

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP DÒNG QUANG ĐIỆN CẢM ỨNG ĐỂ NGHIÊN CỨU ĐI-ỐT BÁN DẪN CÔNG SUẤT

APPLYING OPTICAL BEAM-INDUCED CURRENT IN THE CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTOR POWER DIODES

Nguyễn Duy Minh

TÓM TẮT

Phương pháp dòng quang điện cảm ứng (OBIC) là một phương pháp dựa trên việc đo dòng điện kích thích sinh ra do một chùm tia laser với bước sóng thích hợp chiếu trên bề mặt của một linh kiện bán dẫn. Từ dòng quang điện đo được này, nhiều thông số và đặc tính khác nhau của phần tử khảo sát có thể được làm rõ. Bài báo giới thiệu về nguyên lý của phương pháp OBIC và ứng dụng của nó trong việc khảo sát đi-ốt công suất làm từ vật liệu SiC.

Từ khóa: Phương pháp dòng quang điện cảm ứng, linh kiện bán dẫn, đi-ốt công suất.

ABSTRACT

Optical Beam-Induced Current (OBIC) is a technique that measures a photocurrent in response to a laser beam with appropriate wavelength that is scanned over the surface of a semiconductor device. In this way, a number of important device parameters can be derived. This paper deals with the principle of OBIC and its application for characterization of silicon carbide (SiC) power diodes.

Keywords: Optical Beam Induced Current, semiconductor device, power diodes.

Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

Email: minhnd81@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/6/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 12/10/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2018

1. GIỚI THIỆU

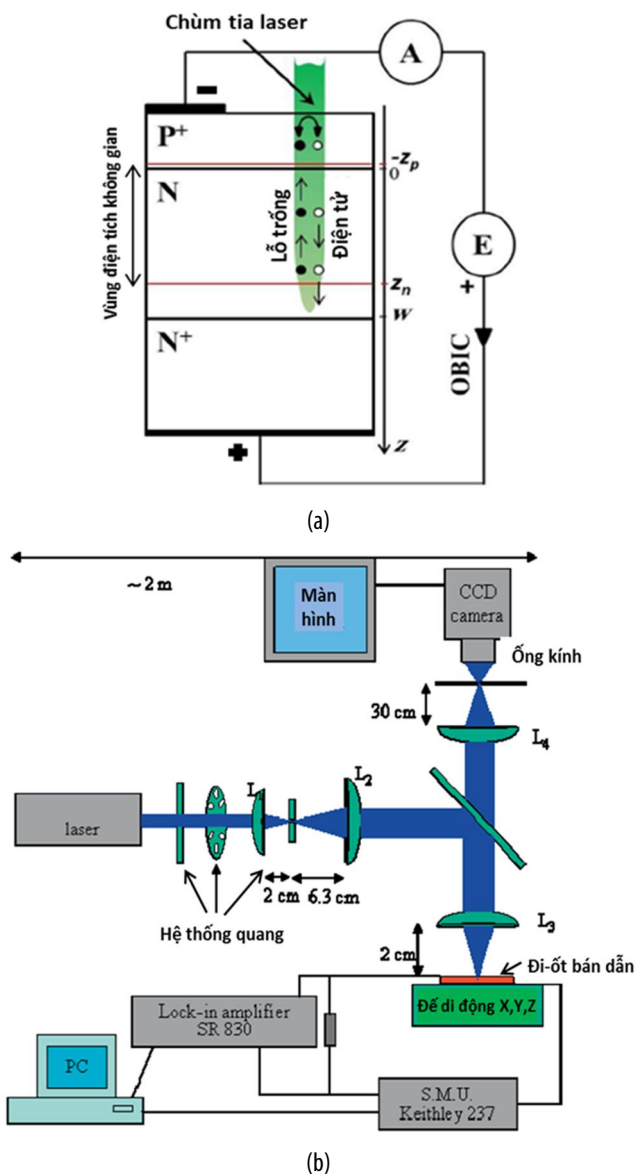
Silicon (Si), vật liệu bán dẫn được sử dụng phổ biến từ hơn 60 năm đã chạm đến giới hạn vật lý của nó trong một số lĩnh vực ứng dụng. Các chất bán dẫn có độ rộng dải cấm lớn (Wide Bandgap Semiconductor-WBG) như Silicon-Carbide (SiC), Gallium-Nitride (GaN) hay kim cương (C) với nhiều đặc tính ưu việt như cường độ điện trường đánh thủng lớn cho phép chế tạo linh kiện công suất điện áp cao; nhiệt độ giới hạn và khả năng dẫn nhiệt tốt cho phép các linh kiện chế tạo trên nền WBG hoạt động tốt trong những môi trường nhiệt độ khắc nghiệt mà ở đó thiết bị chế tạo từ Si không thể hoạt động được hoặc đòi hỏi tản nhiệt công kềnh. Nhờ các đặc tính kể trên mà các linh kiện bán dẫn WBG đã từng bước thay thế các phần tử làm từ Si

