

# Исследование резистивных фоточувствительных элементов на основе HgCdTe методом наведенного тока

© П.С. Вергелес, В.В. Крапухин\*, Е.Б. Якимов<sup>†</sup>

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Россия

\* ОАО «Московский завод „Сапфир“»,  
117545 Москва, Россия

(Получена 20 июля 2006 г. Принята к печати 28 июля 2006 г.)

Методом наведенного тока в растровом электронном микроскопе исследованы фоточувствительные резистивные элементы на основе HgCdTe, фоточувствительность которых понизилась в результате длительной эксплуатации. Показано, что процессы деградации в таких элементах связаны с появлением вблизи контактов областей с пониженной чувствительностью. Проведено моделирование распределения наведенного тока для таких неоднородных элементов. Показано, что сравнение измеренных и рассчитанных распределений сигнала наведенного тока позволяет выявлять наиболее вероятные причины неоднородного понижения чувствительности. Проведенное сравнение показало, что наиболее вероятной причиной понижения чувствительности в исследованных элементах является повышение концентрации доноров в приконтактных областях.

PACS: 71.20.Nr, 71.55.Eq, 72.20.Jv

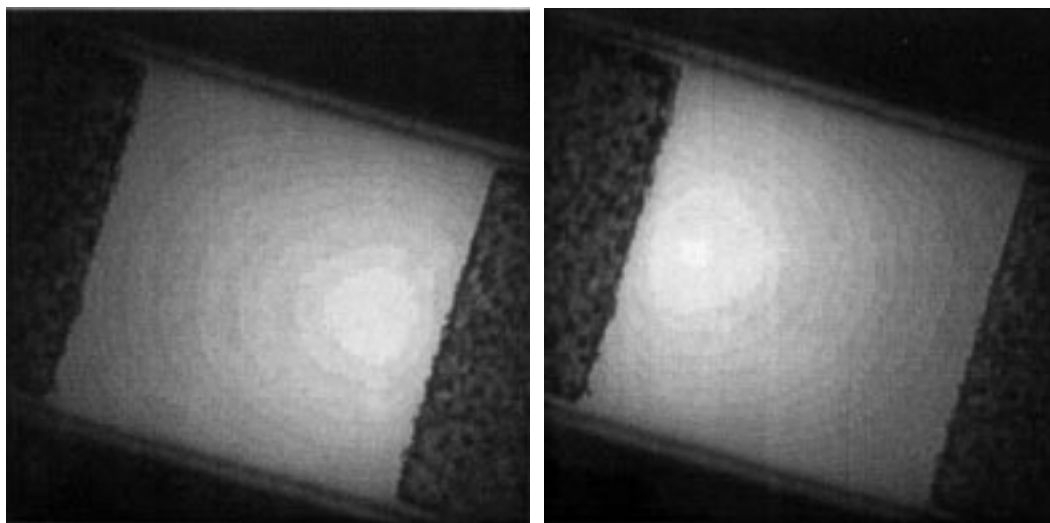
## 1. Введение

Несмотря на существенный прогресс в улучшении параметров фоточувствительных резистивных элементов (ФЧЭ) на основе CdHgTe (кадмий–ртуть–теллур, КРТ), они еще не достигли теоретических значений. Кроме того, окончательно не решена и проблема деградации таких элементов, как при технологических обработках, так и в процессе их эксплуатации. Деградация ФЧЭ проявляется, в частности, в уменьшении их фотоотклика при освещении. Однако исследование механизмов деградации фотоэлементов ограничивается чрезвычайно малым количеством диагностических методов, позволяющих проводить такие исследования. Этим и обусловлен интерес к развитию локальных методов диагностики ФЧЭ, позволяющих изучать пространственное распределение неравновесных носителей заряда для контроля основных параметров материала, таких как диффузионная длина неравновесных носителей заряда, и для выявления источников деградации ФЧЭ.

