

Радиационно-стимулированные процессы в транзисторных термосенсорах

© Б.В. Павлык, А.С. Грыпа

Львовский национальный университет им. Ивана Франко,
79000 Львов, Украина

E-mail: pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

(Получена 10 ноября 2015 г. Принята к печати 16 ноября 2015 г.)

Рассмотрены особенности радиационно-стимулированных изменений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик перехода эмиттер–база в транзисторах типа КТ3117. Показано, что на начальной стадии облучения (при дозах $D < 4000$ Гр для „пассивного“ режима облучения и $D < 5200$ Гр для „активного“) наблюдается увеличение тока через эмиттерный переход, что обусловлено эффектом радиационно-стимулированного упорядочения дефектной структуры p – n -перехода. Также показано, что рентгеновское облучение ($D < 14000$ Гр) и последующие временная релаксация (96 ч) и термический отжиг (2 ч при 400 К) исследуемых транзисторных термосенсоров приводят к повышению их радиационной стойкости.

1. Введение

Изучению механизмов генерации и эволюции радиационных дефектов в полупроводниковых материалах и приборах уделяется довольно много внимания [1–4]. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что полупроводниковые кристаллы и особенно кремний остаются на сегодняшний день базисом твердотельной микро- и наноэлектроники. Наличие структурных дефектов, а также их термо- и радиационно-стимулированная перестройка в приповерхностных слоях кристаллов зачастую определяют стабильность рабочих характеристик и параметров приборов. Особое внимание исследователей обращено на повышение радиационной стойкости термоэлектрических преобразователей.

Использование транзисторных термосенсоров в современной электронике обусловлено их относительно низкой себестоимостью, высоким быстродействием и точностью измерения, а также их миниатюризацией. Существенным преимуществом транзисторных термосенсоров является линейность температурной зависимости измеряемого напряжения $U = f(T)$ и довольно широкий диапазон рабочих температур. Стабильность измеряемых величин обусловлена низким сопротивлением p – n -перехода в прямом включении (в 10^4 – 10^5 раз меньшим, чем в обратном). Это обеспечивает минимальное влияние процессов шунтирования поверхностными каналами. Необходимо также отметить, что транзисторные термодиоды обладают более высокой по сравнению с диодами воспроизводимостью измеряемых величин, поскольку они в меньшей степени зависят от сопротивления базы и процессов рекомбинации неосновных носителей заряда в базовой области.

Одними из высокоэффективных первичных термоэлектрических преобразователей являются высокочастотные транзисторы [4–6]. Как правило, для измерения температуры используется прямое падение напряжения на переходе эмиттер–база U_{p-n} с закороченным на базу коллекторным переходом [7].

В настоящее время существует довольно большая необходимость измерения температуры в средах с высокой интенсивностью радиационных полей. Однако исследования влияния радиации на закономерности изменений электрофизических характеристик транзисторных термосенсоров практически не проводятся. Также отсутствуют исследования радиационно-стимулированных и релаксационных процессов в таких p – n -переходах.

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния рентгеновского излучения и последующих релаксационных процессов на изменения вольт-амперных (ВАХ), вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-температурных (ВТХ) характеристик p – n -переходов высокочастотных транзисторов КТ3117.

2. Методика эксперимента

В качестве термосенсора использован переход эмиттер–база с закороченным на базу коллектором в транзисторах КТ3117, работающих в режиме низкого уровня инжекции, в которых геометрическая толщина низколегированной базы d намного меньше, чем диффузионная длина пробега носителей заряда $L = \sqrt{D^* \tau_{ef}}$, где D^* — коэффициент диффузии, $\tau_{ef} = (\tau_v \tau_s) / (\tau_v + \tau_s)$ — эффективное время жизни неосновных носителей в базе, τ_v — постоянная времени объемной рекомбинации, τ_s — постоянная времени поверхностной рекомбинации.

Для экспериментальных исследований были отобраны транзисторы с одинаковыми исходными электрофизическими параметрами и характеристиками, изготовленные по планарно-эпитаксиальной технологии. Измерения температуры проводились по изменению падения напряжения на прямой ветви ВАХ эмиттер–база при заданном постоянном токе через переход. Величину тока ($I \approx 0.05$ – 0.1 мА) выбирали так, чтобы избежать саморазогрева датчика и тем самым устранить его влияние на измерение температуры.

