

MÁY BIẾN DÒNG ĐIỆN DÙNG SỢI QUANG LÀM PHẦN TỬ CẢM BIẾN

ThS NGUYỄN TRƯỜNG GIANG, LEI WENFENG, ZHANG JUNJIE

Trường Đại học Khoa học Công nghệ Thượng Hải

So với máy biến dòng điện kiểu thông thường, máy biến dòng điện làm việc dựa trên hiệu ứng Faraday dùng sợi quang làm phần tử cảm biến có rất nhiều ưu điểm như: mức cách điện lớn, không bị ảnh hưởng của nhiễu điện từ, băng thông rộng và tốc độ cao, kích thước gọn nhẹ và an toàn... Tuy nhiên, sự xuất hiện của các nguồn lưỡng chiết thẳng bên trong phần tử cảm biến làm ảnh hưởng tới độ nhạy thiết bị. Để xử lý vấn đề này có nhiều giải pháp đã được đưa ra, trong đó máy cảm biến dòng điện sử dụng công nghệ quang OCSs (Optical Current Sensors) cho thấy là giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho các biến dòng điện kiểu cảm ứng hiện nay.

Từ khóa: lưỡng chiết thẳng, hiệu ứng Faraday, cảm biến dòng điện.

CURRENT TRANSFORMER WITH OPTIC-FIBRE SENSOR

Summary

In comparison with conventional types of current transformer, the current transformer which works on the basis of Faraday Effect using optic fiber as the sensing element has many advantages such as greater level of insulation, being not affected by electromagnetic noise, broad and high-speed band, compact size, safety and so on. However, the existence of the direct birefringence sources inside the sensing element affects the device sensitivity. To this end, many solutions have been given, and optical current sensors (OCSs) are an alternative promising solution for the existing sensor-mode current transformers.

Keyword: direct birefringence, Faraday effect, current sensor.

Đặt vấn đề

Thông số về dòng điện để phục vụ cho việc tính toán, theo dõi, giám sát, điều khiển và bảo vệ hệ thống điện được đo lường qua các máy biến dòng điện. Những điểm hạn chế cố hữu của máy biến dòng kiểu cảm ứng như là hiện tượng bão hòa từ khi có dòng điện lớn (sự cố) hay hiện tượng từ dư, nguy cơ cháy nổ do dùng cách điện khiến cho giải pháp khắc phục trở nên phức tạp, không ưu việt về tính kinh tế và kỹ thuật, đặc biệt là trong các lưới điện cao và siêu cao. Trong khi đó, khai thác tính ưu việt của vật liệu quang (mức cách điện lớn, không bị ảnh hưởng của nhiễu điện từ, có thể dùng để đo cho cả điện xoay chiều và một chiều...), máy biến dòng điện sử dụng công nghệ quang OCSs cho thấy đây là một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho các máy biến dòng điện kiểu cảm ứng hiện nay.

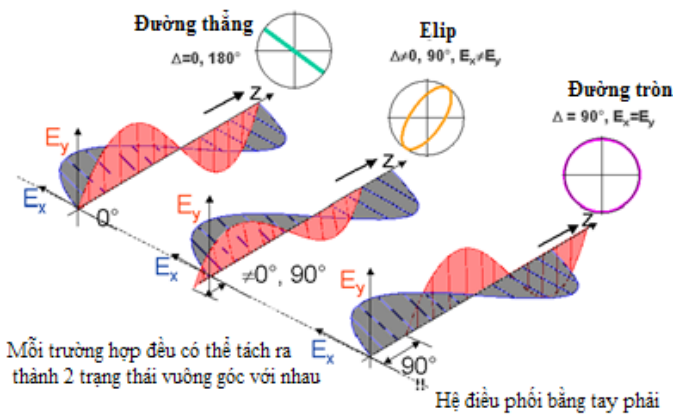
Nguyên lý làm việc và sơ đồ phát hiện (đo)

Trạng thái phân cực của ánh sáng

Là một dạng sóng điện từ ngang, ánh sáng bao gồm điện trường và từ trường thẳng góc với hướng truyền và có thể phân loại thuộc tính thành: không phân cực và phân cực. Mặt phẳng phân cực của ánh sáng tự nhiên (ánh sáng không phân cực) dao động tùy ý dọc theo hướng truyền nên về cơ bản không có hướng chính. Đối với ánh sáng phân cực, tất cả các thành phần trường có độ lệch pha không đổi so với nhau.

