

УДК 681.7

МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗАТОР ВИНТОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
НА ОСНОВЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО МАГНИТНОГО ЗЕРКАЛА© 2011 г. А. К. Гвоздев, Н. И. Зайцев, С. А. Запевалов, Е. В. Иляков,
А. Ш. Фикс, А. С. Шевченко

Институт прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 15.09.2010 г.

Описан магнитный анализатор винтового субрелятивистского электронного пучка, сформированного трехэлектродной магнетронно-инжекторной пушкой в поле криомагнита. Сепарация электронов по поперечным скоростям осуществляется адиабатически нарастающим по ходу пучка магнитным полем. Анализатором измерен разброс электронов по скоростям и питч-фактор микросекундного винтового электронного пучка с энергией электронов 300 кэВ и током 100 А.

ВВЕДЕНИЕ

Выходная мощность и к.п.д. гироприборов сильно зависят от характеристик электронного пучка (питч-фактора, разброса электронов по скоростям). Полученные с помощью численного моделирования параметры электронного пучка часто не соответствуют экспериментальным данным. На практике измеренный питч-фактор ниже, а скоростной разброс электронов выше расчетных данных [1]. Поэтому при разработке мощных гироприборов желательно иметь экспериментальные значения параметров винтового электронного пучка (в.э.п.).

До последнего времени анализ винтового электронного пучка осуществлялся с помощью электростатического анализатора методом тормозящего поля [2]. Измерения проводились в моделирующем режиме, согласно известным законам подобия: ток пропорционален напряжению в степени $3/2$, магнитное поле пропорционально квадратному корню из напряжения. Но при субрелятивистских энергиях электронов для измерения параметров необходим приемлемо большой коэффициент моделирования, поскольку напряжение на датчике ограничено его электропрочностью (разумными пределами) и законы подобия не учитывают изменение массы электрона. Кроме того, существенное снижение температуры эмиттера, необходимое для реализации моделирующего режима, может приводить к дополнительной неоднородности плотности инжектируемого тока [3].

Для анализа в.э.п. в реальных режимах предложен и исследован магнитный анализатор, в котором сепарация электронов по скоростям осуществляется адиабатически нарастающим по ходу пучка магнитным полем [3]. Микросекундная длительность питающего напряжения предотвращает раз-

рушение электродов электронным пучком. Этот датчик использовался для анализа в.э.п., сформированного в магнитном поле импульсного соленоида, которое слабо искажалось импульсным полем датчика.

В системе с криомагнитом, согласно оценкам, приведенным ниже, поле датчика могло вывести соленоид из сверхпроводимости. Для предотвращения этого между соленоидами анализатора и криомагнитом установлен массивный медный экран, а также уменьшена длительность импульса магнитного поля анализатора.

ОПИСАНИЕ МАГНИТНОГО АНАЛИЗАТОРА

Схема магнитного анализатора приведена на рис. 1. Анализатор с импульсным соленоидом **б** внутри вакуумного кожуха установлен в трубе канала транспортировки в.э.п. Секторная диафрагма **4** перехватывает основную часть электронов первичного пучка. Электроны с катода, прошедшие через секторную диафрагму, попадают в область адиабатически нарастающего по ходу пучка магнитного поля, созданного соленоидом **б**, и оседают на коллекторе **7**. С увеличением магнитного поля соленоида часть электронов отражается от магнитного зеркала и оседает на коллимирующей диафрагме.

Соотношение прошедшего на коллектор и основного тока пучка $J_{\text{пр}}/J_{\text{max}}$ в зависимости от максимального по продольной координате значения магнитного поля H_{max} дает информацию о распределении электронов по скоростям, а также о питч-факторе пучка. Анализатор по такой схеме успешно использовался для анализа в.э.п., сформированного в импульсном магнитном поле, где взаимное влияние соленоида ведущего поля и соленоида анализатора было слабым [3].

