

УДК 533.9.082.5

КОНЦЕПЦИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД*Г.А. Саранча^{1, 2}, А.С. Дрозд^{1, 3}, М.С. Кудашев³, Д.С. Сергеев¹*¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Россия³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Классические методы измерения тока в плазме токамака, основанные на эффекте электромагнитной индукции Фарадея (пояс Роговского) или эффекте Холла (датчик Холла), имеют ряд недостатков, которые могут наиболее остро проявиться в стационарных режимах работы токамака-реактора (сильные рассеянные поля, работа в длительном импульсе с постоянным током плазмы). Для обеспечения надёжности измерений может потребоваться использование датчиков тока, основанных на иных физических принципах. Таким датчиком может быть оптоволоконный датчик тока (ОДТ), основанный на магнитооптическом эффекте (эффекте Фарадея). В данной работе проведён анализ международного опыта использования ОДТ для измерения тока плазмы (токамаки JET, EAST, Tore-Supra и др.) и, основываясь на нём, предложена концепция улучшенной схемы измерений ОДТ для токамака Т-15МД. Предлагаемая отражательная (двухпроходная) схема ОДТ, работающего по принципу интерферометра с зондированием на промежуточной частоте, позволит проводить измерения во всём проектном диапазоне токов плазмы (до 2 МА) с погрешностью 0,5 кА и временным разрешением 100 мкс.

Ключевые слова: токамак Т-15МД, диагностика плазмы, оптоволоконный датчик тока, эффект Фарадея, фазометр.

FIBER-OPTICS CURRENT SENSOR CONCEPT FOR THE T-15MD TOKAMAK*G.A. Sarancha^{1, 2}, A.S. Drozd^{1, 3}, M.S. Kudashev³, D.S. Sergeev¹*¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²Moscow Institute of Physics and Technology (NRU), Dolgoprudny, Russia³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Classic methods for plasma current measurement in tokamaks, based on the Faraday's law of induction (Rogowski coil) or the Hall effect (Hall sensor), have a number of disadvantages that can be most acute in fusion reactor steady-state operating regimes (strong stray fields, operation in a long pulse with a constant plasma current). To ensure reliability of the measurements, the use of current sensors based on other physical principles may be required. Such a sensor is a fiber-optic current sensor (FOCS), based on the magneto-optic effect (Faraday effect). The analysis of international experience in FOCS application for plasma current measurements (JET, EAST, Tore-Supra tokamaks etc.) was carried out in this work. Based on analysis, the concept of an improved FOCS measurement scheme for the T-15MD tokamak was proposed. The proposed FOCS reflective (double-pass) circuit, operating on the interferometer principle with probing at an intermediate frequency, make it possible to carry out measurements over the entire designed range of plasma currents (up to 2 MA) with an error of 0.5 kA and a time resolution of 100 μ s.

Key words: tokamak T-15MD, plasma diagnostics, fiber-optic current sensor, Faraday effect, phasemeter.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-3-25-35

ВВЕДЕНИЕ

Для токамака-реактора будущего, работающего в квазистационарном или даже стационарном режиме, когда все макроскопические параметры плазмы не изменяются во времени, важно наличие диагностических комплексов, также работающих в этом режиме. Ток плазмы является одним из главных параметров работы термоядерного реактора, поэтому надёжный контроль за его значением является ключевым аспектом в вопросах безопасной эксплуатации установки [1]. К сожалению, у используемых в настоящее время диагностических методов измерения тока плазмы, основанных на законе электромагнитной индукции Фарадея (пояс Роговского и магнитные зонды) или на эффекте Холла (датчик Холла), есть существенные недостатки, ставящие под сомнение возможность их работы в стационарном режиме токамака-реактора. Индуктивные датчики измеряют производную полоидального магнитного потока, порождённого плазмой, а значит их сигнал требует интегрирования. Под действием сильной радиации с интегратором или системой преобразования в цифровой сигнал могут произойти необратимые изменения, что приведёт к увеличению шума, и интегральный сигнал будет «дрейфовать» относительно своего

реального значения [2, 3]. Особенно это заметно во время стационарной стадии разряда, когда ток плазмы поддерживается постоянным. В случае датчика Холла проблемы возникают из-за локальности его измерений: он регистрирует все магнитные поля как тока плазмы, так и рассеянные поля установки. Попытка извлечь информацию только об одной компоненте поля для большого набора датчиков неизбежно приведёт к большой ошибке вычислений. По этой причине для работы токамака в режиме «длинного импульса» со значительной стационарной составляющей необходимо использование датчика, позволяющего проводить измерение тока плазмы исходя из иных физических принципов. Таким датчиком является оптоволоконный датчик тока (ОДТ).

Установка токамак Т-15МД — крупнейшая в России термоядерная установка с большим радиусом $R = 1,48$ м и малым радиусом $a = 0,67$ м. Согласно проекту она рассчитана на проведение плазменного разряда с током по плазме до 2 МА при тороидальном магнитном поле 2 Тл и длительностью плазменного разряда до 10 с [4]. В настоящей работе обсуждается концепция ОДТ для обеспечения надёжности измерений поясом Роговского в крейсерских режимах работы Т-15МД. В статье кратко обсуждаются физический принцип работы диагностики и способы её реализации, представлен анализ опыта работы с ОДТ на различных мировых установках, описана предлагаемая схема проведения измерений на токамаке Т-15МД. Приводятся основные характеристики предлагаемой схемы.

