

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(11) 036002

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.09.11

(21) Номер заявки
201892465

(22) Дата подачи заявки
2018.11.28

(51) Int. Cl. B23K 26/402 (2006.01)
B23K 26/53 (2006.01)
C03B 25/00 (2006.01)

(54) СПОСОБ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

(31) 2018122426

(32) 2018.06.20

(33) RU

(43) 2019.12.30

(56) RU-C1-2633860
RU-C1-2583870
US-A1-2015357215
CN-U-203900744
US-A1-2009026178

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМ.
Н.Л. ДУХОВА" (RU)

(72) Изобретатель:
Коваленко Александр Фёдорович
(RU)

(57) Изобретение относится к области технологических процессов и может быть использовано для лазерного отжига пластин из полупроводниковых, керамических и стеклообразных материалов. Техническим результатом изобретения является исключение разрушения пластин термоупругими напряжениями в процессе обработки и повышение выхода годных пластин. Технический результат достигается тем, что в способе лазерной обработки неметаллических пластин, заключающемся в облучении их поверхности непрерывным лазерным излучением с плотностью энергии, достаточной для достижения поверхностью пластины температуры отжига, осуществляют предварительный нагрев пластины до температуры, обеспечивающей выполнение критерия термopрочности.

B1

036002

036002

B1

Изобретение относится к области технологических процессов и может быть использовано для лазерного отжига пластин из полупроводниковых, керамических и стеклообразных материалов излучением лазеров, работающих в непрерывном режиме.

Известен способ обработки неметаллических материалов, применяемый для аморфизации кремния и заключающийся в облучении поверхности пластины импульсом лазерного излучения с плотностью энергии, достаточной для плавления поверхностного слоя. Боязитов Р.М. и др. Аморфизация и кристаллизация кремния субнаносекундными лазерными импульсами. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом. Ленинград, 11-18 марта 1988 г., с. 24.

Известен также способ обработки неметаллических материалов, применяемый для отжига ионно-легированного кремния (Кузменченко Т.А. и др. Лазерный отжиг ионно-легированного кремния излучением с длиной волны 2,94 мкм. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом. Ленинград, 11-18 марта 1988 г., с. 29).

Недостатком указанных способов является то, что они не учитывают термоупругие напряжения, возникающие в пластинах в процессе обработки и могущие привести к разрушению пластин.

Также известен способ обработки неметаллических материалов, в котором обработка пластин осуществляется путем облучения поверхности импульсом лазерного излучения. Временная форма импульса описывается определенным соотношением в зависимости от плотности потока энергии лазерного излучения, констант b_1 и b_2 , характеризующих фронт и спад лазерного импульса, от длительности лазерного импульса, текущего времени от начала воздействия, плотности энергии и максимального значения плотности потока лазерного излучения в импульсе. Эффект достигается тем, что формируют лазерный импульс, временная форма которого описывается соотношением

$$q(t) = \begin{cases} b_1 t e^{-b_2 t}; 0 \leq t \leq \tau; \\ 0; t > \tau, \end{cases}$$

где $q(t)$ - плотность мощности лазерного излучения, Вт/м²;

τ - длительность импульса лазерного излучения, с;

b_1 и b_2 - константы, характеризующие фронт и спад лазерного импульса;

e - основание натурального логарифма;

t - текущее время от начала воздействия, с.

Патент РФ № 2211753, МПК В23К 26/00, 10.09.2003.

Указанный способ позволяет минимизировать термоупругие напряжения в поглощающем слое материала пластины при воздействии лазерных импульсов длительностью менее 10^{-6} с, когда рассматривается динамическая задача термоупругости (Коваленко А.Ф. Экспериментальная установка для исследования влияния параметров лазерного импульса на разрушение неметаллических материалов // Приборы и техника эксперимента. - 2004, № 4. - стр. 119-124). Но этот способ не работает, когда длительность лазерного импульса составляет $\sim 10^{-2} - 10^{-6}$ с и необходимо рассматривать квазистатическую задачу термоупругости.

Известен способ лазерной обработки, в частности, используемый для лазерного отжига неметаллических пластин, в котором плотность энергии на поверхности пластины определяют по соотношению

$$W_f = \frac{(T_f - T_0)c\rho}{(1 - R)\chi},$$

где W_f - плотность энергии лазерного излучения, требуемая для нагрева поверхности пластины до температуры отжига;

T_f - температура отжига пластины;

T_0 - начальная температура пластины;

c и ρ - удельная теплоемкость и плотность материала пластины соответственно;

R - коэффициент отражения материала пластины;

χ - показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения,

и осуществляют предварительный нагрев пластины до температуры, определяемой по уравнению

$$T_0 \geq T_f - \frac{\sigma_p(1-\nu)\chi h}{E\alpha_T(1 - e^{-\chi h} - \chi h e^{-\chi h})}$$

где σ_p - предел прочности материала пластины на растяжение;

ν - коэффициент Пуассона материала пластины;

h - толщина пластины;

E - модуль Юнга;

α_T - коэффициент линейного расширения материала пластины;

e - основание натурального логарифма.

