

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. Я. Белов, О возможности исследования теп-
лофизических свойств стекла и сапфира мето-
дами температурных волн, *ТВТ*, 1978, том 16,
выпуск 4, 755–760

Использование Общероссийского математического портала
Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с
пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.220.255.141

5 ноября 2024 г., 02:34:53



УДК 535.5

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛА И САПФИРА МЕТОДАМИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

Белов Г. Я.

На основании ранее разработанного аналитического метода проводится исследование амплитудно-фазовых характеристик гармонических колебаний температуры и мощности в плоских слоях стекла марки КИ и сапфира, ограниченных стенками из платины, платины зачерненной только с внешней, внутренней или с внешней и внутренней поверхностей. Теплообмен с окружающей средой происходит излучением. Результаты расчетов с учетом объемного поглощения и селективности оптических свойств сравниваются с результатами, полученными в приближениях непрозрачной либо полностью прозрачной сред. Показано, что для стекла, ограниченного платиновыми стенками, учет прозрачности при 1000 и 1500 К не приводит к значительному отклонению результатов от приближения непрозрачной среды, а при толщинах слоя ~ 1 мм — от решения для предельно тонкого слоя. Для сапфира при 1500 К и выше роль прозрачности значительна, а при толщинах слоя ~ 1 мм может быть использовано приближение полностью прозрачного слоя. Установлены условия, при которых методы температурных волн и решение для предельно тонкого слоя могут быть успешно применены для исследования теплофизических свойств стекла и сапфира с учетом возможной погрешности в исходных данных по оптическим свойствам.

Данная работа является продолжением [1] и посвящена исследованию с помощью разработанного ранее метода амплитудно-фазовых характеристик в плоских слоях стекла марки КИ и монокристаллической окиси алюминия (сапфира), ограниченных непрозрачными стенками. Рассматриваются вопросы применимости для указанных материалов приближений непрозрачной либо полностью прозрачной среды в зависимости от толщины слоя и оптических свойств ограничивающих стенок.

Определяются условия, при которых целесообразно проводить определение теплофизических свойств стекла и сапфира методами температурных волн и применять в качестве первого приближения решение для предельно тонкого слоя.

Исследование проводится при условии, что теплообмен непрозрачных стенок с окружающей средой происходит только излучением. Оптические характеристики стекла марки КИ при $T=1000$ К заимствованы из [2], сапфира — из [3].

В связи с отсутствием в литературе исходных данных для стекла при более высоких температурах в оценочных расчетах принято, что при изменении температуры от 1000 до 1500 К коэффициент поглощения стекла увеличивается на 20%, а другие свойства (коэффициенты теплопроводности λ_r , объемной теплоемкости ρc_p и коэффициент преломления n) не изменяются. Объемное рассеяние не рассматривается, а селективность оптических свойств учитывается в приближении селективно-серой среды с аппроксимацией спектральных зависимостей семью отрезками ступенчатой кусочно-постоянной функции.

Дальнейшее увеличение числа ступеней аппроксимирующей функции, как показали расчеты, не приводит к заметному изменению результатов. Оптические свойства ограничивающих стенок соответствуют свойствам полированной платины [4], зачерненной ($\epsilon=1$) только со стороны внешних, внутренних или и с внешних и внутренних граничных поверхностей.

Комплексная амплитуда температурных колебаний аппроксимировалась полиномом седьмой степени, коэффициенты которого определялись по

методу [1] с равномерным распределением узлов коллокаций по глубине слоя. Время решения одного варианта задачи на машине БЭСМ-6 с учетом селективности составляло в среднем ~ 5 с (найденно из общего времени решения для 24 вариантов задачи, равного ~ 123 с).

