

12

Экспериментальное исследование ускорения электронов при введении расстройки между частотой следования сгустков и частотой возбуждаемого кильватерного поля

© А.Ф. Линник, И.Н. Онищенко, В.И. Приступа

ННЦ „Харьковский физико-технический институт“, Харьков, Украина
E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 30 августа 2016 г.

Проведено экспериментальное исследование возбуждения кильватерных полей в диэлектрической структуре последовательностью сгустков релятивистских электронов и ускорения в них других сгустков той же последовательности при введении расстройки частоты следования сгустков относительно частоты кильватерного поля, возбуждаемого в диэлектрической структуре на черенковском резонансе. Сгустки первой части последовательности возбуждают кильватерную волну, а сгустки второй части последовательности, сдвигаясь в ускоряющую фазу, приобретают дополнительную энергию. Исследована возможность регулировки числа сгустков, возбуждающих кильватерное поле в структуре, и числа последующих ускоряемых сгустков путем изменения величины расстройки.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.04.44291.16468

Разработка новых методов высокоградиентного ускорения заряженных частиц вызвана необходимостью уменьшения габаритов коллайдеров, востребованных физикой высоких энергий. Одним из перспектив-

ных направлений создания будущих линейных коллайдеров является ускорение кильватерным полем, возбуждаемым в диэлектрических структурах электронным сгустком [1–3]. В этой схеме электронный сгусток с большим зарядом (драйвер) при пролете по вакуумному каналу диэлектрической структуры возбуждает продольное кильватерное поле большой амплитуды. С помощью экстрактора СВЧ мощность передается в канал ускорения. Инжектированный с соответствующей задержкой для попадания в ускоряющую фазу кильватерного поля сгусток с малым зарядом (витнес) ускоряется.

В работах [4,5] показана возможность применения вместо одного сгустка-драйвера с большим зарядом последовательности сгустков с суммарным эквивалентным зарядом. В этом случае инжекция ускоряемых сгустков может быть реализована [6] без использования дополнительного ускорителя-инжектора за счет смещения в ускоряющую фазу возбужденного кильватерного поля сгустков задней части последовательности при их задержке во времени отклонением и возвращением на линию возбуждения кильватерного поля сгустками передней части последовательности. В этом методе проблематичным является требуемое быстрое включение отклоняющего магнитного поля. В настоящей работе предложен и экспериментально исследован метод возбуждения кильватерного поля одними сгустками и ускорения других сгустков одной и той же последовательности, не требующий быстро действующих отклоняющих магнитных систем. Суть метода заключается во введении расстройки Δf между частотой следования сгустков f_m и частотой возбуждаемого кильватерного поля f_0 ($\Delta f = f_m - f_0$). В отсутствие расстройки $\Delta f = 0$ все сгустки последовательности находятся в тормозящей фазе возбуждаемого поля и теряют свою энергию на возбуждение кильватерного поля. При наличии расстройки $\Delta f \neq 0$ сгустки передней части последовательности теряют свою энергию на возбуждение кильватерного поля, а сгустки задней части последовательности, постепенно смещаясь по фазе, попадают в ускоряющее кильватерное поле, возбуждаемое предыдущими сгустками, и приобретают дополнительную энергию. Соответственно кильватерное поле представляет собой биение с периодом $T_1 = 1/\Delta f$, определяемым величиной расстройки. В результате в течение длительности последовательности сгустков T образуется несколько пар тормозящейся и ускоряемой частей $M = T/T_1$. Для точечных сгустков моноэнергетичных электронов число сгустков N^*

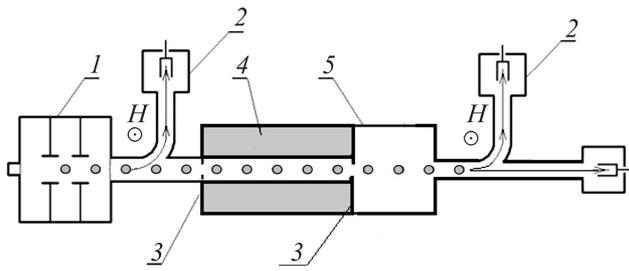


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ускоритель „Алмаз-2М“, 2 — магнитные анализаторы, 3 — входная и выходная диафрагмы, 4 — тefлоновая трубка; 5 — металлический волновод.

первой части последовательности, которые возбуждают кильватерное поле, определяется из условия смещения по фазе N^* -го сгустка на π .

Следующая часть последовательности сгустков такой же длительности ускоряется. При этом каждый сгусток ускоряемой части последовательности оказывается в разных фазах и ускоряется разными по величине кильватерными полями. Это приводит к размытому по энергии спектру ускоренных сгустков, что тем не менее позволяет исследовать процесс ускорения сгустков возбужденными кильватерными полями.

Схема экспериментальной установки для исследования возбуждения кильватерного поля в диэлектрической структуре последовательностью сгустков и ускорения в этих полях других сгустков той же последовательности, сдвинутых в ускоряющие фазы за счет введения расстройки между частотой следования сгустков и частотой возбуждаемого кильватерного поля, представлена на рис. 1.

