

10

## Компенсация частотного рассогласования в многопучковых схемах кильватерного ускорения

© А.М. Альтмарк, А.Д. Канарейкин

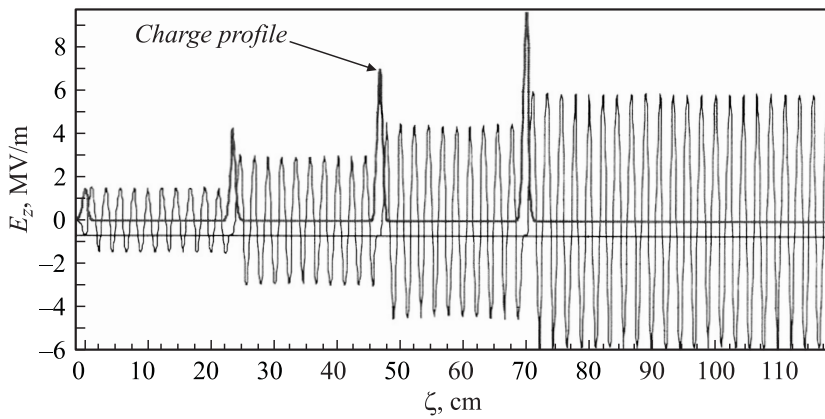
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
E-mail: aaltmark@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 сентября 2020 г.

Кильватерная схема ускорения электронов является эффективным способом создания высоких ускоряющих градиентов как в структурах с диэлектрическим заполнением, так и в плазме. Исследовано влияние погрешности построения многопучковой схемы кильватерного ускорения электронных сгустков на эффективность передачи энергии от ускоряющей последовательности к ускоряемому сгустку. Отклонение значения частоты кильватерного поля от расчетного значения выражается в рассогласовании позиций сгустков в ускоряющей последовательности и уменьшении коэффициента трансформации энергии. Предлагается компенсировать возникшее рассогласование путем корректировки расстояний между сгустками ускоряющей последовательности и тем самым повысить эффективность энергоотдачи. Приведен расчет для структуры с диэлектрическим заполнением на 13 GHz и параметров аргоннского кильватерного ускорителя (AWA).

Кильватерная схема ускорения в структурах подразумевает передачу энергии от ускоряющего сгустка к ускоряемому по мере их прохождения через волноведущую структуру [1]. Передача энергии осуществляется через электромагнитное поле излучения Вавилова–Черенкова (кильватерное поле), генерируемого в структуре ускоряющим сгустком. Существенный интерес в области новых методов ускорения сосредоточен на кильватерном ускорении в волноведущих структурах с диэлектрическим заполнением [1,2].

Эффективность ускорения при кильватерном ускорении в структурах оценивается двумя основными критериями: максимального ускоряющего поля  $E_z^+$  и коэффициента трансформации энергии  $R$  от ведущего сгустка к ускоряемому. Баланс этих двух базовых параметров опреде-



**Рис. 1.** Распределение ускоряющего поля внутри и за пределами RBT-последовательности сгустков (параметры из табл. 1), движущихся справа налево. По оси абсцисс откладывается расстояние между первым сгустком и точкой наблюдения. Сплошная горизонтальная линия показывает величину тормозящего поля  $E_z^-$ .

ляет критерии при выборе и оптимизации указанных ускорительных структур [3].

Коэффициент трансформации определяется как отношение максимальной энергии, которую приобретают частицы ускоряемого сгустка  $W_z^+$ , к максимальной энергии, теряемой частицами ускоряющего сгустка  $W_z^-$ :

$$R = \frac{W_z^+}{W_z^-} = \frac{qLE_z^+}{qLE_z^-} = \frac{E_z^+}{E_z^-},$$

где  $q$  — заряд частицы,  $L$  — расстояние, проходимое сгустками в волноводе,  $E_z^-$  — максимальное тормозящее поле внутри ускоряющего сгустка.

