

## PHỔ TÁN SẮC CỦA HIỆU ỨNG EIT TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ NGUYÊN TỬ $Rb^{85}$ KHI CÓ HIỆU ỨNG DOPPLER

Nguyễn Văn Ái<sup>(1)</sup>, Đỗ Mai Trang<sup>(2)</sup>, Lê Cảnh Trung<sup>(2)</sup>,  
Lương Thị Yên Nga<sup>(2)</sup>, Trịnh Ngọc Hoàng<sup>(2)</sup>, Lê Văn Đoàn<sup>(2)</sup>,  
Nguyễn Văn Phú<sup>(2)</sup>, Đinh Xuân Khoa<sup>(2)</sup> và Nguyễn Huy Bằng<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Trường THPT Kỳ Lâm, Huyện Kỳ Anh, Hà Tĩnh

<sup>2</sup> Trường Đại học Vinh, Nghệ An

Ngày nhận bài 26/9/2020, ngày nhận đăng 29/11/2020

**Tóm tắt:** Chúng tôi đo phổ tán sắc của môi trường khí nguyên tử Rubi 85 ở nhiệt độ phòng khi có mặt hiệu ứng trong suốt cảm ứng điện từ (EIT). Hệ nguyên tử được kích thích theo cấu hình chữ V trong dịch chuyển  $D_2$  bởi một chùm laser liên kết có công suất lớn và một chùm laser dò có công suất nhỏ. Khi có mặt hiệu ứng EIT, miền tán sắc dị thường xung quanh dịch chuyển cộng hưởng sẽ thay đổi thành sáu miền tán sắc “thường - dị thường” tương ứng với sáu cửa sổ EIT. Đặc biệt, vị trí và độ dốc của các miền tán sắc có thể thay đổi được theo tần số và cường độ trường laser liên kết. Điều này mở ra triển vọng về các ứng dụng trong quản lý tán sắc phân giải cao.

**Từ khóa:** Phổ tán sắc; hiện tượng trong suốt cảm ứng điện từ; quản lý tán sắc.

### 1. Giới thiệu

Hiệu ứng EIT (Electromagnetic Induced Transparency) là hiệu ứng lượng tử xảy ra trong hệ nguyên tử, là hiệu ứng mà hệ số hấp thụ cộng hưởng của chùm laser dò có cường độ yếu truyền qua môi trường giảm khi có sự xuất hiện của chùm laser liên kết có cường độ mạnh. Lý thuyết của hiệu ứng EIT được đưa ra đầu tiên vào năm 1989 [1] và được kiểm chứng bằng thực nghiệm vào hai năm sau đó [2]. Kể từ đó, hiệu ứng EIT đã thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học [3-5] do việc thay đổi tính chất quang học của môi trường dẫn đến nhiều ứng dụng tiềm năng, chẳng hạn như phát laser ở trạng thái không đảo mật độ cư trú [6], làm chậm ánh sáng [7], lưu trữ ánh sáng [8], v.v...

Bên cạnh làm giảm hệ số hấp thụ, sự thay đổi thông tin tán sắc của môi trường khi có mặt hiệu ứng EIT cũng đã được nghiên cứu về lý thuyết [9] và thực nghiệm [4]. Nghiên cứu cho thấy rằng với sự thay đổi độ dốc của đường tán sắc có thể làm chậm vận tốc nhóm ánh sáng, thậm chí có thể làm dừng xung sáng trong môi trường nguyên tử, phân tử [7]. Nghiên cứu những hiệu ứng này dẫn đến nhiều ứng dụng như tăng cường phi tuyến Kerr [10], lưỡng ổn định quang [11], chuyển mạch toàn quang [12], v.v...

