

09;10

## Регулировка выходной энергии линейного ускорителя на обратной волне длительностью ВЧ импульса

© В.В. Козлюк

Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 5 марта 1997 г.)

Рассматриваются вопросы регулировки выходной энергии ускоренного пучка в достаточно широком диапазоне без изменения его интенсивности. Метод регулировки энергии протонов состоит в регулировке длительности импульса высокочастотной мощности, вводимой в ускоритель, а также в регулировке времени задержки между моментом инжекции и моментом появления переднего фронта высокочастотного импульса на входном конце ускорителя. Метод был опробован на ускоряющей секции встречно-штыревого типа длиной 1.25 м линейного протонного ускорителя. Экспериментально показано, что за счет изменения длительности ВЧ импульса в данной секции ускорителя можно получить примерно трехкратное изменение энергии электронного пучка на выходе ускорителя без заметного уменьшения интенсивности пучка.

При использовании линейного ускорителя (ЛУ) в качестве источника ионизационного излучения полезно иметь регулировку выходной энергии ускоренного пучка при сохранении неизменной величины его тока [1]. Во многосекционных резонансных машинах эта регулировка достигается достаточно просто — отклонением отдельных секций ускорителя [2]. Что касается односекционных ЛУ на бегущей волне, то здесь регулировку энергии осуществляют изменением входной мощности, частоты или фазы высокочастотного (ВЧ) питания [1,3]. Однако это приводит в первом случае к незначительному изменению выходной энергии, во втором — к резкому падению ускоренного тока пучка, в третьем — к разбиению ЛУ по крайней мере на две секции, что усложняет конструкцию самого ускорителя. В данной работе рассматривается методика регулировки выходной энергии линейного ускорителя на обратной волне, при помощи которой обеспечивается постоянство величины ускоренного тока пучка.

Рассмотрим взаимодействие импульсов тока пучка и ВЧ мощности в секции ЛУ на обратной волне. В соответствии со схемой ускорения частиц в поле обратной волны [4] подадим вначале в ускоряющую структуру ВЧ мощность, распространяющуюся по направлению к инжектору. В момент появления переднего фронта ВЧ импульса на выходе из ускоряющей системы осуществим инжекцию частиц. Ясно, что из-за встречности движения частиц и волны время  $T$  взаимодействия их между собой существенно сокращается по сравнению с тем, как это было бы в любом другом случае. Время  $T$  выражается формулой [5]

$$T = l \frac{V_g + V}{V_g \cdot V}, \quad (1)$$

где  $l$  — пространственная длина взаимодействия частиц и волны;  $V$  — скорость синхронных частиц пучка, усредненная по длине участка  $l$ ;  $V_g$  — групповая скорость распространения ВЧ мощности, усредненная по длине участка  $l$ .

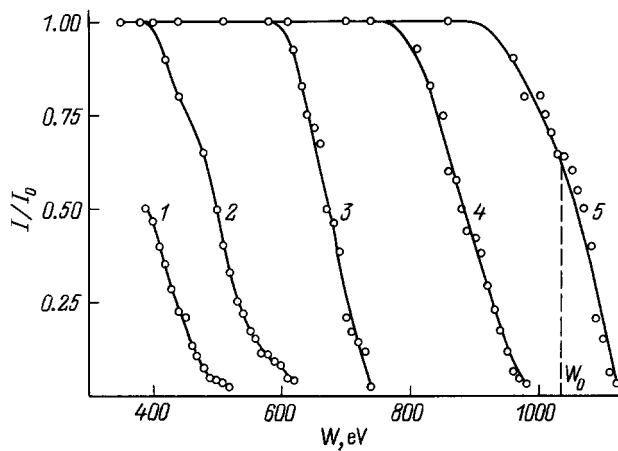
Если выбрать  $l < L$ , то энергия частиц  $W(l)$  будет меньше выходной энергии ускорителя. Она определяется выражением

$$W(l) = e \int_0^l E(z) dz, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $z$  — продольная координата,  $E(z)$  — напряженность ускоряющего поля в секции.

