

УДК 621.72 : 621.315.592 : 537.3

Н. Э. Косцова, Е. Г. Сальман

(Новосибирск)

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НА КОНТАКТАХ НА ПРОЦЕСС
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ
В ПОЛУПРОВОДНИКЕ**

В рамках простой модели полупроводника, содержащего один донорный уровень при не полностью блокирующих контактах, показана возможность появления пика термостимулированной деполяризации (ТТСД), вызванного инжекцией электронов из контакта. Проанализированы условия появления этого пика. Показано, что инжекция электронов из контактов может вызвать инверсию знака ТТСД. Эта инверсия определяется соотношением энергетического положения донорного уровня и высот потенциальных барьеров на катоде и аноде.

Введение. Метод токов термостимулированной деполяризации (ТТСД) широко используется для определения параметров локализованных состояний в полупроводниках и диэлектриках [1—4]. Как правило, предполагается, что отдельные пики ТТСД обусловлены освобождением носителей заряда с локальных центров. В работах [5, 6] было показано, что высокотемпературный пик ТТСД может быть обусловлен процессом экранирования неподвижного заряда, локализованного на глубоких уровнях, равновесными носителями, обеспечивающими собственную [5] или примесную [6] проводимость образца. Однако влияние условий на контактах на ТТСД в теоретических моделях практически не рассматривалось, хотя предположение об их возможном влиянии высказывалось ранее в [1, 4]. Анализ кривых ТТСД обычно проводился для условий растекания избыточного заряда, инжектированного в образец. Влияние граничных условий на контактах на поведение ТТСД в полупроводниках при наличии в них неподвижного заряда детально не рассматривалось.

В настоящей работе методом численного моделирования исследуется влияние граничных условий на контактах на спектр тока ТТСД полупроводника заряженной структуры металл—полупроводник—металл (МПМ).

Модель. В реальном эксперименте для широкого класса полупроводников достаточно трудно создать идеальные омические контакты. Полностью блокирующие контакты нуждаются в диэлектрической прослойке с заданными параметрами, которые также не всегда удается обеспечить на практике. Поэтому особый интерес представляет случай, когда на границе металл—полупроводник существует энергетический барьер, придающий контакту блокирующие свойства. Ниже под блокирующим контактом будем подразумевать такой контакт, при котором концентрация электронов на границе металл—полупроводник (n_k) меньше, чем в зоне проводимости полупроводника (n_c). В стационарном состоянии ток через такой контакт имеет конечное значение и равен $e\mu n_k E_k$ (μ — подвижность носителей заряда, E_k — напряженность электрического поля на катоде) [7].

Для исследования влияния условий на границе МП на спектр ТТСД использовалась замкнутая система уравнений, включающая в себя уравнение кинетики перезарядки донорного уровня (1), уравнение непрерывности (2), уравнение Пуассона (3), уравнение полного тока (4) и условие постоянства напряжения, поданного на образец, (5):

$$\partial n_i(x, t)/\partial t = v\sigma n_c(x, t)(N_i - n_i(x, t)) - v\sigma N_c \exp(-E_i/kT)n_i(x, t), \quad (1)$$

$$\partial j_c(x, t)/\partial x = -\partial \rho(x, t)/\partial t, \quad (2)$$

$$\partial E(x, t)/\partial x = \rho(x, t)/\epsilon\epsilon_0, \quad \rho(x, t) = e(n_c(x, t) + n_i(x, t) - N_i), \quad (3)$$

$$j(t) = j_c + j_{cm} = e\mu n_c(x, t)E(x, t) + \epsilon\epsilon_0 \partial E/\partial x, \quad (4)$$

$$\int_0^d E(x, t)dx = E_0 d. \quad (5)$$

В режиме ТТСД условие (5) приобретает вид

$$\int_0^d E(x, t)dx = 0, \quad (5a)$$

где n_i — концентрация носителей заряда на донорных центрах; σ — сечение захвата; v — тепловая скорость электронов; N_c — плотность состояний в зоне проводимости; V — напряжение поляризации; d — толщина образца; E_i — энергия донорного уровня; N_i — концентрация донорных центров; $E_0 = V/d$; j_c — ток проводимости; ρ — плотность объемного заряда. Концентрацией собственных носителей n_i при записи уравнений (1)–(5) вследствие $n_i \ll n_c$, n_i пренебрегалось.

