

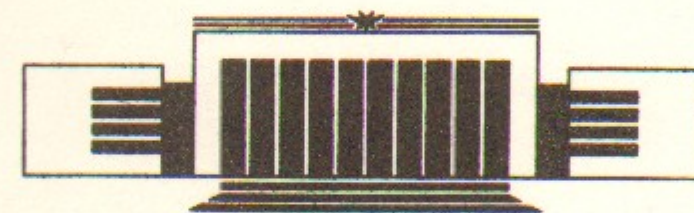


28  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

**В.В.Анашин, М.М.Бровин, Н.А.Винокуров,  
П.Д.Воблый, А.А.Диденко, И.Б.Дробязко,  
А.С.Калинин, Г.Н.Кулипанов, В.Н.Литвиненко,  
Л.А.Мироненко, С.Ф.Михайлов, С.И.Мишнев,  
В.М.Попик, В.Г.Попов, Ю.А.Пупков,  
И.Г.Сильвестров, А.Н.Скринский, А.С.Соколов,  
Э.М.Трахтенберг**

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ  
ПРОМЕЖУТОК ДЛЯ РАБОТЫ  
С ОПТИЧЕСКИМ КЛИСТРОНОМ  
НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3**

**ПРЕПРИНТ 89-126**



**НОВОСИБИРСК**

Специализированный прямолинейный промежуток для работы с оптическим клистроном на накопителе ВЭПП-3

*В.В.Анашин, М.М.Бровин, Н.А.Винокуров,  
П.Д.Воблый, А.А.Диденко, И.Б.Дробязко,  
А.С.Калинин, Г.Н.Кулипанов, В.Н.Литвиненко,  
Л.А.Мироненко, С.Ф.Михайлов, С.И.Мишнев,  
В.М.Попик, В.Г.Попов, Ю.А.Пупков,  
И.Г.Сильвестров, А.Н.Скринский, А.С.Соколов,  
Э.М.Трахтенберг*

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

#### АННОТАЦИЯ

В конце 1985 года было принято решение о модернизации электронного накопителя ВЭПП-3. Одной из основных задач этой модернизации являлось создание на накопителе ВЭПП-3 дополнительного специализированного прямолинейного промежутка (байпаса) для продолжения работ с оптическим клистроном (ОК).

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Конструирование байпаса и новой магнитной системы оптического клистрона (ОК) было закончено к концу 1986 г. В марте 1988 г. была закончена установка байпаса на ВЭПП-3, в апреле получены циркулирующий электронный пучок и спонтанное ондуляторное излучение из ОК, в мае установлены зеркала оптического резонатора, а третьего июня реализован режим генерации вынужденного излучения и продемонстрирована непрерывная перестройка длины волны от 5800 до 6900 Å при ширине спектральной линии излучения менее 0,6 Å. В июле и октябре 1988 г. генерация была получена также в диапазонах 3800—4500 Å и 2400—2700 Å, соответственно.

#### 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Накопитель ВЭПП-3 представляет собой жесткофокусирующий рейстрек, состоящий из двух полуколец и двух прямолинейных промежутков (см. рис. 1). В каждом промежутке установлено по четыре одинаковых квадрупольных дублета. В настоящее время все дублеты накопителя запитаны последовательно от одного генератора. Расположение дублетов и градиент в них подобраны так, что матрицы, описывающие вертикальные и горизонтальные бетатронные колебания в промежутках, единичны. Каждое полукольцо состоит из восьми суперпериодов, конструктивно оформленных в

виде отдельных 22,5-градусных магнитов. Внутри магнита имеются два участка с однородным магнитным полем и два участка с показателем спада разного знака, т. е. реализована ФОДО-структура. Участки с показателем спада выполнены в виде так называемых полуквадруполей. Периметр накопителя составляет 74,4 м, а длина прямолинейного промежутка 12 м. Набеги бетатронных фаз (по вертикали и по горизонтали) в суперпериоде близки к  $0,2 \times 2\pi$ , а соответствующие бетатронные частоты — к  $16 \times 0,2 + 2 = 5,2$  (набег фазы на прямолинейном промежутке равен  $2\pi$ ). Изменяя поле в полуквадруполях при помощи корректирующих обмоток, можно менять бетатронные частоты. Коэффициент уплотнения орбит равен 0,06. ВЧ-система накопителя состоит из двух ускоряющих резонаторов — на второй и на восемнадцатой гармониках частоты обращения (4,03 МГц).