trong một số lĩnh vực ứng dụng đòi hỏi độ tin cậy cao hoặc kích thước, khối lượng bộ biến đổi công suất có vai trò quyết định như truyền tải điện một chiều siêu cao áp (HVDC), hàng không - vũ trụ, đầu kéo đường sắt hay quốc phòng. Tuy nhiên, do việc nghiên cứu và phát triển các linh kiện bán dẫn WBG mới tập trung nhiều trong khoảng 20 năm trở lại đây nên các thành tựu đạt được còn kém ngành công nghiệp Si về nhiều mặt như về kích thước và độ tinh khiết của tấm vật liệu nền (wafer), xác suất linh kiện thành phẩm đạt chất lượng hay các linh kiện sản xuất ra còn nằm khá xa các giới hạn vật lý của vật liệu. Do đó nhiều phương pháp được áp dụng để khảo sát, nghiên cứu các linh kiện bán dẫn WBG trong đó có phương pháp dòng quang điện cảm ứng (Optical Beam Induced Current - OBIC). Phương pháp này có thể dùng để khảo sát cường độ điện trường trong các phần tử bán dẫn công suất [1], xác định hệ số ion hóa của vật liệu [2], xác định thời gian sống của các điện tích tự do [3]. Trong các phần dưới đây của bài báo sẽ giới thiệu chi tiết nguyên lý và hệ thống thiết bị dùng trong phương pháp OBIC cũng như ứng dụng phương pháp này để khảo sát cường độ điện trường trong cấu trúc đi-ốt bán dẫn công suất.

2. PHƯƠNG PHÁP DÒNG QUANG ĐIỆN CẢM ỨNG (OBIC)

Phương pháp OBIC dựa trên việc đo dòng điện sinh ra bởi các điện tích bị kích thích do hấp thụ ánh sáng bên trong một cấu trúc bán dẫn bị phân cực ngược.

Bằng việc sử dụng chùm tia laser có bước sóng (năng lượng) thích hợp chiếu vào một cấu trúc bán dẫn thì các cặp điện tử - lỗ trống có thể được sinh ra, chúng được gọi là hiện tượng tạo ra các điện tích kích thích bằng hấp thụ ánh sáng. Khi có điện trường E đủ lớn, các cặp điện tử - lỗ trống ngay lập tức bị tách ra và chuyển động dưới tác động của điện trường di chuyển về các điện cực của cấu trúc và ta có thể đo được dòng điện này. Nếu điện trường trong cấu trúc bé, các điện tích kích thích được sinh ra có thể tự kết hợp lại trên đường di chuyển trước khi về tới các điện cực và do đó không sinh ra dòng điện.