Линейный резонансный электронный ускоритель „Алмаз-2М“ создавал пучок релятивистских электронов, энергию которых можно менять в пределах от 2.5 до 4.8 MeV, ток пучка 0.8 A в импульсе длительностью $2 \cdot 10^{-6}$ s. Каждый импульс представляет собой последовательность $N = 6 \cdot 10^3$ электронных сгустков, каждый длительностью $6 \cdot 10^{-11}$ s, зарядом $2.6 \cdot 10^{-10}$ C и изменяемой частотой их следования f_m . К ускорителю „Алмаз-2М“ пристыковывалась камера, в которой размещается диэлектрическая структура. Диэлектрическая структура представляет собой медный цилиндрический волновод 5 с внутренним диаметром $85 \cdot 10^{-3}$ m, заполненный диэлектрической

трубкой 4 из фторопласта ($\epsilon = 2.04$, $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$), внешний диаметр которого равен внутреннему диаметру медного волновода, с каналом диаметром $2.1 \cdot 10^{-2}$ м для прохождения электронных сгустков. Длина заполненной диэлектриком части равна $31.9 \cdot 10^{-2}$ м, что соответствует трем длинам волны основной возбуждаемой моды.

Для выбранных параметров диэлектрической структуры частота кильватерного поля, возбуждаемого сгустками на черенковском резонансе, была фиксированной и равнялась $f_0 = 2805$ МГц. Расстройка между частотой следования сгустков f_m и частотой кильватерного поля f_0 обеспечивалась изменением частоты следования сгустков f_m , равной частоте СВЧ-поля клистрона, подаваемого на вход ускоряющей секции ускорителя. Для изменения частоты СВЧ-поля в эксперименте использовался клистрон-усилитель КИУ-12М мощностью до 20 кВт в импульсе $2 \cdot 10^{-6}$ с с входным сигналом мощностью до 10 кВт от задающего генератора „Рубин“ на базе магнетрона МИ-30. Изменением частоты сигнала задающего генератора была получена частота следования сгустков, изменяемая в пределах от 2803 до 2807.5 МГц.

Энергетические спектры электронов сгустков измерялись с помощью магнитных анализаторов 2, расположенных на входе и выходе диэлектрической структуры.

Экспериментально исследовалось влияние расстройки между частотой, возбуждаемой в структуре кильватерной волны, и частотой следования сгустков последовательности на количество сгустков N^* , попадающих в тормозящие фазы и возбуждающих кильватерное поле, и такое же количество сгустков, попадающих в ускоряемые фазы. Для расстройки, при которой $N^* = N/2$, имеет место одно биение. В случае $N^* < N/2$ на огибающей СВЧ-кильватерного поля наблюдалось несколько биений.

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные кривые зависимости N^* от величины расстройки Δf . Кривая 1 (кружки) представляет зависимость экспериментально полученных количеств сгустков N^* , которые тормозятся (область роста кильватерного поля), и количеств сгустков, которые ускоряются (область уменьшения кильватерного поля), от величины Δf . Расчет количества сгустков N^* по формуле (1) приведен в виде кривой 2 (квадратики). Расчетная и измеренная экспериментально зависимости находятся в удовлетворительном согласии.

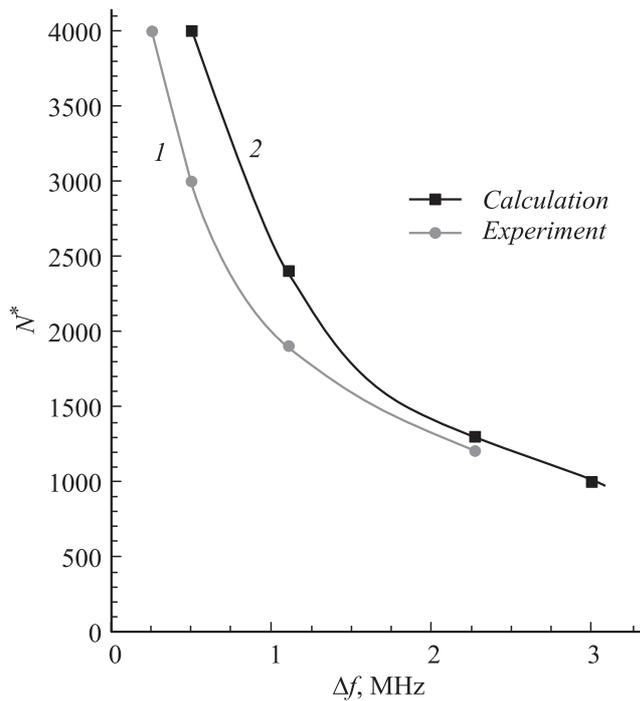


Рис. 2. Зависимость числа сгустков N^* , возбуждающих кильватерное поле, от величины расстройки $\Delta f = f_m - f_0$.

