

# Полуплавающие затворы на нитриде кремния для датчика ионизирующего излучения

И.С. Зеленова, А.Г. Кирдяшкин, С.М. Юлчиев, В.В. Перепеловский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Рассмотрен перспективный полупроводниковый датчик ионизирующего излучения. Дозиметр представляет собой n-p-n структуру с двумя двухслойными полуплавающими затворами, состоящими из слоев нитрида кремния и кремния p-типа. Впервые решена задача увеличения чувствительности датчика, в области малых доз ионизирующего излучения, путем использования  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в структуре полуплавающих затворов. В работе приводятся результаты влияния нитрида кремния на чувствительность датчика ионизирующего излучения. Захваченные носители заряда в слое нитрида кремния приводят к образованию дополнительного положительного объемного заряда, что вызывает увеличение чувствительности прибора. Моделирование выполнялось в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

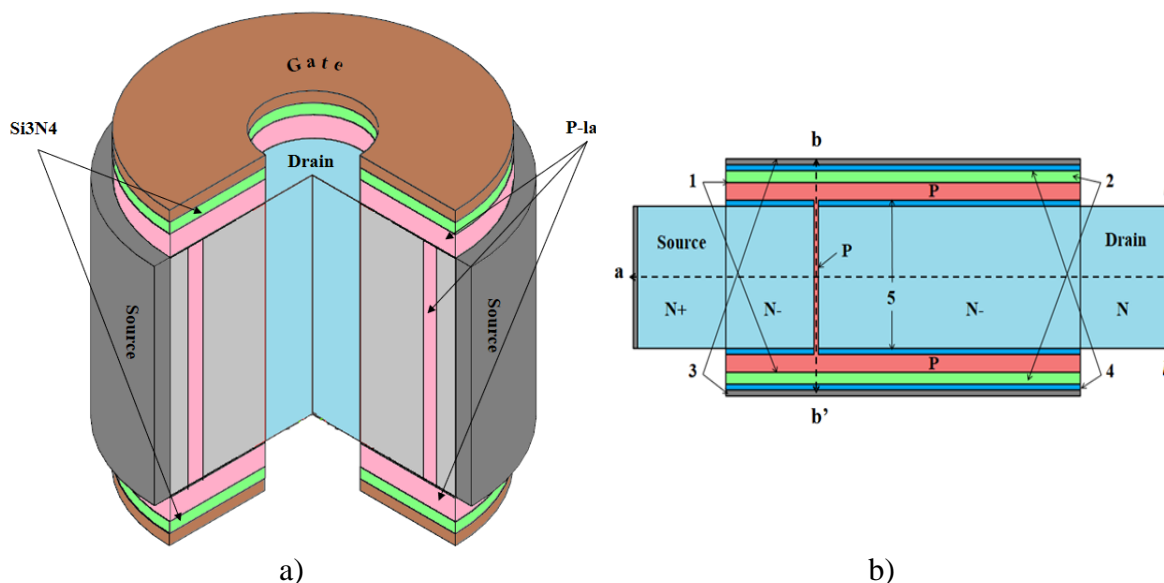
**Ключевые слова:** дозиметр, гамма-излучение, двухслойный полуплавающий затвор, нитрид кремния, Synopsys Sentaurus TCAD

## 1. Введение

В последнее время большое внимание уделяется дозиметрам на полуплавающих затворах с нитридом кремния [1, 2]. Одним из важных параметров дозиметра является высокая чувствительность к ионизирующему излучению [2]. В работе [2] проводились параметрические исследования датчиков ионизирующего излучения на полуплавающих затворах, в результате которых было выяснено, что следующие параметры: i-слоя 20,2 мкм, p-слоя 35 нм, а также использование 3D топологии позволяют добиться высокой чувствительности датчика ионизирующего излучения в области малых доз радиации, однако анализ влияния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  подробно не проводился.

