

— электрические заряды:  $q_{\text{деп}}$  — плотность заряда деполяризации исследуемых поляризованных образцов ПКР-1 для сравнения с начальной величиной их поляризации  $P_0$  (чтобы судить о степени их деполяризации);  $Q_{\Sigma}$  — суммарный заряд, перетекающий за время измерения в цепях обоих исследуемых образцов, для контроля баланса заряда в системе;  $Q_1$  и  $(-Q_2)$  — заряды, перетекшие в цепи непробивающегося исследуемого образца за время  $0 \div t_1$  и  $t_1 \div t_2$  соответственно для расчета отдельных составляющих тока через образец. Все значения зарядов (их плотности) находятся интегрированием соответствующего участка кривой  $I(t)$  по времени:  $t_1 = 0,5$ ,  $t_2 = 1,4$  мкс;  $E_{\text{max}}(E_{\text{пр}}) = 5,5$  кВ/мм;  $I = 23$  А;  $I_{\text{max}} = 350$  А;  $Q_{\Sigma} = 1,18$ ,  $Q_1 = 0,94$ ,  $(-Q_2) = 0,85 \cdot 10^{-5}$  Кл;  $q_{\text{деп}} = 0,41$  Кл/м<sup>2</sup>. Из формул (7), (8), (10) и (11) рассчитаем:  $\rho = 74$  Ом·м,  $\varepsilon_2 = 1600$ ,  $R_{\text{пр}} = 7,6$  Ом,  $R_{\text{к}} = 7,6$  Ом.

Сравнивая результаты измерений в сжатой и несжатой зонах, отметим, что диэлектрическая проницаемость в сжатой ПКР-1 существенно возросла, величина  $E_{\text{пр}}$  осталась, по существу, прежней. Образовавшийся канал пробоя в течение времени наблюдения  $\sim 0,5$  мкс не развивался.

Опыт для сжатой зоны по методу 2 проводился по полной схеме рис. 1, в, т. е. при включенной цепочке  $C_0 R_2$ . Осциллограмма опыта воспроизводится на рис. 4, д. Рассчитанная по ней величина удельного объемного сопротивления ПКР-1, сжатой до давления  $\sim 5$  ГПа, составляет 37,5 Ом·м. Это в 2 раза меньше, чем при давлении 1,6 ГПа.

Характер поведения  $P(E)$  в несжатой зоне ПКР описывается с хорошей точностью линейной функцией:  $P(E) = P_0 + 0,032 E$  ( $\dim P = \text{Кл/м}^2$ ;  $\dim E = \text{кВ/мм}$ ). Отсюда следует, что максимальное, приложенное к пластине ПКР-1, поле  $\sim 1,5$  кВ/мм индуцировало в ней поляризацию, равную примерно  $0,1 P_0$ .

Поступила в редакцию  
22/II 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Г. Я. Карпенко. ФГВ, 1978, 14, 4, 115.
2. P. C. Lysne, C. M. Percival. Ferroelectrics, 1976, 10, 129.
3. В. В. Якушев. ФГВ, 1978, 14, 2, 3.
4. В. Н. Мипеев, А. Г. Ивапов. УФН, 1976, 119, 75.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЬЕЗОМОДУЛЕЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , $\text{Li}_2\text{GeO}_3$ И $\text{LiNbO}_3$ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. З. Новицкий, М. В. Коротченко, М. Д. Волнянский, В. А. Борисенко  
(Москва)

Для непосредственного измерения давлений во фронте и за фронтом ударной волны (УВ) в настоящее время используется пьезоэлектрические [1—5], пьезорезистивные [6—10] и диэлектрические [11, 12] датчики. Действие первых из них, используемых наиболее широко, основывается на хорошо изученном прямом пьезоэффекте; эти датчики отличаются простотой и надежностью, не нуждаются во внешних источниках питания, представлены большим ассортиментом пьезоактивных материалов. Если этот ассортимент ограничить только пьезоэлектриками, то и

