

05

© 1991 г.

## «ФОКУСИРОВКА ФОНОНОВ» И ОРИЕНТАЦИЯ НЕПОЛНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

В. В. Зубрицкий

Рассчитаны направления максимального концентрирования акустических фононов, соответствующие «нулевой» гауссовой кривизне поверхностей медленностей, в LiF, NaCl, KBr при комнатной температуре с целью проверки механизма формирования путей неполного электрического пробоя кристаллов вдоль фононных струй. Показано, что у *ST*-моды KBr и *L*-мод исследованных кристаллов отсутствуют направления резко анизотропного распределения их потока энергии. В плоскости (010) KBr обнаружено 8 направлений сильной фокусировки *FT*-фононов, в (110) NaCl и LiF — 8 и 12 направлений для *ST*-фононов и 8 и 4 для *FT*-мод соответственно. При этом минимальное расхождение отдельных направлений фокусировки с ориентацией стримерных треков составляет  $\sim 20^\circ$  для KBr,  $\sim 26^\circ$  (или  $\sim 10^\circ$  с данными Дэвиссона, полученными в трех образцах) для NaCl и  $\sim 5^\circ$  для LiF, что превышает точность измерений ориентации стримеров ( $\leq 3^\circ$ ).

В упруго анизотропных средах в общем случае вследствие неколлинеарности векторов фазовой и групповой скоростей существуют направления, в которых плотность фононов, излучаемых «точечным» источником, значительно превышает их плотность в «соседних» направлениях. Данный эффект, получивший название «фокусировки фононов» [1], экспериментально изучался в различных кристаллах (см., например, [1-3]), при этом достигнуто хорошее соответствие с теорией. В работе [1] явление фокусировки предложено использовать для объяснения закономерностей неполного электрического пробоя кристаллов, так и не получивших однозначной интерпретации [5-7].

В соответствии с моделью [4] влияние фононов проявляется на этапе зарождения стримерного разряда и заключается в следующем. Электрическое поле «точечного» источника (например, от острого электрода) возбуждает в кристалле из-за стрикции или пьезоэффекта упругие колебания — продольные (*L*), быстрые (*FT*) и медленные (*ST*) поперечные фононы. Вдоль направлений фокусировки  $\mathbf{r}(\theta_f)$  образуются интенсивные потоки акустических фононов, тормозящих быстрые неравновесные носители заряда, что приводит к повышению максимума поля вдоль  $\mathbf{r}(\theta_f)$ , быстрому росту концентрации носителей и проталкиванию области сильного поля вдоль  $\mathbf{r}(\theta_f)$ . Дальнейшее развитие стримера определяется скоростью рождения носителей и описывается без учета воздействия фононов, возбуждаемых «точечным» источником [4].

Предложенный механизм не ограничивается каким-либо классом симметрии кристаллов, и если для нецентросимметричных сред привлекается эффект понижения симметрии во внешнем электрическом поле *E*, то «в центросимметричных кристаллах NaCl, LiF, KBr и др. пробой идет практически по направлениям фононной фокусировки при  $E=0$ » [4].

Таким образом, если определить направления максимального концентрирования фононов [1] в центросимметричных кристаллах, то они должны практически совпадать с кристаллографическими направлениями распространения стримерных разрядов, ориентация которых известна с точностью до градуса. Однако в [4] не приводятся конкретных данных, свидетельствующих о таком

совпадении, а ссылки на результаты [1-3] нельзя считать достаточными. Например, в работе [1] коэффициент концентрации определялся статистическим методом с шагом сканирования  $1.25^\circ$  и  $2^\circ$  по пространству волновых векторов и векторов переноса энергии соответственно. Подобные результаты представлены в [2], где вычисления проведены на сетке  $4 \times 4^\circ$  для LiF и KCl, а также в [3] для NaCl, LiF, KCl, KI, Al, Cu, Ge и др. на сетке по полярному и азимутальному углам  $15 \times 15^\circ$ . Все эти расчеты и соответствующие им эксперименты по баллистическому транспорту фононов выполнены при температурах не выше 5 К. В ряде случаев материальные константы кристаллов экстраполировались к ОК [2]. Стимерные разряды, несколько нам известно, в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) при столь низких температурах не исследовались ( $T_{\text{min}} \approx 80$  К). Кроме того, во многих ЩГК при понижении температуры наблюдаются кристаллографически неориентированные разряды, распространяющиеся по случайным направлениям [5, 6].

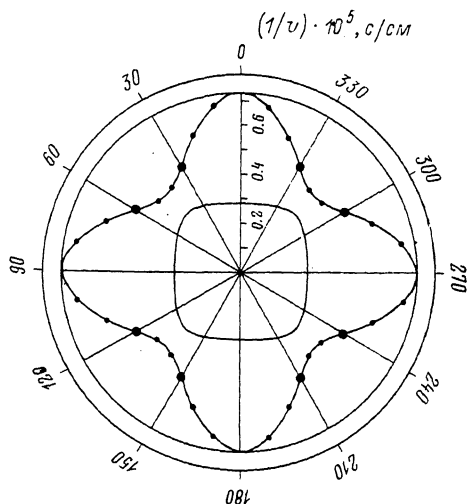


Рис. 1. Сечения поверхностей обратных фазовых скоростей кристаллов бромистого калия  $\text{KBr}$  плоскостью (010) при комнатной температуре.

