

Состояние работ на установках со встречными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-4М Института ядерной физики СО РАН

С.И.Мишнев

Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск, Россия

Представлены результаты работы на установках со встречными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-4М за период 1996-98 гг. В данный период времени электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М работал в широком диапазоне энергий от 2×200 до 2×700 МэВ. Использование сверхпроводящего вигглера позволило набрать большой интеграл светимости, в частности, каждым из двух стоящих на коллайдере детекторов записано более 25 миллионов распадов ϕ -мезонов. В докладе обсуждается предстоящая модернизация коллайдера ВЭПП-2М, связанная с переходом на работу в режиме встречи круглых пучков, что позволит поднять светимость более чем на порядок.

Работа на комплексе ВЭПП-4М была связана в основном с освоением низкой для этого коллайдера области энергий от 2×700 до 2×1850 МэВ, запуском детектора КЕДР, физическими экспериментами на пучке "меченых" γ -квантов. Запущены первые каналы СИ на ВЭПП-4М, продолжалась регулярная работа с использованием СИ накопителя ВЭПП-3.

1. ВЭПП-2М

Установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М (рис.1) начала работать на эксперимент с 1974 г. В 1987 - 1990 гг. установка подверглась модернизации, в результате которой была существенно улучшена инжекционная часть и установлены два новых детектора для проведения экспериментов по физике высоких энергий.

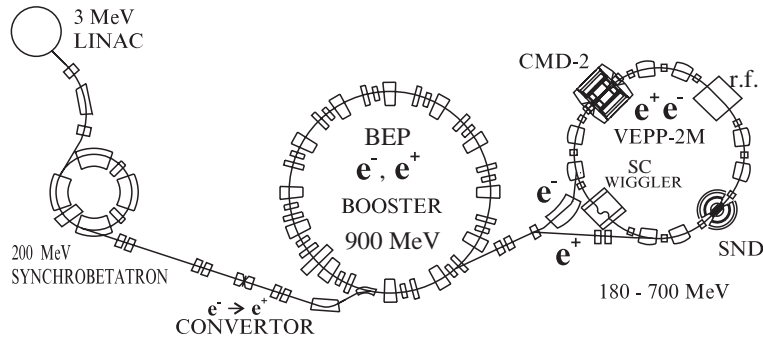


Рис. 1: Схема установки ВЭПП-2М.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-2М:

- длина 18 м,
- рабочий диапазон энергий пучка $E = 180 \div 700$ МэВ,
- 1×1 сгусток; 2 места встречи,
- рабочие токи пучков ($E = 510$ МэВ): $I^+ = I^- = 50$ мА,
- максимальная светимость ($E = 510$ МэВ):

$$L_{max} = 4 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1},$$

- максимальный параметр пространственного заряда ($E = 510$ МэВ):

$$\xi_{zmax} = .05; \quad \xi_{xmax} = .02.$$

В одном из промежутков коллайдера установлен сверхпроводящий 5-полюсный вигглер с максимальным полем $H_{WG} = 8$ Тл, создающий рост радиального эмиттansa пучка и радиационного затухания, что позволяет увеличить светимость и уменьшить внутрпучковое рассеяние.

Зависимость светимости (средней за время набора статистики на данной энергии) от энергии зарегистрирована на детекторе КМД-2 по событиям упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ на большие углы (рис.2). Вигглер был включен во время проведения эксперимента. Токи пучков и светимость в течение цикла набора статистики падали от начального максимального значения примерно в 1.5 раза, после чего производилась новая инжекция (рис.3). Светимость при больших токах меняется по закону $L \sim I_{пучка}$, поэтому ее величина, показанная на графике, приблизительно в 1.3 раза меньше максимальной для данной энергии.

На коллайдере установлены два детектора в противоположных промежутках, которые могут набирать статистику одновременно.

