

УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ В НЕОДНОРОДНО РАЗОГРЕТЫХ $n^+ - p$ - И $p^+ - n$ -ПЕРЕХОДАХ

В. Н. Добровольский, И. Е. Пальцев

Киевский университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина
(Получена 17 июня 1993 г. Принята к печати 24 августа 1993 г.)

С целью проверки теории [В. Н. Добровольский, С. Б. Грязнов. ФТП, 26, 1366 (1992)] исследовалась ударная ионизация электронов и дырок в неоднородно разогретых кремниевых образцах с $n^+ - p$ - и $p^+ - n$ -переходами. В соответствии с выводом теории изменение типа образца при неизменном направлении градиента температуры приводило к изменению знака обусловленного разогревом приращению тока.

В работе [1] обнаружено, что в условиях, близких к лавинному пробую, неоднородный разогрев области пространственного заряда (ОПЗ) кремниевое $p - n$ -перехода может существенно изменять его вольт-амперную характеристику (ВАХ). Этот эффект объяснен теорией [2]. Возникающие из-за разогрева изменения вдоль ОПЗ (рис. 1) дрейфовых скоростей электронов v_n и дырок v_p при протекании тока приводят к изменению в ней их концентраций, в результате этого к изменению напряженности электрического поля в $p - n$ -переходе и самого тока. Процесс изменения концентраций электронов и дырок описан путем введения представления об образовании (разрушении) в ОПЗ электронно-дырочных пар с темпом $-\frac{1}{e}(\alpha_{v_n} j_n + \alpha_{v_p} j_p)$, где

$$\alpha_{v_n} = \frac{v_p}{v_p - v_n} \frac{1}{v_n} \frac{\partial v_n}{\partial x}, \quad \alpha_{v_p} = \frac{v_n}{v_p - v_n} \frac{1}{v_p} \frac{\partial v_p}{\partial x}, \quad (1)$$

e — заряд электрона, j_n и j_p — плотности токов электронов и дырок, $\partial v_n / \partial x$ и $\partial v_p / \partial x$ — градиенты скоростей, возникающие из-за неоднородного разогрева. Величины α_{v_n} и α_{v_p} формально подобны коэффициентам ударной ионизации электронов α_{nE} и дырок α_{pE} с той разницей, что они могут быть как положительными, так и отрицательными и отличаться от нуля во всей ОПЗ, а не только в узкой области вблизи максимума напряженности электрического поля E . Благодаря последнему даже при малой величине α_{v_n} и α_{v_p} их вклад в коэффициент умножения электронов (дырок) может быть сравним с вкладом α_{nE} , α_{pE} и может обуславливать существенное изменение тока.

В ряде работ (см. [3] и ссылки в этой статье) образование пар наблюдалось в неоднородно разогретой квазинейтральной электронно-дырочной плазме (b -дрейф). Условия в [1, 2] принципиально отличаются тем, что пары образуются в ОПЗ. Причем времена пролета электронов и дырок через ОПЗ много меньше времени диэлектрической релаксации.

Результаты теории [2] качественно и по порядку величин согласуются с экспериментом. Однако необычность оперирования в применении к ОПЗ понятием электронно-дырочных пар требует дальнейшей проверки теории. В

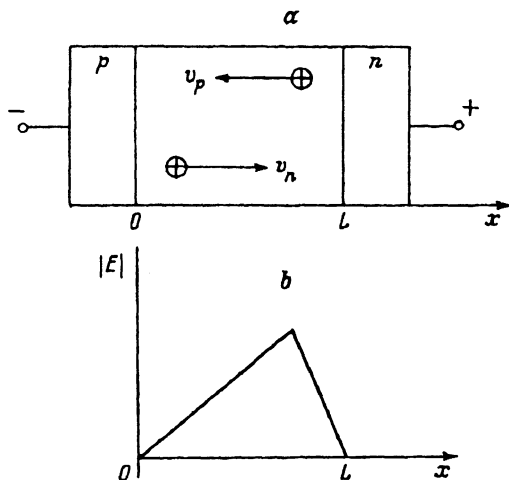


Рис. 1. a — p - n -переход, 0 — L — ОПЗ. b — распределение напряженности поля E вдоль ОПЗ в случае n^+ - p -перехода.

этом отношении наибольший интерес представляют ее качественные заключения, мало подверженные влиянию погрешностей измерений заложенных в теорию характеристик полупроводника. К таковым относится вывод о разных знаках изменения тока I через n^+ - p - и p^+ - n -переходы в температурных полях с одним и тем же направлением градиента температуры dT/dx . Его проверка проведена в настоящей работе.

