MỘT SỐ TÁC ĐỘNG CỦA MÔI TRƯỜNG KHÔNG GIAN VŨ TRỤ TỚI ĐẶC TÍNH ĐIỆN CỦA DỤNG CỤ BÁN DẪN TRÊN CÁC KHÍ CỤ BAY

Trần Tuấn Trung[1*], Đào Đình Hà[2]

Tóm tắt: *Bài báo trình bày một số tác động của bức xạ ion không gian đối với tham số điện của bán dẫn CMOS. Các tác động này được tính toán mô phỏng bằng phương pháp tính toán số. Kết quả tính toán cho phép ước lượng thời gian làm việc an toàn của thiết bị điện tử- bán dẫn trong môi trường không gian.*

Từ khóa: Bán dẫn; MOSFET; Bức xạ ion hóa, điện môi SiO_2.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ và tiến bộ trong chinh phục vũ trụ, thiết bị bán dẫn đã trở thành thành phần không thể thiếu được của các thiết bị điện tử trên phương tiện bay như: máy tính, thiết bị thông tin, thiết bị điều khiển, hệ thống cảm biến trên khoang,... Khác với môi trường trên bề mặt trái đất, các thiết bị bán dẫn này phải làm việc trong không gian vũ trụ có các hạt ion hóa năng lượng cao và điều kiện nhiệt độ khắc nghiệt [1]. Nguồn xuất phát của các hạt này là các hạt trong gió mặt trời, tia vũ trụ và các hạt mang điện trong vành đai của trái đất. Các hạt này bắn phá vào phương tiện bay trong không gian cũng như các vi mạch, dụng cụ bán dẫn trên các phương tiện đó gây ra các hiện tượng tức thời và tích lũy. Hiện tượng tích lũy là sự thay đổi chậm tham số điện của dụng cụ bán dẫn dưới tác dụng của tia bức xạ ion. Hiện tượng tức thời là những đột biến lớn về tham số điện trong thời gian rất ngắn của dụng cụ bán dẫn dưới tác dụng của tia bức xạ.

Hiện tượng tích luỹ do tác động liên tục của bức xạ ion hoá tạo ra các hạt mang điện trong vật liệu bán dẫn và điện môi. Các hạt này tích luỹ theo thời gian tạo ra điện trường cục bộ trong dụng cụ bán dẫn có độ lớn tăng dần. Kết quả của quá trình này là chế độ làm việc của dụng cụ bán dẫn bị thay đổi dần dần đến thay đổi về đặc tính điện của dụng cụ. Hiện tượng tức thời thời diễn ra do bức xạ ion có bản chất là những hạt năng lượng cao bắn phá vào cấu trúc của dụng cụ bán dẫn và tạo ra số lượng lớn hạt điện tích trong thời gian ngắn vài ns đến vài μs. Dưới tác dụng của điện trường, các hạt điện tích di chuyển tạo ra xung điện có giá trị đáng kể trong dụng cụ bán dẫn. Hiện tượng này có thể làm dụng cụ bán dẫn bị đóng, mở tức thời tạo ra tín hiệu sai và có thể dẫn đến phá huỷ dụng cụ bán dẫn nếu các tín hiệu sai làm dụng cụ bán dẫn hoạt động sai thiết kế [2].

Do đó, việc tính toán, thiết kế, sử dụng các thiết bị bán dẫn làm việc trong không gian vũ trụ cần có sự quan tâm đặc biệt để đảm bảo các thiết bị điện tử hoạt động tin cậy và ổn định.

Bảng 1. *Phân cấp linh kiện bán dẫn theo mức chịu đựng tác động bức xạ ion.*

TT	Cấp chịu đựng	Giá trị	
		Liều ion hoá	**Ngưỡng sự kiện đảo**
1	Thương mại	2-10 krad	5 Mev/mg/cm^2
2	Có khả năng chịu bức xạ	20-50 krad	20 Mev/mg/cm^2
6	Có khả năng chịu bức xạ cao	>200 krad-1 Mrad	80-150 Mev/mg/cm^2

Theo yêu cầu của nhiệm vụ thiết kế, quỹ đạo của khí cụ bay sẽ được xác định. Trên cơ sở dữ liệu quỹ đạo và thời gian hoạt động của khí cụ bay, bức xạ ion mà khí cụ phải

chịu đựng sẽ được tính toán. Trên cơ sở đó, yêu cầu thiết kế các linh kiện bán dẫn với mức chịu đựng bức xạ ion được phân theo các cấp như tại bảng 1 [3].

