

06

Отказы мощных полевых транзисторов под действием протонов

© Н.А. Иванов, Е.В. Митин, В.В. Пашук, М.Г. Тверской

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,
Гатчина

ОАО „РНИИ Электронстандарт“, Санкт-Петербург

E-mail: ivanovna@pnpi.spb.ru

Поступило в Редакцию 27 июля 2010 г.

Исследовано воздействие протонов с энергией 1000 MeV на ряд типовых мощных полевых транзисторов, изготовленных по микроэлектронной технологии. Показано, что под действием протонов в этих изделиях происходит пробой подзатворного окисла, приводящий к „катастрофическому отказу“ прибора. Предложена модель возникновения этих отказов, основанная на образовании в чувствительной области транзисторов быстрых остаточных ядер в результате ядерных реакций протонов с ядрами атомов полупроводникового материала.

В настоящее время в аппаратуре космического назначения, в импульсных преобразователях вторичных источников питания широко применяются мощные полевые (металл–окисел–полупроводник) транзисторы (далее MOSFET). Современные MOSFET преимущественно изготавливаются с вертикальной структурой элементарной ячейки (рис. 1), позволяющей получить крайне низкие (единицы $m\Omega$) сопротивления сток–исток в открытом состоянии и достаточно высокие (до полутора kV) пробивные напряжения. При работе в диапазоне низких и средних напряжений MOSFET находятся вне конкуренции благодаря указанным достигнутым параметрам, а также малым временам переключения (десятки ns) и высокой надежности.

Известно, что под действием отдельных тяжелых ионов в этих транзисторах наблюдается пробой подзатворного окисла (SEGR-эффект — Single event Gate Rupture), который проявляется в резком росте тока утечки затвора [1,2] и приводит к отказу прибора. Одной из причин возникновения этого эффекта является снижение пробивного напряжения диэлектрика при прохождении через его объем ионизирующей

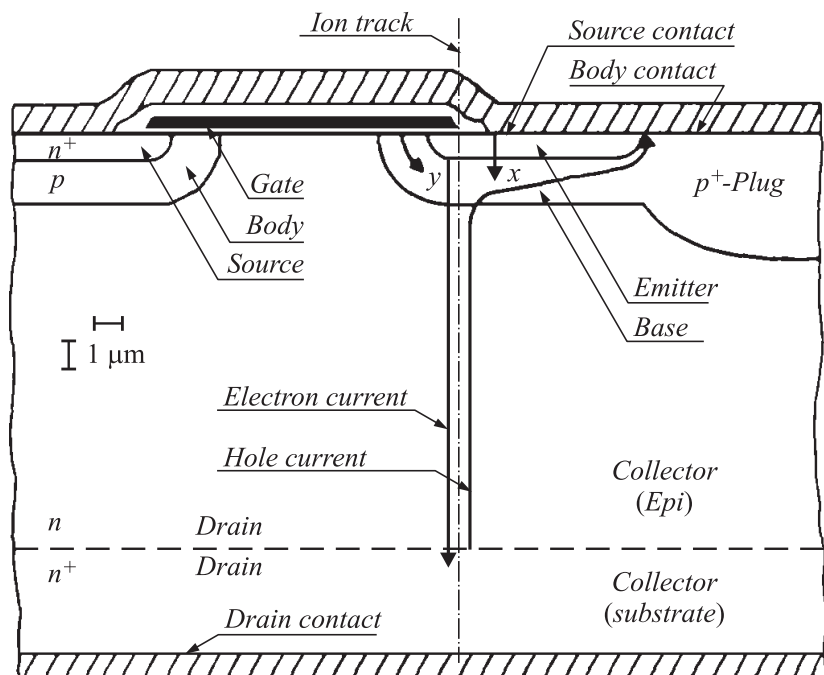


Рис. 1. Сечение ячейки MOSFET.

