



▶ THÂN HỒNG PHÚC

Thân Hồng Phúc đã nhận bằng Kỹ sư, Thạc sĩ, và Tiến sĩ Khoa học tại Đại học Thông tin – Truyền thông (University of Electro – Communications - UEC), Tokyo, Nhật Bản vào các năm 2011, 2013 và 2016. Từ năm 2016 đến năm 2017, chị Phúc là nghiên cứu viên về vật lý bán dẫn và thiết kế linh kiện bán dẫn công suất IGBT ứng dụng trong ô tô điện tại Công ty Fuji Electric tại Matsumoto, Nhật Bản. Vào năm 2018, chị Phúc gia nhập Viện Công nghệ Thông tin và Truyền thông Quốc gia (NICT), Tokyo, Nhật Bản là nghiên cứu viên sau Tiến sĩ thực hiện nghiên cứu và phát triển công nghệ cơ bản thiết bị bán dẫn công suất Ga2O3. Hoạt động nghiên cứu chính của chị Phúc tập trung vào sự phát triển tinh thể hợp chất và chế tạo linh kiện bán dẫn. Chị Phúc hiện đang giảng dạy tại Trường Đại học Duy Tân (DTU), thành phố Đà Nẵng, Việt Nam. Lĩnh vực nghiên cứu hiện nay của chị Phúc bao gồm phát triển công nghệ quy trình sản xuất và thiết kế các linh kiện bán dẫn làm bằng vật liệu Si, SiC và GaN, chẳng hạn như SBD, BJT, MOSFET và IGBT.

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CẢM BIẾN QUANG INGaP / GaAs PHOTOTRANSISTOR TRONG KHÔNG GIAN

Thân Hồng Phúc^{1*}, Yasushi Takaki², Thân Quang Thọ³,
Nguyễn Thị Phước Vân⁴, Takahiro Makino⁵,
Takeshi Ohshima⁵

¹Thân Hồng Phúc, Giảng viên Trường Đại học Duy Tân, số 03 Quang Trung, Quận Hải Châu, thành phố Đà Nẵng, Việt Nam
Email: thanhongphuc@duytan.edu.vn

² Yasushi Takaki, Kỹ sư công ty Power Device Works, Mitsubishi Electric Corporation, Kumamoto, Nhật Bản

³ Thân Quang Thọ, Kỹ sư Phòng Kỹ thuật, Tổng công ty Điện lực miền Trung (EVNCPC), 78A Duy Tân, Phường Hòa Thuận Đông, Quận Hải Châu, thành phố Đà Nẵng, Việt Nam

⁴ Nguyễn Thị Phước Vân, Nghiên cứu viên sau Tiến sĩ, Trường đại học Nam Queensland Úc, St Lucia QLD 4072, Australia

⁵ Takahiro Makino và Takeshi Ohshima, Nghiên cứu viên chính Viện nghiên cứu Quốc gia về Khoa học và Công nghệ Lượng tử (National Institutes for Quantum Science and Technology - QST), Takasaki, Nhật Bản

TÓM TẮT:

Vào năm 1947, linh kiện bóng bán dẫn kiểu tiếp xúc điểm được phát minh bởi nhà khoa học Bardeen và Brattain của Bell Lab (Hoa Kỳ), sau đó vào năm 1948, nhà khoa học Shockley đã phát minh ra bóng bán dẫn kiểu tiếp xúc p-n đánh dấu sự ra đời của thời đại linh kiện bóng bán dẫn. Linh kiện bóng bán dẫn đóng vai trò rất quan trọng của ngành công nghiệp bán dẫn. Không chỉ được sử dụng trong các sản phẩm máy tính, thiết bị truyền thông, thiết bị âm thanh mà còn được sử dụng trong các thiết bị gia dụng, ô tô, máy móc công nghiệp và các sản phẩm điện tử khác. Cuối thập kỷ 1980 và đầu thập kỷ 1990, ngành công nghiệp bán dẫn của Nhật Bản đã đứng đầu thế giới. Những năm gần đây, các lĩnh vực như IoT, xe tự hành và ô tô điện đang thu hút sự quan tâm rất lớn và có triển vọng phát triển trong tương lai, làm cho ngành công nghiệp bán dẫn càng trở nên quan trọng hơn. Trong bài viết này, nhóm tác giả giới thiệu về linh kiện bóng bán dẫn quang, là một loại bóng bán dẫn được sử dụng làm các cảm biến quang trong không gian và khảo sát về sự ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ lên hiệu năng của bóng bán dẫn quang.

Từ khóa: vật liệu và linh kiện bán dẫn, bóng bán dẫn quang, lớp bảo vệ vùng phát, không gian, tia điện tử phóng xạ.

1. GIỚI THIỆU

Trong các mạng cục bộ (LAN) và các mô-đun đa chip (MCM), có các loại cảm biến ánh sáng như Điốt quang PIN, Điốt quang Avalanche (APD), bóng bán dẫn quang, v.v. Tuy nhiên, Điốt quang PIN không có hệ số khuếch đại nên dẫn đến độ nhạy yếu khi ánh

sáng đầu vào thấp. Thêm vào đó, APD có hệ số khuếch đại lớn nhưng lại gây ra nhiễu. Ngược lại, bóng bán dẫn quang, đặc biệt là loại dị tiếp xúc (HPT) dựa trên vật liệu GaAs đã được pha tạp nồng độ cao, có lợi thế về độ lợi cao ở điện áp thấp, ít nhiễu, và độ tin cậy cao [1-3]. Vì vậy, cảm biến ánh sáng HPT được kỳ vọng là cảm biến ánh sáng thay thế Điốt quang PIN và APD trong truyền thông quang, dây cáp quang trong khu vực ánh sáng nhìn thấy được như mạng cục bộ (LAN). Đặc biệt, HPT còn có thể tích hợp được với các mạch tương tự và mạch kỹ thuật số có sử dụng bóng bán dẫn lưỡng cực siêu tần (HBT). Do đó, sự kết hợp giữa HPT và HBT trên cùng một lớp đế bán dẫn đã được nghiên cứu và phát triển rất mạnh mẽ, tạo ra các thiết bị thu sóng có băng thông siêu rộng với tín hiệu thu sóng HPT được khuếch đại bởi bộ khuếch đại HBT.

