

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.С. Кудрявцев

ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНЫЙ СВЕТОВОДНЫЙ БЛОК  
ДЛЯ ИНДИКАЦИИ НУЛЕВОГО ПОЛОЖЕНИЯ  
СВЕТОВОГО ПЯТНА

ИЯФ 2003-44

Новосибирск  
2003

**Четырёхканальный световодный блок  
для индикации нулевого положения светового пятна**

*В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.С. Кудрявцев*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера  
630090, Новосибирск, РФ

**Аннотация**

Описаны устройство и расчёт четырёхканального преобразователя развести его части на отдельные фотодиоды с минимальными потерями света. Преобразователь состоит из четырёх специально доработанных конических световодов, собранных в единый блок с входными торцами в виде соприкасающихся между собой одинаковых 90-градусных секторов. Эта конструкция предназначена для применения в цепях определения положения лазерного луча прибора, измеряющего наклоны силовых линий магнитного поля соленоидов, в качестве альтернативы серийному фотодиоду малого размера.

*© Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера, СО РАН*

---

## Введение

Обозначенный в названии работы световодный блок предлагается в качестве элемента прецизионного устройства для определения направлений силовых линий магнитного поля вблизи оси соленоидов. Высококачественные соленоидные магнитные поля требуются для установок электронного охлаждения [1], так как скорость охлаждения ионов в сильной степени чувствительна к непараллельности движения электронов относительно ионной траектории. Это накладывает ограничения на допустимые отклонения направлений силовых линий магнитного поля относительно оси на участке охлаждения; величина этих отклонений не должна превышать значений, как правило, порядка  $10^{-4}$  рад. При этом длина соленоида охлаждения составляет обычно несколько метров, а в новых разработках достигает даже десятков метров.

Разработанная в ИЯФ [2] схема измерений наклонов силовых линий, т.е. поперечных компонент поля соленоида, выглядит следующим образом. Луч лазера попадает на зеркало магнитного датчика, который находится внутри исследуемого соленоида и ориентируется по направлению магнитного поля в области расположения датчика. Основой датчика является стержневой постоянный магнит, подвешенный на нити, закреплённой вблизи его центра тяжести. Отражённый луч направляется на фотоприёмник, состоящий из четырёх одинаковых симметрично (относительно центра) расположенных секторов. Фотоприёмник ориентирован так, чтобы по разностному сигналу с соответствующих секторов можно было следить за вертикальными и горизонтальными наклонами луча (это осуществимо при ориентации параллельно координатным осям линии, соединяющей центры как смежных, так и противоположных секторов фотоприёмника). Система обратной связи автоматически устанавливает в специальных внешних контурах такие токи, что создаваемое ими магнитное поле в области расположения датчика компенсирует кривизну поля соленоида, направляя тем самым луч в центр фотоприёмника.

В работах [2,3] для измерения поперечных компонент и коррекции поля соленоидов применялся нуль-детектор на базе секционированного

фотодиода ФДК-142 [4] с диаметром светочувствительного окна около 13 мм. Однако при больших расстояниях между зеркалом и фотоприёмником (несколько метров) даже слабый наклон силовой линии может приводить к значительному отклонению отражённого луча от оси, превышающему относительно небольшой размер детектора. Захват луча обратной связью при этом невозможен, так что необходимо ручным способом заводить световое пятно в нужную область. Кроме того, большое входное окно полезно также для надёжного удержания луча в процессе перемещения датчика вдоль соленоида, что неизбежно сопровождается неупорядоченными колебаниями датчика. Другим недостатком применявшегося детектора является его значительная стоимость.

Авторами разработан, изготовлен и испытан световодный блок – преобразователь, позволяющий использовать в качестве фотодетекторов в описанной схеме одноэлементные фотодиоды. Входное окно преобразователя четырёхсекторное, как у ФДК-142, но размер его может многократно превышать размер окна упомянутого фотодиода. Световодный блок достаточно прост в изготовлении и (вместе с четырьмя фотодиодами) дешевле промышленного секционированного диода. Кроме того, применение такого устройства открывает возможности существенного упрощения оптической схемы измерительного прибора, что позволяет сделать его компактным.

