

ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА, ФОРМИРУЕМОГО НА ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛУЧА НЕПРЕРЫВНОГО CO₂-ЛАЗЕРА

© 2005 г. В. С. Макин, канд. физ.-мат. наук; Ю. И. Пестов

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем,
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: vmak@niiki.ru

Изучены профили рельефа поверхности кварцевого стекла после воздействия движущегося сфокусированного луча непрерывного CO₂-лазера. Полученные результаты хорошо объясняются в рамках термокапиллярного механизма формирования рельефа, если температурный коэффициент поверхностного натяжения стекла меняет знак с ростом температуры. Обнаружено и качественно объяснено явление формирования плоского дна микроканала, образующегося после затвердевания стекла.

Коды OCIS: 240.6700.

Поступила в редакцию 05.04.2005.

В лазерной микротехнологии, в частности при формировании микролинз и микровыступов на поверхности стекла, важно знать закономерности формирования рельефа поверхности в результате локального плавления стекла. В числе параметров, определяющих движение расплава, важную роль играет температурный коэффициент поверхностного натяжения $\chi = d\sigma/dT$, где σ – поверхностное натяжение стекла, T – температура. Однако известные экспериментальные данные, касающиеся не только величины, но и знака χ для кварцевого стекла, противоречивы [1–3]. Ранее авторами [4] было обнаружено смещение расплава кварцевого стекла от периферии к центру пятна облучения с образованием там выступа после воздействия серии импульсов ТЕА CO₂-лазера при средней плотности мощности в пятне облучения $q \approx 3$ МВт/см². Такое поведение расплава может быть объяснено действием термокапиллярных сил в том случае, если $\chi > 0$ [5].

В данной работе исследованы закономерности формирования рельефа на поверхности кварцевого стекла под действием движущегося сфокусированного луча непрерывного CO₂-лазера при $q < 2 \times 10^4$ Вт/см² и скоростях движения пятна облучения, при которых не наблюдалось заметного испарения материала.

В экспериментах, проводившихся в атмосфере воздуха, использовались плоскопараллельные полированные пластины из кварцевого стекла марки КИ с толщинами 1,7 и 2,2 мм. Линейно-поляризованное излучение одномодового CO₂-лазера фокусировалось линзой из арсенида галлия с фокусным расстоянием 100 мм в пятно с диаметром $d_{1/10} = 150$ мкм на поверхности пластины. Излучение направлялось по нормали к поверхности пластины, расположенной горизонтально. Движение пятна облучения по

поверхности пластины осуществлялось по прямой линии с постоянной скоростью V в интервале от 0,25 до 40 мм/с. Ширина следа воздействия при скоростях, близких к максимальной, осциллировала вдоль направления сканирования, что может быть связано с имевшей место частичной модуляцией интенсивности лазерного излучения на частоте 100 Гц. Большинство экспериментов выполнено при ориентации вектора V параллельно плоскости колебаний вектора электрического поля E падающего излучения. После облучения запись профиля сформированного рельефа осуществлялась в плоскости, перпендикулярной к вектору V , с помощью профилометра фирмы “Taylor–Hobson” (чувствительность в направлении нормали к поверхности 1 нм, радиус кривизны острия зонда 0,1 мкм). На графиках зависимости высоты рельефа (H) от линейной координаты X вдоль поверхности пластины (рис. 1 и 2) левая и правая конечные точки графика показывают уровень поверхности кварцевого стекла до воздействия лазерного излучения.

На рис. 1 представлен типичный вид профиля рельефа, формирующегося при плотности мощности немного выше пороговой для плавления поверхности стекла при заданной скорости движения пятна облучения. При смещении плоскости записи рельефа вдоль направления вектора V на ± 2 мм профилограмма (рис. 1) рельефа, полученного при $V = 0,25$ мм/с и $q = 7,4$ кВт/см², практически не изменялась. Из рис. 1 следует, что при плавлении происходит перемещение расплава от периферии к центру зоны облучения, т. е. в область более высокой температуры, с образованием в центре выступа, который полностью не сглаживается силами поверхностного натяжения при быстром затвердевании. Такое перемещение расплава может происходить

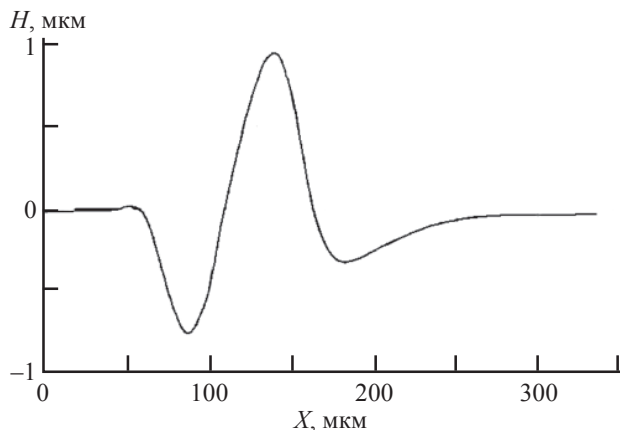


Рис. 1. Профиль остаточного рельефа поверхности кварцевого стекла после воздействия движущимся лучом лазера ($d = 150$ мкм, $q = 7,4$ кВт/см², $|V| = 0,25$ мм/с).

