

УДК 621.315.592

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2020-16-20

Удовицька Ю.А., Луньов С.В., к.ф.-м.н., Кашицький В.П., к.т.н., Назарчук П.Ф., к.ф.-м.н.
Луцький національний технічний університет

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ШВИДКИХ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЧЕРЕЗ ЕПОКСИКОМПОЗИТ

Проведені розрахунки коефіцієнта пропускання, радіаційних, іонізаційних та сумарних втрат для електронів з енергіями 10 МеВ та 12 МеВ при проходженні шару епоксидної смоли товщиною 5 мм з твердником ПЕПА 12 мас. ч. та з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза вмістом 30 мас.ч. Було встановлено, що іонізаційні втрати енергії швидких електронів значно перевищують радіаційні і зростають при введенні в полімерну матрицю наповнювачів порошоків алюмінію та заліза. При цьому коефіцієнт пропускання електронного пучка стає меншим. Для шару епоксикомпозиту з наповнювачем порошку заліза такі втрати енергії електрона є найбільшими. Це пояснює високу радіаційну стійкість досліджуваних раніше монокристалів *n*-Ge з таким захисним шаром епоксипокриття до електронного опромінення з енергією 10 МеВ. Шар епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза може бути перспективним матеріалом для створення відносно дешевих, легких та технологічних захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки від агресивної дії високоенергетичного електронного опромінення. Представлені теоретичні розрахунки можуть бути використанні при розробці та моделюванні на основі такого епоксикомпозиту захисних покриттів чутливих елементів або корпусів напівпровідникових датчиків, які перебувають в умовах підвищеної радіації.

Ключові слова: епоксикомпозит, наповнювачі порошоків алюмінію та заліза, іонізаційні та радіаційні втрати, коефіцієнт пропускання, захисні покриття, електронне опромінення.

1. Вступ

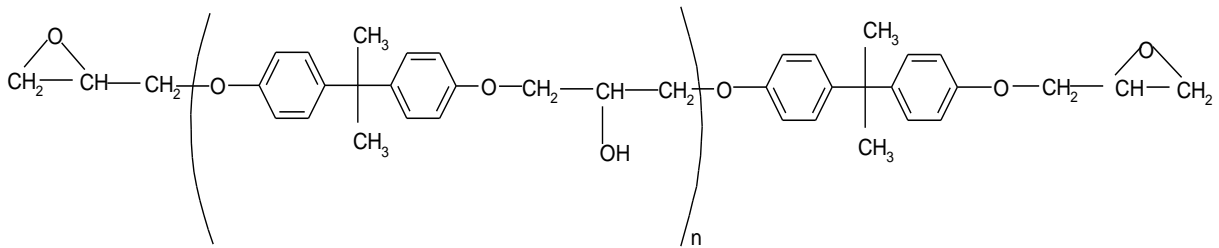
Полімерні матеріали широко використовуються в медицині, авіаційній і ракетокосмічній техніці, машинобудуванні, радіоелектроніці та інших галузях промисловості. Активне заміщення традиційних матеріалів полімерними відбувається в основному завдяки наповненим полімерним композиціям, компоненти яких при взаємодії один з одним і полімерною матрицею здатні надавати синергійний ефект [1]. Поєднання наповнювачів з полімерною матрицею дозволяє отримувати матеріали із заданими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, які можуть переважати аналогічні властивості металів та сплавів [2-6]. Виходячи з одержання необхідних властивостей полімерів, підбирається певне поєднання наповнювачів. В останні роки спостерігається стала тенденція зростання інтересів в області створення космічної техніки, яка має підвищену радіаційну стійкість. У зв'язку з цим розробляються нові види захисних матеріалів, в тому числі і полімерних [7-10]. Застосування чистих полімерів для елементів космічних апаратів практично неможливе в силу величезного комплексу недоліків: низька стійкість до радіації, повна або часткова втрата геометрії при 90 °С, легка займистість, значне розширення при нагріванні (лінійний коефіцієнт розширення в 10 разів більше, ніж для сталі), знижена теплопровідність [11-13]. При проходженні іонізуючого випромінювання через полімер зменшується інтенсивність гальмівного випромінювання, що є перевагою в порівнянні з радіаційно-захисними матеріалами з важких металів і є вирішальним фактором для застосування полімерів в космічному матеріалознавстві. Одним з найбільш негативних чинників космосу, що впливають на працездатність елементів з полімерів, є вплив швидких електронів. Опромінення матеріалів електронним пучком високих енергій викликає в них цілий комплекс фізико-хімічних процесів, які призводять до зміни їх мікроструктури та фізичних властивостей. Особливо чутливими до впливу радіації є напівпровідники. Використання епоксиполімерів в якості захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки дозволяє підвищити їх радіаційну стійкість та відповідно забезпечити стабільну роботу напівпровідникових приладів в умовах підвищеної радіації [14]. Тому цікавим як з теоретичної, так і практичної точок зору є дослідження екрануючої здатності епоксикомпозитного шару від електронного опромінення.

