

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
НТК «Институт монокристаллов» НАНУ  
E-mail: detector@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
08.04 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ДАТЧИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

*Определены требования к конструкции и технологии изготовления p- и n-канальных МОП-транзисторов с толстым слоем оксида, предназначенных для применения в качестве интегральных дозиметров поглощенной дозы ионизирующего излучения.*

Изменению свойств структур «металл—оксид—полупроводник» (МОП) и транзисторов на их основе под воздействием ионизирующего излучения посвящено большое количество научных работ и обзоров, например [1—13].

Описанный в этих работах сдвиг напряжения  $\Delta V_{FB}$  плоских зон МОП-конденсатора и сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_T$  МОП-транзистора при радиационном облучении обусловлены встраиванием положительного заряда в оксид МОП-структуры за счет рождения электронно-дырочных пар в  $\text{SiO}_2$  при поглощении энергии излучения и дальнейшего движения дырок и захвата их ловушками в оксиде вблизи поверхности раздела Si— $\text{SiO}_2$ . Для генерации одной электронно-дырочной пары в объеме  $\text{SiO}_2$  требуется около 18 эВ. Во время облучения происходит также генерация поверхностных состояний на границе раздела Si— $\text{SiO}_2$  [5, 6].

Таким образом, наиболее чувствительной к радиации частью МОП-структуры является оксидный диэлектрик  $\text{SiO}_2$ .

Было показано, что зависимость сдвига порогового напряжения  $\Delta V_T$  от толщины  $t_{ox}$  оксида является степенной функцией типа  $t_{ox}^n$ , где  $n$  может иметь значения  $1 < n < 2$  [7],  $n=2$  [8],  $n=3$  [9], что определяется способом выращивания оксида и технологией изготовления МОП-структуры [10, 11]. Поскольку слой полевого оксида в пассивных областях МОП интегральных схем существенно толще, чем подзатворный оксид в стандартном транзисторе, в полевом оксиде эффект встраивания положительного заряда проявляется гораздо сильнее [12].

Наиболее распространенное представление о механизме встраивания положительного заряда в ок-

сид связано с захватом дырок ловушками в оксиде. Этот механизм исследуется много лет большим числом исследователей, предложен ряд моделей, описывающих его [13—24]. Считается, что глубокие ловушки для дырок вблизи поверхности раздела Si— $\text{SiO}_2$  возникают вследствие существования переходной области, где окисление еще не завершено и где содержатся избыточные атомы кремния (или вакансии кислорода, так называемые  $E'$ -центры) [14, 25], что приводит к возникновению «трехвалентного кремния» [26, 27], создающего напряженные связи Si—Si. Когда положительно заряженная дырка захватывается такой ловушкой, в трехвалентных кремниевых дефектах связь Si—Si обрывается, решетка релаксирует [14, 25], а дырка становится относительно стабильной.

Большинство исследователей склоняются к моделям напряженных связей и трехвалентных кремниевых дефектов на границе раздела Si— $\text{SiO}_2$  [1—4, 14—27]. В работах [28, 29], где изучались необлученные и облученные МОП-структуры, с помощью электронного спинового резонанса (ЭСР) были идентифицированы центры резонанса  $P_b$  как трехвалентные дефекты кремния на границе раздела Si— $\text{SiO}_2$ , а их плотность коррелировала с плотностью поверхностных состояний при термообработке. Авторами [28, 29] было показано в эксперименте прямого измерения ЭСР, что облучение увеличивает концентрацию трехвалентного кремния на границе раздела Si— $\text{SiO}_2$  и что эти дефекты ответственны за встраивание радиационно-индуцированных состояний.

Здесь опущены подробности механизма захвата дырок ловушками и встраивания положительного заряда в оксиде, которые до сих пор являются предметом дискуссий и исследований [2—4].

Большое влияние на сдвиг напряжения  $V_{FB}$  плоских зон МОП-структуры и порогового напряжения МОП-транзистора  $V_T$  оказывает процесс рекомбинации электронно-дырочных пар в оксиде, рожденных излучением [13, 30]. При приложении положительного напряжения на затвор МОП-структуры в оксиде появляется электрическое поле, вследствие чего рекомбинация только что возникших электронно-дырочных пар уменьшается благодаря растягивающему действию поля и выход дырок увеличивается, что приводит к увеличению встроеного в слой оксида положительного заряда, повышению чувствительности к облучению и повышению линейности отклика на него МОП-структуры.

Автор выражает благодарность за плодотворное сотрудничество профессору А. Б. Розенфельду и его коллегам из Центра медицинской радиационной физики Университета Воллонгонга (Австралия).

Проведены также исследования влияния энергии ионизирующего излучения и частиц на электронно-дырочную рекомбинацию в оксиде [2, 3, 30—35]. Было показано, что воздействие низкоэнергетического рентгеновского излучения (единицы и десятки кэВ) дает более сильный эффект встраивания положительного заряда, чем воздействие высокоэнергетического излучения (сотни и тысячи кэВ). При этом для достижения максимального сдвига  $V_{FB}$  при низких значениях энергии [32] выбирался достаточно толстый оксид (0,5 мкм).

При исследованиях был обнаружен эффект усиления дозы в МОП структуре. Материалы Al и Si имеют более высокие коэффициенты поглощения энергии излучения и, соответственно, большую плотность образованного в этих материалах заряда по сравнению с SiO<sub>2</sub>. Поэтому в слой SiO<sub>2</sub> происходит инжекция заряда из прилегающих к нему затвора (Al) и подложки (Si), за счет чего в SiO<sub>2</sub> добавляется заряд дополнительно к тому, который образовался при поглощении энергии оксидом. Эффект проявляется сильнее в тонком слое SiO<sub>2</sub> [4, 10, 11, 33, 36]. Поскольку доза определяется по величине заряда в SiO<sub>2</sub>, то из-за инжекции измеряемое значение дозы оказывается завышенным.

Подробное описание упомянутых явлений и моделей можно найти в обзорах [1—4]. Как видим, эффект накопления положительного заряда в слое оксида МОП-транзистора вблизи границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> при воздействии ионизирующего излучения различного вида исследуется длительное время и не случайно, что он был широко применен для создания датчиков интегральной поглощенной дозы (в частности, дозы гамма-излучения), которые используются в различных областях — в радиотерапии, для дозиметрии космических излучений, пучков в физике высоких энергий, в аварийных дозиметрах и др.

