ thuộc nhiều vào bản chất bán dẫn, mật độ sai hỏng mạng, kích thước các tinh thể nano, khoảng cách giữa chúng...

Yếu tố làm giảm nồng độ hạt tải điện tạo ra là hiện tượng tái hợp. Đối với hầu hết các vật liệu bán dẫn, hạt tải điện tự do được sinh ra trên vùng dẫn sẽ nhanh chóng tái hợp với lỗ trống ở vùng hóa trị, hoặc tái hợp với các mức năng lượng sai hỏng mạng tinh thể, thời gian tái hợp tùy thuộc vào loại bán dẫn, có thể từ vài chục ns tới vài chục μ s. Đối với các chuyển mức năng lượng của điện tử từ trạng thái kích thích tới các mức tạp hoặc các mức năng lượng sai hỏng do sai hỏng mạng gây ra, thời gian tái hợp thường ngắn cỡ ps. Trong khi đó, tái hợp phát xạ ánh sáng của điện tử trong tinh thể bán dẫn vùng cấm thẳng có thời gian cỡ ns, với các bán dẫn vùng cấm xiên thì thời gian tái hợp lâu hơn, cỡ μ s. Các hệ khảo sát hiện tượng nhân hạt tải điện trong phòng thí nghiệm có độ phân giải thời gian khác nhau và chúng được ứng dụng để khảo sát các vật liệu khác nhau.

2. PHÂN LOẠI HIỆN TƯỢNG NHÂN HẠT TẢI ĐIỆN

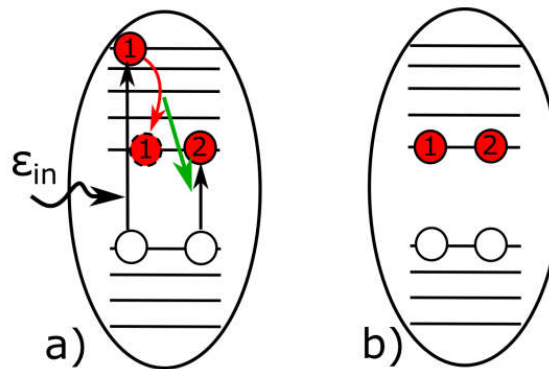
2.1. Nhân hạt tải điện cắt lượng tử không gian (SSQC-Spaced separated quantum cutting)



Hình 1. Sơ đồ giải thích hiện tượng nhân hạt tải điện không gian lượng tử, một photon có năng lượng lớn được hấp thụ bởi 1 hạt tinh thể nano, sau khi nhân hạt tải điện, có 2 exciton trong 2 hạt tinh thể nano.

Trong hiện tượng nhân hạt tải điện này, hạt tinh thể nano A hấp thụ một photon mang năng lượng ϵ_{in} cao hơn 2 lần năng lượng vùng cấm của chất bán dẫn. Một electron tự do sẽ xuất hiện trên vùng dẫn của tinh thể nano với phần năng lượng dư được tính từ đáy của vùng dẫn tới vị trí mức năng lượng của electron này. Phần năng lượng dư được truyền sang hạt tinh thể nano B bên cạnh và tạo ra 1 electron tự do trong hạt này. Kết quả là cả 2 hạt tinh thể A và B đều có điện tử tự do. Nếu không có hiện tượng nhân hạt tải điện SSQC này, phần năng lượng dư của electron trong hạt tinh thể A sẽ biến thành nhiệt (phonon) do electron ở trạng thái kích thích sẽ di chuyển xuống mức năng lượng thấp hơn. Như vậy, phần năng lượng dư thừa được sử dụng để tạo thêm hạt mang điện ở hạt tinh thể ở gần. Nếu không sử dụng cấu hình để thu hạt mang điện tự do thì hai điện tử trên vùng dẫn sẽ tái hợp với 2 lỗ trống ở vùng hóa trị và tạo ra 2 photon với năng lượng ϵ_{out} . Thời gian của SSQC diễn ra được ước tính cỡ khoảng ps.

2.2. Nhân hạt tải điện đa exciton (MEG-multiple exciton generation)



Hình 2. Sơ đồ giải thích cơ chế nhân hạt tải điện đa exciton. Quá trình nhân hạt tải điện diễn ra chỉ trong 1 hạt tinh thể nano, sau khi quá trình nhân hạt tải kết thúc, có 2 exciton được sinh ra trong cùng một hạt tinh thể nano.