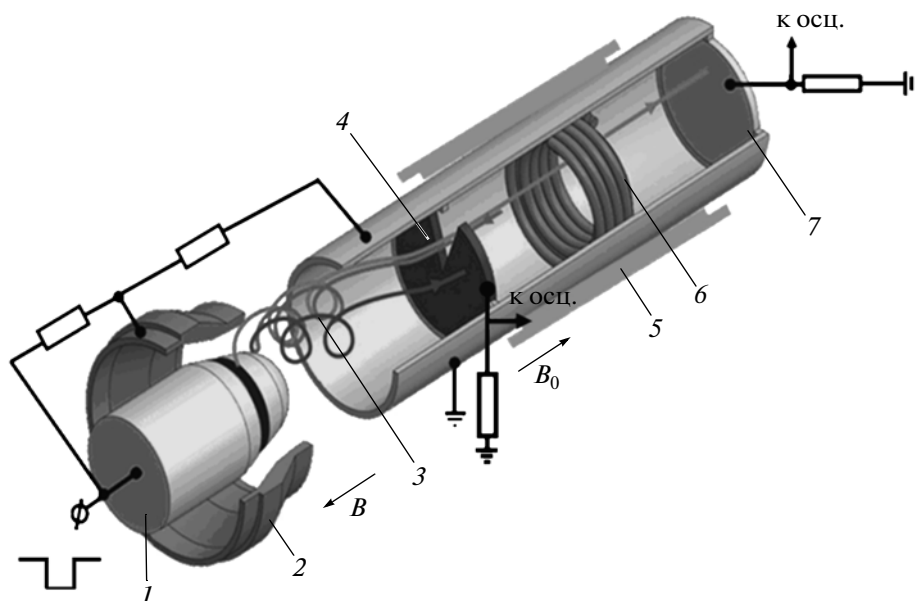


Рис. 1. Схема магнитного анализатора. B_0 – магнитное поле криомагнита; B – магнитное поле катодного соленоида; 1 – катод, 2 – анод, 3 – электронный пучок, 4 – секторная диафрагма, 5 – медный экран, 6 – импульсный соленоид, 7 – коллектор.

В случае формирования в.э.п. в поле криомагнита индуктивная связь между соленоидом криомагнита и соленоидом датчика скоростного разброса может привести к нарушению сверхпроводимости – квенчу. Для нашего случая максимально допустимое напряжение на сверхпроводящем магните в режиме перестройки тока оценивается в 5 В, следовательно, для нормальной работы сверхпроводящего соленоида индуцированное на нем напряжение не должно превышать указанного значения. Это не очевидное предположение, поскольку характерное время развития квенча составляет десятки миллисекунд, а длительность импульса тока соленоида датчика – 150 мкс, и возможно, что максимально допустимое напряжение на сверхпроводящем соленоиде при столь коротком импульсе увеличится.

Для уменьшения индуцированного напряжения между основным соленоидом и соленоидом датчика установлен медный экран 5. Согласно оценкам [4], толщина экрана должна быть

$$h_s > \delta \ln(R_s/2\delta) = 3.5 \text{ мм},$$

где δ – толщина скин-слоя для импульсного поля длительностью 150 мкс, R_s – радиус экрана.

Толщина экрана выбрана с запасом – 10 мм, при этом измеренное с помощью индуктивного зонда поле внутри соленоида анализатора составило 20 кЭ, а поле вне экрана не превышало 4 Э. Секторная диафрагма и коллектор анализатора изготовлены из пиролитического графита, что минимизировало влияние отраженных электронов на результаты измерений (уменьшило коли-

чество упруго отраженных электронов и снизило вероятность образования плазмы на электродах).

Экспериментальное измерение параметров в.э.п.

Измерялись параметры в.э.п., сформированного в трехэлектродной электронной пушке, схема которой представлена на рис. 2.

На рис. 3а, б приведены характерные осциллограммы.

Расчет параметров в.э.п.

