

Люминесценция кварца под действием ударной волны

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

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

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

(Поступила в Редакцию 27 июня 2013 г.)

При разрушении кварца под действием ударной волны, вызванной электрическим взрывом, образуется плазменная струя. Анализ спектра люминесценции показал, что она состоит из атомов и катионов элементов, которые входят в состав кварца и примесей в нем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-05-00011-а.

1. Введение

В последнее время возрос интерес к исследованию механизма разрушения и деформации твердых тел под влиянием мощных ударных волн при взрыве [1–6]. Их скорость превышает скорость звука, а значит, и скорость разрушения и деформации. По этой причине исследование процесса разрушения твердых тел встречается с большими экспериментальными сложностями [2,3,5,6].

В настоящей работе для исследования разрушения кварца мы использовали метод механолюминесценции. Этот метод позволил зарегистрировать свободные радикалы SiO^* , образующиеся в кварце на берегах микротрещин, после разрыва SiOSi связей при ударе, трении и размоле [7–12].

В настоящей работе получен и проанализирован спектр люминесценции плазмы, вылетающей из кварца под действием ударной волны, вызванной электрическим взрывом внутри образца.

2. Объект и метод исследования

На рис. 1 представлена блок-схема установки. Образец монокристаллического кварца (4) размером

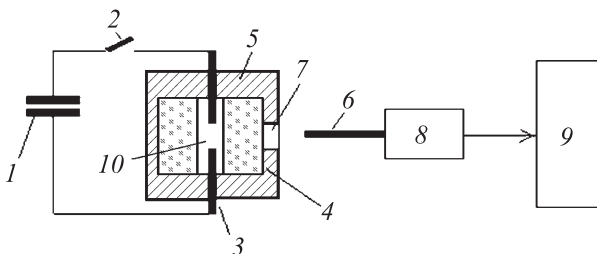


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования спектров кварца при электрическом взрыве: 1 — конденсатор, 2 — электронная схема запуска, 3 — электроды между которыми происходит электрический взрыв, 4 — кристалл кварца, 5 — камера, 6 — кварцевый световод, 7 — окно в камере для вывода светового излучения, 8 — спектрометр AvaSpec-ULS3648, 9 — персональный компьютер, 10 — отверстие в кристалле кварца.



Рис. 2. Фотография плазмы, выделяющейся в момент разрушения кристалла кварца.

$10 \times 10 \times 20 \text{ mm}$ располагался в медной камере (5). В центре образца просверлено отверстие (10) диаметром $\sim 1 \text{ mm}$, где располагались медные электроды (3), расстояние между которыми 4 mm . Конденсатор (1) емкостью $40 \mu\text{F}$ был заряжен до 2 kV , что соответствует запасенной энергии 80 J . С помощью электронной схемы запуска (2) он разряжался, что приводило к электрическому разряду между электродами. Подводимая мощность к месту разряда (3) составляет $8 \times 10^6 \text{ W}$.

При разряде конденсатора из окна (7) вылетала струя плазмы (рис. 2). Ее длина достигала $\sim 0.8 \text{ m}$.

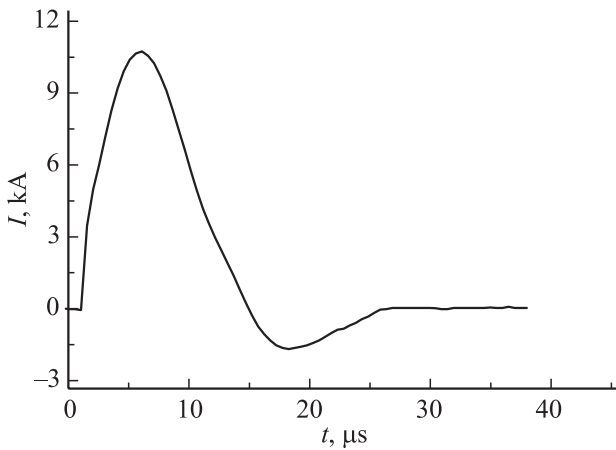


Рис. 3. Ток разряда при электрическом взрыве.

Чтобы оценить время жизни струи, обратимся к рис. 3, на котором изображена временная зависимость силы тока I разряда. В момент возникновения разряда сила тока начинает резко увеличиваться, через $5 \mu\text{s}$ достигает максимального значения, а через $15 \mu\text{s}$ становится равной нулю. В дальнейшем перезарядка конденсатора изменяет направление тока, и еще через $\sim 11 \mu\text{s}$ сила тока становится равной нулю. Для оценки времени жизни плазменной струи измеряли полуширину (ширину на половине высоты) максимума на временной зависимости силы тока. Она оказалась равной $8 \mu\text{s}$.

