

УДК 621.039.634

**Ямагучи С.^{1,2}, Иванов Ю.¹, Сагара А.³, Эмото М.³, Окамото Ю.⁴,
Накацугава Х.⁵, Китагава Х.⁶, Хамабе М.¹, Ватанабе Ф.¹,
Сан Ж.¹, Кавахара Т.^{1,2}**

¹CASER, Университет Чубу, Аичи, 487-8501, Япония;

²Кафедра Электр. Техн. Университет Чубу, Аичи, 487-8501, Япония;

³Национальный институт ядерных исследований, Гифу 509-5292, Япония;

⁴Национальная академия обороны, Йокосука, 239-8686, Япония;

⁵Национальный университет Йокогамы, 240-8501, Япония;

⁶Университет Шимане, Мацуэ, 690-8504, Япония

ИДЕЯ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИВЕРТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

Для сокращения поверхности взаимодействия плазмы с целью продления времени удержания высокотемпературной плазмы, ядерном реактору необходима диверторная пластина. Пластина, закрепляемая на вакуумной камере, должна быть предварительно охлажденной. Функцией дивертора является регулирование потока плазменных частиц, для чего он располагается в системе нагнетания (грузовой системе). Тепловой поток к диверторной пластине ядерного реактора достаточно велик, порядка 10 МВт/м² и частицы высокой энергии, равно как и излучение плазмы подвергаются бомбардировке на поверхности пластины. Тепловой поток на поверхности диверторной пластины равен по величине тепловому потоку внутри космической энергетической установки, однако в тепловом потоке космической энергетической установки отсутствуют частицы высокой энергии. Для удаления теплового потока с поверхности диверторной пластины, обратную сторону пластины необходимо охладить с помощью потока воды, кроме того, для реализации теплового сопротивления, пластина должна быть тонкой. Вследствие этого, перепад температур на пластине превышает 1500 К. В настоящем эксперименте, углерод и вольфрам используются в качестве материалов для изготовления диверторной пластины вследствие их высокой теплопроводности и высокой температуры плавления. Один из авторов предложил использовать термоэлектрический дивертор для генерирования электрического тока еще в 2002 г., однако коэффициенты термоЭДС этих материалов, равно как и мощность на выходе, недостаточно высоки. В данной работе предлагается использование карбида кремния (SiC) в качестве нового материала для изготовления термоэлектрического дивертора, поскольку его теплопроводность выше теплопроводности вольфрама, коэффициент термоЭДС SiC равен порядка 100 мкВ/К, он не плавится и имеет температуру возгонки 2700 К. Предлагается также соединение термоэлектрической эмиссии с системой термоэлектрического генерирования. Помимо этого, обсуждается структура диверторной пластины и ее КПД по отводу тепла и генерированию электроэнергии.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждение, преобразование энергии, ядерный синтез, высокотемпературные материалы.

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.

Введение

Для уменьшения поверхности взаимодействия плазмы с целью продления времени удержания высокотемпературной плазмы, ядерному реактору необходима диверторная пластина [1, 2]. Для регулирования притока частиц и нагнетания, а также температуры пластины она закрепляется на вакуумной камере, а с ней соединяются системы нагнетания и охлаждения [3, 4]. Поскольку, согласно экспериментального правила скейлинга [5, 6, 7], время удержание энергии плазмы тем больше, чем больше поток плазмы, тепловой поток к диверторной пластине в ядерном реакторе [8] чрезвычайно велик – порядка 10 MW/m^2 , то пластина также подвергается бомбардировке частицами высокой энергии. Тепловой поток на диверторной пластине такой же, как и на внутренней стенке двигателя ракеты, поэтому для управления ядерными экспериментами и реакторами важно удаление тепла. Диверторная пластина изготавливается из графита и высокотемпературных металлов, таких, как вольфрам, молибден или композитные материалы [9]. Эти материалы должны обладать высокой теплопроводностью для быстрого отвода тепла потока плазмы. Они должны быть соединены с медной пластиной, охлаждаемой, обычно, потоком воды и гелия. Следовательно, существует большое различие температур на поверхности диверторной пластины со стороны плазмы и со стороны медной пластины; оно превышает 1500 K .