Характерная зависимость прошедшего на коллектор тока $J_{пр}/J_{max}$ от величины пробочного соотношения магнитных полей $[(B_0 + \Delta B)/B_0]^{-1/2} = v_{\perp}/v$ (ΔB – поле, созданное соленоидом анализатора) (рис. 4а) [3] и функция распределения электронов по поперечным скоростям (рис. 4б) приведены для режима: ток пучка 40 А, напряжение на катоде 290 кВ, поле $B_0 = 14.48$ кГс.

Относительный разброс электронов по скоростям δv_{\perp} принято рассчитывать по точкам v_{\perp}/v на кривой отсечки, в которых анализатор отсекает 10 и 90% максимального тока [2]. Обозначив эти значения соответственно $(v_{\perp}/v)_{0.1}$ и $(v_{\perp}/v)_{0.9}$, находим разброс из выражения

$$\delta v_{\perp} = \frac{(v_{\perp}/v)_{0.9} - (v_{\perp}/v)_{0.1}}{[(v_{\perp}/v)_{0.9} + (v_{\perp}/v)_{0.1}]/2}. \quad (1)$$

На практике в качестве средней поперечной скорости принято считать величину, при которой

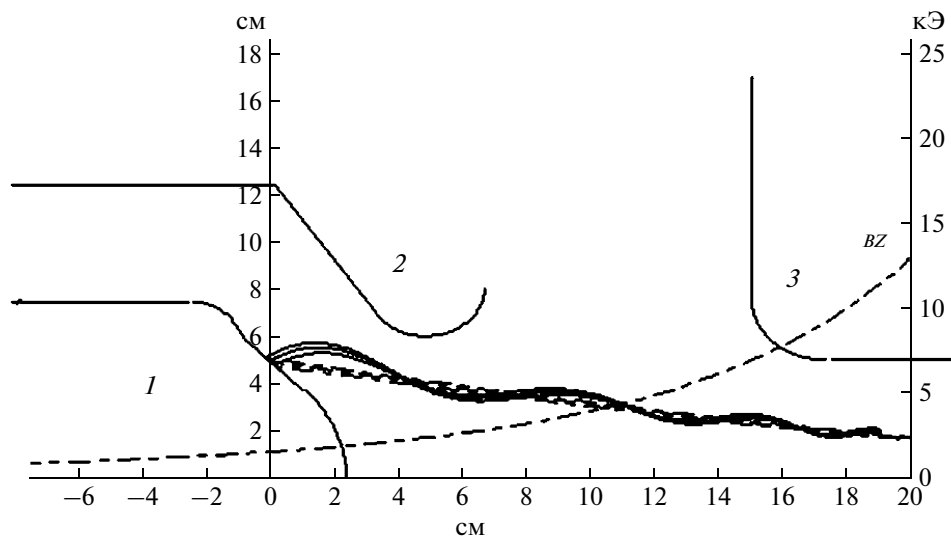


Рис. 2. Схема трехэлектродной пушки (пунктиром обозначено распределение ведущего магнитного поля). 1 – катод, 2 – первый анод, 3 – второй анод. $U_{a1} = 122.9$ кВ – напряжение катод–первый анод; $U_0 = 315$ кВ – напряжение на катоде; $I = 101.2$ А – полный ток; $j_k = 6.9$ А/см² – плотность тока на катод; $g = 1.365$ – питч-фактор; $dvr = 8\%$ – скоростной разброс.

