



НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ІННОВАЦІЙНІ ПРОЄКТИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

<https://doi.org/10.15407/scin16.04.047>

Л.І. АНАТИЧУК, А.В. ПРИБИЛА

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
+380 3722 4 4422, +380 3722 4 1917, anatyach@gmail.com

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ ДЛЯ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ДЕТЕКТОРІВ

Вступ. Рентгенівські методи широко використовують для неруйнівних мікроаналітичних досліджень структури та складу матеріалів з високою просторовою роздільною здатністю. Подальше збільшення цього показника суттєво залежить від покращення аналітичних характеристик напівпровідникових детекторів, а також від застосування широкоапертурних позиційно чутливих детекторів випромінювання нових типів.

Проблематика. Роздільна здатність рентгенівських детекторів суттєво залежить від температурного режиму їхньої роботи, що забезпечується використанням термоелектричних охолоджувачів. Однокаскадні термоелектричні охолоджувачі (ТЕО) застосовують для неглибокого охолодження (до 250 К), тоді як для охолодження сенсорів до робочої температури 230 К використовують двокаскадні ТЕО, до 210 К – трикаскадні, а для охолодження нижче 190 К – чотири- та п'ятикаскадні ТЕО.

Мета. Проектування та оптимізація конструкції термоелектричного багатокаскадного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання.

Матеріали й методи. Методи комп'ютерного об'єктно-орієнтованого проектування та методи теорії оптимального керування, адаптовані до використання для термоелектричного перетворення енергії. Для створення термоелектричних модулів охолодження використано матеріали на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) *n*- та *p*- типів провідності.

Результати. Розрахунки конструкції термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання показали оптимальну електричну потужність термоелектричного перетворювача $W = 2,85$ Вт, що при холодильному коефіцієнті $\varepsilon = 0,02$ забезпечує температуру основи детектора $T_c = -70$ °С та $\Delta T = 90$ К, що є оптимальними умовами для роботи детекторів рентгенівського випромінювання та дозволяють значно підвищити їхню роздільну здатність при мінімальних затратах електричної енергії.

Висновки. Наведено розрахунки забезпечують оптимальні режими роботи детектора рентгенівського випромінювання, а комплексне дослідження та оптимізація зазначеного пристрою підтвердили результати. Отримані дані можна застосовувати для створення приладів з підвищеною роздільною здатністю.

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

Рентгенівські методи широко використовують для неруйнівних мікроаналітичних досліджень структури та складу матеріалів з високою просторовою роздільною здатністю [1]. Сучасний стан методів ядерного мікроаналізу з використанням сфоку-

Цитування: Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні охолоджувачі для рентгенівських детекторів. *Наука іннов.* 2020. Т. 16, № 4. С. 47–52. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.047>

ISSN 1815-2066. *Наука іннов.* 2020. 16(4)

сованих пучків іонів мегаелектронвольтних (МеВ-них) енергій з високою моноенергетичністю ($\Delta E/E = 10^{-5}$) дозволяє досягнути просторової роздільної здатності на поверхні до 100 нм і до 10 нм в товщі зразків. Подальше збільшення роздільної здатності суттєво залежить від покращення аналітичних характеристик напівпровідникових детекторів, а також від застосування широкоапертурних позиційно чутливих детекторів випромінювання нових типів [2].

Для підвищення роздільної здатності рентгенівських детекторів важливо вирішити завдання забезпечення оптимальної температури їхньої роботи [3–9]. Розв'язати його можливо шляхом використання напівпровідникових термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) [5–9], що дозволяє забезпечити потрібну глибину охолодження в мінімальному робочому об'ємі детектора. Так, однокаскадні термоелектричні модулі застосовують для неглибокого охолодження

(до 250 К), для охолодження сенсорів до робочої температури 230 К використовують двокаскадні ТЕО, до 210 К – трикаскадні, а для охолодження нижче 190 К – чотири- та п'ятикаскадні ТЕО [10].

Нижче наведено аналіз можливостей термоелектрики для охолодження рентгенівських детекторів та розробка конструкції багатокаскадного термоелектричного охолоджувача рентгенівських детекторів.

