

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU CAO VÀ ĐỘ CONG BỀ MẶT MẪU LÊN ĐẶC TÍNH KHỬ PHẢN XẠ CỦA LỚP MÀNG DLC PHỦ TRÊN ĐẾ SI BẰNG CÔNG NGHỆ PECVD

Mai Thị Kiều Trang^{1,*}, Dương Chí Dũng¹, Nguyễn Minh Huệ¹,
Phan Nguyên Nhuệ¹, Bùi Đình Bảo¹

¹Khoa Thiết bị đặc biệt, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Trong lĩnh vực an ninh, khí tài ảnh nhiệt ngày càng được sử dụng phổ biến trong các hệ thống giám sát và thường hoạt động trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Để bảo vệ khí tài ảnh nhiệt, người ta thường sử dụng lớp màng cacbon giả kim cương (DLC) mạ lên thấu kính ngoài cùng hoặc kính bảo vệ do màng DLC có khả năng chống mài mòn, độ cứng cao, chịu được môi trường khắc nghiệt và trong suốt trong vùng phổ hồng ngoại của ảnh nhiệt. Trong các thí nghiệm của chúng tôi, màng DLC được mạ phủ bởi phương pháp lắng đọng hơi hóa học tăng cường bằng plasma (PECVD) trên thiết bị Aegis DLC-PECVD của hãng Intlvac (Canada). Tuy nhiên, khi phủ các chi tiết quang học có kích thước lớn, sự thay đổi cấu hình plasma có thể gây ra hiện tượng không đồng nhất của lớp phủ. Bài báo trình bày các kết quả thực nghiệm mạ màng DLC khử phản xạ cho vật liệu Si trong vùng phổ từ 3-5 μm và thông qua phổ truyền qua, khảo sát sự đồng đều của lớp màng DLC trên các mẫu Si đặt ở các vị trí khác nhau trong buồng mạ. Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi độ cao đặt mẫu thay đổi từ 0-40 mm so với điện cực của nguồn plasma, phổ truyền qua của các mẫu gần như không có sự thay đổi về hình dạng, cường độ phổ truyền qua thay đổi nhẹ trong khoảng 1,6% với các mẫu được phủ DLC lên một mặt. Với các mẫu đặt ở độ nghiêng khác nhau, vị trí đỉnh phổ có sự dịch chuyển về bước sóng dài từ 3,4-4 μm ứng với góc pháp tuyến từ 0-50 độ. Các kết quả thực nghiệm này giúp định hướng tối ưu hóa thiết kế bộ gá mẫu giúp cải thiện độ đồng đều của màng DLC trên thấu kính ảnh nhiệt kích thước lớn.

Từ khóa: Mạ màng DLC; công nghệ PECVD; khử phản xạ.

1. Mở đầu

Trong thiết kế, chế tạo ống kính ảnh nhiệt vùng bước sóng 3-5 μm , silicon (Si) là vật liệu thường được sử dụng để chế tạo thấu kính ngoài cùng hoặc kính bảo vệ. Do Si có chiết suất cao ($\sim 3,5$) nên hệ số phản xạ Fresnel ở bề mặt lớn, dẫn đến sự suy hao đáng kể do phản xạ ở hai bề mặt. Cụ thể, trong dải 3-5 μm , tổng hệ số truyền qua hai bề mặt của chi tiết quang học làm từ Si chỉ đạt khoảng 53% [1]. Để khắc phục hạn chế này, từ năm 1958 [2], nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm giảm phản xạ bề mặt bằng

* Tác giả liên hệ, email: maithikieustrang2000@gmail.com

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n03.1037

cách phủ màng khử phản xạ sử dụng các hệ vật liệu như MgF_2 , ZnS , HfO_2 , CdS , ThF_4 , YF_3 , CeF_2 , Y_2O_3 , BaF_2 [3]-[5]. Tuy nhiên, màng mỏng chế tạo từ những vật liệu này có hạn chế về mặt cơ tính như độ cứng thấp, khả năng chống xước kém, không bền dưới tác động của môi trường. Ngoài ra, một số vật liệu như ThF_4 có tính phóng xạ cao, gây ảnh hưởng tới sức khỏe con người trong quá trình sản xuất, sử dụng.

Vật liệu cacbon giả kim cương (*Diamond-Like Carbon - DLC*) là một dạng cacbon vô định hình, nổi bật với tính chất ưu việt như độ cứng cơ học cao, chịu mài mòn tốt, tính trơ hóa học, tương thích sinh học [6]-[8]. Nhờ có những đặc tính này, DLC đã được nghiên cứu ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ cơ khí [9], y sinh [10] và điện tử [11]. Trong lĩnh vực quang điện tử, DLC được chú trọng nghiên cứu nhờ khả năng cho bức xạ hồng ngoại truyền qua tốt, phù hợp làm lớp phủ bảo vệ và khử phản xạ cho các chi tiết quang học hoạt động trong vùng hồng ngoại [12]-[15]. Hiện nay, trên thế giới, đa số thiết bị ảnh nhiệt hoạt động ngoài trời có các chi tiết quang được mạ màng DLC bảo vệ và khử phản xạ, giúp tăng thời gian, khả năng hoạt động của thiết bị trong môi trường khắc nghiệt. Tuy nhiên, tại Việt Nam vẫn chưa có đơn vị nào nghiên cứu mạ màng DLC cho các chi tiết quang học hồng ngoại.

