

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

PACS 42.65.Sf; 42.55.Rz; 81.05.Je; 81.05.Kf

Возникновение волны просветления в стеклокерамике СТ-50-1 под действием излучения Nd:YAG-лазера

В.П.Вейко, Б.Ю.Новиков, Е.А.Шахно, Е.Б.Яковлев

Показано, что при облучении стеклокерамики лазерным излучением с длиной волны, на которой исходная поликристаллическая фаза непрозрачна, а соответствующая стеклофаза прозрачна, возможна ситуация, когда под действием непрерывного излучения в среде за счет лазерно-индуцированного структурно-фазового перехода из кристаллического состояния в аморфное (и обратно) возникает режим колебательных изменений прозрачности и, следовательно, распространяются волны просветления и потемнения.

Ключевые слова: стеклокерамика, лазерно-индуцированный фазовый переход, волна просветления.

1. Введение

Известно, что лазерный нагрев стеклокерамических сред приводит к изменению их структурно-фазового состояния [1]. Локальная аморфизация (стеклование) стеклокерамики, находящейся в кристаллической фазе, приводит к локальному изменению её физических (плотности) и оптических (прозрачности в видимом и ближнем ИК диапазонах) свойств.

Этот класс явлений изучался и подробно представлен в работах групп П.А.Скибы (см., напр., [2]) и В.П.Вейко (см., напр., [1]), где рассмотрено воздействие излучения CO₂-лазера на ситалл СТ-50-1, приводящее к аморфизации поликристаллического ситалла, а также к кристаллизации соответствующего стекла при более мягких режимах облучения. Длина волны излучения CO₂-лазера (10,6 мкм) лежит в области фундаментального поглощения силикатных стеклокерамик, поэтому их поглощательная способность на этой длине волны весьма велика и практически одинакова для стеклокерамик в аморфном и кристаллическом состояниях.

При воздействии на стеклокерамику излучения видимого и ближнего ИК диапазонов ситуация существенно меняется. Поглощательная способность стеклокерамики в поликристаллическом состоянии вследствие сильного рассеяния достаточно велика, поэтому в облучаемой области она быстро нагревается. При достижении температуры плавления стеклокерамики поликристаллическая структура исчезает (кристаллы плавятся), резко уменьшаются рассеяние и поглощательная способность. В результате зона, где поглощается излучение, смещается на границу переднего фронта плавления. Таким образом, изменение оптических свойств материала приводит к радикальному изменению распределения поглощенной све-

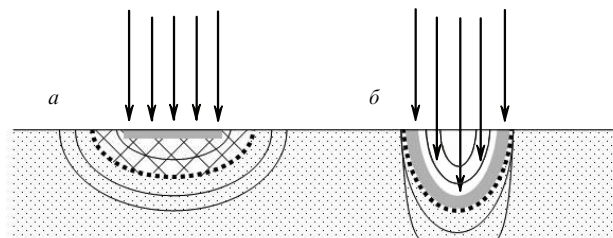


Рис.1. Принципиальная схема роста аморфизованной области ситалла СТ-50-1 при воздействии излучения CO₂- (а) и Nd:YAG-лазеров (б): последовательные во времени положения фронта аморфизации (оптической прозрачности) (сплошные кривые), граница области, где температура равна температуре плавления (кривая из квадратов), область, где температура выше температуры плавления (заштрихована), зоны поглощения излучения (выделены серым цветом).

товой энергии по глубине, что вызывает немонотонное изменение температуры и оптических свойств материала.

На рис.1 представлены общий вид области поглощения и характер движения границы фазового перехода в стеклокерамической пластине при воздействии излучения CO₂- и Nd:YAG-лазеров.

Рассмотрению указанных особенностей фазовых переходов в ситалле СТ-50-1 под действием излучения Nd:YAG-лазера непрерывного действия и посвящена настоящая работа.

