

ОБ АКУСТОЭЛЕКТРОННОМ МЕХАНИЗМЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НЕПОЛНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

К настоящему времени в литературе продолжает широко обсуждаться природа стримерного разряда в твердых телах и, в частности, механизм его кристаллографической направленности как одного из фундаментальных свойств вещества. Одной из многих заслуживающих внимания идей, позволяющих объяснить основные свойства разрядов в полупроводниках и диэлектриках, является гипотеза [1], основанная на представлении о формировании области сильного электрического поля стримера в направлении фокусировки неравновесных акустических фононов (струйного потока генерируемых фононов).

Предсказываемые направления разрядов согласно [1] совпадают с экспериментально полученными для щелочно-галогенидных кристаллов и некоторых полупроводников, кроме того, из теории следует зависимость ориентации стримеров от температуры, напряженности электрического поля, давления и др. факторов [2]. В кристаллах CdS теория предсказывает возможность образования поверхностных стримеров и направлений разрядов, не наблюдавшихся в объемных кристаллах в плоскости типа $\{1210\}$. Однако подобные разряды зарегистрированы в тонких пластинчатых (квазидвухмерных) монокристаллах, ориентированных в указанной плоскости [3] и, возможно, соответствуют рассматриваемой модели.

Развитие (проверка) идеи [1] применительно к различным кристаллам ([4] и ссылки к ней), указало на неоднозначность вытекающих из теории следствий из-за незавершенности по части разработки модели стримера и отсутствия необходимых

сведений, в основном касающихся нелинейных свойств кристаллов. Однако по этим и нижеуказанным причинам, проверка в отношении кристаллов сульфида кадмия, в которых свойства неразрушающих стримерных разрядов изучены в наибольшей степени, не может претендовать на полноту.

Примечательно, что в [4] уже в линейном приближении, т.е. без учета влияния сильного электрического поля, получено хорошее в целом совпадение направлений стримерных разрядов с пьезоэлектрически активными направлениями инфинитного концентрирования поперечных акустических фононов. Однако ряд сделанных допущений, правомочность которых обсуждается далее, привел к противоречивости в интерпретации детерминированности ("привязки") отдельных фоновых мод к формированию того или иного типа стримеров. Вместе с тем, соответствующий анализ выполнен недостаточно полно вследствие упрощенного подхода, без учета влияния погрешности измерения экспериментальных данных, даже если они использованы из одного источника.

Методика расчета вероятных направлений фоновой фокусировки (θ_x) в работе [4] основана на исследовании формы поверхностей медленностей (рефракции) $S(n)$, описываемых в упрощенном варианте уравнениями 4-й (2-й) степени, тогда как последние являются существенно поверхностями 6-го порядка [5]. Для сравнения на рисунке 1 показаны соответствующие сечения поверхностей $S(n)$ плоскостью XZ, описы-

