

Giản đồ pha trật tự từ trong bán dẫn từ pha loãng khi dải tạp được lấp đầy do mất trật tự chéo

Magnetic phase diagram in filled impurity band diluted magnetic semiconductor due to diagonal disorder

Nguyễn Hữu Nhã^a, Phan Văn Nhâm^{b,c*}
Nguyen Huu Nha^a, Phan Van Nham^{b,c*}

^aTrường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam
^aDepartment of Theoretical Physics, VNUHCM-University of Science, Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam
^bViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam
^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam
^cKhoa Môi trường và Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam
^cDepartment of Environment and Natural Science, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 13/7/2021, ngày phản biện xong: 12/8/2021, ngày chấp nhận đăng: 22/11/2021)

Tóm tắt

Sự cạnh tranh các trạng thái trật tự từ do ảnh hưởng của mất trật tự trong hệ bán dẫn từ pha loãng với dải tạp lấp đầy được khảo sát. Với gần đúng trường trung bình động, hàm Green của hạt tải trong mô hình mạng Kondo khi có mất trật tự chéo được xác định. Hàm cảm ứng spin tĩnh tiếp tục được khảo sát cho phép ta nghiên cứu bức tranh thăng giáng từ trong hệ. Tính chất của hàm cảm ứng cho ta được giản đồ pha mô tả các trạng thái trật tự từ khi nhiệt độ thấp. Giản đồ pha cho ta thấy, khi dải tạp lấp đầy hoàn toàn, hệ có thể tồn tại ở trạng thái sắt từ hoặc phản sắt từ tùy vào mức độ mất trật tự trong hệ. Bản chất cạnh tranh của các trạng thái trật tự từ do ảnh hưởng của thể mất trật tự vì vậy được thảo luận một cách chi tiết.

Từ khóa: Bán dẫn từ pha loãng; giản đồ pha; sắt từ; phản sắt từ; lý thuyết trường trung bình động.

Abstract

The competition of the magnetic stabilities under the influence of a disorder in a diluted magnetic semiconductor is addressed. In the framework of the dynamical mean field theory, the Green function of carriers described in the Kondo lattice model with the diagonal disorder is established. The static spin susceptibility function in the paramagnetic state is then examined and the low temperature magnetic diagram in the system is discussed. The phase diagrams show us that either ferromagnetic or antiferromagnetic stability might appear if an impurity band is completely filled, that depends on the disorder effect in the system. The nature of the magnetic competition in the influence of the disorder then is discussed in detail.

Keywords: Diluted magnetic semiconductor; phase diagram; ferromagnetic; antiferromagnetic; dynamical mean-field theory.

©2021 Bản quyền thuộc Đại học Duy Tân

* *Corresponding Author:* Phan Van Nham; Faculty of Nature Sciences, Duy Tan University, 55000, Danang, Vietnam; Institute of Research and Development, Duy Tan University, 55000, Danang, Vietnam
Email: phanvannham@duytan.edu.vn

1. Mở đầu

Bán dẫn từ pha loãng đã và đang là một trong những vật liệu thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu vật liệu vì những khả năng mà vật liệu này mang lại trong công nghệ điện tử học spin [1,2]. Thực vậy, khi pha tạp một lượng nhỏ các ion từ vào vật liệu bán dẫn, ta có vật liệu bán dẫn từ pha loãng. Với vật liệu này, hạt tải vừa mang tính chất điện của bán dẫn lại vừa có tính chất từ khi có tương tác từ với các ion pha tạp. Vì vậy, với các chip bán dẫn từ pha loãng, các tính chất đối lập là lưu trữ và xử lý thông tin có thể tồn tại trên cùng một thiết bị điện tử. Ở vật liệu bán dẫn từ pha loãng này, ngoài khảo sát các tính chất điện của hệ, tính chất từ cũng thu hút sự tập trung nghiên cứu của các nhà vật lý [3,4]. Trong những năm trước, người ta mới chỉ quan sát được trạng thái sắt từ (FM) của hệ.

Khi đó, dải tạp chất của hệ thường chưa lấp đầy. Gần đây, công nghệ điện tử học spin phát triển và nhận thấy với những vật liệu ở trạng thái phản sắt từ (AF) có thể có nhiều ứng dụng hơn vật liệu FM [5,6]. Điều đó cho thấy, việc khảo sát cả trạng thái AF trong bán dẫn từ pha loãng là hết sức cần thiết.

