

УДК 533.9.082.5

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ МАКЕТОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УСТАНОВКЕ ПЛМ

Д.И. Кавыркин^{1,3}, В.П. Будаев^{1,2}, С.Д. Федорович¹, А.В. Карпов^{1,2}, В.Ф. Чиннов³, М.В. Лукашевский¹,
В. Чан Куанг¹, Е.А. Муравьева^{1,3}, А.С. Мязин^{1,3}, А.Г. Агеев⁴

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

⁴АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники» (АО «ВНИИРТ»), Москва, Россия

Объектом исследования в данной работе выступает плазма гелия низкого давления с магнитным удержанием на экспериментальном стенде МЭИ — «плазменном линейном мультикаспе» (ПЛМ). Данная установка предназначена для испытания тугоплавких материалов и макетов элементов первой стенки в обеспечение отечественной программы создания термоядерного реактора (ТИН—ДЕМО) и международного термоядерного реактора ИТЭР. В установке создаются условия плазменного воздействия на поверхность испытуемого образца, близкие по характеру и параметрам к режиму работы диверторных пластин токамака. Установка представляет собой магнитную ловушку с минимумом магнитного поля на оси, плазма в которой создаётся потоком электронов, движущихся от прямо-накального танталового катода к аноду. В установке удаётся создать стационарную гелиевую плазму и поддерживать её в течение нескольких часов при постоянных параметрах разряда: давление гелия в камере 10^{-3} — 10^{-1} торр, ток разряда 4—30 А, диаметр плазменного столба 35—40 мм, падение напряжения на разрядном промежутке 100—200 В. Тепловая нагрузка на поверхность вводимой в приосевую область плазменного столба мишени достигала 5 МВт/м². В качестве основного диагностического средства в данной работе выступает оптическая эмиссионная спектроскопия. В работе предложена методика определения на основе данных об относительных интенсивностях спектральных линий атомов металлических примесей соответствующих им концентраций.

Ключевые слова: токамак, дивертор, плазменные испытания материалов, вольфрам, материалы термоядерного реактора, диагностика, спектроскопия, концентрация.

MEASUREMENT OF ADMIXTURE CONCENTRATION IN THE NEAR-WALL PLASMA DURING TESTING OF THE FUSION REACTOR'S FIRST WALL PROTOTYPES IN THE PLM FACILITY

D.I. Kavyrshin^{1,3}, V.P. Budaev^{1,2}, S.D. Fedorovich¹, A.V. Karpov^{1,2}, V.F. Chinnov³, M.V. Lukashevskij¹,
Q.V. Tran¹, E.A. Muravieva^{1,3}, A.S. Myazin^{1,3}, A.G. Ageev⁴

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT), Moscow, Russia

⁴JSC All-Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering (VNIIRT), Moscow, Russia

This work studies low-pressure helium plasma with magnetic confinement at the experimental installation at MPEI called plasma linear multicusp (PLM). This installation is used for testing refractory materials and prototypes of the first wall elements for the construction of the national thermonuclear reactor (DEMO—FNS) and the international thermonuclear reactor ITER. The installation creates plasma impact conditions on the sample surfaces which are close in nature and parameters to the operation modes of divertor plates of a tokamak reactor. The installation is a magnetic trap with minimum on its axis in which plasma is created by a flow of electrons moving from a directly heated tantalum cathode to the anode. In the installation, it is possible to create a stationary helium plasma and maintain it for several hours at constant discharge parameters: helium pressure in the chamber 10^{-3} — 10^{-1} Torr, discharge current 4—30 A, plasma column diameter 35—40 mm, voltage drop across the discharge gap 100—200 V. This provides heat load up to 5 MW/m² on the surface of the tested sample introduced into the axial region of the plasma column. Optical emission spectroscopy serves as the main diagnostic tool in this work. This work utilizes optical emission spectroscopy as a main diagnostics method. We propose methods for determining atomic concentrations of plasma-forming gas and metallic admixtures on the data on relative intensities of atomic spectral lines.