Одним из наиболее перспективных методов исследования, направленного на решение указанных проблем, является метод наведенного тока (НТ) в растровом электронном микроскопе [1,2]. Основная область применения этого метода — исследование барьерных структур ( $p$ – $n$ -переходов или барьеров Шоттки), поскольку именно на таких структурах возможности обсуждаемого метода могут быть использованы наиболее эффективно. Применение этого метода к резистивным структурам не столь эффективно и имеет ряд особенностей по сравнению с исследованием барьерных структур. В первую очередь это связано с тем, что в барьерной структуре сигнал НТ возникает за счет диффузии неравновесных носителей заряда к области объемного заряда и их разделения полем внутри этой области. При этом сигнал

может измеряться даже без приложенного напряжения и темновой ток в цепи исследуемой структуры обычно пренебрежимо мал. В резистивных фоточувствительных структурах для измерения НТ к элементу необходимо приложить напряжение, при этом темновой ток, обусловленный напряжением, в узкозонных полупроводниках может быть достаточно большим. Изменение тока, вызванное локальным возбуждением, определяется изменением сопротивления элемента; при возбуждении структур сравнительно большого размера сфокусированным пучком изменение тока мало и становится измеримым только при уменьшении размеров исследуемых структур. Повышение сигнала НТ может быть также достигнуто путем увеличения размеров области возбуждения или повышения его интенсивности, т.е. за счет ухудшения пространственного разрешения. Тем не менее при уменьшении размеров ФЧЭ до величин  $\sim (30\text{--}100)$  мкм такие исследования становятся возможными и позволяют получать полезную информацию о параметрах материала элементов [3–5]. Кроме того, в барьерных структурах измеряемый ток равен току неосновных носителей заряда и методы его расчета хорошо развиты [1,2]. В резистивных структурах изменение сопротивления при возбуждении структуры электронным пучком должно рассчитываться с использованием распределения неравновесных носителей заряда, которое, в свою очередь, определяется путем решения амбиполярного диффузионно-дрейфового уравнения. При этом пространственное распределение сигнала в общем случае будет отличаться от распределения сигнала в барьерной структуре. В [3–5] были проведены исследования и расчет распределения сигнала НТ в фоторезистивных элементах на основе КРТ и показано, что сравнение измеренного распределения НТ с рассчитанным позволяет оценить диффузионную длину

<sup>†</sup> E-mail: yakimov@ipmt-hpm.ac.ru



**Рис. 1.** Изображение однородного фоточувствительного элемента в режимах НТ при напряжении +50 и –50 мВ на правом контакте. Размер изображения  $70 \times 70$  мкм.

в готовом элементе, а также эффективные скорости рекомбинации на его боковых границах.

В настоящей работе методом НТ исследованы элементы, в которых фоточувствительность понизилась в результате длительного хранения или отжига при повышенных температурах. Показано, что процессы деградации в таких элементах связаны с появлением областей с пониженной чувствительностью. Проведено моделирование распределения НТ для таких неоднородных элементов. Сравнение измеренных и рассчитанных распределений показало, что наиболее вероятной причиной понижения чувствительности исследованных элементов является повышение концентрации носителей заряда в приконтактных областях.

## 2. Методика

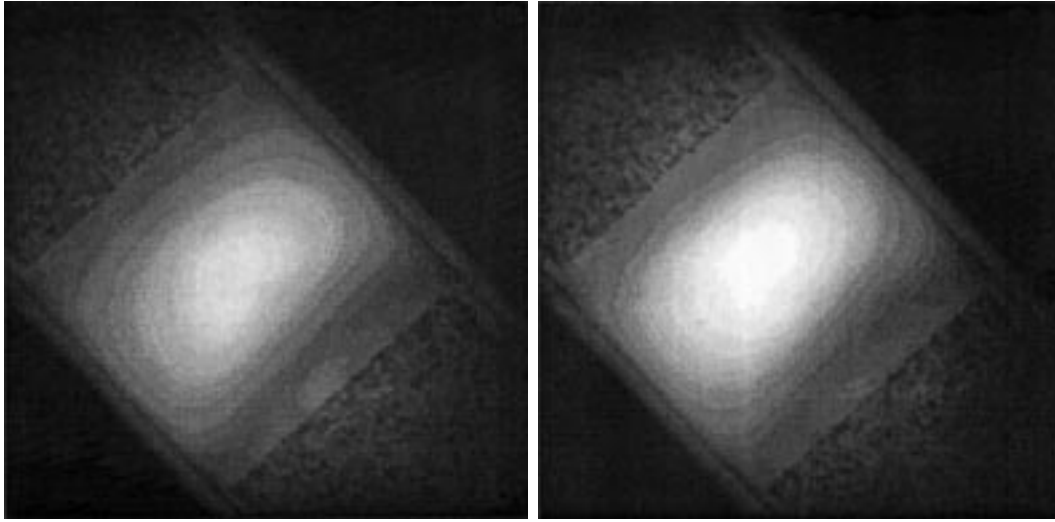
Исследовались резистивные линейки фоточувствительных элементов на основе КРТ. Фоточувствительный элемент изготавливался из  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x \approx 0.22$ )  $n$ -типа проводимости толщиной 5–7 мкм с размерами  $50 \times 50$  мкм. Элементы покрывались многослойной диэлектрической пленкой суммарной толщиной  $\sim 1.5$  мкм.

