

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Д. Н. Жданович¹, Н. Е. Жданович¹, С. Б. Ластовский¹,
И. Ф. Медведева², С. В. Шпаковский³

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19,
220072, Минск, Беларусь,

e-mail: zhdanovich_d@ifftp.bas-net.by

²⁾ Белорусский государственный медицинский университет, 220116, пр. Дзержинского, 83,
Минск, Беларусь, e-mail: medvedeva@ifftp.bas-net.by

³⁾ ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь,
e-mail: SShpakovskiy@integral.by

Приводятся результаты исследования воздействия электронного облучения в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и температур эксплуатации в диапазоне 120–420 К на напряжение пробоя комплиментарных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов при разных токах насыщения коллектора в схеме с общим эмиттером. Также методом спектроскопии DLTS определены электронные характеристики радиационно-индуцированных центров (РИЦ), вводимых облучением быстрыми электронами в коллекторную и эмиттерную области кремниевых $n-p-n$ -транзисторов.

Ключевые слова: транзистор; комплиментарная пара; электронное облучение; напряжение пробоя.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON BREAKDOWN VOLTAGE OF BIPOLAR TRANSISTORS

D. N. Zhdanovich¹, N. E. Zhdanovich¹, S. B. Lastovskii¹,
I. F. Medvedeva², S. V. Shpakovsky³

¹⁾ Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, 220072 Minsk, Belarus

²⁾ Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

³⁾ ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь

Corresponding author: D. N. Zhdanovich (zhdanovich_d@ifftp.bas-net.by)

The results of the study of the influence of electron irradiation in the fluence range of $1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ and operating temperatures in the range of 120–420 K on the breakdown voltage of complementary $n-p-n$ - and $p-n-p$ -transistors at different collector saturation currents in a circuit with a common emitter are presented. Additionally, the electronic characteristics of radiation-induced centers (RIC) introduced by fast electron irradiation into the collector and base regions of silicon $n-p-n$ -transistors were determined by DLTS spectroscopy.

Key words: transistor; complementary pair; electron irradiation; breakdown voltage.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время повысился интерес к использованию кремниевых транзисторов в широком диапазоне температур эксплуатации и при воздействии на них ионизирующих излучений (ИИ). Это обусловлено разработкой различного оборудования, предназначенного для работы на космических аппаратах лунной и марсианской про-

грамм. Основной объем данных по воздействию температуры и ионизирующих излучений ограничен диапазоном температур $-50-125^{\circ}\text{C}$ и небольшими дозами ИИ [1-3]. В то же время практически отсутствуют данные по воздействию температур ниже -50°C и высоких доз ИИ. В данной работе приводятся результаты по влиянию облучения и рабочей температуры на напряжение пробоя биполярных транзисторов обоих типов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследовались изменения напряжения пробоя биполярных транзисторов $n-p-n$ - (КТ 819) и $p-n-p$ - (КТ 818) типа, изготовленных на ОАО «ИНТЕГРАЛ», которые могут использоваться в качестве комплиментарной пары. Кристаллы исследуемых транзисторов КТ 819 и КТ 818 были изготовлены посредством термической диффузии на эпитаксиальном кремнии 30 КЭФ 10 (подложка 460 ЭКЭС 0,01) и 28 КДБ 11 (460 КДБ 0,03), соответственно. Толщина базы КТ 819 не превышала $8,0 \pm 0,8$ мкм, а КТ 818 – $7,0 \pm 0,8$ мкм. Глубина эмиттера КТ 819 составляла $3,5 - 5,5$ мкм и КТ 818 $3,0 - 5,0$ мкм. Концентрация носителей заряда в коллекторе КТ 818 равнялась $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а в коллекторе КТ 819 – $4,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Кристаллы исследуемых транзисторов имели размер $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Исследуемые образцы были облучены электронами с энергией 5 МэВ при плотности потока частиц $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ различными флюенсами ($1 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) при комнатной температуре. Напряжение пробоя коллектор-эмиттер в схеме с общим эмиттером определялось с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов. Измерения проводились импульсным методом с длительностью импульсов коллекторного тока 2 мс. Приведенные в работе графики построены на основании измеренных зависимостей коллекторного тока $I_{\text{ЭК}}$ от напряжения эмиттер-коллектор $U_{\text{ЭК}}$ при разных значениях тока базы $I_{\text{б}}$.