частицы. Вторая причина связана с вкладом подложки, в которой при прохождении иона создается большая концентрация неравновесных носителей тока, способствующая подводу напряжения сток-исток к границе кремния и подзатворного окисла и тем самым к увеличению напряженности поля в подзатворном диэлектрике.

Вследствие этого исследование воздействия различных типов частиц космического излучения на такие транзисторы представляет интерес. В настоящей работе изучалось возникновение SEGR-эффекта в ряде мощных типовых MOSFET под действием высокоэнергетических протонов.

Облучение MOSFET проводилось на синхроциклотроне ПИЯФ РАН при энергии протонов 1000 MeV. Типы исследуемых MOSFET и их основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Типы и основные параметры исследуемых MOSFET

№ п/п	Тип MOSFET	Тип канала	Электрические параметры		
			Максимальное напряжение сток-исток ($U_{DS \max}$), V	Максимальный ток стока ($I_{D \max}$), A	Максимальное напряжение затвор-исток ($U_{GS \max}$), V
1	IRF520	<i>N</i>	100	9.7	± 20
2	IRF530	<i>N</i>	100	17	± 20
3	IRF630	<i>N</i>	200	9	± 20
4	IRF630FP	<i>N</i>	200	9	± 20
5	IRF9540	<i>P</i>	-200	19	± 20
6	IRF9640	<i>P</i>	-200	11	± 20

Получение экспериментальных данных о напряжениях сток-исток (U_{GS}) и затвор-исток (U_{DS}), приводящих к возникновению SEGR-эффекта в MOSFET, проводилось в следующем порядке:

- выборка из четырех MOSFET облучалась протонами при некотором фиксированном значении U_{DS} (от 0 до $U_{DS \max}$) и начальном значении U_{GS} ;

- при отсутствии отказов всех MOSFET выборки после флюенса протонов $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (выбор конкретной величины флюенса протонов обусловлен условиями длительной эксплуатации MOSFET в космическом пространстве и соответствует 15 Gy поглощенной дозы по кремнию) напряжение U_{GS} увеличивалось на 2–5 V и начинался новый сеанс облучения;

- сеансы облучения повторялись вплоть до отказа всех MOSFET выборки;

- процедура повторялась для другого фиксированного значения U_{DS} .

На рис. 2 приведены зависимости пороговых напряжений SEGR-эффекта для следующих MOSFET: *a* — IRF520 и IRF530 ($U_{DS \max} = 100 \text{ V}$); *b* — IRF630 ($U_{DS \max} = 200 \text{ V}$) в двух конструктивных исполнениях — с металлическим фланцем (собственно IRF630) и в полностью изолированном пластмассовом корпусе (IRF630FP); *c* — IRF9640 и IRF 9540 ($U_{DS \max} = 200 \text{ V}$).

Результаты измерений показали, что для перечисленных MOSFET напряжение пробоя затвор–исток при нулевом напряжении сток–