## 1. Конструкция световодного преобразователя

Преобразователь состоит из четырёх полированных и алюминированных конических световодов из оргстекла, на каждом из которых на некотором расстоянии от оси и параллельно ей выполнены два плоских среза, образующих прямой двухгранный угол. Световоды собираются в пакет так, что они прилегают друг к другу по этим плоскостям, оставаясь разделёнными по передаваемым световым потокам (рис.1). Эта сборка вставляется в цилиндрический корпус, центруется оправками и заливается эпоксидной смолой, после затвердевания которой заготовка обрезается по определённым плоскостям и эти торцы полируются. Со стороны выходного торца на корпус надевается крышка, внутри которой закреплены принимающие свет фотодиоды (ФД-24К).

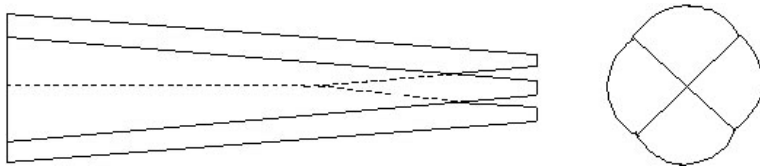


Рис. 1. Световодный блок, собранный из 4 отдельных световодов.

## 2. Расчёт световодов

Геометрия конических световодов моделировалась с помощью компьютерной программы, рассчитывающей ход лучей от выходного отверстия лазера до фотодиодов. Световой пучок представляется лучами, равномерно, с заданным шагом, рассредоточенными по сечению пучка у его выхода из лазера. Входными параметрами служат размеры торцов и угол конуса отдельного световода, расстояния между элементами оптической системы, угол расходимости лазерного луча, а также углы наклонов магнитного датчика (относительно оптической оси) в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Расчёт сопровождается параллельным выводом на экран в трёх проекциях контуров световодов, контуров фотоэлементов, хода лучей, а также основных параметров световодов и падающего светового пучка.

Критерием отбора является доля лучей, достигших светочувствительного элемента фотодиода (с учётом зазора между стеклянным окном и этим элементом) при заданных разумных значениях входных величин. В оптимуме (достаточно широком по набору параметров) эта доля составляет 100%. При этом обеспечивается определение разности световых потоков в комбинации секторов, относящихся к одной (вертикальной или горизонтальной) координате, с точностью не хуже  $10^{-5}$  от величины падающего потока. Программа занимает 200 килобайт дискового пространства, системные требования – минимальные.

Функция световодов – транспортировка перехваченного относительно большим входным окном фотоприёмника светового потока к фотодиодам, сопряжённым с соответствующими участками входного окна. При этом одним из главных требований к световодам является передача света на фотодиоды без потерь. Последние могут возникать вследствие ухода лучей под большими углами из выходных торцов, при полном внутреннем отражении от выходного торца или в результате многократных отражений от боковых стенок световодов с уходом через входные торцы (рис.2). Для всех лучей, прошедших световод, на экран выводится расстояние луча от оси в плоскости светочувствительного элемента фотодиода, а в случае непопадания луча на светочувствительный элемент - дополнительно его расстояние от оси на входе в светоприёмный блок. При этом делается пауза в счёте для анализа ситуации. В случаях ухода луча из-за обратного отражения теряемый луч отмечается на экране другим цветом.

Режим счёта может быть непрерывным или с паузами для контроля хода отдельных лучей. При каждой остановке счёта можно изменить один из исходных параметров, режим работы, а также выйти в основное меню или записать графическое окно в файл. По окончании расчёта выводятся доля прошедших через световоды лучей, доля лучей, попавших на фотоэлементы,

и отношение разности попавших на фотоэлементы лучей к их сумме, чем характеризуется величина выходного сигнала в данном канале.

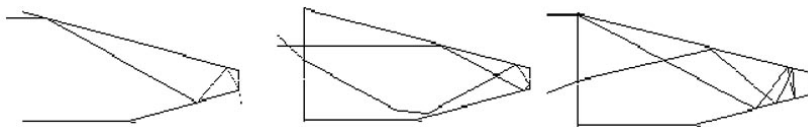


Рис. 2. Возможные каналы потери света: а) выход лучей под большими углами через выходной торец; б) полное внутреннее отражение от выходного торца; в) многократные отражения от боковых стенок световода.

На рис.3 показаны используемые в расчёте геометрические параметры отдельного световода.

