

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭМИТТЕР НА ОСНОВЕ ГЕКСАБОРИДА ЛАНТАНА ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ДУГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ

© 2015 г. В. И. Давыденко, А. А. Иванов, Г. И. Шульженко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: V.I.Davydenko@inp.nsk.su, A.A.Ivanov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 07.05.2015 г.

Для квазистационарных дуговых генераторов ионных источников разработан высокоточный электронный эмиттер на основе гексаборида лантана. Эмиттер представляет собой набор из LaB_6 шайб, между которыми расположены шайбы из терморасширенного графита. Нагрев эмиттера происходит за счет протекания тока через графитовые шайбы. Рассмотрен тепловой режим эмиттера во время генерации плазмы. Разработанный эмиттер успешно использовался в ионных источниках диагностических инжекторов пучков быстрых атомов водорода.

DOI: 10.7868/S0367292115110049

1. ВВЕДЕНИЕ

Дуговые генераторы плазмы с нагревными катодами широко применяются в источниках ионов для создания плазменного эмиттера, из которого с помощью набора сеточных электродов вытягиваются ионы и формируется ионный пучок (см., например, [1–3]). В ИЯФ СО РАН для этой цели был разработан генератор плазмы [4–7] с холодным катодом с большой плотностью тока разряда и начальной плотностью плазмы. В результате расширения плазмы, выходящей из анодного отверстия, ее плотность снижается, так что в плоскости плазменного электрода ионно-оптической системы плотность тока ионов составляет ~ 0.1 – 0.5 А/см². Подробное описание конструкции подобного генератора приведено в следующем разделе.

Основными достоинствами таких генераторов являются высокая степень ионизации плазмы и малое содержание в ней молекулярных ионов. При выполнении определенных условий в потоке плазмы отсутствуют шумы, что позволяет формировать прецизионные ионные пучки с высокой яркостью [4]. Эти достоинства связаны с высокой плотностью разрядного тока – порядка 1 кА/см² и рядом конструктивных особенностей генератора плазмы. Вместе с тем, срок службы генератора плазмы недостаточно велик из-за сильной эрозии и перегрева элементов конструкции. В особенности сильно этот недостаток сказывается при длительностях импульса, превышающих секунду. Нами предложено для уменьшения эрозии катода использовать в катоде специальный электронный эмиттер из гексаборида лантана (LaB_6). В этом

случае можно ожидать увеличения срока службы из-за отсутствия в катоде катодных пятен и уменьшения распыления катода из-за уменьшения скачка потенциала в прикатодной области.

Однако при установке электронного эмиттера время жизни генератора плазмы может быть существенно ограничено выходом из строя его нагревателя, если он работает в режиме лучистого теплообмена и, как следствие, имеет температуру, близкую к температуре плавления материала нагревателя [8, 9]. Чтобы избежать этого, в предложенной конструкции используется графитовый нагреватель, закрепленный непосредственно на поверхности LaB_6 эмиттера и имеющий сравнимую с ним площадь. Это позволяет существенно снизить рабочую температуру нагревателя и, соответственно, увеличить срок его службы.

2. ДУГОВОЙ ГЕНЕРАТОР ПЛАЗМЫ С LaB_6 ЭЛЕКТРОННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Конструкция разработанного генератора плазмы показана на рис. 1. Она близка к описанной ранее в [10], за исключением катодного узла, который имеет цилиндрическую полость, в которой располагается электронный эмиттер с нагревателем из набора шайб из терморасширенного графита. Другой особенностью данного генератора плазмы является интенсивное водяное охлаждение всех элементов. Разряд горит между катодом и анодом в дуговом канале, образованном набором медных и молибденовых изолированных друг от друга диафрагм с отверстием для выхода плаз-