Материал	Точечная группа симметрии	Срез	$\rho_0$ , Мг/м <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$\rho_0 \cdot c_0 \cdot 10^{-3}$ , Мг/(м <sup>2</sup> ·с)	$\varepsilon_{ij}/\varepsilon_0$	$ d_{ij}  \cdot 10^{12}$ , Кл/Н	Литература
Германат висмута ( $\text{Li}_2(\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20})$ )	23	[111]	9,23	3,3	30,5	44	28,4	[13—15]
Германат лития ( $\text{LiGeO}_3$ )	<i>mm</i> 2	[001]	3,49	6,6	23,0	10,2	7,3	[16]
(Мета)ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ )	<i>3m</i>	Z	4,64	7,33	34,0	30	6; 18,8	[3,17]
Кварц ( $\text{SiO}_2$ )	32	X	2,65	5,72	15,2	4,55	2,26	[1,19]

тогда могут быть названы десятки кристаллов, пригодных для использования в качестве рабочего тела датчиков давления<sup>1</sup>.

Эффективность использования пьезоэлектрического датчика давления для измерений в УВ определяются его динамическим пьезомодулем и акустической жесткостью (импеданс) — произведением продольной скорости звука в кристалле на удельную объемную плотность ( $c_0 \cdot \rho_0$ ).

Динамический пьезомодуль должен быть определен в ударно-волновых экспериментах для каждого типа кристалла, при этом важно знать характер его поведения в зависимости от давления ( $p$ ). Важно также знать предел текучести Гюгонио рабочего тела датчика, до которого еще сохраняются упругие свойства кристалла и до которого, в первом приближении, можно считать константами скорость распространения УВ ( $U_0 = C_0$ ) и удельную объемную плотность вещества за фронтом УВ ( $\rho = \rho_0$ ).

В таблице приведены некоторые характеристики исследованных кристаллов и кварца, который служил эталоном, как хорошо изученный материал. Кристалл германата висмута вызвал интерес, так как он имеет одно из самых высоких значений пьезомодуля  $d_{ij}$  из известных чистых пьезоэлектриков при необычно высокой удельной плотности. Также, как ранее для кварца, представляло интерес провести сравнение динамических свойств кристаллов ниобата лития отечественного производства и производства фирмы Crystal Technology, Inc. [3]. Напомним, что ниобат лития является сегнетоэлектрическим кристаллом с жестко зафиксированными («замороженными») доменами и, по прогнозам [5], должен служить хорошим рабочим телом датчиков давления.

Пироэлектрические кристаллы германата лития выбраны для изучения как некоторое промежуточное звено между указанными выше кристаллами.

### Постановка экспериментов и результаты

Ударное воздействие на кристаллы осуществлялось системой плоских волн, выходящих из массивного стального экрана, в контакте с которым подрывался заряд взрывчатого вещества [20]. Марка стали экрана и термообработка стали варьировались, что позволяло менять интенсивность УВ в кристаллах примерно от 0,3 до 1,5 ГПа. Профиль УВ, действующей на кристалл, оставался прямоугольным в течение всего времени пробега УВ по кристаллу, так что сжатие было однократным.

Исследуемые образцы германата висмута и лития имели форму пластин с характерными размерами  $10 \times 10$  мм, а образцы ниобата лития — форму дисков с диаметром 100 мм, толщина образцов  $l = 1 \div 2$  мм.

<sup>1</sup> В [5] проводился подробный анализ причин, ограничивающих или исключающих вообще применение высокоэффективных пьезоэлектриков — сегнетоэлектриков (в частности, пьезокерамики) в качестве рабочего тела датчика давления.

