

Основные механизмы воздействия специальных факторов на полупроводниковую структуру

Д. Селин¹

УДК 621.382 | ВАК 2.2.2

В условиях космического пространства на радиоэлектронную аппаратуру воздействуют различные негативные факторы, связанные с ионизирующим излучением естественного и искусственного происхождения. При проектировании аппаратуры, предназначенной для работы в тяжелых условиях космоса, необходимо учитывать явления, возникающие в структуре полупроводниковых компонентов. В статье описаны эффекты деградации электрических и параметрических показателей полупроводниковых структур при воздействии ионизирующего излучения. Приведена классификация обратимых и необратимых радиационных эффектов. Результатом представленной работы является теоретическая модель физики взаимодействия специальных факторов с полупроводниковой структурой.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими требованиями, которые предъявляют к микросхемам, предназначенным для работы в космосе, являются надежность, долговечность, безотказность, стойкость к воздействию радиационного излучения, а также работоспособность интегральных схем в особых условиях. В связи с чем большое практическое значение имеет исследование природы радиационных дефектов в полупроводниковом материале. В частности, интерес вызывает проблема оптимизации технологии ионной имплантации, поскольку внедрение ионов сопровождается интенсивной генерацией радиационных дефектов, влияющих на электрофизические свойства полупроводникового материала [1].

В космическом пространстве РЭА, в том числе интегральные микросхемы, подвергаются внешнему воздействию следующих специальных факторов [2]: космический вакуум; невесомость; космическая плазма; тепловое излучение Солнца, планет, космического пространства; замкнутый объем; микрометеориты; собственная внешняя атмосфера; ионизирующее излучение (ИИ).

По своей природе ионизирующее излучение состоит из потока заряженных частиц – электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Основные эффекты, возникающие в полупроводниковых структурах

микросхем, связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии частиц в активных и пассивных областях кремния, как основного материала полупроводниковой электроники, используемой в космической аппаратуре. Кроме того, при воздействии ИИ могут также проявляться такие дефекты РЭА, как радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол (изменение прозрачности оптических сред); пробой изолирующих материалов (из-за протекания радиационных химических реакций); световые помехи в оптической РЭА; деградация бортового оборудования КА [2].

ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Различают источники радиационного воздействия на полупроводниковую структуру кремния естественного и искусственного происхождения. К естественным источникам радиации относятся [3]: электроны и протоны радиационных поясов Земли (РПЗ); солнечные космические лучи (СКЛ); галактические космические лучи (ГКЛ).

Радиационные пояса возникают из-за захваченных магнитным полем Земли потоков электронов и протонов, прилетевших из космического пространства. Такие пояса подразделяют на внутренний и внешний. Внутренний пояс находится на расстоянии около 3500 км от поверхности Земли и состоит в основном из протонов, энергия которых варьируется от 30 до 40 МэВ при плотности потока частиц до $10^4 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}$. Внешний

¹ АО «Российские космические системы», инженер-исследователь, selin.ds@spacecorp.ru.

пояс располагается на высоте 16000 км от поверхности Земли, в его составе преимущественно преобладают электроны. Величина энергии электронов варьируется от 20 до 200 кэВ и характеризуется плотностью потока частиц в пределах до $10^7 \text{ c}^{-1}\text{м}^{-2}$. В зависимости от солнечной активности и активности других звезд возможен рост плотности потока частиц на целые порядки, что существенно влияет на работоспособность бортовой аппаратуры КА.

Излучение в виде солнечных космических лучей в основном состоит из протонов, энергия которых лежит в диапазоне от 10 МэВ до 50 ГэВ, а плотность потока частиц варьируется в пределах $10^1\text{--}10^5 \text{ c}^{-1}\text{м}^{-2}$. Очевидно, что величина плотности потока частиц меняется в зависимости от интенсивности солнечных вспышек и отличается от приведенных значений на порядок. Как оказалось, СКЛ достаточно сложно спрогнозировать в связи со случайным характером возникновения солнечных вспышек. Периодичность вспышек с энергией потока частиц в 10 МэВ составляет примерно раз в неделю (в годы солнечной активности) [2]. Энергетический поток частиц с энергией 100 МэВ имеет частоту возникновения примерно один раз в месяц. Соответственно, солнечные вспышки с энергией 1 ГэВ и выше происходят относительно редко, примерно раз в год.

