———— ПРИБОРЫ ———

УДК 621.382.322; 621.383

# ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРИБОРНЫХ МОП-СТРУКТУР

© 2024 г. С. Ш. Рехвиашвили<sup>1, \*</sup>, Д. С. Гаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН,

Нальчик, Россия <sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия \*E-mail: rsergo@mail.ru Поступила в редакцию 21.02.2024 г. После доработки 20.03.2024 г. Принята к публикации 20.03.2024 г.

Изучены электрофизические свойства приборных МОП-структур (конденсатор, полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом, КМОП-интегральная схема) при воздействии на них немодулированного лазерного излучения. Измерены статические и динамические характеристики. Теоретическое исследование проведено с использованием разработанных SPICE-моделей и численных экспериментов. Получено выражение для вольт-амперной характеристики полевого транзистора, работающего в режиме с постоянной оптической засветкой. Показано, что характеристики структур определяются генерацией и рекомбинацией неравновесных носителей заряда, эффектом в p-n-переходах, эффектом Дембера и туннелированием носителей заряда через подзатворный диэлектрик. Результаты работы представляют интерес с точки зрения создания быстродействующих транзисторов и интегральных микросхем нового типа.

*Ключевые слова:* лазерное излучение, МОП-структуры, пороговое напряжение, эффект поля, фотовольтаический эффект, генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда, резистивное переключение, туннельный эффект

DOI: 10.31857/S0544126924030093

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что электромагнитное излучение способно оказывать влияние на полупроводниковые материалы и приборы на их основе. В отношении этого влияния электромагнитное излучение можно классифицировать в зависимости от длины волны, интенсивности и длительности импульсов. Так, например, в полупроводниках видимый свет вызывает внутренний фотоэффект, с помощью ультрафиолетового излучения достигается фотоионизация, интенсивные гаммаи рентгеновское излучения создают повреждения кристаллической решетки (радиационные дефекты), микроволновое излучение приводит к нагреву и активизирует различные процессы с участием фононной подсистемы, за счет инфракрасного излучения происходит интенсивная генерация неравновесных носителей заряда и, соответственно, изменение электрических свойств (электропроводность, квантовые явления) [1]. Электромагнитное излучение можно эффективно использовать для модификации зонной структуры полупроводников. К основным изменениям в данном случае

относятся сдвиги дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, появление добавочных энергетических уровней в запрещенной зоне и изменение ширины запрещенной зоны.

На наш взгляд, с помощью специальных конструкторско-технологических решений направленное воздействие слабоинтенсивного электромагнитного излучения можно превратить в действенный инструмент для улучшения статических и динамических характеристик транзисторов и транзисторных интегральных микросхем [2—4]. Применение оптического излучения от светодиода или лазера позволяет одновременно увеличить быстродействие, снизить энергопотребление и повысить радиационную стойкость как дискретных, так и интегральных полупроводниковых компонентов. Технологически излучатель, например SMDсветодиод, размещается в едином корпусе с функциональным кристаллом.

Цель данной работы состоит в экспериментальном и теоретическом исследовании электрофизических свойств различных МОП-структур при воздействии на них немодулированного маломощного лазерного излучения. Предметами исследования являются МОП-конденсатор, полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом, КМОП-интегральная микросхема.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Исследовались полевой кремниевый диффузионно-планарный транзистор с двумя изолированными затворами и каналом *n*-типа 2П350Б (рис. 1, *a*), интегральная микросхема КМОП-типа К561ЛА7 (рис. 1, *б*), а также самостоятельно изготовленные МОП-конденсаторы на структурах Ті-SiO<sub>2</sub>-*n*-Si. Параметры МОП-конденсаторов: подложка КЭФ 4.5 (100); толщина термического диоксида кремния равна 0.4 мкм; толщина титановой пленки, нанесенной путем магнетронного напыления, равна 0.14 мкм.

В качестве источника излучения применялся красный маломощный полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм. Кроме красного лазера проверялись зеленый (длина волны 532 нм) и синий (длина волны 450 нм) маломощные полупроводниковые лазеры. Было выявлено, что с уменьшением длины волны излучения наблюдаемые эффекты во всех приборах уменьшаются. Таким образом, наиболее предпочтительным для экспериментов оказался красный лазер. Полимерный корпус микросхемы стачивался с лицевой стороны до тонкого защитного слоя, через который лазерное излучение могло проникать в кристалл. Мощность излучения для микросхемы ~100 мВт. В случае транзистора и конденсаторов исследовались открытые структуры, поэтому мощность засветки для них составляла менее половины мощности засветки микросхемы. Мощность излучения контролировалась прибором S142C.

