

CHẾ TẠO MÀNG MỎNG BARI ĐISILIC TRÊN ĐỂ GECMANI BẰNG PHƯƠNG PHÁP BỐC BAY NHIỆT VÀ KHẢO SÁT MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA NÓ

Nhận bài:

19 – 10 – 2019

Chấp nhận đăng:

05 – 11 – 2019

<http://jshe.ued.udn.vn/>

Mai Thị Kiều Liên

Tóm tắt: Màng mỏng BaSi₂ được chế tạo bằng phương pháp bốc bay nhiệt trên đế Ge phẳng và điều chỉnh với thời gian điều chỉnh để t_e khác nhau. Tiếp nối nghiên cứu trước, tính chất kết tinh và thời gian sống của hạt tải không cơ bản τ trong màng BaSi₂ lần lượt được khảo sát. Kết quả cho thấy chất lượng kết tinh của màng BaSi₂ dần suy giảm về phía bề mặt màng. τ của màng BaSi₂ trên đế điều chỉnh cao hơn so với trên đế phẳng, đạt giá trị 3.17 μ s với $t_e = 15$ phút. Đây là giá trị cao nhất đạt được khi đo màng mỏng BaSi₂ lắng đọng trên các đế khác nhau (độ dày < 300 nm). Các kết quả trong nghiên cứu này góp phần củng cố thêm kết luận về thời gian điều chỉnh để tối ưu ở nghiên cứu trước. Phổ phát quang của BaSi₂ cho thấy màng BaSi₂ lắng đọng trên đế điều chỉnh với $t_e = 15$ phút có chất lượng kết tinh tốt hơn trên đế phẳng. Từ đó, giá trị vùng cấm của màng BaSi₂ được thiết lập, đạt 1.17-1.2 eV.

Từ khóa: Bari Đisilic; bán dẫn hợp chất với silic; bốc bay nhiệt; sự điều chỉnh đế; phổ phát quang; thời gian sống của hạt tải.

1. Giới thiệu

Trong các nghiên cứu gần đây về vật liệu hấp thụ ứng dụng chế tạo pin năng lượng mặt trời dạng màng mỏng, bán dẫn hợp chất bari đisilic (BaSi₂) nhận được sự quan tâm đáng kể nhằm thay thế cho vật liệu truyền thống silic (Si). Hai ưu điểm nổi bật của BaSi₂ so với Si là: (i) vùng cấm của BaSi₂ (~1.20-1.30 eV) [1-6] rộng hơn so với vùng cấm của Si (~1.12 eV) và gần với giá trị vùng cấm lý tưởng (~1.40 eV) để chế tạo pin năng lượng mặt trời tiếp xúc đơn; (ii) hệ số hấp thụ của BaSi₂ (~ 3×10^4 cm⁻¹ ở năng lượng kích thích 1.5 eV) [4, 6, 7] cao gấp 30 lần so với hệ số hấp thụ của Si. Điều này có nghĩa là với cùng độ dày màng, BaSi₂ có khả năng hấp thụ ánh sáng mặt trời cao hơn nhiều so với Si. Ngoài ra, BaSi₂ còn có một số ưu điểm nổi bật như: vật liệu được cấu thành từ 2 nguyên tố rẻ và có sẵn trong tự nhiên là Ba và Si; vật liệu có chiều dài khuếch tán và thời gian sống của hạt tải không cơ bản dài [8, 9].

Với những ưu điểm trên, một số nhóm nghiên cứu

đã tiến hành chế tạo và khảo sát tính chất vật liệu của BaSi₂ bằng các phương pháp khác nhau như epitaxy chùm phân tử [4, 6, 8, 10-16], phún xạ [17-20] và bốc bay nhiệt [7, 21-25]. Vật liệu này cũng được chế tạo và khảo sát trên các loại đế khác nhau như Si [21, 22, 24], thủy tinh [7], CaF₂ [23], và Ge [25]. Ở nghiên cứu trước, tôi đã chế tạo và khảo sát tính chất vật liệu của BaSi₂ trên đế Ge bằng phương pháp bốc bay nhiệt [26]. Trong đó, đế Ge đã được điều chỉnh bề mặt trở nên gồ ghề trước khi lắng đọng màng mỏng BaSi₂. Các kết quả thực nghiệm cho thấy sự điều chỉnh để có tác dụng làm giảm sự phản xạ và làm tăng sự hấp thụ ánh sáng ở vật liệu BaSi₂. Đây cũng là chìa khóa làm tăng hiệu suất của các pin mặt trời. Thời gian điều chỉnh để tối ưu được chọn là 15 phút, sau khi xem xét sự cân bằng giữa chất lượng kết tinh và các tính chất quang.