Такая структура и рабочий режим хорошо подходят для генерирования термоэлектрической мощности вследствие высокой разности температур, и один из наших авторов выдвинул идею создания термоэлектрического дивертора (ТЭД) для генерирования электроэнергии еще в 1996 г. [10] и 2002 [11], а также идею создания термионного дивертора (ТИД) и его структуры в 1996 [12]. Однако, поскольку коэффициенты термоЭДС этих материалов (графит и металлы) невысоки, а их добротность весьма низкая, выходная мощность ТЭД оказалась довольно низкой. В данной работе, с целью повышения КПД ТЭД, мы предлагаем в качестве нового материала использовать карбид кремния (SiC). Теплопроводность SiC выше,

нежели у вольфрама, молибдена и углерода, а коэффициент термоЭДС SiC составляет величину порядка 100 мкВ/К [13, 14, 15], вследствие чего можно ожидать более высокого выходного напряжения ТЭД. Он не плавится, температура его возгонки равна ~ 3000 К, поэтому он является высокотемпературным материалом. Если установить такой ТЭД на термоядерном реакторе, можно рассматривать также концепцию ТИД одновременно с ТЭД для увеличения выхода электрического тока. В настоящей работе предлагается и обсуждается новая структура диверторной пластины, оцениваются характеристики отвода тепла, генерирования электроэнергии и перспективы продолжения экспериментов с данным устройством.

Идея создания термоэлектрического дивертора на основе SiC

Для генерирования плазмы высокой температуры, необходимо сократить взаимодействие плазма-стенка, для этого в 1960-х и 1970-х в токамаках использовали лимитер. Однако, материал, из которого изготовлен лимитер, проникает в плазму как примесь, поскольку температура поверхности лимитера может превышать 2500 К. Радиационные потери примесей довольно высоки, вследствие чего время удержания энергии для термоядерного реактора ограничивается и является весьма непродолжительным. Разработана конфигурация дивертора в устройствах магнитного удержания, таких как, например, токамак и геликоидальная система, для снижения уровня загрязнения плазмы примесями. Такую систему можно назвать магнитным лимитером, и магнитное поле основной плазмы не соприкасается ни со стенкой, ни с самим лимитером. Вследствие этого, высокотемпературная плазма, реализуется в конфигурации дивертора во многих экспериментальных приборах, и в настоящее время является стандартной магнитной конфигурацией.

На рис. 1 показана концепция ТЭД в экспериментах по синтезу. Она основана на рис. 1 (b) в статье [4]. Некоторые части рисунка изменены, например, охлаждающий канал на первой стенке дивертора. В точке X величина полоидального магнитного поля равна нулю, а область над точкой X заполнена плазмой; все это называется конфигурацией дивертора. Точечными линиями обозначены поверхности, образованные линиями магнитного поля. Частицы плазмы движутся, в основном, вдоль линии магнитного поля, и стенку, пересекаемую линиями магнитного поля, нужно охладить для их удержания. Уровень излучения плазмы достаточно высок, поэтому первую стенку необходимо охладить. На стенке, заряженные частицы плазмы нейтрализуются и их можно откачивать из вакуумной камеры. Это важный процесс для контроля над плотностью плазмы. По сравнению с исходным рисунком, на рис. 1 добавлены термоэлектрические модули (ТЕ модули), которые соединены со стенкой вакуумной камеры, бомбардируемой потоком частиц.

ТЕ модуль состоит из SiC полупроводников n - и p -типа, соединенных с высокотемпературным металлом типа вольфрама с горячей стороны. Холодная сторона полупроводника контактирует с медью, а медные части охлаждаются с помощью воды. Конфигурация, в своей основе, идентична конфигурации диверторной пластины. Сторона ТЕ модуля со стороны плазмы является его горячей вследствие того, что температура потока частиц плазмы очень высока и наличествует излучение, тогда как его другая сторона холодная. По этим причинам ТЕ модуль имеет большой перепад температур и может генерировать электрический ток.

Функциями ТЭД должны быть следующие:

- 1) отвод тепла со стенок вакуумной камеры,

- 2) откачивание частиц плазмы для контроля над плотностью плазмы,
- 3) генерирование электрического тока.

Две первые функции совпадают с таковыми у исходного дивертора, в то время как последняя добавлена впервые. Вследствие этого, материал для ТЭД обладает высокой теплопроводностью и устойчивостью к бомбардировке частицами высокой энергии плазмы а также тепловому удару (быстрой смене температур). Кроме того, для того, чтобы генерирование электроэнергии стало возможным, коэффициент термоЭДС должен быть большим, а удельное сопротивление – низким. Материалами для изготовления первой стенки дивертора являются вольфрам и молибден, поскольку они являются высокотемпературными материалами с высокой теплопроводностью. Используются также, графит и его производные поскольку они обладают высокой теплопроводностью и могут применяться при высоких температурах. Однако, вследствие того, что их коэффициент термоЭДС довольно низок, от этих материалов не следует ожидать значительного выхода электроэнергии.

