

HIỆU ỨNG MACALUSO - CORBINO TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ NGUYÊN TỬ RUBIDIUM

Nguyễn Văn Ái

Đoàn Hoài Sơn

Trường Đại học Hà Tĩnh

Email: ai.nguyenvan@htu.edu.vn

Ngày nhận bài (received): 03/09/2025

Ngày nhận bài sửa (revised): 22/9/2025

Ngày nhận đăng (accepted): 01/10/2025

Tóm tắt

Bài viết trình bày nghiên cứu hệ thống về hiệu ứng Macaluso-Corbino trong môi trường khí nguyên tử Rubidium tại nhiệt độ phòng. Chúng tôi đã thiết lập mô hình lý thuyết bán cổ điển kết hợp với thực nghiệm để khảo sát sự phụ thuộc của góc quay phân cực vào tần số và cường độ từ trường. Kết quả nghiên cứu cho thấy trên các vạch phổ siêu tinh tế D₂ của hai đồng vị phù hợp cao với lý thuyết. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở dữ liệu quan trọng để tối ưu hóa các bộ lọc quang học nguyên tử (FADOF) và cảm biến từ trường độ nhạy cao.

Từ khóa: Hiệu ứng Macaluso - Corbino, hiệu ứng quay quang từ, phổ phân cực

Macaluso - Corbino effect in rubidium atomic vapor

Abstract

This paper reports a systematic investigation of the Macaluso-Corbino effect in room-temperature Rubidium atomic vapor. A semiclassical theoretical model combined with experimental measurements was developed to analyze the dependence of the polarization rotation angle on the laser frequency and magnetic field intensity. The experimental results obtained for the D₂ hyperfine transitions of both isotopes exhibit excellent agreement with the theoretical predictions. These findings provide a critical basis for optimizing Faraday Anomalous Dispersion Optical Filters (FADOF) and high-sensitivity magnetic field sensors.

Keywords: Macaluso-Corbino effect, Magneto-optical rotation (MOR), Polarization spectroscopy.

1. Mở đầu

Hiệu ứng quay quang từ (Magneto-optical rotation - MOR), hay còn gọi là hiệu ứng Faraday, là hiện tượng mặt phẳng phân cực của ánh sáng bị quay khi truyền qua môi trường vật chất đặt trong từ trường có phương song song với chùm sáng. Trong môi trường khí nguyên tử, khi tần số ánh sáng được điều chỉnh gần cộng hưởng với các mức năng lượng nguyên tử, hiệu ứng này được thể hiện một cách rõ rệt và được gọi là hiệu ứng Macaluso - Corbino (Macaluso D., Corbino O. M. Nuovo Cimento, 1898). Khác với hiệu ứng Faraday trong chất rắn hay chất lỏng, hiệu ứng Macaluso - Corbino trong khí nguyên tử Rubidium thể

hiện tính tán sắc dị thường mạnh (anomalous dispersion) ngay tại vùng lân cận của các vạch phổ hấp thụ.

Trong những thập kỷ gần đây, sự quan tâm trở lại đối với hiệu ứng Macaluso- được thúc đẩy bởi các ứng dụng quan trọng trong quang học lượng tử và đo lường chính xác. Cụ thể, hiệu ứng này là nguyên lý hoạt động cốt lõi của các bộ phận quang học nguyên tử (FADOF - Faraday Anomalous Dispersion Optical Filters) (Gerhardt, 2018; Haider, 2017; Liu và c.s., 2023; Tian và c.s., 2023; Yan và c.s., 2022), cho phép lọc nhiễu nền cực tốt. Ngoài ra, việc nghiên cứu phổ phân cực (Polarization spectroscopy) dựa trên hiệu ứng này đóng vai trò nền tảng cho sự phát triển của các từ kế nguyên tử siêu nhạy và các bộ nhớ lượng tử (Fabricant và c.s., 2023; Jo và c.s., 2018; Julsgaard và c.s., 2004; Kurucz & Fleischhauer, 2008; Tian và c.s., 2023).

