

Ястремская Евгения Васильевна, магистрант,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

## ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ НА РАБОТУ БОРТОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ RADIATION EXPOSURE TO AN ON-BOARD COMPUTER IN A SPACECRAFT

**Аннотация:** Радиация в космической среде может вызывать повреждения и сбои в работе спутника, в том числе бортового компьютера, и систем, приводя к радиационно-индуцированным эффектам. Эти эффекты существенно влияют на надежность, вызывая ошибки, которые могут приводить к сбоям компонентов спутников.

**Abstract:** Radiation in the space environment can cause damage and malfunction of the satellite, including the on-board computer, and systems, leading to radiation-induced effects. These effects significantly affect reliability, causing errors that can lead to failures of satellite components.

**Ключевые слова:** радиация, радиационное воздействие, космический аппарат, МОП-транзистор.

**Keywords:** radiation, radiation exposure, spacecraft, MOS- transistor.

Отказы и сбои в работе бортовой электроники космических аппаратов, вызванные радиационным воздействием, подразделяются на два типа. Первый – это отказы, возникающие из-за постепенного ухудшения характеристик микроэлектронных элементов вследствие накопления радиационных дефектов. Второй – внезапные сбои и отказы, вызванные воздействием отдельных ядерных частиц, например, космического излучения, которое приводит к эффекту полной ионизационной дозы (TID).

Первый тип отказов наиболее характерен для аналоговых биполярных интегральных схем (ИС). Их параметры ухудшаются из-за эффекта смещения – постепенной деградации электрических и оптических свойств полупроводников, вызванной структурными повреждениями кристаллической решетки. Эти повреждения возникают при столкновении неионизирующих частиц радиации с атомами кремния, что приводит к их выбиванию из решетки. В результате эксплуатационные характеристики ИС ухудшаются, например, снижается коэффициент передачи тока (коэффициент усиления). На рис. 1 показано, как с увеличением поглощенной дозы уменьшается коэффициент усиления  $\beta$  биполярного транзистора, входящего в состав ИС.

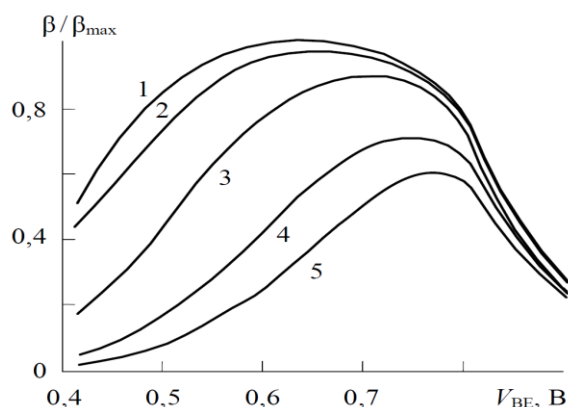


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента усиления биполярного транзистора от напряжения смещения на переходе база-эмиттер  $V_{BE}$  для различных доз облучения  $D$ , [Гр]: 1 – 0; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 2000; 5 – 5000



Современные цифровые интегральные схемы (ИС) создаются на основе структур металл–окисел–полупроводник (МОП) и работают на основных носителях заряда, благодаря чему радиационные дефекты оказывают на них незначительное влияние. Однако для таких ИС критичными являются эффекты, вызванные воздействием отдельных заряженных частиц.

В высоко интегрированных ИС величина электрических зарядов, управляющих их функционированием, сопоставима с зарядами, возникающими в материале микросхемы при прохождении тяжелых ядер или высокоэнергетических протонов. Эти дополнительные заряды, перемещаясь под воздействием электрических полей внутри микросхемы, могут вызывать сбои в ее работе. Существует несколько типов подобных эффектов, однако наиболее распространенными являются обратимые одиночные сбои.

Одиночные сбои возникают вследствие двух механизмов образования заряда в веществе ИС под воздействием космической радиации. Первый механизм связан с прямой ионизацией атомов тяжелыми ионами, а второй – с ионизацией, вызванной ядрами отдачи и вторичными фрагментами, которые образуются при ядерных взаимодействиях протонов и легких ионов с материалом ИС. Эти процессы происходят при энергиях частиц, превышающих несколько десятков мегаэлектронвольт. Известно, что эффекты ТИД оказывают влияние на пороговое напряжение, подпороговые и утечные токи, подвижность носителей заряда и крутизну МОП-транзисторов.

