

Кинетика поляризационного тока в широкозонном фотопроводнике Pb_3O_4

© В.Т. Аванесян[†], В.А. Бордовский, Е.П. Баранова, Г.И. Грабко

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 апреля 2007 г. Принята к печати 24 апреля 2007 г.)

Приведены результаты исследования процессов изотермической поляризации слоев высокоомного полупроводника Pb_3O_4 в постоянном электрическом поле различной напряженности, в темновом и световом режимах. Для интерпретации полученных данных привлекается эстафетный механизм переноса заряда по локальным состояниям запрещенной зоны. Получены значения параметров, характеризующих релаксационные явления: контактной емкости, ширины области накопления заряда и его эффективной подвижности.

PACS: 73.40.Sx, 73.50.Pz, 77.22.Ej

1. Введение

Среди компонентов окисно-свинцового ряда ортоплюмбат свинца Pb_3O_4 отличается стабильность фазового состава в тонких слоях и соответствие спектральной области фотоэлектрической чувствительности видимому диапазону, что обеспечивает значительный потенциал практического применения в качестве базового материала твердотельной оптоэлектроники [1,2].

Поляризационные и зарядовые процессы лежат в основе функционирования большинства полупроводниковых приборов, определяя условия создания потенциального рельефа на поверхности фоточувствительных слоев, а также изменения его при световом возбуждении. Для установления механизмов переноса заряда и природы локальных центров в высокоомных фотопроводниках эффективным оказывается экспериментальное изучение и теоретический анализ механизмов поляризации при наложении электрического поля различной напряженности.

Проведенные ранее исследования [3] позволили детализировать спектр локальных состояний в Pb_3O_4 , характеризуемый как дискретной структурой, так и областями квазинепрерывного распределения. Темп генерации носителей заряда с ловушечных уровней и захват на них оказывают влияние на инерционные свойства электронных приборов, формируемых на основе высокоомных материалов. Исследование временных зависимостей токов изотермической релаксации дает возможность получить информацию о кинетике заполнения неоднородно расположенных по толщине полупроводника центров захвата, а также о процессах, протекающих в приэлектродных областях [4,5].

В данной работе представлены результаты исследования релаксации процессов поляризации в фотопроводящих слоях Pb_3O_4 .

2. Эксперимент

Измерения временных зависимостей токов поляризации проводились на слоях Pb_3O_4 со связующим кремнийорганическим лаком, нанесенным на стеклянные подложки с проводящей прозрачной пленкой двуокиси олова. В качестве верхнего электрода площадью $S = 1 \text{ см}^2$ на поверхность слоя толщиной порядка 50 мкм наносилась серебряная паста. Поляризация исследуемых образцов осуществлялась при использовании источника стабилизированного постоянного напряжения $U = 50\text{--}200 \text{ В}$. Кривые релаксации тока регистрировались по стандартной методике с применением электрометрического усилителя В7-30 (диапазон измеряемых токов разной полярности составлял $10^{-15}\text{--}10^{-7} \text{ А}$) и генератора инфранизких частот Г6-15, обеспечивающего напряжение развертки. Освещение белым светом интенсивностью 235 мкВт/см^2 проводилось через прозрачный электрод, при этом обеспечивалась предварительная изоквантовая и изоэнергетическая градуировка источника светового возбуждения. Все измерения выполнялись при комнатной температуре $T = 293 \text{ К}$.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследования кинетики изотермических токов поляризации в слоях Pb_3O_4 при различных уровнях напряженности электрического поля в темновом режиме измерения и при освещенности образца. Форма кривых релаксационных зависимостей поляризации в Pb_3O_4 позволяет выделить 2 фазы процесса — быструю и медленную, отвечающие временным интервалам $\Delta t_1 = 1\text{--}10 \text{ с}$ и $\Delta t_2 = 10\text{--}100 \text{ с}$. На начальном участке после включения напряжения в поликристаллических слоях Pb_3O_4 наблюдается спад тока, протекающий согласно эмпирическому соотношению Кюри–ван-Швейдлера [6,7] $I \propto t^{-n}$ ($n = 0.8$), переходящему в экспоненциальную зависимость. Приведенный универсальный закон релаксации коррелирует с естественной неупорядоченностью структуры оксидов