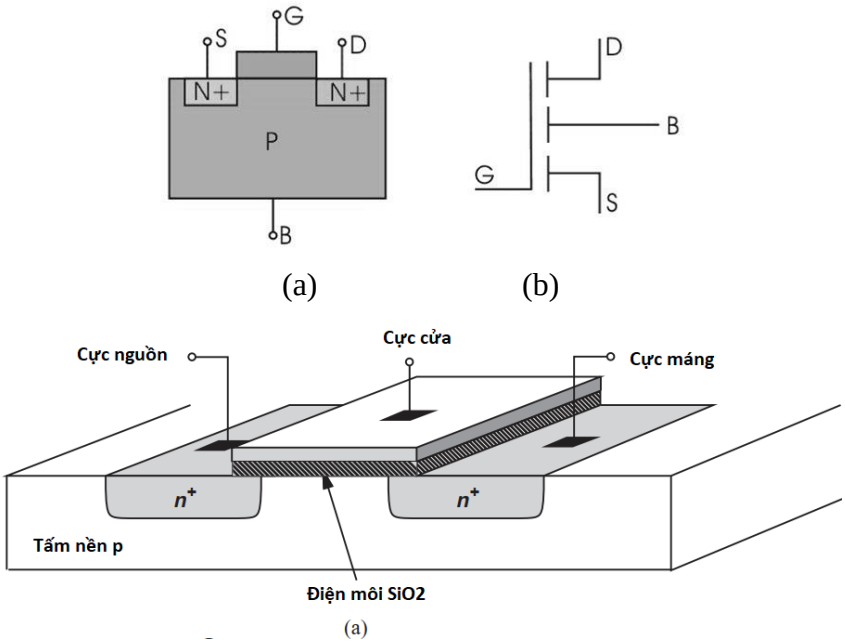
Ví dụ với mức bức xạ vệ tinh CubeSat 3U phải chịu trong quỹ đạo từ Trái đất tới Mặt trăng được tính toán là 18,2 krad/80 ngày [4], nếu thời gian hoạt động của vệ tinh là 2 năm tính được liều bức xạ ion hoá vệ tinh chịu đựng là 166 krad. Với thân vỏ không bảo vệ, cấp độ của linh kiện bán dẫn cần sử dụng khi chế tạo vệ tinh là phải đạt mức chịu bức xạ cao. Điều này có thể giảm bớt với vệ tinh có cấu trúc thân vỏ bảo vệ bức xạ.

Nội dung của bài viết xem xét đến tác động của bức xạ ion hóa lên điện môi SiO_2 tại cực cửa của dụng cụ bán dẫn trường đang được nghiên cứu và sự thay đổi của các đặc tính điện của dụng cụ đó.

2. TÁC ĐỘNG ION HÓA LÊN ĐIỆN MÔI BÁN DẪN

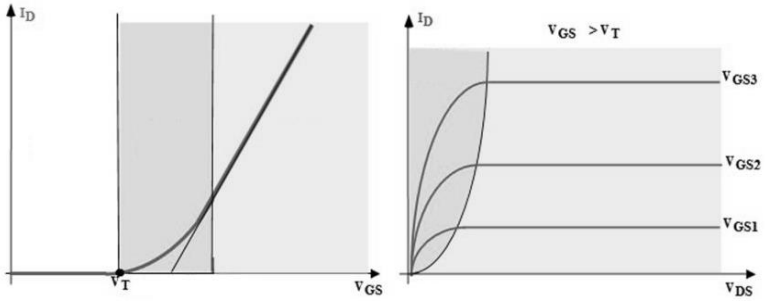
2.1. Cấu trúc và đặc tính của mosfet công nghệ planar

