

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 621.315.592
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-353-359>

Поступила в редакцию 07.06.2018
 Received 07.06.2018

Ф. П. Коршунов, Н. Е. Жданович, В. А. Гуринович

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
 Минск, Беларусь*

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ *p-n-p-n*-СТРУКТУР

Аннотация. Приводятся результаты исследования влияния радиационных дефектов (РД) и термостабильных (до 873 К) радиационно-термических дефектов (РТД), введенных электронным облучением с энергией 4 МэВ и термообработкой, на статические и динамические характеристики кремниевых *p-n-p-n*-структур. Получены зависимости тока включения и тока выключения от времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) при высоком уровне инжекции в широкой *n*-базе структур с РД и РТД и аналогичные зависимости времени жизни ННЗ при высоком уровне инжекции от времени жизни при низком уровне инжекции. На измеренных *DLTS*-спектрах структур идентифицированы следующие уровни дефектов: $E_C - 0,18$ эВ принадлежит комплексу вакансия-кислород $V-O$ (А-центр), $E_V + 0,36$ эВ – комплексу углерод внедрения – кислород внедрения C_iO_i и $E_C - 0,25$ эВ и $E_C - 0,41$ эВ – комплексу дивакансия V_2 в двукратно и однократно отрицательно заряженных состояниях соответственно, а уровни $E_C - 0,39$ эВ и $E_V + 0,30$ эВ предположительно дефектам V_3O и C_iO_{2i} . Рекомбинационным уровнем, определяющим скорость переключения структур с РД, является уровень $E_C - 0,18$ эВ, а у структур с РТД – уровень $E_V + 0,39$ эВ. Показано, что токи включения и выключения больше у структур с радиационно-термическими, чем с радиационными дефектами, что увеличивает стойкость тиристорных структур с РТД к различным помехам и эффекту dU/dt . Полученные температурные зависимости тока управления и напряжения управления *p-n-p-n*-структур в диапазоне температур 77–320 К показывают возможность их использования в схемах в сочетании с высокотемпературными сверхпроводниками.

Ключевые слова: радиационный дефект, радиационно-термический дефект, быстрые электроны, время жизни неосновных носителей заряда, тиристор

Для цитирования. Коршунов, Ф. П. Влияние радиационно-термических дефектов на характеристики *p-n-p-n*-структур / Ф. П. Коршунов, Н. Е. Жданович, В. А. Гуринович. // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 353–359. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-353-359>

F. P. Korshunov, N. E. Zhdanovich, V. A. Gurinovich

Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INFLUENCE OF RADIATION-THERMAL DEFECTS ON CHARACTERISTICS OF *p-n-p-n*-STRUCTURES

Abstract. The article presents the results of study of the effect of radiation defects (RD) and thermally stable (up to 873 K) radiation-thermal defects (RTD), created by electron irradiation with an energy of 4 MeV and heat treatment on the static and dynamic characteristics of silicon thyristor *p-n-p-n* structures. The dependences of turn-on and turn-off current on the lifetime of minority charge carriers at a high injection level (in the range of 1.0–10 mks) are obtained in a thick *n*-base of structures with RD and RTD defects and the same dependences of the minority charge carriers lifetime at a low injection level. *DLTS*-spectra of the investigated structures and temperature dependences of control current and control voltage in the temperature range of 77–320 K are presented as well.

Keywords: radiation defect, radiation-thermal defect, fast electrons, lifetime of minority charge carriers, thyristor

For citation. Korshunov F. P., Zhdanovich N. E., Gurinovich V. A. Influence of radiation-thermal defects on characteristics of *p-n-p-n*-structures. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 353–359 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-3-353-359>

Введение. Кремниевые *p-n-p-n*-структуры являются основой коммутационных приборов – тиристоров. Важными характеристиками таких структур выступают как статические – токи включения, выключения, ток управления, напряжение переключения и остаточное напряжение, так и динамические – время включения и выключения. Обычно для увеличения их быстродействия

в структуры методом диффузии при высокой температуре вводят рекомбинационные центры, как правило, примеси золота или платины [1]. Но исследования [2–4] показали, что в качестве рекомбинационных центров для этих целей можно также использовать радиационные дефекты, введенные в приборные структуры путем облучения быстрыми электронами, гамма-лучами и другими проникающими излучениями.