Thông thường, khi mô tả về sự phân cực thì vectơ cường độ

điện trường E thường được đề cập, vì vectơ cường độ từ trường \vec{H} luôn thẳng góc và tỷ lệ với nó. Có thể biểu thị mỗi trạng thái phân cực - SOP (State of Polarization) dưới dạng tổng của 2 thành phần trực giao. Hai thành phần của \vec{E} (E_x, E_y) biến thiên dạng hình sin với cùng tần số nhưng biên độ và góc pha của chúng có thể khác nhau. Các SOP được chia làm 3 loại: phân cực thẳng, phân cực tròn và phân cực elip (hình 1).



Hình 1: trạng thái phân cực của ánh sáng

Hai trường hợp (thẳng và tròn) chỉ xảy ra trong các điều kiện đặc biệt. Phân cực thẳng xảy ra khi cả 2 thành phần E_x và E_y đồng pha ($\Delta = 0^\circ$), khi đó xếp chồng 2 thành phần trực giao sẽ định hướng theo chỉ một hướng trên mặt phẳng ngang và hình chiếu lên mặt phẳng này là đường thẳng; còn phân cực tròn xảy ra khi 2 thành phần vuông pha ($\Delta = 90^\circ$) và có cùng biên độ ($E_x = E_y$). Các trường hợp khác là phân cực elip.

Luồng chiết

Luồng chiết là hiện tượng tia sáng khi truyền qua chất dị hướng bị phân tách tia sáng thành 2 tia (tia thường và tia bất thường), tùy theo trạng thái phân cực SOP của tia sáng [1].

Nhìn chung, các vật liệu quang (thủy tinh hay tinh thể trong suốt) dùng để chế tạo các thiết bị hoạt động dựa trên hiệu ứng Faraday có đặc trưng là chiết xuất (hệ số khúc xạ) phụ thuộc vào hướng truyền và sự phân cực của ánh sáng. Chiết xuất của tinh thể có giá trị khác nhau đối với 2 thành phần phân cực trực giao của sóng ánh sáng. Đặc tính mà ở đó vật liệu có 2 chiết xuất thường được biết đến với thuật ngữ lưỡng chiết hay khúc xạ kép.

Hiệu ứng Faraday

Ngày 13.9.1845, Michael Faraday phát hiện ra hiệu ứng từ - quang, còn gọi là hiệu ứng Faraday, mô tả sự quay của mặt phẳng phân cực của chùm sáng khi truyền qua vật liệu quang đặt trong từ trường [2, 3]. Trong hiệu ứng Faraday, góc quay Faraday θ_F (còn được gọi là góc phương vị phân cực) của mặt phẳng phân cực khi truyền chùm tia sáng phân cực thẳng qua vật liệu quang theo hướng của từ trường H được cho bởi:

$$\theta_F = \int_l \vec{V} \vec{H} \vec{dl} \quad (1)$$

Trong đó: V là hệ số Verdet ($^\circ/T.m$), được xác định bởi đặc tính của vật liệu quang; l là độ dài tương tác (m).

Trường hợp độ dài tương tác (quang lộ) tạo thành vòng kín thì (1) trở thành:

$$\theta_F = V \oint \vec{H} \vec{dl} \quad (2)$$

Có thể thấy Luật Ampere cũng được viết dưới dạng tương tự (2):

$$I = \oint \vec{H} \vec{dl} \quad (3)$$

Như vậy, có thể xác định từ trường (H) và dòng điện (I) qua việc đo góc θ_F . Các OCSs hoạt động dựa trên hiệu ứng Faraday đo tích phân từ trường theo quang lộ (kín hoặc gần kín) bao quanh dòng điện cần đo.