Key words: tokamak, divertor, plasma testing of materials, tungsten, fusion materials, diagnostics, spectroscopy, concentration.

DOI:10.21517/0202-3822-2022-45-2-55-62

ВВЕДЕНИЕ

Проблема первой стенки является одной из ключевых на пути создания технологии промышленного термоядерного реактора. Подвергаясь колоссальным тепловым, плазменным и радиационным нагрузкам, материалы обращённых к плазме поверхностей токамака неизбежно подвергаются структурным из-

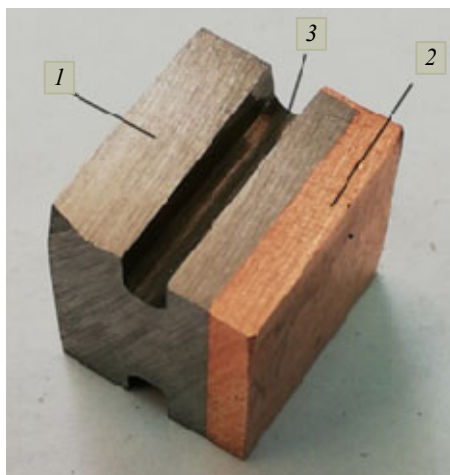


Рис. 1. Макет вольфрамового модуля облицовки дивертора: 1 — вольфрам; 2 — медь; 3 — проточка для крепления в камере установки ПЛИМ

которые необходимо отслеживать, являются концентрации атомов конструкционных материалов в приповерхностной плазме. Наиболее подходящими для решения данной задачи являются методы спектральной диагностики [6, 7]. Так, в [8] описан набор спектроскопических средств (монохроматоров с различными вариантами установленных детекторов и дифракционных решёток), использованных на токамаке T-10 для обнаружения примесных элементов в плазме, таких как углерод, вольфрам, литий и др. Аналогичные исследования проводятся на токамаке Jet для примесей углерода и бериллия [9] и для жидкометаллической стенки на основе олова и лития на установках Pilot-PSI [10] и Magnum-PSI [11]. При этом определение абсолютной концентрации примесей (количественно, а не качественно) требует очень тщательной калибровки и точного знания глубины излучающего слоя, что делает такой способ диагностики чрезвычайно сложным. Так, в работе [12] для анализа данных оптической эмиссионной спектроскопии на установке PSI-2 с учётом указанных факторов предлагается использование моделирования на основе метода Монте-Карло. На токамаке TEXTOR также использовалась оптическая эмиссионная спектроскопия для определения потока вольфрама при эрозии первой танки [13] по интенсивности спектральных линий атома и иона вольфрама. При этом применяемая методика требовала не только точного определения потока излучения из объёма, но и детальной информации о параметрах плазмы в исследуемой области пространства. В данной работе предложен метод определения концентраций примесей по относительным интенсивностям спектральных линий. В ходе проведённого эксперимента наблюдалось поступление в плазму атомов меди с подложки испытываемых образцов (см. рис. 1), и данный метод был использован для определения её концентрации.

СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

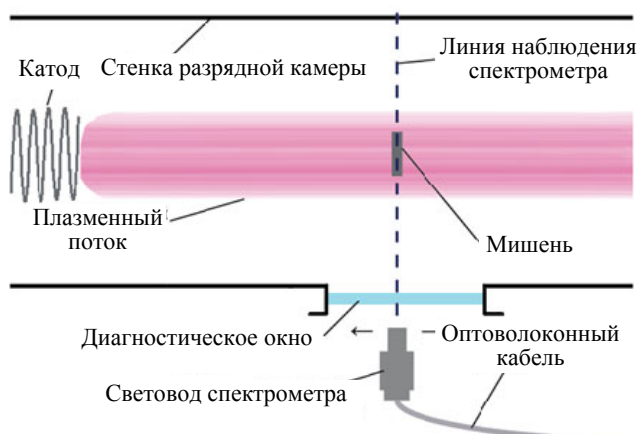


Рис. 2. Схема разрядной камеры и спектральных измерений

Макет устанавливался в центре плазменного потока между катодом и анодом (рис. 2). Для диагностики параметров плазмы в области её взаимодействия с испытываемым образцом в стенках канала установки были оборудованы смотровые окна из сапфира, обеспечивающие возможность спектральной диагностики в диапазоне длин волн 250—1100 нм. В данной статье представлены результаты одновременной регистрации оптических эмиссионных спектров излучения плазмы во всём указанном диапазоне длин волн со спектральным разрешением 0,2—1 нм с использованием четырёхканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec.

В плазменном эксперименте длительностью 50 ч плотность гелиевой плазмы составляла $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, ток разряда устанавливался от 5 до 7 А. На испытуемый макет подавался потенциал 100 В, ток ионов из плазмы на образец с площадью грани $12 \times 12 \text{ мм}$ составлял от 0,55 до 0,65 А.

На рис. 3 показаны фотографии, сделанные через смотровое окно, установленного в камере ПЛМ-М вольфрамового образца во время работы установки (см. рис. 3, а) и после выключения плазмы (см. рис. 3, б). На рис. 3, а заметна «тень» справа от образца (катод расположен слева, и образец перекрывает поток электронов, движущихся к аноду). Также обращает на себя внимание то, что поверхность вольфрама под воздействием плазмы стала насыщенно чёрной.

Средняя температура макета вольфрамового модуля измерялась в ходе эксперимента с помощью термопары, установленной в вольфрамовую часть макета, и составляла $\sim 650^\circ\text{C}$, оценка теплового потока на поверхность образца составила $0,4 \text{ МВт/м}^2$.

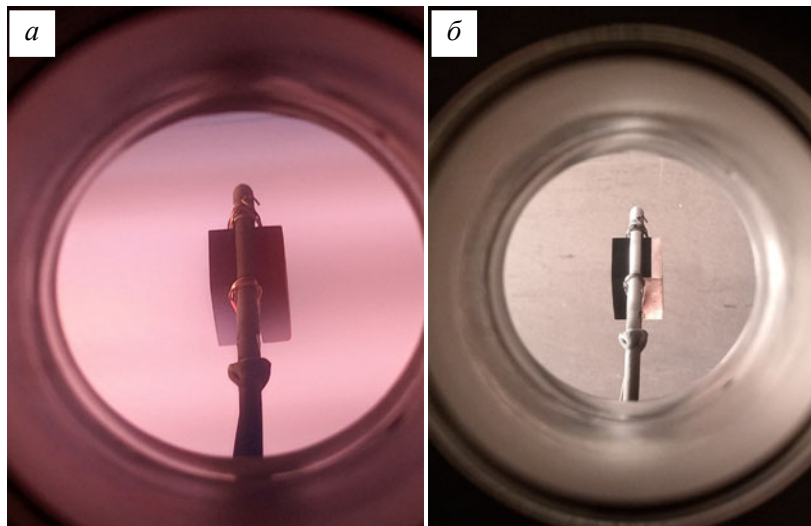


Рис. 3. Макет вольфрамового модуля облицовки дивертора во время испытаний гелиевой плазмой (а) и спустя 6 ч обработки (б)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ ГЕЛИЯ

В работе рассматривается разреженная (10^{-3} — 10^{-1} торр) электроразрядная плазма гелия вблизи разрушаемой металлической стенки — в нашем случае вольфрам на медной подложке. Среда характеризуется малой плотностью основного газа $[\text{He}] \approx 10^{13}$ — 10^{14} см^{-3} и зарядов $n \approx 10^{11}$ — 10^{13} см^{-3} , при которых определяющим механизмом уширения спектральных линий является доплер-эффект [14, 15]. Для переноса излучения в оптически плотной плазме профессор Л.М. Биберман построил модель «эффективного времени жизни» возбуждённого состояния [16], согласно которой интенсивность реабсорбированной спектральной линии, соответствующей разрешённому оптическому переходу $m \rightarrow k$, пропорциональна эффективной вероятности перехода A_{mk}^* :

$$J_{mk} = h\nu_{mk} A_{mk}^* N_m = h\nu_{mk} A_{mk} \theta_{mk} N_m, \quad (1)$$

