

Особенности измерения фазовых спектров пучков ионов высокой интенсивности

В.А. Моисеев, А.В. Фещенко

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Анализаторы фазового спектра с поперечной модуляцией вторичных низкоэнергетических электронов находят широкое применение для исследования микро-структуры пучков ускоренных ионов [1]. Принцип действия анализаторов основан на когерентном преобразовании временной микроструктуры исследуемого пучка в пространственную структуру вторичных низкоэнергетических электронов путем поперечной модуляции по импульсу отклоняющим ВЧ-полем, синфазным с полем в ускорителе. Схема анализатора показана на рис. 1. В настоящее время существуют три разновидности детекторов рассматриваемого типа: анализатор фазового спектра (Bunch Shape Monitor – BSM); анализатор фазового спектра, позволяющий дополнительно измерять среднюю скорость пучка фазопролетным способом за счет продольного перемещения детектора (Bunch Length and Velocity Detector – BLVD); измеритель трехмерного распределения заряда в сгустках (3D-BSM). В последнем приборе дополнительно имеется коллиматор 9, перемещаемый по координате y , а в качестве детектора электронов используется многоканальный коллектор.

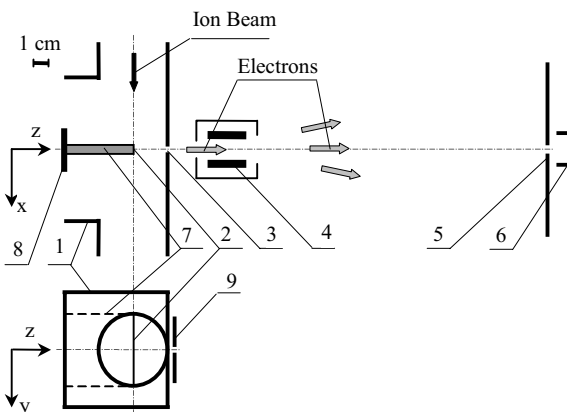


Рис. 1 Схема анализатора фазового спектра (1 – камера детектора, 2 – мишень, 3 – входной коллиматор, 4 – дефлектор-линза, 5 – выходной коллиматор, 6 – коллектор электронов, 7 – держатели мишени, 8 – пластина, 9 – подвижный коллиматор).

Фазовое разрешение указанных устройств обычно составляет величину около 1° на частотах сотни мегагерц. Одним из факторов, влияющих на фазовое разрешение, является собственное поле анализируемого пучка. Оценка влияния собственных полей исследуемого пучка для упрощенных моделей проводилась ранее [2, 3]. В настоящей работе расчет полей сгустков производится для граничных условий, близких к реальной трехмерной геометрии существующих детекторов (рис.1), а движение электронов рассчитывается во всем электронно–оптическом канале анализатора от мишени 2 до плоскости выходного коллиматора 5. Так же оцениваются искажения напряжения на мишени за счет токов, наводимых в мишени пучком, и за счет токов, протекающих в мишени вследствие эмиссии электронов. При этом используется модель длинной линии.

Описание разработанной модели и методика учета погрешностей приведены в работе [4]. Влияние пространственного заряда сводится к ухудшению фазового разрешения $\Delta\varphi$ и появлению ошибки отсчета фазы $\delta\varphi$, а также к смещению электронов по координате y . В настоящей работе представлены результаты моделирования и экспериментальных наблюдений. Расчеты проводятся для пучков с различными параметрами, однако основное внимание уделено эффектам, происходящим в детекторах, установленных на ускорителе Linac-2 CERN, при токах пучка более 150 мА.

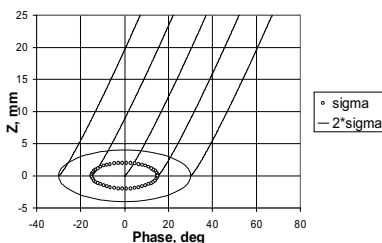


Рис. 2. Траектории движения электронов от мишени до плоскости коллиматора 3 в системе покоя сгустка.

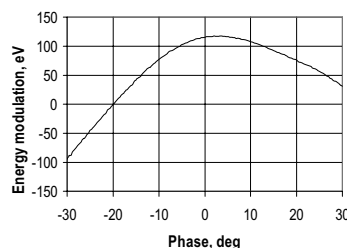


Рис. 3. Отклонение энергии электронов в плоскости коллиматора 3.