Ứng dụng của HPT trong lĩnh vực truyền thông quang đã được đề cập ở trên, trong đó ứng dụng cho ánh sáng đơn sắc rất quan trọng. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, chúng tôi xem xét về cảm biến phản ứng ánh sáng cho ánh sáng trắng, không giống như ứng dụng trong lĩnh vực truyền thông quang sử dụng ánh sáng đơn sắc đã có trước đây. Tương tự như bóng bán dẫn lưỡng cực HBT, cảm biến quang HPT cũng dựa chủ yếu vào vật liệu AlGaAs/GaAs với vùng phát làm bằng vật liệu AlGaAs. Tuy nhiên, để giảm thiểu độ lệch của vùng dẫn tạo ra rào cản cho nguồn điện tử thông qua giao diện vùng phát – vùng gốc thì cần phải có quá trình làm giảm độ lệch này. Ngoài ra, việc sản xuất AlGaAs và GaAs không thể tạo ra sự tương thích cao, do đó nghiên cứu tạo ra HPT dựa trên vật liệu InGaP/GaAs đã trở nên phổ biến hơn trong những năm gần đây [4].

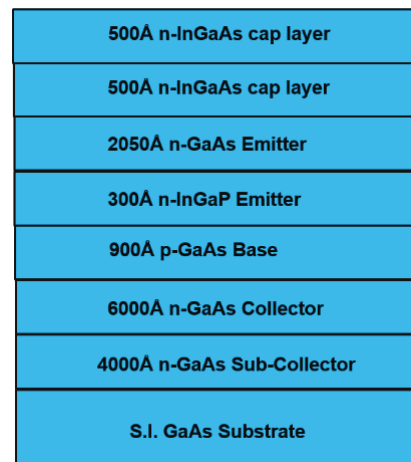
Với mục tiêu phát triển bộ điều chỉnh đèn LED tiết kiệm năng lượng có khả năng điều chỉnh độ sáng của đèn LED màu trắng được sử dụng trong chiếu sáng nội thất và đèn pha của xe hơi để phù hợp với cường độ ánh sáng nền, cùng với việc sử dụng cảm biến ánh sáng không cần pin trong ứng dụng trong không gian, như việc cài đặt trên các con tàu vũ trụ trong không gian, nơi cần phát hiện ánh sáng mặt trời mà không cần sử dụng pin, chúng tôi đã phân tích sự ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ có năng lượng cao lên HPT một cách chi tiết. Hiện tại, ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ có năng lượng cao lên đặc tính bóng bán dẫn lưỡng cực HBT làm bằng vật liệu InGaP/GaAs đã được nghiên cứu và được báo cáo rất nhiều [5-9], tuy nhiên chưa có nhiều nghiên cứu về sự ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ có năng lượng cao lên đặc tính cảm biến quang của HPT làm bằng vật liệu InGaP/GaAs. Do đó, trong bài báo này, chúng tôi đã nghiên cứu về tác động của tia điện tử phóng xạ năng lượng cao lên các đặc tính của InGaP/GaAs HPT. Ngoài ra, lớp bảo vệ vùng phát đã được thấy là có hiệu quả trong việc tăng khả năng truyền dòng điện của GaAs HBT và ức chế quá trình suy giảm do ảnh hưởng của ứng suất điện [10-18]. Tuy nhiên, hiện vẫn chưa có nhiều hoặc không có nghiên cứu nào về tác động của hiệu quả lớp

bảo vệ này lên HPT trong trường hợp chịu tác động của tia điện tử phóng xạ. Do đó, chúng tôi cũng tiến hành so sánh hiệu suất của các InGaP/GaAs HPT có và không có lớp bảo vệ vùng phát và đánh giá hiệu quả của lớp bảo vệ lên HPT bị tác động của tia điện tử phóng xạ.

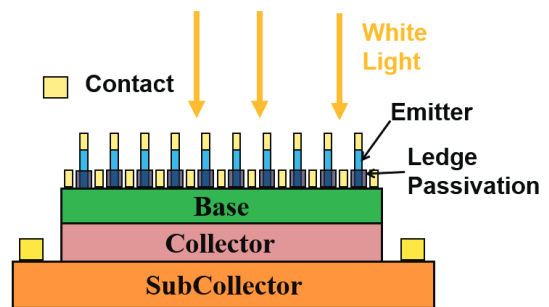
2. THÍ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CẢM BIẾN QUANG

2.1 Quy trình chế tạo cảm biến quang trong phòng sạch

Cảm biến quang HPT được sản xuất dựa trên đế bán dẫn được chế tạo bằng phương pháp bay hơi lắng đọng hóa học kim loại hữu cơ (MOCVD) trên bề mặt S.I. GaAs (100) như được mô tả trong Hình 1. Cấu trúc đế bán dẫn này là giống với cấu trúc InGaP/GaAs HBT dành cho các ứng dụng cao tần phổ biến khác.



Hình 1. Mặt cắt ngang cấu trúc đế bán dẫn của InGaP/GaAs HPT.



Hình 2. Mặt cắt ngang của cảm biến quang InGaP/GaAs HPT có lớp bảo vệ vùng phát [19].