Обычно структуры облучают определенными дозами проникающих излучений, а затем проводят их отжиг при температурах до 473 К для устранения нетермостабильных радиационных дефектов. После этого структуры заделывают в корпуса и получают готовые приборы. Но в ряде случаев возникает необходимость создания в приборных структурах дефектов, термостабильность которых превышает термостабильность радиационных дефектов, используемых в традиционной радиационной технологии (< 573 К). Особенно это необходимо для мощных тиристорных и других полупроводниковых приборов, радиационные дефекты в которых могут отжигаться за счет разогрева большими токами.

В настоящей работе приводятся результаты исследований характеристик переключения одной партии структур, облученных сравнительно небольшими дозами электронов, а также другой партии структур, облученных более высокими дозами и затем подвергнутых высокотемпературной обработке. В первых образцах образуются только радиационные дефекты (РД), а во вторых за счет перестройки их структуры – более термостабильные радиационно-термические дефекты (РТД).

Методика эксперимента. В качестве объектов использовались *p-n-p-n*-структуры, изготовленные по стандартной диффузионной технологии на основе кремния КЭФ-32 с удельным сопротивлением $32 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Облучение образцов двух партий проводилось на линейном ускорителе ЭЛУ-4 при комнатных температурах. Одна партия образцов облучалась электронами с энергией 4 МэВ в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Таким образом был получен набор структур с различными концентрациями РД.

Другая партия образцов, облученных быстрыми электронами той же энергии, но большими флюенсами ($5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), впоследствии отжигалась при температуре 773 К в течение 30 мин. Такой способ радиационно-термической обработки позволил вводить в кремниевые структуры более термостабильные дефекты (РТД) [3], чем дефекты, вводимые при традиционной радиационной технологии (РД). Так был получен еще один набор структур с различными концентрациями РТД. Измерения характеристик переключения исследуемых структур осуществлялись в широком диапазоне температур, вплоть до температуры жидкого азота (77 К). Подобные исследования структур с радиационными и радиационно-термическими дефектами ранее не проводились.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые *p-n-p-n*-структуры имели до радиационной и радиационно-термической обработки следующие характеристики при комнатной температуре: остаточное падение напряжения $U_T = 1,2 \text{ В}$ во включенном состоянии при токе 2 А, обратное напряжение $U_R = 400 \text{ В}$, ток управления $I_G = 5 \text{ мА}$. При облучении измерялись статические и динамические характеристики. Так, остаточное падение напряжения с ростом флюенса возрастало, скорость переключения увеличивалась. При флюенсах быстрых электронов свыше $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ структуры деградировали и не переключались.

На рис. 1 представлены зависимости тока включения $I_{\text{вкл}}$ и тока выключения $I_{\text{выкл}}$ исследуемых структур от значения времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ), измеренного при высоком уровне инжекции (τ_{pB}) в толстой *n*-базе структур при радиационной и радиационно-термической обработках (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно). Ток выключения – это минимальный ток, при котором структура еще удерживается в открытом состоянии.

Время жизни неосновных носителей заряда уменьшалось по мере увеличения дозы электронного облучения от 10 до 1 мкс. (Быстродействие тиристорных структур увеличивалось пропорционально уменьшению времени жизни ННЗ.) Как видно из рис. 1, в случае введения радиационно-термических дефектов наблюдается более сильная зависимость токов включения и выключения по сравнению с введением вторичных радиационных дефектов при одинаковом по величине уменьшении времени жизни ННЗ (увеличении быстродействия).

