

А. Ф. МУХАМЕДГАЛИЕВА, А. М. БОНДАРЬ, И. В. ВЕЛЕСЕВИЧ,
М. Г. ЗИЛЬБЕРШМИДТ, В. Б. ЛАПТЕВ, И. М. ШВЕДОВ

ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ СИЛИКАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА

Исследованы периодические структуры, возникающие на поверхности плавленного и кристаллического кварца, а также некоторых природных силикатов под действием импульсного СО₂-лазера с длительностью импульса 70 нм и энергией в импульсе 1 Дж. Особенности их образования исследованы с помощью оптических микроскопических и ИК спектроскопических методов. Длина периодов решеток на кристаллическом кварце примерно равна 7,3 мкм, на плавленном кварце — 8 мкм при частоте лазера 975 см⁻¹.

Ключевые слова: СО₂-лазер, плавленный кварц, кристаллический кварц, силикаты, периодические структуры, ИК-спектры отражения.

Введение. Проведенные рядом исследователей эксперименты показали, что воздействие СО₂-лазера на поверхность некоторых твердых тел приводит к образованию поверхностных периодических структур. Впервые такие структуры были получены авторами работы [1]. В последние годы было установлено, что многоимпульсное воздействие фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов на некоторые материалы также приводит к появлению одномерных квазипериодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны лазерного излучения [2].

В настоящей работе исследуются периодические структуры, возникающие на поверхности плавленного и кристаллического кварца, а также некоторых природных силикатов под действием наносекундных импульсов СО₂-лазера. Для уточнения физико-химического механизма образования этих структур привлекаются также данные проведенных ранее химических и люминесцентных исследований облученной поверхности силикатов [3].

Экспериментальные исследования. Особенностью воздействия излучения СО₂-лазера на силикаты является сильное поглощение его поверхностью силикатов. Это связано с резонансным взаимодействием излучения с валентными колебаниями атомов Si и O в силикатной матрице. Под действием сфокусированного излучения СО₂-лазера с плотностью мощности более 10⁵ Вт/см² возникает лазерный факел, а также происходит модификация облучаемой поверхности.

Ранее нами было установлено, что при воздействии излучения непрерывного СО₂-лазера на силикатные минералы и горные породы происходят селективная возгонка оксидов кремния с облученной поверхности и обогащение поверхности металлообразующими элементами [4, 5].

Исследование ИК-спектров поглощения и отражения облученных силикатов, проведенное ранее, позволило также обнаружить эффект выжигания провала в области частоты лазерного воздействия. Этот эффект, видимо, связан с разрывом прочных Si—O-связей, вызываемым резонансным лазерным воздействием на силикатную матрицу [6]. В настоящей работе изучается связь между процессом образования рельефа периодических структур и структурными изменениями, происходящими на поверхности при условии резонансного взаимодействия лазерного излучения с веществом.

В качестве объектов исследования использовались образцы кристаллического кварца, аморфного кварца, нефелина — $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$ и родонита — $\text{CaMn}_4[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$, облученные им-

пульсным CO₂-лазером с длительностью импульса 70 нс с энергией в импульсе 1 Дж. Эффективный диаметр лазерного пятна составлял 1,4 мм.

Излучение CO₂-лазера фокусировалось на поверхность образца в обычной воздушной среде. Под действием лазерного излучения на облучаемой поверхности возникает эрозионный факел. В области воздействия лазерного излучения происходит фотоиндуцированная модификация поверхности. После обработки в течение одного-двух часов были сняты ИК-спектры отражения облученных образцов и в течение суток была проведена микроскопическая съемка поверхности образцов, подвергшихся лазерному облучению.

CO₂-лазер функционировал в двух режимах — одномодовом с плотностью энергии 5,2 Дж/см² и многомодовом с 48 Дж/см², частота излучения — 975 и 1076 см⁻¹.

Экспериментальные результаты. С помощью микроскопического анализа облученной поверхности было установлено, что чистые периодические структуры образуются только при одномодовом режиме облучения, при многомодовом на поверхности образуется сложный рельеф, состоящий из квазипериодических структур и регулярно расположенных овальных углублений.