[†] E-mail: avanesyan@mail.ru

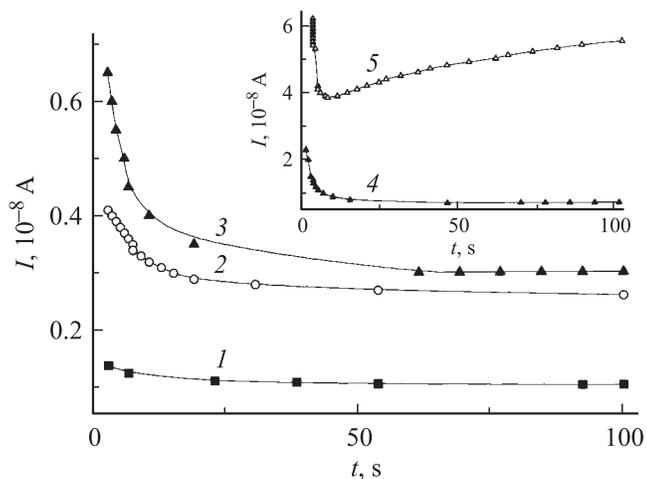


Рис. 1. Кинетика токов поляризации в слоях Pb_3O_4 при темновом режиме измерения и напряженности электрического поля E , 10^6 В/м: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, 4, 5 — 4 (при освещении).

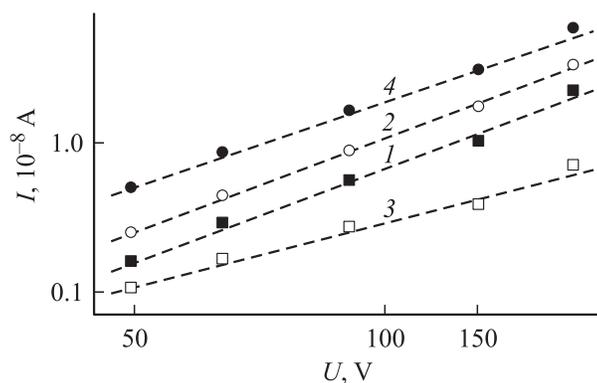


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образца слоя Pb_3O_4 , измеренные в темновом (1, 3) и световом (2, 4) режимах измерения для временных интервалов $\Delta t_1 = 2$ с (1, 2) и $\Delta t_2 = 100$ с (3, 4).

в системе Pb—O, обладающих квазинепрерывным спектром локальных энергетических уровней [1,8]. Остаточная проводимость при этом контролируется захватом носителей на глубокие центры, а также барьерами на межкристаллитной границе.

Для сравнительно слабых электрических полей наблюдается спад тока со временем с последующим установлением уровня, сопоставимого с током утечки. Полученные результаты указывают на симбатный характер кинетики поляризационного процесса в темноте и при освещении. Вольт-амперные характеристики, построенные по начальному и конечному участкам временной зависимости тока поляризации (рис. 2), обнаруживают существенное возрастание фототока на заключительной стадии процесса релаксации.

При освещении образца, начиная с некоторой величины напряжения поляризации, в зависимости $I(t)$ обнаруживается минимум (см. вставку на рис. 1). В этом случае уровень приложенного поля и световое возбуждение исследуемых слоев создают условия, при которых ток утечки становится близким по значению к току, определяемому емкостью контакта. В этом случае сказывается проявление фотоемкостного эффекта, ранее установленного для Pb_3O_4 [9]. Вклад в фотоемкость, помимо неравновесных носителей, образуемых за счет фотогенерации, может давать изменение зарядового состояния центров захвата в запрещенной зоне с широким спектром времен жизни.

