

FABRICATION AND SURVEY OF CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE TRANSPARENT CONDUCTIVE ELECTRODE BASED ON COPPER NANO WIRE

Nguyen Thi Hong Nhung, Nguyen Duy Cuong*
Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/9/2024	In this study, we successfully fabricated transparent conductive electrodes based on copper nanowire using a doctor – blade coating on flexible polyethylene terephthalate substrates. The copper nanowires are synthesized via a simple hydrothermal method with diameters ranging from 25 to 50 nm, and wire lengths can be up to 150 μm . They have dispersed in isopropyl alcohol with a 20 mg/ml concentration, which has potential applications as conductive ink for transparent conductive electrodes. The electrical, optical, and flexibility properties of CuNW TCE are also investigated. CuNW TCE with the optimal number of printing cycles is 4 times. TCE obtained exhibits the sheet resistance, the transmittance at 550 nm, and the figure-of-merit (FOM) value of 40.68 Ω/\square , 87.3%, and 68.3 Ω^{-1} , respectively. In particular, the sheet resistance remained consistent after 750 bends at a bending angle of 80°. These results demonstrate the potential of CuNW TCE for flexible electrode applications in flexible optoelectronic devices.
Revised: 29/10/2024	
Published: 30/10/2024	
KEYWORDS	
Flexible transparent conductive electrodes	
Copper nanowires	
Solar cells	
Hydrothermal	
Screen printing	

CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT ĐẶC TÍNH CỦA ĐIỆN CỰC DẪN ĐIỆN TRONG SUỐT LINH HOẠT DỰA TRÊN DÂY NANO ĐỒNG

Nguyễn Thị Hồng Nhung, Nguyễn Duy Cường*
Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/9/2024	Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chế tạo thành công điện cực dẫn điện trong suốt (TCE) dựa trên cơ sở dây nano đồng (CuNW) thông qua quy trình in gạt trên đế nhựa linh hoạt polyetylen terephthalate. Trong đó, dây nano đồng được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt đơn giản với đường kính trong khoảng từ 25 đến 50 nm và chiều dài có thể lên đến 150 μm . Dây nano được phân tán trong isopropyl alcohol với nồng độ 20 mg/ml dùng làm dung dịch mực in chế tạo điện cực. Đặc tính điện, quang và tính linh hoạt của điện cực dây nano đồng được khảo sát một cách chi tiết. TCE CuNW với số lần in gạt tối ưu là 4 lần. Điện trở bề mặt, độ truyền qua tại bước sóng 550 nm và hệ số chất lượng figure-of-merit – FOM của điện cực tối ưu lần lượt là 40,68 Ω/\square , 87,3% và 68,3 Ω^{-1} . Đặc biệt, điện trở bề mặt vẫn không thay đổi sau 750 chu kỳ uốn gấp với góc uốn cong là 80°. Kết quả này cho thấy TCE dựa trên dây CuNW có tiềm năng trong việc ứng dụng làm điện cực linh hoạt cho các ứng dụng trong thiết bị quang điện tử linh hoạt.
Ngày hoàn thiện: 29/10/2024	
Ngày đăng: 30/10/2024	
TỪ KHÓA	
Điện cực trong suốt linh hoạt	
Dây nano đồng	
Pin mặt trời	
Thủy nhiệt	
In gạt	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11056>