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ОДТ

Физический принцип работы ОДТ (англ. FOCS — Fiber optics current sensor) основан на обратном эффекте Зеемана — расщеплении линий поглощения вещества во внешнем магнитном поле. Внешнее магнитное поле расщепляет резонансную частоту вещества ω_0 на две, связанные с направлением вращения электронов атома по отношению к направлению распространения электромагнитной волны (лево- и правовращающиеся, L и R соответственно). Таким образом, для волн с различными состояниями поляризации существуют различные коэффициенты преломления:

$$n_L^2(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - \Delta\omega_0^2} > n^2(\omega); \quad (1)$$

$$n_R^2(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + \Delta\omega_0^2} < n^2(\omega), \quad (2)$$

где n — коэффициент преломления среды; $\Delta\omega_0$ — изменение резонансной частоты, связанное с ларморовской частотой вращения электронов во внешнем магнитном поле; ω — циклическая частота электромагнитной волны. Любую линейно поляризованную волну можно представить совокупностью двух циркулярно поляризованных волн, вращающихся в противоположных (ортогональных) направлениях. Если линейно поляризованная волна будет распространяться в веществе, помещённом во внешнее магнитное поле, то между компонентами волны возникнет разность хода, обусловленная различием коэффициентов преломления, что приведёт к повороту угла плоскости поляризации линейно поляризованной волны на угол:

$$\varphi_F = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_L - n_R), \quad (3)$$

где λ — длина электромагнитной волны; l — длина пути, пройденного излучением. Этот угол называется углом Фарадея, а эффект вращения плоскости поляризации линейно поляризованного излучения во внешнем магнитном поле — эффектом Фарадея. При этом угол Фарадея оказывается пропорционален интегралу скалярного произведения вектора магнитного поля и пути, пройденному излучением:

$$\varphi_F = \int_{\ell} V(\omega) \mathbf{B} d\mathbf{l}, \quad (4)$$

где φ_F — угол Фарадея; \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля; $d\mathbf{l}$ — элемент пути, по которому ведётся интегрирование; V — постоянная Верде, измеряемая в рад./А и определяемая магнитооптическими свойствами вещества. Величина V зависит от состава материала волокна и оптической длины волны, намного слабее она зависит от температуры диэлектрического вещества [5].

Основой современного оптического метода измерения электрического тока является эффект Фарадея в специальном кварцевом волоконном световоде, который опоясывает токовый канал замкнутым контуром. В данном случае световод используется и как средство доставки излучения, и как чувствительный элемент (с момента открытия эффекта Фарадея до середины XX века излучение подводилось к чувствительному элементу по воздуху [6]. Как следствие, измерение магнитного поля проводилось локально и было чувствительно к внешним полям). Такая конфигурация позволяет исключить влияние внешних токов на регистрируемый угол Фарадея, так как по теореме о циркуляции магнитного поля он линейно зависит только от величины тока I , протекающего внутри замкнутого контура (и не зависит от внешних токов), и количества витков N световода вокруг токового канала:

$$\varphi_F = VNI. \quad (5)$$

Это свойство позволяет использовать только достоинства пояса Роговского (получение сигнала только от токов, пронизывающих контур) и датчика Холла (измерение магнитного поля, а не его производной). Кроме того, в ряд достоинств, выделяющих ОДТ по сравнению с электромагнитными датчиками, можно записать:

— отсутствие необходимости гальванической развязки от установки, поскольку оптические волокна являются диэлектриками [7];

— быстродействие, ограниченное скоростью распространения света по оптическому волокну, в то время как на измерения электромагнитных диагностик существенное влияние оказывает постоянная времени вакуумной камеры [8].

Примечательным свойством эффекта Фарадея является его взаимность по отношению к направлению распространения — угол Фарадея зависит только от направления магнитного поля, но не от направления излучения. Если, отразив зеркалом луч, заставить его пройти через намагниченное вещество ещё раз в обратном направлении, поворот плоскости поляризации удвоится [9].

В самом простом случае угол Фарадея измеряют по поляриметрической схеме. Поляриметр состоит из двух линейных поляризаторов и расположенного между ними чувствительного элемента. После прохождения первого поляризатора излучение попадает в чувствительный элемент, в котором происходит вращение поляризации вследствие эффекта Фарадея, и затем проходит через выходной поляризатор. Интенсивность излучения на детекторе у выхода поляриметра определяется законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha + \varphi_F), \quad (6)$$

где I_0 — входная интенсивность излучения; I — выходная; α — угол пропускания выходного поляризатора относительно входного. Из-за периодичности аппаратной функции такой схемы вблизи экстремумов теряется чувствительность измерений и становится невозможным измерить направление изменения угла Фарадея. К тому же при наличии колебаний амплитуды интенсивности излучения (как входного, так и выходного), не связанных с поворотом поляризации, схема не сможет идентифицировать их как паразитные и перенесёт их влияние на угол Фарадея [10].

Для того чтобы справиться с потерей чувствительности вблизи точек экстремума аппаратной функции, используется квадратурный метод детектирования, заключающийся в измерении двух выходных интенсивностей. После чувствительного элемента излучение разделяется на два канала, в которых разрешённые направления выходных поляриметров расположены ортогонально, таким образом происходит измерение двух компонент вектора поляризации:

$$I_1 = I_0 \cos^2(\alpha + \varphi_F); \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 \cos^2(90^\circ + \alpha + \varphi_F) = I_0 \sin^2(\alpha + \varphi_F).$$

Таким образом, когда один канал попадает в «зону нечувствительности», второй как раз из неё выходит. Однако это не спасает от неопределённости в вычислении направления изменения угла поляризации и не избавляет от чувствительности к колебаниям интенсивности.

