

Шейнман И.Л.¹, Петренко А.В.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Центральное европейское агентство по научным исследованиям «ЦЕРН»

Группирователь высокоэнергетичного пучка на основе диэлектрической кильватерной структуры

Представлена концепция нового метода группирования высокоэнергетичного пучка протонов или электронов для его использования в качестве генераторного пучка при возбуждении ускорительных структур с плазменным или диэлектрическим заполнением. На первом шаге внутри диэлектрической ускорительной структуры с помощью генераторного электронного сгустка в группируемый пучок вводится энергетическая модуляция. Затем энергетическая модуляция пучка будет преобразована в продольное группирование частиц, используя структуры с магнитными диполями. Моделирование самосогласованной динамики пучка использовалось для нахождения требуемых параметров диэлектрической ускорительной структуры, генерирующего кильватерное поле электронного сгустка и системы фокусировки пучка.

Ключевые слова: Группирователь, кильватерное ускорение, диэлектрическая ускорительная структура.

В настоящее время дальнейшее повышение энергии заряженных частиц в традиционных ускорителях сталкивается с необходимостью огромных финансовых вложений для строительства новых макромасштабных устройств. В связи с этим, в последнее время были предложены новые методы ускорения заряженных частиц. Одним из таких методов является кильватерный метод ускорения, основанный на преобразовании энергии существующих сильноточных высокоэнергетичных пучков в энергию частиц следующего за ними слаботочного сгустка, с перспективой значительного увеличения доли энергии, приходящейся на одну частицу.

В ряде работ были предложены идеи передать часть энергии пучка протонов на выходе синхротронов к другим частицам, которые не могут быть ускорены в циклическом ускорителе либо из-за предельно высокой энергетической потери из-за синхротронного излучения (электроны/позитроны), либо из-за короткого времени жизни нестабильных частиц (мюоны, пионы) [1–3]. Такие ускоренные частицы могут использоваться, например, в экспериментах коллайдеров, которые не требуют высокой яркости [4]. Возбуждаемое протонным пучком плазменное кильватерное ускорение [3] является недавно предложенным методом, обещающим темп ускорения ГэВ/м с перспективой достижения ускоряемыми частицами энергии TeV-масштаба на единственной плазменной стадии. Кильватерное поле плазмы ГВ/м соответствуют плазменной длине волны приблизительно 1 мм, в то время как протонный сгусток в типичном синхротроне имеет несколько десятков сантиметров длины. Чтобы возбудить кильватерное поле в плазме с высокой амплитудой протонный сгусток должны быть или сжат по длине во много раз [2, 3] (что технически очень сложно), или один длинный протонный пучок должен быть сгруппирован в последовательность микросгустков, которые будут возбуждать

плазменные колебаниями резонансным образом.

В этой статье мы предлагаем более эффективный альтернативный подход для создания длинной последовательности протонных микросгустков на основе процесса продольного группирования, впервые предложенного в [1]. Для достижения группировки с субмиллиметровым периодом мы предлагаем использовать коллинеарное кильватерное ускорение в структурах с диэлектрическим заполнением. Получающаяся цепочка протонных микросгустков также может быть полезной не только для плазменного кильватерного ускорения, но и как мощный источник излучения миллиметровых волн или как драйвер для аналогичного диэлектрического кильватерного ускорителя.

Основная идея предложенной схемы представлена в [5, 6]. На первом шаге с помощью диэлектрической ускорительной структуры миллиметровой длины волны в пучок протонов вводится энергетическая модуляция. Затем энергетическая модуляция протонного пучка будет преобразована в продольное группирование частиц, используя структуры с магнитными диполями. Длина пути протонов в дипольном магните линейно зависит от импульса протонов, поэтому энергетическая модуляция преобразуется в продольную группировку частиц.

Пучок протонов из Суперпротонного синхротрона SPS ЦЕРН на 400 ГэВ, используемый здесь в качестве примера, имеет энергетический разброс $\sigma_{\Delta E} = 120$ МэВ (относительное значение $\sigma_{\Delta E/E} = 0.03\%$). Чтобы произвести микрогруппирование, необходимое для плазменного кильватерного ускорения, энергетическая модуляция, вводимая в пучок путем его пропускания через диэлектрическую ускорительную структуру, должна быть несколько раз больше, чем некоррелированное энергетическое распределение входящего пучка протонов. Мы примем ± 500 МэВ в качестве типичного значения.

Диэлектрическое кильватерное ускорение основывается на возбуждении электромагнитной волны с продольной компонентой электрического поля сильноточным пучком электронов в вакуумном канале диэлектрического волновода. Пучок протонов движется в вакуумном канале внутри диэлектрика следом за электронным сгустком. При характерных полях 100 – 150 МВ/м требуемая энергетическая модуляция ± 500 МэВ может быть получены на расстояниях в 3 – 5 м. Поскольку длина пучка протонов намного больше, чем длина волны в структуре, возбуждение кильватерного поля должно быть осуществлено в одномодовом режиме. Важно отметить, что пучок протонов не извлекает энергию из кильватерного поля в нашем случае (т.е. кильватерное поле не нагружено) – энергия лишь перераспределяется в пучке протонов.

