

Трансформация структуры кварца под влиянием ударной волны

© В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 4 июня 2015 г.)

С использованием метода инфракрасной Фурье-спектроскопии исследовано строение осколка, образовавшегося после разрушения монокристалла кварца под действием ударной волны. Волна инициирована электрическим пробоем воздуха в отверстии внутри монокристалла. Установлено, что на поверхности осколка образовался слой толщиной $\sim 0.15 \mu\text{m}$, состоящий из „диаплектического стекла“ — кварца с сильно искаженной кристаллической решеткой. Под ним располагается слой толщиной $\sim 2 \mu\text{m}$, в котором кристаллическая решетка кварца сжата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00011-а).

1. Введение

В настоящее время большие успехи достигнуты в области кинетики деформации твердых тел под действием ударных волн [1–7]. Начато построение теоретической модели разрушения при ударно-волновом нагружении [8]. Первые экспериментальные данные о механизме разрушения диэлектриков были получены [9–11] благодаря созданию установок, регистрирующих динамику люминесценции с наносекундным разрешением. Установлено, что под действием ударной волны из диэлектриков вылетают пучки положительно заряженных ионов и электронов. Одновременно они разрушаются на осколки с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

Настоящая работа продолжает цикл этих исследований. В ней изучается строение одного из указанных осколков.

2. Объект и метод исследования

Образец представлял собой параллелепипед, выпиленный алмазной пилой из монокристалла кварца. Он имел размеры $10 \times 10 \times 20 \text{ mm}$. Его помещали в емкость в виде открытого с одной стороны куба. Блок-схема установки описана в [9]. В центре образца просверлено отверстие диаметром $\sim 1 \text{ mm}$, где располагались медные электроды, расстояние между которыми составляло $\sim 4 \text{ mm}$. Конденсатор емкостью $40 \mu\text{F}$ заряжали до 2 kV . При разряде между двумя медными проводниками образовалась плазма [10], состоящая из микрочастиц и атомов Cu . Она вызывала появление ударной волны в образце кварца, которая распространялась со скоростью $\sim 6 \text{ km/s}$ [11]. Под действием волны через $\sim 1 \mu\text{s}$ из образца начинала вылетать струя плазмы, состоящей из положительно заряженных ионов кремния, кислорода и электронов. Механизм ее образования описан

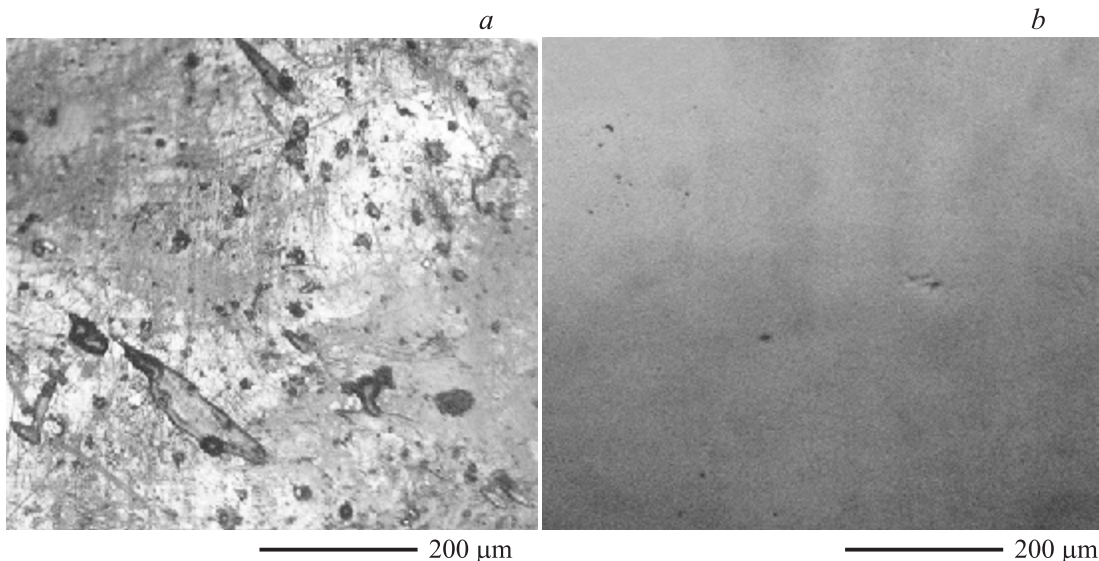


Рис. 1. Поверхности образца со стороны электрического разряда (а) и с обратной стороны (б).

в [12]. Одновременно образец распадался на осколки с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров [9].

Для исследования строения осколков использовался метод инфракрасной (ИК) спектроскопии. ИК-спектры отражения записывались с помощью Фурье-спектрометра IR-21 „Prestige“. Для записи спектров использовалась приставка SRM-8000A. Угол падения луча на образец составлял 10° .