Установим длительность  $T_l$  импульсов ВЧ мощности, равную  $T$ , тогда взаимодействие пучка с волной будет происходить только на части секции. Так как инжекция осуществляется в момент появления переднего фронта импульса ВЧ мощности на выходе из ускоряющей системы, то ускорение частиц начинается с первых ячеек секции. В этой части ускоряющей системы будут происходить группировка и набор энергии частицами. Выходная энергия ускорителя при этом будет меньше энергии, которой можно было бы достичь на всей длине секции. Таким образом, изменяя длительность  $T$ , мы как бы изменяем длину ускоряющей системы, начиная от инжекционного конца, в которой происходит взаимодействие волны с пучком, а значит, и выходную энергию частиц.

Следует отметить, что энергия ускоряемых частиц, находящихся в начале и конце импульса инжекции, различна из-за различия времени их взаимодействия со встречным потоком импульсов ВЧ мощности. Те частицы, которые находятся в районе переднего фронта тока пучка, ускоряются в течение времени, равного длительности импульса ВЧ мощности. Поэтому они набирают максимальную энергию. Здесь же ВЧ мощность выводится из ускоряющей системы. Последующие частицы уже не будут взаимодействовать с этой частью ВЧ импульса, а значит, они набирают меньшую энергию. Частицы, находящиеся в зоне заднего фронта тока пучка, ускоряются в течение времени, равного длительности импульса ВЧ мощности за вычетом из него импульса инжекции. Поэтому они наберут минимальную энергию



Зависимости относительной величины тока пучка от его энергии при различных значениях длительности импульса ВЧ мощности.  $T$ , ns: 1 — 80, 2 — 100, 3 — 120, 4 — 140, 5 — 160;  $I_0$  — ускоренный ток пучка.

из всех частиц в импульсе. Для уменьшения этой разницы в энергии необходимо использовать импульсы тока инжекции как можно более короткой длительности. Тем не менее разница энергии в импульсе тока пучка является принципиально неустраняемым недостатком данного способа регулировки выходной энергии ЛУ. Если выбрать  $l > L$ , то в этом случае ВЧ мощность будет заполнять полностью ускоряющую систему в течение всего времени ускорения импульсов тока пучка. Энергия частиц будет равна выходной энергии ускорителя  $W_0$  и при дальнейшем увеличении длительности  $T$  расти не будет. Ускорение пучка осуществляется так же, как и в обычном режиме работы ускорителя.

В случае инжекции импульсов тока пучка до момента появления переднего фронта ВЧ импульсов на выходе из ускоряющей системы встреча этих импульсов произойдет внутри секции, где в общем случае нет синхронизма частиц с волной. В результате нарушения синхронизма не будет ускорения пучка и говорить о регулировке выходной энергии в данном случае не имеет смысла.

Значения длительностей импульсов  $T$ , необходимые для регулировки энергии ускорителя, обычно составляют величины порядка сотен или даже десятков ns. Сформировать такие импульсы на высоком уровне ВЧ мощности — не простая техническая задача. Можно обойти эту проблему, увеличив длительность  $T_l$  ВЧ импульсов до микросекундных значений. В этом случае инжекцию осуществляют не в момент появления переднего фронта ВЧ импульсов на выходе ускоряющей системы, а с некоторой задержкой  $\tau$ . Как было отмечено выше, набор энергии частицами в ускоряющей системе пропорционален величине  $T$ . В рассматриваемом случае  $T = T_l - \tau$  и ее можно регулировать изменением длительности  $T_l$  импульсов ВЧ мощности или изменением задержки времени инжекции  $\tau$ .