Hình 1. Cấu trúc đi-ốt công suất (a) và mô hình hệ thống OBIC (b)

Để minh họa cho hiện tượng trên chúng ta xét cấu trúc đi-ốt công suất như Hình 1a. Khi đặt điện áp ngược lên đi-ốt, vùng điện tích không gian sẽ được mở rộng ra phần lớn về phía lớp bán dẫn có nồng độ tạp chất nhỏ hơn tức lớp N và xuất hiện điện trường ngoài E trong vùng điện tích không gian hướng từ N đến P. Khi chùm tia laser hướng tới bề mặt cấu trúc bán dẫn theo phương vuông góc với lớp tiếp giáp P+N có thể kích thích sinh ra các cặp điện tử - lỗ trống. Các cặp điện tích sinh ra bên ngoài vùng điện tích không gian sẽ tự kết hợp lại với nhau do đó sẽ không xuất hiện dòng điện ở mạch ngoài. Ngược lại khi các cặp điện tử - lỗ trống sinh ra trong khu vực điện tích không gian, dưới tác động của điện trường chúng sẽ chuyển động về hai phía khác nhau, được tăng tốc và tiến tới biên của vùng điện tích không gian. Sau đó lỗ trống ra vùng bán dẫn P và điện tử ra vùng N sẽ thành các hạt mang điện đa số và bị hút về phía các điện cực. Do đó ta có thể đo được dòng điện ở mạch ngoài gọi là dòng quang điện cảm ứng (OBIC).

Khi điện áp phân cực ngược tăng lên cao, cường độ điện trường trong vùng điện tích không gian sẽ trở nên rất lớn dẫn đến động năng các cặp lỗ trống - điện tử kích thích ban đầu thu được trong quá trình chuyển động rất đáng kể vì thế có thể tạo ra các cặp điện tử - lỗ trống mới khi xảy ra va chạm với lưới tinh thể. Các cặp điện tích mới sinh ra đến lượt nó lại có thể tạo ra các điện tích tự do mới do va chạm và kết quả là dòng điện cảm ứng tăng lên. Do đó có thể thấy dòng điện OBIC phụ thuộc vào cường độ điện trường hay phương pháp OBIC đưa ra hình ảnh thực nghiệm của cường độ điện trường trong cấu trúc bán dẫn.

Mô hình của một hệ thống OBIC được biểu diễn trên Hình 1b. Vì dựa trên hiện tượng hấp thụ photon của chất bán dẫn để tạo ra cặp điện tử - lỗ trống nên năng lượng của các photon (hay bước sóng laser) là một tham số quan trọng. Nếu năng lượng của photon (E_ϕ) khá lớn hơn so với độ rộng dải cấm (E_G) của chất bán dẫn thì sự tạo ra cặp điện tử - lỗ trống là từ một photon. Còn khi E_ϕ nhỏ hơn E_G thì sự tạo ra cặp điện tử - lỗ trống dựa trên việc hấp thụ hai hoặc nhiều photon [4]. Trong mô hình này thì nguồn phát laser nằm trong dải UV với ba bước sóng có thể lựa chọn là 333,6nm; 351,1nm và 363,8nm. Hệ thống quang gồm các thấu kính để hội tụ chùm tia laser lên bề mặt cấu trúc và tạo hình ảnh từ một phần chùm tia phản xạ trên bề mặt cấu trúc để quan sát nhờ hệ thống camera và màn hình. Cấu trúc nghiên cứu được gắn cố định trên một đế có thể di chuyển theo 3 phương (x, y, z) trong đó phương (z) là phương thẳng đứng chính bằng tay còn hai phương ngang, dọc (x, y) điều khiển bằng 2 động cơ piezo để thực hiện quét chùm tia laser theo một phương nhất định hoặc toàn bộ bề mặt cấu trúc. Cấu trúc bán dẫn sẽ được phân cực và dòng điện OBIC đo được nhờ bộ S.M.U Keithley 237 và bộ khuếch đại SR 830. Việc điều khiển các động cơ và ghi lại kết quả đo được thực hiện từ một phần mềm chuyên biệt trên máy tính.