В роботі [14] досліджено дефектоутворення в монокристалах n-Ge при електронному опроміненні. Було встановлено, що в опроміненних монокристалах германію, покритих шаром епоксиполімеру з наповнювачем порошку заліза, утворилася найменша кількість радіаційних дефектів. Даний факт якісно був пояснений тим, що середній пробіг електронів в наповненому порошком заліза епоксиполімері є найменшим, порівняно з шаром епоксипокриття без наповнювачів та з наповнювачем порошку алюмінію. Для комплексного аналізу екрануючої здатності такого шару епоксипокриття необхідне проведення кількісних розрахунків та аналіз радіаційних втрат електронного пучка.

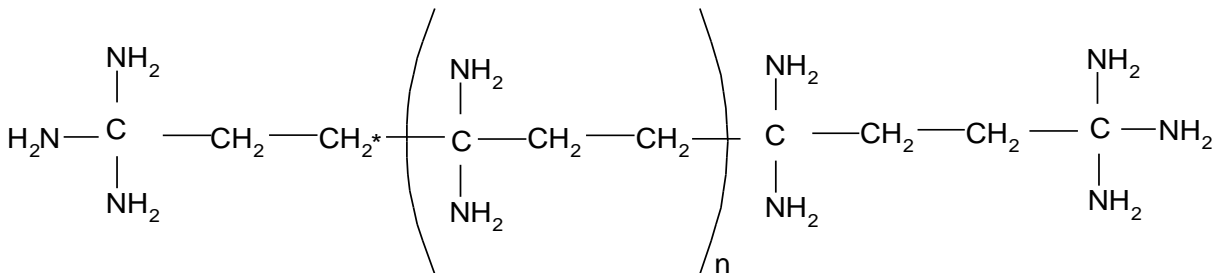
2. Результати теоретичних розрахунків та їх обговорення

В даній роботі проводились розрахунки коефіцієнта пропускання, радіаційних та іонізаційних втрат енергії електронів при проходженні шару епоксидної смоли з вмістом твердника ПЕПА 12 мас.ч., без наповнювачів та з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза вмістом 30 мас.ч.

Відомо [15], що макромолекула епоксидної смоли має таку будову:



атвердника поліетиленполіаміну наступну:



Тоді для 12 мас.ч. твердника ПЕПА, на одну молекулу припадає 5 молекул епоксидної смоли. Враховуючи кількість елементів в епоксидній смолі з твердником, їх масові та атомні числа, можна обчислити відсотковий вміст хімічних елементів (табл. 1).

Таблиця 1.

Елементний склад епоксидної смоли з твердником ПЕПА 12 мас. ч.

Вміст у відсотках різних хімічних елементів			
N	O	H	C
4,94	16,45	8,81	69,8

Густина епоксикомпозиту

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

де m – маса епоксиполімеру, яка визначалась як різниця між масою напівпровідника, покритого шаром епоксикомпозиту, та масою зразка напівпровідника з олов'яними контактами; V – об'єм епоксикомпозиту.

Як показують розрахунки, епоксикомпозитний шар покриття без наповнювачів має густина $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$, а з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза $1,871 \text{ г/см}^3$ та $3,515 \text{ г/см}^3$ відповідно.

Іонізаційні втрати енергії електронів при проходженні шару речовини визначаються виразом [10]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = K\rho \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right], \quad (2)$$

де $K=4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0,307 \text{ MeV}\cdot\text{г}/\text{см}^2$; $m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ – енергія спокою електрона; $r_e = e^2/m_e c^2 = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ – класичний радіус електрона; $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$; ρ – густина речовини; I – середній іонізаційний потенціал атома речовини середовища; $\beta = \sqrt{1 - \frac{(m_e c^2)^2}{(m_e c^2 + E_k)^2}}$ – Лоренц-фактор електрона з кінетичної енергією E_k .