При моделировании кривой ТТСД начальным состоянием являлось стационарное состояние, достигаемое предварительной поляризацией образца напряжением V . Исходные распределения $n_c(x)$, $n_i(x)$, $E(x)$ получались решением системы (1)–(5) при фиксированной температуре (300 К) и начальных условиях

$$n_c(x, 0) = \sqrt{N_i N_c \exp(-E_i/kT)}, \quad (6)$$

$$n_i(x, 0) = N_i - n_c, \quad (7)$$

соответствующих электронейтральности образца. Из (1)–(5) нетрудно показать, что в стационарном состоянии напряженность электрического поля на катоде (E_k), полный запасенный заряд в образце (Q_n) и положение его центра (X_c) можно приближенно представить как

$$E_k = \sqrt{2eN_i V/\epsilon\epsilon_0},$$

$$Q_n = \sqrt{2eN_i V/\epsilon\epsilon_0},$$

$X_c = L/2$, L — протяженность области объемного заряда.

Для расчета кривых ТТСД уравнения (1)–(5) решались при линейном изменении температуры во времени $T = T_0 + \alpha t$ и следующих граничных условиях:

$$n_c(0, t) = n_k(t),$$

$$n_c(d, t) = n_a(t),$$

справедливых для термоэлектронной эмиссии из электродов [7]. Для «замораживания» исходного состояния T_0 выбиралась равной 77 К.

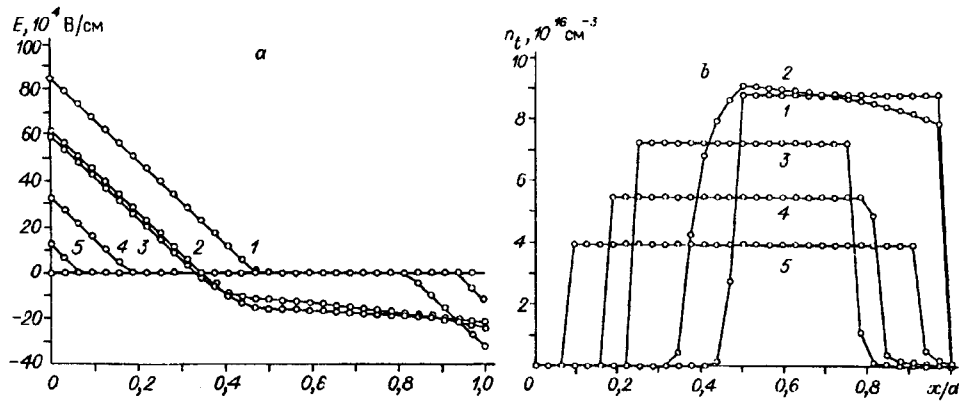


Рис. 1. Распределения напряженности электрического поля (а), концентрации электронов на донорных центрах (б) по объему образца после поляризации ($V = 20$ В) (1) и в течение процесса деполяризации ($V = 0$) (2—5) при различных температурах:

1 — 77 К, 2 — 97 К, 3 — 163 К, 4 — 358 К, 5 — 554 К; $E_t = 0,25$ эВ, $N_t = 10^{17}$ см $^{-3}$, $\varphi_k = 0,75$ эВ, $\varphi_a = 0,45$ эВ, $T_0 = 300$ К

Численное решение системы уравнений (1)—(5), в результате которого определялись зависимости: $E(x, t)$, $n_i(x, t)$, $n_c(x, t)$, $j_c(x, t)$, $j_{cm}(x, t)$, $j(t)$, $Q_n(x, t)$ и $X_{ц}(t)$, выполнялось методом прогонки [8].

