
ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 533.9.082

ИСПЫТАНИЕ ВТОРИЧНО ЭМИССИОННОГО
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ЗОНДА

© 2020 г. **И. В. Визгалов^a**, **И. А. Сорокин^{a, b, *}**

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^bФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская обл., 141120 Россия

*E-mail: iasorokin@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.

После доработки 16.12.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Приводятся результаты испытаний прототипа вторично-эмиссионного зонда, работающего в режиме автоколебательной развертки напряжения, предназначенного для диагностики неравновесной плазмы в присутствии надтепловой группы электронов. Ранее апробация метода автоколебательного зонда проводилась с использованием алюминиевой водоохлаждаемой контактной поверхности с формированием наноразмерного по толщине высокоэмиссионного оксидного покрытия. Особенностью конструкции описываемого зонда является применение тугоплавкого тантала, способного работать в режиме радиационного охлаждения, что упрощает конструкцию и повышает надежность зонда. Показано, что тантал с оксидным покрытием по вторично эмиссионным характеристикам позволяет получать под плазменной нагрузкой хорошо выраженную N-образную ВАХ с большим превышением электронно-эмиссионной составляющей тока над ионным насыщением и удовлетворяет всем требованиям для реализации метода автоколебательного зонда.

Ключевые слова: неравновесная плазма, зондовая характеристика, автоколебательная развертка, пучково-плазменный разряд, вторичная эмиссия

DOI: 10.1134/S207956292004017X

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрены основные принципы метода автоколебательного зонда для измерения ионного тока насыщения в неравновесной плазме при наличии высокоэнергетичной группы электронов. Преимущества метода связаны с отсутствием в измерительной схеме специального блока развертки напряжения, а также с возможностью достижения высокой скорости измерения, определяемой частотой автоколебаний. Генерация автоколебаний происходит благодаря развитию вторично-эмиссионной неустойчивости взаимодействия неравновесной плазмы с отрицательно смещенной поверхностью зонда, и блок развертки заменяется на источник постоянного напряжения.

Определенную трудность при реализации метода представляет необходимость обеспечения высокой вторичной электрон-электронной эмиссии контактной поверхности зонда за счет формирования на ней тонкого (наноразмерного) диэлектрического слоя. При его наличии ВАХ зонда в области ионного насыщения приобретает N-образный вид с участком отрицательного дифференциального сопротивления. Вторично-эмис-

сионный механизм неустойчивости обеспечивает высокую скорость положительной обратной связи и возможность изменения частоты автоколебаний в широком диапазоне частот (от килогерц до десятков мегагерц в зависимости от настройки резонансного контура). В некоторых условиях высокоэмиссионное покрытие необходимо формировать на поверхности зонда специально перед проведением измерений. В других случаях высокоэмиссионное покрытие может возникать естественным образом в процессе взаимодействия материала на поверхности зонда с химически активными компонентами в плазме или в остаточном газе вакуумной камеры. Когда покрытие сформировано, для перевода зонда в автоколебательный режим достаточно добавить в его цепь резонансный контур и подать постоянное отрицательное смещение. Отметим, что в таком варианте автоколебательный зонд может выполнять роль высокочувствительного детектора в отношении появления в установке примесей, приводящих к образованию диэлектрических покрытий, например, оксидных при поступлении кислородосодержащих компонентов.

