

РАЗОГРЕВ ПЛАЗМЫ КРЕМНИЯ В ВОЗДУХЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ БИХРОМАТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ НА ДЛИНАХ ВОЛН 355 и 532 нм

А. Н. Чумаков*, В. В. Лычковский

УДК 621.373.826:533.9

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2021-88-6-900-906>

Институт физики НАН Беларусь,
Минск, Беларусь; e-mail: a.chumakov@dragon.bas-net.by

(Поступила 28 октября 2021)

Экспериментально исследованы формирование и нагрев лазерной плазмы при облучении кремния в атмосферном воздухе импульсным лазерным излучением с длинами волн 355 и 532 нм при плотности мощности излучения до 5 ГВт/см². Установлена повышенная эффективность формирования и нагрева абляционной плазмы при бихроматическом облучении кремния с опережающим воздействием наносекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 355 нм.

Ключевые слова: двухимпульсное бихроматическое лазерное облучение, лазерная плазма, структура плазменного факела, возбуждение спектров приповерхностной плазмы, параметры плазмы.

The formation and heating of laser plasma under the irradiation of silicon in ambient air by pulsed laser radiation with wavelengths of 355 and 532 nm at radiation power density up to 5 GW/cm² has been experimentally investigated. An increased efficiency of the formation and heating of ablation plasma under bichromatic irradiation of silicon with advanced action of nanosecond pulses with a wavelength of 355 nm has been established.

Keywords: double-pulse bichromatic laser irradiation, laser plasma, plasma plume structure, excitation of near-surface plasma spectra, plasma parameters.

Введение. Исследование взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с материалами и образующейся приповерхностной плазмой актуально благодаря непрерывному развитию лазеров и расширению сферы их технологических применений, а также вследствие сложности и нелинейности происходящих при этом процессов [1—4]. Процессы лазерной абляции, формирования и динамики приповерхностной плазмы в воздухе зависят от теплофизических и оптических свойств облучаемых материалов, интенсивности и длины волны ЛИ, а также от длительности лазерных импульсов и частоты их повторения. При высоких (>5 кГц) частотах повторения лазерных импульсов и больших интенсивностях ИК-излучения происходит преимущественное образование эрозионной плазмы с многократным ростом давления на поверхности облучаемого материала [5]. В таких многоимпульсных режимах облучения существенно возрастает эффективность лазерной абляции ряда материалов в воздухе, расширяются возможности их размерной обработки [6—9].

Повышение эффективности образования эрозионной плазмы при воздействии серии лазерных импульсов представляет большой интерес для спектроскопии лазерно-индукционной плазмы и анализа материалов [10—13]. Даже при воздействии двух наносекундных лазерных импульсов, разделенных временным интервалом единиц или десятков микросекунд, выявлено значительное усиление разогрева паров мишени и увеличение плотности электронов, что позволяет повысить чувствительность анализа материалов [13—16]. Воздействие двух фемтосекундных лазерных импульсов, разделенных временным интервалом от единиц до тысяч пикосекунд, также сопровождается усилением

SILICON PLASMA HEATING IN AIR AT THE COMBINED BICHROMATIC LASER RADIATION AT WAVELENGTHS OF 355 and 532 nm

A. N. Chumakov*, V. V. Lychkoskyi (B. I. Stepanov Institute Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: a.chumakov@dragon.bas-net.by)

разогрева приповерхностной плазмы и ростом энергии ионов [17, 18]. Поэтому двухимпульсное лазерное воздействие широко используется в методе лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии [19].

Двухимпульсное лазерное воздействие на металлы в воздухе излучением с разными длинами волн дает дополнительные преимущества в образовании приповерхностной плазмы благодаря пониженному коэффициенту отражения поверхности металлов для коротковолнового излучения и более эффективному разогреву плазмы длинноволновым ЛИ из-за квадратичной зависимости ее поглощательной способности от длины волны. Экспериментально установлена повышенная эффективность образования эрозионной плазмы и генерации механического импульса отдачи в условиях воздействия на ряд металлов в воздухе сдвоенных импульсов на первой и второй гармониках излучения YAG:Nd-лазера при опережающем воздействии коротковолнового излучения с временным интервалом 2—5 мкс [20—22]. В работах [23—25] показано, что воздействие двухимпульсным бихроматическим ЛИ дает больше степеней свободы для управления процессами лазерной абляции и разогрева плазмы кремния, однако остается пока недостаточно исследованным.