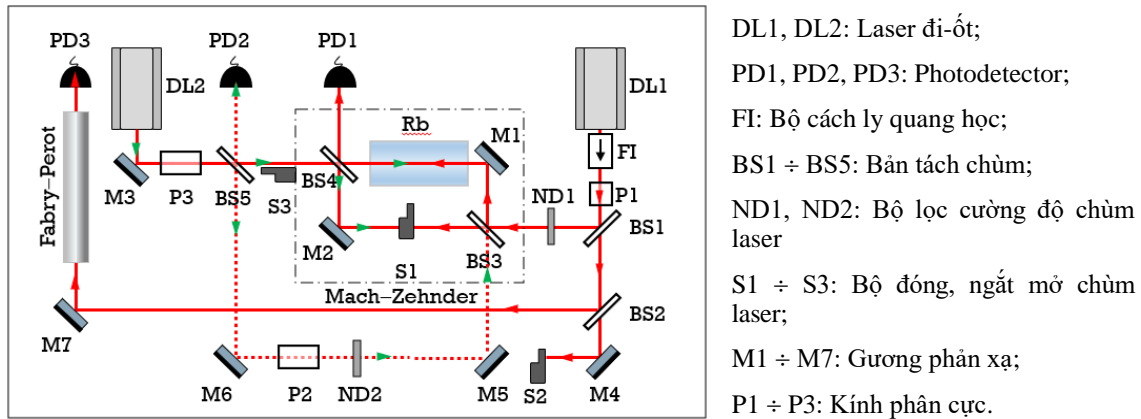
Cơ sở vật lý về quan sát thực nghiệm phổ tán sắc của nguyên tử Rubi sử dụng giao thoa kế Mach-Zehnder đã được đề xuất bởi Libbrecht và đồng sự vào năm 2006 [13], ở đây nhóm tác giả đã quan sát được mối quan hệ giữa hệ số hấp thụ và hệ số tán sắc của môi trường khí nguyên tử Rubi ở nhiệt độ 343 K của dịch chuyển tinh tế.

Gần đây có nhiều nghiên cứu thực nghiệm sử dụng giao thoa kế Mach-Zehnder đo phổ tán sắc của nguyên tử Rubi [4], [13]. Tuy nhiên các kết quả thực nghiệm chỉ dừng lại ở giới hạn số lượng với ba cửa sổ EIT, trong khi quan sát phổ hấp thụ của nguyên tử Rubi 85 khi có mặt hiệu ứng EIT có thể quan sát được sáu cửa sổ EIT khi sử dụng một chùm laser liên kết truyền ngược chiều laser dò.

Trong công trình này, chúng tôi sử dụng giao thoa kế Mach-Zehnder để đo phổ tán sắc của khí nguyên tử Rubi 85 khi có mặt hiệu ứng EIT ở nhiệt độ phòng.

## 2. Thực nghiệm

Hệ thí nghiệm của chúng tôi được bố trí như Hình 1. Ở đây, chúng tôi sử dụng hai nguồn laser đi-ốt buồng cộng hưởng ngoài có thể điều chỉnh tần số quét nằm trong miền dịch chuyển  $D_2$  của nguyên tử Rubi. Cường độ chùm tia laser của DL1 có giá trị cực đại  $50 \text{ mW/cm}^2$ , và laser DL2 có giá trị cực đại  $20 \text{ mW/cm}^2$ . Giải phổ của hai laser quét là  $10 \text{ GHz}$ , độ rộng tần  $1 \text{ MHz}$ .

