Физико-математические науки / Physical and mathematical sciences
1.3.8. Физика конденсированного состояния

УДК: 621.382.323 DOI:10.69537/VKNIIRAN. 2024.19.4.009

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В *N*-КАНАЛЬНЫХ МДП-ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

© Мустафаев Гасан Абакарович (a), Хасанов Асламбек Идрисович (b, c), Хамбулатов Саид-Салах Саид-Хасанович (d)

(a) Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Институт информатики, электроники и робототехники, профессор кафедры электроники и цифровых информационных технологий, zoone@mail.ru, г. Нальчик
(b) Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Институт математики, физики и информационных технологий, заведующий кафедрой физической электроники, aslan2001@rambler.ru, г. Грозный
(c) КНИИ РАН, отдел физико-математических исследований, старший научный сотрудник aslan2001@rambler.ru, г. Грозный
(d) Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Институт математики, физики и информационных технологий, магистрант кафедры физической электроники, said@rambler.ru, г. Грозный

Аннотация. В работе рассматриваются эффекты, возникающие при формировании ловушечных электронных центров на границе раздела Si-Si0_2, так как они более существенно влияют на изменение электрических свойств n-канальных МДП транзисторов. Эксперименты проводились на n-канальных МДП транзисторах обедненного типа. Облучались приборы с одинаковыми начальными характеристиками при последовательном увеличении дозы облучения. В качестве источника γ-лучей использовался Co^{60}. Показано, что в течение облучения первая группа транзисторов не имела смешения на затворе, на вторую группу транзисторов смещение между затвором и подложкой составляло -2,0 В и на третью группу - 4,0 В.

***Ключевые слова*:** радиационные эффекты, облучение, МДП-транзисторы, кремний, оксид кремния, пороговое напряжение.

RADIATION EFFECTS IN n-CHANNEL MOS FIELD-EFFECT TRANSISTORS

© Mustafaev Gasan Abakarovich (a), Khasanov Aslambek Idrisovich (b, c), Khambulatov Said-Salah Said-Khasanovich (b)

(a) Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Institute of Informatics, Electronics and Robotics, Professor of the Department of Electronics and Digital Information Technologies, zoone@mail.ru, Nalchik
(b) Chechen State University named after A.A. Kadyrov, Institute of Mathematics, Physics and Information Technologies, Head of the Department of Physical Electronics. Grozny

KNI RAS, Department of Physical and Mathematical Research, Senior Researcher
aslan2001@rambler.ru, Grozny
(c) Chechen State University named after A.A. Kadyrov, Institute of Mathematics, Physics and Information Technologies, Master's student of the Department of Physical Electronics,
said@rambler.ru, Grozny

Abstract. The paper considers the effects that occur during the formation of trap electron centers at the Si-Si02 interface, since they have a more significant effect on the change in the electrical properties of -channel MOS transistors. The experiments were carried out on -channel MOS transistors of the depleted type. Devices with the same initial characteristics were irradiated with a successive increase in the irradiation dose. Co60 was used as a source of -rays. It is shown that during irradiation the first group of transistors had no bias on the gate, for the second group of transistors the bias between the gate and the substrate was -2.0 V, and for the third group it was 4.0 V.

Key words: radiation effects, irradiation, MOSFETs, silicon, silicon oxide, threshold voltage.

ВВЕДЕНИЕ

Поведение полупроводниковых приборов при воздействии на них радиации представляет значительный интерес с точки зрения определения надежности и выяснения механизмов радиационных эффектов. Воздействие γ-лучей на МДП-приборы приводит к двум эффектам: увеличению плотности положительного заряда в слое окисла и созданию ловушечных электронных центров на границе раздела Si-Si0_2 [1-8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваются эффекты второго типа, так как они более существенно влияют на изменение электрических свойств n-канальных **МДП** транзисторов. Эксперименты проводились на n-канальных **МДП** транзисторах обедненного типа. Облучались приборы с одинаковыми начальными характеристиками при последовательном увеличении дозы облучения. В качестве источника γ-лучей использовался Co^{60}. Интенсивность облучения составляла 2,1 крад (SiO_2). В течение облучения первая группа транзисторов не имели смешения на затворе, на **вторую группу** транзисторов смещение между затвором и подложкой составляло -2,0 В и на **третью группу** - 4,0 В. После каждой стадии облучения измерялись передаточная характеристика, частотная зависимость шумов тока стока и дифференциальная вольт-фарадная зависимость МДП-емкости. Дифференциальная емкость определялась из измерений зарядового тока при приложении положительного или отрицательного линейно меняющегося напряжения. Ток через МДП-диод прямо пропорционален емкости C(V) (уравнение 1), и может наблюдаться на осциллографе. Максимальное напряжение V_R составляло 10 В, а скорость возрастания напряжения менялась от 10^5 до 0,07 В/с, при этом сток и исток накоротко замыкались на подложку.