Trong thời gian qua, nhiều phương pháp đã được nghiên cứu để phủ màng DLC như phún xạ [16], bốc bay bằng laser [17], phóng điện hồ quang [18] và lắng đọng hơi hóa học tăng cường bằng plasma (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - PECVD*) [19]. Trong đó, công nghệ PECVD được đánh giá cao nhờ chi phí hợp lý, dễ vận hành và khả năng kiểm soát tốt các thông số lớp màng. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã áp dụng phương pháp PECVD để mạ màng DLC lên đế Si nhằm bảo vệ và khử phản xạ trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung MWIR (3-5 μm) và đạt được nhiều kết quả khả quan. Tuy nhiên, đối với khí tài ảnh nhiệt hoạt động trong dải bước sóng 3-5 μm , đường kính chi tiết quang học có thể lên đến 120 mm và bán kính cong bề mặt cần mạ có thể nhỏ hơn 80 mm (độ cong lớn). Do đó, lớp màng DLC có thể không đồng nhất tại các vị trí khác nhau trên bề mặt của thấu kính, do phân bố plasma phụ thuộc vào vị trí [20], [21] và khí động học trong buồng lắng đọng [22], [23].

Trong bài báo này, các tác giả trình bày các kết quả nghiên cứu mạ màng DLC bảo vệ và khử phản xạ cho đế Si, đồng thời khảo sát ảnh hưởng của chiều cao và độ cong bề mặt mẫu lên tính chất lớp màng DLC thu được. Các kết quả thực nghiệm này sẽ là cơ sở quan trọng để định hướng thiết kế các bộ giá mẫu, giúp tạo ra phân bố plasma có độ đồng nhất cao trên bề mặt mẫu, từ đó đảm bảo chất lượng và độ đồng đều của lớp màng DLC cho các chi tiết quang học kích thước lớn.

2. Thực nghiệm

Màng DLC được lắng đọng bằng thiết bị Aegis DLC-PECVD của hãng Intlvac theo công nghệ PECVD sử dụng khí butane-n (C_4H_{10}) có độ tinh khiết $> 99,8\%$ làm tiền chất. Các đế Si được đánh bóng cả hai mặt và có độ dày 0,5 mm được sử dụng trong các thí nghiệm. Plasma được tạo ra bởi nguồn RF có tần số 13,6 MHz, công suất tối đa 1000 W, qua bộ phối hợp trở kháng được kết nối với hai điện cực trong buồng mạ. Lưu lượng khí butane được điều khiển theo vòng Proportional – Integral – Derivative (PID) để đảm bảo áp suất buồng mạ không đổi ở mức $1,95 \cdot 10^{-2}$ Torr.

Trước khi lắng đọng, các đế Si được làm sạch bằng cồn Isopropyl alcohol (IPA) để loại bỏ các tạp chất hữu cơ. Sau đó, chúng được làm sạch bằng ion Ar^+ trong buồng chân không, với công suất nguồn RF khoảng 300 W trong thời gian 5 phút, nhằm cải thiện độ bám dính của màng DLC. Khả năng khử phản xạ của màng DLC được đánh giá thông qua phổ truyền qua hồng ngoại, đo bằng máy quang phổ FTIR IRTracer-100 của hãng Shimadzu. Độ bám dính và khả năng chống xước của các mẫu được kiểm tra theo tiêu chuẩn MIL-C-48479A bằng bộ kiểm tra độ bám dính và khả năng chống trầy xước chuyên dụng (*adhesion & scratch resistance test kit*).

Đầu tiên, chúng tôi làm các thí nghiệm với các mẫu Si được đặt trực tiếp trên điện cực với mục đích tối ưu thông số công nghệ mạ lớp màng DLC khử phản xạ cho Si trong dải phổ 3-5 μm . Để lớp màng DLC có thể khử phản xạ tốt nhất cho vật liệu Si, cần thỏa mãn 2 điều kiện [24]:

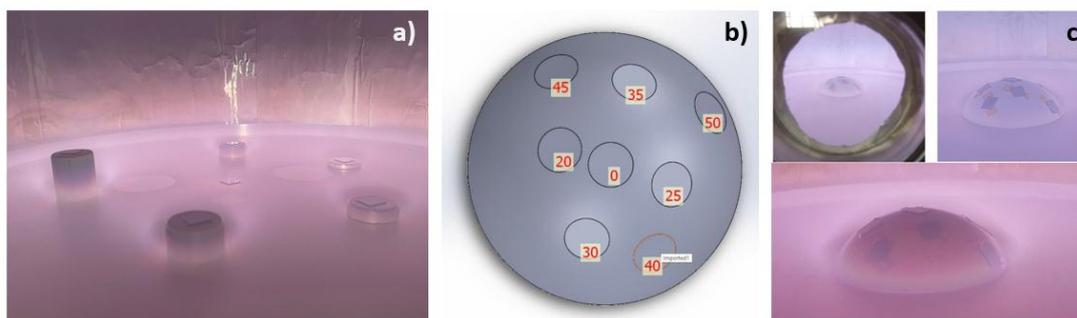
$$n_{DLC} \approx \sqrt{n_{Si}} \quad (1)$$

$$d_{DLC} = \frac{\lambda_0}{4n_{DLC}} \quad (2)$$

trong đó: n_{DLC} , n_{Si} lần lượt là chiết suất của lớp màng DLC và vật liệu Si; d_{DLC} - chiều dày lớp màng DLC; $\lambda_0 = 4 \mu m$.

Chiết suất của lớp màng DLC có thể được tinh chỉnh trong khoảng 1,6-2,2 thông qua điều khiển điện áp của nguồn RF. Qua thực nghiệm, điện áp tối ưu của nguồn plasma trong quá trình mạ là 270 V. Chiều dày lớp màng DLC được kiểm soát thông qua thời gian lắng đọng do môi trường plasma và điện trường cao tần trong buồng mạ không cho phép bố trí các cảm biến đo độ dày lớp màng như các phương pháp lắng đọng khác. Sau nhiều thí nghiệm, thời gian tối ưu mạ DLC là 33 phút 05 giây. Các thông số công nghệ trên được giữ nguyên cho thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của độ cao và độ cong mặt mẫu lên chất lượng lớp màng.

Để đánh giá ảnh hưởng của chiều cao đặt mẫu và độ cong (góc nghiêng đặt mẫu) lên tính chất của lớp màng DLC, nhóm tác giả thực hiện hai thí nghiệm. Trong thí nghiệm 1, các mẫu Si được đặt lên các đường gá mẫu bằng nhôm có chiều cao lần lượt là 0 (đặt trực tiếp trên điện cực), 5, 10, 15, 20 và 40 mm (Hình 1a). Trong thí nghiệm thứ 2, bộ gá mẫu hình chòm cầu bằng nhôm với bán kính cong $R = 75$ mm, đường kính mặt đáy $\phi = 132$ mm và độ cao $h = 40$ mm (Hình 1b, 1c) được sử dụng để mô phỏng lại thấu kính có kích thước và bán kính cong lớn. Mẫu Si được đặt tại các vị trí khác nhau trên chòm cầu ứng với các góc lệch so với trục chính của chòm cầu lần lượt là 0° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° và 50° . Sau khi lắng đọng, màng DLC trên các mẫu đặt ở các vị trí khác nhau được đánh giá thông qua phổ truyền qua hồng ngoại đo bằng máy quang phổ FTIR IRTracer-100.



Hình 1. (a) Mẫu được đặt tại các độ cao 0, 5, 10, 15, 20 và 40 mm trong buồng mạ; (b), (c) Mẫu đặt tại các vị trí ứng với góc nghiêng 0° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° và 50° trên chòm cầu.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tối ưu chế độ công nghệ mạ màng DLC

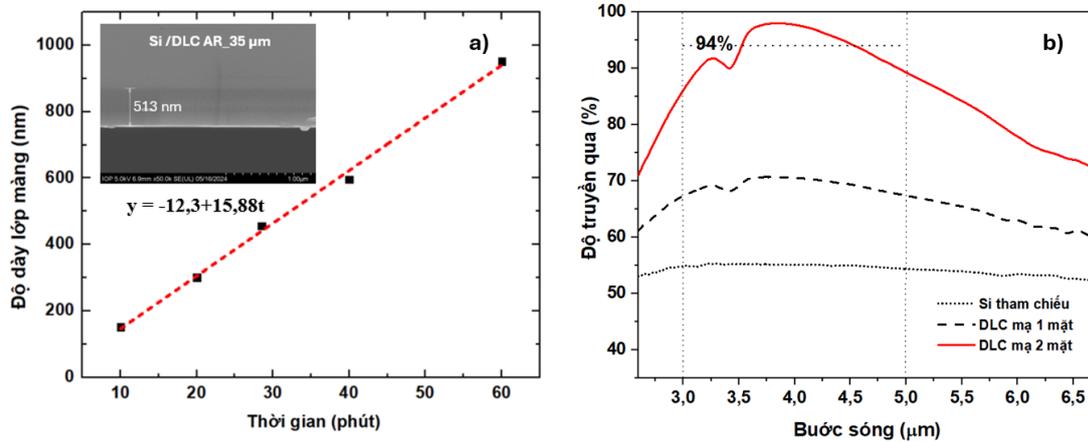
Các mẫu màng DLC được lắng đọng với các khoảng thời gian khác nhau lên đế Si. Độ dày lớp màng DLC được xác định thông qua ảnh chụp mặt cắt ngang sử dụng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Sự phụ thuộc của chiều dày lớp màng DLC vào thời gian lắng đọng được biểu diễn trên Hình 2a cho thấy, độ dày lớp màng tăng tuyến tính theo thời gian lắng đọng, với tốc độ tạo màng cỡ 15,88 nm/phút. Dựa vào đồ thị Hình 2a xác định được chiều dày của lớp màng DLC thỏa mãn phương trình (2) là 513 nm, ứng với thời gian lắng đọng là 33 phút 05 giây.