Следующим шагом в попытках ухода от отрицательных эффектов периодичности аппаратной функции стало использование дополнительного фарадеевского контура — дополнительных витков вокруг компенсационного проводника тока. Когда сигнал детектора начинает уходить в область потери чувствительности, система обратных связей изменяет ток в компенсационном проводнике таким образом, чтобы полный угол Фарадея (сумма углов от измеряемого и компенсационного токов) снова лежал в области наибольшей чувствительности [11]. Тем самым на систему накладываются высокие требования по быстродействию: определение уровня допустимого сигнала, принятие решения о необходимости его корректировки и изменение тока в компенсационном проводнике должны быть значительно быстрее характерных времён изменения тока в плазме токамака.

Для уменьшения относительной погрешности измерений и снижения влияния амплитудных колебаний сигнала используются различные интерферометрические подходы. Например, у интерферометра Саньяка [12] базовый принцип работы состоит в том, что две одинаково поляризованные волны света распространяются по одному и тому же оптическому пути, но во встречных направлениях. При этом влияние таких эффектов, как внешние механические или температурные воздействия, на обе волны оказывается одинаковым, поэтому разность фаз между ними оказывается обусловлена только эффектом Фарадея.

МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОДТ

Первые результаты применения ОДТ для измерения тока плазмы были опубликованы в работе [13], в которой представлены измерения с установки ZT-40. Схема измерений основывалась на квадратурном методе детектирования. На вход в одномодовое волокно поляризатор передавал линейно поляризованное излучение He—Ne-лазера с длиной волны $\lambda = 633$ нм. После прохождения через волокно свет анализировался светоделителем Томпсона, разделяющим ортогональные состояния линейной поляризации, интенсивности которых затем измеряются фотодиодами. В результате экспериментов было показано хорошее согласие с измерениями с помощью пояса Роговского [13, рис. 3], однако было указано на чувствительность такой оптической схемы к вибрациям установки, которая в дальнейшем была уменьшена виброразвязкой.

Следующая работа [14], посвящённая реализации ОДТ на токамаке ФТ-1, описывает аналогичную оптическую схему (лазер $\lambda = 633$ нм), что и на установке ZT-40. С помощью ОДТ на токамаке ФТ-1 были проведены измерения как тока плазмы, так и токов в катушках вертикального поля. Как и ожидалось, осциллограммы токов в управляющих витках оказались гладкими, без флуктуаций [14, рис. 2], в то время как ток плазмы продемонстрировал наличие значительных колебаний [14, рис. 3], присутствие которых не было замечено поясом Роговского. Ключевым выводом работы была необходимость вибрационной развязки лазерного блока ОДТ с вакуумной камерой для уменьшения механических шумов.

В крупных термоядерных установках для минимизации шума пользуются взаимностью эффекта Фарадея, при котором проход излучения в прямом и обратном направлении удваивает угол Фарадея и компенсирует шумы от наведённого механического двулучепреломления (отражательный интерферометр Саньяка) [15]. Для реализации таких двухпроходных оптических схем используется ротатор (зеркало) Фарадея, помещаемый в конце волоконного витка. Таким образом в прямом и обратном направлениях излучение распространяется по одной волоконной линии. К тому же это упрощает монтаж за счёт линейной конфигурации схемы.

В токамаке Tore-Supra [16, 17] использование режима работы ОДТ с отражением от зеркала Фарадея, как и ожидалось, обеспечивает вдвое лучшее отношение сигнал/шум. Также на протяжении 1,5 лет эксперимента проводился анализ стабильности постоянной Верде используемого оптического волокна при неизменной длине волны лазера $\lambda = 1550$ нм. Она вычислялась как коэффициент пропорциональности между током, измеренным поясом Роговского, и углом Фарадея, измеренным ОДТ. Оказалось, что

температурный режим камеры, условия эксперимента (вибрации, срывы и т.д.) не оказали заметного влияния на постоянную Верде: вариация составила 0,6% от стандартной для заявленного волокна величины $V = 0,7$ рад/МА [16, рис. 4].

В токамаке JET [18, 19] проводилось исследование длительного влияния радиационного излучения на работу однопроходного ОДТ. Длительное облучение (3 МГр γ -облучения в течение 4700 ч) привело к радиационно-активированному увеличению поглощения до уровня 0,4 дБ/км с последующим быстрым уменьшением до установленных 0,25 дБ/км при прекращении облучения. Изменение постоянной Верде при этом не превысило 0,01%. Во время нормальной работы температура вакуумной камеры токамака JET составляет примерно 200 °С, а во время прогрева может достигать 320 °С в течение нескольких недель. В ходе испытаний оптоволокна (без полиимидного слоя, хотя авторы рекомендуют не рисковать и использовать термостойкие покрытия) было установлено, что волокно может выдерживать температуру до 300 °С, если находится в атмосфере инертного газа. Из этого следует, что оптоволоконный датчик тока подходит к условиям токамака ИТЭР или токамака-реактора, поскольку обладает принципиально необходимыми для этого свойствами: производит прямое измерение тока, радиационно и термически устойчив. При статистическом сравнении результатов работы пояса Роговского и ОДТ было продемонстрировано, что ОДТ успешно работает на токамаке JET: при токах плазмы до 3 МА средняя погрешность измерения тока не превышала 9 кА [18, рис. 15].