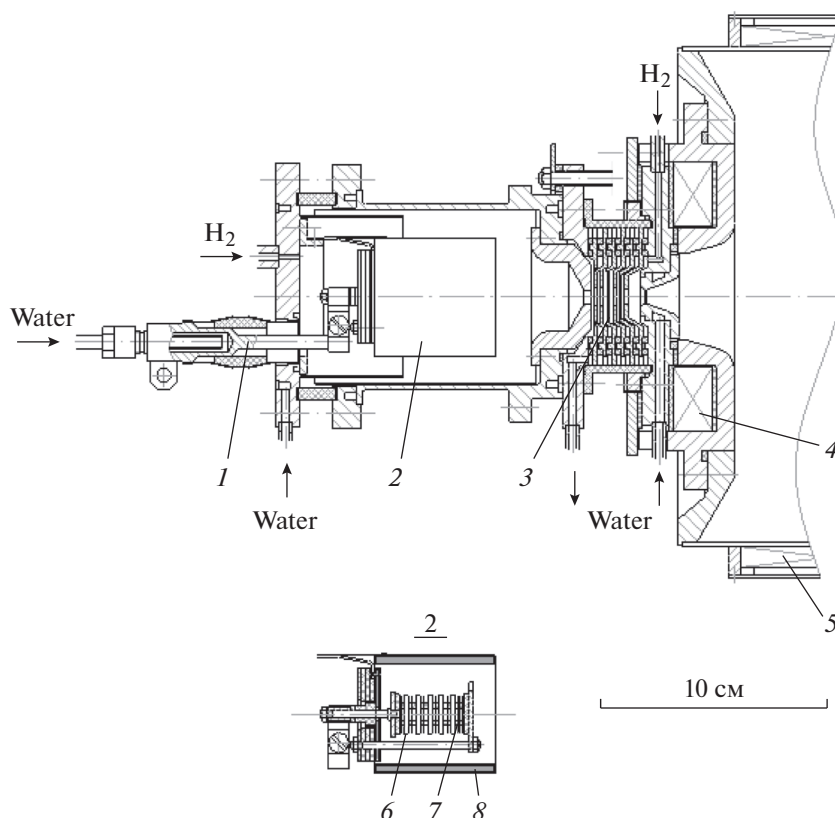


Рис. 1. Общий вид катодного узла и электронного эмиттера: 1 – токоподвод нагревателя, 2 – электронный эмиттер, 3 – набор изолированных диафрагм, 4 – катушка, 5 – постоянный магнит, 6 – шайба из LaB_6 , 7 – шайба из терморасширенного графита, 8 – тепловые экраны.

менной струи. Изолированные металлические диафрагмы защищают изоляторы от запыления и оказывают, кроме того, стабилизирующее влияние на столб газоразрядной плазмы. Рабочий газ (в данном случае водород или дейтерий) напускается через катодную полость, а также в зазор между анодом и ближайшей к нему диафрагмой. Для увеличения выхода плазмы в прианодной области с помощью катушки с железным ярмом создается магнитное поле. Его величина быстро падает к катоду. Выход плазмы из источника в определенных пределах пропорционален площади отверстия в аноде при токе разряда в сотни ампер и напряжении на разряде 70–100 В. Эффективность генерации ионного потока в разряде в зависимости от геометрии разрядного канала, диаметра выходного отверстия, величины магнитного поля в области анода и других параметров источника меняется в пределах 1–2 А/кВт.

Отличительной особенностью конструкции данного электронного эмиттера является использование в нем нагревателя из фольги из терморасширенного графита ТРГ ТУ 5728-003-12058737-2000. Как показано на рис. 1 (позиция 2), электронный эмиттер и нагреватель образуют единую конструкцию, представляющую собой набор из

шайб диаметром 17 мм и толщиной 2 мм из гексаборида лантана, проложенных шайбами из терморасширенного графита диаметром 8 мм и толщиной 0.5 мм. Набор сдавлен в осевом направлении с помощью пружинящих шайб из ТРГ и стоек, которые одновременно служат токоподводом нагревателя. Ток подводится через осевой токоподвод, проходит через набор шайб и замыкается на корпус фланца через боковые стойки. Электропроводность (а также теплопроводность) графитовой фольги, из которой сделаны шайбы, сильно различается вдоль и поперек листа. Электропроводность вдоль листа составляет $0.7 \times 10^5 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, а в поперечном направлении примерно в 80 раз меньше. Выделение мощности происходит в основном на графитовых шайбах, и нагрев шайб из гексаборида лантана происходит за счет их непосредственного контакта с графитовыми. Рабочая температура эмиттера составляет 1600–1650°C при мощности нагрева 750 Вт.

