

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, Спектральное уплотнение каналов в волоконно-оптических линиях связи (обзор),
Квантовая электроника, 1983, том 10, номер 2, 245–264

<https://www.mathnet.ru/qa4033>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

22 мая 2025 г., 13:54:59



Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов

СПЕКТРАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ КАНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ (ОБЗОР)

Показана перспективность спектрального уплотнения каналов в волоконно-оптической связи — передачи по одиночному волоконному световоду нескольких информационных сигналов одновременно на различных оптических несущих. Рассмотрены различные схемы уплотнителей и делителей каналов, созданные в результате приложения спектроскопических методов к оптической связи, а также схемы, основанные на новых физических принципах. Описаны существующие системы связи со спектральным уплотнением каналов. Сделан вывод о возможности спектрального уплотнения десятков каналов в одном световоде длиной в десятки километров.

1. Полоса пропускания волоконных световодов

Одним из важных достоинств волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является их высокая информационная пропускная способность. При передаче информации по одномодовому волоконному световоду (ВС) с помощью лазеров можно достичь параметра широкополосности (произведение ширины полосы на расстояние) ~ 100 ГГц·км. Хотя это значение очень велико, оно лишь в слабой степени отражает потенциальную широкополосность ВС.

Действительно, если исследовать полосу пропускания ВС так же, как в радиотехнике, то на вход ВС следует подавать свет различной частоты и после регистрации амплитуды сигнала на выходе строить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). В сущности, исследование зависимости спектральных потерь излучения в ВС и является определением его АЧХ. Одна из таких характеристик представлена на рис. 1 [1]. Естественно принять за края полосы пропускания длины волн, для которых уровень оптической мощности на 3 дБ ниже, чем на длине волны максимальной прозрачности. По этому критерию спектральная полоса пропускания километрового отрезка ВС простирается примерно от 0,8 до 1,8 мкм, что соответствует $\Delta f \approx 2 \cdot 10^5$ ГГц и на несколько порядков превышает полосу пропускания, определяемую параметром широкополосности. Дело в том, что последний введен для случая передачи на одной оптической несущей; он характеризует предельную широкополосность сигнала, модулирующего оптическую несущую, который может быть ею перенесен по световоду длиной 1 км без искажения.

Увеличению параметра широкополосности ВС препятствуют межмодовая, материальная и волноводная дисперсии, поэтому основные усилия в предшествующие годы были направлены на преодоление данных факторов. Это привело к тому, что термины «информационная полоса ВС» или «ширина полосы ВС», распространившиеся в литературе для характеристики систем с одной оптической несущей, стали зачастую восприниматься как предельные характеристики пропускной способности ВС. Однако поскольку оптические несущие могут быть выбраны в любой точке широкого спектрального диапазона 0,8—1,8 мкм, то именно этот диапазон следует считать полной полосой пропускания ВС, характеризующей его предельную информационную емкость. Для этой сверхширокой полосы ($\sim 2 \cdot 10^5$ ГГц), со-

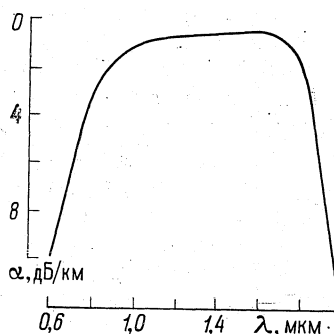


Рис. 1. Зависимость затухания в ВС от длины волны ([1], ось ординат обращена)

ответствующей оптическому окну прозрачности, [был предложен более подходящий для оптической связи термин «оптическая полоса пропускания световода» [2].

Реализация широкой информационной полосы при передаче сигнала по ВС на одной оптической несущей лишь на время отодвинула решение более общей проблемы — использование для связи всей оптической полосы пропускания световода.

Сверхширокая оптическая полоса пропускания ВС может быть освоена лишь посредством уплотнения каналов. Временное уплотнение (передача все более коротких оптических импульсов со все более высокой частотой следования) предъявляет чрезвычайно высокие требования к быстродействию источников, модуляторов и приемников излучения и не может исчерпать всей пропускной способности ВС. Более того, возможности временного уплотнения ограничены дисперсионными характеристиками ВС.

Частотное уплотнение в оптическом диапазоне (одновременная передача по ВС многих каналов на различных оптических несущих) позволяет использовать всю оптическую полосу пропускания световода. При интервале между оптическими несущими 10 нм в диапазоне 0,8—1,8 мкм можно реализовать 100 уплотненных каналов. Для такого уплотнения в оптическом диапазоне (в котором принято указывать длины волн оптических несущих, а не их частоты) в зарубежной литературе, по аналогии с термином «frequency — division multiplexing» для радиодиапазона, укоренился термин «wavelength — division multiplexing». Вместо этого термина был предложен термин «спектральное уплотнение» [2, 3], к настоящему времени ставший в отечественной литературе общепринятым [4]. Основанием для использования последнего термина, помимо его краткости, служит тот факт, что набор уплотненных оптических несущих при анализе с помощью оптических приборов дает оптический спектр из ряда дискретных линий.

Рассмотрим в качестве примеров две ситуации, когда спектральное уплотнение оказывается предпочтительным или незаменимым.

1. Предположим, что в сетях связи реализованы световодные тракты с допустимой скоростью передачи 10 Гбит/с при использовании одной оптической несущей. Современная электронная коммутационная техника рассчитана на работу с импульсами длительностью не менее 1 нс. В соответствии с этим в сетях связи установлены терминалы со скоростью передачи не свыше 1 Гбит/с. При скорости 10 Гбит/с потребовалась бы разработка соответствующих радиотехнических устройств уплотнения и разуплотнения каналов. Гораздо проще использовать для каждого канала на 1 Гбит/с свои оптические несущие, допускающие уплотнение и разуплотнение с помощью достаточно простых оптических устройств.

2. Широкое распространение получили ВС со ступенчатым профилем показателя преломления, с кварцевой сердцевиной в кварцевой или полимерной оболочке. К сожалению, параметр широкополосности у них мал (~25 МГц·км). Следовательно, при использовании одной оптической несущей никакое радиотехническое уплотнение не поможет передать по такому ВС большой поток информации (скажем, более одного видеосигнала на расстоянии 5 км). Единственным методом, позволяющим эффективно использовать потенциальную широкополосность ВС со ступенчатым профилем показателя преломления, является спектральное уплотнение.

К настоящему времени имеется значительное количество работ по устройствам спектрального уплотнения каналов. Однако работ обзорно-аналитического плана явно недостаточно [5, 6] (к тому же они устарели). Данным обзором мы хотели бы восполнить этот пробел. Авторы не стремились дать полный список литературы по спектральному уплотнению. Главную задачу мы видели в определении и систематизации основных тенденций в исследованиях; ссылки даны на наиболее интересные работы.

2. Спектральное уплотнение и спектроскопия

Широкая с радиотехнической точки зрения полоса частот модуляционного сигнала занимает весьма малый оптический спектральный интервал: так, при $\lambda=1$ мкм $\Delta f \approx 3$ ГГц соответствует $\Delta \lambda \approx 10^{-2}$ нм. С другой стороны, спектральные линии источников излучения весьма широки — от десятков нанометров у светодиодов до долей нанометра у одномодовых полупроводниковых лазеров. Поэтому модуляция этих линий информационным сигналом практически не изменяет их формы.

Введение в ВС разных оптических несущих может быть осуществлено спектрально-неизбирательными элементами, например с помощью направленных световодных ответвителей [3]. Спектральная избирательность необходима при разуплотнении оптических несущих, что сводится к разделению спектральных линий.

В спектроскопии линии считаются разрешенными, если удовлетворяется критерий Рэлея. В оптической связи недостаточно удовлетворять этому критерию. Во-первых, при разделении линий (рис. 2) следует как можно полнее собрать энергию от каждой из них (заштрихованные области на рис. 2), поскольку для современных высокопрозрачных ВС каждый децибел потерянной мощности связан с уменьшением длины линии связи. Во-вторых, доля энергии от соседней линии (область с двойной штриховкой на рис. 2) должна быть очень малой, что определяет низкий уровень перекрестных помех между каналами. В-третьих, желателен минимальный интервал между оптическими несущими для более полного использования оптической полосы пропускания. И наконец, в системах связи необходимы малые габариты блоков. Хотя все эти требования противоречивы, они допускают компромиссные решения.

В спектроскопии давно известны устройства для разделения линий (монокроматоры, спектрографы). Большие габариты этих приборов обусловлены стремлением к высокому спектральному разрешению. Поскольку в настоящее время в оптической связи требования к интервалам между оптическими несущими невысоки (не менее 10 нм), малогабаритные делители каналов могут быть выполнены по обычным схемам спектральных приборов. Ближе всего делители каналов стоят к полихроматорам — спектроскопическим приборам для одновременного выделения и регистрации многих линий.

Выходное напряжение фотоприемников пропорционально принимаемой оптической мощности. Поэтому при максимальном заданном уровне перекрестных помех по электрической мощности — 40 дБ достаточно снизить перекрестные помехи по оптической мощности в делителе каналов до — 20 дБ. Большинство авторов руководствуются именно таким критерием при экспериментальном определении минимально допустимого спектрального интервала между оптическими несущими.

