

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.384.649

В. К. ГРИШИН, В. Г. СУХАРЕВСКИЙ

О ФОКУСИРОВКЕ ПУЧКА В ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Линейные индукционные ускорители (ЛИУ) относятся к числу приборов, позволяющих получать токи ускоренных частиц в сотни и тысячи ампер [1, 2]. Одной из проблем в установках такого рода является удержание ускоряемых частиц в поперечной плоскости камеры. Обычно применяемые методы для поперечной фокусировки [3], например, с помощью продольного магнитного поля, создаваемого дополнительным соленоидом, являются надежным средством, однако на практике приводят к громоздким сооружениям с большим токопотреблением. Так, для сохранения пучка электронов с током в 200—300 а при энергии в несколько сотен кэв требуется продольное магнитное поле в сотни эрстед (20 000—40 000 а/м). Соленоид, создавший такое поле, должен иметь сотни а-в/см.

Тем не менее фокусирующую внешнюю систему ЛИУ можно значительно разгрузить и фактически избавиться от нее, используя токи возбуждения вихревого ускоряющего поля. Как известно, ЛИУ представляет собой набор кольцевых индукторов, каждый из которых состоит из кольцевого магнитного сердечника, охватываемого поперечным проводником тока. Для возбуждения аксиального электрического поля необходимы токи, лежащие строго в поперечном сечении индуктора.

В практической схеме (см., например, [2] с подробным описанием конструкции) возникают токи и вдоль кольца, так как напряжение подается на кольцевой проводник, охватывающий сердечник, лишь в отдельных точках.

Нетрудно видеть, что магнитное поле этих побочных токов, до сих пор имевших паразитный характер, при соответствующей модификации их может быть использовано для поперечной фокусировки пучка.

В простейшем случае проводник индуктора изготавливается таким образом, что он будет представлять собой два витка, последовательно соединенных, один из которых по-прежнему охватывает кольцевой сердечник, другой, располагаясь в плоскости кольца, примыкает к нему изнутри. Изменение тока в первом витке (заметим, что благодаря очень большой величине магнитной проницаемости материала сердечника конфигурация магнитного потока вдоль кольца мало зависит от положения и ширины этого витка) создает аксиальное электрическое ускоряющее поле, в то время как кольцевой ток возбуждает продольное магнитное поле.

Последовательная система таких индукторов фактически эквивалентна ЛИУ с фокусирующим продольным полем, которое, однако, возникает автоматически благодаря видоизменению кольцевых токов, ранее носивших пассивный характер.

Аксиальное магнитное поле такого рода будет импульсным, возрастая в течение разряда внешнего источника через индуктор. «Рабочую» величину его можно оценить следующим образом.

Для компенсации электростатического расталкивания электронного пучка с радиусом сечения в 3—4 см и током в 100 а в наиболее опасной области начальных энергий порядка сотни кэв требуется продольное магнитное поле 100—150 эрст [4]. Такое поле в рассматриваемой системе возникает при токе в индукторах 300—400 а (число индукторов на единицу длины установки составляет ~20 1/м) [2]. С другой стороны, отдельный индуктор равнозначен одновитковому трансформатору. Поэтому, учитывая, что мощность в первичном витке существенно превосходит мощность, уно-

симуку ускоряемым пучком (вторичный виток), ток питания становится значительно больше тока пучка, достигая в рабочей части импульса в сотни тысяч ампер.

Следовательно, уже в простейшем варианте модифицируемой конструкции автоматически возбуждаемое магнитное поле оказывается достаточным для фокусировки электронного пучка в течение всего цикла ускорения.

Это условие соблюдается всегда, даже при очень больших токах ускоряемых частиц. В силу отмеченного обстоятельства, ток J в индукторах всегда больше тока пучка I . Фокусирующее действие продольного магнитного поля пропорционально квадрату его величины, т. е. J , в то время как сила электростатического расталкивания $\sim I$. Поэтому условие для поперечного удержания электронов [4] $J/I \geq \text{const}/\sqrt{I}$ лишь облегчается с ростом I .

Отметим также, что величина энергии, расходуемой на возбуждение импульсного продольного поля в предлагаемой схеме, не велика. Действительно, при этом отношение энергии ω_{\parallel} продольного поля к энергии ω_{\perp} основного кольцевого потока индукции имеет порядок (в системе СИ) [5]

$$\frac{\omega_{\parallel}}{\omega_{\perp}} \simeq 2\pi S n^2 \frac{\mu_0}{\mu},$$

где S — площадь сечения центрального канала в индукторах, n — число индукторов на единице длины установки, μ_0 и μ — магнитная проницаемость вакуума и материала сердечника. При $n \simeq 20/\text{м}$ $\mu/\mu_0 = 10^3$ (см. [2]) и радиусе канала ~ 5 см $\omega_{\parallel}/\omega_{\perp} \simeq 2 \cdot 10^{-2}$, т. е. не превышает доли полей рассеяния.

Таким образом, хотя для практических приложений требуются более точные расчеты, очевидно, что уже простое упорядочение кольцевых токов в индукторах дает возможность заметно упростить фокусирующую систему ЛИУ, значительно уменьшить сечение канала в индукторах, и, как следствие, повысить энергию ускорения или сократить габариты установки. Последнее особенно важно для создания малогабаритных установок типа ЛИУ (например, для карротажных исследований).

В заключение отметим, что рассмотренная простейшая система модификации токов питания не является единственно возможной. Если допустить чередование направлений кольцевых токов, как в пределах одного кольца, так и от индуктора к индуктору, то возникает знакопеременное поперечное поле, действие которого эквивалентно, например, системе квадрупольных линз. По-видимому, такая комбинация тока может дать достаточный фокусирующий эффект при меньшей индуктивности связи между индукторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christofilos W. Труды Международной конференции по ускорителям высоких энергий. М., Атомиздат, 1964, стр. 1073.
2. Анацкий А. И. и др. Линейный индукционный ускоритель. «Атомная энергия», 21, 439, 1966.
3. Сб. Ускорители. М., Атомиздат, 1962.
4. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М., Физматгиз, 1963.
5. Гришин В. К., Сухаревский В. Г. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 11, № 5, 1970.

Поступила в редакцию
25.10 1969 г.

Кафедра
ускорителей

УДК 537.533.35

Н. Н. СЕДОВ, М. В. НАЗАРОВ

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОПОЛЕЙ В ЭМИССИОННОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

Прямая задача о контрасте изображений микрополей в эмиссионном электронном микроскопе решается методом последовательных приближений [1]. За нулевое приближение принимается движение электронов в отсутствие микрополей. Влияние микрополей рассматривается как возмущение системы. В настоящей работе изучаются