

06; 07; 12

**ПРОПУСКАНИЕ КВАРЦЕВЫХ МНОГОМОДОВЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН,
ИСПЫТЫВАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ
ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*В. М. Смирнов, Л. И. Скворцов, Л. В. Пономарев, В. А. Мурина,
В. Ш. Берикашвили, Е. И. Леонов*

Экспериментально исследовано изменение пропускания кварцевых многомодовых оптических волокон под воздействием гидростатического давления при различных условиях возбуждения и в различных режимах нагружения. Получено, что при многократных нагружениях или длительной статической выдержке под давлением оптическое волокно приходит в тренированное состояние, характеризующееся максимальным изменением пропускания и дающее верную оценку наибольшего ухудшения пропускания волокна.

Оптическое волокно, используемое для передачи светового сигнала под водой, подвергается воздействию гидростатического давления. В результате этого воздействия изменяются характеристики оптического волокна, в том числе и важнейшая с точки зрения систем передачи информации, ограниченного энергетическим потенциалом, — затухание мощности оптического сигнала (или пропускание).

Для защиты от давления в морских магистральных кабелях волокно помещается в металлическую трубу [1-4], однако при необходимости выполнения требований к малости диаметра, гибкости и плавучести кабеля такой метод защиты неприемлем.

Известно, что зависимость пропускания волокна от гидростатического давления в большой степени определяется структурой защитного покрытия [5-7] и внешним диаметром оптического волокна [8]. Но до настоящего времени не исследованы характеристики волокон под воздействием гидростатического давления при различных условиях возбуждения и режимах нагружения давлением. Необходимо учитывать, что оптическое волокно в ряде применений может находиться в агрессивной химической среде (непосредственно в морской воде или в органическом растворителе) и подвергаться растягивающим и изгибающим механическим нагрузкам, т. е. оно обязательно должно иметь защитное покрытие.

Целью настоящей работы являлось исследование изменения пропускания оптической мощности в кварцевом многомодовом волокне, подвергающемся циклическому и статическому нагружению давлением при различных условиях возбуждения.

Эксперимент

Исследовались кварцевые многомодовые волокна трех типов: со ступенчатым профилем показателя преломления в одном первичном защитном покрытии из полиметилсилоксана с каталитическим отвердителем (лак СИЭЛ) (А), со ступенчатым профилем показателя преломления в первичном (буферном) покрытии из лака СИЭЛ и вторичном покрытии из полиамида (В), с градиентным (параболическим) профилем показателя преломления в первичном покрытии из лака СИЭЛ и комбинированном вторичном покрытии из фторопласта и поли-

амида (В). Структура волокон и их параметры (числовая апертура и исходный коэффициент затухания на длине волны 0.85 мкм) представлены на рис. 1. Волокна были изготовлены модифицированным методом химического осаждения из паровой фазы и имели сердечник из плавленого кварца, легированного окисью германия, и светоотражающую оболочку из чистого кварца.

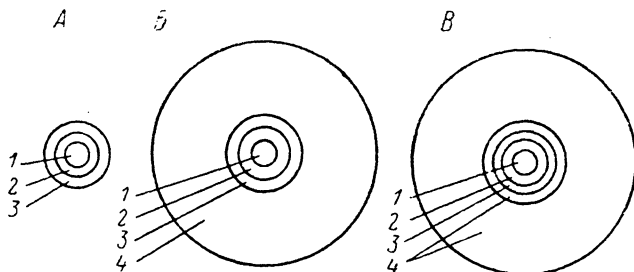


Рис. 1. Структура оптических волокон.

1 — сердечник \varnothing 50 (А, В), 60 мкм (Б); 2 — оболочка \varnothing 125 (А, В), 150 мкм (Б); 3 — вторичное покрытие (лак СИЭД) \varnothing 175 ± 10 (А, В), 200 ± 10 мкм (Б); 4 — вторичное покрытие: полиамид \varnothing 600 ± 75 мкм (Б), фторпласт \varnothing 215 ± 10 мкм и полиамид \varnothing 600 ± 75 мкм (В). $NA=0.22$ (А), 0.20 (Б), 0.18 (В); $\alpha=9.8$ (А, Б), 3.4 дБ/км (В).