Оптоволоконный датчик токамака EAST [20] работает в двухпроходном (отражательном) режиме с круговой поляризацией. Источником света, используемым в работе ОДТ, является одномодовый лазер с длиной волны $\lambda = 1310$ нм, на этой длине постоянная Верде измерительного оптоволокна составляет около 1,1 рад/МА. Таким образом, максимальное значение угла фарадеевского вращения в экспериментах EAST составляет около 1 рад. Для того чтобы детектор правильно определял направление изменения угла Фарадея, в схему ОДТ включён фазовый модулятор, вводящий в поляризацию зондирующего излучения сдвиг $\pm\pi/2$ (так называемое «измерение со смещённой рабочей точкой»). В заключении говорится, что с точки зрения соотношения сигнал/шум ОДТ работает намного лучше, чем пояс Роговского, а также успешно реагирует на быстрое изменение тока во время срыва плазмы [20, рис. 8].

Стоит отметить, что в настоящее время ведутся работы по разработке ОДТ для международного термоядерного проекта ИТЭР [21, 22]. Всё описанное (суммировано в таблице) даёт возможность разработать концепцию оптоволоконного датчика для токамака T-15MD.

Характеристики оптоволоконных датчиков тока, реализованных на различных установках

Установка	Тип датчика	Постоянная Верде, рад/МА	Длина волны лазера, нм	Мощность лазера, мВт
ZT-40	Однопроходный	4,68	633	0,2
ФТ-1	Однопроходный	4,68	633	1,5
Tore Supra	Двухпроходный (отражательный)	0,71	1550	20
JET	Одно-, двухпроходный (отражательный)	0,70	1550	20
EAST	Двухпроходный (отражательный)	1,10	1310	2
ИТЭР	Двухпроходный (отражательный)		Нет данных	

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА ОДТ ДЛЯ ТОКАМАКА T-15MD

Для токамака T-15MD предлагается схема двухпроходного ОДТ, работающего по принципу интерферометра с зондированием на промежуточной частоте.

Недостатком поляриметрической схемы измерений угла Фарадея является наличие двух детекторов для независимой регистрации ортогональных компонент поляризации. При таком подходе колебания выходной амплитуды сигналов фотодетекторов (например, из-за аппаратной задержки или нескомпенсированных вибраций установки) будут интерпретироваться как дополнительное изменение угла поляризации. Поэтому предлагается перенести измерение угла Фарадея с детектирования амплитуд электрическими сигналами на измерение фазы между ними на промежуточной частоте. Принципиальная схема

диагностики показана на рис. 1. На рисунке цветными линиями обозначены оптоволоконные линии, стрелками обозначено направление распространения излучения. Чёрными линиями обозначены электрические сигналы. Внутри вакуумной камеры излучение распространяется в прямом и обратном направлениях по одному волокну. Рядом с линиями введены обозначения типа поляризации (диагональная стрелка — линейная поляризация, круглая — циркулярная) и их фазовый аргумент.