Экспериментальные исследования проводились в растровом электронном микроскопе JSM 840A (Jeol) при температуре 90 К. Поскольку ФЧЭ были покрыты многослойной диэлектрической пленкой, содержащей тяжелые элементы, в большинстве случаев использовалась энергия первичных электронов 35 кэВ, ток пучка не превышал  $10^{-10}$  А. На исследуемые структуры подавалось напряжение 50 мВ разной полярности. При этом измерялся ток, наведенный электронным пучком в цепи ФЧЭ, в зависимости от координат точки облучения. В результате сканирования элемента электронным пучком получалось двумерное распределение избыточного

тока в цепи ФЧЭ. При используемых условиях возбуждения элемента электронным пучком максимальное значение НТ в ФЧЭ не превышало 10% от темнового тока. Как показывают расчеты [3], в таких условиях отношение  $\Delta n/n_0$ , где  $\Delta n$  и  $n_0$  — соответственно концентрации неравновесных и равновесных носителей заряда, порядка 1 вблизи падения пучка и существенно меньше при удалении от нее. Кроме того, зависимость сигнала НТ от приложенного напряжения практически не отличалась от линейной. Это и обусловило возможность использования амбиполярного диффузионно-дрейфового уравнения с постоянными коэффициентами при расчетах распределения концентрации неравновесных носителей заряда. Так как локальная генерация неравновесных носителей заряда сфокусированным электронным пучком качественно подобна генерации сфокусированным оптическим пучком, полученные распределения НТ можно использовать для описания двумерного распределения фоточувствительности элемента.

## 3. Исследование распределения наведенного тока

На рис. 1 и 2 приведены изображения в режиме НТ двух фоточувствительных резистивных элементов со стандартной фоточувствительностью (рис. 1) и с фоточувствительностью, примерно в 1.5 раза меньшей, чем стандартная (рис. 2). В элементе со стандартными характеристиками максимум НТ в направлении, параллельном приложенному электрическому полю, смещен к положительному электроду и сдвигается при изменении полярности приложенного напряжения, что хорошо согласуется с расчетным распределением для однородного элемента [3]. Уменьшение чувствительности вблизи боковых сторон элементов, как показано в [3,4], связано



**Рис. 2.** Изображение неоднородного фоточувствительного элемента в режимах НТ при напряжении +50 и –50 мВ на правом контакте. Размер изображения  $84 \times 84$  мкм.

с рекомбинацией на дефектах, введенных при ионном травлении. Пространственное распределение чувствительности в элементах с пониженной фоточувствительностью заметно отличалось от расчетного. Как видно из рис. 2, в элементе с пониженной чувствительностью она понижается вблизи обоих контактов, при этом максимум НТ расположен вблизи центра элемента и практически не смещается при изменении полярности приложенного напряжения. Таким образом, уже сравнение приведенных изображений позволяет предполагать, что деградация параметров фоточувствительного элемента связана с существенным изменением электрических характеристик в приконтактных областях. Из общих соображений можно предположить, что наблюдаемое понижение чувствительности в приконтактных областях связано с повышением скорости рекомбинации в этих областях (уменьшением диффузионной длины неравновесных носителей заряда) либо повышением концентрации доноров. Обе эти причины обусловлены возникновением дефектов в приконтактных областях и, по-видимому, обе оказывают влияние на характеристики исследуемого элемента. Однако, поскольку они должны приводить к разным распределениям чувствительности, можно надеяться, что сравнение измеренного распределения с расчетным позволит выяснить, какая из них вносит основной вклад в деградацию элемента.

