

УДК 621.039.634

Ямагучі С.^{1,2}, Іванов Ю.¹, Осагара А.Г.³, Емото М.³,
Окамото Ю.⁴, Накацугава Х.⁵, Китагава Х.⁶, Хамабе М.¹,
Ватанабе Ф.¹, Сан Ж.¹ і Кавахара Т.^{1,2}

¹CASER, Університет Чубу, Аічі, 487-8501, Японія

²Кафедра ЕлектрТехн. Університет Чубу Аічі, 487-8501, Японія

³Національний інститут ядерних досліджень, Гіфу 509-5292, Японія

⁴Національна академія оборони, Йокосука, 239-8686, Японія

⁵Національний університет Йокогама, 240-8501, Японія

⁶Університет Шимане, Мацуе, 690-8504, Японія

ІДЕЯ СТВОРЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ДИВЕРТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ

Для скорочення поверхні взаємодії плазми з метою продовження часу утримання високотемпературної плазми ядерному реактору необхідна диверторна пластинка. Пластинка, що закріплюється на вакуумній камері, має бути попередньо охолодженою. Функцією дивертора є регулювання потоку плазмових частинок, для чого він розташовується в системі нагнітання (вантажній системі). Тепловий потік до диверторної пластинки ядерного реактора досить великий, майже 10 МВт/м^2 і частинки високої енергії, так само як і випромінювання плазми зазнають бомбардування на поверхні пластинки. Тепловий потік на поверхні диверторної пластинки рівний по величині тепловому потокові усередині космічної енергетичної установки, однак у тепловому потоці космічної енергетичної установки відсутні частинки високої енергії. Для видалення теплового потоку з поверхні диверторної пластинки зворотню сторону пластинки необхідно охолодити за допомогою потоку води, крім того, для реалізації теплового опору пластинка повинна бути тонкою. Внаслідок цього, перепад температур на пластині перевищує 1500 К . У справжньому експерименті вуглець і вольфрам використовуються як матеріали для виготовлення диверторної пластинки внаслідок їхньої високої теплопровідності й високої температури плавлення. Один з авторів запропонував використовувати термоелектричний дивертор для генерування електричного струму ще в 2002 р., однак коефіцієнти термоЕРС цих матеріалів, так само як і вихідна потужність, недостатньо високі. У даній роботі ми пропонуємо використовувати карбід кремнію (SiC) як новий матеріал для виготовлення термоелектричного дивертора, оскільки його теплопровідність вища від теплопровідності вольфраму, коефіцієнт термоЕРС SiC дорівнює майже 100 мкВ/К , він не плавиться і має температуру сублімації 2700 К . Ми також пропонуємо з'єднання термоелектричної емісії із системою термоелектричного генерування. Крім цього, обговорюється структура диверторної пластинки і її ККД щодо видаленню тепла й генеруванню електроенергії.

Ключові слова: термоелектричне охолодження, перетворення енергії, ядерний синтез, високотемпературні матеріали.

Fusion reactor needs a divertor plate to reduce a plasma surface interaction in order to realize long confinement time of high temperature plasmas. The plate is attached on the vacuum vessel, and it should be cooled. The function of the divertor is to control the plasma particle flow, and it is set with the

pumping system. The heat flux to the divertor plate is quite high as the order of 10 MW/m^2 in fusion reactor, and the high-energy particles and the radiation from the plasma are bombarded on the surface of the plate. The heat flux on the divertor plate is the same as the inside of the rocket engine, but the heat flux of the rocket engine does not include high-energy particles. In order to remove the heat flux from the divertor plate, the reverse side of the plate is cooled by the water flow, and the plate should be thin to realize the low thermal resistance. Therefore, the temperature difference of the plate is higher than 1500 K. Carbon and tungsten are used in the present experiment as materials for the divertor plate because they possess high thermal conductivity and high melting point temperature. One of authors proposed the thermoelectric divertor to generate electric power in 2002, however, the Seebeck coefficients of these materials are not high and the output power of the thermoelectric divertor is not high. Here, we propose to use silicon carbide (SiC) as a new material for the thermoelectric divertor again because its thermal conductivity is higher than tungsten, the Seebeck coefficient of SiC is the order of $100 \mu\text{V/K}$, and it does not melt and its sublimation temperature is 2700 K. In the paper we also propose thermionic emission combined with the thermoelectric conversion system. We discuss the structure of the divertor plate and its performance about the heat removal and electric power generation.