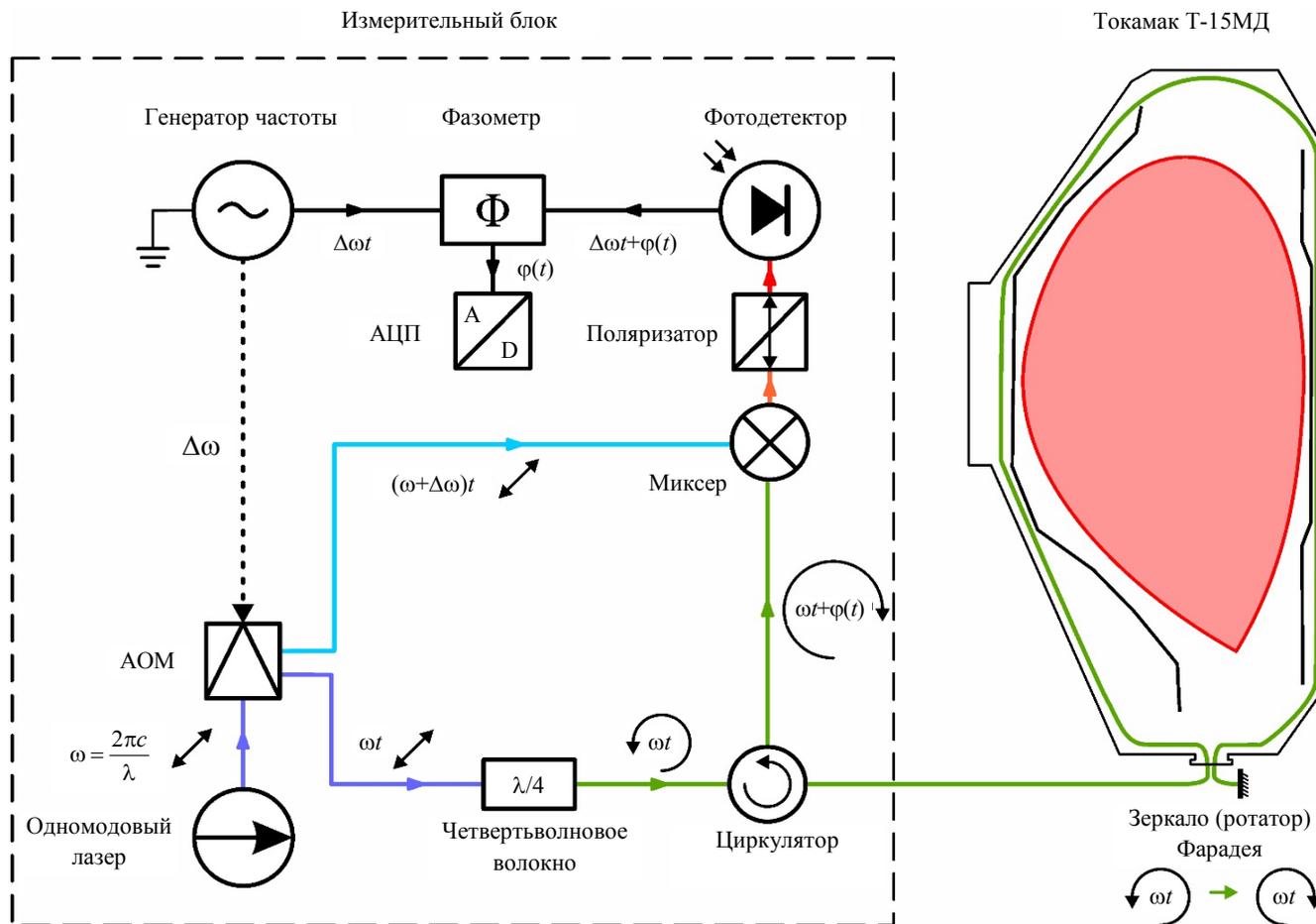


Рис. 1. Принципиальная схема двухпроходного (отражательного) оптоволоконного датчика тока с измерением на промежуточной частоте для токамака Т-15МД

Для этого линейно поляризованное лазерное излучение с длиной волны λ , циклической частотой ω и волновым вектором $k = 2\pi/\lambda$ пропускается через акустооптический модулятор (АОМ) с частотой модуляции $\Delta\omega$ в несколько десятков МГц. АОМ управляется генератором частоты, задающим частоту модуляции. Из АОМ выходят два линейно поляризованных когерентных излучения с амплитудами напряжённости электрического поля E_1 и E_2 соответственно и, сдвинутые друг от друга по частоте на $\Delta\omega$, направляются по различным оптическим каналам:

$$\begin{pmatrix} E_1 \cos \omega t \\ E_1 \cos \omega t \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} E_2 \cos [(\omega + \Delta\omega)t] \\ E_2 \cos [(\omega + \Delta\omega)t] \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Здесь и далее состояние поляризации будет обозначаться в виде двухкомпонентного вектора напряжённости электрического поля $(E_x, E_y)^T$, лежащего в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения. Несмещённое по частоте излучение движется по световоду и проходит сквозь четвертьволновое волокно, переводящее излучение из состояния с линейной поляризацией в состояние с круговой поляризацией:

$$\begin{pmatrix} E_x \cos \omega t \\ E_x \cos(\omega t + \pi/2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E'_1 \cos \omega t \\ E'_1 \sin \omega t \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Затем оно направляется по оптически активному световоду в вакуумную камеру токамака и движется внутри неё. Оптически активное волокно под действием магнитного поля тока плазмы поворачивает

главные оси поляризации излучения на некоторый угол (допустим, что на выходе из четвертьволнового волокна получилась левовращающаяся поляризация):

$$\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t - kn_L l] \\ E'_1 \sin[\omega t - kn_L l] \end{pmatrix}. \quad (10)$$

После нескольких оборотов вокруг плазмы (важно: трассировка световода производится таким образом, чтобы не захватывать в свой контур витки активной и пассивной стабилизации плазмы и любые другие конструкционные элементы, проводящие электрический ток в тороидальном направлении) излучение отражается от зеркала Фарадея. При отражении происходит смена одной круговой поляризации на ортогональную (правовращающуюся):

$$\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t - kn_L l] \\ -E'_1 \sin[\omega t - kn_L l] \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Проходя тот же путь в обратном направлении, но с противоположным направлением вращения поляризации, главные оси повернутся в ту же сторону, что и при проходе в прямом направлении, но на другой угол:

$$\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t - kn_L l + kn_R l] \\ -E'_1 \sin[\omega t - kn_L l + kn_R l] \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Результирующий угол и будет углом Фарадея. Волна, прошедшая вокруг плазмы, с главными осями, повернутыми на угол Фарадея, смешивается с линейно поляризованной волной, вышедшей из АОМ со сдвинутой на $\Delta\omega$ частотой:

$$\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t + \varphi(t)] \\ -E'_1 \sin[\omega t + \varphi(t)] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_2 \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \\ E_2 \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Эта смесь электромагнитных волн попадает в поляризатор, где выделяется одна из поляризационных компонент:

$$\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t + \varphi(t)] + E_2 \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

После этого излучение направляется в фотодетектор, сигнал на котором пропорционален интенсивности света, которая, в свою очередь, является квадратом модуля напряжённости электрического поля волны:

$$I = \left(\begin{pmatrix} E'_1 \cos[\omega t + \varphi(t)] + E_2 \cos[(\omega + \Delta\omega)t] \\ 0 \end{pmatrix} \right)^2. \quad (15)$$

После возведения в квадрат и использования тригонометрических тождеств выражение для интенсивности приобретает вид

$$I = E_1'^2 \frac{(1 + \cos[2\omega t + 2\varphi(t)])}{2} + E_2^2 \frac{(1 + \cos[2(\omega + \Delta\omega)t])}{2} + 2E_1'E_2 \frac{(\cos[\omega t + \varphi(t) + (\omega + \Delta\omega)t] + \cos[\omega t + \varphi(t) - (\omega + \Delta\omega)t])}{2}. \quad (16)$$

Видно, что в выражении присутствуют постоянные во времени слагаемые, слагаемые с осцилляцией на частоте 2ω и на частоте $\Delta\omega$. При усреднении по многим периодам гармоники с частотой 2ω дадут постоянный вклад в величину интенсивности. Поэтому сигнал на фотодетекторе окажется осциллирующим лишь на частоте $\Delta\omega$:

$$I(t) = A \cos(\Delta\omega t - \varphi(t)) + B, \tag{17}$$

где A и B — некоторые константы.