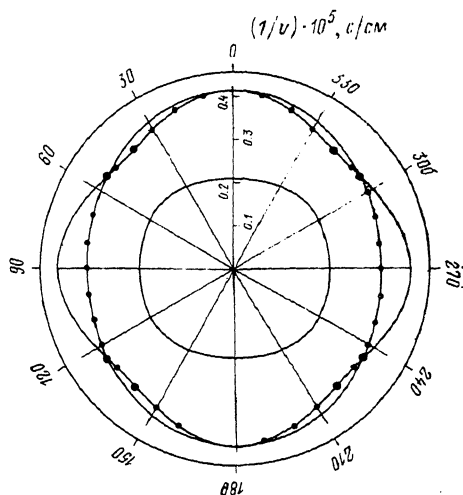


Рис. 2. Сечения поверхностей медленностей для продольной, быстрой (маркированная кривая) и медленной поперечных акустических мод NaCl плоскостью (110) при комнатной температуре.

В этой связи в настоящей работе рассчитаны направления максимального концентрации акустических фононов в кристаллах NaCl, LiF, KBr при комнатной температуре и проведен анализ с экспериментами по стримерам.

Уравнение распространения упругих волн в пьезоэлектрических анизотропных средах

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1)$$

имеет плоско-волновое решение  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{kx}))$  и после соответствующих преобразований приводится к виду:

$$(\Gamma_{il} - \rho v^2 \delta_{il}) u_{0l} = 0, \quad (2)$$

где тензор Кристоффеля  $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_j n_k$ ,  $c_{ijkl}$  — тензор модулей упругости,  $\rho$  — плотность кристалла,  $\mathbf{u}$  — вектор поляризации среды.

Решение (2) дает зависимость фазовых скоростей продольной  $v_L$ , медленной  $v_{ST}$  и быстрой  $v_{FT}$  поперечных фононных мод от направления распространения. Полную информацию о фокусировке фононов позволяет получить анализ поверхностей постоянной частоты или обратных фазовых скоростей — поверхностей медленностей [8, 9]. При этом максимальное концентрация фононов имеет место в областях нулевой гауссовой кривизны ( $G=0$ ) поверхностей

Таблица 1

Материальные константы кристаллов [11],  
использованные в расчетах

Кристалл	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_{11} \cdot 10^{-10}$ , Н/м <sup>2</sup>	$c_{12} \cdot 10^{-10}$ , Н/м <sup>2</sup>	$c_{44} \cdot 10^{-10}$ , Н/м <sup>2</sup>
NaCl	2.1678	4.95	1.29	1.265
LiF	2.64	11.4	4.77	6.36
KBr	2.75	3.49	0.58	0.51

$\omega(\mathbf{k}) = \omega$ . Эти области соответствуют заострениям сечений лучевых поверхностей [10]. Формы поверхностей медленностей и постоянной частоты подобны. В настоящей работе исследовались поверхности медленностей.

За направление полярной оси ( $\theta=0$ ) выбрано направление [001]. Направлению [100] соответствуют полярный  $\theta$  и азимутальный  $\varphi$  углы, равные  $90^\circ$  и  $0$ . Для [010]  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$ . Использованные в расчетах параметры кристаллов приведены в табл. 1.

На рис. 1 и 2 представлены сечения поверхностей рефракции NaCl и KBr плоскостями, в которых лежат пути распространения стримерных разрядов.

Таблица 2

Полярные координаты ( $\theta$ ,  $v^{-1}$ ) точек «нулевой» кривизны сечений поверхностей медленностей для поперечных медленной ( $ST$ ) и быстрой ( $FT$ ) акустических мод, соответствующие им направления ( $\theta_f$ ) фокусировки фононов и ориентация электрических разрядов ( $\theta_d$ ) при комнатной температуре в ЦГК

Кристалл	Сечение $\varphi$ , град	ST		FT		Ориентация неполного пробы	
		$\theta$ , град/ $v^{-1} \cdot 10^5$ , с/см	$\theta_f$ , град	$\theta$ , град/ $v^{-1} \cdot 10^5$ , с/см	$\theta_f$ , град	$\theta_d$ , град	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8
NaCl	45	54.6	63.84	40.56	46.9	73.7	[12], [5]
		0.36352		0.36107		106.3	[12]
		54.9	45.53	54.0	45.51	90	[13], [5], [8]
		0.36356		0.36266		0	[13]
		125.1	134.47	126.0	134.49		
		0.36356		0.36266			
		125.4	116.16	139.44	133.1		
0.36352		0.36107					
LiF	45	348.78	10.38	77.82	94.74	80.7	[12]
		0.21284		0.21086		99.3	[12]
		54.6	72.81	102.18	85.26	90	[12]
		0.24711		0.21086			
		54.9	36.56				
		0.24716					
		125.1	143.44				
		0.24716					
125.4	107.19						
0.24711							
191.22	169.62						
0.21284							
KBr	0	—	—	30.72	70.21	90	[13]
				0.49077			
				59.28	19.79		
				0.49077			
				120.72	160.21		
				0.49077			
		149.28	109.79				
		0.49077					

Примечание. Приведены данные по пробю без перенапряжения.