* Corresponding author. Email: cuong.nguyenduy@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Các điện cực linh hoạt dẫn điện trong suốt đã thu hút nhiều sự chú ý nhờ khả năng linh hoạt của nó, có thể gấp và uốn mà độ dẫn điện vẫn không thay đổi. Do đó, điện cực linh hoạt ngày càng được nghiên cứu rộng rãi trong thiết bị quang điện tử linh hoạt bao gồm thiết bị đeo tay, điốt phát quang hữu cơ, cảm biến linh hoạt, cửa sổ thông minh, và pin mặt trời màng mỏng [1] – [3]. Hiện nay, điện cực dẫn điện trong suốt (TCE) truyền thống như ôxít thiếc indi, ôxít kẽm pha tạp nhôm, ôxít thiếc pha tạp florine vẫn chiếm thị phần lớn trong các thiết bị quang điện tử bao gồm pin mặt trời [4], màn hình tinh thể lỏng [5], điốt phát quang [6]. Do chúng có độ truyền qua cao ($> 90\%$) và điện trở bề mặt thấp ($< 10 \Omega/\square$) [7]. Tuy nhiên, TCE truyền thống có một số nhược điểm nghiêm trọng như không tương thích với đế nhựa, quy trình sản xuất đòi hỏi nhiệt độ cao và không phù hợp với các thiết bị quang điện tử linh hoạt [8]. Ngoài ra, indium là một kim loại quý hiếm nên nguồn cung cấp indi không ổn định, lãng phí vật liệu trong quá trình chế tạo màng (chỉ 30% ITO lắng đọng trên bề mặt đế), hơn nữa bản chất giòn, dễ vỡ của vật liệu gốm khi bị uốn cong [8], [9]. Vì vậy, các vật liệu bao gồm ống nano carbon [10], graphene [11], dây nano kim loại [12], [13], màng mỏng kim loại [14] và polyme dẫn điện [15] đã được nhà nghiên cứu quan tâm nhằm thay thế TCE truyền thống. Tuy nhiên, ống nano cacbon cho điện trở bề mặt lớn ($> 100 \Omega/\square$) nên không phù hợp với thiết bị quang điện tử hiệu suất cao. Màng kim loại mỏng có độ truyền qua thấp do độ phản xạ bề mặt cao [14]. Polyme dẫn điện mặc dù quy trình chế tạo đơn giản và chi phí thấp tuy nhiên đặc tính quang và điện của polyme dẫn điện thấp với điện trở bề mặt khoảng $140 \Omega/\square$ [15]. Năm 2016, Wu và cộng sự đã chế tạo thành công TCE dựa trên dây nano bạc có điện trở bề mặt $16,6 \Omega/\square$ với độ truyền qua 92,7% [12]. Năm 2021, Yu và cộng sự đã chế tạo điện cực dẫn điện dựa trên dây nano đồng (CuNW) có điện trở bề mặt $56,3 \Omega/\square$ với độ truyền qua cao 94% [13]. Do đó, điện cực dẫn điện trong suốt dựa trên dây nano kim loại là ứng cử viên tốt nhất khắc phục những nhược điểm của các TCE truyền thống trên. Do đồng có tính dẫn điện cao tương tự như bạc với điện trở suất của đồng khối và bạc khối lần lượt là $1,67 \text{ n}\Omega\text{m}$ và $1,59 \text{ n}\Omega\text{m}$ [16], hơn nữa đồng có chi phí thấp hơn bạc và có nguồn cung cấp ổn định. Dựa trên những thực tế này, dây nano đồng ngày càng thu hút nhiều sự chú ý của các nhóm nghiên cứu và được nghiên cứu rộng rãi. Điện cực CuNW được chế tạo bằng nhiều phương pháp như quay phủ [17], phun phủ [18] và quét phủ bằng que Meyer [19]. Sau khi quét phủ, các dây nano đồng tạo thành mạng lưới phân bố ngẫu nhiên gồm các dây đồng có kích thước nm chông chéo lên nhau với nhiều khe hở, tạo thành TCE có độ dẫn điện cao và độ truyền qua cao. Thông thường, các dây nano có chỉ số AR (aspect ratio) = [chiều dài/đường kính] cao thì điện cực trong suốt thu được có khả năng dẫn điện và độ truyền qua cao. Do đó, thông qua phương pháp thủy nhiệt, dây thu được có chỉ số AR cao sẽ cho điện trở bề mặt thấp và độ truyền qua cao. Ưu điểm của TCE dựa trên dây nano đồng là có thể chế tạo ngay ở điều kiện phòng, tốc độ chế tạo nhanh, kích thước lớn và điện cực trong suốt thu được cho độ dẫn điện cao. Thêm nữa, các điện cực được chế tạo từ dây CuNW có thể uốn cong mà không bị nứt gãy. Tuy nhiên, chúng có một số nhược điểm như diện tích tiếp xúc giữa các dây nano đồng nhỏ và độ bền với môi trường thấp (dễ bị oxi hoá). Những nhược điểm này cần được cải thiện để dây đồng nói riêng và dây nano kim loại nói chung có thể thay thế hoàn toàn TCE truyền thống. Trong nghiên cứu này, các dây nano đồng siêu dài, có chiều dài lên đến $150 \mu\text{m}$ và đường kính khoảng 20 đến 50 nm đã được tổng hợp trong dung môi nước thông qua phương pháp thủy nhiệt tại nhiệt độ phản ứng $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Sau đó, chúng tôi nghiên cứu chế tạo TCE dựa trên cơ sở dây CuNW bằng phương pháp in gát dung dịch mực in CuNW trên đế nhựa linh hoạt polyetylen terephthalate – PET. Ngoài ra, đặc tính quang, điện và tính linh hoạt của điện cực cũng được khảo sát một cách chi tiết.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất

Các hóa chất được sử dụng cho thí nghiệm bao gồm: tiền chất đồng clorua (CuCl_2) ($\geq 99\%$, Guangdong Chemical), chất hoạt động bề mặt oleylamine (80 – 90%, Aladdin), chất khử glucose

(99%, GHTECH), và các dung môi n-hexane (97%, GHTECH) và isopropyl alcohol – IPA (<100%, Xilong).