Максимальное напряжение на резонаторе первой гармоники 14 кВ (напряжение ограничено разогревом керамических конденсаторов, стоящих в резонаторе), а на резонаторе восемнадцатой гармоники 700 кВ. Инжекция в накопитель ведется на энергии 360 МэВ при выключенном резонаторе восемнадцатой гармоники. Большая длина волны ускоряющего напряжения (37,2 м) и короткий (около 40 нс) импульс инфлектора позволяют использовать однооборотную многократную инжекцию по вертикали со сдвигом импульса инфлектора по времени относительно момента пролета через него накопленного пучка. При этом у впущенной порции электронов появляются лишь когерентные продольные колебания, что позволяет иметь малую вертикальную апертуру (24 мм в полукольцах) без существенного снижения эффективности инжекции.

При модернизации ближайшие к экспериментальному прямолинейному промежутку накопителя (где находилась предыдущая версия ОК) 22,5-градусные магниты были заменены С-образными магнитами, питающимися от отдельного источника тока. Для работы с байпасом эти магниты выключаются.

### 3. МАГНИТНО-ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА БАЙПАСА

При проектировании байпаса было принято, что он должен удовлетворять следующим требованиям и ограничениям:

- а) рабочая энергия — энергия инжекции (360 МэВ);
- б) нулевая поперечная дисперсия ( $\eta$ -функция) на всей прямолинейной части;

в) габариты ограничены стенами зала накопителя ВЭПП-3, а излучение ОК должно выходить в бункер для работ с синхротронным излучением;

г) расстояние между осями экспериментального прямолинейного промежутка и байпаса ограничено снизу горизонтальными габаритными размерами элементов их магнитных систем;

д) разность длин равновесных орбит в режимах работы с байпасом и без него ограничена сверху диапазоном перестройки частот ВЧ-генераторов и резонаторов накопителя;

е) элементы магнитной системы байпаса должны обеспечивать согласование  $\beta$ -функций в полукольцах накопителя с оптимальными  $\beta$ -функциями ОК и улучшить параметры электронного пучка, оставляя при этом максимальную свободную длину в середине байпаса под установку магнитной системы ОК.

Схема магнитной системы байпаса показана на рис. 1. Расстояние от его оси до оси основного прямолинейного промежутка составляет 0,65 м. Поле в 22,5-градусных поворотных магнитах байпаса 14 кГс. Пары квадрупольных линз, расположенные между этими магнитами и полукольцами накопителя, служат для зануления  $\eta$ -функции в байпасе. Остальные четыре пары линз согласуют  $\beta$ -функции накопителя с оптимальными  $\beta$ -функциями в ОК (см. рис. 2). Для увеличения вертикального эмиттанса и декрементов затухания бетатронных и синхротронных колебаний осенью 1988 года на байпас будет установлен трехполюсный виглер с горизонтальным магнитным полем (до 18 кГс).

Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали. Откачка ведется при помощи одиннадцати агрегатов, состоящих из магниторазрядных и титановых сорбционных насосов. Для наблюдения за положением равновесной орбиты имеется семь пикап-станций. На электроды пикап-станций подано отрицательное постоянное напряжение (300 В) для отсоса ионов остаточного газа.