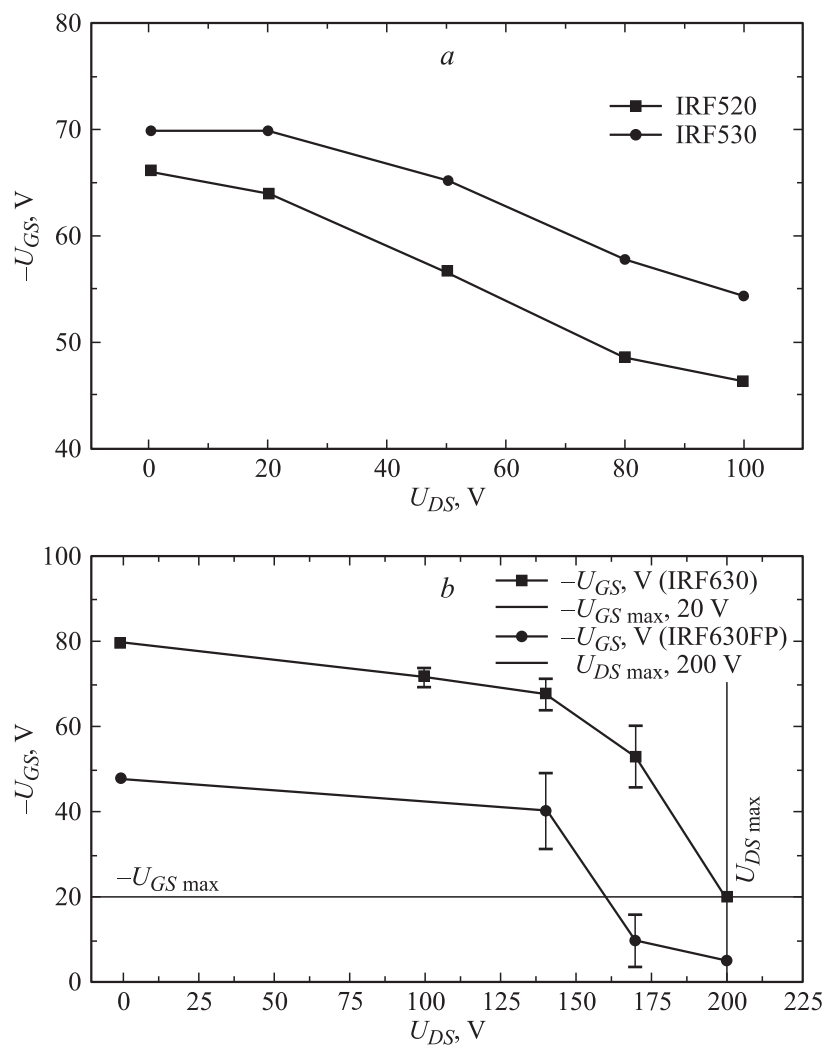


Рис. 2. Зависимости пороговых напряжений SEGR-эффекта для MOSFET: *a* — IRF520 и IRF530; *b* — IRF630 и IRF630FP; *c* — IRF9640 и IRF9540.

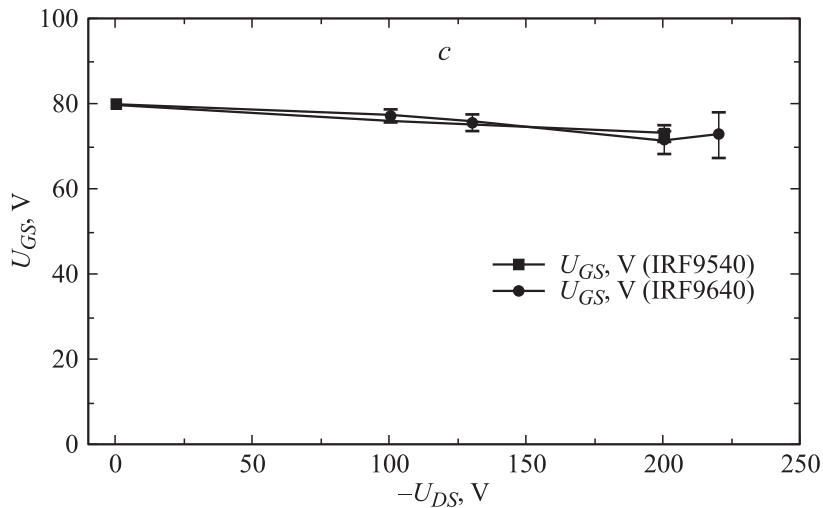


Рис. 2 (продолжение).

исток ($U_{DS} = 0$) совпадает с напряжением электрического пробоя в необлученных образцах $-U_{GSbr}$. MOSFET при $U_{DS} = 0$ практически представляет собой MOS-конденсатор, напряжение пробоя U_{GSbr} которого пропорционально толщине окисной пленки. В работах [3,4] было показано, что облучение пленки диэлектрика MOSFET частицами с линейными потерями энергии LET менее $15 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ не влияет на напряжение ее электрического пробоя. Поскольку LET самих протонов и вторичных частиц, образующихся при ядерных взаимодействиях протонов с ядрами кремния, не превышают эту величину [5], можно утверждать, что полученные нами данные по облучению протонами транзисторов при $U_{DS} = 0$ совпадают с выводами работ [3,4].