Hình 2b biểu diễn phổ truyền qua của đế Si tham chiếu (chưa mạ DLC), đế Si mạ một mặt và đế Si mạ hai mặt với lớp mạ DLC được lắng đọng với các tham số công nghệ tối ưu (điện áp plasma 270 V, thời gian lắng đọng 33 phút 05 giây). Mẫu Si tham

chiều có độ truyền qua khoảng 53-54% phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết suy hao do phản xạ Fresnel trên hai bề mặt của Si [1]. Khi mạ một mặt bằng màng DLC khử phản xạ, phổ truyền qua có đỉnh cực đại trong vùng 3-5 μm , đạt cỡ 69%. Mẫu Si được mạ cả hai mặt cho đỉnh phổ truyền qua gần 98%, với giá trị trung bình trong dải phổ 3-5 μm đạt 94%. Từ công thức hệ số truyền qua của bản song song có hệ số phản xạ ở hai mặt giống nhau:

$$T = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (3)$$

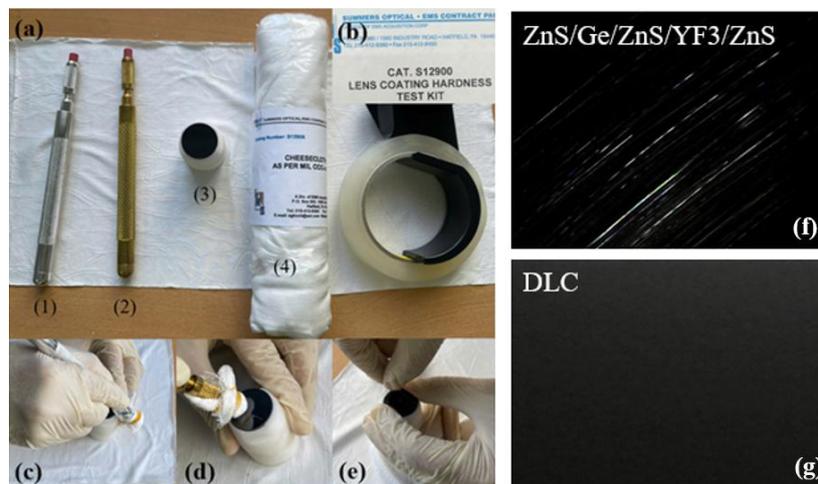
có thể xác định được hệ số phản xạ của màng DLC đạt nhỏ cỡ $R \approx 1\%$, cải thiện đáng kể so với bề mặt mẫu Si chưa được mạ.



Hình 2. (a) Độ dày lớp màng DLC phụ thuộc thời gian lắng đọng;
(b) Phổ FTIR của lớp màng DLC lắng đọng trên đế Si.

Độ bám dính và khả năng chống xước của lớp màng DLC được kiểm tra bằng bộ KIT test theo tiêu chuẩn MIL-C-48479A. Hình 3 mô tả quá trình thử nghiệm độ bám dính và khả năng chống xước của lớp màng DLC. Độ bám dính của màng DLC được kiểm tra bằng cách sử dụng tấm băng dính tiêu chuẩn có chiều rộng $\frac{1}{2}$ inch dán chặt lên bề mặt lớp mạ, sau đó giật nhanh băng dính theo hướng vuông góc với lớp mạ. Qua quan sát lớp mạ bằng mắt thường sau khi thử không thấy xuất hiện các vết bong tróc. Kiểm tra khả năng chống xước của lớp màng bằng cách sử dụng tấm vải tiêu chuẩn bọc lên đầu của bút thử và chà xát lên bề mặt lớp mạ với lực tối thiểu không nhỏ hơn 0,45 kg. Quá trình chà xát được thực hiện bằng cách dịch chuyển tấm vải qua lại giữa hai điểm cố định nào đó không ít hơn 25 chu kỳ qua lại (50 lần dịch chuyển). Sau khi thử nghiệm, quan sát bằng kính hiển vi trường tối trên bề mặt mẫu không xuất hiện các vết xước. So sánh với một mẫu màng mềm trên đế thủy tinh ($\text{ZnS}/\text{Ge}/\text{ZnS}/\text{YF}_3/\text{ZnS}$),

mẫu đối chứng xuất hiện rõ rệt các vết xước và bong (Hình 3f). Các kết quả này cho thấy lớp màng DLC có độ bền cơ học cao, vượt trội đáng kể so với các lớp màng khác.