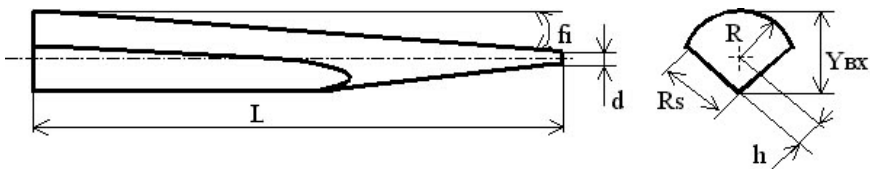


Рис. 3. Обозначение геометрических параметров световода.

Рис.4 демонстрирует общий вид графического окна при расчёте конкретного варианта преобразователя, удалённого на 6.5 м от лазера, с указанными на рисунке входными параметрами. Слева изображены контуры верхнего и нижнего световодов вертикального (условно) канала с проекциями всех лучей на вертикальную (вверху) и горизонтальные плоскости, справа приведён вид по ходу светового пучка с проекциями лучей на плоскость светочувствительных элементов фотодиодов (вверху) и со следами лучей, падающих на эти элементы (внизу). Окружность вблизи оси световодного блока (справа вверху) изображает сечение светового пучка в плоскости входного окна. Полное число лучей определяется выбором шага сетки на выходном отверстии лазера и в данном варианте счёта превышает 40 тысяч (шаг 0.1мм).

На рисунке обозначены также:  $n$  – коэффициент преломления материала световода,  $b$  – расходимость лазерного пучка,  $a_v$  – наклон магнитного датчика по вертикали и  $a_h$  – наклон по горизонтали. В комментариях в верхней части рисунка указана позиция самого последнего (в ходе вычислений) луча на выходе из световода.

Увх,см	R,см	Rs,см	d,мм	h,мм	f,гр.	L,см	n	b,рад	αy,рад	αx,рад
2.91	1.50	2.12	8.0	10.0	6.0	10.47	1.49	.2E-02	.40E-03	.10E-03

Расстояние луча от центра фотоэлемента: 2.21 мм.

Доля лучей, прошедших световод: верхний:100.000%; нижний: 100.000%.  
 Доля лучей, попавших на фотоэлемент: верхний:100.000%; нижний: 100.000%.  
 Сигнал (отношение разности лучей на фотоэлементах к их сумме): .60001  
 меню- m, повторить- s, параметр- p, впр-файл- b, выход- e

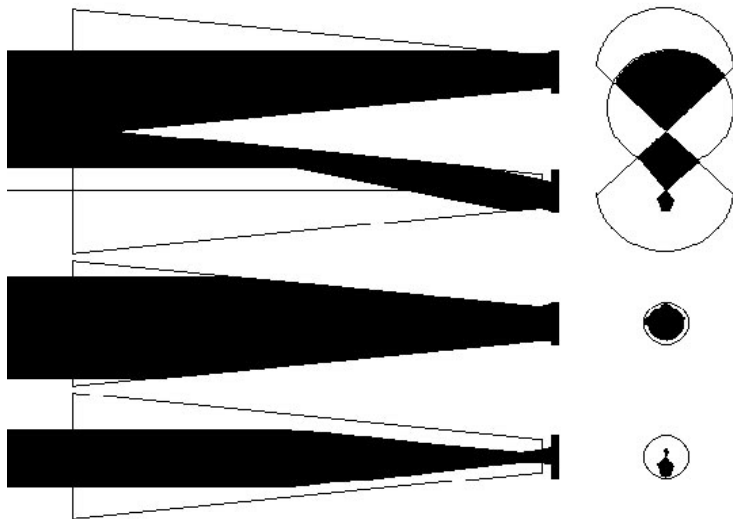


Рис. 4. Общий вид графического окна по окончании расчёта (пояснения в тексте).

### 3. Модификация оптической схемы измерителя

Оптическая схема измерительного устройства, использовавшегося в цитированных выше работах (автоколлимационная труба с боковым осветителем), показана на рис.5(а). Светоделительная пластина позволяет разделить пути прямого (зондирующего) и отражённого (сигнального) луча, но вносит значительное ослабление светового пучка. Чтобы уменьшить внешнюю засветку фотодетектора и отстроиться от слабого дополнительного сигнала, обязанного своим происхождением паразитным отражениям от светоделителя, детектор приходилось относить от последнего на расстояние порядка 1 м, чем определялись габариты прибора. При настройке такой системы необходимо юстировать как зондирующий, так и сигнальный каналы.