В расчетах параметр Предводителя $\chi^2 = \omega L^2 / (\lambda_T / \rho c_p)$ (ω — круговая частота колебаний) варьировался, как и в

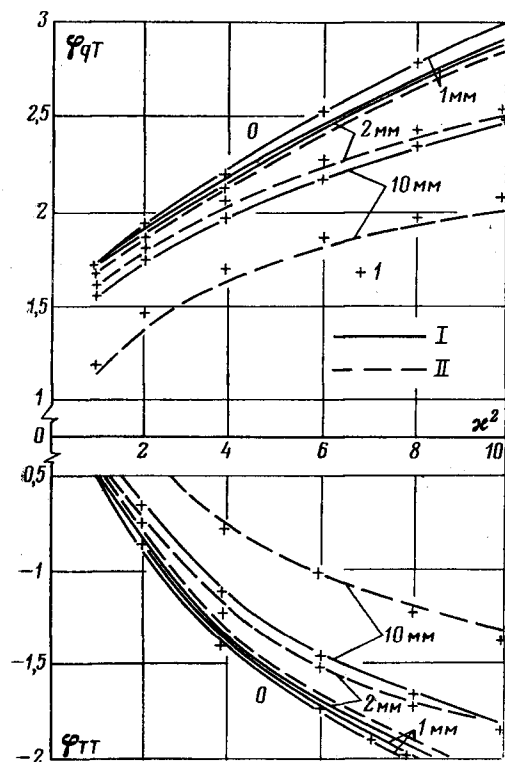


Рис. 1

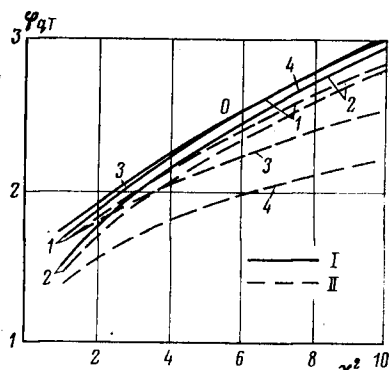


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости φ_{QT} и φ_{TT} от параметра χ^2 на платиновых стенках, ограничивающих слой стекла. Цифры у кривых указывают толщину слоя в мм. (Здесь и далее цифрой 0 отмечено решение для предельно тонкого слоя): I — значения, полученные в приближении непрозрачной среды; II — 1500 К

Рис. 2. Зависимость φ_{QT} от параметра χ^2 на ограничивающих стенках для слоя стекла толщиной 1 мм при 1500 К: I — приближение для непрозрачного слоя; II — приближение с учетом прозрачности слоя; 1 — случай слоя, ограниченного платиновыми стенками; 2 — платиновые стенки с зачерненными внешними поверхностями; 3 — платиновые стенки с зачерненными внутренними поверхностями; 4 — черные границы

[1, 5], в диапазоне 0,5–10; L — толщина слоя принималась равной 0,5; 1; 2; 5; 10 мм, T — температура, равная 1000, 1500 К — для стекла и 1500, 1800, 2000, 2300 К — для сапфира; λ_T — коэффициент теплопроводности, который для стекла принят равным 2,5 Вт/м·град, для сапфира — $10^4/T$ Вт/м·град.

При сравнительных расчетах с учетом объемного поглощения и в приближении непрозрачной и полностью прозрачной среды указанные свойства, кроме коэффициента объемного поглощения, принимались одинаковыми.

Результаты расчетов сдвига фаз между колебаниями мощность — температура φ_{QT} и температура — температура φ_{TT} на ограничивающих стен-

ках в зависимости от параметра κ^2 , толщины слоя L , температуры T и оптических свойств ограничивающих стенок приведены на рис. 1–7.

На всех приведенных графиках цифрой 0 отмечена кривая, соответствующая решению для предельно тонкого слоя.

Отметим, что решения для предельно тонкого слоя в случае непрозрачного, частично прозрачного и полностью прозрачного слоев совпадают. Сравнительный анализ приведенных результатов позволяет отметить сле-

