

О ГАЗОВОЙ ФОКУСИРОВКЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
НА УСКОРИТЕЛЕ "ИМПУЛЬС"

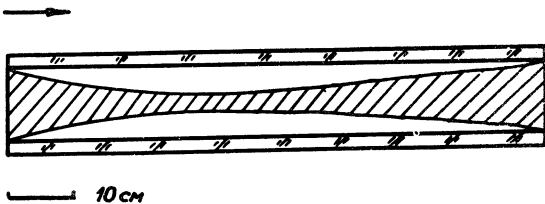
Д. Н. Казанский, В. М. Лихачев, И. В. Сивильникова,
О. А. Смит, Ю. Н. Чехонацкий

Теоретически явление газовой фокусировки электронного пучка впервые было рассмотрено в работах /1,2/. Было показано, что в результате компенсации пространственного заряда происходит стягивание электронов к оси пучка. Экспериментально одним из первых это явление на электронных сильноточных ускорителях наблюдал Линк /3/ при изучении поведения пучка в дрейфовой камере при разных давлениях.

В данной работе исследование газовой фокусировки электронного пучка проводилось на установке "Импульс" ФИАН /4/. Ускоритель позволяет получить электронный пучок с параметрами 800 кэВ, 30 Ка, 50 нсек. Описанные ниже эксперименты были выполнены при токе в пучковой камере $3+12$ кА, максимальной энергии электронов 300 кэВ и длительности импульса тока ~ 120 нсек.

Для регистрации тока пучка использовались цилиндр Фарадея и малондуктивный низкоомный шунт ($R = 0,05$ ом). Геометрические размеры пучка определялись по размеру области свечения газа в камере, фиксируемой фотоаппаратом, и по автографу пучка на свинцовых пластинках. На рис. 1 и рис. 2 приведены форма и размеры области свечения газа и осциллограмма тока, получаемого с шунта при прохождении пучка электронов через камеру. Из полученных экспериментальных данных видно, что только в диапазоне давлений $P = (0,4 \div 1)$ тор наблюдается сжатие пучка. При давлении $P < 5 \cdot 10^{-2}$ тор вследствие кулоновского расталкивания частиц пучок практически не проходит в дрейфовую камеру, а при давлениях $P > 1$ тор появляется свечение вблизи стенок, которое, вероятно, связано с взаимодействием пучка с образовавшейся плазмой. Явле-

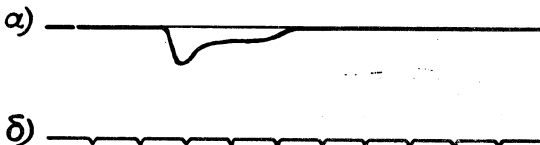
ние газовой фокусировки пучка электронов можно было зафиксировать и по автографу пучка на свинцовых пластинках, расположенных на пути движения пучка.



Р и с. 1. Область свечения газа при прохождении электронного пучка через камеру. $P = 7 \cdot 10^{-1}$ тор, $I = 4$ ка.

Теоретическое рассмотрение явления газовой фокусировки применительно к режиму работы ускорителя "Импульс" дано в работе /5/.

Для качественного объяснения полученных результатов рассмотрим пучок с равномерным распределением плотности тока j по се-



Р и с. 2. Осциллограмма тока в пучковой камере. а) $I = 4$ ка, $P = 7 \cdot 10^{-1}$ тор; б) метки времени: цена деления 200 нсек.

чению длиной L и радиусом b , причем $L \gg b$. Предположим, что продольная скорость электронов постоянная, а электрическое поле только радиальное. Тогда уравнение движения для граничного электрона имеет вид

$$\gamma m \ddot{r} = eE_r - \frac{e}{c} v B_\varphi = 2N_e \frac{e^2}{r} [1 - f - \beta^2(1 - f_m)],$$

где N_e - линейная плотность электронов пучка, N_1 - линейная плотность ионов, $f = \frac{N_e}{N_1}$, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, f_m - коэффициент магнитной компенсации, учитывающий обратный ток.

Из уравнения видно, что необходимым условием начала скатия при $r_m = 0$ является выполнение неравенства

$$\beta^2 + r \geq 1 \quad \text{или} \quad N_1 \geq N_e / \gamma^2.$$

Решение уравнения при начальных условиях $r(0) = b$, $\dot{r}(0) = 0$ имеет вид $r = b \cos(2L/\lambda) \beta \cos t$, где $\lambda = (2L/\pi \beta^2 \epsilon^3)^{1/2} \times [\epsilon(\beta^2 + r - 1)]^{-1/2} j^{-1/2}$. Величина λ есть расстояние, на котором происходит фокусировка. В нашем случае при $I = 4,0$ кэВ = 300 кэВ и $b = 2,2$ см, $\lambda = 26$ см. Экспериментально полученное значение равно 30 см.

Другой важной пространственной характеристикой процесса скатия является конечный радиус пучка r_k . Приведенная выше формула слишком идеализирована и не позволяет сделать оценку его величины. В результате обработки снимков было установлено, что минимальный радиус скатия равен $r_k \approx 0,6b$. Наконец, оценем интервал давлений, в котором происходит газовая фокусировка электронного пучка. Скатие пучка начинается тогда, когда $N_1 = N_e / \gamma^2$, поэтому нижнюю границу для плотности газа можно определить из следующей формулы:

$$n_a = \frac{1}{\sigma v_{\text{имп}} \beta \epsilon \gamma^2}.$$

При $E = 300$ кэВ, $\sigma \sim 10^{-19}$ см² для n_a получаем значение $\sim 2 \cdot 10^{15}$, т.е. 0,1 тор. Верхняя граница интервала давлений, при которых еще происходит газовая фокусировка, будет определяться образованием достаточно плотной плазмы, когда возможно возникновение обратных токов и неустойчивостей в системе пучок-плазма. В наших условиях она соответствует приблизительно давлению в I тор. Данные эксперимента подтвердили эти качественные расчеты. Газовая фокусировка наблюдалась нами в диапазоне давлений $0,4 \div I$ тор.

Эти выводы подтверждаются также выполненными ранее опытами Лянка /3/.

Поступила в редакцию
10 августа 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. Я. И. Френкель, С. А. Бобровский. ИЭФ, II, 353 (1932).
2. Б. И. Давыдов, С. И. Брагинский. Сборник, посвященный семидесятилетию академика А. Ф. Иоффе, 1950 г., стр. 72.
3. W. T. Link. IEEE Trans on Nucl. Sci., NS-14, 777 (1967).
4. Л. Н. Казанский, А. А. Коломенский, Г. О. Месхи, Б. Н. Яблочков. Доклад на II Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1970 г.
5. А. В. Агафонов, А. Н. Лебедев. ИФ, 42, 1432. (1972).