2. Эксперимент

Экспериментальное исследование было направлено на изучение пространственно-временных изменений прозрачности стеклокерамики – образования и распространения в ней волны просветления (и потемнения). Для этого применялась видеорегистрация процессов, происходящих в области воздействия излучения лазера на стеклокерамику. Схема установки [3] представлена на рис.2. Воздействие рабочего излучения лазера 1 (Nd:YAG- либо CO₂-лазер) начиналось при открытии затвора 2. Лазерный пучок, проходя через диафрагму 3, направлялся с помощью зеркала 4 и линзы 5 из ZnSe на образец 6 (пластина ситалла СТ-50-1), находящийся на координатном столике 7, оснащенный системой дополнительного подо-

В.П.Вейко, Б.Ю.Новиков, Е.А.Шахно, Е.Б.Яковлев. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: veiko@lastech.ifmo.ru

Поступила в редакцию 1 ноября 2007 г., после доработки – 10 июля 2008 г.

грева. Часть рабочего излучения направлялась на измеритель мощности 8. Зондирующее излучение He-Ne-лазера 9 проходило через зону модификации и фокусировалось линзой 10 на чувствительную площадку фотодиода 11, что позволяло по изменениям его интенсивности судить о временных изменениях структуры стеклокерамики. Измерение температуры и скоростей нагрева и остывания материала при воздействии лазерного излучения проводилось с помощью быстродействующего цифрового оптического микропирометра 12. Фотодиод 11 и пирометр 12 были подключены к осциллографической приставке 13 для передачи данных с этих устройств на монитор компьютера 14. Микровидео съемка осуществлялась видеокамерой 15 с использованием микроскопа 16.

Экспериментально определено, что процесс просветления стеклокерамики под действием излучения непрерывного Nd:YAG-лазера принципиально отличается от аналогичного процесса, происходящего при воздействии излучения CO₂-лазера. Одним из наиболее важных отличий является возможность формирования аморфизованных областей с большой глубиной (большей радиуса аморфизованной области) при использовании излучения Nd:YAG-лазера. Это определяется смещением зоны поглощения в глубь материала на границу фронта плавления, в отличие от случая воздействия излучения CO₂-лазера, когда поглощение происходит в поверхностном слое.

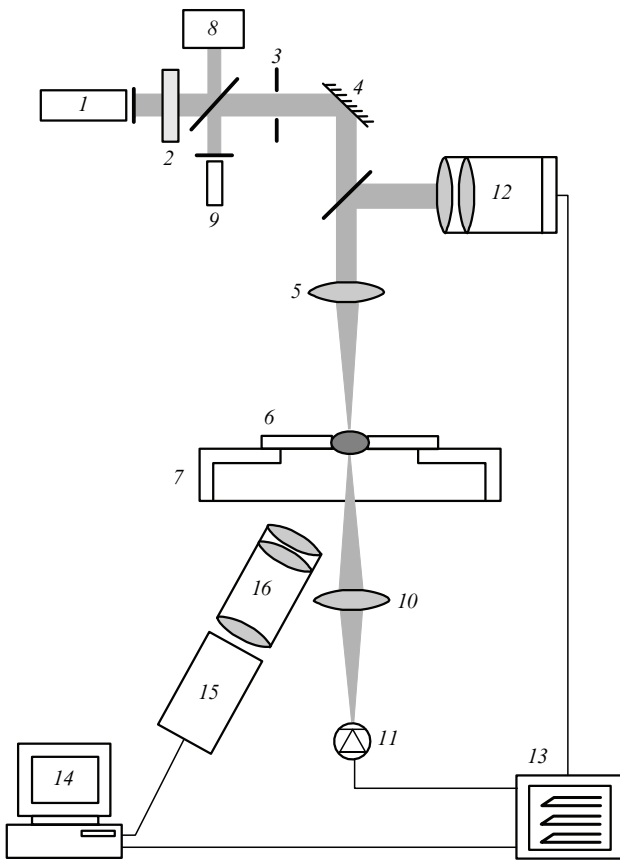


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования движения фронта просветления в стеклокерамике:
1 – Nd:YAG- или CO₂-лазер; 2 – затвор; 3 – диафрагма; 4 – зеркало; 5, 10 – линзы; 6 – образец; 7 – координатный столик; 8 – измеритель мощности; 9 – He-Ne-лазер; 11 – фотодиод; 12 – пирометр; 13 – осциллографическая приставка; 14 – компьютер; 15 – видеокамера; 16 – микроскоп.

