Известия НАН Армении, Физика, т.39, №6, с.361-365 (2004)

УДК 621.384

## БАНЧИРОВКА И УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ CANDLE

## Б.А. ГРИГОРЯН

## Центр синхротронного излучения CANDLE, Ереван

### (Поступила в редакцию 3 февраля 2004 г.)

Исследовано формирование начального пучка электронов на выходе из электронной пушки с учетом сил пространственного заряда. Предложена и реализована система банчировки частиц на основе первых двух гармоник частоты следования сгустков в 500 МГц. Банчировка осуществляется двумя резонаторами на стоячей волне. Дальнейшее продольное сжатие сгустка осуществляется в структуре с бегущей волной с одновременным ускорением частиц сгустка. Проведена трассировка частиц от состояния покоя (электронная пушка) до энергии 100 МэВ на выходе из основного линейного ускорителя на 3 ГГц. Показано, что предложенная схема линейного ускорителя с предбанчировкой частиц, позволяет ускорить до 96% частиц с энергетическим разбросом на выходе из линака в 0.5% и поперечным эмиттансом менее 1 мм-мрад.

#### 1. Введение

Ускорительно-накопительный комплекс CANDLE [1] состоит из линейного ускорителя электронов на энергию 100 МэВ, бустерного синхротрона, ускоряющего электронный пучок до 3 ГэВ, и основного накопительного кольца. Высокая яркость и стабильность фотонных пучков накопителя предполагает обеспечение прецизионных параметров накопленного пучка электронов в основном кольце. В дополнение, режимы работы комплекса должны позволять ускорение и накопление односгусткового, многосгусткового и непрерывного пучка в кольце. Это в свою очередь налагает жесткие требования на параметры пучка уже на начальной стадии формирования его пространственно-временной структуры, когда силы пространственного заряда пучка являются доминирующими.

Линейный ускоритель состоит из источника электронов (электронной пушки), системы группирователей (банчеров) и основной ускоряющей секции. В таблице 1 приведены основные требования к параметрам пучка на выходе из линейного ускорителя электронов для различных режимов работы комплекса.

Формирование пространственно-временной структуры пучка реализуется мультичастотной ВЧ банчировкой электронного пучка на основе введения продольно-энергетической корреляции в каждом сгустке. Для обеспечения эффективного сжатия предлагается использовать первые две гармоники продольного ВЧ поля в резонаторах на стоячей волне на частотах 0.5 и 1 ГГц, соответственно. Дальнейшее сжатие пучка осуществляется в режиме ускорения на бегущей волне с частотой 3 ГГц. Электронный пучок ускоряется при этом до скорости порядка 0.95 скорости света и инжектируется в основной линейный ускоритель на 3 ГГц, который доводит энергию частиц до 100 МэВ.

Режимы работы	Одно-/многосгустковый	Непрерывный
Длительность пучка	1/200-600 нс	1-600 нс
Номинальный ток	~1.6 А / 15 мА	~1 мА
Суммарный заряд	1.6 нК / 6 нК	~1 нК
Энерг. разброс	~ 0.5 %	~ 0.5 %
Поперечный эмиттанс	~ 10 [мм-мрад]	~10 [мм-мрад]
Частота работы	2 Гц	2 Гц
Диаметр пучка	~ 1.5 мм	~ 1.5 мм

Таблица 1. Параметры пучка на выходе линейного ускорителя

## 2. Электронная пушка

Энергия сгустка на выходе из электронной пушки составляет 90 кэВ. На этой стадии пучок электронов является сильно нерелятивистским и силы пространственного заряда являются доминирующими при рассмотрении динамики пучка. Уравнение огибающей сгустка [2] с учетом пространственного заряда имеет вид

$$\frac{da_x}{ds^2} + K_x(s)a_x - \frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} - \frac{4\lambda r_0}{\beta^2 \gamma^3 (a_x + a_y)} = 0, \qquad (1)$$

где  $a_{x,y}$  – полуширина пучка, s – расстояние по направлению движения,  $K_i$  – сила внешней фокусировки,  $\beta = v/c$ , v – скорость центра сгустка, c – скорость света,  $\gamma$  – Лоренц-фактор равновесной частицы,  $\varepsilon_i$  – поперечный эмиттанс сгустка,  $\lambda$  – линейная плотность частиц,  $r_0$  – классический радиус электрона. Последний член уравнения описывает действие сил пространственного заряда, которое обратно пропорционально кубу энергии частицы.