Фаза электрического сигнала, получаемого с фотодетектора, оказывается линейно связанной с величиной угла Фарадея и промежуточной частотой, задаваемой генератором. Сравнивая фазу этого сигнала с фазой сигнала генератора частоты с помощью фазометра, аналогичного используемому в системе СВЧ-интерферометрии токамака Т-15МД [23], можно измерить величину тока, пронизывающего оптоволоконный контур (характерный вид осциллограмм интенсивностей сигналов, попадающих в фазометр, в зависимости от времени и тока плазмы показан на рис. 2. Промежуточная частота 1 кГц носит исключительно иллюстративный характер).

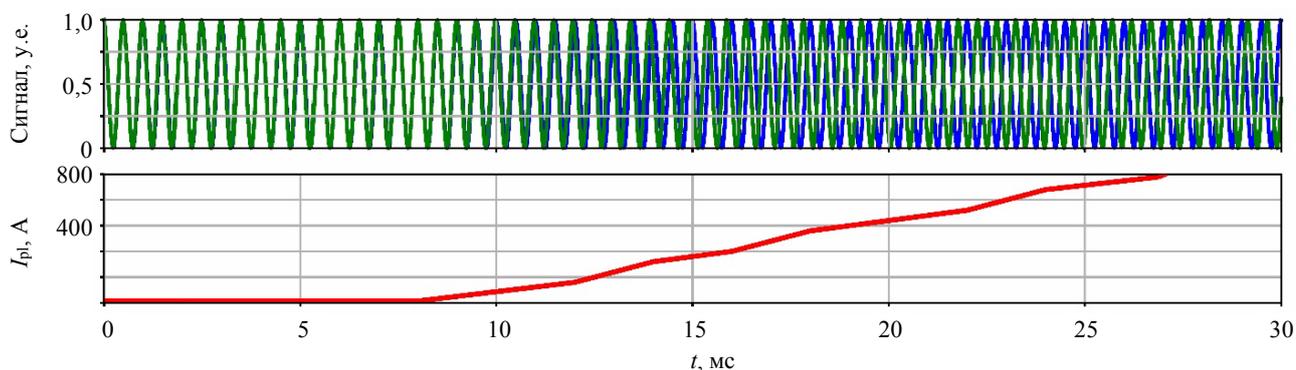


Рис. 2. Осциллограммы электрического сигнала от генератора с частотой $\Delta\omega = 1$ кГц (—), сигнала от фотодетектора (—) и тока плазмы (—)

Таким образом, предлагаемая схема ОДТ позволяет перейти от традиционного измерения с угла поворота плоскости поляризации на измерение набега фазы электромагнитной волны. Фаза круговой поляризации (по сути — угол её поворота) меняется за счёт изменения показателя преломления оптоволоконного в магнитном поле. Важно отметить, что измерения предполагается проводить на промежуточной частоте. Такой переход к измерению фазы на промежуточной частоте позволяет в значительной степени избежать влияния изменения амплитуды регистрируемого сигнала на проводимые измерения.

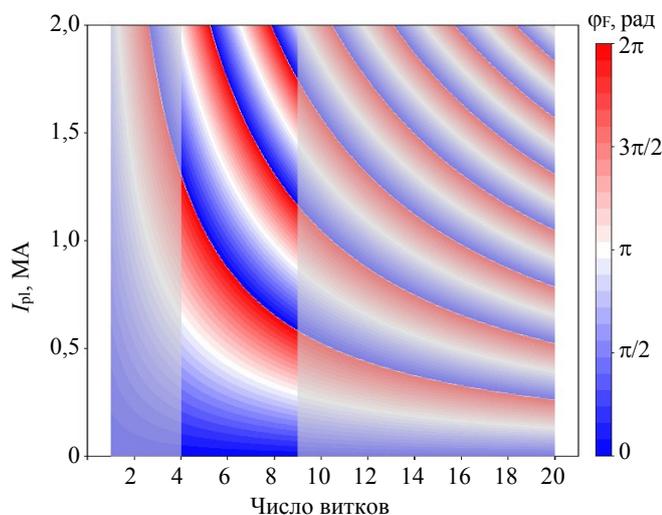


Рис. 3. Зависимость величины угла Фарадея от количества витков оптического волокна внутри вакуумной камеры токамака Т-15МД и величины тока плазмы. Зона с оптимальным числом витков выделена более ярким цветом

В качестве оптически активного световода предлагается использовать оптоволоконно с постоянной Верде $V = 0,6$ рад/МА на длине волны излучения $\lambda = 1550$ нм (оптическое волокно марки SM1500(7.8/125)P), поскольку на этой длине волны достигается наименьшее затухание в оптической линии и обеспечивается высокий уровень сигнала.

В условиях токамака Т-15МД удельный угол Фарадея ($\varphi_F/N = 2VI_{\max}$) не будет превышать 2,4 рад/виток, что соответствует динамическому диапазону 2,4 радиана для $N = 1$ витка и 12 радиан для $N = 5$. Для уменьшения доли шума в полезном сигнале необходимо увеличить диапазон изменения угла Фарадея в эксперименте. Это возможно сделать, увеличивая количество витков оптоволоконного в вакуумной камере (рис. 3). Однако по финансовым соображениям число витков должно быть ограничено сверху.

Ожидается, что наибольшую погрешность в измерениях будет вносить фазометр — его погрешность составляет величину $\delta\varphi_{\max} \sim 3^\circ$ на частоте 500 кГц и слабо зависит от величины измеряемой фазы [24]. При необходимости её можно уменьшить, проведя осреднение выходного сигнала фазометра. Проведена оценка сигнала ОДТ, исполненного в виде $N = 1$ или $N = 5$ витков оптического волокна с постоянной Верде $V = 0,6$ рад/МА, захватывающих только ток плазмы токамака Т-15МД в посчитанном В.М. Леоновым режиме [4]. Результаты моделирования уровня сигнала показаны на рис. 4.

