

**П. А. Бак, Д. Ю. Болховитянов, А. А. Корепанов, П. В. Логачев,  
Д. А. Малютин, А. А. Старостенко, А. С. Цыганов**

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.ru

## **ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНЫЙ СГУСТОК МЕЖДУНАРОДНОГО ЛИНЕЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА**

Представлен прибор, предназначенный для измерения угла разворота оси интенсивного сгустка относительно направления его поступательного движения в линейном коллайдере. Описаны принцип действия пучкового датчика и методика измерения угла разворота оси интенсивного сгустка относительно направления его поступательного движения. Представлены результаты моделирования взаимодействия тестирующего пучка с развернутым релятивистским сгустком. Определены основные составляющие ошибки измерения угла разворота оси сгустка.

*Ключевые слова:* пучковый датчик, поля излучения, международный линейный коллайдер, диагностика, интенсивные пучки.

### **Введение**

Разработка новых методов неразрушающей диагностики интенсивных пучков электронов и позитронов сегодня особенно актуальна в связи с проведением современных экспериментов по физике элементарных частиц и физике высоких энергий, а также в связи с появлением установок нового поколения для работы с синхротронным излучением. Эти методы должны, во-первых, не ухудшать качества исследуемого пучка, во-вторых, работать при значительных плотностях мощности в исследуемом пучке (до  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>) и, в-третьих, быть чувствительными к его внутренней структуре.

Неразрушающие методы диагностики интенсивных пучков основаны на измерении электромагнитных полей, создаваемых заряженными частицами интенсивного пучка. Такие методы используют электромагнитное взаимодействие исследуемого пучка с разнообразными «зондирующими элементами», такими как вакуумная камера ускорителя, газовый поток [1], движущийся поперек диагностируемого пучка, внешний электронный пучок [2] или луч мощного лазера. Для целей диагностики также воз-

можно использование синхротронного излучения, производимого пучком электронов, позитронов или протонов высокой энергии в поворотных магнитах [3; 4].

В данной работе рассмотрено одно из применений пучкового датчика – прибора, использующего внешний (тестирующий) электронный пучок в качестве зондирующего элемента [5; 6].

Пучковым датчиком называем устройство, основанное на использовании электронного пучка низкой энергии и предназначенное для измерения временного и пространственного распределения электромагнитного поля исследуемого сгустка [7–10].

К настоящему времени создано и проверено в работе на ускорителях в ИЯФ СО РАН три пучковых датчика: первый работал на накопителе ВЭПП-3, второй – в составе линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5, третий – на коллайдере ВЭПП-4М. Четвертый прибор создан для измерения угла разворота оси интенсивного сгустка относительно направления поступательного движения этого сгустка [11]. Данный прибор проходит сейчас испытания на стенде в ИЯФ СО РАН, далее планируется его использование на установ-

ке ATF-2 (Япония), которая способна формировать электронные пучки, близкие по параметрам к пучку международного линейного коллайдера.

### Описание установки

Конкретная конструкция пучкового датчика во многом зависит от приложения, однако все такие конструкции имеют схожие элементы. Каждый датчик состоит из электронной пушки, отклоняющей и фокусирующей системы, системы магнитных коррекций, детектирующей системы, системы управления и синхронизации и системы питания.

Общая схема пучкового датчика представлена на рис. 1. Источником тестирующего пучка является триодная пушка с плоским катодом, имеющим диаметр в несколько миллиметров. Ускоряющее напряжение на пушке регулируется в пределах 30–200 кВ. Эмиссионная способность катода должна обеспечивать максимальную плотность тока на уровне  $3 \text{ А/см}^2$ . Тип и материал катода могут меняться в зависимости от задачи и вакуумных условий в конкретной системе.

Вырезающая диафрагма, расположенная за анодным отверстием, позволяет значительно уменьшить фазовый объем тестирующего пучка, что обеспечивает минимальный размер тестирующего пучка на экране детектора (ширина на полувысоте) не более 0,5 мм во всем диапазоне ускоряющих напряжений.