Определение характеристик ГУ РИЦ (энергия активации эмиссии и сечение захвата носителей заряда) в коллекторной и эмиттерной областях кремниевых транзисторов осуществлялось методом спектроскопии DLTS [1]. Спектры измерялись в диапазонах температур $80-300 \text{ K}$ в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены температурные зависимости в диапазоне $120-420 \text{ K}$ напряжения пробоя эмиттер-коллектор ($U_{\text{ЭК проб}}$) $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов при нулевом токе базы с сопротивлением в цепи базы 1 кОм и сопротивлением в цепи коллектора 500 Ом . Наблюдается немонотонный характер изменения температурной зависимости $U_{\text{ЭК проб}}$, особенно после высоких флюенсов электронного облучения. Так, в случае $p-n-p$ -транзисторов, облученных флюенсами 10^{15} см^{-2} и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается максимум значений $U_{\text{ЭК проб}}$ при температуре 300 K и снижение в области высоких температур. В случае $n-p-n$ -транзисторов при флюенсах меньше 10^{15} см^{-2} наблюдается аналогичная, хотя и менее выраженная, зависимость с максимумом, смещенным в область более низких температур. Такое различное положение максимумов на зависимостях $U_{\text{ЭК проб}}(T)$ для разных типов транзисторов обусловлено, по-видимому, различием в значениях подвижности электронов и дырок в n - и p - базе соответственно. При флюенсах 10^{15} см^{-2} и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается сильное увеличение $U_{\text{ЭК проб}}$ во всем диапазоне температур с максимальным значением при темпера-

туре 120 К. Такой характер зависимостей $U_{ЭК\text{ проб}}(T)$ при высоких флюенсах электронов обусловлен, видимо, особенностями компенсации коллекторного и базового слоя транзисторов радиационными дефектами. Падающий участок зависимостей при температурах выше температуры пика $U_{ЭК\text{ проб}}$ вызван преобладающим ростом генерационно-рекомбинационного тока в базе транзисторов по сравнению с увеличением напряжения пробоя «отдельного» коллекторного перехода при нагреве [2].

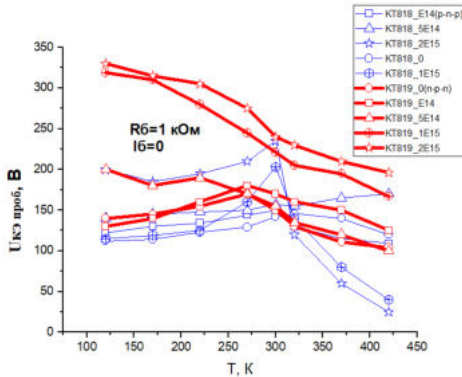


Рис. 1. Температурные зависимости напряжения пробоя эмиттер-коллектор ($U_{ЭК\text{ проб}}$) $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов при нулевом токе базы для разных флюенсов электронного облучения

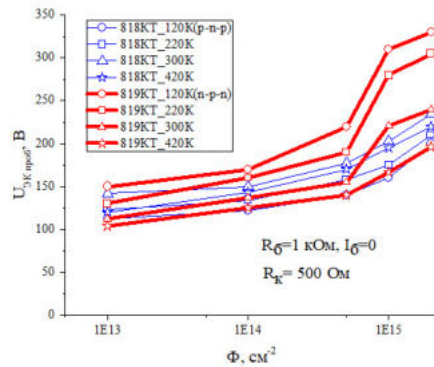


Рис. 2. Дозовые зависимости напряжения пробоя эмиттер-коллектор ($U_{ЭК\text{ проб}}$) $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов при нулевом токе базы при разных температурах измерения

