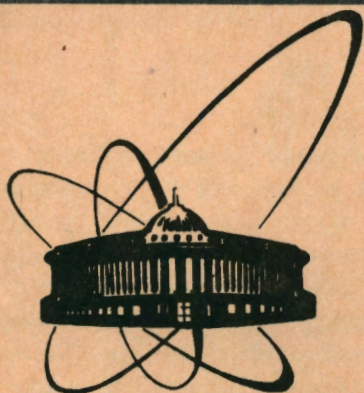


91-148



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-91-148

Ю. В. Гусаков, Ю. И. Романов

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ
НЕСТАНДАРТНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ
ДЛЯ СВЕТОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

1991

Развитие техники волоконно-оптической связи на электрофизических установках (ЭФУ) создает основу для разработки и применения оптических средств передачи информации, коммуникационной средой которых служат волоконно-оптические кабели (см. таблицу).

Главные преимущества, характерные для волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ), заключаются в следующем:

1) помехозащищенность от внешних электромагнитных импульсов и от взаимонаводок, что особенно важно при высокой плотности коммуникаций;

2) широкий частотный диапазон: 500÷600 МГц для многомодовых волокон, 2000÷2500 МГц для одномодовых;

3) малое затухание: 3÷5 дБ/км для волоконно-оптического кабеля, против 30 дБ/км для коаксиального кабеля;

4) малые размеры и масса: диаметр светопроводящей жилы 30÷50 мкм; плотность материала жилы в четыре раза меньше плотности меди; применение волоконно-оптических линий связи дает экономию в массе проводов примерно в 100 раз;

5) устойчивость к воздействию окружающей среды (влага, соляной туман);

6) диапазон рабочих температур: от -60 до +200° С;

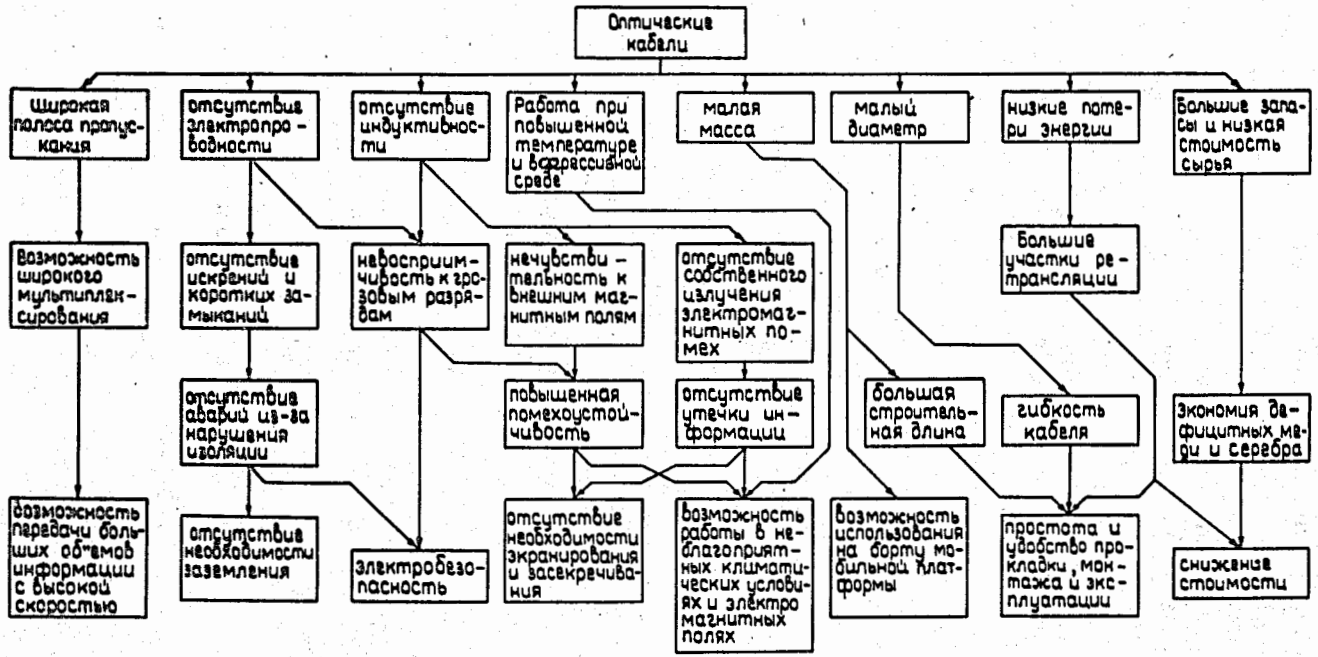
7) наличие гальванической развязки между входом и выходом, позволяющей связывать блоки аппаратуры, разность потенциалов между которыми достигает многих сотен киловольт;

8) дешевизна и недефицитность материалов, из которых изготавливаются оптические волокна и кабели (стекло, кварц, пластмассы).

