

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С345,1

И-20

4/41-7

P9 - 6983

Г.А.Иванов, В.Н.Мамонов, Л.В.Светов

2016/2-73

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ МОДЕЛИ
КОЛЛЕКТИВНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1973

ДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P9 - 5983

Г.А.Иванов, В.Н.Мамонов, Л.В.Светов

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ МОДЕЛИ
КОЛЛЕКТИВНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Введение

Ускоряющая секция модели коллективного линейного ускорителя предназначена для экспериментальной проверки эффекта ускорения и фазировки кольцевого электронного сгустка большой плотности ($N = 10^{13}$ частиц в кольце), нагруженного ионами. Она представляет собой совокупность 4-х последовательно расположенных коаксиальных резонаторов и ведущего соленоида, расположенного в атмосфере и создающего однородное магнитное поле, удерживающее поперечные размеры кольца. Схема ускоряющей системы представлена на рис. 1. Для уменьшения

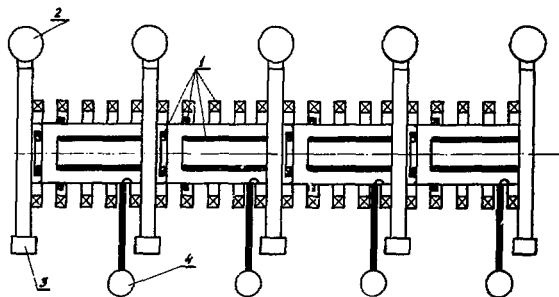


Рис. 1. Схема ускоряющей секции. 1 - катушки ведущего и градиентного соленоидов; 2 - вакуумные насосы; 3 - индикационные устройства; 4 - в/ч генераторы.

экранировки импульсного магнитного поля стенками резонаторов они изготовлены из нержавеющей стали, на которую для увеличения добротности рабочей полости резонатора нанесен слой меди толщиной 20 мкм, что соответствует 4-м скин-слоям для основной частоты резонатора $\Omega = 150$ Мгц. Из работы ^{1/1} следует, что для повышения эффективности ускорения электронного кольца, нагруженного ионами, можно использовать смешанное ускорение электрическим и магнитным полями. Для этого на зазоре резонатора нужно создать нарастающее по определенному закону магнитное поле, а на участке дрейфа (между зазорами резонаторов) - магнитное поле, спадающее по линейному закону. При этом сила, действующая на кольцо в зазоре резонатора, определяется тремя компонентами:

- а) напряженностью внешнего в/ч поля (ускоряющая сила);
- б) силой торможения кольца в нарастающем магнитном поле;
- в) напряженностью поля переходного излучения, которое возникает при пролете кольца мимо неоднородности (ускоряющий зазор).

Результирующая (эффективная) напряженность ускоряющего поля должна соответствовать допустимому ускорению и определяться из условия удержания ионов в кольце ^{1/2}. Таким образом, магнитное поле ускоряющей секции играет двойную роль:

а) удерживает поперечные размеры электронного кольца, нагруженного ионами;

б) за счет градиента $\frac{\partial B_z}{\partial Z}$ магнитного поля осуществляет ускорение кольца в промежутках между ускоряющими зазорами резонаторов, чем обеспечивается непрерывное ускорение кольца на всей длине ускоряющей секции.

Магнитное поле нужной конфигурации можно создать наложением двух полей: однородного поля, создаваемого длинным соленоидом, и поля специальной формы, создаваемого системой витков или катушек, определенным образом распределенных по радиусу и по длине ускоряющей секции, амплитуду модуляции которого можно было бы менять в зависимости от сорта ускоряемых ионов и для различных параметров электронных колец без нарушения условия удержания ионов.