Результаты и обсуждения. 1. Блокирующий контакт. На рис. 1, а приведены пространственные распределения напряженности электрического поля $E(x, t)$ в момент, предшествующий окончанию процесса поляризации (кривая 1) и в процессе деполяризации для различных температур (кривые 2—5) в образце с блокирующим катодом ($\varphi_k > E_t$). Соответствующие распределения концентрации электронов на энергетическом уровне представлены на рис. 1, б.

Сразу после закорачивания электродов образца напряженность электрического поля в каждой его точке уменьшается на величину E_0 , что приводит к изменению знака поля вблизи анода. Как следствие этого, появляется возможность инжекции электронов в образец из анода. Поэтому на поведение ТТСД полупроводника с блокирующим катодом и одним уровнем в запрещенной зоне оказывают влияние два процесса: 1) перераспределение электронов, освобожденных с донорного уровня в зону проводимости, не меняющее полный заряд

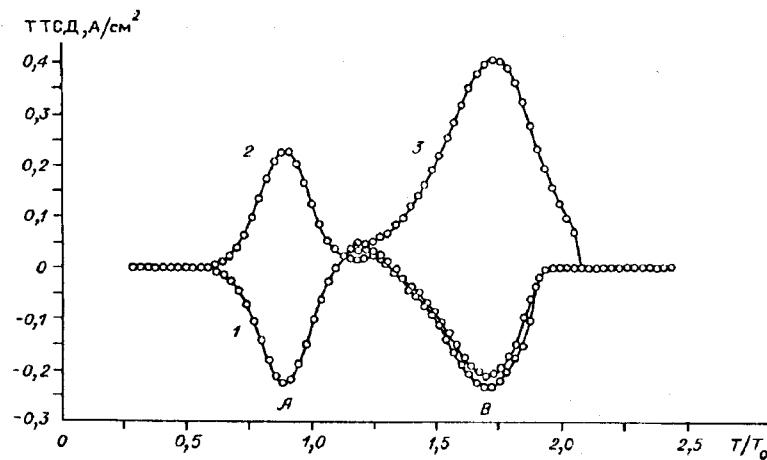


Рис. 2. Спектр ТТСД:

$V = 20$ В (1, 3), $V = -20$ В (2), $\varphi_k = 0,75$ эВ, $\varphi_a = 0,45$ эВ (1, 2), $\varphi_k = 0,45$ эВ, $\varphi_a = 0,75$ эВ (3), $E_t = 0,25$ эВ, $N_t = 10^{17}$ см $^{-3}$

Рис. 3. Зависимость полного заряда от температуры.

(Параметры образца см. на рис. 1)

в образце; 2) инжекция электронов из анодного контакта, уменьшающая полный заряд образца.

Кривая ТТСД, соответствующая данным, представленным на рис. 1, *a, b*, имеет два отчетливо выраженных пика (рис. 2). В области температур появления первого пика (пика *A*) происходит пространственное перераспределение электронов на локальных центрах (см. рис. 1, *b*), а полный заряд, накопленный в образце, не изменяется (рис. 3). Энергия активации процесса, ответственного за пик *A*, определенная по начальному участку кривой [9], равна $E_i/2$, что находится в соответствии с (6) и подтверждает «примесную» природу пика. Таким образом, пик *A* обусловлен перераспределением электронов на локальных центрах, а лимитирующей стадией процесса перераспределения является их термическая активация.

Появление пика *B* сопровождается уменьшением полного заряда, запасенного в образце (см. рис. 3). Энергия активации процесса, ответственного за этот пик, соответствует величине потенциального барьера на аноде. Это позволяет связать пик *B* с инжекцией электронов из анода.

