

Nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình ăn mòn đến điện trở suất tiếp giáp Ohmic của linh kiện AlGaIn/GaN HEMT

Studying the Effect of Etching Process on the Ohmic Specific Contact Resistance of AlGaIn/GaN HEMT

Nguyễn Trung Đô, Lưu Thị Lan Anh, Lê Thị Hồng Liên,
Nguyễn Hoàng Thoan, Nguyễn Ngọc Trung*

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email: trung.nguyennhoc@hust.edu.vn

Tóm tắt

Trong các linh kiện điện tử, từ mạch tích hợp đến pin mặt trời, giá trị điện trở suất (ρ_c) tiếp giáp Ohmic giữa kim loại và bán dẫn là thước đo hiệu suất của thiết bị. Trong bài báo này, ảnh hưởng của quá trình ăn mòn bằng nguồn plasma cảm ứng cao tần (ICP) tới điện trở suất tiếp giáp kim loại - bán dẫn đã được nghiên cứu bằng phương pháp đường truyền tuyến tính (LTLM). Kết quả thu được cho thấy, lựa chọn độ sâu và chế độ công nghệ phù hợp cho quá trình ăn mòn bằng phương pháp ICP trước khi phủ kim loại là một công đoạn có tính quyết định trong việc chế tạo tiếp giáp Ohmic có điện trở suất thấp. Giá trị điện trở Ohmic chế tạo được thấp nhất khi độ sâu ăn mòn đảm bảo cho các lớp kim loại phủ lên vùng AlGaIn pha tạp với khoảng cách bên trên bề mặt lớp 2DEG của cấu trúc AlGaIn/GaN HEMT khoảng 8 nm. Với công suất của nguồn ion là 30 W và công suất nguồn plasma là 250 W, tốc độ ăn mòn vật liệu AlGaIn là khoảng 27,21 nm/phút. Điện trở suất tiếp giáp Ohmic của các lớp kim loại Ti(20 nm)/Al(200 nm)/Pd(60 nm)/Au(100 nm) với bán dẫn AlGaIn có giá trị thấp nhất là $\rho_c = 1,08 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, mặc dù mẫu chỉ ủ ở nhiệt độ tương đối thấp là 650 °C, trong môi trường khí Nitơ.

Từ khóa: GaN/AlGaIn, transistor độ linh động điện tử cao, điện trở suất tiếp giáp Ohmic, quá trình ăn mòn ICP.

Abstract

In electronic devices, ranging from integrated circuits to solar cells, the Ohmic specific contact resistance between metal and semiconductor is a measure of device performance. In this paper, the effect of Induction Coupled Plasma etching (ICP) on creating specific contact resistance between metals and semiconductors was investigated by linear transmission method (LTLM). The obtained results show that selecting etching depth and etch process conditions by ICP method before metal coating is a decisive step in the manufacture of low resistance Ohmic contact. The value of formed Ohmic specific contact resistance is the lowest when the etching depth ensures the metal layers to cover the doped AlGaIn region at a distance of about 8 nm above the AlGaIn/GaN interface. With an ion power source (RIE) of 30 W and a plasma power source (ICP) of 250 W, the etching rate of AlGaIn material is approximately 27,21 nm/minute. The Ohmic specific contact resistance of metal layers Ti (20 nm)/Al (200 nm)/Pd (60 nm)/Au (100 nm) with AlGaIn semiconductor has an optimal value of $\rho_c = 1,08 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, despite the sample was annealing at a relatively low temperature of 650°C, in a nitrogen atmosphere at 650°C.

Keywords: GaN/AlGaIn, high-electron mobility transistors (HEMT), Ohmic specific contact resistance, ICP etching process.

1. Giới thiệu

Linh kiện transistor được sử dụng trong tất cả các thiết bị điện tử. Transistor có độ linh động điện tử cao trên cơ sở vật liệu GaN/AlGaIn (HEMT) là thế hệ linh kiện mới, bắt đầu được sử dụng trong các thiết bị điện tử tần số cao và công suất cao. Sự khác biệt nổi trội của HEMT so với linh kiện Silic truyền thống là linh kiện được làm từ các màng vật liệu bán dẫn có năng lượng vùng cấm rộng và khác nhau, được gọi là chuyển tiếp dị thể [1-3]. Các điện tử trong linh kiện HEMT dịch chuyển từ vật liệu có vùng cấm rộng hơn sang vật liệu có vùng cấm nhỏ hơn, tạo ra một lớp khí