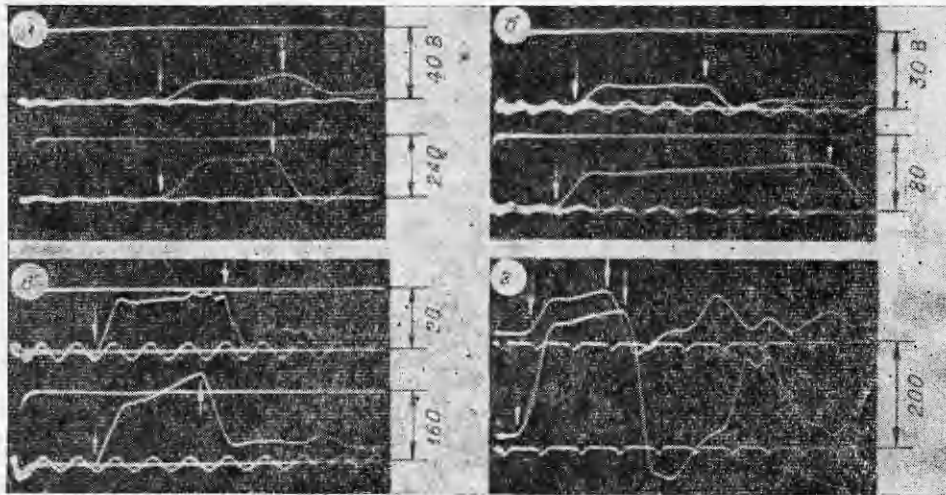


Рис. 1. Типичные осциллограммы в опытах с датчиками давления. Стрелками (слева направо) показаны моменты входа ( $t=0$ ) и выхода ( $t=T$ ) УВ из датчика. Давление в экране, ГПа: 0,5 (а), 0,7 (б), 1,3 (в) и 0,8 (г). Период колебаний (а, б, в) или меток времени (г) — 0,1 мкс.

а, б, в) кварцевый (верхний луч, размер  $10 \times 2$  мм); а, в) ниобат лития (нижний луч,  $13 \times 2$  мм и  $12 \times 12$  мм соответственно); б, в) германат висмута (нижний луч,  $10,5 \times 8,1 \times 2,3$  мм и  $9,6 \times 9,3 \times 10$  мм соответственно); г) германат лития (верхний луч,  $10,2 \times 8,8 \times 1,5$  мм).

На торцевые поверхности образцов площадью  $S$  наносились электроды путем напыления в вакууме алюминия, серебра, золота толщиной  $\sim 10$  мкм. Полученные таким образом пьезодатчики размещались на выходной поверхности генератора УВ. Возможные промежутки между пьезодатчиками и выходной поверхностью генератора УВ исключались с помощью конденсаторного масла. Токосъем с ударно-нагруженного пьезодатчика проводился с помощью накладного электрода, в ряде случаев служившего акустическим отводом (акустические жесткости кристалла и накладного электрода в этом случае были равны). С целью ослабления боковой разгрузки пьезодатчика за время пробега по нему УВ, а также с целью предохранения пьезодатчика от электрического пробоя по боковой поверхности, датчик вместе с накладным электродом целиком заливались конденсаторным маслом.

Для измерения давления  $p_0$  на фронте УВ в стальном экране использовался кварцевый датчик давления, который устанавливался в каждом опыте вблизи исследуемых пьезодатчиков. Типичные осциллограммы сигналов с датчиками различных типов показаны на рис. 1. Они демонстрируют записи напряжения  $V(t) = R \cdot I(t)$ , где  $I(t)$  — ток в цепи пьезодатчика,  $R$  — сопротивление нагрузки ( $R = 50$  Ом). Ток всегда появляется в момент  $t=0$  входа УВ в кристалл. В момент  $t=T$  выхода УВ из кристалла ток падает или до нуля, если использовался акустический отвод, или до какого-то конечного значения (на осциллограмме при этом наблюдается точка перегиба). Таким образом, осциллограммы  $V(t)$  позволяют однозначно и с высокой точностью находить среднюю скорость пробега УВ по кристаллу:  $U_0 = l \cdot T^{-1}$ , что дает возможность контролировать упругие свойства пьезодатчика (напомним, что в этом случае  $U_0 = C_0$ ). Дальнейший расчет проводился по методике [1], а именно: по известным значениям  $I$  в момент  $t=0, T$ ,  $S$  и давления  $p$  в кристалле вычислялся динамический пьезомодуль