Цель настоящей работы — установление особенностей образования и разогрева абляционной плазмы кремния в воздухе при его облучении наносекундными импульсами бихроматического излучения с длинами волн 355 и 532 нм с управляемым времененным интервалом и порядком следования лазерных импульсов.

Экспериментальная установка и методы измерений. Установка создана на основе YAG:Nd-лазеров LH-2132 и LH-2137 (ООО “ЛОТИС ТИИ”, Минск) и системы синхронизации, обеспечивающей генерацию парных наносекундных импульсов ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм длительностью 18 и 15 нс, следующих с регулируемым времененным интервалом между ними и управляемым порядком их следования. Форма временного профиля импульсов ЛИ зарегистрирована фотоприемником 11HSP-V2 (Standa) на осциллографе Teledyne Lecroy Wave Surfer 510R с полосой пропускания 1 ГГц. Энергия лазерных импульсов контролировалась прибором Ophir с измерительной головкой PE25BF-DIF-V2 ROHS. Соосный пучок излучения обоих лазеров формировался с помощью спектроредителя и фокусировался ахроматическим объективом ($f = 150$ мм) на поверхности кремниевой пластины. В качестве мишени использованы кремниевые пластины (111) толщиной 180—375 мкм. Диаметры пятен лазерного облучения на мишени составляли 200 и 250 мкм для $\lambda = 355$ и 532 нм. Для повышения однородности пятен облучения использовались максимально возможные уровни накачки лазеров вместе с ослаблением энергии лазерных импульсов калиброванными светофильтрами.

Формирующийся у поверхности мишени лазерный плазменный факел зарегистрирован видеокамерой [26] на основе ПЗС-матрицы ICX415AL с объективом И-90У 4/75 ($f = 75$ мм). Экспозиция отдельного кадра ~3 мс. Момент запуска камеры регулировался системой синхронизации на основе генератора импульсов Г5-54, связанного с лазером. Временной интервал между лазерным импульсом и импульсом синхронизации видеокамеры контролировался осциллографом по сигналам от фотодиода и генератора импульсов соответственно. При комбинированном воздействии пары бихроматических лазерных импульсов видеокадры регистрировались с синхронизацией от второго импульса пары.

Спектры испускания приповерхностной лазерной плазмы регистрировались спектрометром SL-40-2 с многоэлементным фотоприемником на основе диодной линейки TCD 1304 (Toshiba, Япония) без пространственного разрешения по плазменному факелу. Время экспозиции спектра ~7 мс. Спектры испускания плазменного факела с пространственным разрешением вдоль оси воздействия ЛИ зарегистрированы с помощью дифракционного спектрометра, оснащенного цифровой фотокамерой с матричным фотоприемником, при воздействии отдельной пары бихроматических лазерных импульсов в характерных режимах лазерного облучения с частотой повторения импульсов 1 Гц и экспозицией отдельного кадра ~1 с.

Результаты и их обсуждение. Отдельные видеокадры плазменного факела в режимах монохроматического и комбинированного бихроматического лазерного воздействия с $\lambda = 355$ и 532 нм на кремний в воздухе представлены на рис. 1 (отрицательное значение интервала между импульсами соответствует опережающему воздействию ЛИ 355 нм). Для воздействия ЛИ с $\lambda = 355$ нм характерно формирование плазменного факела с большим количеством частиц конденсированной фазы, разлетающихся в пределах малого телесного угла (рис. 1, а), что может быть обусловлено формированием развитого слоя жидкой фазы на поверхности кремния вследствие высокого коэффициента поглощения ЛИ $\sim 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ [27]. При воздействии ЛИ с $\lambda = 532$ нм наблюдается преимущественно яркое свечение плазменного факела, тогда как выброс частиц конденсированной фазы слабо выражен (рис. 1, б). Картина плазмообразования значительно изменяется при переходе к комбинированному

бихроматическому лазерному воздействию на кремний. При опережающем воздействии лазерных импульсов с $\lambda = 355$ нм размеры ярко светящегося плазменного факела возрастают, а количество крупных частиц существенно уменьшается, тогда как телесный угол разлета частиц увеличивается (рис. 1, в). С ростом временного интервала между импульсами размеры плазменного факела уменьшаются, а количество частиц возрастает, что проявляется в изрезанности границы факела. Подобное изменение картины абляции кремния, вероятно, связано с усиленным выбросом частиц в процессе воздействия коротковолнового ЛИ с $\lambda = 355$ нм и испарением разлетающихся частиц в процессе воздействия второго лазерного импульса пары с $\lambda = 532$ нм. При опережающем воздействии ЛИ с $\lambda = 532$ нм наблюдается разлет частиц в пределах увеличенного телесного угла, а приповерхностный плазменный факел смещается на некоторое расстояние от поверхности образца (рис. 1, г). При дальнейшем увеличении интервала между импульсами количество частиц увеличивается, а свечение приповерхностного факела резко ослабевает, что указывает на приближение картины абляции к случаю монохроматического воздействия ЛИ с $\lambda = 355$ нм. Таким образом, бихроматическое воздействие с лидированием импульсов ЛИ с $\lambda = 355$ нм обеспечивает наиболее интенсивное плазмообразование с ослабленным выбросом частиц (рис. 1, в, г).

