

# ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПУШКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ АНОДОМ

Г.Е. О з у р, Д.И. П р о с к у р о в с к и й

Низкоэнергетичные ( $eU \sim 10\text{--}30$  кэВ) сильноточные электронные пучки (СЭП) представляют значительный интерес как инструмент для модификации поверхностных слоев материалов методом импульсного нагрева [1, 2]. Низкоэнергетичные СЭП получают, как правило, в вакуумных диодах прямого действия со взрывоэмиссионными катодами [3]. Однако длительность импульса в таких диодах обычно не превышает  $\tau_u \sim 10^{-7}$  с, т. к. ограничена временем переключения межэлектродного зазора катодной и анодной плазмами со скоростью  $(2\text{--}3) \cdot 10^6$  см/с [4]. Переход к длительностям импульса СЭП  $\tau_u \sim 10^{-6}$  с представляет определенный интерес, т. к. позволяет уменьшить дефектообразование в поверхностном слое облучаемого материала вследствие уменьшения скорости его нагрева [5].

Увеличение длительности импульса СЭП до  $\tau_u \approx 0.5\text{--}1$  мкс в вакуумном диоде прямого действия затруднительно, т. к. связано с увеличением межэлектродного расстояния и соответствующим уменьшением величины напряженности электрического поля на катоде  $E_k$ . Для увеличения  $E_k$  и первенаса электронного потока используют пушки с плазменным анодом [6]. Плазма, генерируемая искровыми источниками, расположенными в отверстии анодного электрода, натекает в диодный промежуток, сокращает эффективный зазор и существенно увеличивает  $E_k$ . Электронный пучок, формируемый в двойном слое между катодной и анодной плазмами, фокусируется в плазменной анодной линзе и почти полностью проходит в анодное отверстие. Однако в [6] пучок был резко неоднороден из-за сильного сжатия собственным магнитным полем. Кроме того, в [6] амплитуда ускоряющего напряжения составляла  $U_{max} \approx 80$  кВ. Снижение  $U_{max}$  до 20–30 кВ требует проверки возможности эффективного возбуждения взрывной электронной эмиссии на фронте импульса напряжения.

Величина напряженности поля  $E_k$  определяется характером изменения потенциала в прикатодном слое объемного заряда ионов. При медленном нарастании напряжения ( $\tau_n \ll \tau_f$ , где  $\tau_n$  – время пролета ионного слоя,  $\tau_f$  – длительность фронта импульса напряжения) распределение потенциала в слое соответствует закону Чайлда-Ленгмюра. При быстром нарастании напряжения ( $\tau_n \gg \tau_f$ , т. е. когда ионы практически не успевают сдвинуться с места) распределение потенциала в слое имеет вид:

$$U(x) = \frac{en_0 x^2}{2}, \quad (1)$$

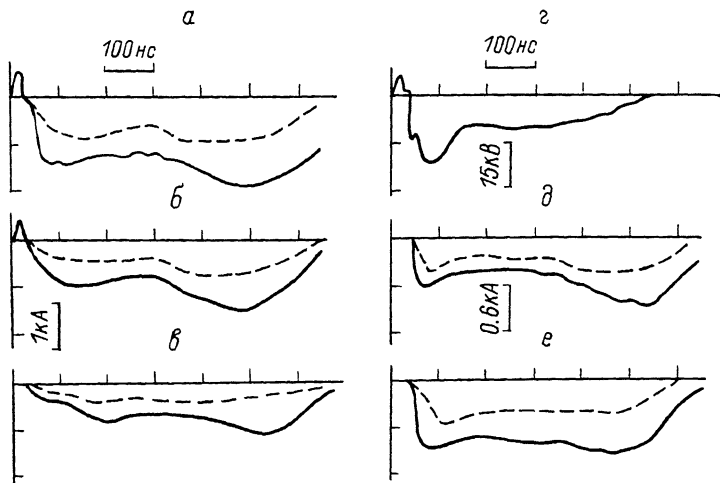


Рис. 1. Типичные осциллограммы.  $U_{max} = 20$  кВ.