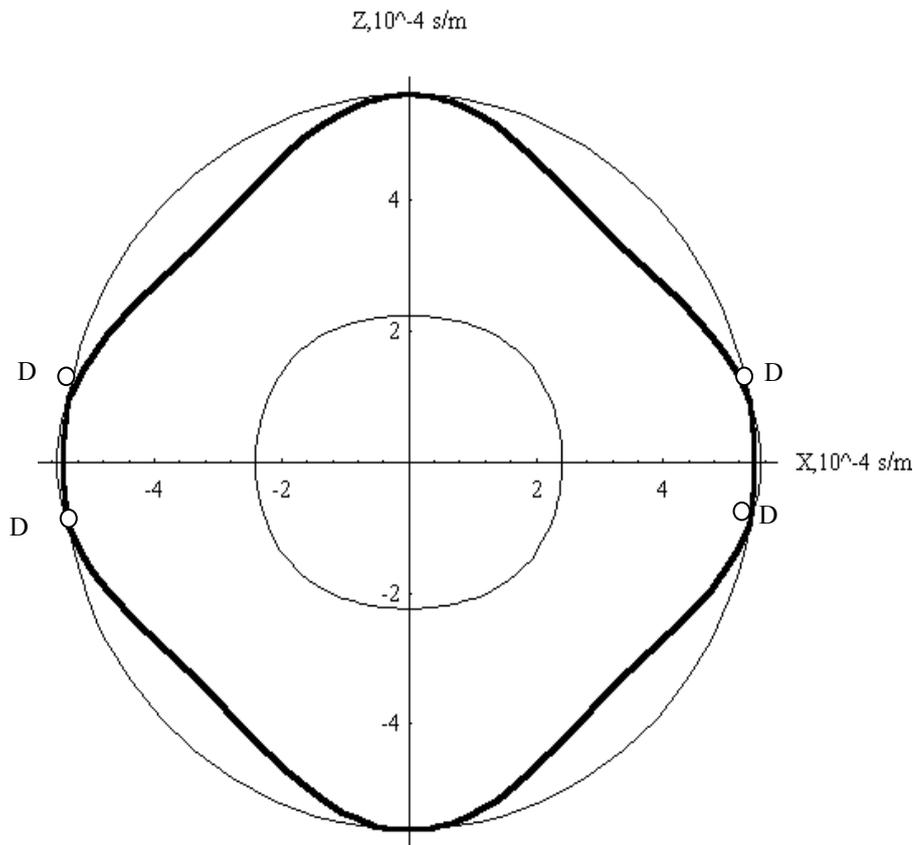


Рисунок 1 - Вид сечений поверхностей медленностей 6-го порядка для сульфида кадмия; D - точки касания (излома) кривых.
Физика, математика, химия

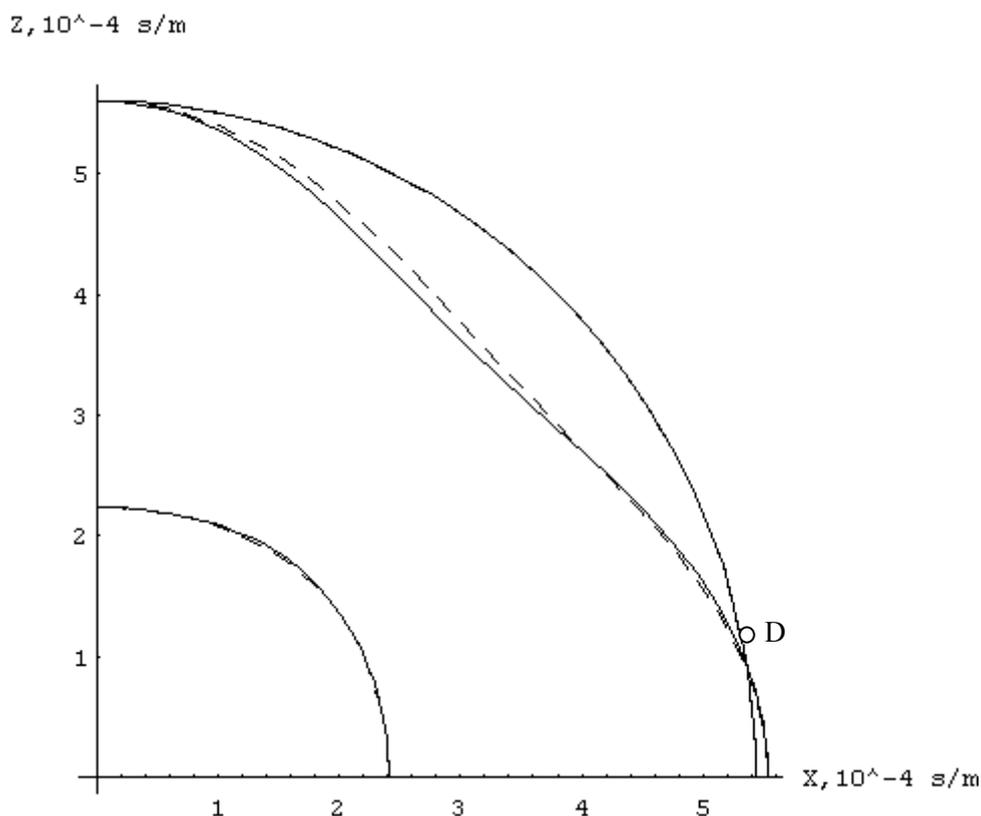


Рисунок 2 - Сечения поверхностей медленностей кристаллов CdS в условиях линейного пьезоэлектрического эффекта при положительных (сплошные кривые) и отрицательных (штриховые) значениях коэффициента e_{33} .

вующие сечения поверхностей $S(n)$ плоскостью XZ, описываемых уравнением 6-й степени, полученные в рамках приближения [4] и при прочих равных условиях. Видно, что обозначенные на нем характерные точки типа D являются не точками пересечения кривых, как это следует из рисунка 1 цитируемой работы, а точками их касания (излома). В результате возникают особенности фокусировки, рассмотренные ниже.