Gần đây, một số nghiên cứu về trạng thái AF trong bán dẫn từ pha loãng đã được tiến hành và khẳng định trạng thái AF có thể tồn tại trong bán dẫn từ pha loãng khi dải tạp gần như lấp đầy hoàn toàn [7]. Trạng thái AF có thể quan sát được khi tương tác từ đủ lớn [7]. Tuy nhiên, ảnh hưởng của mất trật tự lên trạng thái AF hay cạnh tranh giữa trạng thái AF và FM vẫn chưa được khảo sát một cách chi tiết. Với vật liệu pha tạp như bán dẫn từ pha loãng, ảnh hưởng của mất trật tự luôn đóng một vai trò hết sức quan trọng. Nghiên cứu ảnh hưởng của mất trật tự lên cạnh tranh các trạng thái trật tự từ trong vật liệu bán dẫn từ pha loãng vì vậy là hết sức cần thiết. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ khảo sát chi tiết các giản đồ pha mô tả cạnh

tranh trật tự từ trong bán dẫn từ pha loãng thông qua tính chất của hàm cảm ứng spin tĩnh. Hàm cảm ứng này được xác định trong pha thuận từ (PM). Khi hàm cảm ứng phân kỳ, nó cho ta tín hiệu thể hiện sự chuyển pha trạng thái trật tự từ. Tùy vào giá trị xung lượng mà hàm cảm ứng spin tĩnh phân kỳ trước mà hệ có thể ở các trạng thái trật tự từ khác nhau. Hàm cảm ứng spin tĩnh được xác định thông qua hàm Green cũng như hàm năng lượng riêng của hạt tải, được xác định qua lý thuyết trường trung bình động áp dụng cho mô hình mạng Kondo khi tính tới mất trật tự chéo [8].

Bài báo được chia làm bốn phần. Ngoài phần mở đầu thì phần 2 mô tả cơ sở lý thuyết áp dụng để tính hàm cảm ứng spin tĩnh. Phần 3 trình bày kết quả tính số, mô tả giản đồ pha các trạng thái trật tự từ. Cuối cùng, phần 4 là phần kết luận của bài báo.

2. Cơ sở lý thuyết

Trong phạm vi bài báo này, chúng tôi tập trung khảo sát những tính chất từ của hệ bán dẫn từ pha loãng do ảnh hưởng của mất trật tự, vì vậy, để đơn giản nhất chúng tôi sử dụng mô hình mạng Kondo khi có mất trật tự chéo. Trong biểu diễn số lấp đầy, Hamiltonian của mô hình có thể được viết như sau

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + 2J \sum_i \alpha_i S_i^z s_i^z + \sum_i (U\alpha_i - \mu)n_i. \quad (1)$$

Ở đây, chúng tôi đã sử dụng các ký hiệu $c_{i\sigma}^\dagger$ ($c_{i\sigma}$) là toán tử sinh (hủy) hạt tải tại nút i có spin σ . Số hạng đầu tiên vì vậy mô tả sự nhảy nút của hạt tải trong gần đúng liên kết chặt. Số hạng thứ 2 mô tả tương tác từ Hund giữa spin của hạt tải với spin định xứ. J là cường độ tương tác từ. Tiếp theo, U thể hiện cường độ mất trật tự. Khi có pha tạp từ, $\alpha_i=1$, hệ sẽ tồn tại đồng thời mất trật tự và tương tác từ. Ngược lại, nếu tại nút mạng không có pha tạp từ, $\alpha_i=0$, hệ trở thành bán dẫn thông thường. Trong Hamiltonian (1), μ là thế hóa.

Để xác định hàm cảm ứng spin cho hạt tải mô tả trong Hamiltonian (1), trước hết chúng tôi thiết lập các mối liên hệ của hàm Green và năng lượng riêng của hạt tải. Trên cơ sở của lý thuyết trường trung bình động, hàm Green của hạt tải $G_\sigma(i\omega_n)$ ở tần số Matsubara ω_n liên hệ với năng lượng riêng $\Sigma_\sigma(i\omega_n)$ theo công thức

$$G_\sigma(i\omega_n) = \int d\varepsilon \rho(\varepsilon) \frac{1}{i\omega_n - \varepsilon + \mu - \Sigma_\sigma(i\omega_n)}, \quad (2)$$

với $\omega_n = (2n+1)\pi T$ và T là nhiệt độ còn $\rho(\varepsilon)$ là hàm mật độ trạng thái của hạt tải không tương tác. Chú ý rằng, ở gần đúng số chiều vô hạn trong lý thuyết trường trung bình động, cả hàm Green và năng lượng riêng đều không phụ thuộc vào xung lượng.