Излучение плазмы попадало на вход кварцевого световода (6), расположенного на расстоянии $\sim 1 \text{ m}$ от окна. Второй конец световода располагался перед входным окном спектрометра AvaSpec-ULS3648 (8). Измерительный модуль спектрофотометра построен на базе платформы AvaBench-75 с симметричной оптической скамьей Czerny-Turner и 3648 элементной CDD детекторной матрицей [13]. Динамический диапазон элементов детекторной матрицы (соотношение сигнал/шум) $\sim 50 \text{ dB}$. Запись спектра проводилась с помощью считывающего устройства с вводом сигнала в персональный компьютер (9). Детектор спектрофотометра обладал покрытием, усиливающим чувствительность матрицы в ультрафиолетовом диапазоне. Коллекторные линзы детектора дополнительно увеличивали чувствительность измерений. Это позволяло проводить измерения возникающего излучения в спектральном диапазоне $200\text{--}1100 \text{ nm}$ с разрешением 0.25 nm .

3. Результаты измерений и их обсуждение

При электрическом разряде в промежутке между двумя медными проводниками образуется плазма [14], состоящая из микрочастиц и атомов Cu . Она вызывает появление в кварце ударной волны. По скорости нарастания переднего фронта тока разряда (рис. 3) в

начальный период времени (в течение $\approx 0.5 \mu\text{s}$) и расстояния между электродами (4 mm) оценили начальную скорость нагружения образца $\approx 8 \text{ km/s}$. Это значение приблизительно в 1.5 раза больше скорости продольной ($\approx 5.7 \text{ km/s}$) звуковой волны [15] в кварце. Таким образом, скорость ударной волны действительно превосходит скорость звука в кварце.

После разрушения в камере оставались фрагменты кристалла кварца с размерами от нескольких μm до нескольких mm . Для примера на рис. 4 показана фотография осколков, оставшихся после взрыва в камере.

Спектр люминесценции плазменной струи показан на рис. 5. Он состоит из множества наложенных друг на друга узких полос. Их ширина (на половине высоты) составляет $\approx 0.5\text{--}1 \text{ nm}$. Такую ширину обычно имеют полосы, соответствующие излучению возбужденных атомов и ионов. Воспользовавшись таблицами спектральных линий [16] установили, что полосы можно приписать излучению атомов Fe (7664, 6476, 5856, 5688, 5349, 5236, 5216, 5595, 5166, 4454, 4096, 4056, 3963,

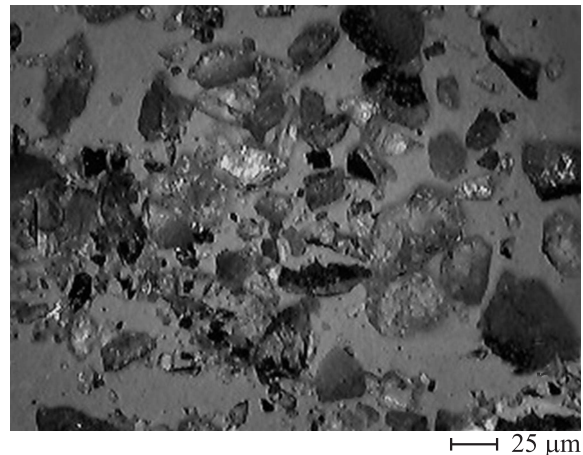


Рис. 4. Фотография продуктов разрушения кварца.

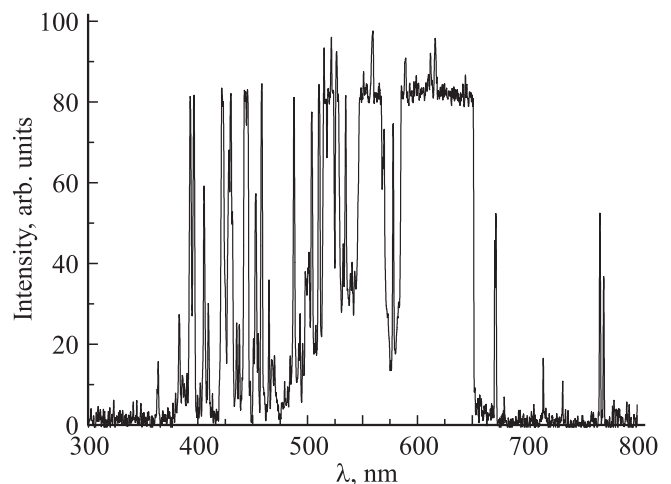


Рис. 5. Спектр излучения плазмы.

3830 и 3640 Å), Li (6707, 6103 Å), Na (5896, 5890, 6154 и 6161 Å), Cu (6508 Å), Ti (5780, 4526, 4437 и 4427 Å), P (4877 Å), O (6158 Å), а также ионов Al⁺ (5320 Å), Al²⁺ (5696 Å), Fe⁺ (5282 Å), Cu⁺ (5103, 5013, 4956 и 4933 Å), N⁺ (6438, 3830 Å), N⁺⁺ (5686 Å), Si⁺⁺ (5670, 5186 Å), O⁺⁺ (4698, 4676, 4377, 4097 Å) и Ti⁺ (5263 Å). В области 6510–5850 Å располагается широкая, бесструктурная полоса, в которой расположены более 80 сильно наложенных друг на друга полос, соответствующих излучению атомов Fe, Ti, Al, Cu, O, Na и Li. В эту же область попадает широкая полоса излучения ионов SiO* (длина волны максимума ~ 600 nm), которые образуются при разрывах SiOSi связей в кварце [7–12]. Однако этот максимум практически невозможно выделить на фоне излучения упомянутых, сильно наложенных полос. По-видимому, это обусловлено тем, что под действием ударной волны кристалл кварца, как уже упоминалось, распадается на фрагменты, линейный размер которых составляет несколько мкм и больше. Эти фрагменты остаются внутри взрывной камеры и практически не входят в состав струи плазмы.