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{d\upsilon} \cdot \frac{d\upsilon}{dt} = C(V)\frac{V_R}{t_R} \quad \textbf{(1)}$$

При облучении транзистора происходит уменьшение тока стока, как показано на рис. 1 $(V_G = 0B)$.

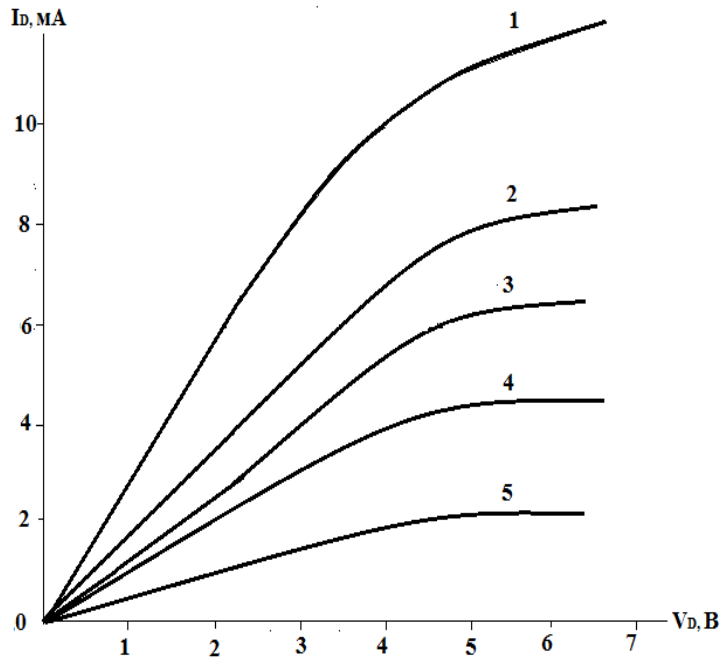

Рисунок 1. Зависимость тока стока от напряжения стока, при последовательном увеличении дозы облучения;1-0 крад, 2-100 крад, 3-250крад, 4-900 крад, 5-5000 крад

Влияние облучения на зависимость тока стока I_D от напряжения затвора V_G для транзистора первой группы представлено на рис. 2. При облучении сильно понижается крутизна, однако напряжение включения изменяется не более чем на 1 В.

Измерение шумов выявило зависимость типа 1/f в интервале частот от 10 Гц до 10 Кгц. Транзистор первой группы показывает (рис. 3) увеличение шумов с ростом дозы облучения.