Hình 3. Thử độ bám dính và độ chống xước của lớp màng DLC

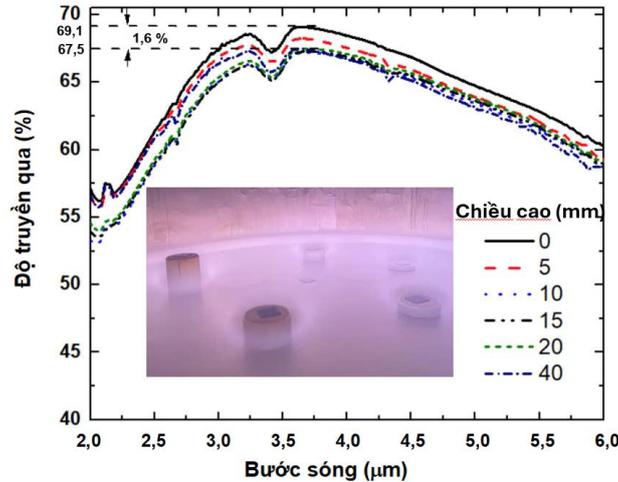
- (a) Dụng cụ: (1) Bút thử xước cấp độ trung bình; (2) Bút thử xước cấp độ mạnh; (3) Mẫu thử; (4) Vải thô thử xước; (b) Băng keo thử bám dính; (c) Thử xước cấp độ trung bình; (d) Thử xước cấp độ mạnh; (e) Thử bám dính; (f) – (g) Ảnh hiển vi trường tối của các lớp màng sau khi thử nghiệm.

3.2. Ảnh hưởng của chiều cao và độ cong bề mặt mẫu lên lớp màng DLC

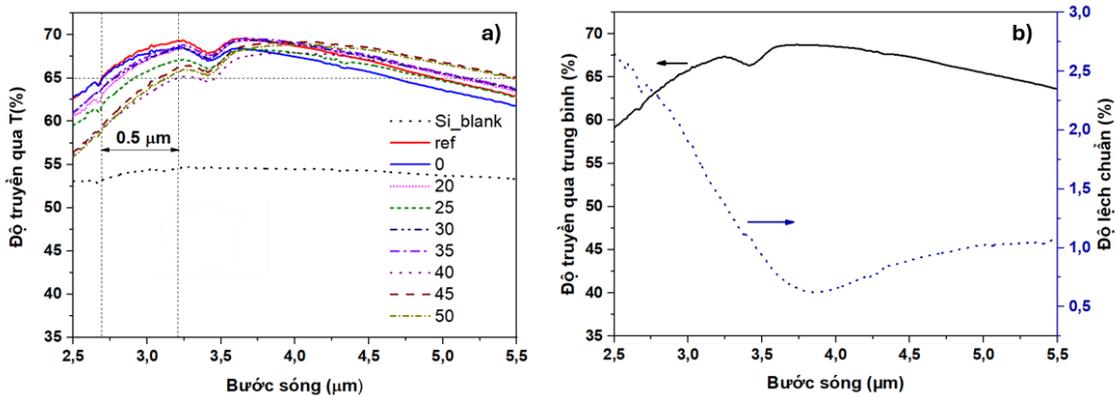
Hình 4 biểu diễn phổ truyền qua của lớp màng DLC được lắng đọng lên các mẫu Si đặt ở các độ cao khác nhau trong buồng mạ PECVD. Kết quả cho thấy vị trí đỉnh phổ truyền qua gần như không thay đổi, tuy nhiên, độ truyền qua T có xu hướng giảm nhẹ khi chiều cao mẫu tăng. Cụ thể, khi chiều cao đặt mẫu thay đổi trong khoảng từ 0 mm đến 40 mm, độ truyền qua giảm khoảng 1,6% (Hình 4). Trong buồng mạ PECVD, plasma tạo ra lớp cách ly giữa plasma khối và mẫu. Biên dạng hình học và độ dẫn của mẫu sẽ có tác động tới môi trường plasma xung quanh và sự hình thành lớp cách ly [25]. Trên Hình 4, có thể quan sát được các quầng tối màu quanh mẫu. Điện trường sinh ra trong vùng cách ly này có tác dụng gia tốc các ion tới bề mặt mẫu. Ở vị trí mẫu có độ cao lớn, bề dày của lớp cách ly nhỏ hơn, dẫn đến quãng đường gia tốc của ion ngắn, do đó, năng lượng ion tác động lên bề mặt mẫu nhỏ hơn. Hệ quả là chiết suất và tính chất quang của lớp màng DLC bị thay đổi dẫn tới suy giảm hệ số truyền qua trong khi vị trí đỉnh phổ vẫn giữ nguyên. Bên cạnh đó, phổ FTIR của lớp màng DLC có vùng bị võng xuống tại đỉnh, nguyên nhân do sự hấp thụ bởi các liên kết C-H dư còn tồn tại trong màng.

