

## BÃY QUANG HỌC NGUYÊN TỬ LẠNH TRUNG HOÀ DỰA TRÊN CÁC MODE PLASMON BỀ MẶT

GS.TS. Nguyễn Ái Việt<sup>1</sup>, ThS. Nguyễn Thị Phương Lan<sup>2</sup>, ThS. Đỗ Chí Nghĩa<sup>3</sup>

**Tóm tắt:** Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một sơ đồ bẫy quang học nguyên tử lạnh dựa trên các mode plasmon bề mặt. Các mode plasmon bề mặt được sinh ra khi một chùm sáng Bessel bị phản xạ toàn phần trên một đế điện môi phẳng được phủ một lớp màng kim loại rất mỏng trên nó. Với phương pháp này, nguyên tử lạnh di chuyển gần bề mặt của màng mỏng bị bắt bẫy. Các mode plasmon bề mặt tạo ra một trường evanescent, sóng suy giảm từ bề mặt màng mỏng sinh ra một thế quang học để hút nguyên tử lạnh trung hòa. Chúng tôi xét một số điều kiện biên có thể dẫn đến lời giải các trạng thái liên kết không tầm thường. Kết quả của chúng tôi so sánh được với một số mô hình bẫy gần đây.

**Từ khoá:** Bẫy quang học, nguyên tử lạnh, mode plasmon.

### 1. MỞ ĐẦU

Bẫy các nguyên tử lạnh trong một thể tích không gian bị giới hạn là một vấn đề vật lý cơ bản được quan tâm đáng kể ngay từ xuất phát điểm là các khảo sát vật lý với một lượng nhỏ các nguyên tử cho đến sự phát triển của công nghệ mới dựa trên sự định xứ của chuyển động không gian của các nguyên tử. Các nguyên tử lạnh bị bẫy được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của vật lý cũng như mở ra những triển vọng mới cho ngành vật lý nhiệt độ thấp. Bẫy nguyên tử lạnh cung cấp một khả năng để nghiên cứu các quá trình va chạm trong các mẫu nguyên tử lạnh [2]. Nguyên tử lạnh bị giam cầm có thể được sử dụng trong việc hình thành các phân tử lạnh [3] và trong nghiên cứu các hiệu ứng thống kê lượng tử của tập hợp các nguyên tử ở nhiệt độ thấp như ngưng tụ Bose – Einstein. Thời gian sống của bẫy phân tử lạnh vào khoảng  $\frac{1}{2}$  giây, do đó, việc tạo ra các nguyên tử và phân tử lạnh chuyển động rất chậm mở ra một hướng nghiên cứu mới trong quang phổ học phân tử và một số thành tựu nổi bật của lĩnh vực này về các trạng thái lượng tử đã được trao giải Nobel Vật lý 2012. Một số mẫu bẫy quang học nguyên tử lạnh cũng đã được đề xuất như sử dụng dây dẫn quang [4 – 5], hoặc cacbon nanotube [6],...

Trong những năm gần đây, plasmon bề mặt đang được quan tâm nhiều do những ứng dụng to lớn của chúng trong các kỹ thuật vật lý mới và công nghệ mới [7 – 10].

<sup>1</sup> Viện Vật lý

<sup>2,3</sup> Trường ĐHSP Hà Nội 2

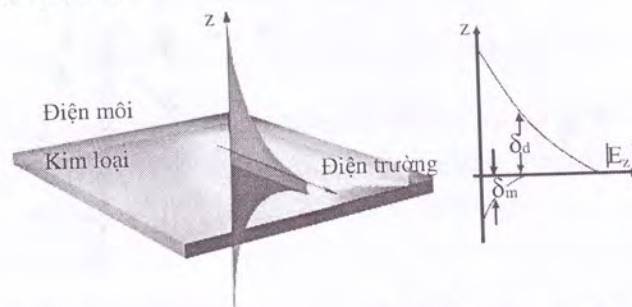
Điểm mạnh và thú vị của plasmon bề mặt là làm các hiệu ứng vật lý mạnh lên rất nhiều lần, thậm chí tăng “khổng lồ” lên nhiều bậc, ví dụ tăng 14 bậc trong tán xạ Raman bề mặt SERS. Điều này gợi ý cho chúng tôi trong việc sử dụng plasmon bề mặt để làm bẫy nguyên tử lạnh.

Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một sơ đồ nguyên lý bẫy quang học nguyên tử lạnh mới sử dụng cơ chế plasmon bề mặt. Các mode plasmon bề mặt được sinh ra bởi một chùm laser Bessel phản xạ toàn phần trên mặt phẳng phân cách kim loại – điện môi theo sơ đồ Kretschmann. Các mode plasmon bề mặt tạo ra một trường sóng evanescent không đồng nhất suy giảm từ bề mặt màng mỏng kim loại trên đế điện môi theo hàm mũ sinh ra một thế quang học hút nguyên tử lạnh trung hòa di chuyển gần bề mặt phân cách. Chúng tôi đã chỉ ra sự tồn tại của các trạng thái bị bẫy và đưa ra cách tính năng lượng các trạng thái liên kết của nguyên tử. Kết quả thu được của chúng tôi có thể so sánh với một số mô hình bẫy quang học gần đây.

## 2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

### 2.1. Sơ đồ bẫy nguyên tử lạnh dựa trên các mode plasmon bề mặt

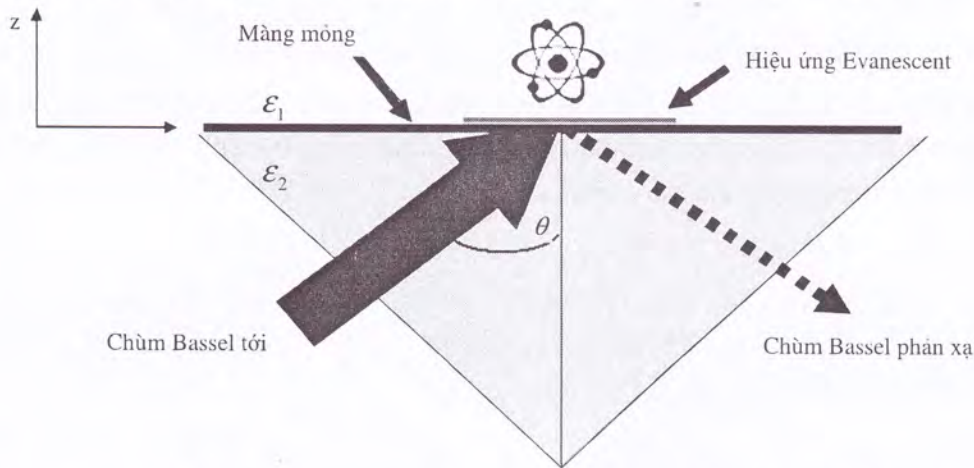
Plasmon được hiểu như là dao động tập thể của các điện tử tự do. Plasmon bề mặt (surface plasmon – SP) là dao động của điện tử tự do ở bề mặt của kim loại dưới sự kích thích của ánh sáng. Plasmon – polariton bề mặt (surface plasmon polariton – SPP) là sự kết hợp của các SP với photon ánh sáng tới, có thể lan truyền dọc theo bề mặt kim loại cho đến khi năng lượng của nó bị mất hết do sự hấp thụ trong kim loại hoặc do sự bức xạ năng lượng vào không gian tự do. Như vậy, có thể thấy SP là các mode liên kết của trường điện từ của ánh sáng tới và các điện tử tự do trong kim loại. Chúng có thể được xem như ánh sáng hai chiều bị ràng buộc bởi một mặt phân cách kim loại – điện môi. Trường SP có cường độ lớn nhất ở mặt phân cách và suy giảm theo hàm mũ ở các hướng vuông góc với bề mặt [8, 10].



Hình 1: Trường thế plasmon trên phương z vuông góc với mặt phân cách kim loại và điện môi [8, 10]

Ta sẽ sử dụng sơ đồ Kretschmann để tạo plasmon bề mặt. Khi chùm ánh sáng Bessel bị phản xạ toàn phần trên bề mặt phẳng điện môi được phủ lên trên nó một màng

màng kim loại thì các mode evanescent plasmon được tạo ra (hình 2). Các mode này tạo ra một trường sóng evanescent bẫy các nguyên tử lạnh chuyển động gần bề mặt màng mỏng [1]. Sóng ánh sáng suy giảm khi đi ra xa từ bề mặt sinh ra một thế hút các nguyên tử lạnh trung hoà. Sự bẫy và dẫn nguyên tử xảy ra ở bên trên màng mỏng đó.



