

УДК 536.413:621.315.592

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

© 2015 г. А. Ф. Коваленко¹, А. А. Воробьев²

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова»,
ул. Сущевская, д. 22, Москва, 127055, Россия

²Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого,
Китайгородский проезд, д. 9, Москва, 103074, Россия

В рамках квазистатической не-связанной задачи термоупругости рассмотрен односторонний нагрев пластины со свободной поверхностью непрерывным лазерным излучением и обоснован метод определения неразрушающих режимов лазерного отжига диэлектрических и полупроводниковых пластин. Получено аналитическое соотношение, являющееся критерием термостойкости пластины и позволяющее определять неразрушающие режимы лазерной обработки. Модель расчета получена при допущении о независимости теплофизических, механических и оптических свойств материалов от температуры. Показано, что для ряда диэлектрических и полупроводниковых материалов существует область изменения безразмерного параметра τ , в которой возможно разрушение термоупругими напряжениями пластин из этих материалов в процессе лазерного отжига. Проведена экспериментальная проверка адекватности модели расчета на примере оптического стекла ЛКЗ, показавшая вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: лазерная обработка, пластина, квазистатическая задача термоупругости, неразрушающие режимы, диэлектрические и полупроводниковые материалы.

Введение

В лазерной технике широко применяются пластины из диэлектрических и полупроводниковых материалов. При их изготовлении под действием абразива при полировке в приповерхностном слое диэлектрических и полупроводниковых пластин могут возникать остаточные напряжения, которые ухудшают оптические свойства поверхностей и снижают их лучевую стойкость [1]. Для устранения этого явления применяют традиционный высокотемпературный [1] или лазерный отжиг поверхностного слоя материалов [2–7]. При традиционном отжиге пластины нагревают в печи до температуры отжига, выдерживают некоторое время, затем медленно охлаждают до комнатной температуры. При лазерном отжиге поверхность пластины нагревают импульсным или непрерывным лазерным излучением [5–8] до требуемой температуры. Прогрев всего объема пластины не требуется. Быстрый нагрев поверхности пластины лазерным излучением до температуры отжига и медленное ее охлаждение приводят к релаксации остаточных

напряжений в приповерхностном слое пластины.

При одностороннем нагреве пластины могут возникать такие режимы обработки, при которых термоупругие напряжения будут определяющими в технологическом процессе. Задача определения неразрушающих режимов лазерного отжига свободно заземленной пластины поверхностным источником решена в работах [6, 8]. В работе [7] рассмотрены неразрушающие режимы импульсного лазерного отжига пластин из диэлектрических и полупроводниковых материалов. При импульсном лазерном отжиге глубина проникновения температурного поля определяется показателем поглощения материала пластины на длине волны воздействующего излучения. При отжиге в непрерывном режиме воздействия глубина проникновения температурного поля определяется временем воздействия лазерного излучения, и ее можно варьировать в широких пределах. С целью определения неразрушающих режимов лазерной обработки рассмотрим решение невязанной квазистатической задачи термоупругости для пластины со свободной поверхностью,

Коваленко Александр Федорович¹ — доцент, доктор техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, e-mail: alexanderfkov@yandex.ru; Воробьев Алексей Александрович² — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, e-mail: vorobievall@mail.ru

обладающей поверхностным поглощением лазерного излучения. Такие режимы реализуются при воздействии непрерывных лазеров, работающих в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн, на полупроводниковые материалы или при воздействии излучения CO₂-лазера на многие монокристаллические, керамические и стеклообразные материалы. Будем считать пластину термостойкой, если она не разрушается термоупругими напряжениями при нагреве ее поверхности до температуры отжига.

Модель расчета

Рассмотрим пластину со свободной поверхностью толщиной h , ограниченную двумя плоскостями $\pm h/2$ и цилиндрической поверхностью с замкнутой направляющей. Теплофизические, механические и оптические свойства пластины примем независимыми от температуры. На поверхность $h/2$ воздействует излучение непрерывного лазера.