Согласно кильватерной теореме [3], если ускоряющее поле генерируется одиночным симметричным сгустком, то  $R$  не может превышать значения 2. Для конкретного примера из рис. 1 видно, что кильватерное поле позади первого (симметричного) сгустка отличается от максимального тормозящего поля внутри того же сгустка (горизонтальная сплошная линия) в 1.98 раза. Было показано теоретически [3], что

создание несимметричного внутреннего профиля заряда одиночного генераторного сгустка позволяет увеличить долю энергии, передаваемой ускоряемому сгустку (тем самым увеличить  $R$  и преодолеть предел 2). В то же время формирование сгустка длительностью 10–30 ps и зарядом в 10–100 pC, требуемого для реализации кильватерных методов ускорения, является крайне сложной задачей. Для решения этой проблемы в [4] был предложен способ увеличения параметра  $R$  с помощью последовательности коротких электронных пучков с профилированием заряда всей последовательности, а не единичного сгустка. Каждый сгусток имеет симметричное распределение заряда, притом что сама последовательность дает линейно нарастающий зарядовый профиль (RBT — Ramped Bunch Train) [5]. Из рис. 1 видно, что с увеличением порядкового номера сгустка в ускоряющей последовательности максимальное тормозящее поле внутри сгустка остается неизменным, а ускоряющий градиент растет от сгустка к сгустку. Этот подход позволил реализовать экспериментальный проект по повышению эффективности кильватерного ускорения и впервые экспериментально продемонстрировать  $R > 2$  [5,6].

Использование многосгустковой схемы ускорения, в свою очередь, связано с предъявлением жестких требований к позиционированию сгустков в ускоряющей последовательности. Для построения ускоряющей RBT-последовательности сгустков необходимо обеспечить согласование между частотой следования сгустков и частотой кильватерного поля так, чтобы на каждый сгусток последовательности действовало одинаковое тормозящее поле [7]. Частота рабочей  $TM_{01}$ -моды ускорительной структуры выбирается таким образом, чтобы на дистанции между двумя соседними сгустками укладывалось нечетное число полувольт кильватерного поля. Для рассматриваемой в этой работе ускорительной структуры с частотой следования сгустков 1.3 GHz обеспечивается дистанция между соседними сгустками  $10.5\lambda \cong 23$  cm (рис. 1), где  $\lambda = V/f$  — длина волны кильватерного поля, а  $f = 13.497$  GHz — частота кильватерного поля (частота  $TM_{01}$ -моды),  $V$  — скорость сгустка (в случае релятивистских сгустков мы полагаем  $V = c$ ). Если частота  $f$  отличается от расчетного значения  $f_0$ , то возникшее рассогласование приводит к уменьшению  $R$  и соответственно потере в эффективности многосгусткового кильватерного ускорения.

В данной работе рассмотрен способ компенсации такого частотного рассогласования путем подстройки межсгустковых расстояний на при-

мере последовательности, формируемой фотоинжектором АВА и проходящей через диэлектрическую волноведущую структуру с частотой 13.497 GHz.

Рассмотрим цилиндрический металлический волновод с диэлектрическим заполнением и вакуумированным каналом. Геометрические размеры волновода ( $R_c$ ,  $R_w$ ) и проницаемость диэлектрика  $\varepsilon$  имеют соответствующие технологические допуски ( $\Delta R_c$ ,  $\Delta R_w$ ,  $\Delta\varepsilon$ ):

$$R_c \in [R_{c0} - \Delta R_c, R_{c0} + \Delta R_c], \quad R_w \in [R_{w0} - \Delta R_w, R_{w0} + \Delta R_w],$$

$$\varepsilon \in [\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon, \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon],$$

где  $R_{c0}$ ,  $R_{w0}$ ,  $\varepsilon_0$  — базовые параметры волновода, соответствующие расчетной частоте кильватерного поля  $f_0$ , для которой в фотоинжекторе настроены дистанции между сгустками для максимального коэффициента трансформации энергии. Частота кильватерного поля  $f$  при этом локализована в некотором диапазоне:

$$f \in [f_1, f_2],$$

где нижняя частотная граница  $f_1$  относится к волноводу с параметрами:  $R_c = R_{c0} - \Delta R_c$ ,  $R_w = R_{w0} + \Delta R_w$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon$ , а верхняя частотная граница  $f_2$  — соответственно к волноводу с  $R_c = R_{c0} + \Delta R_c$ ,  $R_w = R_{w0} - \Delta R_w$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon$ .

