

## ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ $\text{NH}_4\text{Cl}$ И $\text{NaCl}$

*М. Ф. Гоголя, М. А. Бражников*

Исследовалось излучение кристаллических и поликристаллических образцов  $\text{NaCl}$  при ударном сжатии до 28.5 ГПа, а также излучение ударно-сжатых поликристаллических образцов  $\text{NH}_4\text{Cl}$  в диапазоне давлений 2.2—53.5 ГПа. Установлено, что излучение данных объектов в исследуемом диапазоне давлений носит люминесцентный характер, мощность которого существенно зависит от того, в какой форме находится вещество — гомогенной (монокристалл) или гетерогенной (поликристалл).

В процессе экспериментального исследования излучения ионных кристаллов ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CsBr}$ ,  $\text{LiF}$  и др.) от давления при ударном сжатии [1, 2] было обнаружено, что в определенных диапазонах давления регистрируемые световые потоки значительно превосходят ожидаемые световые потоки, вызванные тепловым разогревом вещества в ударной волне. Этот эффект наблюдается, в частности, для  $\text{NaCl}$  до давлений в 45 ГПа [1, 2]. Оказалось, что регистрируемое излучение не является тепловым. Для сравнения интенсивности световых потоков и определения истинной температуры объекта исследования часто используют величину яркостной температуры, которая находится для равновесного и теплового излучения, подчиняющегося законам Планка и Кирхгофа (в дальнейшем, если другое не оговорено, мы под экспериментальной температурой будем понимать яркостную). Нетепловое излучение также можно характеризовать яркостной температурой, но при этом это понятие носит условный характер, являясь только мерой интенсивности потока.

Существенной стороной рассматриваемого нетеплового излучения ионных кристаллов является то, что эти вещества считаются прозрачными или частично прозрачными при ударном сжатии до определенных давлений [3, 4]. Последнее при тепловом характере излучения привело бы к характерному росту регистрируемого излучения (типа  $J=J_0 [1-\exp(-\alpha x)]$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения ударно-сжатого слоя,  $x$  — толщина слоя) [4, 5]. Для люминесцирующих систем может наблюдаться иной характер нарастания [6, 7]. В тех же диапазонах давления, где наблюдается люминесцентное излучение и вещество остается прозрачным, электрическая проводимость оказывается низкой, она растет в тех областях давлений, где нетепловой характер излучения сменяется тепловым [4, 8].

Более поздние работы показали наличие нетеплового характера излучения и в других системах, таких как плавленный кварц [6], ниобат лития [7], различные минералы [9–11]. В [6, 7] рассмотрены возможные механизмы люминесценции и вероятность их осуществления. Авторы пришли к следующим выводам: во-первых, механизм испускания света связан с механическим пределом прочности; во-вторых, излучение пространственно неоднородно при давлениях ниже предела прочности, а с превышением его быстро становится однородным; в-третьих, излучаемая энергия коррелирует с энергией, диссипированной в ударной волне, но при этом доля, приходящаяся на излучение, мала; в-четвертых, спектр излучения носит скорее полосатый характер, чем сплошной серый (это утверждение расходится с определением люминесцентного спектра

в [1, 2]). Отметим, что в [6, 11] для NaCl, плавленного окварца и др. было установлено, что полученный спектр может быть определен как суперпозиция полосатого со сплошным; видимо, это говорит о суперпозиции теплового и нетеплового излучений. При увеличении давления тепловая составляющая начинает превалировать.

Во всех приведенных работах испускаемое излучение в той или иной форме связывалось с «разрушительным» действием ударной волны, т. е. производимыми ею микроразрушениями кристаллов, с механическими напряжениями, с созданием структуры, высоконасыщенной дефектами, но при этом влияние изменения дефектности исходной системы (а значит, и механического предела прочности) на уровень люминесцентного излучения при ударном нагружении не исследовалось, что и явилось одной из побудительных причин для проведения данной работы.