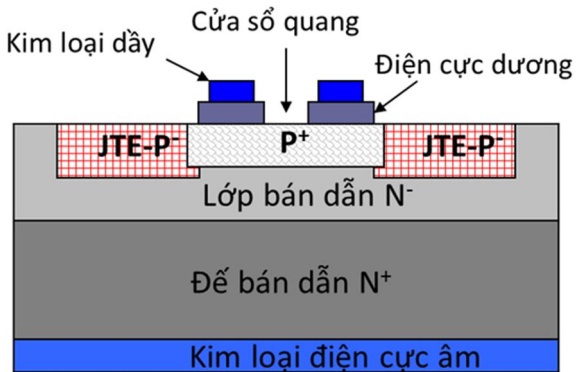
Trong phần tiếp theo của bài báo sẽ giới thiệu ứng dụng hệ thống thiết bị trên vào việc khảo sát cường độ điện trường trong đi-ốt công suất điện áp cao.

3. ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP OBIC KHẢO SÁT CƯỜNG ĐỘ ĐIỆN TRƯỜNG TRONG ĐI-ỐT CÔNG SUẤT ĐIỆN ÁP CAO

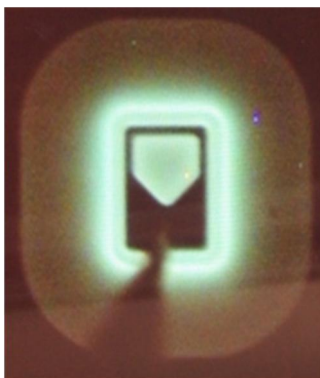
Như đã trình bày, với các đặc tính vật lý vượt trội so với Si, các chất bán dẫn WBG đang là xu hướng nghiên cứu, phát triển đặc biệt trong lĩnh vực chế tạo các linh kiện chịu điện áp cao. Về lý thuyết, do kích thước của các phần tử bán dẫn là hữu hạn nên tại các khu vực ranh giới giữa hai môi trường (hai lớp bán dẫn khác nhau, bán dẫn với môi trường ngoài) các đường đẳng thế tập trung cục bộ làm cường độ điện trường trở nên rất lớn tại những khu vực đó, gây nên hiện tượng đánh thủng cấu trúc cục bộ. Điều này làm suy giảm rất nhiều điện áp cực đại chịu được của những phần tử điện áp cao. Nhiều phương pháp được phát triển và áp dụng để làm giảm sự tăng điện trường cục bộ này của các phần tử bán dẫn công suất [5]. Về thực tế công nghệ chế tạo với các chất bán dẫn WBG, do chưa được tối ưu về quy trình công nghệ như độ tinh khiết vật liệu bán

đầu còn chưa cao, việc kiểm soát tạp chất và nồng độ tạp chất đưa vào trong cấu trúc tinh thể còn nhiều vấn đề nên những điểm này trở thành những khuyết tật trong cấu trúc linh kiện và tại đó cũng có thể xảy ra đánh thủng cục bộ dẫn đến phần tử sản xuất ra không hoạt động được ở mức điện áp thiết kế. Phương pháp OBIC thể hiện rõ điểm ưu việt khi được áp dụng ở đây để khảo sát cường độ điện trường bên trong cấu trúc từ đó có thể đưa ra các kết luận, đánh giá phần tử chế tạo có đạt yêu cầu về điện áp ngược cực đại như thiết kế hay không, các khuyết tật trong cấu trúc hay vấn đề nảy sinh trong quy trình sản xuất.

Các đi-ốt điện áp cao được khảo sát làm từ chất bán dẫn SiC có cấu trúc minh họa như Hình 2a. Để tăng khả năng chịu điện áp ngược, hạn chế hiện tượng đánh thủng cục bộ tại lớp tiếp giáp chính P⁺N đi-ốt được bảo vệ bằng kỹ thuật JTE (Junction Termination Extension) tức sử dụng một vùng tạp chất cùng loại P với lớp bán dẫn chính nhưng có nồng độ thấp hơn P⁺. Một điểm đặt biệt đối với cấu trúc khảo sát bằng phương pháp OBIC là do chùm tia laser không thể xuyên qua lớp kim loại sử dụng làm điện cực nên cần phải thiết kế một cửa sổ quang để chùm tia có thể đi vào trong lớp bán dẫn. Cửa sổ quang này được tạo ra trong quy trình chế tạo bằng kỹ thuật in ảnh litho (lithography) hoặc có thể tạo cửa sổ quang bằng kỹ thuật bắn phá lớp kim loại điện cực sử dụng chùm tia i-on [6].