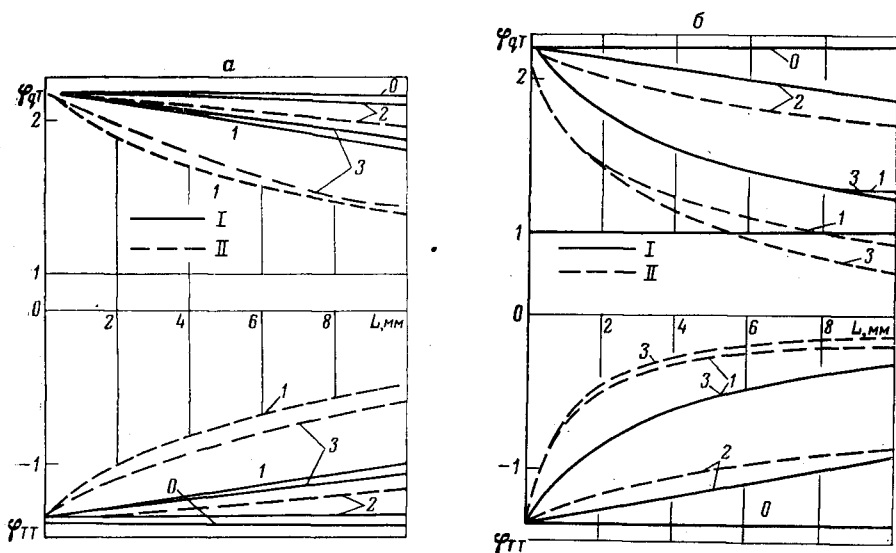


Рис. 3. Зависимости для сапфира Φ_{qT} и $\Phi_{TТ}$ от толщины слоя на ограничивающих платиновых (а) и черных (б) стенках при $\kappa^2=4$; I – 1500, II – 2000 К; 1 – с учетом прозрачности слоя; 2 – в приближении непрозрачной среды; 3 – в приближении полностью прозрачной среды

дующее. Для слоя стекла, ограниченного стенками из платины, учет прозрачности не приводит к значительному отклонению от результатов расчета в приближении непрозрачной среды, а при толщинах слоя ~ 1 мм расчетные данные приближаются к решению для предельно тонкого слоя (рис. 1).

В случае черных границ прозрачность стекла при $T=1500$ К оказывает значительное влияние даже при толщине слоя ~ 1 мм.

Влияние прозрачности оказывается более значительным и в случае применения платиновых стенок с зачерненными внутренними поверхностями. Зачернение только внешних поверхностей платиновых стенок приводит к менее существенному повышению влияния прозрачности (рис. 2). При значениях $T=1000$ К и $L \leq 1$ мм влияние оптических свойств стекла и ограничивающих стенок, как показали расчеты, менее значительно. Это связано с относительно малым вкладом радиационной составляющей в процесс теплообмена, что определяется увеличением в этом случае параметра $N = \lambda_T / L\sigma T^3$ до значений 45 и выше.

Для сапфира прозрачность слоя играет значительную роль во всей области изменения рассматриваемых параметров. При значениях $T \leq 1500$ К и толщинах $L \leq 10$ мм и при $T \approx 2000$ К и толщинах $L \leq 1$ мм может быть использовано приближение полностью прозрачной среды (рис. 3, а, б). При толщинах слоя сапфира $L \leq 1$ мм и высокоотражающих платиновых стенках проявляется меньшая зависимость результатов расчета от толщины и температуры слоя. Расчетные кривые при этом приближаются к решению для предельно тонкого слоя (рис. 4, 5, а). Это положение нарушается в случае черных стенок (рис. 5, б). Как и для стекла,

применение ограничивающих стенок из платины, зачерненной только с внешней стороны, приводит к менее заметному повышению роли прозрачности, чем применение стенок, зачерненных на внутренней поверхности (рис. 6).

Погрешность в отдельных оптических свойствах сапфира и платиновых стенок при $L \approx 1$ мм относительно слабо сказывается на зависимости φ_{qt} (χ^2) в области $\varphi_{qt} < 2,3$.

Это показано сравнением результатов расчетов при номинальных значениях исходных свойств и при внесении определенной величины погрешности в одно из определяющих свойств при прочих неизменных (номинальных) свойствах.