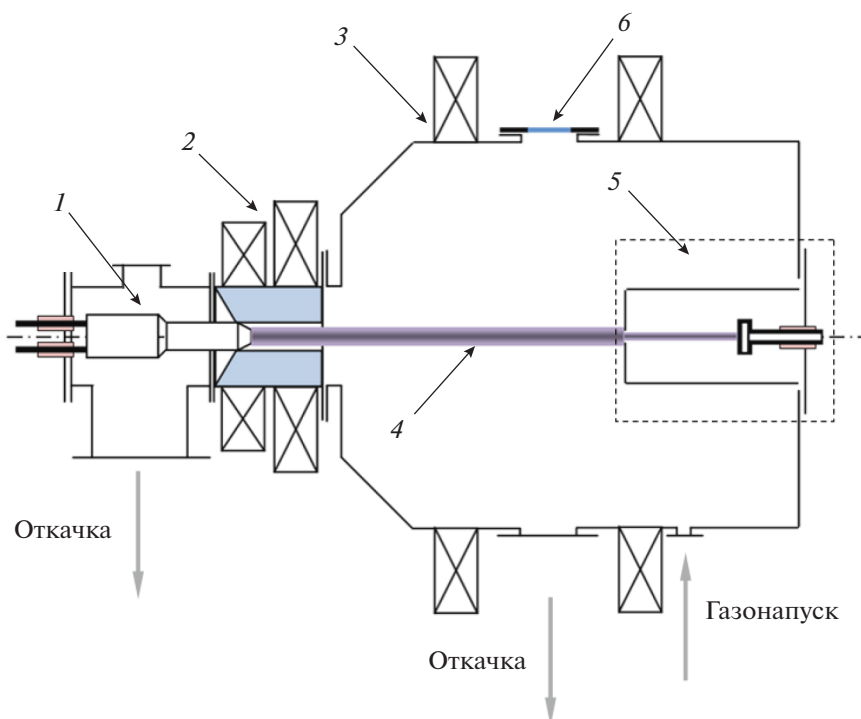


Рис. 1. Схема установки с ППР: 1 — электронная пушка Пирса, 2 — фокусирующие катушки, 3 — катушки Гельмгольца, 4 — ППР, 5 — торцевой зонд, 6 — кварцевое стекло.

В работе [1] апробация метода автоколебательного зонда проводилась на установке ПР-2 с пучково-плазменным разрядом. В качестве зонда для приосевого водородного плазменного потока, содержащего высокоэнергетичную группу электронов, использовался водоохлаждаемый коллектор с алюминиевой контактной пластиной. Высокоэмиссионное диэлектрическое покрытие возникало в результате естественного окисления контактной поверхности из-за наличия кислорода и паров воды в остаточном вакууме. Al и Al_2O_3 по химическим и вторично-эмиссионным свойствам подобны паре Be—BeO. Поэтому нетоксичный алюминий удобен для моделирования поведения под плазменной нагрузкой контактных материалов на основе бериллия, очень распространенного конструкционного материала ядерной и космической техники.

Из-за малой температуры плавления алюминий не вполне удобен для использования в качестве основного материала автоколебательного зонда, особенно в случае применения только радиационного принципа охлаждения из-за невозможности установки проточной системы, например, в случае прыгающего зонда. Из доступных и удобных в обработке тугоплавких материалов для изготовления автоколебательного зонда наибольший интерес представляет тантал. Его основное преимущество перед другими материалами со-

стоит в высокой температуре плавления ($T_{\text{пл}} = 3290 \text{ K}$) и в возможности формирования на поверхности высококачественного диэлектрического оксидного покрытия (Ta_2O_5). Эти свойства определили его широкое применение в электронике, технике, металлургии, химической промышленности и даже хирургии. В отличие от покрытия Al_2O_3 , образующегося на поверхности металла при контакте с кислородом при низких температурах, покрытие из Ta_2O_5 образуется при повышенных температурах (выше 550 K). Это следует учитывать в методике формирования высокоэмиссионного покрытия.

В работе приводятся результаты испытаний прототипа вторично-эмиссионного автоколебательного зонда, изготовленного из тантала, проводившиеся на установке с пучково-плазменным разрядом (ППР). Предложенная конструкция зонда применима для измерения параметров плазмы в условиях пристеночной плазмы современных термоядерных установок. Измерения статической ВАХ зонда показали наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления. По методике [1] определено значение ионного тока насыщения в центральной части ППР, где измерение данной величины методом классического зонда затруднено в связи с наличием высокоэнергетичной группы электронов первичного пучка.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытание конструкции торцевого зонда проводилось на установке с ППР [2–4]. Схема установки представлена на рис. 1.

Источником сильнонеравновесной плазмы в данном случае является пучково-плазменный разряд, инициируемый электронным пучком. В качестве источника электронов используется диодная пушка Пирса с косвенным накалом катода из LaB_6 . Энергия первичного пучка может варьироваться в диапазоне до 4 кВ, ток эмиссии – до 0.5 А. В отличие от установки ПР-2, где использовался стационарный режим работы электронной пушки, в описываемой установке блок питания электронной пушки предусматривает импульсно-периодический режим работы с длительностью импульса 10–200 мс и скважностью более 3. Автоколебательный режим зонда позволяет проводить измерения ионного тока насыщения на различных стадиях рабочего импульса.

Движение электронного пучка ограничено фокусирующими катушками в области перепадной трубки, магнитное поле может варьироваться в пределах до 10 мТл. Магнитное поле в фокусирующих катушках подбирается по максимальному токопрохождению в вакуумном режиме работы установки. Вокруг основной камеры установки предусмотрены катушки Гельмгольца с максимальным полем на оси до 13 мТл, что позволяет значительно повысить плотность плазмы ППР в осевой области установки.

Вакуумная камера установки состоит из двух объемов, имеющих дифференциальную откачку и соединенных с помощью вакуумной диафрагмы, представляющей собой тонкую протяженную трубку диаметром 20 мм, которая обеспечивает перепад давления 1 : 10, что позволяет использовать электронную пушку в вакуумном режиме работы без перехода в дуговой режим в широком диапазоне давлений в основной камере установки. Вакуумная откачка осуществляется с помощью двух диффузионных насосов, оснащенных криоловушками, до давления не хуже 10^{-4} Па. Напуск рабочего газа осуществляется с помощью игольчатых натекаателей. Рабочее давление – 0.02–2 Па. Плазма формируется в основной камере диаметром 0.3 м, длиной 0.5 м. Напротив электронной пушки помещался прототип торцевого зонда. На рис. 2 представлена схема зонда, а также его фотография.