#### 4. Моделирование одномерного распределения тока

Для упрощения расчета при моделировании неоднородных элементов решалось одномерное амбиполярное диффузионно-дрейфовое уравнение [6,7] с точечным ис-

точником возбуждения:

$$\frac{\partial^2 \Delta p(x, x_0)}{\partial x^2} - \frac{eE(x)\mu_a}{D_a} \frac{\Delta p(x, x_0)}{\partial x} - \frac{\Delta p(x, x_0)}{L(x)^2} = -\frac{\delta(x, x_0)}{D_a}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  — изменение концентрации неосновных носителей заряда (дырок),

$$\mu_a = \frac{n - p}{n/\mu_h + p/\mu_e} \quad \text{и} \quad D_a = \frac{n + p}{n/D_h + p/D_e}$$

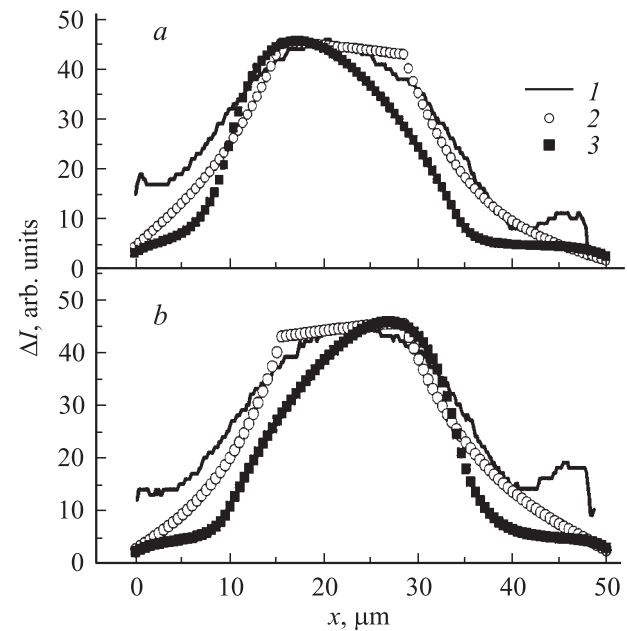
— амбиполярные подвижность и коэффициент диффузии соответственно,  $D_e$ ,  $\mu_e$  и  $n$  — соответственно коэффициент диффузии, подвижность и концентрация электронов,  $D_h$ ,  $\mu_h$  и  $p$  — коэффициент диффузии, подвижность и концентрация дырок,  $x$  — координата в направлении приложенного электрического поля,  $E(x)$  — напряженность электрического поля,  $L(x) = (D_a \tau)^{0.5}$  — диффузионная длина неравновесных носителей заряда,  $\tau$  — время жизни неравновесных носителей заряда,  $x_0$  — координата падения электронного пучка. Поскольку подвижность электронов при температуре измерений примерно на 2 порядка выше подвижности дырок, а концентрация неравновесных носителей заряда, как отмечалось выше, практически не превышает концентрацию равновесных, амбиполярные коэффициент диффузии и подвижность носителей заряда с хорошей точностью равны соответствующим коэффициентам для дырок.

Интегрирование двумерного уравнения в направлении  $y$ , перпендикулярном электрическому полю, показывает, что одномерное уравнение описывает распределение интеграла концентрации  $\int_0^d \Delta p(x, y) dy$  с ошибкой, не превышающей 15%. Кроме того, для однородных

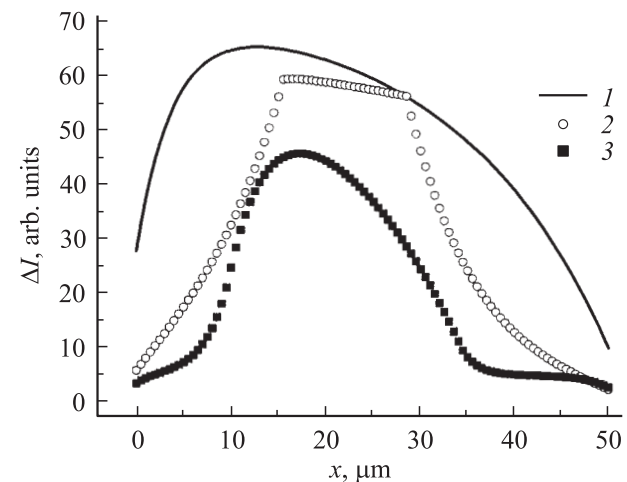
элементов профиль сигнала НТ в направлении электрического поля в середине элемента, рассчитанный в двумерной модели, практически совпадает с профилем, рассчитанным в одномерном приближении. Вследствие этого можно было предполагать, что моделирование в рамках одномерной модели профиля сигнала НТ и сравнение его с профилем, полученным в направлении  $x$  в середине элемента, позволит, по крайней мере на качественном уровне, понять природу наблюдаемой неоднородности электрических свойств.