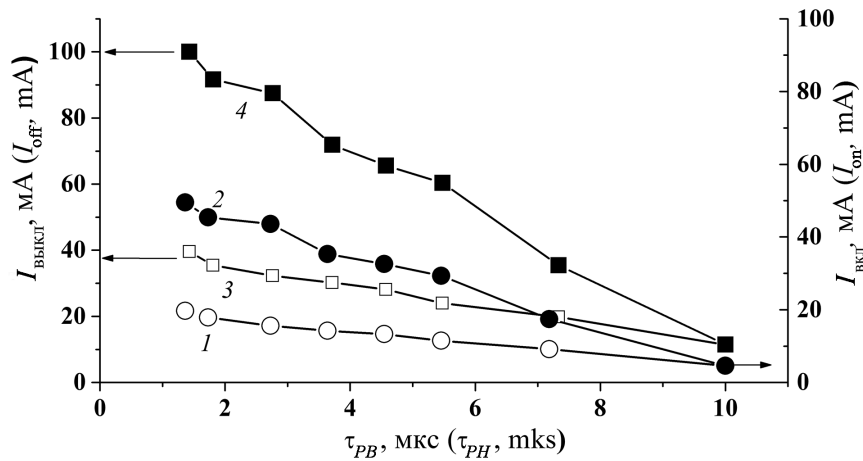


Рис. 1. Зависимость тока включения $I_{\text{вкл}}$ (кривые 1 и 2) и выключения $I_{\text{выкл}}$ (кривые 3 и 4) p - n - p -структур от времени жизни ННЗ τ_{PB} (время жизни измерялось при высоком уровне инжекции): 1, 3 – РД; 2, 4 – РТД

Fig. 1. Dependences of turn-on current I_{on} (curves 1 and 2) and turn-off current I_{off} (curves 3 and 4) of p - n - p -structures on the lifetime of minority charge carriers (MCC) at a high injection level (τ_{PH}): 1, 3 – RD; 2, 4 – RTD

На рис. 2 приведена зависимость соотношения времени жизни для случая РД к времени жизни для случая РТД, измеренных при относительно низком уровне инжекции (τ_{PHRD}/τ_{PHRTD}) от значения времени жизни при высоком уровне инжекции τ_{PB} . Прямой ток через структуру I_F при измерении времени жизни при низком уровне инжекции устанавливался на уровне, незначительно выше тока выключения (см. рис. 1, кривые 1, 2) и был в 10–100 раз ниже тока при измерении времени жизни при высоком уровне инжекции (1 А – максимальный ток установки для измерений τ_p). Как видно из кривой зависимости (τ_{PHRD}/τ_{PHRTD}) от τ_{PB} в случае РТД время жизни ННЗ при низком уровне инжекции уменьшается быстрее, чем в случае РД, и при максимальной концентрации дефектов (минимальных значениях времени жизни ННЗ при высоком уровне инжекции) различие достигает 30 %. Именно этим, по-видимому, частично объясняется различие в ходе зависимостей, приведенных на рис. 1. На характеристики переключения также должно влиять время жизни при низком уровне инжекции в узкой p -базе структур, однако получить такие зависимости для p -базы не удалось, поскольку она зашунтирована технологически на стадии изготовления сопротивлением 50 Ом в целях увеличения токов включения и выключения.

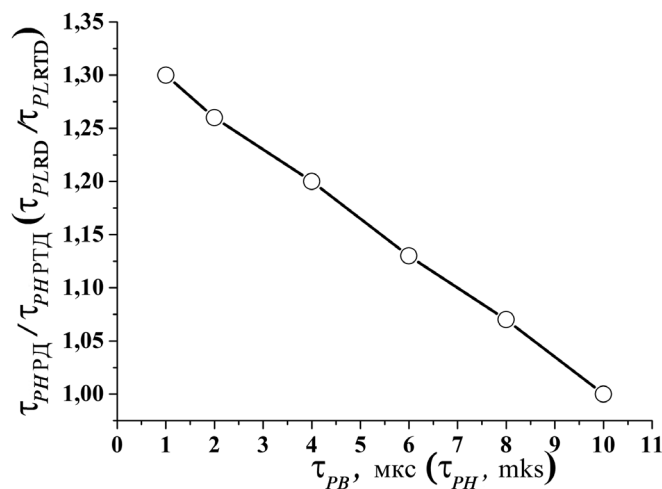


Рис. 2. Зависимость отношения значений времен жизни ННЗ при низком уровне инжекции структур с РД и РТД τ_{PHRD}/τ_{PHRTD} от значения времени жизни ННЗ при высоком уровне инжекции τ_{PB}

Fig. 2. Dependence of the ratio of the MCC lifetimes at a low injection level in structures with RD and RTD τ_{PLRD}/τ_{PLRTD} on the MCC lifetime at a high injection level τ_{PH}

На рис. 3 приведены *DLTS*-спектры исследуемых структур. Для наглядности все значения в спектрах структуры с РД умножены на 4. Таким образом, необходимо учитывать, что на самом деле концентрация РД примерно в 4 раза ниже, чем показано на спектрах.