### 4. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОК

Как и в предыдущих наших работах [1—4] магнитная система лазера на свободных электронах состоит из двух ондуляторов и расположенного между ними трехполюсного виглера (группирователя), т. е. выполнена по схеме ОК [5, 6]. После конструирования магнитовакуумной системы байпаса на магнитную систему ОК

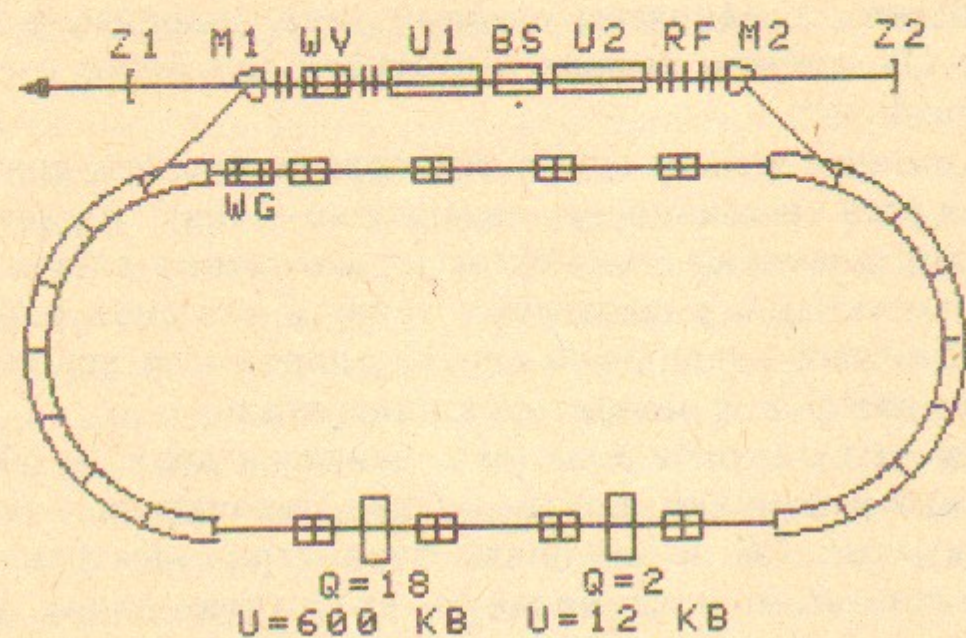


Рис. 1. Схема накопителя ВЭПП-3 с байпасом.

