

УДК 621.315.592

## Применение пленки $\text{Al}_2\text{O}_3$ для стабилизации зарядовых свойств границы раздела $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$

© 2023 г. А. С. Ким<sup>1,2,✉</sup>, Н. А. Серко<sup>1</sup>, П. Е. Хакушев<sup>1</sup>,  
А. Н. Колкий<sup>1</sup>, С. Ю. Юрчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: [aleks6dodds@gmail.com](mailto:aleks6dodds@gmail.com)

**Аннотация.** Исследовано влияние пленок оксида алюминия, полученных методом ВЧ-катодного распыления мишени  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в среде аргона, на зарядовые свойства границы раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ . Проведены измерения высокочастотных  $C-V$ -характеристик МДП-структур с однослойными диэлектрическими пленками:  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,10 и 0,36 мкм,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,14 мкм и двухслойными композициями на их основе. В качестве исходного материала были выбраны пластины марок КДБ-4,5 и КДБ-5000. Рассчитаны электрофизические параметры пленок, такие как  $U_{FB}$  и  $Q_{ss}$ . Экспериментальные результаты подтвердили, что отрицательный встроенный заряд в пленке  $\text{Al}_2\text{O}_3$  способен предотвратить образование инверсионного слоя на поверхности кремния  $p$ -типа проводимости, компенсируя положительный встроенный заряд в пленке  $\text{SiO}_2$  и обогащая поверхность полупроводника основными носителями, и таким образом позволяет стабилизировать зарядовые свойства границы раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ . На примере многоплощадочного  $p-i-n$ -фоточувствительного элемента (ФЧЭ) подтверждена применимость пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в качестве дополнительного диэлектрического покрытия в технологиях изготовления фотодиодов на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости. Установлено, что пассивация диоксида кремния пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на периферии и между элементами ФЧЭ позволяет улучшить вольт-амперные характеристики и сопротивление изоляции  $R_{из}$ , что ведет к повышению процента выхода годных фотодиодов.

**Ключевые слова:** инверсионный слой, пассивация, граница раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ , диэлектрическая пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$

**Для цитирования:** Ким А.С., Серко Н.А., Хакушев П.Е., Колкий А.Н., Юрчук С.Ю. Применение пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для стабилизации зарядовых свойств границы раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ . *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(2): 148—156. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-148-156>

## Application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film for stabilization of charge properties of the SiO<sub>2</sub>/p-Si interface

A. S. Kim<sup>1,2,✉</sup>, N. A. Serko<sup>1</sup>, P. E. Khakuashev<sup>1</sup>, A. N. Kolky<sup>1</sup>, S. Yu. Yurchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC “SPA “Orion”, 9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russian Federation

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS”,  
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

✉ Corresponding author: [aleks6dodds@gmail.com](mailto:aleks6dodds@gmail.com)

**Abstract.** The influence of aluminum oxide films obtained by high-frequency cathode sputtering of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> target in argon atmosphere on charging properties of the SiO<sub>2</sub>/p-Si interface was investigated. High-frequency C–V characteristics for MIS-structure with one-layer dielectric films: SiO<sub>2</sub> (0.10 μm and 0.36 μm), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.14 μm) — and its double-layers compositions were measured. Experiment was carried out with a KDB–4.5 and a KDB–5000 substrates. Some electrophysical parameters of the obtained films such as  $U_{FB}$  and  $Q_{SS}$  were calculated. Based on experimental results it was confirmed that the embedded negative charge of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film prevented the formation of the inversive layer on p-Si surface by compensation of the embedded positive charge of SiO<sub>2</sub> film and enhancement of semiconductor surface with majority charge carriers and, thus, allowed stabilization of charge properties of the SiO<sub>2</sub>/p-Si interface. The applicability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film as additional dielectric covering for manufacture technology of photodiodes on high-resistance p-Si was confirmed by applying on a multi-element p-i-n photosensitive element (PE) as an example. It was established that passivation of silicon dioxide on periphery and between the elements of PE by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film improved I–V characteristics and insulation resistance, which lead to increased yield rate of photodiodes.