На рис. 1 представлено изображение области воздействия трех импульсов одномодового лазера (плотность энергии 5,2 Дж/см²) на поверхность кристаллического кварца с частотой 975 см⁻¹, аналогичные структуры образуются на кристаллическом кварце при облучении тремя импульсами одномодового лазера на частоте 1076 см⁻¹. На снимке присутствуют периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной волны падающего излучения. При облучении тремя импульсами многомодового лазера (плотность энергии 48 Дж/см²) снимки лазерных пятен демонстрируют более сложную квазипериодическую структуру, связанную с составом воздействующего лазерного излучения. На рис. 2 представлено лазерное пятно, облученное тремя импульсами многомодового лазера (плотность энергии 48 Дж/см²) на частоте 1076 см⁻¹.

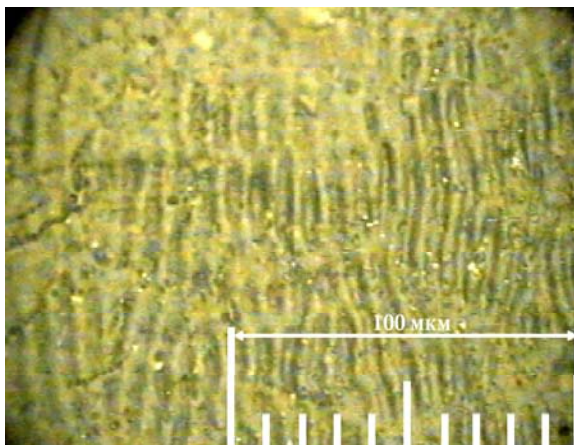


Рис. 1

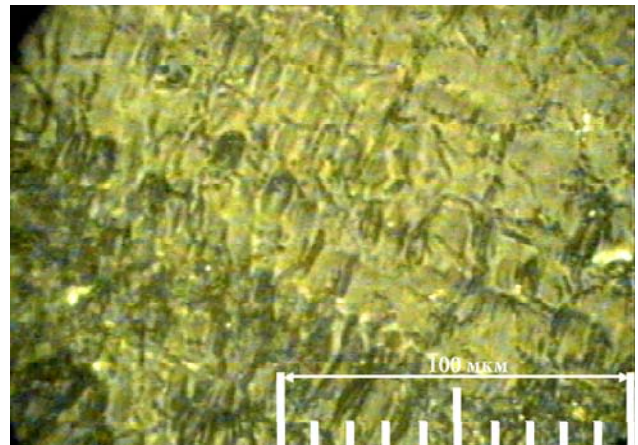


Рис. 2

Воздействие импульсного излучения одномодового лазера на плавленный кварц также приводит к образованию периодических структур, при этом возникают структуры двух типов — концентрические (относительно центра лазерного пятна) кольца, а также системы полос, интенсивность которых увеличивается в области совмещения двух соседних лазерных пятен. Повышение контраста периодических структур при увеличении числа лазерных импульсов (до шести) демонстрирует рис. 3, где приведен снимок области совмещения двух соседних лазерных пятен на плавленном кварце, частота излучения 975 см⁻¹, плотность энергии 5,2 Дж/см².

Были сняты ИК-спектры отражения образцов до и после лазерного облучения на двух указанных частотах лазера. Наибольшее изменение в спектрах отражения наблюдается при лазерном облучении с плотностью энергии 48 Дж/см² тремя импульсами на частоте 1076 см⁻¹.

Соответствующие спектры приведены на рис. 4 (I — интенсивность отраженного излучения, k — волновое число). Сравнение спектров облученного (2) и необлученного (1) образца показывает, что в спектре облученного происходит выжигание линии в районе частоты (отмечено стрелкой) лазерного воздействия, а также выжигание линии в районе 450 см^{-1} . В спектрах отражения образцов кварца, облученных при плотности энергии 48 Дж/см^2 тремя импульсами излучения на частоте 975 см^{-1} , такого заметного выжигания не наблюдается, хотя выжигание линии в районе 450 см^{-1} присутствует.

