

УДК 621.382:621.373.820

## ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ПАРАМЕТРЫ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ MOSFET ТРАНЗИСТОРОВ

В.А. СОЛОДУХА, В.А. ПИЛИПЕНКО, В.А. ГОРУШКО

*Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» –  
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 11 июня 2018*

**Аннотация.** Приведены результаты исследований влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных  $p$ - и  $n$ -канальных MOSFET транзисторов. Установлено, что данная обработка позволяет за счет улучшения зарядовых и структурных свойств диэлектрика уменьшить токи утечки затвора и повысить надежность приборов.

*Ключевые слова:* быстрая термообработка, подзатворный диэлектрик,  $p$ - и  $n$ -канальные транзисторы.

**Abstract.** The results of investigations of influence of the rapid thermal treatment of the gate dielectric on the parameters of the power  $p$ - and  $n$ -channel MOSFET transistors are listed. It was established, that the given treatment makes it possible owing to enhancing the charge and structural properties of dielectric to reduce the gate leakage currents and enhance reliability of devices.

*Keywords:* rapid thermal treatment, gate dielectric,  $p$ - and  $n$ -channel transistors.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 99-103**  
**Influence of rapid thermal treatment of the gate dielectric  
on the parameters of power field MOSFET transistors**  
**V.A. Solodukha, V.A. Pilipenko, V.A. Gorushko**

### Введение

В последнее время большое внимание уделяется разработке элементной базы для средств, используемых в аэрокосмической технике, поскольку она должна обеспечивать надежную работу радиоэлектронной аппаратуры в различных экстремальных условиях. Современные подходы, обеспечивающие повышение надежности специализированной электронной элементной базы, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства, требуют проведения работ в этом направлении на основе технологических, схемотехнических и конструктивных решений на этапе проектирования и ее производства [1–4].

Поскольку основным фактором, приводящим к выходу из строя изделий для аэрокосмической техники, является нестабильность зарядовых свойств диэлектрических пленок и их границы раздела с полупроводником, то на первый план выходят вопросы по совершенствованию технологических процессов их формирования, позволяющие уменьшить и стабилизировать заряд в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик. Одним из возможных путей решения данной проблемы может явиться применение в технологическом процессе быстрой термообработки, которая позволяет за короткий промежуток времени совершенствовать структуру и зарядовые свойства подзатворного диэлектрика, являющегося ключевым элементом, определяющим стабильность характеристик изделий электронной техники [5].

Цель настоящей работы – исследование влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных полевых MOSFET транзисторов.

## Объекты и методика эксперимента

Для исследования влияния быстрой термообработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных *p*- и *n*-канальных транзисторов были выбраны кремниевый эпитаксиально-планарный полевой транзистор КП7128Б (MOSFET транзистор) с изолированным затвором, обогащенным *p*-каналом и встроенным обратносмещенным диодом, и транзистор КП744 (MOSFET транзистор) с изолированным затвором, обогащенным *n*-каналом и встроенным обратносмещенным диодом.

Пробивное напряжение и ток утечки затвора определялись на комплексе прецизионных измерений вольтамперных ( $I-V$ ) и вольт-фарадных ( $C-V$ ) характеристик B1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade. Измерение пробивного напряжения проводилось в следующем режиме – на стоке и истоке напряжение отсутствовало (0 В), а на затвор подавалась линейная развертка напряжения от 0 до –100 В с шагом –1 В. Ток утечки затвора  $I_{з\text{ут}}$  определялся при напряжении затвора –20 В.

Для оценки зарядовых свойств подзатворного диэлектрика приборов проводились термополевые испытания. На первом этапе определялась исходная допороговая вольтамперная характеристика путем подачи на сток и затвор синхронного напряжения от 0 до –5 В с шагом –0,1 В при отсутствии напряжения на истоке (0 В) и фиксировалось при токе стока –100 нА пороговое напряжение ( $V_{th\text{исх}}$ ) и напряжение стока. Далее пластина нагревалась до температуры 200 °С и выдерживалась в течение 5 мин. Затем на затвор подавалось напряжение 9,5 В при заземленных истоке и стоке, что обеспечивало напряженность поля в подзатворном диэлектрике  $E = 2$  МВ/см. После чего нагрев отключался. Пластина остывала до 40 °С, и снималась допороговая вольтамперная характеристика в том же порядке, как и на первом этапе, с фиксацией порогового напряжения ( $V_{th\text{ТПИ}}$ ), и рассчитывалось значение его сдвига  $\Delta V_{th}$ , мВ, по величине которого оценивалось качество диэлектрика:  $\Delta V_{th}, \text{ мВ} = V_{th\text{ТПИ}} - V_{th\text{исх}}$ .

