

УДК 537.226

© 1991

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ**

А. А. Грабар, Р. И. Мужикаш, А. Д. Костюк, Ю. М. Высочанский

Предложен и апробирован метод исследования процессов переключения доменной структуры в сегнетоэлектрике $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$, обладающем фоторефрактивным эффектом. Метод основан на регистрации интенсивности двухволнового взаимодействия при изменении направления энергопереноса вследствие переполаризации кристалла в среде с нелокальным механизмом фоторефрактивной записи. Проведено сравнение с известными методами. Получена информация о динамике переключения доменов $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$ в слабых электрических полях.

Сегнетоэлектрические материалы, обладающие фоточувствительностью и линейным электрооптическим эффектом, составляют значительную часть активно исследуемых фоторефрактивных (ФР) сред [1, 2]. Помимо прикладных аспектов, исследования ФР эффекта могут быть использованы для определения различных физических параметров и изучения механизмов взаимодействия конденсированных сред с электромагнитным излучением. Наиболее распространена голографическая методика измерений, сводящаяся к записи и считыванию объемных фазовых голограмм в изучаемом материале. Типичным для сегнетоэлектриков является доминирование диффузионного механизма ФР эффекта [1-3], при котором записываемая фазовая решетка смещена на четверть периода относительно интерференционной картины. Эффекты нелокальности записи приводят к стационарному энергообмену между взаимодействующими в ФР кристалле пучками I_1 , I_2 , характеризующемуся коэффициентом энергообмена Γ

$$\Gamma = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_1^d I_2^0}{I_1^0 I_2^d} \right). \quad (1)$$

Здесь d — толщина кристалла (либо области взаимодействия пучков); I_1^0 , I_2^0 , I_1^d , I_2^d — интенсивности пучков соответственно до и после взаимодействия. Согласно [3], связь коэффициента Γ с параметрами материала определяется выражением

$$\Gamma = 2\pi n^3 r_{\text{эфф}} E_{\text{пр}} \sin \Phi \cos \theta_i / m\lambda, \quad (2)$$

где n — показатель преломления; Φ — угол сдвига фаз между решеткой и интерференционной картиной; λ — длина волны записывающего излучения; θ_i — половина угла между записывающими пучками; $r_{\text{эфф}}$ — эффективное значение линейного электрооптического коэффициента; $E_{\text{пр}}$ — амплитуда поля пространственного заряда; $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ — глубина модуляции. Из теории двухволнового взаимодействия следует, что интенсивности взаимодействующих пучков изменяются по закону [4]

$$I_{1,2}^d = I_0 (1 \pm [\beta \exp(\Gamma d)]^{\pm 1}), \quad (3)$$

где $I_0 = I_1^d + I_2^d$, $\beta = I_1^0/I_2^0$. При малых β

$$I_{1,2}^d \simeq I_0 \exp(\Gamma d). \quad (4)$$

Знак коэффициента Γ определяет направление энергопереноса, совпадающее с направлением, в котором фазовая решетка смещена относительно интерференционной картины. Он определяется знаком $r_{\text{эфф}}$ и типом фотоиндуцированных носителей заряда и может быть изменен поворотом кристалла на 180° либо его переполаризацией ($\mathbf{P}_s \rightarrow -\mathbf{P}_s$). Гистерезисный характер зависимости коэффициента Γ от переполаризующего поля наблюдался в кристалле СБН: Се [5] в статическом режиме. По-видимому, методика, базирующаяся на эффектах двухволнового взаимодействия в ФР сегнетоэлектриках, может найти распространение при изучении эффектов, связанных с изменением состояния их доменной структуры.

Целью настоящей работы было исследование динамики переполаризации сегнетоэлектрика голографическим методом, а также сравнение указанного метода с известными для определения его возможностей и условий применения на примере кристаллов $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$. Выбор объекта исследования обусловлен следующими его особенностями. Это одноосный сегнетоэлектрик с двумя типами антипараллельных оптически эквивалентных доменов, обладающий хорошим оптическим качеством, ФР эффектом с преобладающим диффузионным механизмом, высоким значением электрооптических коэффициентов и коэффициента стационарного энергообмена, а также невысоким коэрцитивным полем ($E_c \leq 600$ В/см) [6-8]. Кристалл $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ испытывает фазовый переход второго рода при $T_0 = 339$ К с изменением симметрии $P2_1/c \rightarrow P_c$ [9]. Перечисленные качества делают данный материал весьма удобным объектом для апробации предлагаемой методики в первую очередь из-за удобного интервала рабочих температур и низких значений переключающих полей. Измерения проводились на монокристалле, полученном методом химических транспортных реакций, с размерами $\sim 4 \times 4 \times 1.5$ мм. Ориентация образца была выбрана таким образом, чтобы взаимодействующие лазерные пучки распространялись в плоскости, совпадающей с плоскостью симметрии кристалла (010), падая на грань, параллельную кристаллографической плоскости (001). При этом нормаль к боковым граням (100), на которые наносились электроды, была близка по направлению к вектору спонтанной поляризации \mathbf{P}_s образца. В такой геометрии эксперимента обеспечивались коллинеарность волнового вектора записываемой фазовой решетки и \mathbf{P}_s , а также отсутствие эллиптической поляризации лазерных пучков, поляризованных до кристалла в плоскости их распространения либо по нормали к ней. Кристалл с электродами помещался в оптическую ячейку с нагревателем. Переполаризация осуществлялась постоянным или переменным полем, прикладываемым к электродам. Взаимодействующие пучки излучения He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 0.6328$ мкм после образца направлялись на фотодиоды ФД-22К, сигнал с которых регистрировался осциллографом С1-93 либо скоростным самопишущим потенциометром Н3003. Исследования зависимости коэффициента Γ от периода записываемой решетки показали, что максимальное его значение в нашем образце при указанных условиях эксперимента достигается при угле сведения пучков $2\theta_s = 15^\circ$ и составляет ~ 7.5 см $^{-1}$. Время формирования нелокальной ФР решетки $\tau_{\text{ФР}}$, измеренное при включении (выключении) пучка накачки, не превышало 5 мс. Отношение интенсивностей сигнального и накачивающего пучков $\beta = 0.001$.