Использование МОП-транзисторов с пленкой подзатворного диэлектрика SiO<sub>2</sub> в качестве датчиков накопленной дозы ионизирующего излучения описано в [37—55].

Накопление положительного заряда в оксиде приводит к сдвигу порогового напряжения  $V_T$  МОП-транзистора, при этом величина сдвига  $\Delta V_T$  характеризуется интегральной дозой поглощенного ионизирующего излучения. Измерение  $\Delta V_T$  проводится путем измерения величины  $V_T$  до и после облучения транзистора. Величина накопленного в слое оксида заряда  $Q_{ox}$  зависит от толщины этого слоя [7—9], а также от параметров электрического поля в оксиде, определяемых внешним напряжением на затворе транзистора и встроенным потенциалом МОП-структуры. Еще одним фактором, влияющим на чувствительность МОП-структуры к ионизирующему излучению, является концентрация ловушек для дырок вблизи границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> и их пространственное и энергетическое распределение. Недостаточно высокая концентрация ловушек в оксиде может быть фактором, ограничивающим накопление заряда в оксиде при облучении. Для получения максимальной чувствительности к воздействию ионизирующего излучения МОП-транзистор должен иметь достаточно толстый слой подзатворного оксида (как правило, больше 0,5 мкм). Чув-

ствительность также повышается в активном режиме, т. е. когда к затвору транзистора приложено положительное напряжение. В пассивном режиме чувствительность к облучению ниже, но имеется возможность использовать МОП-транзистор как датчик-дозиметр ионизирующего излучения без каких-либо источников питания.

Из приведенного обзора следует, что картина изменения свойств МОП-структур при облучении многообразна и неоднозначна, что обусловлено сильной зависимостью состояния поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub> и характера распределения ловушек в оксиде от технологии изготовления структур. Поэтому при разработке технологии изготовления МОП-приборов для использования в целях дозиметрии ионизирующего излучения, в том числе для дозиметрии в медицине, необходимо решить ряд проблем, которые связаны с обеспечением стабильности и воспроизводимости параметров МОП-приборов. Решение этой сложной задачи для толстых (0,5—1,0 мкм) слоев оксида представлено в данной работе. Требование к воспроизводимости параметров относится к воспроизводимости встраиваемого в слой оксида заряда во всех транзисторах, изготовленных на пластинах из одной партии или даже из разных, при одинаковых условиях облучения, т. е. речь идет о воспроизводимости чувствительности и надежности процесса калибровки приборов.

Известно, что наличие корпуса, материалы и способ корпусировки существенно влияют на результаты измерения дозы, искажая их за счет вторичного излучения [56]. Поэтому была поставлена задача разработать МОП-прибор без корпуса и без применения традиционных защитных компаундов, т. е. практически без герметизации. В таком приборе значительно повышаются требования к стабильности порогового напряжения, форме ВАХ и др. при воздействии атмосферной влаги, биологических и химических веществ.

Кроме дозиметрии гамма- и рентгеновского излучения, МОП-транзисторы успешно применяются также для дозиметрии электронов [23], протонов [35, 44], вакуумного ультрафиолета [6], космического излучения [38] и др.

#### Технология и характеристики интегральных дозиметров на основе p-канальных МОП-транзисторов

Обеспечение воспроизводимости и стабильности параметров МОП-транзисторов, предназначенных для дозиметрии в медицине, достигалось с помощью специальных технологических и конструктивных мер.

Технология производства таких МОП-дозиметров требует применения особых режимов выращивания толстого слоя подзатворного оксида для обеспечения его чистоты, однородности и стабильности, а также режимов термообработки после выращивания SiO<sub>2</sub> (отжига в газовых средах) для создания необходимой плотности и спектра распределения ловушек в оксиде и минимальной плотности их на поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

При разработке технологии МОП-транзисторов были учтены следующие особенности и требования.

— В одном технологическом цикле на кремниевом кристалле формируются транзисторы двух ти-

пов — с толстым (0,5—1,0 мкм) и относительно тонким (0,1—0,15 мкм) слоем подзатворного оксида.

— Для получения толстой однородной пленки стабильного оксида используется комбинация режимов окисления (сухое, влажное, сухое).

— Операции очистки и защиты от загрязнений (продувка кварцевой трубы установки окисления парами Cl, использование HCl при окислении кремния, пироженное окисление, нанесение тонкой пленки фосфоросиликатного стекла (ФСС) на поверхность подзатворного оксида) позволяют получить чистую пленку SiO<sub>2</sub>, обладающую высокой стабильностью.

— Все операции легирования проводятся с помощью ионной имплантации примеси для минимизации содержания посторонних (загрязняющих) примесей и повышения пробивного напряжения исток-стоковых областей, т. к. изменения  $V_T$  могут превышать 10—10<sup>2</sup> В.

— Для создания ловушек для дырок в оксиде вблизи поверхности раздела проводят отжиг тонкого и толстого слоев оксида в атмосфере азота.

— Для регуляции и получения заданного значения порогового напряжения проводят подлегирование бором подзатворных областей каналов транзисторов.

— Контакт к подложке формируют на лицевой стороне пластины, что упрощает сборку прибора и позволяет утоньшать кристаллы путем шлифовки обратной стороны пластины после изготовления приборов.

В разработанной технологии изготовления *p*-МОП транзисторов с толстым слоем SiO<sub>2</sub> можно выделить такие этапы и последовательность операций.

1. Формирование контактов к подложке на лицевой стороне кристалла.

2. Формирование активных областей транзисторов с толстым слоем оксида и подлегирование бором областей каналов.

3. Области, где будут сформированы транзисторы с тонким слоем оксида, защищают нитридом кремния перед выращиванием толстого слоя SiO<sub>2</sub> с применением блока технологии «LOCOS» [57], известной своим свойством планаризовывать поверхность и формировать ненапряженную структуру на переходе «полевой оксид — тонкий оксид» в отличие от травления, которое образует ступеньку.

4. Формирование областей «исток—сток» транзисторов с толстым слоем SiO<sub>2</sub>. Защита этих областей нитридом кремния.

5. Выращивание подзатворного SiO<sub>2</sub> для транзистора с толстым слоем оксида (0,6 мкм).

6. Снятие нитрида кремния и выращивание тонкого подзатворного SiO<sub>2</sub> для транзистора с тонким слоем оксида (0,12 мкм).