Несмотря на сложившуюся практику приобретения у зарубежных фирм стандартных соединителей, в том числе и волоконно-оптических, существует необходимость при проведении научно-исследовательских работ конструирования и изготовления нестандартных волоконно-оптических соединителей, в которых проблема стыковки решается с помощью механических устройств, не требующих для своего изготовления прецизионного или специального оборудования.

Оптические соединители (ОС) являются неотъемлемой частью любой волоконно-оптической системы передачи информации¹¹⁻⁵¹. Назначение оптических соединителей — обеспечить соединение волоконно-оптических кабелей (ВОК) друг с другом и с оптоэлектронными и оптическими уст-

Таблица



ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И ИСПОЛНЕНИЕ
 РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО
 ВНЕШНИЙ ПИТАТЕЛЬ

ройствами, входящими в состав системы передачи информации, с минимальными потерями оптического сигнала.

Выделяются следующие классы ОС:

- разъемные и неразъемные;
- одноволоконные и многоволоконные;
- "кабель—кабель" и "кабель—прибор".

Разъемные соединители должны обеспечивать многократное соединение и разъединение без существенного ухудшения характеристик. Соединители этого класса часто называют оптическими разъемами. Одноволоконные соединители предназначены для соединения с заданными характеристиками одиночных оптических волокон друг с другом или с другими элементами системы передачи, соединители "кабель—прибор" — для соединения волоконно-оптического кабеля с источником или детектором оптического сигнала. В каждом из классов могут существовать подклассы, определяемые особенностями соединяемых элементов. Например, в классе неразъемных ОС можно выделить соединители, изготовленные с использованием арматурных деталей электрических субминиатюрных коаксиальных разъемов типа LEMO. Такие соединители имеют простую и надежную конструкцию, обеспечивая с помощью встроенных в разъем компонентов постоянный оптический контакт со световодной линией и разъемное соединение электрических выводов оптических компонентов с электронным обрамлением ВОСПИ. В классе многоволоконных оптических соединителей можно выделить двухволоконные, четырехволоконные и семиволоконные ОС.

Исходными данными для разработки конструкции оптического соединителя являются оптические и конструктивные характеристики кабеля:

- диаметр сердцевины и оболочек оптического волокна (ОВ);
 - угловая апертура волокна;
 - индикатриса (диаграмма) излучения ОВ;
 - допустимое отклонение формы сердцевины и оболочек ОВ от округлости;
 - количество, материал и размеры защитных оболочек оптического кабеля.
- Кроме того, необходимо знать характеристики источника и детектора излучения:
- форму, размер излучающей поверхности и светочувствительной площадки;
 - диаграммы излучения и приема.

Основным элементом, определяющим качество световодной линии связи, является оптическое волокно. Передача излучения по оптическому

кабелю от передатчика к приемнику сопровождается потерями. Источники потерь в соединенных встык ОВ могут быть разделены на две группы: потери из-за свойств волокон (собственные потери) и потери из-за дефектов во внешнем соединяющем механизме (несобственные потери). Собственные потери зависят от сечения кабеля, материала волокна и показателя его преломления, изменения диаметра по длине кабеля. Допустимые изменения этих потерь определяются на стадии изготовления ОВ. Несобственные потери в основном зависят от неточного совмещения оптических осей, от расстояния и угла между стыкуемыми торцами ОВ и френелевских потерь на отражение от торцов световодов. Френелевские потери, которые зависят от чистоты обработки торцов световодов, сравнительно малы и колеблются от 0,1 до 0,4 дБ.

Незначительное смещение торцов двух оптических волокон вызывает резкое увеличение оптических потерь (рис.1). Для достижения коэффициента связи, равного 90%, угол между двумя осями ОВ должен быть меньше 2° , а расстояние между торцами ОВ не должно превышать 4 мкм^6 . Осевое смещение, равное половине диаметра

ОВ, вызывает потери более 4 дБ. Такой же зазор между торцами ОВ дает ослабление 6 дБ. В то же время чрезвычайно важно, чтобы подготовленные торцы оптических волокон не касались друг друга, так как в противном случае их многократное соприкосновение в результате вибрации и ударов может привести к раскалыванию и возникновению царапин на поверхности торцов ОВ и понизит эффективность оптической связи ОС¹⁷.