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ДЕТЕКТОРА

Для розрахунків використано фізичну модель термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання (рис. 1), яка складається із корпусу детектора (2) з берилієвим вікном (1), через яке випромінювання потрапляє на рентгенівський де-

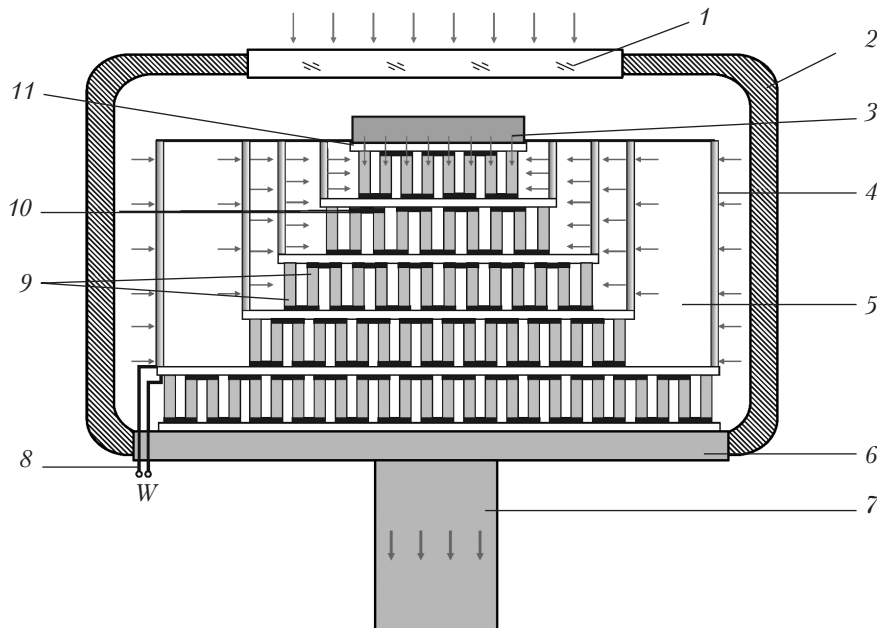


Рис. 1. Схематична модель термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання: 1 – берилієве вікно; 2 – корпус детектора; 3 – рентгенівський детектор; 4 – радіаційні екрани; 5 – інертний газ; 6 – основа корпусу детектора; 7 – кріплення детектора; 8 – термоелектричний охолоджувач; 9 – гілки термоелектричного матеріалу *n*- і *p*-типу провідності; 10 – комутуючі пластини; 11 – електроізоляційні пластини

Таблиця 1. Вимоги до термоелектричного охолоджувача рентгенівських детекторів

Параметри	Значення
Розміри охолоджуючої площадки детектора, мм	10 × 10
Загальна товщина модуля, мм	7 ± 5
Теплові натікання, мВт	3
Робочий інтервал температур, °С	Від -70 до +20
Напруга живлення, В	5
Струм живлення, А	0,7

детектор (3). Необхідні температурні й теплові умови забезпечуються термоелектричним охолоджувачем 8 електричною потужністю W , що складається із гілок термоелектричного матеріалу n - та p -типу провідності (9), електропровідних комутуючих пластин (10) та теплопровідних електроізоляційних пластин (11). Для зменшення теплових втрат корпус детектора заповнюється інертним газом (5) та додатково встановлюються радіаційні екрани (4). Відведення теплового потоку від термоелектричного охолоджувача здійснюється через основу корпусу детектора (6) та кріплення детектора (7).

В табл. 1 наведено умови, яким повинен відповідати проєктований термоелектричний охолоджувач.

МАТЕМАТИЧНИЙ І КОМП'ЮТЕРНИЙ ОПИС ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ

Система рівнянь для опису холодильного коефіцієнту термоелектричного охолоджувача залежно від параметрів елементів фізичної моделі визначається з рівнянь теплового балансу:

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

$$\begin{cases} Q_h = \chi_2 (T_h^{(2)} - T_h^{(1)}), \\ Q_h = \chi_3 (T_h^{(1)} - T_h), \end{cases} \quad (2)$$

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

де $T_c^{(1)}$ — температура поверхні детектора, T_c — температура холодного боку термоелектричного модуля, χ_1 — тепловий контактний опір 4, $T_h^{(2)}$ — температура гарячого боку термоелект-

ричного модуля, $T_h^{(1)}$ — температура основи корпусу детектора, T_h — температура поверхні, на яку здійснюється відведення тепла, c_2 — тепловий контактний опір 5, χ_3 — тепловий опір теплообмінника з «гарячого боку» термоелектричного перетворювача, Q_c — холодопродуктивність термоелектричного модуля, Q_h — його теплопродуктивність, W_{TE} — електрична потужність термоелектричного охолоджувача.

Враховуючи вирази (1)–(3), загальне значення для визначення холодильного коефіцієнта термоелектричного охолоджувача матиме вигляд:

$$\varepsilon_r = \frac{Q_c}{W_{TE} + W_1} = \frac{\alpha I (T_c + Q_c N_1) - 0,5 I^2 R - \lambda (T_h - T_c - (Q_h + Q_c N_1))}{W_{TE} + W_1} \quad (4)$$

де α — диференціальний коефіцієнт Зеебека матеріалу, I — сила струму, R — електричний опір термоелектричного модуля, λ — середній питомий коефіцієнт теплопровідності гілок термоелектричного модуля, W_1 — потужність, що витрачається на забезпечення теплообміну, N_1 — значення, яке спрощує вираз для холодильного коефіцієнту та розраховується за формулою:

$$N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}. \quad (5)$$

Для проєктування конструкції термоелектричного охолоджувача використано пакет прикладних програм *COMSOL Multiphysics* [11]. Для виконання розрахунків рівняння фізичної моделі необхідно подати у чітко визначеному вигляді, який наведено нижче.

