

Влияние толщины образцов на электронную эмиссию из сегнетоэлектрического кристалла ТГС

© А.С. Сидоркин, Н.Ю. Пономарева, С.Д. Миловидова, А.С. Сигов

Воронежский государственный университет,

394693 Воронеж, Россия

Московский институт радиотехники, электроники и автоматики,

117454 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 12 августа 1999 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований эмиссии электронов из образцов номинально чистого кристалла триглицинсульфата различной толщины. Показано, что так же как и коэрцитивное поле, пороговое поле возникновения эмиссии растет с уменьшением толщины d образца обратно пропорционально d .

Работа выполнена при частичной поддержке гранта № 2801 по программе "Университеты России — фундаментальные исследования".

Современный этап развития эмиссионной электроники диктует потребность в поиске новых эмиссионных материалов, в качестве которых хорошие перспективы имеют сегнетоэлектрики. Действительно, оказывается, что эмиссия — это неотъемлемая часть релаксационных процессов, сопровождающих практически любое изменение макроскопической поляризации сегнетоэлектрических материалов [1–4].

Наиболее радикальным и, значит, обещающим максимальный эмиссионный эффект способом изменения макроскопической поляризации сегнетоэлектрика является его переключение [2]. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал, свидетельствующий о связи эмиссии и процессов переполаризации сегнетоэлектриков. В частности, показано, что, во-первых, эмиссия наблюдается, как правило, только в сегнетоэлектрической фазе, где существует спонтанная поляризация. Во-вторых, она появляется только при изменении полярного состояния в образце. При воздействии на сегнетоэлектрический образец переменного электрического поля эмиссионный сигнал наблюдается только в том полупериоде изменения внешнего поля, когда вблизи поверхности образца, являющейся активной в эмиссии, появляется отрицательный нескомпенсированный электрический заряд [5].

Анализ совокупности указанных фактов показывает [1,6], что с наибольшей вероятностью причиной наблюдаемой эмиссии является суммарный нескомпенсированный заряд, который появляется вблизи поверхности материала при изменении полярного состояния образца.

Взаимосвязь процесса переключения и эмиссии электронов из сегнетоэлектриков должна проявляться в корреляции основных параметров, характеризующих эти процессы. Проблема связи параметров переключения и эмиссионных характеристик обсуждалась в работах [7–9], где указывалось на наличие аналогичной зависимости от температуры, степени дефектности образца, типа сегнетоэлектрика (слабый, обычный) для

коэрцитивного поля E_c и порогового поля возникновения эмиссии E_{th} . В частности, в работах [7,8], посвященных изучению пороговых полей в триглицинсульфате, легированном примесью ионов хрома, было показано, что возрастание концентрации примеси вместе с ростом E_c приводит к соответствующему увеличению порогового поля в температурном интервале 25–49°C.

Сравнительный анализ экспериментальных данных по изучению E_{th} в слабом сегнетоэлектрике гептагерманате лития и обычном сегнетоэлектрике триглицинсульфате также подтверждает идею о корреляции порогового и коэрцитивного полей [9]. Действительно, в слабых сегнетоэлектриках поле E_c очень высоко и составляет 5–25 кВ/см даже вблизи точки Кюри, что на 1–2 порядка величины превышает значение коэрцитивных полей для классических сегнетоэлектриков. Подобное соотношение обнаружено в эксперименте и между пороговыми полями E_{th} , измеренными в слабых и обычных сегнетоэлектриках в аналогичных условиях.

Учитывая, что коэрцитивное поле существенно зависит от толщины исследуемых материалов, естественно предположить, что пороговое поле эмиссии также будет зависеть от толщины образца. Проверке данного предположения и посвящена настоящая работа.

1. Методика эксперимента и результаты

Как и в предыдущих работах, измерения плотности тока эмиссии j_{em} в данной работе были выполнены стандартным методом [10] в вакууме $6.5 \cdot 10^{-3}$ Па. Все измерения проводились на образцах полярного среза монокристалла номинально чистого триглицинсульфата (ТГС) с площадью 20–30 мм² и толщинами в диапазоне 0.4–2 мм. Образцы имели электроды из сусального золота. Эмиссия электронов измерялась в области зазора в ближнем к ВЭУ электроде. Ширина указанного зазора составляла приблизительно 1 мм. В качестве

