

Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp Ti tới độ ổn định của cảm biến cộng hưởng plasmon bề mặt loại đo dòng cấu trúc ITO/aSi:H/Ti/Au

Vũ Xuân Mạnh¹, Lê Hồng Minh¹, Lê Văn Bé², Nguyễn Huy Tiệp³, Lê Việt Cường^{3*}

¹Viện Ứng dụng Công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ, 25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Sư phạm Kiên Giang, 449 Nguyễn Chí Thanh, phường Rạch Sỏi, TP Rạch Giá, tỉnh Kiên Giang, Việt Nam

³Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, phường Dịch Vọng Hậu, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 26/7/2024; ngày chuyển phân biện 1/8/2024; ngày nhận phân biện 20/8/2024; ngày chấp nhận đăng 23/8/2024

Tóm tắt:

Cảm biến dựa trên cộng hưởng plasmon bề mặt hay cảm biến cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) đã được chứng minh là có độ nhạy cao trong việc phát hiện sự thay đổi chiết suất của môi trường xảy ra gần bề mặt cảm biến. Tuy nhiên, các cảm biến SPR hiện nay phải kết hợp với một hệ thống quang học bên ngoài, bao gồm các cảm biến quang và hệ thống dịch chuyển chính xác, để đo lường sự thay đổi cả về cường độ và vị trí của ánh sáng phản xạ. Đây là hạn chế chính của các cảm biến hiện nay, khiến chúng không linh hoạt và khó áp dụng trong các xét nghiệm tại chỗ. Hạn chế này đã được chúng tôi khắc phục trong nghiên cứu này, bằng cách tích hợp một cảm biến quang (photodiode) dạng màng mỏng ngay dưới lớp vật liệu plasmonic. Cụ thể, các cảm biến SPR do chúng tôi đề xuất có cấu trúc đế thủy tinh/lớp điện cực trong suốt ITO (200 nm)/lớp Si vô định hình pha tạp hydro (100 nm)/Ti (10 nm)/Au (50 nm), có thể hoạt động tương tự các cảm biến SPR phổ biến hiện nay có cấu trúc dựa trên cấu hình Kretschmann. Nguyên lý hoạt động của cảm biến SPR do chúng tôi đề xuất và tác động của lớp Ti tới độ ổn định của cảm biến cũng được thảo luận trong bài báo này.

Từ khóa: cảm biến SPR, cấu hình Kretschmann, cộng hưởng plasmon bề mặt.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.5

Study on the effect of Ti layer on the stability of electrical measuring surface plasmon resonance sensors with ITO/aSi:H/Ti/Au structure

Xuan Manh Vu¹, Hong Minh Le¹, Van Be Le², Huy Tiep Nguyen³, Viet Cuong Le^{3*}

¹National Center for Technological Progress, Ministry of Science and Technology,
25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

²Kien Giang Teacher Training College, 449 Nguyen Chi Thanh Street, Rach Soi Ward, Rach Gia City, Kien Giang Province, Vietnam

³University of Engineering and Technology, Vietnam National University - Hanoi, 144 Xuan Thuy Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 26 July 2024; revised 20 August 2024; accepted 23 August 2024

Abstract:

Surface plasmon resonance-based sensors, or surface plasmon resonance (SPR) sensors, have been demonstrated to possess high sensitivity in detecting refractive index changes in the medium occurring near the surface of the sensor. However, current SPR sensors must be coupled with an external optical system, including photodetectors and precise displacement systems, to measure changes in both the intensity and position of the reflected light. This is the main disadvantage of current SPR sensors, rendering them non-portable and challenging to apply in on-site experiments. In this study, we have overcome this limitation by integrating a thin-film photodiode directly beneath the plasmonic material layer. Specifically, the SPR sensors we propose have a structure of glass substrate/indium tin oxide (ITO) layer (200 nm)/hydrogenated amorphous Si layer (100 nm)/Ti (10 nm)/Au (50 nm), which can operate similarly to conventional SPR sensors based on the Kretschmann configuration. The operating principle of our proposed SPR sensor and the impact of the Ti layer on the sensor's stability will be discussed in this article.

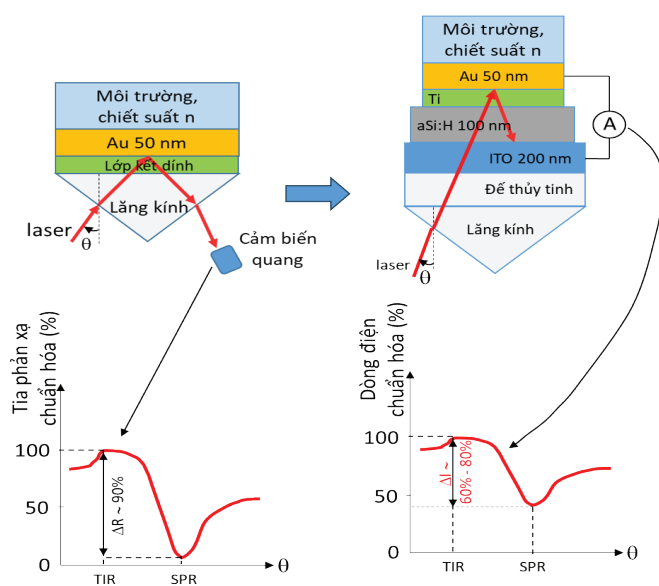
Keywords: Kretschmann configuration, SPR sensor, surface plasmon resonance.