Cơ sở của lý thuyết trường trung bình động là hàm Green ở phương trình (2) trùng với hàm Green của hạt tải mô tả bởi Hamiltonian (1) [8]. Với lý thuyết tích phân phiếm hàm, ta có thể

$$\chi(\mathbf{q}) = T^2 \sum_{ijn, \sigma\sigma'} e^{-i\mathbf{q}(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_j)} \frac{dG_{ii, \sigma}(i\omega_n)}{dh_{j\sigma'}} \Big|_{h=0} \sigma\sigma', \quad (5)$$

với $h_{j\sigma}$ là từ trường ngoài. Với kết quả của hàm Green ở công thức (3), ta có thể viết một cách tường minh hơn

$$\begin{aligned} \chi(\mathbf{q}) = & - \sum_n \frac{4T^2}{2\chi_0^{-1}(\mathbf{q}, i\omega_n) + \sum_\sigma G_\sigma^{-2}(i\omega_n) - S_{n\sigma}^{-1}} \\ & + \sum_{\alpha s \sigma n} \frac{2T^2 \sigma \gamma_{\alpha s}(\mathbf{q})}{2S_{n\sigma} Z_\sigma^{\alpha s}(i\omega_n) \chi_0^{-1}(\mathbf{q}, i\omega_n) + \sum_\sigma G_\sigma^{-2}(i\omega_n) - S_{n\sigma}^{-1}}, \end{aligned} \quad (6)$$

trong đó

$$S_{n\sigma} = \sum_{\alpha s} \frac{W_{\alpha s}}{[Z_\sigma^{\alpha s}(i\omega_n)]^2}$$

và

$$\sum_{\alpha' s'} \Pi_{\alpha s, \alpha' s'}(\mathbf{q}) \gamma_{\alpha' s'}(\mathbf{q}) = \Omega_{\alpha s}(\mathbf{q}),$$

với

$$\Pi_{\alpha s, \alpha' s'}(\mathbf{q}) = \delta_{\alpha\alpha'} \delta_{ss'} - \sum_{n\sigma} \frac{W_{\alpha s} [Z_\sigma^{\alpha s}(i\omega_n)]^{-1} - G_\sigma(i\omega_n)}{S_{n\sigma} Z_\sigma^{\alpha' s'}(i\omega_n)}$$

xác định được hàm Green của hạt tải trên cơ sở của công thức (1). Kết quả cho ta

$$G_\sigma(i\omega_n) = \sum_{\alpha s} \frac{W_{\alpha s}}{\mathcal{G}_\sigma^{-1}(i\omega_n) - (Js\sigma + U)\alpha}. \quad (3)$$

Với $\mathcal{G}_\sigma(i\omega_n)$ là hàm Green của trường hiệu dụng và $W_{\alpha s}$ là các trọng khối. Hàm Green của trường hiệu dụng liên hệ với hàm Green của hạt tải và năng lượng riêng theo phương trình Dyson

$$G_\sigma^{-1}(i\omega_n) = \mathcal{G}_\sigma^{-1}(i\omega_n) - \Sigma_\sigma(i\omega_n). \quad (4)$$

Như vậy, các phương trình (2-4) cho ta một hệ phương trình tự hợp. Giải hệ phương trình tự hợp này bằng phương pháp lặp có thể cho ta kết quả của hàm Green cũng như năng lượng riêng của hạt phụ thuộc vào tần số. Kết quả này giúp chúng ta tính toán hàm cảm ứng spin để khảo sát các tính chất từ của hệ. Thực vậy, hàm cảm ứng spin tĩnh có thể xác định thông qua hàm Green như sau:

$$-\frac{1}{2} \sum_{n\sigma\sigma'} \frac{R_n(\mathbf{q})W_{\alpha s} [Z_{\sigma}^{\alpha s}(i\omega_n)^{-1} - G_{\sigma}(i\omega_n)]}{S_{n\sigma}S_{n\sigma'}Z_{\sigma}^{\alpha s'}(i\omega_n)} \sigma\sigma',$$

$$\Omega_{\alpha s}(\mathbf{q}) = -2 \sum_{n\sigma} \frac{R_n(\mathbf{q})W_{\alpha s} [Z_{\sigma}^{\alpha s}(i\omega_n)^{-1} - G_{\sigma}(i\omega_n)]\sigma}{S_{n\sigma}}.$$