Галактические космические лучи имеют состав в виде ядер легких химических элементов и протонов, обладающих энергией в 100 МэВ и более. Несмотря на относительно большую энергию, ГКЛ имеют низкую плотность потока частиц, которая составляет $10^{-4} \text{ c}^{-1}\text{м}^{-2}$. Благодаря малой плотности потока частиц, в системах автоматизированного проектирования и моделирования стараются не учитывать и не брать во внимание влияние ГКЛ на полупроводниковую структуру кремния. Однако галактическое космическое излучение в виде отдельных ядерных частиц может стать причиной возникновения в микросхемах различных эффектов. Ядерные частицы состоят из пяти групп: протоны, альфа-частицы, L-группа (легкие ионы с атомными номерами $Z = 3\text{--}5$), M-группа (средние ионы $Z = 6\text{--}9$) и H-группа (тяжелые ионы $Z \geq 10$) [2, 3].

Энергетический поток частиц с энергией 100 МэВ имеет частоту возникновения примерно раз в 11 лет. Необходимо отметить, что на сегодняшний день интенсивность отдельных групп ядер ГКЛ в области релятивистских энергий изучена достаточно хорошо.

К искусственным объектам излучения относят ядерные источники энергии. Ионизирующее излучение искусственного происхождения состоит из потока нейтронов и гамма-излучения длительностью порядка 50–100 нс. Несмотря на использование современных безопасных энергетических ядерных установок, они все же являются источниками нейтронного

и гамма-излучения, которые негативно влияют на работоспособность РЭА и ЭКБ в целом. Именно поэтому при длительной эксплуатации приборов и устройств в составе аппаратуры, расположенной в непосредственной близости от ядерных установок, возможен эффект накопления дозовых эффектов, превышающий эффект при ядерном взрыве [4].

Для обеспечения стойкости полупроводниковой структуры кремния необходимо понимать физические процессы воздействия ионизирующего излучения, которые рассмотрим далее.

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

Воздействие специальных факторов в виде ионизирующего излучения на полупроводниковую структуру интегральных схем характеризуется следующими особенностями. Во-первых, ИИ имеет две формы: электромагнитное излучение (гамма- и рентгеновские лучи) и излучение частиц (электроны, ионы, нейтроны). Во-вторых, движение заряженных частиц большой энергии в веществе сопровождается ее потерей, затрачиваемой на возбуждение связанных электронов [5].

При прохождении через полупроводниковую структуру кремния быстрые частицы или фотоны теряют свою энергию. Количество потерянной энергии зависит как от внешних условий распространения ионов, так и от природы возникновения частиц или материала полупроводника. Во время воздействия ИИ на полупроводниковую структуру могут возникнуть следующие эффекты [6, 7]: ядерные превращения; смещение атомов из узлов решетки; возбуждение атомов и электронов без смещения; ионизация атомов.

Негативные эффекты и повреждения структуры «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП) интегральных схем возникают при воздействии различных видов ИИ. Воздействия могут представлять собой как короткий, но высокомоощный импульс, так и маломощный импульс длительного действия.

Воздействие специальных факторов на полупроводниковую структуру могут вызывать как объемные, так и поверхностные эффекты [8]. Изменения кристаллической решетки кремния в результате проникновения ионизирующего излучения, приводящие к изменению электрических характеристик МДП-структуры, относят к объемным эффектам. Поверхностные эффекты проявляются в результате изменения величины поверхностного потенциала и увеличения скорости рекомбинации на поверхности полупроводниковой структуры.

При попадании нейтронов в МДП-структуру кристаллическая решетка полупроводника становится

разупорядоченной, в составе решетки появляются паразитные вакансии и сложные собственные дефекты. В результате нейтронного облучения время жизни неосновных носителей заряда значительно уменьшается, а удельное сопротивление полупроводника начинает расти. Это приводит к деградации электрических параметров ИС.

Во время воздействия ИИ в виде гамма-фотонов, рентгеновских лучей или высокоэнергетических электронов происходит генерация электронно-дырочных пар. При низком уровне ИИ локализованный в оксиде заряд обуславливает сдвиг порогового напряжения, а при высоком уровне происходит образование поверхностных состояний. Кроме того, высокий уровень ИИ усиливает рекомбинацию инжектированных неосновных носителей у поверхности раздела полупроводниковой структуры [8].

Среди основных эффектов воздействия ИИ сильное влияние на деградацию электрических и параметрических показателей кристалла микросхемы оказывают ионизация и смещение атомов. В твердых материалах, наподобие кремния, возникает эффект внутренней ионизации, который классифицируется переходом валентных электронов в зону проводимости. Сами по себе ионизационные эффекты представляют собой образование свободных носителей заряда. Эти носители захватываются имеющимися ловушками при перемещении по объему полупроводниковой структуры.