Mặc dù hiệu ứng Macaluso - Corbino tuyến tính đã được biết từ lâu, việc khảo sát chi tiết sự phụ thuộc của góc quay vào cấu trúc siêu tinh tế của nguyên tử Rubidium dưới tác động của môi trường ngoài vẫn là một chủ đề cần thiết để chuẩn hóa các mô hình lý thuyết thực nghiệm. Nhiều nghiên cứu trước đây thường tập trung vào chế độ phi tuyến (NMOR) tại từ trường thấp (Hermann, 1997). Trong khi chế độ tuyến tính tại từ trường trung bình (Vài chục đến hàng trăm Gauss) - chế độ hoạt động của các bộ lọc (FADOF) - cần được phân tích kỹ lưỡng hơn về sự tương quan giữa mô hình lý thuyết và thực nghiệm phổ.

Trong bài viết này, chúng tôi trình bày nghiên cứu toàn diện về hiệu ứng Macaluso-Corbino trên vạch D2 của nguyên tử Rubidium (^{85}Rb và ^{87}Rb). Chúng tôi xây dựng mô hình lý thuyết bán cổ điển tính toán chiết suất phức cho các thành phần phân cực tròn trái và phải, đồng thời thiết lập hệ đo thực nghiệm để kiểm chứng. Kết quả đo cho thấy sự phù hợp tốt giữa lý thuyết và thực nghiệm, giải thích rõ cơ chế vật lý của sự quay mặt phẳng phân cực tại các đỉnh cộng hưởng.

2. Hiệu ứng Macaluso - Corbino

2.1. Mô hình lý thuyết

Cơ sở vật lý của hiệu ứng quay quang - từ dựa trên sự khác nhau của các chỉ số khúc xạ dạng phức cho các mode phân cực riêng. Đối với ánh sáng phân cực tuyến tính, nó có thể tách thành hai mode: phân cực tròn phải và phân cực tròn trái vuông góc với nhau. Chúng ta có thể dễ dàng biểu diễn ánh sáng phân cực tròn trong hệ Decartes như sau:

$$\begin{aligned}\hat{e}_x &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_+ + \hat{e}_-) \\ \hat{e}_y &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_+ - \hat{e}_-).\end{aligned}\tag{1}$$

Ở đây \hat{e}_x, \hat{e}_y là các véc tơ đơn vị biểu diễn thành phần phân cực dọc theo x và y tương ứng, và \hat{e}_+, \hat{e}_- là các véc tơ biểu diễn phân cực tròn trái và tròn phải của ánh sáng tương ứng.

Cường độ điện trường E của ánh sáng phân cực theo trục y có véc tơ sóng k truyền dọc theo trục z có thể viết dưới dạng

$$E = E_0 \hat{e}_y \cos(kz - \omega t) = -\frac{iE_0}{2\sqrt{2}} [\hat{e}_+ \cdot e^{-i(kz - \omega t)} - \hat{e}_- \cdot e^{-i(kz - \omega t)}] + c. c., \quad (2)$$

Với E_0 là biên độ của cường độ điện trường, ω là tần số góc của ánh sáng và $c.c.$ là ký hiệu thành phần liên hợp phức. Số sóng k là

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\eta\omega}{c}. \quad (3)$$

Trong biểu thức này λ là bước sóng của ánh sáng, và chỉ số khúc xạ η dạng phức được cho dưới dạng

$$\eta = n + i\kappa. \quad (4)$$

Các thành phần thực và ảo của chỉ số khúc xạ tương ứng là chiết suất n đặc trưng cho sự tán sắc của môi trường, và hằng số hấp thụ κ thể hiện khả năng hấp thụ ánh sáng.

Nếu chỉ số khúc xạ của các mode phân cực tròn riêng của ánh sáng là khác nhau ($\eta_+ \neq \eta_-$), mỗi thành phần truyền trong môi trường với các vận tốc khác nhau dẫn sự lệch pha φ .