Генерация последовательности сгустков в АВА осуществляется с частотой следования 1.3 GHz, определяющей дистанцию между сгустками  $\cong 23$  см. Формирование последовательности электронных сгустков осуществляется с помощью специального оптического делителя [2], преобразующего одиночный лазерный импульс в последовательность 4-лазерных импульсов с различной интенсивностью, которые попадают на фотоинжектор. Таким образом, последовательность лазерных импульсов определяет профиль заряда последовательности сгустков на выходе фотоинжектора, т.е. генерируются 4 различных по заряду сгустка. Первый сгусток имеет минимальный заряд, последний — максимальный заряд. Профиль зарядов в последовательности сгустков является линейным. Путем регулировки позиций зеркал в оптическом делителе можно в небольшом диапазоне ( $\Delta d = 0.2$  см) изменять расстояния между сгустками:  $d_{21} \in [d_{021} - \Delta d, d_{021} + \Delta d]$ ,  $d_{31} \in [d_{031} - \Delta d, d_{031} + \Delta d]$ ,  $d_{41} \in [d_{041} - \Delta d, d_{041} + \Delta d]$ , где  $d_{021}$ ,  $d_{031}$ ,  $d_{041}$  — базовые расстояния

**Таблица 1.** Результаты моделирования кильватерного ускорения RBT-последовательностью сгустков

Заряд сгустка	Продольная длина сгустка $\sigma$ , см	Позиция сгустка, см	Максимальное ускоряющее поле $E_z^+$ , MV/m	Коэффициент трансформации $R$
$Q_1 = 10$ пС	0.4	0	1.48	1.98
$Q_2 = 30$ пС		23.33	2.93	3.86
$Q_3 = 50$ пС		46.47	4.38	5.82
$Q_4 = 70$ пС		70.01	5.9	7.1

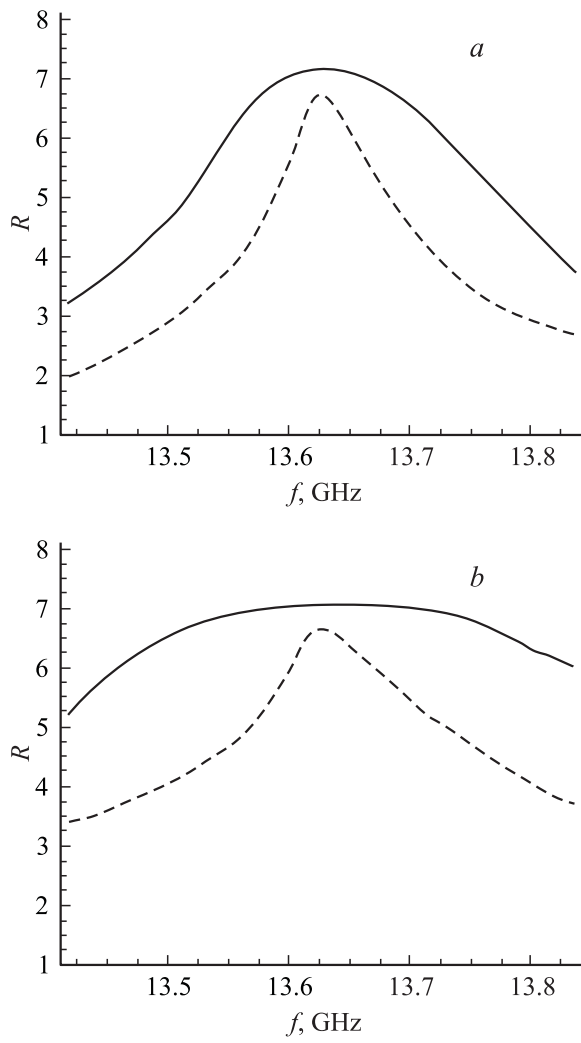
**Таблица 2.** Параметры диэлектрической ускорительной структуры с базовой частотой  $f = 13.497$  GHz

Обозначение	Величина	Допуски, $\mu\text{m}$
Радиус вакуумного канала $R_c$	0.499 см	до 10
Радиус керамической трубки $R_w$	0.6345 см	
Диэлектрическая проницаемость керамики $\varepsilon$	16.04	0.1

между вторым и первым, третьим и первым, четвертым и первым сгустками соответственно. Для компенсации частотного рассогласования  $f_0 - f$  необходимо найти оптимальные дистанции  $d_{21}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{41}$ , при которых  $R$  будет максимален.

Расчеты проводились для схемы ускорения, параметры которой представлены в табл. 1. Как показали измерения параметров диэлектрической ускорительной структуры (табл. 2), допуск на геометрические размеры волновода  $R_c$ ,  $R_w$  составляет 1–10  $\mu\text{m}$ , в то время как для диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  среднее значение отклонения от расчетного значения составляет 0.1–0.5 при  $\varepsilon \sim 6-16$ .