под действием термокапиллярных сил при $\chi > 0$, что в наших опытах представляется наиболее вероятным и согласуется со знаком χ из работы [2]. Некоторая асимметрия профиля рельефа может быть связана с несимметричным распределением плотности мощности в пятне облучения. Из численного рассмотрения графика (рис. 1) также следует, что

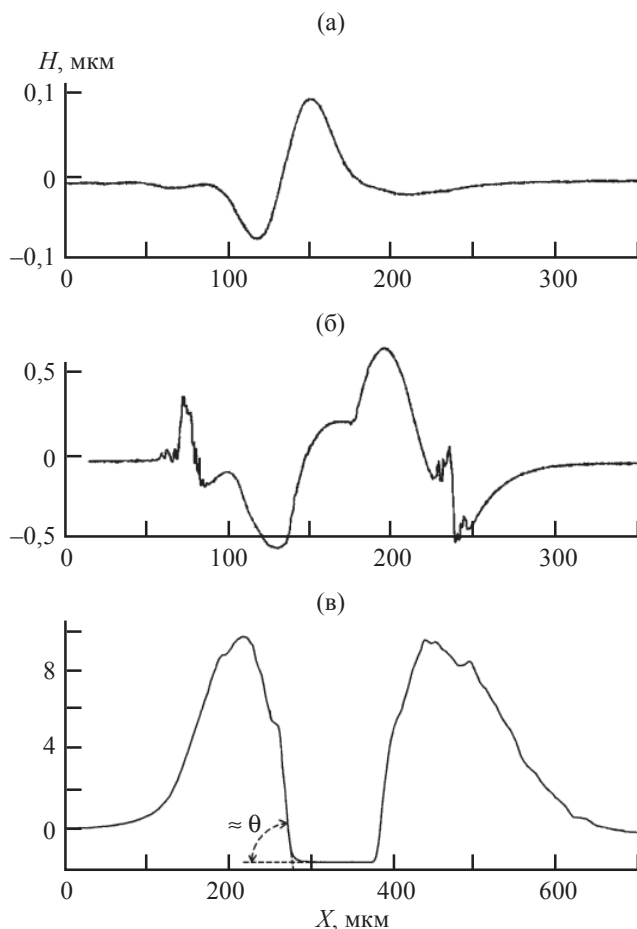


Рис. 2. Профили остаточных рельефов, сформированных на поверхности кварцевого стекла после воздействия движущимся лучом лазера при скоростях сканирования $|V| = 40$ (а), 25 (б) и 0,5 мм/с (в).

объем вытесненного выше плоской исходной поверхности материала на $\sim 15\%$ меньше объема пустот, образующихся под исходной поверхностью. Это означает, что в цикле плавление–затвердевание происходит небольшое уплотнение материала. Оценка, проведенная с учетом всего вовлеченного в процесс плавления материала, показывает, что плотность возрастает на $\sim 0,1\text{--}0,2\%$. Увеличение плотности связано с изменением структуры подвергнутого плавлению и быстрому охлаждению слоя стекла.

Отметим, что для видимого света зона выступа на рис. 1 ведет себя как рассеивающая цилиндрическая линза с фокусным расстоянием ~ 200 мкм. Это говорит об эффективном уменьшении показателя преломления в видимой области спектра, структурно измененного в результате плавления и неравновесного охлаждения слоя стекла с толщиной $\sim (ad/|V|)^{1/2}$, где a – температуропроводность кварцевого стекла, d – диаметр зоны облучения.

На рис. 2 представлены профилограммы рельефа, сформированного при трех различных скоростях движения пятна облучения и постоянном значении $q = 17$ кВт/см². Приведенный на рис. 2а профиль сформирован при $|V| = 40$ мм/с вблизи порога плавления и поэтому по внешнему виду подобен профилю рис. 1. Однако высота выступа на рис. 2а существенно меньше вследствие меньшего в 160 раз эффективного времени разогрева $\tau = d/|V|$ и, соответственно, меньшей достигаемой эффективной толщины расплава $\sim (a\tau)^{1/2}$.

