

УДК 535.33/34

ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОВОДОВ В РЕФРАКТОМЕТРИИ

*В.В.Берцев, В.Б.Борисов, Л.В.Гатилова, Н.И.Егорова, А.С.Козлов, И.О.Конюшенко, В.М.Немец
НИИ Физики Санкт-Петербургского государственного университета*

Поступила в редакцию 01августа 2003 г.

Рефрактометрия в настоящее время широко используется для аналитического контроля состава технологических жидких сред в различных отраслях производства.

В предлагаемом сообщении показывается возможность существенного повышения эффективности рефрактометрических измерений на основе применения световодов в качестве датчиков аналитического сигнала.

Обсуждаются возможности и особенности использования для этой цели U-образных стеклянных световодов с различными геометрическими параметрами.

Берцев Владимир Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИФ СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор около 100 публикаций.

Борисов Валерий Борисович - кандидат физико-математических наук, докторант СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор около 100 публикаций.

Гатилова Лина Вадимовна – аспирант СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор 4 публикаций.

Егорова Наталья Ивановна – аспирант СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор 3 публикаций.

Козлов Александр Сергеевич – аспирант СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор 3 публикаций.

Конюшенко Игорь Олегович – магистрант физического факультета СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор 2 публикаций.

Немец Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией спектрального анализа НИИФ СПбГУ.
Область научных интересов: спектродиагностика.
Автор около 150 публикаций

Рефрактометрия в целом в настоящее время широко используется в различного рода оптико-физических измерениях, целью которых может быть как решение научно-исследовательских задач фундаментального и прикладного характера, так и контроль состояния технологических сред в различных отраслях производства [1]. Существенные ограничения в развитии и применении классической рефрактометрии связаны с

рядом обстоятельств. Во-первых, это проблемы принципиального характера, обусловленные трудностями рефрактометрических измерений в условиях сильного поглощения (в области полос поглощения), а также при наличии загрязнения исследуемой среды (жидкости) твердыми взвешиваемыми. Кроме того, здесь следует подчеркнуть практическую неприменимость классической рефрактометрии к исследованиям газообразных

сред. Во-вторых, трудности автоматизации измерений, практически исключают возможность непрерывных и оперативных измерений.

В большой степени разрешить указанные проблемы и трудности возможно на основе развития и применения рефрактометрии, основанной на использовании световодов – световодной рефрактометрии. Сегодня это относительно молодая область оптико-физических измерений, но уже с большой эффективностью применяется, например, для контроля (в том числе и дистанционного) температуры и давления во взрыво- и пожароопасных жидких и газовых средах [2, 3]. Применение световодов позволяет достаточно просто решить проблему автоматизации рефрактометрических измерений и тем самым обеспечить возможность их эффективного применения в контроле (в том числе и аналитическом) технологических процессов. Именно с этими обстоятельствами связан быстро растущий интерес к световодной рефрактометрии. Однако применение световодов в рефрактометрии имеет свои сложности и особенности, изучению и обсуждению которых посвящена предлагаемая работа.

Световод – это диэлектрическая среда, по которой может распространяться электромагнитная энергия различного спектрального состава [4]. Реально световоды представляют собой гибкие волокна из прозрачных диэлектрических материалов. Принцип действия световода основан на использовании известных законов отражения и преломления света на границе раздела двух сред с различными оптическими свойствами.

Конструктивно световоды обычно имеют круглое поперечное сечение и состоят из двух элементов. В центре располагается сердцевина, изготовленная из материала с большим показателем преломления, ее окружает оболочка из оптически менее плотного материала. Показатель преломления оболочки, как правило, имеет постоянное значение, тогда как показатель преломления сердцевины может оставаться постоянным или же изменяться вдоль ее радиуса по определенному закону (профиль показателя преломления).

В зависимости от диаметра сердцевины световоды условно делятся на две группы: *одномодовые* (оптические волноводы с малым поперечным сечением) и *многомодовые* (с большим поперечным сечением). При этом последние могут характеризоваться как ступенчатым, так и градиентным характером изменения показателя преломления.

Падающий от источника на торец прямого световода свет возбуждает в нем несколько ти-

пов мод: направляемые, рефрагирующие и туннелирующие (рис. 1).