Требования, предъявляемые к магнитному полю

В^{/2/} приводятся выражения для допустимых значений напряженности электрического поля E_z и градиента магнитного поля $(\frac{\partial B_z}{\partial Z})_{\text{доп.}}$, а именно:

$$E_{z \text{ доп.}} \approx \frac{2eN_e \Delta}{\pi R (b_c + \xi_c)} \cdot \frac{m_{\perp}}{M} \cdot \frac{(1 + \frac{M N_i}{m_{\perp} N_e})}{1 + \frac{m_{\perp}}{M}}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial B_z}{\partial Z}\right)_{\text{доп.}} = E_{z \text{ доп.}} \cdot \frac{m_{\perp}}{mc^2 \gamma_0^2 \gamma_{\parallel 0}^2 \beta^2 \theta_0}, \quad (2)$$

где $m_{\perp} = m_0 \gamma_{\perp}$ - "утяжеленная" масса электрона; M - масса иона; $\gamma_{\parallel} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_z^2}}$, $\gamma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma_{\parallel}^2 \beta_{\theta}^2}}$; N_e и N_i - количества электронов и ионов в кольце; R - радиус кольца; b_c - продольный полуразмер сечения кольца в сопутствующей системе; g_c - поперечный полуразмер сечения кольца; Δ - расстояние между "центральными" частицами, отнесенное к b_c ; B_{z_0} - амплитуда ведущего магнитного поля.

При параметрах кольца: $N_e = 10^{13}$, $\gamma_{\perp} = 30$, $b_c = g_c = a = 0,1$ см, $\Delta = \frac{1}{2}$, $R = 5$ см, $\frac{N_i}{N_e} = 0,01$, $B_{z_0} = 10,5$ кГс, $\gamma_{\parallel} = 1$ (начальный этап ускорения) с помощью формул (1) и (2) можно получить следующие значения E_z доп. и $(\frac{\partial B_z}{\partial Z})$ доп. для ускорения, соответственно, ионов водорода, α -частиц и трехзарядных ионов азота.

$1 H^{1+}$	E_z доп. ≈ 12 кВ/см	$(\frac{\partial B_z}{\partial Z})$ доп. $\approx 16,6$ Гс/см
$4 He^{2++}$	E_z доп. $\approx 7,5$ кВ/см	$(\frac{\partial B_z}{\partial Z})$ доп. $\approx 10,9$ Гс/см
$14 N^{7+++}$	E_z доп. $\approx 3,2$ кВ/см	$(\frac{\partial B_z}{\partial Z})$ доп. $\approx 4,4$ Гс/см

Таким образом, амплитуда модуляции магнитного поля для ускорения, например, ионов азота при заданной длине участка спада поля $l = 50$ см, равна $B_{\text{мод}} (\frac{\partial B_z}{\partial Z})_{\text{доп.}} l = 4,4 \cdot 50 = 220$ Гс, что составляет величину $\approx 2,2\%$ амплитуды ведущего магнитного поля B_{z_0} . Заданная вели-

чина градиента обеспечивается с точностью $\approx \pm 5\%$, если неоднородность ведущего магнитного поля не превышает величины $\approx \pm 11$ гс или $\approx \pm 0,1\%$ от B_{Z_0} . Таким образом видим, что к однородности ведущего поля предъявляются жесткие требования.

Из /2/ следует, что для обеспечения равномерного ускорения продольное магнитное поле должно удовлетворять условию:

$$E_{Z \text{ доп.}} = -\frac{1}{2} R \beta_{\theta_0} \gamma_{||0} \gamma_{||} \frac{\partial B_Z}{\partial Z} + E_A f \cos \Omega t \quad (3)$$

где f - функция, отображающая конфигурацию Z компоненты электрического в/ч поля в зазоре, E_A - амплитуда в/ч поля, Ω - частота поля в резонаторе.

Отсюда следует:

$$[B_Z(Z) - B_Z(Z_0)] = \frac{2}{R \beta_{\theta_0} \gamma_{||0} \gamma_{||}} [-E_{Z \text{ доп.}} (Z - Z_0) + E_A \int_{Z_0}^Z f \cos \Omega t d\xi] \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что распределение магнитного поля по длине зазора должно соответствовать интегралу от функции распределения электрического поля с учетом линейной функции $E_{Z \text{ доп.}} (Z - Z_0)$.