## 2. Топология устройства и принцип работы

Исследуемый датчик представляет собой n-p-n структуру (double diode – DD) с двумя двухслойными полуплавающими затворами (double layer semi-floating gate – DLSFG) и управляющими затворами (camel gate – CG). DLSFG представляет собой двухслойную структуру, состоящую из нитрида кремния и кремния p-типа. Топология и сечение такого дозиметра приведены на рисунках 1, а и 1, b, соответственно



**Рисунок 1.** Топология моделируемого дозиметра в форме цилиндра (а) и ее сечение (b) (вращение сечения (b) вокруг оси  $ff'$  позволяет получить 3D топологию (а)): 1 – двухслойный полуплавающий затвор, 2 – слой нитрида кремния в полуплавающем затворе, 3 – управляющий затвор из поликремния, 4 – блокирующий диэлектрик, 5 – подзатворный диэлектрик.

Датчик ионизирующего излучения готов к работе после операции сброса дырок из DLSFG. Для этого на управляющие затворы CG подают положительное напряжение 2 В, а на сток напряжение, равное -1 В. В результате, дырки, находящиеся в полуплавающем затворе, вытесняются из него в канал, где рекомбинируют с электронами. После операции сброса канал истощается, и датчик готов к облучению [2].

Далее дозиметр подвергается воздействию ионизирующего излучения, при этом в обедненной области образуются электронно-дырочные пары, которые разделяются внутренним электрическим полем, дырки уходят в полуплавающий затвор, что приводит к повышению потенциала датчика ионизирующего излучения, и вследствие этого уменьшается величина напряжения, называемого пороговым, которое нужно подать на управляющий затвор для открытия датчика. Последней операцией является считывание. Для этого на исток подается -1В, при этом на затвор подается от -1 В до 3 В [2].

### 3. Результаты моделирования

Моделирование проводилось в среде Synopsys Sentaurus TCAD. Модель излучения представляет собой гамма-излучение  $Co^{60}$  и мягкое рентгеновское излучение 10 кэВ [3-5]. Чувствительность датчика определяется, как разница пороговых напряжений до и после операции облучения. На рис. 2 приведена входная характеристика датчика. Как видно из графика, с увеличением дозы облучения уменьшается величина порогового напряжения.