1. Указанный вывод теории сделан в [2] на основании численных расчетов. Его можно объяснить следующим образом.

Промежуток образца 0 — L на рис. 1 — ОПЗ. В случае n^+ - p -перехода максимум $|E|$ находится у границы ОПЗ $x=L$ и ударная ионизация происходит в узкой области вблизи этой границы. Возникающие при этом электроны быстро покидают ОПЗ, а дырки движутся к границе $x=0$. Поэтому в большей части ОПЗ дырочный ток значительно превышает электронный, и влияние на ток величины α_{v_p} больше, чем α_{v_n} . С ростом температуры $|v_p|$ уменьшается. Поэтому при $dT/dx > 0$, согласно (1), $\alpha_{v_p} > 0$ и, основываясь на подобии α_{v_p} и α_{pE} , можно утверждать, что рассматриваемый разогрев должен увеличивать ток.

При градиенте $dT/dx < 0$ величина $\alpha_{v_p} < 0$ и ток уменьшается.

В p^+ - n -переходе ударная ионизация происходит вблизи границы $x=0$. В большей части ОПЗ ток в основном электронный. Градиент $dT/dx > 0$ ток увеличивает, а градиент противоположного знака — уменьшает.

2. В экспериментах использовались кремниевые образцы с p - n -переходами, которые имели форму дисков диаметром 1.8 мм и толщиной 0.25 мм. Они были подобны образцам [1]. Однако в отличие от работы [1] измерения проводились на образцах как с n^+ - p -, так и с p^+ - n -переходами. И те и другие были получены диффузией примесей в кремниевые пластины n -типа проводимости с удельным сопротивлением 40 Ом·см. Однако в первом случае с одной стороны пластины происходила диффузия фосфора, а с другой — алюминия и бора. Во втором случае с одной стороны диффундировал фосфор, с другой — только бор.

Процедура измерений была такая, как в работе [1]. Экспериментальный образец 1 зажимался между двумя подобными ему образцами 2 и 3, как это

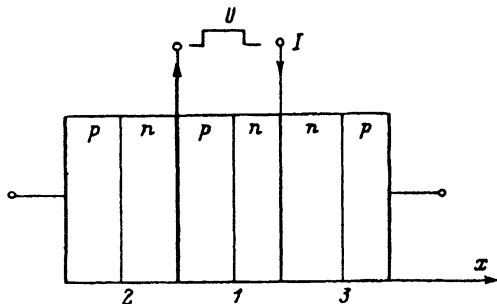


Рис. 2. Исследуемый образец (1) и импульсные нагреватели (2 и 3).

схематически показано на рис. 2. В обратном направлении к образцу 1 прикладывался одиночный прямоугольный импульс напряжения U и одновременно образец подвергался действию теплового импульса с $dT/dx < 0$. Тепловой импульс создавался пропусканием в момент начала импульса напряжения U через образец 2 импульса тока с амплитудой 150 А и длительностью несколько мкс. Для этого через образец 2 разряжалась в проходном направлении емкость. Для создания теплового импульса с $dT/dx > 0$ разогревался образец 3.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока I через $n^+ - p^-$ (а) и $p^+ - n^-$ (б) переходы при действии напряжения U в отсутствие и при градиенте температуры разных направлений. В момент времени t_m независимо от направления градиента температуры $|dT/dx| \approx 1000$ К/см, а разогрев перехода составлял около 80 К. По осциллограммам тока, снятым при разных значениях U , были построены зависимости токов I в момент t_m от U , т. е. ВАХ. Они приведены на рис. 4. Видно, что разогрев при $dT/dx < 0$ уменьшает ток через $n^+ - p^-$ переход, а при $dT/dx > 0$ — его увеличивает. В $p^+ - n^-$ переходе знаки изменения тока противоположны названным в полном согласии с результатами расчетов [2] и соображениями, изложенными в настоящем сообщении. Причем во всех случаях знаки приращений тока такие, как предсказывает теория.