Для анализа экспериментальных данных использована зависимость величины пробивного напряжения затвор-исток вертикальных N -канальных MOSFET от LET ионов, проходящих через транзистор [6]:

$$U_{GS} = 0.87 \left(1 - \exp \left[-\frac{L}{18} \right] \right) U_{DS} - \frac{10^{-7} T_{ox}}{1 + \frac{L}{53}}, \quad (1)$$

где U_{GS} — напряжение пробоя подзатворного окисла, V; U_{DS} — напряжение сток-исток, V; T_{ox} — толщина пленки окисла, см; L — LET

Таблица 2. Параметры аппроксимации

Тип MOSFET	U_{GSbr} , эксп., V	U_{GSbr} , аппр. 2, V	LET, аппр. 2, $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$
IRF520	66.1	68.2	5.53
IRF530	70	74.5	4.70
IRF630	80.0	80.1	1.85
IRF630FP	48	48	1.18

ионов, $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$. Поскольку облучение протонами практически не влияет на электропрочность окисной пленки, то второе слагаемое в (1) равно $10^{-7} \cdot T_{ox} = U_{GSbr}$. В этом случае зависимость $U_{GS}(U_{DS})$ — линейная функция, вид которой зависит от частиц LET, проходящих через эпитаксиальный слой транзисторов:

$$U_{GS} = 0.87(1 - \exp(-L/18))U_{DS} - U_{GSbr}. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных по SEGR-эффекту в транзисторах IRF520, IRF530, IRF630 и IRF630FP. Из этой таблицы следует, что полученные величины LET примерно на три порядка превышают LET для протонов с энергией 1000 MeV ($\sim 2 \text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) и попадают в диапазон LET вторичных частиц, образующихся в ядерных реакциях протонов с ядрами кремния [5]. Этот результат указывает на то, что наблюдаемый SEGR-эффект обусловлен продуктами ядерных реакций и представляет собой типичный эффект воздействия отдельных частиц.

Сравнение чувствительности к SEGR-эффекту для MOSFET с различными предельными напряжениями U_{DS} (рис. 2 *a, b*) (т.е. с различной толщиной эпитаксиальных слоев: $h : h \approx 10 \mu\text{m}$ для IRF520 и IRF530, $h \approx 20 \mu\text{m}$ для IRF9640 и IRF9540) показывает, что заметное снижение порогового значения U_{GS} наблюдается для 100-вольтовых MOSFET практически с $U_{DS} = 0$, а для 200-вольтовых MOSFET — с $U_{DS} = 100 \text{V}$. Это означает, что пробег вторичных частиц — продуктов ядерных реакций, ионизирующих эпитаксиальный слой MOSFET в достаточной степени для развития SEGR-эффекта, превышает $10 \mu\text{m}$. Таким образом, SEGR-эффект может вызываться достаточно легкими вторичными частицами с малыми LET и большими пробегами. Отметим, что в пользу

данного вывода свидетельствуют и результаты вычисления величин LET по аппроксимации 2 (табл. 2).

Сравнение данных для N - и P -канальных MOSFET (рис. 2, b, c) показывает, что чувствительность P -канальных транзисторов к SEGR-эффекту намного меньше, чем N -канальных. Эти результаты согласуются с данными других авторов [7].

Данные по облучению транзисторов IRF630 показали, что в зависимости от технологии изготовления (партии выпуска) MOSFET с кристаллом одного типа могут иметь значительный разброс своих характеристик и соответственно различную устойчивость к SEGR-эффекту (рис. 2, b). MOSFET IRF630FP, единственный среди всех исследованных, оказался чувствительным к SEGR-эффекту в пределах области допустимой работы: при U_{DS} менее 200 В и U_{GS} более -20 В. Это означает, что данное изделие не следует применять в космических аппаратах.

