

07.2

Нелинейность вольт-амперных характеристик однородных компенсированных детекторных структур из GaAs

© И.А. Прудаев¹, М.Г. Верховлетов^{1,2}¹Томский государственный университет, Томск, Россия²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

E-mail: funcelab@gmail.com

Поступило в Редакцию 28 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 15 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 марта 2019 г.

Представлены результаты исследования процессов переноса носителей заряда и перезарядки глубоких уровней в полупроводниковых структурах для детекторов ионизирующих излучений. Исследованы арсенид-галлиевые структуры резистивного типа с барьерами Шоттки и с равномерным распределением глубокого акцептора хрома и глубокого донорного EL2-центра. Путем решения уравнений непрерывности и Пуассона с использованием коммерческого пакета проектирования обнаружен эффект обеднения объема детекторных структур по электронам с ростом поданного напряжения. Установлено, что нелинейность вольт-амперных характеристик структур обусловлена сменой типа проводимости при переходе от равновесного к неравновесному состоянию. При этом структуры с исходным (равновесным) дырочным типом проводимости имеют вольт-амперные характеристики, близкие к линейным.

Ключевые слова: детекторы ионизирующего излучения, арсенид галлия, глубокие уровни, транспорт носителей заряда.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.11.47823.17760

Детекторы ионизирующего излучения на основе GaAs имеют ряд преимуществ по сравнению с широко используемыми детекторами на основе кремния [1–4], обладают более высокой эффективностью поглощения рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 15 keV и высокой радиационной стойкостью. Одна из задач, которая решается при разработке детекторов, связана с увеличением толщины чувствительного слоя, для чего используют однородные компенсированные структуры резистивного типа с омическими контактами или барьерами Шоттки. При этом компенсированный GaAs с высоким удельным сопротивлением (10^7 – $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) изготавливают либо за счет контролируемого введения глубоких донорных уровней EL2 в процессе роста слитков (первый подход [3,4]), либо путем компенсации глубоким акцептором — хромом — в процессе высокотемпературной диффузии (второй подход [1,2]).

Ранее установлено, что первый подход приводит к формированию стационарного домена сильного поля у катода детектора, что связано с сильной полевой зависимостью сечения захвата электронов EL2-центрами [3,4]. В итоге распределение напряженности поля становится неоднородным, а вольт-амперные характеристики (ВАХ) — нелинейными. Экспериментальные результаты [1,2,5] показали, что детекторные структуры, легированные Cr, имеют более линейную ВАХ (иногда линейную в пределах малой погрешности измерений, не превышающей единиц процентов). По этой причине такие детекторы имеют преимущества, так как позволяют создать толстый чувствительный слой (до нескольких

миллиметров) с однородным распределением напряженности электрического поля величиной 1–10 kV/cm [1].

Ранее не установлено, какие процессы приводят к нелинейности ВАХ и неоднородности электрического поля в структурах, компенсированных Cr. Не установлены и технологические параметры, влияющие на степень нелинейности ВАХ. Имеющиеся аналитические модели описывают подобные структуры как последовательное соединение встречно включенных барьеров Шоттки со стороны анода и катода, а также объемного сопротивления компенсированного материала детектора [2,5]. Однако такое представление не учитывает особенностей перезарядки глубоких центров Cr и EL2, концентрация которых в детекторах достигает 10^{16} – 10^{17} cm^{-3} [1–4]. В связи с этим в настоящей работе проведены расчеты протекания тока в детекторных структурах из GaAs, легированных Cr и EL2-центрами, с использованием численной модели.

В расчете геометрия всех структур оставалась постоянной: толщина GaAs 600 μm , площадь детекторных структур 10^{-6} cm^2 , катод и анод формировались барьерами Шоттки с высотой $\Phi_b = 0.9 \text{ eV}$ относительно уровня Ферми в металле (решалась одномерная задача). Для всех структур задавалось однородное распределение концентраций мелкого донора (N_d), глубокого донора (N^{EL2}) и глубокого акцептора хрома (N^{Cr}).