Trong nghiên cứu này, các kết quả thực nghiệm mới về tính chất kết tinh và thời gian sống của hạt tải không cơ bản của vật liệu BaSi₂ trên đế Ge điều chỉnh bề mặt được đưa ra và thảo luận. Qua đó, nhằm củng cố kết luận về thời gian điều chỉnh để tối ưu (15 phút) ở nghiên cứu trước. Phổ phát quang của BaSi₂ trên nền Ge cũng được đo đạc và thảo luận. Từ đó, vùng cấm thực nghiệm của BaSi₂ được suy ra. Để dễ dàng so sánh và

* Tác giả liên hệ

Mai Thị Kiều Liên

Trường Đại học Sư phạm – Đại học Đà Nẵng

Email: mtklien@ued.udn.vn

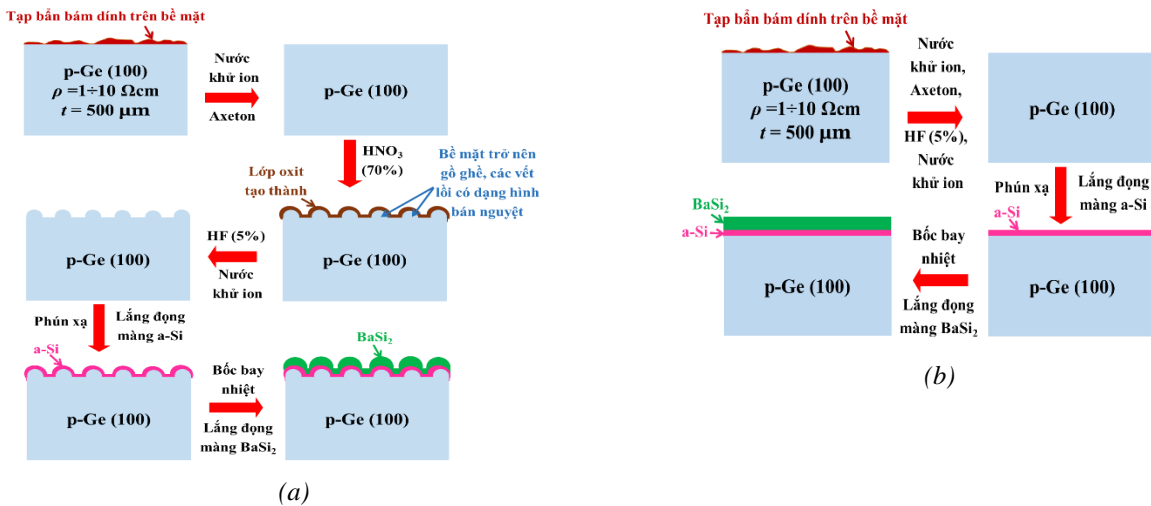
thấy được những ưu điểm của sự điều chỉnh bề mặt để trong việc cải thiện chất lượng kết tinh cũng như các tính chất vật liệu của BaSi₂, màng mỏng BaSi₂ cũng được lắng đọng trên đế Ge phẳng ở cùng điều kiện với đế Ge được điều chỉnh bề mặt.

2. Quy trình thực nghiệm

Đế Ge (100) pha tạp loại P với điện trở suất $\rho = 1 - 10 \Omega \cdot \text{m}$ sau khi cắt thành nhiều mảnh nhỏ với kích thước $1.7 \times 1.7 \text{ cm}^2$ được rửa sạch bằng axeton và nước khử ion. Tiếp đến, các đế Ge được nhúng vào dung dịch HNO₃ pha loãng 70% để tạo nên bề mặt gồ ghề có dạng hình bán nguyệt. Thời gian nhúng (t_c) thay đổi từ 5 đến 20 phút. Sau đó, các đế Ge được cho vào dung dịch axit HF pha loãng 5% trong 3 phút để loại bỏ lớp oxit mới tạo thành do nhúng trong dung dịch HNO₃. Sau khi được rửa sạch với nước khử ion, các đế Ge được đưa ngay vào buồng mẫu của hệ phún xạ để lắng đọng màng Si vô định hình (a-Si) với bề dày 50 nm ở nhiệt độ để 300 °C. Mục đích của việc lắng đọng màng a-Si đã được trình bày ở nghiên cứu trước [26]. Tiếp theo, các đế Ge đã phủ lớp a-Si được chuyển ngay vào buồng mẫu của hệ bốc bay nhiệt. Một lớp BaSi₂ với độ dày 200 nm được lắng đọng ở nhiệt độ để 500 °C và áp suất nền $1.0 \times 10^{-5} \text{ mbar}$. Để dễ dàng so sánh, các màng a-Si và

BaSi₂ cũng được lắng đọng trên đế Ge phẳng trong cùng điều kiện. Hình 1(a) và 1(b) lần lượt thể hiện hình ảnh cắt ngang minh họa các bước thực nghiệm trên đế Ge điều chỉnh và đế Ge phẳng.