где $h\nu_{mk}$ — энергия испускаемого кванта; A_{mk} — вероятность спонтанного перехода оптически тонкой линии; N_m — концентрация излучающих атомов в состоянии m ; θ_{mk} — вероятность вылета принадлежащего данному переходу фотона из рассматриваемой точки среды.

В нашем рассмотрении за относительную интенсивность линии J_{mk} мы принимаем результат интегрирования регистрируемой интенсивности линии (отсчитываемой от «континуума» при его наличии) по её контуру (в разреженной плазме, как правило, узкий контур разрешить не удаётся, и регистрируется аппаратный контур оптической системы). Для доплеровского контура линии, излучающей из центра протяжённого цилиндра радиусом R , вероятность вылета фотона [16]

$$\theta(k_0 R) = \frac{\sqrt{\pi}}{4k_0 R \sqrt{\ln k_0 R}}, \quad (2)$$

а коэффициент поглощения в центре этой линии

$$k_0 = \frac{\pi e^2}{mc} \frac{f_{km} N_k^{\text{полгл}}}{\Delta\nu_D} \quad (3)$$

определяется концентрацией частиц на поглощающем уровне $N_k^{\text{погл}}$, силой осциллятора перехода в поглощении f_{km} и полушириной доплеровской линии A_{mk}^*

$$\Delta\nu_D = 7,16 \cdot 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (4)$$

Здесь v_0 — частота покоящейся частицы; T — температура тяжёлых частиц, К; μ — масса излучающей частицы (в атомных единицах).

Каждая из излучающих линий плазмы характеризуется определённой оптической толщиной $\tau_0 = k_0 R$. Линии с $\tau_0 < 1$ являются оптически тонкими, для них вероятность вылета фотона $\theta = 1$, и излучение такой линии выходит из плазмы радиусом R без поглощения. Если же $\tau_0 \geq 1$, линия является оптически плотной, вероятность вылета её фотонов из среды $\theta(k_0 R) < 1$, и наблюдаемая интенсивность такой реабсорбированной линии пропорциональна эффективной вероятности перехода $A_{mk}^* = A_{mk} \theta_{mk}$.

В спектре излучения пристеночной плазмы гелия наблюдается множество спектральных линий атомов гелия и атомов меди (рис. 4).