Все исследуемые образцы оптических волокон имели длину 150 м и после изготовления не испытывали никаких механических воздействий. Каждый образец сматывался в катушку диаметром около 150 мм, витки волокна в которой укладывались свободно для исключения их бокового взаимодействия, вызывающего дополнительные потери [9], и помещался в камеру высокого давления, заполняющуюся водой. Два конца волокна длиной 2 м выводились из камеры

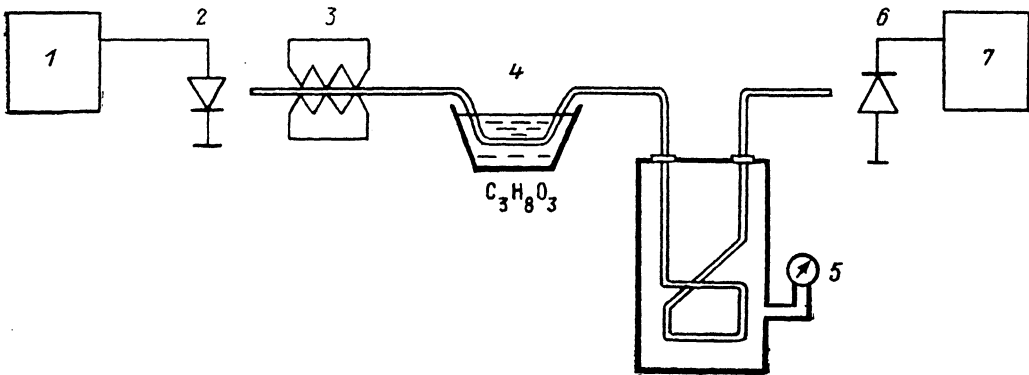


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 — устройство возбуждения источника возбуждения, 2 — СЛД, 3 — смеситель мод, 4 — выделятель мод оболочки, 5 — манометр, 6 — ФД, 7 — измеритель оптической мощности.

через резиновые уплотнители. Избыточное давление в камере повышалось ступенчато с шагом 10 кгс/см^2 в пределах от 0 до 120 кгс/см^2 ; в этих пределах не наблюдается потеря волокном устойчивости и отсутствуют связанные с ней оптические потери [10]. Максимальное давление соответствовало глубине 1200 м. Сброс давления осуществлялся скачком.

Световой импульсный сигнал стабилизированного источника излучения — сверхлюминесцентного диода вводился в оптическое волокно (частота следования импульсов 10 кГц , скважность 2, длина волны 0.85 мкм). Излучение источника полностью заполняло приемный конус волокна. Такой способ непосредственного возбуждения волокна наиболее близок к реальному, имеющему место в практических подводных системах передачи информации, а начальное распределение оптической мощности по модам при этом близко к однородному.

Условия возбуждения волокна изменялись ведением на начальном участке

волокна смесителя мод и делителя мод оболочки. Смеситель мод представлял собой две ребристые пластины, между которыми на участке длиной 10 см волокно зажималось с усилием, вызывающим дополнительные потери 3 дБ. При этом на начальном участке волокна создавалось модовое распределение, близкое к стационарному [11], и устанавливался режим усиленной связи мод. Делитель мод оболочки представлял собой кювету с глицерином (показатель преломления 1.474) длиной 8 см, в которую погружался участок волокна с удаленным защитным покрытием.

На выходном конце волокна измеритель оптической мощности регистрировал средний уровень мощности светового сигнала, поступающего на его кремниевый фотодетектор с диаметром чувствительной площадки, превышающим диаметр поперечного сечения волокна. Схема эксперимента показана на рис. 2.

Измерение мощности на выходе волокна проводилось при каждом значении давления после завершения переходных процессов, но не ранее, чем через 15 мин после установки давления. Погрешность измерения не превосходила 1 % и почти полностью была обусловлена неточностью установки давления. Пропускание волокна, находящегося под действием гидростатического давления, определялось как отношение выходной мощности светового сигнала из волокна, нагруженного давлением, к выходной мощности их ненагруженного волокна.

Результаты и обсуждение

Оптическое волокно А без вторичного покрытия было подвергнуто трем циклам нагружения давлением при квазиоднородном распределении мощности по модам. Наблюдавшееся изменение пропускания лежало в пределах точности измерений, т. е. пропускание практически оставалось неизменным. Поскольку лак СИЭЛ, применявшийся в качестве материала покрытия волокна А, почти нежимаемый (коэффициент Пуассона 0.498) и очень жесткий (модуль Юнга $E=13$ кгс/см²) по сравнению с плавным кварцем ($E=7.3 \times 10^5$ кгс/см²), то наличие такого покрытия не сказывается на силах, развиваемых в сердечнике и светоотражающей оболочке приложенным давлением. Из результатов видно, что механизм передачи оптической мощности в таком волокне не изменяется или изменяется очень незначительно. Модовый смеситель для изменения условий возбуждения волокна А применить не удалось из-за чрезвычайной хрупкости этого волокна.

