

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Т. И. Брюшкова, Е. М. Дианов, Е. П. Никитин, А. М. Прохоров, Измерение малых коэффициентов поглощения стекол калориметрическим методом,  
*Квантовая электроника*, 1976, том 3, номер 11, 2500–2503

<https://www.mathnet.ru/qa12522>

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: 18.97.9.168

21 мая 2025 г., 02:10:47



«Квантовая электроника», 3, № 11 (1976)

УДК 621.391.029.7

Т. И. Брюшкова, Е. М. Дианов, Е. П. Никитин, А. М. Прохоров

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ СТЕКОЛ  
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

## Введение

Стеклянные волоконные световоды, обладающие достаточно малыми потерями, являются в настоящее время наиболее перспективной передающей средой для создания оптических линий связи. В литературе имеются сообщения о получении волоконных световодов с потерями всего лишь несколько дБ/км в спектральных областях 0,8—0,9 и 1,0—1,1 мкм (см., например, [1]). При разработке таких световодов важной задачей является определение величины потерь в исходных материалах, в частности измерение коэффициентов объемного поглощения на уровне  $\sim 10^{-5}$  см $^{-1}$  ( $\sim 4$  дБ/км).

Малые коэффициенты поглощения могут быть определены из измерений пропускания образцов различной толщины [2], из сравнения излучательных способностей образца и абсолютно черного тела [3], а также калориметрическим методом [4, 5], основанным на измерении повышения температуры образца за счет поглощения части проходящего сквозь него лазерного излучения. Последний обеспечивает, по-видимому, наибольшую точность при измерении коэффициентов поглощения  $\sim 10^{-4}$  см $^{-1}$  и менее, так как позволяет свести к минимуму влияние рассеянного света и поверхностного поглощения на результат измерения.

В настоящей работе сообщается об измерении калориметрическим методом коэффициентов объемного поглощения в ряде образцов промышленных и экспериментальных стекол.

## Описание эксперимента

Экспериментальная установка, использованная в данной работе, изображена на рис. 1. Измеряемый образец в виде цилиндра с плоскими полированными торцами (большинство образцов имели диаметр  $\sim 4$  мм, длину  $\sim 40$  мм) помещался в каустической области длиннофо-

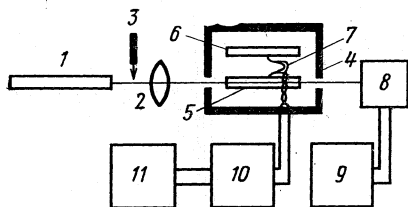
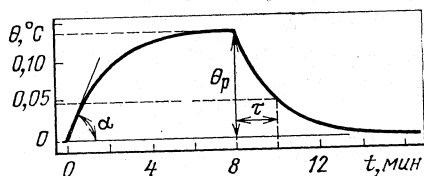


Рис. 1. Экспериментальная установка для калориметрических измерений:

1 — лазер на кристалле YAG: Nd $^{3+}$ ; 2 — линза; 3 — механический затвор для прерывания лазерного излучения; 4 — теплоизолирующая камера; 5 — измеряемый образец; 6 — сравниваемый образец; 7 — термопара; 8 — калориметр; 9 — микроамперметр; 10 — усилитель; 11 — самописец.

Рис. 2. Зависимость относительной температуры образца  $\theta$  от времени  $t$  в процессе измерения (стеклянный образец  $\varnothing 4 \times 40$  мм;  $P = 330$  мВт;  $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-4}$  см $^{-1}$ )  $t = 0$  — момент включения лазера;  $\operatorname{tg} \alpha = (d\theta/dt)t \approx 0$ .



кусной линзы. Сфокусированный линзой луч лазера на кристалле YAG : Nd $^{3+}$ , работающего в непрерывном режиме на длине волны 1,06 мкм, проходил сквозь образец вдоль его оси. Мощность прошедшего излучения измерялась калориметром. Нагрев облучаемого образца определялся с помощью термопары медь — константан (диаметр проволоки  $\sim 50$  мкм) относительно точно такого же образца, не подвергающегося воздействию лазерного излучения. Спай термопары приклеивался к боковой поверхности образца на равном расстоянии от его торцов. Сигнал с термопары подавался на усилитель, а затем на самописец. Образцы были расположены в горизонтальной плоскости, параллельно друг другу и поддерживались тонкими нейлоновыми нитями, чтобы обеспечить минимальный тепловой контакт с остальными элементами конструкции. Для уменьшения влияния окружающей атмосферы на стабильность измерения температуры, оба образца и термопара помещались в специальную теплоизолирующую камеру, имеющую отверстия для ввода и вывода излучения.