3. Результаты измерений и их обсуждение

Для исследования был выбран осколок, имеющий вид пластинки с неровными краями размером $\sim 3 \times 5$ мм с толщиной ~ 1 мм. На рис. 1 показаны фотографии поверхностей. Одна поверхность неровная, покрыта множеством вмятин и „воронков“ с поперечными размерами от нескольких микрометров до $\sim 100 \mu\text{m}$, которые, по-видимому, образовались при бомбардировке поверхности образца после его откола более мелкими частицами кварца. Она располагалась с той стороны, где произошел разряд. Другая поверхность, расположенная с противоположной стороны, была гладкой и носила следы распила алмазной пилой.

На рис. 2 показаны спектры отражения от этих поверхностей. Для сравнения на этом же рисунке приведены спектры плавленого и монокристаллического кварца.

Напомним, что амплитуда электрического вектора света, падающего на поверхность поглощающего образца, затухает экспоненциально вглубь от поверхности [13]. Эффективная толщина поверхностного слоя, информацию о строении которого дает спектр отражения, задана глубиной h , на которой амплитуда электрического вектора света уменьшается в $e \sim 2.7$ раз (e — основание натуральных логарифмов), а интенсивность света — в $e^2 \sim 8$ раз. Для кварца в области $1060\text{--}1080 \text{ cm}^{-1}$ $h \sim 0.15 \mu\text{m}$, а в области $780\text{--}830 \text{ cm}^{-1}$ $h \sim 2 \mu\text{m}$ [14].

Из рис. 2, *a* видно, что спектр, полученный от поверхности образца со стороны, обратной электрическому разряду, практически полностью совпал со спектром монокристалла кварца. Из этого следует, что поверхностные слои образца с этой стороны состоят из кварца, кристаллическая решетка которого практически не изменилась.

Иное строение имеет поверхность со стороны электрического разряда (рис. 2, *b*).

Так, в спектре слоя толщиной $0.15 \mu\text{m}$ наблюдается максимум 1116 cm^{-1} . Его форма напоминает форму полосы для плавленого кварца, но его частота больше, а ширина меньше. На высокочастотном крыле полосы наблюдается слабо выраженный излом, частота которого совпадает с частотой минимума в спектре монокристалла кварца — 1160 cm^{-1} . Эти особенности спектра показывают [15], что рассматриваемый слой состоит из „диалектического стекла“ — кварца с чрезвычайно

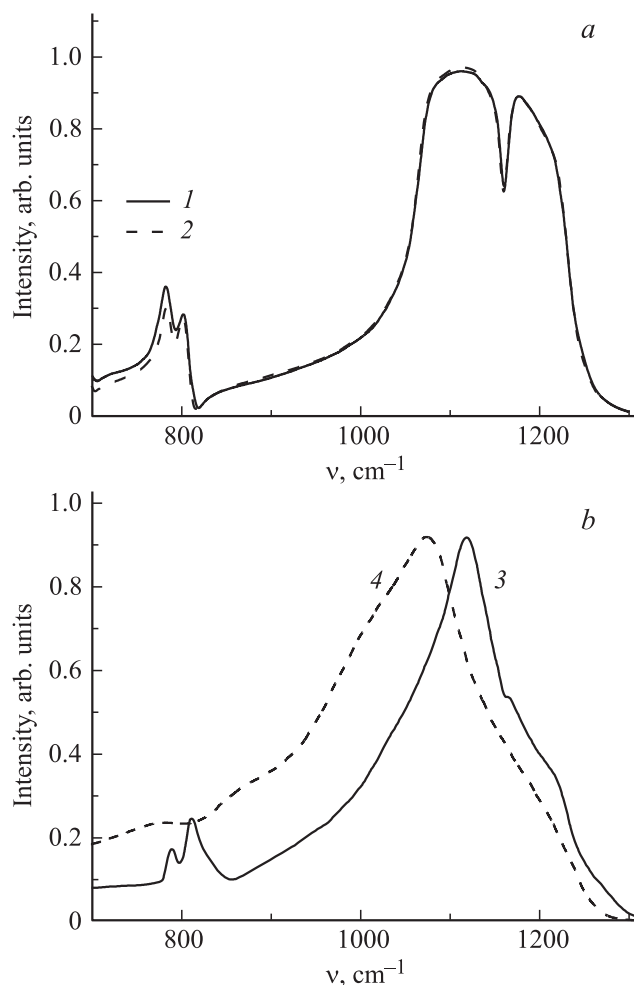


Рис. 2. Спектры отражения ИК-излучения от поверхности образца со стороны, обратной к месту электрического разряда (1) и со стороны электрического разряда (3). Для сравнения приведены спектры монокристалла кварца (2) и плавленого кварца (4). Для удобства рассмотрения спектры нормированы на одну и ту же величину интенсивности в максимуме.

сильно искаженной кристаллической решеткой. Такие диалектические стекла неоднократно наблюдались в земных породах после удара метеоритов [16–20]. Сравнение полученных спектров со спектрами, приведенными в работе [15], позволяет сделать вывод, что давление в ударной волне достигало 26–30 ГПа.