Зонд частично являлся коллектором электронного пучка, таким образом, его значительная открытая пучку площадь могла влиять на локальные параметры плазмы ППР. Зонд включает в себя водоохлаждаемый электрический ввод, на который устанавливался электрод из необходимого материала. В данном случае использовалась торцевая поверхность цилиндрической заготовки из тантала в

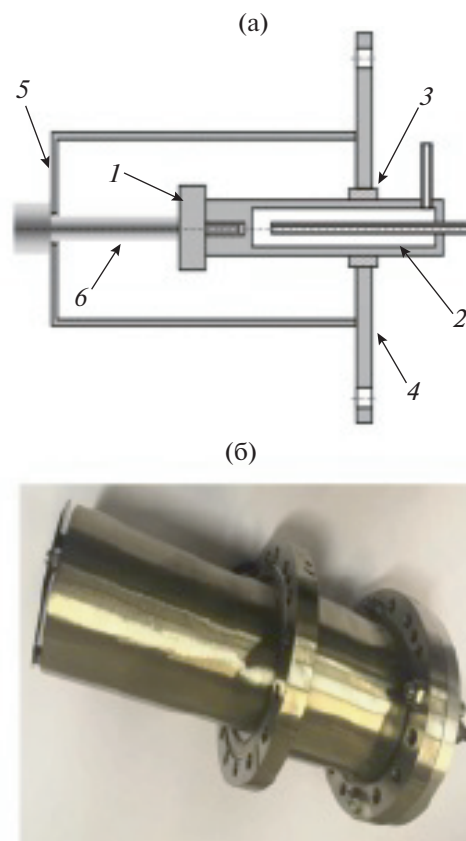


Рис. 2. Торцевой зонд: (а) схема торцевого зонда: 1 – танталовая пластина, 2 – водоохлаждаемый ввод, 3 – керамический изолятор, 4 – фланец, 5 – диафрагма, 6 – пучок; (б) фотография зонда.

качестве поверхности авто-эмиссионного зонда. Для уменьшения глобального влияния торцевого зонда на плазму ППР предусмотрена входная диафрагма диаметром 8 мм.

В качестве источника напряжения смещения зонда использовался блок LPS-2000-1 с выходным напряжением до 2 кВ и током до 1 А, имеющим возможность стабилизации по напряжению, току и мощности. Схема подключения автоколебательного торцевого зонда и измерения выходных параметров электрической цепи представлена на рис. 3.

В работе [1] для измерения тока использовался предварительно откалиброванный датчик Холла. Он дает усиленный сигнал тока, развязанный по напряжению с токовой шиной. При работе в рассеянном магнитном поле требуется следить за изменением постоянной составляющей, чувствительной к изменению ориентации датчика относительно магнитного поля и его величины. Апробация автоколебательной методики для описываемого танталового зонда проводилась с использованием прямых измерений тока с помощью высокочастотного шунта. По конструктивным соображениям,

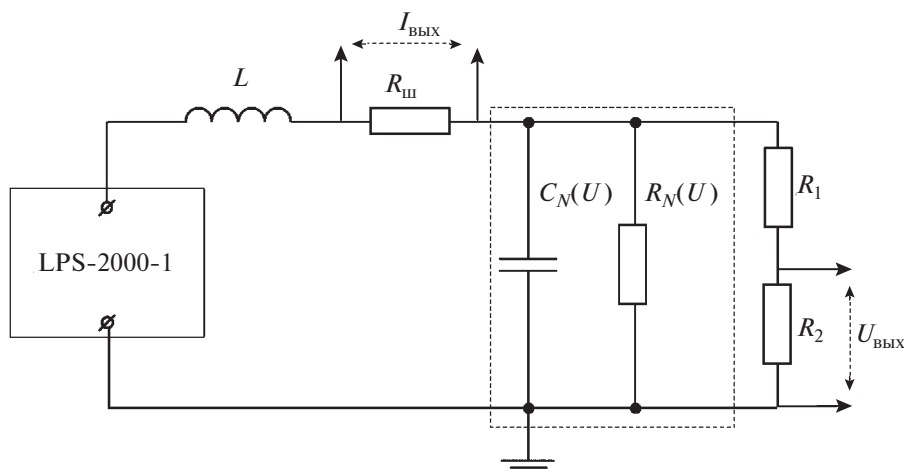


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема торцевого зонда: L — индуктивность цепи, $C_N(U)$ — нелинейная емкость плазменно-поверхностного контакта, $R_N(U)$ — нелинейное сопротивление, соответствующее ВАХ зонда $I_N(U)$, U — напряжение на зонде, R_1 и R_2 — сопротивления делителя, $R_{ш}$ — сопротивление шунта. Пунктирный прямоугольник — электрический эквивалент поверхности-плазменного контакта.