(a)

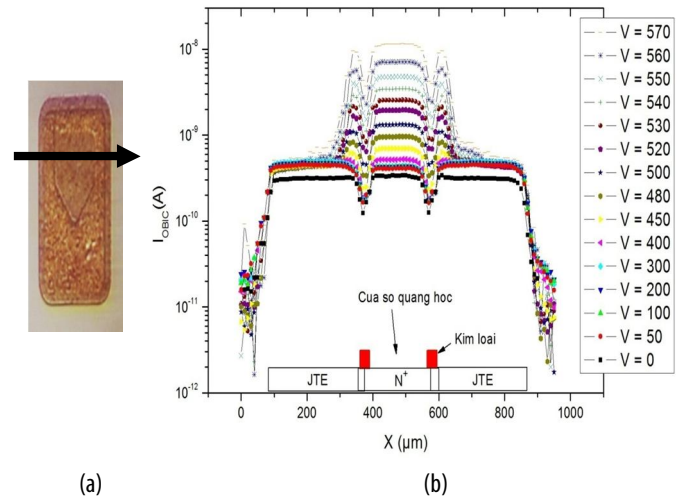


(b)

Hình 2. Minh họa cấu trúc đi-ốt khảo sát (a) và ảnh chụp đi-ốt khi dẫn dòng (b)

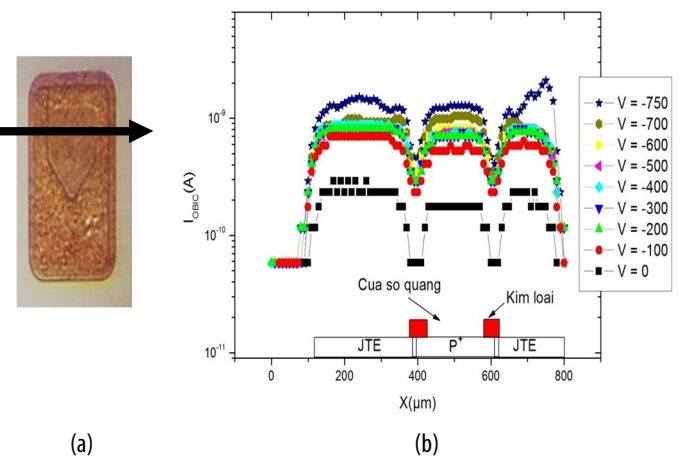
Hình ảnh của đi-ốt chụp từ trên xuống trong chế độ dẫn dòng theo chiều thuận ở Hình 2b cho ta thấy rõ từng khu

vực lớp bán dẫn chính, khu vực JTE bao xung quanh, điện cực kim loại cũng như của sổ quang học.



Hình 3. Đường đi của chùm tia laser (a) và dòng điện OBIC tại các giá trị điện áp ngược khác nhau đo trên đi-ốt 1 (b)

Hình 3a minh họa đường quét của chùm tia laser trên bề mặt đi-ốt và Hình 3b biểu diễn kết quả dòng quang điện OBIC đo được ứng với các giá trị điện áp phân cực ngược tăng dần tại các điểm khác nhau trên đi-ốt. Ta có thể nhận thấy giá trị của dòng điện OBIC tăng theo điện áp ngược đặt vào đi-ốt. Tại khu vực dưới lớp tiếp giáp chính, dòng điện có giá trị 3.10^{-10} (A) ở 0V tăng lên đến 10^{-8} (A) ở 570V tức tăng hơn 30 lần. Ta cũng thấy rằng giá trị dòng OBIC rất cao ở khu vực dưới tiếp giáp chính và đồng thời có hai đỉnh nhọn ở khu vực giữa lớp tiếp giáp chính và JTE trong khi về hai phía của JTE thì dòng điện OBIC rất nhỏ. Như trên đã phân tích thì dòng OBIC chính là hình ảnh của điện trường trong cấu trúc, như vậy tại khu vực hai đỉnh nhọn chính là có điện trường tăng cao cục bộ và có thể dẫn đến đánh thủng cấu trúc khi tiếp tục tăng điện áp ngược. Về mặt quy trình công nghệ thì kết quả này cho thấy nồng độ tạp chất được kích hoạt trong khu vực JTE quá thấp chưa được như thiết kế đó là cường độ điện trường khu vực tiếp giáp chính và JTE phải gần như nhau.