Classification numbers: 1.3, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: cuonglv@vnu.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Các cảm biến cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) dựa trên cấu hình Kretschmann (hình 1, bên trái), đã được triển khai thành công trong nhiều thiết bị thương mại và được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như khoa học đời sống, chẩn đoán y khoa, phân tích thực phẩm và nghiên cứu môi trường [1-7]. Cảm biến có cấu tạo đơn giản, chỉ bao gồm một lớp vật liệu plasmonic, thường là vàng (Au) dày 50 nm [4-8] được lắng đọng trên một lăng kính thông qua một lớp kết dính mỏng crôm (Cr) hoặc titan (Ti). Tuy nhiên, thiết bị hoàn chỉnh cần phải có hệ thống quang học lớn và phức tạp bên ngoài cảm biến, để xác định vị trí và cường độ của ánh sáng phản xạ, tại mặt chuyển tiếp giữa lớp kết dính và lớp Au, lộ ra khỏi lăng kính (hình 1, bên trái). Hệ thống quang học này, khiến thiết bị phân tích sử dụng cảm biến SPR hiện nay có kích thước lớn, hạn chế tính kinh tế, khả năng di động, và tiềm năng sử dụng trong các xét nghiệm tại chỗ.



Hình 1. Minh họa cảm biến dựa trên cộng hưởng plasmon bề mặt cấu hình Kretschmann phổ biến hiện nay (hình trái), cảm biến dựa trên cộng hưởng plasmon bề mặt loại đo dòng do nhóm nghiên cứu đề xuất (hình phải). TIR là góc phản xạ toàn phần, dựa trên cộng hưởng plasmon bề mặt là góc xảy ra hiện tượng cộng hưởng plasmon bề mặt.

Tham khảo sự phát triển của các cảm biến quang (photodiode) dạng màng mỏng hiện nay, các bước tiến trong việc tích hợp các photodiode vào bên trong cảm biến SPR của các nhóm nghiên cứu [9-11], tiếp nối các nghiên cứu gần đây của chúng tôi [12], trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất các cảm biến SPR dựa trên cấu hình Kretschmann với một photodiode tích hợp gồm một lớp điện cực trong suốt ô-xít thiếc indium (ITO) và lớp Si vô định hình pha tạp hydro (aSi:H) được đặt bên dưới lớp vật liệu plasmonic Au (hình 1, bên phải). Điều đặc biệt là, thay vì lắng đọng các lớp ITO, aSi:H, Au trực tiếp trên lăng kính tương tự như các nhóm nghiên cứu khác hoặc như các cảm biến SPR

thông thường hiện nay, chúng tôi chỉ lắng đọng lớp aSi:H, Au trên một đế thủy tinh thương mại đã được phủ lớp ITO dày 200 nm (sau đây gọi là đế thủy tinh/ITO) bằng phương pháp phún xạ. Cấu trúc đế thủy tinh/ITO/aSi:H/Au được gọi là chip cảm biến. Việc sử dụng các chip cảm biến này cho phép việc chế tạo được thuận lợi hơn, các chip cảm biến cũng dễ dàng tích hợp với các loại lăng kính khác nhau, kể cả lăng kính có chiết suất thấp hơn chiết suất của đế thủy tinh, và thuận tiện cho việc tái sử dụng. Lớp aSi:H đóng vai trò quan trọng trong việc hấp thụ photon và tạo ra dòng quang điện tương ứng với sự thay đổi của ánh sáng phản xạ tại mặt chuyển tiếp giữa lớp aSi:H và lớp Au. Lớp aSi:H được lựa chọn do nhiệt độ chế tạo thấp, hệ số hấp thụ cao trên một dải rộng của bước sóng từ cận cực tím đến cận hồng ngoại [13]. Lớp ITO đóng vai trò như một điện cực, hình thành chuyển tiếp Schottky với lớp aSi:H, và cho phép hầu hết ánh sáng tới đi qua [14]. Lớp Au vừa đóng vai trò là điện cực vừa là lớp vật liệu plasmonic.