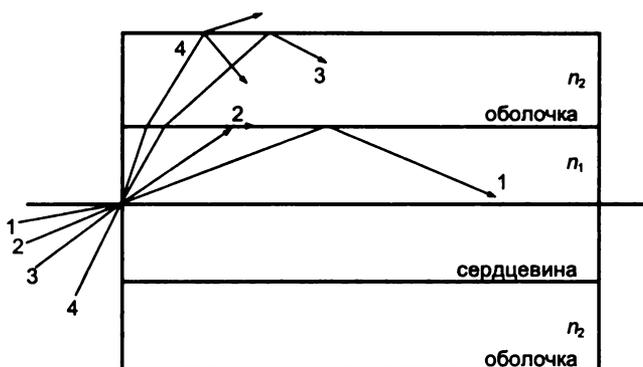


Рис. 1. Распространение света в прямом световоде: 1, 2 – направляемые лучи; 3 – рефрагирующий луч; 4 – туннелирующий луч

Направляемые моды являются основным типом мод, распространяющихся в световоде, и возбуждаются теми лучами, которые падают на торец световода под углами, не превышающими некоторый предельный угол θ_a , называемый апертурным углом (основные типы современных световодов имеют апертурный угол от $11,5^\circ$ до 17°). Вся энергия направляемых лучей при каждом отражении возвращается обратно в сердцевину. Такие лучи могут распространяться на неограниченные расстояния практически без затухания. *Рефрагирующие* моды, возникающие при падении лучей на торец световода под углами, превышающими θ_a , достигают границы раздела сердцевина-оболочка и за счет преломления в оболочку теряют часть энергии, испытывая при этом большое затухание. Вышедший из сердцевины луч распространяется дальше по оболочке и не выходит в окружающую среду. При падении лучей под углами, существенно превышающими θ_a , возникают *туннелирующие* моды. Часть из них достигает внешней поверхности оболочки и выходит в окружающую оболочку световода среды. Рефрагирующие и туннелирующие моды теряют часть своей мощности при каждом отражении и поэтому затухают в процессе распространения (вытекающие моды). Такая сложная модовая структура распространяющегося по световоду излучения требует обоснованного выбора типа световода и условий введения в него излучения при решении той или иной рефрактометрической задачи.

В целом в рефрактометрии находят применение различные типы световодов: как регулярные, так и нерегулярные, с оболочкой и безоболочечные. Роль оболочки в последнем случае выполняет окружающая световод среда. Рабочими мода-

ми в этом случае являются направляемые и рефрактурирующие. Поскольку максимальная чувствительность, в частности, аналитических рефрактометрических измерений с использованием световодов обеспечивается при отсутствии потерь мощности за счет вытекающих (рефрактурирующих) мод при нулевом содержании в среде определяемого компонента, соответствующая этому структура распространяющегося по световоду излучения должна быть представлена только направляемыми модами. В этих условиях распространяющееся излучение будет затухать только при наличии определяемого компонента, а степень затухания будет зависеть от его содержания. Это в полной мере справедливо для прямых регулярных световодов. Однако наиболее эффективными, в частности, для аналитической рефрактометрии признаны изогнутые U-образные световоды [5, 6]. Под изгибом световода подразумевается искривление оптической оси с постоянным или монотонно изменяющимся радиусом. Очевидно, что в изогнутых световодах не существует направляемых мод. Каждая мода является вытекающей и излучает энергию во внешнюю среду либо за счет рефракции, либо за счет туннелирования (при отсутствии оболочки – только за счет рефракции). Одной из основных характеристик изогнутого световода является “критический” радиус изгиба – радиус, при котором основная часть излучения покидает сердцевину световода и выходит в его оболочку [2]. Для оценки его реальных значений воспользуемся предложенными в [7] теоретическими приближениями, в соответствии с которыми световод на участке с изгибом представляется прямым световодом, а изгиб учитывается построением некоторого эффективного профиля показателя преломления:

$$n_{эфф}^2(x) = n_c^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{x}{\rho} \right)^\alpha \right] \left[1 - \frac{(r-x)^2}{R} \right] \quad (1)$$

где x – расстояние, отсчитываемое от оси световода по радиусу, n_c – показатель преломления сердцевины, ρ – радиус сердцевины, r – радиус оболочки, α – показатель степени в степенной функции профиля показателя преломления (для градиентного профиля $\alpha = 2$, для ступенчатого – $\alpha = 7$), R – радиус изгиба световода; $\Delta = (n_c^2 - n_o^2) / 2n_o^2$, где n_o – показатель преломления оболочки. Если рассматривается безоболочечный световод, то n_o – показатель преломления окружающей среды.