**Keywords:** inversion layer, passivation, SiO<sub>2</sub>/p-Si interface, dielectric film Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**For citation:** Kim A.S., Serko N.A., Khakuashev P.E., Kolky A.N., Yurchuk S.Yu. Application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film for stabilization of charge properties of the SiO<sub>2</sub>/p-Si interface. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(2): 148–156. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-148-156>

### Введение

Состояние границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si оказывает большое влияние на электрические характеристики полупроводниковых приборов, надежность их работы и устойчивость к внешним воздействиям. Особенно это касается приборов, изготовленных на основе высокоомного кремния p-типа проводимости. Известно, что термически выращенные пленки диоксида кремния SiO<sub>2</sub> содержат положительный встроенный заряд [1], вследствие чего возможно образование инверсионного канала n-типа проводимости в приповерхностной области кремния. Наличие инверсионного канала обуславливает электрическую взаимосвязь между элементами полупроводниковых приборов и нестабильность их характеристик во времени.

Для стабилизации зарядовых свойств пленки SiO<sub>2</sub> и границы раздела SiO<sub>2</sub>/p-Si применяют различные технологические приемы, например:

- создание высоколегированного p<sup>+</sup>-слоя в приповерхностной области путем ионной имплантации бора;
- нанесение пленок с отрицательным встроенным зарядом.

Создание стоп-областей p<sup>+</sup>-типа проводимости методом ионной имплантации бора отражено в нескольких патентах, в которых имплантированные области расположены на периферии фоточувствительного элемента (ФЧЭ) [2, 3] или между активными элементами [4]. Сформированный таким образом в приповерхностной области пластины кремния высоколегированный слой p<sup>+</sup>-типа проводимости препятствует образованию канала противоположного типа проводимости. Недостатком этого метода является образование высокой концентрации постимплантационных радиационных дефектов, наличие которых в области пространственного заряда p–n-перехода приводит к ухудшению фотоэлектрических параметров полу-

проводниковых приборов, в частности к преждевременному пробою, а также возрастанию обратных токов и шумов. Поэтому нанесение пленок, способных стабилизировать зарядовые свойства границы раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ , более предпочтительно.

Среди пленок, имеющих отрицательный встроенный заряд, известны диоксиды гафния  $\text{HfO}_2$  и циркония  $\text{ZrO}_2$ , а также оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [5]. В ряде работ описаны оптические и электрические свойства пленок  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ , полученных следующими методами:

- атомно–слоевое осаждение  $\text{HfCl}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  [6],  $\text{ZrCl}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  [5];
- ионно–лучевое испарение мишени гафния [7];
- осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы  $\text{Hf}[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_4$  или  $\text{Hf}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$  [8] и  $(\text{C}_3\text{H}_7\text{O})_2(\text{C}_{11}\text{H}_{19}\text{O}_2)_2\text{Zr}$  [9].

Высокая зарядовая устойчивость границ раздела получаемых пленок с кремниевой подложкой и диоксидом кремния обуславливает перспективность диоксидов  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  в качестве пассивирующих покрытий и для Si, и для  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Однако, несмотря на множество существующих синтезов таких пленок, их внедрение не всегда возможно из-за технологической несовместимости выбранного метода получения и существующей технологии изготовления конкретного кремниевого полупроводникового прибора.

Диэлектрические пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , как и  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ , обладают высоким потенциалом для стабилизации зарядовых свойств  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  за счет стабильности и большой величины отрицательного встроенного заряда [1]. В некоторых работах упоминается, что за счет изменения содержания кислорода [10] или облучения тонких пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  гамма–квантами [11] могут быть получены покрытия с результирующим положительным зарядом, что расширяет область применения оксида алюминия в полупроводниковой электронике. Методы синтеза пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  также разнообразны: атомно–слоевое осаждение [12], ионно–лучевое испарение мишени  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [13], осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы  $\text{C}_{15}\text{H}_{21}\text{AlO}_6$  [14] и многие др.

