

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

N. N. Ogurtsova, I. V. Podmoshenskii,  
V. M. Shelemina, Спектральное поглощение кварцевого стекла при температурах 3000–4000 К,  
*TVT*, 1978, Volume 16, Issue 4, 744–748

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6930>

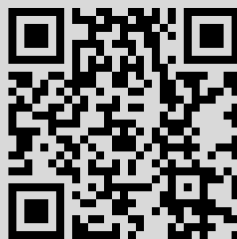
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.83

May 16, 2025, 14:13:46



УДК 536.3

**СПЕКТРАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 3000—4000 К***Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В., Шележина В. М.*

Проведено исследование спектрального поглощения тонких слоев  $10^{-3}$  см кварцевого стекла КУ, разогретых излучением плотной плазмы до температуры 3000—4000 К, когда достигается скорость испарения кварца 10—20 см/с. Исследование выполнено в области спектра 250—1000 нм скоростным методом полного внутреннего отражения на границе стекло — плазма. Показано, что поглощение экспоненциально зависит от частоты и хорошо описывается сходным с формулой Урбаха выражением. Наблюдаемый на опыте спектральный ход поглощения без противоречий объясняется как фундаментальное поглощение кварцевого стекла, идущее из возбужденных колебательных состояний валентной связи Si—O. Несмотря на то, что в условиях высоких температур во всей исследованной области спектра величина коэффициента поглощения достигает  $10^2$ — $10^3$  см $^{-1}$ , из-за малых толщин высокотемпературного слоя сильно ослабляется выход только УФ-излучения плазмы, но сохраняется достаточно хорошая прозрачность в видимой области спектра.

Смещение УФ-границы и уменьшение пропускания плавленного кварца при его разогреве в последнее время широко обсуждается в литературе. Это объясняется тем, что в силу уникальных свойств кварцевое стекло получило широкое распространение в различных областях науки и техники. Основные количественные данные о коэффициенте поглощения получены в области температур до 1500 К [1—3], где можно обеспечить определенность физических условий опытов. Однако в ряде применений (высокоинтенсивные источники света, воздействие мощного лазерного излучения и др.) происходит разогрев поверхностных слоев кварца до существенно более высокой температуры. В этих условиях ослабление излучения резко возрастает, а коротковолновая граница пропускания смещается в область спектра 300—400 нм [4]. В [4] показано, что поглощение в УФ-области, возникающее при контакте кварцевого стекла с плотной плазмой, является его собственным поглощением при высоких температурах. Весьма большая величина поглощения обусловлена дополнительным нагревом кварцевого стекла на несколько сот градусов выше точки кипения при нормальных условиях в соответствии с ростом давления паров при разряде.

Цель данной работы — детальное изучение спектрального поглощения тонких слоев плавленного кварца КУ, разогретого излучением плотной плазмы до температуры интенсивного испарения со скоростью 10—20 см/с. Исследование выполнено в области спектра 250—1000 нм скоростным методом полного внутреннего отражения на границе кварц — плазма, описание которого дано в [4]. Разогрев осуществлялся в капиллярном разряде с испаряемой стенкой, питаемой от источника света «Импульс-5» с трапециевидальной формой тока амплитудой 8000 А и длительностью на полувысоте  $3 \cdot 10^{-5}$  с. Использовались текстолитовые капилляры длиной 1 см, диаметром 0,25 и 0,4 см, часть внутренней поверхности которых составляла призма полного внутреннего отражения из стекла марки КУ. В обоих исследованных режимах была измерена температура плазмы, она оказалась

равной 40 000 К. Согласно оценкам [5], давление плазмы равно  $140 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> для  $d=0,25$  см и  $18 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> для  $d=0,4$  см. В качестве просвечивающего применялся источник света ЭВ-45 с длительностью плоской вершины импульса  $1 \cdot 10^{-4}$  с. Схема синхронизации запускала разогревающий разряд «Импульс-5» через  $5 \cdot 10^{-5}$  с после включения просвечивающего разряда и поглощение наблюдалось на плоской части импульса. Световой сигнал с помощью фотоэлемента преобразовывался в электрический и регистрировался на осциллографе с памятью С8-9. Для монохроматизации излучения использовались двойной кварцевый монохроматор или интерференционные светофильтры. По фотографиям спектра для измерений выбирались участки, свободные от линий поглощения.