$$d = I_0 T (Sp)^{-1}. \quad (1)$$

Давление в рабочем теле пьезодатчика находилось по известному соотношению

$$p = p_0 \cdot 2\rho_0 c_0 / (\rho_0 c_0 + \rho_3 c_3). \quad (2)$$

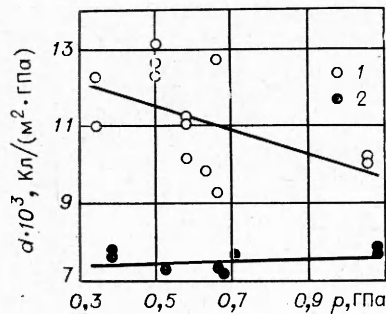


Рис. 2. Динамические пьезомодули  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (1) и  $\text{LiNbO}_3$  (2) в зависимости от давления. Каждая точка — результат отдельного опыта.

Индекс  $\varepsilon$  здесь относится к экрану, для которого значение акустической жесткости составляет  $46,4 \cdot 10^3 \text{ Мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Величина  $p_0$  определялась по (1) на основе получаемых в опыте осциллограмм сигналов с кварцевых датчиков, по известным из [1] значениям  $U_0 = 5,72 \text{ км}/\text{с}$ ,  $d = 2,04 \cdot 10^{-3}$  ( $p \leq 0,6 \text{ ГПа}$ ) и  $d = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа})$  ( $0,9 < p < 1,8 \text{ ГПа}$ ) для кварца, а также по известному соотношению акустических импедансов кварца и экрана.

Таким образом, схема расчета динамического пьезомодуля исследуемых кристаллов следующая: давление в кварцевом датчике, давление в экране, давление в кристалле, пьезомодуль. Погрешность в определении последнего складывается из ошибок измерений: геометрических размеров кварцевого датчика и датчика исследуемого, параметров  $I_0$  и  $I$  из осциллограмм сигналов с кварцевого датчика (при определении давления в экране) и с исследуемого пьезодатчика (при расчете  $d$ ). В суммарную погрешность входит также неопределенность в знании величин акустических жесткостей кварца, экрана и исследуемого кристалла. Учет всех ошибок приводит к максимальной погрешности измерений динамического пьезомодуля  $\pm 9,5\%$ .

Результаты расчетов пьезомодулей германата ванадия и ниобата лития представлены на рис. 2. Графики на этом рисунке есть результат обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Для германата лития в единичных опытах получено:  $d = 2,8$  при  $p = 0,42$ ,  $d = 3,7$  при  $p = 0,54$  и  $d = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа})$  при  $p = 0,84 \text{ ГПа}$ . В ряде случаев при расчете  $d$  в формулу (1) вводился множитель  $\kappa = (I_r/I_0)^{1/2}$  [4, 24].

Итак, для пьезоэлектрических датчиков на основе германата висмута

$$d = (13,0 - 0,3p) \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа}),$$

для пьезодатчиков на основе ниобата лития

$$d = (7,43 + 0,02p) \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа}). \quad (4)$$

### Обсуждение результатов

Ударно-волновые свойства исследованных кристаллов не изучались, пределы текучести Гюгонио для них не установлены. Во всех опытах контролировалось только значение  $U_0$  по известным  $l$  и  $T$ . Установлено, что  $U_0 = c_0$  в пределах точности временных измерений 3%. Отсюда делалось заключение, что во всех случаях кристаллы сжимались упругой волной.