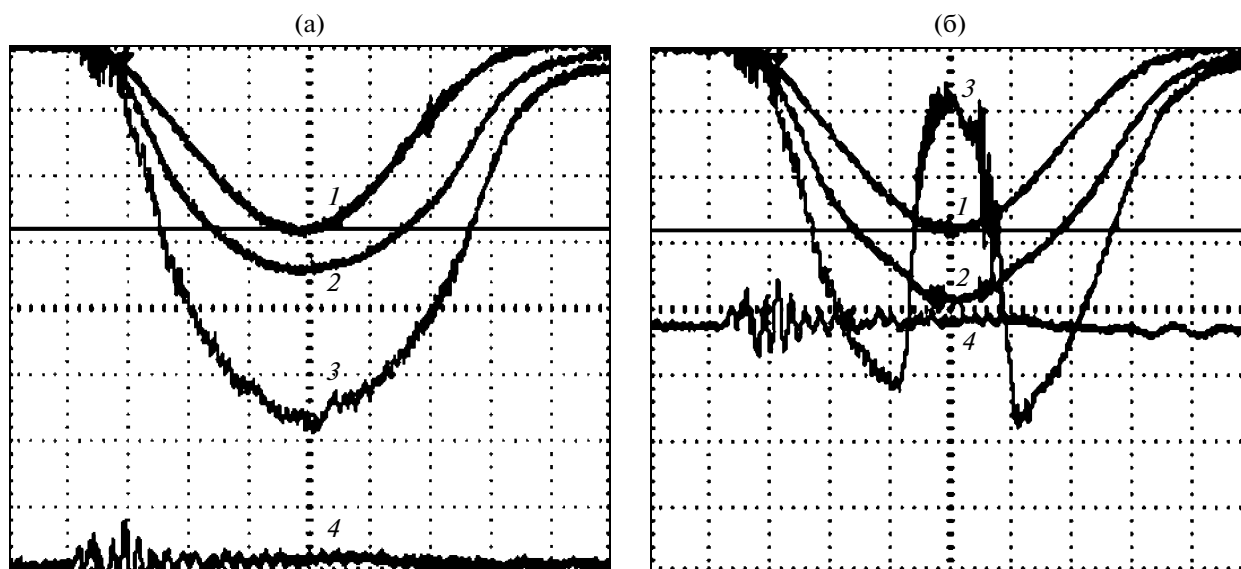


Рис. 3. Характерные осциллограммы, снимаемые с анализатора: а – импульсное поле анализатора близко к 0; б – за- критическое магнитное поле анализатора. 1 – напряжение на катод (20 кВ/деление); 2 – ток диафрагмы (4 А/деле- ние); 3 – ток коллектора (0.1 А/деление), 4 – ток в соленоиде анализатора, линейно связанный с его магнитным полем (0.413 Тл/деление).

анализатор отсекает половину тока (уровень 0.5 на кривой отсечки) – $(v_{\perp}/v)_{0.5}$. Тогда питч-фактор выражается формулой

$$g = \frac{(v_{\perp}/v)_{0.5}}{\sqrt{1 - (v_{\perp}/v)_{0.5}^2}}. \quad (2)$$

На рис. 5а представлена зависимость питч- фактора от тока дополнительного соленоида, уменьшающего магнитное поле на катод (10 А в

соленоиде соответствуют 60 Э) при разных токах пучка.

На рис. 5б представлена зависимость скорост- ного разброса в.э.п. при напряжении на катод 300 кВ, магнитном поле криомагнита 15.5 кГс от величины тока дополнительного соленоида при разных токах пучка. Как видно из графиков, при увеличении тока пучка или поля дополнительного соленоида скоростной разброс растет, а питч-