Для микросхемы измерялись осциллограммы сигналов и передаточные характеристики по напряжению при ее работе в качестве инвертора. Напряжение питания микросхемы в темновом режиме устанавливалось ниже порога срабатывания VS = 1.6 В, что позволило отчетливо отслеживать эффекты от облучения. Полевой транзистор включался по схеме с общим истоком, затворы были объединены. В целях соблюдения схемотехнических особенностей интегральных микросхем КМОП-типа на вход каскада подключались диоды D1 и D2, но эти диоды не облучались. Резистор R1 не имеет принципиального значения, но качественно описывает ненулевое сопротивление полупроводниковых областей. Резистор *R2* заменяет нагрузочный транзистор в КМОП-логике. Измерялись осциллограммы сигналов, передаточные характеристики по напряжению и выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ).



Рис. 1. Принципиальные электрические схемы каскада с общим истоком (а) и инвертора КМОП-типа (б).

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 3 2024

При облучении транзистора между электродами истока и стока возникает фотоЭДС величиной до 0.4 В, что указывает на фотовольтаический эффект и пространственное разделение электронов и дырок. Для МОП-конденсатора с распределенным и точечным металлическими контактами измерялись ВАХ. Использовался прибор ПНХТ Л2-56, с помощью которого наблюдалось резистивное переключение (мемристорный эффект). Результаты экспериментов представлены на рис. 2—4. На всех графиках кривые 1, 2 относятся соответственно к измерениям без облучения и с облучением.

Теоретические исследования проводились с помощью программы LTspice, которая обладает всеми необходимыми вычислительными возможностями [5]. Была разработана SPICE-модель КМОП-инвертора с учетом основных физических эффектов, которые возникают при лазерном облучении. Эквивалентная схема инвертора и результаты схемотехнического моделирования показаны на рис. 1,  $\delta$  и рис. 3,  $\epsilon$ .





**Рис.** 2. Динамические (*a*) и статические ( $\delta - e$ ) характеристики каскада с общим истоком.



**Рис.** 3. Динамические (*a*) и статические (*б*, *в*) характеристики КМОП инвертора. Рисунок (*в*) получен с помощью схемотехнического моделирования.



5 В/дел, 20 мкА/дел

**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики МОП-конденсатора: a - 6ез излучения;  $\delta - с$  излучением.

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные эксперименты показывают, что пороговое напряжение дискретных и интегральных МОП-транзисторов уменьшается по мере увеличения интенсивности и длины волны лазерного облучения, что в целом согласуется с результатами из [6]. Выражение для порогового напряжения для *n*-канального транзистора можно записать в следующем виде [7, 8]:

$$V_T = V_{FB} + 2\varphi_B + \frac{Q}{C_{ox}}; \tag{1}$$

$$V_{FB} = \Phi_M - \chi - \frac{E_g}{2q} - \varphi_B, \qquad (2)$$

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 3 2024

где  $V_{FB}$  — напряжение плоских зон;  $\varphi_B > 0$  — поверхностный потенциал подложки; Q — поверхностная плотность заряда в области канала при наступлении сильной инверсии;  $\Phi_M$  — работа выхода электрона из металла;  $\chi$  и  $E_g$  — энергия электронного сродства и ширина запрещенной зоны полупроводника. Если исходить из (1) и (2), то уменьшение порогового напряжения должно быть связано с уменьшением  $\varphi_B$  и Q. В [6] предполагалось, что уменьшение  $\varphi_B$  и Q связано лишь с генерацией избыточных электронно-дырочных пар в области канала под действием внешнего излучения. Из экспериментов, однако, следует, что существенный вклад вносят  $n^+$ -области истока и стока, наличие которых в [6] не учитывалось. На границах этих областей возникает фотовольтаический эффект, который приводит к увеличению концентрации неосновных носителей заряда в области канала и, соответственно, к увеличению подпорогового тока и уменьшению порогового напряжения. Помимо снижения порогового напряжения вследствие фоновой засветки значительно увеличивается ток стока, уменьшаются выходное напряжение высокого уровня и времена нарастания переднего и спада заднего фронтов сигнала (см. рис. 2), что объясняется увеличением количества подвижных электронов в канале. Участки металлизации и резкое убывание интенсивности излучения при его распространении вглубь подложки являются причиной неравномерного распределения вектора напряженности электрического поля и электрического потенциала. Поэтому статические характеристики схемы на рис. 1, а, вообще говоря, свидетельствуют не только о фотовольтаическом эффекте, но и некотором проявлении эффекта Дембера. В реальной транзисторной структуре разделить вклады в фотоЭДС от фотовольтаического эффекта и эффекта Дембера, к сожалению, не представляется возможным. Ситуация усложняется еще и тем, что на пороговое напряжение [8] и эффект Дембера [9] может оказывать влияние разогрев электронного газа.