Физически уменьшение радиуса изгиба означает то, что лучи, соответствующие направляемым модам, падают на границу раздела “сердце-

вина–оболочка” под все более острыми углами и все меньшее число мод удерживается в сердцевине на изгибе. При некотором $R = R_{кр}$ все моды излучения должны покинуть световод. Экстремальное значение эффективного профиля показателя преломления световода достигается при $x = x_{экс}$, которое в соответствии с [7] определяется выражением:

$$R_{кр} = r + \frac{r}{\alpha} \left[\frac{n_c}{n_c - n_o} + (\alpha + 2) \right] \quad \text{и} \quad (2)$$

для малых α :

$$R_{кр} \approx \frac{r}{\alpha} \left[\frac{n_c}{n_c - n_o} \right] \quad (3)$$

Рассмотрим результаты расчета для конкретного случая: стеклянный ($n_c = 1,5100$) изогнутый безоболочечный световод. Радиус оболочки в таком случае полагается равным радиусу сердцевины, т.е. $r = \rho = 2,0$ мм. В качестве среды, окружающей световод, возьмем воду с показателем преломления $n_o = 1,3314$. В этих условиях расчет показывает, что $R_{кр} = 4,8$ мм. Расчетная зависимость значения критического радиуса изгиба от показателя преломления окружающей среды представлена на рис.2.

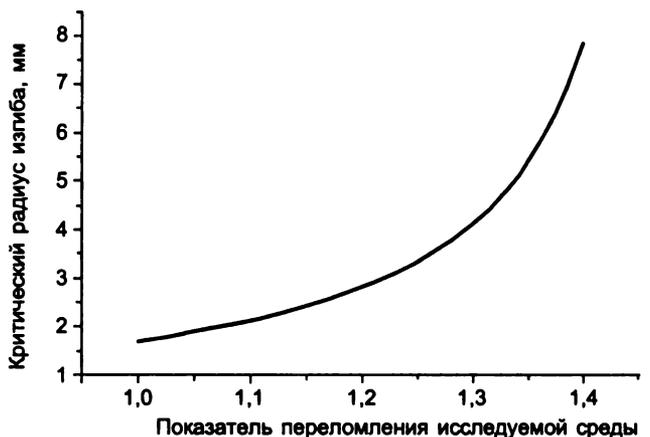


Рис. 2. Зависимость «критического радиуса изгиба» от показателя преломления исследуемой среды, диаметр световода $d = 4$ мм

Полученные результаты позволяют оптимальным образом построить рефрактометрическую схему измерений.

Принцип работы рефрактометра с изогнутым световодом основан на изменении условий полного внутреннего отражения света, проходящего через световод, в зависимости от показателя преломления окружающей среды и радиуса изгиба световода. Рабочую часть рефрактометра (световод) удобно представлять в виде U-образного стеклянного стержня, защищенного от механических воздействий. В прямом входном участке светово-

да формируются соответствующая диаграмма направленности лучей. Центральная часть световода (его изгиб) погружена в исследуемую жидкость, а на торцах расположены излучатель и приемник света. При этом в непосредственной близости от излучателя располагается второй фотоприемник, который контролирует интенсивность излучающего светодиода. Разница в сигналах, поступающих от этих двух фотоприемников, и является в данном случае измеряемым сигналом, а при определении содержания компонента в среде – аналитическим сигналом. Результат измерения после обработки сигнала выводится на индикатор в соответствующих единицах.

В принципе, рефрактометрические измерения можно строить двояким образом: с использованием “докритических” (отношение радиуса изгиба к диаметру световода $R/d > 10$) и “закритических” ($R/d < 10$) радиусов изгиба световода.