В методической части ошибочно указывается отрицательное значение используемого коэффициента e_{33} пьезомодуля. Для этого случая на рисунке 2 показаны сечения поверхностей медленностей, полученные по аналогии с [4]; ради простоты рассматривается первая четверть сечения. Заметная разница в положении точек нулевой кривизны (светлые кружки) по сравнению со случаем положительных значений этого же коэффициента для быстрой поперечной (FTA) моды, приводит к различию направлений θ_F в 1-4 градуса ($45,6$ и $47,3^\circ$ вместо рассчитанных $41,4$ и $46,4^\circ$). С учетом сказанного и литературных данных этот факт, по-видимому, следует рассматривать как опечатку.

Анализ углового распределения кривизны $k(\theta)$ сечения поверхностей медленностей 6-го порядка (рисунок 3) указывает на существование, помимо двух отмеченных точек нулевой кривизны в случае FTA-моды, особенности в области точек типа D с $\theta_D \approx 80,0^\circ$ для FTA и STA поверхностей. Соответствующие точки характеризуются сингулярностью второго рода [2] и обуславливают "неинфинитное" концентрирование в направлениях $\theta_F \approx 69,0$ и $80,8^\circ$ для обеих поперечных

мод. Это следует из данных выполненной проверки.

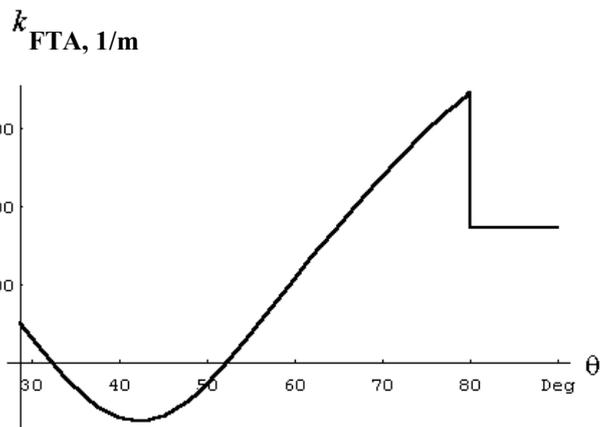


Рисунок 3 - Угловое распределение кривизны сечения поверхности медленностей 6-го порядка для FTA-моды.

Полученный результат свидетельствует о необходимости дополнительного обоснования вклада различных фононных мод в развитие стримерных разрядов того или иного типа и в этом смысле согласуется с выводами [4]. Однако соответствующие оценки в упомянутой работе выполнены при двух допущениях – в предположении изотропии электрической прочности кристалла и различия пороговых амплитуд возбуждающих импульсов напряжения для стримеров разного типа при комнатной температуре, хотя по данным первоисточника

(ссылка [14]) заметное различие порогов (в 4–5 раз) имеет место только при $T=77\text{K}$.

Подобным образом, в ряде случаев с учетом нелинейности первого порядка, определен "полный набор" направлений концентрирования энергии акустических фононов в некоторых других полупроводниках, диэлектриках и электрооптических кристаллах, где приводится точность расчета $\sim 0,1^0$ и утверждается, что выполнена "паспортизация" соответствующих данных. Однако при этом не принята во внимание сильная зависимость пьезоэлектрического эффекта и упругих констант от длины волны, температуры, качества кристалла. В частности, при изменении длины волны (300 К) в диапазоне $\lambda = 0,4 \div 0,7$ мкм пьезооптические коэффициенты для LiNbO_3 меняются в 3 раза (от 10^{14} до $3 \cdot 10^{14}$ см²/дин) [6]. Разброс данных различных авторов, например по коэффициенту ϵ_{11} , достигающий $\sim \pm 10\%$ [7-9], дает погрешность определения направлений фокусировки порядка 5^0 . В [4] исходные данные взяты из одного "вызывающего доверие" источника [8], средняя точность измерения которых составляет около $\pm 1\%$ и использованы в несколько измененном (обработанном) виде также в пределах $\sim \pm 1\%$. Как показывает анализ, вносимая вследствие этого погрешность расчета θ_{F} соответствует примерно 1^0 , т.е. существенно выше заявляемой ($0, 1^0$).

Следует отметить, что детальное исследование эффекта фононной фокусировки, по-видимому, не должно ограничиваться только изучением поверхностей медленностей – более информативным, как известно, является анализ поверхностей лучевых скоростей, описываемых уравнениями высоких степеней (до 150-й) [5]. В частности, в кубических и гексагональных кристаллах существуют направления, вдоль которых распространяются не 3, а 5 различных по скорости упругих волн (квазипродольная, поперечная и 3 квазипоперечных).