Рис. 1 иллюстрирует последовательность включения разрядов и форму просвечивающего импульса ЭВ-45. Форма разогревающего кварц сигнала «Импульс-5» искажена поглощением в кварцевом стекле, через которое ведется наблюдение. Уменьшение пропускания кварцевого стекла начинается практически одновременно с включением его разогрева (рис. 1). Ранее показано [4], что при нагревании кварца качество отражающей поверхности практически не изменяется и наблюдаемое ослабление излучения является собственным поглощением разогретого поверхностного слоя кварцевого стекла. Специальными опытами при увеличении длительности просвечивающего импульса ЭВ-45 до 400 мкс показано, что через 100 мкс после прекращения разряда амплитуда просвечивающего сигнала достигает своей исходной величины. Следует отметить, что при разогреве излучением плотной плазмы измерение температуры и толщины прогретого слоя встречает большие трудности. В условиях данных опытов на поверхности кварцевого стекла достигается температура интенсивного испарения, которая в первом приближении принималась равной равновесной температуре кипения и определялась из выражения [6]

$$\lg P = 13,1 - \frac{24800}{T_k},$$

где  $P$  — давление паров над поверхностью стекла, нагретого до температуры кипения  $T_k$ . Для исследованных режимов с  $P=140 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $T_k=4200$  К и с  $P=18 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $T_k=3600$  К. Данные о толщине прогретого слоя могут быть получены из решения задачи теплопроводности. Для реализуемых на опыте стационарных режимов испарения согласно [7]  $l$  по порядку величины равна  $10^{-3}$  см. Приведенное значение толщины прогретого слоя, безусловно, является лишь ориентировочной оценкой. Поэтому нами по измеренной из осциллограмм величине пропускания с учетом наклонного хода луча при отражении находилась только оптическая толщина поглощающего слоя  $K_e l_e$ , где  $l_e$  — эффективная толщина прогретого слоя с постоянной температурой, равной  $T_k$ . Величина  $l_e$  находится из условия  $K_e(T_k)l_e = \int K_e(T) dl$  и в принципе может несколько изменяться при изменении частоты. Экспериментально полученная частотная зависимость  $K_e l_e$  правильно отражает спектральный ход коэффициента поглощения кварцевого стекла при данной температуре при допущении, что для заданного

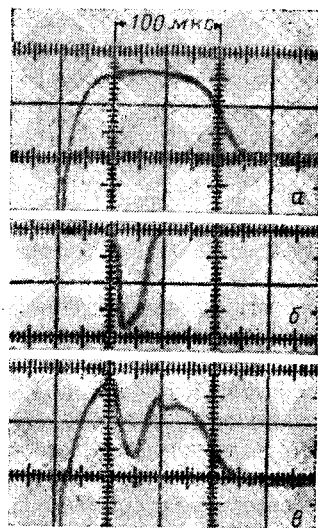


Рис. 1. Осциллограммы излучения: а — просвечивающий разряд ЭВ-45; б — разогревающий кварцевое стекло разряд «Импульс-5»; в — просвечивающий разряд при включенном разогреве

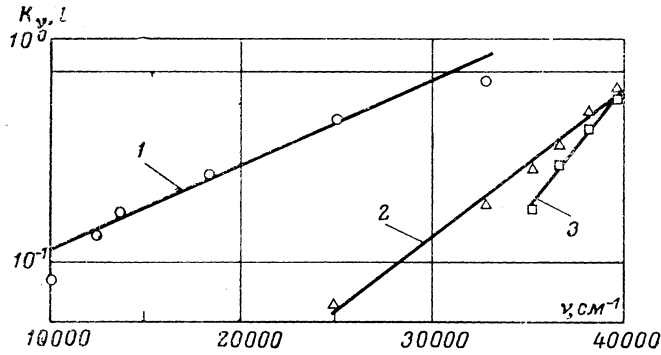


Рис. 2. Частотная зависимость оптической толщины кварцевого стекла КУ, разогретого до температуры 4200 К (1), 3600 К (2), 3000 К [8] (3)

режима  $l_0$  слабо зависит от длины волны. Измерения выполнены для момента времени, соответствующего началу спада тока на заднем фронте импульса, где поглощение максимально.