Возникновение ионизационных эффектов в кремнии физически объясняется накоплением заряда в различных областях приборных структур, как правило, в диэлектрических слоях. Такие эффекты несомненно вызывают деградацию электрических и параметрических показателей микросхем, выполненных по МОП- и КМОП-технологии. Помимо накопления заряда, также могут возникать ионизационные токи в пассивных и активных областях полупроводника, которые несут обратимые и необратимые эффекты [2].

К обратимым эффектам можно отнести изменение логического состояния цифровых микросхем (например,

ячейки памяти, триггеры). Возникновение в выходных цепях импульсных сигналов помех является обратимым эффектом. Вышеперечисленные проблемы можно решить путем повторной подачи напряжения питания (так называемый сброс питания).

К необратимым эффектам можно отнести радиационное защелкивание в КМОП-микросхемах, или тиристорный эффект. За счет больших ионизационных токов становится возможен необратимый пробой диэлектрических слоев, например, в МДП-транзисторах [9].

В результате падения ионизирующего излучения на полупроводниковую структуру кристаллическая решетка кремния приобретает структурные дефекты из-за эффекта смещения. Данный эффект заключается в перемещении атомов из своего нормального положения в иное и носит название радиационного дефекта (РД) [2]. Из-за возникновения РД в полупроводнике изменяются электрические и параметрические характеристики. Вышеперечисленные эффекты негативно сказываются не только на работоспособности отдельных микросхем, но и на РЭА в целом. Частичная классификация специальных факторов представлена на рис. 1.

ЭФФЕКТ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

Рассмотрим ионизацию при облучении полупроводника нейтронами. Если энергия первично-смещенных атомов больше величины пороговой энергии ионизации движущегося атома E_i , то ионизация атомов при нейтронном облучении может рассматриваться как вторичный процесс. По формуле Зейтца (1) энергия ионизации вычисляется следующим образом [2]:

$$E_i = \frac{1}{8} \frac{M}{m} \Delta E_g, \quad (1)$$

где M – масса движущегося атома; m – масса электрона; E_g – наименьшая энергия возбуждения электронов, совпадающая с шириной запрещенной зоны.

Зная необходимые величины, можно рассчитать энергию ионизации кремния E_{Si} , которая составляет 786 кДж/моль.

Условием ионизации по Зейтцу является равенство скоростей движущегося атома и самого медленного орбитального электрона атома мишени.

К первичной ионизации приводит облучение высокоэнергетическими заряженными частицами. При прохождении через полупроводниковый материал полагается, что частицы



Рис. 1. Классификация специальных факторов

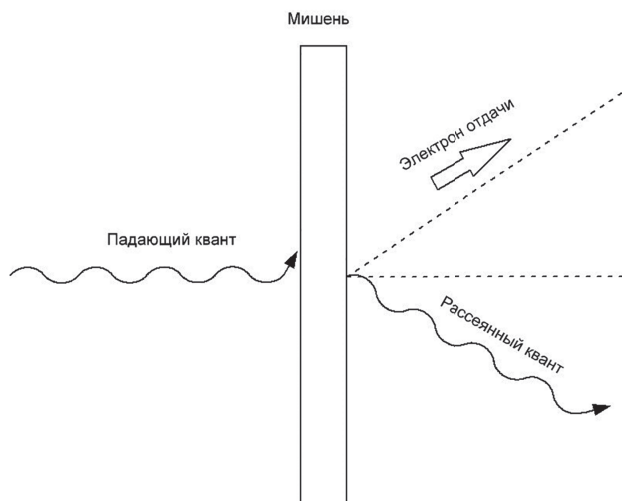


Рис. 2. Иллюстрация Комптоновского рассеяния

теряют свою энергию вследствие электронного и ядерного торможения [6, 7].

При кулоновском взаимодействии с атомарными электронами мишени возникает электронное торможение высокоэнергетических электронов. Эффект рассеяния электронов и фотонов носит название Комптоновского рассеяния (рис. 2). Рассеяние заключается во взаимодействии порции или минимально возможного дискрета фотонов (рентгеновских квантов) с внешними частицами, сопровождающемся передачей энергии электронам и испусканием фотонов с меньшей энергией. При Комптоновском рассеянии наблюдается соприкосновение между рентгеновскими квантами и частицами мишени, как показано на рис. 2.

Ядерное торможение происходит за счет упругого рассеяния высокоэнергетических ионов на ядрах атомов мишени. При этом возникает эффект смещения атомов из узлов решетки [10].