Параметры глубоких уровней, наблюдаемые на *DLTS*-спектрах, определялись из зависимостей Аррениуса [5]. На спектрах облученных образцов в верхней и нижней половине запрещенной зоны были определены следующие энергетические уровни дефектов и рассчитаны значения энергии активации E_C и E_V и сечения захвата электронов σ_n и дырок σ_p .

На спектре 1. $E1$: $E_C - 0,18$ эВ, $\sigma_n = 1,86 \cdot 10^{-14}$ см²; $E2$: $E_C - 0,25$ эВ, $\sigma_n = 4,73 \cdot 10^{-15}$ см²; $E3$: $E_C - 0,27$ эВ, $\sigma_n = 2,11 \cdot 10^{-17}$ см²; $E4$: $E_C - 0,41$ эВ, $\sigma_n = 8,2 \cdot 10^{-16}$ см².

На спектре 2. $H1$: $E_V + 0,36$ эВ, $\sigma_p = 2,5 \cdot 10^{-15}$ см².

На спектре 3. E_T1 : $E_C - 0,39$ эВ, $\sigma_n = 5,7 \cdot 10^{-16}$ см².

На спектре 4. H_T1 : $E = E_V + 0,30$ эВ $\sigma_p = 3,1 \cdot 10^{-17}$ см².

Сопоставление полученных результатов с литературными данными [6, 7] свидетельствует о том, что уровень $E1$ принадлежит комплексу вакансии – кислород $V-O$ (А-центр), уровень $H1$ – комплексу углерод внедрения – кислород внедрения C_iO_i и $E2, E4$ – комплексу дивакансия V_2 в двукратно и однократно отрицательно заряженных состояниях соответственно. Что касается уровней E_T1, H_T1 , то можно предположить, основываясь на известных литературных данных, что это уровни V_3O [8] и C_iO_{2i} [9].

Исходя из полученных данных, можно сделать выводы, что в структурах с радиационными дефектами идет рекомбинация через доминирующий энергетический уровень $E_C - 0,18$ эВ, а у структур с РТД – через более глубокий доминирующий энергетический уровень $E_C - 0,39$ эВ. Известно также [10], что в случае высокого уровня инжекции эффективность рекомбинации определяется сечением захвата основных носителей заряда на уровень дефекта, а в случае низкого уровня инжекции существенное значение имеет глубина залегания уровня.

Поскольку в случае РТД рекомбинация идет через более глубокий уровень, то это, очевидно, и приводит к наблюдаемому усилению зависимости $I_{\text{выкл}}$ и $I_{\text{вкл}}$ от τ_{PH} (рис. 1, кривые 2, 4). Эта особенность поведения токов включения и выключения в случае РТД может быть использована для увеличения стойкости к эффекту dU/dt запираемых тиристоров, поскольку специфика работы последних не позволяет использовать для этой цели шунтирование перехода p -база – n -эмиттер.

На рис. 4 представлены температурные зависимости тока управления $I_{\text{упр}}$ и напряжения управления $U_{\text{упр}}$ в диапазоне температур 77–320 К для p - n - p -структур, содержащих РД и РТД (кривые 1, 3 и 2, 4 соответственно). Аналогичные зависимости были получены для времени