Анализ осциллограмм рис. 1 показывает высокую пьезоактивность исследованных материалов (и прежде всего германата висмута) по сравнению с кварцем. Выигрыш в амплитуде сигнала с датчика из германата висмута достигается также за счет большой величины акустической жесткости кристалла (см. таблицу). Далее следует отметить еще одно преимущество этого датчика — возможность увеличивать с его помощью

время наблюдения формы  $p(t)$ , что наглядно иллюстрирует осциллограмма на рис. 1, б.

Большой разброс значений  $d$  для датчика из германата висмута может быть отнесен за счет того, что были, из которых вырезались образцы, были опытными, и плоскость среза для них контролировалась с меньшей точностью, чем на образцах ниобата лития, поставляемых предприятием, на котором хорошо отработана технология выращивания монокристаллов и получения нужного среза.

Для ниобата лития фирмы Crystal Technology, Inc. в [3] приведено значение

$$d = [7,26 \pm 0,44 + (0,18 \pm 0,05) p] \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа}). \quad (5)$$

Как видно из сравнения (5) и (4), характер зависимости  $d(p)$ , обнаруженный в [3] и в настоящей работе, одинаков. Абсолютные значения пьезомодулей различаются на величину  $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа})$ . С учетом максимальной погрешности измерений это различие фактически исчезает. Таким образом, можно сделать вывод, что пьезодатчики на основе ниобата лития отечественного и зарубежного производства идентичны. Поэтому в дальнейшем при использовании подобных датчиков для измерения давления в УВ можно пользоваться соотношением (5) как более представительным по числу измерений (около 30), выполненных с большей точностью (не хуже 3%) и в более широком интервале давлений ( $0,05 \div \pm 1,5 \text{ ГПа}$ ).

Экстраполяция  $d(p)$  к  $p = 0$  дает значения пьезомодуля 7,43 для ниобата лития и  $13 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГПа})$  для германата висмута или 7,43 и  $13 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}/\text{Н}$  соответственно. Обращает на себя внимание то, что в обоих случаях динамический пьезомодуль существенно меньше статического. (Значение  $d_{33} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}/\text{Н}$  для ниобата лития в таблице наименьшее, найденное авторами в литературе, и нигде больше не встречающееся.) Такая ситуация не находит сегодня физического объяснения, особенно если учесть, что для классического представителя класса пьезоэлектриков — кварца — значения статического и динамического пьезомодулей практически совпадают [1].

Возвращаясь к физической стороне исследований кристаллов, отметим следующее.

Нарастающий характер тока  $I(t)$  в интервале  $0 \div T$  (см. рис. 1, в, г) есть следствие двух причин, действующих вместе или порознь: краевые электрические и механические эффекты в нагружаемом кристалле, возрастание диэлектрической проницаемости за фронтом УВ, в сжатой части кристалла. Последнее вытекает из любой феноменологической теории ударной поляризации как линейных [1, 21], так и нелинейных диэлектриков [21, 22].

Если проводимость за и перед фронтом УВ в кристалле можно не учитывать, то из [1, 21] легко можно получить, что  $\kappa = \varepsilon_2 \delta \varepsilon_1^{-1} = (I_T/I_0)^{1/2}$ , где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — диэлектрические проницаемости несжатого и сжатого вещества,  $\delta$  — величина сжатия, т. е. феноменологически характер записи  $I(t)$  определяет характер проведения  $\varepsilon$  за фронтом УВ. Начальный скачок и параметр  $\kappa$  определяют, в свою очередь, величину ударной поляризации

$$P_0 = p \cdot d = I_0 \kappa T S^{-1}. \quad (6)$$

Величина  $I_0$  не зависит от наличия или отсутствия релаксационных процессов за фронтом УВ, связанных с проводимостью вещества или (и) кинетикой процесса ударной поляризации, но определяется такими внешними факторами, как одновременность  $\Delta t$  нагружения исследуемого образца материала ударной волной, постоянная времени  $\tau$  измерительной цепи, полоса пропускания  $\Delta f$  измерительного тракта [23]. В наших измерениях  $\Delta t = 30 \div 70 \text{ нс}$ ,  $\tau \leq 2 \text{ нс}$  (при характерном значении  $T \geq \geq 200 \text{ нс}$ ),  $\Delta f = 15 \div 20 \text{ МГц}$ .

