

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С МАЛЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ В СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМ СОПРОВОЖДЕНИЕМ

Т.Н. Андреева, И.Н. Мешков, А.Н. Шарапа, А.В. Шемякин  
Институт ядерной физики СО АН СССР  
Новосибирск, 630090

В системах электронного охлаждения необходимо формирование электронного пучка с малыми поперечными скоростями  $v_{\perp}$ . Считается, что эффективным способом минимизации поперечных скоростей на выходе из пушки является так называемая «резонансная оптика», в которой предлагается обеспечить квази-прямоугольное распределение радиальной компоненты

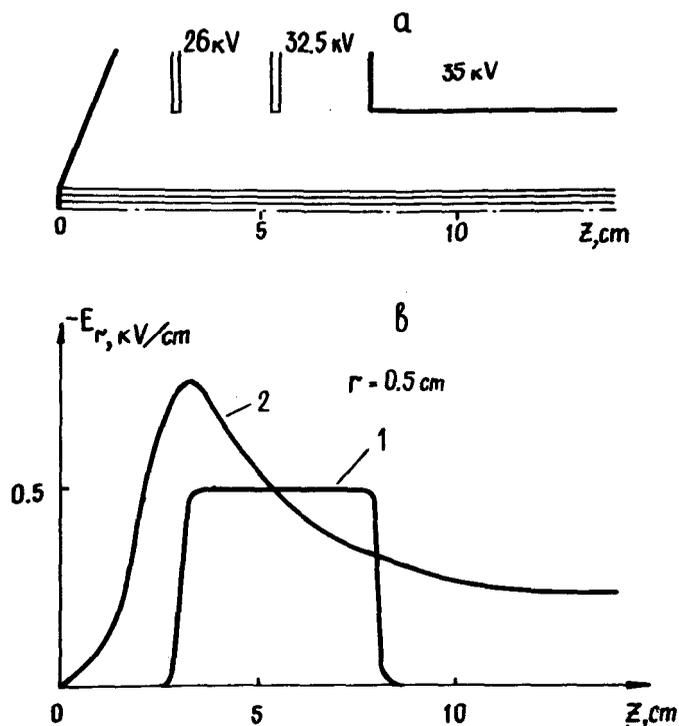


Рис. 1. Электронная пушка установки НАП-М: а—схема пушки, б—распределение радиальной компоненты электрического поля на границе пучка: 1—«резонансная оптика», 2—распределение для пушки НАП-М.

электрического поля  $E_r$  (рис. 1, кривая 1), что дает резонансную зависимость поперечной скорости от величины магнитного поля  $H$ . Однако более детальный анализ показывает, что получить требуемое распределение  $E_r$  не удастся. Трудности с формированием необходимого распределения  $E_r$  носят достаточно принципиальный характер и связаны, в частности, с тем, что в реальной пушке (в том числе и многоэлектродной) нельзя получить плато на распределении  $E_r$ . Попытки реализовать в чистом виде «резонансную оптику» помогли осознать, что более последовательным подходом является формирование в пушке максимально «гладкого» распределения  $E_r$ .

Резонансная зависимость  $v_{\perp}$  от  $H$ , полученная во многих расчетах<sup>3, 4, 5</sup>, связана, по-видимому, со сложным характером движения электрона в дрейфовом промежутке (за пушкой). Это движение можно представить как суперпозицию быстрого ларморовского

вращения со скоростью  $v_L$  и медленного дрейфа центра ларморовского «кружка». Скорость этого дрейфа  $v_D = cE_B/H$  определяется полем пучка  $E_B$ . Обе составляющие скорости постоянны вдоль пучка, а

$$\bar{v}_{\perp} = \bar{v}_L + \bar{v}_D$$

осциллирует с периодом

$$\lambda = 2\pi r c / eH,$$

где  $r$ —полный импульс электрона. Поэтому в любой фиксированной точке пучка вдали от пушки зависимость  $v_{\perp}(H)$  имеет немонотонный характер («резонанс!»). Это отчетливо видно на кривых рис. 2, где