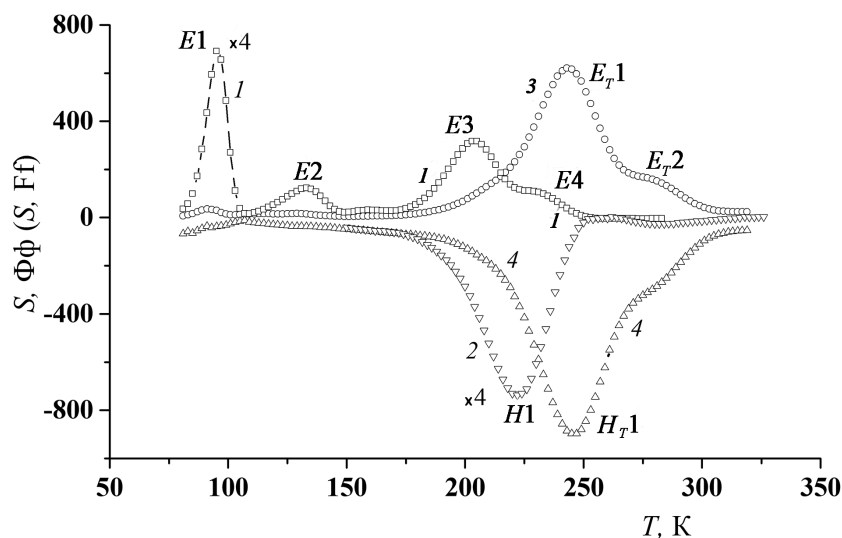


Рис. 3. *DLTS*-спектры исследуемых структур: 1, 2 – $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ см⁻², $E = 4$ МэВ, $T_{\text{отж}} = 293$ К, $e = 191,4$ с⁻¹; 3, 4 – $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻², $E = 4$ МэВ, $T_{\text{отж}} = 773$ К, $t_{\text{отж}} = 30$ мин, $e = 191,4$ с⁻¹

Fig. 3. *DLTS*-spectra of the investigated structures: 1, 2 – $F = 1 \cdot 10^{14}$ см⁻², $E = 4$ MeV, $T_{\text{ann}} = 293$ K, $e = 191.4$ s⁻¹; 3, 4 – $F = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻², $E = 4$ MeV, $T_{\text{ann}} = 773$ K, $t_{\text{ann}} = 30$ min, $e = 191.4$ s⁻¹

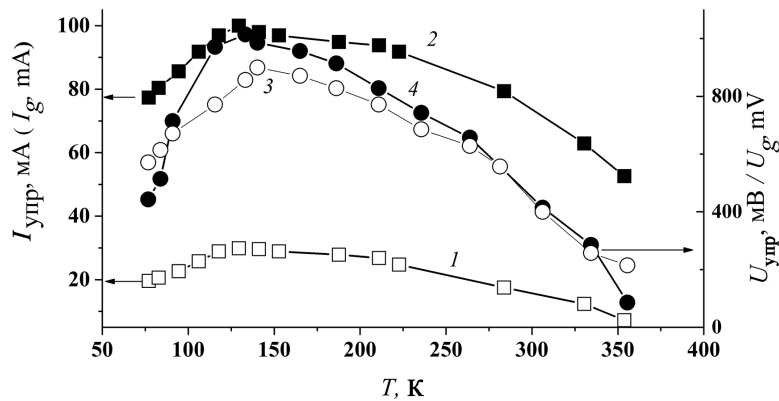


Рис. 4. Температурные зависимости тока ($I_{упр}$) и напряжения ($U_{упр}$) управления $p-n-p-n$ -структур, содержащих РД (1, 3) и РТД (2, 4) при одинаковом значении времени жизни ННЗ, измеренном при комнатной температуре

Fig. 4. Temperature dependences of control current (I_g) and control voltage (U_g) of $p-n-p-n$ -structures with RD (1, 3) and RTD (2, 4) at the same MCC lifetime measured at room temperature

включения и времени жизни неосновных носителей заряда (измеренном при низком уровне инжекции) в исследуемых структурах. Как видно, на температурных зависимостях наблюдается максимум, расположенный в области температур 150 К. Такой немонотонный ход зависимостей связан, по-видимому, с влиянием эффекта прилипания, обусловленного «вымораживанием» основных носителей заряда на уровни легирующей примеси в p - и n -областях $p-n-p-n$ -структур. Прилипание носителей приводит к тому, что с понижением температуры увеличивается значение времени жизни неосновных носителей заряда при низком уровне инжекции. Так, в [11] приведены следующие выражения, на основании которых можно оценить изменения времени жизни ННЗ в области низких температур. Рассматривается случай для времени жизни неравновесных электронов. В случае дырок выражение имеет тот же вид. Электрон может либо находиться в зоне проводимости, либо захватываться на уровень донорной примеси. Время релаксации между электронами в зоне проводимости и электронами на энергетическом уровне донорной примеси выражается следующим образом:

$$\tau_{relax} = 1 / \nu \cdot \exp \frac{-E_d}{kT} = (g_D / N_C S V_C) \exp \frac{E_d}{kT},$$

