

10  
©1994

## ФОРМИРОВАНИЕ ДЛИННОИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСХОДЯЩИХ В НЕМ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНЬЮ

*А.В.Архипов, Г.Г.Соминский*

Для решения некоторых актуальных проблем УТС, например для реализации абляционного ускорения топливных и диагностических таблеток в крупных токамаках, необходимы длинноимпульсные электронные пучки (ЭП) высокой плотности [1,2]. Создание пучков с удельной энергией  $w \geq 10^3$  Дж/см<sup>2</sup> длительностью  $\tau \geq 10^{-4}$  с представляет собой сложную задачу, решению которой препятствуют, в частности, специфические процессы при взаимодействии ЭП с твердым телом. Ниже сообщаются результаты работы по формированию длинноимпульсного ЭП и исследованию происходящих в нем процессов при взаимодействии с мишенью из углерода.

Схематическое изображение системы формирования ЭП показано на рис. 1. Пучок создавался магнитоэкранированной пушкой Пирса с гексаборид-лантановым катодом (1) диаметром 42 мм. По выходе из пушки поток электронов сжимался в нарастающем магнитном поле вблизи магнитного экрана (3), далее дрейфовал в приблизительно однородном магнитном поле  $B_t$  внутри металлического канала транспортировки (5) диаметром 26 мм, затем претерпевал повторную компрессию в нарастающем поле  $B_c$  соленоида (7) и осаждался на мишени-коллекторе (9). Система транспортировки и компрессии ЭП с мишенью, удаленной на 1.2 м от катода, позволяла эффективно защитить пушку от продуктов, слетающих при электронной бомбардировке с мишени, и таким образом предотвратить пробой высоковольтного зазора пушки. Давление остаточного газа в экспериментальном приборе не превышало  $10^{-5} - 10^{-6}$  Тор.

В созданной секционированной системе транспортировки измерялись токи пушки  $I_g$ , анода (2), электрода (4)  $I_e$ , трубы дрейфа (5)  $I_d$ , мишени (9)  $I_t$  и электрода (8). Для получения дополнительной информации о процессах, происходящих при формировании ЭП, производилось наблю-

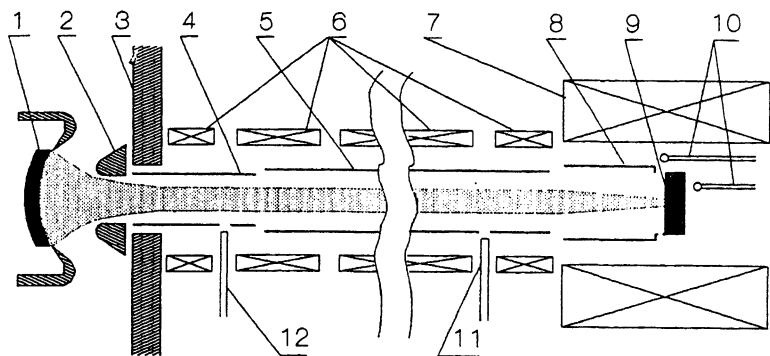
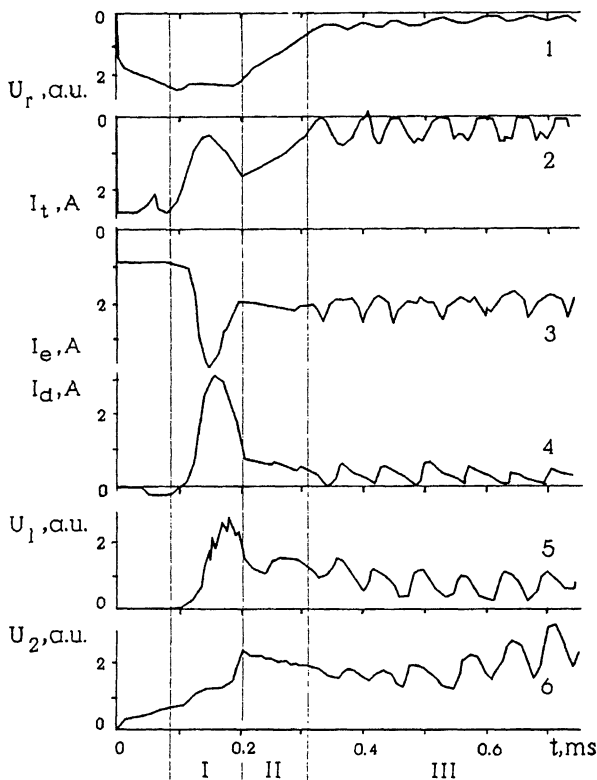


Рис. 1. Схематическое изображение системы формирования электронного пучка. 1 — термокатод, 2 — анод, 3 — магнитный экран, 4 — изолированный электрод, 5 — канал транспортировки, 6 и 7 — соленоиды, 8 — электрод, 9 — мишень-коллектор, 10 — датчики рентгеновского излучения; 11, 12 — датчики светового излучения.

дение рентгеновского (датчиками (10)) и светового (датчиками (11) и (12)) излучений из разных участков экспериментального прибора.

Измерения выполнены в режиме разовых импульсов. Регулируемое в пределах 0–40 кВ отрицательное напряжение  $U_c$  на катод пушки подавалось от емкостного накопителя, коммутируемого искровым разрядником. Колоколообразные импульсы магнитного поля имели длительность у основания 18 мс. Приведенные ниже данные получены при фиксированном напряжении  $U_c \approx 30$  кВ. Ток пушки варьировался в пределах 0–4.5 А изменением температуры катода и ограничивался полем пространственного заряда. Значения магнитного поля  $B_t$  и  $B_c$  выбирались из условия минимального осаждения электронов пучка на стенки канала транспортировки при фокусировке пучка на мишени в пятно диаметром 1 мм, фиксируемое по следу на мишени, и составили 0.5 и 1.8 Тл соответственно. Таким образом, достигалась компрессия по площади  $\sim 1500$  раз.