Как же образовались атомы и ионы, которые наблюдаются в спектрах плазмы, выделяющейся из кварца при взрыве?

Атомы и ионы Cu, вероятно, вылетели из медных электродов и стенок медной камеры. Атомы Si и O входят в состав кварца, а ионы азота образовались при возбуждении атомов азота воздуха электронами струи.

Чтобы объяснить появление других атомов и ионов мы обратились к описанным в литературе результатам измерений примесей, существующих в кварце. Известно, что кристаллы кварца содержат примесные катионы, концентрация которых достигает $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [17]. Они обнаруживаются методами электронного парамагнитного резонанса [17–19], термолюминесценции [20] и катодоллюминесценции [17].

Катионы примесей заменяют ионы Si⁴⁺ в кристаллической решетке кварца. Больше всего содержится Al³⁺, т.к. его ионный радиус 5.1 Å близок к ионному радиусу Si⁴⁺ 0.42 Å. При внедрении Al³⁺ образуется центр [Al₄]⁰ с тремя ионами O²⁻ и одним O¹⁻ [21]. Отрицательный заряд последнего иона компенсируется за счет внедрения в решетку положительно заряженных атомов H⁺, Li⁺, Na⁺, K⁺, Cu⁺ или Ag⁺ [17]. Кроме Al³⁺ в кристаллической решетке содержатся также ионы Fe³⁺ и Ti⁴⁺, ионный радиус которых 0.64 Å, и P⁵⁺, чей ионный радиус меньше 0.35 Å. Различие ионных радиусов Si⁴⁺ и замещающих его ионов обуславливает появление локальных напряжений в решетке кварца. Такие напряжения, по-видимому, способствуют зарождению микротрещин под влиянием ударной волны. При образовании трещин примесные катионы, расположенные вблизи от их поверхностей, вылетают из образца в виде плазмы.

За время существования плазмы они сталкиваются с электронами [22]. В результате заряд ионов уменьшается, и образуются нейтральные атомы. Релаксация

возбуждения атомов и ионов в плазме приводит к люминесценции, наблюдаемой на опыте.

Заключение

Воздействие ударной волны на решетку кварца приводит к его разрушению и образованию плазменной струи, которая состоит в основном из атомов и катионов элементов, которые входят в состав кварца в качестве примесей.

Список литературы

- [1] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Наука, М. (1966). 688 с.
- [2] В.В. Адушкин, А.А. Спивак. Геомеханика крупномасштабных взрывов. Недра, М. (1993). 319 с.
- [3] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter. Springer, N.Y. (2004). 322 p.
- [4] В.Е. Фортов. УФН. **177**, 348 (2007).
- [5] Г.И. Канель, В.Е. Фортов, С.В. Разоренов УФН **177**, 809 (2007).
- [6] H.I.P. Galvez. Minerals Eng. **24**, 1638 (2011).
- [7] G.N. Chapman, A.J. Walton. J. Appl. Phys. **54**, 5961 (1983).
- [8] А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович, И.Ю. Бутягин. Изв. АН СССР **50**, 477 (1986).
- [9] Y. Kawaguchi. Phys. Rev. B **52**, 9224 (1995).
- [10] Y. Kawaguchi. Phys. Rev. B **54**, 9721 (1996).
- [11] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарёв, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. ФТТ **50**, 29. (2008).
- [12] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ЖТФ **81**, 148 (2011).
- [13] A.V. Voronin, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, E.E. Mukhin, S.Yu. Tolstyakov, G.S. Kurskiev, M.M. Kochergin, K.G. Hellblom. Nukleonika **53**, 103 (2008).
- [14] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков. ЖТФ. **69**, 137 (1999).
- [15] А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова. Акустические кристаллы. Справочник. / Под ред. М.П. Шоскальской. Наука, М. (1982). 632 с.
- [16] А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, Е.Я. Шрейдер. Таблицы спектральных линий. Физматгиз, М. (1952). 608 с.
- [17] J. Goetze, M. Ploetze, D. Habermann. Mineral. Petrol. **71**, 225 (2001).
- [18] J. Goetze, M. Ploetze. Eur. J. Mineral. **9**, 529 (1997).
- [19] J.A. Weil. In: Physics and chemistry of SiC > 2 and the Si–SiC > 2 interface / Eds C.R. Helms, B.E. Deal. Plenum Press, N.Y. (1993). P. 131.
- [20] A.S. Marfunin. Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals. Springer, Berlin. (1979). 352 p.
- [21] M. Martinia, M. Fasolia, A. Galli. Radiat. Meas. **44**, 458 (2009).
- [22] И.А. Семиохин. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. МГУ, М. (1988). 142 с.