Для случая одностороннего воздействия лазерного излучения на пластину температурное поле в ней будет изменяться только по толщине и может быть найдено из решения уравнения теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$t = 0; T(z, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$z = h/2; -\lambda \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = q - \sigma \varepsilon T^4(h/2, t); \quad (3)$$

$$z = -h/2; -\lambda \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где $T(z,t)$ — температура; T_0 — начальная температура; z — координата; t — время воздействия; a — коэффициент температуропроводности материала пластины; h — толщина пластины; λ — коэффициент теплопроводности материала пластины; q — плотность потока лазерного излучения, поглощенного поверхностью пластины, $q = q_0(1 - R)$; q_0 — плотность потока лазерного излучения, падающего на поверхность пластины; R — коэффициент отражения; σ — постоянная Стефана—Больцмана; ε — степень черноты материала.

Из-за нелинейности граничных условий (3), температурное поле в пластине может быть найдено путем решения системы уравнений (1)—(4) только численным методом. Если пренебречь радиационными потерями с поверхности $z = h/2$, то температурное поле может быть найдено решением уравнений (1)—(4) методом интегрального преобразования Лапласа [9]

$$T(\xi, \tau) = T_0 + \frac{qh}{\lambda} \left\{ \tau + \frac{12\xi^2 + 12\xi - 1}{24} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \cos \left[\frac{n\pi}{2} (2\xi + 1) \right] e^{-n^2 \pi^2 \tau} \right\}, \quad (5)$$

где $\xi = z/h$ — безразмерная координата; $\tau = at/h^2$ — критерий Фурье.

Наличие градиента температуры по толщине пластины вызывает в ней термоупругие напряжения. Для пластины, имеющей свободную поверхность, в соответствии с принципом Сен-Венана, равнодействующее усилие и равнодействующий момент на контуре должны быть равны нулю [10]. Поэтому термоупругие напряжения, возникающие в пластине, определяются соотношением [10]

$$\sigma_x(z,t) = \sigma_y(z,t) = \frac{E}{1-\nu} [\varepsilon_T + z\chi_T - \alpha_T(T(z,t) - T_0)], \quad (6)$$

где

$$\chi_T = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha_T [T(z,t) - T_0] z dz; \quad (7)$$

$$\varepsilon_T = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha_T [T(z,t) - T_0] dz, \quad (8)$$

E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; α_T — средний в интервале температур коэффициент линейного расширения пластины.

Подставив выражение (5) в уравнения (7) и (8) и выполнив интегрирование, получим уравнение для расчета термоупругих напряжений в пластине:

$$\sigma_x(z,t) = \sigma_y(z,t) = \frac{E\alpha_T q h}{(1-\nu)\lambda} \left\{ \frac{1}{24} - \frac{1}{4} \xi^2 + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 \tau} \times \cos \left[\frac{n\pi}{2} (2\xi + 1) \right] - \frac{24}{\pi^4} \xi \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \pi^2 \tau}}{n^4} \right\}. \quad (9)$$

Исследование на экстремум уравнения (9) показало, что максимальные растягивающие напряжения возникают в сечении, определяемом из решения трансцендентного уравнения

$$-\frac{\xi_{\max}}{2} - \frac{24}{\pi^4} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \pi^2 \tau}}{n^4} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \pi^2 \tau}}{n} \times \sin \frac{\pi n}{2} \left(\frac{\xi_{\max}}{2} + 1 \right) = 0. \quad (10)$$

Зависимость безразмерной координаты максимальных растягивающих напряжений ξ_{\max} от параметра τ представлена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что увеличение τ приводит к смещению координаты мак-

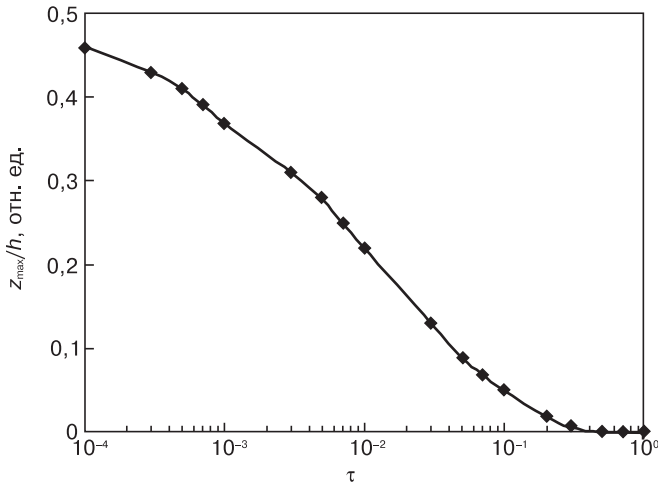


Рис. 1. Зависимость ξ_{\max} от безразмерного параметра τ
 Figure 1. ξ_{\max} as a Function of Dimensionless Parameter τ