Key words: thermoelectric cooling, energy conversion, nuclear fusion, high temperature materials.

Вступ

Для зменшення поверхні взаємодії плазми з метою продовження часу втримання високотемпературної плазми ядерному реактору потрібна диверторна пластина [1, 2]. Для регулювання припливу частинок і нагнітання, а також температури пластини вона закріплюється на вакуумній камері, а з нею з'єднуються системи нагнітання і охолодження [3, 4]. Оскільки, згідно експериментального правила скейлінга [5, 6, 7], час утримання енергії плазми тим більше, чим більше потік плазми, тепловий потік до диверторної пластини в ядерному реакторі [8] надзвичайно великий – порядку 10 MW/m^2 , то пластина також піддається бомбардуванню частинками високої енергії. Тепловий потік на диверторній пластині такий же, як і на внутрішній стінці двигуна ракети, тому для управління ядерними експериментами і реакторами важливо видалення тепла. Диверторна пластина виготовляється з графіту і високотемпературних металів, таких, як вольфрам, молібден або композитні матеріали [9]. Ці матеріали повинні володіти високою теплопровідністю для швидкого відведення тепла потоку плазми. Вони повинні бути з'єднані з мідною пластиною, охолоджуваної, звичайно, потоком води і гелію. Отже, існує велика різниця температур на поверхні диверторної платини з боку плазми і з боку мідної пластини; воно перевищує 1500 К

Така структура й робочий режим добре підходять для генерування термоелектричної потужності внаслідок високої різниці температур, і один з наших авторів висунув ідею створення термоелектричного дивертора (ТЕД) для генерування електроенергії ще 1996 р.[10] і 2002 [11], а також ідею створення терміонного дивертора (ТД) і його структури в 1996 р. [12]. Однак, оскільки коефіцієнти термоЕРС цих матеріалів (вуглець і метали) невисокі, а їх добротність досить низька, вихідна потужність ТЕД надто маленька. У цій роботі з метою підвищення ККД ТЕД ми пропонуємо як новий матеріал використовувати карбід кремнію (SiC). Теплопровідність SiC вища, ніж у вольфраму, молібдену й вуглецю, крім того, коефіцієнти термоЕРС SiC становить майже 100 мкВ/К [13, 14, 15], внаслідок чого можна чекати більш високої вихідної напруги ТЕД. Він не плавиться, і температура його сублімації рівна $\sim 3000 \text{ К}$, тому він є високотемпературним матеріалом. Якщо встановити ТЕД на термоядерному реакторі, можна розглядати також концепцію ТД одночасно з ТЕД для збільшення виходу електричного струму. У цій роботі ми пропонуємо обговорити нову структуру диверторної пластини й оцінити її ККД щодо видалення теплоти, генеруванню електроенергії й перспективи продовження експериментів з даним приладом.

Ідея створення термоелектричного дивертора на основі SiC

Для того, щоб генерувати плазму високої температури, необхідно скоротити взаємодію плазма-стінка, для чого в 60-х і 70-х у роках минулого століття токамаках використовували лімітер. Однак матеріал, з якого виготовлений лімітер, проникає в плазму як домішка, оскільки температура поверхні лімітера може перевищувати 2500 К. Радіаційні втрати домішок досить високі, внаслідок чого час утримання енергії для термоядерного реактора обмежується і є досить нетривалим. Розроблена конфігурація дивертора в кристалах магнітного втримання, таких як, наприклад, токамак і гелікоїдальна система, для зниження рівня забруднення плазми домішками. Таку систему можна назвати магнітним лімітером, і магнітне поле основної плазми не стикається ні зі стінкою, ні із самим лімітером. Внаслідок цього плазма високої температури реалізується в конфігурації дивертора в багатьох експериментальних приладах і в цей час є стандартною магнітною конфігурацією.