3. Делители каналов

Для спектрального анализа в классической спектроскопии [7] чаще всего используются селективные фильтры или элементы с угловой диспер-

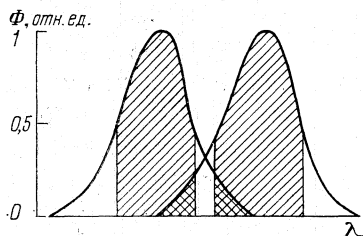


Рис. 2. Спектральное распределение мощности двух оптических несущих

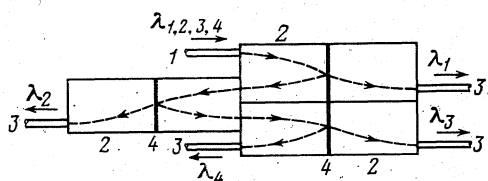


Рис. 3. Последовательное разделение каналов с помощью светофильтров [8, 9]:

1 — входной ВС; 2 — фокусирующие стержни; 3 — выходные ВС; 4 — интерференционные светофильтры

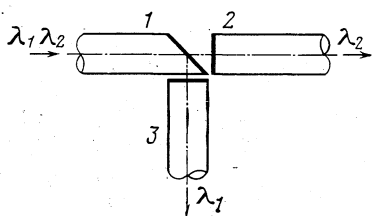


Рис. 4. Делитель каналов с интерференционными фильтрами на торцах ВС [13]

сией. Рассмотрим соответствующие классы спектральных делителей каналов, отличающиеся последовательным или параллельным разуплотнением оптических несущих.

Последовательное разуплотнение каналов светофильтрами. Используемые в делителях светофильтры обычно пропускают узкую область спектра, а остальное излучение эффективно отражают. Чаще всего применяются интерференционные светофильтры. С помощью фильтров можно осуществить последовательное выделение оптических несущих (рис. 3 [8, 9]). В этой схеме шесть фокусирующих стержней состыкованы торцами, между которыми размещены интерференционные фильтры, причем каждый из них пропускает лишь одну оптическую несущую. Очевидно, что при последовательном разуплотнении для позднее выделяемых несущих происходит накопление потерь из-за большего пути сигнала в стержнях и увеличения абберационных искажений.

В [10] описаны специальные уголковые интерференционные фильтры, у которых одна грань (собственно фильтр) расположена наклонно к лучу, а другая отражает свет (уже отраженный фильтром) в направлении, обратном исходному. Поворотом уголка достигается перестройка полосы фильтра при постоянстве пути отраженного луча. Потери при выделении одной несущей от лазерного источника составляют $\sim 2,5$ дБ, интервал между несущими 30 нм. Поскольку интерференционные фильтры по принципу действия работают только в параллельных лучах, а ВС излучают расходящиеся пучки, необходимо размещать между каждой парой фильтр — световод коллимирующий элемент (объектив или фокусирующий стержень).

Интересная схема делителя разработана в [11, 12]. Излучение из входного ВС с четырьмя оптическими несущими коллимируется пристыкованным к световоду специальным микрообъективом и направляется в стеклянную пластину. Угол между осью объектива и нормалью к пластине составляет $\sim 15^\circ$, так что параллельный пучок в ней распространяется зигзагообразно. На пути луча в четырех участках поверхности пластины расположены соответствующие интерференционные светофильтры. Каждый фильтр пропускает только свою несущую, излучение которой фокусируется микрообъективом на детектор. Многослойные фильтры пропускают до 90 % световой энергии в узкой спектральной полосе и эффективно отражают излучение вне ее. Устройство выполнено в виде монолитного блока и надежно разделяет четыре несущих в диапазоне 750—900 нм. Удачная конструкция, специальные микрообъективы и отличные светофильтры позволили снизить потери в каждом канале до 0,4—1,3 дБ.

В схемах последовательного разуплотнения увеличение числа каналов вызывает пропорциональное увеличение числа элементов схемы (фильтров, делительных пластин, зеркал, фокусирующих элементов) и соответственно потерь излучения. Следовательно, число каналов при последовательном разделении не должно быть большим.

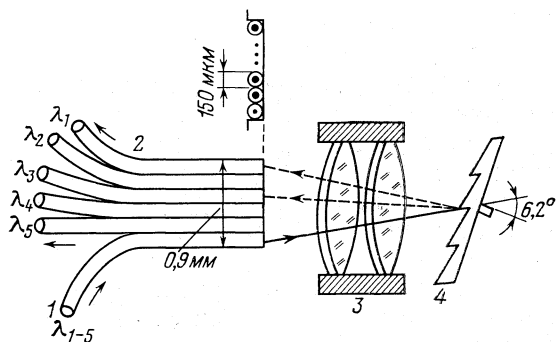


Рис. 5. Параллельное разделение каналов с помощью дифракционной решетки по автоколлимационной схеме [14]:

1 — входной ВС; 2 — выходные ВС; 3 — объектив; 4 — решетка

Для двух каналов схема разделения светофильтрами выглядит предельно просто. Интересная двухканальная конструкция описана в [13]. Три ВС с диаметрами сердцевины 50—60 мкм были состыкованы в пересекающихся V-образных канавках и заклеены в них (рис. 4). На торцы всех ВС предварительно нанесены 19-слойные покрытия, образующие различные интерференционные светофильтры. Излучение из ВС 1 с длиной волны $\lambda=1,2$ мкм попадает в ВС 2 через два длинноволновых светофильтра. Излучение с $\lambda=0,8$ мкм отражается от длинноволнового фильтра на скошенном торце ВС 1 и попадает в ВС 3 через коротковолновый фильтр. Потери в каналах составили 1—2 дБ при развязке 40 дБ.

Итак, разделение малого числа каналов можно вполне успешно выполнить последовательным образом с помощью светофильтров. Однако количество спектрально уплотненных несущих в одном ВС может достигать нескольких десятков; набор таких несущих может образовать весьма широкий спектр. В этом случае разделение их светофильтрами было бы столь же затруднительным, как исследование сложных широких спектров без диспергирующих элементов.

Параллельное разуплотнение диспергирующими элементами. Разложение светового потока в спектр осуществляется с помощью призмы или дифракционной решетки. Оптической связью на сегодня хорошо охвачен диапазон 0,8—0,9 мкм и осваивается более длинноволновый диапазон 1,1—1,6 мкм. Известно [7], что сильное уменьшение дисперсии призмных приборов с ростом длины волны делает их неудобными для ближней ИК области. Кроме того, дисперсия призмы, в отличие от решетки, непостоянна по спектру. Поэтому большая часть делителей изготавливается на основе дифракционных решеток, чему в значительной мере способствует развитая технология изготовления решеток интерференционным методом.

Автоколлимационная схема. Многие делители выполнены по широко распространенной автоколлимационной схеме. Рассмотрим вначале схемы делителей, копирующие в уменьшенном варианте обычную схему автоколлимационного спектрального прибора, например схему, описанную в [14] (рис. 5). Торцы ВС размещены в фокальной плоскости объектива с хорошей коррекцией aberrаций (фокусное расстояние 23,8 мм, диаметр 14 мм). Излучение различных оптических несущих из входного ВС (моделирующего собой конец световодной линии) коллимируется объективом, дифрагирует на решетке и снова попадает в объектив, который создает на торцах приемных ВС «разноцветные» изображения излучающего торца. Приемные ВС разводят излучение каждой несущей на фотоприемники (или в различные волоконно-оптические линии). Дифракционная решетка изготавливается с блеском на определенной длине волны, т. е. с максимальной дифракционной эффективностью в заданном рабочем диапазоне. В описанном делителе решетка изготовлялась с помощью анизотропного травления кремниевой подложки по кристаллическим осям сквозь предварительно нанесенную маску (с последующим золочением). Решетка имела 250 штрих/мм и дифракционную эффективность $\sim 90\%$ в диапазоне 820—880 нм.

Спектральные характеристики делителя (рис. 6) позволяют судить о потерях оптической мощности при ее переходе из выходного ВС в приемные; экспериментальные точки получены для различных длин волн монохроматического излучения во входном ВС. Спектральная ширина излучения составляла 2 нм, что моделировало излучение полупроводникового лазера. Из кривых видно, что потери в каналах делителя достигают 1,1—1,4 дБ. Это показывает основное преимущество параллельного

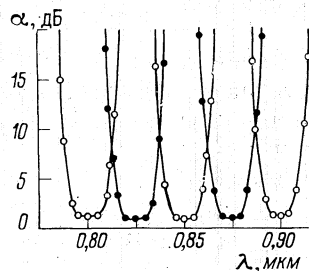


Рис. 6. Спектральные характеристики делителя каналов [14], α — потери

делителя — возможность разделения многих каналов с одинаково малыми потерями. Спектральный интервал между каналами составил 25 нм, а перекрестные помехи менее — 30 дБ.

Хотя делители с призмами распространены мало, для полноты отметим, что их конструкции и основные характеристики подробно рассмотрены в [5]. Автоколлимационный делитель с призмой легко получить, заменив в схеме рис. 5 решетку на призму с одной металлизированной гранью. В [6] использована призма из CdS без металлизации, но соответственно с двумя объективами — коллиматорным и фокусирующим (с одинаковым фокусным расстоянием 27 мм). Потери в делителе равнялись 7 дБ, минимальный спектральный интервал между двумя из трех несущих составил 33 нм, перекрестные помехи были чрезмерно велики (—10 дБ) из-за широких линий излучения светодиодов.