Để làm tăng diện tích vùng nhận ánh sáng và gia tăng dòng điện quang của HPT, kích thước vùng cực phát được thiết kế lớn hơn so với các bóng bán dẫn lưỡng cực HBT. Thông thường, việc tăng diện tích vùng cực phát sẽ dễ gây ra sự tập trung quá mức của dòng điện quanh vùng cực phát, vì vậy hình dạng của điện cực đối với cực phát được thiết kế như một mạch chằng ngang có chiều rộng 4 μm và chiều dài 2100 μm , với tổng cộng là 10 mạch. Đối với điện cực của vùng cực gốc, hình dạng điện cực cũng được thiết kế là một mạch chằng ngang với chiều rộng



4 μm và chiều dài 2100 μm , với tổng cộng là 11 mạch. Diện tích vùng cực phát của các mẫu InGaP/GaAs HPT là 300,000 μm^2 , lớn hơn khoảng 3000 lần so với diện tích vùng cực phát của HBT thông thường có kích thước là 100 μm^2 . Hình 2 là mặt cắt ngang của InGaP/GaAs HPT có lớp bảo vệ vùng phát đã được chúng tôi chế tạo.

Khi ánh sáng chiếu vào cảm biến quang nếu thỏa mãn phương trình (1) thì xuất hiện dòng điện quang được tạo ra do hiện tượng quang điện bên trong linh kiện.

$$E_c \in \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Ở đây, E_g là độ rộng vùng cấm tức là khoảng cách giữa các vùng năng lượng, h là hằng số Planck, c là tốc độ ánh sáng, λ là bước sóng của ánh sáng chiếu vào.

Chúng tôi đã chế tạo hai loại HPT làm bằng vật liệu InGaP/GaAs nhằm mục tiêu nghiên cứu về tính hiệu quả của lớp bảo vệ vùng phát lên tính chất phản ứng ánh sáng của InGaP/GaAs HPT. HPT có lớp bảo vệ được gọi là L-HPT và HPT không có lớp bảo vệ được gọi là N-HPT.

Tiếp theo, quy trình chế tạo HPT trong phòng sạch sẽ được tóm tắt một cách ngắn gọn. Đầu tiên, điện cực vùng phát bằng Ti/Au được tạo ra thông qua phương pháp lift-off trên bề mặt của vật liệu để bán dẫn InGaP/GaAs, sau khi đã rửa sạch bề mặt để bán dẫn bằng dung dịch Acetone và Ethanol. Điện cực vùng phát sau đó được sử dụng như một mặt nạ để thực hiện việc cắt lớp InGaAs và GaAs bằng dung dịch $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ và dung dịch $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$, còn lớp InGaP được cắt bằng dung dịch HCl để lộ ra bề mặt của vùng gốc. Bởi vì lớp vật liệu vùng gốc mỏng nên chúng tôi đã sử dụng dung dịch HCl có tốc độ cắt có sự khác biệt lớn giữa InGaP và GaAs mà không gây hiện tượng cắt lớp quá mức cho vùng gốc.

Điện cực vùng gốc bằng Ti/Pt/Au đã được tạo thành bằng phương pháp lift-off trên bề mặt vùng gốc. Sau đó, việc cắt lớp cho cả vùng gốc và vùng thu được tiến hành để lộ ra bề mặt của lớp vật liệu vùng thu phụ. Trên bề mặt này, chúng tôi tạo điện cực vùng thu bằng Ni/AuGe/Ni/Au. Để làm cho việc lộ ra bề mặt của vùng thu phụ được dễ dàng hơn, chúng tôi đã chèn một lớp InGaP pha tạp chất có nồng độ cao và mỏng giữa vùng thu và vùng thu phụ.

Sau khi cắt xong lớp InGaP bằng dung dịch HCl và cắt xong 20 nm lớp vùng thu phụ, điện cực vùng thu đã được tạo ra. Như vậy, chúng tôi đã tạo xong mẫu N-HPT không có lớp bảo vệ.

Lớp bảo vệ vùng phát được thực hiện bằng cách cắt lớp vùng phát làm bằng vật liệu InGaAs và GaAs bằng dung dịch $3\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : 25\text{H}_2\text{O}$ và $3\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : 150\text{H}_2\text{O}$, bằng cách sử dụng mặt nạ tạo điện cực của vùng phát. Tốc độ cắt cho cả InGaAs và GaAs lúc này đều là 200 nm/phút. Sau đó, chúng tôi sử dụng mặt nạ tạo lớp bảo vệ vùng phát để cắt toàn bộ lớp InGaP có độ dày 30 nm bằng dung dịch HCl. Mẫu L-HPT có lớp bảo vệ trong

Hình 2 đã được tạo ra. Như chúng ta thấy trong hình vẽ, chiều rộng là 5 μm , che phủ khoảng 50% vùng gốc lộ ra. Các bước tiếp theo của quy trình tạo mẫu này giống như quy trình tạo mẫu N-HPT.

2.2 Đánh giá hiệu năng của cảm biến quang

Đặc tính của HPT thường được đánh giá dựa trên hai tham số chính. Tham số đầu tiên là hệ số khuếch đại dòng điện β và tham số thứ hai là độ lợi quang G.

Trong trường hợp bóng bán dẫn mắc theo kiểu cực phát chung thì hiệu suất của HBT/HPT thường được đánh giá bằng hệ số khuếch đại dòng điện β được biểu diễn theo công thức (2).

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (2)$$

Ở đây, I_b là dòng gốc và I_c là dòng thu.

Với mục tiêu ứng dụng HPT vào cảm biến ánh sáng trắng trong không gian, chúng tôi đã sử dụng một nguồn sáng Halogen của hãng PHILIPS (điện áp 15 V, công suất 150 W) với cường độ ánh sáng chiếu vào được duy trì ổn định trong suốt quá trình chiếu sáng. Nguồn sáng có một hệ thống chiếu sáng dạng vòng có đường kính 74 cm để đảm bảo cường độ ánh sáng được phân bố đồng đều trên các mẫu HPT. Trong thí nghiệm, chúng tôi đã sử dụng cùng một nguồn sáng để đo dòng thu của HPT mắc theo kiểu cực phát chung ở các giá trị dòng gốc I_b khác nhau thông qua máy phân tích tham số bán dẫn HP4155.