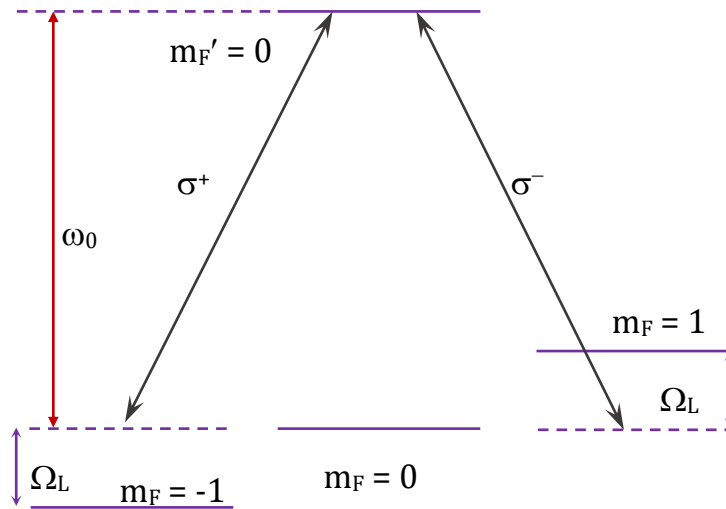
$$\varphi = \frac{\omega l}{c} (\eta_+ - \eta_-). \quad (5)$$

Độ lệch pha φ dẫn đến sự quay của mặt phẳng phân cực một góc ϕ

$$\phi = \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

Ta có thể giải thích sự xuất hiện hiệu ứng Macaluso-Corbino, do sự khác nhau giữa các chỉ số khúc xạ dạng phức. Góc quay của mặt phẳng phân cực được xác định theo biểu thức (6), sự phụ thuộc của góc quay vào từ trường ngoài có thể giải thích bằng lý thuyết bán cổ điển về tương tác giữa ánh sáng với hệ nguyên tử.

Xét hệ nguyên tử hai mức năng lượng $F = 1 \rightarrow F' = 0$, được kích thích bởi ánh sáng phân cực tròn trái và phân cực tròn phải như trên Hình 1. Ở đây F và F' là mô men quỹ đạo toàn phần của trạng thái cơ bản và trạng thái kích thích. Thành phần phân cực tròn phải của chùm sáng tương tác với nguyên tử ứng với dịch chuyển từ trạng thái cơ bản có $m = -1$ lên trạng thái kích thích có $m' = 0$ (m và m' là các số lượng tử từ xác định hình chiếu của momen quỹ đạo lên một trục lượng tử ở trạng thái cơ bản và trạng thái kích thích). Tương tự, thành phần phân cực tròn trái của ánh sáng kích thích dịch chuyển từ trạng thái cơ bản $m = 1$ đến trạng thái kích thích $m' = 0$.



Hình 1. Sơ đồ hệ hai mức năng lượng về tương tác giữa nguyên tử với ánh sáng phân cực thẳng khi truyền chùm sáng qua môi trường có từ trường ngoài khác không. Khi từ trường ngoài có phương trùng với phương truyền, các mức từ con sẽ tách ra từ các trạng thái cơ bản ứng với $\Omega_L = m_F g_F \mu_B B / \hbar$.

Chùm ánh sáng có dải tần số hẹp tương tác với hệ nguyên tử hai mức năng lượng, chiết suất dạng phức của môi trường được xác định theo biểu thức:

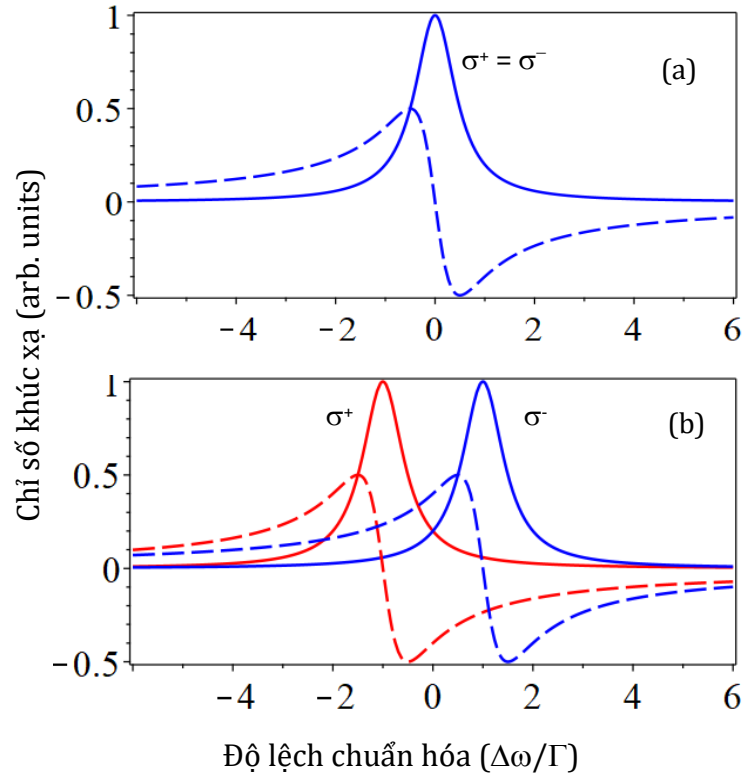
$$\eta = 1 + 2\pi\chi_0 \frac{1}{\Delta\omega + i\Gamma/2} \quad (7)$$