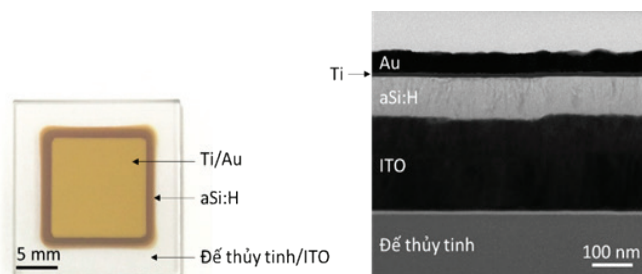
Tuy nhiên, do lớp Au có độ kết dính kém và không bền với lớp aSi:H, vì vậy bên cạnh các chip cảm biến có cấu trúc đế thủy tinh/ITO/aSi:H/Au, chúng tôi cũng chế tạo các chip cảm biến có cấu trúc đế thủy tinh/ITO/aSi:H/Ti (10 nm)/Au để đảm bảo sự kết dính giữa lớp Au và aSi:H. Trong trường hợp này, lớp aSi:H sẽ hấp thụ photon và tạo ra dòng quang điện tương ứng với sự thay đổi của ánh sáng phản xạ tại mặt chuyển tiếp giữa lớp Ti và lớp Au. Mặc dù, việc thêm bất kỳ lớp vật liệu nào phía dưới lớp Au sẽ làm cho hiệu ứng SPR kém hiệu quả hơn [15], nhưng việc thêm lớp aSi:H và lớp Ti trong các chip cảm biến của chúng tôi có thể đem đến một hiệu quả về mặt cấu hình của thiết bị và độ ổn định của cảm biến. Các phân tích dưới đây sẽ làm sáng tỏ điều này. Cần lưu ý ở đây là lớp Ti cần mỏng nhất có thể, để không làm suy giảm hiệu ứng SPR nhưng vẫn cần đảm bảo sự kết dính bền và ổn định cho lớp Au và lớp aSi:H [15]. Điều này chủ yếu phụ thuộc vào công nghệ chế tạo và trang thiết bị sử dụng. Đối với nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng thiết bị phún xạ để chế tạo các lớp màng aSi:H, Ti và Au. Thực tế, chúng tôi đã cố gắng chế tạo các cảm biến có lớp Ti dày 2 và 5 nm, tuy nhiên các lớp màng này không hình thành một màng liên tục và đồng đều với thiết bị sẵn có của chúng tôi. Do đó, lớp Au không bám dính tốt với lớp aSi:H thông qua các lớp Ti này. Kết quả là các cảm biến có lớp Ti dày 2 và 5 nm có độ bền và độ ổn định kém, tương tự như các cảm biến không có lớp Ti. Vì vậy, trong nghiên cứu này chúng tôi chỉ đưa ra các kết quả so sánh với mẫu có cấu trúc ITO/aSi:H/Au và ITO/aSi:H/Ti (10 nm)/Au.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Đế thủy tinh/ITO được sản xuất bởi Công ty Geomatec, chi nhánh Trung Quốc, gồm lớp thủy tinh có chiết suất 1,51, kích thước bề mặt 19,5×19,5 mm, chiều dày 1,1 mm; và lớp ITO dày 200 nm, điện trở suất khoảng 225 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, độ truyền qua khoảng 80% với ánh sáng khả kiến. Lớp vật liệu aSi:H được chế tạo từ bia vật liệu Si loại n có điện trở suất

xấp xỉ 88 Ω .cm được sản xuất bởi Công ty Kurt J. Lesker (Đức). Lớp vật liệu Ti và Au được chế tạo lần lượt từ các bia vật liệu Ti và Au được sản xuất bởi Công ty MSE Supplies LLC (Hoa Kỳ). Các bia vật liệu đều có đường kính 5,08 cm và độ tinh khiết 99,999%.

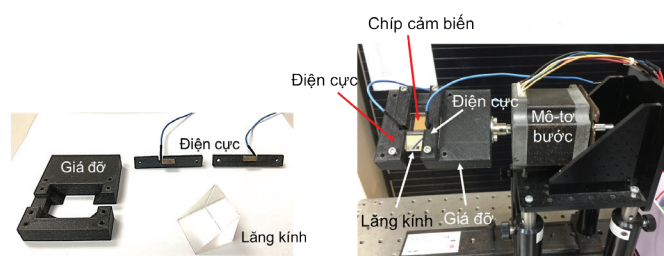
Các lớp vật liệu được chế tạo bằng hệ phun xạ AJA ATC 2000-F (Hoa Kỳ). Các đế thủy tinh/ITO sạch được đưa vào buồng chân không ở áp suất 9×10^{-6} Pa. Quá trình lắng đọng lớp aSi:H diễn ra ở nhiệt độ phòng, trong môi trường khí gồm 15,6 sccm argon và 0,5 sccm hydrogen, thông qua một mặt nạ. Công suất, áp suất và thời gian phun xạ lần lượt là 100 W, $2,7 \times 10^{-1}$ Pa, và 4300 giây. Sau khi lắng đọng lớp aSi:H, đế thủy tinh/ITO/aSi:H được ủ nhiệt bằng lò ủ ngoài, tại nhiệt độ 250°C, dưới áp suất khí quyển trong 60 phút. Sau đó, đế thủy tinh/ITO/aSi:H được đưa trở lại buồng chân không của hệ phun xạ để lắng đọng lớp Au dày 50 nm, thông qua một mặt nạ khác để thu được các chip cảm biến có cấu trúc đế thủy tinh/ITO (200 nm)/aSi:H (100 nm)/Au (50 nm). Lớp Au có chiều dày 50 nm cho hiệu ứng SPR tốt nhất với ánh sáng có bước sóng khoảng 670 nm. Lớp ITO với chiều dày 200 nm cho điện cực dẫn điện tốt và ổn định ngay cả khi đã được ủ ở nhiệt độ 250°C, đồng thời vẫn cho khoảng 80% ánh sáng khả kiến truyền qua. Trong khi đó, theo nghiên cứu của chúng tôi, lớp aSi:H dày 100 nm vừa hấp thụ tốt ánh sáng để tạo ra dòng quang điện lớn, vừa cho phép một phần ánh sáng truyền tới lớp Au để kích thích hiện tượng SPR xảy ra mạnh. Đối với các chip cảm biến có cấu trúc đế thủy tinh/ITO (200 nm)/aSi:H (100 nm)/Ti (10 nm)/Au (50 nm), lớp Ti được lắng đọng trên lớp aSi:H trước khi lắng đọng lớp Au. Quá trình lắng đọng các lớp Ti, Au diễn ra tại nhiệt độ phòng, trong môi trường chỉ có khí Argon với lưu lượng 16 sccm và áp suất $2,7 \times 10^{-1}$ Pa. Lớp Ti và lớp Au được lắng đọng bằng nguồn phun xạ một chiều, với công suất lần lượt là 50 và 10W, thời gian lắng đọng lần lượt là 490 giây và 2030 giây. Cuối cùng, các chip cảm biến thu được có hình dạng và cấu trúc như hình 2.



