

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

А.А. Иванов, Г.И. Шульженко

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

ИЯФ 2006-17

Новосибирск  
2006

**Сильноточный электронный эмиттер  
на основе гексаборида лантана  
для квазистационарного дугового генератора плазмы**

*А.А. Иванов, Г.И. Шульженко*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

---

## Введение

Дуговые генераторы плазмы с нагретыми 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, Новосибирск для этой цели был разработан генератор плазмы [4-6] 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  $\sim 0.1 - 0.5 \text{ A/cm}^2$ . Подробное описание конструкции подобного генератора приведено в следующем разделе.

Основными достоинствами таких генераторов являются высокая степень ионизации плазмы и малое поддержание 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  $1 \text{ кА/см}^2$  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 ( $LB_6$ ). В этом случае можно ожидать увеличения срока его службы из-за отсутствия катодных пятен при условии достаточной эмиссионной способности эмиттера и уменьшения распыления 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 [7]. Чтобы избежать этого, в предложенной конструкции используется графитовый нагреватель, закрепленный непосредственно на поверхности  $LB_6$  эмиттера и имеющий сравнимую с ним площадь. Это позволяет существенно снизить рабочую температуру нагревателя и, соответственно, увеличить срок его службы.

## 1. Дуговой генератор плазмы с $LB_6$ электронным эмиттером

Конструкция разработанного генератора плазмы показана на рис. 1. Она близка к описанной ранее в [8], за исключением катодного узла, который имеет цилиндрическую полость, в которой располагается электронный эмиттер 2 с нагревателем из набора шайб из терморасширенного графита 7. Другой особенностью данного генератора плазмы является интенсивное водяное охлаждения 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 плазменной 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 4 с железным ярмом создается магнитное поле. Его величина быстро спадает 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 меняется в пределах 1 – 2 А/кВт. Она существенно зависит от геометрии разрядного канала, диаметра выходного отверстия, величины магнитного поля в области анода и других параметров источника.

Отличительной особенностью конструкции разработанного электронного эмиттера является использование в нем нагревателя из фольги из терморасширенного графита ТРГ ТУ 5728-003-12058737-2000. Как показано на Рис. 1(2), электронный эмиттер и нагреватель представляют собой единую конструкцию, представляющую собой набор из шайб диаметром 17 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 (см. Рис. 1(2)) 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  $0.7 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$  и примерно в 80 раз меньше в поперечном направлении. 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 равна 1600 – 1650 °С.

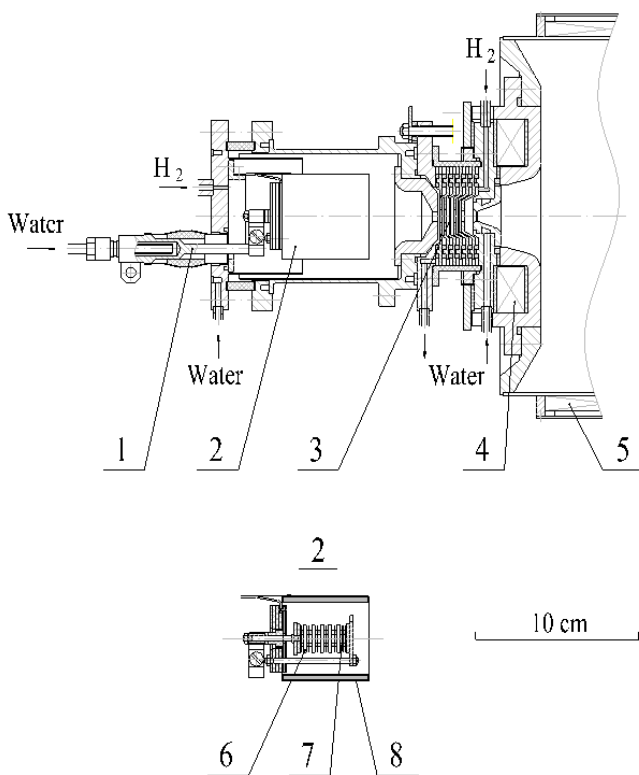


Рис. 1. Общий вид катодного узла и электронного эмиттера: 1 – токоподвод нагревателя; 2 – электронный эмиттер; 3 – набор изолированных диафрагм; 4 – катушка; 5 – постоянный магнит; 6 – шайба из  $LaB_6$ ; 7 – шайба из терморасширенного графита; 8 – тепловые экраны.