В работе использовался пакет проектирования Sentaurus TCAD (Synopsys). Аналогично проведенным нами ранее исследованиям решалась система уравнений Пуассона и непрерывности с учетом перезарядки глубоких уровней [6,7]. Плотность тока задавалась гидроди-

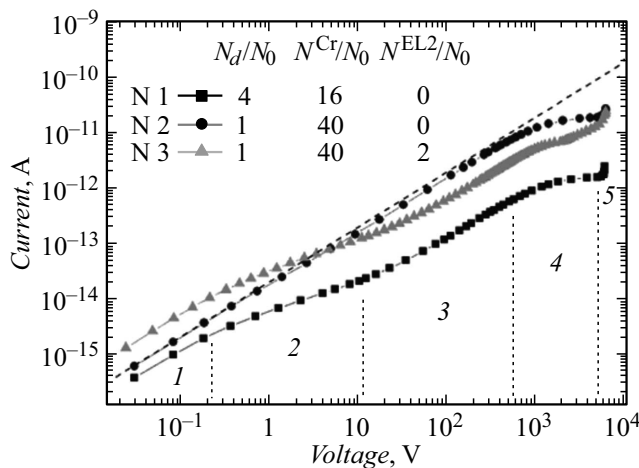


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики трех детекторных структур с различным уровнем легирования. Номера структур представлены на рисунке, N_0 — константа нормирования. Штриховой прямой показана линейная зависимость силы тока от напряжения. Цифрами 1–5 указаны различные участки ВАХ для структуры № 1.

намической моделью, в которой помимо диффузионного и дрейфового членов учитывался градиент температуры горячих носителей. В расчетах учитывались эффекты тепловой генерации тока через ловушки двух типов, так что темп генерации для каждой ловушки описывался следующим выражением:

$$G = - \frac{N v_n v_p \sigma_n \sigma_p n_i^2}{v_n \sigma_n (n + n_1) + v_p \sigma_p (p + p_1)},$$

где N — концентрация ловушек (Cr или EL2), v_n и v_p — тепловые скорости электронов и дырок, σ_n и σ_p — сечения захвата электронов и дырок, n и p — концентрации электронов и дырок, n_i — собственная концентрация носителей, n_1 и p_1 — концентрации носителей в случае совпадения уровня Ферми с уровнем ловушки.

Степень заполнения ловушек в стационарном состоянии определялась соотношением темпов захвата и выброса носителей заряда [3,8]. Эффекты лавинного умножения учитывались аналогично [6,7]. Параметры ловушки хрома взяты из работы [7] (энергия ионизации 0.79 eV, сечения захвата электронов и дырок составляют $3 \cdot 10^{-19}$ и $8 \cdot 10^{-17}$ cm² соответственно). Энергия ионизации EL2-центров задавалась равной 0.75 eV, сечения захвата электронов и дырок в слабом поле для EL2-центров выбирались равными $5 \cdot 10^{-16}$ и $2 \cdot 10^{-18}$ cm² соответственно [3]. Для EL2-центров полевая зависимость сечения захвата электронов задавалась при помощи модели, встроенной в пакет TCAD [8]. Данный подход позволил корректно смоделировать распределение напряженности электрического поля и ВАХ детекторных структур с EL2-центрами: аналогично работам [3,4] в нашем расчете увеличение напряженности поля до 10 kV/cm приводило к росту сечения захвата

электронов до 10^{-13} cm² и формированию домена у катода в детекторе с EL2-центрами.

Результаты расчета ВАХ структур, легированных хромом и EL2-центрами, представлены на рис. 1. Условно все ВАХ можно разбить на пять участков: 1 — линейная зависимость ($U < 0.1$ –1 V), 2 — слабая сублинейная зависимость (0.1 –1 < $U < 10$ –20 V), 3 — линейная зависимость (10 –20 < $U < 400$ –600 V), 4 — участок насыщения тока (400 –600 < $U < 5000$ V), 5 — участок резкого роста тока ($U > 5000$ V). Участки 4 и 5 связаны с выходом на насыщение подвижности носителей заряда при росте напряженности поля и лавинным пробоем соответственно. Как правило, данные участки в эксперименте не наблюдаются (выходят за пределы режимов эксплуатации детекторов). Участки 1–3 практически всегда наблюдаются в экспериментах с разной степенью выраженности, за одним исключением: в эксперименте на участке 3 фиксируют слабую сверхлинейность [1,2,5], которая, на наш взгляд, может быть связана либо с эффектом разогрева детектора, либо с током утечки по поверхности.