Как показали наши исследования, рефрактометр с большим докритическим радиусом изгиба световода (~80 мм при диаметре световода ~6,0 мм) требует высокой точности при его изготовлении и предъявляет серьезные требования в обращении с ним при эксплуатации. Это связано с тем, что входной и выходной концы изогнутого световода, расположенные на относительно большом расстоянии друг от друга, необходимо закреплять и герметизировать по отдельности, что в процессе эксплуатации приводит к частым поломкам световода. Кроме того, рефрактометр такой конструкции имеет довольно крупные габариты. Этим обусловлен интерес к световодным рефрактометрам с малым (закритическим) радиусом изгиба световода.

При моделировании световодного рефрактометра нужно учитывать и то обстоятельство, что реально используемые источники света имеют конечные размеры, сопоставимые с диаметром световода. Кроме того, технически сложно поместить такой источник света точно по оси световода, что может вызывать появление несимметричных вращающихся мод внутри световода. Это безусловно усложняют моделирование процесса распространения света по световоду. Ниже рассматриваются результаты экспериментальных исследований прохождения света по световоду в различных условиях.

В частности, проведены две серии экспериментов, в первой из которых показатель преломления окружающей световод среды фиксировался, а изменялась величина R/d , где d – диаметр световода, а во второй при фиксированном отношении R/d проводились измерения в средах с

различными показателями преломления. Реально в экспериментах использовались световоды с диаметром $d = 4,0$ мм и различными радиусами изгиба. На специально собранной установке в световод с помощью поворотной призмы направлялось излучение светодиода с большой излучающей площадкой. Выходной сигнал через систему линз, сфокусированных на торец световода, подавался на приемник с ПЗС-линейкой. Использование последней позволило осуществить регистрацию распределения интенсивности на выходном торце световода (рис. 3).

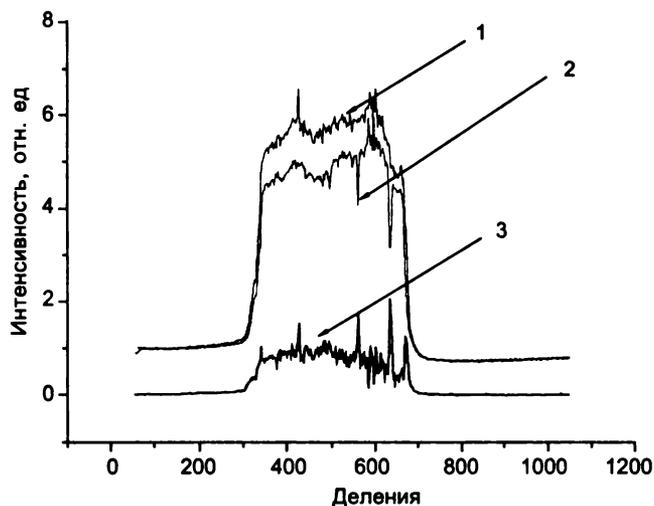


Рис. 3. Распределение интенсивности на выходном торце световода (в воздухе – 1, в среде – 2, разность сигналов – 3)

Полученные результаты приведены на рис. 4. Из графиков следует, что при уменьшении радиуса изгиба световода R падает пропускание, но чувствительность при этом растет (под чувствительностью измерений понимается отношение разности сигналов на выходном торце световода в воздухе и исследуемой среде к разности показателей этих сред).

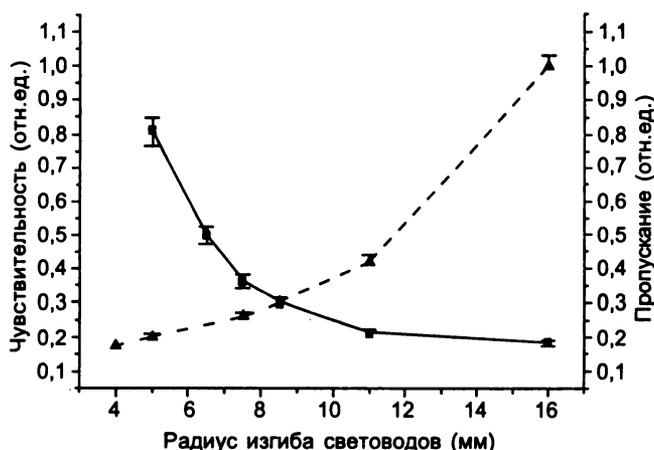


Рис. 4. Зависимость чувствительности изогнутого световода от радиуса его изгиба

Для получения сведений об угловом распределении выходящего излучения в качестве приемника излучения использовался фотодиод, который мог вращаться относительно оси световода (рис.5).