где E_d – энергия ионизации донора; ν – частота переходов с уровня в зону; S – сечение захвата на донорный уровень ($1 \cdot 10^{-14}$ см²), g_D – фактор вырождения донорного уровня (для кремния равен 2), V_C – средняя тепловая скорость для электронов. Время релаксации уровня для $E_d = 0,044$ эВ (уровень легирующей примеси фосфора) при 77 К равно 2,5 пс. Поэтому для кремниевых приборов, работающих вблизи температур 77 К, можно считать, что зона проводимости и донорный уровень находятся в квазиравновесном состоянии, т. е. отношение концентрации инжектированных электронов n_T к концентрации электронов в зоне проводимости n_c будет иметь следующий вид:

$$\frac{n_T}{n_c} = \frac{n_c + n_d}{n_c} = \frac{N_C + N_d g_D \exp(E_d / kT)}{N_C},$$

где n_d и n_c – концентрации электронов на донорных уровнях и в зоне проводимости, N_d – концентрация легирующей примеси, N_C – плотность состояний в зоне проводимости для фосфора $E_d = 0,044$ эВ, и тогда $\exp(E_d / kT) = 5$ при комнатной температуре и 800 при температуре 77 К. Расчеты показывают, что при $N_d = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (уровень легирования n -базы структур равен $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³; уровень легирования p -базы структур равен $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³) время жизни равновесных носителей заряда при 77 К увеличивается на 50 % по сравнению с тем, если бы не было прилипания носителей заряда на уровень легирующей примеси. Это увеличение приводит к росту тока управления и напряжения управления, а также времени включения $p-n-p-n$ -структур.

Отсутствие существенных различий в ходе температурных зависимостей тока управления и напряжения управления в структурах, содержащих РД и РТД, свидетельствует о том, что при низких температурах существенную роль играют параметры уровня прилипания, а не рекомбинации. Вместе с тем у структур, содержащих РТД, существенно возрастает величина токов включения и выключения, а также тока управления и напряжения управления при одинаковых значениях времени жизни ННЗ со структурами, содержащими РД.

Заключение. Таким образом, получены зависимости, характеризующие коммутационные свойства $p-n-p-n$ -структур с радиационными и радиационно-термическими дефектами от времени жизни неосновных носителей заряда в толстой n -базе. Показано, что токи включения и выключения больше у структур с РТД, чем у структур с РД, что увеличивает стойкость тиристорных структур с РТД к различным помехам и эффекту dU/dt . Полученные температурные зависимости переключения $p-n-p-n$ -структур в широком температурном интервале вплоть до температур жидкого азота (77 К) показывают возможность их использования в схемах в сочетании с высокотемпературными сверхпроводниками. Рекомбинационным уровнем, определяющим скорость переключения структур с РД, является уровень $E_C = 0,18$ эВ, а у структур с РТД – уровень $E_C = 0,39$ эВ.

Список использованных источников

1. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
2. Коршунов, Ф. П. Исследование термостабильных радиационных дефектов (до 800 °С) в $p-n$ -структурах на ядерно-легированном кремнии / Ф. П. Коршунов, Н. Е. Жданович // Актуальные проблемы физики твердого тела ФТТ-2016: сб. докл. Междунар. науч. конф., 22–25 нояб. 2016. – Минск, 2016. – Т. 2. – С. 66–68.
3. Влияние отжига на перестройку центров рекомбинации в облученных кремниевых структурах / Ф. П. Коршунов [и др.] // Докл. АН БССР. – 1988. – Т. 32, № 9. – С. 781–783.
4. Исследование радиационно-термических дефектов и их влияние на параметры кремниевых диффузионных $p-n$ -структур / Ф. П. Коршунов [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 1998. – № 3. – С. 64–68.
5. Берман, Л. С. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках / Л. С. Берман, А. А. Лебедев. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
6. Вавилов, В. С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В. С. Вавилов, В. Ф. Киселев, Б. Н. Мукашев. – М.: Наука, 1990. – 216 с.
7. Claeys, C. Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices / C. Claeys, E. Simoen. – Berlin: Springer, 2002. – 404 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
8. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon / V. P. Markevich [at al.] // Phys. Status Solidi A. – 2011. – Vol. 208, iss. 3. – P. 568–571. <https://doi.org/10.1002/pssa.201000265>
9. Радиационно-индуцированные центры с высокой термической стабильностью в кремнии p -типа / С. Б. Ластовский [и др.] // Перспективные материалы. – 2013. – № 9. – С. 19–23.
10. Евсеев, Ю. А. Силовые полупроводниковые приборы / Ю. А. Евсеев, П. Г. Дерменжи. – М.: Энергоиздат, 1981. – 72 с.
11. Jason, C. S. Woo. Optimization of silicon bipolar transistors for high current gain at low temperatures / C. S. Woo Jason, James D. Plummer // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1988. – Vol. 35, № 8. – P. 1311–1321. <https://doi.org/10.1109/16.2553>