Описанная конструкция нагревателя имеет ряд преимуществ перед традиционно используемыми нагревателями из тугоплавких металлов или графита, в которых нагрев электронного эмиттера из LaB_6 происходит за счет лучистого теплообмена (см, например, [3, 8]). К ее достоин-

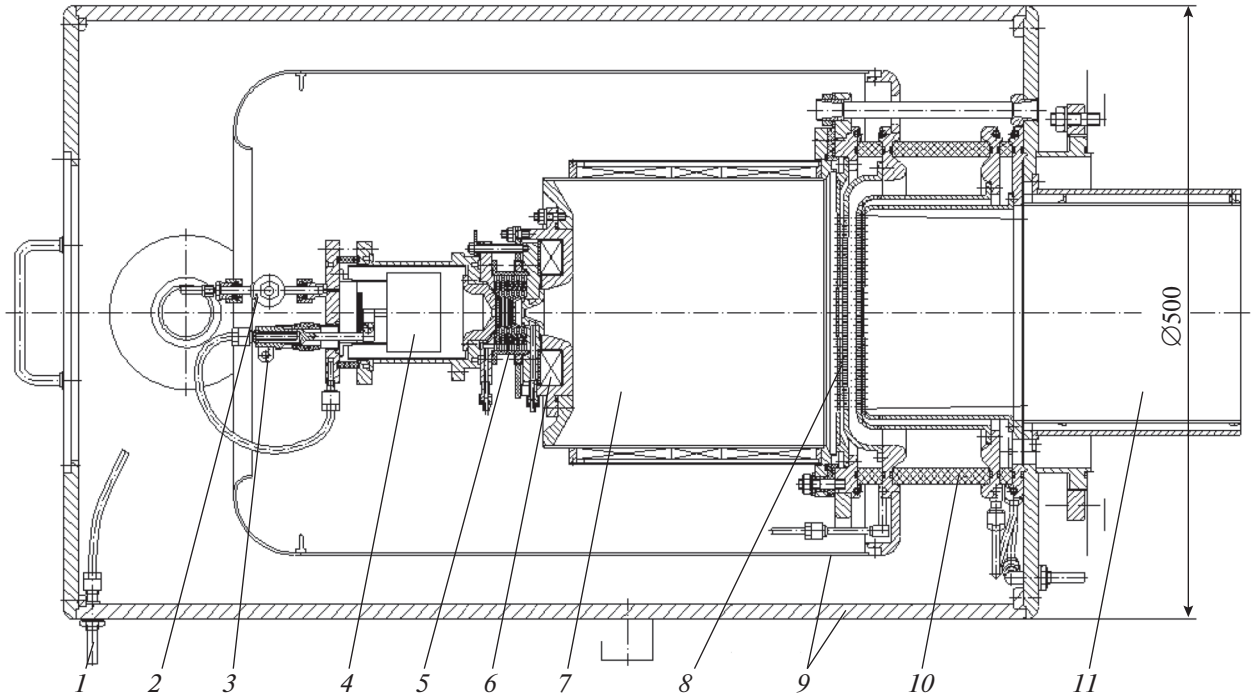


Рис. 2. Схема ионного источника: 1 – ввод газа, 2 – газовый клапан, 3 – ввод накала, 4 – электронный эмиттер, 5 – разрядный канал, 6 – катушка, 7 – расширительный объем, 8 – сетки ионно-оптической системы, 9 – магнитные экраны, 10 – высоковольтный изолятор, 11 – нейтрализатор пучка.