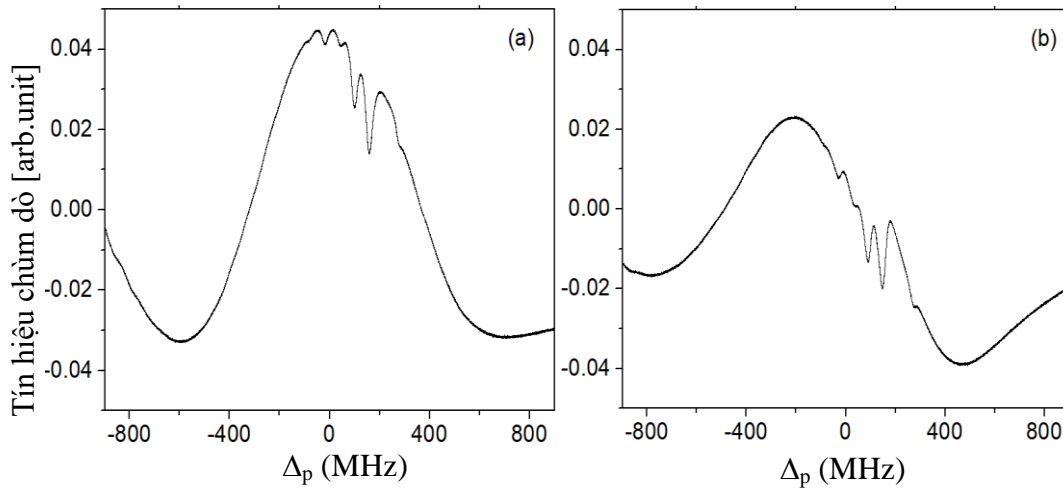


**Hình 1:** Sơ đồ sắp xếp hệ thí nghiệm đo thông tin tán sắc

Laser phát ra từ DL1 sau khi đi qua FI có tác dụng chỉ cho ánh sáng truyền theo một chiều, tới kính phân cực P1 và đến BS1 (10/90). Bản tách chùm BS1 phản xạ 10% cường độ sáng đi vào giao thoa kế Mach - Zehnder, sau đó chùm laser tới photodetector 1 (PD1). Phần còn lại của laser tới phản xạ 10% trên BS2 (10/90) đi tới giao thoa kế Fabry-Pérot, chùm tia truyền qua BS2, sau khi phản xạ trên M4 đến S2. Laser phát ra từ DL2, thành phần truyền qua BS5 và tới buồng mẫu đóng vai trò là chùm laser liên kết, thành phần phản xạ trên BS5 sau khi phản xạ trên các gương M6, M5 qua buồng mẫu đóng vai trò là chùm dò, tới PD2 dùng để khóa tần số của laser DL2 tại dịch chuyển mong muốn (đường nét đứt).

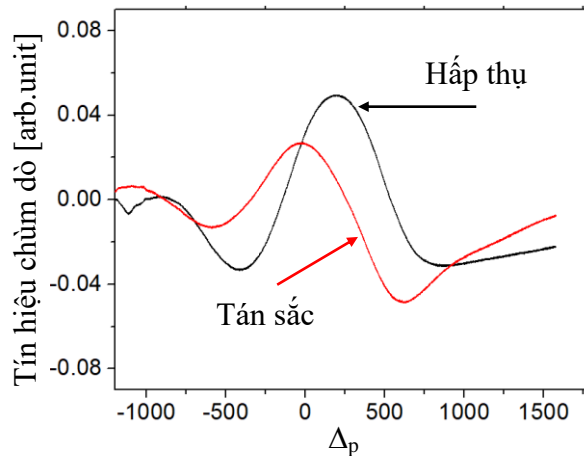
## 3. Kết quả và thảo luận

Trong thí nghiệm này, chúng tôi sử dụng cả hai laser có bước sóng  $780 \text{ nm}$ , có tần số quét nằm trong miền dịch chuyển  $D_2$  của nguyên tử Rubi, laser DL2 được khóa tại dịch chuyển  $5^2S_{1/2} (F = 3) \rightarrow 5^2P_{3/2} (F' = 3)$  của nguyên tử  $^{85}Rb$ , trong khi đó laser DL1 được điều chỉnh quét trong miền dịch chuyển  $D_2$  của nguyên tử Rubi. Cả hai laser cùng tương tác lên mức cơ bản  $5^2S_{1/2}(F=3)$ . Công suất chùm laser dò từ DL1 truyền qua buồng mẫu Rubi được điều chỉnh giảm xuống tới  $0,01 \text{ mW}$  bằng cách sử dụng kính phân cực P1 và bộ lọc ND1, công suất chùm laser liên kết DL2 truyền qua buồng mẫu được điều chỉnh tới giá trị  $2 \text{ mW}$  bằng kính phân cực P3. Thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ phòng ( $T = 299 \text{ K}$ ), hình ảnh phổ hấp thụ khi có hiệu ứng trong suốt cảm ứng điện từ thu được từ thí nghiệm được biểu diễn trong Hình 2a, hình ảnh phổ tán sắc của sáu cửa sổ EIT được mô tả như trong Hình 2b.