2.2. Tổng hợp dây nano đồng

Dây CuNW được tổng hợp thông qua phương pháp thủy nhiệt, với tiền chất là CuCl_2 , chúng được khử thành mầm Cu bằng glucose. Cụ thể, Cu^{2+} bị khử thành Cu^{1+} , sau đó nó tiếp tục được khử thành Cu^{0+} đóng vai trò làm mầm Cu với cấu trúc thập diện. Oleylamine (OLA) đóng vai trò làm chất hoạt động bề mặt có chức năng bao bọc lấy mầm Cu. OLA ưu tiên bám vào mặt mạng (100) do liên kết giữa OLA và mặt (100) lớn hơn đáng kể so với mặt (111) của mầm Cu. Khi đó, dây nano đồng sẽ ưu tiên mọc theo hướng [110]. Tất cả phản ứng được thực hiện trong môi trường nước, sau đó đưa vào bình teflon để thực hiện quá trình thủy nhiệt. Điều kiện tổng hợp dây nano đồng bằng phương pháp thủy nhiệt đã được tối ưu hóa trong công trình đã công bố [20].

Bước 1: 600 mg CuCl_2 với nồng độ glucose là 80 mM được hoà tan trong 40 ml nước khử ion, sau đó cho từ từ OLA với nồng độ 8 mM cho tới khi hỗn hợp trên hoà tan hết và dung dịch chuyển sang màu hồng tím.

Bước 2: Hỗn hợp trên được thủy nhiệt tại nhiệt độ thủy nhiệt là 110 °C trong 8 giờ.

Bước 3: Phân tán dung dịch dây nano đồng thu được sau khi thủy nhiệt vào dung dịch IPA với tỉ lệ 1:1. Sau đó, quay ly tâm với tốc độ 5000 rpm trong 15 phút nhằm loại bỏ dung môi và chất hoạt động bề mặt dư thừa, khi đó hỗn hợp dây và hạt nano đồng sẽ lắng xuống dưới. Phân tán lại hỗn hợp trên trong n-hexane và quay ly tâm 1000 vòng/phút trong 5 phút để loại bỏ OLA. Dây nano sẽ lắng xuống dưới, các hạt nano đồng lơ lửng bên trên bị loại bỏ, quá trình này thực hiện lặp lại 3 lần nhằm loại bỏ hết hạt nano và chất hoạt động bề mặt trên CuNW.

2.3. Chế tạo điện cực trong suốt

Sau khi tổng hợp được dây nano đồng, tiến hành chuẩn bị dung dịch mực in dây nano đồng có nồng độ 20 mg/ml được phân tán trong IPA để chế tạo TCE. Dây nano được phủ lên đế nhựa trong suốt Polyethylene terephthalate (PET) với kích thước là 5 cm × 5 cm bằng phương pháp in gạt ở nhiệt độ phòng. Đầu tiên, đế PET được rung siêu âm trong cồn và nước cất trong 5 phút, sau đó được sấy khô nhằm làm sạch hoàn toàn bụi bẩn trên bề mặt. Mật độ dây đồng trên điện cực được thay đổi bằng số lần quét và nồng độ của dây đồng trong dung dịch. Mực in được in gạt lên bề mặt đế PET bằng đĩa thủy tinh với các số lần gạt khác nhau từ 2 đến 6 lần, sau đó được sấy khô 70 °C trong 1 phút trên hot plate nhằm loại bỏ hoàn toàn IPA, và thu được điện cực hoàn thiện.