## Результаты исследования и их обсуждение

В связи с тем, что при быстрой термической обработке (БТО) нагрев кремниевой пластины осуществляется с нерабочей стороны, то важную роль при этом играет обеспечение ее оптической однородности. Наличие на пластине диэлектрической пленки, которая образуется при формировании подзатворного диэлектрика, будет приводить к изменению коэффициента отражения, а, следовательно, влиять на скорость и конечную температуру ее нагрева и, как следствие, параметры изготавливаемых приборов.

Для исследования влияния БТО подзатворного диэлектрика и наличия окисной пленки с непланарной стороны пластины на параметры изготавливаемых приборов на части пластин перед БТО данная пленка удалялась. Далее на пластинах изготавливались *p*- и *n*-транзисторы и проводился сравнительный анализ параметров приборов изготовленных по стандартной технологии и с быстрой термообработкой.

Анализ вольтамперных характеристик данных приборов (рис. 1) показал (табл. 1), что ток утечки на приборах, прошедших быструю термообработку подзатворного диэлектрика без удаления двуоксида кремния с нерабочей стороны пластины, в 3,53 раза меньше, а пробивное напряжение в 1,12 раза ниже, чем на приборах, изготовленных по стандартной технологии. Приборы, прошедшие такую обработку, с удаленным окислом с нерабочей стороны пластины имеют ток утечки подзатворного диэлектрика в 14,59 раз ниже, а пробивное напряжение меньше в 1,06 раза. Данный результат свидетельствует о том, что наличие окисла на облучаемой стороне приводит к возникновению разброса температуры по площади пластины и уменьшению ее нагрева из-за увеличения коэффициента отражения, что не позволяет достичь структурного совершенства подзатворного диэлектрика.

Удаление окисла с нерабочей стороны пластины приводит к однородному ее нагреву по всей площади и достижению ей более высокой конечной температуры, обеспечивающей требуемую энергию для процессов полной перестройки структуры подзатворного диэлектрика. В то же время несколько меньшие значения пробивного напряжения подзатворного диэлектрика для прошедших БТО пластин с удаленным окислом с нерабочей стороны по сравнению со стандартным процессом обусловлены следующими причинами. Быстрая

термообработка приводит как к уменьшению заряда на границе раздела кремний-диэлектрик, так и к уменьшению толщины окисла за счет перестройки его структуры и уплотнения. Эти два процесса вызывают, с одной стороны, увеличение пробивного напряжения за счет уменьшения заряда на границе раздела кремний-диэлектрик, а с другой – его снижение из-за уменьшения толщины диэлектрика. Эти два механизма действуют на пробивное напряжение подзатворного диэлектрика в противоположных направлениях, и в результате того, какой механизм превалирует, пробивное напряжение будет уменьшаться или увеличиваться. В данном случае можно утверждать, что перестройка структуры и, в первую очередь, уменьшение толщины окисла оказывают большее влияние на пробивное напряжение, чем уменьшение заряда.

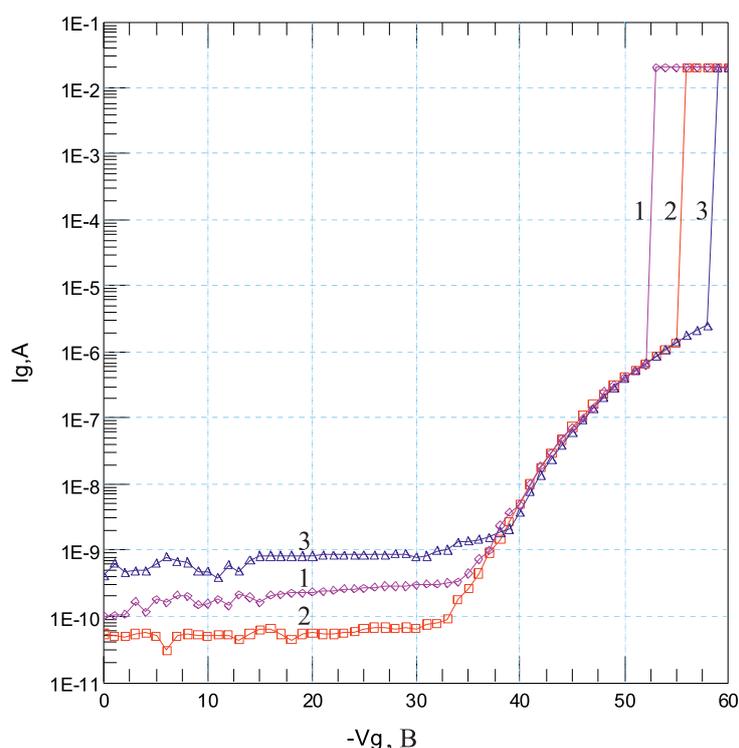


Рис. 1. Вольтамперные характеристики КП7128Б, изготовленных с БТО подзатворного диэлектрика и по стандартной технологии: 1 – с SiO<sub>2</sub> на облучаемой стороне; 2 – без SiO<sub>2</sub>; 3 – стандартная технология

