

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

УДК 535.21

ОБЛЕГЧЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУХА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВУХ ПЛАСТИН ПРОЗРАЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

© 2008 г. А. В. Куликов; В. Н. Смирнов, доктор физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: vn_smirnov@mail.ru

Известно, что форма лазерного импульса, проходящего через плазму оптического пробоя в газе, например в воздухе (лазерная искра), а также в воздухе вблизи поверхности мишени (облегченный оптический пробой) существенно искажается. При этом уменьшается амплитуда импульса и сокращается его длительность. Представляет интерес выяснение возможности инициирования таким деформированным импульсом пробоя у поверхностей двух пластин прозрачного диэлектрика. Экспериментальные результаты получены при воздействии импульсов CO_2 -лазера на пластины, изготовленные из NaCl. Показано, что в условиях проведенных экспериментов вероятность одновременного инициирования плазмы у поверхностей обеих пластин составляет примерно 0,04. Отмечена возможность ее увеличения примерно до 0,6.

Коды OCIS: 320.7130, 260.3230.

Поступила в редакцию 15.11.2007.

Низкие значения коэффициентов поглощения щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) в области 10,6 мкм (менее 10^{-3} см^{-1}) позволяют считать, что пробой (разрушение) в объеме этих кристаллов связан с нагревом поглощающих неоднородностей (ПН). В пользу несобственного пробоя ЩГК свидетельствуют и результаты исследования их пробоя импульсами CO_2 -лазера. Природа ПН, определяющих измеренные значения порогов пробоя ЩГК, была выяснена в начале 80-х годов [1, 2].

Практически важно, что данных о значении порога пробоя материала, измеренном в объеме, недостаточно для оценки работоспособности изготовленных из него оптических элементов. Дело в том, что лучевая прочность последних ограничена более низкими порогами разрушения их поверхностей по сравнению с порогами пробоя в объеме материала. Это связывают с существенно более высокой концентрацией разнообразных дефектов, содержащихся в поверхностном слое и снижающих порог разрушения поверхности. Установлено также, что существенную роль в разрушении элементов из ЩГК играет приповерхностный облегченный оптический пробой (ООП) окружающего образец газа. Порог ООП, как известно, существенно ниже порога пробоя газа вдали от поверхности [3].

К настоящему времени надежно установлено, что макроразрушение поверхности оптического элемента из ЩГК (пробой поверхности) при облучении сверхпороговыми для развития ООП лазерными импульсами обусловлено ее растрескиванием под действием температурных напряжений, возникающих вследствие нагрева поверхностного слоя сильно поглощаемым вакуумным ультрафиолетовым излучением плазмы ООП [4, 5]. Развитие же ООП вблизи облучаемой поверхности связано с нагревом ПН поверхностного слоя, образованием микроразрушений поверхности, эмиссией из них электронов в прилегающий слой воздуха и развитием в нем электронной лавины под действием электрического поля лазерного излучения.

Представляет интерес выяснение возможности инициирования ООП импульсами излучения, прошедшего через пластину прозрачного диэлектрика и плазму пробоя, у поверхности второй пластины с идентичными характеристиками. Очевидно, что для инициирования пробоя интенсивность излучения у поверхности второй пластины должна быть увеличена, по крайней мере, до порогового ее значения у поверхности первой пластины. Другой вариант состоит в облучении тыльной поверхности второй пластины, порог инициирования ООП вблизи кото-

рой, как известно [6], в $N_0 = [2n/(n+1)]^2$ раз (где n – показатель преломления) ниже, чем у фронтальной. Следует иметь в виду, что в обеих ситуациях возможности инициирования пробоя ограничены. В первом случае – необходимостью заметного увеличения интенсивности излучения у фронтальной поверхности первой пластины. Во втором – отношением порогов пробоя фронтальной и тыльной поверхностей, составляющим, например для NaCl ($n = 1,49$) $N_0 = 1,43$.

В настоящей работе исследованы возможности реализации инициирования ООП на тыльной поверхности пластины, изготовленной из NaCl, при перефокусировке на нее излучения, действовавшего на фронтальную поверхность идентичной пластины и инициировавшего вблизи нее ООП.