Hiệu suất của HPT được đánh giá bằng tham số độ lợi quang G được biểu diễn theo công thức (3).

$$G = \frac{hc}{q\lambda} \cdot \frac{\Delta I_c}{P_{in}} \quad (3)$$

Ở đây, h là hằng số Plank, c là tốc độ ánh sáng, q là hằng số điện tích, λ là bước sóng ánh sáng đầu vào, P_{in} là cường độ ánh sáng đầu vào, ΔI_c là giá trị chênh lệch giữa dòng thu ở trạng thái tối và trạng thái sáng, tức là sự gia tăng ΔI_c của dòng thu do ánh sáng gây ra. Do cường độ ánh sáng chiếu vào được giữ ổn định, ta có thể giả định P_{in} là không đổi, từ đó có thể coi ΔI_c tương đương với độ lợi quang G. Trong nghiên cứu của chúng tôi, ΔI_c được sử dụng để đánh giá hiệu năng của HPT thay cho độ lợi quang G.

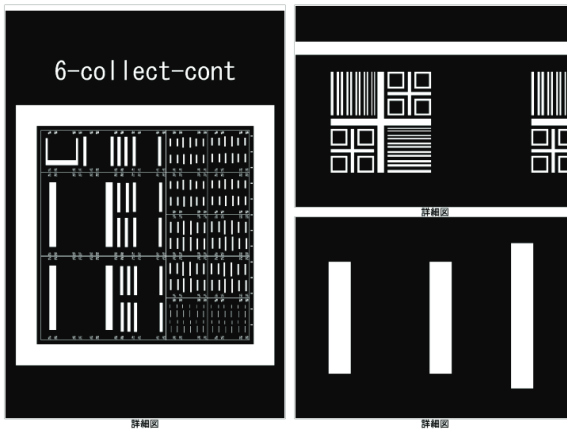
Các thí nghiệm về tác động của tia điện tử phóng xạ năng lượng cao lên cảm biến quang HPT được tiến hành tại Viện nghiên cứu Quốc gia về Khoa học và Công nghệ Lượng tử (National Institutes for Quantum Science and Technology - QST) tại Takasaki, Nhật Bản. Các điện tử được tăng tốc lên 1 MeV và được chiếu trực tiếp lên các mẫu HPTs. Mật độ tia là 1.0×10^{14} , 5.0×10^{14} và $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ bằng cách giữ dòng điện ở mức 1 mA, tương ứng với tốc độ chiếu xạ là $1.65 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Tốc độ này đủ thấp để không làm tăng nhiệt độ của các mẫu trong suốt quá trình chiếu tia điện tử phóng xạ. Các đặc tính

DC của HPTs đã được đo trong trạng thái tối và chiếu ánh sáng trước và sau khi chiếu tia thông qua máy phân tích tham số bán dẫn HP4155A.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Thiết kế mặt nạ cho thí nghiệm khảo sát sự ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ lên InGaP/GaAs HPT

Để phân tích chi tiết ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ lên HPT, chúng tôi đã tiến hành thiết kế bộ mặt nạ dùng để sản xuất ra các mẫu InGaP/GaAs HPT dành riêng cho nghiên cứu chiếu tia điện tử. Diện tích bề mặt vùng phát (A) được giữ nguyên là 160,800 μm^2 , chỉ thay đổi chu vi xung quanh vùng phát (P) thành 13,516, 22,287, 43,192, 57,534, 68,779, 85,636 μm , tương ứng với P/A lần lượt là 0.08, 0.14, 0.27, 0.36, 0.43, 0.53. Chúng tôi đã thiết kế 6 mẫu mặt nạ cho các loại HPT khác nhau. Hình 3 là mặt nạ dùng để tạo ra điện cực vùng thu.



Hình 3. Mặt nạ dùng để chế tạo điện cực vùng thu.

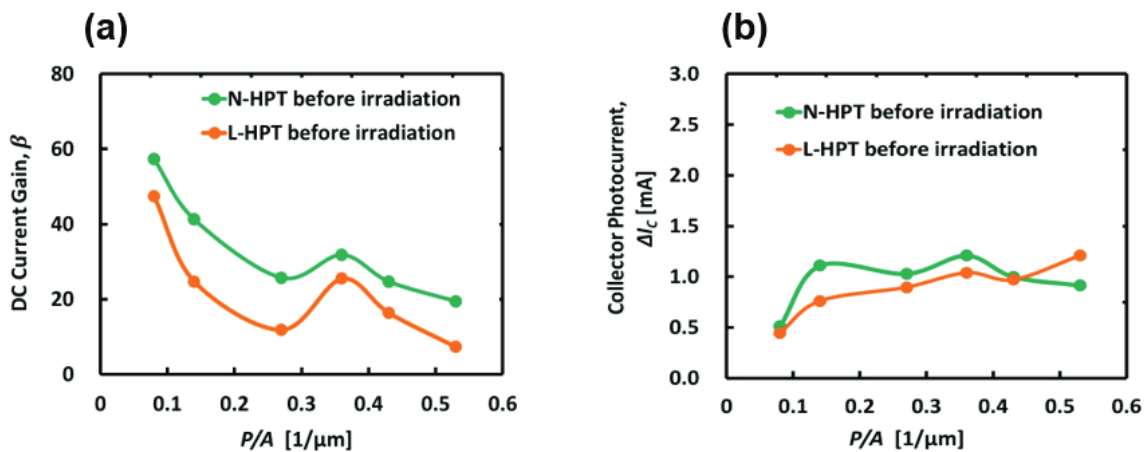
3.2 Kết quả ảnh hưởng của tia điện tử lên HPT

Dòng gốc I_B được thay đổi theo các giá trị lần lượt là 1, 2, 3, 4 và 5 μA , và mỗi giá trị I_B được giữ không đổi trong khi điện áp giữa cực phát và cực thu là V_{CE} được tăng lên từ 0 đến 3.5 V, sau đó đo dòng thu I_C tương ứng