Hiện tượng nhân hạt tải điện MEG thì tương tự như hiện tượng nhân hạt tải điện theo cơ chế SSQC. Điểm khác biệt ở đây là: trong MEG phần năng lượng dư của electron ở trạng thái kích thích được sử dụng để kích thích hạt tải điện ở trong cùng hạt tinh thể nano. Kết quả là trong một hạt tinh thể nano có electron tự do. Một trong hai electron này tự do này sẽ tái hợp với lỗ trống, năng lượng giải phóng được truyền cho điện tử còn lại ở trên vùng dẫn. Kết quả là lại có 1 electron tự do được kích thích nhảy lên mức năng lượng cao hơn. Quá trình tuần hoàn này diễn ra đồng thời với quá trình chuyển mức năng lượng thấp hơn (cooling

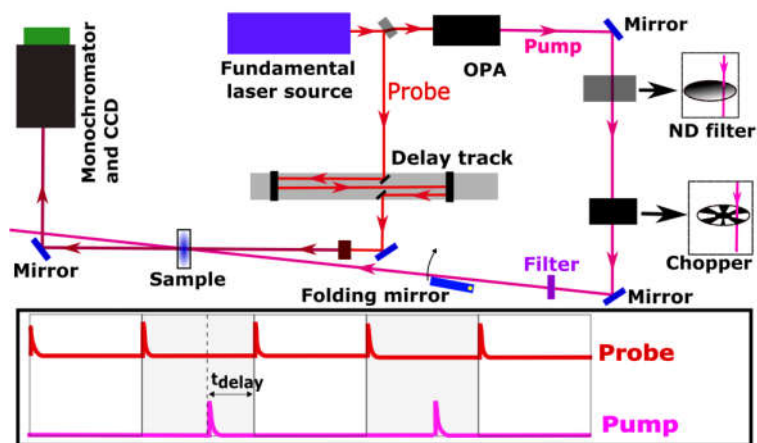
down) của điện tử kích thích và các phonon đồng thời được tạo ra, năng lượng điện tử mất dần và quá trình nhân hạt tải điện không diễn ra nữa.

Như vậy có thể nói cơ chế nhân hạt tải điện SSQC có lợi do số lượng electron được sinh ra nhiều hơn số photon hấp thụ, trong khi đó kết quả của MEG không làm tăng số electron do quá trình phát xạ phonon và electron bị mất mát năng lượng.

3. PHƯƠNG PHÁP KHẢO SÁT HIỆN TƯỢNG NHÂN HẠT TẢI ĐIỆN

3.1. Hấp thụ cảm ứng

Hệ đo hấp thụ cảm ứng, hay còn gọi là hệ pump-probe, bao gồm hai nguồn laser, thông thường là các nguồn xung với công suất cao, đồng thời phân xung laser phải đảm bảo rất hẹp, cỡ khoảng vài chục fs (10^{-15} s). Tần số lặp của xung laser thông thường là vài kHz để rút ngắn thời gian đo lường. Tia pump có tác dụng kích thích electron trong bán dẫn từ vùng hóa trị lên vùng dẫn, tia này được gọi là pump (hay kích thích). Tia probe thường có cường độ nhỏ hơn tia pump và được dùng để kích thích hạt tải điện tự do từ vùng dẫn lên mức năng lượng cao hơn, tia này được gọi là probe. Tần số lặp của tia pump bằng một nửa tần số lặp của tia probe nhờ vào chopper có tốc độ quay không đổi trong suốt quá trình khảo sát.



Hình 4. Sơ đồ hệ khảo sát hiện tượng nhân hạt tải điện thông qua phép đo hấp thụ cảm ứng (pump-probe absorption)

