



Прибила А.В.

Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatyach@gmail.com;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ПРО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У роботі наведено результати проектування термоелектричного багатокаскадного термоелектричного модуля охолодження рентгенівських детекторів. Розроблено конструкцію термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання та проаналізовано можливості його практичного використання. Бібл. 11, рис. 2.

Ключові слова: комп'ютерне проектування, термоелектричне охолодження, рентгенівський детектор.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Термоелектричні охолоджувачі широко використовуються для забезпечення оптимальних режимів роботи різноманітних детекторів випромінювання [1, 2]. Особливо актуальним є їх використання із напівпровідниковими детекторами рентгенівського випромінювання, що значно підвищує їх роздільну здатність [3-9].

У роботі [3] наводяться результати комп'ютерного проектування термоелектричного багатокаскадного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання. Були визначені оптимальні геометричні розміри та режими роботи охолоджувача, що забезпечують найкращі умови роботи рентгенівського детектора. Проте аналіз теплової схеми термоелектричного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання засвідчив наявність теплових втрат, що призводять до зниження його енергетичної ефективності.

Тому метою роботи є аналіз можливостей підвищення ефективності термоелектричного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання.

Фізична модель

Для розрахунків використано фізичну модель термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання представлену на рис. 1. Вона складається із корпусу 2 з берилієвим вікном 1, через яке випромінювання потрапляє на рентгенівський детектор 3. Необхідні температурні і теплові умови на поверхні детектора рентгенівського випромінювання забезпечуються багатокаскадним термоелектричним охолоджувачем електричною потужністю W , що складається із віток термоелектричного матеріалу n - і p -типу провідності 9, електропровідних

комутуючих пластин 10, керамічних електроізоляційних пластин 11 та електричних виводів 8. Для зменшення теплових втрат всередині корпусу детектора 5 створюється вакуум. Відвід теплового потоку від термоелектричного охолоджувача здійснюється через основу корпусу детектора 6 та його кріплення 7.

Аналіз теплової схеми детектора рентгенівського випромінювання показав, що джерелом найбільших втрат ефективності термоелектричного модуля охолодження (що також призводять до зниження максимального перепаду температур) є теплові натікання на термоелектричні вітки каскадів модуля через випромінювання. З метою зниження цих втрат було запропоновано удосконалення конструкції термоелектричного модуля шляхом введення додаткових радіаційних екранів 4 на рис. 1.