Tính chất kết tinh của màng BaSi₂ được đo bằng máy nhiễu xạ tia X (Bruker Discover D8) sử dụng bức xạ Cu K α . Trong phép đo này, tôi sử dụng chế độ đo θ - 2θ và kỹ thuật góc tới nhỏ. Động học phân rã của các hạt tải không cơ bản được khảo sát bằng phương pháp phân rã quang dẫn dùng vi sóng (μ -PCD, KOBELCO LTA1512EP). Các hạt tải được tạo ra bằng xung lade 5 ns với bước sóng 349 nm và kích thước điểm có đường kính 2 mm. Hơn 95% chùm sáng tới được hấp thụ trong khoảng độ dày 50 nm của màng BaSi₂ kể từ bề mặt vì hệ số hấp thụ của BaSi₂ tại bước sóng 349 nm là $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [6]. Để khảo sát ảnh hưởng của mức tiêm hạt tải vào thời gian sống của hạt tải, màng được đo ở 2 điều kiện mật độ photon khác nhau, $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and $1.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Sự phân rã quang dẫn được đo bằng việc sử dụng sự phân xạ của vi sóng ở tần số 26 GHz. Phổ phát quang của màng BaSi₂ được đo với nguồn lade Nd-YAG (532 nm) có công suất 20 mW và ở nhiệt độ phòng (300 K). Từ đó, độ rộng vùng cấm thực nghiệm của màng BaSi₂ được suy ra.



Hình 1. Hình ảnh cắt ngang minh họa các bước thực nghiệm trên đế Ge (a) điều chỉnh (b) phẳng

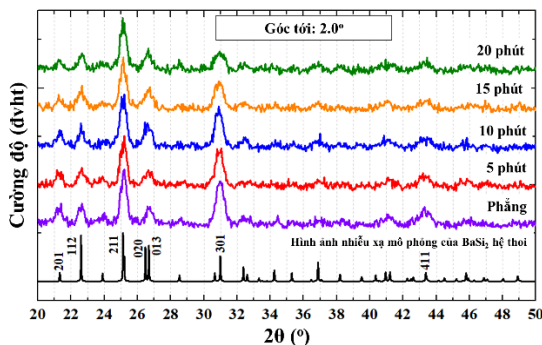
3. Kết quả và thảo luận

Hình 2(a) và 2(b) lần lượt là hình ảnh nhiễu xạ tia X của màng BaSi₂ trên đế Ge phẳng và đế Ge điều chỉnh với thời gian điều chỉnh khác nhau (5, 10, 15, và

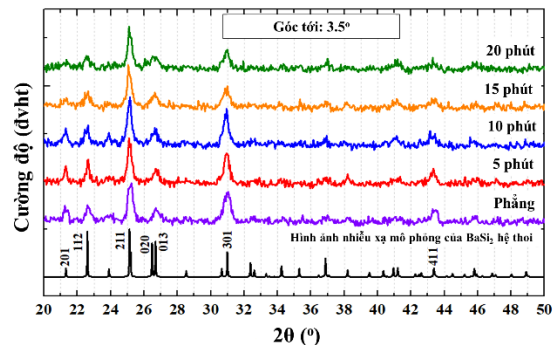
20 phút) ở 2 góc tới 2.0° và 3.5°. Hình ảnh nhiễu xạ mô phỏng của màng BaSi₂ cấu trúc hệ thoi và định hướng ngẫu nhiên cũng được hiển thị để so sánh. Hình ảnh mô phỏng này được lấy từ phần mềm VESTA, trong đó cơ sở dữ liệu tinh thể được hiển thị. Bằng cách thay đổi góc