Hình 5a biểu diễn phổ truyền qua của các mẫu đặt tại các vị trí khác nhau trên chỏm cầu. Phổ truyền qua của mẫu đặt trên đỉnh cầu (mẫu 0) và của mẫu đối chứng

(mẫu tham chiếu) đặt ngay trên điện cực khá tương đồng với những sai khác tương đối nhỏ do khác nhau về độ cao đặt mẫu như trong thí nghiệm trên.



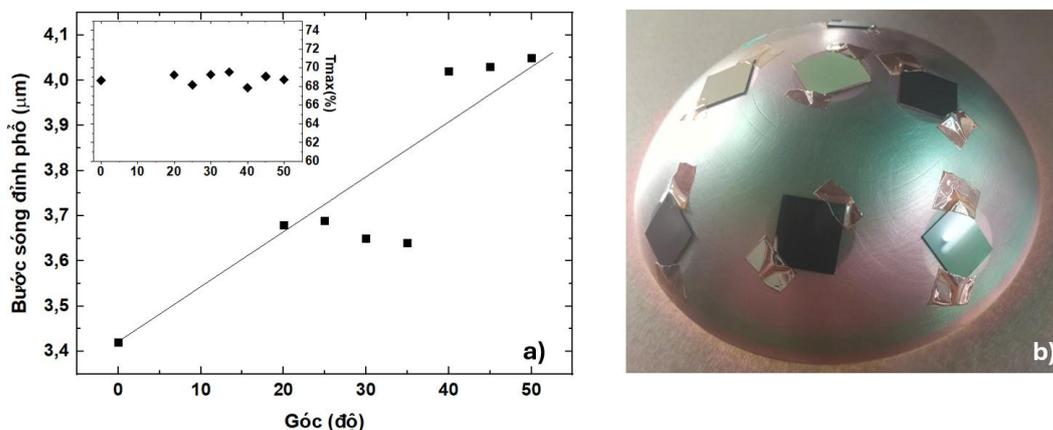
Hình 4. Phổ FTIR của lớp màng DLC trên các đế Si đặt ở các độ cao khác nhau.



Hình 5. (a) Phổ FTIR của lớp màng DLC lắng đọng trên đế Si đặt ở các vị trí góc khác nhau trên bề mặt chòm cầu; (b) Phổ truyền qua trung bình.

Hệ số truyền qua cực đại của các đường phổ gần như không đổi, dao động trong khoảng 68-70% (Hình 5a). Trong khi đó, có thể quan sát thấy các mẫu đặt ở góc lệch lớn có đỉnh phổ truyền qua dịch chuyển rõ rệt về phía bước sóng dài. Hình 5b biểu diễn phổ truyền qua trung bình của tất cả các mẫu trên chòm cầu và độ lệch trung bình của các đường phổ so với đường phổ trung bình. Do phổ truyền qua có dạng chữ V ngược đặc trưng của màng khử phản xạ cấu hình $\lambda/4$ với đỉnh tù và thoải ở phía bước sóng dài, việc dịch phổ về phía bước sóng dài chủ yếu làm thay đổi phía bước sóng ngắn, lớn nhất cỡ 2,5%. Trong khi phía bước sóng dài ít bị ảnh hưởng, chỉ cỡ 1%. Với đồ gá bằng nhôm đặt trên điện cực, có thể được xem như là mặt phẳng thế. Độ biến thiên biên dạng (gradient) bề mặt tỉ lệ với cường độ điện trường. Trên Hình 1c, tại mép của chòm cầu có

thể quan sát thấy quang sáng. Tại vị trí mép, do có điện trường lớn, mật độ ion tại đây cao hơn so với các vùng khác, do đó có tốc độ lắng đọng màng DLC lớn hơn. Việc màng DLC của các mẫu đặt gần mép chòm cầu có độ dày lớn hơn, hoàn toàn phù hợp với kết quả dịch phổ truyền qua về phía bước sóng dài đã đo được. Kết quả thu được phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nelson và cộng sự về sự ảnh hưởng của định hướng bề mặt mẫu lên lớp màng DLC [26].



Hình 6. (a) Định phổ truyền qua của các đế Si lắng đọng màng DLC ở các góc khác nhau; (b) Phân bố màng thành các đôi cầu trên bề mặt bộ gá mẫu.