поскольку в источнике смещения положительный полюс соединен с корпусом, шунт подключен непосредственно к зонду. Импульсное напряжение на зонде во время развития автоколебаний может достигать значений свыше 1 кВ. Поэтому для измерения тока потребовался отдельный осциллограф (Tektronix TPS2014) с отключением от сети питанием, сигнал напряжения зонда снимался с делителя вторым таким же осциллографом по обычной схеме. Синхронизация осуществлялась с помощью трансформатора с тремя обмотками на ферритовом кольце, на первичную обмотку которого подключался выходной сигнал с делителя напряжения, а развязанные по постоянному напряжению сигналы на вторичных обмотках обеспечивали синхронизацию. При частотах измеряемого сигнала вплоть до 1 МГц, данная простая схема позволила надежно фиксировать сигналы напряжения развертки на зонде (с помощью делителя напряжения) и тока в его цепи без процедуры учета сдвига фаз, связанного с запаздыванием измерителя тока на основе датчика Холла.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были проведены измерения ВАХ зонда с помощью блока смещения для нескольких значений парциального давления примеси кислорода. Измерения проводились в маломощных режимах ППР: рабочее давление водорода 0.08 Па, ускоряющее напряжение первичного электронного пучка 1 кВ, ток — 150 мА. На рис. 4 представлена ВАХ зонда в области ионного насыщения, полученная обычным способом при линейной развертке напряжения смещения. Показаны абсолютные зна-

чения отрицательного напряжения смещения и полного тока на зонд.

Наблюдается искажение сигнала ионного тока насыщения, вызванное значительной вторичной эмиссией с поверхности зонда. ВАХ имеет выраженный максимум эмиссионного тока при напряжении около 100 В, минимум и насыщение оказываются за пределом развертки. Можно сделать вывод, что естественной примеси кислорода кислородосодержащих компонентов в рабочем объеме (остаточное давление менее 10^{-4} Па) оказывается достаточным для возникновения вторично-эмиссионного оксидного слоя и появления участка ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При этом наблюдается практически десятикратное превышение эмиссионного тока над ионным током насыщения, что указывает на возможность создания с помощью танталовой контактной поверхности на основе обсуждаемого принципа энергетически эффективного автогенератора ВЧ мощности. Таким образом, экспериментально подтверждается возможность формирования на поверхности Та полноценного эмиссионного покрытия в результате естественного окисления. Отметим также, что многократное повышение парциального давления кислорода мало влияет на ВАХ, что указывает на относительную стабильность толщины оксидного покрытия. Рост толщины должен сдвигать максимум тока вправо, поскольку с ее ростом увеличивается падение напряжения в диэлектрическом слое для обеспечения проводимости. При толщине свыше 100 нм слой становится изолирующим, и ток на зонд обращается в ноль. Толщина эмиссионного покрытия в режиме автоколебаний устанавливается в результате динамиче-

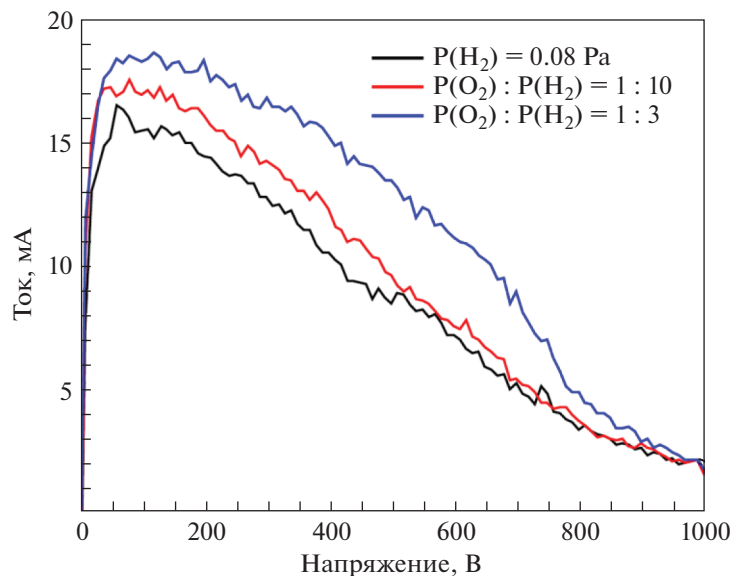


Рис. 4. ВАХ торцевого зонда.

