

Бихроматическое лазерное воздействие с длинами волн 355 и 532 нм на стекло BK-110 в воздухе

А. Н. Чумаков, В. В. Лычковский

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
e-mail: v.luchkouski@dragon.bas-net.by*

Исследованы особенности приповерхностного плазмообразования и модификации стекла BK-110 в атмосферном воздухе при воздействии бихроматических импульсов лазерного излучения (ЛИ) на длинах волн 355 и 532 нм. Установлено влияние временного интервала и порядка следования бихроматических импульсов ЛИ на характер деструкции мишени и разогрев лазерной плазмы.

Ключевые слова: импульсное бихроматическое лазерное воздействие; наносекундная лазерная абляция стекла; образование кратера; хрупкое разрушение; модификация поверхности; разогрев лазерной плазмы.

Bichromatic laser action on BK-110 glass with wavelengths 355 and 532 nm in ambient air

A. N. Chumakou, V. V. Luchkouski

*B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: v.luchkouski@dragon.bas-net.by*

Investigations of near-surface plasma formation features and modification of BK-110 glass in ambient air by action of bichromatic laser pulses with wavelength 355 and 532 nm was carried out. Influence of time interval and order in which pulses of bichromatic laser radiation follow on form of target destruction and laser plasma heating.

Keywords: pulsed bichromatic laser action; nanosecond laser ablation; crater formation; cracked destruction; surface modification; laser plasma heating.

Введение

Исследование лазерного воздействия на прозрачные материалы представляет значительный практический интерес [1]. Считается, что при воздействии наносекундных лазерных импульсов разрушение обусловлено в основном поглощающими неоднородностями, а при воздействии фемтосекундных – многофотонной ионизацией [1, 2]. Результаты лазерного воздействия на материалы зависят также от длины волны излучения. Поэтому использование бихроматических пар лазерных импульсов позволяет влиять на лазерную абляцию материалов и образование приповерхностной плазмы [3, 4]. Настоящая работа посвящена выявлению особенностей лазерной абляции стекла в воздухе и образования плазмы под действием комбинированных наносекундных импульсов лазерного излучения (ЛИ) с длинами волн $\lambda = 355$ и 532 нм.

1. Техника эксперимента

Использована установка на основе двух Nd:YAG лазеров и системы синхронизации, обеспечивающей генерацию парных импульсов лазерного излучения (ЛИ) с $\lambda = 355$ и 532 нм и длительностью 18 и 15 нс соответственно. Бихроматические импульсы следуют с регулируемым временным интервалом ($\Delta\tau$) и управляемым порядком следования: с опережающим воздействием ЛИ 355 нм ($\Delta\tau < 0$), либо ЛИ 532 нм ($\Delta\tau > 0$). Сфокусированные на поверхность стекла БК-110 (толщина 3 мм, состав $\sim 75\%$ SiO_2) пучки лазерного излучения характеризуются длиной перетяжки ~ 3 мм. Диаметр пятна для ЛИ с длинами волн 355 и 532 нм составлял 180 и 250 мкм соответственно, а плотность мощности на поверхности мишени $q_{355} = 0.98$ ГВт/см² и $q_{532} = 1.26$ ГВт/см². Облучение происходило в атмосфере воздуха. Спектры излучения приповерхностной плазмы регистрировались спектрометром SL-40-2 на основе ПЗС линейки TCD 1304 (Toshiba) (экспозиция кадра ≈ 7 мс). Кратеры лазерного разрушения исследовались с помощью оптического микроскопа и регистрировались на цифровую фотокамеру.

2. Результаты и обсуждение

Лазерное разрушение стекла при воздействии 10 пар импульсов излучения с $\lambda = 355$ и 532 нм и плотностями мощности $q_{355} = 1$ ГВт/см² и $q_{532} = 1,26$ ГВт/см² приводит к формированию кратеров, вид которых зависит от порядка следования бихроматических импульсов ЛИ и временного интервала между ними.