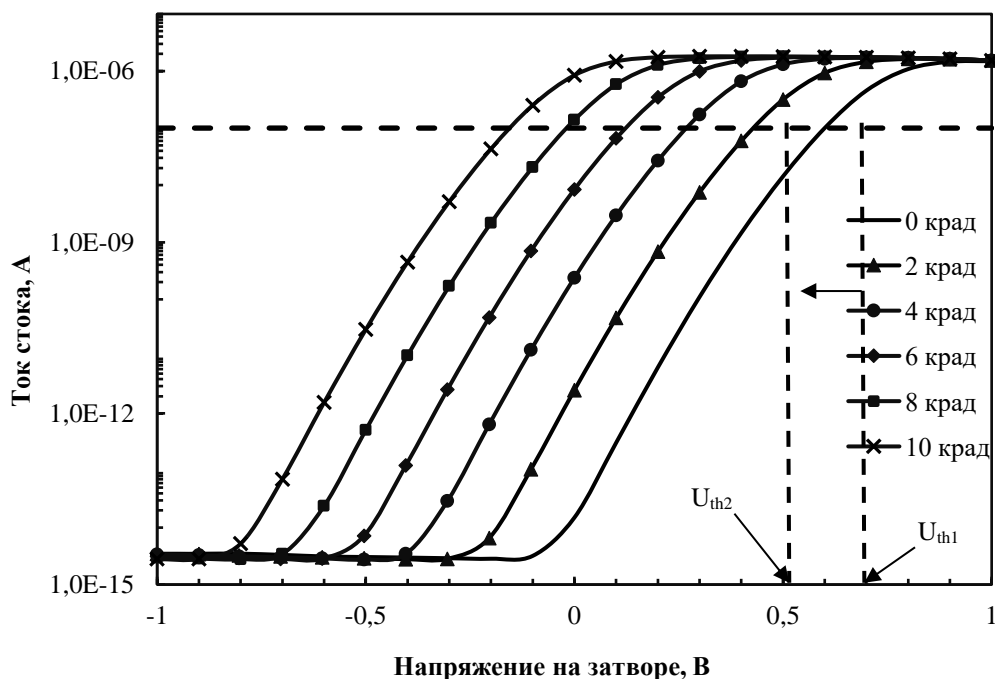


Рисунок 2. Входная характеристика модулируемого прибора

График рисунка 3 представляет собой зависимость чувствительности датчика ионизирующего излучения от толщины нитрида кремния. Как видно из рисунка, чувствительность