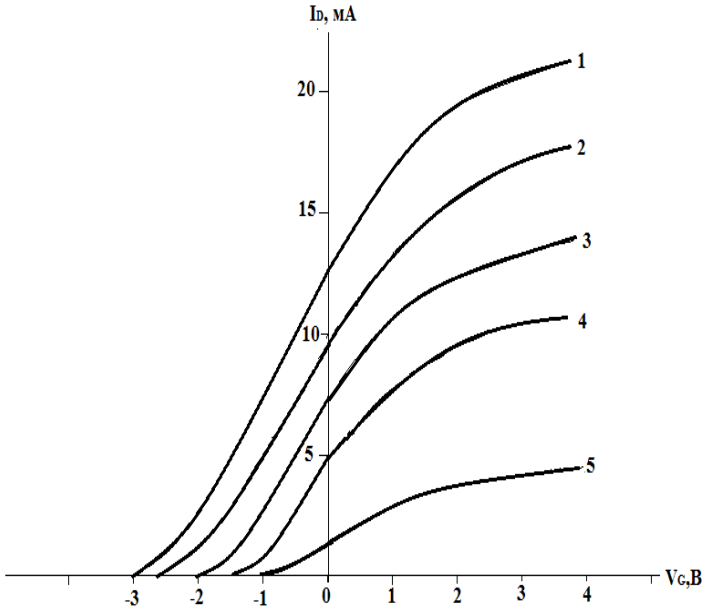

Рисунок 2. Влияние облучения на зависимость тока стока от напряжения затвора V_G, при последовательном увеличении дозы облучения;1-0 крад, 2-100 крад, 3-250крад, 4-900 крад, 5-5000 крад.

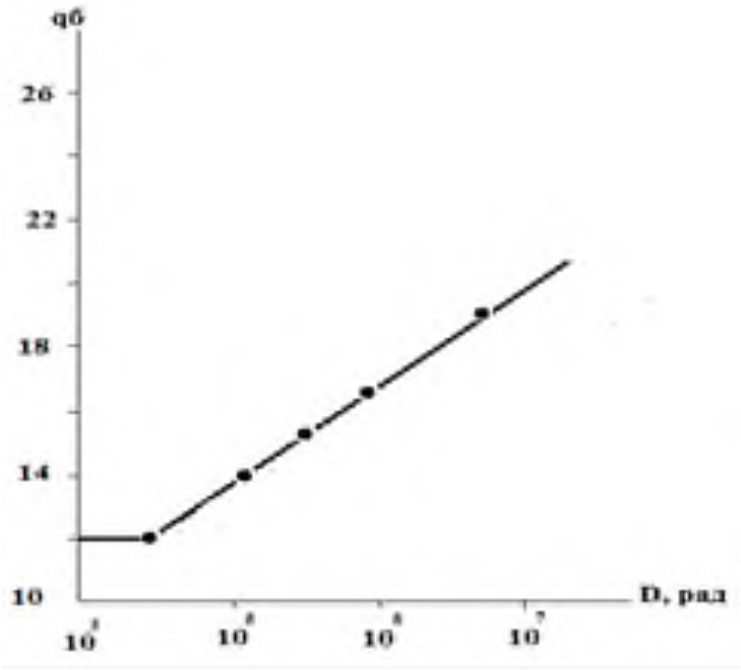

Рисунок 3. Изменение шумов с ростом дозы облучения.

В соответствии с уравнением 2 понижение тока стока может быть объяснено сдвигом порогового напряжения V_T и понижением эффективной подвижности носителей в канале.

$$I_D = \frac{2}{L}\mu_{эфф} C_{OK}\left[(V_G - V_T)V_D - V_D{}^{2/2}\right] \quad \textbf{(2)}$$

Сдвиг порогового напряжения происходит, однако, только в пределах 1В, тогда как уменьшение подвижности может быть более существенным за счет рассеяния на ионизированных примесных центрах [1,2], концентрация которых увеличивается по мере облучения. Малый положительный сдвиг V_T может быть связан с генерацией поверхностных состояний. Увеличение 1/f -шумов для всех транзисторов также свидетельствует об увеличении концентрации поверхностных состояний [1] на границе раздела Si-SiO_2. Анализ полученных зависимостей показал, что уровень Ферми находится вблизи валентной зоны, а дополнительно возникшие состояния распределены выше валентной зоны.

В измерениях вольт-фарадных характеристик МДП-транзисторов квазистатическим методом скорость развертки напряжения не ограничивается термической генерацией, как в МДП-диодах, так как носители инжектируются из стока и истока, закороченных на подложку. Вплоть до величины 10^5В/с скорость развертки не оказывает существенного влияния.

Искажение C-V-зависимости можно объяснить образованием поперечной неоднородности, однако, более вероятной причиной является образование моноэнергетического уровня (акцепторного) выше зоны проводимости Si [2]. Радиационная зависимость плотности состояний зависит от освобождения (заполнения) глубоких ловушек (ниже уровня Ферми) в истощенной области приповерхностного слоя. Различное положение провала на C-V-кривой с увеличением его абсолютного значения вызывается различным зарядом состояний моноэнергетических электронных центров, влияющих назначение поверхностного потенциала [2].