Анализ результатов показал, что качественно механизмы формирования ВАХ для всех рассмотренных структур совпадают. Обсудим их подробно на примере структуры № 1 (рис. 1). На рис. 2 и 3 представлены профили распределения напряженности поля и концентрации носителей заряда для разных приложенных напряжений. Из рис. 2 видно, что поле проникает на всю область детектора уже при напряжении $U < 10$ V. Вблизи контактов наблюдаются узкие области с повышенной напряженностью (ширина 0.15–0.2 μm, напряженность $E = 25$ –30 kV/cm). Однако доля напряжения, приложенного к этим областям, не превышает 0.1% от полного напряжения, приложенного к детектору для $U < 700$ V. Увеличение напряжения приводит к повышению относительной однородности напряженности поля в объеме детектора. Так, при $U = 100$ V отклонения

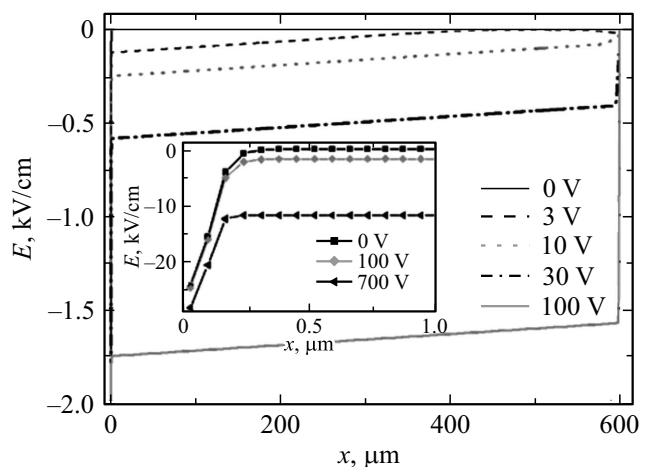


Рис. 2. Распределение напряженности поля в структуре № 1 при различных приложенных напряжениях (катод слева). На вставке показана приконтактная область в увеличенном масштабе.

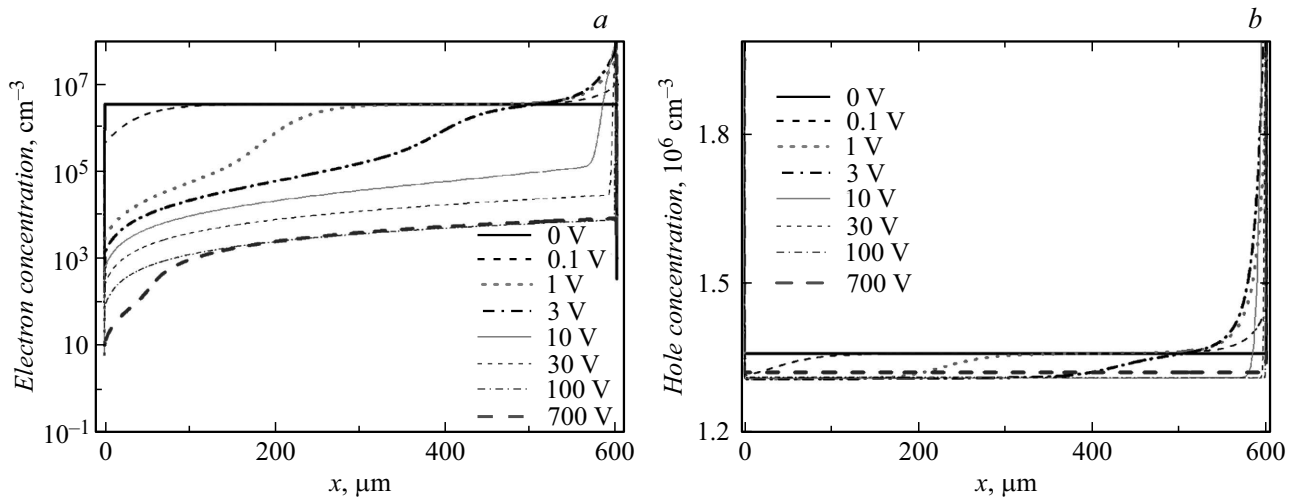


Рис. 3. Распределение концентрации электронов (а) и дырок (б) в структуре № 1 при различных приложенных напряжениях (катод слева).