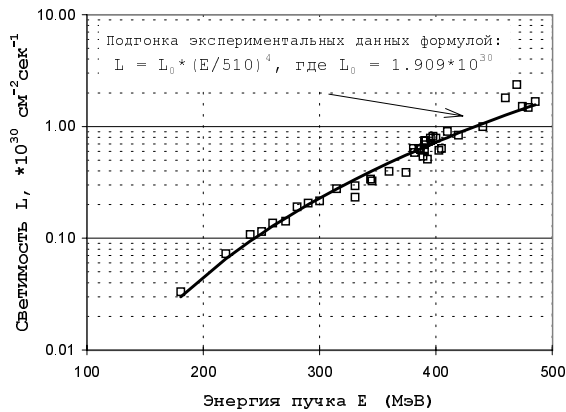


Рис. 2: Зависимость светимости от энергии, измеренная детектором КМД-2 во время набора статистики в эксперименте OMEGA98 (1998 г.).

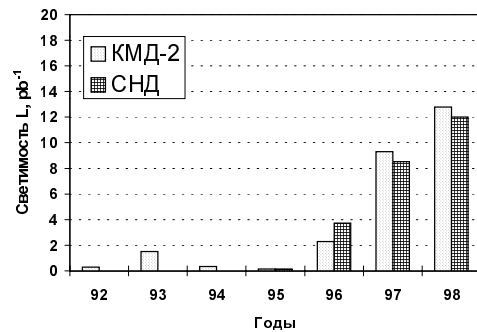


Рис. 3: Набор интеграла светимости по годам на ВЭПП-2М. Светимость измеряется по процессу упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ на большие углы, зарегистрированному в детекторах.

Детектор КМД-2 (криогенный магнитный детектор) запущен в 1992 г. Основными задачами КМД-2 являются изучение редких мод распада векторных мезонов, заряженных и нейтральных каонов, а также измерение величины R — отношения сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны к сечению рождения пары мюонов. Точное измерение величины R на низких энергиях ($0.27 \div 3.1$ ГэВ в системе центра масс) приобрело особую актуальность в настоящее время в связи с начавшимся в Брукхейвене экспериментом по прецизионному измерению аномального магнитного момента мюона, который должен определить вклад слабых взаимодействий в эту величину. Для этого необходимо правильно учесть вклад сильных взаимодействий, в котором определяющим оказывается именно знание величины R в указанной области сравнительно низких энергий [1].

Детектор СЧД (сферический нейтральный детектор) начал работать в 1995 году. Главной частью этого детектора является 3-слойный электромагнитный калориметр на основе кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$, покрывающих телесный угол 90% от 4π . Эксперименты с детектором СЧД в значительной степени ориентированы на изучение многофотонных конечных состояний распада ρ, ω, ϕ - мезонов. В 1997 г. на детекторе СЧД был обнаружен новый класс электрических дипольных распадов ϕ -мезонов на $f^0\gamma$ и $a^0\gamma$. Результаты эксперимента сви-

детельствуют в пользу 4-кварковой модели легких скалярных частиц f^0 и a^0 [2]. Несколько позже такой же результат был получен на детекторе КМД-2.

ВЭПП-2М используется также как источник СИ для проведения исследований в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения ($\lambda = 500 \div 2 \text{ \AA}$); работают 5 экспериментальных станций.

Дальнейшая модернизация коллайдера ВЭПП-2М (рис.4) предполагает организацию работы с круглыми пучками в местах встречи [3]. Режим “круглых пучков” означает выполнение следующих условий:

- равные (и малые) β -функции в месте встречи $\beta_{x0} = \beta_{z0}$;
- равные поперечные эмиттансы, возбуждаемые независимо квантовыми флуктуациями излучения;
- бетатронные частоты либо равны при нулевой связи (нет расщепления частот): $Q_x = Q_z = Q_0$, либо отличаются на полуцелое число : $Q_1 - Q_2 = 0.5$ (“Мебиусная структура”).

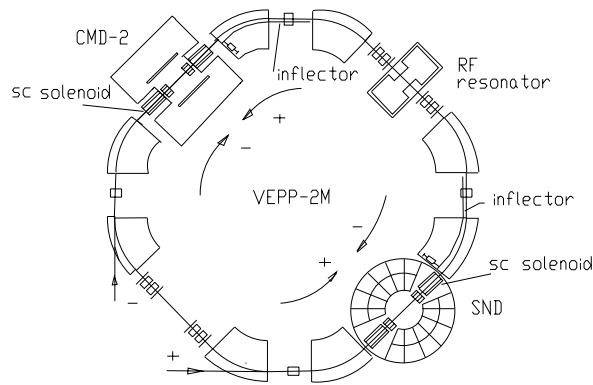


Рис. 4: Схема коллайдера ВЭПП-2М с круглыми пучками.