Пороговое напряжение измеряется по следующему выражению:

$$V_{TH} = V_{TH0} + [\Delta V_{OT} + \Delta V_{IT}], \quad (1.1)$$

где  $V_{TH}$  – пороговое напряжение до облучения,  $\Delta V_{OT}$  – изменение порогового напряжения за счет дырок, захваченных на границе раздела,  $\Delta V_{IT}$  – изменение, вызванное зарядкой интерфейсных ловушек.

Для n-MOS транзистора  $\Delta V_{OT}$  снижает пороговое напряжение, а для p-MOS транзистора увеличивает его модуль. Для обоих типов МОП-транзисторов  $\Delta V_{IT}$  принимается положительным. Значения  $\Delta V_{OT}$  и  $\Delta V_{IT}$  рассчитываются по формулам

$$\Delta V_{OT} = -3,8 * 10^{-8} * t_{OX}^2 * F(E, \xi) * F_t * D, \quad (1.2)$$

$$\Delta V_{IT} = 2,4 * 10^{-8} * t_{OX}^2 * D^{2/3}, \quad (1.3)$$

где  $D$  – доза излучения в рада,  $t_{OX}$  – толщина оксида затвора (нм),  $F(E, \xi)$  – коэффициент генерации дырок в зависимости от напряженности поля ( $E$ ) и энергии облучающей частицы ( $\xi$ ),  $F_t$  – технологический параметр.

Подпороговый ток n-MOS транзистора определяется выражением:

$$I_D = I_{D0} * \frac{W}{L} * \exp \frac{V_{GS} - V_{THN}}{V_t}, \quad (1.4)$$

где  $I_D$  – ток стока,  $\frac{W}{L}$  – размеры транзистора,  $V_{GS}$  – напряжение затвор-исток,  $V_t = \frac{kT}{q}$  – тепловое напряжение,  $V_{THN}$  – пороговое напряжение.

Изменение подпорогового тока обусловлено двумя факторами:

1. Смещением порогового напряжения из-за влияния ТИД-эффектов.
2. Возникновение паразитных каналов в процессе изготовления МОП-транзисторов (рис. 1), что приводит к дополнительному увеличению подзатворного тока.



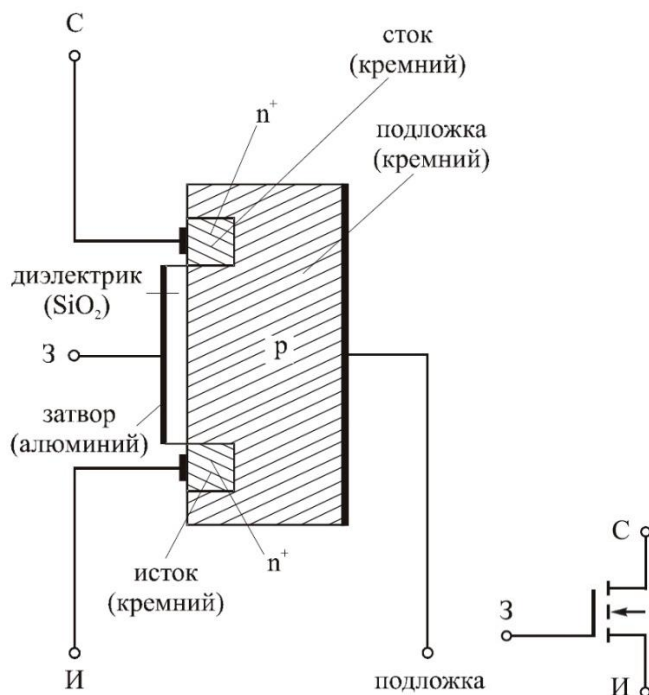


Рисунок 1 –МОП-транзистор.

Подвижность носителей заряда вычисляется по формуле:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha * (\Delta N_{IT})} \quad (1.5)$$

где  $\mu_0$  – подвижность до облучения,  $\Delta N_{IT}$  – плотность интерфейсных ловушек, индуцированных ионизирующим излучением,  $\alpha$  – технологический параметр  $\alpha = 7 \pm 1,3 * 10^{-13}$ . Графики зависимости подвижности носителей от дозы облучения для электронов и дырок представлены на рисунке 2.