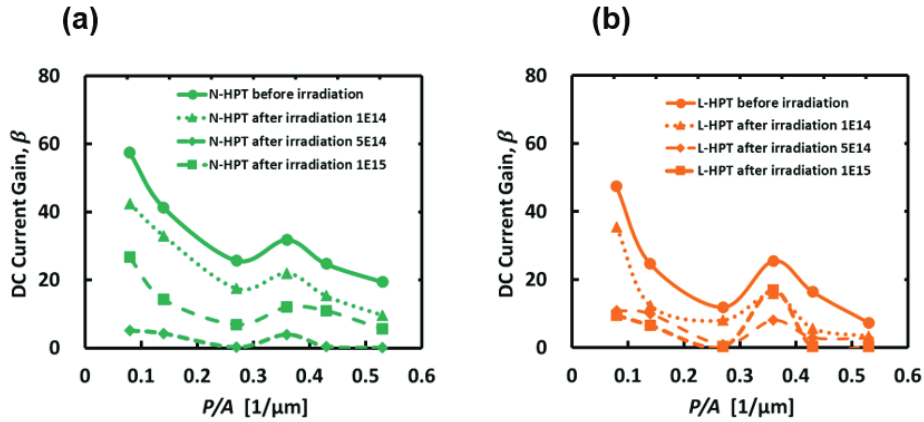
với V_{CE} . Trước và sau khi chiếu tia điện tử phóng xạ năng lượng cao, chúng tôi đã đo đặc tính dòng điện - điện áp của HPT trong trạng thái tối và trạng thái chiếu sáng. Dưới đây là phân tích các kết quả thí nghiệm để có cái nhìn tổng quan về sự ảnh hưởng của tia điện tử phóng xạ lên HPT.

Trước hết, chúng tôi sẽ phân tích sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại dòng điện β và ΔI_C vào P/A trước khi chiếu tia điện tử phóng xạ trong trường hợp diện tích vùng phát A được giữ không đổi, chỉ thay đổi chu vi P để đo hệ số khuếch đại dòng điện β và ΔI_C của HPT. Hình 4a và hình 4b tương ứng là sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại dòng điện β và ΔI_C vào P/A ($I_B = 5 \mu\text{A}$). Trong hình cũng cho thấy giá trị trung bình và thanh lỗi cho mỗi P/A. Thanh lỗi này thể hiện giá trị trung bình $\pm \sigma$ (σ : độ lệch chuẩn). Trước khi chiếu tia điện tử phóng xạ, chúng tôi đã tính giá trị trung bình và thanh lỗi cho N-HPT (11 mẫu) và L-HPT (10 mẫu) ở P/A 0.08, N-HPT (10 mẫu) và L-HPT (7 mẫu) ở P/A 0.14, N-HPT (8 mẫu) và L-HPT (8 mẫu) ở P/A 0.27, N-HPT (7 mẫu) và L-HPT (10 mẫu) ở P/A 0.36, N-HPT (6 mẫu) và L-HPT (7 mẫu) ở P/A 0.43, N-HPT (5 mẫu) và L-HPT (7 mẫu) ở P/A 0.53.

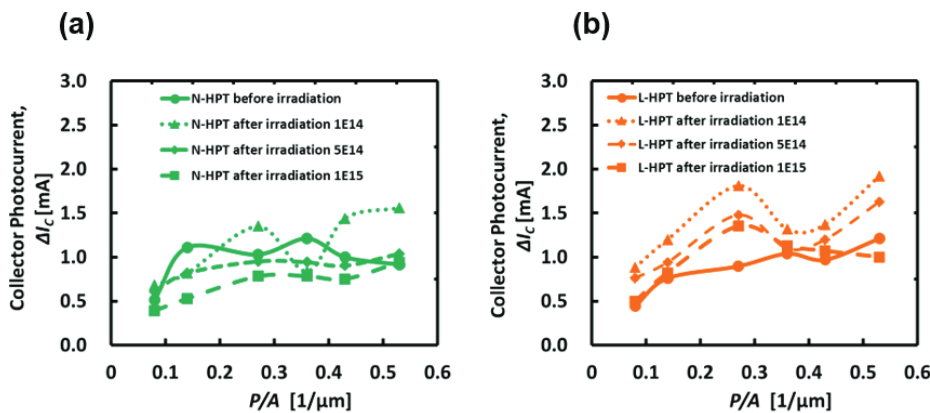
Khi P/A tăng lên, cả N-HPT và L-HPT đều cho thấy hệ số khuếch đại dòng điện β giảm đi. Trong tất cả các mẫu, vì diện tích vùng phát A không đổi và chỉ thay đổi chu vi P cho nên khi P/A lớn hơn thì chu vi P sẽ trở nên dài hơn. Tại P/A 0.36, hệ số khuếch đại dòng điện β có sự gia tăng, nhưng tổng thể từ P/A 0.08 đến 0.27, cả N-HPT và L-HPT đều cho thấy hệ số khuếch đại dòng điện β giảm, và ở các giá trị P/A cao hơn, không có sự thay đổi lớn trong β . Điều này được giải thích là khi P/A tăng, dòng điện sản sinh ra do sự tái kết hợp của điện tử và lỗ trống tại vùng xung quanh vùng phát tăng, dẫn đến sự giảm của β . Tuy nhiên, tác động của hiện tượng Burn-in vào β và hiệu ứng lớp bảo vệ bằng Hydro đã làm giảm sự gia tăng của β . Ảnh hưởng của hiện tượng Burn-in vào β sẽ càng lớn khi P/A lớn. Do đó, ở P/A từ 0.27 trở lên, tác động của hiện tượng Burn-in làm gia tăng β sẽ giúp ổn định β bằng cách ngăn chặn sự gia tăng của dòng điện sản



Hình 4. Sự phụ thuộc của (a) hệ số khuếch đại dòng điện β và (b) ΔI_C vào P/A trước khi chiếu tia điện tử [19].