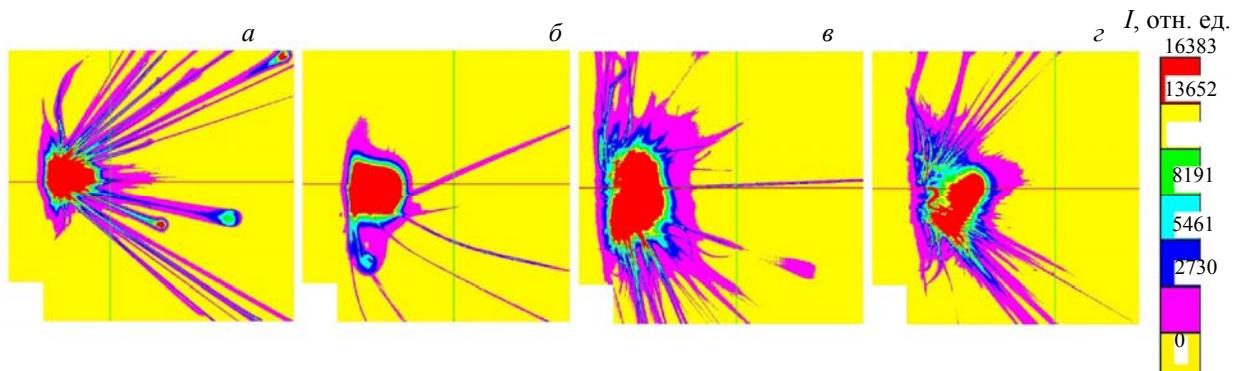


Рис. 1. Отдельные видеокадры плазменного факела при монохроматическом (*а, б*) и бихроматическом (*в, г*) лазерном воздействии на кремний в воздухе: *а* — воздействие ЛИ с $\lambda = 355$ нм, $q_{355} = 1.9 \text{ ГВт}/\text{см}^2$; *б* — ЛИ с $\lambda = 532$ нм, $q_{532} = 3.5 \text{ ГВт}/\text{см}^2$; *в* — комбинированное воздействие ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм, $\Delta t = -20 \text{ мкс}$ (опережающее воздействие ЛИ 355 нм); *г* — комбинированное воздействие ЛИ с $\lambda = 532$ и 355 нм, $\Delta t = +30 \text{ мкс}$ (опережающее воздействие ЛИ с $\lambda = 532$ нм)

Спектры испускания приповерхностных плазменных факелов зарегистрированы как при монохроматическом, так и при бихроматическом лазерном воздействии на кремний в воздухе ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм в диапазоне плотностей мощности $q = 0.9—5.0 \text{ ГВт}/\text{см}^2$. При комбинированном лазерном облучении кремния спектры плазмы регистрировались для разного порядка следования бихроматической пары импульсов в диапазоне интервалов между импульсами Δt от -40 до $+40$ мкс для ряда плотностей мощности воздействующего излучения. В качестве наиболее характерных на рис. 2 представлены спектры плазмы, полученные при бихроматическом лазерном воздействии на кремний с плотностями мощности излучения $q_{355} = 1.9 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ и $q_{532} = 3.5 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ при разных порядках следования лазерных импульсов с временными интервалами $\Delta t_1 = -1.4 \text{ мкс}$ и $\Delta t_2 = +1.4 \text{ мкс}$, сопоставленные со спектрами, полученными при монохроматическом воздействии с $\lambda = 355$ и 532 нм. Видно, что при монохроматическом лазерном воздействии на кремний с $\lambda = 355$ и 532 нм получаются спектры с высоким уровнем непрерывного излучения, характеризующиеся наличием интенсивных атомных спектральных линий Si I 288.2 и Si I 390.5 нм, сильно уширенных линий однократных ионов Si II 385.6 и Si II 413.1 нм и следами ионных линий азота N II 501.1 нм, а также линий двукратных ионов Si III 308.6 и Si III 380.6 нм, интенсивность которых превышает уровень фона (спектры 1 и 3). Отметим, что интенсивность атомных и ионных спектральных линий кремния в спектрах приповерхностной плазмы нелинейно возрастает с увеличением плотности воздействующего ЛИ от 1 до $5 \text{ ГВт}/\text{см}^2$.