Как отмечалось выше, оптический соединитель представляет собой устройство, обеспечивающее многократное соединение — разъединение двух отрезков оптического кабеля между собой, оптического кабеля с источником и приемником оптических сигналов. Он должен не только служить для механического соединения, но и являться как бы продолжением оптического кабеля; иметь малые

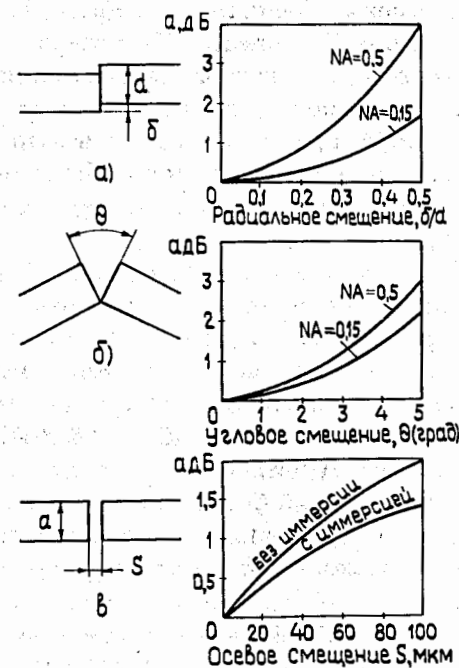


Рис. 1. Переходные потери при соединении ОВ, обусловленные разьюстировкой.

потери, высокую помехозащищенность, малую массу и объем. Эффективное соединение ОВ — трудная задача. Необходима не только оптическая совместимость, но и согласованность между всеми деталями волноконно-оптической системы. Источник светового излучения и детектор должны не просто механически согласовываться с торцами ОВ, но и соответствовать числовой апертуре кабеля, длине световой волны, ширине полосы и коэффициенту отражения¹⁸ /.

Важной характеристикой ОВ является угловое распределение выходящего из него светового потока — апертура, которая определяет его светосообщающую и светопропускающую способность — светосилу. Особое значение эта характеристика имеет при стыковке ОВ с приемниками и источниками излучения. Диаметр соединяемых световодов определяет как размеры, так и конструкцию ОС. Способ ввода и вывода излучения также определяет многие конструктивно-технологические параметры ОС. Особенно сложным является ввод максимального количества световой энергии в оптическую линию. Некогерентность излучения и широкий угол пучка света современных светодиодов позволяют вводить в ОВ всего 1–2% общей мощности. Кроме того, диаметр площади излучения светодиодов намного больше диаметра сечения ОВ, что дополнительно увеличивает потери в зоне стыковки. Соединение ОВ — детектор излучения, напротив, оказывается простым, так как размеры чувствительной площадки фотодиодов либо равны, либо значительно превышают диаметр сердцевинки волокна, а диаграмма приема фотодиодов шире, чем диаграмма излучения ОВ. При соединении любым методом большое значение имеет качество торцовых поверхностей ОВ. Подготовка их к монтажу составляет еще одну серьезную проблему.

Основной показатель ОС — это вносимые потери. На долю ОС в ВОСПИ приходится основные потери при ее сопряжении. Уменьшенное затухание сигнала в ОС позволяет увеличивать строительную длину ВОК. Для обеспечения низкого уровня потерь в ОВ погрешность изготовления элементов точной юстировки волокон не должна превышать 5 мкм, что конструктивно и технологически сложно. Кроме того, ОС для ВОСПИ должны обладать стойкостью к механическим воздействиям, выдерживать множество циклов сочленений — расчленений без значительных усилий со стороны оператора и без заметного ухудшения свойств, иметь дешевую и надежную конструкцию, не превосходить по размерам и массе соответствующие электрические разъемы.

Оптические соединители состоят из следующих основных узлов:

- кабельной части, содержащей прецизионный наконечник, в котором размещены соединяемые ОВ;
- соединительной муфты, содержащей прецизионные элементы ориентирования и фиксации соединяемых волокон и согласующих элемен-

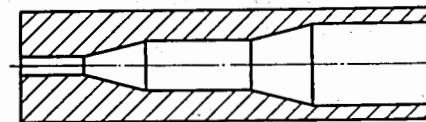


Рис. 2. Форма направляющего канала для наконечника ϕ 2,5 мм (юстируемый ОС).

тов оптоэлектронных приборов; — приборной части, содержащей прецизионный наконечник, в котором размещены согласующие элементы.