Выбор параметров делителя. В автоколлимационной схеме пространственное разнесение двух соседних «разноцветных» изображений излучающей сердцевины световода определяется известной из спектроскопии формулой

$$\Delta x = FN\Delta\lambda, \quad (1)$$

где F — фокусное расстояние объектива; N — число штрихов решетки на миллиметр; $\Delta\lambda$ — спектральный интервал между соседними оптическими несущими.

Исходным параметром при конструировании делителя является диаметр сердцевины ВС в линии связи. «Разноцветные» изображения этой сердцевины в фокальной плоскости автоколлимационной схемы с безаберрационным объективом имеют примерно тот же диаметр, что и сердцевина. Однако диаметр сердцевины приемных ВС берется несколько большим; обычно больше и апертура приемных световодов, поскольку это снижает требования к точности юстировок и оптические потери в делителе. Большой размер сердцевины приемных ВС приводит к тому, что изображение излучающей сердцевины занимает лишь малую часть приемной. Тогда небольшое изменение длины волны оптической несущей, вызывая смещение изображения по приемной сердцевине, не приводит к уменьшению оптической мощности в канале (плато на кривых рис. 6). Этим обеспечивается постоянство амплитуды сигналов в каналах при нестабильных по длине волны источниках излучения (например, полупроводниковых лазерах, у которых длина волны излучения меняется с температурой) [15].

С учетом ожидаемой нестабильности длины волны оптической несущей и заданного диаметра излучающей сердцевины выбирается диаметр приемной сердцевины. При этом необходимо задаться линейной дисперсией $dx/d\lambda$ делителя, определяющей смещение изображения с изменением λ оптической несущей; тем самым определяется $FN = dx/d\lambda$. Внешний диаметр приемного ВС определяет Δx (обычно приемные световоды располагают вплотную друг к другу, как на рис. 5). Тогда из (1) по известным FN и Δx определяется минимальный спектральный интервал $\Delta\lambda$ между оптическими несущими.

В выборе параметров F и N есть известная свобода, ограниченная постоянством их произведения. На практике N не превышает 1300 штрих/мм. Слишком большое F чрезмерно увеличивает габариты делителя, кроме того, при большом F нужно брать объектив большого диаметра с тем, чтобы объектив захватывал весь расходящийся световой пучок, излучаемый входным световодом.

Все параллельные делители представляют собой, в сущности, мини-спектрометры. Как и у спектрометров, у делителя имеются диспергирующий элемент (решетка или призма), коллимирующий элемент (объектив или вогнутое зеркало), а также входная и выходная щели (их роль выполняют сердцевины излучающего и приемного световодов). Поэтому можно конструировать делители с различными разрешением и линейной

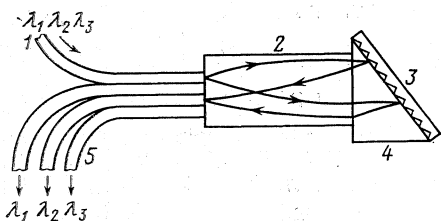


Рис. 7. Делитель на фокусирующем стержне:

1 — входной ВС; 2 — фокусирующий стержень; 3 — дифракционная решетка; 4 — призма-вставка; 5 — выходные ВС

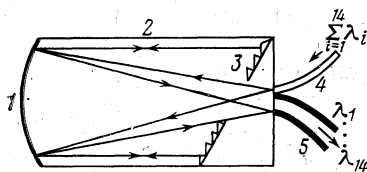


Рис. 8. Делитель в виде стеклянного блока [20]:

1 — зеркальный сферический торец; 2 — стеклянный блок; 3 — дифракционная решетка; 4 — входной ВС; 5 — выходные ВС

дисперсией (т. е. с разным числом каналов), варьируя параметры ВС, диспергирующего и коллимирующего элементов.

Так, если в рассмотренном выше делителе установить решетку с $N=1250$ штрих/мм, то спектральный интервал $\Delta\lambda$ между оптическими несущими можно сузить с 25 до 5 нм. Это позволит одновременно передать по одному световоду 160 каналов в диапазоне 0,8—1,6 мкм при низком уровне оптических потерь во всех каналах.

Измерение спектральных характеристик. На рис. 6 приведены типичные спектральные характеристики делителя, полученные при перестройке длины волны монохроматического излучения, вводимого во входной световод. При такой перестройке одиночное изображение излучающей сердцевинки постепенно изменяет свой «цвет» и последовательно сканирует торцы неподвижных приемных световодов. Спектральная ширина монохроматического излучения все время поддерживается равной ожидаемой спектральной ширине оптических несущих, которые оно моделирует.

Очевидно, что если оставить длину волны монохроматического излучения постоянной и сканировать приемным волокном неподвижное в этом случае изображение, также можно получить спектральную характеристику одного оптического канала, поскольку из (1) известно, какому $d\lambda$ соответствует смещение приемного волокна dx . Имея источники оптических несущих, путем последовательного сканирования соответствующих изображений приемными световодами возможно получить спектральные характеристики, адекватные кривым на рис. 6.

Второй метод не требует источника перестраиваемого монохроматического излучения с заданной спектральной шириной и имеет дело с реальными оптическими несущими, давая надежные значения перекрестных помех. Спектральные характеристики по этому методу впервые получены в работах [2, 3].

Делитель на фокусирующем стержне. Объектив в автоколлимационной схеме можно заменить фокусирующим стержнем [2, 16, 17]. Это дает возможность непосредственной подклейки торцов ВС к торцу стержня. Устройство становится полностью интегральным, когда решетка наносится на скошенный торец стержня [18] или подклеивается к стержню (рис. 7) через небольшую призму-вставку [19] (призма здесь не является диспергирующим элементом). Нанесение решетки непосредственно на скошенный торец стержня [18] может несколько ухудшить характеристики делителя, хотя достигнуты перекрестные помехи менее -20 дБ при спектральном интервале между оптическими несущими 36 нм. В делителе с призмой-вставкой при меньших на порядок помехах (около -30 дБ) спектральный интервал может быть сужен до 28 нм [19].

Мы сознательно не перечисляем (здесь и в некоторых случаях далее) все конструктивные параметры делителя, поскольку они могут быть выбраны довольно произвольно на основе все той же формулы (1), где F в данном случае является эффективным фокусным расстоянием стержня,

равным произведению n на $F_{\text{эРВ}}$ эквивалентного объектива в воздухе (n — показатель преломления стержня на его оси). В (1) N решетки следует разделить на показатель преломления материала призмы. Отметим, что габариты делителя в [19] не превышают размеров канцелярской скрепки.

Обычно $F_{\text{эРВ}}$ стержней мало. Так, в [2] $F_{\text{эРВ}} = 5$ мм и, следовательно, $\Delta\lambda/\Delta x$ должно быть велико, т. е. спектр несущих на переднем торце стержня сильно сжат. Авторы [2] использовали это обстоятельство, что позволило делителю охватить широкий спектральный диапазон (0,63—1,15 мкм) с возможностью эффективной концентрации энергии широких линий оптических несущих на торцах приемных ВС.

Делитель в виде стеклянного блока. Эксплуатационные требования к делителю (в частности, требование высокой надежности работы) хорошо удовлетворяются при интегральном исполнении делителей. Такое исполнение можно осуществить и без фокусирующего стержня, заменой воздушной среды между элементами делителя твердой прозрачной средой, а оптические элементы при этом будут размещены на поверхности образующегося прозрачного блока.

Эта идея реализована, в частности, в [20] (рис. 8). Блок из кварцевого стекла размерами $20 \times 10 \times 10$ мм имеет зеркальный сферический торец, на другом его конце — дифракционная решетка с $N = 150$ штрих/мм. Световоды с диаметром сердцевины 50 мкм приклеены к плоскому торцу в области отверстия в центре решетки. Очевидно, что и здесь реализована все та же автоколлимационная схема, но объектив заменен зеркалом (схема Литтрова). Следовательно, и для нее справедливо соотношение (1); F равно длине блока (половине радиуса кривизны зеркала), N следует делить на n . Световоды расположены вблизи оси зеркала, где абберационные искажения зеркального изображения весьма малы, поэтому авторы дали устройству название «Стимакс» (стигматический максимум). Зеркало в отличие от объектива лишено хроматических аббераций, поэтому делитель работал в широком диапазоне 0,5—1,6 мкм с 14 выходными ВС. В диапазоне 730—950 нм потери в делителе были около 3 дБ, перекрестные помехи менее —30 дБ.

Делитель на световедущей пластинке [21, 22]. Плоскопараллельная пластинка из плавленного кварца имела толщину 300 мкм, ширину 20 мм, длину 30 мм при радиусе кривизны заднего торца 60 мм (рис. 9). Этот торец был посеребрен, а передний плоский торец отполирован. К участку переднего торца прижата плоская дифракционная решетка (816 штрих/мм), посеребренная и покрытая тонким защитным слоем Al_2O_3 . Между решеткой и торцом находилась прослойка глицерина для моделирования работы решетки, вытравленной непосредственно на торце. Угол блеска решетки рассчитывался для лучей в стекле с $\lambda = 870$ нм. Боковые торцы пластинки были зачернены для поглощения излучения, дифрагирующего в нерабочие порядки. Диаметр сердцевины излучающего ВС составлял 300, а приемных ВС — 400 мкм. Между торцами ВС и торцом пластинки помещалась прослойка глицерина для устранения френелевских потерь. Излучение из ВС эффективно вводилось в пластинку и затем распространялось в ней за счет полного внутреннего отражения. Схема хода лучей та же, что и у предыдущего делителя.