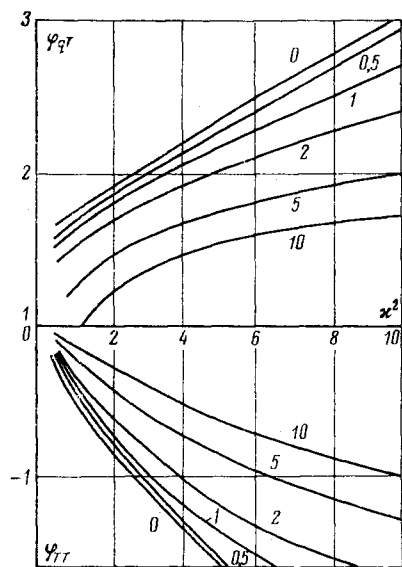


Рис. 4. Зависимости φ_{qt} и φ_{qtT} от параметра χ^2 на платиновых стенках, ограничивающих слой сапфира при $T=2000$ К. Цифры у кривых соответствуют толщине слоя в мм

Расчетная зависимость указанной величины от параметра χ^2 используется в теплофизической практике при определении методом температурных волн коэффициента теплоемкости материала [5]. Результаты расчета F для слоя стекла и сапфира толщиной ~ 1 мм практически совпадают с зависимостью $F(\chi^2)$ для предельно тонкого слоя.

В связи с этим теплоемкость стекла и сапфира может быть определена на основании исследования амплитудных характеристик колебаний температуры и мощности на высокоотражающих стенках плоских образцов при толщинах $L \leq 1$ мм по методикам, аналогичным [5].

На указанных образцах с достаточной точностью может быть определен и коэффициент теплопроводности стекла и сапфира при высоких температурах на основании измерений сдвига фаз колебаний мощности и температуры. Как показал проведенный анализ, возможная погрешность в исходных оптических свойствах относительно слабо влияет на точность полученных результатов.

Приближенные значения коэффициентов теплопроводности могут быть получены с использованием решения для предельно тонкого слоя. При этом для сапфира ($L=1$ мм) при измерениях сдвига фаз φ_{qt} , как показывает анализ кривых, приведенных на рис. 7, на основании решения для предельно тонкого слоя в качестве нулевого приближения может быть получено значение коэффициента теплопроводности λ_T с погрешностью $\sim 25\%$ (без учета инструментальных погрешностей).

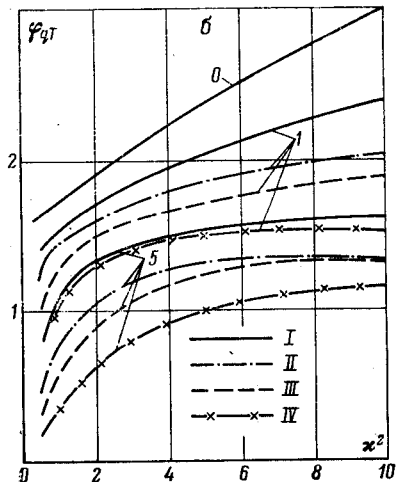
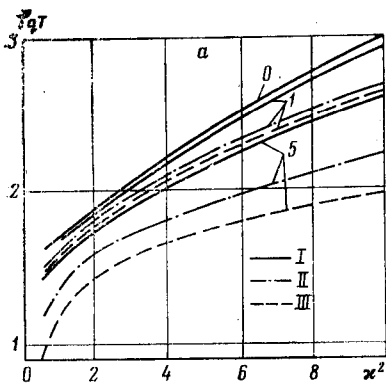


Рис. 5. Зависимость φ_{qT} от параметра x^2 на платиновых (а) и черных (б) стенках, ограничивающих слой сапфира толщиной 1 и 5 мм (цифры у кривых):
 I - $T=1500$ К, II - 1800, III - 2000, IV - 2300