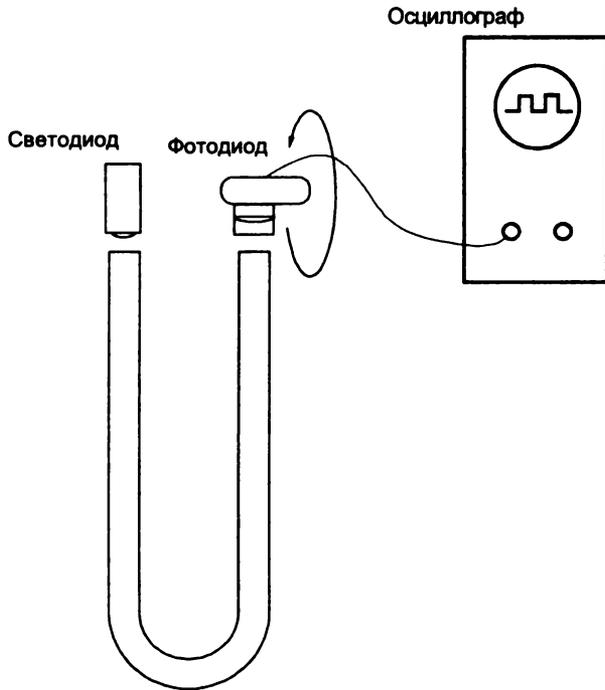


Рис. 5. Схема установки для исследования углового распределения выходящего излучения

Эксперимент обнаружил зависимость чувствительности измерений от угла поворота фотоприемника (рис.6). "Нулевой" угол наклона соответствует случаю, когда фотодиод расположен по оси выходного прямого участка световода. Угловое разрешение фотоприемника ~10 градусов. Из графиков видно, что чувствительность измерений максимальна, когда приемник расположен под углом 20+45 градусов к оси световода.

