

ГИСТЕРЕЗИС ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ И КРИТИЧЕСКОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ В КРИСТАЛЛАХ РУБИНА

С.А.Басун, А.А.Каплянский, С.П.Феофилов, А.С.Фурман

В оптически возбужденном рубине обнаружен гистерезис зависимости внутреннего поля от приложенного напряжения и вольт-амперной характеристики образца, прямо подтверждающий связь образования электрических доменов при облучении с электрической неустойчивостью, обусловленной фотовольтаическим эффектом.

В ¹ было обнаружено, что интенсивное лазерное облучение концентрированного рубина при низких температурах приводит к образованию в кристаллах сильного ($\sim 10^6$ В/см) внутреннего электрического поля, которое сохраняется после выключения освещения¹⁾. В ² показано, что на самом деле при облучении рубин переходит в пространственно-неоднородное состояние с областями (доменами), в которых внутреннее поле одинаково по абсолютной величине и направлено по или против тригональной оси C_3 . Показано также ², что приложение внешнего электрического поля в процессе облучения приводит к перераспределению суммарных объемов (переключению) доменов в пользу доменов с полем, направленным вдоль приложенного. Недавно ³ предложенное теоретическое объяснение результатов ^{1, 2} связывает образование электрических доменов в облучаемом рубине с электрической неустойчивостью, обусловленной тем, что фотовольтаический ток, возникающий в центросимметричном кристалле при наличии электрического поля, по предположению направлен против поля.

В настоящей работе экспериментально обнаружены и интерпретированы гистерезисные явления, связанные с переключением фотоиндуцированных доменов в рубине во внешнем поле. Эти явления согласуются со следствиями теории ³, в частности, они позволили прямо наблюдать направленный против поля фотовольтаический ток.

Опыты проводились при $T = 77$ К на монокристаллах $Al_2O_3 : 0,5\% Cr$, в которых максимальное (насыщающееся) внутреннее поле E_s , создаваемое облучением ¹, составляет $E_s = 330$ кВ/см. На обе грани тонких ($l = 0,18$ мм) пластинок, вырезанных $\perp C_3$, нанесены прозрачные электроды. Образец освещается через электроды лучом непрерывного Аг-лазера с плотностью мощности 100 Вт/см², $\lambda = 514,5$ нм. К электродам от внешнего источника прикладывается постоянное напряжение U_0 , создающее в образце среднее поле $E_0 = U_0 l^{-1}$. При разных E_0 измеряется 1) величина стационарного электрического тока $I(E_0)$, протекающего через образец и 2) величина $\Delta v(E_0)$ псевдоштарковского дублетного расщепления R_J -линии в спектре люминесценции возбуждаемой лучом области, характеризующая внутреннее поле ^{1, 2}.

Теоретический анализ на основе феноменологической модели ³ устойчивых стационарных распределений поля в образце при разных значениях приложенного поля E_0 дает вольт-амперную характеристику образца (см. рис. 1, а). Участок 1 – 2 ($0 < E_0 < E_s$) соответствует полидоменным устойчивым состояниям образца с противоположно направленными полями в доменах $\pm E_s$ ². Ток через образец на этом участке не протекает. Участок 3 – 4 соответствует однородному (монодоменному) состоянию образца с однородным полем в образце E_0 . При этом через образец протекает ток $I(E_0)$, который при $E_0 < E_s$ направлен против приложенного поля E_0 . Таким образом, в интервале $E_t < E_0 < E_s$ имеются два стационарных состояния образца – монодоменное и полидоменное, отличающиеся значением

¹⁾ Наши опыты показали, что внутреннее поле сохраняется неопределенно долго при $T = 300$ К ² и при $T = 400$ К. Часовой отжиг кристаллов при $T = 700$ К приводил к уничтожению поля.

тока, протекающего через образец, и величиной поля в нем. Это делает возможным гистерезис в ходе $I(E_0)$ и $\Delta\nu(E_0)$ при изменении поля E_0 . Этим выводам полностью соответствуют результаты измерений (см. рис. 1).