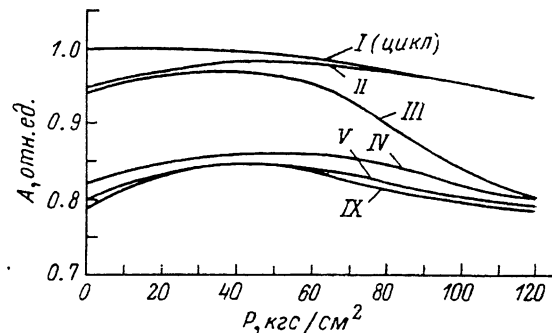
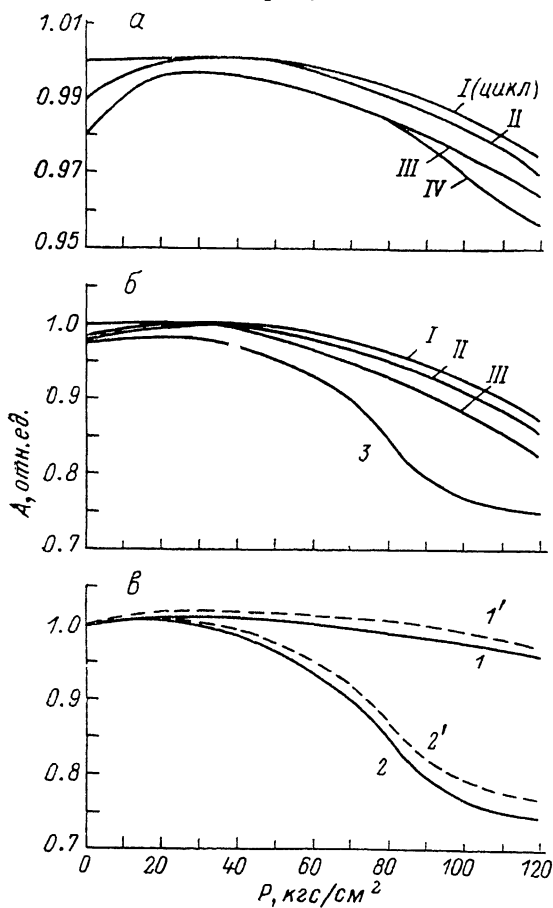


Рис. 3. Зависимость пропускания волокон B от избыточного давления.

Оптическое волокно B со вторичным покрытием из полиамида было подвергнуто девяти циклам нагружения давлением при квазиоднородном начальном модовом распределении. Зависимость пропускания от давления представлена на рис. 3. Лишь при первом цикле нагружения пропускание волокна с ростом давления монотонно убывало. После снятия давления пропускание не вернулось к исходному значению, а осталось на уровне 0.95. При всех последующих циклах нагружения пропускание росло до 30—40 кгс/см² и лишь потом убывало, причем после каждого из первых пяти циклов оно не возвращалось к предыдущему исходному значению, а оставалось на более низком уровне. После пятого цикла при дальнейших нагружениях как характер зависимости, так и значение пропускания почти не изменялись, т. е. волокно стало тренированным. Начиная с 70—80 кгс/см² скорость уменьшения пропускания с ростом давления понижается; кривые, соответствующие всем циклам нагружения, кроме двух первых, имеют здесь точку перегиба, т. е. по мере тренировки волокна кривые пропускания при высоких давлениях стремятся к насыщению.

В результате девяти циклов нагружения давлением от 0 до 120 кгс/см² пропускание волокна *B* в отсутствие давления застabilизировалось на уровне 0.79 исходного. Если предположить, что дополнительное затухание, индуцированное давлением, линейно зависит от длины волокна, то увеличение коэффициента затухания волокна *B* относительно исходного составило в отсутствие давления 6.85 дБ/км; при давлении 120 кгс/см² пропускание волокна *B* составило 0.785 исходного, что соответствует увеличению коэффициента затухания на 7 дБ/км.