Якщо речовина складається з атомів різного сорту, то кожен атом буде давати свій внесок в іонізаційні втрати енергії електронів. Тоді

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \sum_i \left(-\frac{dE}{dx}\right)_i, \quad (3)$$

де $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_i$ – внесок i -го елемента в складній речовині в іонізаційні втрати енергії електрона.

Перепишемо вираз (1) в більш зручному для аналізу вигляді:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho \frac{Z}{A} F(E_k, I), \quad (4)$$

$$F(E_k, I) = \frac{K}{2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right]. \quad (5)$$

Тоді в нашому випадку внески кожного хімічного елемента в іонізаційні втрати рівні:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^C = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C), \quad (6)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^N = \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N), \quad (7)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^O = \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O), \quad (8)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^H = \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H), \quad (9)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Al} = \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}), \quad (10)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Fe} = \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}), \quad (11)$$

Середні іонізаційні потенціали атомів мають наступні значення [15]: $I_C \approx 78\text{eV}$, $I_N \approx 80,5\text{eV}$, $I_O \approx 95\text{eV}$, $I_H \approx 19,2\text{eV}$, $I_{Al} \approx 149,5\text{eV}$, $I_{Fe} \approx 234\text{eV}$.

Згідно з (3-11), сумарні іонізаційні втрати енергії електронів при проходженні шару епоксиполімеру без наповнювачів:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H). \quad (12)$$

Тоді іонізаційні втрати енергії електронів в досліджуваному епоксиполімері з наповнювачем порошку алюмінію

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H) + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}), \quad (13)$$

а з наповнювачем порошку заліза

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H) + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}). \quad (14)$$

Втрати енергії електрона на випромінювання визначаються виразом [10, 16]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \rho \frac{Z^2}{A} \frac{K\alpha}{4\pi} \frac{\varepsilon}{m} G(E_k), \quad (15)$$

де $F(x) = \int_0^x \frac{\ln(1+y)}{y} dy$; $\varepsilon = E_k + m_e c^2$ – повна енергія електрона, p – імпульс електрона;

$$G(E_k) = \frac{K\alpha}{4\pi} \frac{\varepsilon}{m} \left[\frac{12\varepsilon^2 + 4m_e^2 c^4}{3\varepsilon p} \ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right) - \frac{(8\varepsilon + 6p)m_e^2 c^4}{3\varepsilon p^2} \left(\ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right)\right)^2 - \frac{4}{3} + \frac{2m_e^2 c^4}{\varepsilon p} F\left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m_e^2 c^4}\right) \right]. \quad (16)$$

Враховуючи вклад кожного з елементів та наповнювачів сумарні втрати енергії електрона на випромінювання для шару епокипокриття без наповнювачів та з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза, можна записати:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} \right) G(E_k), \quad (17)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} \right) G(E_k), \quad (18)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_N \frac{Z_N^2}{A_N} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} + \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} \right) G(E_k). \quad (19)$$

Втрати кінетичної енергії електрона з врахуванням іонізаційних та радіаційних втрат можна представити як:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}. \quad (20)$$

Тоді енергія електронного пучка при виході з шару епоксикомпозиту:

$$E_k = E_{k_0} - \left(-\frac{dE}{dx}\right) \cdot x, \quad (21)$$

де E_{k_0} – кінетична енергія падаючих на шар епоксикомпозиту електронів, x – товщина шару епоксипокриття.

Екрануючу здатність епоксикомпозитного шару від електронного опромінення можна охарактеризувати коефіцієнтом пропускання електронного пучка:

$$T = \frac{E_k}{E_{k_0}} \cdot 100\%. \quad (22)$$

Результати обчислень радіаційних, іонізаційних та сумарних втрат енергії електронів, а також коефіцієнту пропускання представлені в таблицях 2 та 3. Розрахунки проводились для енергії

електронів $E_{k_0} = 10$ MeV, якими опромінювались досліджувані в роботі [14] монокристали германію, та енергії $E_{k_0} = 12$ MeV. Друге вибране значення енергії є цікавим з фундаментальної точки зору дослідження механізмів дефектоутворення в германії, оскільки при енергіях $E_{k_0} > 10$ MeV в монокристалах германію крім точкових дефектів утворюються області розвпорядкування [17].

Таблиця 2.