Для опису потоків тепла й електрики застосовано закони збереження енергії

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

та електричного заряду

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

де

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

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

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

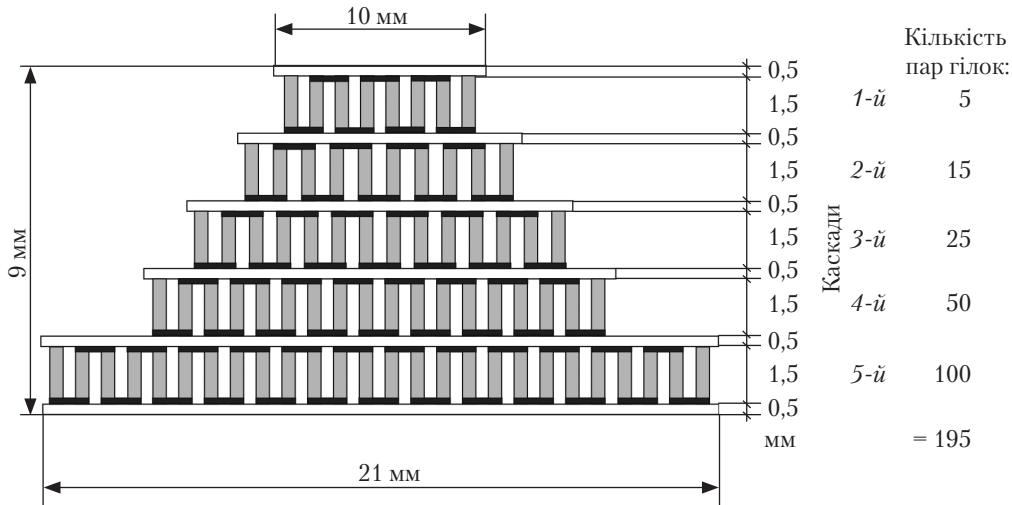


Рис. 2. Конструктивна схема проектованого термоелектричного охолоджувача для детектора рентгенівського випромінювання

У наведених рівняннях \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 (термоелектрорушійної сили), електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (9)–(10), густину потоку енергії \vec{E} можна розрахувати за формулою:

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

Тоді закони збереження енергії (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 [11] та теорії оптимального керування [12] дозволяє знайти оптимальну конструкцію термоелектричного перетворювача та залежності його характеристик.

РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Методом комп'ютерного моделювання розраховано конструкцію термоелектричного багатокаскадного модуля (рис. 2), що уможливило його використання для забезпечення температурних умов детектора рентгенівського випромінювання (табл. 2).

Виходячи з результатів розрахунків, термоелектричний охолоджувач має 5 каскадів з 5, 15, 25, 50 і 100 пар гілок термоелектричного матеріалу, його габаритні розміри – $21 \times 21 \times 9$ мм для забезпечення охолоджувальної площадки 10×10 мм. Розміри гілок термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) n - і p - типів провідності становлять $1,1 \times 1,1 \times 1,3$ мм. Електроізоляційні пластини з оксиду алюмінію (Al_2O_3) повинні

Таблиця 2. Параметри проектованого термоелектричного охолоджувача рентгенівських детекторів

Параметри	Значення
Холодопродуктивність, Q_0 , мВт	57
Температура основи детектора, $T_c^{(1)}$, °C	-70
Перепад температур, Δ , К	90
Холодильний коефіцієнт, ε	0,02
Електрична потужність, W , Вт	2,85

мати товщину 0,5 мм, а електрична комутація з міді (Cu) із антидифузійним прошарком нікелю (Ni) – 0,1 мм.

Розрахункова холодопродуктивність термоелектричного перетворювача становить $Q_0 = 57$ мВт (3 мВт – теплове навантаження від детектора та 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 $\varepsilon = 0,02$. Відповідно, споживання електроенергії таким перетворювачем становить $W = 2,85$ Вт.

Отримані результати підтверджують можливість використання термоелектричних охолоджувачів для забезпечення температурних і теплових умов детекторів рентгенівського ви-

промінювання і за своїми технічними характеристиками мають переваги перед відомими світовими аналогами [10].