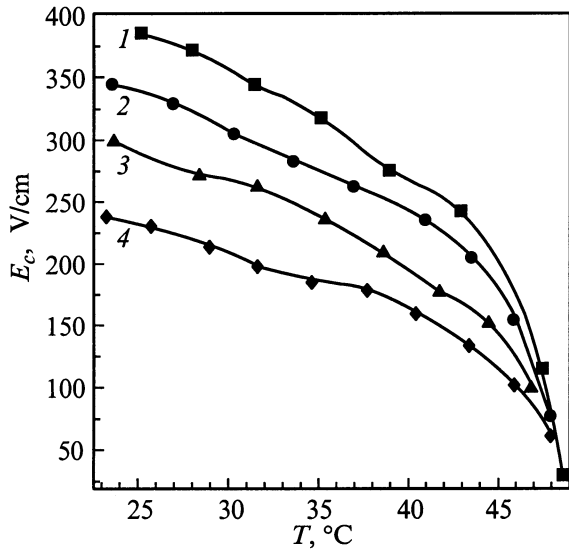


Рис. 1. Зависимости коэрцитивного поля E_c от температуры для образцов чистого монокристалла ТГС различной толщины: d (mm): 1 — 0.45, 2 — 1.03, 3 — 1.3, 4 — 1.98.

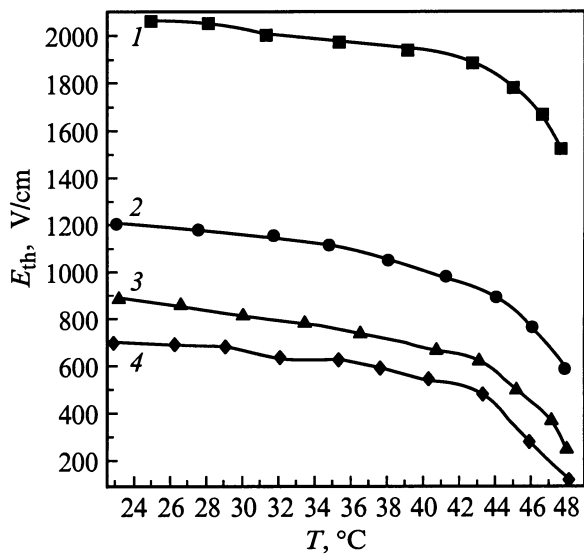


Рис. 2. Зависимости порогового поля E_{th} от температуры для образцов чистого монокристалла ТГС различной толщины: d (mm): 1 — 0.45, 2 — 1.03, 3 — 1.3, 4 — 1.98.

стимулирующего поля использовалось синусоидальное электрическое поле с амплитудой 5–5000 В/см и частотой 50 Гц. Исследования проводились в температурном интервале 25–55 °С.

Проведенные измерения показали следующее.

Как и в предыдущих экспериментах, на всех исследованных образцах электронная эмиссия наблюдалась только в сегнетоэлектрической фазе. Положение высокотемпературной границы температурного интервала, в котором регистрировалась эмиссия, приблизительно

но соответствует температуре перехода в неполярное состояние T_c .

Для всех исследуемых температур коэрцитивное поле образца убывает при приближении к температуре фазового перехода, обращаясь в ноль в T_c . Как видно из сравнения температурных зависимостей коэрцитивного поля, рассчитанного по петлям диэлектрического гистерезиса для различных толщин исследуемых образцов (рис. 1), уменьшение толщины образцов приводит к соответствующему росту численного значения коэрцитивного поля во всем исследуемом интервале температур.

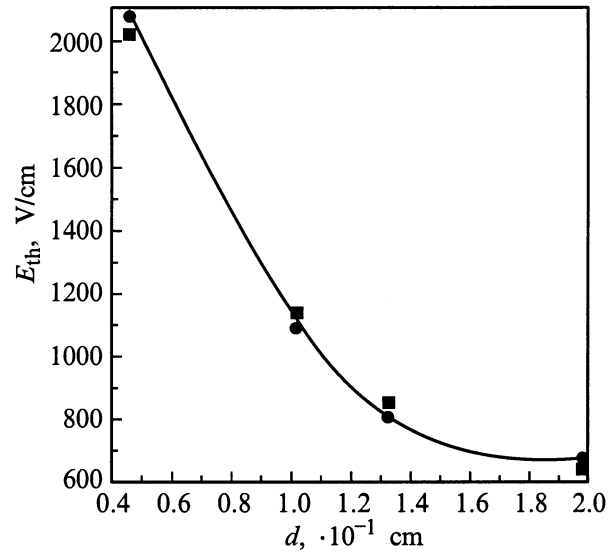


Рис. 3. Зависимость порогового поля E_{th} от толщины образцов чистого монокристалла ТГС при температуре 25 °С.