Кабельная и приборная части, соединительная муфта ОС имеют комплект арматурных деталей, обеспечивающих закрепление оболочек ВОК, а также корпусов оптоэлектронных приборов и защиту прецизионных узлов от воздействия внешних факторов при эксплуатации. В соединителях типа "кабель—прибор" соединительную муфту часто объединяют в одном корпусе с их приборной частью.

Прецизионные наконечники и элементы их ориентирования и фиксации являются наиболее сложными узлами ОС, обеспечивающими достижение заданных выходных параметров соединения: потерь оптического сигнала, переходного затухания.

Наконечники ОС в наших разработках использовались круглые: ϕ 2,5 и ϕ 3,6 мм. Форма направляющего канала приведена на рис.2. Изгибы в канале при обработке скругляются, делаются плавными, в них не должно быть выступов во избежание повреждения ОВ при монтаже. Наконечники выполнялись из износостойких коррозионноустойчивых материалов (в основном из нейзильбера, а также из хромосодержащих нержавеющей сталей).

Технологические процессы, применяемые при резке кабеля и удалении оболочек, в основном совпадают с аналогичными процессами для электрических кабелей, однако хрупкость ОВ требует создания специальных приспособлений и необходимого оборудования. Наибольшие сложности возникают при удалении защитной оболочки с ОВ в прецизионных соединителях.

Самой трудоемкой является сборка кабельной части наконечника. ОВ закрепляется в направляющем канале наконечника с помощью клея в основном на эпоксидной основе. Время полимеризации такого клея, необходимое для достижения требуемых физико-механических свойств, примерно сутки. Затем производится спецобработка (шлифовка, полировка, мытье в бензине и мыльной воде) торцовой поверхности наконечника. Прецизионные детали наиболее трудоемки в изготовлении, поэтому конструкция и технологический процесс изготовления ОС должны разрабатываться таким образом, чтобы количество прецизионных деталей было наименьшим. Требования к точности соединения определяются, в основном, величиной допустимых потерь сигнала и диаметром сердцевин соединяемых ОВ. В настоящее время наиболее

используемы ОВ с диаметром сердцевины 50 мкм (КК125/50). В большинстве систем передачи информации допустимые потери в ОС не должны превышать 1,5–2 дБ/км, что соответствует допустимому эксцентриситету сердцевин соединяемых ОВ не более 5–10 мкм.

Существенное снижение требований к точности изготовления деталей и упрощению конструкции ОС возможно при использовании ОВ с полимерной оболочкой, имеющих сердцевину из кварца диаметром 200 и 400 мкм. Однако применение оптических кабелей КП200 и КП400 для построения широкополосных ВОСПИ весьма ограничено.

Другой путь — усложнение конструкции ОС и наличие контроля оптического сигнала в процессе регулировки. Соосность соединяемых волокон здесь достигается не за счет точности изготовления деталей ОС, а за счет введения в него дополнительных достаточно точных деталей, образующих механизм для регулировки взаимного положения осей волокон (юстируемый ОС). Использование центрирующих направляющих втулок для ОС с круглыми наконечниками позволяет снизить требования к точности получения наружного диаметра наконечников и внутреннего диаметра втулок. Применением дополнительных деталей для закрепления волокна в наконечнике удалось увеличить диаметр направляющих каналов до величины, не требующей изготовления специнструмента. Использование стеклянных микрокапилляров (рис.3а) улучшает условия шлифовки и полировки торцов наконечников после сборки и упрощает процесс сборки кабельной части ОС. Таким образом, прецизионные стеклянные микрокапилляры являются важным микрооптическим компонентом элементов ВОСПИ. Можно имитировать прецизионное отверстие необходимого диаметра для ОВ, состыковав ролики определенного размера ¹⁹. При этом соотношение диаметров роликов и оптического волокна (рис.3б,в):

- для трех роликов $D_{\text{рол.}} = 6,47 a \text{ вол.}$;
- для четырех роликов $D_{\text{рол.}} = 2,4 a \text{ вол.}$

Оба варианта использованы в наконечниках цилиндрической формы ϕ 3,6 мм, причем габариты соединителя с четырьмя роликами будут значительно меньше, так как:

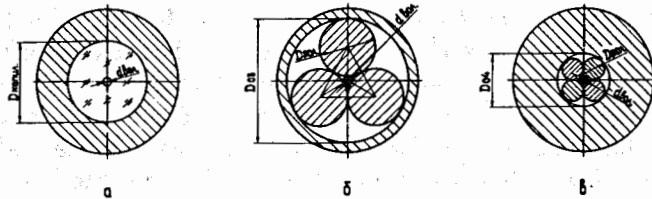


Рис. 3. Элементы ориентирования ОВ в наконечнике

$$D_{03} = 2 (D_{\text{рол.}} + 0,5 a \text{ вол.}) = 2 (6,47 a \text{ вол.} + 0,5 a \text{ вол.}) = 13,94 a \text{ вол.}$$

$$D_{04} = 2 D_{\text{рол.}} + a \text{ вол.} = 2 \cdot 2,4 a \text{ вол.} + a \text{ вол.} = 5,8 a \text{ вол.}$$

Однако при выборе конструкции ОС необходимо учитывать реальность изготовления роликов нужного диаметра.