Ở đây

$$R_n(\mathbf{q}) = \frac{2}{2\chi_0^{-1}(\mathbf{q}, i\omega_n) + \sum_{\sigma} G_{\sigma}^{-2}(i\omega_n) - S_{n\sigma}^{-1}}$$

và

$$\chi_0(\mathbf{q}, i\omega_n) = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} G_{\sigma}(\mathbf{k} + \mathbf{q}, i\omega_n)G_{\sigma}(\mathbf{k}, i\omega_n).$$

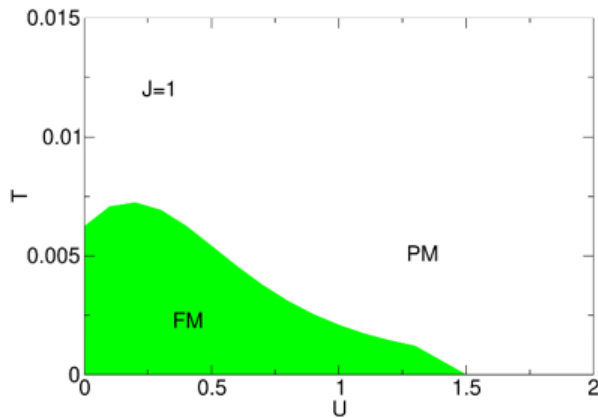
$\chi_0(\mathbf{q}, i\omega_n)$ được gọi là hàm cảm ứng không tương tác. Rõ ràng, hàm cảm ứng spin tĩnh phụ thuộc vào xung lượng chỉ thông qua hàm cảm ứng không tương tác $\chi_0(\mathbf{q}, i\omega_n)$.

Như đã thảo luận ở phần trước, hàm cảm ứng được xác định trong pha thuận từ, khi nhiệt độ giảm, thăng giáng nhiệt nhằm phá vỡ trạng thái trật tự của spin bị giảm theo. Kết quả thăng giáng từ tăng dần và khi nhiệt độ đủ nhỏ, hệ bị phá vỡ đối xứng tự phát và trạng thái trật tự từ xuất hiện. Khi đó hàm cảm ứng phân kỳ. Tùy vào sự phân kỳ của hàm cảm ứng spin tĩnh tại mỗi xung lượng khác nhau mà ta có trạng thái trật tự từ khác nhau. Khi hàm cảm ứng phân kỳ tại biên vùng Brillouin $\mathbf{q} = (\pi, \pi, \dots, \pi)$, chuyển pha thuận-phản sắt từ (PM-AF) xảy ra, còn khi hàm cảm ứng phân kỳ tại tâm vùng Brillouin $\mathbf{q} = \mathbf{0}$, ta có chuyển pha thuận - sắt từ (PM-FM).

3. Kết quả tính số và thảo luận

Như vậy, với kết quả của hàm Green và năng lượng riêng của hạt tải tính toán tự hợp từ lý thuyết trường trung bình động, ta có thể xác định được hàm cảm ứng spin tĩnh dựa trên công thức (6). Bắt đầu bằng một giá trị bất kỳ của

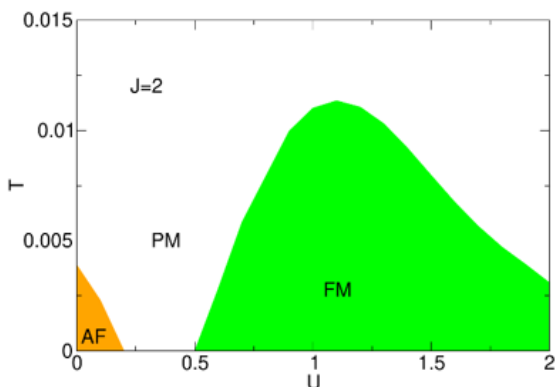
năng lượng riêng $\Sigma_{\sigma}(i\omega_n)$, hàm Green $G_{\sigma}(i\omega_n)$ được xác định từ công thức (2). Từ đó chúng ta xác định hàm Green của trường hiệu dụng $\mathcal{G}_{\sigma}(i\omega_n)$ theo phương trình Dyson ở công thức (4) và từ đó ta tính được hàm Green của điện tử trong gần đúng trường hiệu dụng từ phương trình (5). Với kết quả của hàm Green này, ta lại tính lại được năng lượng riêng từ phương trình Dyson. Quá trình lặp lại được tiếp tục cho tới khi sự sai khác về giá trị của năng lượng riêng hay hàm Green giữa hai lần lặp liên tiếp không nhiều. Bài toán hội tụ và kết quả chúng ta thu được hàm Green và năng lượng riêng tại mỗi giá trị của tần số. Thay kết quả vào (6) ta thu được hàm cảm ứng spin tĩnh tương ứng với mỗi cấu hình xung lượng. Khảo sát hàm cảm ứng này theo nhiệt độ ta có thể xác định được nhiệt độ giới hạn mà tại đó hàm cảm ứng bị phân kỳ. Tùy vào việc hàm cảm ứng bị phân kỳ ứng với giá trị nào của xung lượng mà ta có thể xác định được trạng thái trật tự hoặc FM hoặc AF của hệ. Trong tất cả tính toán dưới đây, chúng ta xét trường hợp dải tạp lấp đầy hoàn toàn, tương ứng với mật độ hạt tải và nồng độ tạp chất bằng nhau, $n = x$. Khi đó, thế hóa được thay đổi để thỏa mãn điều kiện này.