Phân tích chi tiết hơn vị trí cực đại trong phổ truyền qua của các mẫu đặt trên chòm cầu cho thấy sự phân bố thành 3 vùng rõ rệt (Hình 6a), tương ứng với 3 đôi cầu có màu sắc khác nhau trên chòm cầu sau khi mạ màng DLC (Hình 6b). Để giải thích được hiện tượng này, đòi hỏi mô phỏng phân bố plasma theo phân bố điện trường và khí động học trong buồng phản ứng PECVD. Vấn đề này sẽ được các tác giả tiếp tục nghiên cứu trong thời gian tới. Về mặt thực tiễn, lớp màng DLC thường được mạ cho chi tiết quang học nằm ngoài cùng của hệ quang, có mặt tiếp xúc với môi trường. Các chi tiết quang này thường có tiêu cự dài, bề mặt cong ít. Do đó, bộ gá mẫu có thể được thiết kế sao cho toàn bộ bề mặt của chi tiết được mạ nằm trong cùng một đôi cầu để đảm bảo độ đồng nhất của lớp màng.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thành công trong việc ứng dụng công nghệ PECVD để mạ màng DLC bảo vệ và khử phản xạ cho các chi tiết quang học hồng ngoại làm từ vật liệu Si. Các kết quả thu được cho thấy lớp màng DLC có độ đồng nhất cao, độ bám dính và độ chống xước tốt, đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn quân sự Mỹ MIL-C-48479A. Trong dải phổ 3-5 µm, hệ số truyền qua của mẫu Si được mạ hai mặt khử phản xạ đạt hệ số truyền qua trung bình xấp xỉ 94%. Đồng thời, nghiên cứu đã khảo sát và làm rõ ảnh hưởng của chiều cao đặt mẫu và độ cong bề mặt đến tính đồng đều của lớp màng DLC

được lắng đọng bằng công nghệ PECVD. Các kết quả cho thấy độ cao đặt mẫu ít có ảnh hưởng tới lớp màng trong khi bề mặt cong (góc nghiêng đặt mẫu) ảnh hưởng tới độ dày lớp màng và làm phổ truyền qua dịch về bước sóng dài khi góc nghiêng đặt mẫu lớn. Các kết quả này, về mặt định tính phù hợp với các công bố quốc tế, tuy nhiên cần tiếp tục nghiên cứu mô phỏng và khảo sát chi tiết hơn để có được các kết quả định lượng. Về thực tiễn, các kết quả nghiên cứu là dữ liệu thực nghiệm về giới hạn của phương pháp mạ màng DLC-PECVD cho các chi tiết quang học có kích thước lớn. Các kết quả này mặt khác giúp định hướng thiết kế đồ gá cho các mẫu mạ có bán kính cong nhỏ, đảm bảo độ đồng đều của lớp màng DLC trên toàn diện tích của chi tiết cần được mạ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hỗ trợ bởi đề tài TBAN.01 chương trình sản phẩm quốc gia về thiết bị ảnh nhiệt.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. Klocek, Ed., *Handbook of Infrared Optical Materials*. CRC Press, 2017.
- [2] J. T. Cox and G. Hass, “Antireflection coatings for germanium and silicon in the infrared”, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 48, No. 10, pp. 677-680, Oct. 1958. DOI: 10.1364/JOSA.48.000677
- [3] I. S. Gaĭnutdinov *et al.*, “Antireflection coatings on germanium and silicon substrates in the 3-5- μm and 8-12- μm windows of IR transparency”, *Journal of Optical Technology*, Vol. 76, No. 5, pp. 302-305, May 2009. DOI: 10.1364/JOT.76.000302
- [4] M. Bhatt, B. B. Nautiyal, and P. K. Bandyopadhyay, “High efficiency antireflection coating in MWIR region (3.6-4.9 μm) simultaneously effective for Germanium and Silicon optics”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 53, Iss. 1, pp. 33-36, 2010. DOI: 10.1016/j.infrared.2009.08.006
- [5] M. B. Kala, P. K. Bandyopadhyay, and B. B. Nautiyal, “Thorium free antireflection coating in MWIR region on Silicon optics”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, Iss. 5, pp. 409-411, 2012. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.05.005
- [6] A. Grill, “Diamond-like carbon: State of the art”, *Diamond and Related Materials*, Vol. 8, No. 2-5, pp. 428-434, 1999.
- [7] J. Robertson, “Diamond-like amorphous carbon”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 37, Iss. 4-6, pp. 129-281, 2002. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0
- [8] N. Chand, S. Singh, V. Sekar, R. L. Bharadwaj, and A. M. Mahajan, “Diamond-like carbon (DLC) coatings: Classification, properties, and applications”, *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 147-168, May 2024. DOI: 10.32628/IJSRST5241131
- [9] M. Piri, H. Hashemolhosseini, R. Mikaeil, M. Ataei, and A. Baghbanan, “Investigation of wear resistance of drill bits with WC, Diamond-DLC, and TiAlSi coatings with respect to mechanical properties of rock”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 87, Feb. 2020. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105113