trong đó $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ là độ lệch giữa tần số của ánh sáng ω với tần số cộng hưởng ω_0 . Γ là tốc độ phát xạ tự phát của trạng thái kích thích và χ_0 là biên độ của độ cảm tuyến tính của nguyên tử.

Khi đưa hệ nguyên tử vào trong từ trường ngoài có phương trùng với phương truyền chùm sáng thì các trạng thái suy biến của nguyên tử được tách ra từ các trạng thái cơ bản ứng với tần số Larmor Ω_L

$$\Omega_L = \frac{m_F g_F \mu_B B}{\hbar}, \quad (8)$$

trong đó g_F là hằng số Landé và μ_B là manhêton Bohr.



Hình 2. Hệ số hấp thụ (đường liền nét) và hệ số tán sắc (đường chấm chấm) của chỉ số khúc xạ ứng khi môi trường tương tác với laser có phân cực tròn trái (σ^-) và phân cực tròn phải (σ^+) trong hệ nguyên tử hai mức (hình 1) khi không có từ trường (a) và khi có từ trường (b)

Trong mô hình nghiên cứu này, chúng tôi đã giả thiết rằng nguyên tử được kích thích độc lập bởi ánh sáng phân cực tròn phải σ^+ và phân cực tròn trái σ^- . Khi đặt hệ nguyên tử trong từ trường ngoài có véc tơ cảm ứng từ \vec{B} trùng với chiều truyền của ánh sáng thì từ trường sẽ làm tách các mức suy biến ở trạng thái cơ bản, thành các mức con theo tần số Larmor Ω_L xác định theo biểu thức (8) và dẫn đến sự thay đổi chiết suất phức ứng với mỗi thành phần phân cực xác định theo biểu:

$$\eta_{\pm} \approx 1 + 2\pi\chi_0 \frac{1}{(\Delta\omega \mp \Omega_L) + i\Gamma/2} \quad (9)$$

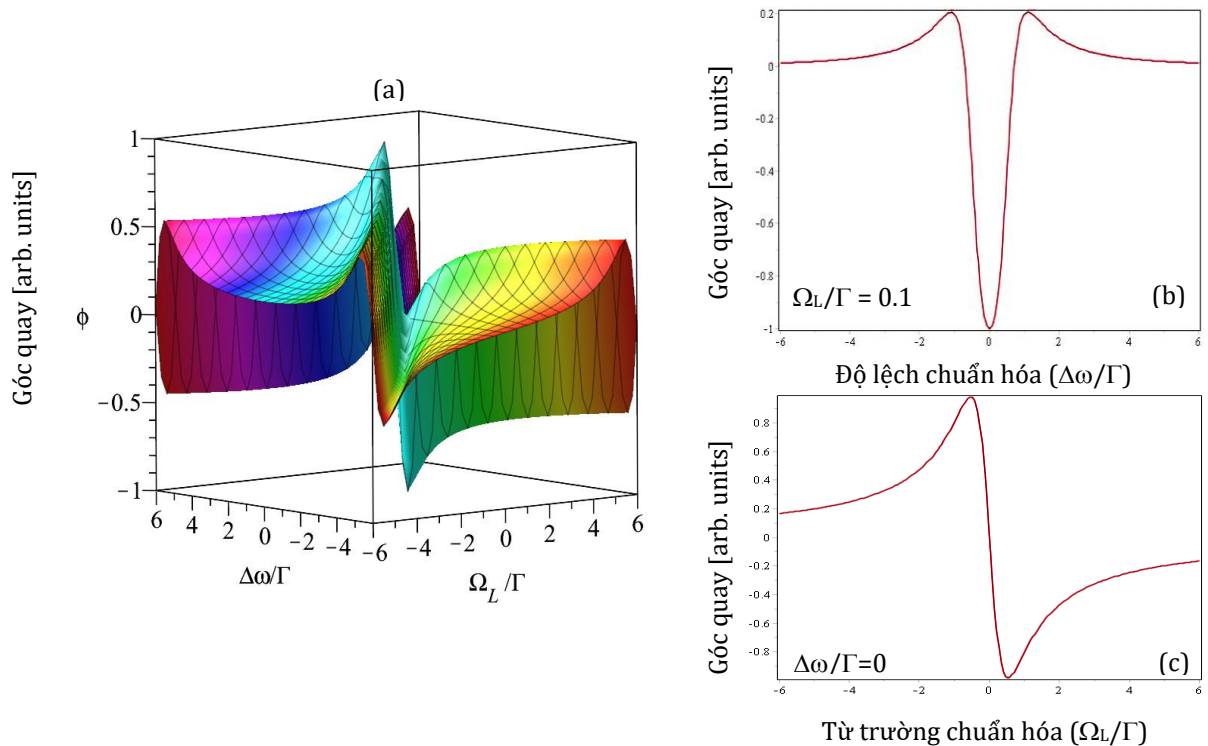
Ta biểu diễn phần thực và phần ảo của chiết suất phức khi có từ trường ngoài (biểu thức (8)), bằng các đường cong liền nét và đường đứt nét tương ứng như trên Hình 2. Khi không có từ trường, các đường cong mô tả sự phụ thuộc của chiết suất phức vào độ lệch chuẩn hóa của các thành phần cực tròn phải σ^+ và phân cực tròn trái σ^- chồng khít lên nhau (Hình 2a). Đường đứt nét mô tả thành phần hấp thụ và đường liền nét mô tả thành phần hệ số tán sắc của σ^+ và σ^- . Dưới tác dụng của từ trường, các thành phần cực tròn phải σ^+ và trái