Наблюдаемая спадающая релаксация тока сопровождается накоплением в структуре заряда, величина которого может быть определена по площади, лежащей под кривой зависимости тока от времени. На рис. 3 приведены зависимости значения этого заряда от приложенного напряжения в темновом и световом режимах измерения. Анализ данных, полученных, в частности, для уровня напряженности электрического поля $E = 10^6$ В/м, указывает на то, что величина контактной емкости $C_c = Q/U = 2.4 \cdot 10^{-9}$ Ф почти на порядок превышает геометрическую емкость образца, определенную по стандартной формуле $C = \epsilon \epsilon_0 S/L = 3.5 \cdot 10^{-10}$ Ф, где ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — электрическая постоянная, S — площадь контакта, L — толщина слоя. Указанное обстоятельство свидетельствует о накоплении заряда вблизи контактных или межзеренных барьеров [10].

Для интерпретации данных кинетики токов изотермической релаксации привлекают ряд механизмов: электродную поляризацию, дипольную ориентацию, накопление пространственного заряда, прыжковый обмен носителей между локализованными состояниями и др. Реальная природа процесса может быть установлена с учетом таких факторов, как характеристики электрического поля, геометрические параметры образца, материал электродов, температура, уровень и спектральный состав фотовозбуждения.

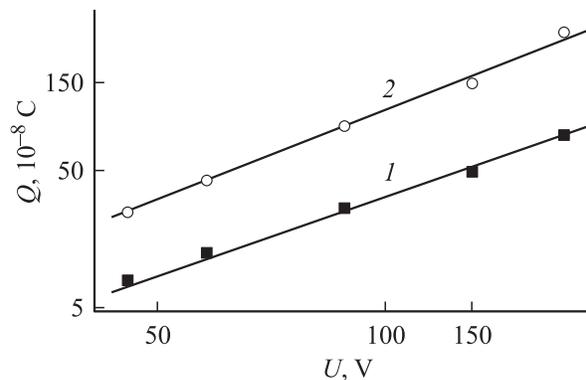


Рис. 3. Зависимости величины заряда, накопленного в слое Pb_3O_4 , от напряжения U в темновом (1) и световом (2) режимах измерения.

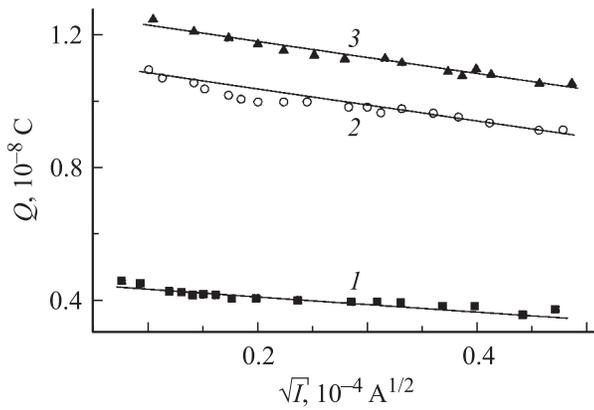


Рис. 4. Зависимости величины заряда, накопленного в слоях Pb_3O_4 за фиксированные промежутки времени действия напряжения, от значений тока, соответствующих концам этих промежутков, в электрических полях напряженностью E , 10^6 В/м: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3.

Межзеренные границы поликристаллических материалов играют важную роль в характеристиках полупроводниковых материалов, свойства которых, например диэлектрические параметры и проводимость, варьируются от зерна к зерну. Длинновременные релаксационные процессы, установленные для исследуемых структур на основе поликристаллических слоев Pb_3O_4 , могут сопровождаться также процессом формирования на границе зерно–прослойка области, обедненной носителями заряда. Неоднородный потенциальный рельеф пограничных зон в исследуемой поликристаллической структуре, характеризуется поведением, эквивалентным влиянию квазинепрерывного энергетического спектра ловушек.

В рамках модели эстафетного механизма, учитывающего перенос заряда по локальным центрам в запрещенной зоне [11], величина накопленного заряда при малых временах поляризации t_p определяется соотношением

$$Q = \mu_{\text{eff}} \varepsilon \varepsilon_0 S \frac{U^2}{L^3} t_p. \quad (1)$$

Здесь μ_{eff} — эффективная подвижность носителей, расчет которой приводит к значению $3 \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Зная величину максимального заряда, накопленного в приконтактной области, и геометрические размеры этой области, аналогично выводам [12] можно оценить значение концентрации заряженных центров, ответственных за процессы накопления зарядов:

$$N_t = \frac{Q}{ed_c S}. \quad (2)$$

С учетом размера области сосредоточения заряда $d_c = \varepsilon \varepsilon_0 S / C_c = 8.4 \cdot 10^{-4}$ см оказалось возможным определить $N_t = 8.3 \cdot 10^{14}$ cm^{-3} .