Для пояснения происходящих процессов на рис. 2 показан сгусток анализируемого пучка и траектории движения электронов, выбитых из мишени в различных фазах φ_b , в системе сгустка. Параметры сгустка ($\sigma_z = 2$ мм, $\sigma_y = 3,5$ мм и $\sigma_\varphi = 15^\circ$) примерно соответствуют типичным параметрам, наблюдаемым на выходе ускорителя Linac-2 CERN с помощью измерителя 3D-BSM. При потенциале мишени – 10 кВ время движения электрона от мишени до коллиматора 3

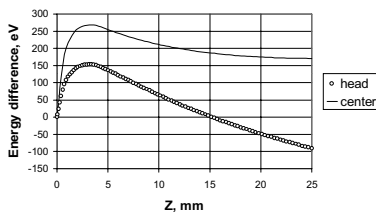


Рис. 4. Разность энергии электронов при наличии и отсутствии пространственного заряда вдоль траектории от мишени до коллиматора 3.

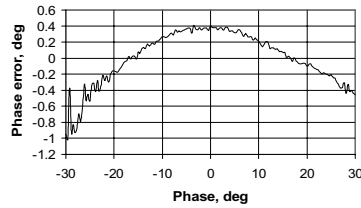


Рис. 6. Изменение ошибки отчета фазы вдоль сгустка.

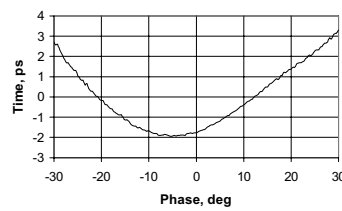


Рис. 5. Модуляция времени пролета электронов от мишени до коллиматора 3.

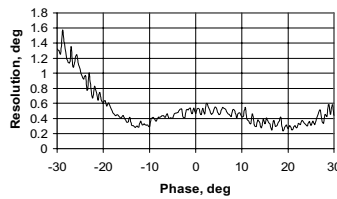


Рис. 7. Изменение фазового разрешения вдоль сгустка.

действует дополнительное ускоряющее поле. За пределами сгустка эффект тормозящий. Суммарный эффект зависит от фазы φ_b .

На рис. 5 показана зависимость времени пролета электронов от мишени до коллиматора, на рис. 6 – ошибки отсчета фазы $\delta\varphi$, а на рис. 7 – фазового разрешения $\Delta\varphi$ от φ_b . Поведение $\Delta\varphi(\varphi_b)$ меняется в зависимости от фокусирующего потенциала. В данном случае выбран потенциал, при котором получается минимальный размер сфокусированного пучка, усредненный по всему сгустку, при нулевом отклоняющем поле, который находится экспериментально и устанавливается при настройке детектора. Погрешности $\Delta\varphi$

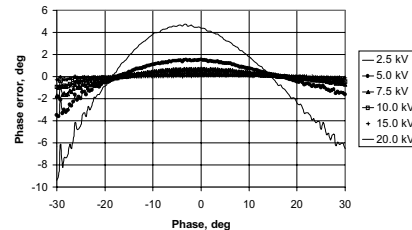
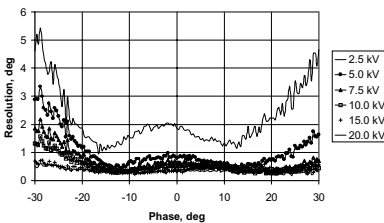


Рис. 8. Изменение фазового разрешения и ошибки отсчета фазы вдоль сгустка при различных напряжениях на мишени.

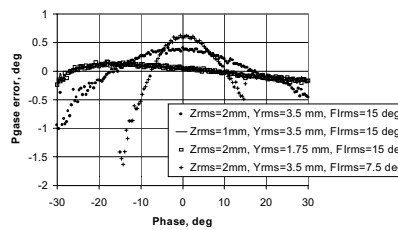
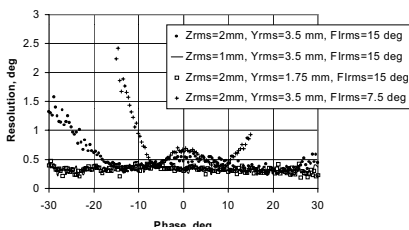


Рис. 9 Изменение фазового разрешения и ошибки отсчета фазы вдоль сгустка для различных размеров сгустков

Данный эффект может проявляться по-разному при различных соотношениях между потенциалом мишени, размерами сгустков, геометрией и требует специального рассмотрения для каждого конкретного случая.

На рис. 10 приведены зависимости $\Delta W(\varphi_b)$, $\Delta\varphi(\varphi_b)$ и $\delta\varphi(\varphi_b)$ для пучков с параметрами, типичными для некоторых ускорителей, на которых проводились измерения фазовых спектров. Кривая “INR” со-

составляет примерно $5,1 \cdot 10^{-9}$ сек или около 37° на частоте 200 МГц. При указанных параметрах вторичный электрон взаимодействует с полями только одного сгустка анализируемого пучка.