Transitor trường có cực cửa cách ly sử dụng công nghệ planar là dụng cụ bán dẫn được sử dụng sử dụng phổ biến trong tất có cấu trúc 2D được giới thiệu trong hình 1a [5]. Trong công nghệ planar, công nghệ sản xuất vi mạch tích hợp trên nền Silic, cấu trúc của n-mosfet công nghệ planar được hiện thực hóa ở dạng 2D kéo dài theo chiều ngang được gọi là bề rộng của linh kiện như hình 1c [6]. Trong công nghệ planar, vùng cực máng (D) và cực nguồn (S) là hai vùng pha tạp loại n^+ nằm cùng độ sâu trên bề mặt tấm silic do được hình thành cùng một lúc trong quá trình chế tạo. Phía trên của khoảng cách giữa hai cực G-D là lớp điện môi (thường là SiO_2) và vị trí cực cửa (G). Trong không gian hình thành transisto, nền silic được pha tạp loại p. Tấm nền silic được nối với điện cực nền (B).



Hình 1. *(a) Cấu trúc của n-mosfet; (b) Ký hiệu mosfet trong mạch điện với các điện cực: G- Cực cửa, D- Cực máng, S- Cực nguồn, B- Cực nền silic; (c) Cấu trúc của n-mosfet trong công nghệ planar.*

Như đã biết, mosfet làm việc dựa hiệu ứng trường do việc điện thế điều khiển được đặt vào cực cửa. Điện thế điều khiển của transistor là điện thế giữa cực cửa với tấm nền (V_{GS}). Khi tăng điện thế cực cửa tới điện áp ngưỡng (Vt), kênh dẫn của transistor bên dưới cực cửa và nối giữa cực nguồn-cực máng hình thành. Kênh dẫn mở rộng dần theo mức tăng điện thế cực cửa làm dòng điện từ điện cực S tới điện cực D (Id) tăng lên làm cho đặc tuyến von-ampe của mosfet có dạng như mô tả tại hình 2.



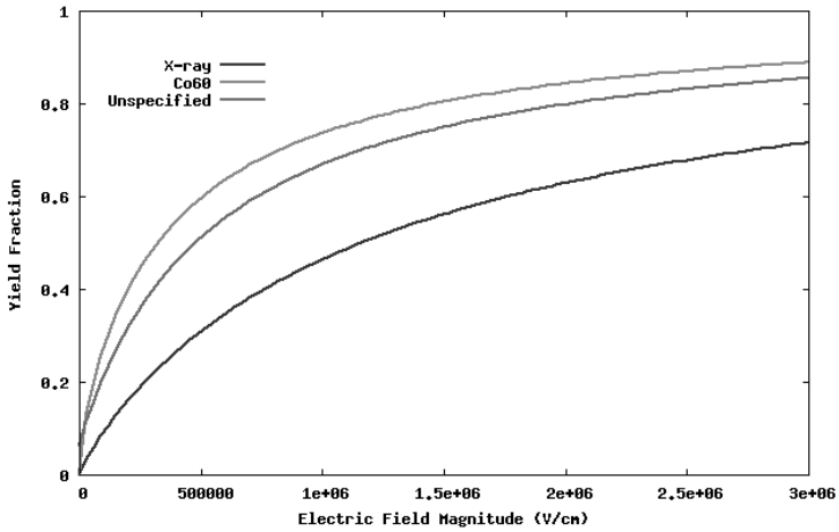
Hình 2. *Đặc tuyến vôn-ampe Vg-Id và Vd-Id của n-mosfet.*