Hình 2. Ảnh bề mặt (trái) và ảnh TEM mặt cắt (phải) của chip cảm biến có cấu trúc đế thủy tinh/ITO (200 nm)/aSi:H (100 nm)/Ti (10 nm)/ Au (50 nm) [14].

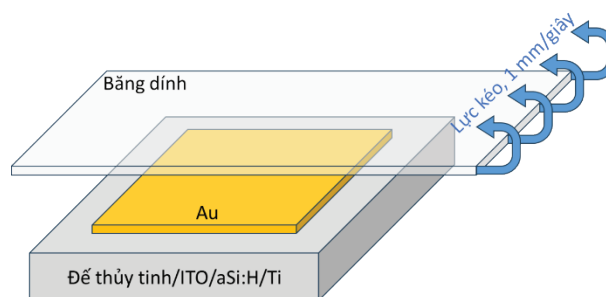
Độ dày của các lớp màng trong chip cảm biến được xác định bằng các phép đo hiển vi điện tử truyền qua (TEM), sử dụng thiết bị JEM-2100F (Jeol). Để phân tích hiện tượng

SPR, chúng tôi gắn chip cảm biến lên lăng kính có chiết suất 1,78 thông qua lớp dầu Silicon 08816-05000 (Toyota). Lăng kính và chip cảm biến được cố định chắc chắn trong một giá đỡ tự chế, và được gắn lên một mô-tơ bước (hình 3). Chip cảm biến được kết nối với thiết bị đo điện Keithley 2400-LV để đo dòng quang điện, với một điện cực kết nối với lớp Au và một điện cực khác kết nối với lớp ITO. Lăng kính được chiếu sáng bằng ánh sáng phân cực p từ mô-đun phát laser (Thorlabs) với bước sóng 670 nm, công suất chiếu 4 mW, và đường kính điểm sáng là 1 mm. Góc tới của ánh sáng (góc θ trong hình 1) được thay đổi bằng cách quay toàn bộ hệ thống giá đỡ và lăng kính, trong khi nguồn phát laser được giữ cố định. Không khí với chiết suất xấp xỉ 1 là môi trường trên các chip cảm biến trong các phép đo này.



Hình 3. Các bộ phận để cố định chip cảm biến (trái), chip cảm biến cùng giá đỡ được gắn vào mô-tơ bước nhằm thay đổi góc tới của ánh sáng chiếu vào lăng kính (phải).

Để thảo luận về nguyên lý làm việc của chip cảm biến, tức khả năng hấp thụ ánh sáng phản xạ tại mặt phân cách giữa lớp aSi:H hoặc lớp Ti và lớp Au của lớp aSi:H và chuyển nó thành dòng quang điện, cũng như thảo luận về độ ổn định, độ bền của chip cảm biến, các phép đo dòng-thế (I-V) bằng thiết bị Keithley 2400-LV cũng được thực hiện. Ngoài ra, độ kết dính và hình thái học bề mặt của lớp Au trên lớp aSi:H cũng được kiểm tra theo thời gian, bằng phương pháp băng keo (tape test) và kính hiển vi điện tử quét sử dụng thiết bị S-3400N (Hitachi). Trong phương pháp băng keo, chúng tôi đã sử dụng băng dính Magic của hãng 3M Scotch, có chiều rộng 12,7 mm, để dán lên một nửa bề mặt lớp Au. Sau đó, sử dụng nhíp kẹp chặt toàn bộ một đầu của băng dính để kéo băng dính theo góc 180° với tốc độ khoảng 1 mm/giây (hình 4).