Если в известном приближении Хофстейна— Хаймана [10] учесть фотоЭДС  $V_{PH}$ , то несложно получить уравнения для ВАХ транзистора, работающего в условиях фоновой засветки:

воздействия (во всяком случае, при небольших значениях интенсивности), так как подвижность электронов в области канала уже имеет устоявшееся низкое значение из-за различных механизмов поверхностного рассеяния и действия поперечного электрического поля [11]. Для интегрального транзистора при h = 50 нм и W / L = 10 из (3) получаем верхнюю оценку  $K_p = 5 \times 10^{-3} \text{ A/B}^2$ . Подвижность дырок в аналогичном поверхностном канале р-канального транзистора в 3-4 раза меньше, чем подвижность электронов [11]. Увеличение интенсивности лазерного излучения вплоть до оптического пробоя может приводить к нагреву всей структуры, изменениям поляризуемости диэлектрика и плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик [12, 13], а также к уменьшению параметра  $K_{p}$ .

Вид участка выходной ВАХ при  $VS \le 0$ (см. рис. 2, *г*) свидетельствует о зависимости фото-ЭДС от напряжения на затворе; с ростом  $V_G$  имеет место уменьшение  $V_{PH}$ . Это требует отдельных комментариев. Структура МОП-транзистора содержит два встроенных встречно направленных диода на областях истока и стока. Истоковый диод закорочен, а стоковый диод включен в параллель цепи сток—исток. При освещении на стоковом диоде создается вентильная фотоЭДС, что при замкнутой цепи эквивалентно подключению дополнительного источника тока, однонаправленного с током

$$I_{D} = \begin{cases} K_{p} \left[ (V_{G} - V_{T}) (V_{D} + V_{PH}) - \frac{1}{2} (V_{D} + V_{PH})^{2} \right], V_{D} < V_{G} - V_{T} - V_{PH}, \\ \frac{K_{p}}{2} (V_{G} - V_{T})^{2}, V_{D} \ge V_{G} - V_{T} - V_{PH}, \end{cases}$$
(3)

где  $K_p$  — удельная крутизна затвора;  $V_G$  и  $V_D$  — напряжения затвор—исток и сток—исток. Темновому току стока соответствует  $V_{PH} = 0$ . Если  $I_D = 0$ , то имеем условие отсечки  $V_D = -V_{PH}$ . Удельная крутизна затвора рассчитывается по следующей формуле [7, 8, 10]:

$$K_p = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_n W}{h L},\tag{4}$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\varepsilon = 3.9$  и h — относительная диэлектрическая проницаемость и толщина слоя диоксида кремния; W и L — ширина и длина канала;  $\mu_n = 300 - 700 \text{ см}^2/(\text{B}\times\text{c})$  — подвижность электронов в области канала для кремниевых транзисторов [7, 8]. Параметр  $K_p$ , по-видимому, не должен сильно зависеть от интенсивности внешнего оптического

источника питания. Появление избыточного тока в цепи питания приводит к смещению выходных ВАХ транзистора влево с образованием области обеднения при  $VS \le 0$ . Другими словами, индуцируемый канал при оптическом воздействии превращается во встроенный канал, по которому при  $V_G \leq 0$  всегда протекает ток. За повышением напряжения на затворе обязательно следует увеличение размера инверсионной области и, как следствие, уменьшение вентильной фотоЭДС. Из рис. 2, г можно видеть, что в области обеднения имеются точки пересечения ВАХ при различных значениях V<sub>G</sub>. Эти точки, по существу, означают, что в области канала транзистора между собой конкурируют фотовольтаический эффект, который доминирует при малых V<sub>G</sub>, и инверсия типа проводимости вследствие эффекта поля, которая преобладает

при больших  $V_G$ . Эффект Дембера, связанный с оттеснением поверхностных электронов обратно в *p*-подложку, препятствует образованию канала, т.е. в нашем случае является нежелательным.