Зависимости 3 на рис. 4 в отличие от остальных зависимостей этого рисунка получены непосредственно на промышленном диоде. В качестве такового использовался диод КД527. Его кристалл имеет диаметр 1.8 мм, толщину 0.2 мм и высокоомную n -часть. Неоднородный разогрев кристалла производился способом, подобным описанному выше. Для этого к молибденовым выводам

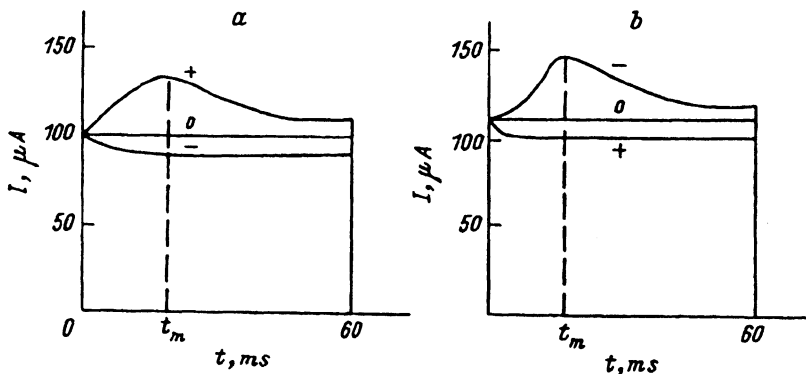


Рис. 3. Осциллограммы тока через $n^+ - p^-$ (а) и $p^+ - n^-$ (б) переходы соответственно при $U = 953$ и 942 В. Градиент температуры: $dT/dx = 0$ (о), $dT/dx < 0$ (—), $dT/dx > 0$ (+).

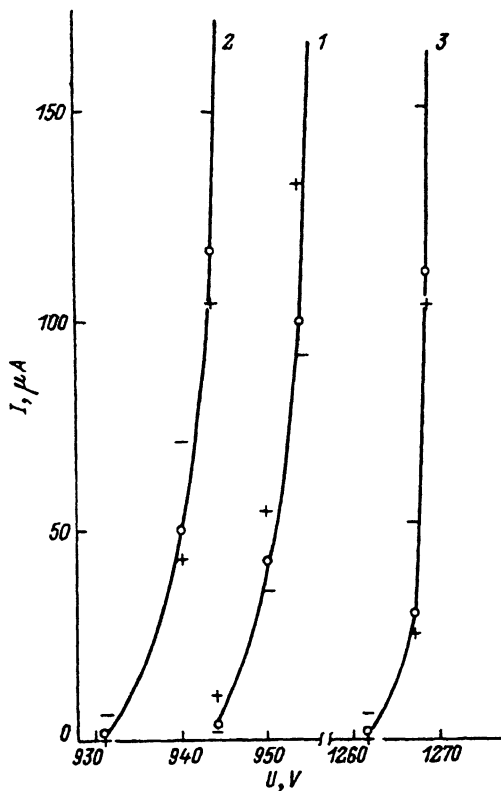


Рис. 4. ВАХ $n^+ - p$ - (1) и $p^+ - n$ - (2, 3) переходов, снятые в момент t_m при разных градиентах температуры: $dT/dx = 0$ (o), $dT/dx < 0$ (-), $dT/dx > 0$ (+). Кривые проведены только через точки $dT/dx = 0$.

диода диаметром 2 мм на расстояниях 3 мм от кристалла припаивались такие же образцы, как 2 и 3 на рис. 1. Они служили импульсными нагревателями. Приведенные значения токов измерены при градиенте около 1000 К/см. В соответствии с теорией при $dT/dx > 0$ ток уменьшался, при противоположном направлении градиента — увеличивался.

3. В связи с вопросом, обсуждаемым в настоящей работе, отметим еще следующее. Авторы статьи [4], подробно рассмотренной в обзоре [5], различают макроскопический α_{nE} и микроскопический α_{nE}^0 коэффициенты ударной ионизации электронов и аналогично — дырок. Они связаны между собой соотношениями

$$\alpha_{nE} = \alpha_{nE}^0 + \frac{1}{v_n} \frac{dv_n}{dx}; \quad \alpha_{pE} = \alpha_{pE}^0 - \frac{1}{v_p} \frac{dv_p}{dx}. \quad (2)$$

Согласно (2), неоднородный разогрев изменяет α_{nE} и α_{pE} на величины порядка α_{v_n} и α_{v_p} . Однако в отличие от последних эти изменения реализуются только в узкой области ОПЗ вблизи максимума $|E|$, где есть ударная ионизация. Поэтому их влияние на ток много меньше, чем α_{v_n} и α_{v_p} . Оно не принималось во внимание в расчетах [2] и приведенных выше рассуждениях о знаке изменения тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Н. Добровольский, В. А. Романов. ФТП, 26, 1361 (1992).
- [2] В. Н. Добровольский, С. Б. Грязнов. ФТП, 26, 1366 (1992).
- [3] В. Н. Добровольский, С. П. Павлюк. ФТП, 15, 120 (1981).
- [4] G. Veni, F. Capasso. Phys. Rev. B, 19, 2197 (1977).
- [5] Ф. Капассо. В сб.: Техника оптической связи: Фотоприемники. М. (1988).

Редактор Л. В. Шаронова