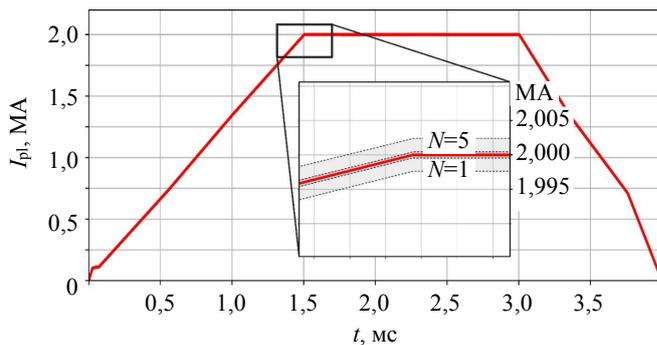


Рис. 4. Модельный сигнал тока плазмы (—) и коридоры ошибок (---), связанные с шумом фазометра, для различного числа витков оптического волокна вокруг вакуумной камеры

Для проведения качественных измерений во время срывов плазмы необходимо, чтобы промежуточная частота была много больше скорости изменения угла Фарадея при изменении тока по плазме. Исходя из данных о величине и длительности «пичков» тока при срыве [25], можно оценить минимальную промежуточную частоту, необходимую для их наблюдения, по следующему соотношению:

$$f_{\text{intm}}^{\min} = \underbrace{10}_{\substack{\text{точек} \\ \text{на период}}} \underbrace{0,1}_{\substack{\text{амплитуда} \\ \text{«пичка»} \\ \Delta\varphi_{\text{«пичка»}}} V N I_{\max}} \underbrace{1}_{\substack{\text{длительность} \\ \text{«пичка»} \\ \tau}} = \frac{2,4N}{100} \left[\frac{\text{рад}}{\text{мкс}} \right] \approx 3,8N \text{ кГц.} \quad (18)$$

Доступные на рынке АОМ создают промежуточную частоту на порядки больше (например, АОМ (модель SSP-1550-200) даёт сдвиг частоты $\Delta\omega = 200$ МГц для длины волны $\lambda = 1550$ нм). Таким образом, можно с уверенностью говорить, что динамика изменения тока плазмы в срыве будет хорошо промеряема с помощью такой схемы ОДТ.

При проведении предварительной трассировки волоконной линии внутри вакуумной камеры токамака (рис. 5) брались во внимание следующие аспекты:

- минимизация длины используемого волокна;
- недопущение малых радиусов кривизны оптической линии;
- использование конструктивных элементов вакуумной камеры для обеспечения жёсткости конструкции;
- исключение конструктивных элементов вакуумной камеры, по которым могут протекать тороидальные токи, из волоконного контура для того, чтобы они не оказывали влияние на сигнал ОДТ.

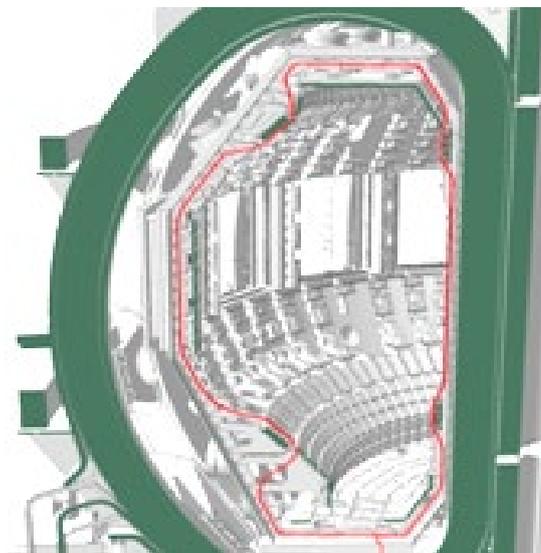


Рис. 5. Предварительная линия трассировки витков ОДТ внутри вакуумной камеры Т-15МД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптоволоконный датчик тока — прецизионная оптическая диагностика для измерения электрического тока. Он является главным кандидатом к использованию в качестве основного датчика тока плазмы в токамаке-реакторе, поскольку обладает рядом ключевых достоинств по сравнению со своими электромагнитными конкурентами — поясом Роговского и датчиком Холла. Однако различные схемы измерения угла Фарадея, традиционно используемые в ОДТ, всё же обладают некоторыми недостатками, которые можно решить, перейдя подобно интерферометрическим диагностикам к измерению на промежуточной частоте.

