

УДК 536.24



Прибила А.В.

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

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

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

ПРОЕКТУВАННЯ 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. 12, рис. 2.

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

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Рентгенівські методи широко використовуються для неруйнівних мікроаналітичних досліджень структури і складу матеріалів з високою просторовою роздільною здатністю [1]. Сучасний стан методів ядерного мікроаналізу з використанням сфокусованих пучків іонів МеВ-них енергій з високою моноенергетичністю ($\Delta E/E = 10^{-5}$) дозволяє досягнути просторової роздільної здатності по поверхні до 100 нанометрів і до 10 нанометрів по товщині зразків. Подальше підвищення роздільної здатності суттєво залежить від покращення аналітичних характеристик напівпровідникових детекторів, а також від застосування широко-апертурних позиційно чутливих детекторів випромінювання нових типів [2].

Для підвищення роздільної здатності рентгенівських детекторів важливо вирішити задачу забезпечення оптимальної температури їх роботи [3 – 9].

Вона вирішується шляхом використання напівпровідникових термоелектричних модулів охолодження (ТМО) [5 – 9], що дозволяють забезпечити необхідну глибину охолодження в мінімальному робочому об'ємі детектора. Так однокаскадні термоелектричні модулі застосовуються для неглибокого охолодження (до 250 К), для охолодження сенсорів до робочої температури 230 К використовуються двокаскадні ТЕО, до температури 210 К – трикаскадні, до температури нижче 190 К – чотири і п'ятикаскадні ТМО [10].

Тому метою роботи є аналіз можливостей термоелектрики для охолодження рентгенівських детекторів та розробка конструкції багатокаскадного термоелектричного охолоджувача рентгенівських детекторів.

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 8, електропровідних комутуючих пластин 9, керамічних електроізоляційних пластин 10 та електричних виводів 7. Для зменшення теплових втрат всередині корпусу детектора 4 створюється вакуум. Відвід теплового потоку від термоелектричного охолоджувача здійснюється через основу корпусу детектора 5 та його кріплення 6.

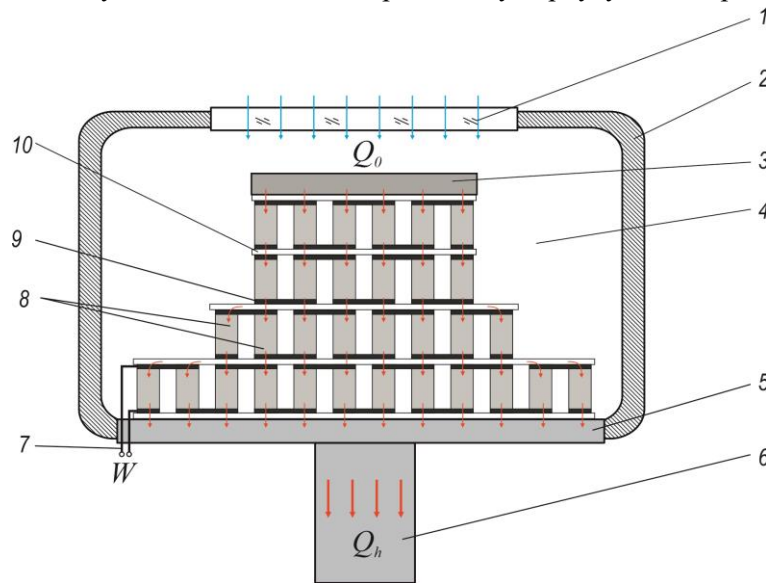


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного багатокаскадного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання: 1 – берилієве вікно; 2 – корпус приладу; 3 – детектор рентгенівського випромінювання; 4 – внутрішній простір приладу в якому створюється вакуум; 5 – основа корпусу приладу; 6 – кріплення приладу; 7 – електричні виводи; 8 – вітки термоелектричного матеріалу n - і p -типу провідності, 9 – електричні комутаційні пластини, 10 – 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 Зеєбека 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 [11] та теорії оптимального керування [12] 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.

