

А. Н. МЕНЬ, О. А. СЕРГЕЕВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА И ЛУЧИСТАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

(Представлено академиком М. А. Стыриковичем 9 VIII 1971)

Тепловые свойства плавленого кварца, типичного представителя класса однородных аморфных веществ, неоднократно были предметом исследований и дискуссий. Данные о его теплоемкости в настоящее время вполне надежны в широком интервале температур ⁽¹⁾. Что же касается теплопроводности, то многочисленные попытки привести в соответствие результаты различных авторов при температурах выше 300°С оставались безуспешными. Наиболее надежными являются величины, полученные в ^(2, 3), а также усредненный результат обработки ряда исследований, проведенной в работе ⁽⁴⁾. Как видно из рис. 1, даже эти данные с ростом температуры существенно расходятся. Кроме того, ни одна из экспериментальных кривых не может быть интерпретирована с точки зрения теории явлений переноса в аморфных телах. Причина этого в том, что в плавленом кварце сосуществуют два механизма переноса энергии — теплопроводность и радиация, так что излучение, быстро растущее с температурой, значительно искажает полученные в эксперименте величины. Этот факт, неоднократно упоминаемый в научной литературе (см., например, ⁽⁵⁾), не был надлежащим образом исследован.

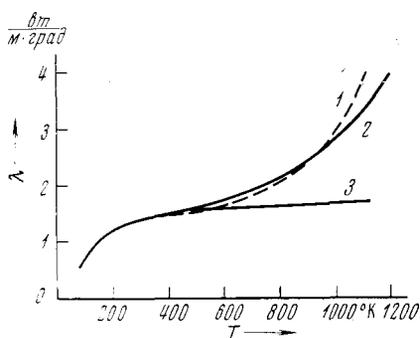


Рис. 1. Теплопроводность λ плавленого кварца: 1 — по данным ⁽²⁾, 2 — по данным ⁽⁴⁾, 3 — истинное значение

Цель настоящей работы — на основе строгого анализа лучистой составляющей переноса получить истинные значения теплопроводности и температуропроводности плавленого кварца и сопоставить их с теоретическими моделями.

Температурное поле плоского образца описывается уравнением лучисто-кондуктивного теплообмена (обозначения общепринятые)

$$\operatorname{div}(\mathbf{q} + \mathbf{E}) = -\gamma c \partial T / \partial \tau, \quad (1)$$

где помимо вектора теплового потока $\mathbf{q} = -\lambda(T) \cdot \operatorname{grad} T$ введен вектор потока лучистой энергии \mathbf{E} . Эта величина, учитывающая спектральные оптические свойства полупрозрачной среды и отражательные характеристики границ слоя, является нелинейным функционалом температурного распределения в образце ⁽⁶⁾. Строгое решение интегро-дифференциального уравнения (1) было получено с помощью ЭВМ. Анализ этого решения показал, что при симметричных граничных условиях, когда температура границ плоского слоя меняется со временем по линейному закону, в среде устанавливается регулярный тепловой режим второго рода. Различия в скорости изменения температуры внутри слоя и на границах не превышали 1,5% для конкретных систем, использованных в эксперименте. Было

показано, что лучистая составляющая температуропроводности в условиях симметричного разогрева образца с требуемой точностью определяется соотношением

$$\begin{aligned}
 a_{л} &= \frac{2\pi}{\gamma c_p(T_0)} \int_{\nu=0}^{\infty} n_{\nu}^2 \left(\frac{\partial I_B}{\partial T} \right)_{T_0} \left\{ \int_{-\tau_{\nu}}^{\tau_{\nu}} \left(1 - \frac{x_{\nu}^2}{l^2} \right) K(x_{\nu}, R_{\nu}, \tau_{\nu}) \cdot dx_{\nu} \right\} d\nu = \\
 &= \frac{2\pi}{\gamma c_p(T_0)} \int_{\nu=0}^{\infty} \frac{n_{\nu}^2}{k_{\nu}} \left(\frac{\partial I_B}{\partial T} \right)_{T_0} \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2\tau_{\nu}} - \frac{2}{5\tau_{\nu}^2} + \int_{\varphi=0}^{1/2\pi} \frac{2 \sin \varphi \cos^3 \varphi}{\tau_{\nu}} \times \right. \\
 &\times \left. \left\{ A(2-A) \left(1 + \frac{\cos \varphi}{\tau_{\nu}} \right) - \frac{R_{\nu}}{1-R_{\nu}A^2} \left[(1-2A+2A^2-2A^3+A^4) - \right. \right. \right. \\
 &\left. \left. \left. - \frac{\cos \varphi}{\tau_{\nu}} (1-2A+2A^3-A^4) \right] \right\} d\varphi \right) d\nu, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $A = \exp(-\tau_{\nu} / \cos \varphi)$, $\tau_{\nu} = l \cdot k_{\nu}(T_0)$, n_{ν} и k_{ν} — спектральные показатели преломления и коэффициент поглощения среды соответственно, $I_B(\nu, T)$ — функция Планка, $2l$ — толщина слоя, R_{ν} и T_0 — коэффициент отражения и температура границ.

Полученные экспериментально значения температуропроводности плавленого кварца марки КВ в диапазоне температур 150—800°С описываются уравнением

$$\begin{aligned}
 a_0 &= [(0,804 - 0,346 \cdot 10^{-3}t + \\
 &+ 0,710 \cdot 10^{-6}t^2) \pm 0,012] \times \\
 &\times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

В измерительной установке реализация упомянутых выше граничных условий выполнялась с высокой точностью (7).