Наиболее интересным из наблюдавшихся эффектов при воздействии на стеклокерамику излучения Nd:YAG-лазера оказалось возникновение режима колебательного изменения пропускания в облучаемой области (рис.3). Такие волны просветления в пластинах ситалла СТ-50-1 толщиной 0.6 мм были получены в наших экспериментах при плотности мощности излучения Nd:YAG-лазера 6×10^3 Вт/см² и диаметре пучка излучения на поверхности образца 300 мкм. Перед облучением образец нагревался до температуры 450 °С. Отметим наличие периодов стабильного фазового состояния материала t_{st} между периодами протекания процессов аморфизации (t_{am}) и кристаллизации (t_{cr}).

Проведенные исследования позволили составить картину изменения прозрачности в стеклокерамике при воздействии излучения непрерывного Nd:YAG-лазера.

Излучение CO₂-лазера (10.6 мкм) всегда, как в поликристаллической, так и в аморфной фазе, поглощается в тонком поверхностном слое, фронт плавления продвигается в глубь стеклокерамики за счет подвода к нему тепла посредством теплопроводности. Температура расплава повышается по мере воздействия излучения, причём максимальная температура локализуется на поверхности стеклокерамической пластины. В процессе проплавления стеклокерамики расплавленная область расширяется также и радиально. После полного проплавления пластины (её просветления) нагревание продолжается до достижения стационарной температуры всего образца.

При воздействии непрерывного излучения Nd:YAG-лазера (1.06 мкм) возникает эффект самоиндуцированного просветления стеклокерамической пластины. Вначале излучение поглощается в поверхностном слое пластины и вызывает её нагрев. Как только поверхностный слой расплавляется, он становится прозрачным для падающего излучения. Область поглощения излучения перемещается с поверхности в поликристаллическую часть стеклокерамики за фронтом плавления. При этом температура как в расплаве, так и вне его не превышает температуры плавления, достигая максимального значения (температуры плавления) непосредственно на фронте просветления. По мере проплавления более глубоких слоёв стеклокерамики область поглощения смещается вниз. Когда толщина оставшегося кристаллического слоя пластины под расплавом становится сравнимой с глубиной проникновения излучения в стеклокерамику ($1/\alpha = 105$ мкм [1], где α – показатель поглощения), процесс замедляется вследствие уменьшения поглощения.

После проплавления стеклокерамической пластины на всю глубину она становится прозрачной для падающего излучения и нагрев прекращается. Далее вследствие

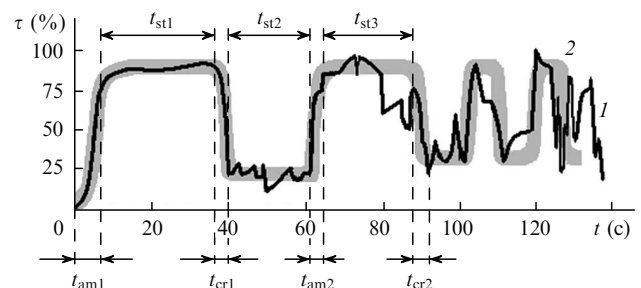


Рис.3. Изменение пропускания τ пластины ситалла СТ-50-1 при воздействии непрерывного излучения Nd:YAG-лазера (1) и соответствующая сглаженная зависимость (2).