Комптоновское рассеяние гамма-квантов имеет место только в том случае, если энергия квантов гамма-излучения, взаимодействующего с веществом, намного превышает энергию связи электрона в атоме. При этом рассеянии происходит упругое взаимодействие гамма-кванта и электрона, при котором падающий квант теряет часть энергии и изменяет направление движения. Энергия, переданная электрону, расходуется на приобретение кинетической энергии атома в виде скорости [3, 11, 12].

Ко всему прочему, гамма-кванты производят ионизацию во всех твердых телах, потому и относятся к важному эффекту этого типа излучения. Существует три основных физических процесса взаимодействия гамма-квантов с полупроводниковой структурой: эффект Комптона, фотоэлектрический эффект и образование

электронно-позитронных пар [6, 7]. Каждый из перечисленных выше физических процессов образует энергичные вторичные электроны при излучении.

Фотоэлектрический эффект преобладает преимущественно при облучении полупроводниковой структуры низкоэнергетическими фотонами (рис. 3). Из рис. 3 видно, что падающий фотон возбуждает электрон, находящийся на внутренней оболочке атома мишени, а сам же полностью поглощается. В результате происходит испускание фотоэлектрического (низкоэнергетического) фотона и электрона. Электрон, находящийся на внешней орбите атома, перемещается на место вылетевшего фотоэлектрона, именно поэтому испускается низкоэнергетический фотон. В зависимости от величины энергии падающего фотона, испускаемый электрон может быть источником дополнительных электронно-дырочных пар [6, 12, 14].

Исходя из того, что фотон является частицей кванта, то есть частицей взаимодействия с внешней средой, то Комптоновский эффект можно рассматривать как частный случай Комптоновского рассеяния. Описываемый эффект возникает при облучении полупроводника высокоэнергетическими фотонами (рис. 4). При взаимодействии падающего фотона на структуру мишени часть энергии передается электрону атома мишени. Благодаря этому, энергия электрона становится такой величины, что способна оторвать электрон от атома. Особенностью

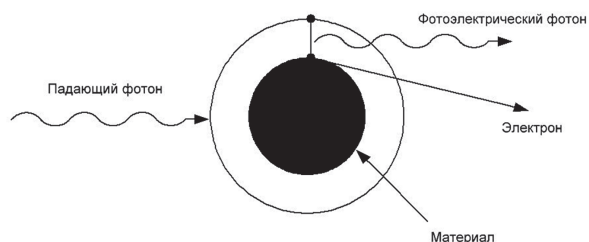


Рис. 3. Иллюстрация фотоэлектрического эффекта

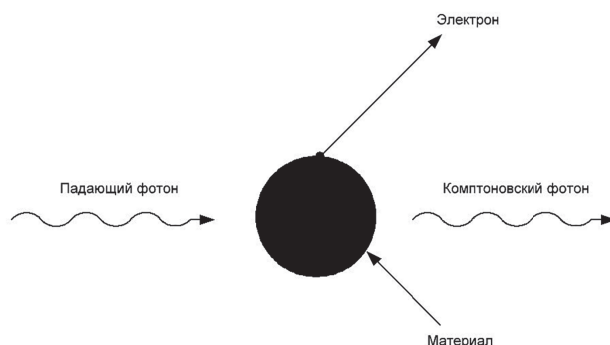


Рис. 4. Иллюстрация Комптоновского эффекта

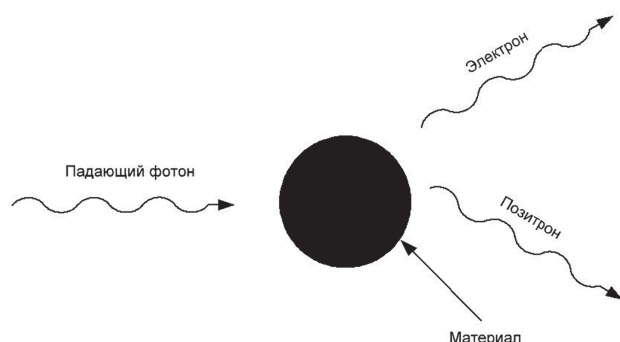


Рис. 5. Иллюстрация образования электронно-позитронных пар

Комптоновского эффекта является образование фотона с меньшей энергией, который в свою очередь способен взаимодействовать с другими атомами мишени. Образованный фотон может создать свободный электрон и ионизированный атом [7, 11, 12].