**Hình 2: Sơ đồ Kretschmann tạo plasmon bề mặt với chùm laser Bessel [1]**

Xét một nguyên tử lạnh trung hoà khối lượng  $m$  chuyển động gần bề mặt màng kim loại. Trường sóng evanescent do các mode plasmon bề mặt sinh ra sự biến thiên độ dốc của thế sinh ra do hiệu ứng này trong mặt phẳng vuông góc dẫn đến một gradient lực tác động lên nguyên tử. Trong khuôn khổ bài báo này, chúng tôi sẽ giới hạn xem xét sự bắt bẫy theo phương  $z$  vuông góc với mặt phân cách kim loại – điện môi của mô hình bẫy.

Theo phương  $z$ , thế quang học do hiệu ứng evanescent gây ra sẽ bị suy giảm nhanh theo hàm mũ từ mặt phân cách nên sẽ có dạng:

$$V_z = -V_0 \exp\left\{-\frac{z}{z_0}\right\}, \quad (1)$$

với  $V_0$  và  $z_0$  coi là các thông số của thế hiệu dụng của mô hình và sẽ so sánh và lấy từ thực nghiệm hoặc từ các lý thuyết khác. Dấu âm (-) trong công thức trên thể hiện tác động hút vào bề mặt đối với các nguyên tử lạnh chuyển động gần bề mặt.

Sự tồn tại của một mức năng lượng trong phổ gián đoạn của thế quang học do plasmon bề mặt gây ra dẫn đến sự tồn tại các trạng thái liên kết của nguyên tử lạnh trung hoà với bề mặt, tức là nguyên tử lạnh đã bị bắt bẫy gần bề mặt.

## **2.2. Nguyên lý làm việc của mô hình bẫy quang học nguyên tử lạnh dựa trên các mode plasmon bề mặt**

Để hiểu được nguyên lý làm việc của mô hình bẫy quang học nguyên tử lạnh dựa trên các mode plasmon bề mặt, ta cần giải bài toán cơ học lượng tử nguyên tử lạnh chuyển động chậm gần bề mặt phân cách bị bắt giữ gần bề mặt bởi một thế hút hiệu dụng.

Phương trình Schrödinger của nguyên tử lạnh nói trên theo phương  $z$  được viết dưới dạng sau:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} - V_0 e^{-\frac{z}{z_0}} \right] \psi(z) = E_z \psi(z), \quad (2)$$

trong đó  $E_z$  là năng lượng của nguyên tử theo phương  $z$  khi có mặt thế bẫy quang học.

Bài toán này không có lời giải giải tích. Thay cho việc giải số chính xác, chúng tôi sử dụng một thế có dạng gần đúng như các tác giả khác thường làm. Để đơn giản, chúng tôi sử dụng phương pháp giả thế  $V$ -potential.

$$V = 2z_0 z - V_0, \quad (3)$$

Các tham số làm khớp (fitting) được chọn sao cho gốc thế năng của các thế phải trùng nhau và diện tích của các thế tạo ra trên hệ tọa độ  $V$ - $z$  phải bằng nhau. Thay  $V$  ở (3) vào phương trình Schrödinger (2) với cách đặt

$$x = \left( \frac{4z_0 m}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left( z - \frac{E_z + V_0}{2z_0} \right) \quad (4)$$

ta nhận được phương trình

$$\psi''(x) - x\psi(x) = 0. \quad (5)$$

Lời giải của phương trình này tìm được thông qua hàm Airy ( $\text{Ai}(x)$ ) sẽ cho ta biểu thức hàm sóng và năng lượng liên kết trên các mức (trong đó các tham số thế của mô hình có thể được lấy ở tài liệu [1])

$$\psi(x) = \text{const. Ai}(x). \quad (6)$$

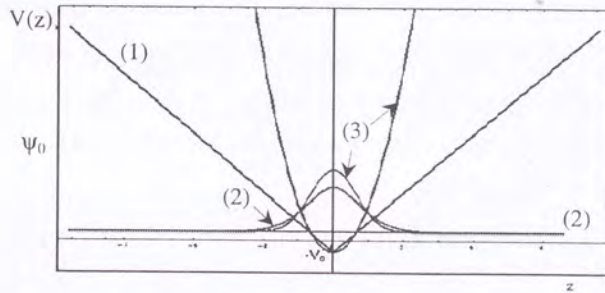
Tùy theo các điều kiện biên của hàm sóng tại  $z = 0$  và tàn dư của động năng thể hiện qua nhiệt độ ta sẽ có các trường hợp nguyên tử lạnh bị giam cầm trong vùng cách mặt phẳng  $z = 0$  một khoảng hay là bị hút chặt vào bề mặt màng mỏng.