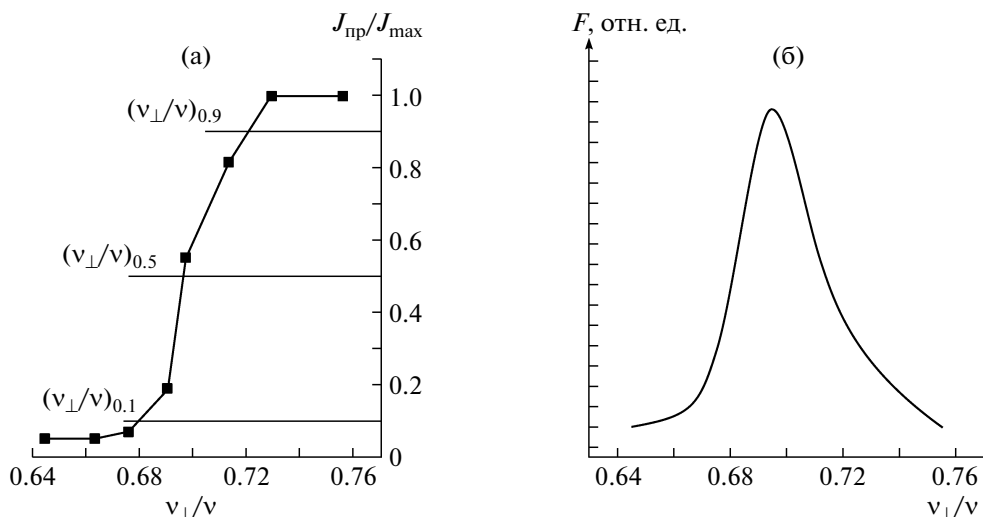


Рис. 4. Характерная кривая отсечки коллекторного тока (а) и соответствующая функция распределения электронов по поперечным скоростям (б).

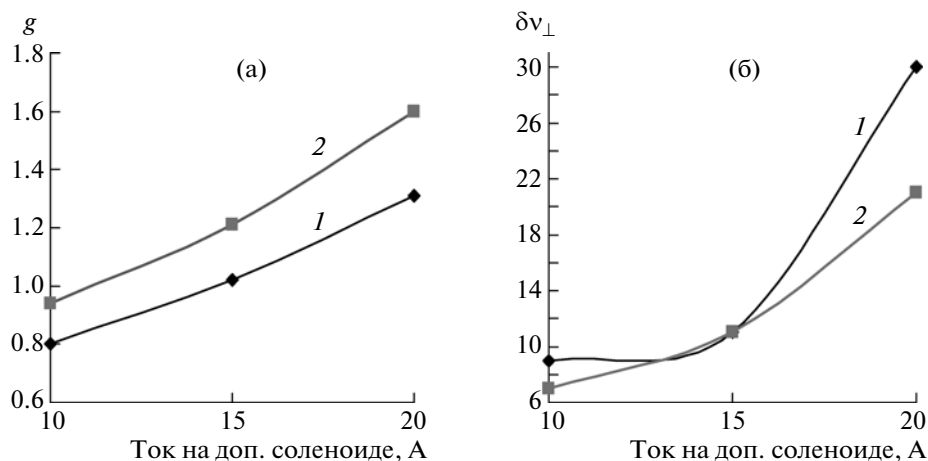


Рис. 5. Зависимости от тока дополнительного соленоида: а – питч-фактора; б – скоростного разброса в.э.п. при напряжении на катоде 300 кВ и при токах пучка 80 А (кривые 1) и 60 А (кривые 2).

фактор уменьшается. Путем оптимизации этих параметров найдены режимы, удовлетворяющие работе гироприборов: питч-фактор ≈ 1.3 ; разброс электронов по скоростям $\leq 15\%$; напряжение на катоде 300 кВ; ток пучка 60–80 А. Точность определения разброса электронов по скоростям и их питч-фактора в нашем случае не хуже 10% и обусловлена точностью измерения ведущего магнитного поля, поля соленоида анализатора, поля дополнительного соленоида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В режиме коротких импульсов магнитный анализатор не имеет принципиальных ограничений на энергию электронного пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 1008-01120) и федеральной программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (госконтракт 02740110015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuftin A.N., Lygin V.K., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E.* // Int. J. Electronics. 1992. V. 72. № 5–6. P. 1145.
2. *Авдошин Е.Г., Гольденберг А.Л.* //Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 10. С. 1605.
3. *Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 5–6. С. 453.
4. *Knoepfel H.* Pulsed high magnetic fields. Amsterdam–London: North-Holland Publishing Company, 1970.