На рис. 1 показано концепцію експериментів із синтезу. Він заснований на рис. 1(b) у посиланні [4]. Деякі частини рисунка змінені, наприклад, що прохолоджує канал на першій стінці дивертора в точці X означає, що величина полоїдального магнітного поля дорівнює нулю, а верхні частини точки X є основною плазмою, і все це називається конфігурацією дивертора. Точкові лінії означають магнітні поверхні, які складаються з ліній магнітного поля. Частинки плазми рухаються в основному вздовж ліній магнітного поля, і стінку, де лінії магнітного поля перетинаються, потрібно охудити для їхнього втримання. Рівень випромінювання плазми досить високий, тому першу стінку необхідно охудити. На стінці заряджені частинки плазми нейтралізуються, і їх можна відкачувати з вакуумної камери. Це важливий процес для контролю над густиною плазми. На вихідному рисунку показано, що додані термоелектричні модулі (ТЕ модулі), які з'єднані зі стінкою вакуумної камери, у якій потік частинок бомбардується, як показано на рис. 1.

ТЕ модуль складається з SiC напівпровідників n - і p -типу, з'єднаних з високотемпературним металом типу вольфраму з гарячої сторони. Холодна сторона напівпровідника з'єднана з міддю, і мідні частини охолоджуються за допомогою води. Конфігурація, у своїй основі ідентична конфігурації диверторної пластини. Плазмова сторона ТЕ модуля є його гарячою стороною внаслідок того, що температура потоку частинок плазми дуже висока і є в наявності випромінювання, тоді як інша сторона холодною. З цих причин ТЕ модуль має великий перепад температур і може генерувати електричний струм.

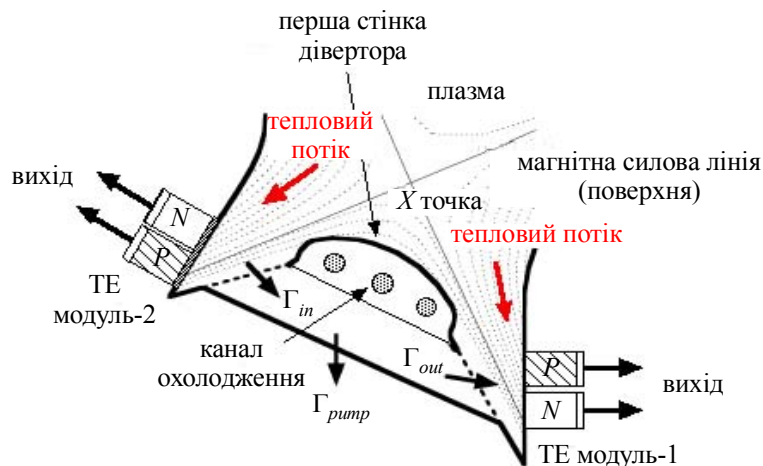


Рис. 1 Установка термоелектричного дивертора (ТЕД) і магнітна конфігурація плазми.

Функціями ТЕД повинні бути такі:

- 1) видалення тепла зі стінок вакуумної камери,
- 2) відкачування частинок плазми для контролю над густиною плазми,
- 3) генерування електричного струму.

Дві перші функції збігаються з такими у вихідного дивертора у той час як остання додана вперше. Внаслідок цього матеріал для ТЕД має високу теплопровідність і стійкість до бомбардування частинками високої енергії плазми й тепловому ударові (швидкій зміні температур) і, крім того, коефіцієнт термоЕРС повинен бути високим, а питомий опір навпаки низьким, для того, щоб генерування електроенергії стало можливим. Матеріалами для виготовлення першої стінки дивертора є вольфрам і молібден, оскільки вони мають високу точку плавлення й високу теплопровідність. Вуглець і його похідні також використовуються, оскільки також мають високу теплопровідність і можуть застосовуватися за високих температур. Однак внаслідок того, що їх коефіцієнт термоЕРС досить низький, вони не занадто добре підходять як матеріали з термоелектричної точки зору. Від цих матеріалів не слід очікувати значного виходу електроенергії.