điện tử 2 chiều (2DEG). Độ linh động điện tử (μ) tại lớp khí điện tử 2 chiều đạt giá trị cao bất thường ở nhiệt độ phòng do hiệu ứng tán xạ giảm [1-3]. HEMT có thể hoạt động ở tần số cao hơn so với các linh kiện bán dẫn thông thường và được sử dụng rộng rãi trong các sản phẩm tần số cao như điện thoại di động, máy thu vệ tinh, bộ chuyển đổi điện áp và các thiết bị radar trong ngành thông tin và truyền thông. Ban đầu, vật liệu thường dùng cho HEMT là các tiếp giáp giữa màng mỏng GaAs với Al(In)GaAs ở các mức nồng độ Al hoặc In (theo mol.) khác nhau, tùy theo ứng dụng của linh kiện. Hiện nay, linh kiện HEMT GaN được làm từ bán dẫn có năng lượng vùng cấm rộng (3,4 eV), độ linh động điện tử rất cao (2000 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ tại 300K và 1800 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ tại 77 K), thân thiện với môi trường đang được sử dụng

rộng rãi hơn. Lớp 2DEG trong cấu trúc AlGaIn/GaN được hình thành dựa trên kết quả có được từ hiệu ứng phân cực tự phát và phân cực áp điện tại lớp AlGaIn. Đối với cấu trúc dị thể, giá trị mật độ hạt dẫn trong lớp 2DEG điển hình là $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ với nồng độ Al là $\sim 20 - 30 \%$. Các tính chất nổi trội của linh kiện trên cơ sở vật liệu AlGaIn/GaN so với các linh kiện truyền thống sử dụng Silic và GaAs là: Tần số làm việc rất cao (lên tới hàng chục, thậm chí hàng trăm GHz), nhiệt độ làm việc cao (nên chỉ cần làm mát ở mức độ thấp nhất), điện trường đánh thủng cao ($2 \times 10^6 \text{ V/cm}$) và vận tốc chuyển động của điện tử lên tới 10^7 cm/s [2, 4-6].

Trong các linh kiện và thiết bị điện tử bán dẫn, các tiếp giáp giữa kim loại với bán dẫn và điện trở tiếp xúc Ohmic đóng vai trò rất quan trọng và trực tiếp ảnh hưởng đến hiệu suất hoạt động của linh kiện. Các đặc tính quan trọng của transistor là tần số dòng cắt (f_T), tần số dao động cực đại (f_{max}) và hiệu điện thế đánh thủng. Để chế tạo được linh kiện GaN HEMT có giá trị dòng máng cao, tốc độ cao và nhiễu thấp, một vấn đề cần giải quyết đó là điện trở tiếp xúc Ohmic của cực nguồn và máng.

Có nhiều nhóm nghiên cứu đã báo cáo về tiếp giáp Ohmic của AlGaIn/GaN HEMTs được chế tạo bằng cách ủ các lớp kim loại lắng đọng trên bề mặt của n-AlGaIn [1,6-11]. Sự hình thành tiếp giáp Ohmic có điện trở thấp trong một cấu trúc với lớp bề mặt có chiều cao rào thế Schottky lớn như n-GaN (hay AlGaIn) yêu cầu một lớp bán dẫn pha tạp mạnh gần với tiếp xúc kim loại nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho hiệu ứng xuyên hầm. Tuy nhiên, việc chế tạo các tiếp xúc Ohmic điện trở thấp này là một quy trình công nghệ rất phức tạp khi phải giải quyết hàng loạt các vấn đề liên quan đến hiệu ứng bề mặt giữa kim loại và các lớp bán dẫn tiếp giáp. Các hiệu ứng này phụ thuộc vào độ dày/mỏng và thành phần của các lớp bán dẫn epitaxy nitride loại n cũng như phụ thuộc vào các điều kiện ủ nhiệt. Do sự phức tạp của các hiệu ứng này, việc ủ tại nhiệt độ cao từ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ đến $900 \text{ }^\circ\text{C}$ [10] vẫn là không đủ để khiến cho các lớp kim loại lại phản ứng hoàn toàn với lớp rào AlGaIn nhằm tạo ra lớp khí điện tử 2 chiều (2DEG) trong linh kiện GaN HEMT. Trong từng trường hợp cụ thể, lớp AlGaIn sẽ có tác dụng như một rào chắn không cho hiệu ứng xuyên hầm xảy ra và do đó sẽ làm tăng điện trở tiếp giáp.