7. Стабилизация подзатворного диэлектрика тонким слоем ФСС и нанесение тонкой защитной пленки металла (Me-защита) на поверхности подзатворных оксидов.

8. Формирование контактных окон к областям «исток—сток» транзисторов.

9. Нанесение пленки затворного металла (Al), фотолитография по металлу и вжигание Al.

10. Пассивация поверхности приборов слоем низкотемпературного фосфоросиликатного стекла толщиной 0,9 мкм.

11. Шлифовка обратной стороны пластины (для улучшения угловой зависимости чувствительности МОП-дозиметров относительно положения источника излучения).

12. Изготовление варианта МОП-транзистора с поликремниевым затворным электродом.

Технология одновременного получения *p*-МОП-транзисторов двух типов — с подзатворным оксидом разной толщины — имеет такие особенности.

— Поскольку процесс формирования толстого слоя подзатворного оксида и процессы поглощения бора оксидом (точнее, движущейся вглубь кремния границей роста оксида) и его перераспределения (диффузии) длительны, расчет дозы подлегирования бором канала под толстым оксидом (которая достаточно мала) проводили очень тщательно. При этом учитывалась зависимость коэффициента диффузии бора от его дозы, а также то, что величина дозы должна быть достаточной, чтобы обеспечить опережающую диффузию бора по сравнению с движением границы роста оксида.

— Для ускорения роста толстого слоя подзатворного оксида и достижения низкого значения встроенного положительного заряда и высокой стабильности характеристик оксида он выращивался при температуре 1100°C сначала в атмосфере сухого кислорода (40 мин), затем отжигался в атмосфере сухого азота (20 мин), после чего процесс окисления продолжался во влажном кислороде и завершался в сухом кислороде (20 мин).

— С целью повышения стабильности оксида проводился процесс осаждения на подзатворный SiO<sub>2</sub> тонкого слоя фосфоросиликатного стекла.

— Проводилось двойное вжигание пленки Al при температуре 450°C в атмосфере азота — до нанесения слоя низкотемпературного ФСС и после защиты-пассивации стеклом.

— Для формирования контактов к подложке *n*-типа оптимальным является ионное легирование фосфором областей контактов в самом начале маршрута.

По описанной технологии на стандартных пластинах кремния *n*-типа (КЭФ-4,5) с ориентацией <100> и диаметром 100 мм были одновременно изготовлены *p*-канальные МОП-транзисторы с толстым (0,6 мкм) и относительно тонким (0,12 мкм) слоями подзатворного оксида (рис. 1). Фотографии готовых изделий представлены на рис. 2.

Проводилась также ионная имплантация примеси бора в области канала МОП-транзистора с толстым слоем оксида с целью подгонки (понижения) величины его порогового напряжения. Известно, что пороговое напряжение МОП-транзистора  $V_T$  соответствующее условию сильной инверсии, равно [58, с. 77, 197, 203]:

$$V_T = \Phi_{MS} + \Phi_B - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} - \frac{Q_B}{C_{ox}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{MS}$  — разность работ выхода электрона из металла и кремния;  
 $\Phi_B$  — потенциал, соответствующий сильной инверсии, т. е. изгибу зон, равному двум уровням Ферми ( $\Phi_B = -2\Phi_F$ );

$Q_{ox}$  — заряд слоя оксида;

$C_{ox}$  — емкость слоя оксида.



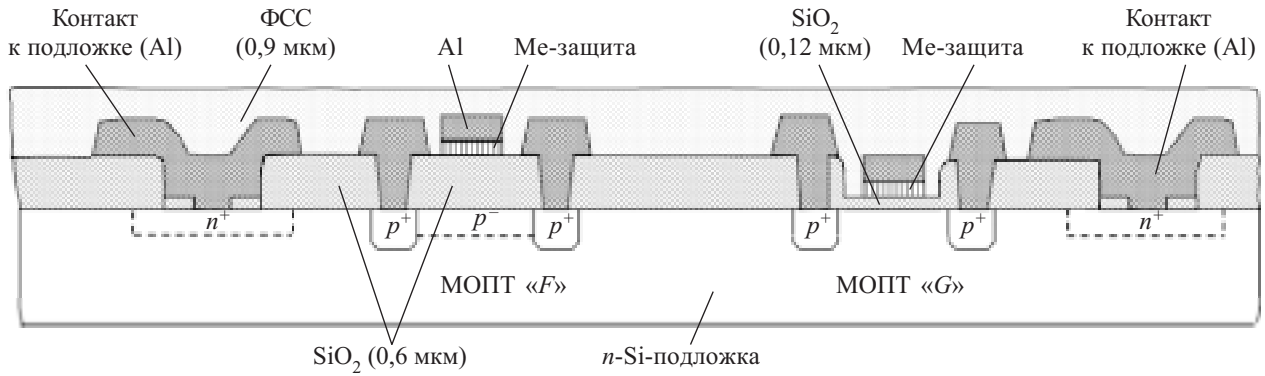


Рис. 1. Схема *p*-канальных МОП-транзисторов с толстым слоем оксида (МОПТ «F») и с тонким слоем (МОПТ «G»), сформированных на *n*-Si-подложке

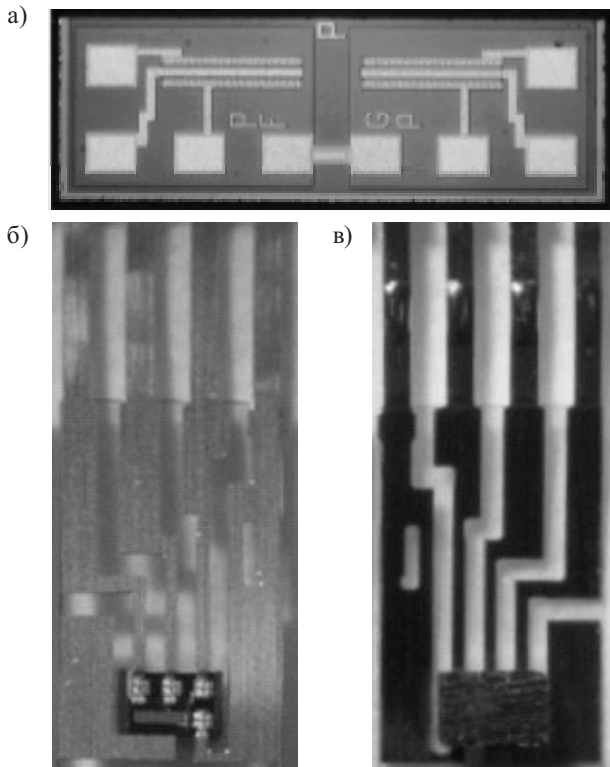


Рис. 2. Фото кристалла с прямыми *p*-канальными транзисторами «F» и «G» (а) и фото кристалла в сборке на гибком носителе (б — лицевая сторона, в — обратная сторона)

$$Q_B = (2\epsilon_S q N_D [-V - \Phi_B])^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_S$  — диэлектрическая постоянная кремния;  
 $q$  — заряд электрона;  
 $N_D$  — концентрация донорной примеси в кремнии;  
 $V$  — напряжение на *p-n*-переходе «канал—подложка».