напряженности составляют не более 10% от максимального значения (для $U = 10\text{ V}$ не менее 70%). Отметим, что увеличение концентрации хрома относительно концентраций мелкого донора и EL2-центров приводит к улучшению линейности ВАХ и однородности поля при фиксированном напряжении (рис. 1 и 2).

Из распределения концентрации носителей заряда (рис. 3) видно, что увеличение напряжения приводит к сильному обеднению структуры (концентрация электронов в объеме снижается на два-четыре порядка относительно равновесного значения). При этом концентрация дырок меняется слабо (уменьшается на 3–4%). Данный эффект объясняется следующим образом. Барьеры Шоттки формируют у поверхности слой p -типа проводимости с концентрацией дырок $1.4 \cdot 10^{10}\text{ cm}^{-3}$, что на четыре порядка превышает аналогичное значение в объеме. Данные носители возникают за счет тепловой генерации и высокой плотности состояний на поверхности, закрепляющей уровень Ферми ниже середины запрещенной зоны. Хотя приложение напряжения и приводит к дрейфу дырок в области поля, со стороны анода имеется бесконечный источник, поддерживающий постоянный уровень их концентрации, — инжектирующий слой p -типа. С другой стороны, источника электронов в рассмотренной структуре нет, что приводит к выносу электронов из области поля и обеднению детектора по этому типу носителей.

Представленные результаты показывают, что нелинейность ВАХ, как и неоднородность распределения напряженности поля, наблюдается в структурах с наибольшей концентрацией равновесных электронов. Если в структуре исходный тип проводимости является электронным (в равновесии), то обеднение по электронам приводит к инверсии типа проводимости объема и появлению сублинейного участка на ВАХ (структуры № 1 и 3). Если же в состоянии равновесия исходный

тип проводимости является дырочным (структура № 2), то обеднение по электронам при увеличении поданного напряжения не сказывается на проводимости детектора в неравновесных условиях. В этом случае ВАХ приближается к линейному виду (штриховая прямая на рис. 1), а напряженность электрического поля распределяется однородно в объеме детектора при малых приложенных напряжениях (единицы вольт).

Отметим, что полученный результат принципиально отличается от представлений о наличии барьеров Шоттки, ограничивающих ток в детекторных структурах [5]. Область пространственного заряда такого барьера, созданная ионизированными донорами, практически не расширяется при приложении напряжения, так как в неравновесных условиях проводимость обусловлена дырками (для материала p -типа барьер приводит к обогащению по основным носителям — дыркам). Распространение поля в глубь детектора при увеличении напряжения контролируется балансом между темпами захвата и выброса носителей с ловушек, а плотность положительного заряда в объеме оказывается на несколько порядков ниже концентрации положительно заряженных ионов в приконтактном слое барьера Шоттки.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 11.2247.2017).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Tyazhev A.V., Budnitsky D.L., Koretskay O.B., Novikov V.A., Okaevich L.S., Potapov A.I., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 509. P. 34–39.
- [2] Veale M.C., Bell S.J., Duarte D.D., French M.J., Schneider A., Seller P., Wilson M.D., Lozinskaya A.D., Novikov V.A., Tolbanov O.P., Tyazhev A., Zarubin A.N. // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 752. P. 6–14.
- [3] Rogalla M., Runge K. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 434. P. 44–56.
- [4] Cola A., Reggiani L., Vasanelli L. // Semicond. Sci. Technol. 1997. V. 12. P. 1358–1364.
- [5] Kolesnikova I., Lozinskaya A., Mihaylov T., Novikov V., Shemeryankina A., Sherbakov I., Tolbanov O., Tyazhev A., Zarubin A. // JINST. 2016. V. 11. P. C03059 (1–6).
- [6] Прудаев И.А., Верхолетов М.Г., Королёва А.Д., Толбанов О.П. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 11. С. 21–29.
- [7] Prudaev I.A., Oleinik V.L., Smirnova T.E., Kopyev V.V., Verkholeto M.G., Balzovsky E.V., Tolbanov O.P. // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. V. 65. N 8. P. 3339–3344.
- [8] Sentaurus Device User Guide.
www.sentaurus.dsod.pl/manuals/data/sdevice_ug.pdf