Tuy nhiên, cần lưu ý (2) chỉ có nghĩa ở điều kiện mà SOP của chùm sáng phân cực thẳng dọc theo quang lộ được bảo toàn, nghĩa là: khi ánh sáng phân cực thẳng truyền trong phần tử cảm biến thì góc phương vị của nó phải được duy trì không đổi trừ khi có một dòng điện chạy qua tâm cảm biến. Nếu không, các phân đoạn khác nhau của quang lộ bên trong phần tử cảm biến sẽ có độ nhạy khác nhau [4]. Như vậy, có thể điều chỉnh độ nhạy toàn phần theo vị trí của dây dẫn so với thiết bị và sự xuất hiện các trường cảm ứng bởi các dòng điện khác [5].

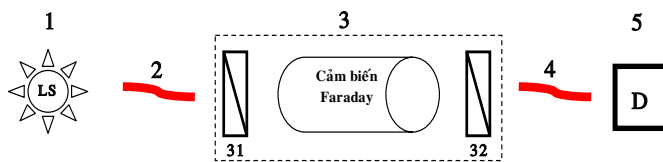
Sơ đồ đo/phát hiện

Sơ đồ đo cơ bản: để đo góc θ_F của ánh sáng đầu ra của OCSs dựa trên hiệu ứng Faraday, có khá nhiều sơ đồ đo đã được giới thiệu. Trên hình 2 là sự bố trí của sơ đồ đo cơ bản, trong đó độ lệch giữa trục truyền của bộ phân cực (kính lọc) và bộ phân tích là 45° . Bởi vậy, cường độ ánh sáng sau khi

truyền qua hệ thống này được cho bởi:

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\theta_F) \quad (4)$$

Trong đó: I_0 là cường độ ánh sáng đầu vào.



- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1: Nguồn sáng | 3: Phân tử cảm biến |
| 2, 4: Cáp (sợi) quang đầu vào/ra | 31: Bộ phân cực |
| 5: Bộ phát hiện (do) | 32: Bộ phân tích |

Hình 2: sơ đồ cơ bản đo góc quay mặt phẳng phân cực

Để loại bỏ sự phụ thuộc vào cường độ ánh sáng, ta chia thành phần xoay chiều (AC) cho thành phần một chiều (DC), có được kết quả sau cùng S:

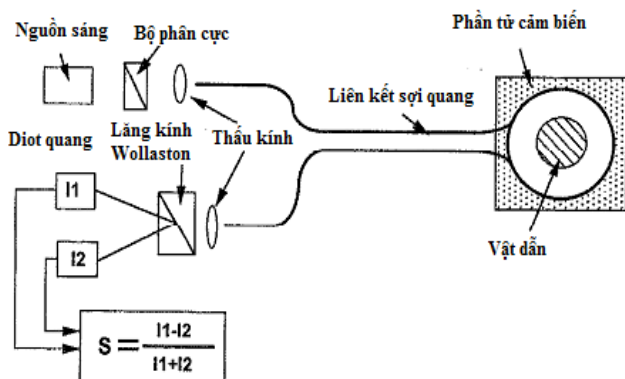
$$S = \sin 2\theta_F \quad (5)$$

Vì kết quả trên chưa xét đến ảnh hưởng của hiện tượng lưỡng chiết trong vật liệu cảm biến nên trên thực tế sẽ có sai số do ảnh hưởng của hiện tượng này.

Sơ đồ lưỡng cầu phương: là một trong những sơ đồ đo được ứng dụng phổ biến nhất, ánh sáng ló ra khỏi phân tử cảm biến được phân thành 2 chùm phân cực thẳng trực giao nhờ lăng kính Wollaston. Cường độ của 2 chùm tia này được đo (phát hiện) riêng rẽ và 2 tín hiệu đầu ra này được cung cấp cho mạch điện tử tương tự để tính hàm đầu ra:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (6)$$

Trong đó: I_1 và I_2 là cường độ 2 chùm tia.