В результате поперечное движение становится одномерным, исчезают резонансы связи, которые раздували пучок или уменьшали его время жизни. Было проведено численное моделирование эффектов встречи в модели “сильный - слабый пучки” и в предположении, что сильный пучок имеет гауссовское распределение плотности по всем трем координатам. Рассматривалось несколько вариантов включения соленоидов; наилучшим признан вариант, когда пара соленоидов в одном месте встречи поворачивает плоскость бетатронных колебаний на 90° , а в противоположном месте встречи — на тот же угол в противоположном направлении (рис.5). Для сравнения показан расчетный эффект взаимодействия обычных для ВЭПП-2М плоских пучков.

Необходимые изменения в магнитной структуре предполагают замену квадрупольных дублетов в экспериментальных промежутках на сверхпроводящие соленоиды с полем около 9 Тл, уменьшения на 20% градиента в оставшихся квадруполях и доработки системы впуска. В настоящее время большая часть необходимого оборудования изготовлена. Начало модернизации накопителя назначено на весну 1999 г. Расчетная светимость при энергии $E = 510 \text{ МэВ}$ $L \simeq 1 \times 10^{32}$ при токах пучков $I^+ = I^- = 180 \text{ мА}$.

В конце 1998 г. предполагается продолжить набор статистики на детекторах при энергии пучка выше 510 МэВ, так как после перехода к круглым пучкам эта область энергий будет недоступна для ВЭПП-2М.

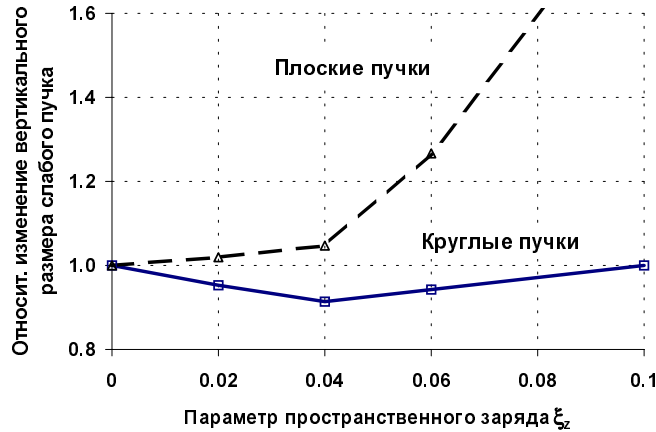


Рис. 5: Расчетное относительное изменение поперечного размера (радиуса) “слабого” пучка из-за взаимодействия с “сильным” пучком (для плоских пучков — изменение вертикального размера).

2. ВЭПП-4М

С 1980 г. в ИЯФ работал электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4. Его максимальная энергия достигала 5.3 ГэВ, максимальная светимость — $5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$. Главные физические результаты относились к изучению свойств семейства Υ -резонансов, в том числе к прецизионному измерению их масс, а также к исследованию двухфотонных взаимодействий e^+e^- .

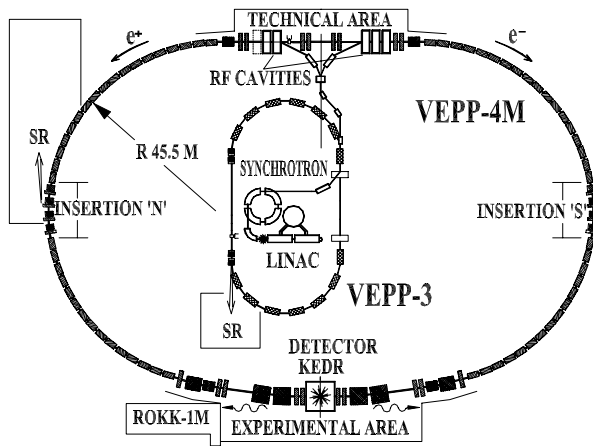


Рис. 6: Схема установки ВЭПП-4М.