В качестве систем, которые имеют низкое значение механического предела прочности и сильно дефектную структуру, были взяты поликристаллические образцы NaCl и NH<sub>4</sub>Cl. Для прямого сравнения уровней излучения использовались кристаллы NaCl.

Исследуемые образцы высотой около 3 мм и диаметром 40 мм изготовлялись методом холодного прессования из химически чистых NaCl и NH<sub>4</sub>Cl, взятых в виде тонкодисперсного порошка, до плотностей 2.10 г/см<sup>3</sup> и 1.51—1.52 г/см<sup>3</sup>, что составляет соответственно 0.98 и 0.98—0.99 от плотности монокристалла (при обработке результатов по NH<sub>4</sub>Cl использовалась средняя плотность 1.515 г/см<sup>3</sup>). Полученные образцы рассеивали белый свет и имели мелкую неоднородную структуру, едва видимую глазом. Ударно-волновое нагружение создавалось в одних случаях ударом разогнанной продуктом взрыва алюминиевой пластины различной толщины, в других — от зарядов различных ВВ, находящихся непосредственно или через металлический экран в контакте с исследуемыми образцами. Диаметр зарядов 40 мм, высота не менее 50 мм, детонация возбуждалась генератором плоского фронта.

Во всех опытах торцы и боковые поверхности образцов, прилегающие к экрану, покрывались слоем черного нитролака. Это обеспечивало хороший контакт с поверхностью металлического экрана или зарядом ВВ и исключало возможность регистрации постороннего излучения в первый момент времени записи опыта. На верхний торец исследуемых образцов помещались различные прозрачные в исходном состоянии вещества, такие как тетрахлорметан, трибромметан, глицерин или кристаллы фторида лития. Предполагалось, что это позволит определить время прохождения ударной волны по образцу, необходимое для нахождения ударной адиабаты NH<sub>4</sub>Cl, которая неизвестна. Кроме того, CCl<sub>4</sub> и CНBr<sub>3</sub> при давлениях выше 10 ГПа становятся непрозрачными [12, 13], а C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>(ОН)<sub>3</sub> и LiF соответственно до давлений 40.9 и 160 ГПа остаются прозрачными [4, 14]. Использование первых двух жидкостей позволяло надеяться на получение информации о выходящих из образцов профилях давления, а вторых — об изменении интенсивности излучения после выхода ударной волны на контактную границу образец—среда.

Регистрация излучения проводилась на двухканальном пирометре с эффективными длинами волн 420 и 720 нм. Временное разрешение установки составляет 50 нс. Излучение фиксировалось из центральной области образцов, ограниченной диафрагмой 5 мм.

Эксперименты с кристаллическими (высотой ~5 мм) и поликристаллическими (прессованными) образцами NaCl проводились при давлении ударно-волнового сжатия 28.5 ГПа (нагружение осуществлялось от заряда гексогена плотностью 1.71 г/см<sup>3</sup> через алюминиевый экран), в качестве индикаторной среды за образцом использовался тетрахлорметан. Полученные регистрации изменения интенсивности излучения во времени приведены на рис. 1. Общий характер записей подобен, хотя уровень интенсивности излучения от поликристаллической системы примерно в 50 раз превосходит излучение от кристалла. Если эти интенсивности характеризовать эффективными яркостными температурами, то в прессованных образцах максимальная температура около 4200 К, а в кристаллических 2650 К, последнее согласуется с результатами [1, 2].