Комбинированное бихроматическое лазерное воздействие (355 + 532 нм) приводит к формированию существенно различающихся спектров (рис. 2, спектры 2 и 4). При опережающем лазерном воздействии с $\lambda = 355$ нм регистрируются спектры, которые характеризуются пониженным уровнем непрерывного излучения и значительным количеством интенсивных атомных и ионных линий крем-

ния (Si I 390.5 нм, Si II 314.9 нм, Si III 455.3 нм, Si III 456.8 нм, Si III 380.6 нм и др.) со следами трехкратных ионов Si IV 408.8 нм (спектр 2). Наличие в спектрах линий двукратных ионов Si III и трехкратных ионов Si IV с нормальными температурами 19000 и 27000 К указывает на разогрев плазмы до $\sim 2 \cdot 10^4$ К. Изменение порядка следования импульсов ЛИ на 532 + 355 нм ведет к ослаблению разогрева абляционной плазмы и усилению выброса частиц, о чем свидетельствуют ослабление спектральных линий двукратных ионов Si III и отсутствие следов трехкратных ионов Si IV (спектр 4).

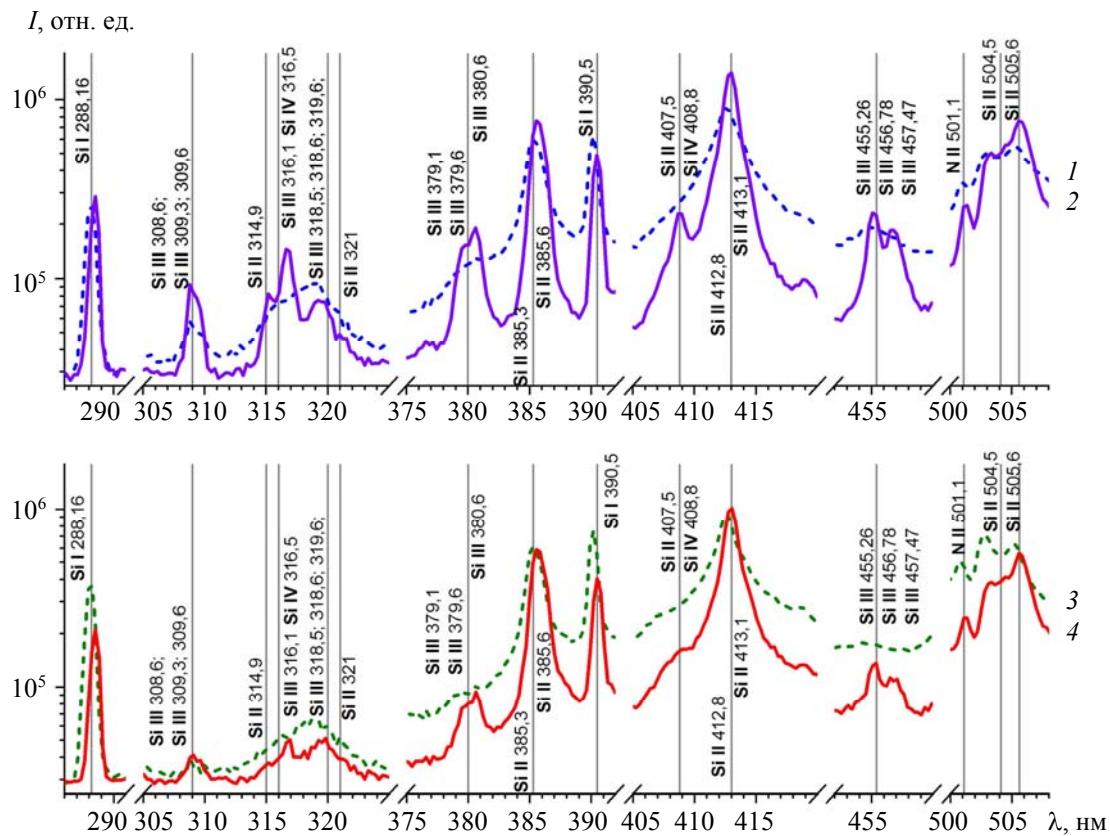


Рис. 2. Спектры испускания приповерхностной плазмы при монохроматическом (1, 3) и бихроматическом (2, 4) лазерном воздействии ЛИ на кремний в воздухе: 1 — ЛИ с $\lambda = 355$ нм ($q_{355} = 4.6$ ГВт/см 2); 2 — комбинированное ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм ($q_{355} = 1.9$ ГВт/см 2 , $q_{532} = 3.5$ ГВт/см 2 , $\Delta\tau = -1.4$ мкс); 3 — ЛИ с $\lambda = 532$ нм ($q_{532} = 4.9$ ГВт/см 2); 4 — комбинированное ЛИ с $\lambda = 532$ и 355 нм ($q_{532} = 3.5$ ГВт/см 2 , $q_{355} = 1.9$ ГВт/см 2 , $\Delta\tau = +1.4$ мкс)

Дополнительную информацию о возбуждении спектров приповерхностной плазмы при бихроматическом лазерном воздействии на кремний импульсов излучения $\lambda = 355$ и 532 нм можно получить из анализа зависимостей интенсивности спектральных линий кремния Si I 390.5; Si II 385.6; Si III 380.6 нм и линии азота N II 501.1 нм, а также отношения интенсивностей линий Si II 385.6/ Si I 390.5 и Si III 380.6/ Si II 385.6 от временного интервала и порядка