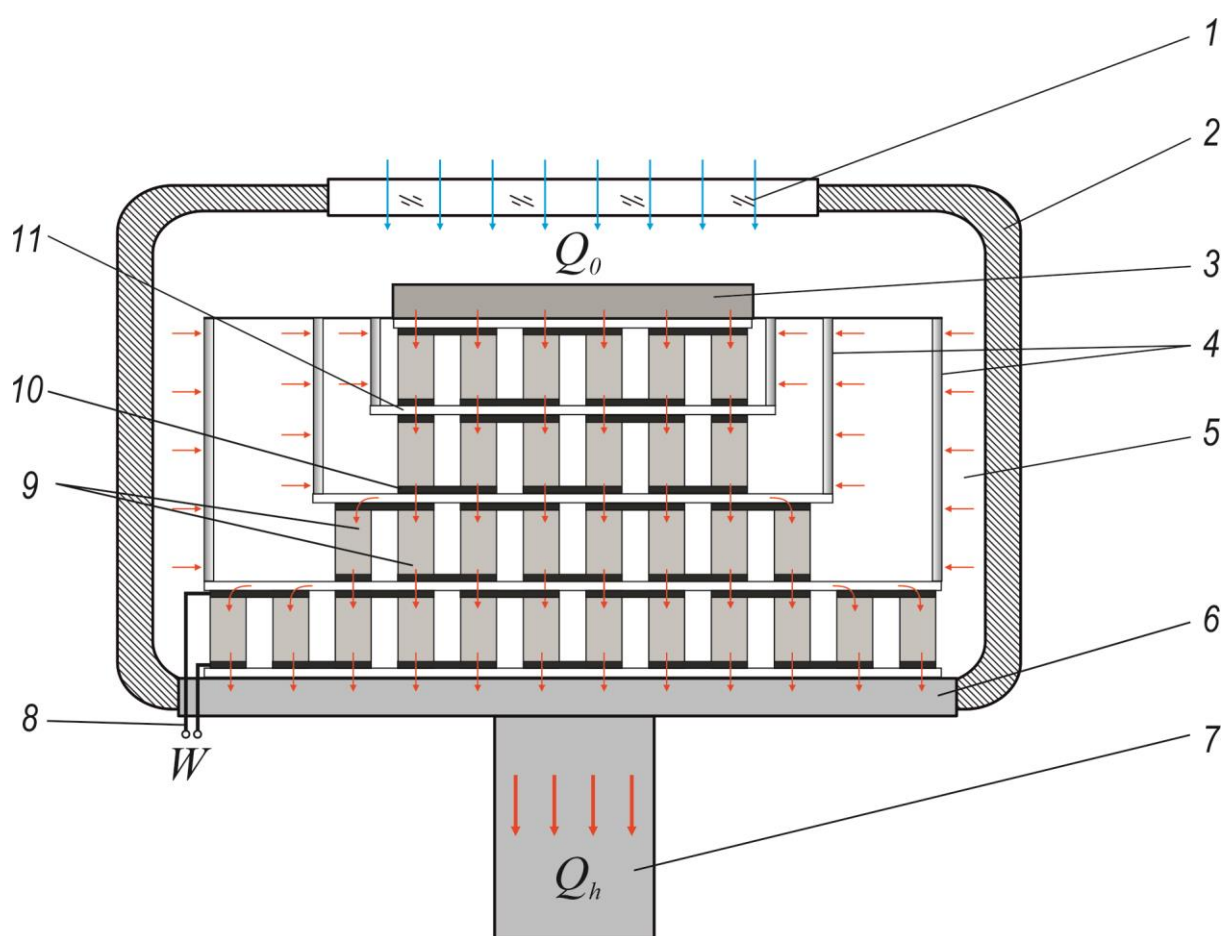


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного багатокаскадного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання: 1 – берилієве вікно; 2 – корпус приладу; 3 – детектор рентгенівського випромінювання; 4 – радіаційні екрани; 5 – внутрішній простір приладу в якому створюється вакуум; 6 – основа корпусу приладу; 7 – кріплення приладу; 8 – електричні виводи; 9 – вітки термоелектричного матеріалу n- і p- типу провідності, 10 – електричні комутаційні пластини, 11 – керамічні електроізоляційні пластини .

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Система рівнянь для опису холодильного коефіцієнту термоелектричного охолоджувача в

залежності від параметрів елементів фізичної моделі визначається із рівнянь теплового балансу:

$$Q_c = \chi_1(T_c^{(1)} - T_c), \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_h = \chi_3(T_h^{(2)} - T_h^{(1)}) \\ Q_h = \chi_4(T_h^{(1)} - T_h) \end{cases}, \quad (2)$$

$$Q_h = Q_c + W_{TE}. \quad (3)$$

Тут $T_c^{(1)}$ – температура поверхні детектора, T_c – температура холодної сторони термоелектричного модуля, χ_1 – тепловий контактний опір, $T_h^{(2)}$ – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, $T_h^{(1)}$ – температура основи корпусу детектора, T_h – температура поверхні на яку відбувається відведення тепла, χ_2 – тепловий контактний опір, χ_3 – тепловий опір теплообмінника з «гарячого боку» термоелектричного перетворювача, Q_0 – холодопродуктивність, Q_h – теплопродуктивність.

Із врахуванням (1)–(3), вираз для холодильного коефіцієнта термоелектричного термоелектричного охолоджувача запишеться у вигляді:

$$\varepsilon_r = \frac{Q_0}{W + W_1} = \frac{\alpha I(T_c + Q_0 N_1) - 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_0 N_1))}{W + W_1}, \quad (4)$$

де α – диференціальний коефіцієнт Зеебека матеріалу, I – сила струму, R – електричний опір термоелектричного модуля, λ – середній питомий коефіцієнт теплопровідності віток термоелектричного модуля, W_1 – потужність, що витрачається на забезпечення теплообміну,

$$N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}, \quad N_2 = \frac{(\chi_3 + \chi_4)}{\chi_3 \chi_4}. \quad (5)$$

Для проектування конструкції термоелектричного охолоджувача використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics [11]. Для цього рівняння фізичної моделі необхідно представити у певному вигляді, як буде показано нижче.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (6)$$

та електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (7)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (8)$$

$$\vec{q} = \kappa\nabla T + \alpha T\vec{j}, \quad (9)$$

$$\vec{j} = -\sigma\nabla U - \sigma\alpha\nabla T. \quad (10)$$

Тут \vec{E} – густина потоку енергії, \vec{q} – густина теплового потоку, \vec{j} – густина електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і теплопровідності.