Магнитное поле ведущего соленоида

$B^{13/}$ величина ведущего магнитного поля H_{z_0} определяется соотношением

$$H_{z_0} = - \frac{m c^2 \beta_{\theta} \gamma_{\perp}}{e R} (1 + \mu P),$$

где $\mu = \frac{r_0 N_e}{2\pi R \gamma_{\perp}}$, $P = 2 \ln \frac{8R}{a}$, r_0 - классический

радиус электрона; a - малый радиус кольца. Для параметров кольца, приведенных выше, величина ведущего

магнитного поля $H_{z_0} \approx 10,5$ кэ. Был сделан расчет соленоида, состоящего из отдельных катушек. Необходи-

мость в таком соленоиде вызвана тем, что по длине ускоряющей системы требуются свободные от витков

места для введения индикационной аппаратуры, подключения вакуумных агрегатов и т.д. При расчете исполь-

зовались формулы для компонент магнитного поля, создаваемого бесконечно тонким витком с током ^{14/}. Считались

поля, создаваемые отдельными витками в разных точках системы на заданном радиусе R , затем находилась

их суперпозиция. С учетом требований к однородности магнитного поля ведущего соленоида выбраны следующие

параметры катушек соленоида: средний радиус $R_{\text{ср}} = 21,5$ см; расстояние между катушками (период соленоида) $d = 12$ см.

При выбранных значениях параметров катушек расчетная неоднородность ведущего поля на радиусе кольца $R = 5$ см

составляет величину $a = \pm \frac{\Delta B}{B_{z_0}} = \pm 0,1\%$.

Энергетический расчет

С целью уменьшения затрат мощности на создание ведущего магнитного поля был выбран импульсный режим работы соленоида. Форма импульса - полусинусоида. Расчет электрических параметров соленоида производился из величины поля $H_{z_0} = 12,5$ кэ (с учетом некоторого запаса).

Параметры катушек соленоида и схемы питания выбирались из следующих соображений:

а) учитывая возможности коммутатора (игнитрон ИВС 200/15) и выпрямителя ($U_{\text{макс.}} = 12$ кв, $I_{\text{зар.}} = 18$ а), величину рабочего тока $I_{\text{раб.}}$ следует выбирать не превышающей 4 ка, а величину напряжения - $U_{\text{раб.}} \leq 12$ кв. При этом для получения величины поля $H_{z_0} = 12,5$ кэ число витков соленоида на 1 м длины должно составлять $W' = 250$ витков/м (при периоде соленоида $d = 0,12$ м, число витков в каждой катушке $W = 30$);

б) рабочая частота импульсного магнитного поля выбиралась из условия допустимого влияния неоднородностей конструкции ускоряющей системы на величину поля в рабочей области. Предварительный расчет и эксперименты показали, что для обеспечения величины неоднородности поля, вызванной неоднородностью структуры, меньшей, чем 0,1% от H_{z_0} ; частота магнитного поля должна быть меньше ≤ 20 гц. Параметры контура L и C опре-

делялись приближенно из соотношений:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{U_{\text{раб.}}}{I_{\text{раб.}}} = 2,5 \text{ ом и } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 20 \text{ гц.}$$

Отсюда: $C \approx 3,19 \cdot 10^{-3} \text{ ф}$, $L \approx 19,9 \cdot 10^{-3} \text{ гн}$.

Из-за активного сопротивления катушек $R_{\Sigma} \approx 0,425 \text{ ом}$ рабочее напряжение приходится брать более высоким, а именно:

$$U_{\text{раб.}} \approx I_{\text{раб.}} \cdot \rho e^{\frac{t}{2\tau}}$$

где $\tau = \frac{L}{R_{\Sigma}}$. Если взять $t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4f}$, $I_{\text{раб.}} = 4 \text{ ка}$, $\rho = 2,5 \text{ ом}$,

то $U_{\text{раб.}} \approx 11,4 \text{ кв}$, что не превышает максимального напряжения выпрямителя $U_{\text{макс}} = 12 \text{ кв}$.