Отже, виконане комп'ютерне проектування термоелектричного охолоджувача для рентгенівських детекторів дало змогу розрахувати конструкцію та характеристики термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання. Проектований елемент містить 5 каскадів з термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3 , має габаритні розміри $21 \times 21 \times 9$ мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 10×10 мм. Електрична потужність його становить $W = 2,85$ Вт, що при холодильному коефіцієнті $\varepsilon = 0,02$ забезпечує температуру основи детектора $T_c^{(1)} = -70$ °С та $\Delta T = 90$ К.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Buhay O.M., Drozdenko M.O., Storizhko V.Yu. Microanalytical X-ray facility in IAP NASU. *Presented at the conference "Nanotechnology and nanomaterials" (27–30 August 2014, Lviv)*. Lviv, 2014. P. 88–89.
2. Woldseth R. *X-Ray Energy Spectrometry*. KeveX: Scotts Valley, CA, 1973.
3. Stone R.E., Barkley V.A., Fleming J.A. 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.* 1986. NS-33(1). P. 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. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0e62/f420e0ba91f616e92c05b460188be98e8eca.pdf> (дата звернення: 19.08.2018).
5. Schlesinger T.E., James R.B. *Semiconductors and Semimetals*. Vol. 43. Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications. Academic Press: New York, 1995. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/eb10/208f629324cca0a2a3aff16de7b3cc0d44f5.pdf> (дата звернення: 19.08.2018).
6. *Semiconductors for Room-temperature Detectors. Applications II*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA, 1998. URL: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:30034710 (дата звернення: 19.08.2018).
7. Sokolov A., Loupilov A., Gostilo V. Semiconductor Peltier-cooled detectors for x-ray fluorescence analysis. *X-Ray Spectrometry*. 2004. V. 33, no. 6. P. 462–465. doi:10.1002/xrs.744.
8. X-Ray Detectors. URL: <http://www.rmtltd.ru/applications/photodetectors/xray.php> (дата звернення: 19.08.2018).
9. X-RAY and Gamma Ray Detector High Resolution CdTe Cadmium Telluride. URL: <http://www.amptek.com/wp-content/uploads/2014/04/XR-100T-CdTe-X-ray-and-Gamma-Ray-Detector-Specifications.pdf> (дата звернення: 19.08.2018).
10. Anatyshuk L.I., Vihor L.N. The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. of Thermoelectricity*. 2013. No. 5. P. 54–58.
11. COMSOL Multiphysics User's Guide. COMSOLAB. 2010. 804 p. URL: <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/pps-comsol/documents/User%20Guide%20and%20Examples/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf> (дата звернення: 19.08.2018).
12. Анагычук Л.И., Семенюк В.А. *Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов*. Черновцы: Прут, 1992. 263 p.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.12.18

Статтю прорецензовано / Revised 28.02.19

Статтю підписано до друку / Accepted 01.03.19

Anatychuk, L.I. and Prybyla, A.V.

Institute of Thermoelectricity, the NAS of Ukraine and the MES of Ukraine,
1, Nauky St., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
+380 372 24 4422, +380 372 24 1917, anatych@gmail.com

THERMOELECTRIC COOLERS FOR X-RAY DETECTORS

Introduction. X-ray methods are widely used for the nondestructive microanalytic studies of the structure and composition of materials with a high spatial resolution. Further increase in their resolution depends substantially on improving the analytical characteristics of semiconductor detectors, as well as on the application of novel types of wide-aperture position-sensitive radiation detectors.

Problem Statement. The resolution of X-ray detectors is essentially dependent on their operating temperature mode, provided by the use of thermoelectric coolers. Single-stage thermoelectric coolers (TEC) are used for superficial cooling (down to 250 K); to cool sensors to an operating temperature of 230 K two-stage TECs are used and three-stage TECs are used for temperatures down to 210 K, whereas four- and five-stage ones are meant for cooling below 190 K.

Purpose. Design and structural optimization of a thermoelectric multi-stage cooler of X-ray radiation detector.

Materials and Methods. Computer-based object-oriented design methods and optimal control theory methods adapted for thermoelectric energy conversion applications.

To develop thermoelectric cooling modules, bismuth telluride-based materials (Bi_2Te_3) of n- and p-types of conductivity have been used.

Results. Calculations of the design of the thermoelectric cooler as a part of the X-ray detector showed optimum electric power of the thermoelectric converter $W = 2.85$ W, which, with a refrigeration coefficient $\varepsilon = 0.02$, provides the detector base temperature $T_c = -70$ °C and $\Delta T = 90$ K. These temperature conditions are optimal for the operation of X-ray detectors and can significantly increase their resolution with minimal electricity consumption.

Conclusions. A comprehensive study and optimization has been performed, and the design of a thermoelectric multistage cooler has been calculated, which ensures optimal operating conditions for the X-ray detector. The obtained results can be used to create X-ray detectors with high resolution.

Keywords: computer simulation, thermoelectric cooling, and X-ray detector.