ского равновесия между процессами распыления и химического восстановления оксида, с одной стороны, и окисления активным кислородом, с другой. Поскольку при низких температурах поверхности зонда молекулярный кислород не окисляет Та, начальную формовку оксидного покрытия после полной очистки поверхности зонда приходится проводить при повышенной температуре либо в кислородосодержащей плазме. Если получено покрытие с избыточной толщиной, и ток в цепи зонда отсутствует, производится утонение покрытия в условиях ППР с аргоном в качестве рабочего газа. Распыление изолирующего покрытия производится в результате бомбардировки ионами аргона, ускоренными из плазмы ППР достаточно высокой плавающей разностью потенциалов (свыше 100 В). При этом источник смещения зонда устанавливается в соответствии с восходящим участком ожидаемой ВАХ (порядка 30 В на рис. 4). Появление значительного тока в цепи зонда свидетельствует о формировании покрытия необходимой толщины (порядка 10 нм) с переходом покрытия из изолирующего состояния в эмиссионный режим. Далее можно переходить к измерениям в автоколебательном режиме при переводе напряжения смещения на падающий участок ВАХ. В аргоновой плазме эмиссионное покрытие быстро распыляется высокоэнергетичными ионами, при переходе на водород оксидный слой может устойчиво существовать в состоянии динамического равновесия между процессами эрозии (распыление и химическое восстановление) и образования новых окислов при наличии даже небольшой примеси кислорода.

Представленные на рис. 4 результаты получены при относительно малой мощности ППР, когда ВАХ на падающем участке можно снять без возбуждения автоколебаний при выполнении условия стабильного протекания тока по контуру на рис. 3 при попадании нагрузочной характеристики источника смещения на участок отрицательного дифференциального сопротивления:

$$\frac{L + L^*}{C_N + C^*} < R|R_N|, \quad (1)$$

где L — подключаемая в колебательный контур внешняя индуктивность, L^* — паразитная индуктивность контура, включая индуктивность плазменного шнура, C_N — нелинейная емкость плазменно-поверхностного контакта, C^* — паразитная емкость зонда (на рис. 3 не показана), R — активное сопротивление колебательного контура и выходное сопротивление источника смещения. R_N — дифференциальное сопротивление. Увеличение мощности разряда ведет к росту эмиссионного тока в максимуме, следовательно, к снижению абсолютной величины дифференциального сопротивления и возникновению условий для генерации автоколебаний.

Поэтому измерения величины значения ионного тока насыщения методом вторично-эмиссионного автоколебательного зонда проводились в более мощных режимах разряда. Давление водорода в камере составляло 0.1 Па, ускоряющее напряжение первичного электронного пучка — 700 В, ток эмиссии — 350 мА. Измеряемое с помощью встроенного в блок питания амперметра среднее значение тока в цепи — 20 мА. Максимум тока эмиссии на ВАХ увеличился до 40 мА, соответ-

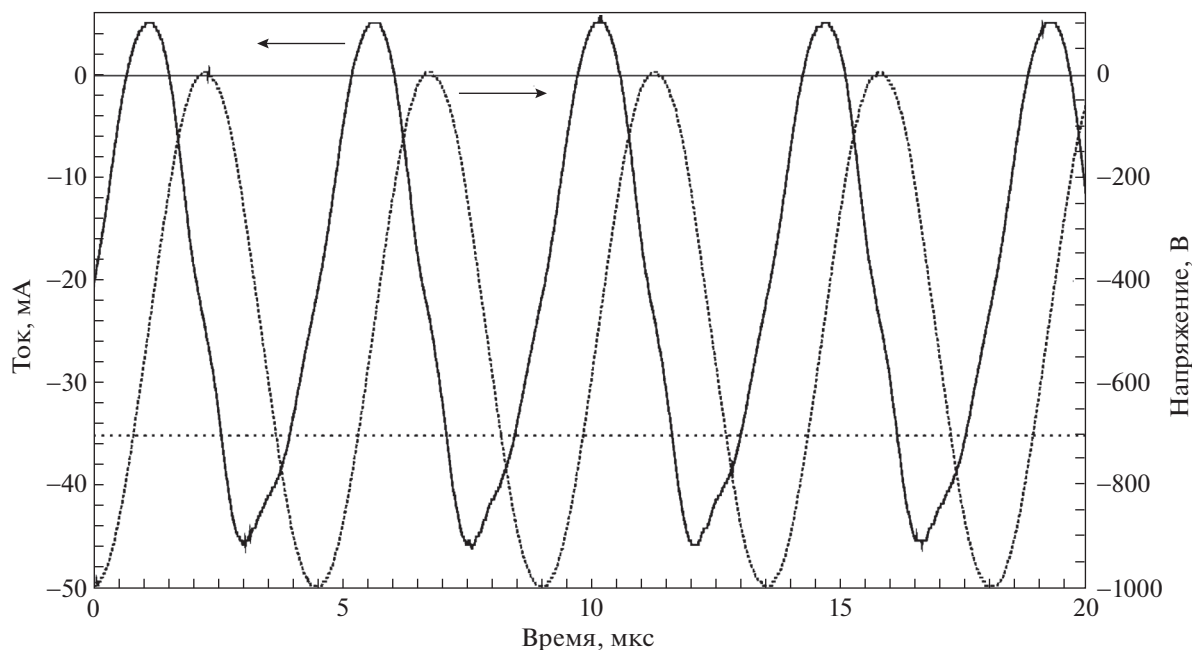


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока в цепи зонда.