Член  $Q_B/C_{ox}$  в выражении (1) характеризует вклад легирующих примесей в величину порогового напряжения  $V_T$ . Доза ионного легирования подзатворных областей рассчитывалась с учетом уравнения (1), а также подбиралась экспериментально из диапазона 0,1—1,0 мкКл/см<sup>2</sup>.

Значения порогового напряжения *p*-канальных МОП-транзисторов с толстым слоем оксида без под-

легирувания канала составляли  $-(4,5-5,0)$  В (измерения проводились при фиксированном токе 100 мкА), а у транзисторов с подлегированным каналом эти значения уменьшались до величины, близкой к  $-1,0$  В. Аналогичные транзисторы с тонким слоем оксида без подлегирования канала имели пороговые напряжения вблизи  $-2,0$  В. Величина разброса значений порогового напряжения транзисторов не превышала 5—7%.

Конструктивно транзисторы выполнены в виде прямого канала длиной 20 мкм и шириной 400 мкм. Размеры кристаллов транзисторов — 0,57×1,6 мм. Они были собраны по технологии гибких носителей «алюминий—полиимид» [59]. Транзистор, собранный на гибком носителе с толщиной слоя алюминия 20 мкм и слоя полиимида 30 мкм, показан на рис. 2, б, в. Такие транзисторы предназначены для клинической дозиметрии при контроле локальных доз облучения в онкологии и для других применений.

Проверка стабильности величины порогового напряжения *p*-канальных МОП-транзисторов, которая проводилась при комнатной температуре после выдержки приборов при температуре +85°С, показала отсутствие дрейфа порогового напряжения при воздействии в течение двух часов напряжения  $\pm 30$  В на затворе относительно истока и подложки для транзисторов как с тонким (0,12 мкм), так и с толстым (0,6 мкм) слоем оксида. При этом изменения порогового напряжения транзисторов не превышали  $\pm 1\%$ . Аналогичные результаты получены для *p*-канальных транзисторов с поликремниевым затвором.

Радиационная чувствительность к гамма-излучению *p*-канальных транзисторов с толстым подзатворным оксидом определялась с помощью их облучения на различных медицинских гамма-установках. При разных параметрах гамма-источников (энергии, мощности и др.) чувствительность имела разные значения и в пассивном режиме составляла около 1—3 мВ/рад. Например, при калибровке *p*-МОП-дозиметра с использованием гамма- и рентгеновского излучения с энергией 6 МэВ от линейного ускорителя «Varian 2100EX» чувствительность дозиметра (сдвиг  $V_T$ ) составляла  $207 \pm 3$  мВ/Гр, что соответствует  $2,07$  мВ/рад  $\pm 1,5\%$  [60]. При калибровке другим источником (<sup>192</sup>Ir) чувствительность *p*-МОП дозиметра составляла  $216 \pm 7$  мВ/Гр, что соответствует

2,16 мВ/рад  $\pm 3,2\%$  [60]. Зависимость изменения порогового напряжения  $p$ -МОП-транзисторов ( $\Delta V_T$ ) от величины дозы гамма-облучения близка к линейной в диапазоне доз 0—1000 рад. В случае приложения положительного напряжения при облучении (в активном режиме) чувствительность  $p$ -МОП-дозиметра возрастала до 40—50 мВ/рад.

**Особенности технологии и конструкции дозиметров на  $n$ -канальных МОП-транзисторах**

При использовании для  $n$ -канального транзистора кремниевой подложки с  $p$ -типом проводимости возникает ряд отличий в технологии и конструкции этих приборов по сравнению с  $p$ -канальными транзисторами. Во-первых, использование фосфора вместо бора при формировании истоков-стоков требует изменения режимов ионной имплантации и разгонки примеси из-за существенного отличия в коэффициенте диффузии, а перераспределение акцепторной примеси бора из подложки в оксид при проведении термического окисления требует учета этого эффекта при выборе исходной легированной подложки. Во-вторых, особенностью  $n$ -канальных транзисторов является появление инверсионного слоя неосновных носителей при увеличении обедняющего (положитель-

ного) потенциала на поверхности кремния. В процессе окисления поверхности подложки кремния  $p$ -типа происходит встраивание фиксированного положительного заряда в полевом оксиде на поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub> и его дальнейшее увеличение при облучении. Это эквивалентно увеличению положительного потенциала на поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub>, которое приводит к возникновению инверсионного слоя вокруг транзистора и, в конечном счете, к короткому замыканию истока со стоком через инверсионный слой и потере возможности контроля тока истока-стока при изменении затворного напряжения. Одним из вариантов предотвращения такого замыкания цепи истока-стока при инвертировании поверхности в  $n$ -канальном транзисторе является использование замкнутого транзистора, у которого затвор окружен стоком и истоком со всех сторон так, что он не соприкасается с инвертированной поверхностью снаружи транзистора в пассивных областях. Были использованы варианты конструкции транзисторов с затвором в виде прямоугольной замкнутой шины и с затвором в виде кольца (рис. 3, 4).