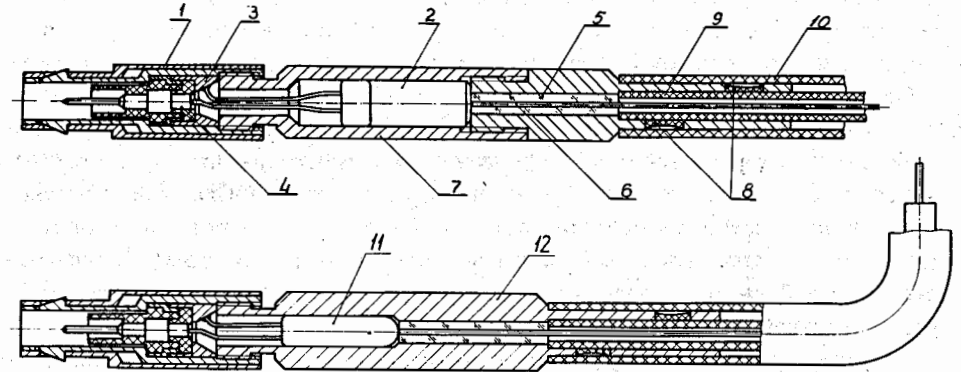


Рис. 4. Активный разъемный соединитель с использованием электрического разъема типа LEMO: (1 — корпус; 2 — фотодиод; 3-4 — точки распайки электрических выводов; 5 — капилляр; 6-12 — наконечники; 7 — корпус приборной части; 8 — отверстия в хвостовике для нанесения клея; 9 — ВОК; 10 — защитный кембрик; 11 — светодиод).

Передняя панель

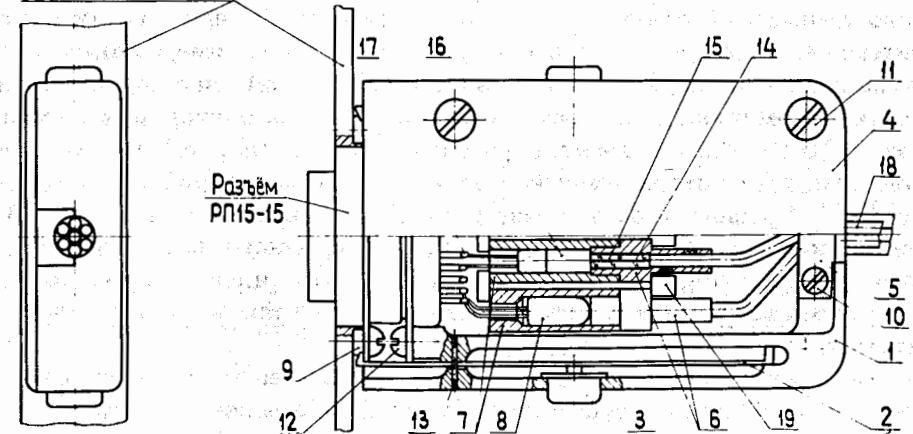


Рис. 5. Многоконтактный активный разъемный соединитель на базе электрического разъема РП-15-15: (1 — корпус; 2 — пластинчатая пружина; 3 — кнопка; 4 — крышка корпуса; 5 — фиксатор ВОК; 6 — втулка; 7 — втулка для оптического компонента; 8 — светодиод; 9-13 — элементы крепления; 14 — ОВ; 15 — капилляр; 16 — фотодиод).

Эти и другие приемы позволяют существенно снизить требования к точности изготовления прецизионных деталей, однако сама конструкция ОС при этом усложняется. Ниже приведены основные конструктивно-технологические решения нестандартных ОС, разработанных авторами, в которых ОВ согласуются механически. На рис.4 показан соединитель с постоянным оптическим контактом¹¹, выполненный на базе субминиатюрного электрического коаксиального разъема типа LEMO. Стыкуемые с ОВ оптические компоненты юстируются в процессе монтажа системы передачи информации по минимуму потерь в линии связи и фиксируются. При этом потери, вносимые оптическим контактом, не превышают 2 дБ, разъемное соединение с электронным обрамлением ВОСПИ обеспечивается электрическими выводами разъема. Аналогично выполнен многоконтактный соединитель с постоянным оптически контактом¹², изготовленный на базе электрического разъема РП-15-15 (рис.5), с механическим фиксатором активной части соединителя.