ственно, почти в три раза уменьшилась абсолютная величина R_N . В результате зондовая цепь перешла в режим генерации автоколебаний. На рис. 5 представлены осциллограммы тока и напряжения, снятые с помощью синхронизированных осциллографов при постоянном напряжении смещения зонда -500 В, примерно на середине падающего участка мгновенной ВАХ зонда.

Пунктирная горизонталь — ускоряющее напряжение пушки, напряжение зонда в момент измерения ионного тока насыщения оказывается существенно ниже, что исключает электрон-электронную эмиссионную составляющую. Ток опережает напряжение почти на треть периода автоколебаний. По осциллограммам можно установить, что максимум мгновенной ВАХ находится при напряжении порядка -200 В (это напряжение соответствует нижнему значению на осциллограмме тока). Соответственно, в момент достижения нижнего значения напряжением зонда (-1000 В), когда $dU/dt = 0$, отсутствует емкостная составляющая, и ток зонда соответствует ионному току насыщения (около 22 мА).

На рис. 6 показана фазовая траектория в координатах динамических переменных — напряжение и ток зонда. Такое дополнительное представление автоколебаний, получаемое исключением времени, позволяет более наглядно представить форму мгновенной ВАХ, связанной с параметрами плазмы и состоянием контактной поверхности. В частности, фазовая траектория очень чувствительна к плотности горячего электронного компонента, с которым через вторичную эмис-

сию связан размах фазовой траектории по току. Стабильность фазовой траектории во времени указывает на постоянство параметров плазмы и отсутствие влияния на них со стороны зонда. В описываемом случае зонд отделен от основного канала ППР диафрагмой, поэтому влияние автоколебаний зондовой системы на параметры основной плазмы незначительно по сравнению с первичным пучком. В противном случае влиянием зонда нельзя пренебрегать, автоколебательная система может переходить в более сложные модулированные и даже хаотические автоколебания. Отметим, что в экспериментах с алюминиевым автоколебательным зондом, описанных работе [1], возбуждение автоколебаний достигалось при весьма значительных постоянной и переменной составляющих тока (соответственно 0.5 и 1 А) по сравнению танталовым (20 и 30 мА).

Чтобы увеличить чувствительность автоколебательного зонда, увеличивая апертуру диафрагмы, а также исключить влияние зонда на параметры диагностируемой плазмы можно изменить режим автоколебаний, переходя к формированию одиночных импульсов, запускаемых относительно слабым внешним воздействием. Заметим, что на приборах с N-образной ВАХ в зависимости положения на ней рабочей точки, выполнения или нарушения условия (1) могут реализоваться несколько принципиально разных режимов. Помимо рассмотренных стационарного и автоколебательного режимов проявляются следующие режимы: одновибратор с формированием положительного или отрицательного импульса напряжения,