Сам характер записи выявляет особенность, присущую обеим системам. Она относится к началу записи, когда в течение примерно 0.2 мкс имеет место пик излучения (на рис. 1 участок 0—1—2) с относительно малыми временами роста и спада, сравнимыми с временным разрешением установки. Дальнейший ход записи 2—3—4 соответствует для кристаллического образца подъему с выходом на плато, а для поликристаллического рост излучения дополнительно определяется уменьшением рассеивающего и поглощающего, еще не сжатого ударной волной слоя. Временные точки, выделенные на рис. 1 штриховой линией, соответствуют выходу ударной волны на контактную границу NaCl—CCl<sub>4</sub>, после которой излучение связано с фронтом ударной волны в тетрагидрометане. Общая продолжительность записи 0—4 в обоих случаях соответствует скорости ударной волны при  $p=28.5$  ГПа. Это обстоятельство послужило в дальнейшем основанием для определения ударной адиабаты хлорида аммония NH<sub>4</sub>Cl.

Каковы же причины подобия форм записей в обоих опытах и столь существенного отличия в мощностях излучения? Таких причин мы видим несколько. Априори природу первого пика излучения можно связать с тремя типами причин: во-первых, излучение, обусловленное наличием нитролака; во-вторых, особенности излучения самого образца, связанные с фазовыми превращениями; в-третьих, электромагнитные эффекты, сопровождающие выход ударной волны из металлического экрана и лака в исследуемый образец, а также потоки заряженных частиц.

Первая причина не кажется решающей, так как при одинаковой интенсивности входящей ударной волны в образцы фиксируются разные мощности излучения. Тем более надо иметь в виду, что в опытах с прессованными образцами существует сильное рассеяние, снижающее регистрируемое излучение. Вторая причина рассматривается из-за возможности перехода NaCl в диапазоне от 26 до 30 ГПа из фазы В1 в фазу В2 [11]. Можно было бы ожидать, что такой переход будет сопровождаться изменением профиля выходящей из образца ударной волны. Однако в опытах регистрируется обычный ход изменения давления.

По-видимому, наблюдаемый пик связан с третьей группой причин, а именно с влиянием процессов, сопровождающих выход ударной волны в образец. При прохождении ударной волны через контактную границу между металлом и образцом (диэлектриком) возможно возникновение контактной разности потенциалов, с другой стороны, в самом NaCl происхождение ударной волны сопровождается поляризационными эффектами; при этом величины возникающих эдс могут достигать нескольких вольт [15, 16]. Авторы этих работ измеряли поляризационный ток в NaCl (как моно-, так и поликристаллической структур) при ударном сжатии до 27.0 ГПа; на осциллограммах наблюдался также пик тока, определяющийся теми же временами, что и пик излучения. На наш взгляд, такие «совпадения» не кажутся случайными. Причиной этих явлений (т. е. следствием возникновения эдс) может быть либо электрический пробой между Al и NaCl, разделенными тонкой (~20 мкм) пленкой нитролака, либо инжектирование электронов (или других заряженных частиц) из материала экрана (и лака) в образец, либо другими сходными процессами. При инжектировании как инжектированные, так и образующиеся при ударном нагружении электроны, согласно [3, 17], могут ускоряться до оптических энергий, используя дефекты, образующиеся при ударном сжатии, где происходят расщепление и создание новых электронных уровней и подуровней, т. е. в этом случае излучают электроны, возбужденные не непосредственно из валентной зоны, а с новых «дефектных» уровней. Источником этих электронов могут служить либо

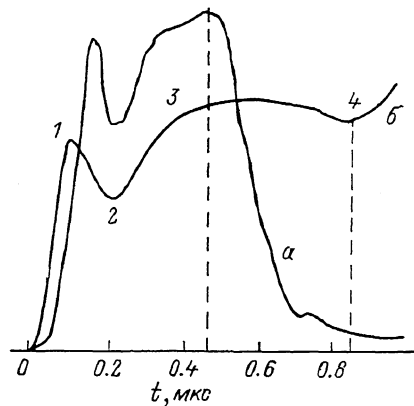


Рис. 1. Изменение интенсивности излучения во времени.

$\alpha$  — для поликристаллического образца NaCl,  $\beta$  — для кристаллического.