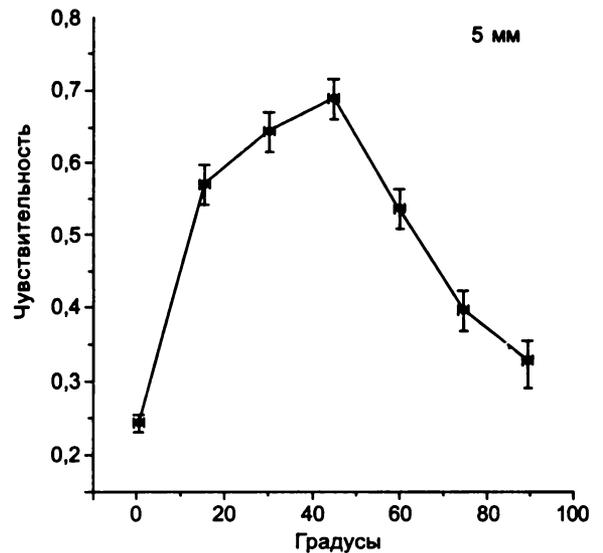
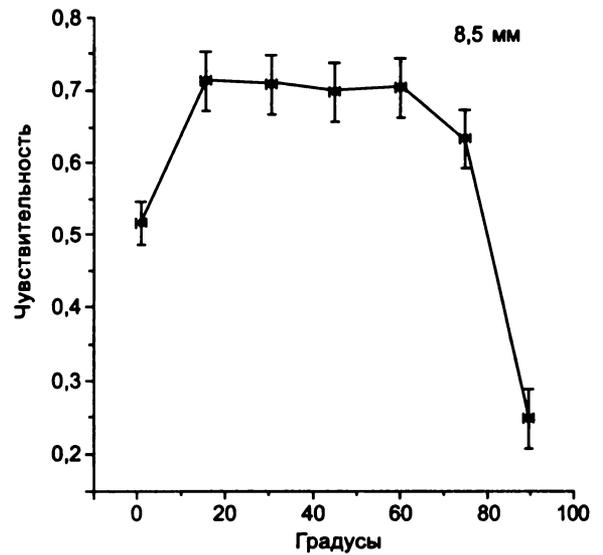
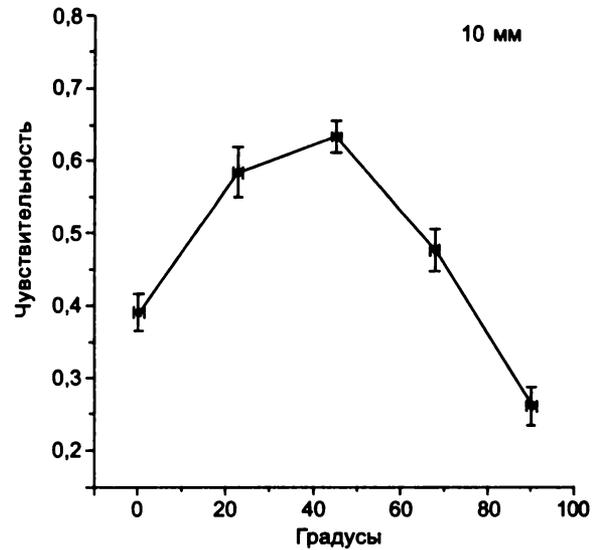
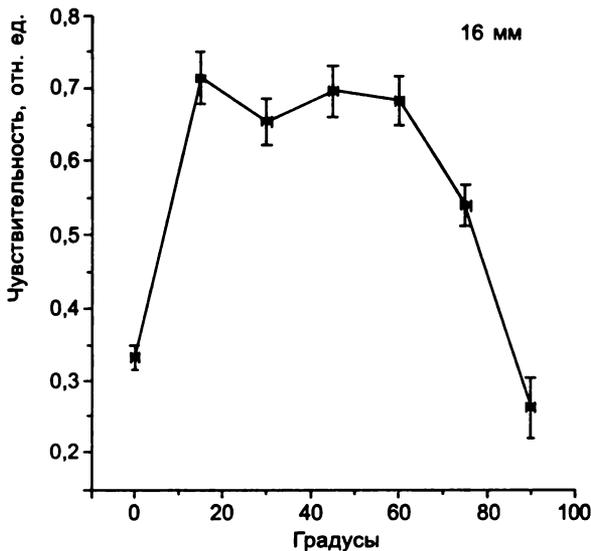


Рис. 6. Зависимость чувствительности (отн. ед.) от угла поворота фотоприемника и расстояния между световодом и фотодиодом

Для получения зависимости пропускания от показателя преломления исследуемой среды

была проведена серия экспериментов с использованием сред с различными показателями преломления от 1,33 до 1,46 (растворы сахарозы, бензины, раствор глицерина в воде). При большом отношении радиуса изгиба световода к его диаметру ($R/d \sim 100$) наблюдается нелинейная зависимость пропускания световода от показателя преломления анализируемой среды (рис. 7). Уменьшение пропускания с увеличением показателя преломления (в данном случае концентрации раствора сахарозы) хорошо согласуется с теорией, представленной в работе [8].

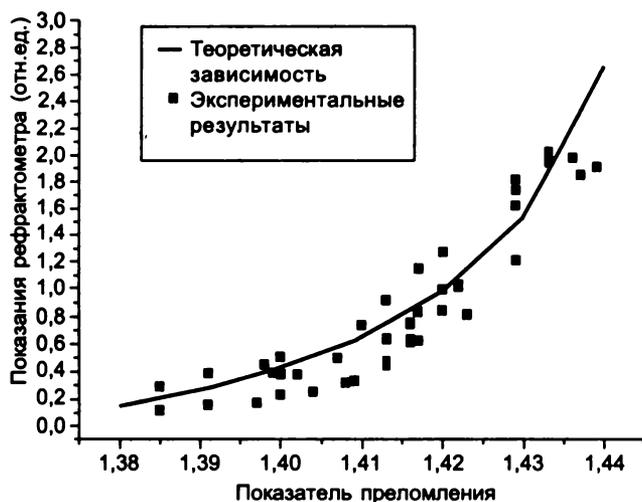


Рис. 7. Зависимость чувствительности от показателя преломления при большом отношении радиуса изгиба к диаметру световода