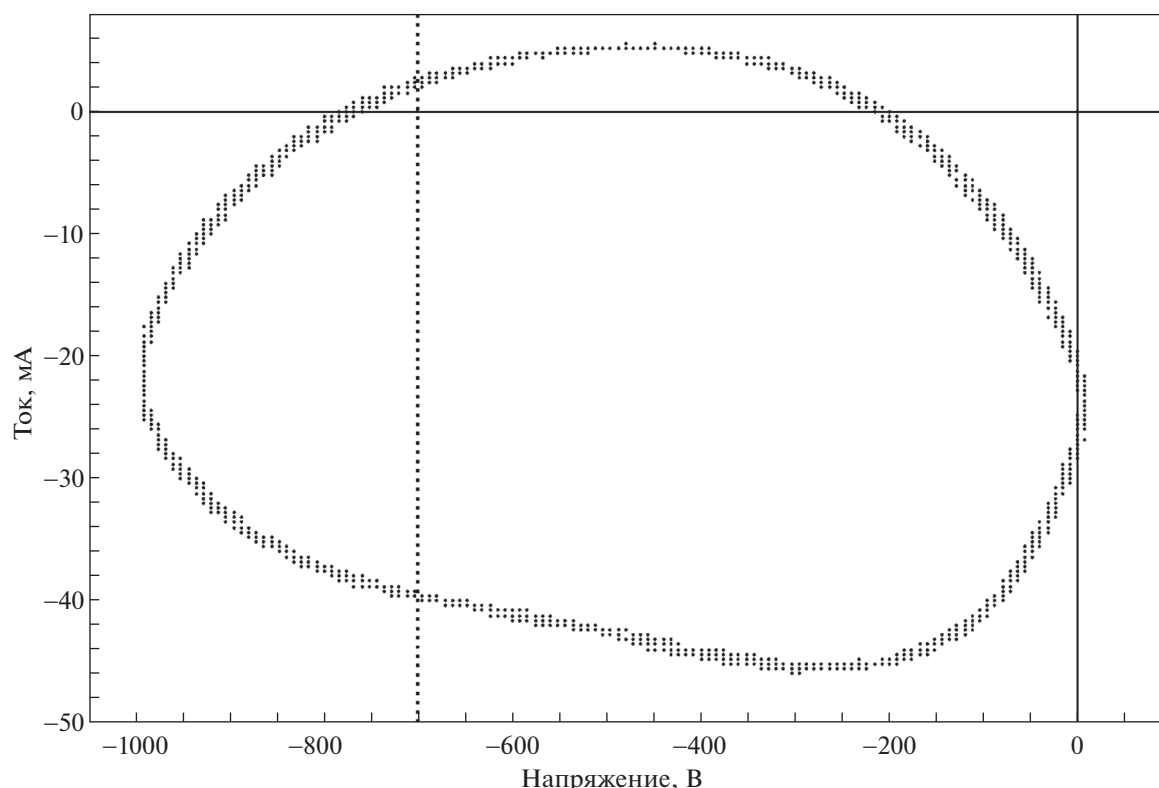


Рис. 6. Фазовая диаграмма автоколебательного процесса, показанного на рис. 5.

двустабильный триггер, а также высокочастотный усилитель.

Для формирования единичного отрицательного импульса требуется низковольтный источник отрицательного смещения, задающий рабочую точку на восходящем участке ВАХ. На рис. 4 этот участок с очень малым положительным дифференциальным сопротивлением находится левее максимума. То есть напряжение постоянного источника смещения может быть снижено до уровня нескольких десятков вольт. В этом случае состояние динамической системы зонда соответствует режиму ждущего одновибратора. В силу очень короткого однократного воздействия импульсного зондового напряжения параметры диагностируемой плазмы практически не изменяются. Кроме того, ионный компонент обладает значительной инерцией, в результате возможное возмущение плотности ионного тока запаздывает по отношению к моменту измерения. В одновибраторном режиме следует ожидать и снижения электромагнитных наводок на регистрирующую аппаратуру по сравнению непрерывным режимом генерации автоколебаний. Методика измерения ионного тока насыщения остается такой же как и в случае непрерывной генерации автоколебаний.

В простейшем варианте запуск одновибратора осуществляется кратковременным внешним им-

пульсным воздействием, выводящим систему из равновесия. Технически наиболее просто дополнительное напряжение к зонду приложить с помощью импульсного трансформатора, когда внешний сигнал (отрицательный по напряжению) кратковременно переводит рабочую точку на падающий участок ВАХ. При этом формируется одиночный отрицательный импульс высоковольтной развертки напряжения зонда. Цикл заканчивается возвратом зондовой колебательной системы в исходное низковольтное моностабильное состояние на участке роста эмиссионного тока.

Другой вариант запуска одновибраторного режима основывается на кратковременном изменении эмиссионного тока зонда, т.е. на быстром изменении положения максимума N-образной ВАХ. Это можно сделать, например, с помощью облучения эмиссионной поверхности зонда вспомогательным электронным пучком. Для этого в конструкцию зонда потребуется добавить управляющую электронно-эмиссионную систему. Следует иметь в виду, что дополнительный пучок можно использовать как для увеличения, так и уменьшения максимума тока на N-образной ВАХ. Причем, второй способ менее инерционный, так как не потребуются изменять ток через индуктивность. После выключения дополнительного пучка этот ток автоматически окажется выше нового

максимума ВАХ, что и запустит импульс одно-вибратора.

Дополнительное электронно-эмиссионное устройство не всегда просто сделать, особенно в сильных магнитных полях. Может оказаться технически более просто управлять одновибраторным режимом зонда с помощью фотоэмиссии при облучении его поверхности лазерным излучением. В настоящее время имеется широкий выбор лазеров как по мощности излучения, так и по рабочей частоте (вплоть до ультрафиолетового диапазона), лазерные фотоинжекторы нашли применение в вакуумной электронике и ускорительной технике. Систему доставки излучения к поверхности зонда можно построить на основе гибких волноводов вплоть до энергии квантов 6 эВ (200 нм), что позволяет получать фотоэлектроны не только для оксидных покрытий, но и практически для всех чистых металлов. Отметим, что фотоэмиссию с чистой танталовой поверхности (работа выхода 4.1 эВ) обеспечивает излучение с длиной волны, порядка 300 нм и меньше. При достаточной мощности оно позволит сформировать высоковольтный импульс развертки зонда даже без вторично-эмиссионного оксидного покрытия и, соответственно, при обычной монокристаллической ВАХ.