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, [3,7]). К ее достоинствам можно отнести следующие.

1. Увеличения площади эмиттера в ней достигается простым увеличением количества шайб в наборе.
2. Температура нагревателя относительно низка и фактически близка к температуре эмиттера, что сильно увеличивает срок его службы.
3. Кроме того, вследствие низкой температуры нагревателя отсутствуют проблемы, связанные с лучистыми потерями тепла из него и необходимостью установки большого количества тепловых экранов для их снижения.

4. При этом снижается также и требуемая мощность нагревателя.
5. 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.

## 2. Применение дугового генератора

Разработанный электронный эмиттер был использован в дуговом источнике водородной плазмы, работавшем в режиме с импульсами длительностью до 4 с (или 10 с с модуляцией пучка). Пучок формировался с помощью четырехсеточной ионно-оптической системы, подробно описанной в [8]. Общий вид сеточной системы и генератора плазмы в сборе показан на рис. 2.

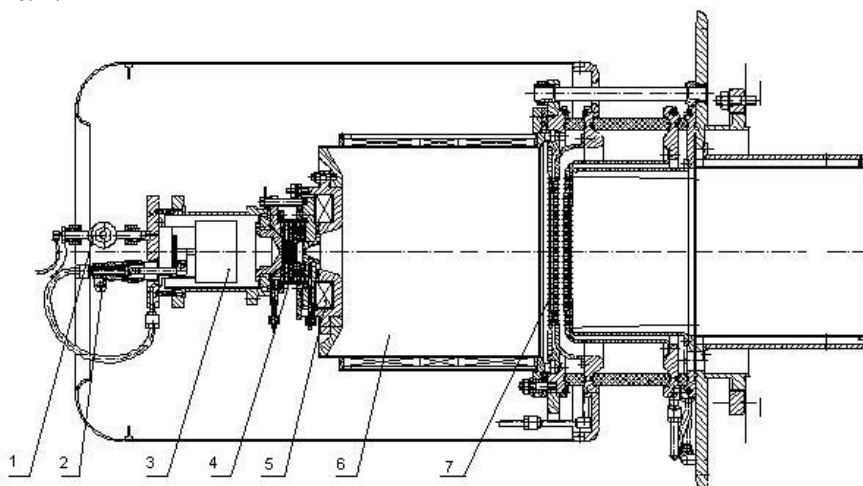


Рис. 2. Схема ионного источника: 1 - газовый клапан, 2 - ввод накала, 3 - электронный эмиттер, 4 - разрядный канал, 5 - электромагнит, 6 - расширительный объем, 7 - сетки ионно-оптической системы.

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 6. После частичного отражения ионов от 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 прозрачности сеток удавалось

формировать пучок ионов с током до 8 А. К достоинствам ионного источника следует отнести относительную простоту конструкции и высокое, ~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 составляет более года в процессе интенсивной эксплуатации на токамаке AlcatorC-mod [8]. На Рис. 3 приведены типичные осциллограммы тока и энергии ионного пучка.