Эксперимент заключался в следующем. При открывании механического затвора излучение лазера попадало на образец и на самописце регистрировался процесс нагрева образца до тех пор, пока температура не достигла постоянной величины, определяемой условиями теплового равновесия. Затем затвор прерывал излучение и записывался процесс остывания образца до исходного состояния. На рис. 2 для иллюстрации представлены записи обоих процессов, полученные при измерении одного из образцов стекла. Из полученного графика определялась температура в состоянии теплового равновесия ( $\theta_p$ ) и постоянная времени процесса остывания ( $\tau$ ). Найденные из эксперимента величины использовались при вычислении коэффициента поглощения по формуле [4]

$$\alpha = C \rho R^2 \theta_p / P \tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент объемного поглощения;  $C$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность стекла;  $R$  — радиус образца;  $P$  — мощность лазерного излучения внутри образца, которая с учетом отражения на торцевых поверхностях выражается через измеряемую мощность ( $P_{\text{изм}}$ ) и показатель преломления материала образца ( $n$ ) следующим образом [4]:  $P = 1/2 P_{\text{изм}} [n + (1/n)]$ . Формула (1) получена исходя из предположения, что образец во время эксперимента ведет себя как однородно нагретое тело. Этому требованию достаточно хорошо удовлетворяли образцы, использованные в настоящей работе. Численные оценки, сделанные для образца кварцевого стекла размером  $\varnothing 4 \times 40$  мм на основании решения уравнения теплопроводности [6], показали, что по истечении времени  $\sim 3$  с после включения лазера максимальное отклонение температуры в точке крепления спая термомпары не превышает  $\sim 6\%$  от ее среднего значения по образцу.

Говоря о равномерном распределении температуры в образце, мы не учитывали поглощение излучения на торцевых поверхностях за счет различных загрязнений. Это поглощение приводит к возникновению потоков тепла, направленных от торцов образца к его середине, что в свою очередь вызывает повышение температуры в точке крепления спая термомпары. Если поверхностное поглощение достаточно велико, то повышение температуры может быть значительным, и коэффициент поглощения, найденный по формуле (1), может существенно превышать истинную величину объемного поглощения. Эксперименты, сделанные в настоящей работе, показали, что применение специальной очистки образцов позволяет измерять коэффициенты объемного поглощения по формуле (1) вплоть до величин  $\sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ . При измерении коэффициентов объемного поглощения  $\sim 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и менее, даже используя специально очищенные образцы, не удастся полностью исключить влияние поверхностного поглощения и результат, полученный по формуле (1), всегда получается завышенным. Для таких измерений характерным является сильный разброс значений коэффициентов поглощения, связанный с различной степенью загрязнения торцевых поверхностей образцов.

Однако если использовать достаточно длинные цилиндрические образцы, то можно исключить влияние поверхностного поглощения на результат измерения. Так как тепловые источники, расположенные на торцах, будут оказывать влияние на температуру в средней части образца лишь спустя некоторое время, то представляется возможным измерять коэффициент объемного поглощения по начальному участку кривой нагрева [5]. Как показали эксперименты, для образцов стекла длиной 40 мм и диаметром 4 мм можно считать, что в течение примерно первых 30 с ход кривой нагрева определяется только объемным поглощением, что позволяет использовать для измерений начальный участок кривой. Вычисление коэффициента поглощения в этом случае производилось по формуле, аналогичной (1) в работе [5]:

$$\alpha = \frac{C \rho R^2}{P} \left( \frac{d\theta}{dt} \right)_{t \approx 0}, \quad (2)$$

где  $(d\theta/dt)_{t \approx 0}$  — скорость нагрева в начальный момент времени (см. рис. 2).

### Обсуждение результатов измерений

В работе были измерены коэффициенты поглощения на длине волны 1,06 мкм в ряде образцов кварцевого стекла, многокомпонентного оптического стекла, серийного неоптимального лазерного стекла, а также в образцах оптического кристаллического кварца особой чистоты. Результаты измерений представлены в таблице. Все цифры, относящиеся к кварцевому стеклу, представляют собой средние значения нескольких измерений и определены по формуле (2). Средняя случайная ошибка этих измерений не превышала  $\sim 25\%$ . Значения коэффициентов поглощения для многокомпонентных и лазерных стекол, а также для образца кристаллического кварца, вычисленные по формулам (1) и (2), получены при усреднении результатов нескольких измерений. Средняя случайная ошибка в этом случае не превышала  $10\%$ .