Одновременно образец был включен в схему Сойера—Тауэра [10] для параллельного наблюдения петель диэлектрического гистерезиса $\mathbf{P}(E)$.

Проведенные исследования влияния переполаризации кристалла на двухволновое взаимодействие в $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ показали, что зависимость интенсивности сигнального пучка $I(E)$, как и $\mathbf{P}(E)$, имеет вид петли гистерезиса (рис. 1). Однако в отличие от диэлектрического гистерезиса петля $I(E)$ асимметрична по I , поскольку интенсивность сигналь-

ного пучка зависит от Γ по экспоненциальному закону (4). Определение значений произведения Γd по петле легко осуществляется: уровень нуля определяется при выключении сигнального пучка, а уровень единицы — при выключении пучка накачки. Полевая зависимость $\ln I$ имеет вид петли, практически повторяющей зависимость $P(E)$.

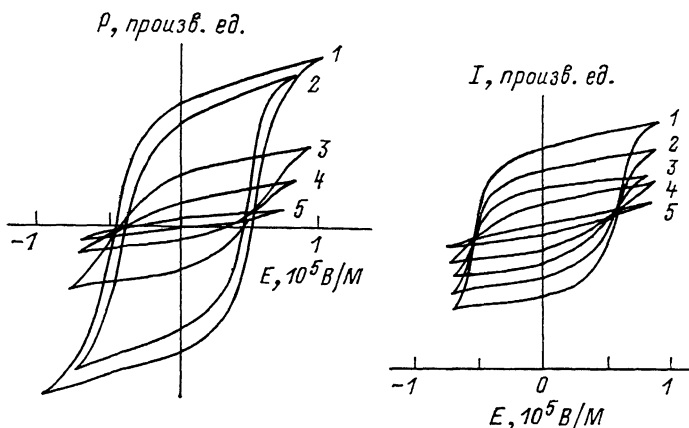


Рис. 1. Петли диэлектрического гистерезиса (а) и зависимость интенсивности сигнального пучка при двухволновом взаимодействии от переключающего поля (б) в кристалле $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ при различных температурах (К).

а: 1 — 299, 2 — 316, 3 — 328, 4 — 336, 5 — 339; б: 1 — 293, 2 — 314, 3 — 321, 4 — 329, 5 — 339.

Трансформация петель переполаризации при изменении температуры (приближении к T_0) и частоты переключающего поля иллюстрируется рис. 1, 2. Видно, что оптический аналог схемы Сойера—Тауэра позволяет получать вполне объективную информацию о характере переполаризации. Единственным ограничением является предельное значение частоты $\nu <$

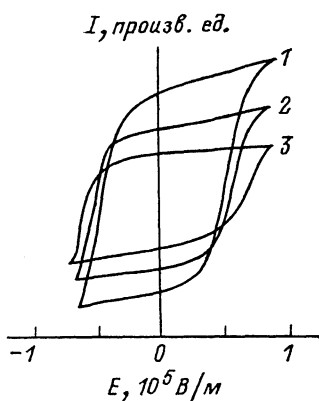


Рис. 2. «Оптические» петли переполаризации при различных частотах переключающего поля.

f , Гц: 1 — 50, 2 — 120, 3 — 200.