После 1985 г. была проведена модернизация коллайдера, на нем установлены новый детектор КЕДР и новый магнитный спектрометр, являющийся частью прямолинейного промежутка коллайдера и позволяющий точно определить потери энергии электрона и позитрона после их двухфотонного взаимодействия в месте встречи; установка получила название ВЭПП-4М (рис.6).

Традиционно основным направлением деятельности ВЭПП-4М должно быть изучение области Υ -резонансов и одновременно набор статистики для двухфотонных процессов. Хотя по величине светимости ВЭПП-4М значительно отстает от работающего коллайдера CESR ($L_{max} = 6 \times 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$)

и близких к запуску В-фабрик, все конкурирующие установки нацелены на работу с б-кварками, рождающимися при энергии в центре масс 10.58 ГэВ, в то время как лежащие ниже по энергии Υ -резонансы (9.46, 10.02 и 10.36 ГэВ) остаются недостаточно исследованными. Кроме того, наличие магнитного спектрометра позволяет с большой точностью фиксировать массу объектов, рождающихся в результате двухфотонных e^+e^- -взаимодействий, что делает ВЭПП-4М уникальной установкой в данной области экспериментов.

В последнее время возник интерес к проведению исследований на встречных пучках в низкой для ВЭПП-4М области энергий пучков — от 0.7 до 1.5 ГэВ — с целью максимально точного измерения величины $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ и возбужденных состояний векторных мезонов ρ' , ω' , ϕ' и т.д. Эта область энергий еще мало исследована; в настоящее время есть только один коллайдер ВЕРС (Пекин), работающий при близких энергиях.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-4М:

- длина 366 м,
- частоты бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 8.54/7.58$,
- максимальная энергия пучка $E = 6$ ГэВ,
- 2×2 сгустка; 1 место встречи,
- рабочие токи пучков — до 20 мА,
- максимальная светимость (проект, $E = 5$ ГэВ): $L_{max} = 2 \times 10^{31}$ см⁻²сек⁻¹,
- в месте встречи: $\beta_z = .05$ м; $\beta_x = .75$ м; $D_x = .80$ м.

Для проведения экспериментов на встречных пучках на ВЭПП-4М установлен детектор КЕДР с продольным магнитным полем, основные компоненты которого: вершинный детектор, дрейфовая камера, черенковские счетчики на основе аэрогеля, спинцилляционные времяпролетные счетчики, торцевые CsI-калориметры, калориметр на основе жидкого криптона, счетчики мюонов. С декабря 1997 г. по апрель 1998 г. детектор работал еще не в полной конфигурации, без магнитного поля и без калориметра на жидком криптоне. На нем была проделана некоторая работа по оптимизации фоновых условий, а также зарегистрирован J/ψ -резонанс ($E = 2 \times 1.55$ ГэВ), что позволило прокалибровать энергию пучка в ВЭПП-4М. В конце 1998 г. предполагается провести работу по полному комплектованию детектора.

Была проведена работа по получению светимости при энергиях пучка $1.0 \div 1.8$ ГэВ. В этой области энергий встретились некоторые трудности, связанные с тем, что остаточные поля в элементах магнитной структуры оказывают неблагоприятное влияние на стабильность и воспроизводимость рабочих режимов при изменении энергии. Кроме того, при низких энергиях уменьшаются декременты радиационного затухания и возрастает роль процессов внутривидового рассеяния.

Основными средствами воздействия на пучок были два дипольных вигглера с полями до 2 Тл, увеличивающие декременты радиационного затухания, энергетический разброс и эмиттанс пучка, а также два вигглера, имеющих магнитное поле и градиент на равновесной орбите, которые позволяли перераспределять декременты радиационного затухания. На рис.7 показаны экспериментальные данные по управлению радиальным размером пучка с помощью дипольных вигглеров. Пунктирная кривая — результат расчета для энергии 1 ГэВ.