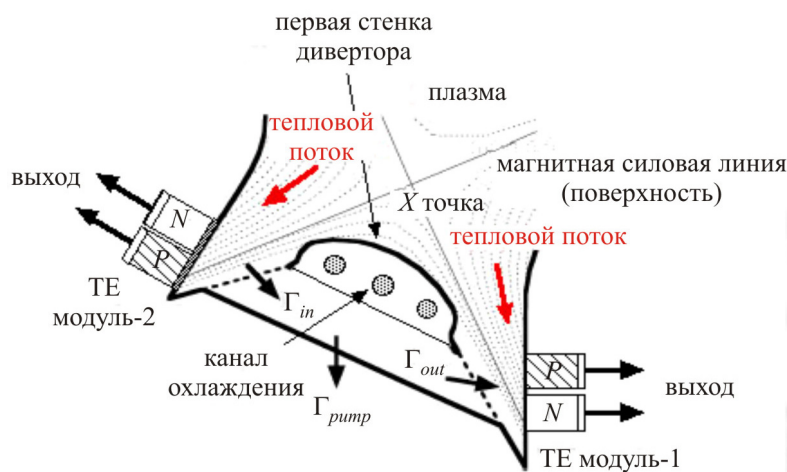


Рис. 1. Установка термоэлектрического дивертора и магнитная конфигурация плазмы.

Для решения проблемы мы предлагаем карбид кремния, SiC . Его теплопроводность выше теплопроводности вольфрама, молибдена и графита, поэтому он хорошо охлаждается и дает возможность сохранить структуру данного дивертора. Коэффициент термоЭДС SiC также выше, чем у вольфрама, молибдена и графита, что делает его подходящим для генерирования электрического тока, по схеме показанной на рис. 1. В настоящее время, мы не располагаем достаточными данными о характеристиках SiC при высоких температурах, а известные его характеристики перечислены в таблице 1. Для соединения полупроводников p -типа и n -типа на горячей стороне хорошо подходит вольфрам, поскольку он устойчив к бомбардировке частицами высокой энергии, и он используется в данном эксперименте. Хорошим полупроводником n -типа является SiC даже в высокотемпературном режиме, однако изготовление p -типа вызывает трудности. Поэтому возможным вариантом изготовления полупроводника p -типа для высокотемпературного режима работы является B_4C . Но, поскольку теплопроводность B_4C невысока, его использование в диверторе ограничено.

Очень важно оценить генерирование электроэнергии при использовании SiC . Ожидаемая добротность SiC , показанная в таблице 1, составит $\sim 10^{-5}$ [K⁻¹], и это значение невелико из-за присутствия $BiTe$, но разность температур модуля высока, и составляет 1500 К, вследствие чего КПД выходной электроэнергии не очень низкий, и его можно оценить с помощью следующего уравнения,

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

где α – коэффициент термоЭДС, κ – теплопроводность, ρ – удельное сопротивление, T_H – температура горячей стороны элемента, T_C – температура холодной стороны элемента.

Таблица 1

Характеристики высокотемпературных материалов

Материал	ТП (точка плавления) ТВ (точка возгонки) [К]	Теплопроводность [Вт/м·К]	Коэфф. термоЭДС [мкВ/К]	Удельное сопротив. [Ом·м]	Комментарии
Вольфрам	3695/ТП	~ 170 ≅ 300 К	< 10	5.2×10^{-8} ≅ 300 К	Для первой стенки
Графит	3915/ТВ	100 ~ 300	< 10	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	Высокая теплопроводность в алмазе
B_4C [16]	2763/ТП	30 ~ 42 ≅ 300 К	~120 ≅ 1000 К	~ 0.006 ≅ 1000 К	Используется в термоядерном реакторе
SiC	3003/ТВ	~ 490	> 400	< 0.0001	Новая идея

Результат расчета КПД показан на рис. 2. КПД термоэлектрических преобразований показан на вертикальной оси, а на горизонтальной – коэффициент качества Z [%]. Если значение Z превышает 10^{-5} K^{-1} , КПД больше 1%. Следовательно, выходная мощность ТЭД составит несколько сотен кВт для МТЭР разработки, а КПД преобразования может быть не низкой, поскольку перепад температур составляет больше 1500 К. Более того, охлаждение дивертора может быть легким по причине высокой теплопроводности SiC .