В экспериментах использовался импульсный CO₂-лазер с длительностью импульса на полувысоте около 50 нс при полной длительности около 1,5 мкс. Излучение лазера фокусировалось линзой из BaF₂ с $F_1 = 193$ мм на фронтальную поверхность первой пластины. Вторая линза из BaF₂ с $F_2 = 168$ мм, расположенная на расстоянии $2F_2$ от фронтальной поверхности первой пластины, переносила изображение облучаемой области на тыльную поверхность второй пластины с увеличением $1\times$. Интенсивность излучения лазерного импульса ослаблялась фильтрами, изготовленными из BaF₂ и CaF₂, и контролировалась германиевым приемником на увлечении носителей тока. Вспышки свечения плазмы ООП регистрировались двумя фотоумножителями ФЭУ, а следы повреждения поверхности – с помощью микроскопа МБС-9. Сигналы с приемника лазерного излучения и ФЭУ подавались на осциллографы С8-14.

Известным методом [7] проведены измерения порогов разрушения фронтальной и тыльной поверхностей полированной пластины. Метод предполагает проведение серии (20–30) облучений образца импульсами с различной интенсивностью q . Образец каждый раз облучается в новом месте, а за порог принимается значение $q^* = 0,5(q_{\max(-)} + q_{\min(+)}),$ где $q_{\max(-)}$ – максимальное в серии облучений значение q , при котором пробой не развивается, а $q_{\min(+)}$ – минимальное в серии значение q , при котором пробой развивается. Пороги составили соответственно 470 ± 50 и 340 ± 50 МВт/см², а их отношение $N = 1,4 \pm 0,4$ близко к N_0 . Для проведения основных измерений пластина была расколота на две равные части, использовавшиеся в качестве образцов 1 и 2.

В ходе выполнения измерений контролировалась кинетика вспышек свечения плазмы ООП у фронтальной поверхности образца 1 и тыльной поверхности образца 2. Всего было проведено 80 измерений при интенсивности излучения, действова-

шего на фронтальную поверхность образца 1, 460–480 МВт/см². При этом были зарегистрированы 3 случая инициирования ООП вблизи обеих поверхностей и один случай инициирования ООП лишь вблизи поверхности образца 2. При 42 облучениях ООП наблюдался лишь вблизи поверхности образца 1, а в 34 случаях ООП вообще не инициировался. В случаях инициирования ООП вблизи обеих облучаемых поверхностей повреждение тыльной поверхности второго образца было существенно слабее повреждений, наблюдавшихся в случаях развития ООП вблизи поверхности одного (любого) из образцов, что, безусловно, связано с поглощением лазерного излучения в плазме ООП у поверхности образца 1.

Малое число одновременно наблюдавшихся ООП вблизи обеих пластин может быть объяснено следующими причинами. Во-первых, пропускания линзы Л2 и пластины 1 составляли соответственно $T_{Л2} = 0,74$ и $T_1 = 0,92$, что заметно снижало интенсивность излучения, действовавшего на поверхность пластины 2. Во-вторых, площадь облучаемого пятна при перефокусировке излучения выросла в $(r_2/r_1)^2 = 1,2$ раза, где r_1 и r_2 – радиусы облучаемых пятен на поверхностях первой и второй пластин. В результате “запас” по интенсивности излучения, обусловленный значением $N_0 = 1,43$, оказался перекрытым потерями. Действительно, $1,43 T_{Л2} T_1 / 1,2 \approx 0,8$.