постепенного радиального оттока тепла из нагретой (расплавленной) области начинается образование кристаллических структур в расплаве стеклокерамики. При этом поглощательная способность резко увеличивается и прозрачность уменьшается. Стеклокерамика опять начинает поглощать излучение, и процесс повторяется. Таким образом, изменение пропускания имеет колебательный характер.

3. Расчёт

Как показано выше, в эксперименте наблюдались колебательные изменения пропускания стеклокерамической пластины, что авторы связывают с фазовым переходом среды из аморфного состояния в кристаллическое и обратно. Аналитическое исследование процесса проводилось в рамках теплофизической модели процессов нагрева и охлаждения стеклокерамической пластины при изменении её поглощательной способности. В расчётах предполагалось, что переход из аморфного в кристаллическое состояние является скачкообразным (аналогичные переходы наблюдались в пленках GeSb при действии даже фемтосекундных лазерных импульсов [4]), хотя в условиях нашего эксперимента при толщине пластины $h = 0.6$ мм переход, естественно, требует времени, которое может быть оценено как $h^2/a \sim 1$ с (a – температуропроводность стеклокерамики). Это значение было заметно меньше периода колебания прозрачности и поэтому в расчетах не учитывалось.

Анализ возможности возникновения колебательного изменения прозрачности стеклокерамической пластины выявил, что наиболее значимым фактором, определяющим кинетику температуры, является радиальный теплоотвод из облучаемой области. Предварительные оценки показали, что теплоотвод излучением и конвекцией, затраты энергии и выделение тепла при фазовых переходах играют существенно меньшую роль.

При проведении расчётов были сделаны следующие основные допущения:

1. Температура стеклокерамической пластины считалась постоянной по толщине. Возможность такого допущения оправдывается тем, что пластина является термически тонкой: предварительные вспомогательные расчёты показали, что перепад температур по толщине пластины через 10 с не превышает 17%. В расчётах предполагалось, что пластина расплавлена, если средняя по толщине температура в центре облучаемой области достигает температуры плавления (при воздействии Nd:YAG-лазера температура в расплавленной области примерно равна температуре плавления, а вне её – ниже температуры плавления). Аналогично предполагалось, что пластина кристаллизовалась, если её средняя по толщине температура в центре облучаемой области понижалась до температуры кристаллизации.

2. Затраты тепла на плавление и выделение энергии при кристаллизации не учитывались. Такое допущение, естественно, несколько искажает количественные характеристики, но сохраняет качественную картину процесса. Использование этого допущения связано с отсутствием у нас достоверных данных как об удельных энергиях плавления и кристаллизации, так и об изменении их во время периодического процесса плавление – кристаллизация в связи с наблюдавшимся эффектом неполной кристаллизации.

3. Поглощательная способность считалась постоянной на протяжении каждой стадии процесса. В действительности она несколько изменяется, что связано, во-первых, с достаточно большой глубиной проникновения излучения с длиной волны 1.06 мкм в стеклокерамику (~ 100 мкм) и, во-вторых, с объёмным характером плавления и кристаллизации.

4. Плотность мощности излучения считалась постоянной в пределах облучаемой области. Это допущение не снижает общности полученных результатов. Кроме того, методика расчёта предполагает возможность учёта любого пространственного распределения плотности мощности излучения.

5. Потери тепла в окружающую среду не принимались во внимание.

6. Размеры пластины считались достаточно большими.

Таким образом, изменение структурных и оптических свойств облучаемой стеклокерамической пластины в области воздействия (изменение её фазового состояния и поглощательной способности) определяется средней по толщине температурой T пластины в центре облучаемой области.