следования бихроматической пары импульсов в диапазоне от -40 до $+40$ мкс (отрицательный интервал соответствует опережающему воздействию импульса ЛИ с $\lambda = 355$ нм). Отношение интенсивностей спектральных линий, соответствующих двум последовательным ступеням ионизации атомов кремния, характеризуется преимущественно экспоненциальной зависимостью от электронной температуры плазмы и степенной зависимостью от концентрации электронов [28], поэтому может служить индикатором температуры плазмы. На рис. 3 представлены наиболее характерные указанные зависимости от временного интервала между импульсами, получаемые при воздействии импульсов ЛИ с плотностями мощности $q_{355} = 1.9$ ГВт/см 2 и $q_{532} = 3.5$ ГВт/см 2 .

При изменении порядка следования лазерных импульсов с опережающим воздействием ЛИ 355 нм ($\Delta\tau < 0$) на опережающее воздействие ЛИ с $\lambda = 532$ нм ($\Delta\tau > 0$) наблюдается резкое уменьше-

ние отношения интенсивностей спектральных линий Si II 385.6/Si I 390.5 нм, а также пары линий Si III 380.6/Si II 385.6 нм (рис. 3, кривые 1 и 2), что указывает на ослабление разогрева аблационной плазмы. Одновременно с этим уменьшаются интенсивности спектральных линий Si III 380.6 и Si II 385.6 нм, но возрастает интенсивность ионной спектральной линии азота N II 501.1 нм (кривые 3—5). Из этого следует, что в условиях опережающего воздействия ЛИ с $\lambda = 532$ нм разогрев аблационной плазмы кремния ограничивается из-за конкурирующего плазмообразования в воздухе, окружающем облучаемый образец кремния. Максимальный разогрев аблационной плазмы кремния наблюдается при опережающем воздействии лазерных импульсов с $\lambda = 355$ нм с временным интервалом $\Delta t = -1.4$ мкс импульсов ЛИ 355 и 532 нм. Это хорошо согласуется с усилением аблации кремния при комбинированном бихроматическом лазерном излучении в условиях опережающего воздействия импульсов с $\lambda = 355$ нм и ее ослаблением при опережающем воздействии импульсов ЛИ с $\lambda = 532$ нм [24, 25].

