

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОУСКОРЕНИЯ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

В.А.Вишняков, В.В.Закутин, В.А.Кушнир, В.П.Ромасько,
Г.Л.Сурсов, А.М.Шендерович

Харьковский физико-технический институт АН УССР

Традиционный метод увеличения энергии существующих линейных ускорителей состоит в увеличении числа ускоряющих секций и систем их высокочастотного питания: модуляторов, клистронов, волноводных трактов, систем электропитания и т.д. и является весьма трудоемким и дорогостоящим. Поэтому значительный интерес представляет поиск более простых и эффективных методов увеличения энергии существующих ускорителей. Одной из возможностей является внутримпульсное перераспределение энергии пучка ускорителя: часть его частиц ускоряется за счет энергии, отдаваемой другими частицами (идеология автоускорения, см., например, работу [1]). При этом сгруппированный пучок электронов в импульсе линейного ускорителя возбуждает высокочастотные колебания в резонансном элементе, настроенном на частоту следования сгустков ω_s либо ее гармонику. Для остальных частиц создаются такие фазовые условия, что они попадают в ускоряющее поле и приобретают дополнительную энергию. Благодаря резонансному характеру взаимодействия эффективное перераспределение энергии в пучке происходит при импульсных токах пучка в сотни миллиампер, имеющих в существующих ЛУЭ. При этом для ускорения пучка не требуется использования дополнительных источников высокочастотного питания и связанного с этим оборудования, так что данный метод прост и экономичен. Вопросы доускорения пучка в пассивных структурах уже рассматривались ранее в ряде работ (см., например, [2-8]). В работе [3] экспериментально показана возможность получения больших ускоряющих полей в цепочке пассивных резонаторов, возбуждаемых пучком линейного ускорителя. При импульсном токе пучка 400 мА получен средний темп потерь энергии пучка более $300 \frac{\text{кэВ}}{\text{см}}$. В настоящей работе, которая является продолжением работы [3], осуществлен быстрый сдвиг фазы пучка на 180° и экспериментально исследовано его доускорение.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Пучок ускорителя ЛУ-40 [9] с импульсным током 200 мА и энергией частиц 10 МэВ пропусклся по оси цепочки из 7 пассивных резонаторов (ПР), настроенных на вторую гармонику частоты следования электронных сгустков. Конструкция и характеристики резонаторов описаны в [3]. Возбуждаемое пучком в резонаторах поле является для его частиц тормозящим. Для осуществления доускорения часть частиц пучка внутри импульса сдвигается по фазе на 180° путем удлинения их траектории в дефлекторной системе из четырех импульсных магнитов M_1, M_2, M_3, M_4 . Питание магнитов производилось от специального импульсного генератора (ИГ), длительность импульса составляла 100 нс, зарядное напряжение $U_z = 17$ кВ, волновое сопротивление формирующей линии ФЛР составляло 4 Ом. Дефлектор снабжен системой коллиматоров, обеспечивающих прохождение пучка по заранее рассчитанной траектории и одновременно измерение его тока и положения. Энергия частиц измерялась с помощью магнитного анализатора (МА) с разрешением, регулируемым в пределах от 1 до 6%. Наряду с этим с помощью датчика 3 измерялась амплитуда наведенного СВЧ-поля.

Работа экспериментальной установки иллюстрируется рис.2 (слева). До момента включения дефлектора ($t=t_2$) пучок проходит по прямолинейной траектории через резонаторы (рис.2б), возбуждает в них электрическое поле (рис.2г) и теряет энергию (рис.2д). В момент времени t_1 поле в резонаторах достигает установившегося максимального значения E_0 , а энергия частиц – минимального значения ε_{\min} . При $t=t_2$ начинает нарастать магнитное поле в дефлекторе (рис.2а). В течение фронта импульса дефлектора ($t_2 < t < t_3$) магнит M_1 отклоняет пучок, так что он по прямой траектории не попадает в ПСР; с другой стороны, величина магнитного поля не достаточна для его транспортировки через всю дефлекторную систему. Поэтому при $t_2 < t < t_3$ ток пучка в пассивных резонаторах равен нулю (рис.2б) и поле в них несколько уменьшается за счет конечной добротности. Поскольку длительность фронта импульса дефлектора много меньше постоянной времени резонаторов ($\frac{2Q}{\pi\omega_0}$), то величина этого спада незначительна. В момент времени $t=t_3$ магнитное поле в дефлекторе достигает своего максимального значения (рис.2а), пучок, пройдя дефлектор, попадает в резонаторы (рис.2б) в ускоряющей фазе высокочастотного поля $\psi = 180^\circ$ (рис.2в) и доускоряется (рис.2д).