Для фокусировки пучка с минимальным уровнем aberrаций используется бронированная магнитная линза с апертурой 50 мм и максимальным значением магнитного поля

на оси 500 Гс. Линза располагается приблизительно посередине между пушкой и детектором, чтобы обеспечить минимальный размер пучка на детекторе. Между пушкой и линзой расположен двухкоординатный магнитный корректор, который состоит из двух косинусных обмоток и позволяет тестирующему пучку пройти вблизи магнитной оси фокусирующей линзы. Такое прохождение дает минимальное значение сферической aberrации приобретаемой тестирующим пучком в фокусирующей линзе.

Непосредственно за фокусирующей магнитной линзой располагается устройство горизонтальной развертки, которое представляет собой две симметрично расположенные параллельные пластины. Создаваемое в зазоре между пластинами электрическое поле должно быть достаточным для значительного отклонения тестирующего пучка. За устройством развертки следует область взаимодействия пучков, которая в простейшем случае может быть выполнена в виде обычного креста из двух труб, однако в зависимости от задачи этот узел может сильно усложниться.

За областью взаимодействия следует пролетный промежуток, на протяжении которого углы, полученные тестирующими электронами в области взаимодействия, превращаются в координаты поперечного смещения на экране детектора. В начале этого участка, сразу за областью взаимодействия, удобно поместить второй двухкоординатный магнитный корректор, аналогичный по конструкции первому. Его основной функцией будет корректировка положения изображения на экране детектора, необходимая во многих режимах работы прибора.

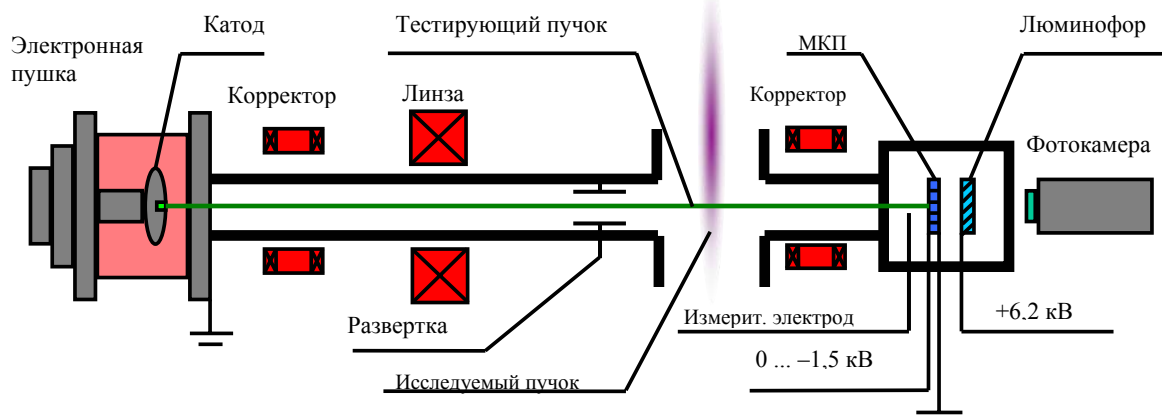


Рис. 1. Схема пучкового датчика (МКП – микроканальная пластина)

В конце пролетного промежутка располагается детектирующая система. В ее состав последовательно по направлению движения тестирующего пучка входят следующие элементы: защитный электрод специальной формы, микроканальная пластина, люминофор, оптическое вакуумное окно, объектив и цифровая фотокамера.

Главной особенностью работы не только детектирующей системы, но и всего прибора является импульсное срабатывание всех систем за исключением магнитной в строго определенных моменты времени. Временная диаграмма работы систем датчика определяется конкретным приложением и для представленной выше конфигурации выглядит следующим образом. Наиболее длительным из всех процессов является существование самого тестирующего пучка. Электронная пушка питается от импульсного высоковольтного источника (модулятора), который выполнен на основе высоковольтного трансформатора Тесла с рабочим напряжением амплитудой до 200 кВ [11].