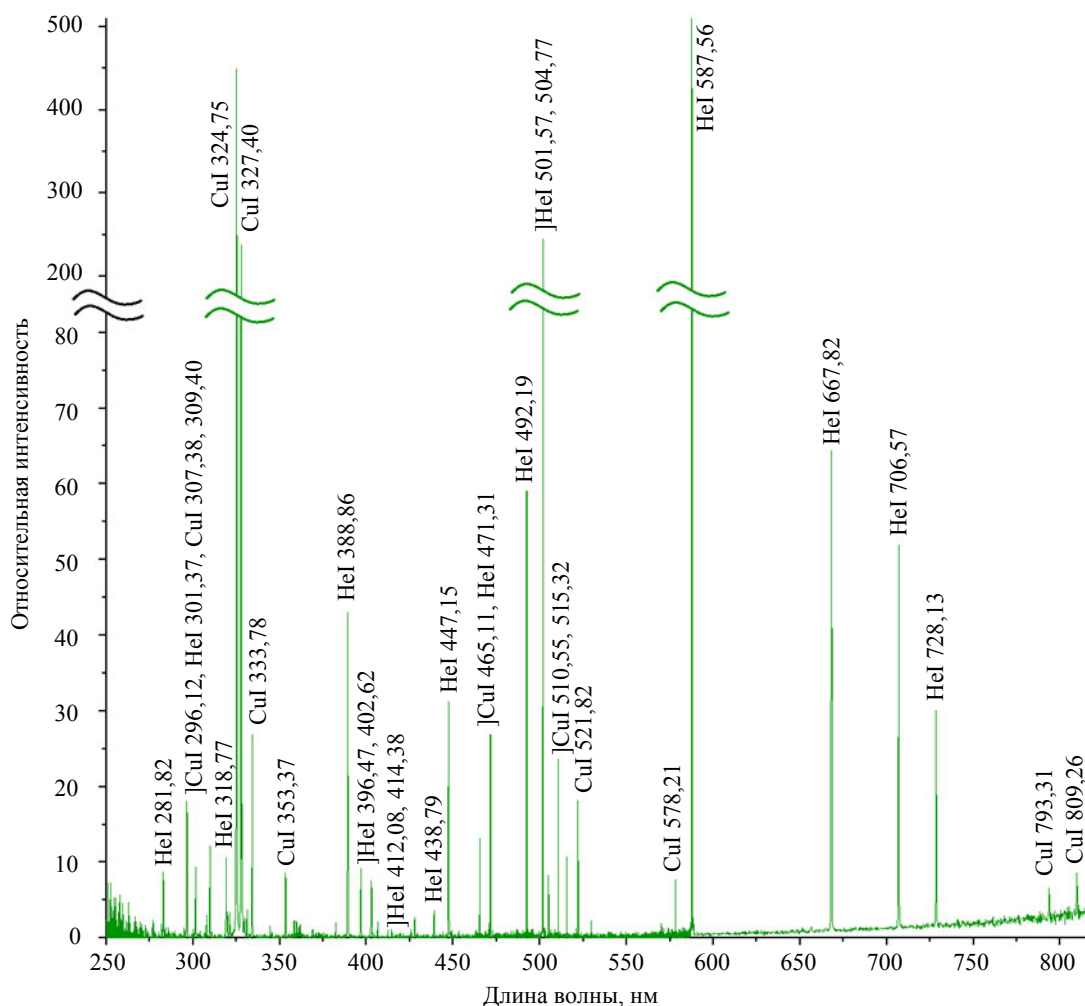


Рис. 4. Расшифровка спектра He + Cu слева от мишени (перед мишенью)

В условиях коронального равновесия, при котором расселение возбуждённых состояний осуществляется радиационно, чувствительны к реабсорбции те спектральные линии, излучающий уровень которых имеет радиационный переход в основное состояние атома, т.е. переход, характеризующийся максимальной оптической толщиной. Применительно к плазме He + Cu — это наблюдаемые в спектре резонансные линии CuI 324,7 и 327,4 нм. Уровень энергии $4p$ ($^2P_{1/2}^0$) является общим для резонансной линии CuI 327,4 нм (переход $4p \rightarrow 1s$ 2S) и линии CuI 578,2 нм (переход $4p \rightarrow 3d^9 4s^2$ $^2D_{5/2}$). В оптически тонкой

плазме его населённость может быть определена из соотношения $[N_k](E_k) = C \frac{J_{km} \lambda_{km}}{A_{km}}$ с использованием

измеренных относительных интенсивностей J_{km} и вероятностей излучательного перехода A_{km} [17]. Если же в плазме начинает играть роль поглощение, может наблюдаться значительное, за пределами ошибки измерений относительных интенсивностей, превышение населённости излучающего уровня, определённое по линии 578,2 нм, по сравнению с населённостью того же уровня, определённой по интенсивности резонансной линии 327,4 нм. Это кажущееся расхождение объясняется тем, что резонансная линия 327,4 нм отвечает переходу на нижний, наиболее населённый и потому наиболее поглощающий уровень атома меди. Поэтому для правильной оценки населённости излучающего уровня по интенсивности резонансной линии необходимо учесть возможную реабсорбцию её излучения и использовать для оценки интенсивности эффективную вероятность перехода $A_{mk}^* = A_{km} \theta_{km}$ с вероятностью вылета «резонансных» фотонов $\theta_{km} < 1$.