а-в - ток в диоде при различных значениях амплитуды предымпульса: а - +25 кВ, б - +15 кВ, в - 0; г - напряжение на диоде,  $\tau_3 = 2$  мкс; д, е - осциллограммы коллекторного тока,  $l = 8$  см: д -  $\tau_3 = 1$  мкс; е -  $\tau_3 = 2$  мкс; сплошной линией показаны осциллограммы при  $H = 1.3$  кЭ, пунктирной - при  $H = 0$ .

где  $n_a \approx const$  - концентрация ионов анодной плазмы. Например, при  $n_a \approx 5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> и  $U_{max} = 30$  кВ значения  $E_k$ , вычисленные по закону Чайлда-Ленгмюра и по (1), составляют  $5 \cdot 10^4$  В/см и  $7 \cdot 10^5$  В/см соответственно, т. е. различаются более чем на порядок. Оценки показывают, что при выполнении закона Чайлда-Ленгмюра время пролета ионом слоя объемного заряда составляет  $\tau = 15$  нс для ионов  $C^+$  и  $\tau_{II} = 4.5$  нс для ионов  $H^+$ , т. е. сравнимо с характерной длительностью фронта импульса напряжения в сильноточных ускорителях. Следовательно, распределение потенциала в слое не является ленгмюровским. Также не выполняется и условие  $n_a(x) = const$ . В [7] приведено аналитическое выражение распределения потенциала в прикатодном слое для случая произвольного соотношения между  $\tau_{II}$  и  $\tau_{\phi}$ . Оценки значения  $E_k$  по модели [7] дают  $E_k \approx 3 \cdot 10^5$  В/см. Такая напряженность поля недостаточна для надежного и однородного по поверхности катода возбуждения взрывной эмиссии. Поэтому при разработке источника электронов были приняты дополнительные меры для улучшения работы катода.

В созданном нами источнике электронов анодная плазма с концентрацией  $n_a \sim 10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup> создавалась 12-ю источниками, расположенными по окружности анодного отверстия. Зазор катод-анод составлял 2.2 см, диаметр катода - 1.5 см. Катод был выполнен из пакета резисторов ТВО-0.125 с сошлифованными торцами, т. е. представлял собой регулярную углеграфито-керамическую

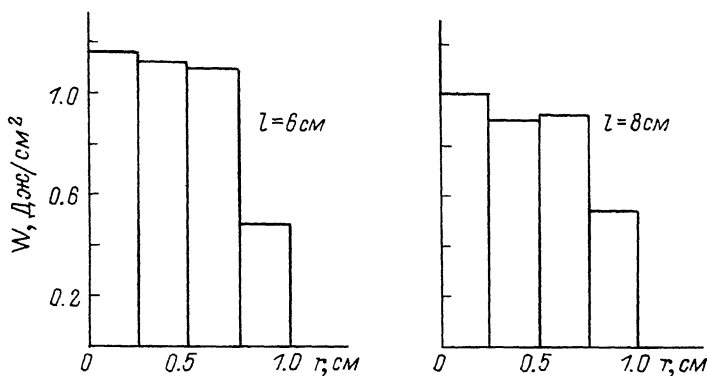


Рис. 2. Гистограммы распределения плотности энергии по сечению пучка,  $\tau_{\text{ж}} = 1 \text{ мкс}$ ,  $N = 1.3 \text{ кЭ}$ ,  $\tau_{\text{ж}} = 20 \text{ кВ}$ .