2.4. Các phương pháp phân tích

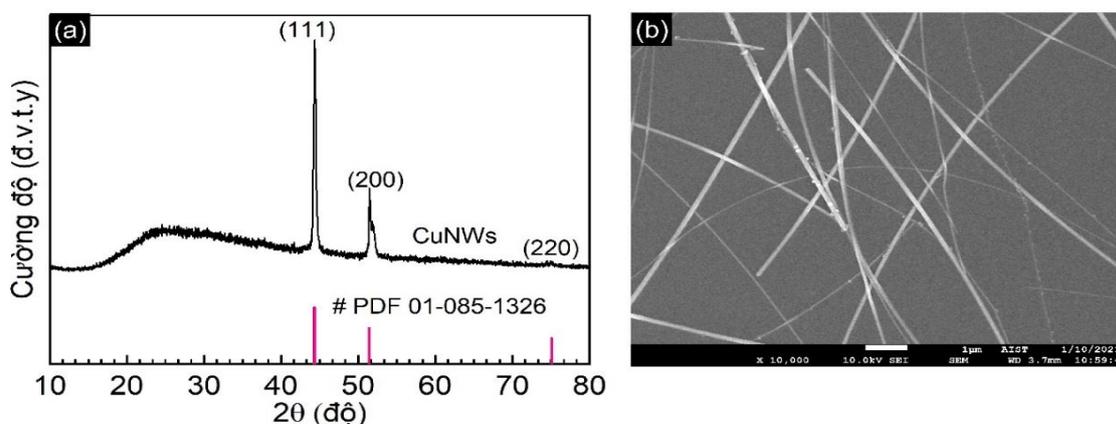
Trong nghiên cứu này, đặc điểm cấu trúc và thành phần của vật liệu được phân tích bằng giản đồ nhiễu xạ tia X trên máy D8-Advance, Bruker (Đức) với tia phát xạ Cu-K α có bước sóng $\lambda = 1,5406$ Å. Độ truyền qua của các TCE được đo bằng thiết bị UV/Vis (Agilent Cary 5000 UV-Vis-NIR). Điện trở bề mặt được đo trên thiết bị bốn mũi dò. Cuối cùng, các thông số của dây nano Cu và hình thái học bề mặt của các TCE được đo bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM, Hitachi).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích cấu trúc của dây CuNW

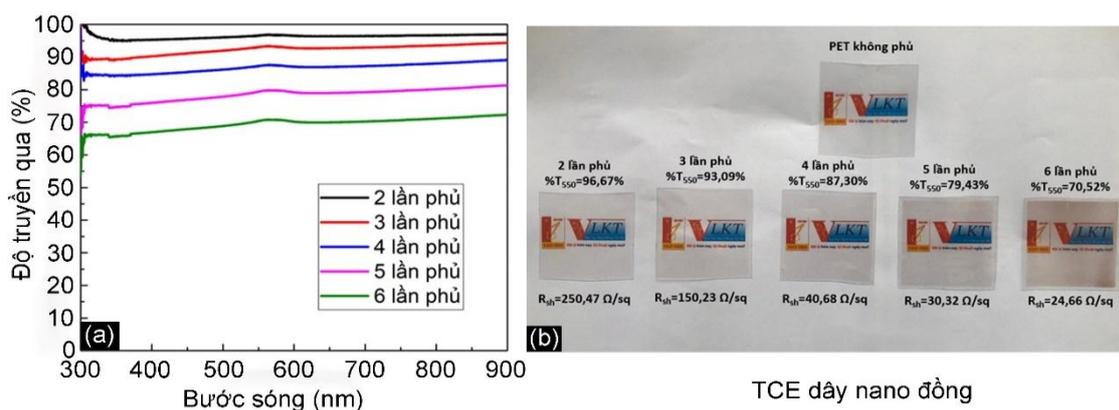
Hình 1a thể hiện giản đồ nhiễu xạ tia X – XRD và Hình 1b là ảnh SEM của dây nano đồng được tổng hợp thông qua phương pháp thủy nhiệt tại nhiệt độ 110 °C. Phổ XRD xuất hiện ba đỉnh tại các vị trí 38,41°, 44,80° và 64,84°, tương ứng với các mặt phẳng mạng (111), (200), và (220) của Cu (JCPDS Card No. 4-836). Từ giản đồ XRD, dây được phát triển từ mặt (111) dọc theo hướng tinh thể [110] vì OLA ưu tiên bám vào mặt mạng (100) do liên kết giữa OLA và mặt (100) lớn hơn đáng kể so với mặt (111). Khi đó, Cu^0 tạo thành trong dung dịch sẽ ưu tiên sắp xếp vào mặt tinh thể (111) giúp dây dài ra và phát triển dị hướng đồng theo hướng [110]. Các pha thứ cấp không xuất hiện trong giản đồ XRD, điều này chỉ ra rằng sản phẩm thu được sau khi thủy

nhệt chỉ là đơn pha Cu. Từ ảnh SEM ta thấy, dây CuNW thu được có đường kính nằm trong khoảng 25 – 50 nm và chiều dài dây lên đến 150 μm .