Эксперименты по измерению светимости были выполнены в нескольких точках по энергии при максимально достижимых на этой энергии токах пучка (рис.8). Светимость измерялась по однократному тормозному излучению на частицах встречного пучка и по упругому рассеянию на малые углы. Поле дипольного вигглера оптимизировалось на каждой энергии. Приведенная для сравнения расчетная светимость определялась при неизменной магнитной структуре (в том числе поле вигглера уменьшалось пропорционально энергии), и предположении, что параметры пространственного заряда ξ_x, ξ_z не зависят от энергии, при этом расчетная светимость $L_{расч.} \sim E^4$. Экспериментальная зависимость светимости от энергии также получилась близкой к $L_{изм.} \sim E^4$, за исключением точки при $E = 1$ ГэВ, где, по-видимому, не были найдены оптимальные условия. Должно быть продолжено изуче-

ние этой точки, следует также попытаться продвинуться в область более низких энергий, вплоть до 0.7 ГэВ — сопряжения с максимальной энергией ВЭПП-2М.

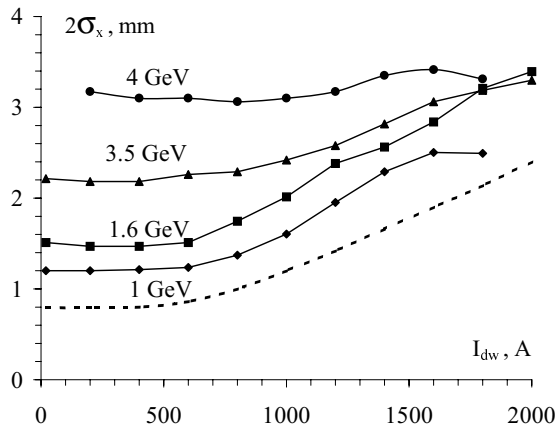


Рис. 7: Управление радиальным размером пучка с помощью дипольных вигглеров.

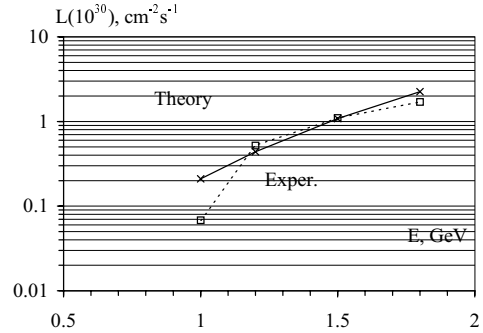


Рис. 8: Зависимость светимости от энергии (режим 2×2 сгустка).

Предполагается также в ближайшее время провести трекинговое моделирование эффектов встречи при условиях, соответствующих работе ВЭПП-4М при низких энергиях.

Другое направление деятельности ВЭПП-4М — работа с пучком γ -квантов, полученных путем обратного рассеяния лазерных фотонов на пучке релятивистских электронов в коллайдере (установка РОКК-1М) [4]. Основные параметры пучка γ -квантов: максимальная энергия $E_\gamma = 1.6$ ГэВ ($E_{\text{пучка}} = 6$ ГэВ); поток γ -квантов до 3×10^6 сек $^{-1}$. Энергия каждого γ -кванта может быть помечена с помощью магнитного спектрометра, измеряющего потерю энергии электрона, породившего этот квант. Диапазон энергий меченых γ -квантов от 2 до 61% от энергии электронного пучка; энергетическое разрешение 1 ÷ 3% от энергии γ -кванта во всем диапазоне. Пучок обратнорассеянных γ -квантов имеет резкую верхнюю границу, зависящую от длины волны лазерных фотонов и энергии пучка; поскольку энергия γ -кванта коррелирована с углом его вылета относительно траектории пучка, коллимацией можно сузить энергетический спектр γ -квантов до 10 ÷ 25% на половине высоты функции распределения. Можно работать также с пучком меченых γ -квантов тормозного излучения на атомах остаточного газа.

В последние годы сделано несколько серий экспериментов на пучке γ -квантов.

- Изучение фоторасщепления тяжелых и промежуточных ядер [5].
- Исследование нелинейных процессов квантовой электродинамики: было измерено эффективное сечение Дельбрюкковского рассеяния, и впервые наблюдался эффект расщепления фотона в кулоновском поле тяжелого ядра [6].
- Была проведена точная калибровка энергетического и пространственного разрешения элементов детекторов КЕДР (прототип калориметра на жидком криптоне) и BELLE, Япония (прототип калориметра на кристаллах CsI) [7].