В результате проведенных экспериментов осуществлен сдвиг фазы пучка на 180° путем удлинения траектории частиц с помощью дефлекторных магнитов. При импульсном токе пучка 200 мА достигнута 100% транспортировка пучка через дефлекторную систему. Этот результат иллюстрируется рис.3а. Здесь J_n – ток пучка, поступающего в пассивные резонаторы по прямолинейной траектории (на рисунке показана только часть этого импульса без переднего фронта), J_d – ток пучка, прошедший через дефлектор, его частицы сдвинуты по фазе на 180° . Из рисунка видно, что $J_d = J_n$. В экспериментах наблюдалось торможение прямого пучка и ускорение пучка, прошедшего через дефлектор.

Рис.1. Схема экспериментальной установки. О – обмотки магнитов, Р – тригatronный разрядник, I – осциллограф, 2 – цилиндр Ларедая.

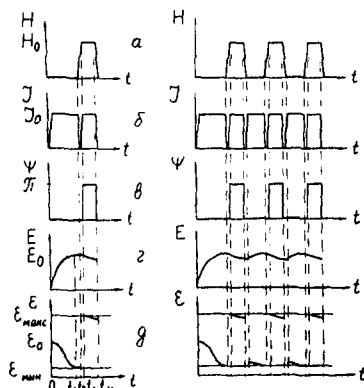
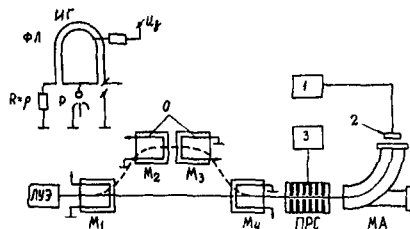


Рис.2. Временные диаграммы процесса доускорения.

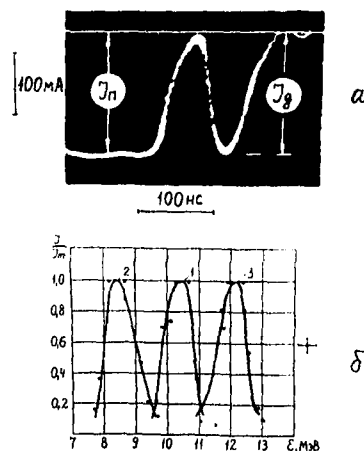


Рис.3. Результаты экспериментов по сдвигу фазы и доускорению пучка.

На рис.3б приведены энергетические спектры пучка ускорителя при расстроенных пассивных резонаторах (1), заторможенного (2) и доускоренного (3) в пассивных резонаторах пучка. Видно, что имеет место ускорение частиц на 1,8 МэВ за счет торможения других частиц на ~ 2 МэВ. Разница 0,2 МэВ обусловлена некоторым спадом поля в пассивных резонаторах за время фронта импульса дефлектора ($t_3 - t_2 = 50$ нс). Из рисунка также видно, что ширина энергетического спектра при доускорении практически не увеличивается. Следовательно, при прохождении через дефлектор фазовая протяженность сгустка ускорителя не изменяется.

Таким образом, полученные результаты показывают перспективность и возможность практической реализации данного метода сдвига фазы и доускорения пучка. При длительности импульса порядка нескольких микросекунд и более можно получить высокий КПД использования энергии пучка путем многократного включения-выключения дефлектора, как это показано на рис.2 справа. После уменьшения поля в резонаторах (за счет передачи энергии ускоряемому пучку, а также потерь в стенках) дефлектор в момент времени t_4 выключается, частицы поступают в ПСР по прямолинейной траектории, отдают часть своей энергии на "подпитку" резонаторов, затем дефлектор снова включается, частицы снова доускоряются и т.д. В такой системе может быть достигнуто двукратное увеличение энергии частиц за счет примерно двукратного сокращения суммарной длительности импульса.

Л и т е р а т у р а

1. Казанский Л.Н., Киселев А.В., Лебедев А.Н. Автоускорение в интенсивных электронных пучках. - Атомная энергия, 1971, т.30, вып.1, с.27-29.
2. Вишняков В.А., Ракятинский А.А., Терехов Б.А., Шендерович А.М. - Украинский физический журнал, 1982, т.27, № 10, с.1469-1475.
3. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Ромасько В.П., Фурсов Г.Л., Шендерович А.М. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: Изд. ОИЯИ. 1985, т.1, с.175-177.
4. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. Обзор. Москва, ЦНИИатоминформ, 1984, с.17.
5. Бойко В.А., Воронков В.М., Даниличев В.А., и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Линейные ускорители. Харьков, 1977, вып.2(5), с.36.
6. Богданович Б.Ю., Остаини В.А., Шальнов А.В., Яненко В.В. В кн.: Ускорители. Москва: Энергоиздат, 1981, вып.20, с.72-76.
7. Ворогушин М.Ф., Мудролюбов В.Г. В кн.: Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: Изд. ОИЯИ, 1983, т.1, с.172-175.
8. Бойко В.А., Воронков В.М., Симонов И.Г. и др. - БТФ, 1982, т.52, вып.11, с.2163-2167.
9. Фурсов Г.Л., Гришко В.М., Гришазов И.А., и др. - Атомная энергия, 1979, т.46, вып.5, с.336-340.