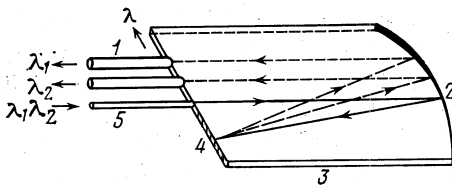


Рис. 9. Делитель на световедущей пластинке [22]:

1 — выходные ВС; 2 — закругленный посеребренный торец; 3 — пластинка из плавленного кварца; 4 — дифракционная решетка; 5 — входной ВС

ного внутреннего отражения. Схема хода лучей та же, что и у предыдущего делителя.

Делитель может обеспечить разделение с потерями ~3 дБ в каждом канале пяти оптических несущих со спектральным интервалом 50 нм; перекрестные помехи менее —20 дБ.

Задача коррекции аббераций в плоском делителе серьезно упрощается тем, что абберациями в

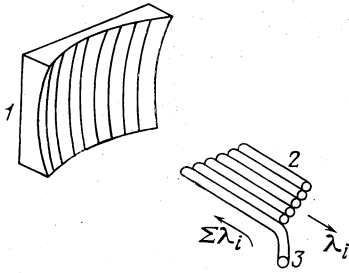


Рис. 10. Делитель с вогнутой решеткой:
1 — решетка; 2 — выходные ВС;
3 — входной ВС

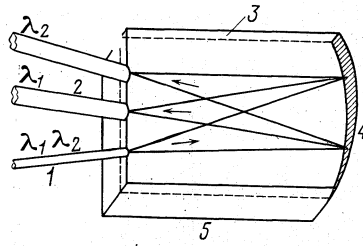


Рис. 11. Делитель на плоском волноводе с вогнутой дифракционной решеткой:

1 — входной ВС; 2 — выходные ВС;
3 — плоский волновод; 4 — вытравленная на торце алюминированная вогнутая решетка; 5 — стеклянная пластинка

плоскости, перпендикулярной пластинке, можно пренебречь, поскольку размер изображения в этой плоскости не может превысить толщины пластинки. Задача коррекции aberrаций становится двумерной. Достаточно рассмотреть ход лучей в плоской схеме делителя и найти профили передней фокальной и зеркальной задней линий, сводящие aberrации к минимуму; затем следует отполировать передний и задний торцы пластинки в соответствии с найденными профилями.

В связи с этим отметим, что привычные плоские оптические схемы спектральных приборов являются, как правило, двумерной идеализацией реальных элементов и хода лучей в трехмерном пространстве. Однако делитель на пластинке действительно представляет собой плоский миниспектрометр, являющийся двумерным интегральным аналогом обычного трехмерного автоколлимационного спектрометра с вогнутым сферическим зеркалом и плоской решеткой.

Делители с вогнутыми решетками. Наиболее эффективны с инженерной точки зрения спектрометры с вогнутыми дифракционными решетками: одиночная вогнутая поверхность формирует в пространстве ряд «цветных» изображений излучающей щели.

Простейший по конструкции и весьма эффективный делитель каналов с вогнутой решеткой описан в [23] (рис. 10). Для сведения к минимуму астigmatизма решетки и увеличения ее дифракционной эффективности (до 68 %) штрихи на ней нарезались по специальной программе: постепенно изменялось расстояние между штрихами, кроме того, их профиль в трех различных участках решетки был разным. Радиус кривизны решетки $R = 50$ мм, $N = 300$ штрих/мм, площадь 15×15 мм, покрытие золотое. Торцы ВС располагались вблизи центра кривизны решетки. Параметры делителя по-прежнему связаны формулой (1), но вместо F следует подставлять R . Формула (1) и эксперимент дают $\Delta\lambda = 20$ нм. Устройством способно разделять 10 каналов в диапазоне 700—900 нм с потерями в каналах менее 2,5 дБ и перекрестными помехами менее —30 дБ.

Интегральный плосковолноводный вариант делителя с вогнутой решеткой, прижатой к торцу стеклянной пластинки, выполнен в [24]; подобная конструкция, в которой решетка вытравлена непосредственно на торце стеклянной пластинки, описана в [25] (рис. 11). В поверхностном слое стеклянной пластинки размерами $35 \times 23 \times 2$ мм диффузией образован плоский градиентный световод глубиной 70 мкм. Вогнутая дифракционная решетка с $N = 1000$ штрих/мм и глубиной штрихов 200 нм образована на закругленном срезе волновода ($R = 35$ мм) с помощью ионного травления через фоторезистивную маску, полученную интерференцией коллимированных лазерных пучков. В эксперименте с 600-микронными приемными ВС две несущие с $\Delta\lambda = 43$ нм разделялись с перекрестными помехами менее —15 дБ.

В [25] отмечена малая эффективность ввода из ВС со ступенчатым профилем показателя преломления в градиентный плоский световод. Эта трудность преодолена авторами [26] применением ступенчатого плоского световода.

В [26] описана конструкция делителя с еще одним стеклянным слоем сверху пластинки на рис. 11. Внешние слои толщиной 1 мм изготовлены из стекла с $n=1,51$, средний (световодный) слой — из стекла с $n=1,58$ при толщине слоя 80 мкм. Решетка с теми же параметрами, что и в [23] (см. начало раздела), приклеена к закругленному торцу стеклянного блока; набор ВС идентичен набору в [23]. В световоде [26] излучение распространяется зигзагообразно между его широкими гранями; конструкция делителя близка к показанной на рис. 9 — в обоих случаях образован пластинчатый световод со ступенчатым профилем показателя преломления. Делитель в [26] — двумерный аналог обычного спектрометра с вогнутой решеткой. Устройство разделяет 10 несущих в диапазоне 1—1,4 мкм со спектральным интервалом 30,5 нм; потери в каналах менее 2,8 дБ, перекрестные помехи менее —25 дБ.

При выборе конструкции делителя необходимо учесть, что нарезать плоские дифракционные решетки с высокой дифракционной эффективностью несравненно проще, чем вогнутые. Однако успехи в изготовлении последних голографическими методами [27] могут в дальнейшем привести к тому, что делители с вогнутыми решетками окажутся вне конкуренции. Вогнутые голографические решетки уже несколько лет эффективно используются в спектроскопии.

Примером делителя с вогнутой голографической решеткой является устройство, описанное в [28]. Для получения интерференционной картины покрытый фоторезистом вогнутый диск освещался двумя точечными когерентными источниками (их формировала оптическая система после разделения излучения аргонового лазера на два потока). Полученный после соответствующей обработки фоторезиста профиль решетки алюминировался. В делителе решетка работала по той же схеме, что и на рис. 10, но входной ВС был отделен от выходных. Делитель работал в диапазоне 480—520 нм, обратная дисперсия равнялась 5 нм/мм. Дифракционная эффективность решетки составляла 80 %, перекрестные помехи в каналах были ниже порога обнаружения. Эти отличные параметры являются прямым следствием голографического метода получения решетки, для которого характерны отсутствие ошибок изготовления, неизбежных в методе нарезания штрихов, а также высокой стигматизм изображений.

Авторы [23, 26] изготовили геометрически идентичные делители с идентичными решетками, отличающиеся тем, что в [23] элементы делителя разделены воздушной средой, а в [26] — стеклом. Поэтому можно сравнить геометрически идентичные делители в обычном и интегральном исполнениях.

Поскольку делители геометрически идентичны, идентичен и ход лучей в них (в частности, сохраняется угол блеска решетки независимо от среды, соприкасающейся с ее рабочей поверхностью). В таком случае для обоих делителей достаточно рассмотреть одну схему с ходом лучей, имея в виду, что среда их распространения может быть различной. В обоих делителях реальные рабочие длины волн в среде одинаковы. Следовательно, вакуумная рабочая длина волны интегрального делителя в n раз больше, чем у обычного, поэтому введение стеклянной среды в делитель меняет его рабочий диапазон с 0,7—0,9 на 1—1,4 мкм. (Указанная особенность в некоторых случаях упрощает исследование решетки для интегрального делителя: например, решетка может быть оптимизирована в воздухе на красное лазерное излучение с длиной волны 0,63 мкм и будет прекрасно работать в стеклянном делителе в области $\sim 0,9$ мкм.) Кроме того, $\Delta\lambda/\Delta x$ для интегрального делителя будет в n раз больше, т. е. спектр несущих будет в n раз «сжат» в плоскости торцов приемных ВС. Так, в [23, 26] при одинаковых Δx (диаметрах приемных световодов) $\Delta\lambda$ между каналами различно: 30,5 нм в интегральном делителе против 20 нм в делителе с воздушной средой.

Таким образом, при сохранении геометрии делителя и его решетки подбором n среды можно варьировать рабочий диапазон устройства и спектральный интервал между разделяемыми каналами.

Заметим также, что конус лучей из входного ВС в стеклянной среде в n раз уже, чем в воздухе. Это снижает абберационные искажения в делителе и позволяет уменьшить его габариты.

4. Уплотнители каналов

Ввод различных оптических несущих в один ВС может быть выполнен с помощью как спектрально-избирательных элементов, так и неселективных устройств (в отличие от разделения несущих). Ввод с помощью последних — светоделительных пластинок, зеркал и объективов достаточно трудно выполнить с малыми потерями при большом числе каналов. Поэтому более перспективным является объединение несущих с помощью сварных ответвителей (уплотнителей) на ВС, технология изготовления которых описана во многих работах (например, в [29]). Однако если все свариваемые световоды одинаковы, от каждой несущей в линию вводится лишь $\sim 1/m$ ее мощности, где m — число каналов (это следует из известной в оптике теоремы Лиувилля).