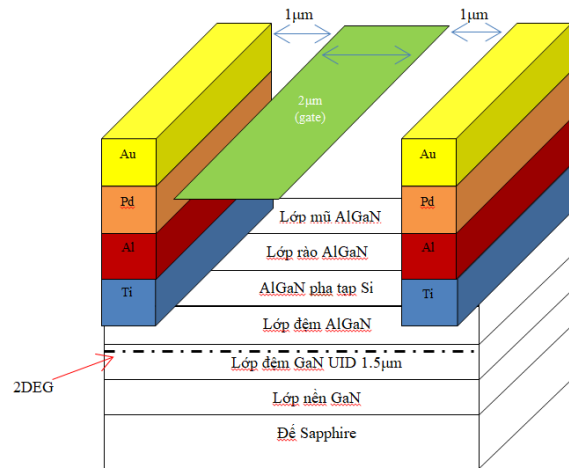
Trong bài báo này, chúng tôi đề cập tới những nghiên cứu về ảnh hưởng của quá trình ăn mòn bằng Plasma kết hợp cảm ứng từ (ICP- Induction Coupled Plasma) tới tính chất điện của tiếp xúc kim loại Ti/Al/Pd/Au với bán dẫn AlGaIn/GaN. Hệ điện cực kim loại Ti/Al được sử dụng bởi chúng tạo ra bề mặt tiếp xúc kim loại/bán dẫn cho phép hạt tải di chuyển tốt qua bề mặt tiếp giáp KL/AlGaIn/GaN [7]. Pd được sử dụng là lớp thứ ba do kim loại này có khả năng ngăn cản các nguyên tử Au khuếch tán từ bề mặt điện

cực kim loại qua lớp Ti/Al đến lớp AlGaIn và có thể làm giảm điện trở của bán dẫn.

Các yếu tố ảnh hưởng đến độ sâu trong quá trình ăn mòn GaN để chế tạo cấu trúc mesa bằng kỹ thuật ICP, thành phần khí ăn mòn và hiệu ứng ủ nhiệt cũng được xem xét.

2. Thử nghiệm

Linh kiện AlGaIn/GaN HEMT sử dụng trong nghiên cứu này có cấu trúc như hình 1 dưới đây.



Hình 1. Cấu trúc linh kiện AlGaIn/GaN HEMT

Bộ MASK's dùng cho quang khắc được thiết kế bằng phần mềm CleWin 4 và đặt Công ty Formosa Microsemi Co. LTD (Đài Loan/Trung Quốc) chế tạo.

Phiến bán dẫn 4 inch có cấu trúc epitaxy AlGaIn/GaN được mua từ nhà sản xuất NTT-AT (Nhật Bản), có các thông số kỹ thuật như sau: Bề dày: $625 \pm 25 \mu\text{m}$; Điện trở suất: $< 0,02 \text{ Ohm.cm}$; Điện trở bề mặt trung bình 400 Ohm/sq. ; Nồng độ hạt tải bề mặt: $10^{13} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$; Độ linh động điện tử: $\sim 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; Điện áp đánh thủng: $\sim 1000 \text{ V}$.

Các lớp vật liệu bán dẫn được chế tạo bởi kỹ thuật epitaxy chùm phân tử (MBE) hoặc lắng đọng hóa học từ pha hơi (MOCVD) bao gồm:

Lớp mũ: là một màng vật liệu siêu mỏng GaN (1-2nm) được lắng đọng phía trên của lớp rào AlGaIn với mục đích ngăn cản sự oxi hóa trên bề mặt và làm giảm điện trở của tiếp xúc Ohmic của điện cực nguồn và máng.

Lớp rào: có bề dày khoảng 15 nm, là lớp có tính quyết định nhất trong cấu trúc HEMT. Lớp này được làm từ loại vật liệu có độ rộng vùng cấm lớn hơn lớp đệm. Độ rộng vùng cấm phụ thuộc vào nồng độ Al có trong vật liệu.

Lớp kích thích: là lớp bán dẫn loại n được pha tạp Si với mục đích tăng nồng độ hạt tải, có bề dày khoảng 5 nm.

Lớp đệm không pha tạp (~5nm) : được làm từ vật liệu có độ rộng vùng cấm thấp hơn lớp rào, một lớp cách điện hoặc một lớp GaN có điện trở cao được sử dụng nhằm đảm bảo dòng máng bão hòa hoàn hảo khi kênh dẫn bị thắt, giảm tổn hao ở tần số cao và giảm nhiễu xuyên âm giữa các thiết bị liền kề.

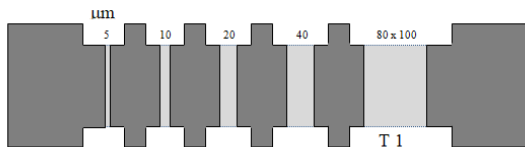
Lớp đệm hạt nhân (UID- pha tạp tùy ý): lớp này (~1,5 μm) phụ thuộc vào vật liệu làm đế và việc lựa chọn kỹ thuật tạo màng epitaxy (MBE hay MOCVD). Thông thường một màng tinh thể rất mỏng AlN, AlGaIn hoặc GaN sẽ được nuôi trước khi lắng đọng một lớp đệm bán cách điện GaN dày hơn. Mục đích là nhằm giảm áp lực và sự không tương thích về mạng tinh thể với lớp nền phi tự nhiên.