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 – $0.6 \times 0.6 \times 1.8$ 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.

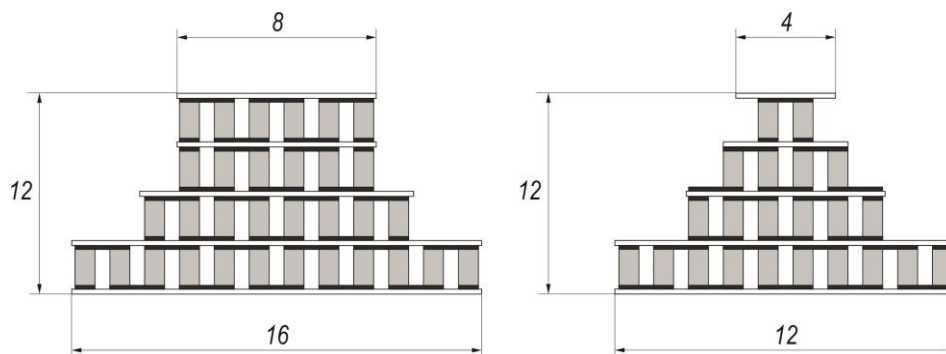


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції термоелектричного охолоджувача для детектора рентгенівського випромінювання.

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 x 16 x 12 мм при

забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4 x 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. Buhay O.M., Drozdenko M.O., Storizhko V.Yu. Microanalytical X-ray facility in IAP NASU / O.M. Buhay, M.O. Drozdenko, V.Yu. Storizhko // Nanotechnology and nanomaterials, 27-30 August 2014: Book of Abstract. – Lviv, 2014. – P. 88-89.
2. Woldseth R. X-Ray Energy Spectrometry. Kevex: Scotts Valley, CA, 1973.
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. Anatyshuk L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013, №5, p. 54-58.
11. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
12. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. – Черновцы: Прут, 1992. – 263 p.

Надійшла до редакції 19.05.2019

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

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна, e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицький національний університет імені Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна

В роботі приведені результати проектування термоелектричного многокаскадного термоелектричного модуля охолодження рентгеновських детекторів. Розроблена конструкція термоелектричного охладителя в складі детектора рентгеновського випромінювання і проаналізовані можливості його практичного використання. Бібл. 12, рис. 2.

Ключевые слова: комп'ютерне проектування, термоелектричне охолодження, рентгеновський 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;
e-mail: anatyach@gmail.com

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

DESIGN OF A THERMOELECTRIC COOLING MODULE FOR AN X-RAY DETECTOR

The paper presents the results of designing a thermoelectric multistage thermoelectric cooling module for X-ray detectors. The structure of a thermoelectric cooler as part of an X-ray detector is developed and the possibilities of its practical use are analyzed. Bibl. 12, Fig. 2.

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

References

1. Buhay O.M., Drozdenko M.O., Storizhko V.Yu. (2014). Microanalytical X-ray facility in IAP NASU. *Nanotechnology and Nanomaterials. Book of Abstracts*. Lviv.
2. Woldseth R. (1973). *X-Ray energy spectrometry*. Kevex: Scotts Valley, CA.
3. Stone R.E., Barkley V.A. and Fleming J.A. (1986). Performance of a Gamma-ray 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 TE, James RB. (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. (1998). *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA.
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.rmtld.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. Anatyachuk L.I., Vikhor L.N. (2013). The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. of Thermoelectricity*, 5, 54-58.
11. COMSOL Multiphysics User's Guide (2010). COMSOLAB, 804 p.
12. Anatyachuk L.I., Semeniuk V.A. (1992). *Optimalnoie upravleniie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal control over the properties of thermoelectric materials and instruments]*. Chernivtsi: Prut [in Russian].

Submitted 19.05.2019