Универсальный юстируемый опторазъемный соединитель "кабель-прибор"¹⁵ приведен на рис.6. Стыкующиеся части соединителя юстируются в процессе монтажа ВОСПИ по минимуму потерь в линии связи. При этом методе стыковки потери, вносимые соединителем, могут быть уменьшены до уровня менее 1 дБ. Подобное техническое решение использовано и в юстируемом оптическом соединителе (рис.7) "кабель-кабель"¹³. Эксцентриситет эксцентриков составил ~0,1 мм, что обеспечило точность их установки не хуже 1 мкм/град. Потери в таком соединителе не выше 1,8 дБ на стык. На рис.8 в качестве примера показано использование юстируемых ОС в высокоскоростной световодной линии связи, разработанной авторами, с использованием полупроводникового лазера ИЛПН-102 и лавинного фотодиода ЛФД-2. На рис.9 показан многоконтактный опторазъемный соединитель "кабель-прибор" на матрицах^{13,14}. Матрицы с очень точно выполненными отверстиями для ОВ и оптических компонентов имеют точно выдержанный шаг таких отверстий, которые совмещаются с помощью штифтов и специальных ловителей. Вносимые потери с таких соединителей не превышают 0,8–1,8 дБ на контакт.

Используя прецизионные наконечники и элементы ориентирования и фиксации ОВ можно существенно упростить соединители "кабель-кабель", объединяя их в одном корпусе с помощью соединительной муфты (рис.10). Потери, вносимые оптическим контактом с таком соединении, обычно не более 3÷5 дБ. В некоторых случаях поворотом наконечников друг относительно друга удается уменьшить потери в линии связи до 2÷2,5 дБ. Таким образом, перечисленные соединители могут быть рассчитаны на любые типы ВОК: круглые и плоские, одно- и многоканаль-

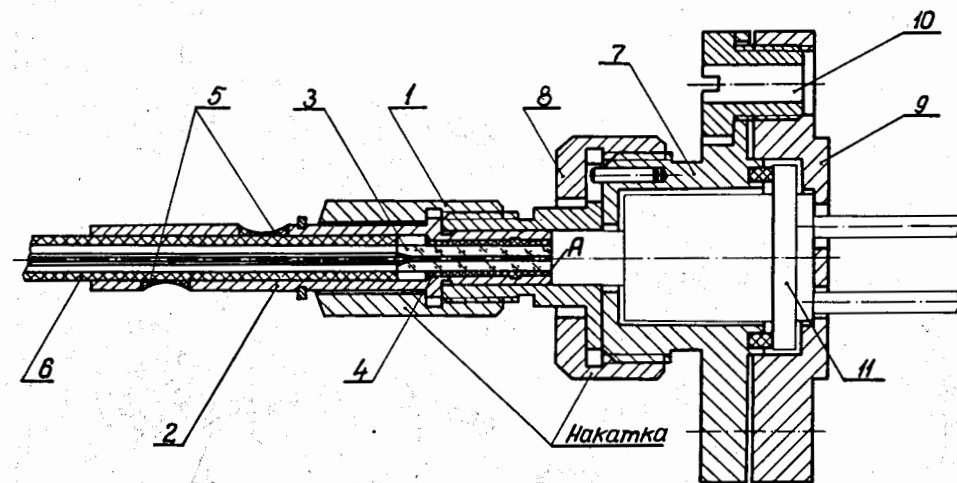


Рис. 6. Универсальный юстируемый разъемный соединитель: (1 — накидная гайка; 2 — хвостовик; 3 — капилляр; 4-5 — эпоксидный компаунд; 6 — оболочка ВОК; 7 — корпус приборный; 8 — фиксатор; 9 — основание приборной части ОС; 10 — элемент крепления; 11 — суперлюминисцентный светодиод ИПЛН-301).