На ВЭПП-4М начаты работы с использованием синхротронного излучения (СИ), для чего построен специальный экспериментальный зал; трассированы пучком СИ первые пять каналов, установлены две экспериментальные станции и проведены первые пробные эксперименты. Всего предполагается установить 14 каналов СИ и 20 экспериментальных станций.

Проведен ряд работ по изучению динамики пучка в ВЭПП-4М, в том числе исследование нелинейностей магнитной структуры, измерение динамической апертуры и ее коррекция [8], исследование поперечной неустойчивости пучка, связанной с импедансом вакуумной камеры и измерение распределения импеданса вдоль кольца [9].

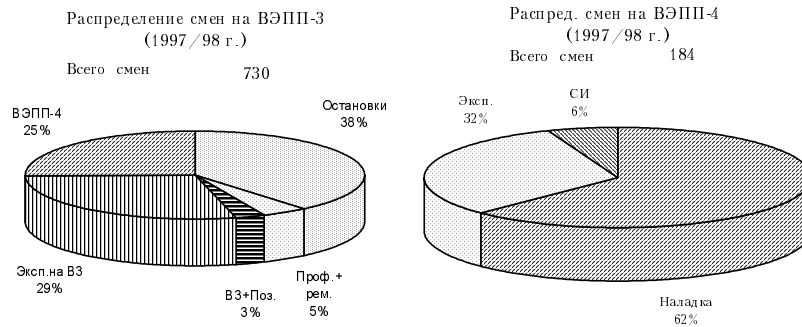


Рис. 9: Распределение времени в течение 1997/98 рабочего года (с 1 сентября 1997 г.) на установках ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Единицей учета времени считалась 12-часовая смена.

Накопитель ВЭПП-3 работает как инжектор, ускоряющий электроны и позитроны от 0.35 ГэВ до той энергии, которая нужна для коллайдера ВЭПП-4М (в диапазоне 1.0 ÷ 1.85 ГэВ). ВЭПП-3 имеет и самостоятельное значение: в последние 10 лет на нем были проведены эксперименты по изучению структуры дейтона на внутренней поляризованной мишени; по расщеплению тяжелых ядер пучком меченых γ -квантов; он работал как источник электронов для лазера на свободных электронах, генерирующего излучение в диапазоне длин волн 0.24 ÷ 0.7 мкм. Все это время он служил также источником СИ, на котором многочисленные группы вели работы по разнообразной тематике, относящейся к физике твердого тела, химии, биологии и т.д., а также литографии и LIGA-технологии.

В настоящее время (октябрь 1998 г.) коллайдер ВЭПП-4М выключен, так как разобран детектор КЕДР для установки недостающего оборудования. Накопитель ВЭПП-3 после летней остановки начал работу с пучком для потребителей СИ.

Список литературы

- [1] *CMD-2 Collaboration.* // Nuclear Physics A633 (1997), p. 268c.
- [2] *M.H.Achasov et al.* Proc. of the VII-th International Conference on Hadron Spectroscopy, Brookhaven, (1997), p. 26-35.
- [3] *V.V.Danilov et al.* Proc. EPAC'96, Barcelona (1996), p. 1149
- [4] *G.Ya.Kezerashvili et al.* Radiation of Relativistic Electrons on Periodical Structures (RREPS-97). International Symposium, September 7-12, 1997, Tomsk (accepted for publication at NIM-B).
- [5] *M.L.Terranova et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. v.24 (1998) 205-216.
- [6] *Sh.Zh.Akhmadaliev et al.* Photon-97. International Conference, Amsterdam, 1997.
- [7] *V.M.Aulchenko et al.* // Nucl. Inst. Meth. A379 (1996) p. 491.
- [8] *V.A.Kiselev et al.* Proc. EPAC'96, Barcelona (1996), p. 896.
- [9] *V.A.Kiselev et al.* Proc. EPAC'98, Stockholm (1998), p. 1005.