Отобранные образцы разделили на две группы: первую группу облучали в „активном“ режиме, т. е. с приложен-

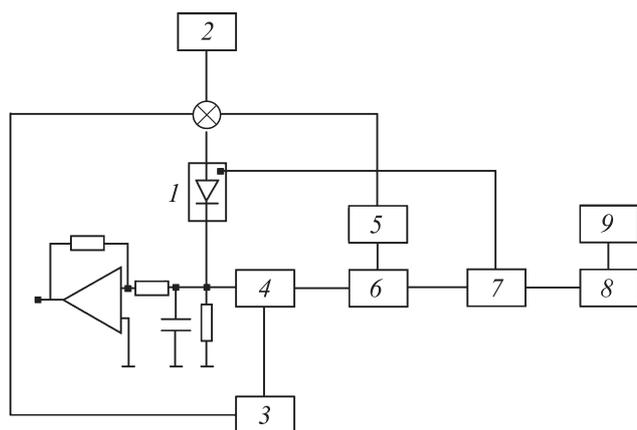


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования ВФХ: 1 — образец, 2 — источник постоянного смещения, 3 — высокочастотный генератор, 4, 6 — полосовые усилители с синхронными детекторами, 5 — генератор низкочастотной, 7 — блок обработки данных, 8 — АЦП, 9 — компьютер.

ным к переходу прямым напряжением ($U = 0.7$ В); вторую группу — в „пассивном“ режиме, без приложенного электрического поля.

Рентгеновское облучение проводили с использованием установки УРС-1.0 (напряжение 45 кВ, ток 8 мА, W-анткатод). ВТХ исследовали с помощью оригинальной установки, описанной в работе [5]. Исследования ВФХ транзисторных $p-n$ -переходов проводили с использованием емкостно-модуляционного спектрометра ГУ7-1. Величину дифференциальной емкости $p-n$ -

структуры определяли с помощью малого по амплитуде переменного напряжения при постоянном смещении. Измерения ВФХ производили на частоте 125 кГц при медленно изменяющемся смещении. Блок-схема установки показана на рис. 1.

3. Экспериментальные результаты и их анализ

Известно, что на ВАХ кремниевого диода, построенных в полупологарифмическом масштабе, в диапазоне прямых приложенных напряжений четко прослеживаются линейные участки [8]. Эти участки соответствуют разным механизмам токопереноса. В нашем случае это: 0.0–0.75 В — диффузионный механизм токопереноса; 0.75–1.0 В — рекомбинационный механизм; 1.0–2.0 В — комбинированный механизм токопереноса. Для более детального анализа закономерностей радиационно-стимулированных изменений тока на этих участках ВАХ были построены зависимости тока от дозы облучения, $I = f(D)$, которые представлены на рис. 2. На начальной стадии облучения ($D < 4000$ Гр для „пассивного“ режима облучения и $D < 5200$ Гр для „активного“) значения прямого тока всех участков ВАХ при увеличении дозы облучения возрастают, однако с разной скоростью. Чем больше начальное значение тока, тем выше скорость его радиационно-стимулированных изменений. Минимальное увеличение тока претерпевает диффузионная компонента в обоих режимах облучения (кривые 1 и 4 на рис. 2). Максимальные изменения наблюдаются на участке при $U > 1.0$ В. Увеличение