Hình 5. Sự phụ thuộc hệ số khuếch đại dòng điện β của (a) N-HPT và (b) L-HPT vào P/A sau khi chiếu tia điện tử [19].



Hình 6. Sự phụ thuộc ΔI_C của (a) N-HPT và (b) L-HPT vào P/A sau khi chiếu tia điện tử [19].

sinh ra do sự tái kết hợp của điện tử và lỗ trống tại vùng xung quanh vùng phát. Cần lưu ý rằng, dòng gốc I_B được đo trong thí nghiệm này là rất nhỏ. Tuy nhiên, khi P/A lớn hơn thì β của L-HPT thấp hơn β của N-HPT như trong hình 4 (a), còn trong hình 4 (b) thì không có sự khác biệt đáng kể giữa ΔI_C của L-HPT và N-HPT. Điều này xảy ra là do L-HPT có diện tích vùng phát hiệu quả lớn hơn nhờ vào tác động của lớp bảo vệ, và mật độ dòng gốc I_B hiệu quả thấp hơn khiến cho hiệu năng vùng phát giảm đi khi dòng gốc thấp. Mặc dù β của L-HPT thấp hơn β của N-HPT, nhưng do có thể có sự gia tăng thêm từ dòng hạt tự do được tạo ra bởi ánh sáng chiếu vào dẫn đến ΔI_C của L-HPT sẽ tương đương với ΔI_C của N-HPT.

Tiếp theo, chúng ta sẽ phân tích sự phụ thuộc hệ số khuếch đại dòng điện β và ΔI_C của HPT vào P/A sau khi chiếu bởi tia điện tử phóng xạ. Hình 5 thể hiện sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại dòng điện β vào P/A sau khi chiếu tia điện tử cho cả N-HPT và L-HPT ($I_B = 5 \mu A$).

Như chúng ta thấy trong hình 5, hệ số khuếch đại dòng điện β và ΔI_C của cả hai loại HPT đều giảm khi P/A tăng lên. Ở mức chiếu xạ thấp như $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, sự tạo thành khuyết tật diễn ra dễ dàng hơn quanh vùng mép vùng phát do liên kết của các nguyên tử tại đây rất yếu dẫn đến việc β giảm khi P/A tăng. Tuy nhiên, ở mức chiếu xạ cao hơn, các khuyết tật diễn ra đồng đều trên

toàn bộ mẫu nên β không phụ thuộc nhiều vào P/A . Tuy nhiên, với L-HPT, liên kết của các nguyên tử ở vùng mép của vùng phát nhờ có lớp bảo vệ vẫn còn khá mạnh nên β không phụ thuộc nhiều vào P/A ngay cả ở mức chiếu xạ thấp.

Hình 6 thể hiện sự phụ thuộc của ΔI_C vào P/A . Mặc dù có một số biến đổi nhỏ nhưng nhìn chung ΔI_C không có sự phụ thuộc đáng kể nào vào P/A .

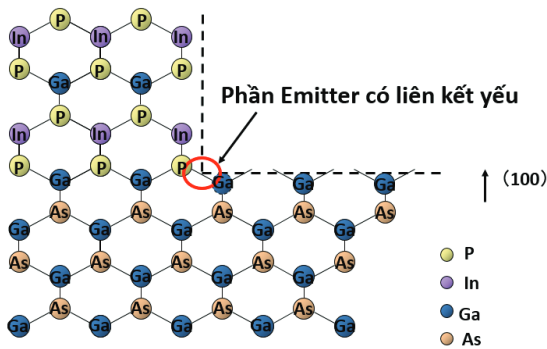
3.3 Cơ chế suy giảm β và ΔI_C của HPT do tia điện tử phóng xạ

Dựa trên tác động của tia điện tử phóng xạ đối với β và ΔI_C trong HPT đã trình bày ở trên, chúng ta có thể tổng hợp tác động của việc tạo ra khuyết tật do tia điện tử phóng xạ và tác động lên đặc tính của HPT trong hình 7. Trong phân tích này, chúng ta loại bỏ tác động của hiệu ứng Burn-in.

Ở các mức chiếu xạ thấp, cả N-HPT và L-HPT đều tạo ra khuyết tật, nhưng khuyết tật được tạo ra dễ dàng tại bề mặt gần bề mặt vùng góc. Trong N-HPT, vùng phát có độ dày 305 nm nằm trên lớp InGaP dày 30 nm ở phần xung quanh, dẫn đến tia điện tử phóng xạ ảnh hưởng mạnh đến khu vực xung quanh mép vùng phát, và khuyết tật được tạo ra tại các khu vực có sự kết nối yếu của nguyên tử.

Vì vậy, sự giảm β do tia điện tử phóng xạ ở N-HPT trở nên rõ ràng, tương tự như tác động của các thí nghiệm về ảnh hưởng của ứng suất điện với cường độ dòng điện lớn trong thời gian ngắn và đột ngột.

Ở các mức chiếu xạ cao, tác động của tia điện tử phóng xạ trở nên tương tự ở cả N-HPT và L-HPT. Điều này xảy ra vì lúc này, không chỉ khu vực xung quanh mép vùng phát mà cả lớp vùng phát – vùng gốc dưới lớp điện cực vùng phát cũng có nhiều khuyết tật được tạo ra, dẫn đến sự gia tăng của dòng tái kết hợp của điện tử và lỗ trống làm cho dòng gốc I_B tăng lên. Ở L-HPT, vì lớp dưới lớp điện cực vùng phát được bao phủ mỏng hơn do tác động của lớp bảo vệ vùng phát, cho nên sự tạo ra ứng suất điện trong quá trình chiếu tia điện tử phóng xạ hoặc đo lường là nhỏ hơn, và cũng nhờ vào kết nối của nguyên tử ở L-HPT cũng mạnh hơn. Do đó, β của L-HPT cao hơn N-HPT, nhưng khi sự ảnh hưởng của khuyết tật trong tinh thể sản sinh ra nhiều hơn thì sự khác biệt giữa β của hai loại HPT trở nên không rõ rệt. Hiệu ứng của tia điện tử phóng xạ với mức chiếu xạ cao trong HPT cũng tương tự như hiệu ứng của ứng suất điện với cường độ dòng điện nhỏ trong thời gian dài.