Tính năng lượng của trạng thái cơ sở (mức gián đoạn thấp nhất), ta có được năng lượng liên kết của nguyên tử lạnh trung hoà với bề mặt thể hiện sự bất bão hòa

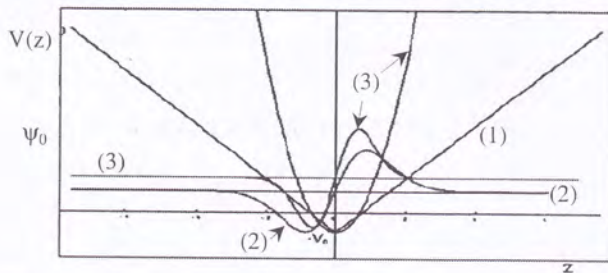
$$E_n = \text{Ai} \left[ - \left( \frac{4z_0 m}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{E_z + V_0}{2z_0} \right]. \quad (7)$$

Kết quả tính số trên máy tính sử dụng phần mềm Mathematica [11] được thể hiện trên các hình 3, 4 và 5 với thế dạng  $V$  ( $V$ -potential) và thế parabol so sánh. Trên hình 3: hàm thế (1), hàm sóng (2) và mức năng lượng ở trạng thái cơ bản trong trường hợp thế fit  $V$ -potential, (3) là kết quả của hàm thế dạng parabol. Trên hình 4: hàm thế, hàm sóng

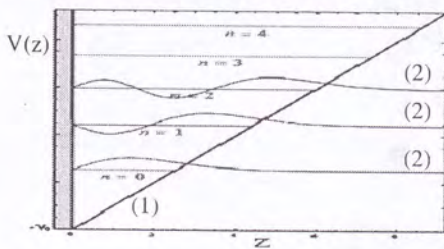
(2) và mức năng lượng ở trạng thái kích thích thứ nhất cho thế  $V$ -potential, (3) là kết quả của hàm thế dạng parabol. Trên hình 5: hàm thế (1), hàm sóng (2) và một số mức năng lượng đầu tiên trong trường hợp thế  $V$ -potential (a), kết quả ở trạng thái cơ bản được so sánh với trường hợp hàm thế dạng parabol (b).



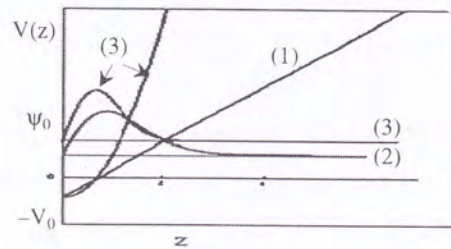
Hình 3: Hàm thế (1), hàm sóng (2) và mức năng lượng ở trạng thái cơ bản trong trường hợp thế fit  $V$ -potential. Đường (3) là kết quả của hàm thế dạng parabol



Hình 4: Hàm thế (1), hàm sóng (2) và mức năng lượng ở trạng thái kích thích thứ nhất cho thế  $V$ -potential. Đường (3) là kết quả của hàm thế dạng parabol



Hình 5a



Hình 5b

Hình 5: Hàm thế (1), hàm sóng (2) và một số mức năng lượng đầu tiên trong trường hợp thế  $V$ -potential (a). Kết quả ở trạng thái cơ bản được so sánh với trường hợp hàm thế dạng parabol (b)

### 3. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một sơ đồ nguyên lí một bẫy quang học nguyên tử lạnh sử dụng cơ chế plasmon bề mặt và nghiên cứu nguyên lí làm việc của nó. Trong mô hình này, các nguyên tử lạnh có thể bị bắt bẫy gần màng mỏng bởi một thế hút

hiệu dụng sinh bởi hiệu ứng evanescent plasmon. Độ sâu và độ dốc của hồ thế phụ thuộc vào cường độ và góc tới của chùm ánh sáng laser Bessel, cũng như các thông số bề mặt tiếp giáp. Các tham số đặc trưng của mô hình có thể có được bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm hoặc lấy từ các lý thuyết khác. Trong khuôn khổ của bài báo này, chúng tôi mới chỉ đưa ra một mô hình gần đúng đơn giản để ước tính năng lượng liên kết của nguyên tử lạnh bị bắt bẫy trong thế quang học gây ra do các mode plasmon bề mặt theo phương  $z$  vuông góc với mặt phẳng phân cách kim loại – điện môi. Ở đây, chúng tôi chỉ chỉ ra dạng của hàm sóng và các mức năng lượng cho trường hợp thế  $F$  dạng parabol và dạng thế  $V$ -potential.