Hình 3: sơ đồ lưỡng cầu phương

Sau khi căn chỉnh lăng kính Wollaston sao cho $S = 0$ khi không có từ trường, hệ thống này có thể sử dụng để đo θ_F , và khi đó (6) sẽ trở thành dạng (5). Khi θ_F khá nhỏ, tín hiệu đầu ra thu được sẽ tỷ lệ với trị số góc quay góc phương vị của ánh sáng phân cực thẳng đầu ra. Nếu có hiệu ứng lưỡng chiết trong phân tử cảm biến thì tín hiệu đầu ra của hệ thống trên sẽ trở thành:

$$S = 2\theta_F \frac{\sin \delta}{\delta} \quad \text{với } \delta \gg 2\theta_F \quad (7)$$

$$\text{và } S = \sin 2\theta_F \quad \text{với } \delta \ll 2\theta_F \quad (8)$$

Trong đó: δ là độ lưỡng chiết thẳng bên trong cuộn quang. Lưỡng chiết này không chỉ làm giảm độ nhạy của thiết bị mà còn làm giảm cả độ ổn định của tín hiệu đầu ra.

Máy biến dòng điện sử dụng sợi quang làm phân tử cảm biến

Trên thực tế, vấn đề chủ yếu trong thiết kế và chế tạo OCSs là sự xuất hiện của các loại lưỡng chiết thẳng trong cuộn quang do độ elip lõi [6] và ứng suất không đối xứng [7]; do uốn cong [8] và áp lực ngang [9] khiến cho độ nhạy của cảm biến thấp hơn so với (2). Hơn nữa, do sự phụ thuộc vào nhiệt độ của lưỡng chiết nên độ nhạy cảm biến cũng chịu ảnh hưởng của biến động nhiệt độ môi trường. Vì vậy, để cải thiện hoạt động của cảm biến thì điều quan trọng là trong quá trình thiết kế và chế tạo cảm biến loại này cần giảm thiểu các tác động của tất cả các nguồn lưỡng chiết ngoại lai. Dưới đây là tổng hợp một số giải pháp đã được nghiên cứu, đề xuất và báo cáo.

Sử dụng sợi có độ lưỡng chiết tròn lớn

Để thấy, khi có độ lưỡng chiết tròn lớn xuất hiện trong sợi quang thì có thể loại bỏ (bù) được lưỡng chiết thẳng gây ra do uốn cong trong khi góc quay Faraday (là hiệu ứng lưỡng chiết tròn tạo bởi từ trường) được xếp chồng lên lưỡng chiết tròn này; nhờ đó, có thể giữ được độ nhạy đo lường.

Sợi quang có độ lưỡng chiết tròn lớn có thể tạo được bằng cách bện xoắn [10], hoặc sử dụng sợi SEB (Spun Elliptically Birefringent) [11]. Phạm vi (ngưỡng) trên của độ xoắn được giới hạn bởi ngưỡng mỗi cơ khí của sợi.

Vấn đề chủ yếu đối với cảm biến loại này là sự phụ thuộc nhiệt độ mà chủ yếu là do sự phụ thuộc

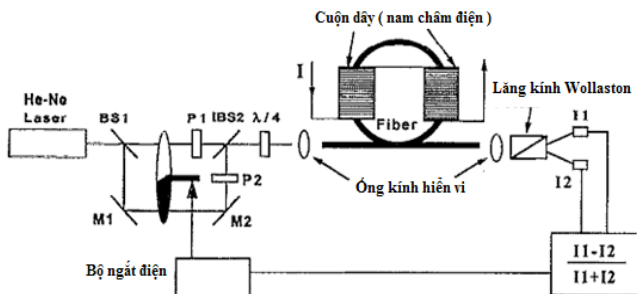
vào sự biến động nhiệt của lưỡng chiết tròn. Để hạn chế ảnh hưởng của biến động nhiệt, có thể vận dụng sơ đồ bù nhiệt trong thiết kế. Laming và Payne sử dụng một sơ đồ bù nhiệt tích cực trong thiết kế của mình [11]: trong phạm vi 20÷70°C, cảm biến sử dụng sợi SEB chỉ có mức thay đổi 0,05%/°C về độ nhạy của nó.