Патент РФ № 2602402, МПК Н01L 21/428, 20.11.2016.

Применение лазерного отжига приводит к релаксации остаточных напряжений в приповерхностном слое пластин, возникающих при их шлифовке и полировке абразивом, а также устраняет неоднородности структуры при напылении тонких пленок, что позволяет повысить лучевую стойкость пластин, исполь-

зуемых в лазерной технике.

Недостатком указанного способа является то, что он применим только при импульсном режиме воздействия, когда выполняется условие

$$\chi \sqrt{a \tau_u} \ll 1, \quad (1)$$

где α - коэффициент температуропроводности материала пластины;

τ_u - длительность лазерного импульса.

Если для отжига, например, пластины из оптической керамики КОЗ применяется непрерывный СО₂-лазер, то поглощение излучения в обрабатываемой пластине будет объемным. Нагрев пластины будет осуществляться посредством прямого проникновения излучения в пластину и за счет механизма теплопроводности, то есть условие (1) выполняться не будет.

Известен также способ отжига неметаллических пластин, заключающийся в облучении их поверхности непрерывным лазерным излучением с плотностью энергии, определяемой по соотношению

$$W_f = \frac{(T_f - T_0) c \rho h}{(1 - R) f_f(\chi h, \tau)},$$

где

$$f_f = 1 + \frac{2}{\tau(1 - e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left(1 + \frac{\pi^2 n^2}{\chi^2 h^2}\right) \pi^2 n^2} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau})$$

- функция безразмерных параметров χh и $\tau = at/h^2$;

t - время воздействия лазерного излучения.

Коваленко А. Ф. Метод обоснования неразрушающих режимов лазерной обработки пластины с объемным поглощением. - Физика и химия обработки материалов. 2004. № 6, - стр. 25-29. Указанный способ выбран в качестве прототипа.

Недостатком прототипа является то, что возможны такие режимы обработки, при которых плотность энергии лазерного излучения, вызывающая разрушение пластины термоупругими напряжениями, окажется меньше плотности энергии, необходимой для достижения облучаемой поверхностью пластины температуры отжига, то есть в процессе обработки возможно разрушение пластин термоупругими напряжениями.

Техническим результатом изобретения является исключение разрушения пластин из полупроводниковых, керамических и стеклообразных материалов термоупругими напряжениями в процессе лазерного отжига и повышение выхода годных пластин.

Технический результат достигается тем, что в способе лазерной обработки неметаллических пластин, заключающемся в облучении их поверхности непрерывным лазерным излучением с плотностью энергии, определяемой по уравнению

$$W_f = \frac{(T_f - T_0) c \rho h}{(1 - R) f_f(\chi h, \tau)},$$

где T_f - температура отжига пластины;

T_0 - начальная температура пластины;

c и ρ - удельная теплоемкость и плотность материала пластины соответственно;

h - толщина пластины;

R - коэффициент отражения материала пластины на длине волны лазерного излучения;

$$f_f = 1 + \frac{2}{\tau(1 - e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left(1 + \frac{\pi^2 n^2}{\chi^2 h^2}\right) \pi^2 n^2} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau});$$

χ - показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения;

$\tau = at/h^2$ - критерий Фурье;

a - коэффициент температуропроводности материала пластины;

t - время воздействия лазерного излучения;

$n = 1, 2, 3, \dots \infty$ - натуральное число;

e - основание натурального логарифма;

$\pi \approx 3,14$,

осуществляют предварительный нагрев пластины до температуры, определяемой по уравнению

$$T_0 \geq T_f - \frac{\sigma_p(1 - \nu)}{E \alpha_T f(\chi h, \tau)},$$

где

$$f(\chi h, \tau) = - \frac{\frac{2}{\tau(1 - e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left[1 + \frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}\right] \pi^2 n^2} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau}) \cos \pi n}{1 + \frac{2}{\tau(1 - e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left[1 + \frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}\right] \pi^2 n^2} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau})};$$

σ_p - предел прочности материала пластины на растяжение;
 ν - коэффициент Пуассона материала пластины;
 E - модуль Юнга материала пластины;
 α_T - коэффициент линейного расширения материала пластины.