Способ экспериментально проверен на ускоряющей системе встречно-штыревого типа линейного ускорителя

протонов на обратной волне методом электронного моделирования. Длина системы составляет 1.25 m, начальная энергия равна 385 keV (210 eV), конечная —  $W_0 = 1.9$  MeV (1035 eV). Расчетная величина импульсной ВЧ мощности, подаваемой в ускоряющую систему составляет 180 kW (54 mW). В скобках указаны значения параметров импульсной электронной модели протонного ускорителя, при помощи которой осуществлялась проверка способа. Длительность импульсов тока инжекции составляла 10 ns, а величина ускоренного тока пучка находилась в пределах 10–12  $\mu$ A. Длительность ВЧ импульсов  $T$  регулировалась в диапазоне 80–160 ns. Форма импульсов ВЧ мощности трапециевидная с передними и задними фронтами по 10–15 ns. Инжекция частиц в секцию осуществлялась в момент появления переднего фронта импульса ВЧ мощности на выходе ускоряющей системы. Погрешность этого согласования с учетом размытости передних фронтов импульсов тока пучка и ВЧ мощности не превышала 20 ns. Измерение импульсных токов пучка осуществлялось при помощи вторично-электронного умножителя [6], а энергии частиц — методом задерживающего потенциала [7].

В таблице представлены результаты прямых измерений и результаты вычислений выходной энергии секции ЛУ. Вычисление выходной энергии ускорителя (2) осуществлялось с использованием формулы (1) и результатов измерений резонансных макетов УС, проведенных авторами работы [8].

$T$ , ns	$V$ , m/s	$V_g$ , m/s	$l$ , mm	$W$ , MeV	$W$ , eV	$W_{\text{exp}}$ , eV
160	$1.38 \cdot 10^7$	$1.58 \cdot 10^7$	1252	1.9	1035	1040
140	$1.3 \cdot 10^7$	$1.55 \cdot 10^7$	1064	1.49	812	880
120	$1.22 \cdot 10^7$	$1.51 \cdot 10^7$	884	1.14	621	670
100	$1.1 \cdot 10^7$	$1.46 \cdot 10^7$	714	0.89	485	500
80	$1.06 \cdot 10^7$	$1.43 \cdot 10^7$	561	0.7	381	390

В таблице  $W$ , MeV — расчетные значения выходной энергии частиц протонного ЛУ;  $W$ , эВ — пересчитанные значения этих же энергий для электронной модели;  $W_{\text{exp}}$  — измеренные значения выходной энергии секции ЛУ на электронной модели. Из сравнения двух последних колонок видно хорошее совпадение вычисленных и измеренных значений выходной энергии ЛУ. На рисунке приведены кривые задержки относительной величины тока пучка для длительностей импульсов ВЧ мощности, указанных в таблице. Видно, что с уменьшением величины  $T$  от 160 до 80 ns выходная энергия частиц падает с 1040 до 380 eV. При этом ток пучка изменяется не более чем на 10%.

В заключение можно сделать вывод о том, что в линейном ускорителе на обратной волне возможна регулировка выходной энергии частиц, при которой сохраняется неизменной величина ускоряемого тока пучка. Ранее [9] в аналогичной структуре была показана возможность регулировки выходного тока пучка с сохранением неизменной величины его выходной энергии. Таким образом, в методе ускорения заряженных частиц на обратной волне

достигается независимая регулировка выходных значений энергии и тока пучка, что расширяет возможности его применения в области радиационных работ.

## Список литературы

- [1] *Рябухин Ю.С., Шальнов А.В.* Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980. 192 с.
- [2] *Линейные ускорители ионов / Под ред. Б.П. Мурина.* М.: Атомиздат, 1978. Т. 1. 260 с.
- [3] *Жилейко Г.И.* Высоковольтные электронные пучки. М.: Энергия, 1968. 240 с.
- [4] *Богомолов А.С.* // ДАН СССР. 1973. Т. 208. № 6. С. 1328–1329.
- [5] *Козлюк В.В.* А.С. № 1711349 (СССР). БИ. 1992. № 5.
- [6] *Борисенко А.Н., Козлюк В.В., Перов В.В.* // ПТЭ. 1988. № 2. С. 133–135.
- [7] *Шульман Ф.Р., Фридрихов С.А.* Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука, 1977. 552 с.
- [8] *Перов В.В., Павлов В.М., Козлюк В.В.* // ВАНТ. Сер. Техника физ. экспериментов. 1979. № 1/3. С. 7.
- [9] *Козлюк В.В., Перов В.В.* // Тез. докл. XII Всесоюз. семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. Харьков, 1991. С. 116.