На рис. 3 показана модуляция энергии электронов в плоскости коллиматора 3, вылетевших из мишени в различных фазах φ_b , возникающая в результате

взаимодействия с полем сгустка, а на рис. 4 – разность энергий при наличии и отсутствии пространственного заряда в зависимости от пройденного расстояния для двух электронов, соответствующих “голове” и центру сгустка.

Вследствие экранирующего действия мишени влияние заряда, находящегося с ее обратной стороны (на рис. 1 слева от мишени), уменьшается. Поэтому вблизи мишени на вылетевший электрон

погрешности $\Delta\varphi$ и $\delta\varphi$ существенно зависят от потенциала мишени (рис.8) и уменьшаются при его увеличении.

На рис. 9 показано поведение зависимостей $\Delta\varphi(\varphi_b)$ и $\delta\varphi(\varphi_b)$ при различных среднеквадратичных размерах исследуемого пучка σ_z , σ_y

и σ_φ . Уменьшение фазовой протяженности сгустков приводит к увеличению погрешностей. При уменьшении же поперечных размеров погрешности наоборот уменьшаются, поскольку сокращается область пространства, где сконцентрировано основное поле пучка, и интегральное воздействие на вторичные электроны уменьшается.

ответствует выходу начальной части (100 МэВ) линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН, “DESY” – выходу Linac-3 DESY, “SSC” – выход RFQ SSC. Влияние пространственного заряда на фазовое разрешение в указанных случаях практически незаметно.

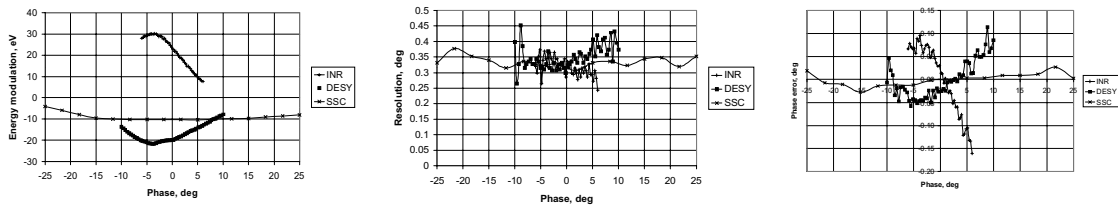


Рис. 10. Поведение энергии, фазового разрешения и ошибки отчета фазы для некоторых ускорителей.

На рис. 11 для детектора 3D-BSM показано изменение положения пучка в плоскости коллиматора 5 по координате y вследствие действия пространственного заряда в зависимости от φ_b для различных начальных точек y_0 на мишени.

Хотя в разработанной модели [4] и заложена возможность учета изменения потенциала границ во времени, однако, ввиду сложности происходящих при пролете сгустка процессов, корректный учет таких изменений представляет большие сложности, поэтому все расчеты проводились в предположении неизменности потенциала границ.

Результаты расчетов остаются справедливыми при условии, если такие возмущения малы. Для оценки возмущения потенциала мишени она рассматривается как передающая линия с распределенными параметрами [4]. На рис. 12 показано напряжение на мишени вследствие токов, протекающих в ней при пролете сгустка, для детектора 3D-BSM. Модуляция напряжения не превышает нескольких вольт, что значительно меньше как самого потенциала мишени, так и величины $\Delta W/e$, где ΔW – модуляция энергии электронов. Модель длинной линии также позволяет найти напряжение на мишени, возникающее вследствие эмиссии вторичных электронов. Проведенные расчеты показали, что это напряжение пренебрежимо.

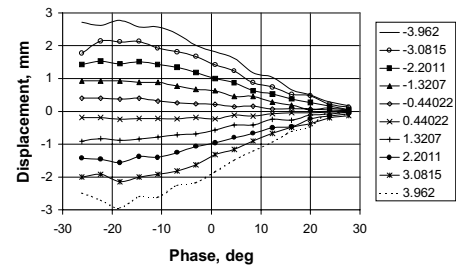


Рис. 11. Смещение электронов по координате y вследствие действия пространственного заряда.

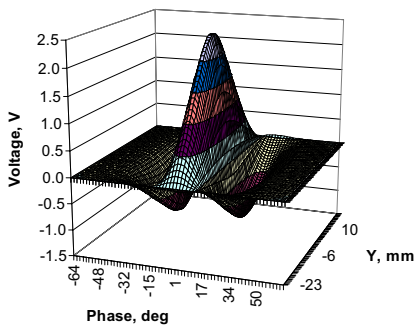


Рис. 12. Искажение напряжения на мишени.