Ниже приводится более подробное описание заявляемого способа лазерной обработки неметаллических пластин. Сущность способа состоит в следующем. Для предотвращения изгиба пластины при обработке ее, как правило, свободно зажимают по контуру (Коваленко А. Ф. Метод обоснования неразрушающих режимов лазерной обработки пластины с объемным поглощением. - Физика и химия обработки материалов. 2004. № 6, - стр. 25-29). Пластина полностью покрывается лазерным излучением. В этом случае температурное поле в пластине будет изменяться только по ее толщине. В свободно зажатой по контуру пластине под действием температурного поля, изменяющегося только по толщине пластины, возникают термоупругие напряжения (Коваленко А. Д. Термоупругость. - Киев: "Вища школа", 1973, стр. 216):

$$\sigma_x(z, t) = \sigma_y(z, t) = \frac{E}{1-\nu} \{ \varepsilon_T - \alpha_T [T(z, t) - T_0] \}, \quad (2)$$

$$\text{где: } \varepsilon_T = \frac{1}{h} \int_0^h \alpha_T [T(z, t) - T_0] dz, \quad (3)$$

$\sigma_x(z, t)$, $\sigma_y(z, t)$ - термоупругие напряжения в пластине, зависящие от координаты z и времени t ;
 ε_T - средняя по толщине пластины температура;
 x, y, z - координаты, причем z - координата, отсчитываемая от облучаемой поверхности пластины вглубь;

$T(z, t)$ - температура в точке с координатой z в момент времени t .

Анализ уравнения (2) показывает, что термоупругие напряжения в пластине являются сжимающими там, где текущая температура выше средней температуры по толщине пластины, и растягивающими там, где текущая температура ниже средней по толщине пластины. Так как хрупкие материалы, к которым относятся полупроводниковые, керамические и стеклообразные материалы, имеют предел прочности на растяжение в 5-10 раз меньше, чем на сжатие (Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. - М.: Наука. 1986, стр. 512, стр. 75), дальнейший анализ проведем для растягивающих напряжений.

В работе (Коваленко А. Ф. Метод обоснования неразрушающих режимов лазерной обработки пластины с объемным поглощением. - Физика и химия обработки материалов. 2004, № 6, стр. 25-29) с учетом уравнений (2), (3) и уравнения для температурного поля в пластине получены уравнения для расчёта плотности энергии, вызывающей разрушение пластины термоупругими напряжениями

$$W_T = \frac{\sigma_p(1-\nu)c\rho h}{E\alpha_T(1-R)f_T(\chi h, \tau)}, \quad (4)$$

где

$$f_T(\chi h, \tau) = \frac{2}{\tau(1-e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left(1 + \frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}\right)} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau}) \cos(-\pi n),$$

и уравнение для расчёта плотности энергии, требуемой для достижения облучаемой поверхностью пластины температуры отжига

$$W_f = \frac{(T_f - T_0)c\rho h}{(1-R)f_f(\chi h, \tau)}. \quad (5)$$

Разделив (4) на (5) и поставив условие $W_T/W_f \geq 1$, получим критерий термпрочности пластины для случая объёмного поглощения лазерного излучения при непрерывном режиме воздействия

$$\frac{\sigma_p(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f - T_0)} \geq f(\chi h, \tau), \quad (6)$$

где

$$f(\chi h, \tau) = \frac{\frac{2}{\tau(1-e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left[1 + \frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}\right]} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau}) \cos(-\pi n)}{1 + \frac{2}{\tau(1-e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left[1 + \frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}\right]} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau})}. \quad (7)$$

Левая часть неравенства (6) является константой, характеризующей отношение предела прочности на растяжение материала пластины, свободно зажатой по контуру, к максимальным растягивающим напряжениям в ней при одностороннем нагреве. Правая часть неравенства является функцией двух безразмерных параметров χh и τ . Максимального значения, равного 0,35, функция $f(\chi h, \tau)$ достигает при $\chi h \approx 5$ и $\tau \approx 0,1$. Если условие (6) выполняется, можно производить лазерный отжиг пластины. Если это условие не выполняется, то разрушение пластины термоупругими напряжениями произойдет при меньшей плотности

энергии, чем требуется для достижения поверхностью пластины температуры отжига, и лазерный отжиг проводить в данном режиме нельзя.

Из неравенства (6) найдем значение начальной температуры, при которой критерий термopочности будет выполнен

$$T_0 \geq T_f - \frac{\sigma_p(1-\nu)}{E\alpha_T f(\chi h, \tau)} \quad (7)$$

Нагрев пластины осуществляют в муфельной печи до требуемой для выполнения критерия термopочности температуры T_0 и выдерживают необходимое время для выравнивания температуры по толщине пластины.

Время выдержки определяют из критерия Фурье, определяющего тепловую инерцию пластины

$$\frac{at_B}{h^2} \geq 3, \quad (8)$$

где t_B - время выдержки пластины при требуемой для выполнения критерия термopочности температуре.