В спектре слоя, эффективная толщина которого составляет $\sim 2 \mu\text{m}$, наблюдается два максимума 789 и 812 cm^{-1} , приписанные колебаниям кристаллической решетки кварца [21,22]. Оба максимума смещены в сторону высоких частот относительно положения этих же максимумов в спектре исходного образца монокристаллического кварца (782 и 802 cm^{-1}) на $\Delta\nu \approx 7\text{--}9 \text{ cm}^{-1}$. Смещение частоты $\Delta\nu$ вызвано остаточной деформацией ϵ кристаллической решетки после откола образца [23]: $\Delta\nu = -G\nu_0\epsilon$ (G — параметр Грюнайзена, а ν_0 — частота колебаний недеформированной кристаллической решетки).

ки). Наблюдаемое смещение означает, что кристаллическая решетка кварца в этом слое сжата на величину $\varepsilon = \Delta\nu/(G\nu_0) \approx 0.2\%$ (среднее значение G для частот 782 и 802 cm^{-1} составляет ~ 5 [24]). Гидростатическое давление P_g , которое могло бы вызвать такую деформацию, составляет $P_g = K\varepsilon \approx 80 \text{ МПа}$ (модуль упругости кварца $\sim 38 \text{ ГПа}$ [25]).

Приведенные данные показывают, что под действием ударной волны в поверхностном слое кварца в слое толщиной $\sim 0.15 \mu\text{m}$ дальний порядок в кристаллах кварца нарушается и на их месте образуется диаплектическое стекло. В слое толщиной $\sim 2 \mu\text{m}$ кристаллическая решетка кварца сжата на 0.15%. На расстоянии $\sim 1 \text{ mm}$ от поверхности (обратная сторона осколка кварца) кристаллическая решетка не нарушена. По-видимому, вся энергия ударной волны ушла на образование диаплектического стекла.

4. Заключение

Под влиянием ударной волны на поверхности осколка кварца образуется слой из диаплектического стекла толщиной $\sim 0.15 \mu\text{m}$. Под ним располагается слой толщиной $\sim 2 \mu\text{m}$, в котором кристаллическая решетка кварца сжата.

Список литературы

- [1] R.W. Armstrong, S.M. Walley. *Int. Mater. Rev.* **53**, 105 (2008).
- [2] В.В. Адушкин, А.А. Спивак. *Геомеханика крупномасштабных взрывов*. Недра, М. (1993). 319 с.
- [2] В.Е. Фортов. *УФН* **177**, 348 (2007).
- [4] Г.И. Канель, В.Е. Фортов, С.В. Разоренов. *УФН* **177**, 809 (2007).
- [5] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter*. Springer, N.Y. (2004) 322 p.
- [6] H.I.P. Galvez. *Miner. Eng.* **24**, 1638 (2011).
- [7] Г.А. Малыгин, С.Л. Огарков, А.В. Андрияш. *ФТТ* **55**, 721 (2013).
- [8] Г.А. Малыгин, С.Л. Огарков, А.В. Андрияш. *ФТТ* **57**, 1772 (2015).
- [9] В.И. Веттегрень, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* **56**, 315 (2014).
- [10] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков. *ЖТФ* **69**, 2, 137 (1999).
- [11] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, А.В. Воронин, В. С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. *ФТТ* **56**, 981 (2014).
- [12] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, В. С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. *ФТТ* **56**, 1767 (2014).
- [13] M. Born, E. Wolf. *Principles of optics*. 2nd ed. Pergamon press, Oxford (1964). 856 p.
- [14] В.И. Веттегрень, Р.И. Мамалимов, Г.А. Соболев. *ФТТ* **55**, 1987 (2013).
- [15] H. Schneider. *Meteoritics* **13**, 2, 227 (1978).
- [16] F. Langenhorst. *Bull. Czech Geolog. Survey* **77**, 265 (2002).
- [17] M. Chen, C. Koeberl, W. Xiao, X. Xie, D. Tan. *Meteoritics Planetary Sci.* **46**, 5, 729 (2011).
- [18] J. Wackerle. *J. Appl. Phys.* **33**, 922 (1962).
- [19] M.G.C. Vernooij, F. Langenhorst. *Meteoritics Planetary Sci.* **40**, 9/10, 1353 (2005).
- [20] O. Goltrant, H. Leroux, J-C. Doukhan, P. Cordier. *Phys. Earth Planetary Interiors* **74**, 3-4, 219 (1992).
- [21] J. Etchepare, M. Merian, L. Smetankine. *J. Chem. Phys.* **60**, 1873 (1974).
- [22] K. Iishi, H. Yamaguchi. *Am. Miner.* **60**, 907 (1975).
- [23] O. Madelung. *Festkörpertheorie*. Springer, Berlin (1972). 416 p.
- [24] Q. Williams, R.J. Hemley, M.B. Kruger, R. Jeanloz. *J. Geophys. Res.* **98**, 22 157 (1993).
- [25] D.L. Lakshtanov, S.V. Sinogeikin, J.D. Bass. *Phys. Chem. Miner.* **34**, 11 (2007).