С учетом описанных особенностей  $n$ -канальных МОП-транзисторов была разработана также технология и конструкция дозиметра на основе  $n$ -канальных МОП-транзисторов с толстым слоем оксида, которая имеет некоторые отличия от описанной выше технологии  $p$ -канальных МОП-транзисторов. Эти отличия связаны с тем, что после изготовления  $n$ -МОП-транзистор имеет положительное значение порогового напряжения, которое при облучении уменьшается до нуля, а при дальнейшем увеличении дозы сдвигается в область отрицательных значений с переходом через нулевое значение. Это представляет неудобство при использовании таких транзисторов в измерительных системах. Например, при чувствительности транзистора к ионизирующему излучению в пассивном режиме, равной 1—1,5 мВ/рад, для перекрытия диапа-

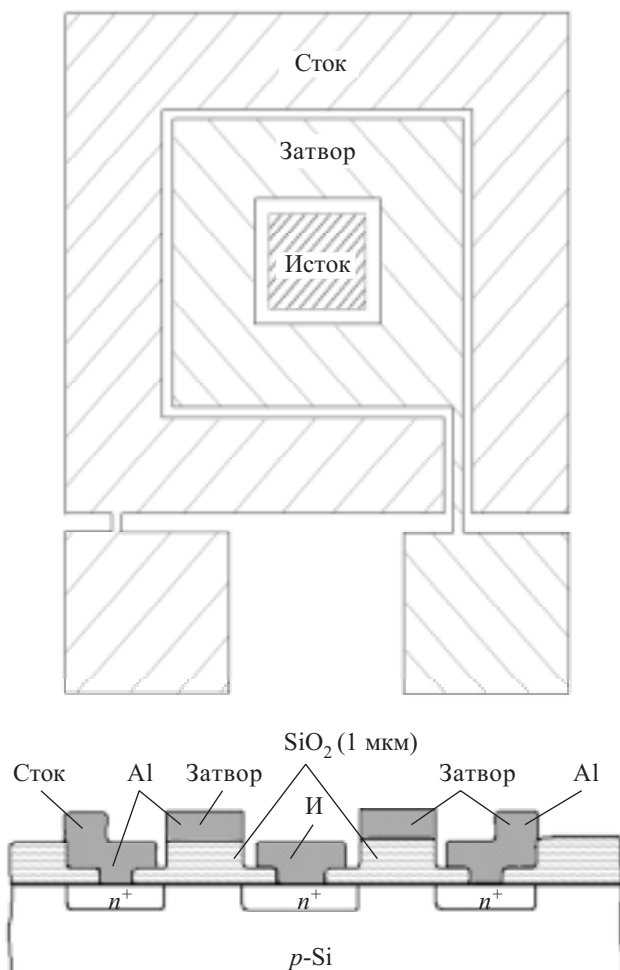


Рис. 3. Схема замкнутого  $n$ -канального транзистора с толстым слоем оксида

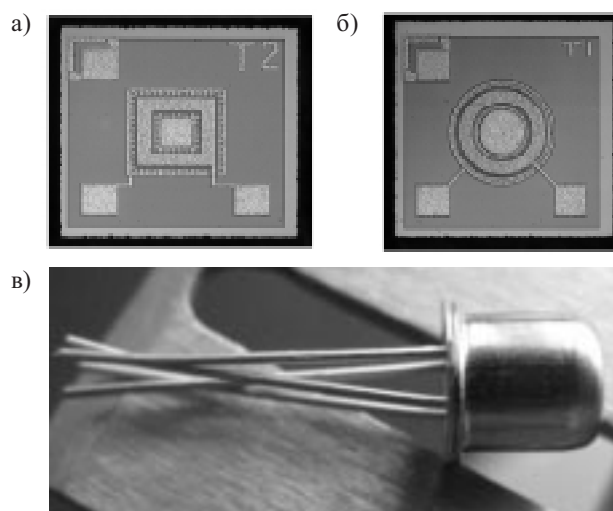


Рис. 4. Фотографии кристаллов  $n$ -канальных транзисторов с затвором в виде прямоугольной замкнутой шины (а) и в виде кольца (б) и транзистор в корпусе типа КТ-1 (в). Толщина подзатворного оксида  $t_{ox}=1,0$  мкм, размер кристалла 1×1 мм

зона доз 5000 рад необходимо иметь транзисторы с пороговым напряжением  $V_T$  не менее 5—8 В, в то время как транзистор с оксидом толщиной 1 мкм, изготовленный на стандартной подложке КДБ-10, имеет значение  $V_T \approx 3—5$  В. Поэтому для обеспечения достаточно высокого положительного порогового напряжения и, соответственно, более широкого диапазона изменения положительных значений  $V_T$  было разработано два варианта транзисторов. В первом варианте (группа А на рис. 5) применяли ионное легирование области канала транзистора, изготовленного на подложке КДБ-10, для соответствующего сдвига порогового напряжения транзистора в сторону увеличения его положительного значения, например до 8—10 В, а во втором варианте (группа Б на рис. 5) для повышения порогового напряжения применялась специальная подложка *p*-типа с повышенной концентрацией акцепторной примеси.

По разработанной технологии были изготовлены *n*-канальные МОП-транзисторы с толстым слоем оксида ( $t_{ox}=1,0$  мкм) на стандартных пластинах кремния *p*-типа (КДБ-10) диаметром 100 мм (рис. 4, а). Результаты измерения значений порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов при фиксированном значении тока (100 мкА) представлены на рис. 5. Разброс значений порогового напряжения для партии транзисторов первого варианта (группа А) составляет около 8%, а для партии транзисторов второго варианта (группа Б) — около 3%. Сборка кристаллов транзисторов размером 1×1 мм проводилась в корпусе типа КТ-1 (см. рис. 4, в).

Проводились измерения стабильности порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов с  $t_{ox}=1,0$  мкм при комнатной температуре после их выдержки по описанной выше методике (+85°C, ±30 В). Как и в случае *p*-канального транзистора, они показали отсутствие дрейфа  $V_T$ , а нестабильность величины порогового напряжения составила менее ±1%.

Большое влияние на пороговое напряжение и, соответственно, на точность измерения дозы оказывает температура. Исследования показали, что при нуле-

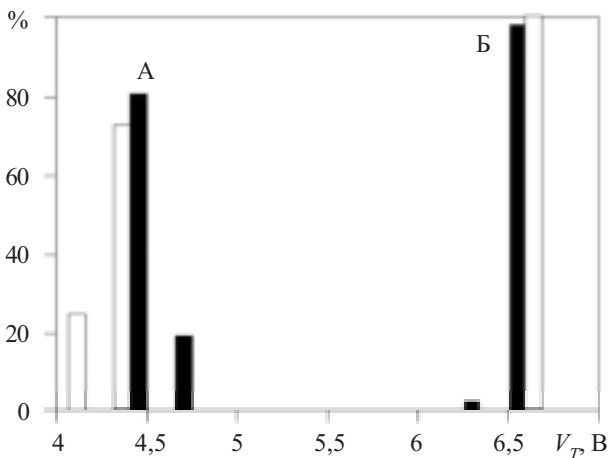


Рис. 5. Гистограммы распределения значений порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов для замкнутых кольцевых (■) и прямоугольных (▨) транзисторов;  $t_{ox}=1,0$  мкм

вом напряжении смещения подложки температурный дрейф  $V_T$  может составлять 5—8 мВ/°С в диапазоне температуры 20—50°C. Поэтому для уменьшения погрешности при измерении накопленной дозы, особенно малых ее значений, необходимо знать температурную зависимость  $V_T$  и контролировать температуру.