В тот момент, когда напряжение на электронной пушке достигает максимального значения, происходит пролет исследуемого сгустка через область взаимодействия. К этому времени все напряжения в детекторе также должны выйти на номинальный уровень. Тестирующий электронный пучок на энергии от 30 до 200 кэВ попадает на входную поверхность микроканальной пластины (МКП), напряжение на входной поверхности которой в этот момент принимает максимальное отрицательное значение (до  $-2,0$  кВ). Выходная поверхность МКП при этом находится под потенциалом вакуумной камеры. Нужно отметить, что максимальное постоянное рабочее напряжения на МКП не превосходит 900 В, однако в импульсном режиме это напряжение может быть увеличено более чем вдвое.

Длительность импульса питания МКП должна удовлетворять следующим требованиям. Во-первых, она должна существенно превышать длительность исследуемого пучка и время пролета им области взаимодействия, во-вторых, эта длительность должна быть минимально возможной, чтобы минимизировать фоновую засветку МКП электронами и фотонами, не имеющими прямого отношения к тестирующему пучку. В описываемом случае импульс питания МКП представлял собой половину синусои-

ды с полной шириной 20 нс и регулируемой амплитудой в диапазоне 0–2 кВ. Импульс питания МКП является самым коротким из всех и играет роль быстрого электронного затвора в детектирующей системе. Как следует из сказанного, МКП играет роль не только быстрого затвора, но и усилителя изображения. Усиленный электронный поток на выходе МКП попадает в ускоряющий зазор между МКП и люминофором, где ускоряется до энергии 6 кэВ. Такое значение энергии необходимо для прохождения электронами тонкого (доли микрона) алюминиевого покрытия на входной поверхности люминофора (такое покрытие имеют все люминофоры высокого разрешения, оно препятствует размытию изображения за счет вторичных электронов, выбиваемых из люминофора падающим на него пучком). Импульс положительного напряжения на входной металлизированной поверхности люминофора имеет форму половины синуса и полную длину около 60 нс. Несмотря на относительно короткую длительность электронного тока на люминофор, высвечивание люминофора затягивается на огромное с точки зрения всех рассмотренных процессов время – несколько миллисекунд. Этот факт существенно отражается на конструкции прибора для ряда приложений.

Из-за большой разницы в длительности тока тестирующего пучка и длительности процесса взаимодействия пучков очень большой заряд может приходиться на вход МКП в то время, когда нет исследуемого пучка. Заряд приводит к деградации МКП и уменьшению ее коэффициента усиления в том месте, куда попадает пучок. Для предотвращения этого перед МКП располагается защитный электрод – именно он и принимает на себя тестирующий пучок в то время, когда исследуемый сгусток в области взаимодействия отсутствует. Этот же электрод используется для измерения импульсного значения тока тестирующего пучка.

Регистрация изображения на люминофоре производится при помощи объектива и цифровой фотокамеры, синхронизованной с работой пучкового датчика. Далее изображение передается в компьютер, где происходит его обработка.

Система синхронизации, кроме точной временной привязки всех импульсов друг к другу (не хуже 50 пс), должна также обеспечивать точную привязку всех импульсов к

фазе высокочастотных колебаний ускоряющего напряжения. Именно этой фазой определяется точное положение исследуемого сгустка в ускорителе в заданный момент времени.

На рис. 2 представлена схема пучкового датчика для международного коллайдера. Данный пучковый датчик состоит из следующих элементов: 1 – электронная пушка с высоковольтным трансформатором; 2 – фокусирующая линза; 3 и 5 – вакуумные клапаны; 4 – канал ускорителя; 6 – детектор тестирующего пучка. На рис. 3 – фотография этого прибора.