Второй образец волокна *B* выдерживался под давлением 120 кгс/см² в течение 16 ч и после этой выдержки показал с точностью до погрешности измерения зависимость пропускания от давления, полученную на пятом—девятом



циклах нагружения первого образца.

Оптическое волокно с комбинированным фторопластово-полиамидным покрытием было подвергнуто шести циклам нагружения давлением. Зависимость пропускания от давления при квазиоднородном модовом распределении представлена на рис. 4, а. Характер изменения пропускания волокна *B* аналогичен характеру зависимости для волокна *B*. Проявляются эффекты тренировки и стремления кривых пропускания тренированного волокна к насыщению. Пропускание максимально при давлениях 30—40 кгс/см². Однако пропускание волокна *B* изменяется под воздействием гидростатического давления меньше,

Рис. 4. Зависимость пропускания волокна *B* от избыточного давления при квазиоднородном начальном модовом распределении (а), в режиме усиленной связи мод (б) и при выделении мод оболочки тренированного волокна (в).

1 — квазиоднородное начальное распределение; 2 — режим усиленной связи мод; 1', 2' — соответствующие зависимости при возбуждении мод оболочки; 3 — пропускание после выдержки 60 ч.

чем пропускание волокна *B*: при избыточном давлении 120 кгс/см² пропускание тренированного волокна составляет 0.96 исходного (соответствует увеличению коэффициента затухания на 1.2 дБ/км), после снятия давления — 0.98 (соответствует увеличению на 0.6 дБ/км).

Полученные результаты показывают, что зависимости пропускания покрытых волокон от давления в большей степени определяются предисторией. Максимальное ухудшение пропускания волокон имеет место в результате многократных циклических нагружений давлением или длительной статической выдержки. Оба эти режима нагружения оказывают одинаковый эффект, заключающийся в тренировке волокна. Поэтому измерения пропускания, сделанные на первом цикле нагружения свежизготовленного волокна [5-8], не могут дать истинную оценку ухудшения пропускания волокна, предназначенного для работы под водой.

Изменение пропускания покрытых волокон под давлением, по-видимому, в основном связано с нерегулярностями их структуры (флуктуациями геоме-

трических и механических параметров по длине, дефектами), в результате прикладываемое давление вызывает неоднородные напряжения в волокне, приводящие к микроизгибам. Второй причиной является само наличие защитного полимерного покрытия, которое, даже будучи идеальным, трансформирует однородное всестороннее сжатие в неоднородные внутренние напряжения.

Подтверждением этого служит фактическая нечувствительность к давлению пропускания волокна *A*, не имеющего покрытия. То, что пропускание волокна *B* менее подвержено воздействию давления, чем пропускание волокна *B*, объясняется лучшим качеством изготовления волокна *B* и в некоторой степени, возможно, защитным эффектом слоя фторопласта, который характеризуется большей жесткостью по сравнению с полиамидом (модуль Юнга фторопласта 3×10^4 кгс/см², полиамида 2×10^4 кгс/см²).

При циклическом нагружении пропускание покрытых волокон восстанавливается до значения, имевшегося перед нагружением. Это долговременное изменение пропускания связано с тем, что области неоднородного напряжения волокна, в которых напряжения наибольшие (это внутренние поверхности цилиндрических покрытий и дефекты — концентраторы напряжений, большинство из них находится на границах слоев), и после снятия нагрузки первого цикла сохраняют часть напряжений. В окружающих областях после снятия внешней среды нагружения и деформации стремятся релаксировать, однако этому препятствуют напряженные области, т. е. в волокне возникает система внутренних неоднородных остаточных напряжений (растяжения и сжатия), в основном сконцентрированных у границ кварцевой светотражающей оболочки. После проведения второго и последующих циклов остаточные напряжения усиливаются, пока наконец не наступит такое состояние волокна, когда все его нерегулярности будут вовлечены в создание системы остаточных напряжений и все напряженные области будут сохранять максимальные напряжения, которые они способны поддерживать без релаксации. Эти напряжения вызывают остаточные микроизгибы волокна.

При длительной статистической выдержке волокна под давлением имеет место пластическая деформация — сжатие полимерных покрытий без полного восстановления формы, а также в принципе возможна необратимая текучесть кварцевого стекла сердечника и оболочки [12] и ухудшение его оптических свойств. Процессы, происходящие в волокне в режимах многократного циклического и длительного статического нагружения, приводят в конечном итоге к одинаковым результатам, что свидетельствует об одинаковости остаточных напряжений и пластических деформаций, создаваемых в волокне в обоих режимах.