Хорошее совпадение величин коэффициентов поглощения, полученных в настоящей работе для образцов лазерных стекол ЛГС-250-3 и ЛГС-247-2, с их паспортными значениями, измеренными на образцах длиной  $\sim 1$  м (приведены в таблице в круглых скоб-

Материал	Образец	$\alpha_{1,06\text{мкм}}, \text{см}^{-1}$	[ОН <sup>-</sup> ], вес. %
Кварцевое стекло	КСГ № 1	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$
	№ 2	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$
	№ 3	$2 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$
	КИ	$5 \cdot 10^{-4}$	
	КУ	$4 \cdot 10^{-5}$	
	Хлоридный № 16 Гидридный № 8	$0,9 \cdot 10^{-5}$ $0,8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-2}$
Кристаллический кварц*		$2,8 \cdot 10^{-4}$	
Многокомпонентное стекло**	№ 1	$9 \cdot 10^{-4}$	
	№ 2	$4,5 \cdot 10^{-4}$	
Лазерное стекло	ЕД-2-1	$4,6 \cdot 10^{-4}$	
	ЛГС-250-3	$1,2 \cdot 10^{-3}$ ( $1,3 \cdot 10^{-3}$ )	
	ЛГС-247-2	$2,1 \cdot 10^{-3}$ ( $2,5 \cdot 10^{-3}$ )	

\* Образец кристаллического кварца, получен методом гидротермального синтеза во ВНИИ синтеза минерального сырья Министерства геологии СССР.

\*\* Образцы опытных варок оптического силикатного стекла.

ках), показывает, что систематическая ошибка калориметрического метода в данном случае невелика. Максимальная разница, полученная для стекла ЛГС-247-2, не превышает ~ 20%. На основании приведенных в таблице данных можно сделать вывод, что многокомпонентное стекло пока не может рассматриваться в качестве исходного материала для изготовления волоконных световодов с малыми потерями. Лучший результат, полученный для образца № 2 (см. таблицу), составляет  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$  (~ 200 дБ/км). Измерения коэффициентов поглощения в кварцевых стеклах типа КСГ, полученных от трех различных изготовителей, а также в промышленном кварцевом стекле типа КУ показали, что все исследованные образцы обладают достаточно малым поглощением на длине волны 1,06 мкм и представляют интерес в качестве исходных материалов для оптических волокон. Однако следует отметить, что высокое содержание гидроксильных групп в стеклах типа КСГ вызывает сильные полосы поглощения (~ 100 дБ/км и более) с максимумами на длине волны 0,72, 0,88 и 0,945 мкм (см., например, [7]). В настоящее время хорошо известно, что поглощение в ближней инфракрасной области спектра обусловлено наличием в стекле не только гидроксильных групп, но и ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , а также ряда других ионов [8]. Для приведенных в таблице образцов кварцевых стекол типа КСГ была проделана серия анализов на содержание указанных примесей. Сравнились результаты анализов, выполненных в Институте химии силикатов АН СССР, в ГОСНИИ кварцевого стекла и в Ереванском политехническом институте. Однако сопоставить величины измеренных коэффициентов поглощения и результаты анализов не представляется возможным, так как концентрации ионов примесей, полученные в различных организациях для одного и того же стекла, сильно различаются (в некоторых случаях на два порядка). Самый низкий уровень поглощения был измерен в образцах кварцевого стекла, полученного методом химического осаждения из газовой фазы, в котором в качестве исходных соединений используются особо чистые гидриды и хлориды кремния [9]. Изготовленное таким методом кварцевое стекло имеет потери на поглощение  $\leq 1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и отличается также более низким содержанием гидроксильных групп, особенно хлоридный образец (см. таблицу).

Из сравнения результатов измерений коэффициентов поглощения в серийных лазерных неодимовых стеклах видно, что стекло ЕД-2-1 обладает существенно более низким поглощением, чем стекла ЛГС-250-3 и ЛГС-247-2. Это различие связано с чистотой стекла, так как поглощение, обусловленное тепловой населенностью уровня  ${}^4I_{11/2} \text{ Nd}^{3+}$  в данных стеклах [10], не превышает  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$ .