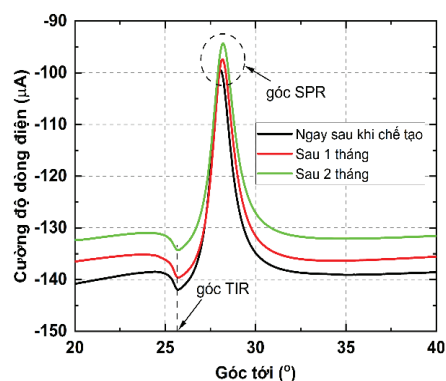
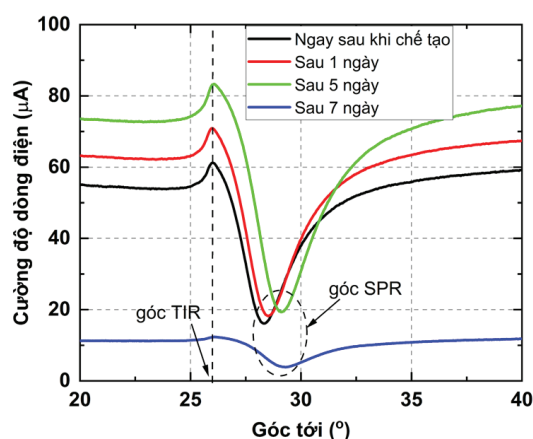


Hình 4. Hình minh họa băng dính dán lên lớp Au được bóc ra khỏi lớp Au với tốc độ 1 mm/giây, bằng lực kéo theo góc 180° (hướng từ phải sang trái).

3. Kết quả và bàn luận

Hình 5 là kết quả đo sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện vào góc tới của ánh sáng đối với các chip cảm biến, theo thời gian. Có thể thấy rằng, hình dạng của các đồ thị này giống với đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của cường độ tia phản xạ vào góc tới của ánh sáng, với góc phản xạ toàn phần (góc TIR) và góc cộng hưởng plasmon bề mặt (góc SPR) đặc trưng, như thu được trong các cảm biến SPR truyền thống. Nguyên nhân của việc sinh ra dòng điện và sự phụ thuộc của cường độ dòng điện vào góc tới của ánh sáng đã được chúng tôi giải thích chi tiết trong nghiên cứu gần đây của chúng tôi [12]. Có hai điểm khác biệt rõ rệt khi so sánh tín hiệu dòng quang điện của hai loại chip cảm biến. Thứ nhất, tín hiệu dòng quang điện của các chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Au thay đổi nhanh theo thời gian, cả về cường độ dòng điện và vị trí góc SPR; trong khi đó, tín hiệu dòng quang điện của các chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/

trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au bị bong tróc, hình thành các hạt và lỗ lớn chỉ sau bảy ngày chế tạo; trong khi, lớp Au trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au hầu như không có sự thay đổi nào sau hai tháng chế tạo. Sự kết dính và độ bền của lớp Au trong các chip cảm biến còn được thể hiện thông qua phép thử băng keo, với các kết quả được thể hiện trong hình 7. Theo đó, một đoạn băng keo được dán lên bề mặt của lớp Au, sau đó được kéo ra với một lực cố định. Các kết quả cho thấy, lớp Au lắng đọng trực tiếp trên lớp aSi:H, trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au, bám dính tốt với lớp aSi:H ngay sau khi chế tạo (lớp Au còn nguyên vẹn sau khi bóc lớp băng keo). Tuy nhiên, sau 7 ngày, khi được kiểm tra lại cũng bằng phương pháp băng kéo, lớp Au đã bị lột ra khỏi lớp aSi:H gần như toàn bộ khi kéo lớp băng kéo ra. Trong khi đó, lớp Au vẫn nguyên vẹn trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au, sau rất nhiều lần dán và bóc lớp băng keo. Sự kết dính kém và suy giảm chất lượng nhanh chóng theo thời gian của lớp Au trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au, có

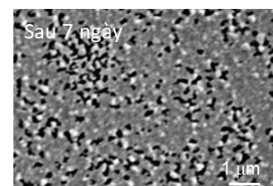
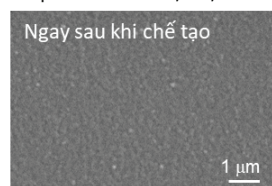


Hình 5. Đồ thị sự phụ thuộc của dòng quang điện vào góc tới của ánh sáng của chip cảm biến, cấu trúc ITO/aSi:H/Au (trái) và của chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Ti/Au (phải), đo theo thời gian.

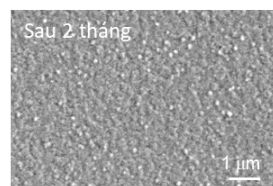
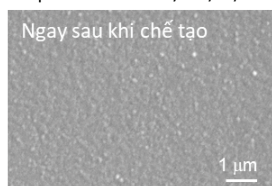
Ti/Au lại ổn định trong một thời gian dài, cường độ dòng điện và góc SPR thay đổi không đáng kể theo thời gian. Thứ hai, đó là sự đảo ngược của tín hiệu dòng điện, nhưng xét về giá trị tuyệt đối, thì cường độ dòng điện do các chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Ti/Au sinh ra lớn hơn hẳn so với cường độ dòng điện do các chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Au, xét trong cùng một chế độ đo.