При увеличении E_0 от нуля до $E_0 = E_s$ ток I через образец равен нулю (участок 1 – 2 на рис. 1, а). Что касается расщепления $\Delta\nu$, то согласно ² при росте E_0 в интервале $0 < E_0 < E_s$ величина $\Delta\nu$ сохраняется неизменной на уровне $\Delta\nu_s$, отвечающем внутреннему полю в доменах $\pm E_s$ (штрих-пунктир на рис. 1). Этот результат получается, если в условиях облучения прикладывать к образцу поле, стартуя для разных E_0 каждый раз от нулевого значения поля (в этом случае величина $\Delta\nu_s$ устанавливается очень быстро). Если же в интервале $0 < E_0 < E_s$ поля E_0 прикладываются последовательно путем небольших приращений E_0 , то величины $\Delta\nu$ достигают стационарного значения $\Delta\nu_s$ только за многие часы. Поэтому величины $\Delta\nu$, измеренные через реалистичные времена после приращения E_0 , отличаются от $\Delta\nu_s$ (см. рис. 1). В этих наблюдениях проявляется, очевидно, сложная кинетика перестройки доменной структуры – при изменении приложенного поля – к новому (соответствующему E_0) стационарному состоянию, характеризующемуся, в частности ^{2, 3}, определенным соотношением объемов доменов с $\pm E_s$. Темп такого преобразования тем медленнее, чем меньше изменение E_0 и – как следует из рис. 1 – чем ближе E_0 к "критической" точке $E_0 = E_s$.

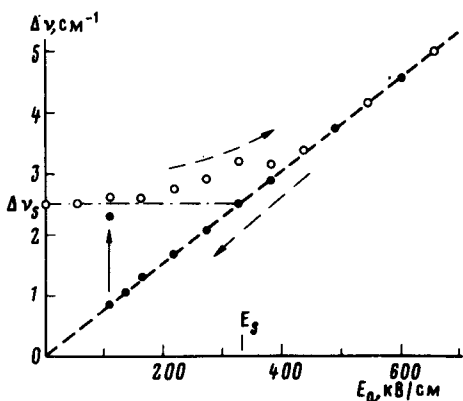
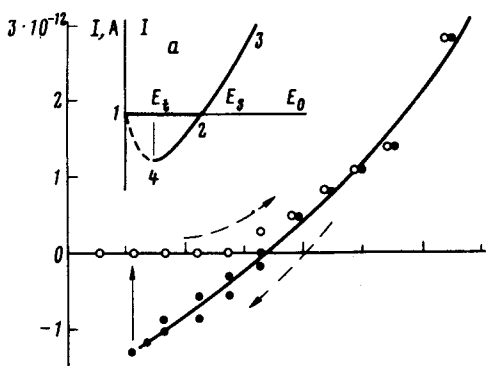


Рис. 1

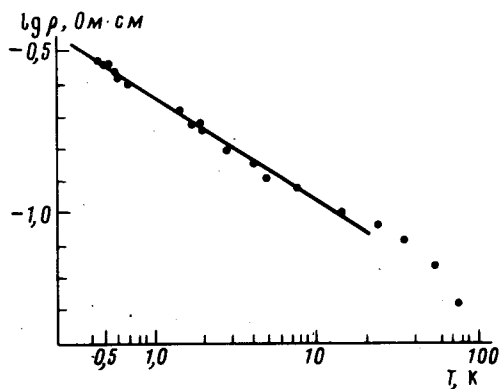


Рис. 2

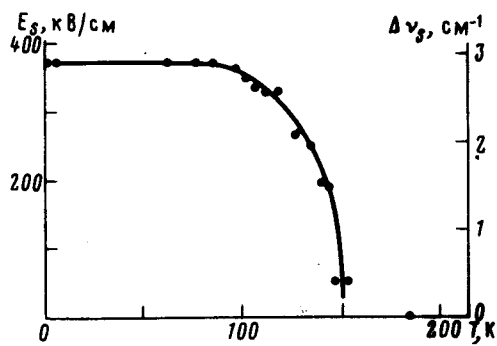


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость тока и величины псевдоштарковского расщепления от приложенного внешнего поля: \circ – увеличение E_0 , \bullet – уменьшение E_0