tới, chất lượng kết tinh ở các độ sâu khác nhau tính từ bề mặt của màng BaSi₂ có thể được khảo sát. Góc tới càng lớn, tia X càng có thể xuyên sâu vào màng tính từ bề mặt. Hình ảnh nhiễu xạ cho thấy tất cả các đỉnh quan sát được của màng đều trùng khớp với các đỉnh trong hình ảnh nhiễu xạ mô phỏng của màng BaSi₂ cấu trúc hệ thoi và định hướng ngẫu nhiên. Điều này cho thấy các màng BaSi₂ chế tạo được đều là các màng đơn pha. Trong Hình 2(a), đối với màng trên đế Ge phẳng và trên đế Ge điều chỉnh có $t_e = 5$ và 10 phút, các đỉnh (201), (301), và (411) có cường độ tương đối cao hơn so với các giá trị mô phỏng của chúng. Trong khi đó, đối với màng trên đế Ge điều chỉnh có $t_e = 15$ và 20 phút, các đỉnh này có cường độ tương đối tương tự với các giá trị mô phỏng của chúng. Các kết quả này chứng tỏ rằng màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge điều chỉnh với $t_e = 5$ và 10 phút có định hướng ưu tiên trong khi các màng

với $t_e = 15$ và 20 phút định hướng ngẫu nhiên. Các đỉnh (201), (301), và (411) được phân loại thành họ $hm1$ ($h > m$). Điều này cũng gợi ý rằng tinh thể của màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng và đế Ge điều chỉnh với $t_e = 5$ và 10 phút có thể định hướng quanh các trục tinh thể a và b [23]. Nguồn gốc của định hướng ưu tiên này hiện vẫn chưa rõ ràng và đang được nghiên cứu thêm, nhưng chắc chắn không phải do việc sử dụng đế Ge hay lớp a-Si vì đế Ge có định hướng (100) và lớp a-Si là lớp vô định hình. Hình ảnh nhiễu xạ ở Hình 2(b) có cùng biểu hiện và khuynh hướng như ở Hình 2(a). Điều này cho thấy chất lượng kết tinh của màng BaSi₂ khá đồng đều dọc theo bề dày của màng. Tuy nhiên, quan sát kỹ ta thấy các đỉnh của tất cả các màng BaSi₂ trong Hình 2(a) rộng hơn các đỉnh trong Hình 2(b). Điều này gợi ý rằng chất lượng màng BaSi₂ bị suy giảm về phía bề mặt.



(a)



(b)

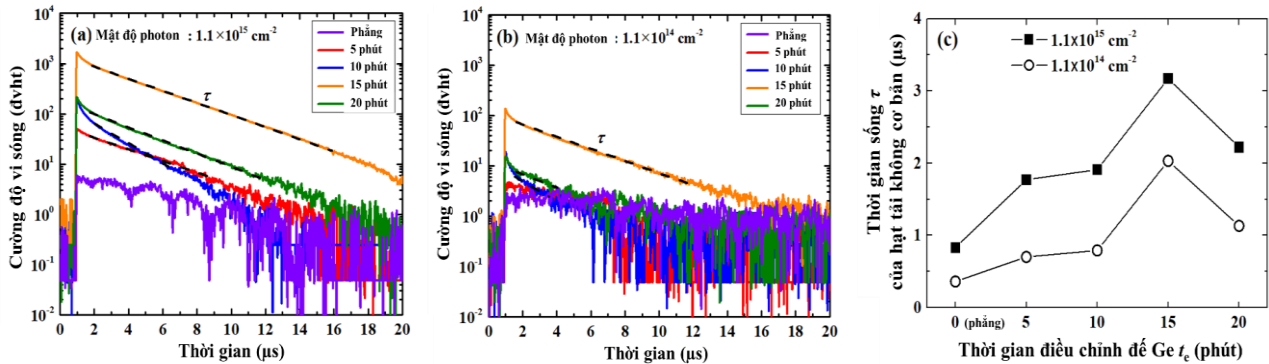
Hình 2. Hình ảnh nhiễu xạ tia X của các màng mỏng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng và điều chỉnh với góc tới (a) 2.0° và (b) 3.5°. Hình ảnh nhiễu xạ mô phỏng của màng BaSi₂ cấu trúc hệ thoi và định hướng ngẫu nhiên cũng được hiển thị để so sánh

Để khảo sát tiềm năng ứng dụng của màng mỏng BaSi₂ trên đế Ge điều chỉnh trong pin mặt trời, thời gian sống τ của hạt tải không cơ bản trong màng BaSi₂ được tiến hành khảo sát. Hình 3 hiển thị các đường phân rã quang dẫn của các màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng và điều chỉnh với các t_e khác nhau ở 2 điều kiện mật độ photon (a) $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ và (b) $1.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Xét về tốc độ phân rã, sự phân rã quang dẫn có thể được chia thành 3 phần: (1) sự phân rã nhanh chóng ban đầu do cơ chế tái hợp Auger, (2) sự phân rã thứ 2 gần như không đổi do cơ chế tái hợp Shockley-Read-Hall (SRH), và (3) sự phân rã thứ 3 xảy ra chậm do tác dụng