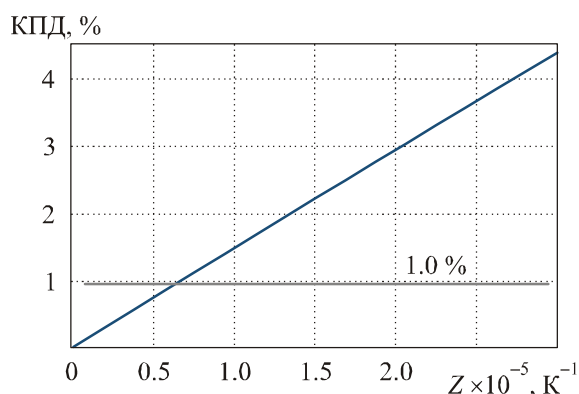


Рис. 2. КПД термоэлектрического дивертора, в котором использован (SiC), при разности температур 1500 К.

Рассмотрение перспектив дальнейшего развития

Идея создания SiC ТЭД хороша для диверторной пластины, но, к сожалению, на данный момент, недостаточно экспериментальных данных по работе SiC и подобных материалов при

высоких температурах. Поэтому описанная проблема представляет собой случай интересный для изучения. Важно также и соединения с металлами: с горячей стороны используется вольфрам, а медь подсоединяется к электроду, как показано на рис. 1. В этом смысле, необходимо развивать технологию соединения, что нелегко, поскольку скорость распространения тепловой энергии, как правило, различна в этих материалах. Плазма является одной из сред, проводящих электричество, ее удельное сопротивление вдоль линии магнитного поля малое, поскольку электроны в плазме могут легко двигаться вдоль линии поля. В перпендикулярном направлении магнитного поля, однако, оно является большим. Более того, удельное сопротивление высокотемпературной плазмы является низким. Таким образом, если получится установить ТЭД вдоль линии магнитного поля, то можно пренебречь соединением вольфрам-пластина при изготовлении ТЭД. Однако, конфигурация магнитного поля контролируется с помощью токов магнита и плазмы. Если же внимательно рассмотреть конфигурацию дивертора на рис. 1, то можно увидеть много возможных вариантов применения ТЭД.

Еще один из вариантов использования связан с термионной эмиссией [12]. Мы помещаем два электрода в вакуумную камеру, как показано на рис. 3. Один из них – W -пластина 1, а второй – W -пластина 2. Они электрически соединены с помощью линии магнитного поля и плазмы.

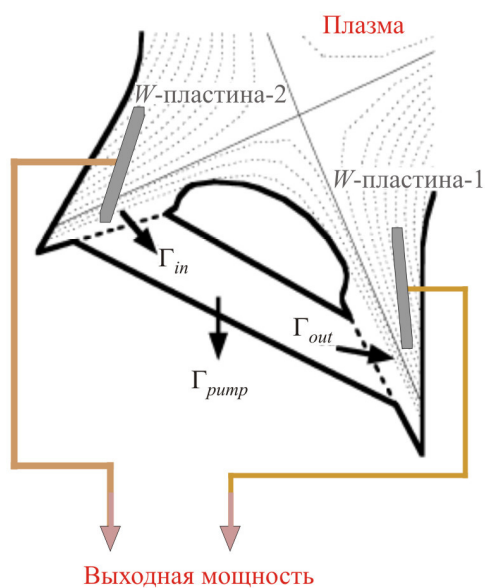


Рис. 3. Схема дивертора с повышенной термоэлектрической и термионной эмиссией для повышения выходной мощности.

Следует также следить за тем, чтобы температура поверхности пластины $W-1$ была низкой, а $W-2$ – высокой. Разность температур между двумя пластинами зависит от дизайна пластин, контроля работы плазмы и охлаждающей системы. Система может работать как генератор термионной эмиссии, если подсоединить ее к электродам и кабелям, как показано на рис. 3.

Излучение высокотемпературной плазмы весьма сильное, поэтому можно ожидать термионной эмиссии, усиленной фотонами. Если угол между W -пластиной и линиями магнитного поля у пластин 1 и 2 (рис. 3) различен, то можно реализовать разность температур на этих двух поверхностях пластин. Если между двумя пластинами осуществляется электрическое соединение, термоэлектрическую часть можно установить позади пластин. Вследствие высокой температуры и/или сильного излучения плазмы, излучающая пластина эмитирует электроны, тогда как низкотемпературная пластина – поглощает их. Присоединив полупроводник p -типа сзади горячей пластины, а полупроводник n -типа – к холодной пластине, можно ожидать выхода энергии как от термоэлектрического, так и от термионного преобразований. Хорошей идеей является также применение обычной схемы, не являющейся термоядерным реактором.