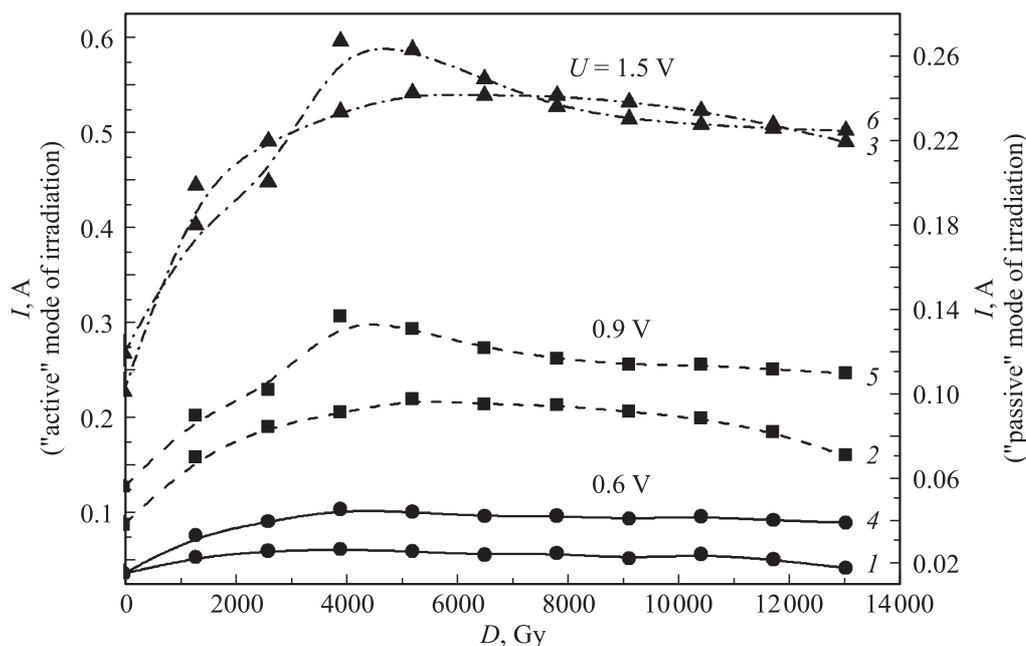


Рис. 2. Радиационно-стимулированные изменения величины тока через эмиттерный $p-n$ -переход на линейных участках ВАХ: диффузионный механизм токопереноса ($U = 0.6$ В), рекомбинационный механизм ($U = 0.9$ В), комбинированный механизм токопереноса ($U = 1.5$ В). (1–3) — „активный“ режим облучения; (4–6) — „пассивный“ режим облучения.

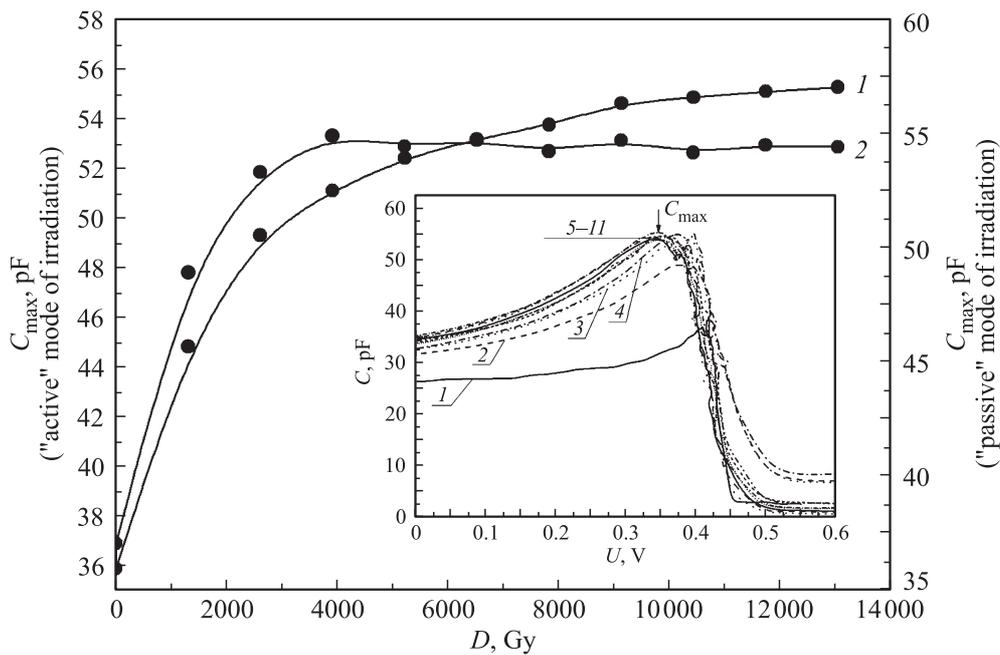


Рис. 3. Радиационно-стимулированные изменения емкости в характерном максимуме C_{max} : 1 — „активный“ режим облучения, 2 — „пассивный“ режим облучения. На вставке — ВФХ термосенсора до облучения (1) и после облучения дозами 1300 (2), 2600 (3), 3900 (4), 5200–13 000 Гр (5–11).

силы тока через переход эмиттер–база обусловлено „эффектом малых доз“ — радиационно-стимулированного упорядочения дефектной структуры, в первую очередь в контактных областях $p-n$ -переходов транзисторных термосенсоров.