**Hình 2:** Hình ảnh phổ EIT của nguyên tử Rubi 85 ứng với dịch chuyển  $5^2S_{1/2}(F = 3) \rightarrow 5^2P_{3/2}(F' = 2, 3, 4)$ : (a) hấp thụ, (b) tán sắc

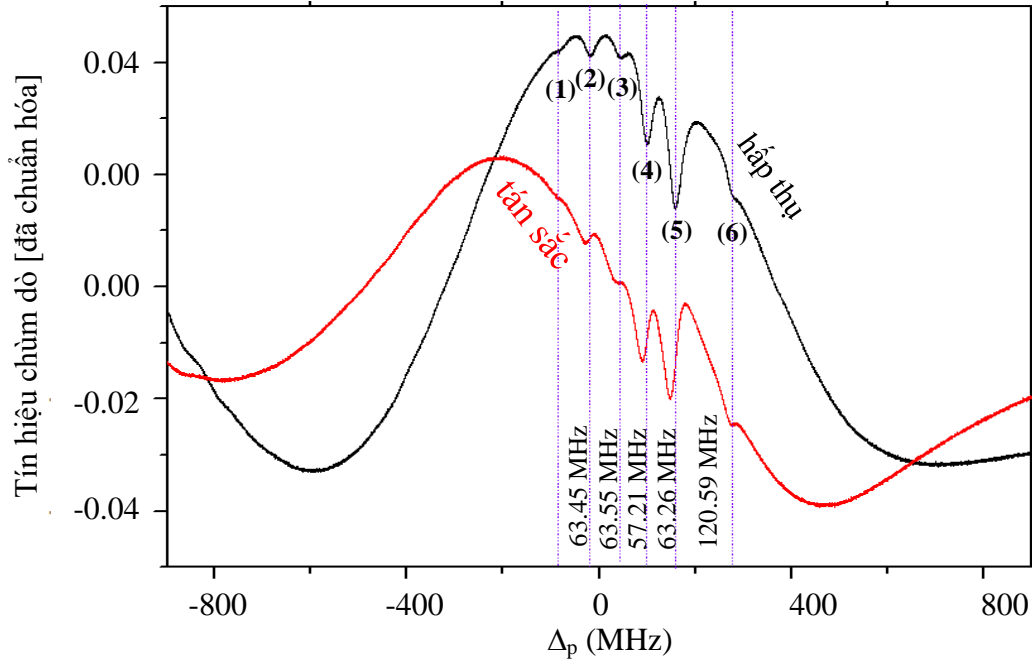
Trong Hình 2a chúng ta thấy trên đường Doppler, xuất hiện sáu cửa sổ EIT, chúng ta có thể giải thích sự xuất hiện này tương tự như mô hình của nhóm tác giả Ying [5] đã đưa ra giải thích sự hình thành bảy cửa sổ EIT năm 2014, trong trường hợp chùm dò và chùm laser liên kết cùng chiều. Ở đây, chùm laser liên kết sẽ liên kết độc lập với ba nhóm nguyên tử (A, B, C) chuyển động với vận tốc khác nhau ứng với ba dịch chuyển  $5^2S_{1/2}(F = 3) \rightarrow 5^2P_{3/2}(F' = 2, 3, 4)$ . Do đó, khi chùm laser dò quét qua ba nhóm nguyên tử này, mỗi nhóm nguyên tử đã liên kết với chùm laser liên kết, sẽ giảm hấp thụ tại ba giá trị tần số của laser dò dưới tác dụng của hiệu ứng Doppler. Tuy nhiên, có ba giá trị tần số của chùm dò bị trong suốt đối với ba nhóm nguyên tử (A, B, C) trùng nhau do đó chúng ta chỉ quan sát thấy sáu cửa sổ trên đường cong Doppler.



**Hình 3:** So sánh phổ hấp thụ và phổ tán sắc của khí Rubi 85

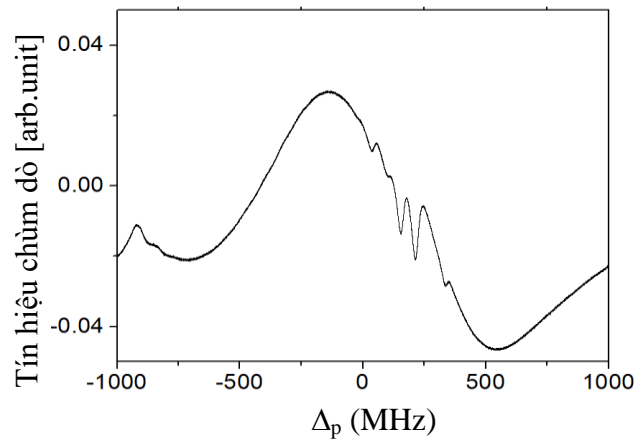
Sử dụng giao thoa kế Mach-Zehnder quan sát phổ tán sắc, so sánh tín hiệu phổ hấp thụ và phổ tán sắc chúng tôi nhận thấy xung quanh dịch chuyển cộng hưởng (đỉnh hấp thụ) xuất hiện một miền tán sắc dị thường (Hình 3). Kết quả hoàn toàn phù hợp với mô hình lý thuyết của Libbrecht và đồng nghiệp đã công bố vào năm 2006 [13]. Khi có chùm laser