Температура T находится из решения задачи о нагреве вещества до температуры плавления T_m при поглощении излучения. После достижения температуры T_m поглощение прекращается (вследствие аморфизации материала) и вещество остывает до температуры кристаллизации T_{cr} в результате радиального теплоотвода, затем оно кристаллизуется, поглощение резко возрастает (до прежнего или близкого к нему значения) и процесс повторяется. Следовательно, этот процесс является нелинейным, т.е. воздействие излучения, определяемое поглощательной способностью, зависит от температуры, а кинетика изменения поглощательной способности – от времени достижения температур T_m и T_{cr} .

Задача была решена методом источников [5]. Результаты решения приведены в табл.1, где приняты следующие обозначения:

$$F = 2\pi \int_{r=0}^{r_*} \frac{q(1-R) \exp\{-r^2/[4a(t-t')]\}}{\rho ch} \frac{1}{4\pi a(t-t')} r dr;$$

$q = P/(\pi r_0^2)$ – плотность мощности падающего излучения; P – мощность излучения; r_0 – радиус облучаемой области; R – коэффициент отражения пластины; ρ , c – плотность и теплоёмкость стеклокерамической пластины; r – расстояние от центра облучаемой области; r_* – радиус области тепловыделения в облучаемой пластине; γ – остаточное пропускание пластины; T_0 – начальная температура; t_m – время достижения температуры плавления; $E_2(z)$ – интегральная показательная функция. В расчётах вследствие большого рассеяния излучения Nd:YAG-лазера в стеклокерамике принималось, что $r_* = r_0 + (1 \div 2) \times \delta$, где δ – глубина проникновения излучения в кристаллическую фазу стеклокерамики.

Характерная кинетика температуры показана на рис.4. Расчёт выполнен для $P = 4.2$ Вт, $T_0 = 450$ °С, $r_* = 0.45$ мм и $h = 0.6$ мм. Учтено остаточное пропускание пластины от предыдущего цикла $\gamma = 0.1$.

В результате проведённых вычислений установлено, что в определенном диапазоне параметров воздействия скачкообразное изменение поглощательной способности

Табл.1. Результаты решения задачи о лазерном локальном нагреве стеклокерамической пластины.

Номер цикла	Стадия процесса	Выражение для температуры в интегральном виде	Диапазон времени t	Температура
1	нагрев и плавление (поглощение излучения)	$T = \int_0^t F dt' + T_0$	$0 \leq t \leq t_{m1}$	$T = \frac{q(1-R)t}{\rho ch} \left[1 - E_2 \left(\frac{r_0^2}{4at} \right) \right] + T_0$
	остывание и кристаллизация (стеклокерамика прозрачна)	$T = \int_0^{t_{m1}} F dt' + T_0$	$t_{m1} \leq t \leq t_{cr1}$	$T = \frac{q(1-R)t}{\rho ch} \left\{ 1 - E_2 \left(\frac{r_0^2}{4at} \right) + \frac{t-t_{m1}}{t} E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{m1})} \right] \right\} + T_0$
2	нагрев и плавление (поглощение излучения)	$T = \int_0^{t_{m1}} F dt' + \int_{t_{cr1}}^t F dt' + T_0$	$t_{cr1} \leq t \leq t_{m2}$	$T = \frac{q(1-R)t}{\rho ch} \left\{ 1 - E_2 \left(\frac{r_0^2}{4at} \right) + \frac{t-t_{m1}}{t} E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{m1})} \right] + \frac{t-t_{cr1}}{t} (1-\gamma) - \frac{t-t_{cr1}}{t} (1-\gamma) E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{cr1})} \right] \right\} + T_0$
	остывание и кристаллизация (стеклокерамика прозрачна)	$T = \int_0^{t_{m1}} F dt' + \int_{t_{cr1}}^{t_{m2}} F dt' + T_0$	$t_{m2} \leq t \leq t_{cr2}$	$T = \frac{q(1-R)t}{\rho ch} \left\{ 1 - E_2 \left(\frac{r_0^2}{4at} \right) + \frac{t-t_{m1}}{t} E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{m1})} \right] + \frac{t-t_{cr1}}{t} (1-\gamma) - \frac{t-t_{cr1}}{t} (1-\gamma) E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{cr1})} \right] + \frac{t-t_{m2}}{t} (1-\gamma) E_2 \left[\frac{r_0^2}{4a(t-t_{m2})} \right] \right\} + T_0$