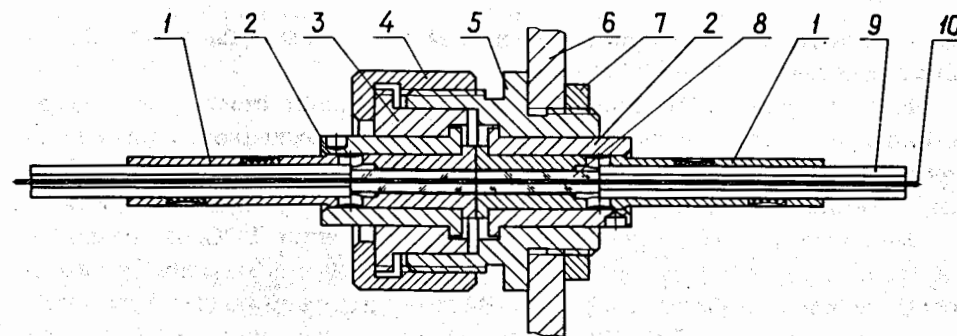


Рис. 7. Юстируемый оптический соединитель "кабель-кабель": (1 — хвостовик; 2 — втулка эксцентриковая; 3 — втулка фиксирующая; 4 — накидная гайка; 5 — корпус гильзы; 6 — панель прибора (при необходимости); 7 — гайка; 8 — капилляр; 9 — оболочка ВОК; 10 — ОВ).

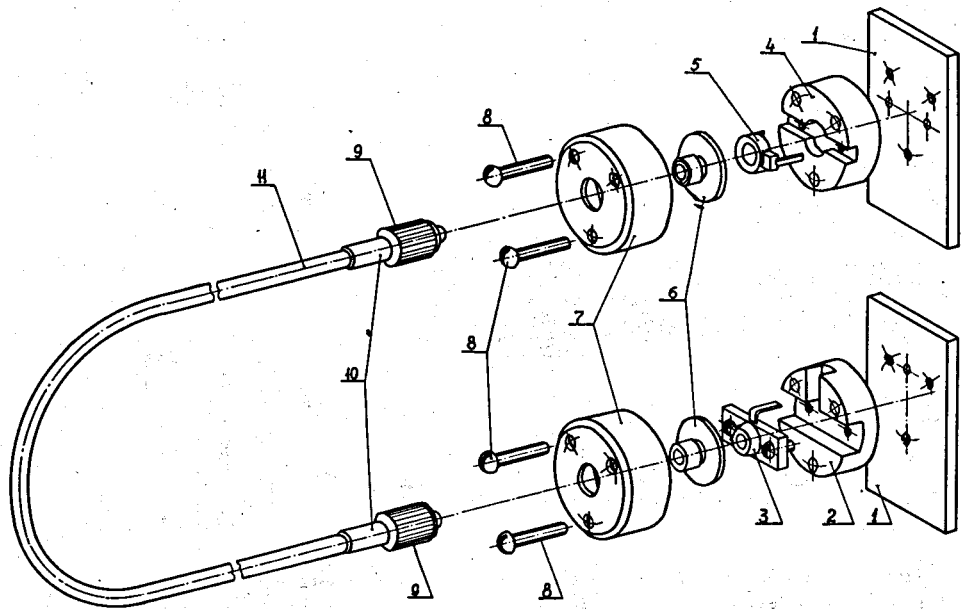


Рис. 8. Использование юстируемых ОС в высокоскоростной линии связи: (1 — панель КАМАК 2М; 2-4 — корпус ОС; 3 — лазер; 5 — ЛФД-2; 6 — юстируемая втулка; 7 — крышка-фиксатор ОС; 8 — элементы крепления; 9 — накидная гайка; 10 — хвостовик; 11 — ВОК).

ные и позволяют с минимальными потерями стыковать кабели с ОВ разного диаметра.

Использование ВОК для передачи информации стало уже прочно устоявшимся направлением. Развитие ВОСПИ сдерживалось из-за отсутствия стандартов на оптические кабели и ОС для них. По мере овладения технологией производства ВОК стоимость их будет снижаться.

Основные потребители ОС — это разработчики ВОСПИ, главным образом, на ближние расстояния (управление высоковольтными электрофизическими установками, связь внутри и между ЭВМ). В ближайшем будущем произойдет значительный рост потребности в ОС самого различного назначения. Это объясняется увеличением объема производства и разработкой новых применений ВОСПИ в технике.

Авторы выражают благодарность М.А. Воеводину за поддержку и интерес к работе, П.К. Маньякову и В.А. Белякову — за полезные обсуждения.