После выдержки пластины в муфельной печи осуществляют воздействие на нее лазерного излучения с плотностью энергии, определяемой по уравнению (5).

Пример осуществления способа обработки

Необходимо провести лазерный отжиг поверхности пластины из цветного оптического стекла ЖСС12 толщиной 0,5 см излучением Nd:YAG-лазера, работающего в непрерывном режиме. Время воздействия излучения на пластину составляет 2 с. Показатель поглощения данной марки стекла для излучения с длиной волны 1,06 мкм составляет 10 см^{-1} [ГОСТ 9411 - 90. Стекло цветное оптическое. М.: Изд-во стандартов, 1992, стр. 48]. Безразмерный параметр $\chi h = 5$, безразмерный параметр $\tau = 0,5$. Начальную температуру пластины примем равной 300 К, температуру отжига - 1100 К. Расчет по уравнению (5) показывает, что для отжига пластины потребуется плотность энергии лазерного излучения 580 Дж/см^2 . Расчет по уравнению (4) показывает, что для разрушения термоупругими напряжениями пластины толщиной 0,5 см требуется плотность энергии 346 Дж/см^2 , то есть меньше, чем для отжига. Рассчитаем левую и правую части критерия термopочности (6). Левая часть неравенства (6) составляет 0,115. Правая часть неравенства (6) при $\chi h = 5$ и $\tau = 0,5$ составляет 0,193. Видно, что критерий термopочности не выполнен. Пластина будет разрушена термоупругими напряжениями. Чтобы этого не произошло, необходимо пластину предварительно нагреть в муфельной печи до температуры не менее 623 К и выдержать при этой температуре не менее 125 с для выравнивания температуры по толщине пластины. Расчеты выполнены по уравнениям (7) и (8) при следующих исходных данных [ГОСТ 9411-90. Стекло цветное оптическое. М.: Изд-во стандартов, 1992, стр. 48, Стекло/Под ред. Н. М. Павлушина. М.: Стройиздат, 1973. стр. 280]: $\sigma_p = 70 \text{ МПа}$, $E = 80 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,2$, $\alpha_T = 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $a = 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$. Примем новое значение начальной температуры $T_0 = 630 \text{ К}$. Затем воздействуют на пластину лазерным излучением с плотностью энергии не более 341 Дж/см^2 (плотность мощности $170,5 \text{ Вт/см}^2$ при времени воздействия 2 с). Расчеты проведены по уравнению (4) для нового значения начальной температуры 625 К. Температура поверхности пластины при этом достигает температуры отжига, а термоупругие напряжения не превысят предела прочности материала.

Таким образом, реализация предложенного способа лазерной обработки неметаллических пластин приводит к исключению их разрушения термоупругими напряжениями в процессе лазерного отжига и повышению выхода годных пластин.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ лазерной обработки неметаллических пластин, заключающийся в облучении их поверхности непрерывным лазерным излучением с плотностью энергии, определяемой по уравнению

$$W_f = \frac{(T_f - T_0)c\rho h}{(1-R)f_f(\chi h, \tau)},$$

где T_f - температура отжига пластины;

T_0 - начальная температура пластины;

c и ρ - удельная теплоемкость и плотность материала пластины соответственно;

h - толщина пластины;

R - коэффициент отражения материала пластины на длине волны лазерного излучения;

$$f_f = 1 + \frac{2}{\tau(1 - e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n e^{-\chi h}]}{\left(1 + \frac{\pi^2 n^2}{\chi^2 h^2}\right) \pi^2 n^2} (1 - e^{-\pi^2 n^2 \tau});$$

χ - показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения;

$\tau = \alpha t / h^2$ - критерий Фурье;

a - коэффициент температуропроводности материала пластины;

t - время воздействия лазерного излучения;

$n = 1, 2, 3, \dots \infty$ - натуральное число;

e - основание натурального логарифма;

$\pi \approx 3,14$,

отличающийся тем, что осуществляют предварительный нагрев пластины до температуры, определяемой по уравнению

$$T_0 \geq T_f - \frac{\sigma_p(1-\nu)}{E\alpha_T f(\chi h, \tau)},$$

где

$$f(\chi h, \tau) = \frac{\frac{2}{\tau(1-e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1-(-1)^n e^{-\chi h}]}{[1+\frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}]} (1-e^{-\pi^2 n^2 \tau}) \cos(-\pi n)}{1 + \frac{2}{\tau(1-e^{-\chi h})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1-(-1)^n e^{-\chi h}]}{[1+\frac{\pi^2 n^2}{(\chi h)^2}]} (1-e^{-\pi^2 n^2 \tau})};$$

σ_p - предел прочности материала пластины на растяжение;

ν - коэффициент Пуассона материала пластины;

E - модуль Юнга материала пластины;

α_T - коэффициент линейного расширения материала пластины.



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2