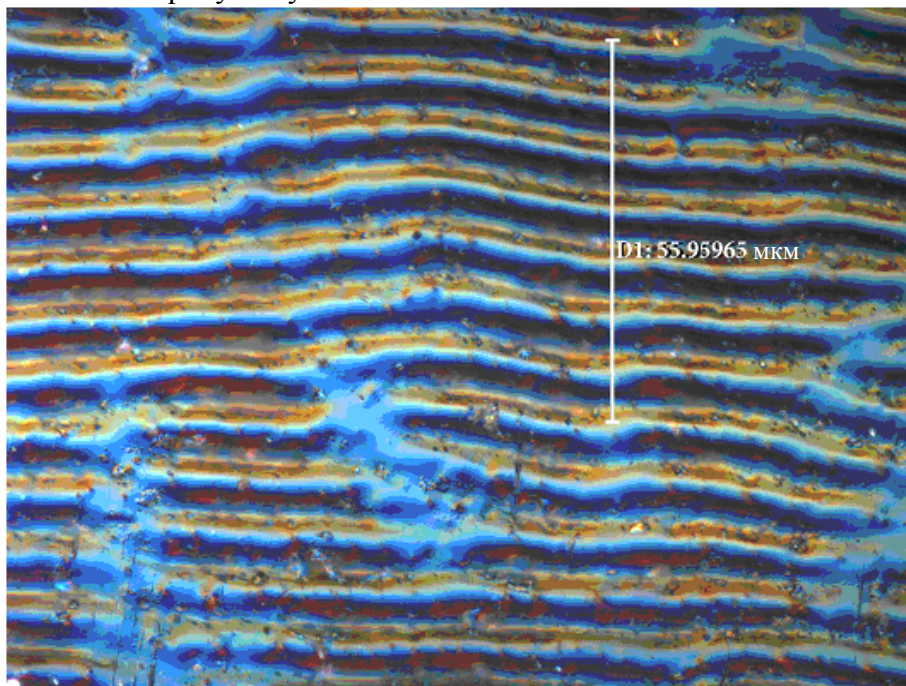


Рис. 3

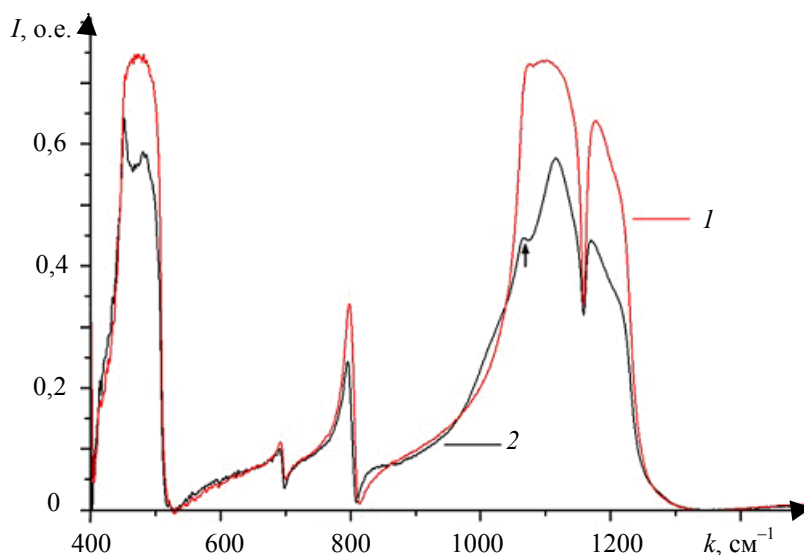


Рис. 4

Была измерена длина периодов структур: для кристаллического кварца, облученного лазером с частотой 975 см^{-1} — $7,3 \text{ мкм}$, 1076 см^{-1} — $7,1 \text{ мкм}$; для плавленого кварца, облученного лазером с частотой 975 см^{-1} — 8 мкм .

Обсуждение результатов. Возникновение периодических структур на поверхности силикатов при воздействии на них импульсного излучения CO_2 -лазера с длительностью импульса 70 нс позволяет сделать некоторые выводы.

Периодические структуры в силикатах возникают при интерференции падающей и поверхностной электромагнитных волн [7]. Скорость абляции максимальна в областях с наибольшей освещенностью. Из теории поверхностных электромагнитных волн следует, что период таких периодических структур Λ равен:

$$\Lambda = \lambda/n,$$

где λ — длина волны падающего лазерного излучения, n — показатель преломления облучаемого материала.

Полученные нами значения периодов структур в пределах точности измерений вписываются в данную модель, если учесть, что показатель преломления должен немного уменьшиться в результате структурных изменений, вызванных резонансным лазерным воздействием.