Полученные результаты приведены на рис. 2 и в таблице. На график нанесены также данные работы [8], где разогрев стекла КУ до интенсивного испарения с температурой 3070 К осуществлялся при давлении, близком к атмосферному. Анализ экспериментальных данных показал, что во всех трех случаях частотная зависимость коэффициента поглощения кварцевого стекла, разогретого до температуры интенсивного испарения, близка к экспоненциальной и качественно описывается сходным с формулой Урбаха выражением

$$K_v = K_0 \exp[1,435\sigma(\nu - \nu_0)/T],$$

где  $\nu$  — исследуемая частота,  $\text{см}^{-1}$ ;  $T$  — температура поглощающего слоя, К;  $\sigma$ ,  $K_0$ ,  $\nu_0$  — постоянные. Коэффициент  $\sigma$  найден из наклона экспериментальных кривых рис. 2. Его величина несколько понижается с возрастанием температуры

$$\sigma = 2,2 - 4,2 \cdot 10^{-4} T_K.$$

$\nu, \text{см}^{-1}$	4200 К			3600 К			3070 К [8]		
	$K_\nu l$	$K_\nu \cdot 10^{-2}, \text{см}^{-1}$	$l \cdot 10^{-4}, \text{см}$	$K_\nu l$	$K_\nu \cdot 10^{-2}, \text{см}^{-1}$	$l \cdot 10^{-3}, \text{см}$	$K_\nu l$	$K_\nu, \text{см}^{-1}$	$l \cdot 10^{-2}, \text{см}$
10 000	0,08	2,24	3,57						
12 200	0,14	2,74	5,1						
13 500	0,18	3,35	5,37						
18 200	0,28	5,52	5,07						
25 000	0,57	11,1	5,13	0,06	0,27	2,22			
33 000	0,92	26,2	3,51	0,21	1,5	1,4			
35 500				0,31	2,2	1,4	0,2	8,3	2,4
37 000				0,43	3,0	1,5	0,33	12,3	2,68
38 000				0,65	4,0	1,62	0,50	20,3	2,46
40 000				0,83	5,33	1,4	0,74	30,4	2,43
$l_{\text{ср}}$			4,62			1,6			2,49

Постоянные  $K_0$  и  $\nu_0$  из имеющихся экспериментальных данных определить нельзя. Воспользоваться для этого абсолютными измерениями коэффициента поглощения, выполненными при температурах  $< 2000$  К [1–3] затруднительно, так как полученная в этих условиях частотная зависимость поглощения кварцевого стекла даже качественно имеет иной вид. Можно полагать, что учет температурного сдвига граничной частоты  $\nu_0$  и температурной зависимости  $K_0$  не окажет существенного влияния на величину

коэффициента поглощения в исследованном нами длинноволновом крыле. Поэтому в первом приближении принимаем для  $K_0$  и  $\nu_0$  значения при нормальных условиях  $K_0=10^5$  см<sup>-1</sup>,  $\nu_0=67\,000$  см<sup>-1</sup>. При этом допущении оценен спектральный коэффициент поглощения кварцевого стекла при температуре 3000—4000 К, а из сопоставления с экспериментальными данными  $K_\nu$  найдена эффективная толщина прогретого слоя. Результаты этих расчетов приведены в таблице, откуда видно, что для заданной температуры толщина прогретого слоя хорошо согласуется с проведенной выше оценкой, что свидетельствует о реальности сделанных допущений и подтверждает тепловой характер наблюдаемого поглощения. В исследованной области спектра 250—1000 нм коэффициент поглощения достигает 100—1000 см<sup>-1</sup>. Однако из-за малой толщины высокотемпературного слоя ослабление излучения плазмы при наблюдении через кварцевую стенку сравнительно невелико.