К внешним факторам относятся также электрические и механические краевые эффекты. Вопрос об их влиянии на результаты измерений практически отпадает при использовании охранного кольца на измерительном датчике [1, 24]. В настоящих измерениях кольцо не применялось, поэтому о степени влияния названных эффектов на результаты измерений судили по отношению минимального размера кристалла (диаметра) в плоскости экрана к толщине кристалла на основании данных [1]. Это отношение не опускалось ниже пяти, поэтому учет влияния краевых эффектов не проводился. Нарастающий характер  $I(t)$  относился за счет изменения диэлектрической проницаемости, что учитывалось при расчете динамического пьезомодуля. Значение  $I_0 = V_0 R^{-1}$  определялось на осциллограммах путем экстраполяции начального скачка напряжения к моменту  $t = 0$ .

При давлении  $\sim 2$  ГПа осциллограмма с датчика из германата висмута имела вид, характерный для случая, когда в объеме сжатого диэлектрика имеет место электрический пробой [5]. Таким образом, область использования датчика ограничивается давлением  $1,1 < p \leq 2$  ГПа, что значительно ниже, чем, например, у кварца.

Электрическое поле, генерируемое в кристалле ударной волной, есть  $E = P_0(\epsilon\epsilon_0)^{-1}$ . Его величина, когда вектор ударно-индуцированной поляризации совпадает с направлением движения УВ (так называемая аксиальная мода), не зависит от величины сопротивления нагрузки датчика [5] и определяется при заданном давлении  $p$  динамическим пьезомодулем и диэлектрической проницаемостью. Сопоставление их значений для кварца и германата висмута показывает, что величина  $E$  в кварце всегда больше (примерно, в 2 раза). В этой ситуации следует, по-видимому, сделать вывод, что электрическая прочность кварца в статических условиях (156 кВ/мм) и в динамических ( $\sim 100$  кВ/мм [1]) больше, чем у германата висмута.

Величина ударно-индуцированной в кристалле ниобата лития поляризации  $P_0$  составляет  $\sim 7,5 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup> в интервале давлений  $0,3 \div 1,0$  ГПа. Это на два порядка меньше величины спонтанной поляризации кристалла  $P_s$ , равной  $0,7$  Кл/м<sup>2</sup> [17], и свидетельствует о том, что существенного нарушения доменной конфигурации в кристалле при ударном нагружении его слабыми УВ не происходит и что доменные процессы не будут искажать результаты измерений давления этим датчиком. Согласно [25], интенсивное выделение электрического заряда во внешней цепи, связанное с разрушением доменной структуры кристаллов ниобата лития, происходило в ударных волнах с интенсивностью  $\sim 10$  ГПа. Величина заряда, перетекающего при этом в цепи, составила  $0,9 \div 1,0 P_s$ .

### Выводы

Исследование динамического пьезомодуля монокристаллов чистого пьезоэлектрика (германата висмута), пьезоэлектрика (германата лития) и сегнетоэлектрика с жестко зафиксированными доменами (ниобата лития) показало, что все названные кристаллы могут служить высокоэффективным рабочим телом датчиков давления<sup>2</sup>. Наибольшей стабильностью свойств отличаются кристаллы ниобата лития, их производство освоено промышленностью, их поведение в ударных волнах исследовано наиболее полно. В [3] исследовались динамические пьезомодули для трех срезов ниобата лития — Z, Y, 36° — Y; в работе [26] исследовалась механическая и электрическая реакция ниобата лития на воздействие УВ с интенсивностью, превышающей предел текучести Гюгонио. Результаты, изложенные в настоящей работе, согласуются с данными [3, 26].