электроны, образующиеся при инжектировании заряженных частиц, либо сами электроны, инжектированные из Al в NaCl. При этом на первой стадии может работать механизм, предложенный в [17], когда валентные электроны тепловым путем перебрасываются на новые донорные уровни. Исходя из этой теории, мощность излучения связана с количеством дефектов, образующих промежуточные донорные уровни, которых в случае поликристаллической системы значительно больше. Скорее всего это и объясняет при подобии записей разный уровень мощности излучения. Кроме того, на мощность излучения может влиять воздух пор, который, однако, излучает не сам, как сплошная среда, но является источником ионизированных частиц, тем самым увеличивая количество дефектов поликристаллической прессованной системы. Возможным пояснением разности мощности может явиться и тот факт, что при хранении и обработке у кристаллов типа NaCl (и NH<sub>4</sub>Cl) образуется поверхностный трещиноватый слой, перенасыщенный дефектами и насыщенный водой [18], удельная доля для прессованных образцов, естественно, значительно больше. Понятно, что влияние инжектированных электронов (электронов экрана) или какой-либо другой контактный эффект может иметь место в узкой области образца, прилегающей к экрану. Поэтому такое «контактное» излучение должно быстро исчезнуть по прохождению ударной волны контактной границы (аналогичные типы излучения авторы наблюдали и в случае контакта металлов (Cu, Al) и некоторых жидкостей в областях давлений, где последние прозрачны). Надо сказать, что подобный пик излучения, видимо, наблюдался и другими исследователями. Так, в [19] приведены аналогичные записи для NaCl, но уже при более высоких давлениях в ближней инфракрасной области (длина волны пирометра ~900 нм). В [19] исследовалось излучение Mg и прозрачность сапфира в ударных волнах. Исходя из данных [1, 2] и расчета температуры ударно-сжатого Mg, приведенные в [19] записи могут быть скорее отнесены к излучению NaCl. Рассматриваемое «контактное» излучение по представленным в [19] регистраграммам наблюдалось при «контакте» Mg—NaCl, Mg—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NaCl—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; последний выражен менее явно на общем фоне записи. К сожалению, автор [19] никак эти данные не интерпретировал.

Мы так подробно остановились на первом участке записи по двум причинам: во-первых, на наш взгляд, природа этого «контактного» излучения связана с дальнейшей люминесценцией в объеме; во-вторых, многие вещества типа каменной соли или сапфира могут использоваться в качестве оконных материалов и учет «контактного» всплеска люминесценции представляется важным при проведении пирометрических исследований ударно-сжатых конденсированных сред.

В рамках приведенных выше рассуждений можно объяснить и последующий ход записи излучения. На начальном этапе распространения ударной волны по образцу (без учета «контактного» излучения) существует период нарастания излучения за счет увеличения до некоторого предела толщины эффективно излучающего слоя. Для кристалла можно связать такой прирост излучения с частичной прозрачностью NaCl, как это делал автор [2]. Он полагал, что в период установления равновесия между свободными электронами и решеткой световой поток пропорционален числу свободных электронов, этим же числом определяется и коэффициент поглощения. Экспоненциальный рост числа свободных электронов приводит на определенном этапе к тому, что характер записи можно описать в рамках излучения частично прозрачной среды с постоянным коэффициентом поглощения. Однако сам автор [2] считал, что NaCl при давлении около 28 ГПа прозрачен. На основании наших данных и записей, приведенных в [19], возникает сомнение о тепловом характере излучения в NaCl при более высоком давлении до 70 ГПа.

Таким образом, мы видим, что гетерогенная и существенно дефектная структура приводит к значительно более мощным люминесцентным излучениям. Причем дефектность для таких систем, как NaCl и NH<sub>4</sub>Cl, в прессованном состоянии двоякая: во-первых, изначальная гетерогенность структуры приводит при ударном сжатии к более мощной системе дефектов, во-вторых, существенную роль в начальном количестве дефектов играет большая удельная поверхность «трещиноватого» слоя, насыщенного дефектами, а также адсорби-

рованной из воздуха водой [18]. Именно эти факты и являются основой для понимания результатов проведенного исследования по изучению излучения в поликристаллических прессованных образцах  $\text{NH}_4\text{Cl}$  под воздействием ударно-волнового сжатия.