Профиль рис. 2б получен при $|V| = 25$ мм/с, поэтому за счет увеличения τ (по сравнению со случаем $|V| = 40$ мм/с) в центре пятна облучения достигалась существенно большая максимальная температура. Изменение характера рельефа на рис. 2б по сравнению с рис. 2а может быть связано с тем, что с увеличением температуры величина χ в центральной области пятна облучения становится отрицательной ($\chi < 0$), тогда как на периферии остается справедливым $\chi > 0$. В результате под действием термокапиллярных сил возникают потоки расплава из центральной части пятна к периферии и в противоположном направлении. Конкуренция этих потоков приводит в результате к сложной форме образующегося рельефа.

На рис. 2в показан рельеф, формирующийся при скорости $|V| = 0,5$ мм/с, при которой достигается температура кипения T_b , о чем свидетельствуют наблюдавшееся слабое испарение при движении пятна облучения и образование множества микроскопических пузырьков в объеме поверхностного слоя стекла. Из-за эффективного рассеяния света на микропузырьках облученная область имеет белый цвет. За счет образования пузырьков объем материала, вытесненного выше уровня исходной поверхности, в ~ 20 раз превосходит объем пустот, образующихся ниже

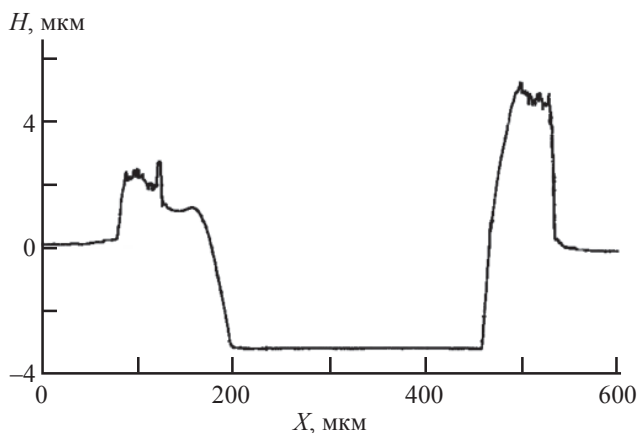


Рис. 3. Профиль остаточного рельефа поверхности кварцевого стекла после воздействия неподвижным лучом лазера в течение 2 с при $q \approx 40$ кВт/см² и угле падения излучения 45°. Профиль записан в плоскости падения излучения. Направление вектора силы тяжести совпадает с направлением излучения.

уровня исходной поверхности. Из рис. 2в видно, что рельеф сформировался за счет вытеснения расплава от центра пятна облучения к периферии, что также можно объяснить действием термокапиллярных сил, если $\chi < 0$ вблизи температуры кипения.

На рис. 2в также обращает на себя внимание почти строго горизонтальный участок профиля, расположенный ниже уровня исходной поверхности, который назовем дном профиля. Обнаружено, что такие практически плоские участки поверхности в центре следа воздействия устойчиво воспроизводятся при близких к температуре кипения максимальных температурах стекла T_m , достигаемых в процессе облучения. Установлено, что вне зависимости от угла падения лазерного излучения в интервале от 0° до 45° и угла между вектором силы тяжести и вектором нормали к поверхности образца в интервале от 0° до 90° дно профиля всегда практически параллельно исходной поверхности. Плоское дно профиля формируется также и при воздействии неподвижного луча лазера (рис. 3). Отметим, что плоское дно формируется при таких глубинах и времени существования расплава, когда поверхность расплава успевает принять равновесную форму под действием сил поверхностного натяжения. Поэтому причиной формирования плоской поверхности расплава вместо цилиндрического мениска в капилляре, образованном формирующимися при затвердевании расплава стенками канала, может быть самосогласованное выстраивание краевого угла θ между стенкой и поверхностью расплава таким образом, чтобы площадь поверхности расплава была минимальной. Для простоты рассмотрения будем полагать, что поверхность стенки канала не испытывает излома на линии соприкосновения трех фаз, что позволяет использовать понятие краевого угла

для капилляра. Можно показать, что минимальной по площади будет плоская поверхность расплава. При этом меньший угол между плоскостью поверхности расплава и касательной плоскостью к стенке канала (рис. 2в) будет близок к краевому углу θ между поверхностями твердой и жидкой фаз кварцевого стекла. В различных условиях экспериментов получено значение краевого угла θ от 9° до 16°, что соответствует хорошему смачиванию расплавом своей твердой фазы. Вместе с тем, описанное выше явление требует дальнейшего изучения.