При моделировании неоднородного элемента он разбивался на три области — две приконтактные и центральную. В первом случае в этих областях задавались различные значения равновесной концентрации носителей заряда, которые изменялись скачком на границах областей. В приконтактных областях длиной  $d_1$  и  $(d-d_2)$ , где  $d$  — длина элемента, концентрация доноров полагалась равной  $N_1$ , а в центральной области длиной  $(d_2-d_1)$  —  $N_2$ . Профили сигнала НТ рассчитывались при  $N_1/N_2 > 1$ . Уменьшение концентрации доноров вблизи контактов должно приводить к увеличению относительного изменения сопротивления, а следовательно, и чувствительности в неоднородных областях, что противоречит экспериментальному распределению. Во втором случае предполагалось, что на границах приконтактных областей уменьшается диффузионная длина  $L$ . Уровень возбуждения предполагался малым, т.е. предполагалось, что концентрация неравновесных носителей заряда  $\Delta p \ll N_1$  и  $\Delta p \ll N_2$ . Граничные условия на  $n^+ - n$ -контактах описывались, как и в [3,8], введением конечной скорости поверхностной рекомбинации. На границах раздела в случае скачка концентрации, как обычно, использовалось условие непрерывности тока, и изменение концентрации неравновесных носителей заряда на границах рассчитывалось с учетом изменения потенциала  $\Delta\phi = kT \ln(N_1/N_2)$ . В случае скачка диффузионной длины на границах раздела использовалось условие непрерывности концентрации и потока неравновесных носителей заряда. Далее для 101 значения  $x_0$  в диапазоне от 0 до  $d$  рассчитывалось распределение неравновесных носителей заряда  $\Delta p(x, x_0)$ , обусловленное этими носителями изменение сопротивления образца и соответственно изменение тока  $\Delta I$  (сигнал НТ) в зависимости от  $x_0$ .

На рис. 3 приведены экспериментальные профили (кривые 1) сигнала НТ для образца, представленного на рис. 2, полученные при напряжениях  $U = \pm 50$  мВ. На этом же рисунке представлены профили, рассчитанные в предположении неоднородного распределения концентрации (кривые 2) или неоднородного распределения диффузионной длины (кривые 3), наиболее близко описывающие экспериментальные профили. При моделировании в первом случае варьировалось отношение концентрации в приконтактных областях и в центре элемента  $N_1/N_2$ , а во втором — отношение диффузионных длин в приконтактных областях и в центре элемента. Кроме того, в обоих случаях варьировались размеры



**Рис. 3.** Экспериментальные (1), рассчитанные в предположении неоднородного распределения концентрации доноров (2) и в предположении неоднородного распределения диффузионной длины (3) нормированные профили сигнала НТ в неоднородном фотоэлементе при напряжении +50 мВ (а) и -50 мВ (б) на левом контакте (см. рис. 2).



**Рис. 4.** Профили сигнала НТ, рассчитанные для однородного фотоэлемента (1), а также для неоднородного фотоэлемента в предположении неоднородного распределения концентрации доноров (2) и в предположении неоднородного распределения диффузионной длины (3) при напряжении +50 мВ на левом контакте и одинаковой скорости генерации неравновесных носителей заряда.

приконтактных областей с измененными свойствами и скорость генерации.

Для кривых 2 на рис. 3 наилучшее согласие достигалось при размерах приконтактных областей 15.5 и 21.5 мкм и отношении  $N_1/N_2 = 23$ . Для кривых 3 со-

ответственно при размерах приконтактных областей 10 и 16 мкм диффузионные длины составляют  $L_1 = 2$  мкм и  $L_2 = 8$  мкм. Видно, что экспериментальные профили лучше описываются в предположении неоднородного распределения доноров. На рис. 4 представлены те же профили для  $U = +50$  мВ, рассчитанные при одинаковой скорости генерации. Для сравнения на этом же рисунке представлен профиль, рассчитанный для однородного образца (кривая 3). Видно, что профили, рассчитанные в разных приближениях, различаются не только формой, но и величиной сигнала.