Для розв'язку проблеми ми пропонуємо карбід кремнію, SiC. Його теплопровідність вища теплопровідності вольфраму, молібдену й вуглецю, тому він добре охолоджується й дає можливість зберегти структуру даного дивертора. Коефіцієнт термоЕРС SiC також вищий, ніж у вольфраму, молібдену й вуглецю, що робить його придатним для генерування електричного струму, як показано на рис. 1. Нині ми не маємо у своєму розпорядженні достатніх даних про характеристики SiC за високих температур, а відомі характеристики перелічені в таблиці 1. Для з'єднання напівпровідників *p*-типу й *n*-типу на гарячій стороні добре підходить вольфрам, оскільки він стійкий до бомбардування частинками високої енергії плазми, і використовується в даному експерименті. Добрим напівпровідником *n*-типу є SiC навіть у високотемпературному режимі, однак виготовлення *p*-типу викликає труднощі. Тому можливим варіантом виготовлення напівпровідника *p*-типу для високотемпературного режиму роботи є B_4C . Звичайно, вибір напівпровідника *p*-типу для високотемпературного режиму роботи не становить труднощів. Але, оскільки теплопровідність B_4C невисока, його використання в диверторі обмежене.

Таблиця 1

Характеристики високотемпературних матеріалів

Матеріал	ТП (точка плавлення) ТВ (точка возгонки) [К]	Теплопро відність [Вт/км]	Коеф. термоЕРС [мкВ/К]	Питомий опір [Ом·м]	Коментарі
Вольфрам	3695/МПа	~ 170 ≅ 300 К	< 10	5.2×10^{-8} ≅ 300 К	Для першої стінки
Вуглець	3915/SP	<u>100</u> ~ 300	< 10	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	Високотемпе-ратурна електропровід. в алмазах
B_4C [16]	2763/МПа	30 ~ 42 ≅ 300 К	~120 ≅ 1000 К	~ 0.006 ≅ 1000 К	Використовуються в ядерному реакторі
SiC	3003/SP	~ 490	> 400	< 0.0001	Нова ідея

Дуже важливо оцінити генерування електроенергії за використанням SiC. Очікувана добротність SiC, показана в таблиці 1, становитиме $\sim 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$, і це значення невелике через присутність *BiTe*, але різниця температур модуля висока і становить 1500 К, внаслідок чого ККД вихідної електроенергії не дуже низький, і його можна оцінити за допомогою такого рівняння:

$$\varepsilon = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + \frac{Z(T_H + T_C)}{2}} - 1}{\sqrt{1 + \frac{Z(T_H + T_C)}{2} + \frac{T_C}{T_H}}}, \quad Z = \frac{\alpha^2}{\kappa\rho} \quad (1)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, κ – теплопровідність, ρ – питомий опір, T_H – температура гарячої сторони елемента, T_C – температура холодної сторони елемента.

Результат розрахунків ККД показаний на рис. 2. ККД термоелектричних перетворень показаний на вертикальній осі, а на горизонтальній – коефіцієнт якості Z [%]. Якщо значення Z перевищує 10^{-5} K^{-1} , ККД більше 1 %. Отже, вихідна потужність ТЕД складе кілька сотень кВт для МТЕР розробки, а ККД перетворення може бути не низкою, оскільки перепад температур становить більше 1500 К. Більше того, охолодження дивертора може бути легким через високу теплопровідність SiC.

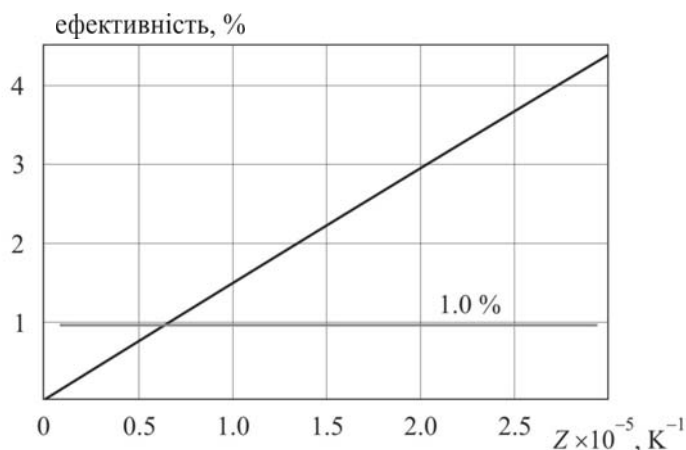


Рис. 2 ККД термоелектричного ТЕД, у якому використаний (SiC), за різниці температур 1500 К.