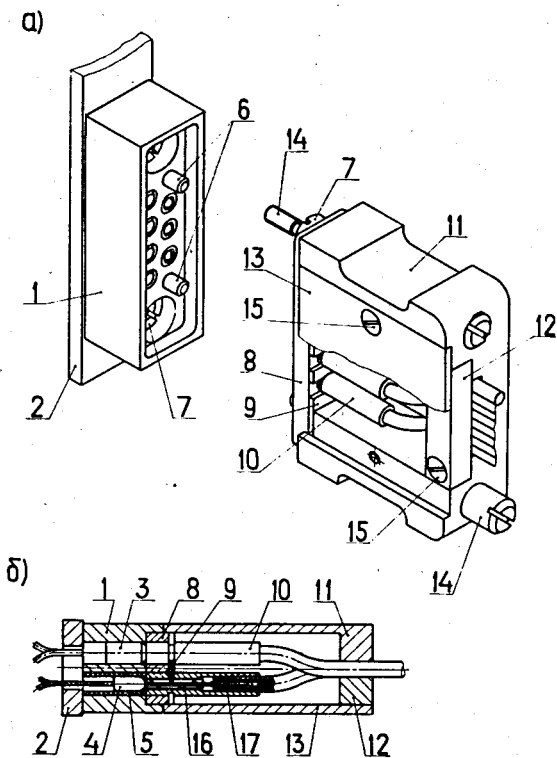


Рис. 9. Многоконтактный ОС на матрицах: а) разъем; б) разъем в разрезе (1 — корпус (приборная часть)); 2 — передняя панель модуля КАМАК; 3,4 — оптические элементы; 5 — изолирующая втулка; 6 — направляющие штифты; 7 — узел крепления; 8 — юстировочная пластина; 9 — гребенка; 10 — наконечник; 11 — корпус (кабельная часть ОС); 12 — фиксатор ВОК; 13 — крышка; 14 — винт-фиксатор; 15 — элемент крепления; 16 — капилляр; 17 — ОС).

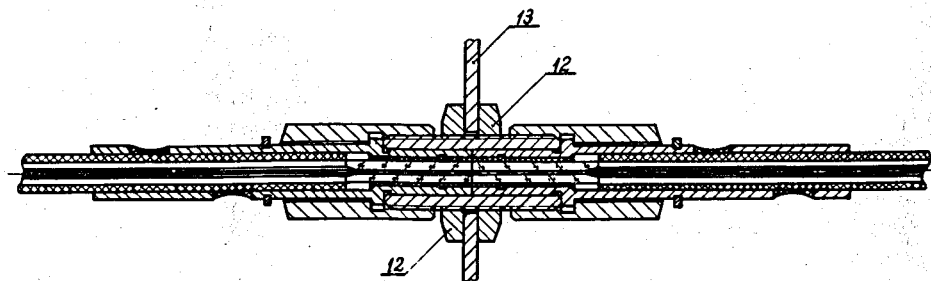


Рис. 10. Соединение ВОК с прецизионными наконечниками с помощью соединительной муфты (12 — элемент крепления; 13 — приборная панель (при необходимости)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов Ю.И. — ОИЯИ, 13-82-279, Дубна, 1982.
2. Романов Ю.И. — ОИЯИ, 13-83-478, Дубна, 1983.
3. Романов Ю.И. — ОИЯИ, 13-85-599, Дубна, 1985.
4. Романов Ю.И. — ОИЯИ, 13-86-566, Дубна, 1986.
5. Романов Ю.И., Турзо И. — 13-86-513, Дубна, 1986.
6. Радиоэлектроника за рубежом. 1972. Вып.45, с.32.
7. Электроника (пер. с англ.), 1976, т.49, № 13, с.23.
8. Electronic Design, 1978, V.26, № 22, p.61-63
9. Техника средств связи. Сер. ВОС, 1985, вып.2, с.176.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 апреля 1991 года.

P13-91-148

Гусаков Ю.В., Романов Ю.И.
Волоконно-оптические нестандартные соединители
для световодных линий связи высоковольтных
электрофизических установок

Описаны принципы конструирования волоконно-оптических нестандартных соединителей для световодных линий связи высоковольтных электрофизических установок (ЭФУ), в которых применяется кабель с многомодовым световодом. Проблема стыковки в них решается с помощью механических устройств, не требующих для своего изготовления прецизионного или специального оборудования (разработки 1982–1990 г.г.)

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

P13- 91- 148

Gusakov Yu.V.; Romanov Yu.I.
Fiber-Optics Nonstandard Connectors
for Light-Pipe Connection Lines of High-Voltage
Electrophysical Apparatus

Fiber-Optics Nonstandard connectors for light-pipe connection lines of high-voltage electrophysical apparatus are described in which a cable with a multi-mode light pipe is used. The problem of joining in them is solved with the help of mechanical devices which do not require precision or special equipment for their preparation (developments of 1982–1990).

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1991