Анализ механизмов уширения резонансных линий меди в названных условиях показывает, что, несмотря на значительный атомный вес Cu ($\mu = 63,5$), доплеровское уширение будет преобладающим как над ван-дер-ваальсовым (при $[\text{He}] < 10^{16} \text{ см}^{-3}$), так и над резонансным (при $[\text{Cu}] < 10^{14} \text{ см}^{-3}$) уширением [14]. Наблюдаемые в спектре линии CuI 510,5 и 578,2 нм, отвечающие за переходы на метастабильные состояния, имеют общий верхний уровень с линиями 324,7 и 327,4 нм соответственно. С целью выявления эффекта «пленения» резонансного излучения проведём сравнение приведённой населённости $[N_k/g_k](E_k) = C \frac{J_{km} \lambda_{km}}{A_{km} g_k}$ уровня энергии $4p (^2P_{1/2}^0)$, энергия возбуждения 3,79 эВ, являющегося общим для резонансной линии CuI 327,4 нм (переход $4p \rightarrow 4s ^2S$) и линии CuI 578,2 нм (переход $4p \rightarrow 3d^9 4s^2 ^2D_{5/2}$).

Выполним оценку вероятности вылета фотона резонансной линии 327,4 нм, используя измеренное отношение интенсивностей рассматриваемых линий с общей (равной) населённостью их верхнего уровня N_{4p} :

$$N_{4p_{1/2}} = C \frac{578 J_{578}}{g_{4p_{1/2}} A_{578}} = C \frac{327 J_{327}}{g_{4p_{1/2}} A_{327} \theta_{4p_{1/2}-1s}}. \quad (5)$$

Разрешая равенство (5) относительно вероятности вылета «резонансного» фотона $\lambda = 327,4$ нм, получаем её численное значение $\theta_{4p-1s} = \frac{1,65 \cdot 10^6 \cdot 240 \cdot 327}{1,37 \cdot 10^8 \cdot 8 \cdot 578} = 0,20$. Решив трансцендентное уравнение (2),

оцениваем соответствующую вероятности вылета оптическую плотность плазмы $k_0 R = 2,35$ и при $R = 1,6$ см получаем значение коэффициента поглощения в центре линии 327,4 нм $k_0 = 1,5 \text{ см}^{-1}$. Согласно соотношению (3) мы можем определить концентрацию поглощающих атомов меди в основном состоянии $N_0^{\text{ногл}} = [\text{Cu}]$, если правильно оценим доплеровскую полуширину резонансной линии CuI 327,4 нм по формуле (4). Принимая температуру излучающих атомов меди соизмеримой с температурой нагрева образца (его тепловое излучение наблюдается на ИК-участке спектра) $T = 1200 \text{ К}$, $\mu = 63,54$, $\nu = 0,92 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, $\Delta \nu_D = 2,8 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, определяем по (3) значение плотности атомов меди в основном состоянии $N_0^{\text{ногл}} = [\text{Cu}] = 5,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Аналогичное сравнение интенсивностей может быть выполнено для второй резонансной линии 324,7 нм и линии 510,6 нм, также имеющих общий верхний уровень с энергией 3,82 эВ:

$$N_{4p_{3/2}} = \frac{510 J_{510}}{g_{4p_{3/2}} A_{510}} = \frac{324 J_{324}}{g_{4p_{3/2}} A_{324} \theta_{4p_{3/2}-4s}}. \quad (6)$$

Решая уравнение (6), находим значения $\theta = 0,14$, $k_0 R = 3,0$ и $[\text{Cu}] = 4,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Среднее значение плотности $[\text{Cu}] = 5,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ соответствует парциальному давлению паров меди над твёрдой поверхностью с температурой $T_w \cong 1300 \text{ К}$ в вакууме [18]. Это значение находится в хорошем согласии с использованной нами при оценке доплеровской ширины температурой атомов в исследуемом плазменном потоке.