Зависимость глубины рельефа от числа лазерных импульсов свидетельствует об абляционном характере возникновения периодических структур. Это подтверждается и тем, что в спектрах отражения облученных образцов прослеживается такая зависимость изменений отражения. В этих спектрах наблюдается ступенчатое изменение интенсивности отражения в районе частоты лазерного воздействия при увеличении числа воздействующих импульсов [4].

Зависимость глубины рельефа от частоты лазерного воздействия свидетельствует о резонансном характере лазерного воздействия. ИК-спектры отражения образцов, облученных на двух частотах — 975 и 1076 см^{-1} , демонстрируют существенные различия. Как можно видеть на рис. 4, в спектре отражения кристаллического кварца, облученного на частоте 1076 см^{-1} (вблизи максимума линии поглощения кварца), происходит выжигание линии шириной примерно 20 см^{-1} на частоте лазерного воздействия. При частоте излучения 975 см^{-1} (на краю линии поглощения) такого заметного эффекта не наблюдается, хотя выжигание линии в районе частоты 450 см^{-1} тоже присутствует, следовательно, при облучении и на этой частоте происходит абляция материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что резонансное воздействие лазерного излучения на материалы в среднем ИК-диапазоне обеспечивает возникновение периодических структур при воздействии одного-трех импульсов наносекундной длительности при потоке энергии порядка 5,2 Дж/см². Интенсивная абляция связана с разрывом прочных ковалентных кремний-кислородных связей в области частоты лазерного воздействия, о чем свидетельствуют ИК-спектры облученных образцов.

Заключение. Результаты проведенных исследований воздействия импульсного излучения CO₂-лазера на силикаты позволяют сделать вывод, что в условиях одномодового режима при потоке энергии порядка 5,2 Дж/см² и при воздействии нескольких импульсов с длительностью 70 нм на поверхности силикатных минералов образуются периодические структуры, зависящие от частоты воздействующего лазерного излучения.

Полученные структуры могут найти применение в микро- и оптоэлектронике, при изготовлении дифракционных решеток, фильтров, сенсоров и в других областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegrist M., Kaech G., Kneubuhl F. H. Formation of periodic wave on the structure of solid by TEA-CO₂ laser pulses // Appl. Phys. 1973. Vol. 2. P. 45—46.
2. Голосов Е. В., Емельянов В. И., Ионин А. А., Колобов Ю. Р., Кудряшов С. И., Лигачев А. Е., Новоселов Ю. Н., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Фемтосекундная лазерная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана // Письма в ЖЭТФ. Т. 90, вып. 2. С. 116—120.
3. Бондарь А. М., Мухамедгалиева А. Ф., Шведов И. М. Фотовосстановительные процессы и формирование нанокластеров на поверхности силикатов, индуцированные излучением CO₂ лазера // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. С. 474—479.
4. Bondar A. M., Mukhamedgalieva A. F. Photochemical induced burning of a spectral line in infrared reflection spectra of silicates // J. Russian Laser Res. NY: Plenum press, 1996. Vol. 17. P. 534—538.

5. Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М. Лазерно-стимулированные реакции на поверхности кварца и некоторых минералов // Поверхность, физика, химия, механика. 1983. № 5. С. 125—129.
6. Mikhamedgalieva A. F. and Bondar A. M. Laser-induced selective sublimation from silicates // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2118. N 33. P. 224—226.
7. Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Г., Яковлев Е. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит, 2008. 312 с.

Сведения об авторах

- Анель Фазуловна Мухамедгалиева** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Московский государственный горный университет, кафедра физики; E-mail: anel-mggg@mail.ru
- Анатолий Михайлович Бондарь** — канд. физ.-мат. наук; Московский государственный горный университет; E-mail: bam-imet@mail.ru
- Владимир Борисович Лаптев** — канд. физ.-мат. наук; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Московская область; старший научный сотрудник; E-mail: laptev@isan.troitsk.ru
- Михаил Григорьевич Зильбершмидт** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный горный университет, кафедра физики горных пород
- Ирина Васильевна Велесевич** — Московский государственный горный университет; старший научный сотрудник
- Игорь Михайлович Шведов** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный горный университет, кафедра физики горных пород; E-mail: svirell@mail.ru

Рекомендована
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию
08.09.10 г.