Для оценок стойкости изделий полупроводниковой электроники к отказам под действием отдельных частиц используются величины сечения возникновения отказов Σ , которые определяются экспериментально из соотношения:

$$\Sigma = N/(\Phi z), \quad (3)$$

где N — количество зарегистрированных отказов при облучении выборки из z изделий флюенсом частиц Φ . В настоящей работе при исследовании SEGR-эффекта $z = 4$, а в качестве Φ использовалась либо величина флюенса до отказа всех изделий, испытывавшихся в одном сеансе, либо (в случае отсутствия отказов или отказа не всех изделий выборки) максимальный флюенс за сеанс $\Phi_{\max} = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Если при флюенсе Φ_{\max} пробоев не зафиксировано, то оценивалась максимальная величина сечения Σ_{\max} , равная:

$$\Sigma_{\max} = 1/(\Phi_{\max} z) = 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2. \quad (3a)$$

Зависимости $\Sigma(U_{GS})$, рассчитанные в соответствии с формулами (3) и (3a) для MOSFET, по которым получена достаточная экспериментальная статистика, приведены на рис. 3. Из этого рисунка видно, что величины сечений SEGR-эффекта растут с ростом напряжений U_{GS} при постоянных значениях U_{DS} . Данное обстоятельство обусловлено тем, что с ростом U_{GS} все большее число продуктов ядерных реакций имеет величины пробегов и LET, достаточные для возникновения

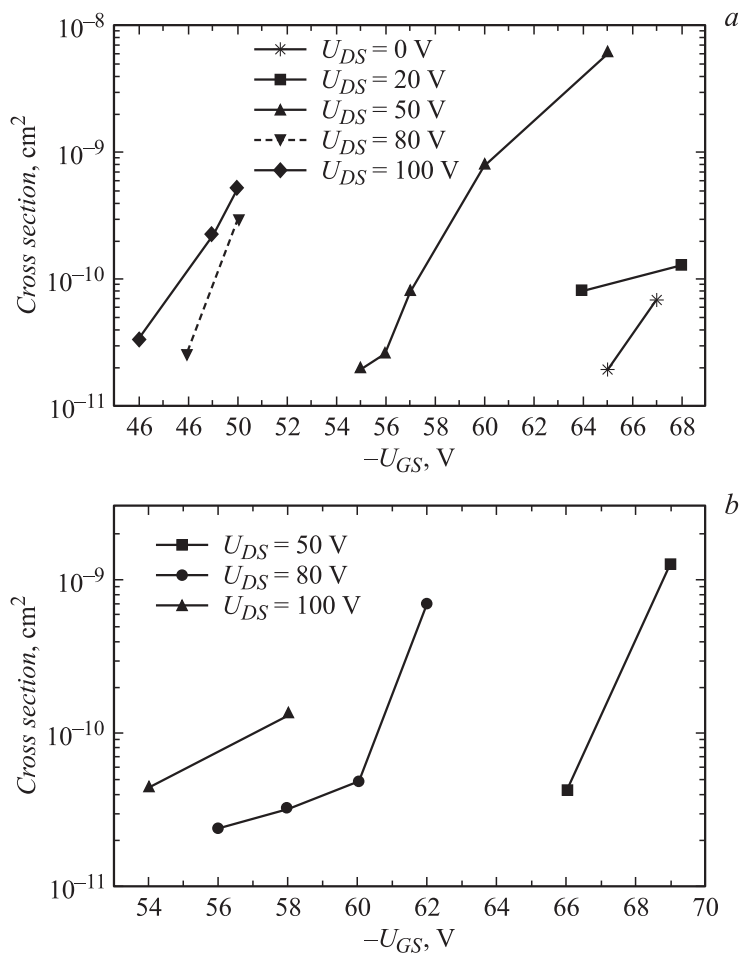


Рис. 3. Сечения SEGR-эффекта в зависимости от напряжения затвор-исток (U_{GS}) при различных значениях напряжения сток-исток (U_{DS}) для MOSFET: *a* — IRF520; *b* — IRF530; *c* — IRF630.

