

Моделирование статических и динамических характеристик PIN-диода и их коррекция в условиях радиационного облучения

А.А. Даниленко¹, Р.Р. Кинзябулатов¹, А.Д. Иванов¹, В.В. Марочкин², В.В. Перепеловский¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Pixpolar Oy 10, Metallimiehenkuja, c/o Regus Kora, 02150, Espoo, Finland

Аннотация: в данной работе приводятся результаты моделирования PIN-диода с дискретной металлизацией поверхности выполненные в Synopsys Sentaurus TCAD. Исследовано влияние дефектов, вызванных электронным облучением PIN-диода, на вид ВАХ и время открытия PIN-диода. Выполнена коррекция статических и динамических характеристик PIN-диода посредством задания соответствующих потенциалов на затворы PIN-структуры. Определены напряжения, подаваемые на затворы, компенсирующие влияние дефектов.

Ключевые слова: ВАХ, время открытия, pin-диод, затвор, дефекты, электронное облучение

1. Введение

Полупроводниковые структуры применяются в различных условиях, в том числе в областях с повышенным радиационным излучением. Существуют различные исследования на тему влияния радиации на приборы и устройства. Например, в [1] исследуется деградация кремниевых n+-p-p+ структур высокоэнергетическим, интенсивным (10^{15} - 10^{16} см⁻²) электронным / протонным облучением. Целью работы [2] было исследование влияния дозы электронного облучения на ВАХ и низкочастотные шумы (токовые и 1/f) для 4H-SiC pin-диодов, а в [3] статье получили изменения ВАХ и барьера Шоттки в зависимости от дозы электронного облучения в диоде Шоттки р-типа.

В процессе облучения могут меняться кристаллическая структура и электрические свойства полупроводника. В некоторых ситуациях это делается намеренно, чтобы точно скорректировать быстродействие, емкость. Так, например, в статье [4] пришли к выводу, что модифицирование полупроводников протонами и α -частицами довольно простое, дешевое и обладает высокой повторяемостью результатов. В работах [5-6] с помощью облучения высокоэнергетическими частицами влияли на динамические характеристики диодов.

Иногда, наоборот, излучение вызывает нежелательные изменения характеристик, как в работе [7]. Также в последнее время было опубликовано несколько работ [8,9], в которых исследовалось влияние металлических электродов, находящихся на поверхности i-области, на свойства pin-диода. Наша работа посвящена моделированию pin-диода с дискретно-металлизированной поверхностью. В статье исследовалась модель pin-диода под влиянием электронного облучения. Это облучение характеризуется сравнительно слабыми повреждениями решетки кристалла и неизменностью химического состава твердого тела в отличие от воздействия других высокоэнергетических частиц (например, облучение α -частицами). При этом концентрация индуцированных дефектных центров относительно мала и распределена с высокой однородностью по объему образца [10]. Моделирование такого рода устройств целесообразно выполнять в среде Synopsys Sentaurus TCAD [11,12].

2. Исследуемая p-i-n-структура

Дополнительные затворы G1-G3 на поверхности i-области (рисунок 1) дают возможность регулировать распределение концентраций электронов и дырок в структуре посредством подачи потенциала на электроды, что позволяет скомпенсировать влияние дефектов, возникающих при радиационном облучении.