Lớp nền: Do vật liệu GaN không tồn tại trong tự nhiên, nên màng GaN epitaxy thường được lắng đọng trên một đế tinh thể là vật liệu nhân tạo như Si, SiC, Al₂O₃ hay Si (111). Đế sử dụng là đế sapphire (0001) và công nghệ chế tạo MBE).

Trước tiên, phiên bản bán dẫn epitaxy GaN được rửa sạch bằng acetone nóng trong 10 phút, sau đó rung siêu âm trong methanol 10 phút và cuối cùng được rửa bằng nước khử ion. Sau đó, sử dụng chất cảm quang Microposit S1800 photoresists (Nhật Bản) cho quá trình quang khắc bằng MASK 1.

Mẫu sử dụng để xác định điện trở tiếp giáp bằng phương pháp đường truyền tuyến tính (Linear Transmission line method - LTLM) [1] được thiết kế để chế tạo đồng thời với các điện cực nguồn và máng của HEMT. Các mẫu sau đó được cắt bằng máy cắt kim cương và chia thành 3 nhóm chính để thực hiện quá trình ăn mòn ICP ở các độ sâu khác nhau nhằm tạo ra cấu trúc mesa. Các lớp kim loại làm điện cực sau đó được phủ chính xác lên trên cấu trúc mesa bằng quy trình quang khắc điện hình như thể hiện trên hình 2.

Quá trình ăn mòn được thực hiện bằng hệ thiết bị PlasmaTherm 790 (Đại học Quốc gia Singapore) với hỗn hợp khí Cl₂ (20sccm) và Ar (5 sccm) ở áp suất 5 mTorr và nhiệt độ là 10 °C. Nguồn điện cảm ứng plasma (Inductively coupled plasma – ICP) công suất 1kW hoạt động ở tần số 2 MHz để kiểm soát thông lượng ion. Nguồn điện cho quá trình ăn mòn bằng ion (reactive ion etching – RIE) có công suất 500W hoạt động ở tần số 13,6 MHz để kiểm soát năng lượng của chùm ion.



Hình 2. Cấu trúc bề mặt của mẫu thử sử dụng để đo điện trở tiếp giáp Ohmic bằng phương pháp đường truyền tuyến tính (LTLM).

Ngay sau khi ăn mòn, các mẫu được phủ lần lượt các màng kim loại Ti(20 nm)/Al(200 nm)/Pd(60 nm)/Au(100 nm) sử dụng hệ bay hơi bằng chùm điện tử Edwards.

Các mẫu sau đó được xử lý bằng quá trình ủ nhiệt nhanh (RTA) trong môi trường khí trơ (N₂) tại nhiệt độ tương đối thấp là 650 °C và nhiệt độ cao 900 °C nhằm cải thiện chất lượng của tiếp xúc Ohmic chế tạo được.

Đặc trưng I-V của phép đo điện trở tiếp xúc bằng kỹ thuật LTLM (H.4) được thực hiện trên hệ thiết bị HP 4145.

Bảng 1. Các thông số chính của quá trình ăn mòn ICP

Mẫu thử	Công suất RIE (W)	Công suất ICP (W)	Tốc độ phun khí (sccm)	DCV (-V)	Thời gian ăn mòn (s)
MT1	300	0	20/5	538	30
MT21	30	250	20/5	87	50
MT22	30	250	20/5	89	55
MT3	30	250	20/5	88	100