Для интервала времени и напряжений поляризации, соответствующих спадающим ветвям релаксационных

характеристик, в рамках модели эстафетного механизма должно выполняться уравнение

$$Q = \alpha I^{1/2}, \quad (3)$$

где Q — заряд, накопленный в слое, I — величина тока, соответствующая заданному интервалу времени, α — постоянная, зависящая от геометрических размеров слоя, емкости контакта и других параметров.

Зависимость, построенная в координатах формулы (3), представлена на рис. 4. Ее экстраполяция для величины напряженности поля $E = 10^6$ В/м при $Q = 0$ приводит к значению тока отсечки $I_0 = 3.6 \cdot 10^{-9}$ А.

Согласно используемой нами теории, величина эффективной подвижности с учетом выполнения соотношения (3) может быть определена из формулы

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{L^3 I_0}{U^2 C_c d_c}. \quad (4)$$

Расчет по выражению (4) дает $\mu_{\text{eff}} = 8.2 \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что по порядку величины согласуется с результатом, полученным из соотношения (1), установленного для эстафетного механизма переноса заряда.

4. Заключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что процесс электропроводности в поликристаллических слоях ортоплюмбата свинца Pb_3O_4 согласуется с теорией эстафетного механизма переноса заряда в условиях неоднородного распределения локальных центров в структуре металл–высокоомный полупроводник–металл.

Изучение релаксации тока, обусловленной накоплением и перераспределением объемного заряда, расширяет представления о механизмах фотопроводимости и переноса заряда в соединениях $A^{IV}B^{VI}$ с переменной ионно-ковалентной связью и тенденцией к формированию естественно-неупорядоченной структуры.

Список литературы

- [1] Г.А. Бордовский, В.А. Извозчиков. *Естественно-неупорядоченный полупроводниковый кристалл* (СПб., Образование, 1997).
- [2] K. Yuji. *Kagky Kogyo*, **36** (7), 507 (1985).
- [3] V.T. Avanesyan, A. Badakhshan. *Proc. of 10th Int. Symp. on Electrets ISE 10* (Delphi, Greece, 1999) p. 205.
- [4] J.G. Simmons, M.C. Tam. *Phys. Rev. B*, **7** (8), 3706 (1973).
- [5] В.Т. Аванесян, В.А. Бордовский, Р.А. Кастро. *ФТП*, **31** (11), 1340 (1997).
- [6] A.K. Jonsher. *Universal Relaxation Law* (London, Chelsea Dielectric Press, 1996).
- [7] K.L. Ngai, A.K. Jonsher, C.T. White. *Nature*, **277** (5693), 185 (1979).

- [8] V.T. Avanesyan, V.A. Bordovskii. J. Non-Cryst. Sol., **351**, 2849 (2005).
- [9] V.T. Avanesyan, V.A. Bordovskii, S.A. Potachev. J. Non-Cryst. Sol., **305**, 136 (2002).
- [10] В. Хейванг. *Аморфные и поликристаллические полупроводники* (М., Мир, 1987) с. 160.
- [11] Б.Л. Тиман. ФТП, **7** (2), 225 (1973).
- [12] С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов. Неорг. матер., **25** (2), 212 (1989).

Редактор Т.А. Полянская

Kinetics of polarization current in the wide band gap Pb_3O_4 photoconductor

V.T. Avanesyan, V.A. Bordovskij, E.P. Baranova, G.I. Grabko

Herzen State Pedagogical University of Russia,
191186 St. Petersburg, Russia

Abstract Results of study of isothermal polarization on high-resistance semiconductor layers of Pb_3O_4 in the constant electric field of various intensity for dark and light modes of measurements are presented. For interpretation of the received data the go-ahead mechanism of charge transfer on local states of forbidden zone is involved. Values of the parameters describing the relaxation phenomena such as contact capacity, width of charge storage area and effective mobility of charge are derived.