

НОВЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ, СИЛЬНОТОЧНЫЕ ПУЧКИ

УДК 621.384.6

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ВЫХОДЕ РЕЗОНАНСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКЕ

Н.И. Айзацкий, В.Ф. Жигло, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, А.Н. Опанасенко, С.А. Пережогин

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua

Проведено моделирование самосогласованной динамики частиц в начальной части ускорителя электронов 10 см-диапазона на бегущей волне. Показана возможность формирования субпикосекундных сгустков частиц со сравнительно малым поперечным эмиттансом при применении в таком ускорителе инжекторов, состоящих из диодной электронной пушки и группирователей на нераспространяющихся колебаниях. Эффективность группировки достигается за счет фазового движения частиц в бегущей волне, которая является суперпозицией волн, возбуждаемых генератором СВЧ-мощности и последовательностью интенсивных сгустков. При определенной фазе инжекции сгустков в ускоряющую секцию фазовая скорость суммарной волны становится меньше скорости света и, если сгустки совершают в ней около четверти синхротронного колебания, возможно образование в сгустках областей с высокой плотностью частиц. Для обеспечения малого поперечного эмиттанта пучка ускоритель помещается в аксиально-симметричное магнитное поле специальной конфигурации. Согласно расчетам, длительность сгустков на половине высоты может быть уменьшена до 430 фемтосекунд при энергии частиц 8,7 МэВ, токе пучка 0,95 А и нормализованном поперечном эмиттансе 13 мм \times мрад.

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение коротких интенсивных сгустков электронов является одним из наиболее динамически развивающихся направлений в физике пучков заряженных частиц. Существует несколько методов получения таких сгустков [см., например, 1,2]. В последнее время получил развитие так называемый метод скоростной группировки сгустков, получаемых на выходе высокочастотных пушек с фотоэмиссионными катодами [3]. Основной принцип метода хорошо известен и широко используется в технике ускорителей, в частности, при формировании сгустков в инжекторных системах (см., например, [4]). Его сущность заключается в следующем. Электронный сгусток инжектируется в ускоряющую секцию в нулевой фазе бегущей волны. При этом скорость частиц меньше фазовой скорости волны, которая, в свою очередь, равна или меньше скорости света. Сгусток скользит по фазе в сторону максимума ускоряющего поля, совершая вращение на фазовой плоскости фаза-энергия. Если фазовая скорость волны меньше скорости света, то траектории захваченных частиц являются замкнутыми, и, совершив четверть периода фазового колебания, частицы сгустка расположатся так, что сгусток будет иметь минимальную фазовую протяженность. В случае, если фазовая скорость волны равна скорости света, траектории частиц на фазовой плоскости являются не замкнутыми и эффективность группировки уменьшается, хотя при этом можно сгруппировать сгусток с очень высокими энергиями частиц.

Анализ литературы, посвященной скоростной группировке, показал, что при рассмотрении теоретических основ метода не учитывается влияние сгустков на поле волны, в котором они ускоряются, что, в принципе, оправдано для группировки сгустков, получаемых на выходе фотоинжекторов, средний ток пучка которых, как правило, мал. При умеренных требованиях к поперечному эмиттансу пучка могут быть использованы традиционные инжекторы, в которых происходит формирование одного сгустка на каждом периоде ускоряющего поля из непрерывного пучка. Такие инжекторы могут обеспечить значительную величину импульсного тока пучка. Представляет интерес изучение процессов скоростной группировки сгустков, полученных на выходе таких инжекторов, в условиях существенного воздействия полей излучения сгустков на поле бегущей волны. Данная работа посвящена изучению этого вопроса.

2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для нахождения параметров аксиально-симметричных электродинамических и магнитных систем использовался пакет SUPERFISH/POISSON, для моделирования движения частиц – коды EGUN и PARMELA. Для нахождения самосогласованных полей, в которых движутся частицы при формировании и ускорении сгустков, была использована методика [5]. В качестве модели ускорителя мы использовали систему, состоящую из инжектора электронов на нераспространяющихся колебаниях [6] и короткой секции на бегущей волне с $2\pi/3$ -типом колебаний [7] (Рис.1).