Hình 1. (a) Giản đồ nhiễu xạ tia X và (b) Hình thái của dây CuNW được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở nhiệt độ 110 $^{\circ}\text{C}$ trong thời gian 8 giờ

3.2. Đặc tính quang của TCE dựa trên dây CuNW



Hình 2. Phổ UV-Vis (a) và hình ảnh mô tả của điện cực dựa trên dây nano đồng với số lần in gát khác nhau từ 2 đến 6 lần

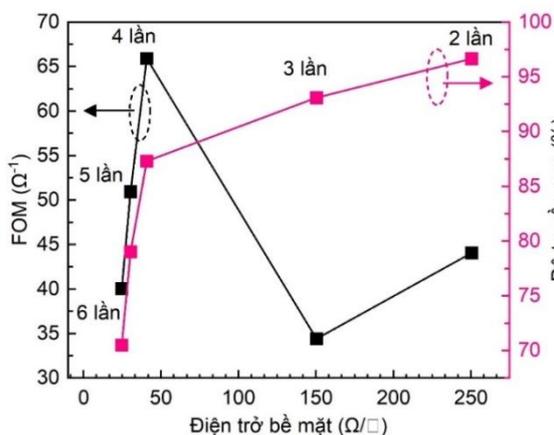
Hình 2a là phổ truyền qua UV-Vis của các điện cực dựa trên dây CuNW với số lần in gát khác nhau lần lượt từ 2 đến 6 lần. Theo như kết quả trên Hình 2b, khi số lần in gát càng tăng thì độ truyền qua càng giảm một cách rõ rệt; nguyên nhân là do mật độ các dây nano đồng tăng lên. Cụ thể, độ truyền qua T tại bước sóng 550 nm với số lần in gát khác nhau từ 2 đến 6 lần lượt là 96,67%, 93,09%, 87,30%, 79,43%, và 70,52%. Kết quả cho thấy độ truyền qua của các điện cực trong suốt trong vùng ánh sáng khả kiến là tương đối cao khi số lần gát là dưới 4 lần. Đối với các ứng dụng linh kiện quang điện tử như pin mặt trời, photodetector, độ truyền qua của TCE thường phải đạt trên 80%. Do đó, điện cực dẫn điện dựa trên dây nano đồng được chế tạo từ 2 đến 4 lần in gát là phù hợp cho các ứng dụng này.

3.3. Đặc tính điện của TCE dựa trên dây CuNW

Đối với điện cực trong suốt, hai thông số quan trọng nhất để đánh giá đặc tính quang điện của chúng là độ truyền qua và điện trở bề mặt. Điện trở bề mặt (R_{sh}) là một thông số quan trọng để đánh giá khả năng dẫn điện của TCE. Thông thường, độ truyền qua tỷ lệ thuận với điện trở bề mặt. Do đó, để đánh giá chất lượng của điện cực trong suốt người ta dựa vào hệ số chất lượng FOM (Figure of Merit). Giá trị FOM được tính theo công thức:

$$FOM = \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_{OP}} = \frac{188.5}{R_{sh}(T^{-\frac{1}{2}}-1)} \quad (1)$$

Trong đó, σ_{OP} là độ dẫn quang (tại bước sóng 550 nm) và σ_{DC} là độ dẫn điện DC của điện cực. TCE có giá trị FOM càng cao cho thấy chất lượng càng tốt.



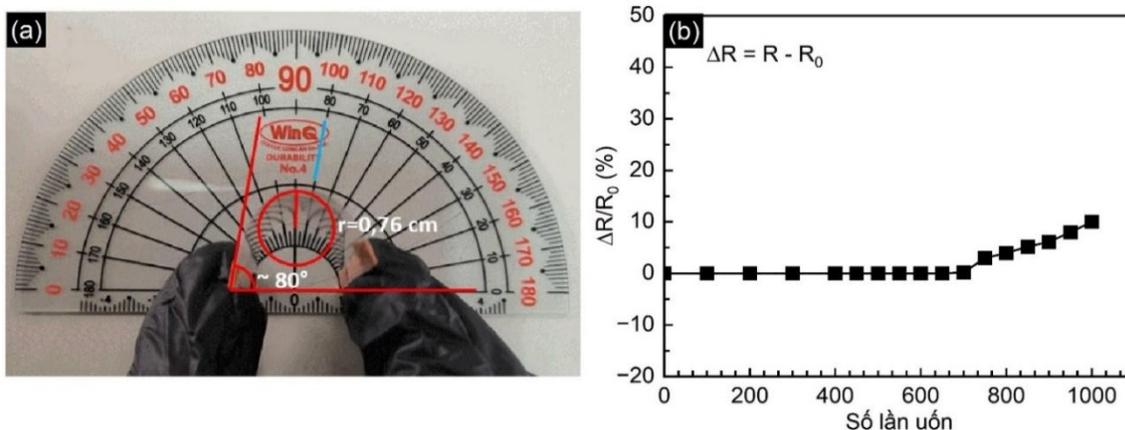
Bảng 1. Giá trị các thông số của của điện cực trong suốt dây nano đồng với số lần in gát khác nhau