Sự khác biệt thứ nhất có thể được giải thích bởi sự kết dính kém của lớp Au trên lớp aSi:H ngay sau khi chế tạo, và sự suy giảm chất lượng của lớp Au trong chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Au. Trong khi đó, lớp Au trong chip cảm biến cấu trúc ITO/aSi:H/Ti/Au lại rất bền theo thời gian và dính chắc vào lớp aSi:H thông qua lớp kết dính Ti. Thực vậy, các ảnh hiển vi điện tử quét (SEM), theo dõi hình thái học bề mặt của lớp Au theo thời gian trong hai loại chip cảm biến, được thể hiện trong hình 6 đã cho thấy lớp Au

Chip cảm biến ITO/aSi/Au

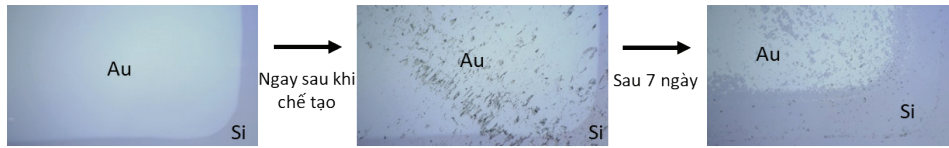


Chip cảm biến ITO/aSi/Ti/Au

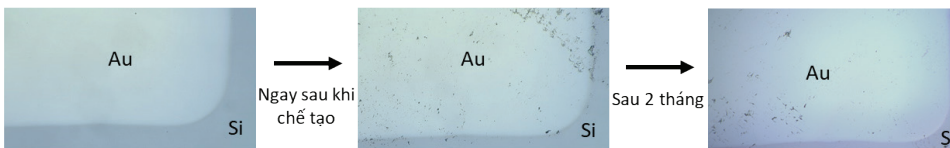


Hình 6. Ảnh SEM bề mặt lớp Au theo thời gian trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au (trên) và trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au (dưới).

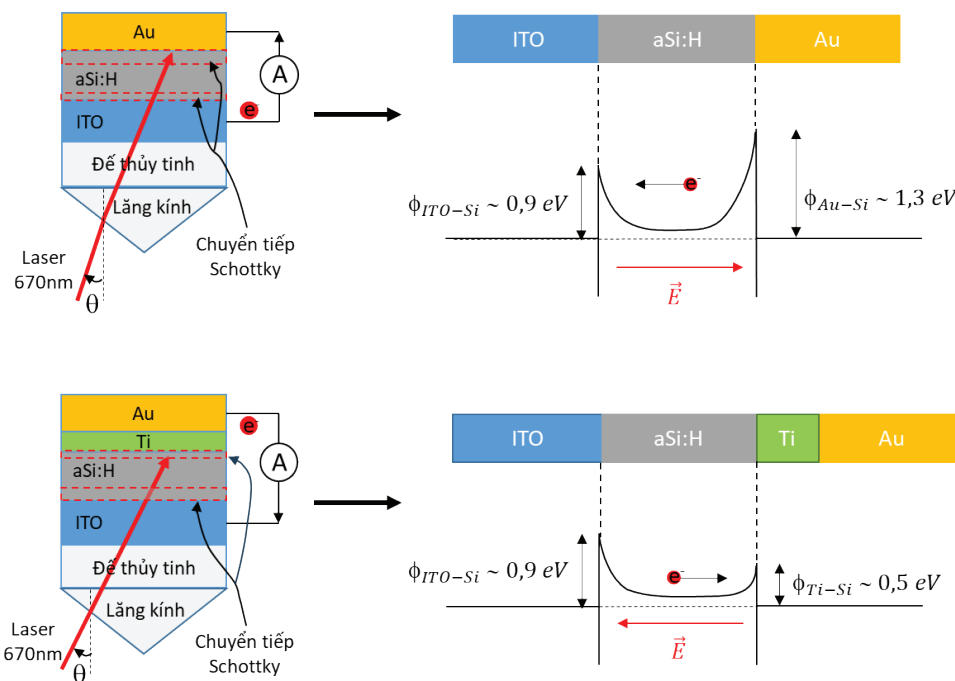
Chíp cảm biến ITO/aSi/Au



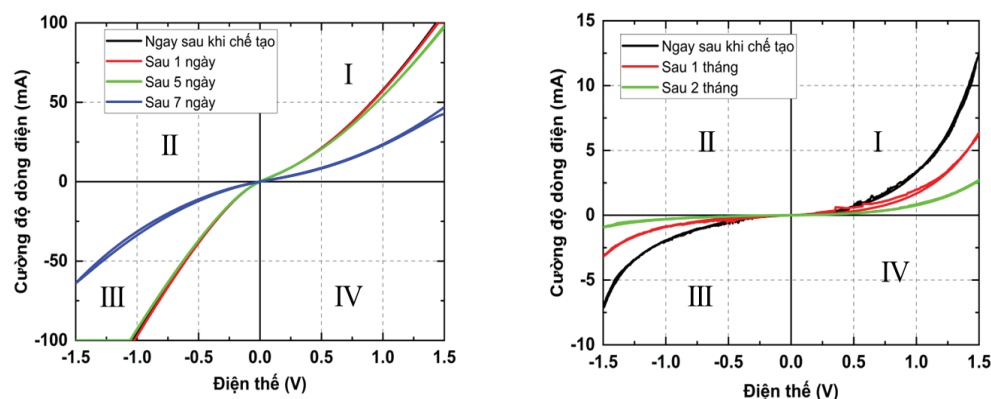
Chíp cảm biến ITO/aSi/Ti/Au



Hình 7. Ảnh bề mặt lớp Au trong chíp cảm biến ITO/aSi:H/Au (trên) và trong chíp cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au (dưới) chụp bằng kính hiển vi quang học sau các phép thử bằng keo.