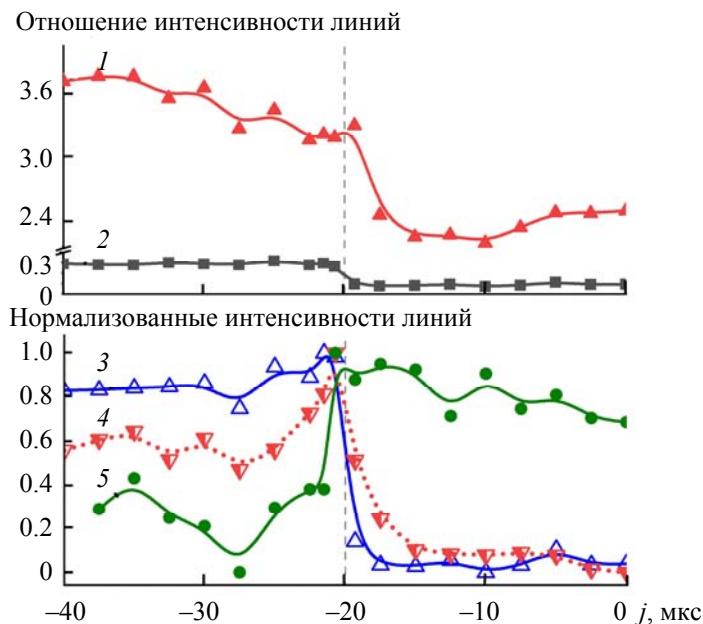


Рис. 3. Зависимости отношения интенсивностей спектральных линий Si II 385.6/Si I 390.5 (1), Si III 380.6/Si II 385.6 (2), а также нормированных интенсивностей линий Si III 380.6 (3), Si II 385.6 (4) и N II 501.1 (5) в спектрах плазмы, инициированной бихроматическим воздействием ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм на кремний от временного интервала j и порядка их следования (отрицательный интервал соответствует опережающему воздействию импульса ЛИ с $\lambda = 355$ нм)

Присутствие в спектрах плазмы линии водорода H_α 656.2 нм, обусловленное наличием паров воды в атмосферном воздухе, позволяет сделать оценки усредненной по плазменному факелу концентрации электронов для нескольких интервалов между импульсами бихроматического излучения. В частности, максимальная концентрация электронов $\sim 2.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ достигается при облучении кремния бихроматической парой лазерных импульсов с опережающим следованием импульсов излучения 355 нм и $\Delta t = -15$ мкс, тогда как при обратном порядке следования лазерных импульсов с $\Delta t = +15$ мкс концентрация электронов $\sim 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ близка к минимальной.

С учетом интенсивности и параметров нескольких атомных и ионных спектральных линий кремния (Si I 390.5 нм, Si II 385.6 нм, Si II 413.1 нм и др.) в предположении соответствия заселенности энергетических уровней распределению Больцмана определена электронная температура плазмы (усредненная по плазменному факелу). При опережающем воздействии импульсов ЛИ 355 нм температура составляет $T \approx 2.9 \cdot 10^4$ К и мало изменяется с времененным интервалом от -20 до -1.4 мкс. При смене порядка следования импульсов на опережающее воздействие ЛИ с $\lambda = 532$ нм температуры не превышают $T \approx 2.4 \cdot 10^4$ К и также слабо зависят от временных интервалов в диапазоне 3—15 мкс.

Спектры приповерхностной плазмы с пространственным разрешением вдоль оси воздействия бихроматического ЛИ, полученные в режимах, различающихся временными интервалами и порядком

следования импульсов бихроматического излучения (рис. 4), дают полезное представление о структуре плазменного факела. По высоте спектр плазменного факела разделен на две различные зоны. К поверхности мишени прилегает зона с преобладанием непрерывного спектра высокой интенсивности, над которой располагается зона с интенсивным линейчатым спектром. При этом суммарная высота спектров увеличивается с ростом временного интервала между лазерными импульсами. Наиболее интенсивные линейчатые спектры приповерхностной плазмы с ограниченной зоной непрерывного излучения наблюдаются при опережающем воздействии на кремний ЛИ с $\lambda = 355$ нм с временным интервалом импульсов в диапазоне от -5.5 до -1.3 мкс. Этому может способствовать интенсивное испарение частиц конденсированной дисперской фазы и разогрев плазмы в процессе воздействия второго импульса с $\lambda = 532$ нм.