имеет ярко выраженный экстремум при толщине  $Si_3N_4 = 200$  нм. При значениях толщин больше 200 нм чувствительность падает из-за снижения эффективности операции сброса [6]

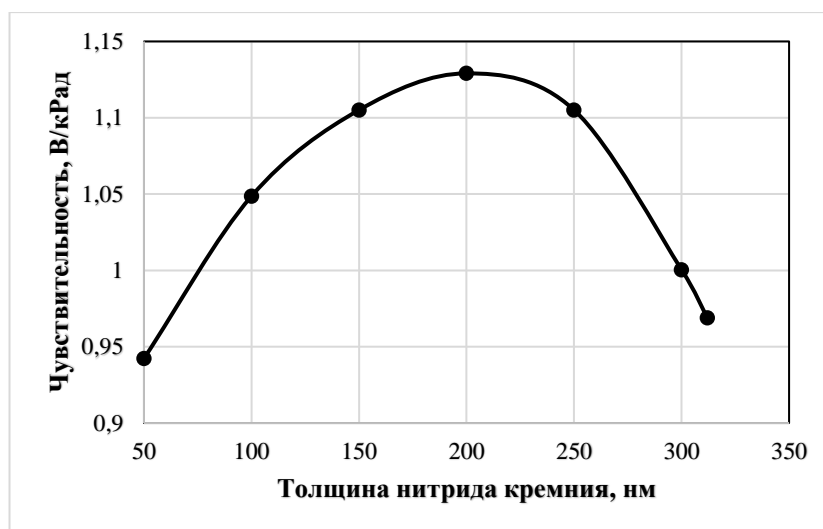
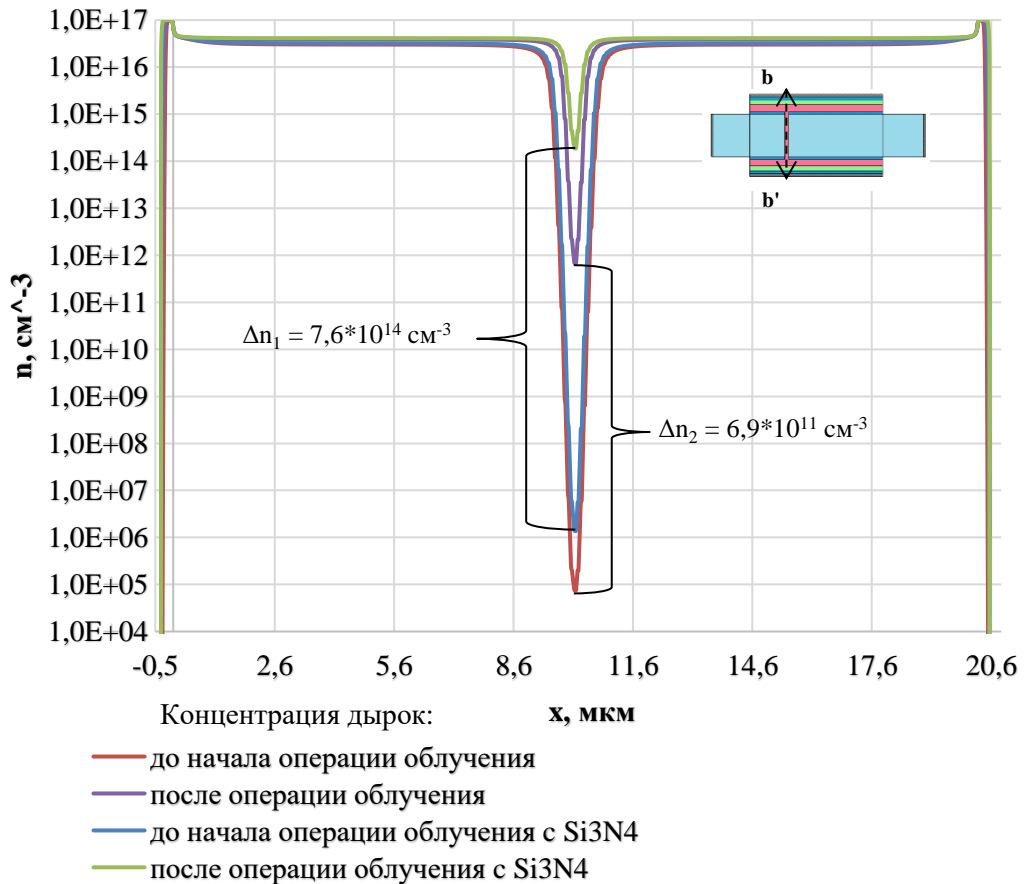