Как вышеуказанные, так и иные эффекты должны наблюдаться и при лазерном облучении интегральных микросхем [14, 15]. Из рис. 3 следует, что у интегральной микросхемы КМОП-типа создаваемые лазерным излучением эффекты проявляются менее заметно, чем у одиночного транзистора. В основном это обусловлено тем, что в электрической схеме используются комплементарные транзисторы, фототоки которых частично компенсируют друг друга. Качественная интерпретация экспериментальных результатов проводилась посредством схемотехнического моделирования инвертора КМОП-типа с входными защитными диодами (см. рис. 1, б), на основе которого построена микросхема К561ЛА7. Ниже приведена SPICE-модель инвертора.

**\* CMOS INVERTER** VIN 1 0 0.5 VS 2 0 1.6 ID1 1 0 12u ID2 2 1 12u IM1 3 0 12u IM2 3 2 12u D101DIODE D212DIODE M13100 NMOSFET M2 2 1 3 2 PMOSFET .MODEL NMOSFET NMOS(KP=5e-3 VTO=0.23) .MODEL PMOSFET PMOS(KP=2e-3 VTO=-1) .MODEL DIODE D(IS=1p RS=100) .DC VIN 0 0.5 0.01 .PRINT DC V(3) .END

Воздействие лазерного излучения описывается источниками тока ID1, ID2, IM1 и IM2, а также уменьшением пороговых напряжений VTO входного и нагрузочного транзисторов. Моделирование показывает, что наличие всех фототоков при прочих одинаковых условиях влечет за собой снижение порога переключения инвертора. Параметры модели диодов и их фототоки слабо влияют на статические характеристики инвертора. Чтобы описать поведение обоих транзисторов при лазерном облучении, оказалось достаточным учесть всего два параметра — KP и VTO. Остальные параметры модели МОП-транзистора [16] также могут в той или иной степени изменяться

в результате оптического воздействия, но их учет не столь существенен для физики рассматриваемых процессов в приборных структурах.

Утончение подзатворного диэлектрика (h < 10 нм) приводит к появлению новых эффектов и кардинально изменяет электрофизические свойства МОП-структуры. Структуры со сверхтонким слоем диоксида кремния занимают промежуточное положение между барьерами Шоттки и классическими МОП-структурами и представляют большой интерес для современной наноэлектроники. В настоящей работе изучалось влияние лазерного излучения на процесс протекания тока через подзатворный диэлектрик в МОП-конденсаторе Ti-SiO<sub>2</sub>-*n*-Si.

Увеличение напряжения на конденсаторе сопровождается электрическим пробоем и образованием туннельно-прозрачного промежутка между металлом и полупроводником. При этом оказалось, что напряжение пробоя в случае распределенного металлического контакта меньше, чем в случае точечного металлического контакта, что связано с неоднородной структурой диэлектрика. Пробой, скорее всего, происходит по механизму инжекции дырок из анода [17].

После образования туннельного промежутка на прямой ветви ВАХ формируется достаточно устойчивый во времени гистерезис (см. рис. 4), который интерпретируется как мемристивный эффект. Лазерное воздействие приводит к уменьшению площади гистерезиса. Регистрировались ВАХ двух типов: 1) свойственные резистивному переключению: 2) свойственные туннельному диоду с N-образной кривой. Оба случая сочетаются с филаментарным механизмом, в рамках которого предполагается возникновение и исчезновение токопроводящих каналов в диэлектрике [18-20]. Филаменты могут образовываться по причине миграции кислородных вакансий (по аналогии с оксидами переходных металлов [19]) и/или металлизации дефектных областей в диэлектрике, которые влияют на величину потенциального барьера. С физической точки зрения наибольший интерес представляют ВАХ с N-образными кривыми, которые, вероятно, обусловлены резонансным туннелированием электронов через дискретные уровни [21]. Особенно примечательным здесь является то, что положение и величина максимумов N-образных кривых не зависит от внешнего лазерного воздействия, что видно из рис. 4.