Энергетически более выгодно использовать спектрально-избирательные элементы. Принцип работы уплотнителей каналов и их конструкции не отличаются от схем делителей, необходимо лишь в последних изменить направления распространения лучей на обратные, поэтому любой делитель можно использовать и как уплотнитель каналов. Так, в [30] описан уплотнитель 10 несущих, разделенных спектральным интервалом 36 нм, работающий в диапазоне 1,1—1,5 мкм; уплотнитель состоит из стеклянного блока с приклеенной к нему плоской решеткой и стеклянных линз (в виде стержней с плоско-выпуклыми торцами), а также из набора ВС. Ход лучей в уплотнителе обратен ходу лучей в делителе, показанному на рис. 5. Отмечено, что прямое использование делителя каналов в качестве уплотнителя может приводить к большим потерям в каналах. Это происходит потому, что в делителе выходные ВС обычно имеют больший диаметр и числовую апертуру, чем входной ВС, а при использовании делителя в качестве уплотнителя вход и выход меняются местами. В [30] указанные параметры выходного ВС уплотнителя несколько больше параметров входных ВС, что позволило снизить потери в каналах до 2,2 дБ.

Спектральные характеристики уплотнителя каналов аналогичны характеристикам, показанным на рис. 6. Подбором соотношений диаметров входных и выходного ВС (т. е. входных и выходной щелей) варьируется желательная полоса пропускания каждого канала в уплотнителе. В [30] она равна 35 нм по уровню 3 дБ.

Ранее нами отмечалась важность предварительной фильтрации перекрывающихся по спектру несущих. Обычно это достигается с помощью полосовых интерференционных фильтров. В связи с этим при необходимости фильтрации в уплотнителях использовались исключительно последовательные схемы. Однако авторы [31] обратили внимание на фильтрующие свойства решетки в параллельном уплотнителе каналов. Они экспериментально показали, что с помощью идентичных по конструкции уплотнителя и делителя на решетках можно осуществить эффективное уплотнение с одновременной фильтрацией излучения светодиодов при спектральном интервале между несущими 20 нм, а также последующее надежное разделение каналов. Ранее система связи со столь плотно расположенными оптическими несущими мыслилась лишь как система на лазерных диодах с узкими линиями излучения. В связи с идентичностью конструкций делителя и уплотнителя каналов было предложено [31] и реализовано [32] двунаправленное использование единого устройства (уплотнителя/делителя каналов), схема которого показана на рис. 5. В системе связи [32] одна решетка на каждом конце линии

уплотняет несколько оптических несущих и одновременно разделяет несущие с другими длинами волн, поступающие по одиночному ВС тракта передачи. Можно сказать, что в этой системе решетка является аналогом радиотехнической приемопередающей антенны с набором соответствующих частотных фильтров.

5. Новые методы разуплотнения каналов

Помимо уже описанных, существуют и другие спектроскопические схемы, которые также можно использовать для разуплотнения каналов. Например, в [33] показано разделение каналов с использованием зонной пластинки; разделялись 10 каналов в области 1 мкм с интервалом 20 нм. Однако по конструкции и параметрам такие делители уступают лучшим из описанных выше устройств.

Несомненный интерес представляют голографические делители. В качестве примера такого делителя рассмотрим устройство, описанное в [28].

На рис. 12, а показана схема формирования основного элемента делителя — толстослойной голограммы пропускания в пленке желатина. Для этого пленка одновременно освещалась двумя когерентными световыми пучками от аргонового лазера ($\lambda=488$ нм), один из которых — сходящийся, другой излучается из ВС. При использовании полученной голограммы для разделения каналов (рис. 12, б) этот же ВС является входным (он предварительно стыкуется со световодом системы связи, по которому поступают различные оптические несущие); выходные ВС принимают излучение разделенных несущих. Голограмма испытывалась на разделение пяти линий аргонового лазера в диапазоне 476—515 нм с потерями в каждом канале ~ 1 дБ. Обратная дисперсия составила 10 нм/мм, при интервале между несущими 7 нм перекрестные помехи были менее -30 дБ. Распространение такого рода делителей пока сдерживается отсутствием материалов, в толще которых можно было бы записывать голограммы пропускания в ИК области спектра, где работает современная оптическая связь. К сожалению, в отличие от отражательных голограмм, голограммы пропускания нельзя записать в видимом, а использовать в ИК свете.

Другой интересный метод разделения каналов основан на существовании длинноволновой границы чувствительности у полупроводниковых фотоприемников. Начиная с некоторой длины волны, фотодиод становится прозрачным для длинноволнового излучения. Это обстоятельство было использовано в [34, 35], где описан «слоеный» фотодиод — делитель каналов. Принимаемое длинноволновое излучение свободно проходит сквозь первый фоточувствительный слой с широкой запрещенной зоной и регистрируется только во втором узкозонном слое, а коротковолновое излучение регистрируется в первом слое. В [35] для фотодиода на основе InGaAsP достигнуты перекрестные помехи менее -30 дБ для каналов с несущими 1,15 и 1,30 мкм. В данном устройстве область между этими длинами волн не может использоваться для разделения несущих, так как в ней перекрываются «хвосты»

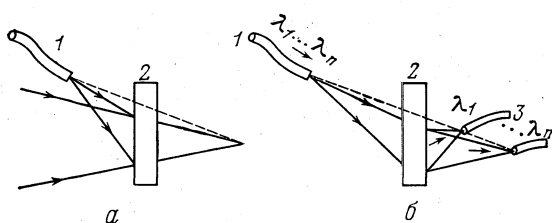


Рис. 12. Схема записи голограммы (а) и использование ее для разделения каналов (б) (пунктир — ось симметрии) [28]:

1 — входной ВС; 2 — пленка желатина; 3 — выходные ВС

спектральной чувствительности обоих фотоприемных слоев. С удалением от этой области (например, при выборе несущих на 1,0 и 1,4 мкм) перекрестные помехи резко снижаются.

В [34] описан также двухволновый светодиод, т. е. готовый источник двух уплотненных несущих (обе излучающие площадки выведены на один торец). Устрой-

ства изготовлены методом эпитаксии из жидкой фазы. Двухволновый светодиод может работать и как двойной лазер, однако тогда интенсивности генерации обеих несущих сильно взаимосвязаны. Поэтому в работе использовался светодиодный режим с центральными длинами волн 1,1 и 1,3 мкм; перекрестные помехи в каналах составили —20 и —10 дБ.

В [36] физический механизм разделения каналов тот же, но принимаемое излучение направляется по волноводу, вдоль которого сформированы фоточувствительные слои с постепенно убывающей шириной запрещенной зоны.

В [37] рассмотрена схема уплотнения, как бы инвертирующая принцип действия двойного светодиода. Авторы разработали светодиод с максимумом излучения на 1,28 мкм. Ясно, что этот диод легко выполнить прозрачным для длин волн 1,3—1,6 мкм. Он имеет контактные окна, благодаря чему может быть вставлен в разрыв ВС и может добавить свое излучение к проходящему по ВС более длинноволновому свету. Последовательный набор таких светодиодов с убывающими длинами волн может привести к уплотнению нескольких несущих в магистральном ВС в области 1—1,6 мкм.

Можно предположить, что оптическая связь в дальнейшем будет использоваться и новые методы спектральной селекции, поскольку плотность размещения несущих по спектру будет возрастать, а требования к габаритам и надежности связанных устройств вряд ли изменятся, что не позволит использовать классические спектроскопические методы.

6. Спектральное уплотнение в одномодовых ВС

Все описанные выше конструкции делителей и уплотнителей каналов предназначены для многомодовых ВС, характеризующихся сравнительно большими диаметрами сердцевин (50—600 мкм) и числовой апертурой (0,2—0,4). Однако те же делители могут быть использованы для разделения оптических несущих, распространяющихся по одномодовому ВС. Одномодовые ВС имеют малые диаметры сердцевин (~5 мкм) и апертуру (~0,06), поэтому излучение из них легко ввести во входной многомодовый ВС делителя практически без потерь, после чего разделение несущих идет как обычно. Вообще в конструкции делителя входной многомодовый ВС можно заменить одномодовым [25]. При меньшей «входной щели» (диаметре сердцевины ВС) и более узком конусе входного излучения характеристики делителя могут только улучшиться.

Однако замена всех ВС в делителях одномодовыми нецелесообразна, так как абберационные искажения изображений в делителях вполне могут быть порядка диаметра сердцевин выходных одномодовых ВС. После такой замены может чрезмерно сузиться и полоса в каждом канале, что потребует повышенной стабильности оптических несущих. Вполне допустимо в качестве выходных использовать маломодовые ВС или многомодовые с частично стравленной оболочкой.

Сложнее обстоит дело с уплотнением несущих в одномодовом ВС. Проблема ввода даже одной несущей в одномодовый ВС весьма сложна ввиду малости его параметров; тем более сложно введение многих несущих с малыми потерями. При уплотнении описанными выше методами придется либо смириться со значительными потерями энергии, либо изготавливать чрезвычайно высококачественные элементы для уплотнителей, обладающие минимальными абберациями. Для малого числа каналов, по-видимому, целесообразно изготовление сварных волоконных уплотнителей или объединение несущих с помощью интегральных волноводных элементов [38].