Рисунок 3. Зависимость чувствительности от толщины нитрида кремния (i-слой 20.2 мкм)

В ходе исследования рассмотрено распределение дырок в сечении  $bb'$  дозиметра на основе полуплавающего затвора с p-слоем и слоем  $Si_3N_4$ , а также для структуры без слоя  $Si_3N_4$ . Данные были получены до и после облучения. Следует отметить, что в структуре с  $Si_3N_4$  разница концентраций дырок после и до облучения составляет примерно  $7,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а без нитрида  $6,9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , что на 3 порядка больше, так как носители заряда захватываются не только p-слоем, но и  $Si_3N_4$ . Таким образом,

чувствительность структуры с  $\text{Si}_3\text{N}_4$  выше, чем у топологии без  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Ниже представлено распределение дырок по структуре в сечении  $bb'$  с  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и без него до и после воздействия ионизирующим излучением (рисунок 4).

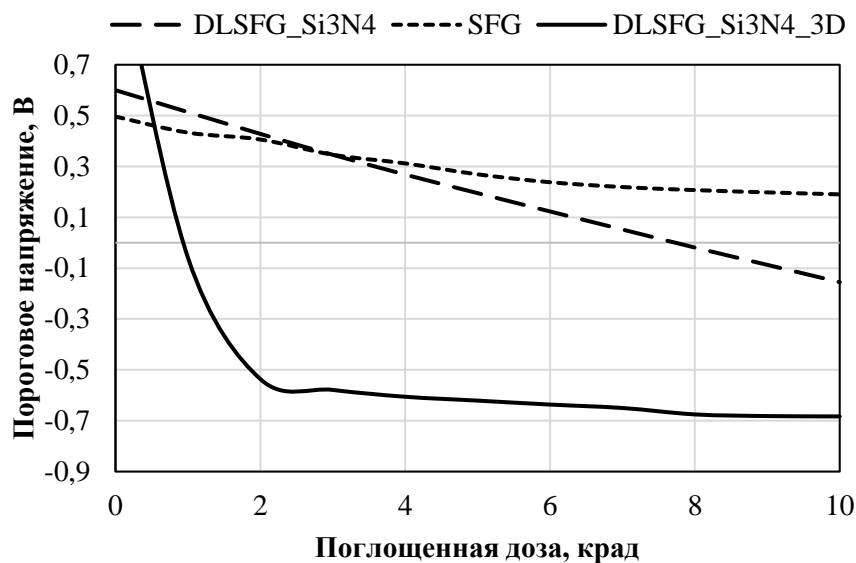


**Рисунок 4.** Распределение дырок по структуре в сечении  $bb'$  при толщине  $i$ -слоя = 20.2 мкм

В процессе моделирования была рассчитана концентрация захваченных электронов и дырок в слое нитрида кремния через 1,5 секунды после начала операции облучения. Она составила для электронов  $1,94 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , а для дырок  $1,94 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация захваченных дырок нитридом кремния на 6 порядков больше, чем электронов, что приводит к возрастанию положительного потенциала в полуплавающем затворе, в следствие этого к повышению чувствительности датчика ионизирующего излучения.

В работе [7] указывается на то, что при облучении дефекты, возникающие в слое нитрида кремния, действуют как ловушки, захватывая генерируемые носители заряда. Дырки, обладая меньшей подвижностью, остаются в ловушках, а электроны покидают ловушки. Следовательно, дырок становится больше, что приводит к возрастанию потенциала дозиметра и, вследствие этого, увеличивается чувствительность прибора.

Характеристика, наклон которой определяет чувствительность датчика ионизирующего излучения, приведена на рисунке 5. Данный график отражает зависимости порогового напряжения от поглощенной дозы излучения с однослойным (SFG) и двухслойным (DLSFG) полуплавающим затвором и зависимость для дозиметра, выполненного в 3D топологии (DLSFG\_3D).



**Рисунок 5.** Зависимости порогового напряжения от поглощенной дозы излучения

Таким образом, добавление в полуплавающий затвор  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а также переход к 3D топологии позволяет повысить чувствительность дозиметра в области малых доз ионизирующего излучения.

#### 4. Заключение

Включение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в структуру датчика ионизирующего излучения, а также использование 3D топологии [2] позволяет увеличить чувствительность датчика ионизирующего излучения в области малых доз радиации. Причиной увеличения чувствительности являются дырки, захваченные ловушками в слое нитрида кремния. С возрастанием дозы облучения чувствительность падает, так как потенциал полуплавающего затвора с захваченными дырками уменьшает внутреннее электрическое поле датчика, необходимое для разделения сгенерированных электронно-дырочных пар.

#### Список литературы

1. Зеленова И. С. Дозиметр ионизирующего излучения на основе двухслойного полуплавающего затвора / И.С. Зеленова, Р.Р. Кинзябулатов и В.В. Перепеловский //Электроника и микроэлектроника СВЧ – 2019. – Вып. № 1. – С. 308 – 311.
2. Кирдяшкин А. Г. Параметрическое исследование датчика ионизирующего излучения с двухслойным полуплавающим затвором / А.Г Кирдяшкин, И.С. Зеленова и В.В. Перепеловский // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2020. – С. 56 – 60.
3. Sentaurus, T. S. Device User Guide, ver // G-2012.06, Synopsys / T.S Sentaurus – 2012.
4. Перепеловский, В. В. Введение в приборно-технологическое моделирование устройств микроэлектроники: лаб. Практикум / В. В. Перепеловский, Н. И. Михайлов, В. В. Марочкин - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 49 с.
5. Перепеловский, В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. Практикум / В. В. Перепеловский, Н. И. Михайлов, В. В. Марочкин - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 27 с.
6. Peng Dong. A deep-level transient spectroscopy study of gamma-ray irradiation on the passivation properties of silicon nitride layer on silicon/ Peng Dong, Xuegong Yu, Yao Ma and et al. //AIP Advances, 2017. – Vol. 7
7. Zeyrek S. The C—V and G/ω—V Electrical Characteristics of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Ray Irradiated Al/Si $_3$ N $_4$ /p-Si (MIS) Structures / S. Zeyrek, A. Turan, M. Bülbül // Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd – 2013. – Vol. 30