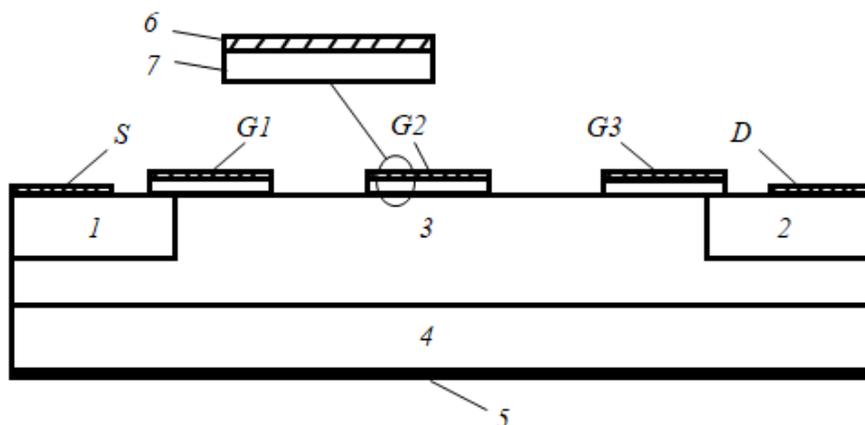


Рисунок 1. Топология исследуемого p-i-n-диода. 1 – p^+ -область, легированная бором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 – n^+ -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 – n -область, легированная фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 4 – полужолирующая подложка; 5 – металлизация подложки; 6 – управляющий затвор из поликремния; 7 – слой диэлектрика из оксида кремния толщиной 5 нм.

3. Параметры модели

Программная среда Synopsys Sentaurus TCAD позволяет описывать ловушки, возникающие в результате облучения, которые создают дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне, возникшие вследствие облучения, а также учитывать захват и хранение пространственного заряда на ловушках. В работе приводится исследование влияния электронного облучения на вольт-амперные характеристики и характеристики открытия p-i-n-структуры. В данном случае считается, что облучалась вся структура, поэтому она имеет однородное распределение ловушек с параметрами, соответствующими электронному облучению [13] (Таблица 1).

Таблица 1. Параметры ловушек

Параметр	Значение	Ед. изм.
$E_{\text{trap}1} = E_c - E_{t1}$	0.36	эВ
$E_{\text{trap}2} = E_v + E_{t2}$	0.4	эВ
Concentration	$9e+12$	см^{-3}

4. Коррекция ВАХ p-i-n-диода

На рисунке 2 показаны вольт-амперные характеристики для исходной и подвергнутой электронному облучению p-i-n-структуры в диапазоне от 0 до 1.7 В.

Разработанная структура с дискретной металлизацией поверхности обеспечивает взаимную компенсацию напряжения затворов и вклада ловушек на ВАХ p-i-n-диода. Так, положительное напряжение на затворах действует аналогично ловушкам и угол наклона ВАХ уменьшается, а при отрицательном напряжении на затворах происходит обратная ситуация и появляется возможность компенсировать вклад дефектов в ВАХ.

Напряжения разных знаков, поданные на затворы (рисунок 1), позволяют достичь лучшего результата по коррекции ВАХ pin -структуры. При подаче отрицательного напряжения на затвор $G1 = -5.2$ В и положительного напряжения на затвор $G3 = 5.2$ В достигается максимальное изменение угла наклона ВАХ. В процессе исследования обнаружено, что зависимость компенсирующего напряжения на затворах структуры является линейной функцией от концентрации дефектов.