Nghiên cứu này của chúng tôi góp phần tìm hiểu các mô hình lý thuyết quang cho bẫy nguyên tử lạnh đang được quan tâm nhiều hiện nay. Các kết quả thu được có thể hữu ích trong việc đề xuất và giải thích một số các kết quả thực nghiệm liên quan đến bẫy nguyên tử lạnh sử dụng hiệu ứng plasmon. Các tính toán cụ thể hơn và tốt hơn của mô hình theo phương  $z$  và cả theo phương song song với mặt phẳng phân cách ( $x, y$ ) chúng tôi sẽ trình bày trong các nghiên cứu sau.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. S. Al-Awfi, *Theoretical Study of Surface Plasmons with Phase Singularities Generated by Evanescent Bessel Beams*, Sains Malaysiana, 41(11), pp. 1461 – 1466, 2012.
2. G. M. Bruun and K. Burnett, *Interacting Fermi gas in a harmonic trap*, Phys. Rev. A 58, pp. 2427 – 2430, 1998.
3. A. Fioretti, D. Comparat, A. Crubellier, O. Dulieu, F. Masnou-Seeuws and P. Pillet, *Formation of Cold Cs Molecules through Photoassociation*, Phys. Rev. Lett 80, pp. 4402 – 4405, 1998.
4. V.I. Balykin, K. Hakuta, Fam Le Kien, J.Q. Liang and M. Morinaga, *Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber*, Phys. Rev. A, 70, 011401, 2004.
5. Wang Zheng-Ling et al., *Nanoscale guiding for cold atoms based on surface plasmons along tips of metallic wedges*, Chin. Phys. B, 22(7), 073701, 2013.
6. C.T. Anh, D.T. Nga, T.T. Thao, N.V. Thanh, N.A. Viet, *Trapping Cold Atoms by a Carbon Nanotube*, Mod. Phys. Lett. B, 25(12 & 13), pp.979-985, 2011.
7. Lakowicz J. R., *Radiative decay engineering 5: metal-enhanced fluorescence and plasmon emission*, Anal Biochem, 337(2), pp. 171 – 194, 2005.
8. Barnes W. L., Dereux A. and Ebbesen T. W., *Surface Plasmon subwavelength optics*, Nature, 424, pp. 824 – 830, 2003.

9. Yun C. S., Javier A., Jennings T., Fisher M., Hira S., Peterson S., Hopkins B., Reich N. O., and Strouse G. F., *Nanometal Surface Energy Transfer in Optical Rulers, Breaking the FRET Barrier*, J. Am. Chem. Soc, 127(9), pp.3115-3119, 2005.
10. Zoran Jakšić, *Plasmonic waveguides based on synthetic nanomembranes*, SPIE Newsroom, Nanotechnology, 2011.
11. Blinder S. M, (2010), *Particle in an finite Vee-potential*  
<http://demonstrations.wolfram.com/ParticleInAnInfiniteVeePotential>

## OPTICAL TRAPPING COLD NEUTRAL ATOMS BASED ON SURFACE PLASMON MODES

*Nguyen Ai Viet, Nguyen Thi Phuong Lan, Do Chi Nghia*

**Abstract:** *In this paper, we present a schema of trapping cold atoms based on the surface plasmon modes. These plasmon modes can be created when a Bessel beam light is totally reflected internally at the planar dielectric substrate on which a thin metallic film has been deposited. By evanescent plasmon modes, the wave decays away from the thin film producing an attractive optical potential for trapping neutral atom. We consider some possible boundary conditions leading to the non-trivial bound state solution in the z-direction perpendicular to the surface plane. Our model could be comparable with some recent trapping models.*

**Keywords:** *Schema of trapping, cold atom, plasmon mode.*