### Методика измерения угла наклона оси сгустка к направлению его поступательного движения

Одним из применений пучкового датчика является измерение угла разворота оси исследуемого сгустка к направлению его поступательного движения [9; 12]. Такой разворот может являться результатом воздействия на сгусток его собственных полей излучения.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования работы пучкового

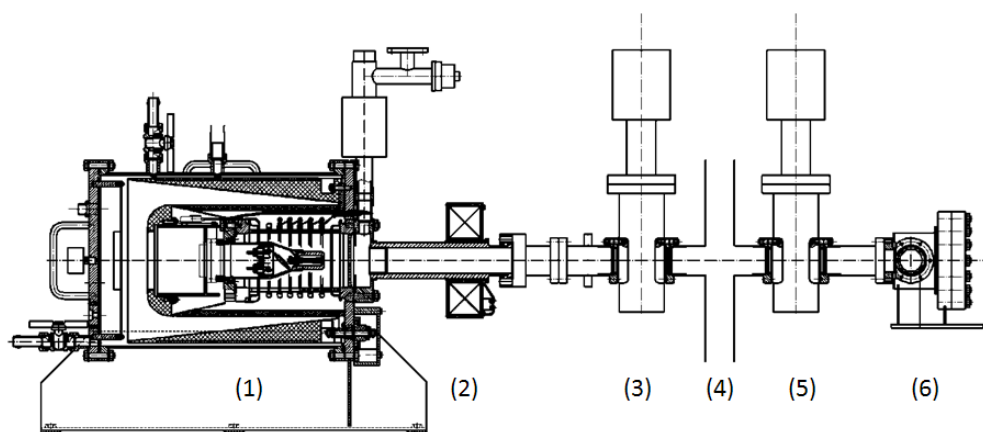


Рис. 2. Схема пучкового датчика для международного линейного коллайдера

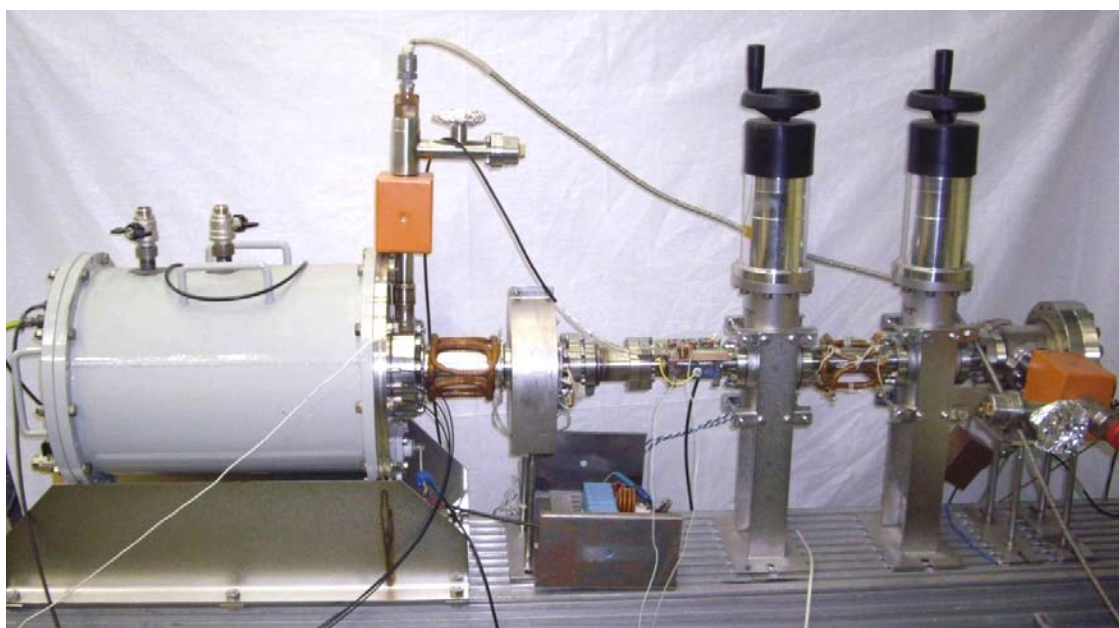


Рис. 3. Фотография пучкового датчика для международного коллайдера

датчика для следующих параметров исследуемого сгустка: длина сгустка – 0,2 мм, поперечный размер – 0,02 мм, число электронов в сгустке –  $7 \cdot 10^9$ . Здесь в качестве поперечных размеров и длины приводится ширина на полувысоте. Параметры тестирующего пучка: энергия – 200 кэВ, импульсный ток пучка – 2 мА, поперечный диаметр пучка на выходе из пушки составляет 2 мм, в области взаимодействия – 0,05 мм. Экран расположен в 2 см от точки пересечения траекторий пучков.