С остаточными явлениями связан немонотонный характер зависимости пропускания тренированного волокна от гидростатического давления: при его увеличении давления напряжения сжатия, создаваемые внешними силами, начинают уравнивать локальные напряжения растяжения, частично устраняя остаточные микроизгибы волокна. После достижения максимума пропускание уменьшается из-за микроизгибов, индуцируемых давлением; максимум пропускания наблюдается примерно при тех же значениях давления, при которых начинается уменьшение пропускания на первом цикле нагружения.

Повышая давление, можно достигнуть значения, при котором в пределах устойчивости волокна прекращается уменьшение его пропускания [10]; при этом значении все нерегулярности волокна, откликающиеся на гидростатическое сжатие, дают максимальный вклад в создание микроизгибов. В связи с тем, что тренированное волокно находится в напряженно-деформированном состоянии, соответствующем давлению, большему, чем реально прикладываемое, зависимость его пропускания начинает стремиться к насыщению при меньших давлениях, чем зависимость пропускания свежеизготовленного волокна при первых циклах нагружения.

Характер наблюдаемого изменения пропускания кварцевых оптических волокон аналогичен зависимости пропускания электрического коаксиального кабеля от давления, также имеющей гистерезисный вид [13]. Однако в оптических волокнах со вторичным покрытием этот эффект значительно сильнее. Тренировка волокна многократными нагружениями давлением аналогична его

тренировке термоциклированием, при котором пропускание уменьшается с каждым последующим циклом понижения температуры [14, 15].

Зависимость пропускания волокна B от гидростатического давления исследовалась в режиме усиленной связи мод, создаваемой смесителем мод с вносимым затуханием 3 дБ (рис. 4, б). Свежий образец волокна подвергался трем циклам нагружения и выдерживался под давлением 120 кгс/см² в течение 60 ч. Затем волокно подвергалось еще двум циклам нагружения, при которых были получены совпадающие зависимости пропускания, т. е. после выдержки волокно пришло в тренированное состояние.

Характер зависимости в режиме усиленной связи мод в целом сохраняется, однако пропускание волокна при этом ухудшается с ростом гидростатического давления значительно больше, чем при квазиоднородном начальном модовом распределении: при избыточном давлении 120 кгс/см² пропускание тренированного волокна составляет 0.75 от пропускания свежизготовленного ненагруженного волокна с усиленной связью мод (соответствует увеличению коэффициента затухания на 8.3 дБ/км), после снятия давления — 0.975 (соответствует увеличению на 0.7 дБ/км). Полученный результат объясняется тем, что распространяющиеся в волокне моды высших порядков, наиболее интенсивно теряющие свою мощность на микроизгибах как исходных, так и появляющихся в результате воздействия на волокно гидростатического давления, в условиях сильной модовой связи отнимают от мод низших порядков большую мощность, понижая тем самым общее пропускание волокна. После снятия смесителя мод волокно было подвергнуто новому циклу нагружения. Зависимость пропускания от гидростатического давления практически совпала с полученной ранее.

С целью выяснения роли светоотражающей оболочки в процессе передачи оптической мощности по волокну, подвергающемуся воздействию гидростатического давления, моды оболочки отсекались выделителем мод. Исследовался тот же тренированный образец. Полученные зависимости пропускания тренированного волокна при квазиоднородном начальном модовом распределении и в режиме усиленной связи мод представлены на рис. 4, в. При избыточном давлении 120 кгс/см² пропускание тренированного волокна при квазиоднородном начальном модовом распределении составляет 0.96 от пропускания при 0 кгс/см² (соответствует увеличению коэффициента затухания на 1.2 дБ/км), в режиме усиленной связи мод — 0.745 (соответствует увеличению на 8.5 дБ/км).