Втрати енергії електрона та коефіцієнт пропускання для епоксипокриття товщиною 5 мм, опроміненого електронами за енергії $E_{k_0} = 10$ MeV

Тип покриття	Іонізаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}, \frac{MeV}{cm}$	Радіаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}, \frac{MeV}{cm}$	Сумарні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right), \frac{MeV}{cm}$	Кінетична енергія електрона E_k, MeV	Коефіцієнт пропускання електронного пучка $T, \%$
Епоксиполімер без наповнювача	2,640	0,150	2,790	8,605	86,05
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку алюмінію	3,664	0,265	3,929	8,036	80,36
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку заліза	4,431	0,400	4,831	7,585	75,85

Таблиця 3.

Втрати енергії електрона та коефіцієнт пропускання для епоксипокриття товщиною 5 мм, опроміненого електронами за енергії $E_{k_0} = 12$ MeV

Тип покриття	Іонізаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}, \frac{MeV}{cm}$	Радіаційні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}, \frac{MeV}{cm}$	Сумарні втрати $\left(-\frac{dE}{dx}\right), \frac{MeV}{cm}$	Кінетична енергія електрона E_k, MeV	Коефіцієнт пропускання електронного пучка $T, \%$
Епоксиполімер без наповнювача	2,682	0,180	2,862	10,569	88,08
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку алюмінію	3,762	0,319	4,081	9,960	83,00
Епоксикомпозит з наповнювачем порошку заліза	4,503	0,480	4,983	9,509	79,24

3. Висновки

Як слідує з таблиць 2 та 3, іонізаційні втрати енергії швидких електронів є більшими на порядок за радіаційні. Найбільші сумарні втрати та відповідно найменший коефіцієнт пропускання є для шару епоксикомпозиту з наповнювачем порошу заліза. Це пояснює найбільшу радіаційну стійкість досліджуваних в роботі [14] монокристалів n-Ge з таким шаром епоксипокриття та найменшу концентрацію утворених при електронному опроміненні в цих монокристалах радіаційних дефектів. Епоксикомпозитне покриття з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза дозволяє послабити електронний пучок з енергією $E_{k_0} = 12$ MeV до енергії менше 10 MeV, що зменшить ймовірність утворення в монокристалах германію областей розвпорядкування, наявність яких суттєво знижує рухливість електронів.

Таким чином, одержаний шар епоксикомпозиту може бути перспективним матеріалом для створення відносно дешевих та технологічних захисних покриттів елементів напівпровідникової електроніки від агресивної дії високоенергетичного електронного опромінення. Представлені теоретичні розрахунки втрат енергії швидких електронів та коефіцієнта пропускання електронного пучка можуть бути використанні при розробці та моделюванні на основі епоксидної смоли з наповнювачами порошоків алюмінію та заліза захисних покриттів чутливих елементів або корпусів напівпровідникових датчиків для атомної та термоядерної енергетики, авіакосмічної промисловості.

Література

1. Черкашина Н. И. и др.(2013). Синтез высокодисперсного гидрофобного наполнителя для полимерных матриц. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 6, 156-159.
2. Садова О.Л.Кашицький В.П., Люшук О.М. (2017). Вплив порошоків графіту на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів. Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрям автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Суми, 22-26 травня 2017 р., Суми: СумДУ, 145-147.
3. Букетов А.В., Скирденко В.О. (2015). Дослідження впливу мікродисперсних наповнювачів на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 51 (1), 43-49.
4. Малець В. М., Боярська І. В., Кашицький В. П. (2016). Вплив зовнішніх фізичних полів на структурування епоксикомпозитів наповнених високодисперсним порошком заліза. Компрессорное и энергетическое машиностроение, 3, 37-39.
5. Боярська І. В. Кашицький В. П., Савчук П. П. (2012). Розробка технології структурування епоксикомпозитів у полях струмів високої частоти. Наукові нотатки, 37, 50-53.
6. Савчук П. П., Кашицький В. П., Будкіна О. Л., Кислюк О. П., Назаренко В. А. (2010). Технологічні аспекти формування епоксикомпозитних систем, наповнених дисперсними частинками сполук заліза. Наукові нотатки, 28, 453-456.
7. Pavlenko, V. I., et al. (2015). Study of the attenuation coefficients of photon and neutron beams passing through titanium hydride. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 9.3, 546-549.
8. Павленко В. И., Едаменко О. Д., Ястребинский Р. Н., Черкашина Н. И. (2011). Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 3, 113 – 116.
9. Едаменко, О. Д., Ястребинский, Р. Н., Соколенко, И. В., Ястребинская, А. В. (2012). Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения. Современные проблемы науки и образования, 6, 128.
10. Yastrebinski, R. N., Cherkashina, N. I., Yastrebinskaya, A. V., Noskov, A. V. (2016). Energy losses of fast electrons when passing through the radiation-protective iron-oxide composite. Problems of Atomic Science and Technology, 104(4), 9-14.
11. Черкашина Н. И. (2012). Моделирование воздействия космического излучения на полимерные композиты с применением программного комплекса GEANT4. Современные проблемы науки и образования, 3, 122.
12. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. (2014). Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 4, 101 – 106.