В системах связи на одномодовых световодах наиболее естественно использование одномодовых лазеров с минимальной шириной спектра излучения. Это открывает возможности весьма плотного расположения каналов по спектру с интервалом $\Delta\lambda$ в несколько нанометров. Малые диаметры сердцевин одномодовых ВС (т. е. входной и, возможно, выходных «щелей» в де-

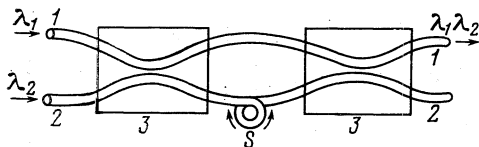


Рис. 13. Уплотнитель (делитель) [каналов на одномодовых ВС:
1, 2 — волоконные ВС; 3 — направленный ответвитель

Два одномодовых ВС имеют области взаимодействия полей 3, в первой из которых происходит равномерное распределение световой энергии с λ_i из одного ВС в оба. Путь света в одном из ВС на величину S больше, чем в другом. Если фазовая задержка на пути S для λ_1 равна $2\pi n + \pi$, а для λ_2 задержка равна $2\pi m$, то после второй области взаимодействия световая энергия концентрируется в одном световоде 1. При обратном ходе лучей устройство (рис. 13) может работать как делитель каналов. Устройство весьма компактно. Лишенные защитного покрытия ВС целиком (за исключением выводов) помещены в сосуд из плавленого кварца длиной 5 см и перевиты между собой. В центральной части на одном ВС оставлено защитное покрытие, на которое намотан другой голый световод — этим создается разность хода 35 мкм. При использовании масла с подобранным n в перевитых голых ВС с предварительно стравленной оболочкой (области 3) происходит перераспределение энергии. Устройство объединяло две несущие с $\Delta\lambda = 3,5$ нм и потерями в каждом канале 2 дБ, имея хорошую температурную стабильность. Авторы полагают, что с помощью набора подобных устройств можно уплотнить (разделять) набор эквидистантных оптических несущих с $\Delta\lambda \approx 0,5 - 10$ нм.

Описанное устройство можно изготовить также на базе интегральной оптики. Связь между одномодовыми ВС можно осуществлять и посредством контакта двух предварительно сошлифованных боковых сторон ВС [40].

Уплотнение двух несущих в одномодовом ВС и их разделение с помощью интерференционных фильтров и микрооптики описано в [41] (параметры этой системы приводятся далее).

7. Субнанометровое уплотнение и интегральная оптоэлектроника

До сих пор мы рассматривали уплотнение оптических несущих, излучаемых независимыми источниками. При переходе к субнанометровому интервалу между несущими, возможно, предпочтительнее формирование новых несущих путем частотного сдвига исходной монохроматической волны. Такая схема описана в [42]. Исходное лазерное излучение делится на два световых потока, первый из которых является опорным. Второй поток проходит через два акустооптических модулятора: один модулятор создает частотный сдвиг исходной оптической несущей, а другой налагает на новую несущую информационный сигнал. Затем исходная опорная несущая и промодулированная несущая вводятся в ВС. На выходе линии на квадратичном фотодетекторе регистрируются биения между двумя несущими, промодулированные информационным сигналом. Фактически это гетеродинная схема, в которой гетеродинный опорный сигнал передается одновременно с информационным. Сдвиг оптической несущей может быть удвоен или утроен при последовательном расположении нескольких одинаковых модуляторов на пути ответвленного луча. Таким образом, возможно формирование нескольких эквидистантных оптических несущих, каждая из которых может быть промодулирована своим информационным сигналом и продетектирована путем смешения с опорной несущей на фотодиоде. Анализ такой системы на одномодовом ВС показал, что отдельные несущие распространяются

лителях) повышают разрешение делителей. В связи с этим при малых $\Delta\lambda$ разделение каналов может быть вполне успешным.

В случае одномодовых источников оптических несущих для их уплотнения и разуплотнения можно эффективно использовать интерференционные явления. Так, в [39] реализован оригинальный уплотнитель каналов (рис. 13).

независимо и что возможные фазовые сдвиги в ВС по отношению к опорной волне не препятствуют работе системы, в которой реализуется субнанометровое спектральное уплотнение каналов.

В [42] указывается, что описанную схему желательнее было бы выполнить на базе интегральной оптики, при этом вместо объемных акустооптических модуляторов можно будет использовать модуляторы на поверхностных акустических волнах. Нет сомнения, что элементная база волоконнооптической связи станет в будущем в основном интегрально-оптической; это касается и уплотнителей/делителей каналов. В качестве примера такого интегрального устройства приведем волноводный делитель каналов [43] (рис. 14). В нем на единой кремниевой подложке объединены наложенные брегговские решетки в объеме тонкопленочного световода, волноводные фотоприемники (биполярные фототранзисторы) и электронные коммутационные ключи на основе биполярных транзисторов. Приемники и ключи выполнены по стандартной технологии кремниевых микросхем, тонкопленочный световод образован слоем As_2S_3 . Делитель работал в области $\sim 0,86$ мкм и успешно разделял три несущих с $\Delta\lambda \approx 20$ нм.

По-видимому, именно интегральная оптоэлектроника позволит в дальнейшем создать практические системы оптической связи с субнанометровым спектральным уплотнением каналов.

8. Системы связи со спектральным уплотнением

В большинстве работ по спектральному уплотнению описаны не системы связи с уплотнением, а оконечные устройства — уплотнители и делители каналов. Каждое такое устройство имеет ВС, сопрягающийся с линейным ВС системы связи. Параметры этих «сопрягаемых» световодов в основном совпадают с параметрами линейного световода. Сопряжение одинаковых ВС может быть выполнено просто, надежно и с малыми потерями (например, путем сварки в электрической дуге с потерями $\sim 0,2$ дБ). Не исключено и подсоединение к линейному ВС с помощью разъемов.

Таким образом, подсоединяя оконечные оптические устройства к одиночному линейному ВС, можно получить готовую систему связи со спектральным уплотнением каналов. Широкополосность каждого канала ограничивается только широкополосностью линейного ВС на данной оптической несущей. Ранее большие усилия направлялись на изготовление ВС, обладающих большим параметром широкополосности на заданной оптической несущей, однако сейчас уже выпускаются световоды с хорошей широкополосностью (~ 1 ГГц·км) одновременно для многих оптических несущих в диапазоне 0,7—1,6 мкм [44].

Если в одноканальной системе связи на одной оптической несущей с предельными для данного ВС широкополосностью и дальностью заменить оконечные устройства устройствами со спектральными уплотнителем и делителем, то последние внесут потери в линию. Обычно уплотнители и делители вносят потери по 2—5 дБ, еще 1 дБ следует добавить на их сопряжение с линейным ВС, т. е. суммарные дополнительные потери в каждом канале составляют 5—11 дБ. Если не снижать скорость передачи в каналах, то необходимо сохранить прежний уровень затухания в линии; для этого придется либо уменьшать дальность передачи, либо применять ВС с меньшим затуханием. В первом случае для технического сравнения исходной одноканальной системы с уплотненной следует сравнить произведения чис-

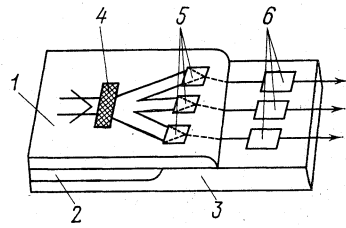


Рис. 14. Волноводный делитель каналов:

1 — тонкопленочный волновод As_2S_3 (3—5 мкм); 2 — изолирующий слой SiO_2 (0,5 мкм); 3 — кремниевая подложка; 4 — наложенные брегговские решетки; 5 — биполярные фототранзисторы; 6 — транзисторные ключи

ла каналов в системе на дальность связи. Например, если 10-километровая одноканальная система связи трансформируется в 10-канальную с дополнительными потерями 6 дБ, то при потерях в ВС 2 дБ/км длина линии сократится до 7 км, при этом общее число каналов-километров возрастет в 7 раз (10 кан \times 7 км против 1 кан \times 10 км), т. е. информационная пропускная способность системы с уплотнением возрастает в 7 раз. При замене линейной ВС более «прозрачной» (для сохранения прежней дальности связи) возрастание пропускной способности уплотненной системы пропорционально числу уплотненных каналов. Правда, при переходе на ВС с меньшим затуханием может возрасти стоимость линейного тракта. Здесь для технико-экономического сравнения систем следует оценивать стоимость реализации одного канала связи. Так, в [44] показано, что в системе дальностью 10 км при переходе от одноканального варианта с несущей 840 нм на шестиканальный (с добавлением пяти несущих в диапазоне 1200—1300 нм и соответствующей заменой ВС) стоимость одного канала снижается в пять раз; скорость передачи в каждом канале сохраняется на исходном уровне (45 Мбит/с).

Укажем на некоторые реализованные и предложенные системы связи со спектральным уплотнением. В работах [22, 31] реализованы системы с уплотнением на дифракционных решетках в области 0,8—0,9 мкм аналогового телевизионного и импульсного сигналов в ВС с диаметром сердцевины сотни микрон и длиной сотни метров. Эксперименты с этими системами показали, что разработанные оконечные элементы позволяют создавать системы связи с несколькими уплотненными каналами дальностью в несколько километров.