2.2. Ảnh hưởng bức xạ ion lên điện môi SiO_2 của dụng cụ bán dẫn

2.2.1 Bức xạ ion hóa

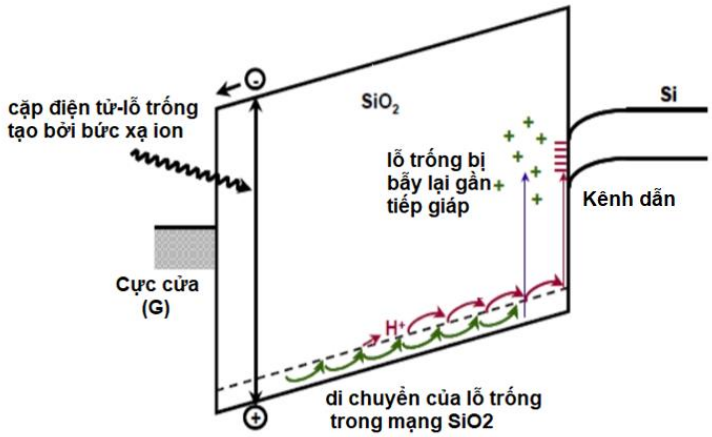
Tác động tích lũy của bức xạ ion hóa được nghiên cứu tiêu biểu là tác động của tia X và tác động của các hạt, nguyên tử như alpha, N, Co, Fe, Ni,...

Quá trình tác động của bức xạ ion hóa diễn ra như sau: bức xạ ion kích thích nguyên tử Si trong liên kết SiO_2 và đẩy electron ra khỏi nguyên tử tạo thành cặp electron-lỗ trống. Khi dụng cụng bán dẫn làm việc, giữa hai cực G và B của dụng cụ có điện thế khác không. Điện thế này tạo ra một điện trường trên chất điện môi SiO_2. Dưới tác động của điện trường này, electron và lỗ trống chuyển động về hai phía khác nhau trước khi tái hợp trở lại. Cường độ của điện trường càng lớn, cặp electron-lỗ trống bị tách ra càng mạnh làm cho tỉ lệ tái hợp giảm đi, qua đó tăng tỉ lệ sinh cặp electron-lỗ trống tăng lên theo McLean [7] như hình 3.



Hình 3. *Mức sinh cặp điện tử-lỗ trống trong điện trường dưới tác động bức xạ ion.*

Lỗ trống di chuyển về lớp tiếp giáp SiO_2 – Si và dừng tại đó. Biểu đồ thế năng của lỗ trống khi dịch chuyển trong điện môi SiO_2 được chỉ ra trong hình 4. Bản thân các lỗ trống hình thành một điện thế bổ sung tại tiếp giáp SiO_2 – Si tác động tới kênh dẫn. Ngay cả khi mosfet không làm việc, điện trường này cũng hoạt động như một điện thế điều khiển có tác dụng lên kênh dẫn của mosfet. Bên cạnh đó, điện môi SiO_2 cũng được sử dụng làm vật liệu bao quanh các dụng cụ bán dẫn trên tấm nền dung-cách ly giữa các linh kiện. Do đó, các cặp điện tử-lỗ trống sẽ dịch chuyển đến vùng biên tiếp giáp các cách ly và tạo nên điện thế tại đây. Dưới tác dụng của điện thế này, vùng biên của dụng cụ bán dẫn sẽ xuất hiện các dòng điện rò.



Hình 4. *Dịch chuyển lỗ trống trong điện môi SiO_2 của mosfet.*

Theo Dozier [8] hàm mô tả độ tái hợp của cặp điện tử-lỗ trống sinh ra do bức xạ ion hóa của tia X như sau:

$$Y = \left[\frac{|E| + (E_0 Y_0)}{|E| + E_0}\right]^{A_0} \quad (1)$$

trong đó, E là cường độ điện trường; E_0 = 1,35×10^6 V/cm với tia X; Y_0 =0 với tia X; A_0 =0,9 với tia X.

Ở đây, hàm (1) tỉ lệ ngược với giá trị cường độ điện trường và hàm sinh cặp điện tử-lỗ trống do bức xạ ion hóa của tia X tạo thành có dạng:

$$Y_A = 1 - Y \quad (2)$$

trong đó, Y_A là hàm sinh cặp điện tử-lỗ trống do bức xạ tia X; Y là hàm tái hợp (1).

Khi đó, phân bố điện thế trong dụng cụ bán dẫn do điện tích không gian sinh ra được tính:

$$\nabla(\varepsilon \nabla\Psi) = -\rho \quad (3)$$

trong đó, ε là hằng số điện môi của vật liệu; Ψ là điện thế không gian; ρ là mật độ điện tích không gian.