Исходя из возможностей выпрямителя и коммутаторов и условия соблюдения заданного теплового режима катушек ведущего соленоида мы выбрали следующий режим работы: рабочий ток в витках ведущего соленоида $I_{\text{раб.}} = 4 \text{ ка}$; частота следования импульсов $F = 0,2 \text{ гц}$; волновое сопротивление контура $\rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = 2,5 \text{ ом}$; длительность импульса тока $\frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = 25 \text{ мсек}$, что соответствует $f = 20 \text{ гц}$; напряжение на батарее конденсаторов с учетом активного сопротивления $U_{\text{раб.}} = 11,5 \text{ кв}$. Напряженность ведущего магнитного поля H_{Z_0} при этих параметрах должна иметь величину $H_{Z_0} = 12,5 \text{ кэ}$.

Электрическая схема

Схема импульсного питания соленоида представлена на рис. 2. Соленоид состоит из двух частей, индуктивности которых L_1 и L_2 подбираются равными $L_1=L_2$. Каждая половина соленоида питается током разряда емкости $C_1=C_2$, представляющей собой батарею конденсаторов

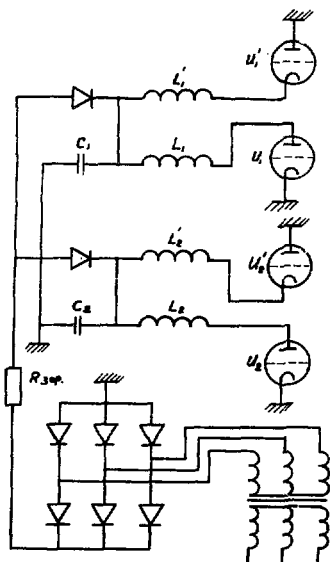


Рис. 2. Схема импульсного питания ведущего соленоида.

ИМ 150/5, собранных по последовательно-параллельной схеме через коммутаторы I_1 и I_2 . Игнитроны I'_1 и I'_2 используются для перезарядки емкостей C_1 и C_2 с целью использования энергии, запасенной в индуктивности. Во избежание излишнего нагрева стенок резонаторов вследствие протекания в них наведенных токов предусмотрено включение двух дополнительных индуктивностей L'_1 и L'_2 , через которые течет ток перезарядки.

Конструкция соленоида

Ведущий соленоид включает 4 периода ускоряющей секции (по 5 катушек на период $L = 60$ см), катушки переходного участка, необходимого для стыковки полей ускоряющей секции и адгезатора; катушки хвостового участка, необходимого для того, чтобы создать однородное поле в месте расположения 4-го, последнего резонатора. Катушки крепятся на опорную плиту секциями по 5 штук. С целью обеспечения жесткого механического крепления каждая катушка соленоида крепится в 4-х точках через 90° скобами, которые в продольном направлении связаны швеллерами. Для уменьшения активного сопротивления катушки намотаны в 4 слоя медной лентой сечением $25 \times 0,3$ мм.² Межслоевая изоляция - 3 слоя стеклотенты толщиной 0,2 мм. С целью улучшения механических характеристик и увеличения электрической прочности катушки заливаются эпоксидной смолой (ЭД-5).

Они имеют с одной стороны пластины охлаждения, что позволяет обеспечить нормальный тепловой режим при величине средней мощности потерь ≈ 1 кВт на катушку.