Детектор	ITBSM-1				ITBSM-2			
	2,5	5,0	7,5	10,0	2,5	5,0	7,5	10,0
U_{targ} , кВ	2,5	5,0	7,5	10,0	2,5	5,0	7,5	10,0
$\Delta X_{0,5}$, мм	3,8	1,9	1,7	1,3	3,8	1,9	1,3	1,0

Экспериментальная проверка рассматриваемых эффектов проводилась в детекторах ITBSM-1, ITBSM-2 и 3D-BSM, установленных на ускорителе Linac-2 CERN после первого (10 МэВ), второго (30 МэВ) и третьего (50 МэВ) ускоряющих резонаторов при токах пучка более 150 мА. При этом наблюдалась фокусировка вторичных электронов в плоскости 5 при отключенном отклоняющем ВЧ-поле и проводились измерения формы сгустков при различных потенциалах мишени. Наибольшие искажения формы наблюдались для детектора ITBSM-2, где продольные размеры сгустка наименьшие. В таблице приведены размеры сфокусированного пучка на полувысоте для детекторов ITBSM-1 и ITBSM-2, а на рис. 13 – гистограммы сфокусированного пучка электронов для 3D-BSM при разных потенциалах мишени. На рис. 14 приведены результаты многократных измерений фазового спектра с помощью детектора ITBSM-2 для разных потенциалов мишени. Хотя при уменьшении потенциала и происходит ухудшение фокусировки вторичных электронов, а, следовательно, и ухудшение фазового разрешения, однако даже при снижении напряжения на мишени до 2,5 кВ величина разрешения остается достаточной для передачи резких изменений в форме фазового спектра. Изменение же самой формы измеренной кривой подтверждает существование заметной ошибки отчета фазы $\delta\varphi$.

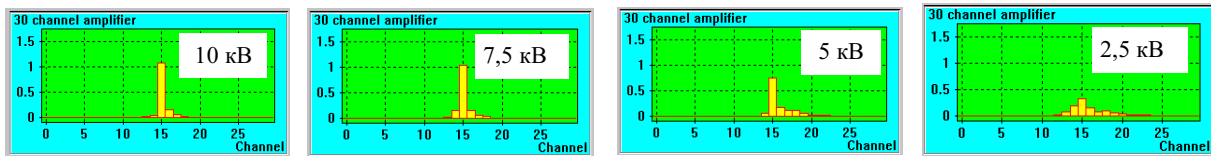


Рис. 13. Гистограммы сигналов с многоканального измерителя тока электронов детектора 3D-BSM при различных потенциалах мишени.

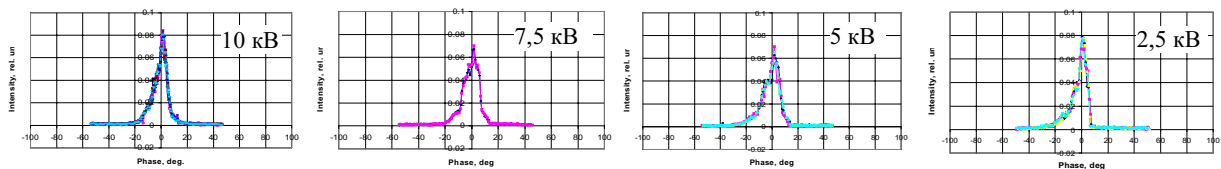


Рис. 14. Результаты измерений фазового спектра для разных потенциалов мишени.

Заключение

При измерении формы сгустков пучков высокой интенсивности эффекты пространственного заряда оказывают заметное влияние на результаты измерений. Может происходить ухудшение фазового разрешения, приводящее к сглаживанию измеренной функции по сравнению с реальным распределением, искажение формы измеренной кривой, а также смещение пучка параллельно мишени. Указанные эффекты сложным образом зависят от характеристик пучка и параметров детектора. Наиболее простым способом уменьшения погрешностей является повышение напряжения на мишени. Эти погрешности, однако, невелики и даже пренебрежимы для пучков большинства существующих ускорителей ионов.

Литература

1. С.К. Есин, П.Н. Остроумов, А.В. Фещенко. Разработка и изготовление детекторов продольных характеристик ускоренных пучков ионов. Вопросы Атомной Науки и Техники, Сер. Ядерно-физические исследования, Вып. 4,5 (31,32), Харьков. 1997, С. 67-69.
2. В.А. Воронцов, А.М. Тронь. Влияние собственного поля ускоренного пучка заряженных частиц на разрешение вторично-электронного измерителя фазового спектра. Труды X всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986г., т.1, С. 452-455.
3. A. Tron, I. Merinov. Space Charge Effect in Secondary Electron Monitors. Proc. of the 1997 PAC, Vancouver, 1997, V.2, pp. 2247-2049.
4. A.V. Feschenko, V.A. Moiseev. Space Charge Effects in Bunch Shape Monitors. Proc. of the XX Int. Linac. Conf. Linac2000, Monterey, Ca, August 21-25 (в печати).