3. Kết quả và thảo luận

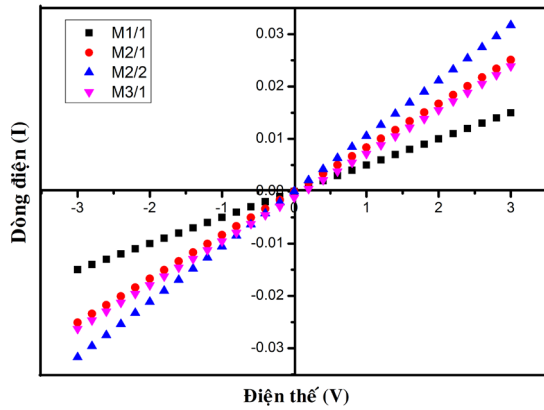
Như chúng ta đã biết, chiều dày của các lớp bán dẫn AlGaIn hoặc GaN là rất nhỏ (thậm chí dưới 10 nm) nên các thông số công nghệ sử dụng trong quá trình ăn mòn cần phải được thiết lập sao cho tốc độ ăn mòn vật liệu phải đủ chậm để có thể kiểm soát và điều khiển được chiều sâu. Để lựa chọn chế độ ăn mòn tối ưu cho các mẫu thực M1/1, M2/1, M2/2 và M3/1, các điều kiện ăn mòn được thực hiện trên các nhóm mẫu thử (buffer samples). Nhóm mẫu thử MT1 chỉ được ăn mòn trên bề mặt bán dẫn AlGaIn, MT21, MT22 và MT3 được ăn mòn ở các độ sâu xác định và thời gian ăn mòn của chúng là khác nhau. Nhóm mẫu thử MT21 được ăn mòn xuống tới lớp bán dẫn AlGaIn không pha tạp. Nhóm mẫu thử MT22 được chuẩn bị để tạo tiếp xúc Ohmic với lớp bán dẫn AlGaIn loại n. Ngoài ra, độ sâu này đã gần với vị trí của lớp 2DEG, tức là tại bề mặt của tiếp giáp giữa các lớp bán dẫn AlGaIn và GaN. Cuối cùng, độ sâu ăn mòn của nhóm mẫu thứ 3 (MT3) với mục tiêu là có thể sẽ đạt đến vị trí của bề mặt AlGaIn/GaN nơi có sự xuất hiện của lớp 2DEG cũng như cho phép các lớp kim loại tiếp giáp trực tiếp với kênh dẫn 2DEG. Sự thăng giáng giá trị điện áp phân cực (DCV) đo được trong quá trình ăn mòn ICP là tối thiểu. Sau rất nhiều thử nghiệm, chế độ, công nghệ cho kết quả ăn mòn tốt nhất được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 2 trình bày kết quả độ sâu ăn mòn của cấu trúc LTLM trên phiên bản bán dẫn AlGaIn/GaN trước khi phủ kim loại của các nhóm mẫu đo. Dễ nhận thấy đối với các hệ mẫu, thời gian ăn mòn tăng thì độ sâu ăn mòn cũng tăng. Độ sâu ăn mòn thực tế so với tính toán lý thuyết có giá trị gần bằng nhau khi thời gian ăn mòn tăng. Mẫu 2/1 được ăn mòn tới lớp rào AlGaIn không pha tạp trong khi mẫu 2/2 được ăn mòn

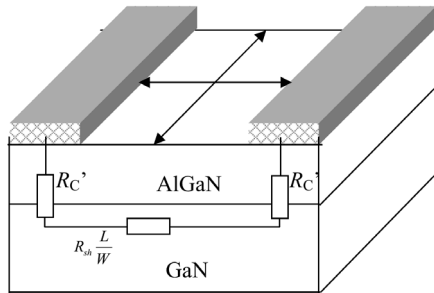
tới vùng AlGaIn kích thích. Một điều quan trọng là công suất của nguồn ion được giữ ở mức thấp nhất (30W) để làm chậm tốc độ ăn mòn để đảm bảo quá trình ăn mòn tốt hơn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, với công suất của nguồn ion là 30 W và công suất plasma là 250 W, tốc độ ăn mòn AlGaIn là khoảng 27,21 nm/phút.

Bảng 2. Độ sâu ăn mòn của cấu trúc LTLM trên HEMT AlGaIn/GaN trước khi phủ kim loại

Mẫu thử	Thời gian (s)	Độ sâu ăn mòn trung bình TN (nm)	Độ sâu ăn mòn trung bình LT (nm)
M1/1	30	1,8	2,0
M2/1	50	12,2	18,35
M2/2	55	18,35	19,71
M3/1	100	34,3	34,3



Hình 3. Ảnh hưởng của độ sâu ăn mòn lên đặc trưng I-V của tiếp xúc Ohmic.



Hình 4. Cấu trúc TLM được sử dụng để xác định điện trở tiếp xúc.

Hình 3 thể hiện đặc trưng dòng điện phụ thuộc vào điện áp (I-V) của các tiếp giáp kim loại - bán dẫn được xác định dựa trên cấu trúc LTLM. Dễ nhận thấy rằng, mẫu 2/2 có tiếp giáp Ohmic tốt nhất, sau đó là mẫu 2/1, M1/1 và cuối cùng là M3/1. Kết quả này chỉ ra rằng, các chế độ công nghệ trong quá trình ăn mòn, đặc biệt là độ sâu ăn mòn đã ảnh hưởng quan trọng đến quá trình tạo ra các tiếp giáp Ohmic tốt hơn. Hơn nữa, các kết quả xác định điện trở tiếp giáp cụ thể của từng mẫu sử dụng cấu trúc LTLM đã chế tạo được cũng khẳng định điều này.