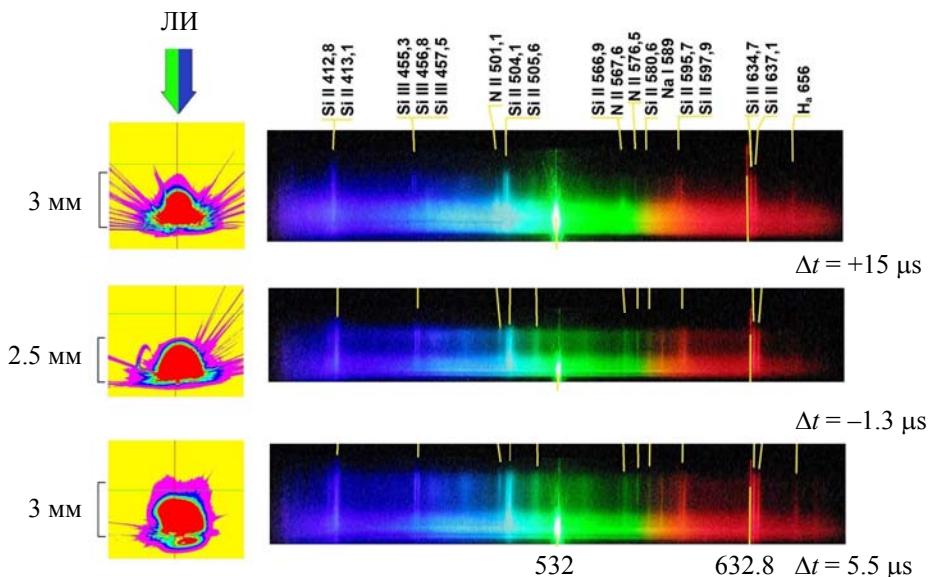


Рис. 4. Отдельные видеокадры плазменного факела (слева) и соответствующие им спектры свечения плазменного факела (справа) при воздействии бихроматического излучения с $q_{355} = 1.9 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ и $q_{532} = 3.5 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ с временными интервалами между импульсами $\Delta t = -5.5, -1.3$ и $+15$ мкс

Смена порядка следования бихроматической пары лазерных импульсов на 532+355 нм приводит к расширению зоны непрерывного излучения и сужению зоны линейчатого спектра с ростом интенсивности ионных линий азота и снижению интенсивности спектральных линий кремния (рис. 3, $\Delta t > 0$; рис. 4, $\Delta t = 15$ мкс). Это может быть обусловлено интенсивным выбросом конденсированных частиц под действием ЛИ с $\lambda = 355$ нм с соответствующим усилением экранировки мишени при понижении эффективности испарения их в плазменном факеле.

Заключение. Исследовано формирование приповерхностной плазмы на пластинках кремния в атмосферном воздухе при воздействии импульсного лазерного излучения наносекундной длительности с длинами волн 355 и 532 нм и плотностью мощности в диапазоне 1—5 ГВт/см², в том числе при комбинированном бихроматическом облучении с управляемым порядком и временным интервалом следования импульсов. Установлено влияние порядка и временного интервала следования комбинированных импульсов лазерного излучения с длинами волн 355 и 532 нм на структуру образующейся приповерхностной лазерной плазмы, а также на возбуждение спектральных линий кремния и компонентов окружающего мишень воздуха. Установлена повышенная эффективность формирования и нагрева аблационной плазмы при комбинированном бихроматическом облучении кремния в воздухе наносекундными импульсами лазерного излучения на длинах волн 355 и 532 нм с опережающим воздействием импульсов лазерного излучения с длиной волны 355 нм. При этом оптимальные условия возбуждения эмиссионных спектров кремния реализуются в диапазоне временных интервалов между импульсами от -1.4 до -5 мкс.

Работа поддержана государственной программой научных исследований Беларуси “Конвергенция-2025” (подпрограмма “Микромир, плазма и Вселенная”, задание 2.2.02_1).