Для численного моделирования пучкового датчика была создана программа, рассчитывающая движение заряженных частиц в электромагнитных полях с заданной пространственной и временной конфигурацией. В качестве базового алгоритма при написании программы использовалась релятивистская разностная схема с дробным шагом, моделирующая движение заряженной частицы в заданном внешнем электромагнитном поле. На первой половине шага вычислялись приращения компонент импульса частицы в электрическом поле в расчете

на полный шаг. Затем для новых компонент импульса вычислялись компоненты скорости и соответствующие им приращения координат, но только за первую половину полного шага. Далее для нового расположения частицы вычислялись компоненты магнитного поля. По этим компонентам рассчитывались изменения компонент импульса при повороте в магнитном поле за полный шаг по времени. По этим новым компонентам импульса вычислялись новые компоненты скорости и в соответствии с ними производилось второе за цикл приращение координат, соответствующее второй половине шага по времени. Для новых значений координат вычислялись значения компонент электрического поля, далее цикл повторялся.

Для измерения угла разворота сгустка в направлении  $Y$  («голова» отклоняется вверх, а «хвост» вниз) итоговое изображение на экране прибора может быть поделено на четыре части: 1)  $x > 0, y > 0$ ; 2)  $x < 0, y > 0$ ; 3)  $x < 0, y < 0$ ; 4)  $x > 0, y < 0$ . На рис. 4 представлены четыре случая, соответствующие различным углам наклона сгустка; нарастающая асимметрия в яркости соответствующих частей изображения очевидна. Размер отображаемой области для каждого изображения составляет  $2,5 \times 2,5$  см.

Пусть  $N_1$  – число электронов в части экрана 1,  $N_2$  – в части 2 и т. д. Далее вычисляются следующие величины:

$$\Delta_1 = (N_4 - N_1) / (N_4 + N_1)$$

и

$$\Delta_2 = (N_2 - N_3) / (N_2 + N_3).$$

Зависимости этих величин от амплитуды смещения края сгустка  $\delta y$  (мкм) относительно его середины представлены на рис. 5.

Погрешность измерения угла разворота сгустка (не хуже 0,05 рад) так же, как и в предыдущем случае, в основном определяется интенсивностью тестирующего пучка и нестабильностью напряжений и токов в системах питания ускоряющих, фокусирующих и корректирующих элементов пучкового датчика.

### Ошибки измерения

Вклад в ошибку измерения угла наклона оси сгустка к направлению его поступательного движения дают перечисленные ниже факторы. Это – стабильность источников питания магнитной системы, стабильность