симальных растягивающих напряжений от облучаемой поверхности к срединной плоскости пластины.

Сечения, в которых термоупругие напряжения равны нулю, определяют из трансцендентного уравнения

$$\frac{1}{24} - \frac{1}{4}\xi^2 + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\pi^2 n^2 \tau} \times \cos \left[\frac{\pi n}{2} (2\xi + 1) \right] - \frac{24}{\pi^4} \xi \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 n^2 \tau}}{n^4} = 0. \quad (11)$$

На рис. 2 представлены значения температуры и термоупругих напряжений в пластине из оптического стекла ЛК3 толщиной 1 см, рассчитанные по соотношениям (5) и (9) соответственно, для плотности мощности излучения CO_2 -лазера 50 Вт/см^2 и времени воздействия 1,7 с. Из рис. 2 видно, что в области высоких температур термоупругие напряжения являются сжимающими. По мере уменьшения температуры они уменьшаются до нуля, переходят в растягивающие напряжения, возрастают до мак-

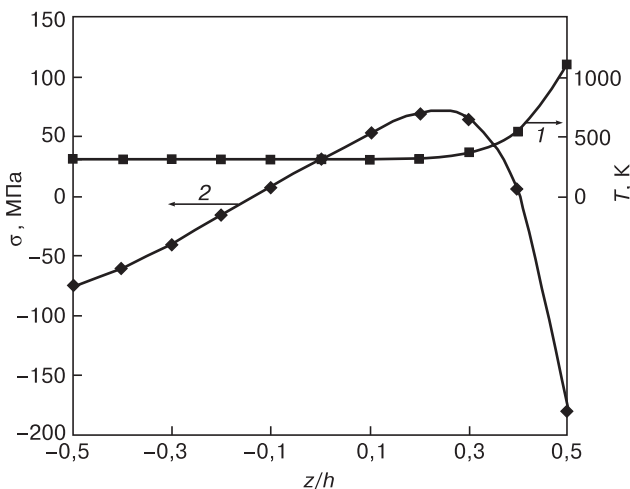


Рис. 2. Распределение температуры T (1) и термоупругих напряжений σ (2) по толщине пластины
 Figure 2. Distributions of (1) temperature and (2) Thermal Elastic Stresses σ Across Plate Thickness

симального значения, затем уменьшаются до нуля и переходят в растягивающие. Так как хрупкие материалы имеют предел прочности на растяжение примерно в 5—10 раз меньше, чем на сжатие [11], дальнейший анализ проведем для растягивающих напряжений.

Плотность мощности лазерного излучения, вызывающую разрушение пластины термоупругими напряжениями, определяют из уравнения (9) после подстановки в него координаты ξ_{\max} , рассчитанной по соотношению (10):

$$q_T = \frac{\sigma_{\text{ВР}}(1-\nu)\lambda}{(1-R)E\alpha_T h f_T(\tau)}, \quad (12)$$

где

$$f_T(\tau) = \frac{1}{24} - \frac{1}{4}\xi_{\max}^2 + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\pi^2 n^2 \tau} \times \cos \frac{\pi n}{2} (2\xi_{\max} + 1) - \frac{24}{\pi^4} \xi_{\max} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 n^2 \tau}}{n^4}. \quad (13)$$

Плотность мощности лазерного излучения, необходимую для достижения поверхностью пластины температуры отжига, определяют из уравнения (5) при $\xi = 1/2$

$$q_f = \frac{(T_f - T_0)\lambda}{h(1-R) \left(\tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 n^2 \tau}}{n^2} \right)} = \frac{(T_f - T_0)\lambda}{h(1-R)f_f(\tau)}, \quad (14)$$