ствам можно отнести следующие. Увеличение площади эмиттера в ней достигается простым увеличением количества шайб в наборе. Температура нагревателя относительно низка и фактически близка к температуре эмиттера, что сильно увеличивает срок его службы. Кроме того, вследствие низкой температуры нагревателя отсутствуют проблемы, связанные с лучистыми потерями тепла из него и с необходимостью установки большого количества тепловых экранов для их снижения. При этом снижается также и требуемая мощность нагревателя. Использование в качестве материала нагревателя терморасширенного графита и его относительно низкая температура также предотвращает отравление поверхности катода из-за попадания на него паров материала нагревателя.

3. ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ КАТОДА

Рассмотрим тепловой режим гексаборид лантанового катода во время генерации плазмы. Тепловой режим катода определяется излучением с поверхности, охлаждением за счет термоэмиссии электронов, нагревом ионным потоком и теплопроводностью. Плотность мощности излучения с поверхности LaB_6 катода с коэффициентом черноты $\varepsilon \approx 0.69$ и температурой $T \approx 1900$ К равна $w \approx \varepsilon \sigma T^4 \approx 50$ Вт/см². Охлаждение катода за счет эмиссии электронов имеет плотность мощности

$w_e \approx (j_e/e)(\phi + 2T)$ и для работы выхода LaB_6 , равной $\phi \approx 2.7$ эВ, и эмиссионной плотности тока $j_e \approx 10$ А/см² составляет величину $w_e \approx 32$ Вт/см². Нагрев поверхности катода потоком ионов из плазмы является принципиально важным для теплового режима катода. Напряжение в катодном слое $\Delta U \approx 20\text{--}40$ В. Плотность ионного тока на катод оценивается по формуле Бома $j_i \approx 0.6en\sqrt{T_e/M}$. Плотность мощности нагрева катода проходящими ионами при $\Delta U \approx 20$ В и для прикатодной водородной плазмы с плотностью $n \approx 5 \times 10^{13}$ см⁻³ и электронной температурой $T_e \approx 5$ эВ составляет $w_i \approx j_i \Delta U \approx 30$ Вт/см². Катод также нагревается потоками фотонов и быстрых атомов из прикатодной плазмы. При плотности мощности дополнительного нагрева катода $w_h \approx 5$ Вт/см² во время генерации плазмы повышение температуры поверхности катода имеет величину $\Delta T \approx Tw_h/4w \approx 50$ К. При таком повышении температуры поверхности катода плотность тока термоэмиссии электронов возрастет с 10 А/см² до 14 А/см². Время установления равновесной температуры в катодной пластине при нагреве с двух сторон оценивается как $\tau \approx C\rho\delta\Delta T/2w_h$, где δ – толщина пластины, C – удельная теплоемкость, ρ – плотность. Для LaB_6 величина $C \approx 0.57$ Дж/г°C, $\rho \approx 4.73$ г/см³, и время

установления равновесной температуры в пластине толщиной 2 мм составляет $\tau \approx 2.7$ с.

В реальных условиях работы в дуговом генераторе LaB_6 катод нагревается ионным потоком, о чем свидетельствует возрастание тока разряда в начале импульса. Поэтому нагреватель поддерживает температуру катода несколько ниже рабочей.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ДУГОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Разработанный электронный эмиттер был использован в дуговом генераторе водородной плазмы ионного источника диагностического инжектора [10]. Дуговой генератор работал в режиме с импульсами длительностью до 4 с (или 10 с с модуляцией). Пучок формировался с помощью четырехэлектродной ионно-оптической системы, описанной в [10]. Общий вид ионного источника диагностического инжектора показан на рис. 2.

Электронный эмиттер и катодный узел в целом надежно работали при токе разряда до 700 А и длительности импульса до 10 с. При этом полный выход плазмы был эквивалентен примерно 30 А протонного тока. Для формирования ионного пучка плазменный поток из анодного отверстия расширялся в объеме. После частичного отражения ионов от магнитного поля магнитов, расположенных на его периферии, в плоскости плазменной сетки формировался профиль потока с неоднородностью $\pm 10\%$. С учетом потерь плазмы на стенках расширительного объема и конечной прозрачности сеток удавалось формировать пучок ионов с током до 8 А. К достоинствам ионного источника следует отнести относительную простоту конструкции и высокое, $\sim 80\%$, содержание протонов в сформированном пучке, а также малую угловую расходимость пучка, равную ~ 0.6 градуса при энергии частиц 55 кэВ. При длительности импульсов 3 с ресурс работы генератора плазмы составлял более двух лет в процессе интенсивной эксплуатации на токамаке AlcatorC-mod.