Для уменьшения деградации эмиттанса пучка в процессе формирования и ускорения сгустков подбиралась специальная конфигурация магнитного поля. На первом этапе магнитная система задавалась с помощью набора витков с током. После того, как нужная конфигурация была найдена, магнитная система была синтезирована с использованием пакета SUPERFISH/POISSON.

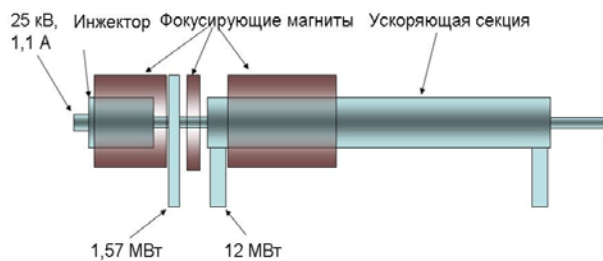


Рис.1. Структурная схема ускорителя

При проведении исследований мы интересовались, в основном, параметрами пучка в установившемся режиме, поэтому длительность импульса тока пучка была выбрана минимальной, при которой такой режим достигается (примерно 1,3 мкс) для экономии времени моделирования. Результаты моделирования приведены ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование самосогласованной динамики частиц в инжекторе показало, что оптимальной мощностью СВЧ-питания при ускорении пучка амперного диапазона является величина 1,56 МВт. Моделирование динамики частиц при различных конфигурациях магнитного поля показало, что для получения малого поперечного эмиттанса на выходе инжектора необходимо обеспечить малый размер пучка в районе начала резонатора с максимальным полем. Одна из возможных конфигураций магнитного поля на оси, при которой наблюдается малое ухудшение поперечного эмиттанса пучка, показана на Рис.2.

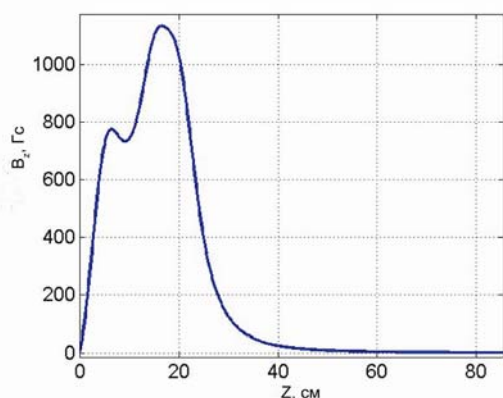


Рис.2. Конфигурация магнитного поля на оси инжектора

Изменение среднеквадратичного размера (1σ) пучка вдоль инжектора при данной конфигурации магнитного поля показано на Рис.3. Можно видеть, что в районе координат от 8 до 10 см пучок имеет минимальный размер. Этот диапазон координат соответствует началу 5 резонатора.

Параметры инжектора при выбранной конфигурации магнитного поля и мощности СВЧ-питания

1,56 МВт приведены в Табл.1. Следует отметить, что уменьшение деградации поперечного эмиттанса пучка приводит примерно к двухкратному увеличению фазовой протяженности сгустков. По-видимому, это происходит за счет увеличения действия сил пространственного заряда при увеличенной плотности частиц. Вместе с тем, в распределении частиц на плоскости фаза-энергия есть сгущения (Рис.4), которые могут быть использованы для формирования фемтосекундных сгустков.

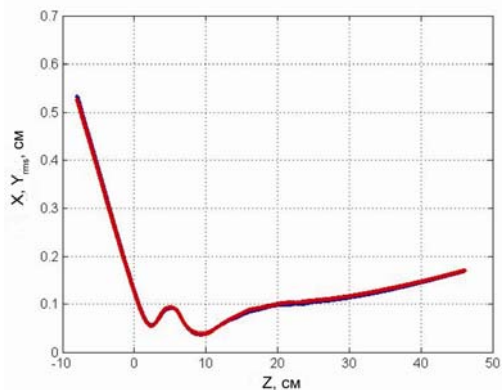


Рис.3. Среднеквадратичный размер пучка вдоль инжектора

Таблица 1
Параметры инжектора

Рабочая частота инжектора, МГц	2797,15
Энергия пучка на выходе электронной пушки, кэВ	25
Ток пушки, А	1,1
Максимальное поле на оси резонансной системы, МВ/м	43
Энергия частиц на выходе инжектора, кэВ	1065
Ширина энергетического спектра пучка, включающего 70% частиц на выходе инжектора, %	2,8
Фазовый интервал, включающий 70% частиц сгустков, град	19
Поперечный нормализованный эмиттанс (1σ), мм·мрад	9