где

$$f_f(\tau) = \tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} e^{-\pi^2 n^2 \tau}. \quad (15)$$

Разделив уравнение (12) на уравнение (14) и поставив условие $q_T/q_f \geq 1$, получим

$$\frac{\sigma_{\text{ВР}}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f - T_0)} \geq \frac{\frac{1}{24} - \frac{1}{4}\xi_m + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\pi^2 n^2 \tau} \cdot \cos \left(\frac{\xi_m}{2} + \frac{1}{2} \right)}{\tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} e^{-\pi^2 n^2 \tau}} - \frac{\frac{24}{\pi^4} \xi_m \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} n^{-4} e^{-\pi^2 n^2 \tau}}{\tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} e^{-\pi^2 n^2 \tau}}. \quad (16)$$

Неравенство (16) является критерием термостойкости пластин со свободной поверхностью при одностороннем их нагреве поверхностным источником. Как и неравенство в работе [6], полученное для свободно заземленных по контуру пластин, нера-

венство (16) позволяет определять неразрушающие режимы лазерного отжига и предъявлять требования по термостойкости к существующим и вновь разрабатываемым материалам.

Результаты и их обсуждение

Проведем анализ полученных результатов. Левая часть неравенства (16) является константой, характеризующей отношение предела прочности на растяжение материала пластины к максимальным растягивающим напряжениям, и не зависит от параметра τ . Правая часть неравенства — функция безразмерного параметра τ (критерия Фурье). Функция $f(\tau)$ является выпуклой, возрастает по мере увеличения τ , достигая максимального значения, равного 0,174 при $\tau \approx 2 \cdot 10^{-2}$, затем уменьшается. Максимум функции $f(\tau)$ по сравнению с аналогичной функцией, полученной в работе [6] для пластины, свободно заземленной по контуру, уменьшается в 1,57 раза и смещается в область меньших значений τ на порядок. На рис. 3 показано графическое решение неравенства (16) для пластины из оптического стекла ЛК3. Можно выделить три области. В области I $\tau < \tau_1$, и неравенство (16) выполняется. Следовательно, можно осуществлять лазерный отжиг, не опасаясь разрушения пластины термоупругими напряжениями. В области II $\tau_1 < \tau < \tau_2$, неравенство (16) не выполняется. Разрушение пластины термоупругими напряжениями произойдет при меньшей плотности мощности лазерного излучения, чем требуется для достижения ее поверхностью температуры отжига. В области III параметр $\tau > \tau_2$, и неравенство (16) вновь выполняется. Следовательно, можно осуществлять лазерный отжиг пластин. Так как толщина пластины может быть фиксированной, необходимо выбирать время воздействия технологического лазера таким образом, чтобы безразмерный параметр τ позволял

осуществлять отжиг в областях, где неравенство (16) выполняется.

Анализ свойств ряда материалов показал, что для оптических стекол [12] (кроме кварцевых), оптической керамики КОЗ и КО4, полупроводниковых материалов Ge, ZnSe, GaAs, Si [6—8, 13] и др. левая часть неравенства (16) меньше 0,174. Следовательно, существует область изменения параметра τ , в которой возможно разрушение пластины термоупругими напряжениями. Если свойства материала пластины такие, что левая часть неравенства (16) больше 0,174, то критерий термостойкости выполняется при любых значениях параметра τ . Это означает, что пластина не будет разрушена термоупругими напряжениями. Например, для кварцевых стекол левая часть неравенства (16) составляет 0,83 [6—8, 14].

Из уравнений (12) и (14) путем несложных математических преобразований получим следующие уравнения:

– для расчета плотности энергии, вызывающей разрушение пластины термоупругими напряжениями,

$$W_T = \frac{\sigma_{BP}(1-\nu)hc\tau}{(1-R)E\alpha_T f_T(\tau)}; \quad (17)$$

– для расчета плотности энергии, необходимой для достижения поверхностью пластины температуры отжига,

$$W_f = \frac{(T_f - T_0)hc\rho\tau}{(1-R)f_f(\tau)}, \quad (18)$$

где c, ρ — удельная теплоемкость и плотность материала пластины соответственно.