ВЫВОДЫ

Важным направлением диагностики плазмы в термоядерном реакторе является определение концентрации металлических примесей, появляющихся в плазме при эрозии стенки реактора. В работе был предложен оригинальный, не требующий абсолютной калибровки спектрометра метод определения этого параметра путём измерения коэффициентов поглощения в центре резонансных линий металлов, излучающих в доступной области спектра (УФ и видимой). С использованием предложенного метода в работе была определена концентрация меди, поступающей в плазму при испытаниях макета модуля облицовки дивертора токамака. Оценка вероятности вылета фотонов линий резонансного дублета CuI 324,7, 327,4 нм выполнялась посредством сравнения отношений наблюдаемых интенсивностей реабсорбированных резонансных линий и оптически тонких линий CuI 510,5 и 578,2 нм с общей (а потому и равной) населённостью их излучающих уровней $N_{4p1/2}$ и $N_{4p3/2}$. Разрешая равенства (5) и (6) относительно неизвестных вероятностей вылета «резонансных» фотонов $\lambda = 324,7, 327,4$ нм, были получены два её численных значения θ , уравнением (2) связанных с коэффициентом поглощения в центре резонансных линий k_0 , который однозначно с помощью соотношения (3) позволяет установить два искомых значения концентрации атомов меди $[Cu] \approx \{4,8—5,7\} 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Области применимости модели «эффективного времени жизни» [16] $k_0 R = 2—50$ соответствует диапазон измеряемых предложенным методом концентраций паров меди $10^{11}—10^{12} \text{ см}^{-3}$, отвечающий ожидаемым концентрациям электронов и соответствующий температуре нагрева образца под воздействием потока гелиевой плазмы.

Таким образом, рассмотренный метод оценки концентрации металлических примесей в разреженной ($10^{-1}—10^{-3}$ торр) плазме гелия требует для своей реализации лишь легко измеряемого отношения интенсивностей двух атомных линий металла — резонансной и нерезонансной с общим излучающим уровнем, обеспечивая приемлемую для сильно неравновесной плазмы погрешность около 20%. Данный метод имеет широкое поле применения благодаря небольшим энергиям ионизации атомов металлов (4—8 эВ), приводящим к сосредоточенности спектров их излучения в удобном для наблюдений УВИ-диапазоне длин волн.

Спектроскопическое исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 21-79-10281 «Спектроскопия высокого разрешения для диагностики приповерхностной плазмы при взаимодействии мощных потоков неравновесной замагниченной плазмы со стенкой», работы по генерации плазмы на ПЛМ выполнены при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITER Physics Basis. — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, № 12, p. 2561.
2. Ueda Y., Coenen J.W., De Temmerman G., Doerner R.P., Linke J., Philipps V., Tsiatroni E. Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond. — Fusion Engineering and Design, 2014, vol. 89, Issues 7—8, p. 901—906.
3. Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S. Physics basis for the first ITER tungsten divertor. — Nuclear Materials and Energy, 2019, vol. 20, p. 100696.
4. Будаев В.П., Федорович С.Д., Мартыненко Ю.В., Лукашевский М.В., Губкин М.К., Карпов А.В., Лазукин А.В., Шестаков Е.А., Кавыркин Д.И., Rogozin K.C. Плазменная установка ПЛМ для испытаний вольфрама мощными стационарными плазменно-тепловыми нагрузками. — Ядерная физика и инжиниринг, 2018, т. 9, № 3, с. 283—294.
5. Будаев В.П., Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., Губкин М.К., Карпов А.В., Лазукин А.В., Шестаков Е.А. Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23—36.