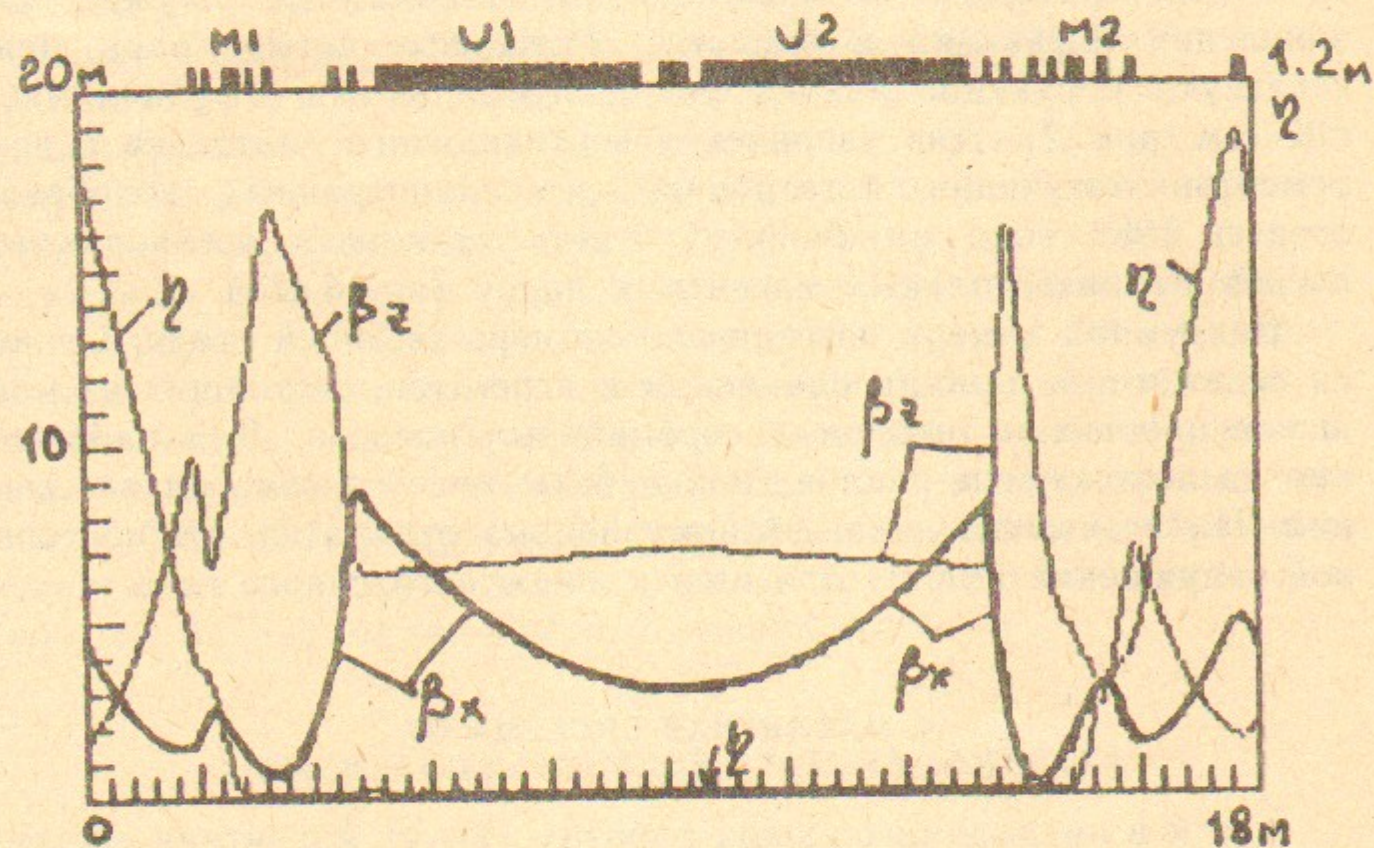


Рис. 2. Оптимизированные  $\beta$ - и  $\eta$ -функции в байпасе для работы ОК в ультрафиолетовой области спектра.

осталось 7,5 метра. Между ондуляторами были размещены электромагнитный группирователь (от предыдущей магнитной системы ОК-3), пикап-станция, откачной агрегат и вертикальный корректор. На каждый ондулятор осталось 3,4 м. Чтобы использовать зеркала со стандартными отражающими покрытиями, за исходную длину волны  $\lambda$  была принята длина волны гелий-неонового лазера 0,63 мкм. В этом случае

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad K = 0,0934 \cdot H_0(\text{кГс}) \cdot \lambda_0(\text{см}), \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  — период ондулятора,  $\gamma$  — релятивистский фактор. Рассмотрение возможных конструкций ондуляторов такой большой длины показало, что применение сверхпроводимости и постоянных магнитов связано с большими трудностями при изготовлении и эксплуатации. Поэтому мы разработали и изготовили несверхпроводящие электромагнитные ондуляторы. Поле в ондуляторе возбуждается восемью периодически изогнутыми медными шинами  $18 \times 18$  мм с отверстиями для воды. Параметры ондулятора приведены в таблице.

Длина ондулятора, м	3,4
Период, см	10
Число периодов	33,5
Число обмоток	8
Сечение шины, мм <sup>2</sup>	$18 \times 18$
Потребляемый ток, кА	2,2
Магнитный зазор, см	2,2
Ширина полюса, см	9
Максимальное магнитное поле на оси, кГс	5,3
Потребляемая мощность, кВт	30

Как видно из (1) для работы на длине волны 0,63 мкм достаточно поля 3,5 кГс, другими словами, период ондулятора мог бы быть меньше. К такому «завышенному» периоду привел учет нескольких соображений. Во-первых, вклад нелинейности вертикальной фокусировки ондулятора в неизохронность бетатронных колебаний обратно пропорционален периоду ондулятора. Во-вторых, при поле 3,5 кГс согласованная вертикальная  $\beta$ -функция ондулятора равна  $\beta_z = 4,9$  м, а соответствующий набег бетатронной фазы на магнитной системе ОК близок к  $\pi/2$ , что обеспечивает подавление вклада вышеупомянутой нелинейности в силу нелинейных резонан-