Враховуючи (8) – (10), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T - (\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U. \quad (11)$$

Тоді закони збереження (5), (6) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T] - \nabla[(\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U] = 0, \quad (12)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (13)$$

Нелінійні диференціальні рівняння другого порядку в частинних похідних (12) і (13) визначають розподіл температури T та потенціалу U у термоелектричному охолоджувачі.

Розв'язок цих рівнянь із використанням технології об'єктно-орієнтовано комп'ютерного моделювання [10] та теорії оптимального керування [11] дозволяє знайти оптимальну конструкцію термоелектричного перетворювача та залежності його характеристик.

Результати комп'ютерного проектування

В результаті комп'ютерного моделювання розраховано конструкцію термоелектричного багатокаскадного модуля (рис.2), що забезпечує можливість його використання для забезпечення температурних умов детектора рентгенівського випромінювання (табл. 1).

Таким чином, термоелектричний охолоджувач містить 4 каскади – по 6, 12, 27 і 65 пар віток термоелектричного матеріалу, його габаритні розміри – 12 x 16 x 12 мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4 x 8 мм. Розміри віток термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) n- і p- типів провідності – 0.6 x 0.6 x 1.8 мм. Електроізоляційні пластини з оксиду алюмінію (Al_2O_3) товщиною 0.5 мм, електрична комутація з міді (Cu) із антидифузійним прошарком нікелю (Ni) товщиною 0.1 мм.

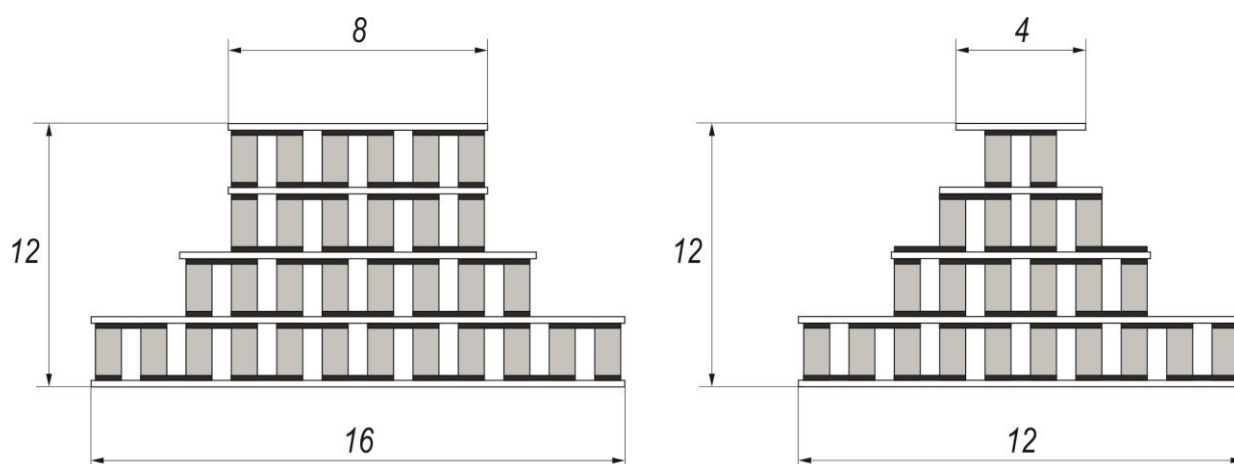


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції термоелектричного охолоджувача для детектора рентгенівського випромінювання.

Розрахункова холодопродуктивність термоелектричного перетворювача складає $Q_0 = 57$ мВт (3 мВт – теплове навантаження від детектора плюс 54 мВт – натікання через випромінювання). При забезпеченні температури на детекторі $T_c^{(1)} = -70$ °С та за температури тепловідводу $T_h = +20$ °С холодильний коефіцієнт термоелектричного охолоджувача становить $\varepsilon = 0.02$. Отже, електрична потужність, що буде споживатися таким перетворювачем становить $W = 2.85$ Вт.

Отримані результати підтверджують можливості використання термоелектричних охолоджувачів для забезпечення температурних і теплових умов детекторів рентгенівського випромінювання і за своїми характеристиками переважають відомі світові аналоги [10].

Висновки

1. Проведено комп'ютерне проектування термоелектричного охолоджувача для рентгенівських детекторів.
2. Розраховано конструкцію та характеристики термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання. Таким чином, термоелектричний охолоджувач містить 4 каскади з термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3 габаритними розмірами – $12 \times 16 \times 12$ мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4×8 мм.
3. Визначено електричну потужність термоелектричного перетворювача $W = 2.85$ Вт, що при холодильному коефіцієнті $\varepsilon = 0.02$ забезпечує температуру основи детектора $T_c^{(1)} = -70$ °С та $\Delta T = 90$ К.