- [1] С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. Действие излучения большой мощности на металлы, под ред. А. М. Бонч-Бруевича и М. А. Ельяшевича, Москва, Наука (1970)
- [2] У. Дьюли. Лазерная технология и анализ материалов, Москва, Мир (1986)
- [3] А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, И. Н. Михэйлеску. Взаимодействие лазерного излучения с металлами, Москва, Наука (1988)
- [4] С. И. Анисимов, Б. С. Лукьянчук. Успехи физ. наук, **172**, № 3 (2002) 301—333 [S. I. Anisimov, B. S. Lukyanchuk. Phys. Usp., **45**, N 3 (2002) 293—324]
- [5] Л. Я. Минько, А. Н. Чумаков, Н. А. Босак. Квант. электрон., **17**, № 11 (1990) 1480—1484 [L. Ya. Min'ko, N. Chumakov, N. A. Bosak. Quant. Electron., **20**, N 11 (1990) 1389—1392], doi: 10.1070/QE1990v020n11ABEH007540
- [6] R. Sattmann, V. Sturm, R. Noll. J. Phys. D: Appl. Phys., **28** (1995) 2181—2187
- [7] С. Г. Горный, А. М. Григорьев, М. И. Патров, В. Д. Соловьев, Г. А. Туричин. Квант. электрон., **32**, № 10 (2002) 929—932 [S. G. Gornyi, A. M. Grigor'ev, M. I. Patrov, V. D. Solov'ev, G. A. Turichin. Quant. Electron., **32**, N 10 (2002) 929—932], doi: 10.1070/QE2002v032n10ABEH002320
- [8] С. М. Климентов, П. А. Пивоваров, В. И. Конов, Д. Брайтлинг, Ф. Даусингер. Квант. электрон., **34**, № 6 (2004) 537—540 [S. M. Klimentov, P. A. Pivovarov, V. I. Konov, D. Breitling, F. Dausinger. Quant. Electron., **34**, N 6 (2004) 537—540], doi: 10.1070/QE2004v034n06ABEH002769
- [9] С. М. Першин. Квант. электрон., **39**, № 1 (2009) 63—67 [S. M. Pershin. Quant. Electron., **39**, N 1 (2009) 63—67], doi: 10.1070/QE2009v039n01ABEH013720
- [10] Л. Я. Минько, А. Н. Чумаков, Г. И. Баканович. Журн. прикл. спектр., **61**, № 5—6 (1994) 476—484 [L. Y. Min'ko, A. N. Chumakov, G. I. Bakanovich. J. Appl. Spectr., **61** (1994) 805—811], doi: 10.1007/BF02606441
- [11] М. Л. Петух, В. А. Розанцев, А. Д. Широканов, А. А. Янковский. Журн. прикл. спектр., **67**, № 6 (2000) 798—801 [M. L. Petukh, V. A. Rozantsev, A. D. Shirokanov, A. A. Yankovskii. J. Appl. Spectr., **67** (2000) 1097—1101]
- [12] Reinhard Noll. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Fundamentals and Applications, Berlin, Heidelberg, Springer (2012) 83—95
- [13] А. Н. Чумаков, В. Б. Авраменко, Н. А. Босак. Журн. прикл. спектр., **79**, № 2 (2012) 279—287 [A. N. Chumakov, V. B. Avramenko, N. A. Bosak. J. Appl. Spectr., **79** (2012) 261—268]
- [14] G. Cristoforetti, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni. Appl. Phys. B, **80** (2005) 559—568
- [15] Е. А. Ершов-Павлов, К. Ю. Катсалап, К. Л. Степанов, Ю. А. Станкевич. Spectrochim. Acta B, **63** (2008) 1024—1037
- [16] А. А. I. Khalil. Laser Phys., **20**, N 1 (2010) 238—244
- [17] V. Piñon, D. Anglos. Spectrochim. Acta B, **64** (2009) 950—960
- [18] S. Amoruso, R. Bruzzese, X. Wang, G. O'Connel, J. G. Lunney. J. Appl. Phys., **108** (2010) 113302
- [19] Д. Кремерс, Л. Радзиемски. Лазерно-искровая спектроскопия, Москва, Техносфера (2009) 265—267
- [20] А. Н. Чумаков, Н. А. Босак, В. Л. Рудаков. Материалы Второго белорусского космического конгресса, 25—27 октября 2005 г., Минск, ОИПИ НАН Беларуси (2005) 45—49
- [21] А. Н. Чумаков, Н. А. Босак, А. В. Панина. Журн. прикл. спектр., **84**, № 4 (2017) 595—602 [A. N. Chumakov, N. A. Bosak, A. V. Panina. J. Appl. Spectr., **84**, N 4 (2017) 620—626]
- [22] А. Н. Чумаков, Н. А. Босак, А. А. Иванов. Журн. прикл. спектр., **86**, № 5 (2019) [A. N. Chumakov, N. A. Bosak, A. A. Ivanov. J. Appl. Spectr., **86**, N 5 (2019) 836—842]
- [23] A. N. Chumakov, N. A. Bosak, P. I. Verenich. High Temp. Mater. Proc., **18**, N 4 (2014) 269—272
- [24] В. В. Лычковский, А. Н. Чумаков. Материалы междунар. школы-конференции молодых ученых и специалистов “Современные проблемы физики”, 4—6 ноября 2020 г., Минск, Институт физики НАН Беларуси (2020) 37—38
- [25] А. Н. Чумаков, В. В. Лычковский, И. С. Никончук, А. С. Мацукович. Журн. тех. физики, **92**, № 1 (2022) 36—44
- [26] I. S. Nikonchuk, A. N. Chumakov. J. Phys.: Conf. Ser., **666** (2016) 012021, doi: 10.1088/1742-6596/666/1/012021
- [27] M. Panzner, J. Kasper, H. Wust, U. Klotzbach, E. Beyer. Proc. SPIE, **4637** (2002) 496—504, doi: 10.1117/12.470659
- [28] Г. Грин. Спектроскопия плазмы, Москва, Атомиздат (1969) 224—225