Расчеты траектории частиц в электронной пушке были проведены с помощью программы E-GUN [2], которая включает учет сил пространственного заряда при описании динамики сгустка. В качестве источника электронов была выбрана стандартная электронная пушка с галлий-арсенидовым катодом и оксидным покрытием. Геометрия пушки была оптимизирована для паралельности эквипотенциальных линий для получения ламинарного потока частиц и обеспечения ускорения необходимого заряда в сгустке. Была проведена трассировка 80 макрочастиц для заданной геометрии пушки. С использованием катода с площадью эффективной эмиссии в 1 см<sup>2</sup> получен сгусток электронов с сумарным зарядом в 1.6 нК и 6 нК для односгусткового и многосгусткового режимов работы, с пиковым током в сгустках 1.5 А и 15 мА соответственно. На рис.1 представлена геометрия электронной пушки и траектории частиц. Расчеты были проведены без учета влияния магнитного поля соленоидного магнита, которое частично компенсирует действие сил пространственного заряда. Триодный тип пушки с модуляцией сетки на частоте 500 МГц позволяет обеспечить предварительную банчировку пучка на этой стадии с длительностью в 1 нсек.





#### 3. Группирование сгустка (банчировка)

Механизм группировки нерелятивистских частиц основан на строгой зависимости скорости частиц от энергии. Это позволяет эффективно формировать временную структуру пучка уже на стадии выхода частиц из электронной пушки с помощью внешнего ВЧ поля. Инжектируя частицы в нулевой фазе ВЧ поля, где прирост энергии центральной частицы равен нулю, передние частицы испытывают торможение, а задние – ускорение, частицы пучка получают продольно-энергетическую корреляцию, которая со временем приводит к продольному сжатию пучка за счет разности скоростей. Расстояние, на котором происходит эффективная банчировка пучка, зависит как от энергии самого сгустка, так и от амплитуды напряжения внешнего ВЧ поля, и задается следующим выражением [3]

$$L_{eff} = \frac{\lambda_{RF}}{2\pi} \cdot \frac{m_e c^2 \beta^3 \gamma^3}{e \cdot U_{peak}}, \qquad (2)$$

где  $\lambda_{RF}$  – длина волны ВЧ поля,  $m_e c^2$  – энергия покоя электрона,  $U_{peak}$  – пиковое напряжение в резонаторе, e – заряд электрона.

Очевидно, что идеальной формой внешнего электромагнитного поля, обеспечивающей наиболее строгую корреляцию энергии и положения частицы в сгустке, является линейная зависимость поля от времени [4]. Разложение в ряд Фурье такого поля по основной гармонике  $\omega_0$  имеет вид