Hình 6 thể hiện kết quả LTLM của mẫu 2/2. Đó là đồ thị của tổng điện trở giữa hai lớp tiếp xúc của mẫu LTLM, R_{tot} phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai lớp tiếp xúc.

Các tính toán LTLM có liên quan đến điện trở tiếp xúc Ohmic (R_c) của linh kiện AlGaIn/GaN HEMT dựa trên các phương trình dưới đây [1]:

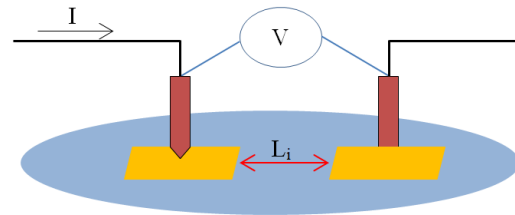
$$R_c = R_{tot} - 2R_{probe}/2 \quad (1)$$

Điện trở suất tiếp giáp ρ_c :

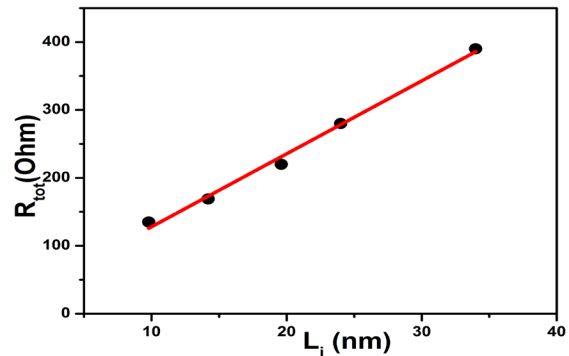
$$\rho_c = \frac{R_c^2}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$\rho_c = R_c^2 W / gradient \quad (3)$$

trong đó, R_{tot} là điện trở có giá trị tại $L_i = 0$ và R_{probe} là điện trở của mũi dò xác định từ thực nghiệm và có giá trị khoảng 16,43 Ω . L_i là khoảng cách giữa các điện cực kim loại (H.5). R_{sh} là điện trở bề mặt của bán dẫn; L , W lần lượt là chiều dài và chiều rộng của vùng bán dẫn giữa 2 điện cực kim loại. $Gradient$ là độ dốc của đồ thị I-V xác định từ hình 6.



Hình 5. Sơ đồ đo đặc trưng I-V của tiếp giáp kim loại – bán dẫn bằng 2 mũi dò (probe). L_i là khoảng cách giữa các điện cực kim loại



Hình 6. Kết quả LTLM của mẫu 2/2 sau khi ủ ở nhiệt độ 650 °C, trong môi trường Ni-tơ, thời gian 60 giây.

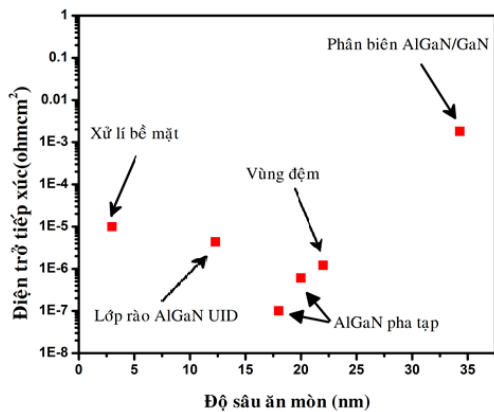
Từ hình 6, chúng ta xác định được giá trị điện trở suất $\rho_c = 1,08 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ của tiếp giáp M2/2 được ủ ở nhiệt tương đối thấp là 650°C. Giá trị điện trở suất này là phù hợp khi so sánh với các số liệu tốt nhất từ các công trình nghiên cứu gần đây [10,11]. Các giá trị điện trở suất tiếp giáp đối với các mẫu 1/1, 2/1 và 3/1 tính được theo phương pháp tương tự có giá trị lần lượt là $124,0 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$, $83,4 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ và $1790,0 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$.

Các kết quả này được tổng hợp lại trong bảng 3 dưới đây biểu hiện mối liên hệ giữa độ sâu ăn mòn và điện trở tiếp xúc tiếp xúc Ohmic.

Bảng 3. Mối liên hệ giữa độ sâu ăn mòn và điện trở tiếp xúc đặc trưng.

