

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛОТНОГО ОБЛАКА ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

А.В.Аржанников, А.В.Бурдаков, В.С.Койдан,
Д.Д.Рютов

Экспериментально показана возможность захвата значительной доли электронов сильноточного релятивистского пучка в плазменном объеме, ограниченном тонкими фольгами. Плотность накопленных электронов более чем на порядок превышает плотность исходного пучка.

При инжекции в вакуум релятивистского электронного пучка (РЭП) со сверхкритическим током у анодной фольги должно возникать облако осциллирующих электронов [1, 2]. Как показано в [1], плотность такого облака может значительно превышать исходную плотность пучка, причем полное число захваченных электронов можно существенно увеличить, если с внешней стороны анодной фольги создать плазменный промежуток, длина которого L существенно превышает зазор катод-анод.

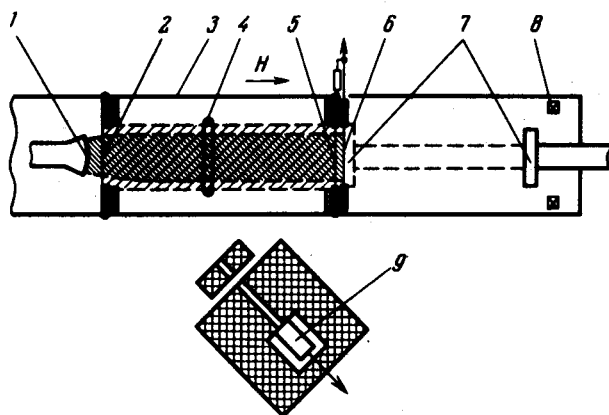


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — катод ускорителя, 2 — входная фольга, 3 — обратные токопроводы, 4 — анод пеннинговского разряда, 5 — выходная фольга, 6 — выходная измерительная фольга, 7 — графитовый коллектор, 8 — пояс Роговского, 9 — рентгеновский детектор в свинцовой защите

Для экспериментальной проверки возможности получения плотного облака релятивистских электронов использовалась установка "ИНАР" [3]. Схема эксперимента показана на рис. 1. РЭП с энергией 0,8 Мэв, током до 14 кА и ϕ см инжектировался через входную (анодную) фольгу 2 в шнур водородной плазмы ϕ 6,5 см, длиной $L = 20$ см и плотность $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$, который создавался пеннинговским разрядом. Выходная фольга 5 отделяла плазму от вакуумного объема, в котором мог размещаться графитовый коллектор 7. За фольгой 5 на расстоянии, существенно меньшем зазора катод-анод, была установлена дополни-

тельная фольга *б*. Эта фольга соединялась с фольгой *5* безындуктивным шунтом. В эксперименте использовались фольги из алюминия толщиной $5 \div 50$ мкм. Вся система находилась в магнитном поле 12 кэ; в области диода поле было в $1,3$ раза больше. Тормозное γ -излучение с фольги *2* регистрировалось сцинтилляционным детектором *9*, который был изготовлен и установлен таким образом, что он принимал γ -излучение, идущее из центра анодной фольги под углом 45° к ее поверхности.

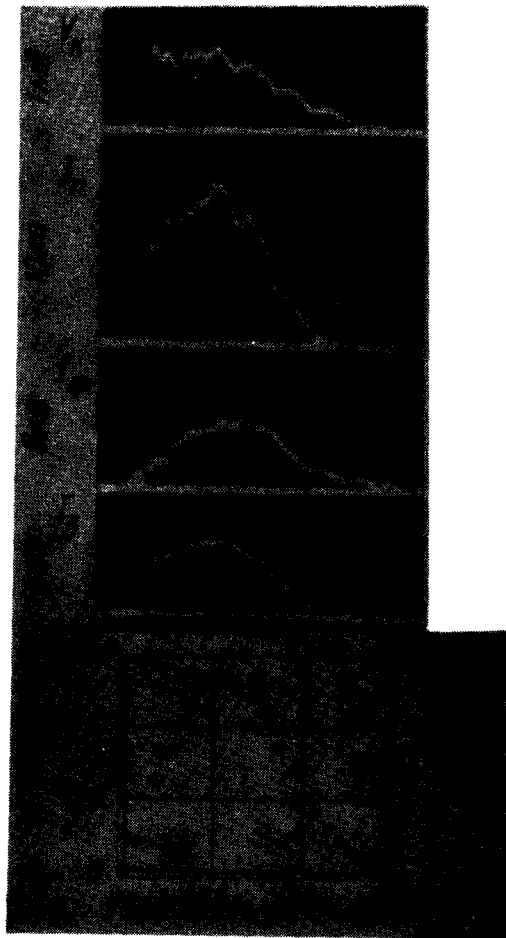


Рис. 2. Осциллограммы, демонстрирующие эффект накопления при $d_2 = d_5 = 10$ мкм, $d_6 = 50$ мкм: *а* — напряжение на катоде ускорителя, *б* — ток инжектируемого пучка, *в* — ток на измерительную фольгу *б*, *г* — ток, стекающий в вакуум, *д* — заряд накопленных релятивистских электронов

Результаты экспериментов представлены на рис. 2 и 3. Если коллектор *7* находится в контакте с фольгой *б*, то шунт в цепи этой фольги регистрирует ток пучка, прошедшего через плазму (этот ток практически совпадает с диодным током), на поясе Роговского *8* сигнал отсутствует, а сигнал с детектора *9* соответствует однократному прохождению РЭП через фольгу *2*. Если же коллектор *7* отодвигается от фольг *5*, *б* на расстояние 50 см, то, так как инжектируемый ток (рис. 2, *б*) существенно выше вакуумного тока (рис. 2, *г*), большая часть электронов

пучка отражается назад, и появляются условия для осцилляций релятивистских электронов между катодом ускорителя и "виртуальным катодом" в вакууме, за фольгами 5, 6. В этом случае ток на измерительных фольгах (рис. 2, в) нарастает медленно (он обусловлен в основном поглощением осциллирующих электронов в фольге), а рентгеновский сигнал увеличивается во много раз.