Экспериментальная проверка адекватности модели расчета

С целью проверки адекватности модели расчета проведены экспериментальные исследования воздействия излучения непрерывного СО₂-лазера ИЛГН-709 мощностью 100 Вт на пластины из оптического стекла ЛК3 толщиной от 0,2 до 1 см и диаметром 1,5 см. В эксперименте пластины полностью накрывали лазерным излучением. Поверхность образцов была свободной. Плотность мощности лазерного излучения на образцах изменяли посредством расфокусировки лазерного пучка. В ходе эксперимента измеряли следующие параметры:

- мощность излучения лазера (измерителем мощности ИМО-2Н);
- диаметр пятна излучения в плоскости исследуемого образца;
- длительность воздействия лазерного излучения на исследуемые образцы;
- температуру поверхности пластины (пирометром ADA TemPro 1600).

Разрушение пластин термоупругими напряжениями контролировали визуально. По измеренным

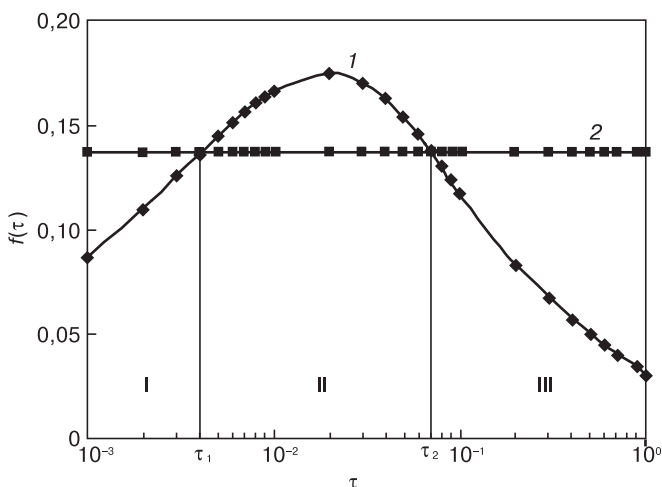


Рис. 3. Графическое решение неравенства (16) для оптического стекла ЛК3:
1 — $f(\tau)$; 2 — ЛК3

Figure 3. Graphical Solution of Eq. (16) for LK3 Optical Glass:
(1) $f(\tau)$; (2) LK3

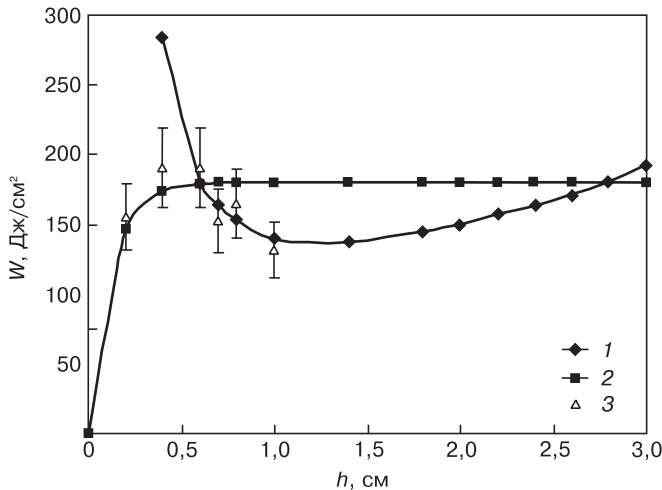


Рис. 4. Расчетные зависимости плотности энергии W_T (1) и W_f (2) от толщины пластины и экспериментальные данные (3)

Figure 4. Calculated Energy Densities (1) W_T and (2) W_f as Functions of Plate Thickness and (3) experimental data

величинам рассчитывали плотность энергии лазерного излучения, необходимую для достижения поверхностью пластины температуры отжига или вызывающую ее разрушение термоупругими напряжениями.