Mẫu	Độ sâu ăn mòn (nm)	Điện trở suất tiếp xúc Ohmic ($10^{-7} \times \Omega \text{cm}^2$)
M1/1	1,8	124,0
M2/1	12,2	83,4
M2/2	18,35	1,08
M3/1	34,3	1790

Các kết quả từ bảng 3 được vẽ lại trên đồ thị như trong hình 7. Nhận thấy, giá trị ρ_c giảm khi độ sâu ăn mòn tăng lên cho đến khi nó đạt được độ sâu của lớp AlGaIn pha tạp Si, vị trí mà chúng ta quan sát được giá trị của ρ_c tăng. Chúng ta có thể kết luận rằng tiếp xúc Ohmic chế tạo được tốt nhất khi độ sâu ăn mòn đảm bảo cho các lớp kim loại phủ lên vùng AlGaIn pha tạp ngay bên trên bề mặt 2 DEG của cấu trúc AlGaIn/GaN.

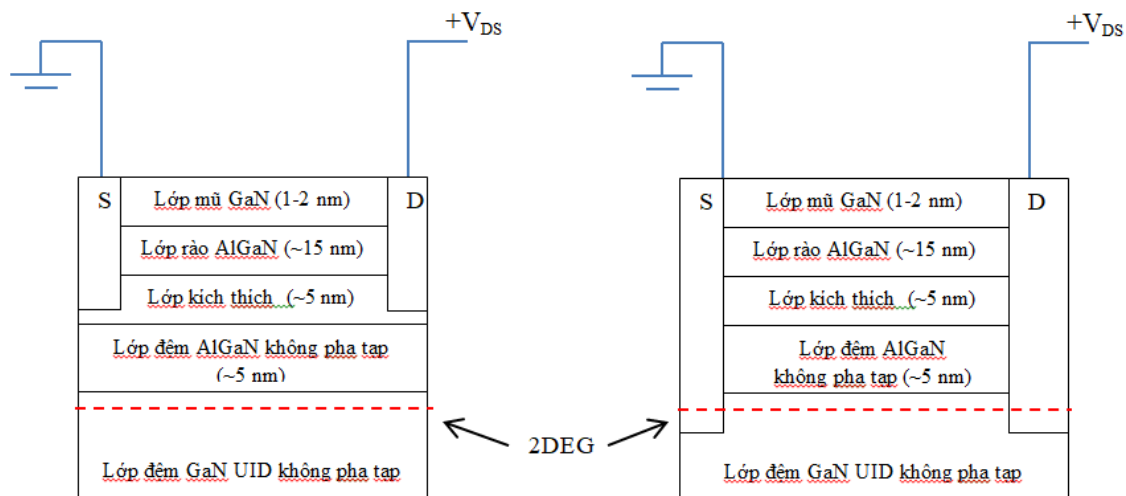


Hình 7. Ảnh hưởng của độ sâu ăn mòn lên điện trở tiếp xúc đặc trưng.

Điều này cho thấy rằng, quá trình ủ cho dù là ở nhiệt độ cao 900 °C [4] vẫn là không đủ cho sự khuếch tán của nguyên tử kim loại đến lớp khí điện tử 2 chiều 2DEG tại bề mặt phân cách của AlGaIn/GaN trong cấu trúc HEMT. Lớp AlGaIn không phản ứng đã cản trở hiệu ứng xuyên hầm cần thiết cho các hạt tải di chuyển qua mặt phân cách kim loại - bán dẫn. Việc ủ ở nhiệt độ cao cũng là bất lợi cho hình thái bề mặt của kim loại do sự hình thành của mảng hợp kim hạt lớn và do đó làm giảm các tiếp xúc cho liên kết đây sau này.

Mẫu 2/1 đã được ăn mòn một lớp AlGaIn ~12,2 nm trước khi phủ kim loại, điều này có nghĩa là điện cực nguồn và máng của linh kiện mới chỉ tiếp xúc với lớp rào, chưa tới lớp bán dẫn pha tạp, dẫn tới giá trị điện trở tiếp xúc lớn hơn rất nhiều so với mẫu 2/2. Đối với mẫu 2/2 các điện cực kim loại đã được phủ ở độ sâu ~18,35 nm. Theo tính toán thiết kế, các điện cực kim loại đã tiếp xúc với lớp bán dẫn pha tạp Si. Khi đó, khoảng cách giữa lớp kim loại điện cực và lớp 2DEG là ngắn hơn so với các linh kiện được ăn mòn bằng các kỹ thuật thông thường. Khi việc ủ mẫu 2/2 tại 650 °C hoàn thành, khoảng cách ngắn này chứng tỏ rằng đây không phải là một trở ngại cho kim loại trong việc khuếch tán đến lớp 2DEG và cho phép hiệu ứng xuyên hầm phát xạ trường trực tiếp tối ưu diễn ra. Trong một cấu trúc như vậy, tổng diện tích bề mặt của kim loại tiếp xúc với bán dẫn là tối đa, do đó dẫn đến điện trở suất tiếp xúc là rất thấp (Hình 8).