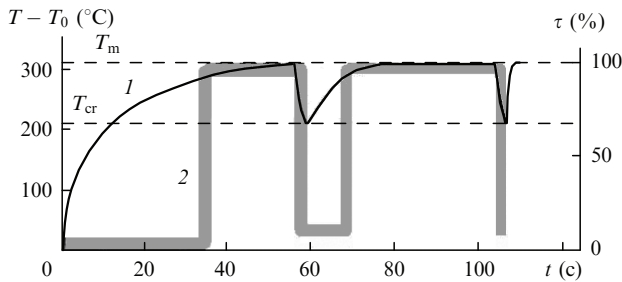


Рис.4. Расчётное изменение средней по толщине температуры T пластины СТ-50-1 в центре облучаемой области (1) и соответствующая ему качественная зависимость изменения пропускания пластины во времени (2).

пластины от температуры приводит к колебательному характеру изменения пропускания во времени. Кинетика процесса, т. е. продолжительность циклов поглощение – пропускание, в большой степени определяется мощностью излучения, эффективностью рассеяния, а также остаточной прозрачностью, наблюдаемой после первой кристаллизации. Продолжительность циклов непостоянна – для использованных в расчёте экспериментальных параметров она уменьшается от цикла к циклу.

4. Заключение

Результаты воздействия непрерывного излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 1.06 мкм на стеклокерамические материалы существенно отличаются от результатов воздействия излучения CO₂-лазера. Причина различий заключается в том, что оптические свойства стеклокерамики в ближней ИК области спектра определяются её фазовым состоянием: кристаллическая фаза поглощает излучение, а расплавленная – пропускает. Что касается излучения дальнего ИК диапазона (CO₂-лазер), то оно практически одинаково поглощается как в кристаллической, так и в расплавленной фазе стеклокерамики.

Таким образом, характер оптических и термических явлений, наблюдаемых при облучении стеклокерамики излучением Nd:YAG-лазера, существенно иной, нежели при облучении CO₂-лазером. Основные особенности процесса в рассмотренном случае определяются нелинейным характером нагрева вследствие наличия обратных связей между оптическими и термическими характеристиками – поглощательной способностью и температурой стеклокерамики.

Одним из наиболее ярких примеров проявления этой нелинейности является обнаруженный экспериментально и смоделированный математически колебательный характер изменения пропускания облучаемой области стеклокерамической пластины во времени при локальном воздействии излучения Nd:YAG-лазера.

Заметим, что подобные явления должны наблюдаться и в других стеклокерамиках при фазовом переходе кристаллизация – аморфизация, сопровождающемся образованием прозрачной для излучения фазы, например в стеклокерамике Foturan, а также в полупроводниках при лазерном плавлении [6] и т. п.

Работа была проведена при поддержке гранта на ведущую научную школу РФ (госконтракт № 02.512.11.2136), гранта РФФИ (№ 07-02-00887-а), госконтракта РНП 2.1.1.784 и, частично, гранта NATO № СВР.ЕАР.СЛГ 982748.

1. Вейко В.П., Киеу К. *Квантовая электроника*, **37** (1), 92 (2007).
2. Скиба П.А. *Лазерная модификация стекловидных материалов* (Минск: изд-во БГУ, 1999).
3. Veiko V.P., Yakovlev E.B., Kromin A.K., Chuiko V.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1992**, 114 (1993).
4. Siegel J., Afonso C.N., Solis J. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3102 (1999).
5. Беляев Н.М., Рядно А.А. *Методы стационарной теплопроводности* (М.: Высшая школа, 1978).
6. Либенсон М.Н. *Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их применение* (С.-Петербург: Наука, 2007).