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Изменение плотности заряда в окисле оказывает слабое влияние на изменение электрических свойств исследуемых транзисторов;
2. Наибольшая доза облучения для этих приборов составляет 10^5 рад (SiO_2);
3. Спад крутизны происходит в результате увеличения ионизированной примеси и рассеяния электронов в канале на этих центрах;
4. C-V-характеристики указывают на увеличение состояний на границе раздела Si-SiO_2 с моноэнергетическим уровнем ниже дна зоны проводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М. 1980, Советское радио. 224с.

2. Ладыгин Е.А. Основы радиационной технологии микроэлектроники. Раздел: Первичные процессы образования радиационных центров в полупроводниковых кристаллах. Курс лекций. — М.: МИСиС, 1994. — 101 с.

3. Мустафаев А.Г., Мустафаев А.Г. Воздействие ионизирующих излучений на биполярные структуры. Электронный журнал "Исследовано в России", 016, С.203-208, 2008 http://zhunial.ape.relam.ni/articles/2008/016.pdf.

4. Мустафаев А.Г., Саркаров Т.Э., Мустафаев Г.А. Влияние излучений на МДП-структуры //Зарубежная электронная техника. Москва, 2001, вып.4, С.82-102.

5. Мустафаев А.Г., Мустафаев А.Г. Влияние накопленной дозы излучения на

КМОП-транзисторы изготовленные по КНС технологии //Нано и микросистемная техника, №9,2008, С.44-46.

6. Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Хасанов А.И. Стойкость МОП структур к гамма-облучению // Труды Всероссийской научно-практической конференция «Актуальные проблемы современного материаловедения». Грозный, 2015. С.124-127.

7. Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Черкесова Н.В., Хасанов А.И. Влияние ионизирующих излучений и температуры на радиационную стойкость полупроводниковых приборов // Известия чеченского государственного университета, №4, 2017, с.29-32.

8. Мустафаев Г.А., Тешев Р.Ш., Саркаров Т.Э., Мустафаев А.Г. Распределение заряда в тонких диэлектрических плёнках при воздействии ионизирующих излучений/Труды СКГТУ, Владикавказ, 2002, С. 129-137.

REFERENCES

1. Ladygin E.A. Effect of penetrating radiation on electronic products. M. 1980, Sovetskoe radio. 224 p.

2. Ladygin E.A. Fundamentals of radiation technology of microelectronics. Section: Primary processes of formation of radiation centers in semiconductor crystals. Lecture course. - M.: MISiS, 1994. - 101 p.

3. Mustafaev A.G., Mustafaev A.G. Effect of ionizing radiation on bipolar structures. Electronic journal "Researched in Russia", 016, pp. 203-208, 2008 http://zhunial.ape.relam.ni/articles/2008/016.pdf.

4. Mustafaev A.G., Sarkarov T.E., Mustafaev G.A. Effect of radiation on MIS structures // Foreign electronic equipment. Moscow, 2001, issue 4, pp. 82-102.

5. Mustafaev A.G., Mustafaev A.G. Effect of accumulated radiation dose on CMOS transistors manufactured using SOS technology // Nano and microsystem technology, No. 9, 2008, pp. 44-46.

6. Mustafaev G.A., Mustafaev A.G., Khasanov A.I. Resistance of MOS structures to gamma irradiation // Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Actual problems of modern materials science". Grozny, 2015. pp. 124-127.

7. Mustafaev G.A., Mustafaev A.G., Cherkesova N.V., Khasanov A.I. The influence of ionizing radiation and temperature on the radiation resistance of semiconductor devices // Bulletin of the Chechen State University, No. 4, 2017, pp. 29-32.

8. Mustafaev G.A., Teshev R.Sh., Sarkarov T.E., Mustafaev A.G. Charge distribution in thin dielectric films exposed to ionizing radiation / Proceedings of SKGTU, Vladikavkaz, 2002, pp. 129-137.