Общий световой поток, проходящий через изогнутый световод, при приближении к "критическому" радиусу изгиба и переходе через него резко падает. Зависимости относительных показаний рефрактометра с малым радиусом изгиба световода при изменении показателя преломления представлены на рис. 8. На графике видно, что данные зависимости могут быть аппроксимированы прямой линией. Близкий к прямой вид графика имеет несомненные преимущества при создании различных измерительных приборов. Однако, подобная зависимость не уклады-

вается в представления работы [8]. Как отмечалось выше, создание теории изогнутого толстого световода с малым радиусом изгиба для реальных условий связано с определенными трудностями и выходит за рамки данной работы.

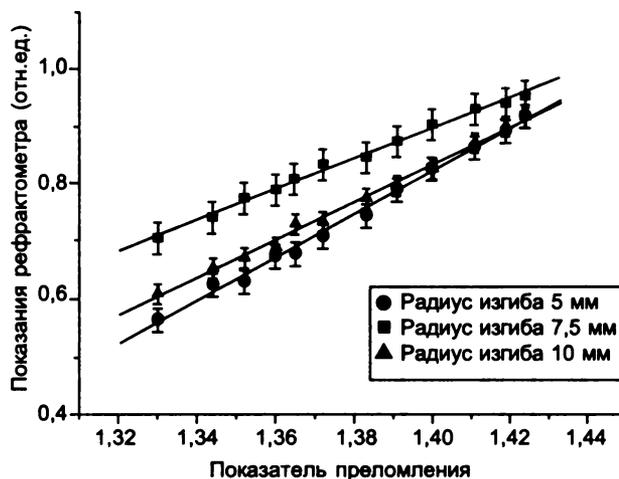


Рис. 8. Зависимость чувствительности от показателя преломления при малом отношении радиуса изгиба к диаметру световода

Таким образом, в работе исследованы возможности создания рефрактометра на основе изогнутого U-образного световода. Проведены экспериментальные и теоретические исследования световодного рефрактометра в широком диапазоне радиусов изгиба световода при различных условиях его освещения. Оценка чувствительности рефрактометра показала, что она максимальна при радиусах изгиба, близких к "критическому". Кроме того, чувствительность существенным образом зависит от угла, под которым принимается излучение с выходного торца световода. Наибольшее значение чувствительности достигается при расположении приемника излучения под углом 25 – 45° к оси световода.

В целом полученные результаты позволяют оптимальным образом выбрать параметры световода как узла рефрактометра для решения той или иной конкретной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974. 400 с.
2. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
3. Алексеев А.М. Волоконно-оптический рефрактометр / А.М.Алексеев, Ю.А.Голод, С.Г.Парчевский, В.Н.Черневский // Заводская лаборатория. 1995, Т.61, № 7. С. 24 – 26.
4. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения: Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 335 с.
5. Мейстер Т.Г. Электронные спектры многоатомных молекул. ЛГУ, 1969. 206 с.
6. Степанов Б.И. Люминесценция сложных молекул. Минск: АН БССР, 1955. 326 с.
7. Затыкин А.А. Взаимодействие излучения с поглощающей средой на участке световода с крутым из-

гибом / А.А.Затыкин, С.К.Моршнев, А.В.Францессон
// Квантовая электроника, 1983. Т.10, № 11. С.2283 –
2287.

8. Киржиниц Д.А. Крамерса – Кронига соотношения
//Физическая энциклопедия / М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. С.487.

* * * * *

FEATURES AND POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF WAVEGUIDES IN REFRACTOMETRY
V.V.Bertsev, V.B.Borisov, L.V.Gatilova, N.I.Egorova, A.S.Kozlov, I.O.Konyushenko, V.M.Nemetz

The refractometry in nowadays is wide used for analytical control of technological liquids in different branches of industry.

The possibility of increasing of efficiency of refractometric investigations by using lightguides to obtain the analytical signal is demonstrated.

Features and possibilities of using U-shape glass lightguides with different parameters are discussed.