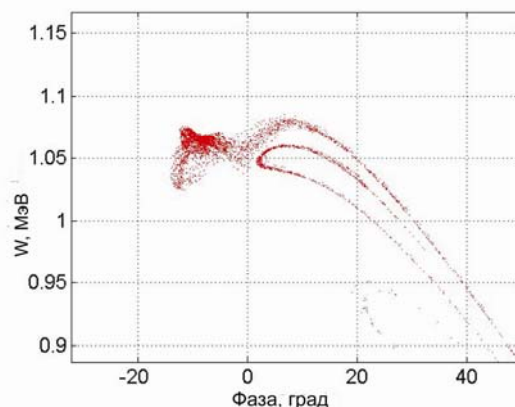


Рис.4. Фазоэнергетическое распределение частиц

Моделирование динамики частиц при разных фазах влета сгустков в ускоряющую секцию показало, что минимальная длительность сгустков достигается при их инжекции практически в нулевое поле бегу-

щей волны. На Рис.5 показано распределение фазы и амплитуды волны поля ускоряющей пространственной гармоники, которое является суперпозицией полей, возбуждаемых внешним генератором СВЧ-питания и сгустками в установившемся режиме (примерно 1,6 мкс от начала СВЧ-импульса). Несмотря на то, что на рабочей частоте фазовая скорость волн в секции равна скорости света, из-за фазового скольжения сгустков фазовая скорость суммарной волны не равна скорости света, как это видно из Рис.5. Благодаря этому сгусток совершает фазовые колебания относительно волны (Рис.6).

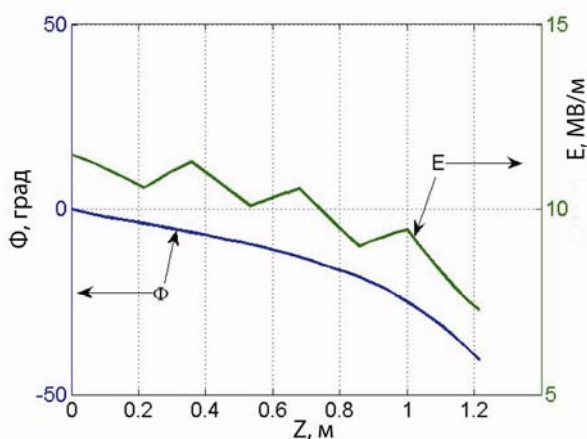


Рис.5. Распределение ускоряющего поля вдоль секции (кривая E – амплитуда, кривая Φ – фаза)