1. W. G. French, J. B. McChesney, P. B. O'Connor, G. W. Tasker. *Bell Syst. Techn. J.*, 53, 951 (1974).
2. J. P. Dakin, W. A. Gambling. *Opto-Electronics*, 5, 335 (1973).
3. H. G. Lipson, L. H. Skolnick, D. L. Stierwalt. *Appl. Optics*, 13, 1741 (1974).
4. D. A. Pinnow, T. C. Rich. *Appl. Optics*, 12, 984 (1973).

5. M. Hass, J. W. Davisson, H. B. Rosenstock, J. Babiskin. *Appl. Optics*, **14**, 1128 (1975).
6. E. Vernal G. *Appl. Optics*, **14**, 314 (1975).
7. А. В. Белов, М. М. Бубнов, А. Н. Гурьянов, Д. Д. Гусовский, Г. Г. Девятых, Е. М. Дианов, А. С. Конов, В. Г. Лужаин, Е. П. Никитин, А. В. Николайчик, А. М. Прохоров, А. С. Юшин. «Квантовая электроника», **2**, 2103 (1975).
8. G. R. Newns, P. Pantelis, J. L. Wilson, R. W. J. Uffen, R. Worthington. *Opto-Electronics*, **5**, 289 (1973).
9. А. В. Белов, М. М. Бубнов и др. «Письма в ЖТФ», **1**, 689 (1975).
10. Е. М. Дианов, А. Я. Карасик, А. А. Кутъенков, В. Б. Неуструев, И. А. Щербаков. «Квантовая электроника», **3**, 168 (1976).

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

Поступило в редакцию  
28 апреля 1976 г.

Т. И. Врушкова, Е. М. Дианов, Е. Р. Никитин, А. М. Прохорова. **Measurement of Low Absorption Coefficients in Glasses by the Calorimetric Method.**

The calorimetric method has been employed to measure the volume absorption coefficients in a number of commercial and experimental glasses. An experimental system is described, the results are presented of measurements at the wavelength of  $1.06 \mu$ . The lowest absorption level amounting to  $\sim 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  has been obtained in the quartz glass samples manufactured by the method of chemical deposition from the gas phase.

«Квантовая электроника», **3**, № 11 (1976)

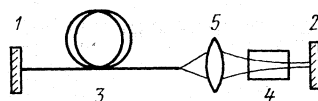
УДК 621.378.325:621.391.029.7

Е. М. Дианов, С. К. Исаев, Л. С. Корниенко, Н. В. Кравцов, В. В. Фирсов

### ЛАЗЕР СО СВЕТОВОДНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

В работах [1, 2] было показано, что изменение эффективной длины резонатора с помощью оптической линии задержки, образованной сферическими зеркалами, приводит к расширению функциональных возможностей лазера. Разработанные недавно стеклянные волоконные световоды с малыми потерями [3, 4] позволяют создавать компакт-

Рис. 1. Схема ОКГ со световодным резонатором.



ные линии задержки, которые можно использовать в качестве элемента резонатора лазера.

В данной работе приводятся первые экспериментальные результаты исследования лазера со световодным резонатором. Резонатор (рис. 1) состоял из плоских зеркал 1 и 2 (зеркало 1 — выходное с пропусканием 10%). Внутри резонатора располагались отрезки световода 3 различной длины  $L$ , свернутые в бухту диаметром 300 мм, кристалл  $\text{YAlG} : \text{Nd}^{3+} 4$  длиной 40 мм и согласующий объектив 5 с фокусным расстоянием 25 мм. Торцы кристалла и поверхностей линз объектива просветлены, торцы световода тщательно отполированы. Выходное зеркало располагалось на расстоянии 10 мкм от торца световода. Возбуждение активного элемента осуществлялось импульсной лампой накачки с длительностью вспышки около 300 мкс.

Используемый световод имел внешний диаметр 120 мкм и диаметр сердцевины 40 мкм. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n$  составляла величину  $\sim 0,01$ , что соответствует числовой апертуре световода 0,15. Полные потери световода на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм составляли величину, меньшую 10 дБ/км [4].

Показанный на рис. 1 световодный резонатор эквивалентен резонатору с двумя плоскими зеркалами и линзой, расположенной между ними. Оптимальное согласование световода достигается тогда, когда диаметр сечения основной моды эквивалентного резонатора на зеркале 1, т. е. на правом торце световода, составляет 0,64 диаметра его сердцевины [5]. В этом случае в световоде возбуждается мода  $HE_{11}$ , а расчетное расстояние между главной плоскостью объектива и торцом световода составляет 26,1 мм.