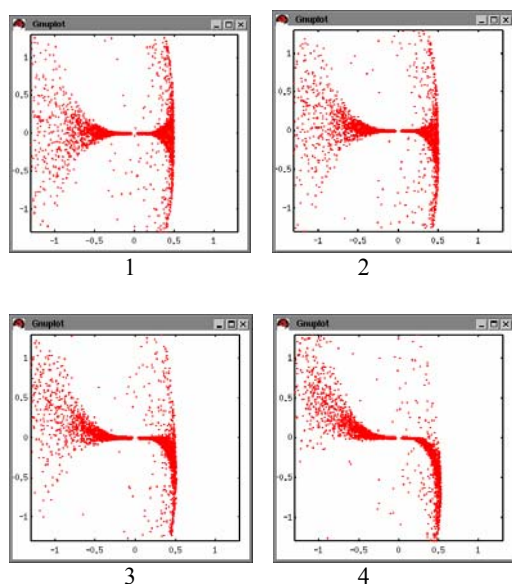


Рис. 4. Численное моделирование изображений на экране пучкового датчика для увеличивающегося (слева направо, сверху вниз) угла разворота пучка относительно направления его движения (в вертикальной плоскости). Размер каждого изображения по вертикали и горизонтали составляет 2,5 см. Амплитуда смещения края сгустка соответствует: 1 – 1 мкм; 2 – 4 мкм; 3 – 8 мкм; 4 – 16 мкм. Амплитуда смещения в 1 мкм означает, что «голова» сгустка (на +1 продольной сигме) смещена вверх на 1 мкм, а «хвост» соответственно (на –1 продольной сигме от центра) смещен на 1 мкм вниз

импульсного высокого напряжения на электронной пушке и конечное число электронов тестирующего пучка, взаимодействующих с исследуемым сгустком.

Число электронов тестирующего пучка  $N$ , взаимодействовавших с полями исследуемого сгустка, получается около 8 000 для тока тестирующего пучка величиной 2 мА и длительности исследуемого сгустка в 0,66 пс. Тогда вклад статистической ошибки в измерение величин

$$\Delta_1 = (N_4 - N_1) / (N_4 + N_1)$$

и

$$\Delta_2 = (N_2 - N_3) / (N_2 + N_3),$$

где  $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ , получается на уровне  $\frac{1}{\sqrt{N/2}} = 0,015$ . Здесь считается, что

детектирующая система способна регистрировать отдельные электроны и при этом работать в линейном режиме с точностью на уровне 2 %.

Нестабильность источников питания магнитной системы составляет 0,0001, что в результате приводит к смещению тестирующего пучка на уровне 1 мкм на экране (размер сфокусированного пучка на экране около 1 мм).

Вклад в ошибку измерения величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , связанный с нестабильностью высокого напряжения на электронной пушке от выстрела к выстрелу (0,0001) и на протяжении одного выстрела (0,005), существенно меньше приведенной выше статистической ошибки. С учетом собственных шумов детектора и стабильности токов в магнитной системе суммарную ошибку в измерении параметра асимметрии можно оценить на уровне 4 %.

### Заключение

Предложенный метод, являясь неразрушающим, позволяет в процессе работы ускорителя контролировать разворот оси сгустка относительно направления его поступательного движения. Такой разворот может быть связан с воздействием на сгусток полей излучения, генерируемых интенсивным пучком в ускоряющих структурах и высокочастотных элементах вакуумной камеры ускорителя. Влияние полей излучения приводит к росту фазового объема пучка, что ограничивает интенсивность пучка и увеличивает его поперечный размер. Представленный в данной работе способ измере-

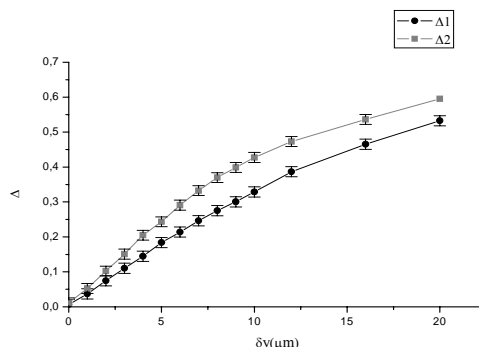


Рис. 5. Параметры асимметрии изображений в зависимости от амплитуды разворота сгустка, величина ошибки определяется статистикой  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ ,

$$N = 5\,000, \Delta_1 = (N_4 - N_1) / (N_4 + N_1) \\ \text{и } \Delta_2 = (N_2 - N_3) / (N_2 + N_3)$$

ния угла наклона оси сгустка к направлению его поступательного движения может быть полезен в борьбе с нежелательным влиянием на пучок полей излучения в основной ускоряющей структуре международного линейного коллайдера. Для экспериментальной проверки данной методики в ближайшем будущем планируются эксперименты на ATF-2 (национальная лаборатория КЕК, Япония). Указанный ускорительно-накопительный комплекс обеспечивает параметры пучка, близкие к номинальным для международного линейного коллайдера.