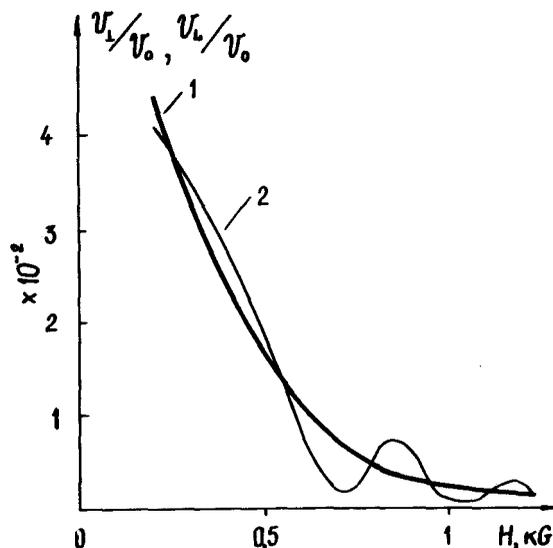


Рис. 2. Зависимость ларморовской (1) и полной поперечной (2) скоростей граничного электрона от величины магнитного поля для пушки НАП-М в плоскости  $z = 14$  см.

приведены расчетные зависимости  $v_L$  и  $v_{\perp}$  от величины магнитного поля для установки НАП-М. Аналогичное распределение радиальной компоненты электрического поля имело место в пушке установки электронного охлаждения<sup>3-5</sup> ЦЕРН, и расчеты дали для  $v_{\perp}$  резонансную зависимость от магнитного поля.

Таким образом, ясно, что задача заключается в формировании пучка с минимальным  $v_{\perp}$ . Очевидно, что значение  $v_L$  зависит от величины  $E_r$  в пушке и гладкости ее распределения. Для распределений, подобных приведенному на рис. 1 (кривая 2),

$$v_L \approx cE_r^{\max} / H,$$

где  $E_r^{\max}$ —максимальное значение функции  $E_r(z)$ . Эту величину можно оценить, воспользовавшись теоремой Гаусса и схемой пушки, показанной на рис. 3:

$$E_r^{\max} = \frac{4\pi Q}{2\pi R L} = \frac{2I}{v_0 R} \left( \frac{3L_0 + L}{L} \right) = E_B \left( \frac{3L_0}{L} + 1 \right),$$

где  $I$ ,  $E_b$  — ток и поле пространственного заряда пучка;  $v_0$  — полная скорость электронов;  $L_0$ ,  $L$  — протяженности ускоряющего зазора и области возмущения радиального поля (см. рис. 3). Отсюда следует, что для

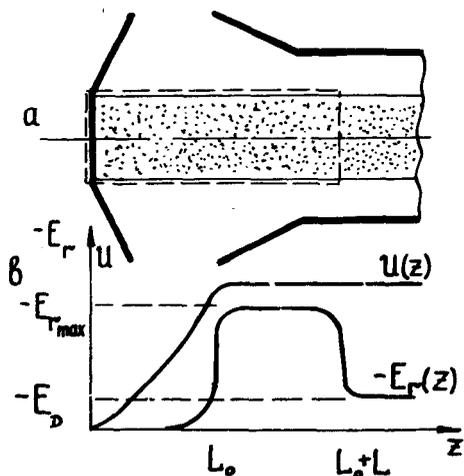


Рис. 3. Модель для оценки максимального значения  $E_r$ . Пунктиром показан контур интегрирования.  $a$  — схема пушки,  $b$  — распределение потенциала и  $E_r$ .

уменьшения  $E_r^{\max}$  необходимо увеличивать  $L$ , т. е. «сглаживать» распределение  $E_r$ . Иллюстрацией этого может служить рис. 4, на котором приведены зависимости  $v_e/v_b(H)$  для пушек с одинаковым первеансом,