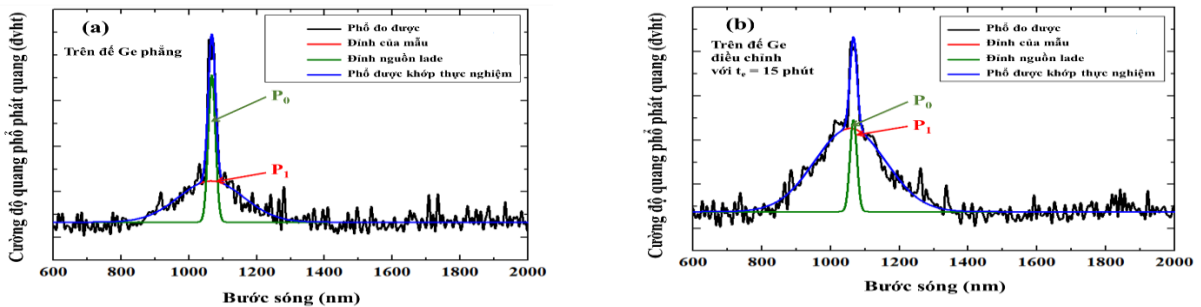
của hiệu ứng giam giữ hạt tải [23, 27]. Vì các màng BaSi₂ không được phủ lớp làm chậm phản ứng, sự phân rã ban đầu có thể được quy cho sự tái hợp tại bề mặt. Vì sự tái hợp SRH không có hiệu ứng giam giữ hạt tải phản ánh chất lượng kết tinh và thường xác định thời gian sống của hạt tải không cơ bản, τ được rút ra từ phần phân rã thứ 2 như hiển thị bằng các đường nét đứt trong Hình 3. Vì phần phân rã thứ 2 rất ngắn đối với màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng trong Hình 3(a) và 3(b) và trên đế Ge điều chỉnh với $t_e = 5$ phút trong Hình 3(b), các đường phân rã quang dẫn rất khó quan sát. Sự phân rã chậm do hiệu ứng giam giữ hạt tải bắt đầu khá

sớm ở những màng này so với các màng BaSi₂ khác có lẽ là do số lượng hạt tải tự do hoặc không bị giam giữ khá ít. Điều này gợi ý rằng số lượng các tâm giam giữ hay khuyết tật mạng trong những màng này lớn hơn so với những màng khác. Sự phụ thuộc của thời gian sống τ của hạt tải không cơ bản vào thời gian điều chỉnh để Ge, t_e , ở 2 điều kiện mật độ photon được hiển thị ở Hình 3(c). Chúng ta có thể thấy rằng τ của màng BaSi₂ trên các đế Ge điều chỉnh dài hơn so với màng BaSi₂ trên đế Ge phẳng ở cả 2 điều kiện mật độ photon, biểu thị chất lượng kết tinh của màng BaSi₂ trên các đế Ge điều chỉnh tốt hơn so với trên đế Ge phẳng. Tập trung vào để điều chỉnh, ta thấy τ tăng theo t_e đến 15 phút rồi giảm khi $t_e = 20$ phút. Xu hướng này là giống nhau cho cả 2

điều kiện mật độ photon và phù hợp với sự phân tích về chất lượng kết tinh đã trình bày ở nghiên cứu trước [26]. Ở điều kiện mật độ photon thấp hơn, τ ngắn hơn cho tất cả các màng, gợi ý rằng những màng này có mật độ khuyết tật cao và cơ chế tái hợp SRH chiếm ưu thế [24, 27]. Vì mật độ khuyết tật là xác định, τ tăng theo mức độ tiêm hạt tải. Ở $t_e = 15$ phút và mật độ photon $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, τ đạt giá trị 3.17 μs . Giá trị này là giá trị cao nhất đạt được khi đo màng mỏng BaSi₂ lắng đọng trên các đế khác nhau (độ dày < 300 nm). Các kết quả này nhằm củng cố cho kết luận ở nghiên cứu trước rằng việc điều chỉnh bề mặt đế Ge có tác dụng tích cực và thời gian $t_e = 15$ phút là điều kiện tối ưu để đạt được màng BaSi₂ có chất lượng kết tinh và các tính chất quang học tốt.