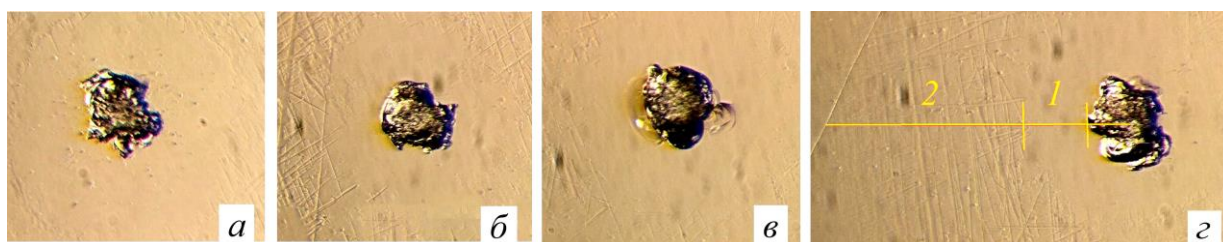


Рис. 1. Вид лазерных кратеров и линий поверхностных дефектов при комбинированном лазерном облучении ($\lambda = 355$ и 532 нм, $q_{355} = 0.98$ ГВт/см² и $q_{532} = 1.26$ ГВт/см²) с опережающим воздействием ЛИ 355 нм ($\Delta\tau < 0$ мкс): а – $\Delta\tau = -1,5$ мкс; б – $\Delta\tau = -10$ мкс; в – $\Delta\tau = -20$ мкс; г – $\Delta\tau = -30$ мкс (1 – ближняя гладкая область ореола, 2 – дальняя область с линиями дефектов)

Опережающее действие ЛИ с $\lambda = 355$ нм (интервал между парой бихроматических импульсов ЛИ $\Delta\tau < 0$ мкс; рис. 1) в диапазоне интервалов $\Delta\tau$ от $-1,4$ мкс до -35 мкс приводит к образованию лазерных кратеров хрупкого разрушения, окруженных развитым ореолом. Ближняя область ореола представляет собой очень гладкую поверхность. Более удалённая область покрыта обильным количеством ровных пересекающихся друг с другом линий поверхностных дефектов.

Однако при опережающем воздействии импульса с $\lambda = 532$ нм (интервал между бихроматических парой импульсов ЛИ $\Delta\tau > 0$ мкс; рис. 2) лазерное разрушение выглядит иначе. В режимах воздействия с $\Delta\tau = +1,4$ мкс, $+5$, $+10$, $+20$ и $+25$ мкс формируется кратер в форме гладкого углубления, окруженного ореолом, схожим с полученными в режимах облучения с $\Delta\tau < 0$ мкс. А в режимах со значениями интервалов

между импульсами $\Delta\tau = +30$ мкс, $+35$ и $+15$ мкс лазерный кратер выглядит как кратер хрупкого разрушения.

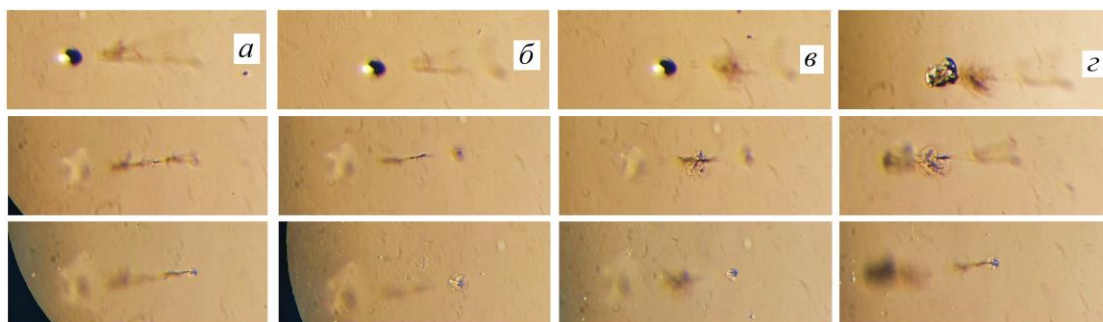


Рис. 2. Вид кратеров лазерного разрушения, сопутствующих им растрескиваний в глубине образца и отколов на тыльной стороне мишени, полученных при бихроматическом лазерном облучении ($\lambda = 355$ и 532 нм, $q_{355} = 0.98$ ГВт/см² и $q_{532} = 1.26$ ГВт/см²) в режимах с опережающим воздействием ЛИ 532 нм ($\Delta\tau > 0$ мкс): в столбцах *a* – $\Delta\tau = +5$ мкс; *б* – $\Delta\tau = +15$ мкс; *в* – $\Delta\tau = +25$ мкс; *г* – $\Delta\tau = +35$ мкс (фотоснимки сделаны под небольшим углом)

Стоит отметить, что поверхностные дефекты, образовавшиеся в дальней области ореола лазерных кратеров, имеют определенное сходство с результатами, полученными при лазерном облучении среды Si/SiO₂ в более мягком режиме [5]. В приведенной работе дефекты представляли совокупность параллельных линий дислокации кристаллической решетки, пересекающихся с другой совокупностью параллельных линий под углом 90 или 60 градусов, для образцов кремния с разной ориентацией кристаллической решетки.