- [10] K. Malisz, B. Świczko-Żurek, and A. Sionkowska, "Preparation and characterization of diamond-like carbon coatings for biomedical applications - A review", *Materials*, Vol. 16, Iss. 9, 2023. DOI: 10.3390/ma16093420
- [11] A. M. Baranov *et al.*, "Development of DLC film technology for electronic application", *Diamond and Related Materials*, Vol. 9, Iss. 3-6, pp. 649-653, 2000. DOI: 10.1016/S0925-9635(99)00251-4
- [12] D. M. Swec and M. J. Mirtich, "Diamondlike carbon protective coatings for optical windows", NASA Technical Memorandum 102111, 1989.
- [13] K. S. Harshavardhan and S. B. Iyer, "Diamond-like carbon coating for optical windows", *IETE Journal of Research*, Vol. 40, No. 2-3, pp. 97-100, 1994. DOI: 10.1080/03772063.1994.11437184
- [14] K. N. Reddy *et al.*, "Double side coating of DLC on silicon by RF-PECVD for AR application", *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 1416-1421, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.423
- [15] A. Varade, A. Krishna, K. N. Reddy, M. Chellamalai, and P. V. Shashikumar, "Diamond-like carbon coating made by RF plasma enhanced chemical vapour deposition for protective antireflective coatings on germanium", *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1015-1019, 2014. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.390
- [16] C. R. Lin, D. H. Wei, C. K. Chang, and W. H. Liao, "Optical properties of diamond-like carbon films for antireflection coating by RF magnetron sputtering method", *Physics Procedia*, Vol. 18, pp. 46-50, 2011. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.06.055
- [17] A. A. Voevodin, A. W. Phelps, J. S. Zabinski, and M. S. Donley, "Friction induced phase transformation of pulsed laser deposited diamond-like carbon", *Diamond and Related Materials*, Vol. 5, Iss. 11, pp. 1264-1269, 1996. DOI: 10.1016/0925-9635(96)00538-9
- [18] J. Vetter, "60 years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 257, pp. 213-240, 2014. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.017
- [19] W. Kijaszek *et al.*, "Study on properties of diamond-like carbon films deposited by RF ICP PECVD method for micro- and optoelectronic applications", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 296, 2023. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116691
- [20] E. Waddell, D. Gibson, L. Lin, and X. Fu, "Modelling and optimization of film thickness variation for plasma enhanced chemical vapour deposition processes", in *Proceedings of SPIE 8168, Advances in Optical Thin Films IV*, 2011. DOI: 10.1117/12.896696
- [21] K. Bobzin, N. Bagcivan, N. Goebbels, and K. Yilmaz, "Effect of the substrate geometry on plasma synthesis of DLC coatings", *Plasma Processes and Polymers*, Vol. 6, Iss. S1, pp. S425-S428, 2009. DOI: 10.1002/ppap.200931010
- [22] J. Ding *et al.*, "Effect of electrode architecture and process parameters on distribution of SiH₃ in a PECVD system", *Vacuum*, Vol. 86, Iss. 3, pp. 344-349, 2011. DOI: 10.1016/j.vacuum.2011.07.061

- [23] O. Leroy, H. Videlot, and J. Jolly, “Two-dimensional modelling of CH₄-H₂ radio-frequency discharges for a-C:H deposition”, *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 16, No. 2, pp. 121-130, 2001. DOI: 10.1051/epjap:2001201
- [24] E. Hecht, *Optics*, 5th ed., Pearson Education Limited, 2017, p. 424.
- [25] A. Anders, *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*, 1st edition, Wiley-VCH, 2000.
- [26] N. Nelson *et al.*, “The effect of substrate geometry and surface orientation on the film structure of DLC deposited using PECVD”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 254, pp. 73-78, 2014. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.05.066

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SAMPLE HEIGHT AND SURFACE CURVATURE ON THE ANTI-REFLECTION PROPERTIES OF DLC COATINGS ON Si SUBSTRATES USING PECVD TECHNOLOGY

Abstract: *In the field of security, thermal imaging devices are increasingly employed in surveillance systems and often operate under harsh environmental conditions. To ensure their durability and performance, protective diamond-like carbon (DLC) coatings are often deposited on the outer lens or protective lens. DLC films are highly attractive owing to their excellent wear resistance, high hardness, environmental stability, and infrared transparency within the spectral range of thermal imaging systems. In this study, DLC coatings were deposited using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) with the Aegis DLC-PECVD system (Intlvac, Canada). A challenge in coating large optical components is that variations in plasma distribution can lead to film non-uniformity. We report experimental results on the deposition of anti-reflective DLC coatings on Si substrates for the mid-wave infrared spectral region (3-5 μm). The uniformity of the DLC layers was assessed through transmission spectroscopy of samples placed at different positions inside the deposition chamber. The results indicate that varying the sample height from 0 to 40 mm relative to the plasma electrode caused negligible changes in spectral shape, while the transmission intensity exhibited only a slight variation of ~1.6% for single-side DLC-coated samples. For samples placed at different tilt angles, the transmission peak shifted toward longer wavelengths, from 3.4 to 4 μm, corresponding to incident angles between 0° and 50°. These findings provide useful insights for optimizing sample holder design to improve the thickness uniformity and optical performance of DLC coatings on large thermal imaging lenses.*

Keywords: DLC coating layer; PECVD technology; antireflection coatings.

Nhận bài: 23/06/2025; Hoàn thiện: 29/08/2025; Chấp nhận đăng: 15/10/2025