Исследование  $\text{NH}_4\text{Cl}$  проводилось в широком диапазоне давлений от 2.2 до 53.5 ГПа. Типичные записи интенсивности излучения при давлениях 3.3 (а), 31.4 (б), 34.3 ГПа (в) для образцов, контактирующих с  $\text{CHBr}_3$ ,  $\text{LiF}$  и  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ , приведены на рис. 2 (штриховыми вертикальными линиями отмечены моменты выхода ударной волны на контактную границу с прозрачной средой). Точность определения ударной адиабаты  $\text{NH}_4\text{Cl}$  по временам прохождения ударной волны в относительно тонких образцах и характеристикам нагружающих систем в нашем случае невысока, особенно при низких давлениях (меньше 10 ГПа) и высоких давлениях (больше 30 ГПа), и оценивается по дав-

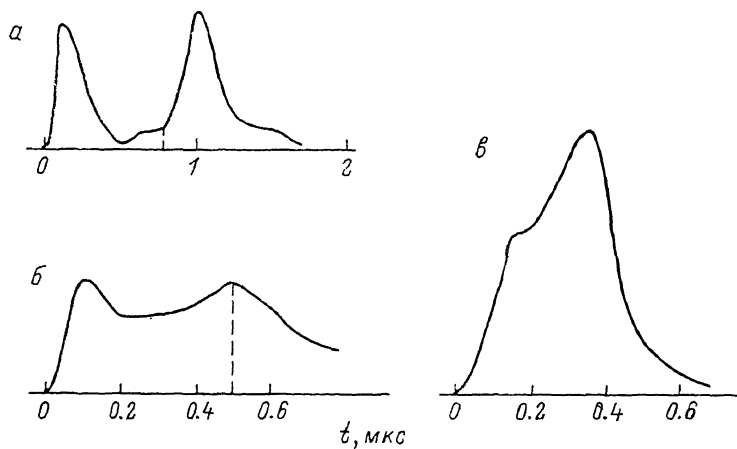


Рис. 2. Характерные записи интенсивностей излучения  $\text{NH}_4\text{Cl}$  при  $\lambda=420$  нм.

лению примерно в 7—10 %. Контрольные опыты, проведенные специально для регистрации профиля выходящего из образца давления (при входящем давлении около 20 ГПа), не показывают каких-либо аномалий, что может свидетельствовать об отсутствии превращений, существенно влияющих на ход ударной адиабаты. В рамках указанной точности использовалась следующая запись ударной адиабаты:  $D=3.59+1.404u$  [км/с].

Максимальные значения интенсивностей излучения, взятые при выходе ударной волны на контактную границу образца с последующей средой, характеризовались эффективными яркостными температурами. Зависимость яркостных температур от давления приведена на рис. 3; штриховой линией нанесены рассчитанные термодинамические значения температур, которые лежат значительно ниже. Анализируя полученную зависимость, явно можно выделить две области, отличающиеся темпами роста интенсивности излучения. Этот перегиб при 5—6 ГПа трудно связать с разложением и возгонкой вещества, которая в нормальных условиях происходит при температуре  $\sim 600$  К. В ударной волне такая температура достигается (по расчету) при давлениях больше 12 ГПа, следовательно, сам процесс может идти только при существенно больших давлениях (но никак не меньших) из-за эффекта смещения в более высокую область температуры разложения точки возгонки с увеличением давления. Исходя из того, что скачкообразное изменение одного из параметров исследуемого вещества (яркостная температура, характеризующая излучение) не может, видимо, быть объяснено в рамках только плавного изменения остальных свойств самого вещества, остается предположить две принципиально возможные причины, видимые на сегодняшний день: либо изменение самой природы излучения, например, до 6.5 ГПа доминирует катодолюминесценция и диэлектрический пробой на границах кристалликов, что увязывается с большой разностью интенсивностей излучения в красной и синей областях, а после 6.5 ГПа доминирует другой механизм, предложенный в [17]; либо характер излучения ме-