Hình 3. Sự phân rã quang dẫn của các màng mỏng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng và điều chỉnh ở mật độ photon (a) $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ và (b) $1.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ được đo bằng phương pháp μ -PCD. Các đường nét đứt biểu thị các đường khớp thực nghiệm được vẽ ở phần phân rã gần như không đổi. (c) Thời gian sống của hạt tải không cơ bản τ của các màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge phẳng và điều chỉnh với các thời gian điều chỉnh t_e khác nhau



Hình 4. Phổ phát quang ở nhiệt độ 300K của các màng BaSi₂ có độ dày 200 nm trên các đế Ge (a) phẳng và (b) điều chỉnh với $t_e = 15$ phút

Hình 4(a) và 4(b) lần lượt biểu thị phổ phát quang ở nhiệt độ phòng (300 K) của các màng BaSi₂ có độ dày 200 nm trên các đế Ge phẳng và điều chỉnh với $t_e = 15$ phút. Phổ phát quang được phân giải thành 2 đỉnh phổ là P_0 (1064 nm) của nguồn lade kích thích và P_1 của

màng BaSi₂. So sánh hai Hình 4(a) và 4(b) ta có thể thấy cường độ tương đối giữa hai đỉnh (P_1/P_0) ở Hình 4(b) cao hơn so với ở Hình 4(a). Điều này cho thấy màng BaSi₂ lắng đọng trên đế Ge điều chỉnh với $t_e = 15$ phút có chất lượng kết tinh tốt hơn trên đế Ge phẳng

[28, 29]. Kết quả này phù hợp với các kết quả đo SEM, Raman, và hồi đáp quang học ở nghiên cứu trước [26] cũng như kết quả đo sự phân rã quang dẫn như đã trình bày ở Hình 3. Từ đỉnh phổ P_1 , vùng cấm thực nghiệm của màng BaSi_2 trên đế Ge phẳng và đế Ge điều chỉnh với $t_e = 15$ phút được xác định lần lượt là 1.17 eV và 1.2 eV. Các giá trị này thấp hơn so với các giá trị vùng cấm đo được bằng các phương pháp khác [18, 24, 30-32]. Điều này có thể giải thích do: (i) các mẫu được đo phổ phát quang ở nhiệt độ phòng, sự ảnh hưởng của nhiệt độ lên dao động mạng là đáng kể; hoặc/và (ii) sự khác nhau về hệ số giãn nở giữa màng BaSi_2 và đế Ge dẫn đến sự hình thành các biến dạng trong màng BaSi_2 .

4. Kết luận

Màng mỏng BaSi_2 được chế tạo bằng phương pháp bốc bay nhiệt trên đế Ge phẳng và đế Ge điều chỉnh với thời gian điều chỉnh để t_e khác nhau (5-20 phút). Tiếp nối với nghiên cứu trước, các tính chất kết tinh và thời gian sống của hạt tải không cơ bản trong vật liệu BaSi_2 lần lượt được khảo sát bằng các phương pháp XRD và μ -PCD. Kết quả thực nghiệm cho thấy chất lượng kết tinh của màng BaSi_2 dần suy giảm từ khối ra bề mặt màng. Thời gian sống τ của hạt tải không cơ bản trong màng BaSi_2 trên đế Ge điều chỉnh cao hơn so với trên đế Ge phẳng, và đạt giá trị 3.17 μs với $t_e = 15$ phút. Đây là giá trị cao nhất đạt được khi đo màng mỏng BaSi_2 lắng đọng trên các đế khác nhau (độ dày < 300 nm). Các kết quả thu được trong nghiên cứu này góp phần củng cố thêm kết luận về thời gian điều chỉnh để tối ưu (15 phút) ở nghiên cứu trước. Phổ phát quang của BaSi_2 trên nền Ge cũng được đo đạc và cho thấy màng BaSi_2 lắng đọng trên đế Ge điều chỉnh với $t_e = 15$ phút có chất lượng kết tinh tốt hơn trên đế Ge phẳng. Từ đó, vùng cấm thực nghiệm của màng BaSi_2 được suy ra, đạt giá trị 1.17-1.2 eV.

Tài liệu tham khảo

[1] J. Evers and A. Weiss (1974). Electrical properties of alkaline earth disilicides and digermanides. *Mater. Res. Bull.*, 9, 549-553.
 [2] T. Nakamura, T. Suemasu, K. Takakura, F. Hasegawa, A. Wakahara and M. Imai (2002). Investigation of the energy band structure of orthorhombic BaSi_2 by optical and electrical measurements and theoretical calculations. *Appl.*

Phys. Lett., 81, 1032-1034.