Вообще говоря, вклад в сигнал с фольги 6 может вносить также наведенный ток, обусловленный изменением заряда электронного облака у этой фольги. Экспериментально установлено, что при толщине фольги $d_6 \geq 50$ мкм вкладом наведенного тока можно пренебречь; при меньшей толщине этот ток учитывался при последующей обработке осциллограмм. Кроме того, путем изменения толщины фольги 6 при неизменной суммарной толщине фольг $d = d_2 + d_5 + d_6$ было установлено, что ток поглощаемых электронов пропорционален толщине фольги. Это позволяло определять суммарный ток на все фольги $\Sigma I_{\Phi}(t)$ по току, стекающему на фольгу 6.

Из осциллограмм рис. 2 видно, что в течение примерно 25 нсек инжектируемый ток $I_{\Pi}(t)$ превышает сумму токов на фольги $\Sigma I_{\Phi}(t)$ и в вакуум $I_{\text{В}}(t)$, т. е. происходит накопление релятивистских электронов в плазменном объеме. Изменение полного заряда накопленных электронов можно вычислить с помощью уравнения $\dot{Q} = I_{\Pi}(t) - I_{\text{В}}(t) - \Sigma I_{\Phi}(t)$. Графическое интегрирование этого уравнения позволяет найти зависимость $Q(t)$ (рис. 2, д). В рассматриваемом случае максимальный заряд накопленных электронов составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$ Кл, что примерно в 14 раз превышает заряд исходного пучка в плазменном промежутке при однократном прохождении.

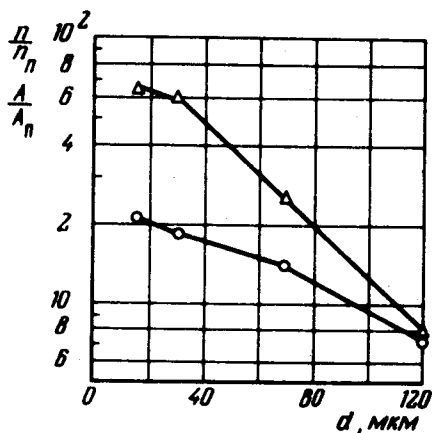


Рис. 3. Зависимость эффекта накопления от суммарной толщины фольг: о — отношение максимальной плотности накопленных электронов n к максимальной плотности исходного пучка n_{Π} ($n_{\Pi} = 2,3 \cdot 10^{11}$ см⁻³), Δ — отношение амплитуды A рентгеновского сигнала в режиме накопления к его амплитуде A_{Π} при однократном прохождении пучка

При уменьшении суммарной толщины фольг d плотность накопленных электронов возрастает (рис. 3), поскольку до поглощения фольгами электроны пучка совершают большее число колебаний между точками поворота. Отметим, что при $d \lesssim 30$ мкм наблюдается уменьшение диодного тока; при $d = 15$ мкм оно достигает 30%. Этот эффект может быть объяснен действием пространственного заряда той части облака, которая находится в диоде [1].

При уменьшении d рентгеновский сигнал растет быстрее, чем плотность накопленных электронов (рис. 3). Причина состоит в том, что возрастание рентгеновского сигнала обусловлено не только увеличением числа электронов, пересекающих фольгу Z , но и расширением диаграммы направленности тормозного излучения вследствие углового рассеяния электронов при многократном прохождении через фольги. Следует заметить, что при $d = \text{const}$ величина рентгеновского сигнала примерно пропорциональна толщине входной фольги как в режиме однократного прохождения пучка, так и в режиме накопления. Это означает, что наблюдается рентгеновское излучение действительно с фольги, а не с катода ускорителя.

Максимальный заряд накопленных электронов достигался при минимальной суммарной толщине фольг ($d = 15 \text{ мкм}$) и составлял $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$, что соответствует полному числу релятивистских электронов $1,2 \cdot 10^{15}$ и их объемной плотности $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; давление этого облака равно примерно 1 атм .

Такое электронное облако представляет интерес в двух отношениях. Во-первых, плотность запасенной в нем энергии существенно выше, чем в исходном пучке, а время, в течение которого эта энергия может быть высвобождена, очень мало ($\sim L/c$). Во-вторых, при условии создания плазмы на внешней стороне фольги b можно осуществить коллективное ускорение большого числа ионов (их плотность будет порядка плотности накопленных электронов) до энергии, в несколько раз превосходящей ускоряющее напряжение в диоде [4]. Результаты эксперимента свидетельствуют о реальности указанных применений.

Авторы приносят благодарность Г.И.Будкеру за поддержку работы и В.А.Расторопову за помощь в проведении экспериментов.

Институт ядерной физики
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1 мая 1976 г.

Литература

- [1] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Препринт №75-111 Института ядерной физики СО АН СССР, 1975; Физика плазмы, 2, вып. 3, 1976.
- [2] J. M. Creedon, I. D. Smith, D. S. Prono. Phys. Rev. Lett., 35, 91, 1975.
- [3] Ю.И.Абрашитов, В.С.Койдан, В.В.Конюхов, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер, Д.Д.Рютов. ЖЭТФ, 66, 1324, 1974.
- [4] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 2, вып. 6, 1976.