Tôi (ủ) cuộn dây sợi quang

Day và Etzel đưa ra một trong những biện pháp khá hiệu quả trong việc loại bỏ lưỡng chiết thẳng gây ra do uốn cong là phương pháp tối [12]: cuộn quang được gia nhiệt tới 800-900°C trong khoảng 24 giờ rồi được làm mát chậm. Thực nghiệm với cảm biến sử dụng cuộn quang có đường kính một vài cm và hơn 100 vòng sử dụng kỹ thuật này đã cho kết quả tốt [13]. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là khi tối ở nhiệt độ cao sẽ làm mất lớp phủ bảo vệ và có khuynh hướng làm yếu sợi. Do vậy, cuộn quang được tối phải được đóng gói (bó) sao cho không được tạo thêm lưỡng chiết thẳng. Nhóm Tang đã cho những cuộn quang được tối vào dầu có độ nhớt lớn chứa Teflon, kết quả cho thấy hệ số nhiệt của độ nhạy cảm biến vào khoảng 0,017%/°C trong phạm vi -10÷120°C [14].

Sử dụng đa hợp (dồn kênh) thời gian của 2 SOP ánh sáng đầu vào

Thay vì loại bỏ lưỡng chiết thẳng gây ra do uốn cong, Ren và Robert đề xuất một sơ đồ đo sử dụng dồn kênh thời gian 2 SOP khác nhau của ánh sáng đầu vào: cả ánh sáng phân cực thẳng và ánh sáng phân cực tròn lần lượt được đưa vào cảm biến (hình 4). Nhờ đó, góc quay Faraday được tách khỏi lưỡng chiết thẳng gây ra do uốn cong.



Hình 4: sơ đồ dồn kênh thời gian để loại bỏ ảnh hưởng của lưỡng chiết thẳng do uốn cong

Với đầu vào ánh sáng phân cực thẳng thì ở đầu ra cảm biến sẽ có:

$$S_1 = 2\theta_F \frac{\sin \left[\sqrt{\delta^2 + (2\theta_F)^2} \right]}{\sqrt{\delta^2 + (2\theta_F)^2}} \quad (9)$$

Còn với đầu vào là ánh sáng phân cực tròn thì ở đầu ra sẽ là:

$$S_2 = \delta \frac{\sin \left[\sqrt{\delta^2 + (2\theta_F)^2} \right]}{\sqrt{\delta^2 + (2\theta_F)^2}} \quad (10)$$

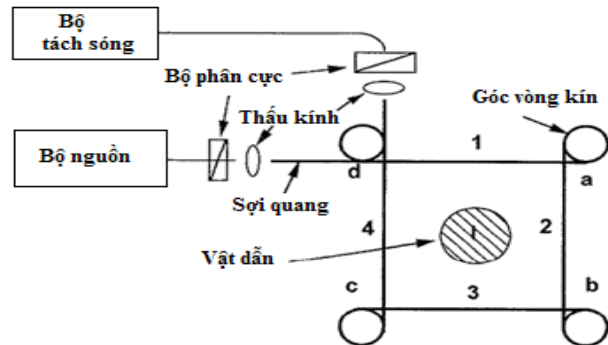
Từ (9), (10) rút ra được:

$$2\theta_F = \frac{\arcsin \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2}} \quad (11)$$

Biểu thức (11) cho thấy lưỡng chiết thẳng (δ) đã được loại bỏ hoàn toàn nhờ ứng dụng sơ đồ này. Tuy nhiên, với chất lượng tín hiệu đầu vào không tốt (không hoàn hảo) thì sẽ đạt được độ nhạy biểu kiến khác nhiều so với (11).

Thiết kế dạng hình học (tô-pô) đặc thù cho phần tử cảm biến

Trong thiết kế này, lưỡng chiết thẳng gây ra bởi uốn cong được sử dụng như một bộ trễ pha. Với kiến trúc bố trí của phần tử cảm biến được thiết kế cẩn thận, có thể “trói” lưỡng chiết thẳng tại 4 góc của phần tử cảm biến dạng vuông này và không có lưỡng chiết thẳng xuất hiện ở 4 cánh tay cảm biến (hình 5). Tại mỗi góc của cảm biến này, có 3 vòng sợi quang với bán kính uốn cong 10 mm để tạo độ trễ 2π giữa 2 thành phần trực giao của ánh sáng phân cực thẳng. Vì 4 cánh tay cảm biến (chứa sợi thẳng) tạo thành vòng kín bao quanh dây dẫn nên tín hiệu đầu ra chỉ biểu thị góc quay Faraday như được xác định bởi (2).