На рис. 4 показаны результаты расчетов по уравнениям (17) и (18) и экспериментальные данные. Каждая экспериментальная точка получена статистической обработкой десяти измерений. Из рис. 4 видно, что температуру поверхности пластин толщиной 0,2, 0,4 и 0,6 см удалось довести до температуры отжига без разрушения пластин термоупругими напряжениями. Пластины толщиной более 0,6 см разрушены термоупругими напряжениями при плотности энергии меньшей, чем требуется для достижения поверхностью пластины температуры отжига. Результаты эксперимента вполне удовлетворительно согласуются с результатами расчетов. К сожалению, мощность излучения экспериментальной установки позволила проверить адекватность расчетной модели только для тонких пластин.

Заключение

В рамках квазистатической несвязанной задачи термоупругости для изотропной пластины получено аналитическое соотношение, являющееся критерием термостойкости при ее отжиге лазерным излучением в непрерывном режиме воздействия. Получены аналитические соотношения для расчета плотности

мощности и плотности энергии лазерного излучения, необходимых для достижения поверхностью пластины температуры отжига или вызывающих ее разрушение термоупругими напряжениями. Показано, что для ряда диэлектрических и полупроводниковых материалов существует диапазон изменения безразмерного параметра τ , в котором возможно разрушение пластины термоупругими напряжениями. Проведена экспериментальная проверка адекватности модели расчета.

Библиографический список

1. Вильчинская, С. С. Оптические материалы и технологии / С. С. Вильчинская, В. М. Лисицын. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 180 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
3. Новиков, Г. А. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках германия на кремнии, сапфире и кварце / Г. А. Новиков, Р. И. Баталов, Р. М. Баязитов, И. А. Файзрахманов, Г. Д. Ивлев, С. Л. Прокопьев // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 3. – С. 89–95.
4. Степанов, А. П. Отжиг эксимерным лазером силикатного стекла с ионно-синтезированными наночастицами серебра / А. П. Степанов, В. Ф. Валеев, В. И. Нуждин, И. А. Базаров, И. А. Файзрахманов // Журн. техн. физики. – 2009. – Т. 79, вып. 10. – С. 102–109.
5. Коваленко, А. Ф. Режимы высокотемпературного лазерного отжига оптической керамики КО-1 и КО-5 излучением CO_2 -лазера / А. Ф. Коваленко // Стекло и керамика. – 2014. – № 9. – С. 9–13.
6. Коваленко, А. Ф. Определение неразрушающих режимов термообработки диэлектрических и полупроводниковых пластин / А. Ф. Коваленко // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2003. – № 2. – С. 39–42.
7. Коваленко, А. Ф. Метод определения неразрушающих режимов импульсного лазерного отжига диэлектрических и полупроводниковых пластин / А. Ф. Коваленко, А. А. Воробьев // Известия вузов. Материалы электрон. техники. – 2014. – № 3. – С. 206–210. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-206-210
8. Атаманик, В. М. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники / В. М. Атаманик, О. В. Володин, И. В. Дяченко, Н. С. Захаров, А. Ф. Коваленко, А. В. Козлов, С. А. Комаров, Т. А. Михайлова, А. В. Никонов, В. Е. Роголин, М. В. Сахаров, И. П. Суханов, Я. А. Суханов, А. В. Федичев. – Сергиев Посад : ЦФТИ МО РФ, 2004. – 176 с.
9. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
10. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 240 с.
11. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1986. – 512 с.
12. ГОСТ 13659–88. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 48 с.
13. Блистанов, А. А. Акустические кристаллы. Справочник / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, Н. В. Переломова, Ф. Н. Стрижельская, В. В. Чкалова, М. П. Шаскольская / под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
14. ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 34 с.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2015 г.

The Method for Determination of Nondestructive Conditions of Laser Annealing of Dielectric and Semiconductor Plates

Aleksandr F. Kovalenko¹ — Dr. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory, Profrrsor (alexanderfkov@yandex.ru); **Aleksei A. Vorobiev**² — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory (vorobievall@mail.ru).