σ bị tách ra, dạng của các đường cong hấp thụ và đường cong tán sắc không thay đổi nhưng đỉnh của các đường cong này bị dịch chuyển ra xa vùng cộng hưởng (Hình 2b).

Như trình bày ở trên, sự khác nhau giữa phần thực và phần ảo của chỉ số khúc xạ dẫn đến sự quay của mặt phẳng phân cực. Kết hợp các biểu thức (5), (6) và (9) chúng ta thu được mối liên hệ giữa góc quay ϕ và từ trường.

$$\phi \approx \frac{4\pi\chi_0\omega l}{c} \cdot \frac{\Omega_L (\Delta\omega^2 - \Gamma^2 / 4 - \Omega_L^2)}{[\Delta\omega^2 - \Gamma^2 / 4 - \Omega_L^2]^2 + \Gamma^2 \Delta\omega^2} \quad (10)$$

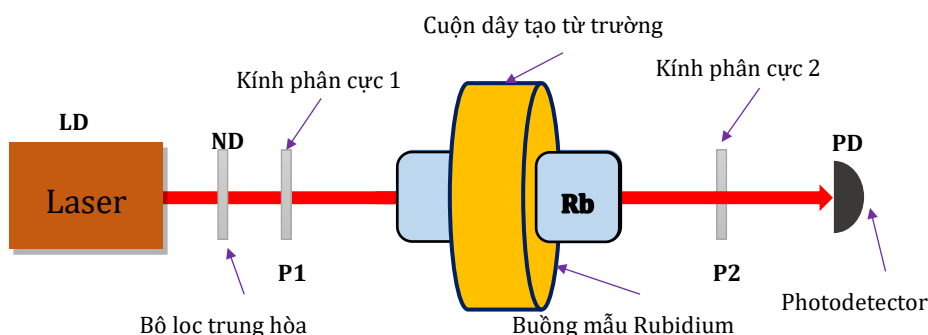
Dựa vào biểu thức (10) chúng ta có thể thấy được sự phụ thuộc của từ trường vào góc ϕ như trong Hình 3a. Hình 3b, chúng ta thấy, góc quay mặt phẳng phân cực của ánh sáng truyền qua thay đổi nhiều nhất ở gần dải tần số cộng hưởng của các dịch chuyển và đạt giá trị cực đại tại tần số cộng hưởng. Ở xa miền tần số cộng hưởng, ta không quan sát thấy sự quay mặt phẳng phân cực. Trên Hình 3c cho thấy khi giá trị của từ trường nhỏ thì góc quay phân cực tỉ lệ thuận với độ lớn của từ trường Ω_L/Γ , ngoài ra chiều quay mặt phẳng phân cực còn phụ thuộc vào hướng của từ trường ngoài.



