

П. А. Бак, П. В. Логачев, Д. А. Малютин, А. А. Старостенко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
Email: D.A.Maljutin@inp.nsk.su

РЕГИСТРАЦИЯ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Описан метод наблюдения полей излучения генерируемых интенсивным сгустком в элементах вакуумной камеры ускорителя на основе пучкового датчика. Представлены результаты численного моделирования взаимодействия тестирующего пучка с полями излучения. Представлены результаты наблюдения полей излучения на инжекционном комплексе ВЭПП-5.

Ключевые слова: пучковый датчик, поля излучения, линейный ускоритель, диагностика, интенсивные пучки, ВЭПП-5.

Введение

Поля излучения, генерируемые интенсивными сгустками в ускоряющих структурах и в сложных элементах вакуумной камеры ускорителя, оказывают воздействие на тестирующий электронный пучок пучкового датчика. Пучковым датчиком в данном случае называется диагностический прибор [1], принцип действия которого основан на отклонении электронного пучка низкой энергии (тестирующего пучка) в электромагнитных полях интенсивных сгустков заряженных частиц. Поскольку вакуумная камера пучкового датчика через отверстия для входа и выхода тестирующего пучка электродинамически связана с вакуумной камерой ускорителя, то указанные выше поля излучения могут существенно влиять на распределение интенсивности тестирующего пучка в плоскости детектора. Этот эффект наблюдался экспериментально [1] на пучковом датчике линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5 [2]. Результаты эксперимента представлены данной работе.

Описание эксперимента и численное моделирование

В качестве детектирующей системы пучкового датчика здесь применялась сборка из

последовательно расположенных микроканальной пластины и люминофора, которые работали в импульсном режиме. Импульсы питающих напряжений микроканальной пластины и люминофора были точно синхронизованы с пролетом интенсивных электронных сгустков через область взаимодействия пучкового датчика. Тестирующий пучок с энергией 36 кэВ двигался через область взаимодействия перпендикулярно направлению движения исследуемых сгустков. (Общую схему пучкового датчика см. на с. 31.)

В данной серии экспериментов применялась быстрая горизонтальная развертка тестирующего пучка. Развертка производилась в плоскости, содержащей траектории движения исследуемых сгустков и тестирующего пучка. Подробное описание принципа работы пучкового датчика, а также технических деталей его реализации можно найти в работе [1].

Поля излучения, генерируемые короткими сгустками в ускоряющей структуре, свободно распространяются по вакуумной камере как ускорителя, так и пучкового датчика (рис. 1), и модулируют скорость электронов в тестирующем пучке. В итоге это приводит к соответствующей группировке тестирующего пучка и модуляции яркости его изображения на экране (рис. 2).

Такая модуляция начинает появляться через несколько наносекунд после пролета

интенсивных сгустков и наблюдается в течение последующих нескольких десятков наносекунд. Электромагнитное поле одной из высших мод ускоряющей структуры инжекционного комплекса ВЭПП-5 с частотой 8 714 МГц, заполняющее вакуумную камеру пучкового датчика, было рассчитано с помощью программы HFSS (High Frequency Structural Simulator) (см. рис. 1). Полученные таким образом значения полей использовались при моделировании движения тестирующего пучка в пучковом датчике. Результаты численного моделирования изображений, получаемых на экране прибора при наличии полей излучения, представлены на рис. 3. В моделировании, как и в реальном эксперименте, тестирующий пучок движется по оси вакуумной камеры, а его размер меняется в соответствии с оптической схемой и имеет следующие значения: на выходе электронной пушки диаметр око-

ло 0,4 мм, в линзе – около 3 мм и на детекторе – около 0,5 мм.

Моделирование проводилось для случая с линейной горизонтальной разверткой тестирующего пучка. На получившихся изображениях присутствует характерная петля от самого исследуемого сгустка. Амплитуда электромагнитного поля излучения увеличивается и составляет 0,01, 0,03 и 0,05 от величины максимального значения поля исследуемого сгустка соответственно. Энергия тестирующего пучка равнялась 36 кэВ. Электромагнитное поле высокой частоты заполняет вакуумную камеру пучкового датчика, создавая в ней стоячую волну, что приводит к характерной группировке тестирующего пучка в направлении его движения и соответственно к группировке изображения развертки пучка на экране прибора. Характерный пример изображения с экрана прибора, сформированного под действием полей излучения, представлен на рис. 4.