¹*All–Russia Research Institute of Automatics, 22 Suschchevskaya Str., Moscow 127055, Russia,*

²*Peter the Great Strategic Missile Forces Military Academy, 9/5 Kitaygorodsky proezd, Moscow 103074, Russia*

Abstract. One–sided heating of plate with a free surface with continuous laser emission has been examined within the framework of quasistatic unbound problem of thermoelasticity. The method for determination of nondestructive conditions of laser annealing of dielectric and semiconductor plates has been validated. This relationship allows one to generate nondestructive conditions of laser processing. The calculation model has been obtained in the assumption of the independence of thermal, mechanical and optical properties of materials on temperature. We show that for a number of dielectric and semiconductor materials there is a region of change of the dimensionless parameter τ , in fracture of plates of these materials during laser annealing may occur due to thermoelastic stresses. Experimental verification of the adequacy of the calculation model has been made for the example of LK3 optical glass which showed quite a satisfactory agreement between the calculated and experimental data.

Keywords: laser processing, plate, quasistatic problem of thermoelasticity, nondestructive conditions, dielectric and semiconductor materials.

References

1. Vilchinskay S. S., Lisizin V. M. *Opticheskie materialy i tekhnologii* [Optical materials and technologies]. Tomsk: Izd. Tomskogo politekh. un–ta, 2011. 180 p (In Russ.)
2. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological laser machining processes]. Moscow: Izd. MGTU im. N. E. Bauman, 2008. 664 p. (In Russ.)
3. Novikov H. A., Batalov R. I., Bayazitov R. M., Faizrahmanov I. A., Ivlev G. D., Prokop'ev S. L. Optical diagnostics of the laser–induced phase transformations in thin germanium films on silicon, sapphire and fused silica. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 85, no. 3, pp. 89–95. (In Russ.)
4. Stepanov A. L., Valeev V. F., Nuzhdin V. I., Bazarov V. V., Faizrahmanov I. A. Excimer laser–assisted annealing of silicate glass with ion–synthesized silver nanoparticles. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Journal of Applied Physics*. 2009, vol. 79, no. 10, pp. 102–109. (In Russ.)
5. Kovalenko A. F. Regimes for hinged–temperature annealing for KO–1 and KO–5 ceramics by CO₂ laser radiation. *Glass and Ceramics*. 2015, vol. 71, no. 9–10, pp. 309–313. DOI: 10.1007/s10717–015–9676–8
6. Kovalenko A. F. The definition of nondestructive treatment of the dielectric and semiconductor plates. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2003, no. 2, pp. 39–42. (In Russ.)
7. Kovalenko A. F., Vorobev A. A. Method of determining nondestructive pulse laser annealing modes for dielectric and semiconductor wafers. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2014, no. 3, pp. 206–210. DOI: 10.17073/1609–3577–2014–3–206–210
8. Atamanyuk V. M., Volodin O. V., Dyachenko I. V., Zakharov N. S., Kovalenko A. F., Kozlov A. V., Komarov S. A., Mikhailova T. A., Nikonov A. V., Rogalin V. E., Sakharov M. V., Sukhanov I. P., Sukhanov Ya. A., Fedichev A. V. *Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s materialami optiko–elektronnoi tekhniki* [Interaction of laser radiation with materials optoelectronic technology]. Sergiev Posad: TsFTI MO RF, 2004. 176 p. (In Russ.)
9. Karlsru G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964. 488 p. (In Russ.)
10. Kovalenko A. D. *Osnovy termouprugosti* [Principles of thermoelasticity]. Kiev: Naukova dumka, 1970. 240 p. (In Russ.)
11. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1986. 512 p. (In Russ.)
12. GOST 13659–88: *Steklo opticheskoe bestsvetnoe. Fiziko–khimicheskie kharakteristiki* [Optical glass colorless]. Moscow: Izd. Standartov, 1988. 48 p. (In Russ.)
13. Blistanov A. A., Bondarenko V. S., Perelomova N. V., Strizhevskaya F. N., Chkalova V. V., Shaskol'skaya M. P. *Akusticheskie kristally. Spravochnik* [Handbook of acoustic crystals]. Moscow: Nauka, 1982. 632 p. (In Russ.)
14. GOST 15130–86: *Steklo kvartzevoe opticheskoe* [Optical glass quartz]. Moscow: Izd. Standartov, 1986. 34 p. (In Russ.)

Received May 28, 2015