Số lần in gát	Điện trở bề mặt (Ω/□)	Độ truyền qua (%)	FOM (Ω ⁻¹)
2	250,47	96,67	44,06
3	150,23	93,09	34,42
4	40,68	87,3	65,94
5	30,32	79,03	50,94
6	24,66	70,52	40,05

Hình 3. Mối quan hệ giữa hệ số chất lượng FOM, điện trở bề mặt, và độ truyền qua của TCE CuNW với số lần in gát từ 2 đến 6 lần

Hình 3 mô tả mối quan hệ của độ truyền qua và điện trở bề mặt đến hệ số chất lượng FOM của điện cực dây nano đồng với các lần in gát khác nhau. Với 2 lần in gát, điện trở bề mặt của TCE thu được khá cao, ~250,47 Ω/□. Khi tăng dần số lần in gát từ 3 đến 6 lần thì điện trở bề mặt giảm dần với giá trị lần lượt là 150,23 Ω/□, 40,68 Ω/□, 30,32 Ω/□ và 24,66 Ω/□ (xem Bảng 1). Sự giảm của điện trở bề mặt là do mật độ dây nano Cu tăng lên. Ngoài ra, khi số lần gát tăng thì dây có xu hướng phân bố đều hơn. Tuy nhiên, số lần in gát càng tăng thì mật độ dây CuNW trên bề mặt càng lớn, do đó sẽ làm giảm độ truyền qua. Để đánh giá chất lượng các điện cực dẫn điện trong suốt ta dựa vào giá trị hệ số chất lượng FOM. Theo Hình 3, giá trị FOM cao nhất là 65,94 Ω⁻¹ (4 lần quét) tương ứng với điện trở bề mặt $R_{sh}=40.68 \Omega/\square$ và độ truyền qua tại bước sóng 550 nm $T_{550}=87,30\%$. Do đó, số lần in gát tối ưu cho điện cực dựa trên dây CuNW là 4 lần in gát. Theo kết quả thu được, nhận thấy rằng TCE CuNW có tiềm năng thay thế TCE AgNW [12] ($R_{sh}=16,6 \Omega/\square$, $T_{550}=92,7\%$).

3.4. Độ ổn định cơ học của TCE dựa trên dây CuNW



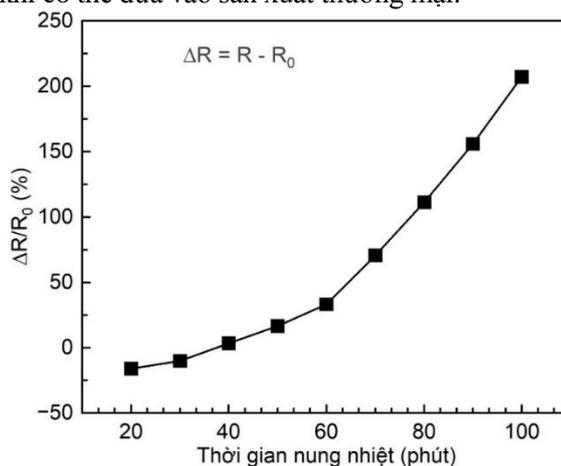
Hình 4. (a) Hình ảnh minh họa điện cực khi uốn cong và (b) sự thay đổi điện trở bề mặt của điện cực CuNW sau khi bị uốn cong với góc uốn 80°

Độ ổn định cơ học và tính linh hoạt của điện cực trong suốt dựa trên dây nano đồng được khảo sát thông qua thí nghiệm uốn cong điện cực với góc uốn là 80° (Hình 4a). Sau đó, sự thay đổi điện trở bề mặt $\Delta R=(R-R_0)/R_0$ của TCE sau mỗi lần uốn được đo bằng phương pháp 4 mũi dò. Trong đó R_0 là điện trở ban đầu và R là điện trở đo được sau khi uốn. Kết quả sự thay đổi điện trở bề mặt được thể hiện ở Hình 4b.

Kết quả cho thấy, sự thay đổi điện trở bề mặt sau khi uốn 700 lần với góc uốn 80° là không đáng kể. Tiếp tục tăng số lần uốn lên 750, điện trở bề mặt tăng nhẹ, $\sim 3\%$ so với giá trị ban đầu. Khi chu kỳ uốn là 1000 lần, điện trở bề mặt tăng lên 10%. Nguyên nhân là do sự đứt gãy của dây nano tại các vị trí bị uốn cong, làm gián đoạn đường dịch chuyển của các điện tử trên dây nano đồng, dẫn đến giảm khả năng dẫn điện của TCE. Kết quả này chỉ ra rằng điện cực trong suốt trên cơ sở dây CuNW có độ linh hoạt cao, điện trở bề mặt không thay đổi đáng kể sau nhiều lần uốn gập, rất phù hợp cho ứng dụng trong các linh kiện quang điện tử linh hoạt.