Таблица 1. Электрические характеристики КП7128Б, изготовленных по стандартной технологии и с применением БТО подзатворного диэлектрика при наличии на облучаемой стороне SiO<sub>2</sub> и без него

Параметры	Тип технологического процесса		
	стандартный	БТО с SiO <sub>2</sub>	БТО без SiO <sub>2</sub>
Ток утечки затвора, нА	820,0	232,0	56,2
Пробивное напряжение затвора (при I <sub>3</sub> = 1 мА), В	-58,05	-52,05	-55,05

Термополевые испытания стабильности MOSFET транзистора КП7128Б и расчетные значения сдвига порогового напряжения показали, что данная величина для приборов, прошедших БТО подзатворного диэлектрика с двуокисью кремния на облучаемой стороне, составляет минус 180 мВ, без нее – минус 165 мВ и в случае стандартного процесса – минус 230 мВ. Сдвиг порогового напряжения в положительную сторону после БТО говорит о снижении зарядового состояния подзатворного диэлектрика по сравнению со стандартным технологическим процессом.

Для оценки качества и надежности подзатворного диэлектрика проводился контроль заряда пробоя ( $Q_{bd}$ ) путем пропускания тока через диэлектрик и фиксации заряда, прошедшего через структуру. Далее строилось распределение Вейбула и определялся пробой по дефектам диэлектрика. В нашем случае заряд пробоя для приборов, прошедших БТО подзатворного диэлектрика, при наличии диэлектрика на обратной стороне пластины и без него составил

$3,85 \cdot 10^{-1}$  и  $5,19 \cdot 10^{-1}$  Кл/см<sup>2</sup> соответственно, а на приборах, не проходивших такой обработки,  $3,67 \cdot 10^{-1}$  Кл/см<sup>2</sup>. Приведенные исследования свидетельствуют о том, что БТО подзатворного диэлектрика на пластинах с удаленным диэлектриком значительно увеличивает  $Q_{bd}$  по сравнению с пластинами, прошедшими данную обработку, со слоем SiO<sub>2</sub> и изготовленными по стандартному процессу. Это также свидетельствует о повышении качества и надежности подзатворного диэлектрика после БТО.

Аналогичные исследования были проведены и для мощного *n*-канального полевого транзистора КП744 (MOSFET транзистор) с изолированным затвором, обогащенным *n*-каналом и встроенным обратносмещенным диодом. Анализ вольтамперных характеристик данных приборов (рис. 2) показал (табл. 2), что на приборах с БТО подзатворного диэлектрика без удаленного окисла с нерабочей стороны пластины токи утечки в 85,8 раза выше, а пробивное напряжение в 1,02 раза ниже, чем для приборов, прошедших такую обработку после удаления окисла с нерабочей стороны пластины.