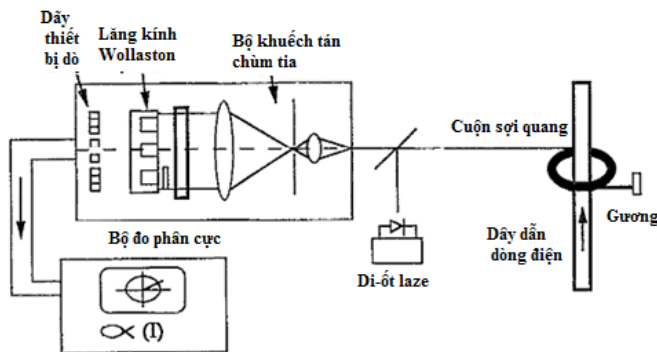


Hình 5: kiến trúc tổng thể của đầu cảm biến

Ưu điểm của sơ đồ này là có thể chế tạo cảm biến với kích thước rất nhỏ, đồng thời có thể tăng độ nhạy của cảm biến một cách tuyến tính theo số vòng sợi quang. Tuy nhiên, nhược điểm chính của cảm biến loại này là độ nhạy của nó chịu ảnh hưởng của biến động nhiệt vì có độ lưỡng chiết thẳng lớn gây ra bởi uốn cong bên trong phần tử cảm biến.

Sử dụng polarimeter (phân cực kế)

Nếu sự biến động nhiệt diễn ra trong một phạm vi hẹp (thường là 5÷10°C) thì có thể phân biệt biến động về SOP của ánh sáng đầu ra do dòng điện gây ra với ảnh hưởng của nhiệt độ bằng cách phân tích SOP hoàn toàn [15], tức là đo đồng thời góc phương vị và độ elip rồi đánh giá dòng điện và nhiệt độ tức thời bằng bảng tra cứu. Trong sơ đồ này (hình 6), 3 lăng kính Wollaston và mảng (dây) gồm 6 bộ phát hiện kèm theo một mảng bộ lọc phân cực được sử dụng để tạo ra 6 tín hiệu cần cho tính toán góc phương vị và độ elip của tín hiệu đầu ra. Hệ thống do Ahlers và Bosselmann giới thiệu (hình 6) đạt được độ phân giải (resolution) về góc phương vị và độ elip là 0,1°[15].

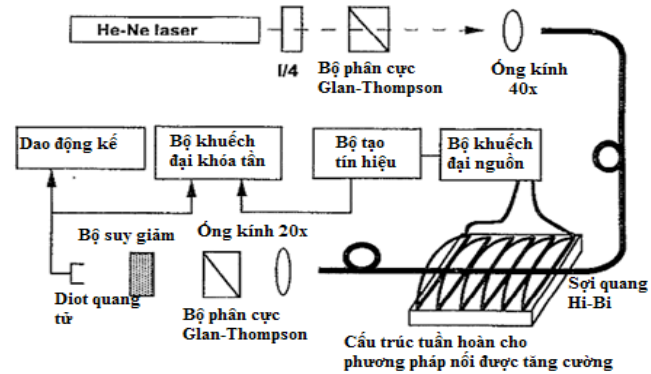


Hình 6: phân tích đầy đủ sự phân cực của máy biến dòng từ-quang MOCS (Magnetic-Optic Current Sensor) bằng polarimeter

Sử dụng sợi Hi-Bi (Highly - Birefringent)

Nhóm nghiên cứu Chu, McStay và Rogers đề xuất một thiết kế về OCSs sử dụng sợi Hi-Bi [16]. Trong hệ thống của họ (hình 7), ánh sáng phân cực thẳng được tạo ra ở 1 trong 2 phương thức dao động riêng (eigenmode) phân cực trực giao với tỷ số tắt dần 30 dB, còn ánh sáng tổng hợp (ghép) do hiệu ứng Faraday được phát hiện ở phương thức (mode) khác nhờ bộ phân tích Glan - Thompson. Tín hiệu đầu ra của hệ thống này tỷ lệ với dòng điện đặt. Do hệ số ghép phương thức (mode coupling coefficient)

của cảm biến phụ thuộc nhiều vào chu kỳ của từ trường đặt (xác định theo cấu hình cảm biến) nên hoạt động của thiết bị này sẽ ít chịu ảnh hưởng của biến động của môi trường hơn vì chúng không xuất hiện trong dạng chu kỳ dọc sợi cảm biến.