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика образца при $E_0 \perp C_3$

Рис. 3. Температурная зависимость стационарного внутреннего поля E_s

При дальнейшем увеличении E_0 выше точки E_s величина $\Delta\nu$ начинает расти линейно с полем, соответствуя псевдоштарковскому расщеплению $\Delta\nu(E_0)$ в однородном поле E_0 монокристаллического образца (штриховая линия, рис. 1). Через образец начинает протекать ток, возрастающий с ростом E_0 (участок 2 – 3, рис. 1, а). Максимальное достигнутое значение E_0 составляло $E_0^{max} = 650$ кВ/см.

При обратном изменении поля E_0 – уменьшении его от E_0^{max} до $E_0 = E_s$ ход зависимостей $\Delta\nu(E_0)$ и $I(E_0)$ полностью совпадает с ходом их в прямом направлении (при увеличении E_0). Однако при уменьшении E_0 ниже точки $E_0 = E_s$ обнаруживается гистерезис. Величина $\Delta\nu$ продолжает и ниже $E_0 = E_s$ соответствовать псевдоштарковскому расщеплению в приложенном поле E_0 , характерному для монокристаллического образца. Ток I при $E_0 = E_s$ меняет знак и при дальнейшем уменьшении E_0 , оставаясь отрицательным, увеличивается по абсолютной величине. Это поведение соответствует ожидаемому (участок 2 – 4 рис. 1, а) и прямо свидетельствует о сохранении монокристаллического состояния образца при обратном ходе приложенного напряжения в области $E_0 < E_s$. Примечательно, что наблюдаемый на обратной ветви гистерезиса ток направлен против электрического поля в образце. Это отражает преобладающий в этой ситуации вклад фотовольтаического тока и его отрицательный знак, что убедительно подтверждает основное предположение³.

На обратной ветви гистерезиса при $E_0 < E_s$ экспериментально обнаруживается неустойчивость монокристаллического состояния. Она проявляется через некоторое время после приложения $E_0 < E_s$ как в спаде величины (отрицательного) тока I до нуля, так и в увеличении расщепления $\Delta\nu(E_0)$ до величины $\Delta\nu_s$, что свидетельствует, очевидно, о спонтанном переходе образца в поликристаллическое состояние (на прямую ветвь гистерезиса). Переход между ветвями осуществляется тем быстрее, чем ниже E_0 ; для $E_0 = 110$ кВ/см время перехода составляет примерно час (см. вертикальные стрелки на рис. 1). Упомянем и о наблюдениях в ряде случаев незатухающих нерегулярных осцилляций I на обратной ветви гистерезиса при $E_0 < E_s$.

Следует отметить, что в ситуации, когда приложенное поле $E_0 \perp C_3$ (плоскость образцов вырезана $\parallel C_3$), вольт-амперная характеристика имеет обычный омический вид – см, рис. 2.

В заключение коснемся влияния температуры на явление фотоиндуцированных электрических доменов в рубине. На рис. 3 изображена зависимость внутреннего поля насыщения E_s от температуры, при которой происходит облучение образцов ($U_0 = 0$). Кривая $E_s(T)$ детализирует отмеченный в² критический характер температурного перехода ($T_c = 150$ К) рубина из однородного в неоднородное состояние в присутствии облучения. Наблюдалось также сильное замедление кинетики фотоиндуцированного образования доменной структуры вблизи T_c (при $T < T_c$). Этот факт, как и ход $E_s(T)$, характерны для фазовых переходов.

Авторы благодарны М.И.Дьяконову за полезные обсуждения и советы, а О.В.Тороповой – за помощь в измерениях.

Литература

1. Liao P.F., Glass A.M., Humphrey L.M. Phys. Rev. B, 1980, 22, 2276.
2. Басун С.А., Каплянский А.А., Феофилов С.П. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 492.
3. Дьяконов М.И. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39,