Điện trường phân bố trong dụng cụ bán dẫn được tính theo công thức sau:

$$\boldsymbol{E} = -\nabla\Psi \quad (4)$$

Điện tích không gian trong dụng cụ bán dẫn được tính bằng:

$$\rho = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) + Q_T \quad (5)$$

Trong đó: n là mật độ điện tử; p là mật độ lỗ trống; N_D^+ là mật độ ion donor; N_A^- là mật độ ion acceptor Q_T là mật độ điện tích từ các nguồn khác bao gồm điện tích gây ra bởi bức xạ ion hóa.

3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

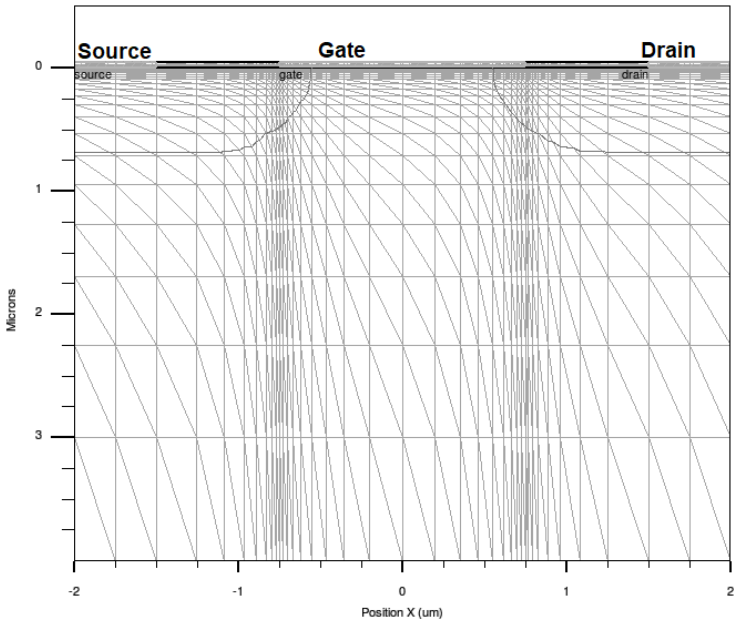
3.1. Đối tượng mô phỏng

Transistor trường được khảo sát là cấu trúc đã được xây dựng và nghiên cứu một số đặc tính tại trong nghiên cứu của Đào Đình Hà [9]. Transistor được hình thành trên tấm nền Si pha tạp Bo ở mức 2×10^{17}cm^{-3}. Transistor được cách ly với các dụng cụ lân cận bằng SiO_2 công nghệ STI. Vùng cực máng và cực nguồn được tạo bởi pha tạp P với mật độ tối đa đến 2×10^{19} cm^{-3}. Tiếp giáp p-n tại vùng cực máng, cực nguồn có chiều sâu 0,65 µm. Các tham số công nghệ chính của transistor được nghiên cứu trình bày trong bảng 2 như sau:

Bảng 2. *Tham số công nghệ chính của mosfet.*

TT	Tham số	Giá trị		
		Tối thiểu	Danh định	Tối đa
1	Chiều sâu oxit STI, µm	0,5	0,7	0,9
2	Chiều rộng oxit STI, µm	0,1	0,2	0,5
3	Chiều dày oxit cực cửa, nm	11	13	15
4	Cửa sổ tiếp điểm cực máng, cực nguồn, µm	0,3×0,3	0,5×0,5	0,7×0,7
5	Chiều dài cực cửa, µm		1,5	
6	Chiều rộng mosfet, µm		1,5	

Cấu trúc của dụng cụ bán dẫn được xây dựng cùng với lưới tính toán được tập trung ở vùng kênh dẫn, điện môi cực cửa và tiếp giáp p-n của cực nguồn, cực máng hình 5.



Hình 5. *Cấu trúc 2D của MOSFET và lưới tính toán tại mặt cắt dọc tại vị trí giữa kênh dẫn.*

3.2. Công cụ tính toán

Nhóm tác giả sử dụng phần mềm tính toán Silvaco framework [10] cho phép tính toán mô phỏng bằng phương pháp tính toán số (numerical calculation) quá trình công nghệ chế tạo dụng cụ bán dẫn 2D/3D và tính toán các đặc tính điện của dụng cụ đó.