По сравнению с режимом возбуждения мод оболочки в режиме выделения мод оболочки наблюдается уменьшение пропускания при всех значениях гидростатического давления. Это связано с тем, что при возбуждении мод оболочки имеет место обмен мощностью между модами, распространяющимися в сердечнике и в оболочке, а при выделении мод оболочки такого обмена практически нет. Поэтому если, допустим, в отсутствие гидростатического давления оптическая мощность на выходе волокна при возбуждении и при выделении мод оболочки была одной и той же, то при воздействии давления обменивающиеся между собой мощностью моды сердечника и возбужденные источником моды оболочки донесут до выхода волокна оптическую мощность, большую, чем одни лишь моды сердечника и возбуждаемые их хвостами по мере распространения очень слабые моды оболочки. С увеличением давления усиливается связь между модами сердечника и оболочки, поэтому пропускание волокна при возбуждении мод оболочки все больше превышает пропускание волокна при их выделении. Это проявляется наиболее отчетливо в режиме усиленной связи мод (рис. 4, в), когда обмен мощностью между сердечником и оболочкой более интенсивный, т. е. возбуждение мод оболочки в некоторой степени ослабляет ухудшающее воздействие гидростатического давления на пропускание волокна.

Выводы

Таким образом, исследовано пропускание кварцевых многомодовых оптических волокон в полимерном защитном покрытии, испытывающих воздействие гидростатического давления. Волокна подвергались циклическим на-

гружениями и статической выдержке под давлением; пропускание измерялось при возбуждении источником излучения мод сердечника и светоотражающей оболочки и при возбуждении мод одного сердечника, а также при квазиоднородном начальном модовом распределении и в режиме усиленной связи мод.

В результате многократных циклических нагружений и длительной статической выдержки под давлением оптическое волокно приходит в тренированное состояние, характеризующееся предельным необратимым ухудшением пропускания. По значениям пропускания, полученным на первых циклах нагружения давлением свежизготовленного волокна, нельзя судить об изменении пропускания волокна при его продолжительной работе на глубине или в режиме многократных погружений и всплываний. Обоснованную оценку такого изменения дает тренированное волокно.

В оптических волокнах, подвергающихся воздействию гидростатического давления, следует избегать макро- и микроизгибов, неоднородностей, дефектов и других факторов, вызывающих усиление связи мод, поскольку с ростом давления пропускание волокон с усиленной связью мод резко ухудшается. В то же время при возбуждении источником излучения мод оболочки ухудшение пропускания волокна с ростом давления несколько меньше, чем при возбуждении мод одного сердечника.

Литература

- [1] *Amano K.* // IEEE J. of Quant. Electron. 1982. Vol. QE-18. N 4. P. 697—704.
- [2] *Yabuta T., Yoshizawa N., Hashino K.* // Rev. of the Electrical Communication Laboratories. 1983. Vol. 31. N 6. P. 786—791.
- [3] *Kijima N., Mukunoki T., Yoshizawa N., Kawata O.* // Electrical Communication Laboratories Techn. J. 1984. Vol. 33. N 2. P. 319—332.
- [4] *Naganuma Y., Abe K.* // Wire J. Intern. 1984. Vol. 17. N 9. P. 179—186.
- [5] *Katsuyama Y., Mochizuki S., Yashiro T., Ishida Y.* // Electron. Lett. 1978. Vol. 14. N 12. P. 372—373.
- [6] *Алимов Х. П. и др.* // Квантовая электрон. 1979. Т. 6. № 12. С. 2657—2659.
- [7] *Гольдфарб И. С.* // Электросвязь. 1980. № 12. С. 16—19.
- [8] *Kawase M., Yamashita K., Nishimura M. et al.* // Electron. Lett. 1979. Vol. 15. N 7. P. 208—209.
- [9] *Tacshima M., Ebisawa F., Nakagawa K.* // Trans. of the IECE Jap. 1980. Vol. J63-B. N 5. P. 535—536.
- [10] *Nakagawa K., Takeshima M., Ebisawa F.* // Electron. Lett. 1980. Vol. 16. N 22. P. 838—839.
- [11] *Agarwal A. K., Unrau U.* // J. Opt. Commun. 1983. Vol. 4. N 4. P. 126—133.
- [12] *Sosman R. B.* The Properties of Silica. New York: The Chemical Catalog Company, 1927. Chapter 24. 856 p.
- [13] *Aida K., Aiki M.* // IEEE Trans. Commun. 1978. Vol. COM-26. N 2. P. 246—254.
- [14] *Gardner W. B. et al.* // Bell System Techn. J. 1981. Vol. 60. N 6. P. 859—864.
- [15] *Brockway Y. S., Sauzance M. R.* // Bell System Techn. J. 1983. Vol. 62. N 4. Pt 1. P. 993—1018.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
Ленинград

Поступило в Редакцию
13 ноября 1987 г.