Hình 1. Giản đồ pha các trạng thái từ (FM: xanh lá cây, PM: trắng) của hệ phụ thuộc vào nhiệt độ T và mất trật tự U cho $J=1$ và $n=x=0.1$.

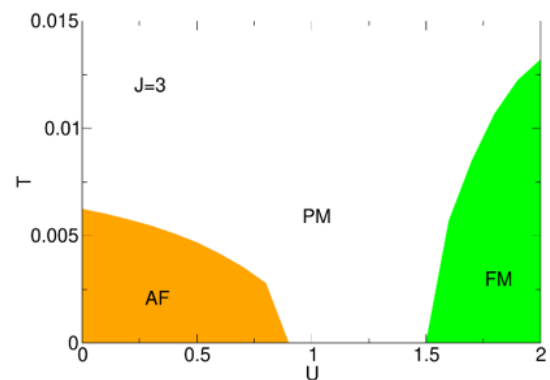
Hình 1 mô tả giản đồ pha trạng thái trật tự từ của hệ trong mặt phẳng (T, U) cho trường hợp $J=1$. Từ hình vẽ ta nhận thấy, trong toàn phạm vi xác định của mất trật tự ta chỉ quan sát được chuyển pha thuận-sắt từ khi giảm nhiệt độ. Ở vùng nhiệt độ cao, hệ ở trạng thái thuận từ, khi giảm nhiệt độ, tồn tại một giá trị của nhiệt độ mà tại đó hàm cảm ứng phân kỳ và hệ ở trạng thái FM. Tuy nhiên, trạng thái FM chỉ tồn tại khi U đủ nhỏ. Thực vậy, khi tăng U , mất trật tự làm phá vỡ sự sắp xếp có hướng của các spin của hạt tải và kết quả hệ có thể chuyển sang trạng thái thuận từ nếu U đủ lớn.

Tăng thế tương tác trao đổi Hund J , với $J=2$, Hình 2 cho chúng ta thấy bức tranh trật tự từ của hệ có sự thay đổi rõ rệt khi chịu sự ảnh hưởng của mất trật tự.



Hình 2: Giản đồ pha các trạng thái từ (FM: xanh lá cây, AF: cam, PM: trắng) của hệ phụ thuộc vào nhiệt độ T và mất trật tự U cho $J=2$ và $n=x=0.1$

Khi không có mất trật tự, $U=0$, hệ có thể tồn tại trạng thái phản sắt từ. Điều này có thể giải thích khi J đủ lớn và U nhỏ, dải tạp được tách rời hoàn toàn so với dải chính của chất bán dẫn [9], vì vậy, khi dải tạp được lấp đầy hoàn toàn thì khả năng nhảy nút của điện tử tạp quyết định trạng thái FM không còn. Thay vào đó, chỉ còn sự nhảy nút ảo, ưu tiên trạng thái AF. Tăng U , mất trật tự làm giảm khả năng sắp xếp spin của hạt tải theo hướng xác định và trạng thái trật tự bị thu hẹp. Khi U đủ lớn, ví dụ $U > 0.5$, ta nhận thấy trạng thái FM bắt đầu hình thành và nhiệt độ chuyển pha tăng mạnh khi tăng U . Lúc này, khi U đủ lớn, dải tạp và dải chính bị chồng chập lên nhau vì vậy nó tăng cường khả năng nhảy nút của hạt tải và dẫn tới tăng cường trạng thái trật tự FM. Nếu tiếp tục tăng U , thế mất trật tự lại đóng góp vào việc phá vỡ trật tự đối xứng của các mô-men từ và làm giảm khả năng ổn định của trạng thái FM. Nhiệt độ chuyển pha PM-FM vì vậy lại giảm khi U tăng.