Магнитное поле градиентных катушек

Как уже было сказано, на зазоре резонатора нужно создать нарастающее магнитное поле, которое с точностью до линейной функции от Z должно совпадать с формой интеграла от функции распределения электрического

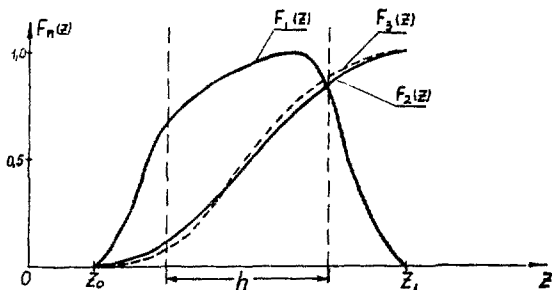


Рис. 3. Кривые распределения полей F_n ($n = 1, 2, 3$) в зазоре резонатора.

- а) $F_1(z) = \frac{E_z(z)}{E_A}$ — функция распределения электрического в/ч поля; б) $F_2(z) = \frac{1}{S} \int_{z_0}^z F_1(\xi) d\xi$ — интеграл от $F_1(z)$, отнесенный к своему максимальному значению $S = \int_{z_0}^{z_1} F_1(\xi) d\xi$;
- в) $F_3(z) = \frac{B_z(z) - B_z(z_0)}{B_{\text{мод.}}}$ — экспериментальная кривая распределения магнитного поля, отнесенная к своему максимальному значению $B_{\text{мод.}} = B_z(z_1) - B_z(z_0)$.

поля по зазору, т.е. с $\int_{z_0}^z E_z dZ$. Были проведены измерения электрического поля в зазоре резонатора на $R = 5$ см. Распределение электрического поля по длине зазора представлено на рис. 3. Графически был посчитан интеграл $\int_{z_0}^{z_1} E_z dZ$, где Z_0 и Z_1 - координаты начала и конца фактического распределения электрического поля E_z , а $h = 7$ см - геометрическая длина зазора. Магнитное поле нужной конфигурации, как показано на рис.4, создается системой 3-х элементов: а) катушка №1;

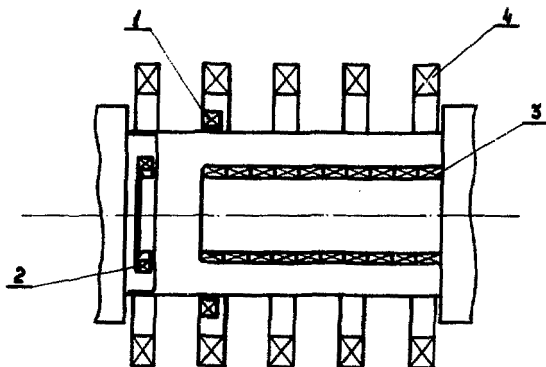


Рис. 4. Система катушек градиентного поля. 1 - катушки с $W=10$ и $r_{\text{ср.}}=14$ см; 2 - катушки с противотоком, $W=3$ и $r_{\text{ср.}}=8$ см; 3 - катушки градиентного соленоида; 4 - катушки ведущего соленоида.

б) катушка №2; в) градиентный соленоид №3. Такой вариант создания градиентного поля обусловлен невозможностью расположения витков с током в рабочей полости резонатора. Катушка №1 со средним радиусом $r_{\text{ср.}} = 14$ см и с $W = 10$ намотана на специальном каркасе и может перемещаться по поверхности резонатора, что позволяет менять распределение магнитного поля на зазоре. Катушка №2, со встречной намоткой витков, с $r_{\text{ср.}} = 8$ см и с $W = 3$ располагается за плунжером. Она позволяет локализовать нарастающее магнитное поле в месте расположения зазора резонатора. Таким образом, комбинация катушек №1 и 2 позволяет создать в зазоре магнитное поле нужной конфигурации с учетом распределения электрического поля. Градиентный соленоид крепится на внутренней трубе резонатора. Он состоит из 10 катушек со средним радиусом $r_{\text{ср.}} = 6,5$ см. Число витков в катушках меняется по линейному закону от 1-го до 9-ти, десятая катушка содержит 5 витков. Комбинация катушки №1 и градиентного соленоида позволяет создать в промежутке между ускоряющими зазорами резонаторов поле, спадающее по линейному закону. Длина промежутка $l = 53$ см. Градиентные катушки намотаны в 4 слоя медной лентой сечением $25 \times 0,3$ мм² и пропитаны эпоксидной смолой. Катушки №№ 1,2 и градиентный соленоид защищаются от двух импульсных источников, синхронизованных с источником тока ведущего соленоида, частота импульса тока которых под-