Подобный дуговой генератор плазмы с LaB_6 эмиттером в течение 2006–2011 гг. использовался также в ионном источнике диагностического инжектора RUDI [11] на токамаке TEXTOR. Генератор работал с импульсами длительностью до 10 с.

В настоящее время разработан и подготовлен к испытаниям дуговой генератор плазмы с LaB_6 эмиттером с длительностью импульса до 100 с. Этот генератор предназначен для использования в мощном источнике отрицательных ионов водорода [12]. Электронный LaB_6 эмиттер для генератора с увеличенной длительностью импульса имеет конструкцию, близкую к описанной в статье. Для шайб разрядного канала и анода генератора предусмотрено более эффективное охлаждение водой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан электронный эмиттер на основе гексаборида лантана для высокопоточных дуговых генераторов плазмы, применяемых в ионных источниках с длительностью импульса до 10 с. Особенностью источника является применение нагревателя из терморасширенного графита, установленного в непосредственном контакте с электронным эмиттером. Это позволило значительно снизить рабочую температуру нагревателя и повысить надежность и срок службы нагревателя. Высокая надежность электронного эмиттера с таким нагревателем подтверждается длительной безаварийной эксплуатацией на токамаках AlcatorC-Mod и TEXTOR.

Авторы выражают благодарность Г.Ф. Абдрашитову и В.В. Колмогорову за разработку схемы питания генератора плазмы, П.П. Дейчули и Н.В. Ступишину за помощь в наладке и испытаниях ионного источника.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goebel D.M., Crow J.T., Forrester A.T.* // Rev. Sci. Instr. 1978. V. 49. P. 469.
2. *Goebel D.M., Forrester A.T.* // Rev. Sci. Instr. 1982. V. 53. P. 810.
3. *Семашко Н.Н., Малахов Н.П.* // Докл. третьей Всесоюзной конф. по инж. проблемам термоядерных реакторов, Москва, 1984. Т. 1. С. 394.
4. *Belchenko Yu.I., Davydenko V.I., Derevyankin G.I., Dymov G.I., Dudnikov V.G., Morozov I.I., Roslyakov G.V., Shabalin A.L.* // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 378. doi: 10.1063/1.1141299
5. *Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* // Физика плазмы. 1981. Т. 7. С. 262.
6. *Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я.* // ПТЭ. 1986. № 6. С. 39.
7. *Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 258.
8. *Кудинцева Г.А., Мельников А.И., Морозов А.В., Никонов Б.П.* Термоэлектронные катоды. М.: Энергия, 1966. С. 366.
9. *Димов Г.И., Иванов А.А., Росляков Г.В.* // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 933.
10. *Deichuli P.P., Abdrashitov G.F., Beals D., Granetz R., Ivanov A.A., Kolmogorov V.V., Mishagin V.V., Shulzhenko G.I., Stupishin N.V.* // Rev. Sci. Instr. 2006. V. 77. 03B514. doi: 10.1063/1.2171754
11. *Listopad A.A., Coenen J.W., Davydenko V.I., Deichuli P.P., Ivanov A.A., Mishagin V.V., Savkin V.Ya., Schalt W., Schweer B., Shulzhenko G.I., Stupishin N.V., Uhlemann R.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 02B104. doi: 10.1063/1.3264633
12. *Listopad A.A., Belchenko Yu.I., Davydenko V.I., Ivanov A.A., Ivanov I.A., Kolmogorov V.V., Mishagin V.V., Putvinsky S.V., Shulzhenko G.I., Smirnov A.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. 02B129. doi 10.1063/1.4835415