Покрытия обычно снижают по энергии порог образования и увеличивают квантовый выход фотоэлектронов. В рабочем эмиссионном режиме зонда (с оксидным покрытием из Ta_2O_5) и сильным электрическим полем фотоэмиссия должна существенно облегчаться. Во-первых, должна заметно смещаться в длинноволновую область красная граница инжекции электронов из металла в зону проводимости диэлектрика за счет эффектов Шоттки и туннелирования. Во-вторых, облегчается эмиссия горячих электронов на границе диэлектрик-вакуум, благодаря нагреву в электрическом поле порядка 10^7 В/см [5]. Таким образом, при использовании эмиссионного покрытия можно значительно упростить требования к лазерной системе запуска импульса развертки.

Кроме того, автоколебательный зонд, оснащаемый лазерной подсветкой с изменяемой фокусировкой луча, легко дорабатывается для проведения LIBS анализа осаждаемых на его поверхности примесей. Таким образом, перевод автоколебательного зонда в одновибраторный режим позволит поднять чувствительность, снизить общие наводки на регистрирующую аппаратуру, расширить диагностические возможности метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по испытаниям прототипа вторично-эмиссионного зонда, работающего в режиме автоколебательной развертки напряжения и предназначенного для диагностики неравновесной плазмы в присутствии надтепловой группы электронов. Особенностью конструкции описываемого автоколебательного зонда по сравнению с ранее испытанными зондами из Al как аналога Ве является применение тугоплавкого Ta. Во-первых, при высоких тепловых нагрузках тантал способен работать в режиме радиационного охлаждения. Во-вторых, в результате естественного окисления остаточными кислородосодержащими компонентами на его поверхности формируется высококачественное диэлектрическое покрытие, обеспечивающее автоколебательный режим работы зонда. Использование Ta существенно упрощает конструкцию зонда и повышает его надежность. Сочетание режимов непрерывной автоколебательной развертки и одновибраторного запуска импульсной развертки напряжения внешним сигналом позволит значительно расширить диагностические возможности метода автоколебательного зонда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-12-01575.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А., Сорокин И.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10. № 2. С. 132–140. <https://doi.org/10.1134/S2079562919010172> [Vizgalov I.V., Gutorov K.M., Kurnayev V.A., Sorokin I.A. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1368–1375. <https://doi.org/10.1134/S10637788190100181>].
2. Isaev N.V., Klykov I.L., Peskov V.V., Shustin E.G., Vizgalov I.V., Kurnayev V.A. // Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57(1). P. 82–85. <https://doi.org/10.1134/S002044121401014X>
3. Isaev N.V., Chmil' A.I., Shustin E.G. // Plasma Phys. Rep. 2004. V. 30(3). P. 292–297. <https://doi.org/10.1134/1.1687029>
4. Shustin E.G., Isaev N.V., Temiryazeva M.P., Fedorov Yu.V. // Vacuum. 2009. V. 83(11). P. 1350–1354. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.03.033>
5. Гриценко В.А. // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 9. С. 971–979. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.12.038008> [Grishenko V.A. // Phys. Usp. 2017. V. 60. P. 902–910. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.12.038008>].

Testing Secondary-Emission Self-Oscillatory Probe

I. V. Vizgalov^{1, †} and I. A. Sorokin^{1, 2, *}

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

² Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Fryazino, Moscow oblast, 141120 Russia

*e-mail: iasorokin@mail.ru

Received December 12, 2019; revised December 16, 2019; accepted December 16, 2019

The test results of the prototype of the secondary-emission probe operating in the mode of self-oscillatory sweep intended for diagnosing nonequilibrium plasma in the presence of epithermal group of electrons are given. Earlier, the method of self-oscillatory probe was tested using an aluminum water-cooled contact surface with formation of a nanoscale thick high-emission oxide coating. The structure of the described probe is peculiar owing to application of refractory tantalum, which is capable of working in the mode of radiation cooling, which simplifies the structure and increases the reliability of the probe. It is shown that, owing to secondary-emission characteristics, oxide-coated tantalum allows under plasma loading obtaining a pronounced N-type current–voltage characteristic with a large excess in the electron-emission current component against the ion saturation current and satisfies all requirements for realization of the method of self-oscillatory probe.

Keywords: nonequilibrium plasma, probe characteristic, self-oscillatory development, plasma discharge, secondary emission

[†] Deceased.