бирается равной рабочей частоте $f = 20$ гц. Для того чтобы получить линейный спад магнитного поля в промежутках между зазорами резонаторов, между полем, создаваемым катушками №№1,2, и полем градиентного соленоида, а также между их токами при данной геометрии должны существовать определенные соотношения. Методом последовательных вариаций было найдено оптимальное соотношение полей этих трех элементов. Регулировка градиента осуществляется за счет изменения тока в витках катушек, создающих градиентное поле.

Магнитные измерения

С помощью импульсного магнитометра с датчиком Холла были проведены относительные магнитные измерения полей ведущего соленоида и градиентных катушек на радиусе $R = 5$ см. Погрешность измерений составляла величину $\approx \pm 0,2\%$ (сюда входят разброс показаний импульсного вольтметра В4-6, нестабильность выпрямителя и т.д.). Поскольку на уровне ведущего поля $H_{z_0} = 10,5$ кэ трудно заметить "тонкости" структуры градиентного поля, измерения полей ведущего соленоида и градиентных катушек проводились отдельно. Система измерения не позволяет обнаружить какие-либо неоднородности поля ведущего соленоида, поэтому можно считать, что неоднородность ведущего магнитного поля

меньше, чем погрешность измерений, т.е. $< \pm 0,2\%$. Относительные магнитные измерения градиентного поля показали, что отклонение от нужной конфигурации поля на периоде ускоряющей секции не превышает величины $\approx \pm 10\%$. На рис. 5 показано градиентное поле одного

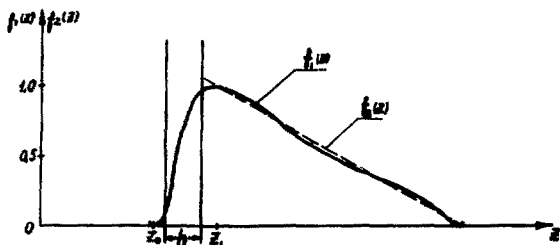


Рис. 5. Кривые распределения градиентного магнитного поля на длине периода ускоряющей секции.

- а) $f_1(Z) = \frac{B_z(Z) - B_z(Z_0)}{B_{\text{мод.}}}$ - экспериментальная кривая;
- б) $f_2(Z)$ - расчетное распределение.

периода ускоряющей секции. Таким образом, в работе по формированию магнитного поля ускоряющей секции получены следующие результаты:

а) в цилиндрическом объеме $V = 0,5 \text{ м}^3$ получено однородное магнитное поле с напряженностью $H_{Z_0} = 10,5 \text{ кэ}$;

б) неоднородность ведущего поля на радиусе кольца $R = 5 \text{ см}$ не превышает величины $\approx \pm 0,2\%$;

в) сформировано градиентное магнитное поле с отклонением от нужной конфигурации $\approx \pm 10\%$.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам сектора №3 ОНМУ, принимавшим активное участие в изготовлении и сборке ведущего соленоида, а также в проведении магнитных измерений, М.Г.Пивню, А.А.Кузнецову, Г.И.Долбиловой, В.А.Буланову, И.И.Голубеву, Н.В.Петрову.

Литература

1. В.И.Векслер, В.П.Саранцев и др. Препринт ОИЯИ Р9-3440-2, Дубна, 1968.
2. А.Г.Бонч-Осмоловский и др. Препринт ОИЯИ Р9-4171, Дубна, 1968.
3. И.Н.Иванов и др. Препринт ОИЯИ Р9-4132, Дубна, 1968.
4. В.Смайт. "Электростатика и электродинамика", И.-Л., 1954.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 марта 1973 года.