Несмотря на то что общие закономерности изменения тока через $p-n$ -переход в обоих режимах облучения очень похожи, начальные значения величины тока (I_0) различаются в 2 раза. Максимальное радиационно-стимулированное значение тока (I_m) достигается при разных поглощенных дозах: 4000 Гр — „пассивный“ режим, 5200 Гр — „активный“ режим.

Увеличение начального тока в 2 раза и увеличение дозы облучения, при которой на ВАХ достигаются максимальные значения измеряемых величин, обусловлено пространственным разделением приложенным электрическим полем радиационно-индуцированных электронно-дырочных пар с участием водородных центров [9].

Анализ ВФХ $C(U)$ также показал, что на начальной стадии облучения, как в „пассивном“, так и в „активном“ режимах, наблюдается увеличение емкости в характерном максимуме C_{max} (рис. 3). Наличие данного максимума обусловлено формированием положительного заряда в переходном слое границы раздела $p-n$ -перехода.

Отличительной чертой ВФХ, полученной при „активном“ режиме облучения, является то, что кривая $C(D)$ (рис. 3) изменяется более плавно и выходит на насыщение только при $D = 11\ 000$ Гр.

Выход на насыщение значения тока через $p-n$ -переход и емкости на ВФХ при поглощенных дозах об-

лучения $D \geq 4000$ Гр („пассивный“ режим облучения) обусловлен уравниванием процессов радиационно-стимулированной генерации электрически активных дефектов и рекомбинационных процессов с участием свободных носителей заряда. Необходимо также учитывать уменьшение времени жизни носителей заряда, обусловленное образованием радиационных дефектов с энергетическими уровнями вблизи середины запрещенной зоны $E_g/2$. Такие генерационно-рекомбинационные центры обладают большим сечением захвата носителей заряда, вследствие чего время жизни неравновесных носителей заряда будет уменьшаться.

Корреляция радиационно-стимулированных изменений ВАХ и ВФХ в обоих режимах облучения подтверждает высказанные предположения о пространственном разделении электронно-дырочных пар в „активном“ режиме облучения. При анализе закономерности изменений ВАХ и ВФХ необходимо учитывать наличие в приповерхностных слоях нескольких конкурирующих процессов, доминирующих на разных стадиях облучения: генерация и рекомбинация носителей заряда; эволюция структурных дефектов; появление компоненты радиационно-стимулированной диффузии дефектов на начальной стадии облучения.

Несмотря на соответствующие радиационно-стимулированные изменения ВАХ и ВФХ термосенсора, его вольт-температурные характеристики в пределах исследуемых доз облучения изменяются на 3–4%, т.е. чувствительность термосенсора практически не изменяется. При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать, что падение напряжения U на

транзисторном термосенсоре равно $U = U_b + U_{p-n}$. Концентрация легирующей примеси в базе очень низка, а толщина базы значительно меньше длины свободного пробега носителей заряда, поэтому падение напряжения на базе U_b практически не претерпевает радиационно-стимулированных изменений.

Падение напряжения на $p-n$ -переходе определяется соотношением [10]

$$U_{p-n} = \frac{E_g}{q} - \frac{ckT}{q} \ln \frac{CT^{4-\alpha}}{IN\omega},$$

где T — температура, k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона, E_g — ширина запрещенной зоны; c — коэффициент, зависящий от механизма переноса заряда через $p-n$ -переход ($1 < c < 2$); C — постоянная, пропорциональная подвижности носителей заряда при $T = 300$ К, $C \neq f(T)$; α — показатель степени температурной зависимости подвижности, зависящий от типа материала и степени его легирования.

Из приведенных результатов (рис. 2, 3) видно, что радиационно-стимулированные изменения напряжения на $p-n$ -переходе эмиттер–база термосенсора U_{p-n} оказываются в 2–2.5 раза меньше, чем соответствующие изменения величины емкости в характерном максимуме на ВФХ. Такое отличие обусловлено различной зависимостью U_{p-n} и C_{\max} от радиационно-чувствительных параметров термосенсора. U_{p-n} является более интегральной характеристикой, зависящей от величины D опосредственно через подвижность носителей тока, тогда как C_{\max} зависит от концентрации заряда в области пространственного заряда и времени жизни неосновных носителей заряда в базовой области. Поскольку деградация времени жизни неосновных носителей заряда начинается при дозах облучения, в 1.5–2 раза меньших, чем изменения подвижности основных носителей заряда в базе [11], то и радиационно-стимулированные изменения U_{p-n} и C_{\max} соответственно будут различаться.