**Радиационные характеристики *n*-канальных МОП-транзисторов с толстым подзатворным оксидом**

Для определения чувствительности *n*-канальных МОП-транзисторов с толстым слоем подзатворного оксида проводились радиационные испытания на гамма- и рентгеновских источниках. Результаты испытаний на кобальтовой пушке «Агат-Р1» (медицинское оборудование, источник гамма-излучения — изотоп  $^{60}\text{Co}$ , энергия — 1,25 МэВ, мощность дозы — около 3 рад/с) в пассивном режиме в диапазоне доз от 0 до 5000 рад приведены на рис. 6 и 7. Доза облучения определялась по времени облучения для калиброванной мощности излучения (точность измерения дозы гамма-излучения — не хуже 15%).

На рис. 6 видно, что все приведенные зависимости  $V_T$  от дозы облучения достаточно близки к линейным в диапазоне доз 0—1000 рад. Это более наглядно показано на рис. 7, где приведены результаты зависимости относительной величины сдвига порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов  $\Delta V_T$  от дозы гамма-излучения в диапазоне доз от 0 до 1000 рад.

На рис. 6 видно также постепенное уменьшение наклона кривых при увеличении дозы облучения от 1000 до 5000 рад, что, вероятно, связано с влиянием поля, создаваемого увеличением положительного заряда дырок, встраивающихся в оксид вблизи поверхности раздела Si–SiO<sub>2</sub> во время облучения, а так-

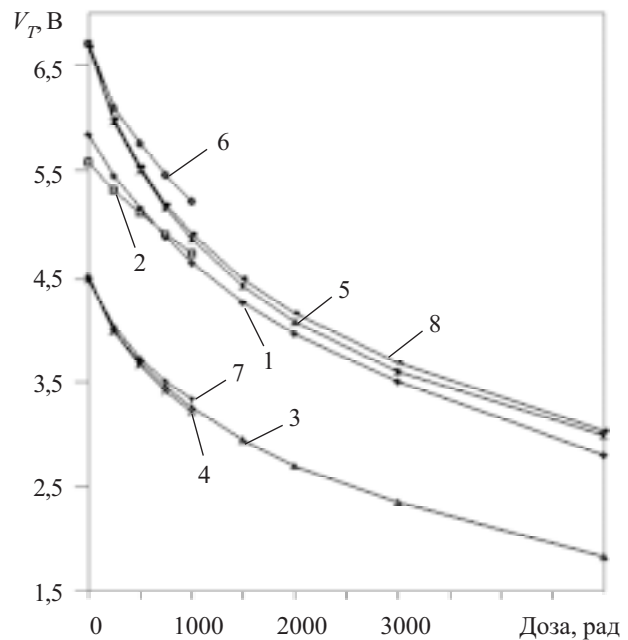


Рис. 6. Зависимость порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов от дозы гамма-излучения для образцов, изготовленных на пластинах КДБ-12 (1, 2, 5, 6, 8) и на пластинах КДБ-3 (3, 4, 7)

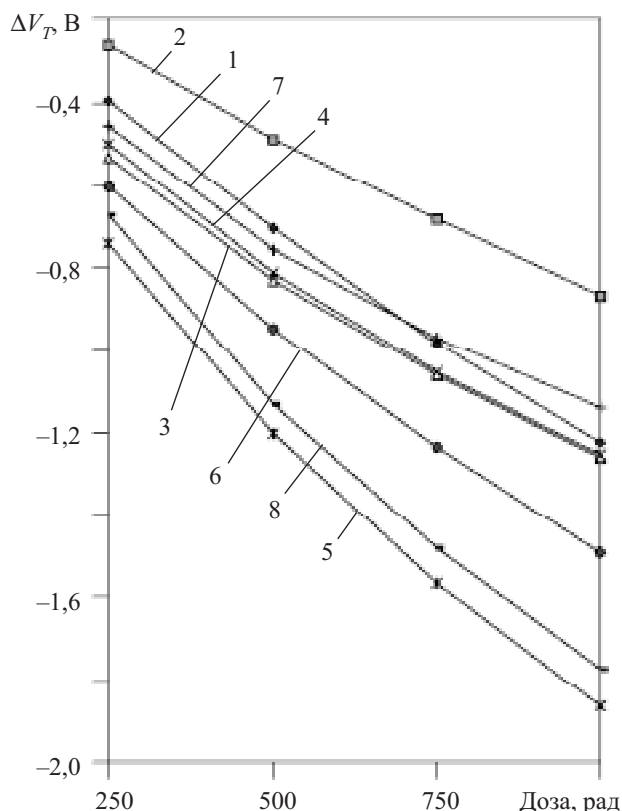


Рис. 7. Зависимость величины сдвига порогового напряжения  $n$ -канальных МОП-транзисторов  $\Delta V_T$  для тех же образцов, что и на рис. 6, от дозы гамма-излучения

же с уменьшением количества свободных ловушек в оксиде из-за постепенного их заполнения дырками при облучении.

Чувствительность изготовленных  $n$ -канальных МОП-транзисторов к гамма-излучению (сдвиг порогового напряжения на единицу дозы) при их использовании в качестве датчиков интегральной дозы (гамма-дозиметров) составляла 1—4 мВ/рад в диапазоне доз 0—250 рад и постепенно уменьшалась при увеличении дозы облучения и составляла 0,8—1,8 мВ/рад в диапазоне доз 250—1000 рад. Максимальная их чувствительность в пассивном режиме составляла 3—4 мВ/рад в диапазоне доз 0—250 рад, что превышает чувствительность аналогичных образцов  $n$ -канальных МОП-транзисторов, изготовленных ранее [44]. Участок зависимости, наиболее близкий к линейному, наблюдается в диапазоне доз 250—1000 рад.