2. Розгляд перспектив подальшого розвитку

Ідея створення SiC ТЕД приваблива для диверторної пластини, але, на жаль, на даний момент, експериментальних даних недостатньо для роботи SiC і подібних матеріалів за високих температур. Тому описана проблема являє собою цікавий випадок для вивчення. З'єднання з металами теж важливо, і для гарячої сторони використовується вольфрам, а мідь приєднує до електрода, як показано на рис.1. У цьому змісті необхідно розвивати технологію з'єднання, що нелегко, оскільки поширення теплової енергії, як правило, різне для цих матеріалів. Плазма є одним із середовищ із електропровідністю, і питомий опір вздовж лінії магнітного поля низький, оскільки електрони в плазмі можуть легко рухатися уздовж лінії поля. У перпендикулярному напрямку магнітного поля, однак воно є високим. Більше того, питомий опір високотемпературної плазми низький. Таким чином, якщо вийде встановити ТЕД уздовж лінії магнітного поля, можна зневажити сполученням вольфрам- пластини при

виготовленні ТЕД. Однак конфігурація магнітного поля контролюється за допомогою струмів магніту й плазми. Якщо ж уважно глянути на конфігурацію дивертора на рис. 1, можна побачити багато можливих варіантів застосування ТЕД.

Ще один з варіантів використання пов'язаний з терміонною емісією [12]. Ми розташовуємо два електроди у вакуумну камеру, як показано на рис. 3. Один з них – W -пластина 1, а другий – W -пластина 2. Вони електрично з'єднані за допомогою лінії магнітного поля й плазми. Слід також стежити за тим, щоб температура поверхні W -пластини 1 була низькою, а W -пластини 2 – високою. Різниця температур між двома пластинами залежить від дизайну пластин і контролю роботи плазми й охолоджувальної системи. Система може працювати як генератор терміонної емісії, якщо приєднати її до електродів і кабелів, як показано на рис. 3.

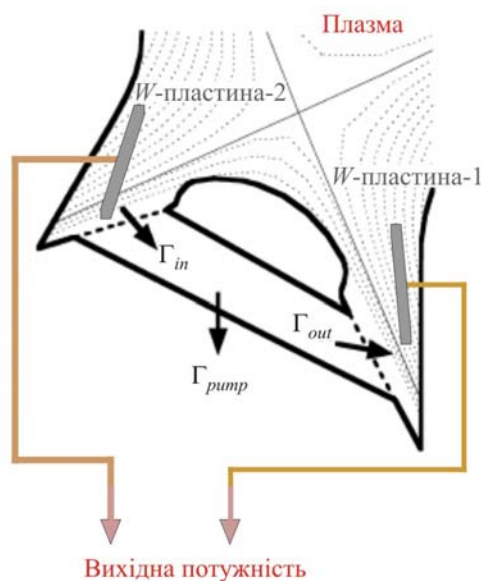


Рис. 3 Схема дивертора з підвищеною термоелектричною й терміонною емісією для підвищення вихідної потужності.

Випромінювання плазми високої температури досить сильне, внаслідок чого можна чекати терміонної емісії, посиленої фотонами, і просторовий кут між двома пластинами для плазми відрізняється на рис. 3, і це означає, що можна реалізувати різницю температур для цих двох поверхневих пластин. Якщо електричне з'єднання між двома пластинами здійснюється, термоелектричну частину можна встановити за пластинами. Внаслідок високої температури або сильного випромінювання пластина може випромінювати електрони, тоді як низькотемпературна пластина – поглинати електрони із плазми; напівпровідник p -типу слід приєднувати позаду гарячої пластини, а напівпровідник n -типу слід з'єднати з холодною пластиною. Тоді можна чекати виходу енергії як від термоелектричного, так і від терміонного перетворень, згідно із запропонованою схемою. Хорошою ідеєю є також застосування звичайної схеми, що не є термоядерним реактором.