Hình 3: Giản đồ pha các trạng thái từ (FM: xanh lá cây, AF: cam, PM: trắng) của hệ phụ thuộc vào nhiệt độ T và mất trật tự U cho $J=3$ và $n=x=0.1$

Tiếp tục tăng J , ví dụ $J=3$ như trong Hình 3, chúng ta nhận thấy bức tranh trật tự từ trong hệ do ảnh hưởng của mất trật tự không thay đổi, tuy có dịch về phía với giá trị lớn hơn của U . Vùng của trạng thái AF được mở rộng hơn với phạm vi lớn hơn của độ mất trật tự. Điều này có thể hiểu được vì khi J lớn, thế tương tác từ

đóng vai trò quan trọng hình thành và duy trì trạng thái trật tự từ của hệ. Độ mất trật tự vì vậy phải đủ lớn để phá vỡ trật tự đối xứng. Trong trường hợp J lớn hơn này, ta cũng quan sát thấy nhiệt độ chuyển pha trạng thái trật tự từ cũng tăng lên. Chú ý rằng, trong tất cả các trường hợp của thể tương tác Hund, vùng phản sắt từ và sắt từ luôn tách xa nhau, ở giữa là trạng thái thuận từ. Như vậy, dưới sự ảnh hưởng của mất trật tự, hệ có thể chuyển từ trạng thái phản sắt từ, sang thuận từ rồi trạng thái sắt từ. Một tính chất thú vị có thể quan sát được ở vật liệu bán dẫn từ pha loãng.

4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã khảo sát chi tiết bức tranh giản đồ pha mô tả các trạng thái trật tự từ có thể của hệ bán dẫn từ pha loãng khi dải tạp được lấp đầy khi có mặt của mất trật tự. Bằng gần đúng trường trung bình động, chúng tôi có thể thu được hàm Green và năng lượng riêng của hạt tải từ đó cho phép xác định hàm cảm ứng spin tĩnh. Khảo sát tính phân kỳ của hàm cảm ứng với những cấu hình xung lượng khác nhau giúp chúng tôi xác định được các trạng thái trật tự từ khác nhau của hệ. Khi thể tương tác Hund nhỏ, chỉ trạng thái sắt từ hình thành. Trạng thái sắt từ này bị suy giảm khi tăng cường độ mất trật tự. Khi tăng thể tương

tác từ, trạng thái phản sắt từ hình thành ở vùng mất trật tự nhỏ. Khi tăng mất trật tự, trạng thái phản sắt từ này cũng bị suy yếu và thay vào đó trạng thái sắt từ hình thành khi mất trật tự đủ lớn. Nếu tiếp tục tăng độ mất trật tự, trạng thái sắt từ này bị suy giảm và biến mất khi thể mất trật tự đủ lớn. Kết quả của nghiên cứu cho ta được bức tranh tương đối trọn vẹn về cạnh tranh các trạng thái trật tự từ trong hệ bán dẫn từ pha loãng khi dải tạp được lấp đầy hoàn toàn.

Tài liệu tham khảo

- [1] T. Jungwirth, J. Wunderlich, V. Novák, K. Olejník, B.L. Gallagher, R.P. Campion, K.W. Edmonds, A.W. Rushforth, A.J. Ferguson, P. Němec. (2014). *Rev. Mod. Phys.* 86, 855.
- [2] T. Dietl, H. Ohno. (2014). *Rev. Mod. Phys.* 86 187.
- [3] O. Fedorych, E.M. Hankiewicz, Z. Wilamowski, J. Sadowski. (2002). *Phys. Rev. B* 66, 045201.
- [4] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand. (2000). *Science* 287, 1019.
- [5] M. Gryglas-Borysiewicz, A. Kwiatkowski, P. Juszyński, Z. Ogorzałek, K. Puzniak, M. Tokarczyk, G. Kowalski, M. Baj, D. Wasik, N. Gonzalez Szwacki *et al.*. (2020). *Phys. Rev. B* 101, 054413.
- [6] J. P. T. Santos, M. Marques, L. K. Teles, and L. G. Ferreira. (2010). *Phys. Rev. B* 81, 115209.
- [7] V.-N. Phan, H.-N. Nguyen. (2020). *Phys. Rev. B* 102, 125202.
- [8] A. Georges, G. Kotliar, W. Krauth, M.J. Rozenberg. (1996). *Rev. Mod. Phys.* 68, 13.