В [45] описана четырехканальная система на ВС с диаметром сердцевины 60 мкм для дистанционного телевизионного контроля дальностью до 5 км в диапазоне 730—880 нм при интервале между каналами \sim 50 нм. Излучение светодиодов уплотняется и разуплотняется с помощью интерференционных светофильтров с перекрестными помехами менее -27 дБ. В том же диапазоне на основе фильтров, описанных выше [10], авторы считают возможным создать четырехканальные системы на лазерах при дальности 18 км, скорости передачи 1,5 Мбит/с и $\Delta\lambda = 30$ нм или на светодиодах с передачей аналоговых видеосигналов на расстояние 5,5 км с $\Delta\lambda = 50$ нм.

Интересная система описана в [46]. Уплотнение четырех несущих в области 0,8 мкм выполняется с помощью интерференционных фильтров, однако после такой фильтрации взаимоперекрестие несущих устраняется и разуплотнение выполняется на дифракционной решетке. Достигнута дальность 14,1 км, суммарные потери в оконечных устройствах 5,7 дБ, $\Delta\lambda = 20$ нм, перекрестные помехи менее -20 дБ.

В [47] описано трехканальное уплотнение лазерного излучения в диапазоне 800—900 нм с $\Delta\lambda \sim 35$ нм с помощью интерференционных фильтров по принципу схемы рис. 3. (В [48] те же авторы уплотняют три канала просто волоконным объединителем, поскольку узкие лазерные линии вовсе не требуют фильтрации.) Деление каналов выполняется на решетке с фокусирующим стержнем. Дальность системы невелика (1,1 км), но она интересна тем, что каждая из трех ее оптических несущих промодулирована тремя телевизионными сигналами с частотным уплотнением. Фактически имеет место каскадное частотное уплотнение.

В перспективной для связи области длин волн $\sim 1,3$ мкм система со спектральным уплотнением впервые была реализована в [3]. Авторы ставили своей целью возможно более плотное расположение каналов (вблизи оптимальной длины волны). Объединение сигналов одномодовых лазеров выполнялось в сварном волоконном объединителе, разделение — на дифракционной решетке. Дальность системы равнялась 500 м, $\Delta\lambda = 10$ нм, перекрестные помехи менее -20 дБ. Система допускает трансформацию в двадцатипятиканальную с уплотнителем, аналогичным делителю. Эта система была усовершенствована в [32]. Две несущие с интервалом 17 нм распространяются в одном направлении, две другие — в обратном на расстояние

5 км. На концах линии универсальный уплотнитель/делитель на единичной решетке обеспечивает связь с перекрестными помехами менее —20 дБ. Геометрия оконечных устройств допускает передачу 10 каналов в каждом направлении.

В [41] реализована дальняя (на 36 км) двухканальная система связи на одномодовом ВС с несущими 1,2 и 1,3 мкм. Передача могла идти в одном или обоих направлениях (дуплексный вариант), интерференционные фильтры на микрооптике обеспечивали развязку между каналами 30 дБ, скорость передачи в каналах составляла 400 Мбит/с. Введение в одноканальную линию второго канала (т. е. дополнительных потерь в оконечных устройствах) уменьшало длину линии лишь на 10 %.

Для малого числа каналов (менее пяти) вполне допустимо строить оконечные устройства с использованием светофильтров, а для двухканальных систем фильтры предпочтительнее, чем решетки. Светофильтры считались совершенно необходимыми при уплотнении взаимоперекрывающихся широких несущих (например, излучения светодиодов). Однако после осуществления в [31, 32] эффективной фильтрации несущих при уплотнении их на дифракционной решетке появилась возможность выбора между фильтрами и решеткой. Для числа каналов более 5 устройства с параллельным уплотнением на решетках находятся вне конкуренции.

Утверждение о преимуществе систем с решетками перед системами с фильтрами повторяется во многих работах (например, в [19]), однако оно нуждается в оговорке. Обычно при сравнении этих систем молчаливо предполагается, что многоканальная связь осуществляется между двумя оконечными пунктами. Если же требуется где-то на полпути выделить один канал из световода, удобнее это сделать светофильтром, а не решеткой. Как и всегда, конкретное построение системы определяется конкретными требованиями к ней.

Переход от связи на одной оптической несущей к спектральному уплотнению каналов становится необходимым после полного использования информационной пропускной способности ВС с одной несущей. Поэтому спектральное уплотнение прежде всего важно для многомодовых ВС со ступенчатым профилем показателя преломления (их параметр широкополосности 25 МГц·км), затем — для градиентных ВС (1 ГГц·км). Широкополосность одномодовых ВС столь велика, что, на первый взгляд, спектральное уплотнение не является для них обязательным. Однако и в этом случае при заданном большом информационном потоке в ВС следует проводить конкретное технико-экономическое сравнение между связью на одной оптической несущей (с использованием быстродействующего модулятора, фотоприемника и электронных блоков с ширинами полос в десятки гигагерц) и связью со спектральным уплотнением, предъявляющим умеренные требования к широкополосности указанных элементов в каждом канале при сохранении заданной общей информационной емкости тракта передачи. Кроме того, информационная пропускная способность одномодового ВС с одной несущей сильно уменьшается с ростом длины, что может существенно увеличить потребность в спектральном уплотнении.

Спектральный интервал между каналами определяется в первую очередь необходимой спектральной полосой пропускания одного канала. При резком спаде пропускания на краях полосы (обеспечивающем хорошую развязку от перекрестных помех из соседних каналов) интервал между каналами может лишь незначительно превышать полосу одного канала (см. рис. 6). Рассмотрим факторы, определяющие необходимую полосу пропускания одного канала.

1. Ширина линии оптической несущей. В наихудшем случае ширина неотфильтрованных линий излучения светодиодов достигает десятков нанометров. Ширина линий одномодовых полупроводниковых лазеров составляет менее нанометра.

2. Температурный сдвиг длины волны оптической несущей. Для полупроводниковых лазеров этот сдвиг равен $\sim 0,4$ нм/град, поэтому для диапазона рабочих температур $\pm 25^\circ\text{C}$ необходимая спектральная полоса пропускания канала должна составить не менее 20 нм.

3. Боковые модуляционные полосы. В зависимости от характера передаваемой информации сигнал, модулирующий несущую, характеризуется определенной радиотехнической полосой Δf . Около промодулированной оптической несущей возникают соответствующие боковые модуляционные полосы, но даже при $\Delta f \sim 100$ ГГц спектральное модуляционное уширение оптической несущей составит лишь $\pm \Delta\lambda \approx 0,3$ нм.

Необходимая спектральная полоса канала определяется суммарным воздействием указанных трех факторов. Очень малый вклад вносит модуляционное уширение оптической несущей. Это означает, что необходимая спектральная полоса одного канала слабо зависит от типа ВС, ибо даже для одномодовых световодов с максимальным параметром широкополосности 100 ГГц·км модуляционное уширение весьма мало. Напротив, для ВС любого типа одинаково существенным негативным фактором является температурная нестабильность оптической несущей, которая практически и определяет на сегодня необходимую спектральную полосу пропускания одного канала в десятки нанометров.

Сведение к минимуму температурной нестабильности источников изменит относительный вклад каждого из трех факторов, определяющих полосу канала. Использование узкополосных стабильных оптических несущих позволит перейти в отдельных случаях к субнанометровым интервалам между каналами, определяемым главным образом широкополосностью световода. Пример субнанометрового уплотнения, в котором частотный интервал между узкополосными оптическими несущими жестко задается внешними модуляторами, описан выше в п. 7.

В настоящее время распространение систем со спектральным уплотнением ограничивается отсутствием специальных наборов излучателей. Каждый такой набор должен состоять из нескольких источников света примерно одинаковой интенсивности с длинами волн излучения, разделенными одинаковым спектральным интервалом $\Delta\lambda$. Из предыдущего рассмотрения следует, что максимально плотное спектральное расположение каналов возможно при использовании одномодовых стабилизированных лазеров. Разработка наборов таких лазеров представляет собой сложную научно-техническую задачу, которую еще предстоит решить. Однако из материалов данного раздела видно, что создание линий связи с числом источников около пяти возможно уже сейчас, в том числе путем использования светодиодов с предварительной фильтрацией их излучения.

Заключение

Волоконные световоды характеризуются сверхширокой оптической полосой пропускания $\sim 2 \cdot 10^5$ ГГц. Связь на одной оптической несущей, даже с применением одномодового ВС, может лишь в малой степени использовать огромную пропускную способность этой полосы. Реальное ее освоение возможно путем одновременной передачи по одному ВС многих оптических несущих с различными длинами волн, т. е. путем спектрального уплотнения каналов.

Разработчики оконечных устройств (уплотнителей и делителей каналов) для систем со спектральным уплотнением активно использовали идеи и методы спектроскопии. При этом удалось реализовать известные спектроскопические схемы в виде изящных малогабаритных конструкций с рекордными параметрами. Потребности спектрального разуплотнения каналов привели к созданию нового класса устройств — плоских интегральных мини-спектрометров (делителей каналов), которые, возможно, найдут применение в прикладной спектроскопии. Оптическая связь с целью разделения

несущих взяла также на вооружение ряд физических методов, не использовавшихся или слабо освоенных в спектроскопии. Для систем со спектральным уплотнением созданы образцы интегральных устройств, объединяющих на одной подложке оптические и электронные компоненты; эти устройства вносят свой вклад в формирование нового научно-технического направления — интегральной оптоэлектроники.