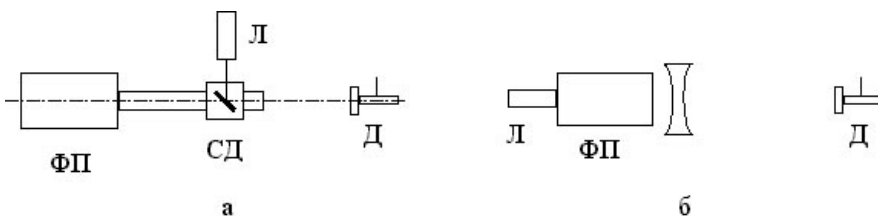


Рис. 5. Сравнение прежней (а) и предлагаемой (б) схем оптического тракта (Л – лазер, Д – датчик с зеркалом, ФП – фотоприёмник, СД – светоделитель).

Применяя описанный выше детектор, прежнюю оптическую схему можно упростить, исключив светоделительный элемент (рис.5(б)). Тонкий луч лазера, расположенного за детектором и жёстко с ним связанного, выпускается через узкий осевой канал в детекторе и направляется на зеркало датчика. Если за счёт естественной или принудительно увеличенной расходимости размер отраженного пучка лучей в плоскости входного окна детектора существенно превышает размер выпускного канала, потерей небольшого количества лучей, не попавших на световоды из-за наличия канала, можно пренебречь, тем более что при включённой обратной связи световое пятно устанавливается симметрично относительно оптической оси. Юстировка прибора на установке заключается только в проводке зондирующего луча вдоль оси соленоида. Принудительное расширение прямого лазерного пучка легко достигается установкой слабой рассеивающей линзы непосредственно перед детектором, при этом она мало влияет на ход отражённых лучей в световодах детекторного узла.

Рассмотренный вариант детектора был протестирован на стенде в составе оптической схемы, изображённой на рис.5(а). Установлено, что отклик прибора на небольшое поперечное возмущение поля соленоида с достаточной степенью точности не меняется, если у описанного фотоприёмника без пропускного канала закрыть приосевую область входного окна небольшим непрозрачным экраном, имитирующим потерю части отраженного от магнитного датчика светового потока.

Вариант фотоприёмника с каналом находится в настоящее время в стадии изготовления.

В заключение необходимо заметить, что эта схема без ограничений работает в случаях достаточно малого отношения длины соленоида к расстоянию между соленоидом и детектором, а также с широкоапертурными детекторами. В противном случае размер светового пятна на входе в детектор будет сильно зависеть от позиции магнитного датчика на оси соленоида, вследствие чего согласование размеров пятна с сечениями пропускного канала и входного окна световодного блока при разных расстояниях до зеркала датчика может оказаться затруднительным. Кроме



того, к качеству лазерного пучка для такого варианта прибора следует предъявлять несколько более жёсткие требования, чтобы исключить возможные нежелательные эффекты, связанные с неравномерным распределением светового потока по сечению пучка.

## Литература

- [1] *В.В. Пархомчук, А.Н. Скринский.* Электронное охлаждение. 35 лет развития. УФН 43, вып.5, с.434 (2000).
- [2] *В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.В. Пархомчук, В.С. Туников и др.* Прецизионный измеритель направления магнитного поля. XVII Совецание по ускорителям заряженных частиц, ГНЦ РФ Институт высоких энергий, Протвино, 17-20 окт. 2000г. Сб. докладов, Т.1, с.216-219, Протвино (2000).
- [3] *В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, Ю.М. Боймельштейн и др.* Испытания электронного охладителя на энергию 35 кэВ для Института современной физики (Ланжоу, КНР). Тр. XVIII Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2002), окт. 1-4, 2002, Обнинск.
- [4]. *Аксёненко, М.Л. Бараночников.* Приёмники оптического излучения. Справочник, с.54, М.: Радио и связь, 1987.

*В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.С. Кудрявцев*

**Четырёхканальный световодный блок  
для индикации нулевого положения светового пятна**

*V.N. Bocharov, A.V. Bublej, V.S.Kudryavtsev*

**Four channel light guide  
for zero position of light spot indication**

ИЯФ 2003-44

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 23.06. 2003 г.

---

Сдано в набор 25.06. 2003 г.  
Подписано в печать 26.06.2003 г.  
Формат 60х90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.5 уч.-изд.л.  
Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 44

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
*Новосибирск., 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*