УДК 538.97; 621.382.037.37

**действие радиации на вольтамперные характеристики
МОЩНЫХ полупроводниковых ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ**

**Матюхин С.И., Турин В.О., Ставцев А.В.\***

*Россия, г.Орел, ФГБО ВПО «Госуниверситет – УНПК»*

*\* Россия, г.Орел, ЗАО «Протон-Электротекс»*

*Представлены результаты теоретического исследования влияния накопленной дозы радиации на вольтамперные характеристики мощных полупроводниковых диодов и тиристоров. Показано, что в отличие от маломощных приборов, у которых действие радиации приводит к падению порогового напряжения и росту дифференциального сопротивления, пороговое напряжение мощных высоковольтных приборов под действием радиации, как правило, растёт, а дифференциальное сопротивление не меняется.*

*Ключевые слова: математическое моделирование; полупроводниковые приборы; вольтамперная характеристика; воздействие радиации*

*The results of theoretical studies of the radiation accumulated dose effect on the current-voltage characteristics of silicon power semiconductor diodes and thyristors are presented. It is shown that in contrast to the low-power devices where the radiation effect leads to decrease of the threshold voltage and increase of the differential resistance, the threshold voltage of the power devices under influence of radiation usually increases, and the differential resistance does not change.*

*Keywords: mathematical modeling, power semiconductor devices, current-voltage characteristic, radiation effect*

В настоящее время построенные на базе мощных полупроводниковых приборов устройства силовой электроники используются в самых разных областях человеческой деятельности: в быту (пылесосы, холодильники, кондиционеры, стиральные машины и т.д.), в энергетике (преобразователи частоты и напряжения на электростанциях, регуляторы производительности технологических процессов), в коммунальном хозяйстве (лифтовое оборудование и освещение), в автомобилестроении (роботизированные сборочные линии, сварочные аппараты, системы управления традиционными и гибридными двигателями), в аэрокосмической промышленности (системы электропитания и электроприводы), на транспорте (системы мягкого пуска и управления электродвигателями). Большую долю силовых полупроводниковых приборов (СПП) потребляют также металлургия и связь (индукционные печи, высокоэффективные источники питания, преобразователи и управляющие устройства).

Как считают ведущие эксперты в области прогнозирования мировых тенденций развития науки и техники, компьютерная и силовая электроника, отвечающие за работу, соответственно, «разума» и «мускулов» современной техники, становятся важнейшими технологиями сверхавтоматизированного XXI века. При этом силовая электроника, проникая практически во все сферы экономики, превращается ещё и в мощный фактор энерго- и ресурсосбережения, поскольку позволяет заметно снизить потери, связанные с преобразованием одних видов энергии в другие.

Как показывает мировой опыт, введение одного только электронного регулирования без изменения технологии по существу обеспечивает снижение удельного расхода энергии на 20 – 30 %. Широкомасштабное же использование новых технологий, существенной частью которых является силовая электроника, обеспечивает многократное снижение расхода энергии и материалов. В то же время это приводит и к постоянному расширению спектра условий, в которых приходится функционировать полупроводниковым приборам.

Часть этих условий связана с воздействием на СПП проникающей радиации. Это, в частности, обусловлено внедрением новейших электронных разработок в атомной энергетике и в ускорительной технике, на высотном воздушном транспорте, а также всё более и более интенсивным применением силовой электроники в космических исследованиях, включая межпланетные перелёты. Всё это, совместно с современными требованиями к уровням безопасности и безотказной работы силовых устройств и приборов, делает исследования в области воздействия радиации на различные характеристики СПП весьма актуальными.

Одной из важнейших является вольтамперная характеристика (ВАХ) СПП, поскольку от нее в значительной мере зависит нагрузочная способность приборов и их КПД. Обзоры работ, посвященных исследованиям влияния радиации на ВАХ и другие характеристики полупроводниковых приборов, в настоящее время достаточно широко представлены в литературе (см., например, [1–9]). Однако главное внимание в этих работах обычно уделяется области сравнительно малых плотностей тока (до 50 А/см2), в которой основным физическим эффектом, определяющим ВАХ, является взаимодействие инжектированных носителей заряда с глубокими примесными уровнями, играющими роль центров рекомбинации и прилипания. В настоящей работе теоретически исследовано влияние накопленной дозы радиации на мощные высоковольтные приборы, которые, в отличие от маломощных низковольтных, как правило, работают при высоких плотностях тока (свыше 50 А/см2) и высоких уровнях инжекции и в которых существенными становятся эффекты, определяемые взаимодействием носителей друг с другом: снижение коэффициентов инжекции эмиттерных переходов, электронно-дырочное рассеяние (ЭДР) и появление дополнительного канала Оже-рекомбинации.