Расчет параметров волновода и самосогласованной динамики пучка были проведены с использованием программы DynPart [7-9]. Для создания кильватерной волны с требуемыми параметрами (базовая частота 300 ГГц, длина волны $\lambda = c/f = 1$ мм, напряженность поля свыше 100 МВ/м), используем диэлектрический волновод с внутренним радиусом вакуумного канала $R_c = 1$ мм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.75$ (материал – кварц). При этом внешний радиус диэлектрика составляет $R_w = 1.0614$ мм, толщина диэлектрика $d = 0.0614$ мм. Радиус волновода определяет величину кильватерного поля при заданной величине заряда электронного сгустка и его длине.

Будем выбирать такую минимальную длину сгустка, которая бы обеспечивала максимальную амплитуду, но в то же время, чтобы режим возбуждения оставался бы практически одномодовым. Для достижения поля 100 МВ/м требуется заряд $Q = 5$ нКл. При этом среднеквадратическая длина сгустка, удовлетворяющего описанным требованиям, составляет $\sigma_z = 0.1$ мм.

Выбор поперечных размеров сгустка определяется его динамикой при движении в диэлектрическом волноводе. Поскольку генерируемое электронным сгустком поле действует не только на следующий за ним протонный сгусток, но и на него самого, и при

смещении сгустка от оси волновода отклоняющее поле может достигать существенных значений, приводя к посадке частиц на стенку волновода. Поэтому для удержания сгустка у оси необходимо использование жесткой квадрупольной фокусировки. Величина фокусирующего магнитного поля для несверхпроводящих ("теплых") магнитов на границе волновода, как правило, не превышает $B_0 = 1.5$ Тл, которую и будем использовать в расчетах.

При заданной величине градиента магнитного поля дальность полета определяется начальным смещением ведущего сгустка от оси волновода и длиной фокусирующей секции. При этом существует длина фокусирующей секции, при которой дальность полета ведущего сгустка максимальна (то есть оптимальное среднее значение бета функции канала квадруполь). Примем поперечные размеры сгустка $\sigma_x = \sigma_y = 0.05$ мм.

На основе численного моделирования динамики пучка производился подбор начального значения длины фокусирующей секции, обеспечивающей максимальную дальность полета. Дальность полета рассчитывалась по моменту первого касания макрочастицами сгустка стенки волновода. Для устранения влияния случайности распределения макрочастиц проводились серии повторных вычислений, а также выбиралось достаточно большое количество макрочастиц, обеспечивающее малый разброс расчетных дальностей полета.

Наилучшая транспортировка электронного пучка согласно расчетам была достигнута при длине периода ФODO 11 см, при длине квадруполь 4.7 см. Магнитное поле в первом квадруполье было выбрано равным $B_0 = 1.5$ Тл. Распространение пучка на расстояние 5 м было достигнуто при смещении генераторного сгустка от оси волновода не более чем на 0.03 мм. При этом уменьшение энергии частиц в средней зоне генераторного сгустка составляет приблизительно 450 МэВ из стартовых 600 МэВ. Энергетическая модуляция протонного пучка составила $\Delta W = \pm 670$ МэВ.

Результаты расчетов распределения гамма-фактора пучка и положения частиц до и после прохождения группирователя представлены на рис. 1-3.

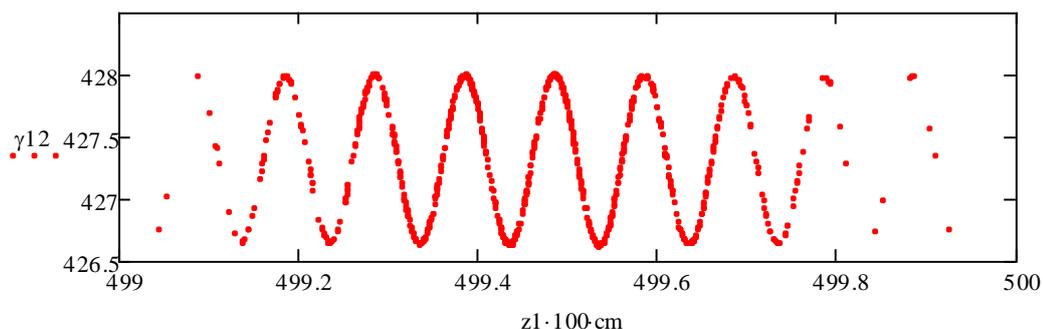


Рис. 1. Распределение гамма-фактора частиц протонного пучка.