13. Соколенко И. В. и др. (2013). Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 6, 145-148.
14. Udovyt'ska Yu.A., Maslyuk V.T. (2020). Development of epoxy composite protective coatings for increasing the radiation stability of n-Ge single crystals. *Funct. Mater.*, 27 (1), 24-28.
15. Stormand H., Israel H.I. (1970). Photon Cross Section from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100. *Nucl. Data Tables*, A7, 565.
16. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. (1969). Квантовая электродинамика. М.: Наука, 623.
17. Luniov S. V., Zimych A. I., Nazarchuk P. F., Maslyuk V. T., Megela I. G. (2015). The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge. *Journal of physical studies*, 19 (4), 4704.

Удовицкая Ю.А., Лунёв С.В., Кашицкий В.П., Назарчук П.Ф.

Луцкий национальный технический университет

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ЭПОКСИКОМПОЗИТ

Проведены расчеты коэффициента пропускания, радиационных, ионизационных и суммарных потерь для электронов с энергиями 10 МэВ и 12 МэВ при прохождении слоя эпоксидной смолы толщиной 5 мм с отвердителем ПЕПА 12 мас. ч. и с наполнителями порошков алюминия и железа содержанием 30 мас.ч. Было установлено, что ионизационные потери энергии быстрых электронов значительно превышают радиационные и растут при введении в полимерную матрицу наполнителей порошков алюминия и железа. При этом коэффициент пропускания электронного пучка становится меньше. Для слоя эпоксикомпозита с наполнителем порошки железа такие потери энергии электрона есть наибольшими. Это объясняет высокую радиационную стойкость ранее исследуемых монокристаллов n-Ge с таким защитным слоем эпоксидного покрытия к электронному облучению с энергией 10 МэВ. Слой эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 с наполнителями порошков алюминия и железа может быть перспективным материалом для создания относительно дешевых, легких и технологических защитных покрытий элементов полупроводниковой электроники от агрессивного воздействия высокоэнергетического электронного облучения. Представленные теоретические расчеты могут быть использованы при разработке и моделировании на основе такого эпоксикомпозита защитных покрытий чувствительных элементов или корпусов полупроводниковых датчиков, которые находятся в условиях повышенной радиации.

Ключевые слова: эпоксикомпозит, наполнители порошков алюминия и железа, ионизационные и радиационные потери, коэффициент пропускания, защитные покрытия, электронное облучение.

Udovyt'ska Yu.A., Luniov S. V., Kashytskyi V. P., Nazarchuk P.F.

Lutsk National Technical University

CALCULATION OF THE ENERGY LOSSES OF FAST ELECTRONS PASSING THROUGH EPOXY COMPOSITE

Calculations of the transmission factor, radiation, ionization and total losses for electrons with the energies of 10 MeV and 12 MeV that passing a layer of epoxy resin with a thickness of 5 mm with PEPA hardener (12 parts by weight) and with fillers of the iron and aluminum powders (30 parts by weigh) were conducted. It was established that the ionization losses of energy of fast electrons far exceed the radiation losses and increasing when imposing aluminum and iron powder fillers into the polymer matrix. In so doing, the transmission factor of the electron beam becomes smaller. Such electron energy losses for the epoxy composite layer with iron powder filler are greatest.

This explains the high radiation resistance of the previously investigated n-Ge single crystals with such a protective epoxy coating layer to electron irradiation with energy of 10 MeV. A layer of

epoxy resin ED-20 with aluminum and iron powder fillers may be promising material for creating relatively cheap, lightweight and technological protective coatings of elements of semiconductor electronics against the aggressive action of high-energy electron irradiation. The presented theoretical calculations can be used in the development and in modeling of such epoxy composite protective coatings of sensitive elements or semiconductor enclosures, which are in conditions of a high radiation.

Key words: *epoxy composite, aluminum and iron powder fillers, ionization and radiation losses, transmission facto, protective coatings, electron irradiation.*