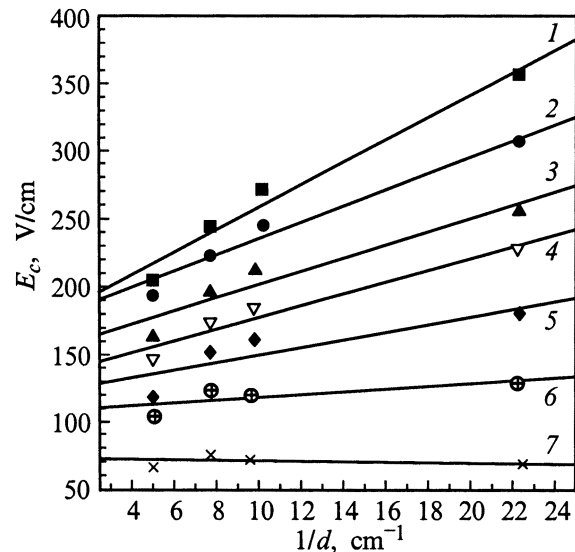


Рис. 4. Зависимость коэрцитивного поля E_c от обратной толщины образца для чистого монокристалла ТГС при различных температурах: T (°С): 1 — 24, 2 — 27, 3 — 30, 4 — 35, 5 — 40, 6 — 45, 7 — 48.

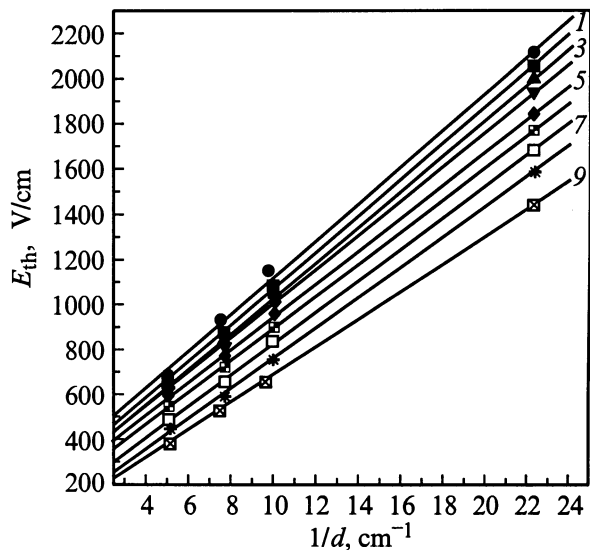


Рис. 5. Зависимость порогового поля E_{th} от обратной толщины образца для чистого монокристалла ТГС при различных температурах: T ($^{\circ}\text{C}$): 1 — 24, 2 — 27, 3 — 30, 4 — 35, 5 — 38, 6 — 40, 7 — 44, 8 — 47, 9 — 48.

Аналогичные экспериментальные зависимости получены и для порогового поля E_{th} возникновения электронной эмиссии. Так же как и коэрцитивное поле, пороговое поле возникновения эмиссии является убывающей функцией температуры (рис. 2). Кроме того, наблюдается нелинейное возрастание (рис. 3) порогового поля возникновения эмиссии E_{th} с уменьшением толщины образцов во всем диапазоне температур, соответствующем сегнетоэлектрической фазе. Обработка полученных зависимостей показывает, что пороговое поле возникновения эмиссии, как и коэрцитивное поле, растет при уменьшении толщины образца d обратно пропорционально d (рис. 4, 5). При этом отмечается факт некоторого превышения пороговым полем значения коэрцитивного поля E_c . Численное значение указанного различия не является постоянным для исследуемого материала и зависит от размеров образцов и, в частности, от их толщины. Особенно сильно указанный эффект проявляется при исследовании тонких образцов, имеющих толщину менее 1 мм.