- [3] L. I. Ivanenko, V. L. Shaposhnikov, A. B. Filonov, A. V. Krivosheeva, V. E. Borisenko, D. B. Migas, L. Miglio, G. Behr, and J. Schumann (2004). Electronic properties of semiconducting silicides: Fundamentals and recent predictions. *Thin Solid Films*, 461, 141-147.
 [4] K. Morita, Y. Inomata, and T. Suemasu (2006). Optical and electrical properties of semiconducting BaSi_2 thin films on Si substrates grown by molecular beam epitaxy. *Thin Solid Films*, 508, 363-366.
 [5] S. Kishino, T. Imai, T. Iida, Y. Nakaishi, M. Shinada, Y. Takanashi, and N. Hamada (2007). Electronic and optical properties of bulk crystals of semiconducting orthorhombic BaSi_2 prepared by the vertical Bridgman method. *J. Alloys Compd.*, 428, 22-27.
 [6] K. Toh, T. Saito, and T. Suemasu (2011). Optical absorption properties of BaSi_2 epitaxial films grown on a transparent silicon-on-insulator substrate using molecular beam epitaxy. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 68001.
 [7] K. O. Hara, Y. Nakagawa, T. Suemasu, and N. Usami (2015). Realization of single-phase BaSi_2 films by vacuum evaporation with suitable optical properties and carrier lifetime for solar cell applications. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 07JE02.
 [8] M. Baba, K. Toh, K. Toko, N. Saito, N. Yoshizawa, K. Jiptner, T. Sekiguchi, K. O. Hara, N. Usami, and T. Suemasu (2012). Investigation of grain boundaries in BaSi_2 epitaxial films on Si (111) substrates using transmission electron microscopy and electron-beam-induced current technique. *J. Cryst. Growth*, 348, 75-79.
 [9] K.O. Hara, N. Usami, K. Nakamura, R. Takabe, M. Baba, K. Toko, and T. Suemasu (2013). Determination of bulk minority-carrier lifetime in BaSi_2 earth-abundant absorber films by utilizing a drastic enhancement of carrier lifetime by post-growth annealing. *Appl. Phys. Express*, 6.
 [10] R.A. McKee, F.J. Walker, J.R. Conner, and R. Raj (1993). BaSi_2 and thin film alkaline earth silicides on silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 63, 2818-2820.
 [11] H.H. Weiering (1996). New barium-induced surface reconstructions on Si (111). *Surf. Sci.*, 355, L271-L277.
 [12] Y. Inomata, T. Nakamura, T. Suemasu, and F. Hasegawa (2004). Epitaxial growth of semiconducting BaSi_2 thin films on Si (111) substrates by reactive deposition epitaxy. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 4155-4156.
 [13] K. Toh, K.O. Hara, N. Usami, N. Saito, N. Yoshizawa, K. Toko, and T. Suemasu (2012).