Các module được sử dụng bao gồm module Victory Process được sử dụng để tái tạo lại cấu trúc 3D mosfet với kích thước, tham số công nghệ và phân bố pha tạp theo yêu cầu để ra. Modul Victory Device được sử dụng để tính toán các tham số điện của mosfet. Module REM (Radiation effects module) được sử dụng để tính toán biến đổi do bức xạ gây ra trên mosfet.

Đặc tính của transistor được tính toán dưới tác động của bức xạ ion của tia X với các liều hấp thụ khác nhau từ 10 krad đến 500 krad.

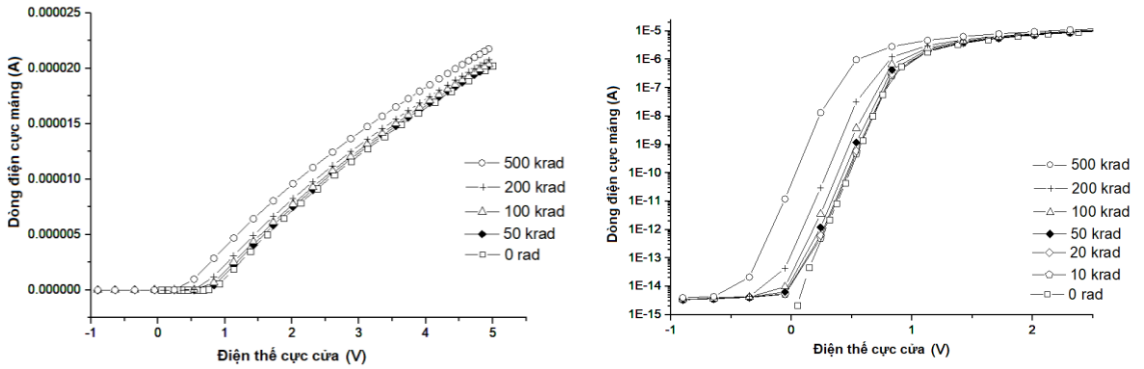
Năng lượng chùm tia X là 10 keV và liều chiếu xạ có giá trị 1 rad/s. Liều hấp thụ của dụng cụ bán dẫn được tính bằng thời gian chiếu xạ tính bằng giây.

3.3. Kết quả

Giá trị điện áp ngưỡng tính toán được của mosfet dưới tác động của các liều chiều xạ ion hoá khác nhau được cho trong bảng 3. Có thể nhận thấy, sau khi chiếu xạ, điện áp ngưỡng của mosfet giảm, đường đặc tuyến điện của dụng cụ dịch về phía trái. Với liều chiếu xạ đến 50 krad, điện áp ngưỡng của dụng cụ thay đổi đến 9,3% là mức có thể chấp nhận được, liều chiếu xạ trên 100 krad tạo nên sự thay đổi lớn về điện áp ngưỡng (>28%). Điều này gây ảnh hưởng lớn tới hoạt động của các mạch điện mà dụng cụ bán dẫn này tham gia.

Bảng 3. *Giá trị điện áp ngưỡng của mosfet với các mức chiếu xạ.*

Tham số	**Giá trị**						
Độ chiếu xạ, krad	0	10	20	50	100	200	500
Điện áp ngưỡng, V	0,75	0,74	0,71	0,68	0,54	0,46	0,28
Mức thay đổi điện áp, %	0	1,3%	5,3%	9,3%	28%	38,6%	62,7%



(a) *(b)*

Hình 6. *Kết quả tính toán đặc tuyến điện của mosfet.*

Bên cạnh đó, phân tích đặc tuyến Vg-Id của mosfet tại vùng cận điện áp ngưỡng (0 V÷0,5 V) cũng cho thấy, dòng rò của mosfet tăng lên sau khi bị chiếu xạ. Tiêu biểu là mức rò tại điện thế cực cửa bằng không (Vg=0 V) khá lớn (10 lần) kể cả với liều chiếu xạ thấp (50 krad) tức là khi không có điện áp điều khiển thì mosfet không đóng hoàn toàn. Điều này ảnh hưởng đến chế độ làm việc đã được thiết kế của dụng cụ và mạch điện cũng như mức tiêu thụ năng lượng và khả năng tiêu tán nhiệt sinh ra trên dụng cụ và mạch điện đó.