В нашем случае схожий мягкий режим термического воздействия возможен на удалении от облученной области, когда вклад воздействия самого ЛИ и инициированного им плазменного факела становится малым. Тогда инертный процесс теплопроводности может реализовать режим более мягкого теплового воздействия аналогичный [5] и способствовать движению дефектов кристаллической решетки и проявлением полос сдвига кристаллической решетки на поверхности мишени

Также следует учесть оптические особенности распространения ЛИ внутри прозрачного образца. Оптическая плотность стекла БК-110 ($n \approx 1,57$) много больше оптической плотности окружающего воздуха. Это приводит к смещению положения фокуса пучка ЛИ вглубь облучаемого образца, что повышает вероятность развития лазерного разрушения внутри облучаемого стекла. Гладкий кратер, образующийся в режимах облучения стекла импульсами бихроматического ЛИ с $\Delta\tau > 0$ мкс, может только усилить это явление вплоть до экстремального случая – коллимации и рассеяния луча ЛИ. В данной работе для всего диапазона интервалов $\Delta\tau > 0$ (рис. 2) наблюдалось образование разрушений в глубине образца вдоль оси воздействия ЛИ в виде протяженного растрескивания или в виде объемной «пушинки». На тыльной стороне мишени наблюдалось откольное разрушение, диаметром $\sim 1/5$ диаметра кратера лицевой стороны.

Параметры и особенности разогрева приповерхностной плазмы при воздействии бихроматического ЛИ на стекло БК-110 можно выявить на основе анализа интенсивностей эмиссионных линий атомов и ионов кремния (SiO₂ – основа материала

образца) и ионов азота, а также их отношений в различных режимах комбинированного лазерного облучения. Для анализа были выбраны спектральные линии Si III 455,3; Si II 413,1; Si I 702,6 и N II 501,1 и установлены зависимости их интенсивности от временного интервала между импульсами ЛИ с длинами волн 355 и 532 нм (рис. 3).

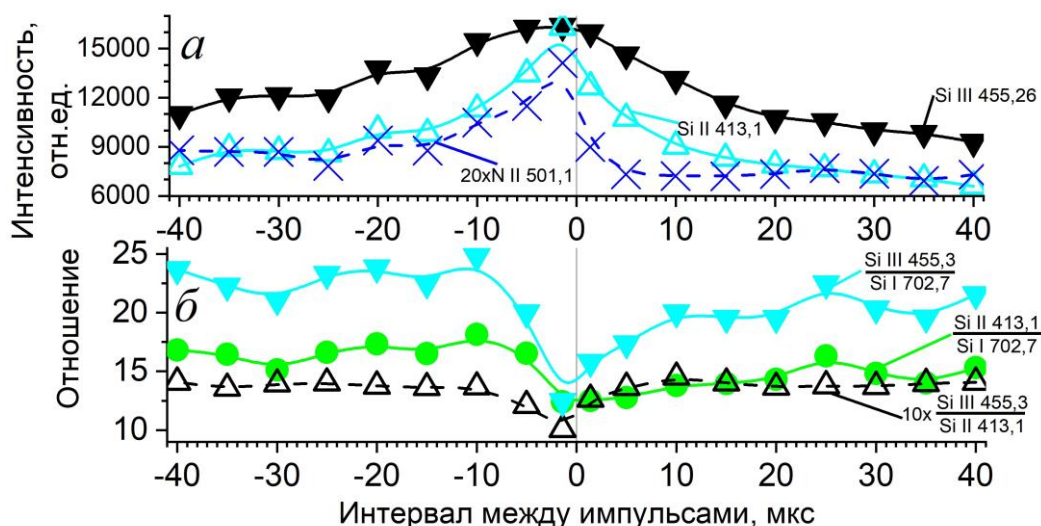


Рис. 3. Зависимости интенсивностей (а) эмиссионных линий атомов и ионов кремния Si I 702,6; Si II 413,1 и Si III 455,3, ионов азота N II 501,1, а также их отношений (б) от временного интервала между импульсами бихроматического ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм, $q_{355} = 0.98$ ГВт/см² и $q_{532} = 1.26$ ГВт/см²

Зависимости значений максимальной интенсивности (рис. 3, а) эмиссионных линий кремния Si II 413,1 и Si III 455,3, а также азота N II 501,1 обладают явным основным максимумом при режиме лазерного облучения $\Delta\tau = -1,4$ мкс. К нему прилегают пологие «крылья» зависимостей. Имеются также слабо выраженные локальные максимумы при значениях интервала $\Delta\tau = -20; -35$ и $+25$ мкс. Эти зависимости отражают преимущественно свечение фронта ударных волн в областях эрозионной и воздушной плазмы, разогреваемых лазерным излучением.