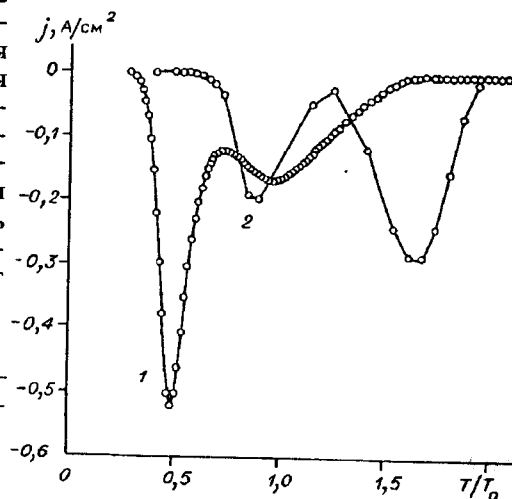
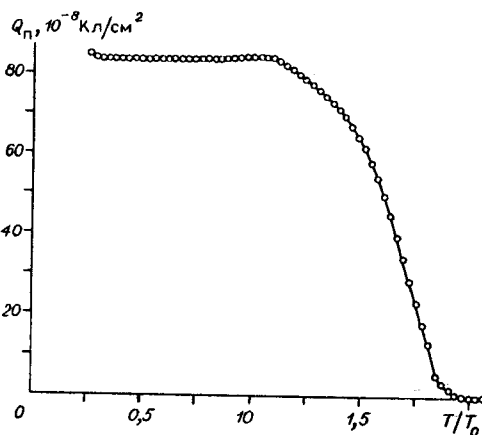
Относительное положение пиков *A* и *B* зависит от соотношения между E_i и φ_a (рис. 4). При уменьшении φ_a инжекционный пик ТТСД смещается в область более низких температур, и при $\varphi_a < E_i$ он появляется раньше «примесного» пика. При этом его интенсивность увеличивается, а пика *A* — уменьшается. Последнее связано с нейтрализацией части заряда, запасенного в образце, до того, как начинается его перераспределение в объеме образца за счет освобождения электронов с центров.

Следует отметить еще один факт, характерный для инжекционного пика ТТСД: изменение полярности напряжения поляризации не сказывается на направлении (знаке) тока пика *B*, в то время как направление (знак) тока «примесного» пика изменяется (см. рис. 2). Следовательно, явления, протекающие на контактах, могут быть одной из причин часто наблюдающейся инверсии знака ТТСД [1, 10].

2. Частично блокирующий контакт. Если в поступлении носителей заряда в процессе деполяризации участвуют оба контакта, то вклад в ТТСД вносят три процесса: 1) перераспределение освобожденных электронов с локального уровня; 2) инжекция электронов из анода; 3) инжекция электронов из катода. В зависимости от соотношения высоты потенциальных барьеров на аноде φ_a и катоде φ_k направление тока в области инжекционного пика может быть как положительным, так и отрицательным (см. рис. 2), что усложняет интерпретацию эксперимента.

Рис. 4. ТТСД для различных значений барьера на аноде (эВ):

1 — 0,1; 2 — 0,4, $\varphi_k = 0,58$, $E_i = 0,25$



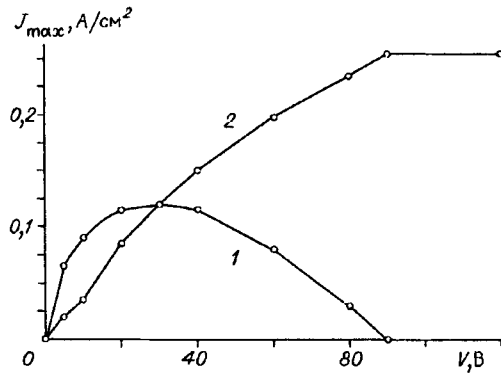


Рис. 5. Зависимости интенсивности пика от напряжения поляризации:

1 — пик А, 2 — пик В

3. Идентификация природы пиков ТТСД. Очевидно, что попытка определения параметров центров по инжекционному пику ТТСД даст ложные результаты. Поэтому на практике важно перед определением параметров центров установить природу каждого из пиков. Обычно для

этого используются зависимости, связывающие параметры пика и условия возбуждения образца [1, 2]. Рассмотрим, как влияет на характеристики пиков ТТСД в рамках используемых приближений изменение напряжения поляризации V . Очевидно, что оно не сказывается на температурном положении пиков, так как в используемой модели полевые эффекты не учитывались.