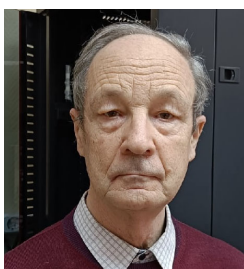
6. **Belevtsev A.A., Kavyrshin D.I., Sargsyan M.A., Chinnov V.F., Efimov A.V., Shcherbakov V.V.** Spectral diagnostics of plasma in the zone of its destructive interaction with heat-resistant materials. — *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018, vol. 51, p. 484002 (13 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aadccc>.
7. **Coenen J.W. et al.** — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 073043.
8. **Немец А.Р., Крупин В.А., Ключников Л.А., Нурғалиев М.Р., Тройнов В.И., Земцов И.А., Образцов И.С., Сергеев Д.С.** Исследование примесного состава плазмы в экспериментах с углеродным, вольфрамовым и литиевым лимитерами на Т-10. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2017, т. 40, вып. 2, с. 23—28.
9. **Sertoli M., Carvalho P., Giroud C., Menmuir S.** Measuring the plasma composition in tokamaks with metallic plasma-facing components. — *J. of Plasma Physics*, 2019, vol. 85(5), p. 905850504; doi: 10.1017/S0022377819000618.
10. **Van Eden G.G., Kvon V., van de Sanden M.C.M., Morgan T.W.** Oscillatory vapour shielding of liquid metal walls in nuclear fusion devices. — *Nature Communications*, 04 August 2017; doi: 10.1038/s41467-017-00288-y.
11. **Morgan T.W. et al.** Liquid metals as a divertor plasma-facing material explored using the Pilot-PSI and Magnum-PSI linear devices. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2018, vol. 60, p. 014025.
12. **Eksaeva A., Marenkov E., Borodin D., Kreter A., Reinhart M., Kirschner A., Romazanov J., Terra A., Brezinsek S., Nordlund K.** ERO modelling of tungsten erosion in the linear plasma device PSI-2. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, p. 253—260.
13. **Brezinsek S. et al.** Spectroscopic determination of inverse photon efficiencies of W atoms in the scrape-off layer of TEXTOR. — *Phys. Scr.*, 2017, p. 014052.
14. **Собельман И.И.** Введение в теорию атомных спектров. — М.: Физматлит, 1963.
15. **Очкин В.Н.** Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2006.
16. **Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.** Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1982.
17. **Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team.** NIST Atomic Spectra Database, 2021, ver. 5.9, [Online]. — Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2022, February 27]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; doi: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>.
18. **Dushman S.** Scientific Foundations of Vacuum Technique. Second Edition. — N.-Y., London. 1962.



Дмитрий Игоревич Кавыршин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ОИВТ РАН, 125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, Россия; доцент; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия dimakav@rambler.ru



Вячеслав Петрович Будаев, в.н.с., д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; профессор; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия budaev@mail.ru



Сергей Дмитриевич Федорович, к. техн. н., доцент; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия



Алексей Владиславович Карпов, ведущий инженер; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия; ведущий инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



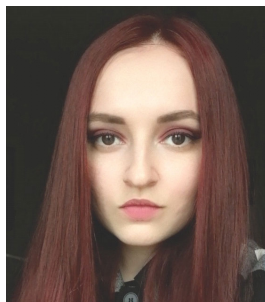
Валерий Федорович Чиннов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник; ОИВТ РАН, 125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, Россия



Михаил Владимирович Лукашевский, к. техн. н., доцент; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия



Винь Чан Куанг, аспирант; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия



Евгения Андреевна Муравьева, инженер; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия; стажер-исследователь; ОИВТ РАН, 125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, Россия



Алексей Сергеевич Мязин, инженер; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 14, Россия; стажер-исследователь; ОИВТ РАН, 125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, Россия



Алексей Геннадиевич Агеев, ведущий инженер; ВНИИРТ, 105082 Москва, ул. Б. Почтовая 22, Россия

Статья поступила в редакцию 15 января 2022 г.

После доработки 16 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 55—62.