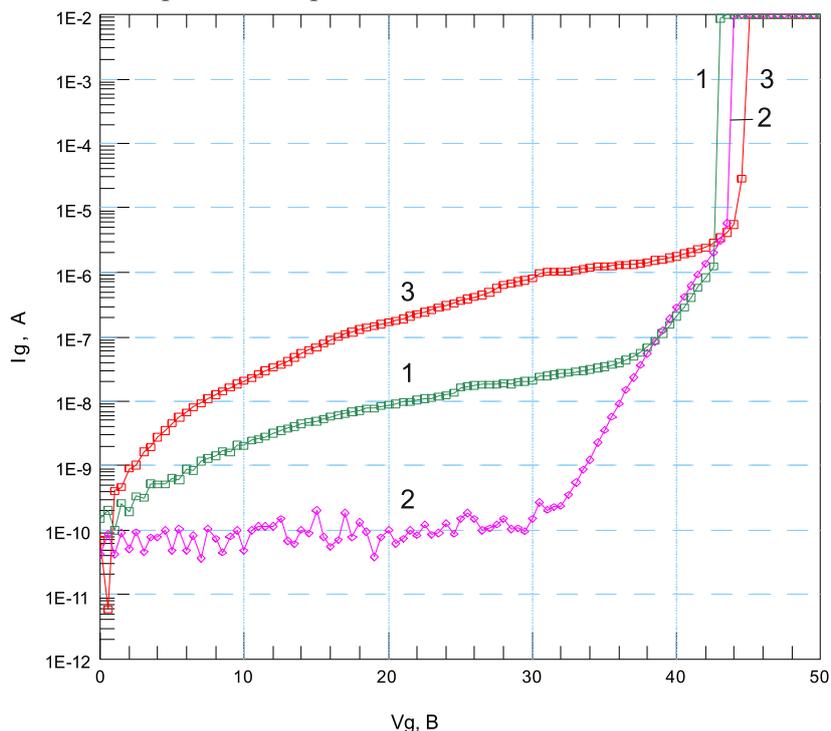


Рис. 2. Вольтамперные характеристики КП744, изготовленных с БТО подзатворного диэлектрика и по стандартной технологии: 1 – с SiO<sub>2</sub> на облучаемой стороне; 2 – без SiO<sub>2</sub>; 3 – стандартная технология

Таблица 2. Электрические характеристики КП744, изготовленных по стандартной технологии и с применением БТО подзатворного диэлектрика при наличии на облучаемой стороне SiO<sub>2</sub> и без него

Параметры	Тип технологического процесса		
	стандартный	БТО с SiO <sub>2</sub>	БТО без SiO <sub>2</sub>
Ток утечки затвора, нА	166,300	8,750	0,102
Пробивное напряжение затвора (при $I_3 = 1$ мА), В	44,55	42,56	43,55

В то же время на приборах, прошедших быструю термообработку подзатворного диэлектрика на пластинах со снятым диэлектриком с обратной стороны пластины, ток утечки в  $1,63 \cdot 10^3$  раз меньше, а пробивное напряжение в 1,02 раза ниже, чем на приборах, изготовленных по стандартной технологии.

Проведение термополевых испытаний данных приборов показал, что сдвиг порогового напряжения для приборов, прошедших быструю термообработку подзатворного диэлектрика без двуокиси кремния на облучаемой стороне, составляет минус 102 мВ, с ее наличием – минус 111 мВ и в случае стандартного процесса – минус 130 мВ. Как видно из приведенных данных, быстрая термообработка подзатворного диэлектрика в данном случае так же,

как и в случае  $p$ -канального транзистора, обеспечивает снижение зарядового состояния по сравнению со стандартным технологическим процессом.

Оценка качества и надежности подзатворного диэлектрика путем определения заряда пробоя позволила установить, что, как и в случае  $p$ -канального транзистора, наблюдается увеличение заряда пробоя на приборах, проходивших БТО с удаленным диэлектриком на облучаемой стороне. Так, для приборов с БТО подзатворного диэлектрика при наличии диэлектрика на обратной стороне пластины и без него  $Q_{bd}$  составил  $1,00 \cdot 10^{-1}$  и  $2,39 \cdot 10^{-1}$  Кл/см<sup>2</sup> соответственно, а на приборах, не проходивших такой обработки,  $9,37 \cdot 10^{-2}$  Кл/см<sup>2</sup>.

Таким образом, применение быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика в технологическом процессе создания мощных полевых  $p$ - и  $n$ -канальных MOSFET транзисторов позволяет за счет улучшения его структурного совершенства и стабилизации зарядовых свойств уменьшить токи утечки приборов и повысить их надежность.

### Список литературы / References

1. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. Space Microelectronics. M.: Tekhnosphere, 2015. Vol. 1. 694 p.
2. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. Space Microelectronics: in 2 vol. M.: Tekhnosphere, 2015. Vol. 2. 488 p.
3. Belous A., Saladuha V., Shvedov S. Space Microelectronics. Modern Spacecraft Classification, Failure, and Electrical Component Requirements. Vol. 1. Boston, London: Artech House, 2017. 386 p.
4. Belous A., Saladuha V., Shvedov S. Space Microelectronics. Integrated Circuit Design for Space Applications. Vol. 2. Boston, London: Artech House, 2017. 604 p.
5. Pilipenko V.A. Rapid Thermal Treatments in the VLSI Technology. Minsk: BSU Publishing Center, 2004. 531 p.

#### Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Горущко В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

#### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Казинца, 121А,  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –  
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
тел. +375-17-212-37-41;  
e-mail: office@bms.by  
Пилипенко Владимир Александрович.

#### Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, general manager of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Pilipenka U.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National academy of sciences of Belarus, deputy director of science development of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Harushka V.A., leading engineer of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

#### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Kazintsa st., 121A,  
JSC «INTEGRAL» –  
holding managing company «INTEGRAL»  
tel. +375-17-212-37-41;  
e-mail: office@bms.by  
Pilipenka Uladzimir Aleksandrovich