эмитирующую структуру. При случайном отсутствии эмиссии некоторых эмиттеров соседние функционирующие эмиттеры стимулируют на первых возбуждение взрывной эмиссии [4]. Генератор импульсных напряжений вырабатывал импульс специальной формы, состоящий из короткого ( $\sim 20 \text{ нс}$ ) положительного предимпульса амплитудой до  $30 \text{ кВ}$  и основного импульса ускоряющего напряжения амплитудой до  $30 \text{ кВ}$ , фронтом  $\tau_{\text{ф}} \approx 10^{-8} \text{ с}$  и длительностью до  $1.2 \text{ мкс}$ . Пауза между этими импульсами не превышала  $10\text{--}15 \text{ нс}$ . Время задержки подачи напряжения на катод относительно момента срабатывания искровых источников анодной плазмы обычно составляло  $0.5\text{--}3 \text{ мкс}$ . Внешнее ведущее магнитное поле напряженностью до  $2 \text{ кЭ}$ , предотвращающее пинчевание пучка, создавалось двумя катушками Гельмгольца. Электроны пучка поглощались коллектором, располагавшимся на расстоянии  $l = 6\text{--}10 \text{ см}$  от катода.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы импульсов тока в диоде, напряжения на диоде и тока на коллектор. Видно, что увеличение амплитуды положительного предимпульса приводит к существенному увеличению токоотбора в диоде и скорости нарастания тока. Рост токоотбора с увеличением амплитуды предимпульса объясняется следующим образом. При подаче предимпульса катодом является анодная плазма. Электроны анодной плазмы, бомбардируя катод, вызывают десорбцию молекул с его поверхности и их ионизацию. Как показывают оценки, концентрация образующейся плазмы составляет  $10^{14}\text{--}10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Наличие такой предварительно созданной плазмы стимулирует возбуждение взрывной эмиссии на катоде, одновременно увеличивая начальную эффективную площадь эмиссии, что повышает эффективность токоотбора в диоде.

Наложение внешнего ведущего магнитного поля не только предотвращает пинчевание пучка, но и увеличивает его ток, стабилизирует воспроизводимость его параметров от импульса к импульсу. Времяпролетные измерения с помощью зондов показали, что скорос-

ти разлета анодной плазмы поперек и вдоль силовых линий магнитного поля составили  $2 \cdot 10^6$  см/с и  $(3-4) \cdot 10^6$  см/с соответственно, т. е. магнитное поле не препятствует образованию квазиоднородного плазменного облака.

Результаты измерений распределения плотности энергии по сечению пучка  $W(r)$  приведены на рис. 2. Видно, что в определенных режимах распределение является квазиоднородным. Плотность энергии на коллекторе можно регулировать длиной транспортировки пучка и запасенной в ГИНе энергией в пределах  $(0.2-4)$  Дж/см<sup>2</sup>.

Наблюдаемые на опыте величины коллекторных токов примерно на порядок превосходят критические токи, при которых могут развиваться наиболее опасные электростатические неустойчивости: пирсовская и пучково-дрейфовая. Это свидетельствует, по-видимому, о плазменной стабилизации пучка, т. е. о повышении порога развития этих неустойчивостей примерно в  $n_a/n_b$  раз ( $n_b$  - концентрация электронов в пучке) [8].

Таким образом, низкоэнергетичные СЭП субмикросекундной длительности могут достаточно эффективно генерироваться в пушках с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом и транспортироваться на расстояние  $l \sim 10$  см. Последнее позволяет существенно уменьшить попадание продуктов эрозии катода и анода на облучаемую поверхность.

Благодарим Е.Б. Янкелевича за помощь в разработке установки.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Ротштейн В.П., Лебедева Н.И. - ДАН СССР, 1980, т. 253, № 6, с. 1383-1386.
- [2] D v u r e s h e n s k i i A.V. et al. - Phys. Stat. Sol. 1982, v. 69, N 1, p. 183-187.
- [3] Коваль Б.А., Месяц Г.А., Озур Г.Е. и др. - Письма в ЖТФ, 1981, т. 7, № 20, с. 1227-1230.
- [4] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [5] Рыжов В.В., Турчановский И.Ю., Шемякина С.Б. - Физ. и хим. обработки материалов, 1985, № 3, с. 56-59.
- [6] Иремашвили Д.В., Осепашвили Т.А., Какучая П.И. - Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, № 11, с. 508-511.
- [7] A n d r e w s I.G., V a r e y R.H. - Phys. Fluids, 1971, v. 14, N 2, p. 453-460.
- [8] Незлин М.В. Динамика пучков в плазме. М.: Энергоиздат, 1982. 263 с.

Поступило в Редакцию  
1 декабря 1987 г.