Hình 7: sơ đồ thực nghiệm đo dòng điện sử dụng dùng sợi Hi-Bi

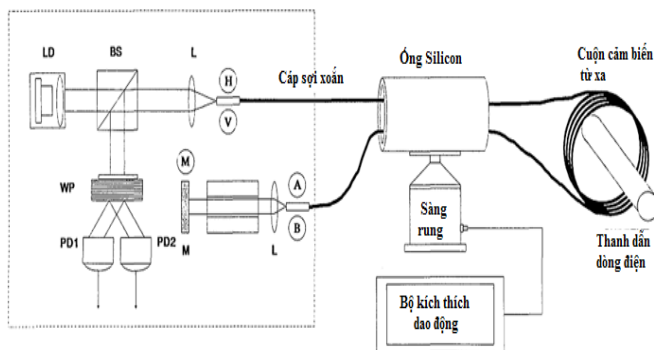
Sử dụng sơ đồ phát hiện giao thoa

Cũng có thể sử dụng thuật ngữ lưỡng chiết tròn để biểu thị cho hiệu ứng Faraday, nghĩa là có thể mô tả khá tốt sự thay đổi của góc phương vị gây ra bởi dòng điện dưới dạng sự thay đổi của lưỡng chiết tròn do dòng điện gây ra hoặc dưới dạng điều chế chiết suất vi sai và nhờ đó tạo ra sự thay đổi góc pha. Có thể phát hiện sự thay đổi góc pha đó bằng cách sử dụng các sơ đồ phát hiện giao thoa. Trong các sơ đồ loại này, giao thoa kế Sagnac (cho phép đo các hiệu ứng phi thuận nghịch độc lập với các kích động thuận nghịch) có một số ưu điểm đối với việc đo dòng điện bởi bản chất phi thuận nghịch của hiệu ứng Faraday. Trong giao thoa kế Sagnac, ngoài sự biến động lưỡng chiết tròn của sợi quang do nhiệt độ không thể khôi phục thì có thể xử lý ảnh hưởng của nhiễu loạn cường độ ánh sáng và sự thay đổi về SOP đầu vào bằng cách sử dụng một sơ đồ loại bỏ phương thức phổ dụng (common mode). Hơn nữa, do tất cả các nguồn nhiễu loạn thể hiện sự biến đổi ở tần số thấp nên có thể tránh được nhờ sử dụng phương pháp ngoại sai (tần số phách) khi đo góc quay Faraday. Nhóm nghiên cứu Leilabady sử dụng bộ điều pha áp điện hình trụ trong giao thoa kế Sagnac trong thiết kế cảm biến dòng có thể phát hiện dòng điện xoay chiều nhỏ nhất là 10 mA [17].

Sử dụng OCR hoặc MRM

Hầu hết các OCSs đều cần có cáp quang kết nối phần tử cảm biến với nguồn sáng và bộ đo nằm bên trong bộ phận đo lường. Trong bất cứ hệ thống

do dòng điện sử dụng sợi quang nào trên thực tế thì các nhiễu loạn (kích động) từ môi trường như biến động nhiệt và dao động cơ khí trên cáp nối quang sẽ làm giảm tỷ số tín hiệu - nhiễu S/N (Signal/Noise) ở đầu ra và do đó ảnh hưởng tới hoạt động của hệ thống cảm biến. Để khắc phục vấn đề này, có thể sử dụng sơ đồ bù lưỡng chiết thụ động, trong đó sử dụng OCR (orthoconjugate reflector: bộ phản xạ liên hợp vuông) [11], hoặc MFR (mirrored Faraday rotator) [18].