сов. В-третьих, при уменьшении периода очень быстро возрастает потребляемая мощность (ток в шинах растет, а их сечение приходится уменьшать). Вакуумная камера в ондуляторах представляет собой плющенную трубку из нержавеющей стали с вертикальной апертурой 18 мм, а горизонтальной 75 мм. Если учесть, что в полукольцах имеются вертикальные искажения равновесной орбиты величиной 2-3 мм, а в ондуляторе орбита выставляется точно в медианной плоскости, то видно, что такая вертикальная апертура не уменьшает акцептанс накопителя. Большая горизонтальная апертура обеспечивает вывод ондуляторного излучения на поверхности вакуумной камеры, близкие к откачным агрегатам, и достаточно высокую скорость откачки из вакуумных камер ондуляторов.

### 5. ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Оптический резонатор состоит из двух зеркал, расположенных на расстоянии 18,7 м одно от другого. Это расстояние равно одной четвертой периметра накопителя для того, чтобы лазер работал в режиме синхронизации мод (т. е. для того, чтобы световой сгусток, летающий в оптическом резонаторе, взаимодействовал с электронным сгустком при каждом прохождении последнего через ОК). Для простоты изготовления зеркал радиусы их кривизны выбраны одинаковыми и стандартными (10 м). Зеркала расположены на оси байпасса на одинаковых расстояниях от середины магнитной системы ОК. Легко подсчитать, что конфокальный параметр резонатора равен 2,5 м. Для длины волны 0,63 мкм радиус низшей моды оптического резонатора в серединах ондуляторов равен 0,9 мм, а на зеркалах 2,8 мм. Зеркала помещены в небольшие вакуумные камеры, связанные каналами с камерой байпасса. При замене зеркал их вакуумные камеры отсекаются шиберами, а после достижения в них хорошего вакуума (без прогрева) шиберы снова открываются. В каналах установлены откачные агрегаты и приемники излучения. Давление остаточного газа в камере переднего зеркала около  $1 \cdot 10^{-8}$  торр без электронного пучка и порядка  $10^{-7}$  торр с электронным пучком. Юстировка зеркал производится при помощи вращения их вакуумных камер, которые соединяются с каналами через сильфоны. В начале захода коэффициенты отражения зеркал были лучше 99,9%.

### 6. РАБОТА С ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Циркулирующий электронный пучок был получен сразу после включения магнитной системы байпасса. Для обезгаживания вакуумной камеры использовался режим с большим (до 0,2 А) накопленным током. Без отрицательного напряжения на пикап-электродах предельный ток был в 2-3 раза меньше. После набора нескольких ампер-часов вакуум при токах пучка около 20 мА улучшился на порядок (до  $10^{-8}$  торр).

Для увеличения пикового тока включается резонатор восемнадцатой гармоники частоты обращения. Максимальный полученный пиковый ток около 5 А.

В настоящее время работы с оптическим клистроном ведутся на токах менее 30 мА. Это обусловлено поперечной неустойчивостью электронного пучка, приводящей к увеличению его размеров. Положение должно улучшиться после установки виглера с горизонтальным магнитным полем.

Пересчитанные из измеренных на малых токах длины сгустка и горизонтального размера энергетический разброс  $\sigma_E/E$  и горизонтальный эмиттанс согласуются с расчетными значениями  $2,5 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-6}$  см. Вертикальный размер в несколько раз меньше горизонтального, что соответствует вертикальному эмиттансу порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  см.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Artamonov A.S. et al. Nuclear Instr. and Meth., 1980, v.177, p.247.
2. Korniyukhin G.A. et al. Nuclear Instr. and Meth., 1983, v.208, p.189.
3. Korniyukhin G.A. et al. Nuclear Instr. and Meth., 1985, v.A237, p.281.
4. Vinokurov N.A. Nuclear Instr. and Meth., 1986, v.A246, p.105.
5. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-59. Новосибирск, 1977.
6. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. — Горький, 1981, с.204.