Генерационно-рекомбинационные токи базы усиливаются в коллекторном переходе и выражение для тока коллектора при разомкнутой цепи базы имеет следующий вид:

$$I_{к} = BI_{Б} + (B + 1)I_{к0} \quad (1)$$

где $B = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$, α – коэффициент передачи тока эмиттера.

$$I_{к} = \frac{\alpha M I_{к0}}{1 - \alpha M}, \quad (2)$$

где M – коэффициент лавинного умножения носителей.

Тогда выражение для напряжения пробоя транзистора $U_{ЭК\text{ проб}}$ имеет следующий вид:

$$U_{ЭК\text{ проб}} = U_{М} \sqrt[n]{1 - \alpha}, \quad (3)$$

где $n = 2,5$ и $3,5$ для кремниевых n^+p - и p^+n - переходов соответственно, $U_{М}$ – напряжение лавинного пробоя коллекторного перехода. Из выражений 1–3 видно, что в нашем случае уменьшение составляющей $U_{ЭК\text{ проб}}$, обусловленной ростом тока базы при нагреве преобладает над ростом, обусловленным увеличением $U_{М}$. Это определяет уменьшение $U_{ЭК\text{ проб}}$ при температурах выше температуры максимума $U_{ЭК\text{ проб}}$. В диапазоне более низких температур зависимость $U_{ЭК\text{ проб}}(T)$ определяется соответствующей зависимостью $U_{М}(T)$ [3].#

На рисунке 2 приведены дозовые зависимости в напряжения пробоя эмиттер-коллектор $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов при нулевом токе базы при температурах измерения $T = 120-420$ К. Для обоих типов транзисторов наблюдается увеличение значения $U_{ЭК}$ проб и особенно значительно при флюенсах $(1-2) \cdot 10^{15}$ для $n-p-n$ -типа. Такое изменение связано, в основном, с компенсацией коллекторной области радиационными дефектами.

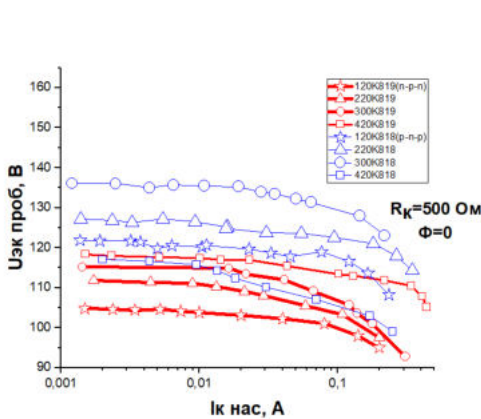


Рис. 3. Значения $U_{ЭК}$ проб необлученных $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов в зависимости от тока насыщения коллектора $I_{К\text{нас}}$ при разных температурах измерения

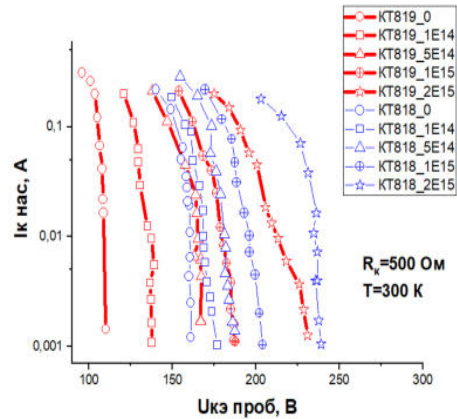


Рис. 4. Значения $U_{ЭК}$ проб $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов в зависимости от $I_{К\text{нас}}$ для разных флюенсов электронного облучения

На рисунке 3 приведены значения $U_{ЭК}$ проб необлученных $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов в зависимости от тока насыщения коллектора $I_{К\text{нас}}$ при температурах измерения в диапазоне 120–420 К. С ростом температуры $n-p-n$ - транзисторов наблюдается монотонное увеличение $U_{ЭК}$ проб при всех значениях $I_{К\text{нас}}$. Аналогичный характер поведения $U_{ЭК}$ проб для $p-n-p$ - транзисторов наблюдается только при $T = 120-300$ К. При $T = 420$ К зависимость $U_{ЭК}$ проб($I_{К\text{нас}}$) смещается в область более низких температур.