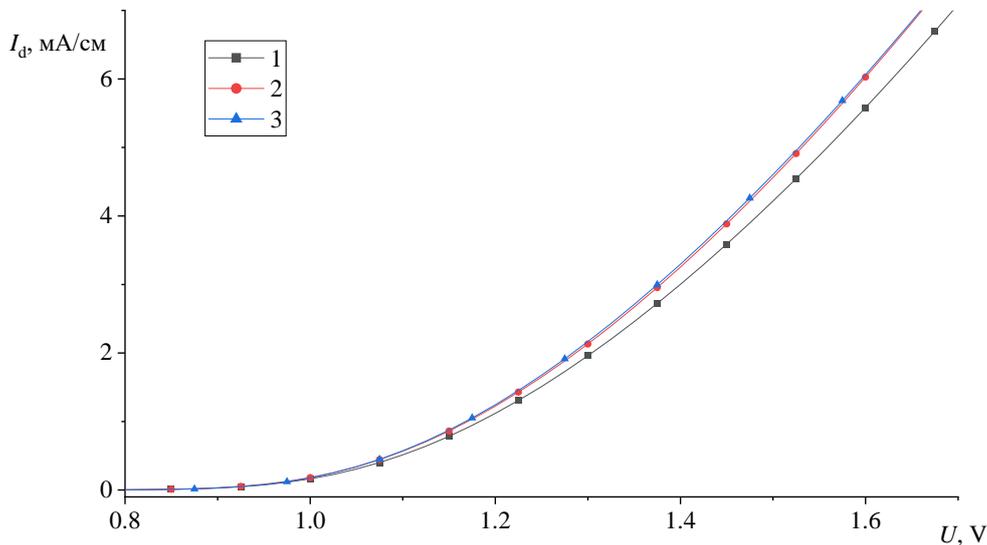


Рисунок 2. Компенсация ВАХ дополнительными затворами: 1 – ВАХ pin -диода после облучения, 2 – ВАХ исходного диода, 3 – ВАХ pin -диода после облучения с компенсацией затворами.

5. Коррекция характеристик открытия pin -диода

Другой характеристикой pin -диода является характеристика переключения из закрытого состояния в открытое, т.е. это время от начала импульса до стабилизации тока. По данной характеристике можно определить время открытия pin -диода.

Дефекты в pin -структуре меняют скорость нарастания тока и, как следствие, требуется коррекция характеристики переключения для возвращения времени открытия к времени открытия чистого pin -диода. Как было показано в работе [14], характеристики переключения управляются затворами на поверхности pin -структуры. На рисунке 1 показаны соответствующие затворы, обеспечивающие коррекцию характеристик переключения ($G1$ - $G3$), представленных на рисунке 3. Крайние затворы ($G1$ и $G3$) обеспечивают регулировку тока и времени открытия, и, как следствие, появляется возможность настройки ВАХ и характеристики переключения соответственно. Введение в модель среднего затвора $G2$ позволяет отдельно настраивать время открытия. Применение одновременно 3-х затворов дает возможность достаточно точно корректировать характеристику переключения pin -диода, что видно при сравнении 1, 2 и 3 зависимостей на рисунке 3. Результаты корректировки отображены зависимостью 3. Отдельно проводились исследования диапазона изменения времени открытия, представленные зависимостями 4 и 5. Видно, что, меняя напряжение на $G2$, можно либо ускорять время открытия, либо замедлять.