Ток пушки менялся слабо (менее 10% в миллисекунду), что позволило выявить принципиальные ограничения транспортировки ЭП, не связанные с ее работой. На рис. 2 показано изменение во времени токов и сигналов, характеризующих процессы в канале транспортировки. Сигналы рентгеновского датчика (10)  $U_r$  (кривая 1) отражают изменение тока быстрых электронов пучка на мишень. Падение величины  $U_r$  в области  $t \geq 200$  мкс обусловлено уменьшением этого тока. Действительно, такой спад наблюдается и в сигнале мишени  $I_t(t)$  (кривая 2). Обращает на себя внимание “провал” тока  $I_t$  в интервале  $100 \leq t \leq 200$  мкс



**Рис. 2.** Изменение во времени амплитуды сигнала с выхода рентгеновского датчика  $U_r$  (1); токов мишени  $I_t$  (2), электрода 4  $I_e$  (3), трубы дрейфа  $I_d$  (4); интенсивности световых сигналов  $U_1$  (5) и  $U_2$  (6) с датчиков 11 и 12.

(участок I). Этот провал в соответствии с данными об изменении  $U_r(t)$  нельзя связать с ослаблением бомбардировки мишени быстрыми электронами. Объяснить вид зависимости  $I_t(t)$  удастся, анализируя изменения токов  $I_e$  на электрод (4) (кривая 3) и на трубу дрейфа  $I_d$  (кривая 4), а также интенсивности светового излучения  $U_1$  и  $U_2$  (кривые 5, 6) с датчиков (11) и (12). Положение обсуждаемой особенности на зависимости  $I_t(t)$  коррелирует с пиками характеристик  $I_d(t)$  и  $I_e(t)$  в интервале  $100 \leq t \leq 200$  мкс. Именно на этом участке происходят резкое увеличение тока ионной полярности на трубу дрейфа и формирование пика интенсивности свечения сначала вблизи мишени, а затем и в удаленной от нее области трубы дрейфа. Можно связать поэтому особенности обсуждаемых характеристик с рождением плотной плазмы у мишени и ее распространением в сторо-

ну пушки. Эта плазма является источником ионных токов на трубу дрейфа и мишень, которые и объясняют изменение  $I_d$  и  $I_t$  на участке  $I$ . Происходящее здесь же увеличение тока  $I_e$  связано, видимо, с попаданием на электрод (4) медленных электронов из плазмы, поскольку подача на него малого (порядка 50 В) отрицательного смещения приводит к резкому падению  $I_e$  и росту токов анода и мишени на этом участке.

Взаимодействием ЭП с плотной коллекторной плазмой можно объяснить и ход характеристик в области  $t \geq 200$  мкс (рис. 2, участки  $II$ ,  $III$ ). Их сопоставление с аналогичными кривыми, полученными при отключенном соленоиде (7),\* позволяет утверждать, что спад тока на мишень на участке  $II$  определяется в основном потерями в плазме самой мишени, тогда как периодическая модуляция токов при  $t \geq 300$  мкс может быть обусловлена релаксационными процессами с участием плазмы, рожденной и другими электродами, также подвергающимися интенсивной бомбардировке.

Проведенные измерения позволяют определить достижимое энерговыделение на мишени в созданной системе. В течение  $\sim 300$  мкс на мишени выделяется  $\sim 20$  Дж, что соответствует плотности энергии  $\sim 2.0 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>2</sup>, если весь ток сосредоточен в пятне диаметром 1 мм<sup>2</sup>. С учетом хода зависимости  $I_t(t)$  в области  $III$  за время 5 мс, в течение которого продолжается бомбардировка мишени, на ее поверхности должно дополнительно выделиться  $\sim 70$  Дж.

Характеристики рис. 2 получены при фиксированном токе пушки  $I_g = 3.5$  А, но качественно подобны в широком интервале значений этого тока ( $1 \leq I_g \leq 4.5$  А). С уменьшением  $I_g$  в указанных пределах уменьшается масштаб регистрируемых особенностей и увеличивается их задержка относительно начала импульса. При еще меньших значениях  $I_g$  токи всех электродов и сигналы рентгеновских датчиков слабо меняются во времени, вплоть до  $t = 5$  мс.

Таким образом, в работе создана система формирования электронного пучка высокой плотности, выявлены принципиальные ограничения его длительности, обусловленные поглощением энергии ЭП в плазме, рождающейся при бомбардировке электродов, обнаружена периодическая модуляция части ЭП, достигающей мишени-коллектора, и выдвинута гипотеза о связи модуляции с развитием релаксационных колебаний в плазме.

\* При отключенном соленоиде (7) ( $B_c = 0$ ) из-за расфокусировки пучка резко падает плотность тока быстрых электронов на мишень и практически исключается формирование плотной коллекторной плазмы.

Авторы признательны сотруднику ИЯФ СО РАН Г.И.Кузнецову и сотруднику НИИ источников тока И.К.Батраку за содействие в создании электронной пушки, а также студенту А.В.Комашко за помощь в проведении измерений.

### Список литературы

- [1] *Milora S.L.* // J. Vac. Sci. 1989. V. 7. N 3. Pt 1. P. 925-937.
- [2] *Архипов А.В., Кутеев Б.В., Савицкий Н.Л.* и др. // Тез. докл. V Все-союз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Л., 1990. С. 155-156.

Санкт-Петербургский  
государственный технический  
университет

Поступило в Редакцию  
28 марта 1994 г.