liên kết, phổ tán sắc của nguyên tử Rubi được biểu diễn như trong Hình 4. Chúng ta thấy miền tán sắc xung quanh sáu cửa sổ EIT có sự thay đổi khi xuất hiện chùm laser liên kết. Khoảng cách giữa các cửa sổ EIT được chúng tôi biểu diễn như trên Hình 4.



**Hình 4:** So sánh phổ hấp thụ và tán sắc khi có hiệu ứng EIT của nguyên tử Rubi 85, vị trí các cửa sổ tương ứng với các dịch chuyển: (1)  $F = 3 \rightarrow F' = 2$  (nhóm A); (2)  $F = 3 \rightarrow F' = 2,3$  (nhóm B,A); (3)  $F = 3 \rightarrow F' = 3$  (nhóm B); (4)  $F = 3 \rightarrow F' = 2,4$  (nhóm C,A); (5)  $F = 3 \rightarrow F' = 3,4$  (nhóm C,B); (6)  $F = 3 \rightarrow F' = 4$  (nhóm C)

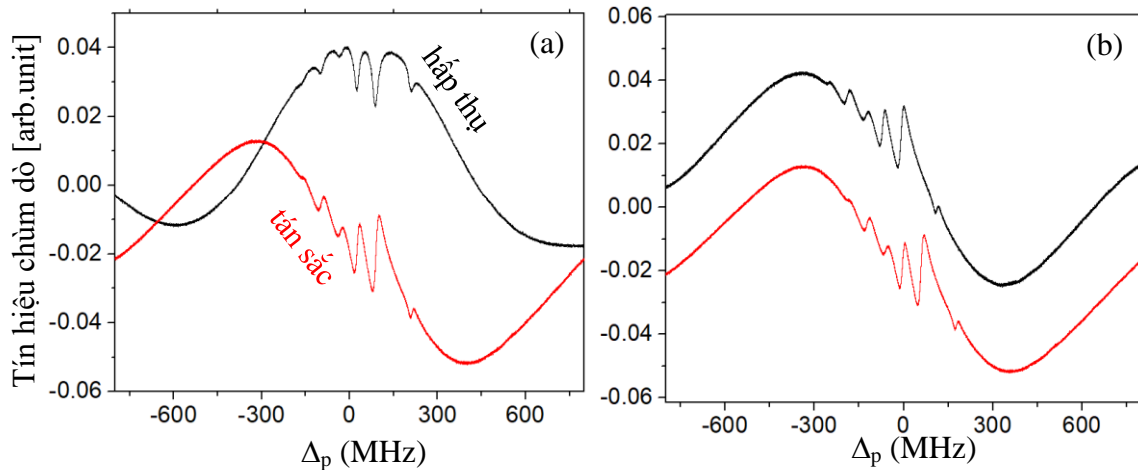
Chúng ta có thể quan sát được ba miền chiết suất thường xuất hiện trên miền chiết suất dị thường (ở vị trí cửa sổ thứ 2, 4, 5 từ trái sang). Kết quả này phù hợp với kết quả đã quan sát của nhóm chúng tôi đã công bố năm 2017 [4].



**Hình 5:** Phổ tán sắc khi có hiệu ứng EIT của nguyên tử Rubi 85 ứng với công suất chùm laser liên kết 3 mW

Khi tăng công suất chùm laser liên kết lên tới giá trị 3 mW, độ sâu của các cửa sổ EIT tăng và chiết suất của các miền tán sắc thay đổi [4]. Kết quả phép đo cho thấy xuất hiện thêm một miền tán sắc thường ở vị trí cửa sổ phía ngoài cùng bên phải (Hình 5). Khi tiếp tục tăng công suất chùm laser liên kết, độ rộng miền tán sắc thường tăng vì độ rộng cửa sổ EIT tăng dưới tác dụng của hiện tượng mở rộng do công suất. Điều này dẫn đến làm mờ đi các cửa sổ thứ nhất và thứ ba từ trái sang.