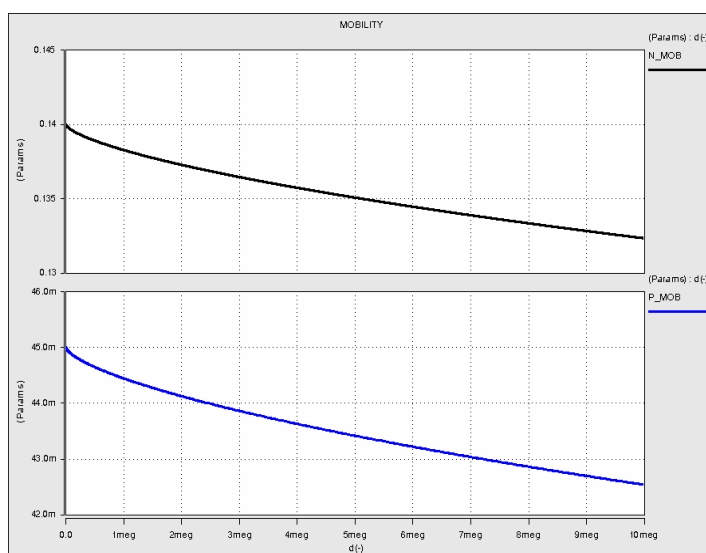


Рисунок 2 – Зависимость подвижности носителей заряда от дозы облучения.

Существует несколько методов защиты МОП-транзисторов от влияния эффектов ТИД. Для этого применяются как схемотехнические, так и топологические методы защиты. Для



повышения устойчивости электронного оборудования КА к одиночным сбоям. В данной статье рассматривается схемотехнический метод защиты от смещений порогового напряжения.

Для оценки влияния ТИД-эффектов на напряжения МОП-транзисторов используются уравнения (1.1-1.3). На рисунке 3 представлены зависимости пороговых напряжений n- и p-МОП транзисторов. Рассмотрены два типа транзисторов: с тонким и толстым оксидом. Анализ показывает, что транзисторы с толстым оксидом более чувствительны к ТИД-эффектам.

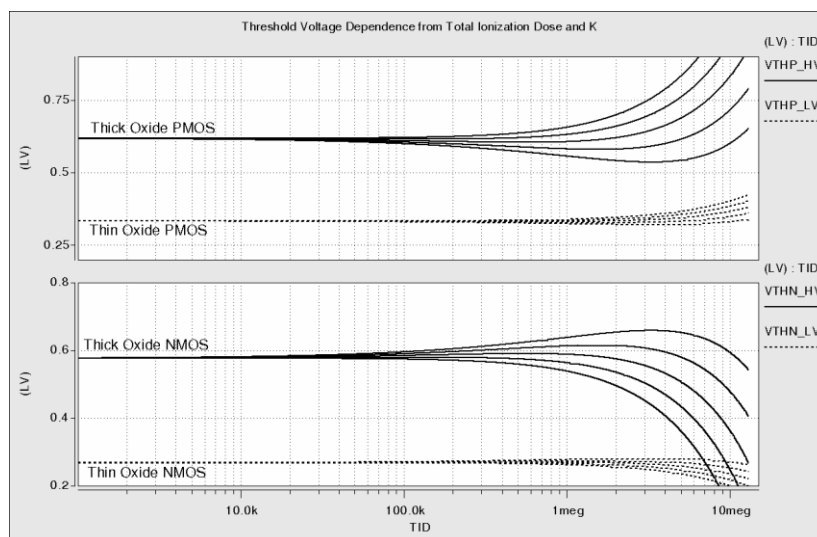


Рисунок 3 – Сдвиг напряжения из-за ТИД.

Снижение порогового напряжения n-МОП транзистора при высоких дозах облучения приводит к тому, что его невозможно закрыть даже при  $V_{GS} = 0V$ . В случае p-МОП транзисторов возможно отсутствие открытия под воздействием высокой радиации. Для n-МОП влияние ТИД на пороговое напряжение является критичным, так как диапазон напряжений затвор-исток, необходимых для его работы в открытом состоянии, шире, чем диапазон напряжений для закрытия.

На рисунке 4 представлены вольт-амперная характеристика (ВАХ) n-МОП транзистора до облучения (сплошная линия) и после облучения дозой 12 Мрад при  $V_{GS} = 0V$  (пунктир). Кривая для закрытого n-МОП при дозе 12 Мрад близка к кривой нормального режима при  $V_{GS} = 1V$ . Это означает, что после облучения транзистор остается открытым даже при  $V_{GS} = 0V$ .