Учет этих эффектов приводит к тому, что поведение под действием радиации ВАХ мощных высоковольтных приборов существенно отличается от аналогичного поведения маломощных приборов, в которых указанные эффекты отсутствуют. В частности, в отличие от маломощных приборов, у которых действие радиации приводит к падению порогового напряжения и росту дифференциального сопротивления, определяемое процессами ЭДР сопротивление высоковольтных приборов под действием радиации практически не меняется, а пороговое напряжение, как правило, растёт (рисунок 1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рисунок 1 – Теоретические ВАХ сварочного диода Д053-7100 (ЗАО «Протон-Электротекс», г.Орёл), облученного нейтронами (сплошные кривые): (1) – Φ = 3⋅1012 см–2; (2) – Φ = 1013 см–2; (3) – Φ = 3⋅1013 см–2. Тонкие кривые – *T* = 298 K, жирные – *T* = 443 K. Пунктир – ВАХ необлученного диода. |

Скорость изменения порогового напряжения  в зависимости от флюенса Φ определяется, в основном, деградацией времени жизни носителей заряда и равна

, (1)

где :

. (2)

В формуле (1) величина *k* – это постоянная Больцмана; *e* – элементарный заряд; *T* – абсолютная температура структуры;  – фактор идеальности;  – толщина низколегированной базы;  – амбиполярная длина диффузии неосновных носителей заряда (дырок) в базе,  – их время жизни;  – радиационная константа, определяющая скорость деградации времени жизни [10]. В формуле (2) величина *b* представляет собой отношение подвижностей электронов и дырок (для кремния ).

Обращает на себя внимание сильная зависимость скорости изменения напряжения (1) от отношения . Эта зависимость приводит к тому, что у приборов с тонкой базой  при малых фленсах Φ пороговое напряжение при облучении может снижаться. Однако с увеличением накопленнойдозы радиации и в случае  пороговое напряжение СПП достаточно быстро увеличивается вследствие опережающего в сравнении с падающим напряжением на *p-n*-переходе [второе слагаемое в формуле (1)] роста напряжения на базе [первое слагаемое в (1)]. При этом, как показывают наши вычисления, деградация времени жизни носителей заряда  приводит к увеличению обратного тока приборов при любых флюенсах.

Вызванное радиацией повышение обратного тока и порогового напряжения СПП в целом приводит к росту тепловых потерь, а следовательно, – к падению эффективности преобразования энергии при помощи устройств силовой электроники.

Работа выполнена в рамках программы развития нанотехнологий НОЦ ОрелНано [11].

 Список литературы

1. Вавилов, В.С. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах [Текст] / В.С. Вавилов, Н.А. Ухин. – М., 1969. – 312 с.

2. Коршунов, Ф.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах [Текст] / Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. – Минск, 1978. – 231 с.

3. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники [Текст] / Под ред. Е.А. Ладыгина. – М., 1980. – 224 с.

4. Коршунов, Ф.П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы [Текст] / Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А. Вавилов. – Минск, 1986. – 254 с.

5. Никифоров, А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС [Текст] / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. – М., 1994. – 164 с.

6. Зебрев, Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции [Текст] / Г.И. Зебрев. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 148 с.

7. Таперо, К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения [Текст] / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. – М., 2012. – 304 с.

8. Вологдин, Э.Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборах [Текст] / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М., 2001. – 70 с.

9. Вологдин, Э.Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов [Текст] / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М., 2000. – 102 с

10. Вологдин, Э.Н. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов [Текст] / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М., 1998. – 94 с.

11. Степанов, Ю.С. Научно-образовательный центр нанотехнологий в структуре учебно-научно-производственного университетского комплекса /Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Ю. Степанова //Наноинженерия. - №5. – 2012. – С.3-6.

**Матюхин Сергей Иванович,** д.ф.-м.н., доцент, ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», декан факультета естественнонаучного и гуманитарного образования. Тел. (4862) 41-98-81 E-mail: sim1@mail.ru

**Турин Валентин Олегович,** к.ф.-м.н., ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», зав. кафедрой «Физика». Тел. (4862) 41-98-89 E-mail: voturin@ostu.ru

**Ставцев Александр Валерьевич,** ЗАО «Протон-Электротекс», технический директор. Тел. (4862) 43-41-42 E-mail: a.stavtsev@proton-electrotex.com