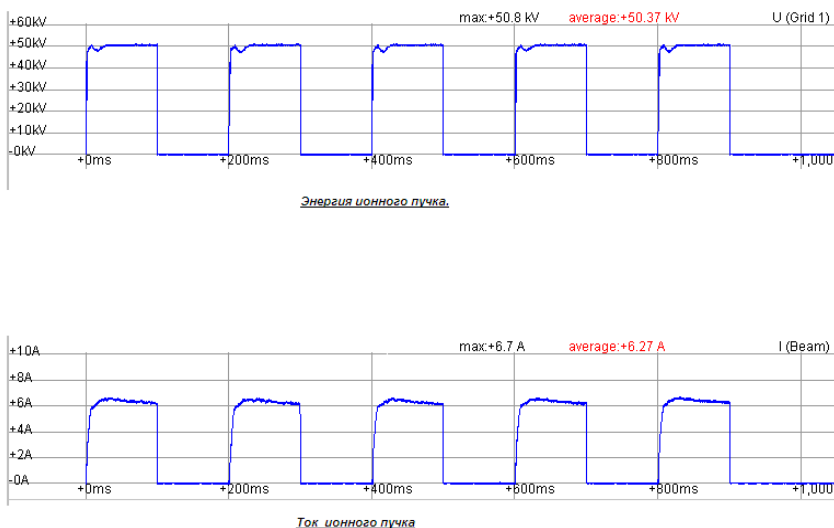


Рис. 3.

### 3. Заключение

Разработан электронный эмиттер на основе гексаборида лантана для сильноточных 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, повысить надежность и срок службы нагревателя. Высокая надежность электронного эмиттера с таким нагревателем подтверждается длительной безаварийной эксплуатацией на токамаке AlcatorC- Mod в Массачусетском технологическом Институте, США.

Авторы выражают благодарность В.И. Давыденко за интерес к работе и полезные обсуждения, 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.

## Литература

- [1] *D.M. Goebel, J.T. Crow, A.T. Forrester.* Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production. *Rev. Sci. Instr.*, 1978, №4, p. 469-472.
- [2] *D.M. Goebel and A.T. Forrester.* Plasma studies on a hollow cathode, magnetic multipole ion source for neutral beam injection. *Rev. Sci. Instr.*, 1982, №6, p. 810-815.
- [3] *Н.Н. Семашко, Н.П. Малахов.* Разрядные характеристики катодов ионных источников косвенного накала. Доклады III Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т.1, М: 1984, с.394.
- [4] *Yu.I. Belchenko, V.I. Davydenko, G.E. Derevyankin, G.I. Dimov, V.G. Dudnikov, I.I. Morozov, G.V. Roslyakov, and A.L. Shabalin.* Ion Sources at the Novosibirsk Institute of Nuclear Physics. *Rev. Sci. Instr.*, 1990, №1, p.378-384.
- [5] *Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я.* Протонный источник инжектора атомов установки АМБАЛ. ПТЭ, 1986, №6, с.39-42.
- [6] *Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* Многоамперный импульсный источник протонов. ЖТФ, 1983, т.53, с.258-263.
- [7] *Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов,* Термоэлектронные катоды. М: Энергия, 1966, с.366.
- [8] *P.P. Deichuli, G.F. Abdrashitov, D. Beals, R. Granetz, A.A. Ivanov, V.V. Kolmogorov, V.V. Mishagin, G.I. Shulzhenko, N.V. Stupishin.* An ion source with LaB<sub>6</sub> hollow cathode for a diagnostic beam injector. *Rev. Sci. Instr.*, 2006 (to be published).



*А.А. Иванов, Г.И. Шульженко*

**Сильноточный электронный эмиттер  
на основе гексаборида лантана  
для квазистационарного дугового генератора плазмы**

*A.A. Ivanov, G.I. Shulzhenko*

**High-current electron emitter  
based on the hexaboride lantan  
for the quazistationary plasma generator**

ИЯФ 2006-17

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 4.04. 2006 г.

---

Сдано в набор 11.04. 2006 г.  
Подписано в печать 12.04.2006 г.  
Формат 60x90 1/16 Объем 0.5 печ.л., 0.4 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 17

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринтере “Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИЯФ им. Г.И. Будкера РАН”,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*