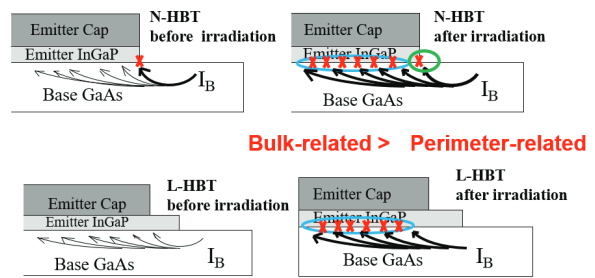
Hình 7. Cấu trúc mạng tinh thể giữa vùng phát và vùng gốc.

Ngoài ra, ở mức chiếu xạ thấp, khuyết tật có xu hướng hình thành dễ dàng gần vùng phát như chúng ta thấy trong hình 8, dẫn đến sự gia tăng của dòng điện quang bị hạn chế. Nói cách khác, sự suy giảm ΔI_C trong HPT do tia điện tử phóng xạ ở mức chiếu xạ thấp là do sự suy giảm β . Hơn nữa, ở mức chiếu xạ cao, khuyết tật hình thành nhiều hơn trong lớp vùng gốc, dưới bề mặt vùng gốc và vùng thu phía dưới. Tuy nhiên, đối với L-HPT, nhờ có sự mở rộng của vùng nghèo do có lớp bảo vệ vùng phát, cho nên dòng tái kết hợp của điện tử và lỗ trống bị hạn chế. Từ đó làm cho sự suy giảm của dòng quang thuộc nhóm L-HPT do tia điện tử phóng xạ ít hơn so với N-HPT.

Bên cạnh đó, khoảng cách giữa điện cực vùng phát và điện cực vùng gốc là $10 \mu\text{m}$, do đó độ dài lan truyền cần thiết để các hạt tự do được tạo ra bởi ánh sáng hấp thụ ở vùng gốc và vùng thu, và di chuyển được đến vùng nghèo của liên kết vùng gốc – vùng thu giảm đi do sự hình thành của khuyết tật. Ở L-HPT, chiều rộng của lớp bảo vệ là $5 \mu\text{m}$ và khoảng cách giữa điện cực vùng phát và điện

cực vùng gốc ngắn hơn $5 \mu\text{m}$. Do đó, cho dù có khuyết tật hình thành, thì các hạt tự do được tạo ra từ ánh sáng vẫn không tái hợp và có thể di chuyển được đến vùng nghèo của liên kết vùng gốc – vùng thu. Khi di chuyển tới được vùng nghèo, do cảm ứng của điện trường, lỗ trống di chuyển đến vùng gốc nhiều hơn, tạo ra sự tự hình thành điện trường giữa vùng phát và vùng gốc tăng lên, dẫn đến sự gia tăng của dòng thu. Tuy nhiên, khi khoảng cách giữa các điện cực lớn lên thì tác động của lớp bảo vệ vùng phát giảm đi.

Dựa vào các kết quả thí nghiệm đã trình bày bên trên, lớp bảo vệ vùng phát đã được chứng minh là có hiệu quả tốt đối với tác động của tia điện tử phóng xạ lên cảm biến quang HPT, đặc biệt là đối với dòng điện quang. Vì vậy, lớp bảo vệ vùng phát được coi là không thể thiếu đối với HPT ứng dụng làm cảm biến quang trong không gian.



Hình 8. Cơ chế hình thành khuyết tật sau khi chiếu tia điện tử phóng xạ của HPT.

4. KẾT LUẬN

Các tác động của tia điện tử phóng xạ năng lượng cao lên hiệu năng của các cảm biến quang InGaP/GaAs HPT đã được nghiên cứu trong báo cáo này. Hiệu năng của cả N-HPT và L-HPT đều suy giảm đáng kể sau khi chiếu tia điện tử phóng xạ năng lượng cao. Nghiên cứu cũng đã xem xét hiệu quả của lớp bảo vệ vùng phát trong trường hợp chiếu tia điện tử phóng xạ. Để xác định xem sự hình thành khuyết tật xảy ra chủ yếu ở vùng mép cực phát hay ở bên trong khối tinh thể, chúng tôi đã thay đổi các giá trị khác nhau của A (diện tích vùng phát) và P (chu vi lẻ vùng phát) để thay đổi tỷ lệ P/A tương ứng với 0.08, 0.14, 0.27, 0.36, 0.43, và 0.53. Chúng tôi đã thay đổi mức chiếu xạ của tia điện tử từ 1.0×10^{14} , 5.0×10^{14} đến $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Dòng gốc I_B được thay đổi theo các giá trị 1, 2, 3, 4, và $5 \mu\text{A}$ để đảm bảo rằng không có ứng suất điện lên HPT trong quá trình đo lường sau khi chiếu tia điện tử phóng xạ.

Trước khi chiếu tia điện tử phóng xạ, chúng tôi đã nhận thấy rằng tỷ lệ P/A tăng từ 0.08 đến 0.27 dẫn đến sự giảm của hệ số khuếch đại dòng điện β cho cả N-HPT và L-HPT, và không có sự biến đổi đáng kể của β ở tỷ lệ P/A lớn hơn. Tuy nhiên, đối với dòng quang ở vùng thu ΔI_C , không có sự khác biệt đáng kể nào giữa L-HPT và N-HPT được quan sát trong tất cả các mức chiếu xạ và tỷ lệ P/A.