- Molecular beam epitaxy of BaSi₂ thin films on Si (001) substrates. *J. Cryst. Growth*, 345, 16–21.
- [14] M. Baba, K. Nakamura, W. Du, M.A. Khan, S. Koike, K. Toko, N. Usami, N. Saito, N. Yoshizawa, and T. Suemasu (2012). Molecular beam epitaxy of BaSi₂ films with grain size over 4 μm on Si (111). *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51, 098003.
- [15] R. Takabe, K. Nakamura, M. Baba, W. Du, M.A. Khan, K. Toko, M. Sasase, K.O. Hara, N. Usami, and T. Suemasu (2014). Fabrication and characterization of BaSi₂ epitaxial films over 1 μm in thickness on Si (111). *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 04ER04.
- [16] R. Takabe, S. Yachi, D. Tsukahara, K. Toko, and T. Suemasu (2017). Growth of BaSi₂ continuous films on Ge (111) by molecular beam epitaxy and fabrication of p-BaSi₂ /n-Ge heterojunction solar cells. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 05DB02.
- [17] Z. Yang, Z. Hao, and Q. Xie (2011). Effects of annealing temperature on the structure and surface feature of BaSi₂ films grown on Si (111) substrates. *Phys. Procedia* 11, 118-121.
- [18] T. Yoneyama, A. Okada, M. Suzuno, T. Shibutami, K. Matsumaru, N. Saito, N. Yoshizawa, K. Toko, and T. Suemasu (2013). Formation of polycrystalline BaSi₂ films by radio-frequency magnetron sputtering for thin-film solar cell applications. *Thin Solid Films*, 534, 116-119.
- [19] N.A.A. Latiff, T. Yoneyama, T. Shibutami, K. Matsumaru, K. Toko, and T. Suemasu (2013). Fabrication and characterization of polycrystalline BaSi₂ by RF sputtering. *Phys. Status Solidi C*, 10, 1759-1761.
- [20] R. Alvarez, J.M. Garcia-Martin, M.C. Lopez-Santos, V. Rico, F.J. Ferrer, J. Cotrino, A.R. Gonzalez-Elipé, and A. Palmero (2014). On the deposition rates of magnetron sputtered thin films at oblique angles. *Plasma Process. Polym.*, 11, 571-576.
- [21] Y. Nakagawa, K.O. Hara, T. Suemasu, and N. Usami (2015). Fabrication of single-phase BaSi₂ thin films on silicon substrates by vacuum evaporation for solar cell applications. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 08KC03.
- [22] Y. Nakagawa, K.O. Hara, T. Suemasu, and N. Usami (2016). On the mechanism of BaSi₂ thin film formation on Si substrate by vacuum evaporation. *Procedia Eng.*, 141, 23-26.
- [23] K.O. Hara, J. Yamanaka, K. Arimoto, K. Nakagawa, T. Suemasu, and N. Usami (2015). Structural and electrical characterizations of crack-free BaSi₂ thin films fabricated by thermal evaporation. *Thin Solid Films*, 595, 68-72.
- [24] C.T. Trinh, Y. Nakagawa, K.O. Hara, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami (2016). Photoresponse properties of BaSi₂ film grown on Si (100) by vacuum evaporation. *Mater. Res. Express*, 3, 76204.
- [25] C.T. Trinh, Y. Nakagawa, K.O. Hara, Y. Kurokawa, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami (2017). Growth of BaSi₂ film on Ge (100) by vacuum evaporation and its photoresponse properties. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 05DB06.
- [26] M. T. K. Lien (2019). Effect of substrate modification on properties of thermally evaporated barium disilicide thin-films. *Journal of Science, The University of Danang-University of Science and Education* (accepted).
- [27] K.O. Hara, N. Usami, K. Toh, M. Baba, K. Toko, and T. Suemasu (2012). Investigation of the recombination mechanism of excess carriers in undoped BaSi₂ films on silicon. *J. Appl. Phys.*, 112, 083108.
- [28] Y.F. Liao, Q. Xie, Q.Q. Xiao, Q. Chen, M.H. Fan, J. Xie, J. Huang, J.M. Zhang, R. Ma, S.L. Wang, H.X. Wu, and D. Fang (2017). Photoluminescence of Mg₂Si films fabricated by magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 403, 302-307.
- [29] Y. Yamamoto, M.R. Barget, G. Capellini, N. Taoka, M. Virgilio, P. Zaumseil, A. Hesse, T. Schroeder, and B. Tillack (2017). Photoluminescence of phosphorous doped Ge on Si (100). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 70, 111–116.
- [30] K. Morita, Y. Inomata, and T. Suemasu (2006). Optical and electrical properties of semiconducting thin films on Si substrates grown by molecular beam epitaxy. *Thin Solid Films*, 508, 363.
- [31] T. Suemasu, T. Saito, K. Toh, A. Okada, and M.A. Khan (2011). Photoresponse properties of BaSi₂ epitaxial films grown on the tunnel junction for high-efficiency thin-film solar cells. *Thin Solid Films*, 519, 8501.
- [32] Y. Matsumoto, D. Tsukada, R. Sasaki, M. Takeishi, and T. Suemasu (2009). Photoresponse properties of semiconducting BaSi₂ epitaxial films grown on Si (111) substrates by molecular beam epitaxy. *App. Phys. Express*, 2, 021101.

FABRICATING BARIUM DISILICIDE THIN-FILMS ON GERMANIUM SUBSTRATE AND INVESTIGATING SOME OF ITS PROPERTIES

Abstract: BaSi₂ thin-films were fabricated by thermal evaporation method on flat and modified Ge substrates with various etching times t_e . Continuing with the previous study, the crystalline properties and minority carrier-lifetimes τ in BaSi₂ thin-films were investigated respectively. The obtained results showed that, the film quality slightly degrades toward the film surface. τ of the BaSi₂ films grown on modified substrates are longer than those on flat substrate and reaches 3.17 μ s at $t_e = 15$ mins. This is the highest value obtained while measuring the thin BaSi₂ films (thickness < 300 nm) evaporating and condensing onto various substrates. The results obtained in this study contribute to strengthening the conclusions about the optimal etching time in the previous study. Photoluminescence spectra of BaSi₂ films on Ge substrates showed that BaSi₂ film deposited on modified substrate with $t_e = 15$ mins has better crystalline quality than that on the flat one. The experimental bandgap of BaSi₂ thin-films was deduced, reaching the value of 1.17-1.2 eV.

Key words: Barium disilicide; Silicide semiconductor; Thermal evaporation; Substrate modification; photoluminescence; carrier lifetime.