Благодарность. Авторы выражают благодарность профессору Ацуо Ийоши, ректору университета Чубу, за поддержку исследовательских работ. Авторы также благодарны профессору Льву Булату, зав. кафедрой электрической инженерии и электроники Санкт-Петербургского Государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий за поддержку, обсуждение и организацию презентации на XIV-м Форуме по термоэлектричеству в г. Москва, РФ.

Литература

1. A.W. Leonard, W. Suttrop, T.H. Osborne, T.E. Evans, D.N. Hill, A. Herrmann, C.J. Lasnier, D.N. Thomas, J.G. Watkins, W.P. West, M. Weinlich and H. Zohm, Divertor Heat and Particle Flux due to ELMs in DIII-D and ASDEX-upgrade. *J. Nucl. Materials* 241-243, 628-632 (1997).
2. A. Herrmann, T. Eich, S. Jachmich, M. Laux, P. Andrew, A. Bergmann, A. Loarte, G. Matthews, J. Neuhauser, 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, 759-767 (2003).
3. M.S. Tillack, A.R. Raffray, X.R. Wang, S. Malang, S. Abdel-Khalik, M. Yoda and D. Youchison. Recent US Activities on Advanced He-cooled W-alloy Divertor Concepts for Fusion Power Plants. *Fusion Eng. Des.* 86, 71-98 (2011).
4. A.S. Kukushkin, H.D. Pacher, G. Federici, G. Janeschitz, A. Loarte, G.W. Pacher. Divertor issues on ITER and extrapolation to reactors, *Fusion Eng. Des.* 65, 355-366 (2003).
5. A. Sagara, O. Motojima, K. Watanabe, S. Imagawa, H. Yamanishi, O. Mitarai, T. Satow, H. Tikaishi, FFHR Group, Blanket and Divertor Design for Force Free Helical Reactor (FFHR), *Fusion Eng. Des.* 29, 51-56 (1995).
6. D.N. Hill, A review of ELMs in Divertor Tokamaks, *J. Nucl. Materials* 241-243, 182-198 (1997).
7. T. Tsunematsu, The Scaling Law of Energy Confinement Time for ITER, *Fusion Eng. Des.* 15, 309-310 (1992).
8. P. Gavila, B. Riccardi, S. Constans, J.L. Jouvelot, I. Vastra Bobin, M. Missirlian, M. Richou, High Heat Flux Testing of Mock-ups for a Full Tungsten ITER Divertor, *Fusion Eng. Des.* 86, 1652-1655 (2011).
9. E. Visca, F. Escourbiac, S. Libera, A. Mancini, G. Mazzone, M. Merola, A. Pizzuto, Testing of High Heat Flux Components Manufactured by ENEA for ITER Divertor, *Fusion Eng. Des.* 84, 309-313 (2009).
10. S. Yamaguchi, Thermoelectric Energy Conversion in Fusion Reactor, *J. Plasma Fusion Res.* 72, 1283-1291 (1996) (in Japanese).
11. S. Yamaguchi, Thermoelectric Conversion and its Application for Nuclear Fusion, *J. Plasma Fusion Res.* 78, 19-35(2002) (in Japanese).
12. S. Yamaguchi, S. Ohyabu and O. Motojima, 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. K. Koumoto, T. Seki, C.H. Pai and H. Yanagida, CVD Synthesis and Thermoelectric Properties of Boron Carbide, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 100, 853-857 (1992).
14. Y. Arita, K. Suzuki and T. Matsui, Development of High Temperature Calorimeter: Heat Capacity Measurement by Direct Heating Pulse Calorimetry, *J. Phys. Chem. Solids.* 66, 231-234 (2005).
15. S. Fukuda, T. Kato, Y. Okamoto, H. Nakatsugawa, H. Kitagawa, S. Yamaguchi, Thermoelectric Properties of Single-Crystalline SiC and Dense Sintered SiC for Self-Cooling Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 031301 (2011).
16. M. Bouchacourt, F. Thevenot, The Correlation Between the Thermoelectric Properties and Stoichiometry in the Boron Carbide Phase $B_4C-B_{10.5}C$, *J. Mater. Sci.* 20, 1237-1247 (1985).

Поступила в редакцию 14.12.2011.