Г.Д. Ивлев, Е.И. Гацкевич

OPMHb

ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси, Минск, Беларусь

КОМБИНИРОВАННЫЙ МИЛЛИ- И НАНОСЕКУНДНЫЙ НАГРЕВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

изучены эффекты B настоящей работе комбинированного воздействия импульсов излучения рубиновых лазеров милли-И наносекундного длительности на монокристаллические пластины кремния КДБ-10 (100). В экспериментах использовались импульсы излучения рубинового лазера, работающего в миллисекундном режиме упорядоченной свободной генерации (СГ) длительностью 0,7 мс по импульса достаточно основанию высокой однородностью c распределения энергии излучения по сечению пучка и моноимпульсное (МИ) рубинового лазера С пассивной излучение модуляцией добротности резонатора (длительность импульса 80 нс по уровню 0,5). Реализована необходимая синхронизация одиночных вспышек обоих лазеров с регулируемой задержкой генерации МИ относительно начала СГ в комбинированном воздействии сведённых лазерных пучков на исследуемые объекты при диаметре облучаемой зоны до 4 мм и высокой воспроизводимости задаваемых энергетических параметров облучения.

В экспериментах на эффективной длине волны 0,53 мкм проводились пирометрические измерения температуры поверхности образцов в условиях воздействия одного (СГ) или двух (СГ и МИ) лазерных пучков. Кроме контроля временных и энергетических параметров воздействующих импульсов, детектирования теплового излучения (ТИ) образцов в спектральной области 0,48–0,55 мкм, детектировалось также отражённое от зоны импульсного нагрева излучение СГ, что позволяло контролировать образование расплава Si и

77

длительность фазовых превращений.

На рисунке 1 представлены осциллограммы импульса излучения СГ (а), и сигналов пирометрического датчика, детектировавшего ТИ зоны воздействия импульса СГ на кремний при плотности энергии $W_{ms} = 40 \ \text{Дж/см}^2$ в двух вариантах: «б» – действие только СГ и «в» – комбинированное облучение с плотностью энергии в моноимпульсе $W_{ns} = 3 \ \text{Дж/см}^2$. Импульс второго лазера испускался через 0,3 мс от начала СГ, когда достигается максимальная температура поверхности образца (около 1550 К) вследствие его нагрева этим излучением. При комбинированном воздействии чётко наблюдается всплеск ТИ, связанный с



дополнительным, моноимпульсным, нагревом облучаемой поверхности Si.

Рисунок 1 – Осциллограммы лазерного импульса (а), воздействующего на образец кремния, и тепловое излучение Si: «б» – без дополнительного воздействия МИ, «в» – с дополнительным воздействием МИ

В результате исследования тепловых эффектов комбинированного воздействия лазерных импульсов С указанной временной синхронизацией с варьируемыми значениями W_{ms} и W_{ns} выяснено влияние величины W_{ms} как параметра на пиковую температуру T_p поверхности образцов и время существования расплава Si В зависимости от плотности энергии моноимпульсного облучения и порога Wm лазерно-индуцированного установлены зависимости воздействием МИ плавления приповерхностного слоя исследуемых кристаллов. Из сравнения зависимостей T_p (W_{ns}), полученных без дополнительного нагрева кремния излучением СГ и при действии такового (W_{ms} = 40 Дж/см²), следует (рисунок 2,а), что разница в достигаемых температурах возрастает до 230 К с повышением W_{ns} до 3 Дж/см². Величина W_m уменьшается практически линейно (рисунок 2,б) с повышением плотности энергии излучения СГ.



Рисунок 2 – Зависимости пиковой температуры поверхности Si от W_{ns} (a) и порога плавления W_m поверхности образцов от величины W_{ms} (б)

В экспериментах установлена особенность динамики изменения ТИ образцов во время действия МИ в условиях комбинированного лазерного нагрева. Она проявляется (рисунок 3) в наличии двух максимумов интенсивности детектируемого излучения, разделённых во времени моментом достижения пиковой мощности МИ. Пока неясно, чем обусловлена такая временная структура импульса ТИ, требующая специального рассмотрения.

Проведено моделирование эффектов комбинированного нано- и миллисекундного облучения пластин кремния пучками рубинового лазера в указанных экспериментальных условиях. При моделировании ограничились одномерным приближением, учитывая равномерность распределения плотности энергии по зоне облучения и малую глубину тепловой диффузии за время импульса по сравнению с размерами Миллисекундный импульс области нагрева. аппроксимировался импульсом прямоугольной формы длительностью 300 мкс. Воздействие импульса СГ до начала облучения МИ описывалось на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности С учетом температурных зависимостей теплофизических и оптических параметров. При формулировании граничных условий учитывалось, что теплообменом с окружающей средой можно пренебречь на обеих поверхностях пластины. Начальная температура задавалась 300 К.



Рисунок 3 – Осциллограммы (100 нс/дел) детектируемого теплового излучения при комбинированном воздействии с различным плотностями энергии облучения

Поскольку при воздействии МИ температура мало изменяется в облучения импульсом СГ, и температура в области результате поглощения излучения наносекундного импульса распределена почти СГ учитывалось воздействие импульса равномерно, введением начальной температуры, зависящей от Wms. Фазовые превращения в указанных условиях изучались на основе численного решения задачи Стефана. При W_{ms} до 30 Дж/см² расчетные и экспериментальные значения порогов плавления W_m практически совпадают (рисунок 2,б). При больших значениях Wms плавление начинается при бо́льших значениях W, чем дают расчетные данные. Указанное различие может быть обусловлено тем, что при увеличение плотности энергии импульса СГ моделирование с раздельным решением тепловых задач для импульсов СГ и МИ приводит к заметной погрешности.

Таким образом, методами оптико-пирометрической диагностики лазерно-индуцированных процессов установлены корреляционные зависимости, характеризующие взаимосвязи энергетических И теплофизических параметров комбинированного воздействия лазерных импульсов на исследуемые объекты. Установлено достаточно хорошее соответствие расчётной и экспериментальных зависимостей порогов плавления. инициируемого наноимпульсным нагревом облучаемой поверхности, от плотности энергии в импульсе СГ.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф09СО-015.