Hình 4. Đường đi của chùm tia laser (a) và dòng điện OBIC tại các giá trị điện áp ngược khác nhau đo trên đi-ốt 2 (b)

Kết quả đo OBIC trên đi-ốt khác được biểu diễn ở Hình 4. Từ kết quả này ta có thể thấy cường độ điện trường khá đều trong toàn cấu trúc, cả khu vực tiếp giáp chính và JTE. Nói một cách khác là nồng độ tạp chất khu vực JTE thiết kế là đạt đến tối ưu. Tuy nhiên ta cũng quan sát thấy một đỉnh nhọn ở khu vực biên ngoài của JTE. Điện trường tăng cao cục bộ tại khu vực này có thể do khuyết tật trong cấu trúc tinh thể hoặc có thể do nồng độ tạp chất khu vực này bị cao hơn mức tối ưu. Thực nghiệm cho thấy đây là lỗi xác suất phụ thuộc vị trí của đi-ốt trên tấm nền chế tạo (wafer) do ngành công nghệ bán dẫn SiC còn chưa được chín muồi.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp dòng quang điện cảm ứng (OBIC) là một phương pháp thực nghiệm ưu việt được ứng dụng nhiều trong phân tích và nghiên cứu các phần tử bán dẫn công suất. Phương pháp này đặc biệt hữu dụng trong kiểm tra, khảo sát các linh kiện bán dẫn công suất điện áp cao vì có khả năng đưa ra hình ảnh thực nghiệm của cường độ điện trường bên trong cấu trúc. Bài báo đã trình bày nguyên lý của phương pháp và giới thiệu kết quả ứng dụng phương pháp OBIC trong nghiên cứu đi-ốt điện áp cao sản xuất từ vật liệu silicon-carbide (SiC), một loại vật liệu bán dẫn có nhiều đặc tính ưu việt hơn chất bán dẫn truyền thống silicon (Si) và đang dần thay thế silicon trong một số lĩnh vực, đặc biệt trong điện tử công suất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Soelkner, J. Kreutle, J. Quincke, W. Kaindl and G. Wachutka, (2000). *Back side optical beam induced current method for the localization of electric field enhancements in edge termination structures of power semiconductor devices*. Microelectronics Reliability, Vol. 40, Iss. 8-10, P. 1641-1645.
- [2]. W.S. Loh, B.K. Ng, J.S. Ng et al., (2008). *Impact Ionization Coefficients in 4H-SiC*. IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.55, Iss.8, P. 984-1990.
- [3]. T. Flohr and R. Helbig, (1989). *Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by optical-beam-induced-current measurements at different light wavelengths*. J. Appl. Phys. 66, 3060.
- [4]. C.Xu and W.Denk, (1999). *Comparison of one- and two-photon optical beam-induced current imaging*. J. Appl. Phys. 86, 2226.
- [5]. D-M. Nguyen, R. Huang, L-V. Phung, D. Planson et al., (2013). *Edge termination design improvements for 10 kV 4H-SiC bipolar diodes*. Materials Science Forum, Vols. 740-742, P. 609-612.
- [6]. M. Lazar, F. Jomard, D-M. Nguyen, C. Raynaud et al., (2012). *SIMS analyses applied to open an optical window in 4H-SiC devices for electro-optical measurements*. Materials Science Forum, Vols. 717-720, P. 885-888.