Khi mức chiếu xạ của tia điện tử phóng xạ tăng lên, ở tất cả các mẫu với tỉ lệ P/A khác nhau, cả N-HPT và L-HPT đều thấy sự giảm của hệ số khuếch đại dòng điện β . Trong trường hợp của N-HPT, β giảm cho đến 5.0×10^{14} , nhưng tăng lên ở $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ hoặc cao hơn. Trong khi đó, ở L-HPT, β giảm từ $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, nhưng sau đó thì không có sự biến đổi đáng kể. Ở cả hai loại HPT, đối với hầu hết các giá trị P/A, tỷ lệ thay đổi ΔI_C tăng dần khi ở mức $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ và sau đó giảm dần. Tuy nhiên, ở mức $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, N-HPT lại có tỷ lệ thay đổi đảo ngược thành âm ở tất cả các giá trị P/A, trong khi ở L-HPT nó vẫn duy trì dương. Sự khác biệt về tỷ lệ thay đổi β giữa cả hai loại HPT có thể được giải thích bằng sự khác biệt về mật độ dòng gốc hiệu quả do sự khác biệt về diện tích, trong khi sự khác biệt về dòng quang ở vùng thu khi có ánh sáng chiếu vào được cho là phụ thuộc vào sự khác biệt về dòng quang gốc hiệu quả và mật độ dòng tương ứng của β . Sự suy giảm dường như là hiện tượng liên quan đến sự hình thành khuyết tật bên trong tinh thể hơn là liên quan sự hình thành khuyết tật xung quanh vùng mép cực phát hay liên quan đến sự suy giảm do ứng suất điện. Lớp bảo vệ vùng phát được chứng minh là có hiệu quả trong việc kiềm chế sự suy giảm hiệu năng của cảm biến quang HPT do tia điện tử phóng xạ gây nên.

5. LỜI CẢM ƠN

Kết quả được trình bày trong bài báo này dựa trên các thí nghiệm được thực hiện tại Đại học Thông tin – Truyền thông (University of Electro – Communications - UEC), Tokyo, Nhật Bản. Thí nghiệm chiếu xạ tia điện tử năng lượng cao được tiến hành tại Viện nghiên cứu Quốc gia về Khoa học và Công nghệ Lượng tử (National Institutes for Quantum Science and Technology - QST) tại Takasaki, Nhật Bản. Nhóm tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Giáo sư Shinji Nozaki và Giáo sư Kazuo Uchida của Đại học Thông tin – Truyền thông (University of Electro – Communications - UEC), Tokyo, Nhật Bản đã chỉ đạo chính cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Chandrasekhar, “High-speed monolithic p-i-n/HBT and HPT/HBT photoreceivers implemented with simple phototransistor structure,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1316–1318, Nov. 1993.
- [2] H. Kamitsuna, Y. Matsuoka, S. Yamahata, and N. Shigekawa, “Ultrahighspeed InP/InGaAs DHPTs for OEMMICs,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 10, pp. 1921–1925, Oct. 2001.
- [3] K. H. Ha et al., “High-speed Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs heterojunction phototransistors,” *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 16, pp. 1386–1387, Aug. 1995.
- [4] C-K. Song et al., “Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 315–317, Jul. 2001.
- [5] S. Vuppala, C. Li, P. Zwicknagl, and S. Subramanian, “Neutron, proton, and electron irradiation effects in InGaP/GaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, pp. 1846–1851 Dec. 2003.
- [6] A. Sarkar, S. Subramanian, and S. M. Goodnick, “Electron irradiation effects in AlGaAs/GaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, pp. 2024–2030, Nov. 2000.
- [7] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. G. Dentai, and S. M. Goodnick, “Degradation of DC characteristics of InGaAs/InP single heterojunction bipolar transistors under electron irradiation,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, pp. 840–849, May 1999.
- [8] A. Shatalov, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. Dentai, and S. M. Goodnick, “Electron irradiation effects in polyimide passivated InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, pp. 1708–1715, Dec. 1999.
- [9] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. G. Dentai, and S. M. Goodnick, “Degradation of InGaAs/InP double heterojunction bipolar transistors under electron irradiation,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, pp. 850–858, May 1999.
- [10] S-W. Tan et al., “Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 2, pp. 204–210, Feb. 2005.
- [11] W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S-K. Fan, “Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 301–303, Jun. 1993.
- [12] O. Ueda et al., “Current status of reliability of InGaP/GaAs HBTs,” *SolidState Electron.*, vol. 41, no. 10, pp. 1605–1610, Oct. 1997.
- [13] A. A. Rezazadeh et al., “Bias and temperature stress reliability of InGaP/GaAs HBTs,” in *Proc. IEEE 38th Annu. Int. Rel. Phys. Symp.*, 2000, pp. 250–257.
- [14] M. G. Adlerstein and J. M. Gering, “Current induced degradation in GaAs HBT’s,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 2, pp. 434–439, Feb. 2000.
- [15] N. Pan et al., “High reliability InGaP/GaAs HBT,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 115–117, Apr. 1998.
- [16] A. Kurokawa et al., “Effects of surface recombination on dc characteristics of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” *Inst. Electron., Inf. Commun. Eng. (IEICE)*, Tokyo, Japan, Tech. Rep. ED2005-198, MW2005-152, Jan. 2006.
- [17] F-Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, “Improvement in reliability of InGaP/GaAs HBT’s by ledge passivation,” *Inst. Electron., Inf. Commun. Eng. (IEICE)*, Tokyo, Japan, Tech. Rep. ED2007-217, MW2007-148, Jan. 2008.
- [18] C-K. Song and P-J. Choi, “Effects of InGaP heteropassivation on reliability of GaAs HBTs,” *Microelectron. Rel.*, vol. 39, no. 12, pp. 1817–1822, Dec. 1999.
- [19] Phuc Hong Than, “A Study on Fabrication and Reliability of the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor Powered by an On-Chip GaAs Solar Cell,” Ph. D Thesis in EE, Department of Engineering Science, Graduate School of Information and Engineering Sciences, University of Electro-Communications, Tokyo, Japan, March 2016 (Written in Japanese).