Реализованы системы связи с одновременной передачей нескольких оптических несущих по одному ВС на расстояние в несколько километров. Разработанные оконечные устройства и эксперименты по уплотнению в системе дальней связи (36 км) показывают, что в ближайшие годы могут быть созданы системы с передачей десятков оптических несущих по одному световоду на расстоянии в десятки километров.

Спектральное уплотнение — это частотное уплотнение, перенесенное из радиодиапазона в оптический диапазон. Оно безусловно будет развиваться столь же быстро, как в свое время уплотнение каналов в радиосвязи. Однако если в радиосвязи эффективно использовались как временное, так и частотное уплотнение, то в оптической связи освоение сверхширокой полосы пропускания практически возможно лишь с помощью спектрального уплотнения.

С учетом быстрого нарастания в будущем информационных потоков желательнее уже сейчас при прокладке оптических линий использовать ВС с максимально широкими спектральными окнами прозрачности. Это позволит в дальнейшем все более эффективно использовать потенциальную пропускную способность уже проложенных трактов оптической связи, для чего будет достаточно простой замены одноканальных оконечных устройств уплотнителями и делителями спектрально-уплотненных каналов.

1. T. Moriyama, O. Fukuda, K. Sanada, K. Inada, S. Tanaka, K. Chida, T. Edahiro. VI Europ. Conf. on Optical Communication (VI ECOC), York, United Kingdom, 1980, p. 18.
2. М. И. Беловолов, Е. М. Дианов, В. И. Косяков, А. А. Кузнецов. *Изв. АН СССР. Сер. физическая*, **44**, 2075 (1980).
3. М. И. Беловолов, А. Т. Гореленок, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, И. С. Тарасов. *Квантовая электроника*, **6**, 2487 (1979).
4. Краткий англо-русский словарь терминов по волоконно-оптической связи. *Труды ИИЭР*, **68**, 196 (1980).
5. W. J. Tomlinson. *Appl. Optics*, **16**, 2180 (1977).
6. T. Miki, H. Ishio. *IEEE Trans. on Communs*, **COM-26**, 1082 (1978).
7. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. *Техника и практика спектроскопии*. — М.: Наука, 1976.
8. K. Kobayashi, P. Ishikawa, K. Minemura, S. Sugimoto. *Fiber Integr. Opt.*, **2**, 1 (1979).
9. M. Shikata, K. Kobayashi. 1979 National Convention Record (Institute of Electronics and Communications Engineers, Japan) paper 811.
10. S. Ishikawa, K. Takahashi, K. Doi. VI ECOC (см. [1]), 1980, p. 298.
11. K. Hashimoto, K. Nosu. Optical Communication Conf., Amsterdam, 1979, paper 11.5.
12. K. Nosu, H. Ishio, K. Hashimoto. *Electron. Letts*, **15**, 414 (1979).
13. H. Nakajima, T. Iwama, M. Seino, E. Miyauchi, T. Obokata. VI ECOC (см. [1]), 1980, p. 290.
14. Y. Fujii, K. Aoyama, J. Minowa. *IEEE J.*, **QE-16**, 165 (1980).
15. K. Aoyama, J. Minowa. *Appl. Optics*, **18**, 1253 (1979).
16. W. J. Tomlinson, G. D. Aumiller. *Appl. Phys. Letts*, **31**, 169 (1977).
17. W. J. Tomlinson, C. Lin. *Electron. Letts*, **14**, 345 (1978).
18. K. Kobayashi, M. Seki. *Optical Fiber Communication, Digest*. Washington, 1979, p. 54.
19. W. J. Tomlinson. *Appl. Optics*, **19**, 1127 (1980).
20. J.-P. Laude, J. Flamand, J. M. Lerner. Third International Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (100C'81), Digest. San Francisco, 1981, p. 66.
21. М. И. Беловолов, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, А. С. Свахин, В. А. Сычугов, Т. В. Тулайкова. 100C'81 (см. [20]), 1981, p. 66.
22. М. И. Беловолов, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, А. С. Свахин, В. А. Сычугов, Т. В. Тулайкова. *Квантовая электроника*, **9**, 429 (1982).
23. R. Watanabe, K. Nosu, T. Harada, T. Kita. *Electron. Letts*, **16**, 106 (1980).
24. G. L. Tangonan, O. G. Ramer, H. R. Friedrich, C. K. Asawa, D. L. Persechini, L. E. Gorre. Optical Communication Conf., Amsterdam, 1979, paper 21.5.

25. Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, В. А. Сычугов, Т. В. Тулайкова. *Квантовая электроника*, **8**, 384 (1981).
26. R. Watanabe, K. Nosu. *Appl. Optics*, **19**, 3588 (1980).
27. M. C. Hutley, W. R. Hunter. *Appl. Optics*, **20**, 245 (1981).
28. J. Ludman, J. Horner. Conf. on Physics of Fiber Optics. Amer. Cer. Soc., 82-nd Ann. Meeting. Digest, 1980, p. 55.
29. М. И. Беловолов, Е. М. Дианов, А. В. Лучников, А. М. Прохоров. *Квантовая электроника*, **7**, 1578 (1980).
30. R. Watanabe, K. Nosu, Y. Fujii. *Electron. Letts*, **16**, 108 (1980).
31. М. И. Беловолов, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, А. В. Кузнецов. *Квантовая электроника*, **9**, 418 (1982).
32. Ж. И. Алферов, М. И. Беловолов, А. Н. Гурьянов, А. Т. Гореленок, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, А. В. Кузнецов, А. М. Прохоров, И. С. Тарасов. *Квантовая электроника*, **9**, 1698 (1982).
33. H. M. Haskol. Conf. on Physics of Fiber Optics (см. [28]), 1980, p. 52.
34. S. Sakai, T. Aoki, M. Tobe, M. Umeno, Y. Amemiya. VI ECOC (см. [1]), 1980, p. 230.
35. J. C. Campbell, A. G. Dentai, T. P. Lee, C. A. Buggus. *IEEE J.*, **QE-16**, 601 (1980).
36. М. Б. Иванов, М. Н. Мизеров, Е. Л. Портной, Н. В. Пронина. *Письма в ЖТФ*, **6**, 1234 (1980).
37. W. Proebster, H. Grothe. 100C'81 (см. [20]), 1981, p. 58.
38. Н. М. Лындин, Ю. А. Саркисов, В. А. Сычугов, Ю. Ф. Федоров, Г. П. Шипуло, И. С. Безперстова, Т. В. Пальчун. *Квантовая электроника*, **7**, 134 (1980).
39. S. K. Sheem, R. P. Moeller. *J. Appl. Phys.*, **51**, 4050 (1980).
40. O. Parriaux, S. Gidon, A. A. Kuznetsov. *Appl. Optics*, **20**, 2420 (1981).
41. K. Minemura, K. Kobayashi, N. Nomura, S. Matsushita, A. Ueki. Conf. on Laser and Electrooptical Systems (CLEOS-80), Digest, San Diego, 1980, p. 40.
42. C. S. Ih, B.-Y. Chen. 100C'81 (см. [20]), 1981, p. 66.
43. Ю. А. Быковский, Ю. В. Воронов, В. А. Золотарев, О. Р. Мочалкина, В. Л. Смирнов, О. И. Толстопятов. *ЖТФ*, **51**, 1215 (1981).
44. B. Bielawski. *Intern. Fiber Optics and Communs*, **1**, 32 (1980).
45. N. Kajino, K. Nishimura, F. Hayashida, T. Otsuka, K. Ito, H. Shiono, T. Yamada. VI ECOC (см. [1]), 1980, p. 442.
46. *Lasser Focus*, **16**, 58 (1980).
47. J. Conradi, R. Maciejko, J. Straus, I. Few, G. Duck, W. Sinclair, A. J. Springthorpe, J. C. Dymment. *Electron. Letts*, **17**, 91 (1981).
48. J. Conradi, J. Straus, A. J. Springthorpe, J. C. Dymment, R. Maciejko, G. Duck, W. Sinclair, I. Few, P. Devlin. CLEOS-80 (см. [41]), 1980, p. 42.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
3 марта 1982 г.

E. M. Dianov, A. A. Kuznetsov. Wavelength-Division Multiplexing of Channels in Fiber-Optic Communication Links (Review Article).

Prospects are shown of the wavelength-division multiplexing of channels in the fiber-optic communications, which means simultaneous transmission of several information signals at different optical carriers along a single fiber-optic waveguide. Various schemes are considered of channel multiplexers developed as a result of the use of spectroscopic methods in the optical communications, as well as schemes are presented which utilize new physical principles. Existing communication systems with wavelength-division multiplexing of channels are described. A conclusion is drawn that wavelength-division multiplexing of a few dozens of channels in a single lightguide several dozen kilometers long is possible.

«Квантовая электроника», 10, № 2 (1983)

УДК 535.371+535.373+535.375

В. И. Петров, Я. С. Бобович

ПРИРОДА РАССЕИВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ В РЕЗОНАНСНОМ ВКР КРАСИТЕЛЯМИ И ФОРМА ГЕНЕРИРУЕМЫХ СПЕКТРОВ

Изучены спектры резонансного ВКР (РВКР) полиметинового красителя 3,3'-диэтилтиатрикарбонцианиниодида при сканировании частоты накачки по длинноволновому краю полосы поглощения. В области чисто электронного перехода обнаружено изменение относительных интенсивностей линий РВКР 505 и 510 см⁻¹. Характер этого изменения позволяет приписать последнюю линию рассеянию невозбужденными молекулами красителя. Обсуждается механизм