С увеличением V интенсивность пика А первоначально растет (при $V < V_{\text{по}} = eN_i d^2 / 2\epsilon\epsilon_0$, где $V_{\text{по}}$ — напряжение предельного опустошения ловушек), проходит через максимум при $Q = qdN_i/2$ и становится практически равной нулю при $V = V_{\text{по}}$ (рис. 5). Такое поведение пика А вызвано взаимосвязанным увеличением запасенного в образце заряда и уменьшением числа носителей, обуславливающих величину тока при перераспределении заряда в образце. При $V = V_{\text{по}}$ достигается предельное зарядение образца, но число носителей, обеспечивающих примесный пик ТТСД, становится практически равным нулю.

Напротив, интенсивность пика В с увеличением напряжения поляризации постоянно растет и при $V = V_{\text{по}}$ достигает насыщения, что связано с накоплением в образце предельного заряда и соответствующего значения E_a (см. рис. 5).

Полученные закономерности позволяют заключить, что для экспериментальной идентификации инжекционного пика ТТСД требуются измерения ТТСД при различных значениях и полярностях напряжения поляризации. Независимость направления тока от полярности напряжения, появление участка насыщения зависимости интенсивности пика от V и ее линейный характер при малых V являются основаниями для установления инжекционной природы пика ТТСД. Дополнительное подтверждение этого возможно при измерениях ТТСД-образцов, снабженных контактами с различными φ_a и φ_k , так как температурное положение инжекционного пика зависит от высоты барьера (см. рис. 4). Энергия активации, рассчитанная по пику ТТСД, соответствует высоте потенциального барьера на границе.

Заключение. Таким образом, в рамках простой модели полупроводника, содержащего один донорный уровень при не полностью блокирующих контактах, показана возможность появления, кроме «примесного» пика ТТСД (обусловленного перераспределением объемного заряда в образце за счет освобождения электронов с ловушечного центра), пика, вызванного инжекцией электронов из контакта. Энергия активации, определяемая по этому пику, соответствует высоте потенциального барьера на контакте. В зависимости от соотношения энергетического положения донорного уровня и высоты потенциальных барьеров на катоде и аноде инжекция электронов из контактов может вызывать инверсию знака ТТСД.

Зависимость интенсивности инжекционного пика от напряжения поляризации может быть использована для определения концентрации примесных центров по величине напряжения предельного заряда образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вертопрахов В. Н., Сальман Е. Г. Термостимулированные токи в неорганических веществах. Новосибирск: Наука, 1972.
2. Гороховатский Ю. А., Бордовский Г. А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991.
3. Chen R., Kish Y. Analysis of Thermally Stimulated Processes. Oxford e. a.: Pergamon Press, 1981.
4. Thermally Stimulated Relaxation in Solids /Ed. P. Bräunlich. Berlin e. a.: Springer-Verlag, 1979.
5. Muller P. Relationship between thermally stimulated depolarization and conductivity // Phys. Stat. Sol. (a). 1974. 23, N 1. P. 165.
6. Salman E. G., Vertoprakhov V. N. Thermally stimulated depolarization current controlled by surface charge change // Phys. Stat. Sol. (a). 1988. 108, N 2. P. 625.
7. Ламперт М. А., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973.
8. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
9. Garlik G. F. J., Gibson A. F. The electron trap mechanism of luminescence in sulphide and silicate phosphors // Proc. Phys. Soc. 1948. A60. Pt. 6, N 342. P. 574.
10. Бордовский В. А., Бордовский Г. А., Извозчиков В. А. Инверсия термостимулированного тока при исследовании ловушек в фотоэлектретном режиме // ФТП. 1970. 4, вып. 10.

Поступила в редакцию 29 декабря 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!