Hình 3. Sự phụ thuộc góc quay quang - từ ϕ vào độ lệch tần chuẩn hóa ($\Delta\omega/\Gamma$) (a) và từ trường chuẩn hóa (Ω_L/Γ) (b)

2.2. Thực nghiệm

Hệ thí nghiệm được xây dựng như hình vẽ 4. Ở đây chúng tôi dùng một Laser Diode DLC202 (của hãng Moglab) phát liên tục có bước sóng nằm trong miền dịch chuyển D_2 của nguyên tử Rubidium, cường độ chùm laser có thể điều chỉnh bằng bộ lọc trung hòa và kính phân cực P1. Trong thí nghiệm này chúng tôi sử dụng buồng mẫu Rubidium $GC19075-RB$ của hãng Thorlabs, ở nhiệt độ phòng $T = 300$ K. Điều chỉnh cường độ chùm laser qua buồng mẫu $I_p = 1,6$ mW/cm², từ trường ngoài được tạo ra bằng cách sử dụng hệ Helmholtz-coil, có thể thay đổi bằng cách thay đổi cường độ dòng điện I qua cuộn dây, với $B = 32.I$ Gauss (*Advanced Physics Lab Experiments | TeachSpin, Inc | Buffalo, NY, 2025*). Khi dòng điện $I = 1,5$ A từ trường ngoài qua buồng mẫu có giá trị $B = 48$ G.



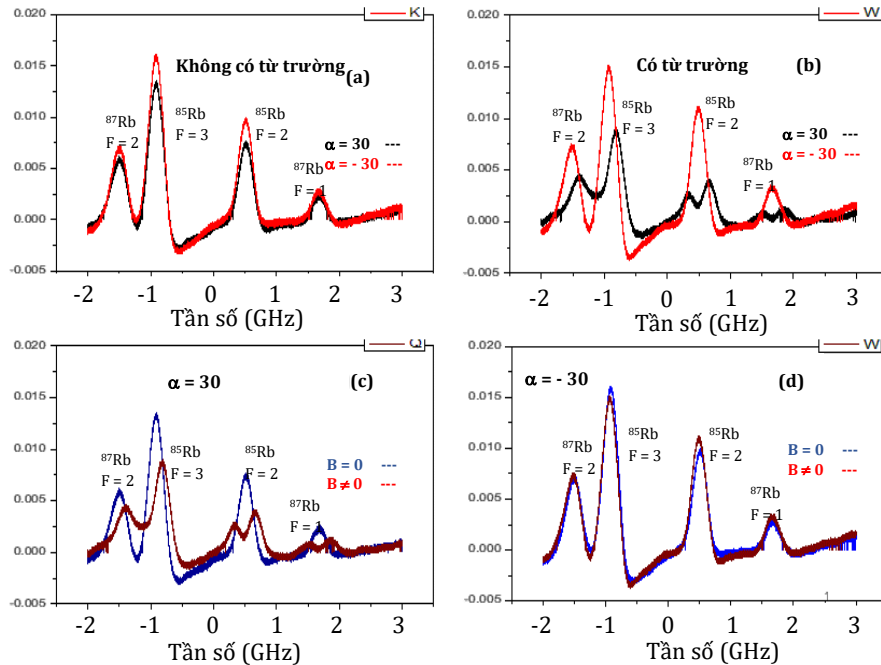
Hình 4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm quan sát hiệu ứng Macaluso - Corbino

Trong trường hợp không có từ trường, nếu quay kính phân cực P2, cường độ tín hiệu thu được trên PD thay đổi. Trên Hình 5a là tín hiệu thu được khi thay đổi góc phân cực của kính P2 (ứng với hai góc quay $\alpha = \pm 30^\circ$ của kính phân cực P2 so với hướng phân cực của P1), chúng ta thấy vị trí hấp thụ cực đại của tín hiệu ứng với các giá trị tần số khác nhau không thay đổi. Điều này chứng tỏ môi trường khí nguyên tử hấp thụ chùm laser tại các dịch chuyển cộng hưởng nhưng không làm thay đổi hướng phân cực của chùm laser khi qua buồng mẫu.