Энергетические спектры электронов пучка, измеренные с помощью магнитных анализаторов, установленных на выходе ускорителя и на выходе диэлектрической структуры, представлены на рис. 3: квадратики — исходные энергетические спектры; кружки — энергетические спектры электронов после возбуждения кильватерного поля и взаимодействия с ним сгустков. На рис. 3, *a* показан резонансный случай (нулевая расстройка $\Delta f = 0$), на рис. 3, *b* — нерезонансный случай (ненулевая расстройка $\Delta f = 2.5$ MHz).

Из рис. 3, *a* следует, что при наличии диэлектрика в случае резонанса весь энергетический спектр смещается на 400 keV как целое

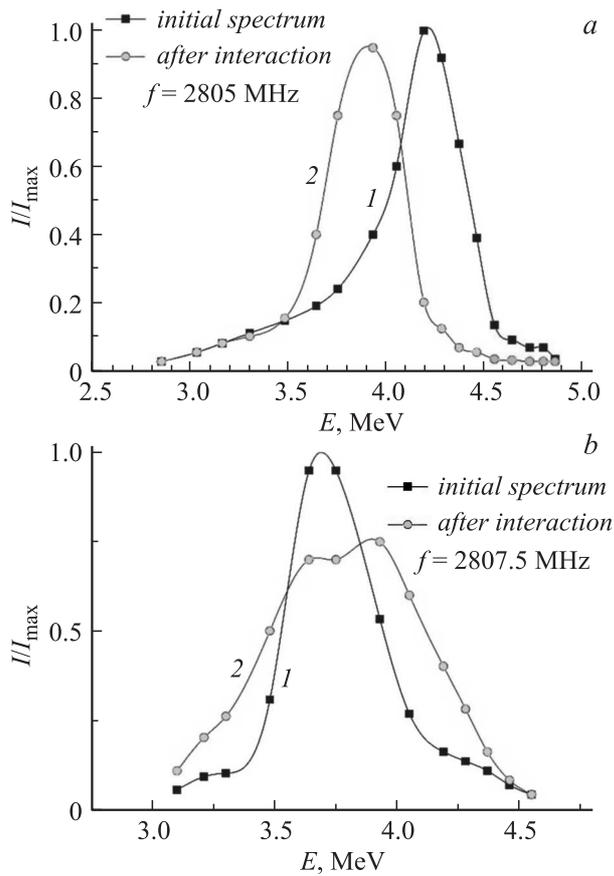


Рис. 3. Энергетические спектры электронов сгустков, инжектируемых из ускорителя „Алмаз-2М“ (кривая 1) и взаимодействовавших с диэлектрической структурой (кривая 2): $a - \Delta f = 0$; $b - \Delta f = f_m - f_0 = 2.5$ MHz.

в область меньших энергий, что объясняется потерей энергии на возбуждение колебаний всех сгустков, как резонансных.

При наличии расстройки между частотой следования сгустков и частотой кильватерного поля $\Delta f = f_m - f_0 = 2.4$ MHz (рис. 3, b) в энергетических спектрах электронов наблюдаются как потерявшие

энергию электроны (-150 keV), так и ускоренные до энергии выше первоначальной ($+150$ keV). Это свидетельствует о том, что часть сгустков последовательности, смещаясь по фазе, попадает в ускоряющую фазу кильватерной волны, возбуждаемой предыдущими сгустками той же последовательности, и отбирает энергию кильватерного поля.

Изменением величины расстройки можно регулировать число сгустков последовательности, которые возбуждают кильватерную волну, и число последующих сгустков, которые попадают в ускоряющую фазу кильватерного поля и получают дополнительную энергию. При увеличении расстройки возникают условия, когда появляется биение кильватерного поля с несколькими частями последовательности заторможенных и ускоренных сгустков.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность использовать расстройку частоты следования сгустков относительно частоты черенковского кильватерного поля, возбуждаемого в диэлектрической структуре, для ускорения части сгустков последовательности, без необходимости использовать отдельный ускоритель-инжектор.

Работа поддержана программой „Global Initiatives for Proliferation Prevention (GIPP)“, проект ANL-T2-247-UA (УНТЦ № P522).

Список литературы

- [1] *Gai W., Schoessow P.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2001. V. 459. N 1. P. 1–5.
- [2] *Onishchenko I.N., Sidorenko D.Yu., Sotnikov G.V.* // Phys. Rev. E. 2002. V. 65. P. 066501 (1–11).
- [3] *Батулин С.С., Шейнман И.Л., Альтмарк А.М.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 9. С. 7–13.
- [4] *Zhang T.-B., Hirshfield J.L., Marshal T.C., Hafizi B.* // Phys. Rev. E. 1997. V. 56. N 4. P. 4647–4655.
- [5] *Onishchenko I.N., Kiselev V.A., Linnik A.F., Sotnikov G.V.* // Proc. IPAC'13. Shanghai, China, 12–17 May, 2013. P. 1259–1261.
- [6] *Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнин В.А.* и др. // Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, Россия, 21–23 октября 1986 г. Т. 1. С. 257–259.