няется в силу прежде всего изменения структурно-механических свойств самого вещества, например, по аналогии с [6], можно было бы ожидать, что при этих давлениях достигается динамический предел прочности на ударной адиабате и это определяет перемены в характере излучения. Действительно, можно считать, что при низких давлениях (меньше 5 ГПа) фиксируется «контактное» излучение, которое затухает, а формирование «собственного» излучения затянуто во времени, причем второй максимум (уже как «собственного» излучения) достигается после прохождения ударной волной образца  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (рис. 2, а) и выхода ее в трибромметан  $\text{CBrBr}_3$ . К сожалению, при таких давлениях нет информации о характере излучения или прозрачности самого  $\text{CBrBr}_3$ , известно только, что ударная адиабата в координатах  $p$  и лежит ниже ударной адиабаты  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Поэтому однозначно связать второй пик излучения с люминесценцией образца  $\text{NH}_4\text{Cl}$  под воздействием слабой волны разрежения (как это делали авторы [6] для  $\text{SiO}_2$ ), или же с оптическими свойствами  $\text{CBrBr}_3$ , или с циркуляцией в медном экране, на который помещался образец, на сегодняшний день не представляется возможным. Увеличение давления приводит к сближению этих двух пиков излучения, уже при 6 ГПа регистрограммы имеют вид, подобный рис. 2, б, причем контактная граница с  $\text{CBrBr}_3$  четко прорабатывается.

Рис. 2, б относится к давлению 31.6 ГПа. Последующей средой, с кото-

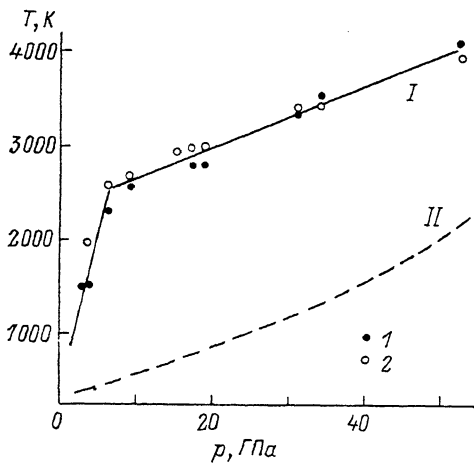


Рис. 3. Зависимость эффективных ярких температур ( $I$ ) от давления в сравнении с рассчитанными термодинамическими значениями ( $II$ ).

$\lambda$ , нм: 1 — 720, 2 — 420.

рой контактирует образец, является фторид лития  $\text{LiF}$ , являющийся динамически более «жестким», поэтому при отражении от него ударной волны в  $\text{NH}_4\text{Cl}$  происходит подъем давления на 40 %. Несмотря на такой прирост давления в отраженной волне, наблюдается спад интенсивности излучения. При тепловом характере излучения такая запись соответствует превращению вещества за фронтом ударной волны, идущему с поглощением энергии, например диссоциации [20]. Но правомерность такой интерпретации в данном случае неочевидна. Значительно больший спад наблюдается при контакте исследуемого образца с глицерином (рис. 2, в), когда в образец распространяется волна разрежения, но излучение не спадает до теплового, а приблизительно на порядок превышает его. Это обстоятельство указывает на то, что излучающий слой не является узкой полосой, примыкающей к фронту ударной волны, а захватывает более значительный объем ударно-сжатого вещества, в котором по мере удаления от фронта происходит релаксация излучения, т. е. наличие остаточного люминесцентного излучения как при двухкратном сжатии, так и при изэнтропическом расширении говорит о том, что созданное первичной ударной волной излучение обладает некоторой инерционностью или автономией в течение не менее 0.5 мкс; излучение не сразу спадает и не сразу возрастает (исключая «контактное»).