При ориентации вектора $\mathbf{E}$ параллельно вектору $\mathbf{V}$ в некоторой области значений параметров q и $|\mathbf{V}|$ на профилограммах фиксировалось формирование локальных областей квазипериодического микрорельефа высотой до 0,1–0,2 мкм и с характерными периодами $d_1 \sim 7,5$ мкм и $d_2 \sim 3,7$ мкм (см., например, рис. 2б). Векторы решеток этих микроструктур ориентированы перпендикулярно к вектору $\mathbf{E}$. Такие периодические структуры могут возникать вследствие возбуждения волноводных мод (ВМ) ТЕ-типа и их интерференции с падающим излучением ($d_1 \approx \lambda/n_s$), а также интерференции друг с другом распространяющихся в противоположных направлениях ВМ и (или) интерференции первых пространственных гармоник волноводных мод с падающим излучением ($d_2 \approx \lambda/2n_s$) [6–8]. Здесь n_s – эффективный показатель преломления для ВМ. Возбуждение волноводных мод становится возможным, так как разогретый слой стекла вследствие перестройки структуры может обладать большим показателем преломления на длине волны излучения лазера, чем лежащие ниже слои стекла. Наличие пространственной модуляции интенсивности излучения, возникающей за счет интерференции, приводит к образованию пространственно-периодических температурных полей. Материальный механизм формирования мелкомасштабных структур, вероятно, также является термокапиллярным. Из экспериментально полученных значений периодов мелкомасштабных структур следует, что эффективный показатель преломления для волноводных мод $n_s \approx 1,4$. Периодические структуры, вероятнее, такой же физической природы, наблюдались в работах [9] (период порядка 4 мкм) и [10] (период 8,3 мкм; нет информации о марке использованного стекла).

Отметим, что обнаруженные нами экспериментально мелкомасштабные регулярные структуры микрорельефа в динамике должны иметь большие высоту и периодичность, но после окончания лазерного воздействия при затвердевании расплава сглаживаются силами поверхностного натяжения и искажаются вследствие продолжающегося некоторое время течения расплава.

Таким образом, в данной работе исследованы закономерности формирования крупно- и мелкомасш-

табных рельефов на поверхности кварцевого стекла под действием движущегося луча непрерывного CO₂-лазера. Предложен термокапиллярный механизм формирования рельефа, который качественно объясняет полученные экспериментальные результаты, если температурный коэффициент поверхностного натяжения стекла $\chi > 0$ вблизи температуры плавления и меняет знак при дальнейшем росте температуры.

Обнаруженный периодический микрорельеф поверхности кварцевого стекла интерпретирован как результат интерференции падающего излучения с волноводными модами ТЕ-типа, взаимной интерференции ВМ и интерференции первых пространственных гармоник ВМ с падающим излучением.

Обнаружено и интерпретировано явление формирования плоского и параллельного исходной поверхности стекла участка поверхности в центре следа воздействия лазерного излучения в таких режимах, когда глубина и время существования расплава достаточны, чтобы поверхность расплава успела прийти в равновесие под действием сил поверхностного натяжения.

Изученные особенности формирования рельефа могут найти применение для создания поверхностных микроканалов течения жидкости, микроструктурирования поверхностей кварцевых стекол с целью предотвращения прилипания гладких поверхностей, создания аподизирующих аттенуаторов лазерного излучения, создания растров микролинз, создания микронных и субмикронных зазоров между оптическими поверхностями, локального изменения показателя преломления кварцевого стекла и т. д.

Авторы выражают благодарность С.М. Чилипенко за проведение измерений профиля рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Леко В.К., Мазурин О.В.* Свойства кварцевого стекла. Л.: Наука, 1985. 166 с.
2. *Kingery W.D.* Surface tension of some liquid oxides and their temperature coefficient // *J. Am. Ceramic Soc.* 1959. V. 42. № 1. P. 6–10.
3. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Самсонова Г.В. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
4. *Макин В.С., Пестов Ю.И.* Образование решеток рельефа и показателя преломления на кварцевом стекле под действием излучения ТЕА CO₂-лазера // *Оптический журнал.* 2004. Т. 71. № 8. С. 41–46.
5. Физическая энциклопедия. Т. 2. М.: Большая российская энциклопедия, 1994. С. 240.
6. *Либенсон М.Н., Макин В.С., Трубаев В.В.* Лазерно-индуцированный рельеф гексагональной симметрии на поверхности <111> германия // *Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21. В. 4. С. 44–50.
7. *Макин В.С.* Интерференция пространственных гармоник поверхностных плазмон-поляритонов и формирование регулярного рельефа на поверхности полупроводника // Сб. тр. VI Междунар. конф. “Прикладная оптика”. СПб., 2004. Т. 2. С. 190–197.
8. *Силин Р.А.* Периодические волноводы // М.: Фазис, 2002. С. 57.
9. *Баженов В.В., Бонч-Бруевич А.М., Либенсон М.Н., Макин В.С.* Возникновение и упорядочение поверхностного рельефа при нагреве и оплавлении интенсивным светом // *Письма в ЖТФ.* 1987. Т. 13. В. 20. С. 1235–1239.
10. *Wu D.J., An C.W., Hong M.H., Wang W.J., Peng Y.Z., Lu Y.F.* Grating fabrication with CW CO₂ laser irradiation // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4915. P. 266–271.