пробоя транзисторов. Очевидно, что максимальная величина сечения SEGR-эффекта (сечение насыщения) Σ_{sat} будет в том случае, когда каждая ядерная реакция в чувствительном объеме транзисторов будет приводить к пробую. Величина Σ_{sat} может быть определена из соотно-

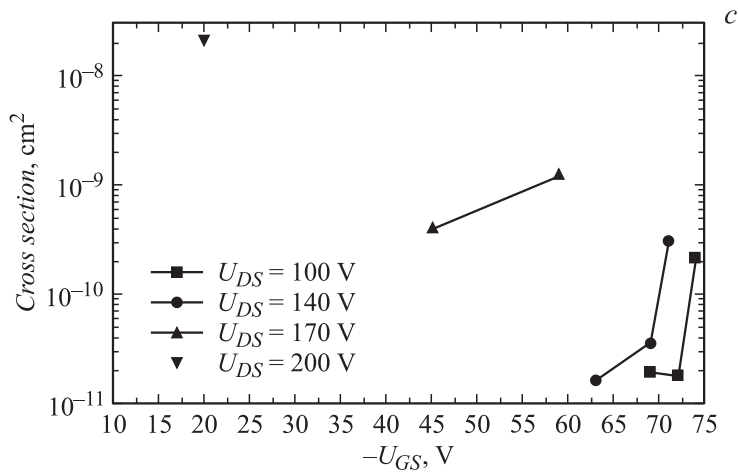


Рис. 3 (продолжение).

шения:

$$\Sigma_{sat} = n \cdot \sigma \cdot S \cdot h, \quad (4)$$

где n — концентрация атомов вещества; σ — сечение ядерных реакций протонов с кремнием; S — площадь кристалла; h — толщина чувствительной области MOSFET. При $n = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $\sigma = 0.5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$, $S = 10^{-1} \text{ cm}^2$, $h = 10 \mu\text{m}$ получаем $\Sigma_{sat} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$. Соответственно средняя величина флюенса протонов Φ , способная вызывать пробой транзисторов в условиях насыщения, равна $\Sigma_{sat}^{-1} = 4 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$. Сравнение с полученными нами экспериментальными данными (рис. 3) показывает, что максимальное значение $\Sigma \approx 10^{-8} \text{ cm}^2$ было получено для MOSFET IRF630 и IRF520. Данный результат указывает на то, что условия насыщения не были достигнуты и к возникновению SEGR-эффекта причастны вторичные ядерные частицы, имеющие достаточно большие LET и пробеги [5]. По всей видимости, условия насыщения будет выполняться при больших значениях U_{DS} с ростом напряжения U_{GS} . Однако в этом случае величины напряжений U_{GS} существенно превышают допустимые рабочие значения и практического интереса не представляют.

Список литературы

- [1] *Titus J.L., Wheatley C.F., Burton D.J.* et al. // IEEE Trans. Sci. Dec. 1995. V. 42 (6). P. 1928–1934.
- [2] *Wheatley C.F., Titus J.L., Burton D.I.* // IEEE Transactions. NS. 1994. V. 41. N 6. P. 2152–2159.
- [3] *Wrobel T.F.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. V. NS-34 (6). P. 1262–1268.
- [4] *Pikel J.C., Blandford J.T., Waskiewicz A.E., Strahan V.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1985. V. NS-32 (6). P. 4176–4179.
- [5] *Ермаков К.Н., Иванов Н.А. Маркелов В.В.* и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Науч.-техн. сб. 2006. В. 3–4. С. 54–57.
- [6] *Titus J.L., Wheatley C.F., Burton D.J.* et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1995. V. 42 (6). P. 1928–1934.
- [7] *Coss J.R., Swift G.M., Selva L.E.* et al. // IEEE Radiation Effects Data Workshop Record. ISBN: 0–7803–5109–6. 1998. P. 15–38.