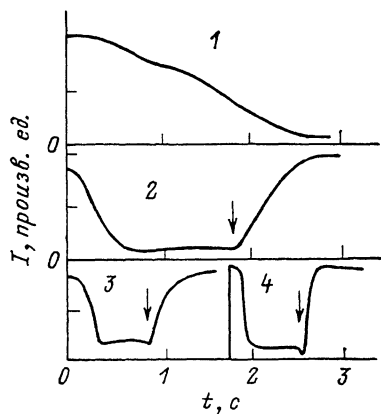
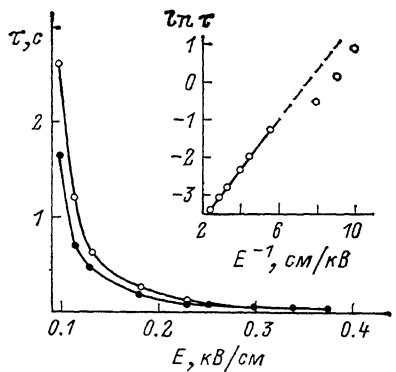


Рис. 3. Временная эволюция интенсивности сигнального пучка при переключении доменной структуры $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ при различных амплитудах переключающего импульса.

E , В/см: 1 — 100, 2 — 125, 3 — 150, 4 — 225. Стрелкой отмечены точки изменения полярности.

$< \tau_{\text{ФР}}^{-1}$. Определенное влияние на вид петель может оказать освещение образца, однако сравнение диэлектрических петель гистерезиса, полученных на освещенном и неосвещенном кристаллах, показывает, что дополнительное фотовозбуждение приводит к небольшому ($\sim 15\%$) увеличению регистрируемого коэрцитивного поля, вызванному экранированием внешнего электрического поля неравновесными носителями заряда.

Реализован также оптический аналог известного метода Мерца [10]. Последний состоит в регистрации тока в цепи, включающей в себя образец, при его переполяризации прямоугольными импульсами с различной амплитудой. В нашем эксперименте наблюдалась временная эволюция интенсивности сигнального пучка после приложения переполяризующего импульса. Характерный вид кривых переключения представлен на рис. 3. Наиболее привлекательным является то, что по величине сигнала относительно уровня, отвечающего отсутствию двухволнового взаимодействия, в любой момент времени можно судить о степени монодоменизации образца, поскольку состояние с $\Gamma=0$ отвечает равному объему антипараллельных доменов. Регистрация состояния доменной структуры может быть проведена в отсутствие внешнего поля, бесконтактно, спустя любое время



после переполяризации, в любой части образца, ограниченной областью пересечения взаимодействующих пучков.

Зависимость времени полного переключения τ от величины импульса

Рис. 4. Полевые зависимости времени переключения доменной структуры $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$ при двух различных полярностях переключающих импульсов.

На вставке — зависимость $\ln \tau(E^{-1})$ с учетом униполярности образца.

переполяризации представлена на рис. 4. В целом она хорошо описывается экспоненциальной зависимостью $\tau = \tau_0 \exp(A/E)$ при $A = 630$ В/см, что проиллюстрировано на вставке. Отклонение от экспоненты имеет место при слабых полях, когда переполяризация осуществляется только после «тренировки» образца — нескольких циклов переключения более высокими полями. Две зависимости $\tau(E)$ на рис. 4 отвечают различной полярности импульсов. Их несовпадение вызвано униполярностью образца. Величина внутреннего поля, по данным рис. 4, может быть оценена в 15 В/см.

Таким образом, предлагаемая методика может быть эффективно применена для изучения процессов переполяризации одноосных сегнетоэлектриков, обладающих ФР эффектом с нелокальным откликом. Его достоинствами являются простота реализации, дистанционность, возможность реализации в отсутствие электрических цепей, а также локальность. Ограничения в его применении связаны с требованиями к оптическим и ФР параметрам исследуемого материала, а также с высокой чувствительностью к механическим колебаниям. Наиболее перспективно, на наш взгляд, его применение для регистрации долговременных (как спонтанных, так и индуцированных) процессов изменения состояния доменной структуры и в выделенном объеме образца, т. е. в режимах, наиболее трудных для реализации традиционными методами.

Список литературы

- [1] Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 270 с.
- [2] Gunter P., Huguier J. P. // Photorefractive Materials and their Applications. Pt I. Berlin, Springer-Verlag, 1988. P. 7—74.
- [3] Kukhtarev N. V., Markov V. B., Odulov S. G. et al. // Ferroelectrics. 1979. V. 22. P. 949—964.
- [4] Винецкий В. Л., Кухтарев Н. В., Марков В. Б. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1977. Т. 41. № 4. С. 814—820.
- [5] Ma J., Liu L., Wu S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 10. P. 826—827.
- [6] Бутурлакин А. П., Гурзан М. И., Сливка В. Ю. // ФТТ. 1977. Т. 19. № 7. С. 1990—1993.

- [7] Грабар А. А., Высочанский Ю. М., Перечинский С. И. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 11. С. 3469—3472.
- [8] Грабар А. А., Батори К. А., Кикинеши А. А., Сливка В. Ю. // Сб. «Фундаментальные основы оптической памяти и среды». Киев, 1989. № 20. С. 106—108.
- [9] Carpentier C. D., Nitschè R. // Mat. Res. Bull. 1974. V. 9. N 8. P. 1097—1100.
- [10] Рудяк В. М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М.: Наука, 1986. 248 с.

Ужгородский
государственный университет

Поступило в Редакцию
7 февраля 1991 г.