Hình 8. Mô hình vùng năng lượng giả thiết hình thành trong các chíp cảm biến với hai chuyển tiếp Schottky.



Hình 9. Đồ thị I-V của chíp cảm biến ITO/aSi:H/Au (trái) và chíp cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au (phải) đo theo thời gian.

thể làm cho tiếp xúc điện giữa lớp aSi:H và Au trở nên kém và không ổn định, do đó tín hiệu điện do chíp cảm biến sinh ra bị suy biến mạnh trong một thời gian ngắn.

Sự khác biệt thứ hai có thể được giải thích bởi các chuyển tiếp Schottky được hình thành trong các chíp cảm biến. Dựa vào thông tin về công thoát của các kim loại điển hình và ái lực của Si trong tài liệu [16], chúng tôi đã vẽ mô hình vùng năng lượng cho các chíp cảm biến như hình 8. Theo đó, lớp aSi:H sẽ hình thành chuyển tiếp Schottky với cả lớp ITO và lớp Ti, cũng như với lớp Au, với độ cao các hàng rào Schottky giả thuyết như trong hình 8. Từ hình vẽ, có thể thấy, trong chíp cảm biến ITO/aSi:H/Au, chiều cao hàng rào Schottky ở chuyển tiếp aSi:H-Au lớn hơn chiều cao hàng rào Schottky ở chuyển tiếp aSi:H-ITO, điều này dẫn tới một điện trường nội trong lớp aSi:H hướng từ lớp ITO sang lớp Au. Kết quả là, điện tử được tạo ra do lớp aSi:H hấp thụ photon của ánh sáng sẽ di chuyển về phía lớp ITO. Trong khi đó, với chíp cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au, chiều cao hàng rào Schottky ở chuyển tiếp aSi:H-Ti nhỏ hơn chiều cao hàng rào Schottky ở chuyển tiếp aSi:H-ITO, điều này dẫn tới một điện trường nội trong lớp aSi:H hướng từ lớp Ti sang lớp ITO. Kết quả là, điện tử được tạo ra do lớp aSi:H hấp thụ photon của ánh sáng sẽ di chuyển về phía lớp Au. Điều này khiến cho chiều của dòng quang điện được tạo ra trong hai loại chíp cảm biến ngược chiều nhau. Do đó, đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của dòng quang điện vào góc tới

của ánh sáng của hai loại chip cảm biến bị ngược nhau như trong hình 5 ở trên. Các hàng rào thế Schottky trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au thấp hơn trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au, cùng với sự kết dính tốt của lớp Au trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au, có thể là nguyên nhân dẫn đến điện trường độ dòng quang điện được tạo ra trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au lớn hơn cường độ dòng quang điện được tạo ra trong chip cảm biến ITO/aSi:H/Au.

Kết quả của các phép đo I-V được thể hiện trong hình 9 đã chứng minh cho các lập luận của chúng tôi ở trên. Cả hai loại chip cảm biến đều sở hữu các đường I-V không thể hiện rõ ràng đặc trưng tuyến tính cũng như đặc trưng chỉnh lưu điện. Quan sát kỹ, chúng ta có thể thấy, dòng điện tăng nhanh theo thế trong góc phần tư thứ III với chip cảm biến ITO/aSi:H/Au, trong khi dòng điện tăng nhanh theo thế trong góc phần tư thứ I với chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au. Ngoài ra, các đồ thị I-V của chip cảm biến ITO/aSi:H/Ti/Au, đặc biệt là đồ thị I-V đo sau hai tháng chế tạo, thể hiện được đặc trưng chỉnh lưu điện tốt hơn so với đồ thị I-V của cảm biến ITO/aSi:H/Au. Điều này cho thấy mẫu chế tạo được chưa thực sự tối ưu về tính chất điện mặc dù có độ bền cơ học tốt. Do đó, nếu tối ưu được quá trình chế tạo, có thể chúng ta sẽ tạo được ra chuyển tiếp ITO/aSi:H/Ti có tính chất chỉnh lưu điện tốt và ổn định ngay sau khi chế tạo. Điều này sẽ góp phần tăng độ nhạy của cảm biến [12].