Представленная в работе схема работы ОДТ может быть охарактеризована как отражательный интерферометр с измерением фазы круговой поляризации зондирующего излучения на промежуточной частоте. Благодаря отражению от Фарадеевского зеркала (проходу луча в прямом и обратном направлениях) должны компенсироваться невзаимные эффекты, например, наведённое двулучепреломление. Использование круговой поляризации позволяет перейти от измерения угла поворота Фарадея к измерению фазы, которое, в свою очередь, не требует учёта интенсивности сигнала на детекторе и исключает неоднозначность в определении направления изменения угла Фарадея (тока плазмы). Предложенная для токамака Т-15МД двухпроходная схема ОДТ с измерением на промежуточной частоте имеет следующие возможности: измерение в режиме «реального времени» — временное разрешение не хуже 100 мкс (10 кГц) с возможностью введения в систему обратных связей по току плазмы; абсолютная погрешность измерения тока плазмы не более 0,5 кА во всём возможном диапазоне токов.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Donné A.J.H. et al.** Chapter 7: Diagnostics. — Nuclear Fusion (IOP Publishings), 2007, vol. 47, № 6, S337—S384.
2. **Xue M.M. et al.** Upgrade of poloidal field coils current measurement system on Experimental Advanced Superconducting Tokamak. — Fusion Eng. and Des., 2019, vol. 148, p. 111264.
3. **Hodgson E.R.** General radiation problems for insulating materials in future fusion devices. — J. of Nuclear Materials, 1998, vol. 258—263, № Part 1, p. 226—233.
4. **Khvostenko P.P. et al.** Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. — Physics of Atomic Nuclei (Pleiades Publishing, Ltd.), 2020, vol. 83, № 7, p. 1037—1057.
5. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. — М.: Техносфера, 2008.
6. **Rogers A.J.** Optical technique for measurement of current at high voltage. — Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, vol. 120, № 2, p. 261—267.
7. **Mihailovic P., Petricevic S.** Fiber optic sensors based on the Faraday effect. — Sensors (MDPI), 2021, vol. 21, № 19, p. 6564.
8. **Андреев В.Ф. и др.** Моделирование магнитных измерений на токамаке Т-15МД с учётом наведённых токов в вакуумной камере. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 25—42.
9. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. В 10 т. Т. VIII. — М.: Физматлит, 2001.
10. **Пржиялковский Я.В.** Поляризационные свойства низкокогерентного оптического излучения в волоконных световодах со спиральной структурой осей линейного двулучепреломления. Дис. к.ф.-м.н., 2017. 179 с.
11. **Боев А.И. и др.** Волоконно-оптический датчик тока. Патент RU 2437106 C2. 29. Декабрь 2009 г.
12. **Blake J., Tantaswadi P., de Carvalho R.T.** In-line Sagnac interferometer current sensor. — Transactions on Power Delivery (IEEE), 1996, vol. 11, № 1, p. 116—121.
13. **Chandler G.I., Jahoda F.C.** Current measurements by Faraday rotation in single-mode optical fibers. — Review of Scientific Instruments, 1985, vol. 56, № 5, p. 852—854.
14. **Kozhevnikov N.** Fiber-optic sensor for plasma current diagnostics in tokamaks. — In: Proceedings of SPIE 1584 Fiber Optic and Laser Sensors IX. December 1991, p. 138—144.
15. **Enokihara A., Izutsu M., Sueta T.** Optical fiber sensors using the method of polarization-rotated reflection. — J. of Lightwave Technology (IEEE), 1987, vol. 5, № 11 (November), p. 1584—1590.
16. **Moreau Ph. et al.** Test of fiber optic based current sensors on the Tore Supra tokamak. — Fusion Eng. and Des. (Science Direct), 2011, vol. 86, № 6—8, p. 1222—1226.
17. **Aerssens M., Gusarov A., Brichard B., Massaut V., Mégret P., Wuilpart M.** Faraday effect based optical fiber current sensor for tokamaks. — In: 2nd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (IEEE). June 2011, p. 1—6.
18. **Leysen W. et al.** Plasma current measurement at JET using polarimetry-based fibre optic current sensor. — Fusion Eng. and Des. (Science Direct), 2020, vol. 160, p. 111754.
19. **Wuilpart M. et al.** Polarimetric optical fibre sensing for plasma current measurement in thermonuclear fusion reactors. — In: 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (IEEE). July 2020, p. 1—4.
20. **Xue M.M. et al.** Fiber-optic current sensor for plasma current on experimental advanced superconducting tokamak. — Fusion Eng. and Des. (ScienceDirect), 2019, vol. 140, p. 11—15.
21. **Karabulut D. et al.** Effect of Faraday mirror imperfections in a fiber optic current sensor dedicated to ITER. — Fusion Eng. and Des. (ScienceDirect), 2019, vol. 138, p. 48—52.
22. **Kim S.-M., Dandu P., Gusarov A., Danisi A., Vayakis G., Wuilpart M.** Assessment of the structural vibration effect on plasma current measurement using a fiber optic current sensor in ITER. — Sensors (MDPI), 2023, vol. 23, № 3, p. 1460.
23. **Drozdz A.S., Sergeev D.S.** Design of a phasemeter for real-time measurements of the average plasma density with the microwave interferometer of the tokamak T-15MD. — Review of Scientific Instruments, 2022, vol. 93, p. 063501.

24. **Bragin E.Y. et al.** Comparison of phase extraction methods on the example of the PN-3 microwave interferometer. — *Instruments and Experimental Techniques*, 2024, vol. 67, № 2, p. 274—282.
25. **Стефановский А.М.** Распределение плотности тока при срыве разряда и пилообразных колебаниях в простой модели тока плазмы в токамаке. — *Физика плазмы*, 2011, vol. 37, № 2, p. 115—127.



Георгий Александрович Саранча, аспирант; МФТИ, 141701 МО, Долгопрудный, Институтский пер. 9, Россия; младший научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; МФТИ (НИУ), 141701 Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер. 9, Россия
sarancha.ga@phystech.edu



Алексей Станиславович Дрозд, аспирант; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское ш. 31, Россия; лаборант; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
drozd_as@nrcki.ru



Матвей Сергеевич Кудашев, студент; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское ш. 31, Россия
motkudashev@gmail.com



Дмитрий Сергеевич Сергеев, старший научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
sergeev_ds@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2024 г.

После доработки 16 июня 2024 г.

Принята к публикации 5 июля 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 3, с. 25—35.