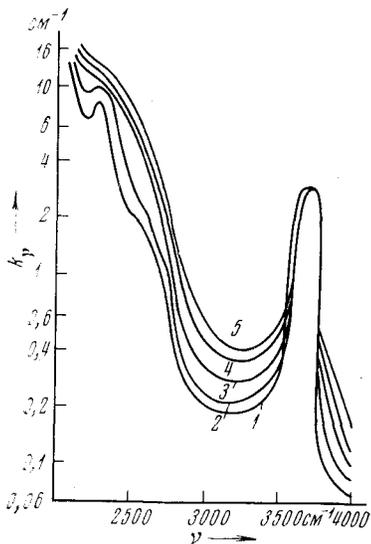


Рис. 2. Коэффициент поглощения k_{ν} плавленого кварца КВ при различных температурах: 1 — 20°С, 2 — 200, 3 — 400, 4 — 600, 5 — 800°С

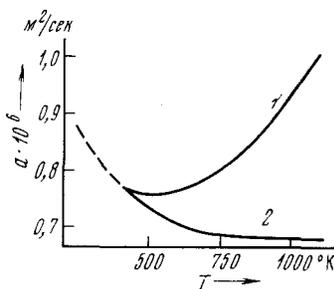


Рис. 3. Температуропроводность a плавленого кварца: 1 — эффективные (измеренные) значения, 2 — истинные значения после исключения лучистой составляющей

Требуемые для расчета по формуле (2) значения спектрального коэффициента поглощения материала измерялись в том же температурном интервале. Эти данные приведены на рис. 2. Спектральные значения показателя преломления взяты по литературным данным. Истинная температуропроводность плавленого кварца получена путем вычитания лучистой составляющей, рассчитанной с помощью (2), из величины a_0 , найденной из (3) для той же температуры. Результаты приведены на рис. 3.

Определение истинной температуропроводности позволило вычислить истинные значения теплопроводности плавленого кварца $\lambda(T) = \gamma \cdot a(T) \cdot c_p(T)$. В этих вычислениях удельная теплоемкость рассчитывалась по

уравнению

$$c_p(T) = 931,3 + 0,256T - 2,40 \cdot 10^{-7}T^{-2}, \quad (4)$$

точность которого в интервале $298,15-2000^\circ\text{K}$ составляет $0,4\%$ (¹), а плотность плавленого кварца $\gamma = 2200 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ и ее изменение с температурой не превышает десятой доли процента (⁸). Полученные таким образом значения $\lambda(T)$ представлены на рис. 1, 3.

По существующим представлениям в аморфных веществах перенос тепла обусловлен фононами. Длина свободного пробега фононов с ростом температуры устанавливается постоянной, равной среднему размеру своеобразных цепочек в стеклообразующих материалах — «кристаллитов», на границах которых происходит рассеяние фононов (⁹). В связи с этим теплопроводность оказывается пропорциональной теплоемкости такого вещества. Так как у плавленого кварца температурная зависимость плотности не существенна, то температуропроводность его должна оставаться постоянной при изменении температуры. Приведенная на рис. 3 кривая 2 показывает, что, начиная от температур 700°K , такая закономерность действительно имеет место. Зависимость (4) для температур выше 700°K практически переходит в прямую линию, а потому теплопроводность должна с температурой расти по линейному закону. Как видно из рис. 1, истинная теплопроводность плавленого кварца является практически линейной функцией температуры даже в более широком интервале $500-1100^\circ\text{K}$. Ранее были установлены аналогичные зависимости $\lambda(T)$ для других стеклообразных материалов (¹⁰). Таким образом, можно считать, что теплофизические свойства плавленого кварца согласуются с теоретическими представлениями и кварц не составляет исключения среди аморфных веществ.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева
Ленинград

Поступило
5 VIII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ K. K. Kelley, High-Temperature, Heat-Content, Heat-Capacity and Entropy Data for Inorganic Compounds, U. S. Bur. of Mines Bull. 584, Washington, 1960. ² Е. Д. Девяткова, А. В. Петров и др., ФТТ, 2, № 4, 1960. ³ A. Sugawara, J. Appl. Phys., 39 (13), 5994 (1968). ⁴ R. W. Powell, C. J. Ho, P. E. Liley, NSRDC-NBS8, Category S, Thermodynamic and Transport Properties, Nov., 1966. ⁵ Е. А. Любимова, Е. А. Сакварелидзе, ДАН, 193, № 4 (1970). ⁶ А. А. Мень, О. А. Сергеев, Тр. Всесоюз. н.-и. инст. метрологии, в. 111 (171) (1969). ⁷ К. Т. Парцхаладзе, О. А. Сергеев, В сборн. Доклады I республиканской научно-технич. конф. по метрологии, Тбилиси, 1970. ⁸ А. Н. Королева, Е. Б. Шевченко, Тр. Всесоюз. н.-и. инст. метрологии, в. 78 (138) (1965). ⁹ Дж. Займан, Электроны и фононы, ИЛ, 1962. ¹⁰ И. А. Розов, А. Ф. Чудновский, В. Ф. Кокорина, Физика и техника полупроводников, 1, в. 8 (1967).