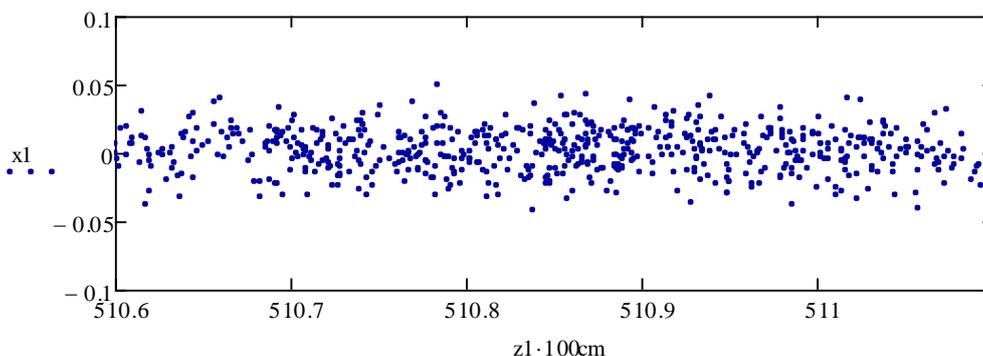


Рис. 2. Протонный пучок перед группирователем.

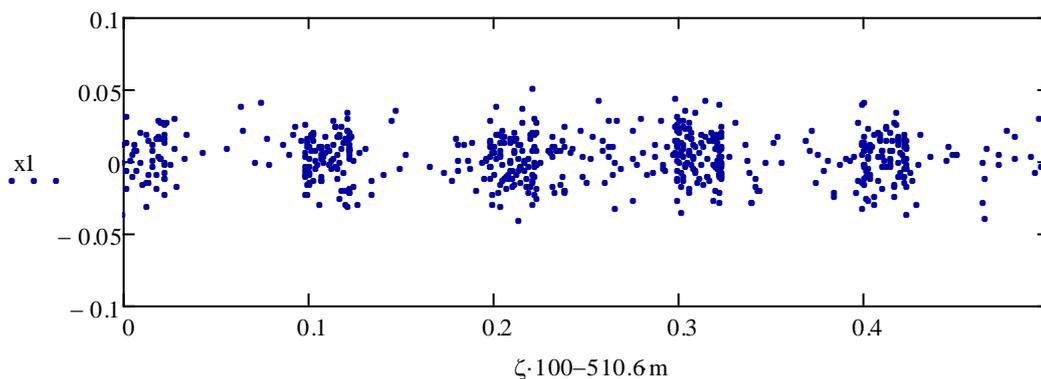


Рис. 3. Протонный пучок после прохождения группирователя

Таким образом, после прохождения поворотного участка модулированный протонный пучок приобретает требуемый продольный профиль распределения заряда.

Библиографический список

1. E.A. Perevedentsev, A.N. Skrinsky, On possibility of using intense beams of large proton accelerators for excitation of linear accelerating structures, Proceedings of VI National Accelerator Meeting, Dubna, 1978; Preprint INP 79-80, Novosibirsk, 1979.
2. V.E. Balakin, A.V. Novokhatsky, The method of accelerating electrons with maximum high gradient by a proton beam; Preprint INP 79-86, Novosibirsk, 1979.
3. A. Caldwell, K. Lotov, A. Pukhov, F. Simon. Proton-driven plasma-wakefield acceleration. Nature Physics, 5 (2009), p. 363.
4. A. Caldwell. Collider physics at high energies and low luminosities. Eur. Phys. J. Spec. Top. (2014) 223: 1139.
5. A. Petrenko. Proton beam micro-bunching using mm-wavelength accelerators, AWAKE Collaboration Meeting. 10.03.2016, Lisbon
6. I. Sheinman, A. Petrenko. High-Energy Micro-Buncher Based On the mm-Wavelength Dielectric Structure. Proceedings Russian Particle Accelerator Conference RUPAC-2016 TUPSA041, 21-25 November 2016, Saint-Petersburg, Russia
7. I. Sheynman, A. Kanareykin, G. Sotnikov. Numerical and Analytical Methods of Modeling of Bunch Dynamics in Dielectric Filled Accelerating Structures // Proceedings Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2012), MOPPA010. Saint-Petersburg, Russia, pp. 266-268. 2012.
8. I. Sheinman, P. Kirilin. Code development for calculation of self-coordinated beam dynamics in dielectric wakefield accelerators // Proceedings of 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO), Combined Conferences IVESC-ICEE-ICCTPEA-BDO'2014, W-BDO-7. Saint-Petersburg, Russia. pp. 245-247. 2014.
9. I. L. Sheinman, A. E. Yakushkin. Software Complex "Dynpart" for the Calculation of Self-Consistent Beam Dynamics in Dielectric Wakefield Accelerating Structures. Proceedings Russian Particle Accelerator Conference RUPAC-2016, TUPSA042, 21-25 November 2016, Saint-Petersburg, Russia