Điều chỉnh công suất chùm laser dò và laser bơm đến giá trị lần lượt là 0,07 mW và 3 mW, tín hiệu phổ hấp thụ và phổ tán sắc thu được biểu diễn như trong Hình 6(a). Chúng ta thấy tại cửa sổ thứ 3 từ trái sang xuất hiện miền tán sắc thường. Tiếp theo, giữ nguyên cường độ của các chùm laser và giảm tần số của chùm laser liên kết xuống 68 MHz, tất cả vị trí trung tâm của miền tán sắc thường đều dịch chuyển sang trái 68 MHz, khi đó độ dốc của các miền tán sắc đều có sự thay đổi, tại vị trí cửa sổ đầu tiên từ trái sang xuất hiện thêm một miền tán sắc thường, nâng tổng số miền tán sắc thường quan sát được lên thành sáu miền (Hình 6(b)).



**Hình 6:** Phổ hấp thụ và tán sắc của nguyên tử Rubi 85 khi có mặt hiệu ứng EIT trường hợp công suất chùm dò bằng 0,07 mW, công suất chùm laser liên kết 3mW (a), phổ tán sắc của khí nguyên tử Rubi 85 khi thay đổi tần số laser liên kết (đường phía trên) (b).

#### 4. Kết luận

Miền tán sắc tại vị trí các cửa sổ EIT không những phụ thuộc vào công suất của chùm laser liên kết và laser dò, nó còn phụ thuộc vào tần số của chùm laser liên kết. Bằng thực nghiệm có thể điều khiển tần số và công suất của các chùm laser, do đó chúng ta có thể điều khiển được các miền tán sắc. Khi có sự xuất hiện của chùm laser liên kết ngược chiều với chùm laser dò, trên đường cong Doppler ứng với dịch chuyển  $D_2$  ( $F = 3$ )  $\rightarrow$  ( $F' = 2, 3, 4$ ) của nguyên tử Rubi 85 xuất hiện sáu cửa sổ EIT. Kết quả quan sát phù hợp với mô hình lý thuyết của nhóm tác giả Ying [5] đã đưa ra giải thích sự hình thành bảy cửa sổ EIT trong trường hợp chùm laser liên kết cùng chiều với chùm laser dò. Quan sát phổ tán sắc của nguyên tử Rubi 85 khi có hiệu ứng EIT thu được tối đa sáu miền tán sắc thường tại vị trí sáu cửa sổ EIT, độ dốc của sáu miền tán sắc có thể điều khiển được bằng cách thay đổi cường độ các chùm laser và tần số của chùm laser liên kết. Kết quả phép đo cho thấy có thể điều khiển được sáu miền tán sắc thường, nhiều hơn ba miền tán sắc

thường so với công bố trước đây [4]. Kết quả đang dừng lại ở quan sát phép đo một cách định tính mà chưa đưa ra biểu thức tính toán cụ thể để giải quyết triệt để về mặt lý thuyết.