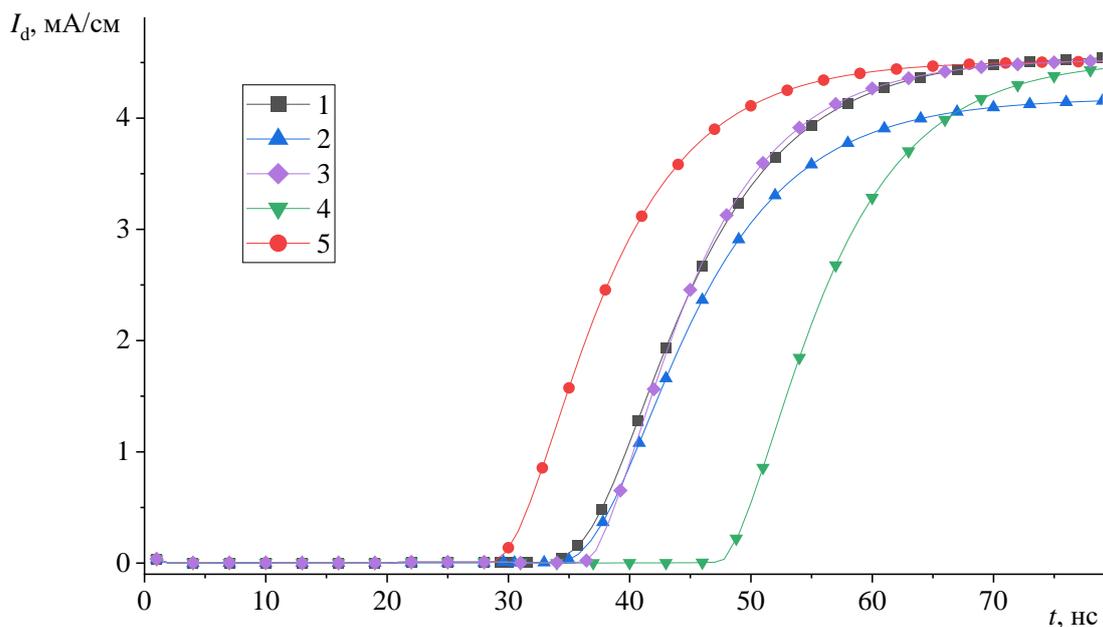


Рисунок 3. Характеристика переключения: 1 – исходного (без дефектов) pin-диода, 2 – облученного pin-диода; 3 – облученного pin-диода с компенсирующими затворами; 4 – облученного pin-диода с увеличением времени открытия; 5 – облученного pin-диода с уменьшением времени открытия.

В таблице 2 показаны напряжения на затворах, соответствующие каждой зависимости из рисунка 3.

Таблица 2. Напряжения на затворах в соответствии с номером зависимости

Номер зависимости	G1	G2	G3
1	0 В	0 В	0 В
2	0 В	0 В	0 В
3	-5.2 В	-0.6 В	5.2 В
4	-5.2 В	-0.8 В	5.2 В
5	-5.2 В	0.6 В	5.2 В

6. Заключение

В работе приводится метод коррекции характеристик pin-структуры, подвергнутой воздействию электронной радиации, заключающийся в нанесении на поверхность диода трех МДП-затворов и подачи на них соответствующих потенциалов. К корректируемым характеристикам относятся ВАХ и характеристики открытия pin структуры. Данный метод позволяет скорректировать отклонение рабочих характеристик диода из-за подвергнутого облучения до заводских характеристик, тем самым дает возможность использовать такие диоды в электронике с высокими требованиями к работе в зонах с повышенной радиацией и обеспечивает более долгое использование устройства.

Список литературы

1. Yamaguchi, M. Deep level analysis of radiation-induced defects in Si crystals and solar cells / M. Yamaguchi, [at al.] // *Journal of Applied Physics*, — 1999. — 86(1). — P.217–223.
2. Добров, В.А. Влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ на вольт-амперные характеристики и низкочастотные шумы 4H-SiC pin-диодов / В.А. Добров и др. // *Физика и техника полупроводников* — 2019. — том 53. — №4. — С. 555-561.
3. Krishnan, S. Electron irradiation effects on the Schottky diode characteristics of p-Si / S. Krishnan, G. Sanjeev, M. Pattabi // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* — 2008. — 266(4)/ — P. 621–624.
4. Козлов, В.А. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами / В.А. Козлов, В. В. Козловский // *Физика и техника полупроводников* — 2001. — Том 35. — №7. — С. 769-795.
5. Солдатенков, Ф. Ю. Применение протонного облучения для точной коррекции динамических характеристик сверх-быстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A3B5 p-i-n диодов / Ф. Ю. Солдатенков, В. А. Козлов, М. Ф. Кудояров // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» — 2015. — С.74-78
6. Hazdra, P. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons / P. Hazdra [at al.] // *Microelectronics Journal* — 2004. — 35(3) — P. 249–257.
7. Li, X. Synergistic effects of NPN transistors caused by combined proton irradiations with different energies / X. Li [at al.] // *Microelectronics Reliability* — 2018 — 82 — P. 130–135.
8. Novo, C. Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode / C. Novo [at al.] // 31st Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro) — 2016
9. Shruthi, A. S. Study of Device Physics in Impact Ionisation MOSFET using Synopsys TCAD tools / Shruthi, A. S. [at al.] // *International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAЕСС)* – 2014.
10. Калинина, Е. В. Влияние облучения на свойства SiC и приборы на его основе / Е. В. Калинина // *Физика и техника полупроводников* — 2007. — Т.41 — №7. — С. 769-805.
11. 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.
12. 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.
13. Зи, С. Физика полупроводников, книга 1 / С. Зи. — М.: Мир — 1984. — 456 с.
14. Даниленко, А.А. Программирование двухбитного pin-диода в среде Synopsys Sentaurus TCAD / А.А. Даниленко и др. // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. — 2018. — №. 5 — С. 51-59