2. Обсуждение полученных результатов

Практически все полученные результаты согласуются с предлагаемой выше схемой, объясняющей возникновение эмиссии при изменении полярного состояния в сегнетоэлектриках освобождением зарядов из поверхностных электронных состояний под действием поля нескомпенсированных зарядов. На поверхности сегнетоэлектриков имеется связанный поверхностный заряд, обусловленный обрывом вектора спонтанной поляризации P_s . В

равновесном состоянии при данной температуре поле связанных зарядов скомпенсировано свободными зарядами, притекающими к поверхности за счет собственной проводимости сегнетоэлектрического материала (которая всегда имеется в реальных кристаллах) или среды, в которой он находится. Нарушение баланса указанных зарядов, происходящее, например, при переполяризации образцов, приводит к возникновению электрического поля результирующего заряда в поверхностном слое, устанавливающегося в течение короткого времени обращения вектора P_s . При благоприятном направлении это поле может ускорять электроны и вызывать эмиссию.

Как уже отмечалось, переполяризация является одним из наиболее действенных способов создания нескомпенсированных зарядов на поверхности сегнетоэлектрика. Для осуществления процесса переключения образца необходимо приложение внешних полей, превышающих коэрцитивное. Изменение величины коэрцитивного поля E_c по какой-либо причине должно вызывать увеличение вместе с ним и порогового поля эмиссии.

Как известно, коэрцитивное поле не является универсальным параметром материала, а зависит от целого ряда различных факторов, в том числе и от толщины образца. В большинстве теоретических моделей [11] и экспериментальных данных [12] отмечается обратно пропорциональная зависимость коэрцитивного поля $E_c(d, T) = E_c^0(T) + \frac{A_c(T)}{d}$ от толщины образца. Как видно из рис. 4, использование указанной зависимости позволяет описать и полученные в работе данные по кристаллу триглицинсульфата. При этом при комнатной температуре значения величин E_c^0 и A_c равны 200 В/см и 8 В соответственно. С повышением температуры значения величин E_c^0 и A_c , характеризующих начальную ординату и угол наклона соответствующих прямых, уменьшаются.

Согласно рис. 5 пороговое поле возникновения эмиссии может быть описано аналогичной функцией $E_{th}(d, T) = E_{th}^0(T) + \frac{A_{th}(T)}{d}$. Здесь E_{th}^0 — гипотетическое значение порогового поля для бесконечно толстых образцов, равное 270–300 В/см при комнатной температуре. При приближении к точке фазового перехода данная величина уменьшается, что, по-видимому, связано с аналогичной зависимостью соответствующего слагаемого в коэрцитивном поле. Параметр $A_{th}(T)$ при комнатной температуре равен 70 В и также убывает при приближении к точке Кюри. Таким образом, характер поведения порогового поля эмиссии для образцов триглицинсульфата различной толщины подобен зависимости коэрцитивного поля, что свидетельствует о взаимосвязи указанных величин.

Определенное различие в поведении величин E_c и E_{th} не должно вызывать удивления, поскольку в формировании процесса эмиссии играет роль не просто процесс переключения, а факт создания при переключении поля нескомпенсированных зарядов, достаточного для эмиссии.

Список литературы

- [1] А.М. Косцов, А.С. Сидоркин, В.С. Зальцберг, С.П. Грибков. ФТТ **24**, 3436 (1982).
- [2] Г.И. Розенман, В.А. Охапкин, Ю.Л. Чепелев, В.Я. Шур. Письма в ЖЭТФ **39**, 397 (1984).
- [3] K. Biedrzycki. Phys. Stat. Sol. (A) **109**, K79 (1988).
- [4] H. Gundel, J. Handerek, H. Riege. J. Appl. Phys. **69**, 2, 975 (1991).
- [5] K. Biedrzycki, R. Bihan. Ferroelectrics **12b**, 253 (1992).
- [6] A.S. Sidorkin, В.М. Darinskii. Ferroelectrics **111**, 325 (1997).
- [7] A.S. Sidorkin, S.D. Milovidova, N.Yu. Ponomareva, O.V. Rogazinskaya. Ferroelectrics **219**, 23 (1998).
- [8] А.С. Сидоркин, Н.Ю. Пономарева, С.Д. Миловидова. ФТТ **41**, 9, 1675 (1999).
- [9] А.С. Сидоркин, П.В. Логинов, А.М. Саввинов, А.Ю. Кудзин, Н.Ю. Короткова. ФТТ **38**, 2, 624 (1996).
- [10] A.S. Sidorkin, В.М. Darinskii, A.P. Lazarev, A.M. Kostsov. Ferroelectrics **143**, 209 (1993).
- [11] A.K. Tagantsev. Ferroelectrics **184**, 79 (1996).
- [12] Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов, Н.Н. Крайник, А.И. Соколов, Н.К. Юшин. Физические основы сегнетоэлектрических явлений. Наука, Л. (1985). 367 с.