**Lời cảm ơn:** Công trình này được thực hiện dưới sự tài trợ của đề tài hợp tác quốc tế song phương mã số B2018-TDV-01SP của Bộ Giáo dục và Đào tạo.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Imamoglu and S. E. Harris, “Lasers without inversion: interference of dressed lifetime-broadened states,” *Opt. Lett.*, Vol. 14, No. 24, p. 1344, Dec. 1989, doi: 10.1364/OL.14.001344.
- [2] J. E. Field, K. H. Hahn, and S. E. Harris, “Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 67, No. 22, pp. 3062-3065, Nov. 1991, doi: 10.1103/PhysRevLett.67.3062.
- [3] I. Krešić, M. Kruljac, T. Ban, and D. Aumiler, “Electromagnetically induced transparency with a single frequency comb mode probe,” *J. Opt. Soc. Am. B, JOSAB*, Vol. 36, No. 7, pp. 1758-1764, Jul. 2019, doi: 10.1364/JOSAB.36.001758.
- [4] D. X. Khoa, L. C. Trung, P. V. Thuan, L. V. Doai, and N. H. Bang, “Measurement of dispersive profile of a multiwindow electromagnetically induced transparency spectrum in a Doppler-broadened atomic medium,” *J. Opt. Soc. Am. B, JOSAB*, Vol. 34, No. 6, pp. 1255-1263, Jun. 2017, doi: 10.1364/JOSAB.34.001255.
- [5] K. Ying, Y. Niu, D. Chen, H. Cai, R. Qu, and S. Gong, “Observation of multi-electromagnetically induced transparency in V-type rubidium atoms,” *Journal of Modern Optics*, Vol. 61, No. 8, pp. 631-635, May 2014, doi: 10.1080/09500340.2014.904019.
- [6] Y. Liu *et al.*, “Laser without population inversion of nitrogen ions pumped by femtosecond pulses,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics (2019), paper FTh1M.2*, May 2019, p. FTh1M.2, doi: 10.1364/CLEO\_QELS.2019.FTh1M.2.
- [7] G. Heinze, C. Hubrich, and T. Halfmann, “Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 111, No. 3, p. 033601, Jul. 2013, doi: 10.1103/PhysRevLett.111.033601.
- [8] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, “Storage of Light in Atomic Vapor,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, No. 5, pp. 783-786, Jan. 2001, doi: 10.1103/PhysRevLett.86.783.
- [9] Yu. I. Geller, D. E. Sovkov, A. T. Hakim’yanov, and A. V. Sharypov, “Dispersion properties of electromagnetically induced transparency under the Doppler broadening,” *Russ Phys J*, Vol. 50, No. 3, pp. 259-266, Mar. 2007, doi: 10.1007/s11182-007-0036-1.
- [10] H. Liang, Y. Niu, L. Deng, and S. Gong, “Enhancement of Kerr nonlinearity completely without absorption,” *Physics Letters A*, Vol. 381, No. 48, pp. 3978-3982, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.physleta.2017.10.048.

- [11] D. X. Khoa *et al.*, “Optical bistability in a five-level cascade EIT medium: an analytical approach,” *J. Opt. Soc. Am. B, JOSAB*, Vol. 33, No. 4, pp. 735-740, Apr. 2016, doi: 10.1364/JOSAB.33.000735.
- [12] H. M. Dong, L. T. Y. Nga, and N. H. Bang, “Optical switching and bistability in a degenerated two-level atomic medium under an external magnetic field,” *Appl. Opt., AO*, Vol. 58, No. 16, pp. 4192-4199, Jun. 2019, doi: 10.1364/AO.58.004192.
- [13] K. G. Libbrecht and M. W. Libbrecht, “Interferometric measurement of the resonant absorption and refractive index in rubidium gas,” *American Journal of Physics*, Vol. 74, No. 12, pp. 1055-1060, Dec. 2006, doi: 10.1119/1.2335476.

## SUMMARY

### DISPERSION SPECTRUM OF EIT EFFECT IN THE GASEOUS RUBIDIUM 85 IN THE PRESENCE OF DOPLER BROADENING

Nguyen Van Ai <sup>(1)</sup>, Do Mai Trang <sup>(2)</sup>, Le Canh Trung <sup>(2)</sup>,  
Luong Thi Yen Nga <sup>(2)</sup>, Trinh Ngoc Hoang <sup>(2)</sup>, Le Van Doai <sup>(2)</sup>,  
Nguyen Van Phu <sup>(2)</sup>, Dinh Xuan Khoa <sup>(2)</sup>, Nguyen Huy Bang <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Ky Lam High School, Ky Anh District, Ha Tinh Province

<sup>2</sup>Vinh University, Nghe An Province

Received on 26/9/2020, accepted for publication on 29/11/2020

This paper presents the measurement of the dispersion spectrum of the gaseous Rubidium 85 at room temperature in the presence of electromagnetically induced transparency (EIT). We consider the system of the V-type configuration in which D2 line transition is simultaneously targeted by two counter-propagating laser fields - a strong coupling laser field and a weak probing laser field. Under the EIT effect, the anomalous dispersion in the resonant region is split into six “normal-anomalous” dispersion giving rise to six EIT-windows. Our experimental result suggested that the positions, as well as the slope of the curve at the dispersion domains, are controllable through both frequency and intensity of the coupling laser field. This insight is important for applications in high-resolution dispersion management.

**Keywords:** Dispersion spectrum; electromagnetic induced transparency; dispersion management.