Подяка. Автори висловлюють подяку професорові Ацуо Ййосі, ректорові університету Чубу, за підтримку дослідницьких робіт. Двоє авторів, також вдячні професорові Леву Булату, зав. кафедрою електричної інженерії й електроніки Санкт-Петербурзького Державного університету низькотемпературних і харчових технологій за підтримку, обговорення й організацію презентації на XIV Форумі з термоелектрики в м. Москва, РФ.

Література

1. Leonard A. W., Suttrop W., Osborne T. H., Evans T. E., Hill D. N., Herrmann A., Lasnier C. J., Thomas D. N., Watkins J. G., West W. P., Weinlich M., Zohm H. "Divertor heat and particle flux due to ELMs in DIII-D and ASDEX-upgrade". *J. Nucl. Materials*. **241-243** (1997) 628-632.
2. Herrmann A., Eich T., Jachmich S., Laux M., Andrew P., Bergmann A., Loarte A., Matthews G., Neuhauser J., ASDEX Upgrade team, Contributors to EFDA-JET work programme. "Stationary and transient divertor heat flux profiles and extrapolation to ITER". *J. Nucl. Materials*. **313-316** (2003) 759-767.
3. Tillack M. S., Raffray A. R., Wang X. R., Malang S., Abdel-Khalik S., Yoda M., Youchison D. "Recent US activities on advanced He-cooled W-alloy divertor concepts for fusion power plants". *Fusion Eng. Des.* **86** (2011) 71-98.
4. Kukushkin A. S., Pacher H. D., Federici G., Janeschitz G., Loarte A., Pacher G. W. "Divertor issues on ITER and extrapolation to reactors". *Fusion Eng. Des.* **65** (2003) 355-366.
5. Sagara A., Motojima O., Watanabe K., Imagawa S., Yamanishi H., Mitarai O., Satow T., TIKARAISHI H., FFHR Group. "Blanket and divertor design for force free helical reactor (FFHR)". *Fusion Eng. Des.* **29** (1995) 51-56.
6. Hill D. N. "A review of ELMs in divertor tokamaks". *J. Nucl. Materials*. **241-243** (1997) 182-198.
7. Tsunematsu T. "The scaling law of energy confinement time for ITER". *Fusion Eng. Des.* **15** (1992) 309-310.
8. Gavila P., Riccardi B., Constans S., Jouvelot J. L., Bobin Vastra I., Missirlian M., Richou M. "High heat flux testing of mock-ups for a full tungsten ITER divertor". *Fusion Eng. Des.* **86** (2011) 1652-1655.
9. Visca E., Escourbiac F., Libera S., Mancini A., Mazzone G., Merola M., Pizzuto A. "Testing of high heat flux components manufactured by ENEA for ITER divertor". *Fusion Eng. Des.* **84** (2009) 309-313.
10. Yamaguchi S. "Thermoelectric energy conversion in fusion reactor". *J. Plasma Fusion Res.* **72** (1996) 1283-1291 (in Japanese).
11. Yamaguchi S. "Thermoelectric conversion and its application for nuclear fusion". *J. Plasma Fusion Res.* **78** (2002) 19-35 (in Japanese).
12. Yamaguchi S., Ohya S., Motojima O. "A proposal for divertor cooling and electric power generation in plasma fusion device". Proc. 1996 Int. Conf. on Plasma Physics (ICPP96). Nagoya, Japan. (1996) 1394-1397.
13. Koumoto K., Seki T., Pai C. H., Yanagida H. "CVD synthesis and thermoelectric properties of boron carbide". *J. Ceram. Soc. Jpn.* **100** (1992) 853-857.
14. Arita Y., Suzuki K., Matsui T. "Development of high temperature calorimeter: heat capacity measurement by direct heating pulse calorimetry". *J. Phys. Chem. Solids*. **66** (2005) 231-234.
15. Fukuda S., Kato T., Okamoto Y., Nakatsugawa H., Kitagawa H., Yamaguchi S. "Thermoelectric properties of single-crystalline SiC and dense sintered SiC for self-cooling devices". *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 031301.
16. Bouchacourt M., Thevenot F. "The correlation between the thermoelectric properties and stoichiometry in the boron carbide phase $B_4C-B_{10.5}C$ ". *J. Mater. Sci.* **20** (1985) 1237-1247

Надійшла до редакції 25.06.12.