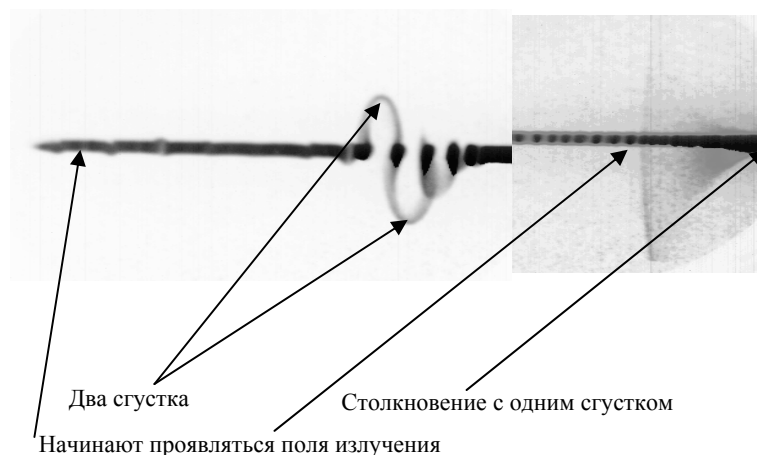


Рис. 1. Примеры наблюдения полей излучения (негатив)

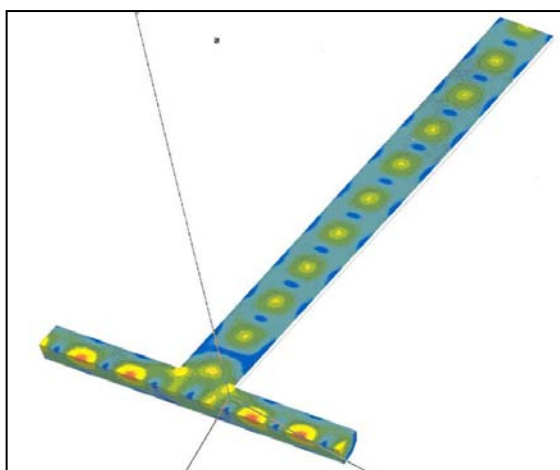


Рис. 2. Структура электрического поля, возникающая в вакуумной камере пучкового датчика инжекционного комплекса ВЭПП-5 после пролета последовательности интенсивных сгустков

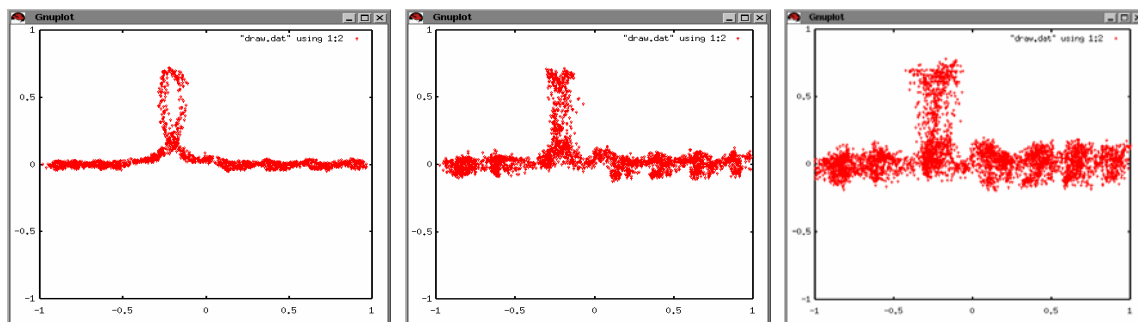


Рис. 3. Влияние полей излучения на итоговое изображение на экране прибора. На изображениях по порядку сверху вниз увеличивается амплитуда поля излучения и составляет 0,01, 0,03 и 0,05 от максимального значения поля исследуемого сгустка (60 кВ/см) соответственно. Энергия тестирующего пучка – 36 кэВ. Для сравнения на всех рисунках приведена характерная петля от самого исследуемого сгустка (включена горизонтальная развертка тестирующего пучка). Область изображения 2×2 см. Геометрия прибора соответствует пучковому датчику линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5