Література

1. Anatyчук L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013, №5, p. 54-58.
2. Прибила А.В. Проектування термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання // Термоелектрика №2, С. 87-92. 2019.
3. R.E. Stone, V.A. Barkley, and J.A Fleming, "Performance of a GammaRay and X-ray Spectrometer using Germanium and Si (Li) Detectors Cooled by a Closed-Cycle Cryogenic Mechanical Refrigerator," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-33(1), 299 (1986).

4. E.C. Broerman, R.M. Keyser, T.R. Twomey, D.L. Upp. A new cooler for HPGe detector systems.– ORTEC, PerkinElmer Instruments, Inc Oak Ridge TN 37831-0895 USA.
5. Schlesinger TE, James RB. Semiconductors and Semimetals. Vol. 43. Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications. Academic Press: New York, 1995.
6. Semiconductors for Room-temperature Detectors. Applications II, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA, 1998.
7. Sokolov, A., Loupilov, A., & Gostilo, V. (2004). Semiconductor Peltier-cooled detectors for x-ray fluorescence analysis. X-Ray Spectrometry, 33(6), 462–465. doi:10.1002/xrs.744.
8. <http://www.rmtltd.ru/applications/photodetectors/xray.php>.
9. <http://www.amptek.com/wp-content/uploads/2014/04/XR-100T-CdTe-X-ray-and-Gamma-Ray-Detector-Specifications.pdf>.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
11. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. – Черновцы: Прут, 1992. – 263 p.

Надійшла до редакції 20.11.2019

Прибыла А.В., канд. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyck@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,
Черновцы, 58000, Украина

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе приведены результаты проектирования термоэлектрического многокаскадного термоэлектрического модуля охлаждения рентгеновских детекторов. Разработана конструкция термоэлектрического охладителя в составе детектора рентгеновского излучения и предложена методика повышения его энергетической эффективности. Библ. 11, рис. 2.

Ключевые слова: компьютерное проектирование, термоэлектрическое охлаждение, рентгеновский детектор.

A.V. Prybyla ^{1,2} *cand. Phys. - math. Sciences*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,

2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

e-mail: anatykh@gmail.com

EFFICIENCY INCREASE OF THERMOELECTRIC COOLING MODULE FOR X-RAY DETECTOR

The paper presents the results of designing a multi-stage thermoelectric cooling module for X-ray detectors. The design of a thermoelectric cooler as a part of X-ray detector is developed and the technique of increase of its energy efficiency is offered. Bibl. 11, Fig. 2.

Key words: computer design, thermoelectric cooling, X-ray detector.

References

1. Anatykhuk L.I., Vikhor L.N. (2013). The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 54-58.
2. Prybyla A.V. (2019). Design of thermoelectric cooling module for X-ray radiation detector. *J. Thermoelectricity*, 2, 87-92.
3. Stone R.E., Barkley V.A., and Fleming J.A. (1986). Performance of a GammaRay and X-ray spectrometer using germanium and Si (Li) detectors cooled by a closed-cycle cryogenic mechanical refrigerator. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-33(1), 299.
4. Broerman E.C., Keyser R.M., Twomey T.R., Upp D.L. *A new cooler for HPGe detector systems.*—ORTEC, PerkinElmer Instruments, Inc Oak Ridge TN 37831-0895 USA.
5. Schlesinger T.E., James R.B. (1995). *Semiconductors and Semimetals. Vol. 43. Semiconductors for room temperature nuclear detector applications.* New York: Academic Press.
6. Semiconductors for room-temperature detectors. Applications II, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA, 1998.
7. Sokolov A., Loupilov A., Gostilo, V. (2004). Semiconductor Peltier-cooled detectors for x-ray fluorescence analysis. *X-Ray Spectrometry*, 33(6), 462–465. doi:10.1002/xrs.744.
8. <http://www.rmtltd.ru/applications/photodetectors/xray.php>.
9. <http://www.amptek.com/wp-content/uploads/2014/04/XR-100T-CdTe-X-ray-and-Gamma-Ray-Detector-Specifications.pdf>.
10. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB.
11. Anatykhuk L.I., Semeniuk V.A. (1992). *Optimal'noie upravleniie svoistvami termoelektricheskikh materialsov i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]*. Chernivtsi: Prut [in Russian].

Submitted 20.11.2019