Аналогично ведут себя характеристики  $p$ -канальных и  $n$ -канальных МОП-транзисторов при облучении другими видами ионизирующего излучения, например рентгеновским [61]. При этом радиационная чувствительность МОП-транзисторов имеет другие значения.

### Выводы

Проведенный анализ влияния различных конструктивно-технологических факторов на стабильность, воспроизводимость параметров и чувствительность отклика МОП-транзисторов на воздействие различного ионизирующего излучения позволил определить требования к технологии и конструкции  $p$ -канальных

и  $n$ -канальных МОП-транзисторов с толстым слоем оксида, предназначенных для применения в качестве интегральных дозиметров поглощенной дозы ионизирующего излучения. Для расширения диапазона измеряемых доз разработан вариант технологии формирования в одном технологическом цикле транзисторов двух типов с разной толщиной слоя подзатворного оксида, имеющих разную чувствительность к ионизирующему излучению.

Изготовлены МОП-дозиметры как в варианте  $p$ -канальных, так и  $n$ -канальных приборов, обладающие устойчивыми характеристиками.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ma T. P., Dressendorfer P. V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits.— New York: Wiley Interscience, 1989.
2. Oldham T. R. Ionizing radiation effects in MOS oxides / In book: Advances in solid state electronics and technology (ASSET) series.— Singapore: World Scientific, 1999.
3. Hughes H. L., Benedetto J. M. Radiation effects and hardening of MOS technology devices and circuits // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2003.— Vol. 50, N 3.— P. 500—521.
4. Oldham T. R., McLean F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2003.— Vol. 50, N 3.— P. 483—499.
5. Zaininger K. H. Irradiation of MIS capacitors with high-energy electrons // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1966.— Vol. NS-13, N 6.— P. 237—247.
6. Powell R. J., Derbenwick G. F. Vacuum ultraviolet radiation effects in SiO<sub>2</sub> // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1971.— Vol. NS-18, N 6.— P. 99—105.
7. Adams J. R., Daves W. R., Sanders T. J. A radiation hardened field oxide // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1977.— Vol. NS-24, N 6.— P. 2099—2101.
8. Derbenwick G. F., Gregory B. L. Process optimization of radiation-hardened CMOS integrated circuits // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1975.— Vol. NS-22.— P. 2151—2156.
9. Hughes G. W., Powell R. J. MOS hardness characterization and its dependence upon some process and measurement variables // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1976.— Vol. NS-23.— P. 1569—1572.
10. Saks N. S., Ancona M. G., Modolo J. A. Radiation effects in MOS capacitors with very thin oxides at 80 K // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1984.— Vol. NS-31.— P. 1249—1255.
11. Benedetto J. M., Boesch H. E., McLean F. B. Mize G. P. Hole removal in thin gate MOSFET's by tunneling // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1985.— Vol. NS-32.— P. 3916—3920.
12. Adams J. R., Coppage F. N. Field oxide inversion effects in irradiated CMOS devices // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1976.— Vol. NS-23, N 6.— P. 1604—1609.
13. Hu G. J., Aitken J. M., Dennard R. H. A hardened field insulator // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1981.— Vol. NS-28, N 6.— P. 4102—4104.
14. Ngai K. L., White C. T. A model of interface states and charges at Si-SiO<sub>2</sub> interface: its predictions and comparison with experiments // J. Appl. Phys.— 1981.— Vol. 52.— P. 320—337.
15. Laughlin R. B., Joannopoulos J. O., Chadi D. J. Theory of the electronic structure of the Si-SiO<sub>2</sub> interface // Phys. Rev.— 1980.— B21.— P. 5733—5744.
16. McLean F. B. A framework for understanding radiation-induced interface states in SiO<sub>2</sub> MOS structures // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1980.— Vol. NS-27, N 6.— P. 1651—1657.
17. Revesz A. G. Defect structure and irradiation behavior of noncrystalline SiO<sub>2</sub> // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1971.— Vol. NS-18.— P. 113—116.
18. Svensson C. M. The physics of SiO<sub>2</sub> and its interfaces / Ed. by S. T. Pantelides.— New York: Pergamon Press, 1978.— P. 328.