<sup>2</sup> Хотя нигде выше об этом ничего не говорилось, следует иметь в виду, что исследованные кристаллы могут служить также эффективным рабочим телом датчиков ускорения.

Максимальное значение динамического пьезомодуля среди исследованных кристаллов имеет германат висмута —  $13 \cdot 10^{-3}$  Кл/(м<sup>2</sup> · КПа), что в 6 раз превышает пьезомодуль кварца.

Поступила в редакцию  
22/II 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Graham, F. W. Neilson, W. B. Benedick. J. Appl. Phys., 1965, 36, 1775; R. A. Graham. Phys., 1972, Rev. B., 6, 4779.
2. I. R. Hearst, G. B. Irani, L. B. Geesaman. J. Appl. Phys., 1965, 36, 3440.
3. R. A. Graham, R. D. Jacobson. Appl. Phys. Lett., 1973, 23, 584; R. A. Graham. J. Appl. Phys., 1977, 48, 2153.
4. Н. П. Хохлов, В. Н. Минеев, А. Г. Иванов — В сб.: Докл. I Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. Т. 1. М., 1974.
5. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Г. Я. Карпенко. ФГВ, 1978, 14, 2, 250.
6. P. J. A. Fuller, J. H. Price. Brit. J. Appl. Phys., 1964, 35, 1471.
7. Г. И. Капель. Применение манганиновых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред. Препринт. Черноголовка, 1973.
8. Г. В. Симаков, М. Н. Павловский и др. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1974, 8, 11.
9. J. Y. W. Seto. J. Appl. Phys., 1976, 47, 4780.
10. D. E. Grady, M. J. Ginsberg. J. Appl. Phys., 1977, 48, 2179.
11. R. J. Eichelberger, G. E. Hauver. In.: Les ondes de detonation. Paris, 1961.
12. Н. А. Фот, В. П. Алексеевский и др. — В сб.: Докл. I Всесоюз. симп. по импульсным давлениям, М., 1974.
13. М. Оное, А. W. Warner, A. A. Ballman. IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-14, 165, 1967.
14. E. C. Spencer et al. Appl. Phys. Lett., 1965, 7, 67; 1966, 8, 81; 1966, 9, 290.
15. E. A. Kraut et al. Appl. Phys. Lett., 1970, 17, 271.
16. М. Д. Волнянский, О. А. Гржегоржевский и др. ФТТ, 1976, 18, 863.
17. Ю. С. Кузьминов. Ниобат и танталат лития. Материалы для нелинейной оптики. М., Наука, 1975.
18. Ю. Н. Вепевцев, С. А. Федулов и др. — В сб.: Титанат бария. М., Наука, 1973.
19. А. Г. Смагин, М. И. Ярославский. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М., Энергия, 1970.
20. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ФТТ, 1963, 5, 269.
21. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов. УФН, 1976, 119, 75.
22. Е. З. Новицкий, В. В. Колесников, Р. В. Ведринский. ФГВ, 1973, 9, 6, 887.
23. В. В. Якушев. ПМТФ, 1972, 4, 155.
24. G. A. Jones, W. J. Halpin. Rev. Sci. Instr., 1968, 39, 258.
25. Е. З. Новицкий, О. А. Клещевников и др. ФТТ, 1973, 15, 310.
26. P. L. Stanton, R. A. Graham. Appl. Phys. Lett., 1977, 31, 723.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

В. Ю. Ульяницкий  
(Новосибирск)

Многочисленные исследования спиновой детонации, проводившиеся до настоящего времени, касались в основном структуры и параметров фронта вблизи поверхности трубы. Наиболее полные эксперименты такого рода проведены в [1, 2]. В [1] предложена также газодинамическая модель течения в указанной области, которая находится в полном соответствии с экспериментом. Попытки изучения объемной структуры ограничивались лишь получением торцевых отпечатков на закопченной