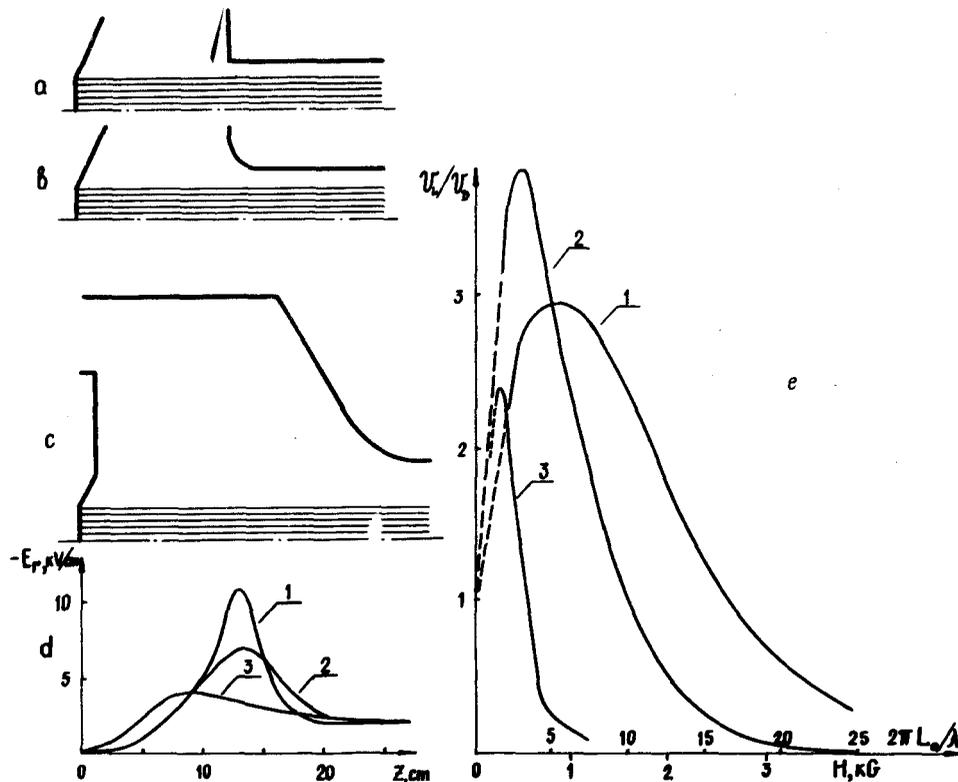


Рис. 4. Схемы диодных пушек с одинаковыми значениями первеанса ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и их характеристики:  $d$  — распределение  $E_r$ ,  $e$  — зависимость ларморовской скорости (в единицах  $v_b$ ) от напряженности магнитного поля. Кривые 1, 2, 3 характеризуют пушки с геометриями  $a$ ,  $b$ ,  $c$  соответственно.

но разной формой электродов. Для гладкой функции  $E_r(z)$  заданное значение  $v_e \approx v_b$  достигается при значительно меньших магнитных полях. Оптимальной является геометрия  $c$  (рис. 4).

При анализе описанной задачи преимущественно

использовались численные методы. Использование аналитических методов, подобных развитым в физике плазмы и теории колебаний (дрейфовое приближение, сохранение адиабатического инварианта и т. д.), здесь руд ч ц т р у т да - левой скоростью и адиабатический инвариант равен нулю.

#### Литература

1. Будкер Г.И., Скринский А.Н. УФН, 1978, т.124, вып.4, с.561.
2. Куделайнен В.И., Мешков И.Н., Салимов Р.А. ЖТФ, 1972, т.16, с.1821.
3. Bell M., Chaney J., Krienen F., Möller-Petersen P., Petrucci G., Nucl. Instr. and Meth., 1981, v.190, N 2, p.237.
4. Haseroti H., Hill C.E., Vallet J.-L., Habfast C., Hütten L., Poth H., Wolf A. Proc. of the Workshop on Electron Cooling and Related Applications. Karlsruhe, 1984, p.93.
5. Wolf A. Elektronenkühlung für niederenergetische Antiprotonen. KfK 4023, Kernforschungs-zentrum Karlsruhe, 1986.

#### Discussion

Р.А. Салимов. Как совмещается гладкость оптики с высоким первеансом?

А.В. Шемякин. Я еще раз подчеркиваю, что все три пушки имеют одинаковый первеанс. Увеличение расстояния катод-анод для пушки с гладкой оптикой компенсируется изменением геометрии прикатодного электрода.

Н.Г. Хавин. Скажите, насколько равномерно распределение плотности тока по катоду для пушки с гладкой оптикой?

А.В. Шемякин. Около 4%.