На рисунке 4 показаны значения $U_{ЭК}$ проб $p-n-p$ - и $n-p-n$ - транзисторов в зависимости от $I_{К\text{нас}}$ при температуре измерения 300 К для разных флюенсов облучения в диапазоне $10^{14}-2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Данные зависимости были получены при $I_{К\text{нас}} = 1-200$ мА. При $I_{К\text{нас}} > 200$ мА наблюдался прожиг коллекторного перехода транзисторных структур, связанный с тепловым пробоем. Как видно из представленных результатов, для обоих типов транзисторов наблюдается увеличение $U_{ЭК}$ проб с ростом флюенса электронов.

На рисунке 5, а показаны DLTS-спектры, измеренные для перехода коллектор–база $n-p-n$ -транзистора. Уровни, расположенные в верхней половине запрещенной зоны n -Si, дают при перезарядке основными носителями заряда максимумы, а в нижней половине запрещенной зоны при перезарядке неосновными носителями заряда – минимумы. Значение амплитуды этих пиков напрямую зависит от концентрации соответствующих РИЦ [1]. Из анализа зависимостей Аррениуса для всех пиков, определены электронные характеристики ГУ дефектов. Сопоставление полученных значений с известными литературными данными [4–6] позволило про-

вести идентификацию РИЦ. Ими являются комплексы: вакансия–кислород $V-O$ (А-центр) с глубоким уровнем акцепторного типа $E_c - 0,19$ эВ и сечением захвата $\sigma = 5,48 \cdot 10^{-14}$ см² и углерод внедрения–кислород внедрения C_iO_i с уровнем донорного типа $E_v + 0,36$ эВ и $\sigma = 2,27 \cdot 10^{-15}$ см². В несколько меньших концентрациях вводятся также дивакансии V_2 с двумя акцепторными уровнями $E_c - 0,25$ эВ и $\sigma = 5,26 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_c - 0,42$ эВ и $\sigma = 1,17 \cdot 10^{-15}$ см² (пики $V_2(=/-)$ и $V_2(-/0)$), а также метастабильный дефект тривакансия V_3 , свойства которого достаточно полно изучены в работе [4, 6]. Некоторая неопределенность возникает с DLTS-пиком E_{184} , максимум которого расположен на спектре при 184 К.

На рисунке 5, б представлены DLTS-спектры, измеренные для перехода эмиттер–база того же транзистора, что и на рисунке 5, а. Здесь менее легированной областью является p -область базы. В целом вид DLTS-спектра типичен для облученного электронами $p-Si$, полученного методом Чохральского [5]. Основными РИЦ в p -базе транзисторов являются: комплексы углерод внедрения–кислород внедрения C_iO_i с уровнем донорного типа $E_v + 0,36$ эВ и $\sigma = 2,27 \cdot 10^{-15}$ см², бор внедрения–кислород внедрения B_iO_i с уровнем донорного типа $E_c - 0,24$ эВ и $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-15}$ см², бор внедрения–углерод замещения B_iC_s с уровнем донорного типа $E_v + 0,31$ эВ и $\sigma = 4,9 \cdot 10^{-14}$ см², дивакансия с уровнем $E_v + 0,18$ эВ и $\sigma = 5,8 \cdot 10^{-16}$ см² (пик $V_2(+/0)$) и тривакансия с уровнем $E_v + 0,19$ эВ ($V_3(+/0)$) [6].