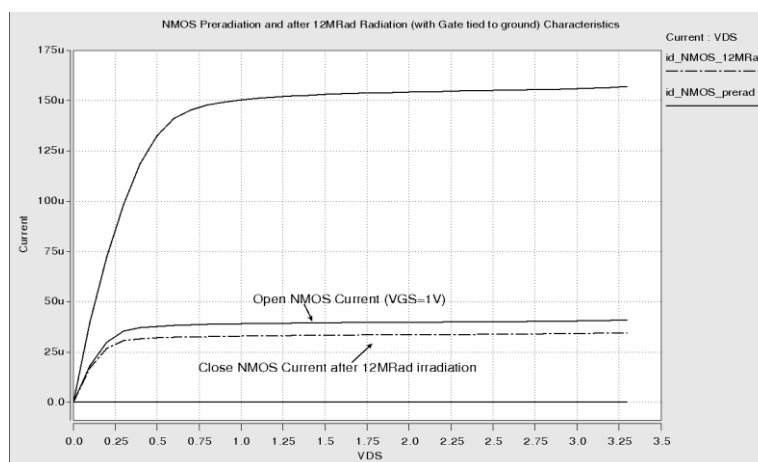


Рисунок 4 – ВАХ n-МОП транзистора.



Предлагаемый метод защиты (рисунок 5) основан на эффекте подложечного смещения. Это адаптивный метод, в котором потенциал подложки n-МОП транзистора изменяется в зависимости от дозы радиации: чем выше доза, тем больше разность потенциалов между истоком и подложкой.

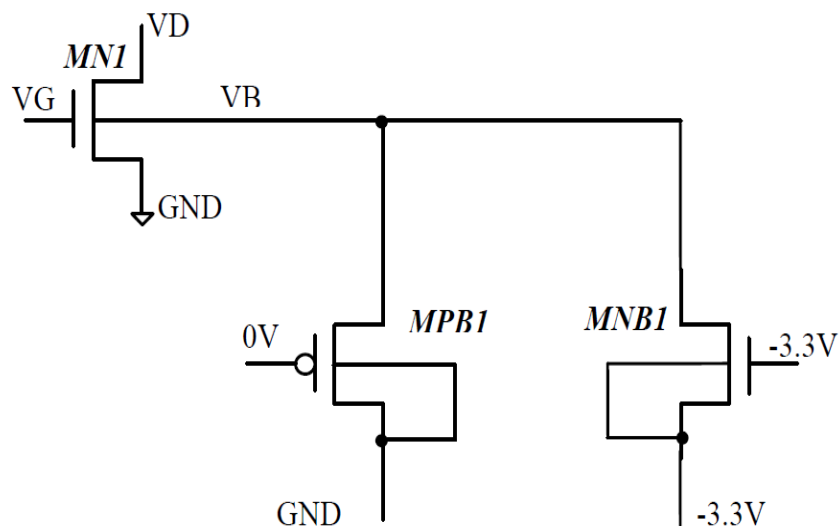


Рисунок 5 – Схема защиты.

Принцип работы метода заключается в том, что под воздействием TID-эффектов пороговое напряжение n-МОП снижается, а p-МОП увеличивается. За счет управления подложечным потенциалом можно компенсировать эти изменения и обеспечить стабильную работу транзисторов в условиях радиационного воздействия. Таким образом, если схема работает в среде с низким уровнем радиации, транзистор MPB1 находится в открытом состоянии, а MNB1 – в закрытом. В этом случае потенциал подложки подключается к GND через MPB1. Так как p-МОП транзистор плохо передает низкий уровень, потенциал в точке VB в нормальном режиме работы не будет равен 0, а составит примерно  $V_{THP}$ . Это приведет к небольшому снижению порогового напряжения транзистора MN1 в нормальном режиме, что является одним из недостатков данной схемы.

При увеличении дозы ионизирующего излучения транзистор MPB1 начнет закрываться, а MNB1 – открываться. Соответственно, по мере роста радиационной дозы потенциал подложки VB станет отрицательным (рис. 5). Это обеспечит стабильность напряжения транзистора MN1 даже при высоких дозах радиации, в условиях которых он должен был бы открываться в обычном режиме (когда подложка подключена к GND). В результате n-МОП транзистор, затвор которого соединен с GND, останется закрытым даже при очень высоких дозах облучения.

На рисунке 6 представлены зависимости тока закрытых n-МОП транзисторов (при  $V_{GS} = 0V$ ) в двух случаях: с подложкой, подключенной к GND (пунктирная линия), и с применением предложенного метода защиты (сплошная линия). Видно, что при использовании предложенного метода радиационная доза, при которой закрытый транзистор начинает открываться, почти в два раза выше по сравнению с незащищенным транзистором (с подложкой, подключенной к GND).