Во время облучения полупроводника высокоэнергетическими фотонами образуются электронно-позитронные пары (рис. 5). Позитрон имеет точно такие же свойства, что и электрон, за исключением положительного заряда. При бомбардировке атомов полупроводника падающие фотоны полностью уничтожаются, образуя при этом электронно-позитронные пары [13, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом представленной работы является теоретическая модель физики взаимодействия специальных факторов с полупроводниковой структурой. На основании рассмотренного материала можно сделать вывод о том, что существуют три основных физических процесса взаимодействия гамма-квантов с полупроводниковой структурой: эффект Комптона, фотоэлектрический эффект и образование электронно-позитронных пар. Эти эффекты следует принимать во внимание при моделировании и прогнозировании функционирования интегральных микросхем и РЭА, разрабатываемых для применения в аппаратуре космического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tan H., Zhang L., Tan R., Dong P.** A Deep Insight Into the Ionizing Radiation Effects and Mechanisms on the Dynamic Characteristics of SiC MOSFETs // *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 71, i. 2, pp. 1145-1152, February. 2024. DOI: 10.1109/TED.2023.3342768.
2. **Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. С. 234.
3. **Чернышев А.А.** Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
4. **Яненко А.В. и др.** Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов // *Спецтехника и связь*. 2011. № 4–5. С. 4–7.
5. **Darwish H., Andary J., Arnildi-Meadows B., Artz O., Baudot J., Bertolone G., Besson A., Bialas N., Bugiel R., Claus G.** Tolerance of the MIMOSIS-1 CMOS Monolithic Active Pixel Sensor to ionizing radiation // *Journal of Instrumentation*, vol. 18, no. 6, C06013. June. 2023. DOI: 10.1088/1748-0221/18/06/C06013.
6. **Ладыгин Е.А.** Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. Советское радио, 1980.
7. **Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М.** Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Минск: Наука и техника, 1978.
8. **Горлов М.И., Данилин Н.С.** Физические основы надежности интегральных схем: Учебное пособие. М.: МАКС Пресс, 2008. 404 с.
9. **Жданкин В.** Радиационно-стойкие высоковольтные интегральные микросхемы драйверов для управления затворами MOSFET/IGBT-транзисторов // *Компоненты и технологии*. 2012. № 4 (129). С. 147–152.
10. **Басков П.Б. и др.** Ядерно-оптические преобразователи для детектирования сильных нейтронных полей // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2021. № 4. С. 122–134.
11. **Калинина Е.В. и др.** Оптические и электрические свойства 4H-SiC, облученного нейтронами и тяжелыми ионами высоких энергий // *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38. № 10. С. 1223–1227.
12. **Girones V., Boch J., Carapelle A., Chapon A., Maraine T., Labau T., Saigne F., Garcia Alia R.** The use of high energy X-ray generators for TID testing of electronic devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. vol. 70, i. 8, pp. 1982-1989, August. 2023. DOI: 10.1109/TNS.2023.3279626.
13. **Schwank J.R.** Total dose effects in MOS devices // *IEEE NSREC Short Course Notes*. Phoenix (Arizon, USA), 2002. P. III – 1 – III – 123.
14. **Kholodnov V.A.** The Possibility of Fundamentally New Profile Photoelectric Effects in Semiconductors // *Journal of Communications Technology and Electronics*. vol. 67, no. 3, pp. 340-343, April. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226922030068>.



ПОСТЫ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОКОНТРОЛЯ



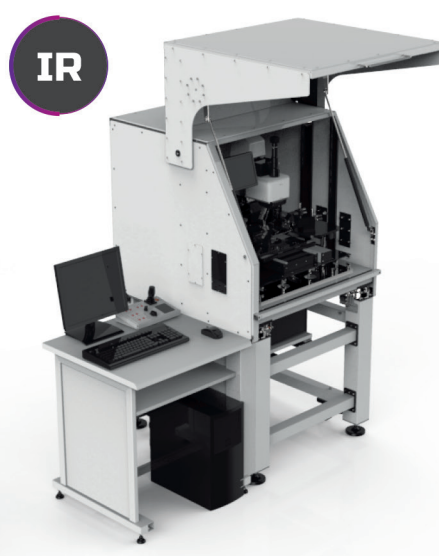
• Микроскоп МИКРО 200



• Высокоразрешающий
комплекс ГУФ



• Комплекс
автоматизированный
МА-300



• Комплекс
аналитический
«ФОТОН»

тел.: (+375 17) 377-90-64, e-mail: office@optes.by

ОАО «Оптоэлектронные системы»
220033, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский пр-т 2, корп. 2-15;
факс.: +375 17 272-71-21; тел: + 375 17 377-90-64; www.optes.by; email: office@opes.by



optes.by