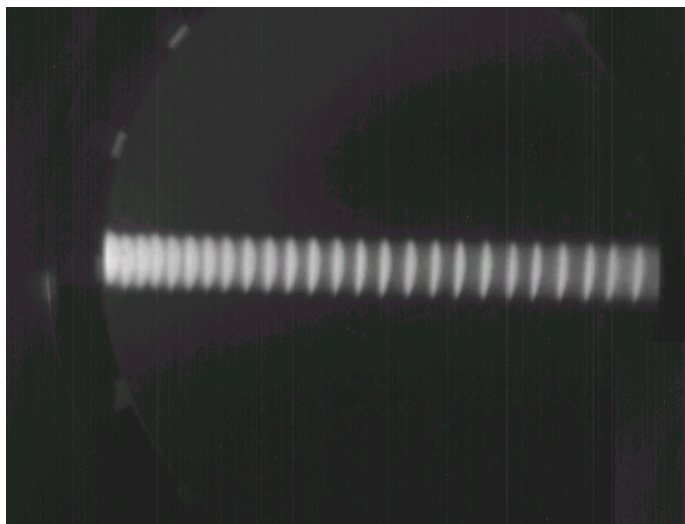


Рис. 4. Пример влияния полей излучения на тестирующий пучок. Изображение с экрана пучкового датчика линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5. Энергия тестирующего пучка 36 кэВ. Неравномерность расположения сгустков связана с неравномерностью быстрой горизонтальной развертки

В данном случае численное моделирование позволяет определить влияние электромагнитных полей определенного типа, заполняющих вакуумную камеру прибора, на итоговое изображение. Сравнение изображений с экрана прибора с изображениями, полученными в результате численного моделирования, позволяет в определенной степени судить о структуре электромагнитных полей, заполняющих вакуумную камеру прибора.

Экспериментальные результаты

На рис. 5 приведено изображение тестирующего пучка, образующееся при взаимо-

действии с последовательностью сгустков, следующих с частотой 2 855 МГц, что и определяет временной масштаб на экране (время между сгустками составляет 350 пс). На рис. 6 представлен график, полученный из рис. 5 путем сложения чисел в столбцах матрицы яркости изображения. Таким образом, восстанавливаем скорость развертки тестирующего пучка на экране и вычисляем временной масштаб, который потребуется для измерения полей излучения.

Последовательность интенсивных сгустков генерирует в ускоряющей структуре электромагнитные волны на частотах более высоких, чем основная (основная частота структуры – 2 855 МГц). На рис. 7 приведе-

но изображение с пучкового датчика, настроенного по времени сразу после пролета сгустков. На рис. 8 фактически представлена зависимость яркости изображения от времени, рассчитанная для рис. 7 путем сложения чисел в столбцах матрицы яркости изображения. Спектральная характеристика этой зависимости представлена на рис. 9 (сплошная кривая). В данном случае наблюдалась известная высшая мода ускоряющей структуры с частотой 8 714 МГц [3]. Пунктирной кривой на рис. 9 представлен Фурье-спектр зависимости интенсивно-

сти тестирующего пучка от времени, соответствующей рис. 6. Здесь, как и должно быть, пик соответствует основной частоте ускоряющей структуры.

Важно отметить, что описанный выше эффект уверенно наблюдается благодаря удачному расположению пучкового датчика в ускоряющей системе линака, а также благодаря широким возможностям системы формирования и группировки электронного пучка, реализованным на данном ускорителе [2].