Особый интерес в данных исследованиях представляют процессы временной (96 ч при комнатной температуре) релаксации и термического отжига ($T = 400$ К, 2ч) в облученных термодатчиках. В нашем случае эти процессы сопровождаются тенденцией возвращения измеряемых величин к первоначальному значению. При повторном рентгеновском облучении характер изменений компонентов тока через $p-n$ -переход на ВАХ и величины емкости в характерном максимуме на ВФХ тот же самый, однако скорость радиационно-стимулированных изменений значительно меньше. Этот факт позволяет утверждать, что рентгеновское облучение ($D < 14000$ Гр) и последующие временная релаксация и термический отжиг исследуемых транзисторов приводят к повышению их радиационной стойкости.

4. Заключение

На начальной стадии облучения ($D < 4000$ Гр) в транзисторных термосенсорах доминируют процессы ра-

диационно-стимулированного упорядочения дефектной структуры („эффект малых доз“) $p-n$ -перехода, что подтверждается увеличением прямого тока через $p-n$ -переход.

Увеличение начального тока в 2 раза („активный“ режим облучения) и увеличение дозы облучения, при которой ВАХ выходит на насыщение, обусловлено пространственным разделением радиационно-индуцированных электронно-дырочных пар.

Выход на насыщение величины тока через $p-n$ -переход и емкости на ВФХ обусловлен уравниванием процессов радиационно-стимулированной генерации электрически активных дефектов и рекомбинационных процессов с участием свободных носителей заряда.

Временная релаксация при комнатной температуре и термический отжиг облученных термосенсоров приводят к частичному возврату исследуемых параметров (I_{p-n} , C_{\max}) в диапазон исходных значений, а повторное облучение приводит к уменьшению скорости радиационно-стимулированных изменений, т.е. к повышению их стойкости к рентгеновскому облучению.

Список литературы

- [1] А.Ф. Банишев. Вестн. МГУПИ, **35**, 71 (2011).
- [2] M. Ramamoorthy, E.L. Briggs, J. Bernholc. Phys. Rev. B, **60** (11), 8178 (1999).
- [3] Yu.M. Shwarts, M.M. Shwarts, O.M. Ivashchenko, O.V. Kondrachuk, L.I. Shpinar. Ukr. J. Phys., **49** (10), 1000 (2004).
- [4] Б.В. Павлык, Д.П. Слободзян, А.С. Грыпа, Р.М. Лыс, М.О. Кушлык, И.А. Шикоряк, Р.И. Дидык. ФТП, **46** (8), 1017 (2012).
- [5] Б.В. Павлык, А.М. Леновенко, А.С. Грыпа. СЭМСТ (Одесса), **10**, № 2, 94 (2013).
- [6] Yu.M. Shwarts, V.L. Borblik, N.R. Kulish, E.F. Venger, V.N. Sokolov. Sensors Actuators, **86**, 197 (2000).
- [7] В.М. Василюк, А.М. Леновенко, Н.О. Ковальчук. СЭМСТ (Одесса), № 3, 26 (2006).
- [8] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, с. 456. [Пер. с англ.: S. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, Wiley-Intersci. Publ., 1981) v. 1].
- [9] О.В. Александров. ФТП, **48** (4), 523 (2014).
- [10] Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман. *Физика сенсоров температуры и магнитного поля* (Одесса, Маяк, 2000).
- [11] Ш.Д. Курмашев, И.М. Викулин. СЭМСТ (Одесса), **2**(8), № 4, 90 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Radiation-stimulated processes in the transistor temperature sensors

B. Pavlyk, A. Hrypa

Ivan Franko National University of L'viv,
79000 L'viv, Ukraine

Abstract This paper reviews the radiation-stimulated changes of the current–voltage and capacitance–voltage characteristics of KT3117 transistor emitter–base junction. It is shown that at the initial stage of irradiation (doses of $D < 4000$ Gy for „passive“ exposure mode and $D < 5200$ Gy for „active“ exposure mode) the current value through the emitter junction increases due to the effect of radiation-stimulated ordering of the p – n junction defect structure. It is also shown that X -irradiation ($D < 14\,000$ Gy) and the subsequent time relaxation (96 h) and thermal annealing (2 h at 400 K) of the investigated transistor temperature sensors increase their radiation resistance.