Таким образом, на основании проведенных измерений можно сделать следующие выводы.

1. Уровень люминесцентного излучения гетерогенных образцов значительно превышает уровень люминесценции ионных кристаллов типа  $\text{NaCl}$ .

2. В исследуемом диапазоне давлений излучение хлорида аммония носит люминесцентный характер и является суперпозицией «контактного» и собственного излучений, что в свою очередь определяет динамику изменения интенсивности регистрируемого излучения во времени (естественно, с учетом поглощения и рассеяния света слоями вещества, еще не сжатого ударной волной).

3. Сравнивая взаимодействие последующего вещества  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с «мягкими» и «жесткими» окнами, можно сделать вывод, что люминесценция присуща всему объему ударно-сжатого вещества и само излучение не меняет своего люминесцентного характера за время наблюдения (до 0.5 мкс).

#### Список литературы

- [1] Кормер С. Б., Симицин М. В., Кириллов Г. А., Урлин В. Д. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. Вып. 4. С. 1033—1048.
- [2] Кормер С. Б. // УФН. 1968. Т. 94. № 4. С. 641—687.
- [3] Кормер С. Б., Симицин М. В., Кириллов Г. А., Попова Л. Т. // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. Вып. 1. С. 135—147.
- [4] Wise J. L., Chhabildas // Shockwaves in Condensed Matter-85 / Ed. Y. M. Gupta. New York; London: Plenum Press, 1986. P. 44—51.
- [5] Sugira H., Kondo H., Sawaoka J. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 16. P. 4512—4514.
- [6] Brannon P. J., Konrad C., Morris R. W. et al. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. № 11. P. 6374—6381.
- [7] Brannon P. J., Morris R. W., Asay J. R. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. N 5. P. 1676—1679.
- [8] Альтшулер Л. В., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. Вып. 1. С. 16—24.
- [9] Ahrens T. J., Lyzenga G. A., Mitchell A. C. et al. // High Pressure Research in Geophysics. Advances in Earth and Planetary Sciences. Center for Academic Publications (Japan), 1982. Vol. 12. P. 579—594.
- [10] Kondo K., Ahrens T. J. // Phys. and Chem. of Minerals. 1983. Vol. 9. P. 173—181.
- [11] Schmidt D., Svedsen B., Ahrens T. J. // Shock Waves in Condensed Matter-85 / Ed. J. M. Gupta. New York; London: Plenum Press, 1986. P. 261—265.
- [12] Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Афанасенков А. Н., Шевелев В. Н. // ДАН СССР. 1968. Т. 182. № 4. С. 807—810.
- [13] Гоголя М. Ф., Воскобойников И. Н. // ФГВ. 1988. Т. 24. № 6. С. 127—134.
- [14] Petersen C. F., Rosenberg J. T. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. N 7. P. 3044—3046.
- [15] Минеев В. Н., Иванов А. Г. // УФН. 1976. Т. 119. № 1. С. 75—109.
- [16] Иванов А. Г., Новицкий Е. Э., Минеев В. Н. и др. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. Вып. 1. С. 41—48.
- [17] Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Урлин В. Д. // ЖЭТФ. 1968. Т. 55. Вып. 5. С. 1631—1639.
- [18] Иванов А. В. Прочность оптических материалов. Л., 1989. 144 с.
- [19] Urtiev P. A. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 8. P. 3490—3493.
- [20] Radousky H. B., Ross M. // High Pressure Research. Intern. J. 1988. Vol. 1. N 1. P. 39—52.

Институт химической физики  
им. Н. Н. Семенова АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
18 июля 1990 г.