Видно, что в направлениях  $\langle 111 \rangle$  поверхности быстрой и медленной акустических мод соприкасаются. Выполнение тождества  $v_{ST} \equiv v_{FT}$  для  $\langle 111 \rangle$  свидетельствует о корректности вычислений. Темными кружками на рис. 1, 2 помечены точки, где  $G \rightarrow 0$ . Они разделяют области знакопеременной кривизны.

Ни в одном из кристаллов для продольных акустических фононов не найдено направлений резко анизотропного распределения их потока энергии. В этом смысле можно сказать, что  $L$ -моды пассивны.

Аналогичная ситуация наблюдается и для  $ST$ -фононов в КВг. В плоскости (010) этого кристалла имеется 8 симметричных направлений максимального концентрирования только быстрых поперечных фононов (табл. 2, интервал  $0-180^\circ$ ). Сравнивая полученные данные с ориентацией стримерных треков в КВг [13], легко видеть, что несовпадение составляет примерно  $20^\circ$ .

В хлористом натрии обнаружено 8 направлений сильной фокусировки  $ST$ -фононов и столько же направлений для  $FT$ -фононов. Вдоль кристаллографической оси [111] у медленной поперечной моды наблюдается коническая рефракция с углом между осью и образующей  $\delta = 9.15^\circ$ . Кроме того, как видно из табл. 2, у  $FT$ - и  $ST$ -фононных мод имеются практически совпадающие направления фокусировки  $\theta_{ST}^f \approx \theta_{FT}^f$  (на рис. 2 эти и другие близко расположенные точки с  $G \rightarrow 0$  неразрешены). Несовпадение ( $\Delta\theta$ ) направлений фокусировки  $ST$ -моды с данными [13] по пробую NaCl составляет около  $26^\circ$ . Меньшее различие наблюдается с результатами [12]  $\Delta\theta_{FT}^{[12]} \approx 10^\circ$ . Для быстрых акустических фононов расхождение с измерениями [13] и [12] еще значительно  $\Delta\theta_{FT}^{[13]} \approx 43^\circ$  и  $\Delta\theta_{FT}^{[12]} \approx 27^\circ$  (табл. 2). Необходимо отметить, что в NaCl пути пробоя с ориентацией  $[xy]$ , где  $x \geq y$ , нестабильны [14] и во многих исследованиях [5, 6, 15] повторены результаты [13].

В кристаллах LiF для быстрых поперечных фононов наблюдается 4 направления максимального концентрирования, а для  $ST$ -моды — 12 направлений. Так же как и в NaCl, вдоль [111] имеет место коническая рефракция  $ST$ -фононов, но с углом  $\delta = 18.1^\circ$ . Сравнение с данными по пробую показывает, что в LiF  $\Delta\theta_{FT} \approx 5^\circ$ . Для медленных поперечных фононов минимальное расхождение с направлениями развития стримеров составляет  $\Delta\theta_{ST} \approx 8^\circ$ .

Учитывая, что точность измерения ориентации треков разрядов  $|\Delta\theta| \leq \leq 3^\circ$  [12], полученные результаты не позволяют сделать вывод о совпадении путей неполного электрического пробоя кристаллов NaCl, LiF, КВг с направлениями максимального концентрирования акустических фононов, возбуждаемых «точечным» источником, при  $E=0$ .

Выражаю признательность В. Н. Белому и А. Г. Хаткевичу за конструктивные обсуждения.

### Список литературы

- [1] Taylor B., Maris H. J., Elbaum C. // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 23. N 8. P. 416—419.
- [2] Taylor B., Maris H. J., Elbaum C. // Phys. Rev. B. 1971. Vol. 3. N 4. P. 1462—1472.
- [3] Philip J., Viswanathan K. S. // Phys. Rev. B. 1978. Vol. 17. N 12. P. 4969—4978.
- [4] Чернозатонский Л. А. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. Вып. 5. С. 225—228.
- [5] Беркс Дж. Б., Шульман Дж. Г. Прогресс в области диэлектриков. М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. Т. 4. 293 с.
- [6] Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
- [7] Франц В. Пробой диэлектриков. М.: ИЛ, 1961. 207 с.
- [8] Northrop G. A., Wolfe J. P. // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 22. N 12. P. 6196—6212.
- [9] Lax M., NarayanaMurthi V. // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 22. N 10. P. 4876—4897.
- [10] Хаткевич А. Г. // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1965. № 1. С. 93—97.
- [11] Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.
- [12] Davison J. W. // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. N 10. P. 1194—1201.
- [13] Caspari M. E. // Phys. Rev. 1955. Vol. 98. N 6. P. 1679—1691.
- [14] Davison J. W. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. N 1. P. 228.
- [15] Лисицын В. М., Олешко В. И. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 1. С. 15—18.