На рис. 3, б даны зависимости отношений интенсивности эмиссионных линий кремния Si III 455,3 / Si II 413,1; Si III 455,3 / Si I 702,6 и Si II 413,1 / Si I 702,6, которые отображают изменение степени разогрева эрозионной плазмы с изменением режима лазерного облучения и выглядят противоположно зависимостям рис. 3, а. Для режима $\Delta\tau = -1,4$ мкс наблюдается главный минимум этих зависимостей, выходящих на «плато» в областях режимов $\Delta\tau > 0$ и $\Delta\tau < 0$, причем для $\Delta\tau < 0$ это «плато» выше. Последнее свидетельствует о более эффективном образовании и разогреве эрозионной плазмы при $\Delta\tau < 0$. Имеющиеся локальные максимумы зависимостей Si III 455,3 / Si I 702,6 и Si II 413,1 / Si I 702,6 при режимах $\Delta\tau = -20; -10; +10, +25$ мкс и другие свидетельствуют о нелинейной зависимости степени разогрева эрозионной плазмы от временного интервала импульсов бихроматического излучения.

Заключение

Характер разрушений при облучении стекла БК-110 импульсами бихроматического ЛИ зависит от порядка следования импульсов и интервала между ними. Так при опережающем воздействии ЛИ 355 нм ($\Delta\tau < 0$) происходит формирование лазерного кратера хрупкого разрушения, окруженного ореолом, состоящим из ближней гладкой области с шириной кольцевого слоя порядка 1 диаметра кратера и более удаленной области, покрытой обильным количеством ровных пересекающихся друг с другом линий поверхностных дефектов. Образование таких дефектов может быть связано с движением дефектов кристаллической решетки, инициированным разогревом поверхности мишени распадающейся приповерхностной плазмой за пределами пятна лазерного облучения.

При опережающем воздействии ЛИ 532 нм ($\Delta\tau > 0$) лазерный кратер формируется в виде гладкого углубления при интервалах между импульсами от +1,4 до +25 мкс, но с дальнейшим ростом интервалов принимает вид кратера хрупкого разрушения. Кроме того, в таких режимах воздействия ЛИ $\Delta\tau > 0$ наблюдается растрескивание внутри стекла и откол на тыльной стороне мишени размером $\sim 0,2$ диаметра кратера лицевой стороны.

Особенности разогрева приповерхностной плазмы также зависят от порядка следования и временного интервала импульсов ЛИ. При опережающем воздействии импульсов ЛИ 355 нм ($\Delta\tau < 0$) наблюдается более сильный разогрев эрозионной плазмы. Наблюдаемые при этом локальные максимумы зависимостей отношений Si III 455,3 / Si I 702,6 и Si II 413,1 / Si I 702,6 в режимах $\Delta\tau = -20; -10; +10; +25$ мкс и другие свидетельствуют о нелинейной зависимости степени разогрева эрозионной плазмы от временного интервала импульсов бихроматического излучения. Однако наблюдаемые в режиме лазерного облучения $\Delta\tau = -1,4$ мкс максимумы интенсивностей спектральных линий кремния Si III 455,3, Si II 413,1 и азота N II 501,1 свидетельствуют о преимущественном разогреве эрозионной и воздушной плазмы в областях соответствующих ударных волн.

Библиографические ссылки

1. Маненков А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел // УФН. 1986. Т. 148, № 1. С. 179–211.
2. Колдунов М. Ф. Теоретический анализ условий теплового взрыва и фотоионизационная неустойчивость прозрачных диэлектриков с поглощающими включениями / М. Ф. Колдунов, А. А. Маненков, И. Л. Покотило // Квантовая электроника. 1998. Т. 15, № 3. С. 544–550.
3. Чумаков А. Н., Лычковский В. В. Разогрев плазмы кремния в воздухе при комбинированном бихроматическом лазерном облучении на длинах волн 355 и 532 нм // ЖПС 2021. Т. 88, № 6. С. 900–906.
4. Абляция кремния в воздухе моно- и бихроматическими импульсами лазерного излучения с длинами волн 355 и 532 нм / А. Н. Чумаков [и др.] // ЖТФ 2022. Т. 92, № 1. С. 36–44.
5. Модификация поверхности раздела SiO₂/Si при воздействии импульсно-периодического излучения волоконного лазера / А. М. Скворцов [и др.] // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 6. С. 503–508.