Trong trường hợp có từ trường ngoài, nếu quay kính phân cực P2 (hai góc quay $\alpha = \pm 30^\circ$), cường độ tín hiệu thu được trên PD thay đổi khác biệt ở các dịch chuyển cộng hưởng D_2 $5^2P_{3/2}(F' = 2, 3, 4) \rightarrow 5^2S_{1/2}(F = 3)$; $5^2P_{3/2}(F' = 1, 2, 3) \rightarrow 5^2S_{1/2}(F = 2)$ của ^{85}Rb và $5^2P_{3/2}(F' = 1, 2, 3) \rightarrow 5^2S_{1/2}(F = 2)$; $5^2P_{3/2}(F' = 2, 1, 0) \rightarrow 5^2S_{1/2}(F = 1)$ của ^{87}Rb (Hình 5b). Điều này cho thấy, dưới tác dụng của từ trường, chùm laser khi tương tác với môi trường khí nguyên tử đã bị thay đổi hướng phân cực tại các tần số gần với tần số cộng hưởng, sự quay mặt phẳng phân cực lớn nhất tại các dịch chuyển cộng hưởng, điều này phù hợp với nhận định đã đưa ra trong mục 2.1.

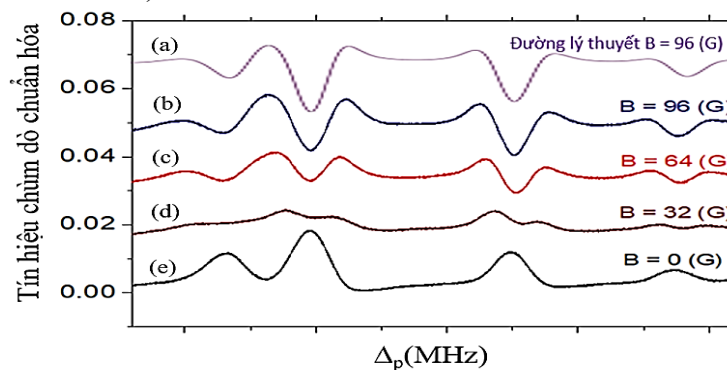
So sánh sự quay mặt phẳng phân cực tại các dịch chuyển ở các góc quay khác nhau $\alpha = 30^\circ$ và $\alpha = -30^\circ$ chúng ta thấy sự quay mặt phẳng phân cực ở các dịch chuyển cộng hưởng được thể hiện rõ rệt khi đặt kính P2 ở góc $\alpha = 30^\circ$, và thay đổi không đáng kể khi đặt kính

P2 ở góc $\alpha = -30^0$. Điều này chứng tỏ dưới tác dụng của từ trường, mặt phẳng chùm laser đã bị quay theo chiều kim đồng hồ, gần với hướng phân cực có $\alpha = -30^0$ của kính P2 hơn.



Hình 5. Quan sát hiệu ứng Macaluso - Corbino: (a) khi không có từ trường, (b) khi có từ trường. (c, d) So sánh khi có từ trường và khi không có từ trường.

Khi thay đổi từ trường, đặt kính phân cực P2 ở $\alpha = 60^0$ và đo các góc quay mặt phẳng phân cực chùm laser ở gần các dịch chuyển cộng hưởng, chúng ta nhận thấy khi từ trường tăng lên, góc quay mặt phẳng phân cực của các mode riêng lan truyền qua môi trường khí nguyên tử Rubidium tăng lên tại các miền cộng hưởng (Hình 6 b - e). Điều này phù hợp tốt với mô hình lý thuyết đã trình bày trong mục 2.1 và kết quả mô phỏng bằng phần mềm trong công trình (Zentile và c.s., 2015) ở Hình 6a.



Hình 6. So sánh góc quay mặt phẳng phân cực ánh sáng ở các giá trị từ trường ngoài khác nhau. Hình (a) đường mô phỏng theo lý thuyết, hình (b - e) đường thực nghiệm của các giá trị từ trường khác nhau khi $\alpha = 60^0$.