Согласно [22, 23] основной причиной, приводящей к фотоэлектрическим эффектам в МОП-конденсаторе без p—n-переходов, является образование около границы раздела диэлектрик-полупроводник неравновесной обедненной области независимо от механизма протекания тока через диэлектрик. По нашему мнению, на формирование обедненной области может оказывать влияние не только ток утечки через диэлектрик, но и эффект Дембера. При лазерном облучении, по-видимому, может играть определенную роль эффект Франца—Келдыша [24]. Изначально происходит поглощение кванта излучения электроном и его высокоэнергетическое туннелирование через потенциальный барьер. Попадая в полупроводник, электрон в ходе ударной ионизации вызывает рождение нескольких электронно-дырочных пар, что дает вклад в усиление фототока.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведены экспериментальные и теоретические исследования электрофизических свойств различных МОП-структур (конденсатор, транзистор, интегральная микросхема) при воздействии на них непрерывного лазерного излучения. Полученные результаты представляют интерес как с позиции развития методов исследования радиационной стойкости [25], так и с позиции создания качественно новых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [2].

Показано, что непрерывная фоновая засветка позволяет уменьшить полную мощность, затрачиваемую на переключение мемристорной МОП-структуры, снизить порог переключения и сократить время установления переходных процессов *n*-канального МОП-транзистора и интегральной микросхемы КМОП-типа. Электрическое поле затвора транзистора стягивает к поверхности фотогенерированные неосновные носители заряда, что ускоряет образование проводящего канала. В итоге происходит уменьшение порогового напряжения. При этом обнаруживается эффект уменьшения фотоЭДС под действием поперечного электрического поля. Проведено SPICE-моделирование инвертора КМОП-типа, которое дало возможность объяснить экспериментальные результаты. Конструктивные особенности КМОП-инвертора делают его менее восприимчивым к лазерному излучению по сравнению с отдельным МОП-транзистором, что хорошо подходит для изготовления радиационно-стойких интегральных микросхем. Чтобы создать интегральную микросхему с повышенной фоточувствительностью и улучшенными статическими и динамическими характеристиками за счет оптической накачки, необходимо использовать МОП-транзисторы с каналом одного типа проводимости. Подходящей схемотехнической единицей в данном случае представляется, например, инвертор с нелинейной нагрузкой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. 190 с.

- 2. Рехвиашвили С.Ш., Нарожнов В.В. Способ повышения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных схем. Патент РФ № 2799113. Приоритет от 18.03.2022.
- 3. Альтудов Ю.К., Гаев Д.С., Псху А.В., Рехвиашвили С.Ш. Биполярный транзистор с оптической накачкой // Микроэлектроника. 2023. Т. 52. № 6. С. 489—496.
- 4. *Рехвиашвили С.Ш., Гаев Д.С.* Исследование влияния оптического излучения на интегральную микросхемы ТТЛ-типа // Известия ВУЗов. Электроника. 2024. Т. 29. №3. С.310-318.
- 5. *Володин В.Я.* LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 400 с.
- 6. Wlodarski W., Bergveld P., Voorthuyzen J.A. Threshold voltage variations in n-channel MOS transistors and MOSFET-based sensors due to optical radiation // Sensors and Actuators. 1986. V. 9. № 4. P. 313–321.
- Sze S.M., Ng Kwok K. Physics of semiconductor devices. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 815 p.
- Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. М.: Мир, 1991. 327 с.
- Ефанов А.В., Энтин М.В. Теория ЭДС Дембера на горячих электронах // ФТП. 1986. Т. 20. № 1. С. 20—24.
- Hofstein S.R., Heiman F.P. The silicon insulated-gate field-effect transistor // Proceedings of the IEEE. 1963. V. 51. № 9. P. 1190–1202.
- Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.
- 12. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
- Терехов В.А., Манько А.Н., Бормонтов Е.Н., Левченко В.Н., Требунских С.Ю., Тутов Е.А., Домашевская Э.П. Влияние сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения на параметры структур металл—диэлектрик—полупроводник // ФТП. 2004. Т. 38. № 12. С. 1435—1438.
- Скоробогатов П.К., Никифоров А.Ю., Егоров А.Н. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования объемных ионизационных эффектов в тонкопленочных кремниевых микросхемах // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 1. С. 12—27.
- Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Егоров А.Н., Громов Д.В. Выбор оптимальных параметров лазерного излучения для моделирования ионизационных эффектов в кремниевых микросхемах объемной технологии // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 2. С. 127—132.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 3 2024

- Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. М.: Физматлит, 2010. 408 с.
- 17. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Игнатов П.В., Мизгинов Д.С. Анализ моделей пробоя подзатворного диэлектрика // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2018. № 2(170). С. 5—7.
- 18. *Sawa A*. Resistive switching in transition metal oxides // Materials Today. 2008. V. 11. № 6. P. 28–36.
- Горшков О.Н., Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Чалков В.Ю., Антонов И.Н., Круглов А.В., Шенина М.Е., Котомина В.Е., Филатов Д.О., Серов Д.А. Резистивное переключение в мемристорах на основе гетероструктур Аg/Ge/Si // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 2. С. 44–46.
- Пермякова О.О., Рогожин А.Е. Моделирование резистивного переключения в мемристорных структурах на основе оксидов переходных металлов // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 5. С. 323-333.

- 21. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000. 246 с.
- Вуль А.Я., Саченко А.В. Фотоэлектрические свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник с туннельно-прозрачным слоем диэлектрика // ФТП. 1983. Т. 17. № 8. С. 1361—1376.
- 23. Векслер М.И., Тягинов С.Э., Шулекин А.Ф., Грехов И.В. Вольт-амперные характеристики туннельных МОП диодов Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si с пространственно неоднородной толщиной диэлектрика // ФТП. 2006. Т. 40. № 9. С. 1137—1143.
- 24. Белорусова Д.А., Гольдмана Е.И., Чучев Г.В. Эффект Франца-Келдыша в структурах кремний-сверхтонкий (3.7 нм) окисел-поликремний // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 9. С. 917—920.
- 25. *Пирогов Ю.А., Солодов А.В.* Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 1—38.

## The Effect of Laser Radiation on Functional Properties of MOS Structures

### © 2024 S. Sh. Rekhviashvili<sup>1,</sup> \*, D. S. Gaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Mathematics and Automation KBSC RAS, Nalchik, Russia <sup>2</sup>Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia \*E-mail: rsergo@mail.ru

The electrophysical properties of instrument MOSFET structures (capacitor, field-effect transistor with an isolated gate and an induced channel, CMOS integrated circuit) when exposed to unmodulated laser radiation are studied. Static and dynamic characteristics were measured. The theoretical study was carried out using the developed SPICE models and numerical experiments. An expression is obtained for the volt-ampere characteristics of a field-effect transistor operating in a mode with constant optical illumination. It is shown that the characteristics of the structures are determined by the generation and recombination of nonequilibrium charge carriers, the field effect, the photovoltaic effect in p-n junctions, the photo-Dember effect and tunneling of charge carriers through a gate dielectric. The results of the work are of interest from the point of view of creating high-speed transistors and integrated circuits of a new type.

*Keywords:* laser radiation, MOSFET structures, threshold voltage, field effect, photovoltaic effect, generation and recombination of nonequilibrium charge carriers, resistive switching, tunnel effect

#### REFERENCES

- 1. *Vavilov V.S.*, *Kekelidze N.P.*, *Smirnov L.S.* The effect of radiation on semiconductors. Moscow: Nauka, 1988. 190 p. (In Russian)
- 2. *Rekhviashvili S.Sh.*, *Narozhnov V.V.* A method for increasing the performance of transistors and transistor integrated circuits. RF Patent No. 2799113. Priority of March 18, 2022.
- Al'tudov Y.K., Gaev D.S., Pskhu A.V., Rekhviashvili S.Sh. Optically pumped bipolar transistor // Russ Microelectron. 2023. V. 52. P. 510–516. https://doi.org/10.1134/S1063739723700762

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 3 2024

- Rekhviashvili S.Sh., Gaev D.S. Investigation of the effect of optical radiation on the TTL-type integrated circuit // Izvestiya VUZov. Electronics. 2024. V. 29. No. 3 (in print).
- Volodin V.Ya. LTspice: computer modeling of electronic circuits. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010. 400 p. (In Russian)
- Wlodarski W., Bergveld P., Voorthuyzen J.A. Threshold voltage variations in n-channel MOS transistors and MOSFET-based sensors due to optical radiation // Sensors and Actuators. 1986. V. 9. No. 4. P. 313–321. https://doi.org/10.1016/0250-6874(86)80063-4