Mẫu 3/1 lại không có được điện trở tiếp xúc tốt khi so sánh với các mẫu còn lại là do các lớp kim loại lúc này đã tiếp giáp trực tiếp với lớp 2DEG thông qua một vùng gần bằng độ rộng của kênh dẫn khi mà độ dày của nó lại không đáng kể. Điều này xảy ra do kim loại được đặt lên một rãnh có độ sâu đi qua mặt phân cách AlGaIn/GaN, vị trí của 2DEG. Do vậy, vùng tiếp giáp giữa kim loại và kênh nằm tại phía của kim loại (H.8). Sự dồn nén dòng này có thể góp phần làm cho điện trở tổng cộng trở nên lớn hơn.



Hình 8. Mặt cắt của một linh kiện HEMT sau khi phủ kim loại và ủ. (a) mẫu 2/2, kim loại khuếch tán từ vị trí tiếp giáp đến lớp 2DEG với diện tích bề mặt tiếp xúc lớn hơn. (b) mẫu 3/1 – chỉ có một cực kim loại tiếp giáp với lớp 2DEG.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu ở trên, chúng ta có thể kết luận rằng, lựa chọn độ sâu và chế độ công nghệ phù hợp cho quá trình ăn mòn bằng phương pháp ICP trước khi phủ kim loại là một công đoạn có tính quyết định trong việc chế tạo tiếp xúc Ohmic có điện trở thấp trong cấu trúc AlGaIn/GaN HEMT. Giá trị điện trở suất tiếp xúc Ohmic chế tạo được thấp nhất khi độ sâu ăn mòn đảm bảo cho các lớp kim loại phủ lên vùng AlGaIn pha tạp với khoảng cách bên trên bề mặt 2 DEG của cấu trúc AlGaIn/GaN HEMT tối thiểu khoảng 8 nm.

Lời cảm ơn

Đề tài này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài mã số B20180-BKA-57. Chúng tôi cũng xin chân thành cảm ơn giáo sư Chua Soo Jin (Đại học Quốc gia Singapore) về sự hợp tác với dự án.

Tài liệu tham khảo

- [1] Dieter Schroder, Semiconductor material and device characterization, 3rd ed., John Wiley & sons, inc., 2006.
- [2] S.I. Stepanov *et al.*, Gallium oxide: Properties and application-A review, Rev. Adv. Mater. Sci., vol. 44, pp. 83-86, 2016.
- [3] J. K. S.J. Pearton, C.R. Abernathy, M.E. Overberg, G.T. Thaler, A.H. Onstine, B.P. Gila, F. Ren, B. Lou, New applications for Gallium, Mater. today, vol. 5, no. 6, pp. 24-31, June 2006.
- [4] D. Jana, S. Porwal, and T. K. Sharma, Confirmation of unintentional donors in AlGaIn/GaN HEMT structures by Mg-doping during initial growth of GaN buffer layer, J. Lumin., vol. 219, March 2020.
- [5] F. Berthet *et al.*, Characterization and analysis of electrical trap related effects on the reliability of AlGaIn/GaN HEMTs, Solid-State Electronics, vol. 72, pp. 15-21, June 2012.
- [6] S. Dhakad, N. Sharma, C. Periasamy, and N. Chaturvedi, Optimization of ohmic contacts on thick and thin AlGaIn/GaN HEMTs structures, Superlattices Microstructure, vol. 111, pp. 922-926, November 2017.
- [7] A. Soltani *et al.*, Development and analysis of low resistance ohmic contact to n-AlGaIn/GaN HEMT, Diamond Related Materials, vol. 16, no. 2, pp. 262-266, February 2007.
- [8] C. Tang, G. Xie, and K. Sheng, Study of the leakage current suppression for hybrid-Schottky/ohmic drain AlGaIn/GaN HEMT, Microelectronics Reliability, vol. 55, no. 2, pp 347-351, February 2015.
- [9] Q. Feng, L. M. Li, Y. Hao, J. Y. Ni, and J. C. Zhang, The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method, Solid-State Electronics, vol. 53, no. 3, pp. 955-958, September 2009.
- [10] A. Taube *et al.*, Temperature-dependent electrical characterization of high-voltage AlGaIn/GaN-on-Si HEMTs with Schottky and ohmic drain contacts, Solid-State Electronics, vol. 111, pp-12-17, September 2015.
- [11] Y. Liu, M. K. Bera, L. M. Kyaw, G. Q. Lo, and E. F. Chor, Low resistivity Hf / Al / Ni / Au Ohmic Contact Scheme to n-Type GaN, International Journal of Electrical, International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 6, no. 9, pp. 602-605, 2012.