## $-At = A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \cos 2\omega_0 t + ... + A_6 \cos 6\omega_0 t .$

Для эффективной банчировки пучка выбрана система группирователей на частотах 0.5, 1 и 3 ГГц. Первые два группирователя представляют собой резонаторы на стоячей волне и обеспечивают только продольное сжатие пучка. Пучок влетает в резонаторы в нулевой фазе ВЧ поля. Первый резонатор с частотой 500 МГц и с пиковым напряжением в 30 кВ обеспечивает банчировку более 70% частиц в интервале длины волны в 10 см (3 ГГц). После дополнительной банчировки в 1 ГГц-овом резонаторе на стоячей волне пучок влетает в предускоряющую диафрагмированную структуру на бегущей волне, имеющей частоту 3 ГГц. Частицы доускоряются на спадающем гребне волны, обеспечивая одновременно продольное сжатие пучка и доускорение частиц до релятивистской энергии. На выходе из предускорителя кинетическая энергия частиц уже близка к релятивистской, и скорость частиц составляет порядка 0.96 скорости света. Более 85% частиц уже сгруппированы в интервале 30<sup>0</sup> длины волны 3 ГГц основной ускоряющей системы, которая доводит энергию частиц до проектного значения в 100 МэВ с темпом ускорения 17 МВ/м. На рис.2 приведены результаты трассировки 5600 частиц вдоль всего тракта, от электронной пушки до выхода из основного линейного ускорителя. Как видно из рисунка, более 96% частиц захватываются в режим ускорения. При этом энергетический разброс частиц в сгустке не превышает 0.5%, а поперечный эмиттанс пучка меньше 1 мм-мрад.



Рис.2. Результаты трассировки 5600 частиц вдоль всего ускорителя.

Представлены основные системы генерации, группирования и ускорения электронов в линейном ускорителе инжекторе на 100 МэВ. Динамика процесса формирования пространственно-временной структуры пучка исследована с учетом пространственного заряда пучка. Результаты исследования легли в основу проекта линейного ускорителя-инжектора для источника синхротронного излучения CANDLE [1,5]. Отличительной особенностью полученных результатов является эффективный захват более 96% частиц в режим ускорения в энергетическом интервале менее 0.5%.

# ЛИТЕРАТУРА

- CANDLE Design Study of 3GeV Synchrotron Light Source, ASLS-CANDLE R-001-02.
- 2. E-GUN Documentation.
- 3. Handbook of Accelerator Physics and Engineering (eds. A.Chao, M.Tigner), World Scientific, Singapore, 1999.
- 4. H.Weidemann. Particle Accelerator Physics. ISBN 3-540-64671-x, 2-nd edition.
- B.Grigoryan, V.Tsakanov, A.Vardanyan. The Design and Simulation Studies of the Preinjector for CANDLE Light Source. In Proc. of EPAC-2002, Paris, France, June 02-07, 2002, pp.1765-1767.

## ՍԱՄՆԻԿՆԵՐԻ ԽՄԲԱՎՈՐՈՒՄՆ ԵՎ ԱՐԱԳԱՅՈՒՄԸ CANDLE-Ի ԳԾԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉՈՒՄ

## Բ.Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

Ներկայացված է էլեկտրոնային փնջի ձևավորումը էլեկտրոնային թնդանոթի ելքում, հաշվի առնելով տարածական լիցքի ուժերի ազդեցությունը։ Առաջարկված խմբավորման համակարգը կազմված է երկու խմբավորիչներից, որոնք օգտագործում են 500 ՄՀց հաճախության 1-ին և 2-րդ հարմոնիկները։ Կատարված հաշվարկների արդյունքում, նախագծված արագացուցիչը հնարավորություն է տալիս պահպանել և էֆեկտիվ արագացնել փնջի մասնիկների 96%-ից ավելին, ունենալով 0.5%-ից փոքր էներգիական սփովածք և լայնական էմիտանս՝ 1-մմ-մոադ -ից փոքր։

# PARTICLE BUNCHING AND ACCELERATION IN THE LINEAR ACCELERATOR OF CANDLE

#### B.A. GRIGORYAN

The electron beam formation at the gun exit taking into account the space charge effects is presented. The bunching system operating at two harmonics of 500 MHz frequency structure is suggested. Two standing wave bunchers perform the beam pre-bunching. Third traveling wave buncher at 3 GHz performs the final bunching and acceleration of the beam. The simulation of the particles tracking through the accelerator structure starting from the electron gun up to 100 MeV final energy is done. The bunching system allows the capture of more than 96% of particles and efficient acceleration of the electron beam with 0.5% energy spread and transverse emittance less than 1-mm-mrad at the energy of 100 MeV.