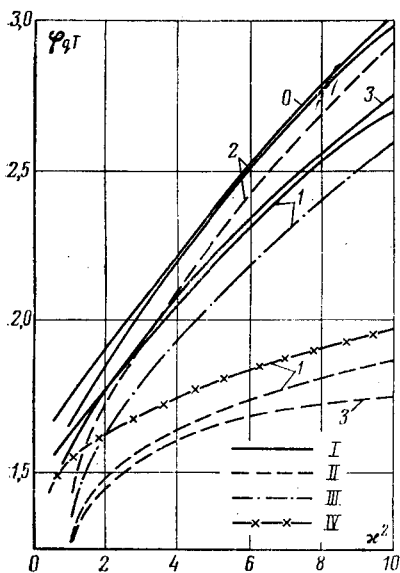


Рис. 6

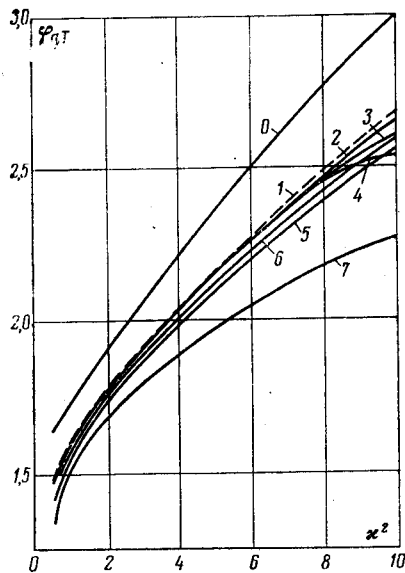


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость φ_{qT} от параметра x^2 на ограничивающих стенках для слоя сапфира толщиной 1 и 5 мм (цифры у кривых) при $T=2000$ К; I - платиновые стенки; II - черные стенки; III - платиновые стенки, зачерненные с внешних поверхностей; IV - платиновые стенки, зачерненные с внутренних поверхностей; I - с учетом прозрачности слоя; 2 - в приближении непрозрачной среды; 3 - в приближении полностью прозрачной среды

Рис. 7. Зависимость φ_{qT} от параметра x^2 на платиновых стенках, ограничивающих слой сапфира толщиной 1 мм при $T=2000$ К: 1 - расчет при номинальных значениях свойств; 2 - расчет при внесении погрешности в степень черноты стенок $\delta\epsilon=+20\%$; 3 - при погрешности в коэффициенте поглощения $\delta\alpha=+20\%$; 4 - при погрешности в коэффициенте преломления $\delta n=+10\%$; 5 - при погрешности в коэффициенте теплопроводности $\delta\lambda_T=-30\%$; 6 - $\delta\epsilon=+20\%$; $\delta\alpha=+20\%$; 7 - $\delta\epsilon=+20\%$, $\delta\alpha=+20\%$, $\delta n=+10\%$, $\delta\lambda_T=-30\%$

Применяя метод последовательных приближений с использованием в качестве исходного значения λ_T° для расчета уточненной зависимости $\Phi_{gr}(\kappa^2)$ на втором и третьем шагах итерационного процесса, определяем достаточно точно значение коэффициента теплопроводности. Для сапфира ($T \leq 2000$ К) при расчетах зависимости сдвига фаз от параметра κ^2 может быть использовано, как показано выше, приближение полностью прозрачной среды.

При исследовании стекла ($T \leq 1000$ К) расчетные трудности заметно уменьшаются, поскольку исходное значение λ_T° , полученное на основании решения для предельно тонкого слоя, отличается от действительного лишь на $\sim -10\%$ (рис. 1) и влияние погрешностей в исходных свойствах стекла и ограничивающих стенок, как показали расчеты, имеет меньшее значение, чем для сапфира.

При исследовании теплофизических свойств стекла и сапфира могут быть непосредственно использованы полученные здесь зависимости, если считать, что истинные значения коэффициентов теплопроводности не отличаются значительно от принятых в данной работе.

Экспериментаторы, занятые высокотемпературными исследованиями теплофизических свойств полупрозрачных материалов, могут использовать приведенные здесь результаты для выбора методики, оптимальной толщины образца и области изменения определяющих параметров.

Автор выражает благодарность Л. П. Филиппову, обратившему внимание на важность выполненных исследований, и В. В. Шебешеву за помощь в проведении расчетов.

Москва

Поступила в редакцию
14 VII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Я. Белов. ТВТ, 15, № 5, 1977.
2. В. А. Петров, С. В. Степанов. ТВТ, 13, № 2, 1975.
3. G. N. Plass. Appl. Opt., 4, № 12, 1965.
4. Сб. Излучательные свойства твердых материалов (под ред. А. Е. Шейндлина). «Энергия», 1974.
5. Л. П. Филиппов. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. Изд. МГУ, 1967.