4. KẾT LUẬN

Tác động ion hóa của tia X đối với điện môi trong dụng cụ bán dẫn là một hiện tượng cần được cân nhắc trong quá trình thiết kế, tính toán thiết bị điện tử-bán dẫn đối với các thiết bị hoạt động trong không gian.

Trong công nghệ planar cấu trúc của mosfet, SiO_2 được sử dụng để làm vật liệu cách ly các dụng cụ bán dẫn với nhau. Do đó, ngoài tác động tới điện áp ngưỡng của mosfet, các lỗ trống trong vật liệu SiO_2 ở biên mosfet trong tiếp tục ảnh hưởng tới dòng rò của dụng cụ. Tiếp tục nghiên cứu các tác động của môi trường đến các dụng cụ bán dẫn và rút ra mô hình tính toán hiệu quả các tác động đó.

***Lời cảm ơn**: Nhóm tác giả xin cảm ơn các đồng nghiệp tại trường Đại học Quốc gia Tin học và Vô tuyến điện Belarus đã hỗ trợ phương tiện và tài liệu để thực hiện nội dung tính toán.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. M. Bagatin, S. Gerardin, *"Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers,"* CRC Press, 2015. – p. 191.

[2]. A. H. Siedle, L. Adams, *"Handbook of Radiation Effects,"* OUP Oxford, 2002. – p. 640.

[3]. Radiation Effects on Electronic Components in Low-Earth Orbit, Reliability Practice No. PD-ED-1258, NASA, 1996. - p.7.

[4]. Shin., et al. "*Radiation effect for a CubeSat in slow transition from the Earth to the Moon*" J. Advances in Space Research, **Vol. 55**, Issues 7, 2015, pp. 1792-1798.

[5]. Đỗ Xuân Thụ, "*Dụng cụ bán dẫn*", tập 2, NXB Đại học và trung học chuyên nghiệp (1985), tr. 16-30.

[6]. B. Razavi, *"Fundamentals of Microelectronics,"* 2nd, Wiley, 2013. – p. 923.

[7]. McLean, F B, and Oldham, T R. Tue. *"Basic mechanisms of radiation effects in electronic materials and devices. Final report, September 1986-September 1987"*.

[8]. C. M. Dozier *et al, "Charge yield for cobalt-60 and 10-keV X-ray irradiations of MOS devices,"* J. of IEEE Transactions on Nuclear Science,**Vol. 34**, Issues 6, 1987, pp. 1535 - 1539.

[9]. Dao Dinh Ha; Tran Tuan Trung; Nguyen Trong Quang, I. Lovshenko, V. Khanko, V, Stempitsky*, "Simulation of the Heavy Charged Particle Impacts on Electrical Characteristics of N-MOSFET Device Structure,"* 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 189 - 192.

[10]. Silvaco. [Electronic resource]. – Access mode: http://silvaco.com/. – Access date: 20.04.2021.

ABSTRACT

EFFECTS OF SPACE ENVIRONMENT ON ELECTRICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR DEVICE ON FLIGHT VEHICLE

This paper presents some effects of space ionizing radiation on electrical parameters of CMOS semiconductors. These impacts are calculated and simulated by numerical calculation method. The calculation results allow estimating the guaranted safe working time of electronic-semiconductor devices in the space environment.

Keywords: Semiconductor; Mosfet; Ionizing radiation; Dielectric SiO_2.

Nhận bài ngày 15 tháng 8 năm 2021
Hoàn thiện ngày 16 tháng 9 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 24 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: [1]Viện Tên lửa – Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;
[2]Bộ môn Vi xử lý – Học viện kỹ thuật quân sự.
[*]Email: Trung.bsuir@gmail.com.