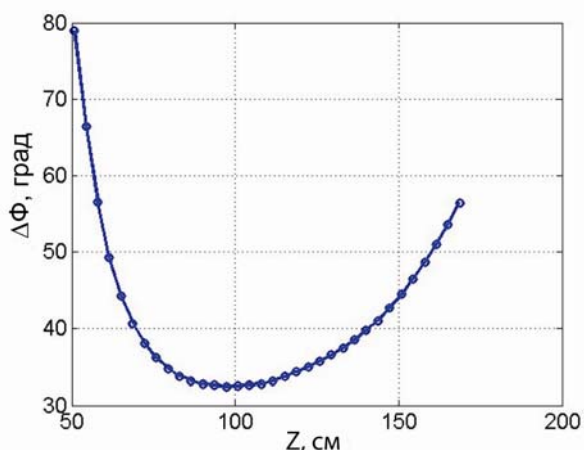


Рис.6. Разность фаз волны и первой гармоники тока сгустков вдоль секции

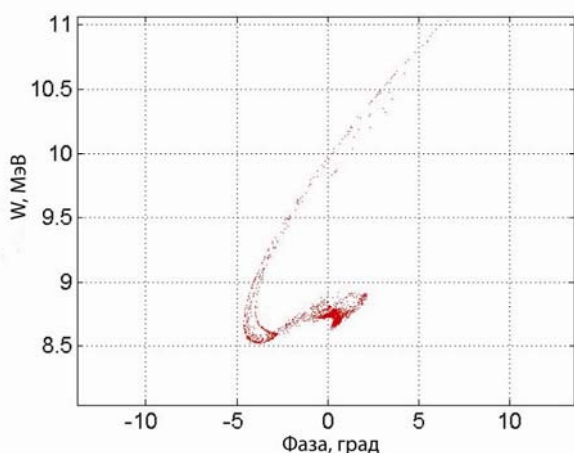


Рис.7. Распределение частиц на плоскости фаза – энергия

На Рис.7 изображено распределение частиц на плоскости фаза-энергия. Фаза частиц отсчитана относительно некоторой референсной частицы, находящейся примерно в центре сгустка. Видно, что распределение имеет довольно сложную форму с областью повышенной плотности частиц.

Сравнивая Рис.7 и Рис.4 видно, что частицы совершили вращение в плоскости фаза-энергия. Фазовый спектр сгустка приведен на Рис.8. Видно, что фазовое распределение имеет острый пик с малым значением фазовой протяженности на половине высоты. Обобщенные параметры пучка на выходе ускорителя для установившегося режима приведены в Табл.2.

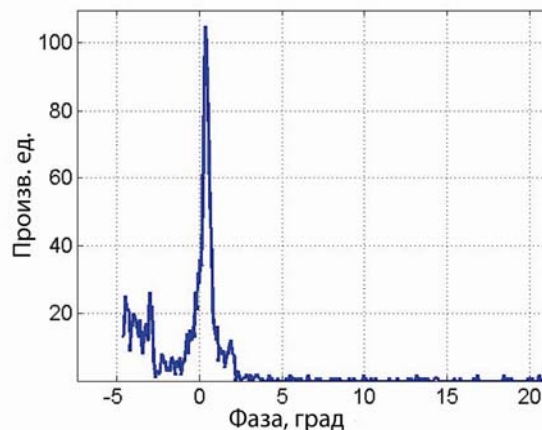


Рис.8. Фазовый спектр пучка

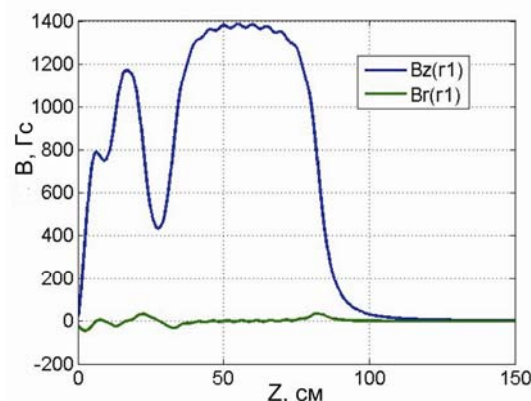


Рис.9. Распределение магнитного поля

Таблица 2

Параметры пучка на выходе ускорителя

Ток пучка, А	0,95
Пиковый ток, А	284
Длительность сгустков на половине высоты, фс	430
Энергия частиц, МэВ	8,7
Ширина энергетического спектра пучка, включающего 70% частиц на выходе ускорителя, %	2,6
Фазовый интервал, включающий 70% частиц сгустков, град	5
Поперечный нормализованный эмиттанс (1σ), мм-мрад	13
Поперечный размер пучка (4σ), мм	9,8

Следует заметить, что в интервал фаз, соответствующих ширине спектра на полувысоте, попадает не менее 45% частиц пучка. При расстройке фазы

СВЧ-питання секції в межах $\pm 5^\circ$ від оптимального пікового ток зменшується в два рази. Крім того, моделювання показало, що для зменшення деградації поперечного емітанса пучка необхідно забезпечити малі поперечні розміри сгустків в початковій частині секції, включаючи і трансформатор типу волни (ТТВ). Для цього необхідно забезпечити розподілення магнітного поля, зображене на Рис.9. Центр ТТВ відповідає координаті $Z=48$ см.