В настоящее время собран стенд пучкового датчика (см. рис. 3), получен электронный пучок с энергией 200 кэВ, ток пучка 1 мА, размер пучка на детекторе (МКП) порядка 1 мм.

### Список литературы

1. McGinnis D. P. The Design of Beam Pickup and Kickers // Beam Instrumentation Workshop-94. Vancouver. B.C. Canada, 1994. Vol. 333. P. 64–77.
2. Ross M., Frisch J., Hendrickson L. McCormick D., Vogel V., Hayano H., Urakawa J. Very High Resolution RF Cavity BPM // Particle Accelerator Conference. 2003. Vol. 4. P. 2545–2547.
3. Hofmann A. Physical phenomena used in beam observation // Isola di Capri. Italy, 1988. Vol. 343. P. 367–379.
4. Mitsuhashi T., Flanagan J., Hiramatsu S. Synchrotron Radiation Monitor for КЕК



B-Factory // Japan: KEK Proc., 2000. Vol. 99-24. P. 134–138.

5. Logatchov P. V., Bak P. A., Starostenko A. A., Dikansky N. S., Gousev E. A., Korabelnikov M. B., Shiyankov S. V. Non-destructive Single Pass Monitor of Longitudinal Charge Distribution. Электронный ресурс: <http://conference.kek.jp/heacc2001/pdf/p2new04.pdf>.

6. Logatchov P. V., Starostenko A. A. Non-Destructive Single-Pass Monitor of Longitudinal Charge Distribution // ICFA Beam Dynamics Newsletter. 1999. Vol. 20. P. 105–109.

7. Ngo M. T., Pasour J. A., Mai T. Nonperturbing Electron Beam Probe To Diagnose Charged-Particle Beams // Rev. Sci. Instrum. 1992. Vol. 63 (5). P. 3027–3039.

8. Старостенко А. А. Применение электронного пучка низкой энергии как средства неразрушающей диагностики интенсивных пучков заряженных частиц: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ин-т ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Новосибирск, 2006.

9. Логачев П. В., Малютин Д. А., Старостенко А. А. Применение электронного пучка низкой энергии как средства неразрушающей диагностики интенсивных пуч-

ков заряженных частиц // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 5–33.

10. Logatchov P. V. Beam quality control for linear colliders // 2000 Joint US-CERN-Japan-Russia accelerator school St. Petersburg and Moscow 1–14 July 2000. High quality beams. AIP Conference proceedings. Melville; N. Y., 2001. Vol. 592. P. 552–565.

11. Akimov V. E., Bulatov A. V., Kazarev I. V., Korepanov A. A., Maliutin D. A., Starostenko A. A., Pachkov A. A. Electron miniaccelerator for the charged particles beam nondestructive diagnostics // XX<sup>th</sup> Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC 2006). September 10–14, 2006. Novosibirsk, 2006.

12. Prabir K. R., Simon S. Yu., Hanestroza E. et al. Electron-beam diagnostic for space-charge measurement of an ion beam // Paper LBNL-56392, 2004. Электронный ресурс: <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/840875-vZ9y7z/native/840875.pdf>.

Материал поступил в редколлегию 16.10.2008

P. A. Bak, D. Yu. Bolkhovityanov, A. A. Korepanov, P. V. Logatchov,  
D. A. Malyutin, A. A. Starostenko, A. S. Tsyganov

#### INSTRUMENT FOR STUDYING WAKE FIELDS INFLUENCE TO INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER HIGH INTENSITY BUNCH

Instrument for bunch tilt measurements in linear collider is presented. Electron beam probe basic principles are described and method of bunch tilt measurements is discussed. The simulation results of testing beam interaction with tilted relativistic bunch are presented. Main components of the bunch tilt measurement error are determined.

*Keywords:* electron beam probe, electron beam diagnostic, wake fields, international linear collider, ilc, diagnostic, high intensity bunch.