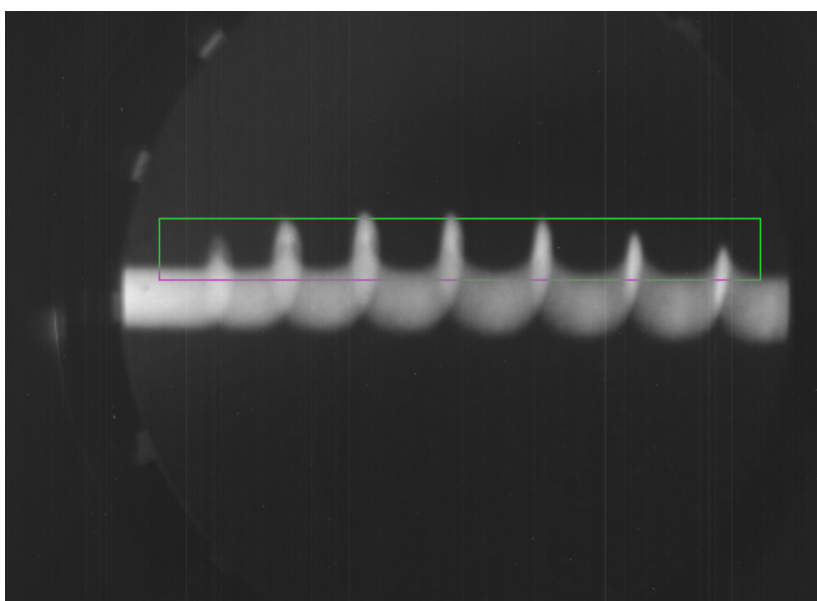


Рис. 5. Вид тестирующего пучка на экране датчика (каждый пик соответствует сгустку в ускорителе), расстояние между пиками точно соответствует одному периоду ВЧ ускоряющей структуры (350 пс). Рамкой отмечена область, в которой производилось суммирование яркости изображения в вертикальном направлении (по столбцам матрицы яркости изображения)

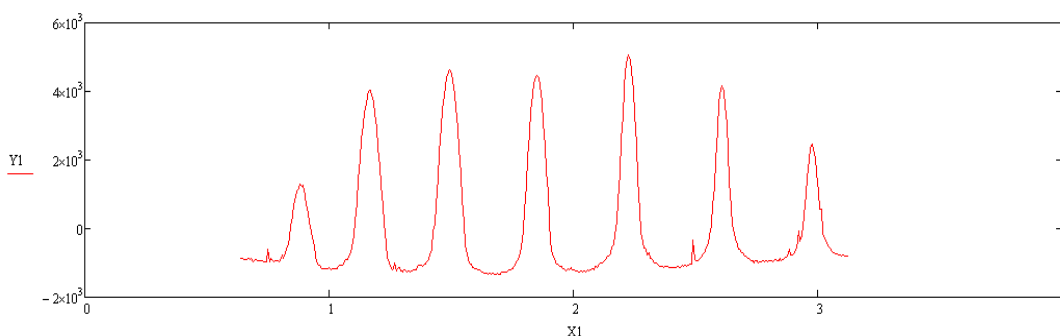


Рис. 6. Зависимость суммы яркостей в столбце от номера столбца (горизонтальной координаты на экране прибора) для части матрицы яркости изображения (заклучена в рамку), представленной на рис. 5

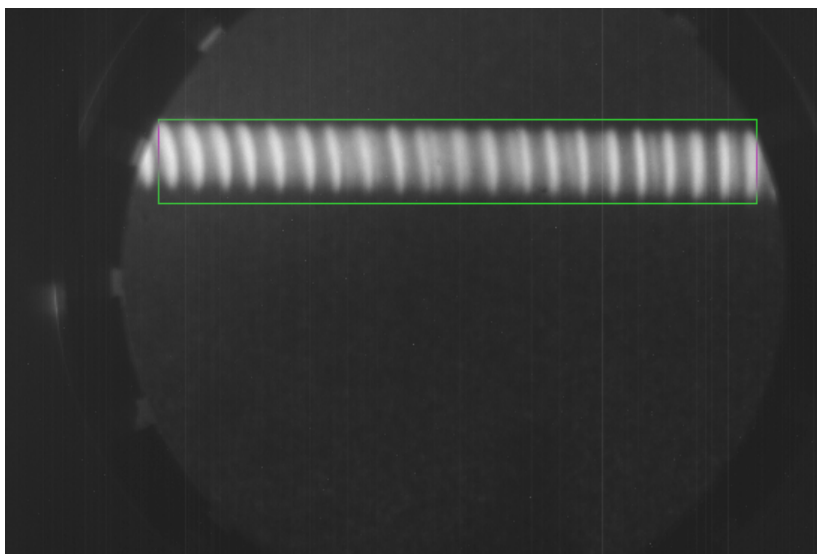


Рис. 7. Поля излучения, генерируемые в ускоряющей структуре: изображение с экрана пучкового датчика (тестирующий пучок сгруппирован полями излучения). Рамкой отмечена область, в которой производилось суммирование яркости изображения в вертикальном направлении (по столбцам матрицы яркости изображения)