3.5. Độ ổn định nhiệt của TCE dựa trên dây CuNW

Để khảo sát tính ổn định nhiệt, các TCE được nung ở nhiệt độ 120°C trong khoảng thời gian từ 10 đến 100 phút; sau đó, đo điện trở bề mặt tại các thời gian khảo sát khác nhau để kiểm tra sự thay đổi điện trở bề mặt $\Delta R=(R-R_0)/R_0$ bằng phương pháp bốn mũi dò. Kết quả sự thay đổi điện trở bề mặt tại các thời gian khác nhau tại $T = 120^\circ\text{C}$ được thể hiện ở trong Hình 5. Tại thời gian 10 phút, giá trị điện trở bề mặt không thay đổi. Khi tăng thời gian lên 20 phút, điện trở bề mặt của điện cực CuNW giảm $\sim 16\%$, điện cực có xu hướng dẫn điện tốt hơn. Nguyên nhân của giảm điện trở bề mặt là do chất hoạt động bề mặt oleylamine bao bọc bên ngoài của các dây nano nóng chảy, giúp điện tích tiếp xúc của các dây CuNW tăng lên, dẫn đến điện trở tại các điểm tiếp xúc giữa các dây giảm. Khi tăng thời gian nung thêm nữa, điện trở bề mặt tăng lên so với khi nung tại thời điểm 20 phút. Tiếp tục tăng thời gian nung lần lượt là 40, 50, 60, 70, 80, 90 và 100 phút, điện trở bề mặt lần lượt tăng 3,33%, 16,67%, 33,33%, 70,66%, 111,33%, 156%, và 207,33% so với điện trở bề mặt khi chưa nung. Điện trở có xu hướng tăng là do sự oxi hoá bề mặt của dây nano đồng tạo thành một lớp vỏ ôxít đồng ngăn cản khả năng dẫn điện của điện cực. Do thời gian gia nhiệt tăng thì số lượng oxy khuếch tán vào lớp Cu tạo thành lớp Cu_2O càng nhiều. Kết quả này cũng cho thấy hạn chế của TCE dựa trên dây CuNW đó là sự ổn định với môi trường bên ngoài, vật liệu đồng khi tiếp xúc với môi trường bên ngoài rất dễ bị oxi hoá làm mất đi các đặc tính của vật liệu. Vấn đề này cần được khắc phục và giải quyết trước khi có thể đưa vào sản xuất thương mại.



Hình 5. Độ ổn định nhiệt của TCE CuNW ở nhiệt độ 120°C theo thời gian gia nhiệt

4. Kết luận

Điện cực trong suốt dựa trên dây nano đồng đã được chế tạo thành công bằng phương pháp in gát với nồng độ dây CuNW trong dung dịch mực in là 20 mg/ml được phân tán trong dung môi

IPA. Các điện cực chế tạo cho thấy các đặc tính quang, điện, tính linh hoạt phù hợp để ứng dụng trong các linh kiện quang điện tử nói chung và linh hoạt nói riêng. Hệ số chất lượng FOM cao nhất của điện cực đạt $65,94 \Omega^{-1}$ tương ứng với điện trở bề mặt là $40,68 \Omega/\square$ và độ truyền qua tại bước sóng 550 nm là 87,30%. Điện cực trong suốt dựa trên dây CuNW có thể chịu được 700 lần uốn cong với góc uốn là 80° và nhiệt độ 120°C trong 30 phút mà không có sự thay đổi về điện trở bề mặt so với lúc ban đầu. Tuy nhiên, điện cực trong suốt dựa trên dây CuNW dễ bị oxi hóa khi tiếp xúc với môi trường bên ngoài. Vấn đề này cần được khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo của chúng tôi.