- Sze S.M., Ng Kwok K. Physics of semiconductor devices. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 815 p.
- 8. *Ferry D.K., Akers L.A., Greeneich E.W.* Ultra large scale integrated microelectronics (Prentice Hall Advanced Reference Series). Prentice Hall, 1988. 285 p.
- Efanov A.V., Entin M.V. Theory of the hot-electron Dember emf. // Sov. Phys. Semicond. 1986. V. 20. No. 1. P. 11–13.
- Hofstein S.R., Heiman F.P. The silicon insulated-gate field-effect transistor // Proceedings of the IEEE. 1963. V. 51. No. 9. P. 1190–1202. https://doi. org/10.1109/PROC.1963.2488
- Krasnikov G. Ya. Design and technological features of submicron MOSFETS. Moscow: Teknosfera, 2011. 800 p. (In Russian)
- 12. Veiko V.P., Libenson M.N., Chervyakov G.G., Yakovlev E.B. Interaction of laser radiation with matter. Moscow: Fizmatlit, 2008. 312 p. (In Russian)
- Terekhov V.A., Man'ko A.N., Bormontov E.N., Levchenko V.N., Trebunskikh S. Yu., Tutov E.A., Domashevskaya E.P. Influence of ultrashort pulses of electromagnetic radiation on parameters of metal-insulator-semiconductor structures // Semiconductors. 2004. V. 38. P. 1390–1393. https://doi. org/10.1134/1.1836058
- Nikiforov A.Y., Skorobogatov P.K., Egorov A.N., Gromov D.V. Selection of optimal parameters of laser radiation for simulating ionization effects in silicon bulk-technology microcircuits // Russ. Microelectron. 2014. V. 43. P. 133–138. https://doi.org/10.1134/ S1063739714020073
- Skorobogatov P.K., Nikiforov A.Y., Egorov A.N. Optimization of laser irradiation parameters for simulation of a transient radiation response in thin-film silicon-based microcircuits // Russ Microelectron. 2015. V. 44. P. 8–21. https://doi.org/10.1134/ S1063739715010084
- 16. *Denisenko V.V.* Compact models of MOS transistors for SPICE in micro- and nanoelectronics. Moscow: Fizmatlit, 2010. 408 p. (In Russian)

- Krasnikov G.Ya., Gornev E.S., Ignatov P.V., Mizginov D.S. Analysis of gate dielectric breakdown models // Electronic technology. Series 3: Microelectronics. 2018. No. 2(170). P. 5–7. (In Russian)
- Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides // Materials Today. 2008. V. 11. No. 6. P. 28—36. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70119-6
- Gorshkov O.N., Shengurov V.G., Denisov S.A., Chalkov V.Yu., Antonov I.N., Kruglov A.V., Shenina M.E., Kotomina V.E., Filatov D.O., Serov D.A. Resistive switching in memristors based on Ag/Ge/Si heterostructures // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. No. 1. P. 91–93. https://doi.org/10.1134/S106378502001023X
- Permyakova O.O., Rogozhin A.E. Simulation of resistive switching in memristor structures based on transition metal oxides // Russ. Microelectron. 2020. V. 49. No. 5. P. 303–313.
- Demikhovsky V.Ya., Vugalter G.A. Physics of quantum low-dimensional structures. Moscow: Logos, 2000. 246 p. (In Russian)
- Vul' A. Ya., Dideikin A.T. Photodetectors based on metal-tunnel insulator-semiconductor structures // Sensors and Actuators A: Physical. 1993. V. 39. No. 1. P. 7–18. https://doi. org/10.1016/0924-4247(93)80175-G
- Vexler M.I., Tyaginov S.E., Shulekin A.F., Grekhov I.V. Current-voltage characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MOS tunnel diodes with a spatially nonuniform oxide thickness // Semiconductors. 2006. V. 40. P. 1109–1115. https://doi.org/10.1134/S1063782606090223
- Belorusov D.A., Goldman E.I., Chucheva G.V. Franz-Keldysh effect in silicon—ultrafine (3.7 nm) oxide-polysilicon structures // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. V. 68. No. 9. P. 1002–1005. https://doi.org/10.1134/ S1064226923090036
- Pirogov Yu.A., Solodov A.V. Damage to integrated circuits in radio-frequency fields // Radio electronics journal. 2013. No. 6. P. 1–38. (In Russian)