Совпадение ориентации стримерных разрядов с пространственной анизотропией ряда эффектов – концентрирования электрического поля [10], фононной фокусировки [1], направлениями взаимодействия СВЧ и световой волн [11] и процессов самовоздействия [12] в сильных полях, а также чувствительность к воздействию одних и тех же факторов, некоторые другие особенности эффектов – подтверждают сделанный ранее вывод о сложности изучаемого явления [13]. Вклад того или иного из названных процессов, вероятно, определяется внешними условиями и рассматриваемой средой и требует учета при разработке конкретной модели стримера.

УДК 530.1

Краглер Р., Русаков К.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ

Во многих физических и технических системах движение носит регулярный периодический характер. Если объект движется по одной траектории между двумя положениями, такое движение называют колебанием, а в технике чаще всего – вибрацией. Вибрации механических систем представляют собой важную область анализа в физике, а также в техническом и строительном проектировании. В случае свободных колебаний, когда объект выведен из положения равновесия и

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чернозатонский Л.А. Фононные струи - каналы стримерного пробоя кристаллов // Письма в ЖЭТФ.- 1983.- Т. 38, № 5.- С.225-228.
2. Новиков В.В., Пустовойт В.И., Чернозатонский Л.А. Влияние внешних воздействий на концентрирование акустических волн в кристаллах // Сб. Точные измерения в акустооптике и оптоэлектронике. - М.: ВНИИФТРИ, 1985.- С. 40-45.
3. Гладышук А.А., Гурский А.Л., Парашук В.В., Яблонский Г.П., Грибковский В.П., Пендюор С.А., Таленский О.Н. Влияние толщины кристалла, температуры, одноосного сжатия, полярности электрического импульса и разрядного промежутка на стримерные разряды в сульфиде кадмия // ЖПС. 1985. Т. 17, В.6. С. 889 - 895.
4. Зубрицкий В.В. Фокусировка фононов и анизотропия стримерного пробоя в кристаллах CdS // ФТТ.- 1996.- № 1.- С. 56-62.
5. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики, М.:Наука,1979, 639 с.
6. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Проблемы нелинейной оптики (обзор). М. 1964; Кристаллы с нелинейной поляризуемостью // УФН. 1967. Т.93, №4. С.633-674.
7. Акустические кристаллы / Под ред. М.П. Шаскольской.- М.: Наука,1982.-632 с.
8. Даньков И.А., Падо Г.С., Кобяков И.Б., Бердник В.В. Упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические свойства сульфида кадмия в интервале температур 4,2 - 300 К // ФТТ. 1979. Т.21, №9. С. 2570-2574; ФТТ. 1982. Т.24, №12. С.3613-3620.
9. Даньков И.А., Падо Г.С., Завьялова Л.П. Таблицы рекомендуемых справочных данных. "Сульфид кадмия монокристаллический. Упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические свойства сульфида кадмия в диапазоне 4,2 - 300 К". -М.: ВНИЦГСССД, 1982; Реф.Ж. 1983, 8ЕД.
10. Яблонский Г.П., Луценко Е.В. Анизотропия нелинейной поляризуемости в сильных электрических полях и кристаллографическая ориентация разрядов: Препринт № 693 / Ин-т физики АНБ, Минск, 1994, 18 с.
11. Грибковский В. П., Прокопюна А.Н., Русаков К.И., Парашук В. В. Взаимодействие электрического поля со светом и направленность стримерных разрядов // Журн. прикл. спектр.- 1994.- Т. 60, № 3-4.- С. 362 - 368.
12. Парашук В. В., Грибковский В. П. Об автоканалировании света при стримерном разряде в полупроводниках // Докл. АН Беларуси, 1997, Т. 41, №1, С.44-49.
13. Грибковский В.П. Стримеры в полупроводниках - кооперативные самоорганизованные процессы // Доклады АН БССР.-1985.- Т. 29, № 10.- С. 896-898.

предоставлен самому себе, его колебания происходят с собственной частотой, зависящей только от свойств системы. Моделирование таких колебаний различных систем не представляет большой трудности, т.к. описывается уравнением гармонических колебаний.

В реальных технических системах, как правило, имеются минимум два тела, способных колебаться, а также существует определенная связь между этими телами. В системе будут

Краглер Роберт. Профессор, доктор физ.-мат. наук Фаххохиуле Равенсбурга-Вайнгартена (Германия).

Русаков Константин Иванович. Доцент каф. физики, кандидат физ.-мат. наук Брестского государственного технического университета.

Фазисы: Брест, ул. Московская, 267.