Lời cảm ơn

Nguyễn Thị Hồng Nhung được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2023.TS.082.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. E. Adetayo, T. N. Ahmed, A. Zakhidov, and G. W. Beall, "Improvements of organic light-emitting diodes using graphene as an emerging and efficient transparent conducting electrode material," *Advanced Optical Materials*, vol. 9, no. 14, p. 2002102, 2021.
- [2] J. Wan, Y. Xia, J. Fang, Z. Zhang, B. Xu, J. Wang, and Y. Li, "Solution-processed transparent conducting electrodes for flexible organic solar cells with 16.61% efficiency," *Nano-Micro Letters*, vol. 13, pp. 1-14, 2021.
- [3] D. Kim, J. Kwon, J. Jung J, K. Kim, H. Lee, J. Yeo, S. Hong, S. Han, and S. H. Ko, "A transparent and flexible capacitive-force touch pad from high-aspect-ratio copper nanowires with enhanced oxidation resistance for applications in wearable electronics," *Small Methods*, vol. 2, no. 7, 2018, doi: 10.1002/smt.201800077.
- [4] C. Xie, Y. Liu, W. Wei, and Y. Zhou, "Large-area flexible organic solar cells with a robust silver nanowire-polymer composite as transparent top electrode," *Advanced Functional Materials*, vol. 33, no.1, p. 2210675, 2023.
- [5] J. Sang, X. Zhou, Z. Xia, J. Sun, J. Wang, J. Shang, and K. Neyts, "Dispersion and tunable alignment of colloidal silver nanowires in a nematic liquid crystal for applications in electric-optic devices," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, no. 8, pp. 11016-11023, 2023.
- [6] J. Y. Kim, G. G. Oh, E. Kim, H. S. Kim, G. Hong, J. H. Ryou, and M. K. Kwon, "Silver-nanowire-based localized-surface-plasmon-assisted transparent conducting electrode for high-efficiency light-emitting diode," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, p. 7747, 2021.
- [7] X. Yin, J. Wang, A. Liu, W. Cai, L. Ying, X. He, Z. Tang, and L. Hou, "Flexible ITO-free sky-blue polymer light-emitting diodes and printed polymer solar cells based on AgNW/PI transparent conductive electrode," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 5, no. 1, p. 014003, 2020.
- [8] A. Kumar and C. Zhou, "The race to replace tin-doped indium oxide: which material will win?" *ACS Nano*, vol. 4, no. 1, pp. 11-14, 2010.
- [9] D. W. Kim, J. W. Han, K. T. Lim, and Y. H. Kim, "Highly enhanced light-outcoupling efficiency in ITO-free organic light-emitting diodes using surface nanostructure embedded high-refractive index polymers," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, no. 1, pp. 985-991, 2017.
- [10] B. Dan, G. C. Irvin, and M. Pasquali, "Continuous and scalable fabrication of transparent conducting carbon nanotube films," *ACS Nano*, vol. 3, no. 4, pp. 835-843, 2009.
- [11] M. Xu, J. Qi, F. Li, and Y. Zhang, "Transparent and flexible tactile sensors based on graphene films designed for smart panels," *Journal of Materials Science*, vol. 53, no. 13, pp. 9589-9597, 2018.
- [12] F. Wu, Z. Li, F. Ye, X. Zhao, T. Zhang, and X. Yang, "Aligned silver nanowires as transparent conductive electrodes for flexible optoelectronic devices," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 4, no. 47, pp. 11074-11080, 2016.
- [13] S. Yu, J. Li, L. Zhao, B. Gong, and L. Li, "Folding-insensitive, flexible transparent conductive electrodes based on copper nanowires," *Solar Energy Materials & Solar Cells/Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 231, p. 111323, 2021.
- [14] S. M. Lee, J. H. Kwon, S. Kwon, and K. C. Choi, "A review of flexible OLEDs toward highly durable unusual displays," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 5, pp. 1922-1931, 2017.

- [15] S. I. Na, S. S. Kim, J. Jo, and D. Y. Kim, "Efficient and flexible ITO free organic solar cells using highly conductive polymer anodes," *Advanced Materials*, vol. 20, no. 21, pp. 4061-4067, 2008.
- [16] V. B. Nam and D. Lee, "Copper nanowires and their applications for flexible, transparent conducting films: A review," *Nanomaterials*, vol. 6, 2016, doi: 10.3390/nano6030047.
- [17] D. V. R. Kumar, A. M. Koshy, N. Sharma, N. Thomas, and P. Swaminathan, "Room temperature curable copper nanowire-based transparent heater," *ACS omega*, vol. 8, no. 23, pp. 21107-21112, 2023.
- [18] M. J. Chiu, I. Wahdini, Y. N. Shen, C. Y. Tseng, J. Sharma, and Y. Tai, "Highly stable copper nanowire-based transparent conducting electrode utilizing polyimide as a protective layer," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 6, no. 9, pp. 5058-5066, 2023.
- [19] W. Li, H. Zhang, S. Shi, J. Xu, X. Qin, Q. He, K. Yang, W. Dai, G. Liu, Q. Zhou, H. Yu, S. R. P. Silvaet, and M. Fahlman, "Recent progress in silver nanowire networks for flexible organic electronics," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 8, no. 14, pp. 4636-4674, 2020.
- [20] T. H. N. Nguyen, T. L. H. Chu, B. H. A. Luu, V. B. Nguyen, T. L. Nguyen, and D. C. Nguyen, "Synthesis of copper nanowires by hydrothermal method," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 229, no. 10, pp. 376-382, 2024.