ВИВОДИ

Путем численного моделювання самосогласованної динаміки частинок проведено дослідження особливостей формування субпікосекундних сгустків електронів в прискорюючій секції з фазовою швидкістю, рівною швидкості світла. Показано принципова можливість отримання субпікосекундних сгустків з піковим током 0,3 кА і нормалізованою яскравістю $2 \cdot 10^{10}$ А/м² при використанні інжектора з діодної термоемісійної пушкою. Такі сгустки можуть бути використані для дослідження генерації випромінювання терагерцового діапазону.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Piot. State-of-the-Art Electron Bunch Compression // *Proc. of the LINAC 2004*. Lubeck, Germany, v.1, p.528-532.
2. P. Emma. Issues and Challenges for Short Pulse Radiation Production // *Proc. of the LINAC 2004*. Lubeck, Germany. 2004, v.1, p.225-229.
3. S.G. Anderson, P. Musumeci, J.B. Rosenzweig. Velocity bunching of high-brightness electron beams // *Physical review special topics - accelerators and beams*. 2005, v.8, p.014401.
4. О.А. Вальднер. *Линейные ускорители электронов*. М: «Атомиздат», 1966, с.167.
5. V.V. Mytrochenko, A. Opanasenko. Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code // *NIM*. 2006, v.A558, p.235-239.
6. Н.И. Айзацкий, П.Г. Гуртовенко, В.Ф. Жигло и др. Компактный инжектор электронов для линейного резонансного ускорителя 10 см-диапазона // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, p.68-72.
7. Н.И. Айзацкий, В.И. Белоглазов, Е.З. Биллер и др. Мощный линейный ускоритель электронов с энергией до 40 МэВ // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, p.25-29.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

ON FEMTOSECOND BUNCH FORMATION IN TRAVELING WAVE LINAC AT HIGH BEAM LOADING

M.I. Ayzatskiy, V.F. Zhiglo, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko, S.A. Perezhogin

Simulation of self consistent beam dynamics in initial part of the S-band traveling wave electron linac has been carried out. It is shown that formation of subpicosecond bunches with relatively low transversal emittance is possible in such linac using an injector consisted of a diode electron gun and the evanescent wave buncher. Efficiency of bunching is reached due to the phase motion of particles in a traveling wave that is superposition of waves excited by a RF generator and a train of intense bunches in an acceleration section. Phase velocity of the wave becomes lower than that of the light at certain injection phase of bunches and if bunches run a quote of synchrotron period before living the section it is possible of formation of dense regions inside bunches. To provide low transverse emittance of the beam the linac is placed into axially symmetric magnetic field with special configuration. According to the simulations full width at a half of magnitude of bunches can be lowered to 430 femtosecond at particle energy of 8.7 MeV, beam current of 0.95 A and normalized transversal emittance of 13 mm×mrad.

ДО ПИТАННЯ ПРО ФОРМУВАННЯ ФЕМТОСЕКУНДНИХ ЗГУСТКІВ ЕЛЕКТРОНІВ НА ВИХОДІ РЕЗОНАНСНОГО ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА З БІГУЧОЮ ХВИЛЕЮ ПРИ ЗНАЧНОМУ СТРУМОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

M.I. Айзацький, В.Ф. Жигло, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, А.М. Опанасенко, С.О. Пережогін

Проведено моделювання самоузгодженої динаміки частинок в початковій частині прискорювача електронів 10 см-діапазону на хвилі, що біжить. Показано можливість формування субпікосекундних згустків частинок з порівняно малим поперечним емітансом при застосуванні в такому прискорювачі інжекторів, що складаються з діодної електронної гармати і груповачів на коливаннях, що не розповсюджуються. Ефективність групування досягається за рахунок фазового руху частинок в хвилі, що біжить, яка є суперпозицією хвиль, що збуджуються генератором НВЧ-потужності і послідовністю інтенсивних згустків. При певній фазі інжекції згустків в прискорювальну секцію фазова швидкість сумарної хвилі стає менше швидкості світла і, якщо згустки здійснюють в ній близько чверті синхротронного коливання, можливе формування в згустках областей з високою щільністю частинок. Для забезпечення малого поперечного емітансу пучка прискорювач поміщається в аксіально-симетричне магнітне поле спеціальної конфігурації. Згідно з розрахунками, тривалість згустків на половині висоти може бути зменшена до 430 фемтосекунд при енергії частинок 8,7 МеВ, струмі пучка 0,95 А і нормалізованому поперечному емітансі 13 мм×мрад.