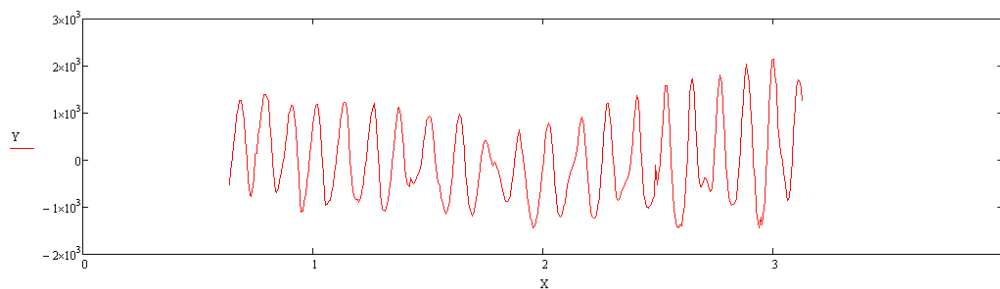


Рис. 8. Зависимость суммы яркостей в столбце от номера столбца (горизонтальной координаты на экране прибора) для части матрицы яркости изображения (заклучена в рамку), представленной на рис. 7

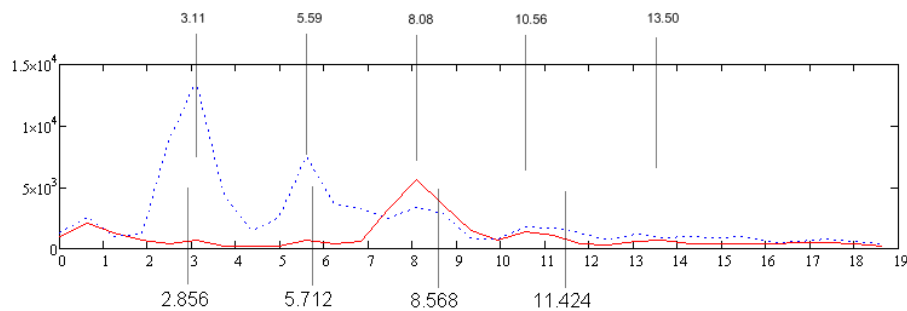


Рис. 9. Фурье-спектр зависимости интенсивности тестирующего пучка от времени, соответствующей рис. 6 (пунктирная кривая) и рис. 8 (сплошная кривая). По оси X отложена частота, ГГц

Заключение

Ряд высших мод электромагнитных колебаний, характерных для ускоряющих структур S-диапазона (3 ГГц), не являются аксиально-симметричными. Именно эти моды, как правило, ответственны за искажение формы сгустка и увеличение его поперечного фазового объема. Такие моды эффективно возбуждаются интенсивным сгустком, траектория которого смещена относительно оси ускоряющей структуры. Минимизация амплитуды колебаний таких мод путем смещения траектории движения интенсивного пучка к оси ускоряющей структуры позволяет существенно улучшить качество пучка, состоящего из нескольких сгустков. В данном случае пучковый датчик может быть использован для указанной выше минимизации интенсивности высших мод, возбуждаемых интенсивным пучком в ускоряющей структуре. Это, в свою очередь,

приведет к улучшению качества пучка за счет уменьшения его поперечного фазового объема.

Список литературы

1. *Логачев П. В., Малютин Д. А., Старостенко А. А.* Применение электронного пучка низкой энергии как средства неразрушающей диагностики интенсивных пучков заряженных частиц // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 5–33.
2. *Астрелина К. В., Блинов М. Ф., Всевожская Т. А., Диканский Н. С., Логачев П. В. и др.* Получение интенсивных позитронных пучков на инжекционном комплексе ВЭПП-5 // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. С. 94–114.
3. *Бурштейн Э. Л., Воскресенский Г. В.* Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками. М.: Атомиздат, 1970.

Материал поступил в редколлегию 16.10.2008

P. A. Bak, P. V. Logatchov, D. A. Malyutin, A. A. Starostenko

ELECTRON BUNCHES WAKE FIELDS OBSERVATION ON VEPP-5 LINEAR ACCELERATOR

Method for observation of wake fields generated by intensive bunch in vacuum chamber is described. Simulation results for electron beam interaction with wake fields are presented. Some observation results of wake fields at VEPP-5 are presented.

Keywords: electron beam probe, electron beam diagnostic, wake fields, linear accelerator, linac, diagnostic, high intensity bunch, VEPP-5.