19. Sah S. T. Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1976.— Vol. NS-23, N 6.— P. 1563—1568.
20. Deal B. E. The current understanding of charges in the thermally oxidized silicon structure // *J. Electrochem. Soc.*— 1974.— Vol. 121.— P. 198—205.
21. Sakurai T., Sugano T. Theory of continuously distributed trap states at Si-SiO<sub>2</sub> interfaces // *J. Appl. Phys.*— 1981.— Vol. 52.— P. 2889—2896.
22. Revesz A. G. Chemical and structural aspects of the irradiation behavior of SiO<sub>2</sub> films on silicon // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1977.— Vol. NS-24.— P. 2102—2107.
23. Pepper M. Low energy electron irradiation of the Si-SiO<sub>2</sub> interface // *Thin Solid Films.*— 1972.— Vol. 14.— S7—S10.
24. McCarrity J. M., Winokur P. S., Boesch H. E., McLean F. B. The physics of SiO<sub>2</sub> and its interfaces / Ed. by S. T. Pantelides.— New York: Pergamon Press, 1978.— P. 428.
25. Feigl F. J., Fowler W. B., Yip K. L. Oxygen vacancy model for the E<sub>1</sub>' center in SiO<sub>2</sub> // *Solid State Commun.*— 1974.— Vol. 14, N 3.— P. 225—229.
26. Lenahan P. M., Dressendorfer P. V. Hole traps and trivalent silicon centers in metal/oxide/silicon devices // *J. Appl. Phys.*— 1984.— Vol. 55.— P. 3495—3499.
27. Lenahan P. M., Brower K. L., Dressendorfer P. V., Johnson W. C. Radiation-induced trivalent silicon defect buildup at the Si-SiO<sub>2</sub> interface in MOS structures // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1981.— Vol. NS-28.— P. 4105—4106.
28. Caplan P. G., Poindexter E. H., Deal B. E., Razouk R. R. ESR centers, interface states, and oxide fixed charge in thermally oxidized silicon wafers // *J. Appl. Phys.*— 1979.— Vol. 50.— P. 5847—5854.
29. Poindexter E. H., Caplan P. G., Deal B. E., Razouk R. R. Interface states and electron spin resonance centers in thermally oxidized (111) and (100) silicon wafers // *J. Appl. Phys.*— 1981.— Vol. 52.— P. 879—884.
30. Hughes R. C. Charge-carried transport phenomena in amorphous SiO<sub>2</sub>: direct measurements of the drift mobility and lifetime // *Phys. Rev. Lett.*— 1973.— Vol. 30.— P. 1333—1336.
31. Benedetto J. M., Boesch H. E. The relationship between <sup>60</sup>Co and 10 keV X-ray damage in MOS devices // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1986.— Vol. NS-33.— P. 1318—1323.
32. Dozier C. M., Brown D. B. Effect of photon energy on the response of MOS devices // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1981.— Vol. NS-28.— P. 4137—4141.
33. Dozier C. M., Brown D. B. The use of low energy X-Rays for device testing – a comparison with Co<sup>60</sup> radiation // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1983.— Vol. NS-30.— P. 4382—4387.
34. Fleetwood D. M., Winokur P. S., Dozier C. M., Brown D. B. Effect of bias on the response of metal-oxide-semiconductor devices to low energy X-ray and Cobalt-60 irradiation // *Appl. Phys. Lett.*— 1988.— Vol. 52.— P. 1514—1516.
35. Paillet P., Schwank J. R., Shaneyfelt M. R. et al. Comparison of charge yield in MOS devices for different radiation sources // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 2002.— Vol. NS-49.— P. 2656—2661.
36. Boesch H. E., McGarrity G. M. Charge yield and dose effects at 80 K // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1976.— Vol. NS-23.— P. 1520—1525.
37. Holmes-Siedle A. G., Adams L. Dosimetric silica films: the influence of fields on the capture of positive charge // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1982.— Vol. NS-29.— P. 1975—1979.
38. Holmes-Siedle A. G. The space charge dosimeter — general principles of a new method of radiation dosimetry // *Nucl. Instrum. and Methods.*— 1974.— Vol. 121.— P. 169—179.
39. Adams L., Holmes-Siedle A. The development of an MOS dosimetry unit for use in space // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1978.— Vol. NS-25.— P. 1607—1612.
40. Thompson I., Thomas R. E., Berndt L. P. Radiation dosimetry with MOS sensors // *Radiation Protection Dosimetry.*— 1984.— Vol. 6.— P. 121—124.
41. Holmes-Siedle A. G., Adams L. RADFETs: a review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters // *Radiat. Phys. Chem.*— 1986.— Vol. 28, N 2.— P. 235—244.
42. Hughes R. C., Huffman D., Snelling J. V. et al. Miniature radiation dosimeter for in vivo radiation measurements // *Int. J. Radiat. Oncol. Phys.*— 1988.— Vol. 14.— P. 963—967.
43. Ensell C., Holmes-Siedle A., Adams L. Thick oxide p-MOSFET dosimeter for high energy radiation // *Nucl. Instrum. and Methods.*— 1988.— Vol. A269.— P. 655—658.
44. Litovchenko P. G., Barabash L. I., Rozenfeld A. B. et al. MOS structure for emergency gamma and proton dosimetry // *Radiation Protection Dosimetry.*— 1990.— Vol. 33.— P. 179—182.
45. Buehler M. G., Blaes B. R., Soli G. A., Tardio G. R. On-chip p-MOSFET dosimetry // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1993.— Vol. 40.— P. 1442—1449.
46. Soubra M., Cygler J., Mackay G. Evaluation of a dual bias metal oxide-silicon semiconductor field effect transistor detector as radiation dosimeter // *Med. Phys.*— 1994.— Vol. 21.— P. 567—572.
47. Butson M. J., Rosenfeld A. B., Mathur J. N. et al. A new radiotherapy surface dose detector: the MOSFET // *Med. Phys.*— 1996.— Vol. 23.— P. 655—658.
48. Ramani R., Russell S., O'Brien P. Clinical dosimetry using MOSFET's // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*— 1997.— Vol. 37.— P. 959—964.
49. Sarabayrouse G., Siskos S. Radiation dose measurement using MOSFETs // *IEEE Instrum. Meas. Magazine.*— 1998.— Vol. 1 (2).— P. 26—34.
50. Halvorsen P. H. Dosimetric evaluation of a new design MOSFET in vivo dosimeter // *Med. Phys.*— 2005.— Vol. 32.— P. 110—117.
51. Gladstone D. J., Lu X. Q., Humm J. L. et al. A Miniature MOSFET radiation dosimeter probe // *Med. Phys.*— 1994.— Vol. 21.— P. 1721—1728.
52. Rosenfeld A. B. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities // *Radiation Protection Dosimetry.*— 2002.— Vol. 101.— P. 393—398.
53. Asensio L. J., Carvajal M. A., Lopez-Villanueva J. A. et al. Evaluation of low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // *Sensors and Actuators.*— 2006.— Vol. A125.— P. 288—295.
54. Kwan I. S., Rosenfeld A. B., Qi Z. Y. et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors // *Radiation Measurements.*— 2008.— Vol. 43.— P. 929—932.
55. Перевертайло В. Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Тр. 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии».— Одесса.— 2004.— С. 200.
56. Rosenfeld A. B., Carolan M. G., Kaplan G. I. et al. MOSFET dosimeters: the role of encapsulation on dosimetric characteristics in mixed gamma-neutron and megavoltage X-ray fields // *IEEE Trans. on Nuclear Science.*— 1996.— Vol. 42, N. 6.— P. 1870—1877.
57. Зи С. М. Технология СБИС. Часть. 1.— М.: Мир, 1986.
58. Интегральные схемы на МДП приборах / Под ред. А. Н. Кармазинского.— М.: Мир, 1975.
59. Перевертайло В. Л., Жора В. Д., Грунянская В. П. и др. Сборка кремниевых детекторов на гибких носителях типа Al-полиимид // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.*— 2009.— № 1.— С. 40—44.
60. Rosenfeld A. B., Kwan I. S., Wilkinson D. et al. The effect of rectal heterogeneity on wall dose in high dose-rate brachytherapy // *Med. Phys.*— 2009.— Vol. 36.— P. 224—232.
61. Перевертайло В. Л. Метод определения радиационной стойкости интегральных схем с помощью низкоэнергетического рентгеновского излучения // Матер. 16-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики».— Ялта.— 2008.— С. 194—196.