Для анализа полученных результатов была экспериментально исследована зависимость вероятности развития ООП [8] у фронтальной поверхности пластины от интенсивности излучения $P_1(q)$. С этой целью поверхность пластины облучалась сериями импульсов с различными значениями интенсивности q , одинаковыми в каждой серии. Каждый раз облучалось новое место поверхности. Вероятность инициирования ООП при интенсивности q оценивалась величиной $P_1 = m/M$, где M – число измерений в серии, а m – число случаев инициирования ООП. Известно [7], что порог, определяемый по приведенной выше формуле, равен интенсивности, при которой вероятность развития ООП $P_1 = 0,5$. Исследованная зависимость действительно проходит через точку с координатами $q = 470$ МВт/см² и $P_1 = 0,5$. Для вероятности развития ООП вблизи тыльной поверхности построена зависимость $P_2(q)$ с учетом того, что она должна быть подобна полученной экспериментально для фронтальной поверхности и должна проходить через точку с координатами $q = q_t^* = q_\phi^*/1,43$ и $P_2 = 0,5$. Здесь q_t^* и q_ϕ^* – пороги инициирования ООП у тыльной и фронтальной поверхностей пластин. Пользуясь этими двумя зависимостями, оказалось возможным оценить вероятность инициирования ООП

вблизи поверхностей образцов 1 и 2 при произвольном значении интенсивности излучения q .

Так, например, если на фронтальную поверхность образца 1 воздействует импульс излучения с интенсивностью $q_1 = 470 \text{ МВт/см}^2$, то вероятность инициирования ООП вблизи нее $P_1 = 0,5$. На тыльную же поверхность образца 2 воздействует импульс излучения с интенсивностью (с учетом указанных выше причин ее снижения) $q_2 = 0,56q_1 = 260 \text{ МВт/см}^2$. Ей соответствуют вероятность инициирования ООП $P_2 \approx 0,1$ и вероятность инициирования ООП вблизи обеих поверхностей $P_1P_2 = 0,05$, которая близка к экспериментально наблюдавшейся $0,04 \approx 3/80$. Оценки показывают, что при замене линзы Л2 линзой, изготовленной из NaCl ($T_{Л2} = 0,92$), и тех же условиях воздействия можно было бы ожидать, что $P_1 = 0,5$ и $P_2 \approx 0,5$. При замене линзы и увеличении интенсивности излучения, воздействующего на фронтальную поверхность, до 500 МВт/см^2 вероятности инициирования ООП вблизи обеих поверхностей возросли бы соответственно до значений примерно 0,8 и 0,7, т. е. вероятность одновременного инициирования ООП у поверхностей обоих образцов была бы близка к 0,6.

Результаты проведенных исследований могут быть полезны при проектировании оптических схем, содержащих большое число элементов, поверхности которых подвергаются воздействию импульсов излучения с интенсивностями, близкими к порогам их разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Имас Я.А., Калугина Т.И., Крутякова В.П., Смирнов В.Н. Электронно-микроскопические исследования поглощающих неоднородностей в щелочно-галоидных кристаллах // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 3. С. 129–133.
2. Крутякова В.П., Смирнов В.Н., Файнберг Л.М. Спектроскопические исследования поглощающих неоднородностей в щелочно-галоидных кристаллах // Журн. прикл. спектр. 1984. Т. 41. № 5. С. 736–738.
3. Бонч-Бруевич А.М., Диденко И.А., Капорский Л.Н. Низкопороговый оптический пробой газов вблизи поверхности. Обзор экспериментальных работ. Минск: Институт тепло- и массообмена АН БССР, 1985. 60 с.
4. Наумова Н.Н., Пухов А.М., Смирнов В.Н. Растрескивание поверхности щелочно-галоидных кристаллов под действием излучения сильноточного импульсного разряда // ОМП. 1989. № 9. С. 15–17.
5. Смирнов В.Н. Растрескивание поверхности прозрачного диэлектрика, находящейся в контакте с лазерной плазмой // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 3. С. 7–11.
6. Boiling N.L., Crisp M.D., Dube G. Laser induced surface damage // Appl. Opt. 1973. V. 12. № 4. P. 650–660.
7. Foltyn S.R. Spotsizes effects in laser damage testing. Laser induced damage in optical materials // NBS Special Publ. 1984. № 669. P. 368–379.
8. Bass M., Barrett H.H. Avalanche breakdown and the probabilistic nature of laser induced damage // IEEE J. Quant. Electr. 1972. V. QE-8. № 3. P. 338–343.