Hình 8: OCSs sử dụng MRM

Kết luận

Với nhiều tính năng nổi trội về kết cấu và nguyên lý hoạt động, cũng như được tập trung đầu tư nghiên cứu và phát triển, các OCSs có tiềm năng rất lớn trong việc thay thế các biến dòng thế hệ cũ (hoạt động theo nguyên lý cảm ứng điện từ) vốn có một số nhược điểm cố hữu về tính kinh tế - kỹ thuật cũng như đáp ứng các yêu cầu của xu thế lưới điện hiện đại như Smart Grids. Mặc dù, nhiều thiết kế đã và đang được đưa vào hoạt động trên các lưới điện hiện đại tại một số quốc gia như Nhật Bản, Đức... nhưng một số vấn đề về tính kinh tế - kỹ thuật trong thiết kế và chế tạo vẫn cần được nghiên cứu, thử nghiệm để có giải pháp tối ưu hơn ■

Tài liệu tham khảo

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Birefringence>
- [2] Mansuripur M. "The Faraday Effect", Optics and Photonics News, Issue 11, pp. 32-36 (1999).
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect
- [4] Ning Y.N., Wang Z.P., Palmer A.W., Grattan K.T.V. and Jackson D.A. "Recent progress in optical current sensing techniques", Rev. Sci. Instrum.66(5), pp. 3097-3111 (1995).
- [5] Bush S.B. and Jackson D.A. "Numerical investigation

of the effects of birefringence and total internal reflection on a Faraday effect current sensors", Appl. Opt. 31, pp. 5366-5374 (1992).

[6] Rashleigh S.C. and Ulrich R. "Origins and control of polarisation effects in single-mode fibres", J. Lightwave Technol., Vol. LT-1, no. 2, pp. 312-331 (1983).

[7] Norman S.R., Payne D.N., Adams M.J. and Smith A.M. "Fabrication of single-mode fibres exhibiting extremely low polarisation birefringence", Electron. Lett, Vol. 15, pp. 309-311 (1979).

[8] Ulrich R., Rashleigh S.C. and Eickhoff W. "Bending-induced birefringence in single-mode fibres", Optics Letter, Vol. 5, no. 6, pp. 273-275 (1980).

[9] Smith A.M. "Single-mode fibre pressure sensitivity", Electron. Lett. Vol. 16, no. 20, pp. 773-774 (1980).

[10] Ulrich R. and Simon A. "Polarization optics of twisted single-mode fibers", Applied Optics, Vol.18, Issue 13 pp.2241-2251 (1979).

[11] Laming R.I. and Payne D.L. "Electric current sensors employing highly birefringent optical fibers", Journal of lightwave technology, Vol. 7, Issue 12, pp.2084-2094 (1989).

[12] Day G.W. and Etzel S.M. "Annealing of bend-induced birefringence in fiber current sensors", Technical Digest International Conference on Integrated Optics and Technical Fiber Communication, European Conference on Optical Communication, pp.871-874 (1985).

[13] Tang D. and Day G.W. "Progress in the development of miniature optical fiber current sensors", IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS'88 Annual Meeting, Conference Proceedings, pp.306-307 (1988).

[14] Tang D., Rose A.H. and Day G.W. "Practical consideration in the design of optical fiber current sensors", SPIE 1267, Fiber Optic Sensors IV (1990).

[15] Ahlers H. and Bosselmann Th. "Complete polarization analysis of a magneto-optic current transformer with a new polarimeter", Proceedings on the 7th Optical Fiber Sensors Conference (1990).

[16] Chu W., McStay D. and Rogers A.J. "Current sensing by mode coupling in fibre via the Faraday effect", Electron. Lett. 27, pp. 207-208 (1991).

[17] Leilabady P.A., Wayte A.P., Berwick M., Jones J.D.C. and Jackson D.A. "A pseudo-reciprocal fiber-optic Faraday rotation sensor: current measurement and data communication applications", Opt. Commun. 59, pp.173-176 (1986).

[18] Pistoni N.C. and Martinelli M. "Vibration-insensitive fiber-optic current sensor", Optics letters, Vol. 18, no. 4, pp. 314-316 (1993).