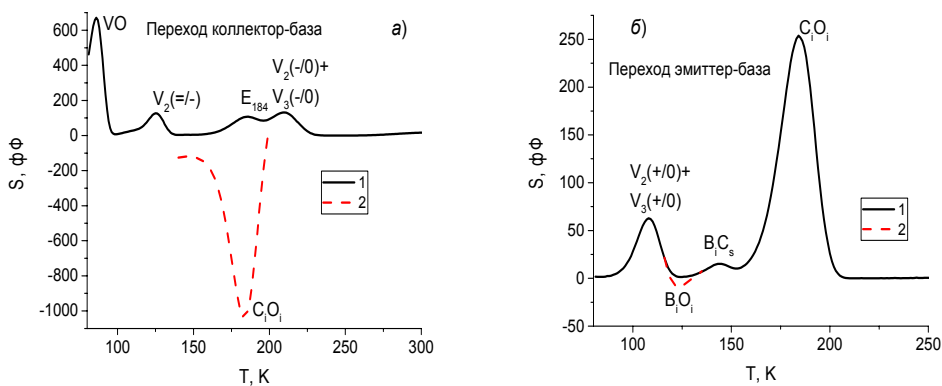


Рис. 5. Спектры DLTS, записанные в режимах перезарядки ГУ РИЦ основными (кр. 1) и неосновными (кр. 2) носителями заряда: а – для переходов коллектор – база; б – эмиттер – база $n-p-n$ -транзистора, облученного электронами с $E = 5$ МэВ флюенсом $\Phi = 10^{15}$ см⁻².

Спектры записаны при $U_{см} = -6$ В, $U_{зап} = -2$ В (кр. 1) и $+2$ В (кр. 2), $t_{зап} = 0,01$ с и $\epsilon_m = 19$ с⁻¹

Максимум DLTS-пика с наибольшей амплитудой на рисунке 5, б C_iO_i расположен при 184 К. Допустимо предположить, что этот пик C_iO_i может записываться одновременно с другими пиками дефектов, содержащихся в коллекторной n -области, при регистрации спектров перехода коллектор–база, в результате чего на спектрах возникает пик E_{184} .

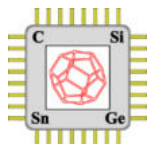
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что температурные (120–420 К) зависимости напряжения пробоя $U_{ЭК}$ проб p - n - p - и n - p - n - транзисторов после разных флюенсов облучения быстрыми электронами имеют немонотонный характер. Это явление обуславливается как компенсацией коллекторной и базовой области приборов (n - p - n -транзисторы), так и вкладом генерационно-рекомбинационной составляющей тока базы. Показано, что в n -область коллектора вводятся комплексы вакансия–кислород, углерод внедрения–кислород внедрения, а также дивакансия и тривакансия. Основными РИЦ в p -области базы являются комплексы углерод внедрения–кислород внедрения, бор внедрения–кислород внедрения, бор внедрения–углерод замещения, дивакансия и тривакансия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Lang, D.V. Deep-level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors / D.V. Lang // J. Appl. Phys. - 1974. - Vol. 45, № 7. - P. 3023–3032.
2. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
3. Дьяконов В.П. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. Солон-пресс, 2008.
4. Trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon / V.P. Markevich [et al.] // Phys. Rev. B. - 2009. - Vol. 80, № 23. - P. 235207 (1-7).
5. DLTS studies of carbon related complexes in irradiated n- and p-silicon / L.F. Makarenko [et al.] // Solid State Phenomena. - 2010. - Vols 156-158. - P. 155–160.
6. The trivacancy and trivacancy-oxygen family of defects in silicon / V.P. Markevich [et al.] // Solid State Phenomena. - 2014. - Vols 205-206. - P. 181–190.

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



ВУЗОВСКАЯ НАУКА, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ,
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Материалы
XI Международной научной конференции

Минск, 16–18 октября 2024 г.

Научное электронное издание

Минск, БГУ, 2025

ISBN 978-985-881-739-8

© БГУ, 2025