3. Kết luận

Trong bài viết này, chúng tôi sử dụng mô hình lý thuyết giải thích hiệu ứng Macaluso - Corbino về sự quay mặt phẳng phân cực của ánh sáng khi truyền qua khí nguyên tử Rubidium. Dưới tác động của từ trường ngoài, các mức năng lượng suy biến sẽ phân tách và tương tác với các thành phần phân cực tròn trái và tròn phải, dẫn đến sự quay mặt phẳng phân cực của chùm sáng có tần số gần tần số cộng hưởng của các dịch chuyển trong khí Rb.

Kết quả đo được bằng thực nghiệm cho thấy sự quay mặt phẳng phân cực tại các dịch chuyển D_2 của nguyên tử Rubidium hoàn toàn tương quan với dự đoán lý thuyết đưa ra, qua đó khẳng định tính khả thi và độ chính xác cao của phương pháp đo.

Nghiên cứu này không chỉ cung cấp bằng chứng thực nghiệm toàn diện về hiệu ứng Macaluso-Corbino trong môi trường khí nguyên tử Rubidium, mà còn mở ra các tiềm năng ứng dụng chuyển mạch quang - từ ở cấp độ nguyên tử, cảm biến quang - từ siêu nhạy (ứng dụng đo từ trường sóng não), ...

Trong các công trình tiếp theo, chúng tôi sẽ tối ưu hóa các yếu tố ảnh hưởng bởi hiệu ứng Doppler và khảo sát chi tiết vào các dịch chuyển siêu tinh tế trong môi trường khí nguyên tử Rubidium.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Advanced Physics Lab Experiments*, TeachSpin, Inc, Buffalo, NY. (2025). TeachSpin. Truy vấn 30 Tháng Chạp 2025, từ <https://www.teachspin.com>
- Fabricant, A., Novikova, I., & Bison, G. (2023). How to build a magnetometer with thermal atomic vapor: A tutorial. *New Journal of Physics*, 25(2), 025001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/acb840>
- Gerhardt, I. (2018). How anomalous is my Faraday filter? *Optics Letters*, 43(21), 5295-5298. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005295>
- Haider, T. (2017). A Review of Magneto-Optic Effects and Its Application. *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 7(1), 17-24.
- Hermann, J. A. (1997). Nonlinear optical absorption in thick media. *JOSA B*, 14(4), 814-823. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.14.000814>
- Jo, J. Y., Kim, Y., Hwangbo, C. K., & Kim, K. H. (2018). Sensitive measurement of the magneto-optic effect in the near infrared wavelength region with weak alternating magnetic fields. *Optical Materials Express*, 8(9), 2636-2642. <https://doi.org/10.1364/OME.8.002636>

- Julsgaard, B., Sherson, J., Cirac, J. I., Fiurášek, J., & Polzik, E. S. (2004). Experimental demonstration of quantum memory for light. *Nature*, 432(7016), 482-486.
<https://doi.org/10.1038/nature03064>
- Kurucz, Z., & Fleischhauer, M. (2008). Continuous-variable versus electromagnetically-induced-transparency-based quantum memories. *Phys. Rev. A*, 78.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.023805>
- Liu, Z., Guan, X., Qin, X., Wang, Z., Shi, H., Zhang, J., Miao, J., Shi, T., Dang, A., & Chen, J. (2023). An atomic filter laser with a compact Voigt anomalous dispersion optical filter. *Applied Physics Letters*, 123(13), 131103.
<https://doi.org/10.1063/5.0161979>
- Macaluso D., Corbino O. M. Nuovo Cimento. (1898). *Macaluso-corbino effect*. 384-389.
- Tian, M., Quan, W., Jiang, L., Liu, J., Chai, Y., Lu, Z., & Zhao, X. (2023). Single-beam NMOR atomic magnetometer based on a fiberized EOM. *Optics Letters*, 48(11), 3075-3078. <https://doi.org/10.1364/OL.494469>
- Yan, Y., Yuan, J., Wang, L., Xiao, L., & Jia, S. (2022). A dual-wavelength bandpass Faraday anomalous dispersion optical filter operating on the D1 and D2 lines of rubidium. *Optics Communications*, 509, 127855.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127855>
- Zentile, M. A., Keaveney, J., Weller, L., Whiting, D. J., Adams, C. S., & Hughes, I. G. (2015). ElecSus: A program to calculate the electric susceptibility of an atomic ensemble. *Computer Physics Communications*, 189, 162-174.
<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.11.023>