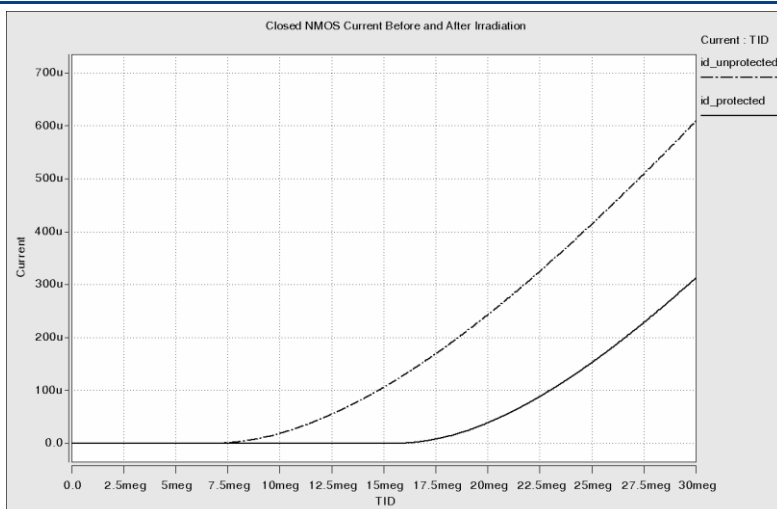


Рисунок 6 – Зависимость тока закрытого транзистора от дозы облучения.

На рисунке 7 представлены ВАХ закрытых транзисторов при дозе облучения 12 Мрад (пунктирная линия – для незащищенного n-MOS, сплошная – для защищенного). Видно, что после защиты ток n-MOS транзистора уменьшился с 35 мкА до 0, что означает его полное закрытие при дозе 12 Мрад.

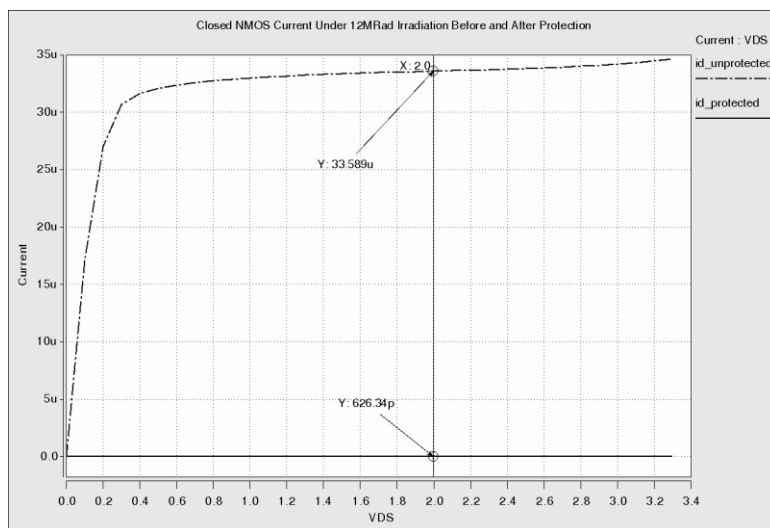


Рисунок 7 – ВАХ закрытого n-MOS до и после применения защиты.

Предложенная схема обеспечивает защиту от смещения напряжения, вызванного TID-эффектами, при высоких уровнях радиации (свыше 20 Мрад) и повышает стойкость n-MOS устройства к радиационному воздействию.

Основные недостатки данной схемы:

- при низких уровнях радиации потенциал подложки транзистора не подключен непосредственно к GND, что приводит к небольшому снижению напряжения;
- требуется дополнительный источник отрицательного напряжения;
- площадь схемы увеличивается почти в три раза.

Таким образом, при проектировании необходимо выбирать между уровнем защиты и указанными недостатками в зависимости от конкретной задачи.



*Список литературы:*

1. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2010. – 192 с.
2. Александров О.В., Тяпкин Н.С., Мокрушина С.А., Фомин В.Н. Влияние ионизирующего облучения на распределение зарядов и пробой МОП-транзисторов / Физика и техника полупроводников, 2022, том 56, вып. 2
3. Дидык П. И., Жуков А. А. Радиационная стойкость микроэлектронных приборов при совместном воздействии дестабилизирующих факторов космического пространства на этапе конструирования / Космические исследования, 2023, Т. 61, № 3, стр. 242-247.
4. Таперо К. И. Эффекты низкоинтенсивного облучения в приборах и интегральных схемах на базе кремния / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 1. С. 5–21.
5. Таперо, К. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие / К. И. Таперо, С. И. Диденко. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013.
6. Srour, J. R., Marshall, C. J., & Marshall, P. W. / Review of displacement damage effects in silicon devices / IEEE Transactions on Nuclear Science, 50 (3), 653–670. 10.1109/tns.2003.813197 2003.