References

1. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov A. V. *Radiation Effects in Integrated Circuits*. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1986. 254 p. (in Russian).
2. Korshunov F. P., Zdanovich N. E. Study of the thermostable radiation defects (up to 800°C) in $p-n$ -structures on nuclear-doped silicon. *Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela FTT-2016, sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, 22–25 noyab. 2016. T. 2* [Solid State Physics Topical Issues (SSP-2016). Conference Book of International Scientific Conference. November 22–25, 2016. Vol. 2]. Minsk, 2016, pp. 66–68 (in Russian).
3. Korshunov F. P., Marchenko I. G., Zdanovich N. E., Troschinskii V. T. Impact of annealing on recombination centers transformation in irradiated silicon structures. *Doklady AN BSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR*, 1988, vol. 32, no. 9, pp. 781–783 (in Russian).
4. Korshunov F. P., Zdanovich N. E., Marchenko I. G., Troschinskii V. T. Investigation of radiation-thermal defects and their influence on the characteristics of silicon diffused $p-n$ -structures. *Vestsi Natsyianal'най akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 1998, no. 3, pp. 64–68 (in Russian).

5. Berman L. S., Lebedev A. A. *Capacity spectroscopy of deep centers in semiconductors*. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 176 p. (in Russian).
6. Vavilov V. S., Kiselev V. F., Mukashev B. N. Defects in silicon and on its surface. Moscow, Nauka Publ., 1990. 216 p. (in Russian).
7. Claeys C., Simoen E. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin, Springer, 2002. 404 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
8. Markevich V. P., Peaker A. R., Hamilton B., Lastovskii S. B., Murin L. I., Coutinho J., Torres V. J. B., Dobaczewski L., Svensson B. G. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon. *Physical Status Solidi A*, 2011, vol. 208, no. 3, pp. 568–571. <https://doi.org/10.1002/pssa.201000265>
9. Lastovskii S. B., Murin L. I., Markevich V. P., Korshunov F. P., Medvedeva I. F. Radiation-induced centers with high thermal stability in p-type silicon. *Perspektivnye materialy*, 2013, no. 9, pp. 19–23 (in Russian).
10. Evseev Yu. A., Dermenji P. G. *Semiconductor power devices*. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 72 p. (in Russian).
11. Jason C. S. Woo, Plummer James D. Optimization of silicon bipolar transistors for high current gain at low temperatures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, vol. 35, no. 8, pp. 1311–1321. <https://doi.org/10.1109/16.2553>

Информация об авторах

Жданович Николай Евгеньевич – научный сотрудник лаборатории «Радиационные воздействия», Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: jdan@ifftp.bas-net.by

Гуринович Валентина Артемовна – научный сотрудник лаборатории «Радиационные воздействия», Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gurinovich@ifftp.bas-net.by

Коршунов Федор Павлович – член-корреспондент, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория «Радиационные воздействия», Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: korshun@ifftp.bas-net.by

Information about the authors

Nikolai E. Zhdanovich – Researcher of the Laboratory of the Radiation Effects, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: jdan@ifftp.bas-net.by

Valentina A. Gurinovich – Researcher of the Laboratory of the Radiation Effects, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gurinovich@ifftp.bas-net.by

Fedor P. Korshunov – Corresponding Member, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of the Radiation Effects, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korshun@ifftp.bas-net.by