Cường độ hấp thụ cảm ứng được tính bằng công thức:

$$IA = \frac{I_{no\ pump} - I_{with\ pump}}{I_{with\ pump}}$$

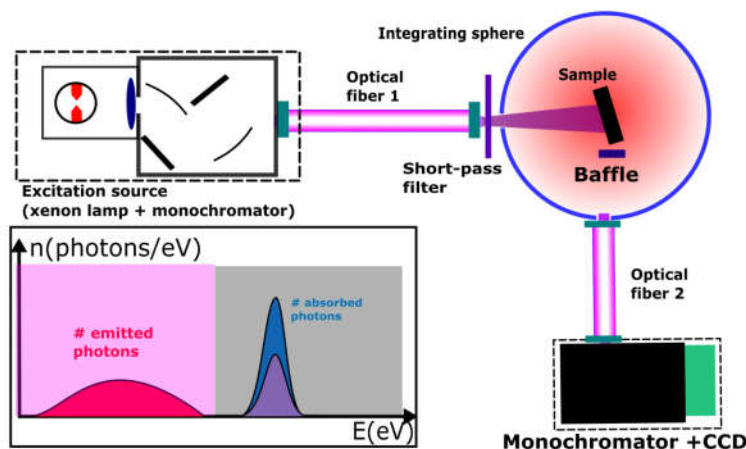
IA: cường độ hấp thụ cảm ứng

$I_{no\ pump}$ là cường độ tia probe khi không có tia pump

$I_{with\ pump}$ là cường độ tia probe khi có tia pump

Bằng cách khảo sát sự phụ thuộc của biên độ hấp thụ cảm ứng theo bước sóng kích thích, quá trình nhân hạt tải điện sẽ được suy luận. Hệ đo hiện tượng hấp thụ cảm ứng được sử dụng rộng rãi cho các chất bán dẫn khác nhau, tuy nhiên giá thành rất cao và yêu cầu nhiều chi phí vận hành.

3.2. Sử dụng quả cầu tích phân



Hình 4. Sơ đồ hệ đo hiệu suất lượng tử sử dụng quả cầu tích phân. Mẫu được đặt trong quả cầu và được kích thích bằng ánh sáng đơn sắc. Phổ ánh sáng được máy đơn sắc ghi lại trên cảm biến CCD và hiệu suất phát xạ được tính.

Đây là phương pháp xác định số hạt tải điện tự do dựa vào số lượng photon được phát ra sau khi hạt nano được kích thích bởi photon. Trong hệ đo này, mẫu được đặt trong 1 quả cầu tích phân, do đó toàn bộ số photon phát ra từ mẫu được dẫn về máy đơn sắc monochromator và phổ phát xạ cũng như truyền qua của mẫu được ghi lại trên CCD. Từ phổ truyền qua. Trong khi đó, số hạt photon được phát xạ tỷ lệ với số hạt tải điện được tạo ra trên vùng dẫn được tính dựa vào phổ phát xạ huỳnh quang của mẫu. Dựa vào tỷ số giữa số photon phát xạ và photon hấp thụ, sự tồn tại của hiện tượng nhân hạt tải điện sẽ được kết luận.

4. KẾT LUẬN

Như vậy, hiện tượng nhân hạt tải điện rất quan trọng trong nghiên cứu khoa học cũng như trong ngành kỹ thuật điện tử. Hiện tượng nhân hạt tải điện có cơ chế hoạt động khác nhau tùy thuộc vào bản chất của chất bán dẫn. Thời gian diễn ra hiện tượng nhân hạt tải điện ứng với các cơ chế khác nhau cũng rất khác nhau, với khoảng thời gian từ ps đến μ s. Các hệ

khảo sát hiện tượng nhân hạt tải điện nói chung có chi phí cao, có thể kết hợp với các phương pháp khác để hạ chi phí và ứng dụng trong các phòng thí nghiệm ở Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. N.X. Chung, R. Limpens, and T. Gregorkiewicz, *Photoluminescence Quantum Yield in Ensembles of Si Nanocrystals*, *Advanced Optical Materials* **1600709**, 1-8, (2017)
2. W.D.A.M. De Boer, D. Timmerman, T. Gregorkiewicz, H. Zhang, W.J. Buma, A.N. Poddubny, and I.N. Yassievich, *Self-trapped exciton state in Si nanocrystals revealed by induced absorption*, *Physical Review B* **85** 16, 161409 (2012).
3. N.X. Chung, R. Limpens, C. Weerd, A. Lesage, M. Fujii, and T. Gregorkiewicz, *Toward practical carrier multiplication: Donor/acceptor codoped Si nanocrystals in SiO₂*, *ACS Photonics*, **5**, 2843-2849 (2018).
4. C. Delure, M. Lannoo, G. Allan, and E. Martin, Auger and Coulomb charging effects in semiconductor nanocrystallites, *Physical Review Letters*, **75**, 2228-2231, (1995).