4. Kết luận

Bằng cách tích hợp các lớp màng mỏng ITO/aSi:H dưới lớp Au trong cảm biến SPR dựa trên cấu hình Kretschmann truyền thống, chúng tôi đã chế tạo thành công các chip cảm biến SPR loại đo dòng. Các chip cảm biến này có thể tạo ra được tín hiệu điện thay đổi theo góc tới của ánh sáng, tương tự như tín hiệu về cường độ của tia phản xạ trong các cảm biến SPR truyền thống. Ảnh hưởng của lớp kết dính Ti giữa lớp aSi:H và lớp Au đã được đánh giá và giải thích. Theo đó, sự xuất hiện của lớp Ti, làm cho tín hiệu điện bị đảo chiều nhưng có cường độ lớn hơn. Ngoài ra, lớp Ti cũng giúp cho cấu hình vật lý của cảm biến bền hơn theo thời gian, qua đó tín hiệu điện thu được cũng ổn định hơn. Tuy nhiên, như đã được báo cáo nhiều trong các nghiên cứu về cảm biến SPR, việc thêm bất kì lớp kết dính nào cũng sẽ làm cho hiệu ứng SPR yếu đi, dẫn đến độ nhạy của cảm biến thấp. Vì vậy, chiều dày của lớp Ti cần được lựa chọn sao cho vừa đảm bảo độ nhạy của cảm biến, vừa đảm bảo độ bền và độ ổn định của cảm biến.

LỜI CẢM ƠN

Công trình nghiên cứu được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu cấp Bộ Khoa học và Công nghệ do Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì: "Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo cảm biến trường

phân tán (evanescent field sensor) nhạy chiết suất để xác định hàm lượng ethylene oxide sử dụng trong bảo quản thực phẩm", mã số 15/2023/HĐ-ĐTCB.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E. Kretschmann, H. Raether (2014), "Notizen: Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light", *Zeitschrift Für Naturforschung A*, **23(12)**, pp.2135-2136, DOI: 10.1515/zna-1968-1247.
- [2] A.S. Lambert, S.N. Valiulis, A.S. Malinick, et al. (2020), "Plasmonic biosensing with aluminium thin films under the Kretschmann configuration", *Analytical Chemistry*, pp.8654-8659, DOI: 10.1021/acs.analchem.0c01631.
- [3] Y.V. Stebunov, D.I. Yakubovsky, D.Y. Fedyanin, et al. (2018), "Superior sensitivity of copper-based plasmonic biosensors", *Langmuir*, **34(15)**, pp.4681-4687, DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b00276.
- [4] V. Yesudasu, H.S. Pradhan, R.J. Pandya (2021), "Recent progress in surface plasmon resonance based sensors: A comprehensive review", *Heliyon*, **7(3)**, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06321.
- [5] S. Das, R. Devireddy, M.R. Gartia (2023), "Surface plasmon resonance (SPR) sensor for cancer biomarker detection", *Biosensors*, **13(3)**, DOI: 10.3390/bios13030396.
- [6] Bruker (2024), *Surface Plasmon Resonance for High-Throughput Analysis*, <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/surface-plasmon-resonance.html>, accessed 5 June 2024.
- [7] Cytivalifesciences (2024), *Biacore™ T200*, <https://www.cytivalifesciences.com/en/us/shop/protein-analysis/spr-label-free-analysis/spr-systems/biacore-t200-p-05644>, accessed 5 June 2024.
- [8] Sprpages (2024), *SPR Theory*, <https://www.sprpages.nl/spr-overview/spr-theory>, accessed 5 June 2024.
- [9] Y. Ajiki, T. Kan, K. Matsumoto, et al. (2018), "Electrically detectable surface plasmon resonance sensor by combining a gold grating and a silicon photodiode", *Applied Physics Express*, **11(2)**, DOI: 10.7567/APEX.11.022001.
- [10] A. Lotfiani, M. Ghanaatshoar, S.M. Mohseni (2019), "Miniaturized optoelectronic SPR sensor based on integrated planar waveguide and MIM hot-electron photodetector", *IEEE Transactions on Electron Devices*, **66(12)**, pp.5215-5220, DOI: 10.1109/TED.2019.2950297.
- [11] Y.C. Huang, S.F. Wang, B.C. Chen, et al. (2023), "Towards cost-effective and lightweight surface plasmon resonance biosensing for H5N1 avian influenza virus detection: Integration of novel near-infrared organic photodetectors", *Sensors and Actuator B: Chemical*, **400**, DOI: 10.1016/j.snb.2023.134898.
- [12] H.T. Nguyen, C.T. Tran, H.H. Nguyen, et al. (2024), "Surface plasmon resonance sensor with photodiode integrated beneath plasmonic layer", *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, **9(2)**, DOI: 10.1016/j.jsamd.2024.100711.
- [13] Y. Zhao, X. Zhang, B. Yan (2019), "Hydrogenated amorphous silicon thin film", *Handbook of Photovoltaic Silicon*, Springer, pp.639-692, DOI: 10.1007/978-3-662-56472-1_27.
- [14] N.H. Tiep, N.D. Hieu, B.D. Tu, et al. (2023), "Effect of annealing temperature on I-V curves of ITO/aSi:H junction", *The Proceedings of The 4th International Workshop on Advanced Materials and Devices*, pp.153-156 (in Vietnamese).
- [15] S. Ekgasit, C. Thammacharoen, F. Yu, et al. (2005), "Influence of the metal film thickness on the sensitivity of surface plasmon resonance biosensors", *Applied Spectroscopy*, **59(5)**, pp.661-667, DOI: 10.1366/0003702053945994.
- [16] D.A. Neamen (2012), *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 784pp.