Кильватерное поле, изображенное на рис. 1, генерируется профилированной ускоряющей последовательностью из четырех сгустков, параметры которой представлены в табл. 1. Максимально возможное значение  $R$  для данной последовательности равно 7.1, соответствующее волноводу с параметрами  $R_{c0}$ ,  $R_{w0}$ ,  $\varepsilon_0$ , позициям сгустков  $d_{021}$ ,  $d_{031}$ ,  $d_{041}$  и расчетной частоте кильватерного поля  $f_0$ .



**Рис. 2.** Компенсация частотного рассогласования для RVT-последовательности из четырех сгустков (табл. 1): сплошная линия — после оптимизации КТ, пунктирная линия — без оптимизации КТ.

На рис. 2, *a* показана зависимость коэффициента трансформации  $R$  от частоты кильватерного поля  $f$ . Для сравнения пунктирной линией показана зависимость коэффициента трансформации  $R$  от частоты кильватерного поля без оптимизации расстояний между сгустками ( $d_{21} = d_{021}$ ,  $d_{31} = d_{031}$ ,  $d_{431} = d_{041}$ ). Из рис. 2, *a* видно, что можно поддерживать величину коэффициента трансформации больше 6 только при небольшом частотном рассогласовании  $f_0 - f$  (175 МГц). В случае максимального частотного рассогласования наибольшие значения  $R$ , которые могут быть достигнуты, равны 3.25 ( $f = f_1 = 13.3$  GHz) и 3.8 ( $f = f_2 = 13.7$  GHz). При этом наибольший диапазон регулировки соответствует  $d_{41}$  и равен  $2\Delta d$ .

Чтобы проиллюстрировать пути повышения эффективности компенсации частотного сдвига, расчеты проводились также и для различных значений базовых расстояний между сгустками и диапазонов их вариации  $\Delta d$ . При увеличении  $\Delta d$  от 0.2 до 0.3 см высокое значение  $R (> 6)$  можно поддерживать при частотном рассогласовании  $f_0 - f$ , не превышающем 225 МГц. Если же технически возможна реализация случая, когда расстояния между сгустками невелики ( $5.5\lambda$ ), то частотное рассогласование не вызывает заметного снижения  $R$  (рис. 2, *b*).

Из анализа зависимостей оптимальных расстояний от частоты следует, что с увеличением номера сгустка в последовательности диапазон регулировки соответствующего расстояния возрастает. Дистанция между первым и вторым сгустком варьируется в пределах  $\Delta d_{21} = 0.12$  см, между вторым и третьим —  $\Delta d_{31} = 0.21$  см, между первым и четвертым —  $\Delta d_{41} = 0.4$  см. Следовательно,  $R$  наиболее всего чувствителен к позиции второго сгустка. Позиция последнего сгустка наименее всего влияет на величину  $R$ . Другими словами, чем выше номер сгустка в ускоряющей последовательности, тем менее жесткие требования предъявляются к его позиционированию.

Таким образом, установлено, что при генерации последовательности из 4 и более сгустков точная позиция сгустков в последовательности существенно влияет на величину коэффициента трансформации и тем самым определяет эффективность отдачи энергии от ускоряющей последовательности к ускоряемому сгустку. Позиция второго сгустка в ускоряющем пучке является наиболее критичной, что и объяснимо физически, так как его фазовый вклад определяет оптимальное формирование ускоряющей последовательности следующих за ним сгустков.

## Список литературы

- [1] *Gai W., Schoessow P., Cole B.* // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2765.
- [2] *Power G., Conde M.E., Gai W., Kanareykin A.D.* // Phys. Rev. Sp. Topics–Accel. and Beams. 2000. V. 3. P. 1302.
- [3] *Vane K.L., Chen P., Wilson P.B.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. V. 32. P. 3524.
- [4] *Ваганян С.С., Лазиев Э.М., Цаканов В.М.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физич. 1990. Т. 15. В. 7. С. 30–36.
- [5] *Power J., Gai W., Kanareykin A.D.* // AIP Conf. Proc. 2001. V. 569. P. 605.
- [6] *Jing C., Kanareykin A., Power J., Conde M., Yusof Z., Zhoessow P., Gai W.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 144801-1.
- [7] *Шейнман И.Л., Канарейкин А.Д.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 8. С. 24–31.