Были поставлены специальные опыты по исследованию изменения прозрачности кварцевого стекла КУ в зависимости от времени разогрева. В этом случае разогревающий и просвечивающий разряды соединялись последовательно и питались от АВ-45, чем автоматически достигалась синхронность их включения. Проведенные исследования показали, что во временном ходе поглощения можно выделить две фазы. Быстрый рост поглощения на переднем фронте определяется временем разогрева стекла до температуры кипения и выхода на квазистационарный режим испарения. Гораздо более медленное увеличение поглощения в пределах плоской части токового импульса, по-видимому, связано с нарастанием толщины прогретого слоя за счет дополнительного объемного поглощения в нем более длинноволновых квантов. Наблюдаемую на опыте задержку в восстановлении исходной прозрачности кварцевого стекла после прекращения его разогрева можно объяснить рассеянием излучения на микронеоднородностях, возникающих в перегретом поверхностном слое при резком спаде давления на заднем фронте. То обстоятельство, что после разряда жидкий слой уносится с поверхности, по-видимому, является одной из причин полного восстановления прозрачности плавленого кварца.

Скоростным методом полного внутреннего отражения на границе кварц — плазма получены также данные об ослаблении излучения импульсной ксеноновой лампы ИФП-8000 в режиме, близком к номинальному, длительность синусоидального импульса тока 600 мкс при амплитуде 7000 А. Призма полного внутреннего отражения прижималась к наружной поверхности кварцевого баллона лампы через глицерин, обеспечивающий оптический контакт призмы и баллона, что позволило наблюдать отражение от его внутренней поверхности. Глицерин обладает достаточной вязкостью, прозрачен в УФ-области спектра и имеет близкий к кварцу показатель преломления. Специальными опытами было показано, что под воздействием излучения лампы с  $\lambda \leq 300$  нм во всех обследованных нами иммерсионных средах (глицерин, дистиллированная вода, концентрированный раствор сахара) образуются микропузыри и появляется обусловленное рассеянием на них дополнительное ослабление излучения, соизмеримое с исследуемым эффектом тепловой непрозрачности стекла. Поэтому измерения выполнены на лампе с баллоном из легированного кварцевого стекла, существенно ослабляющего излучение с  $\lambda \leq 300$  нм. Проведенные измерения показали, что в исследованной нами области спектра 310—650 нм максимальное уменьшение пропускания баллона при разряде не превышает 5%.

Вся совокупность полученных данных по спектральному поглощению горячего кварцевого стекла без противоречий объясняется как фундаментальное поглощение, идущее из возбужденных колебательных состояний валентной связи Si — O. Этому представлению соответствуют обратимый характер поглощения и полученная формула, в которой Больцмановский множитель описывает температурное возбуждение колебаний. В газах

аналогичный эффект хорошо известен и изучен как экспериментально, так и теоретически. Отмеченное в работе дополнительное влияние рассеяния на пузырьках относится к заднему фронту импульса, где быстрый спад газового давления создает перегрев и вскипание поверхностного слоя. В квазистационарном режиме на плато тока температурная зависимость столь однозначна, что уместно ставить вопрос об определении температуры нагрева кварца по наклону спектральной характеристики. Явных признаков участия других видов поглощения в опытах не установлено. Хорошая воспроизводимость явления и отсутствие влияния выбора образца указывают на малую роль возможных примесей и чисто кварцевую природу поглощения. Незначимы и термохимические превращения, поскольку в спектре не замечено появления новых спектральных полос или скачков  $K_v$ , нарушающих монотонную зависимость поглощения от температуры. В расплаве стекла при температуре 3000–4000 К существует быстрая кинетика для всех процессов. Она создает хорошие условия для выполнения термодинамических равновесий. Поэтому мало вероятно появление сверхравновесного поглощения вследствие интенсивного плазменного облучения.

Ленинград

Поступила в редакцию  
16 V 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. C. Beder, C. D. Bass, W. L. Shackelford. *Appl. Optics*, 10, № 10, 2263, 1971.
2. А. В. Ванюшин, В. А. Петров. *ТВГ*, 14, № 3, 661, 1976.
3. А. В. Ванюшин, В. А. Петров. *ТВГ*, 14, № 1, 87, 1976.
4. С. Н. Белов, М. И. Демидов, Н. Н. Огурцова и др. *ЖПС*, 10, № 3, 408, 1969.
5. Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, П. Н. Роговцев. *ТВГ*, 9, № 3, 468, 1971.
6. H. L. Schick. *Chem. Phys.*, 60, 331, 1960.
7. П. Н. Роговцев. *ЖПС*, 12, № 5, 798, 1970.
8. И. В. Подмошенский, Л. П. Полозова, В. Н. Чирков, А. В. Яковлева. *ЖПС*, 9, № 1, 96, 1968.