Поскольку интеграл от профиля сигнала НТ соответствует фотоотклику элемента при однородном освещении, было проведено интегрирование рассчитанных профилей и получено, что при неоднородном распределении доноров наилучшее описание экспериментального профиля соответствует уменьшению фотоотклика примерно в 1.6 раза, а при неоднородном распределении диффузионной длины в 2.5 раза. Поскольку сигнал на неоднородном элементе был примерно в 1.5 раза меньше, чем для однородного, такие оценки также подтверждают, что предположение о неоднородном распределении доноров позволяет лучше описать полученные результаты. Из приведенных выше данных видно, что, хотя оба механизма могут вносить вклад в уменьшение чувствительности исследуемого элемента, наибольшее влияние на его характеристики оказывает повышение концентрации в приконтактных областях. Известно [9,10], что междоузлия ртути в кристаллах HgCdTe являются донорами, могут диффундировать на заметные расстояния даже при комнатной температуре и легко вводятся, например, при ионном травлении. В связи с этим повышение концентрации доноров в приконтактных областях может быть связано с диффузией таких дефектов из подвергнутых ионному травлению областей под контактами.

## 5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе методом НТ исследованы деградированные фоторезистивные элементы на основе КРТ. Выявлено различие в распределении чувствительности между элементами с нормальным и пониженным фотооткликом. Сравнение полученных распределений с рассчитанными позволило показать, что основной причиной возникновения неоднородности фотоэлектрических свойств в деградированных элементах является повышение концентрации доноров в приконтактных областях, а также оценить концентрацию избыточных доноров и размер области, в который это повышение произошло.

Авторы выражают благодарность Н.М. Акимовой за любезно предоставленные образцы для исследований и Н.А. Ярыкину за плодотворное обсуждение полученных результатов.

## Список литературы

- [1] H.J. Leamy. J. Appl. Phys., **53**, R51 (1982).
- [2] Е.Б. Якимов. Зав. лаб., **68**, 63 (2002).
- [3] О.В. Смолин, Е.В. Сусов, Е.Б. Якимов. Изв. РАН. Сер. физ., **64** (4), 466 (2005).
- [4] О.В. Смолин, Е.В. Сусов, Е.Б. Якимов. Прикл. физика, № 2, 54 (2005).
- [5] O.V. Smolin, E.V. Susov, E.B. Yakimov. Proc. SPIE, **5834**, 242 (2005).
- [6] R. Kumar, S. Gupta, V. Gopal, K.C. Chhabra. Infr. Phys., **31**, 101 (1991).
- [7] A.N. Ishaque, J.W. Howard, M. Becker, R.C. Block. J. Appl. Phys., **69**, 307 (1991).
- [8] E.P.G. Smith, C.A. Musca, L. Faraone. Infr. Phys. Technol., **41**, 175 (2000).
- [9] J.L. Elkind. J. Vac. Sci. Technol., **10**, 1460 (1992).
- [10] E. Belas, R. Grill, J. Franc, A.L. Toth, P. Hoschl, H. Sitter, P. Moravec. J. Cryst. Growth, **159**, 1117 (1996).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## EBIC investigation of photosensitive resistive elements based on HgCdTe

*P.S. Vergeles, B.V. Krapukhin\*, E.B. Yakimov*

Institute for Microelectronics Technology  
and High Purity Materials,  
Russian Academy of Sciences  
142432 Chernogolovka, Russia  
\* JSC «Moscow Plant“ Sapphire»,  
117545 Moscow, Russia

**Abstract** Photosensitive resistive elements based on HgCdTe with a sensitivity degrading during prolonged operation were studied by the Electron Beam Induced Current (EBIC) method in the SEM. It was shown that the degradation processes in such elements were associated with an appearance of regions with decreased sensitivity near contacts. A simulation of EBIC distribution for such inhomogeneous elements was carried out. It was shown that a comparison of measured and simulated distributions allowed to reveal the most probable reasons for inhomogeneous sensitivity decrease. A comparison has shown that the most probable reason for sensitivity decreasing in the elements under study was an increase of the donor concentration in nearby contact regions.