Ниже представлены результаты исследования стабилизирующих свойств пленок оксида алюминия, осажденных на поверхность  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  методом высокочастотного (ВЧ) катодного распыления мишени  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также их применимости в технологиях изготовления полупроводниковых приборов на основе высокоомного кремния. Предполагается, что пассивация поверхности  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  оксидом алюминия за счет отрицательного встроенного заряда большой величины способна скомпенсировать положительный заряд в пленке диоксида кремния и предотвратить образование области противоположного типа про-

водимости на поверхности пластины кремния  $p$ -типа проводимости.

### Образцы и методика эксперимента

Исследование проводилось на пластинах кремния  $p$ -типа проводимости с ориентацией (111), диаметром 60 мм и удельным сопротивлением 4,5 и 5000 Ом·см. Пластины подразделялись на две группы по значению удельного сопротивления. В каждой из групп образцов на пластинах выращивали слой термического диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,10 и 0,36 мкм, осаждали пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,14 мкм, а также формировали двух–слойную композицию на их основе:

- $\text{SiO}_2$  (0,10 мкм) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,14 мкм);
- $\text{SiO}_2$  (0,36 мкм) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,14 мкм).

Осаждение пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  проводили на установке катодного распыления диэлектриков Leybold Heraeus Z–400 с использованием высокочастотного источника энергии. Катодная система распыления, схема которой представлена на рис. 1, имеет следующие характеристики: диаметр распыляемой мишени 76 мм, расстояние между мишенью и подложкой 100 мм. Напряжение источника питания составляло до 1 кВ, ток — до 20 А, мощность — 600 Вт.

Перед процессом осаждения осуществляли откачку камеры форвакуумным и турбомолекулярным насосами до давления  $0,2 \cdot 10^{-4}$  бар, по достижению которого в камеру подавали аргон при давлении  $0,5 \cdot 10^{-2}$  бар. Тлеющий разряд создавался при подаче мощности 300 Вт на катод между мишенью и подложкодержателем. Также проводили тренировку мишени при закрытой заслонке в течение 3 мин в атмосфере чистого аргона. Время процесса осаждения составляло 15 мин.

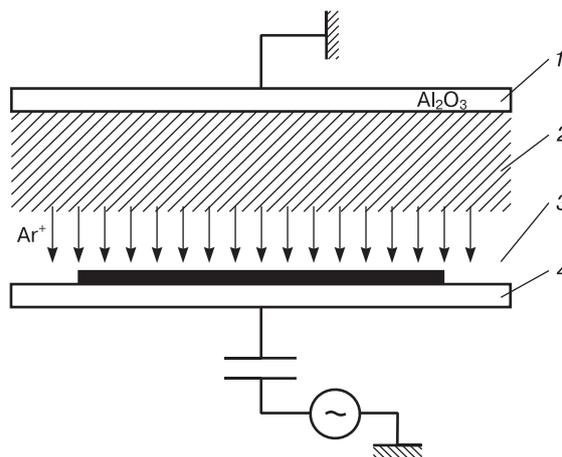


Рис. 1. Схема установки ВЧ–катодного распыления:  
1 — катод с распыляемой мишенью; 2 — тлеющий разряд; 3 — темное пространство; 4 — подложкодержатель

Fig. 1. Scheme of the installation of RF cathode sputtering:  
(1) cathode with a sputtered target; (2) glow discharge; (3) dark space; (4) substrate holder

Толщину и показатель преломления термических пленок SiO<sub>2</sub> и осажденных пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для всех образцов измеряли на эллипсометре ЛЭФ 3М-1. Толщина пленок SiO<sub>2</sub> составляла 0,10 и 0,36 мкм, показатели преломления при этом находились в диапазоне 1,45—1,46. Для пленок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> те же параметры составляли 0,13—0,14 мкм и 1,64—1,68 соответственно. Относительная диэлектрическая проницаемость пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, рас-

считанная исходя из измеренной максимальной емкости МДП-структуры 468 пФ, составляла 9,4. Полученные параметры осажденных пленок SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полностью соответствуют литературным данным [15—18].

В качестве металлического электрода МДП-структур применяли хром толщиной 0,05 мкм, полученный методом магнетронного напыления на установке Leybold Heraeus L-560 с последую-

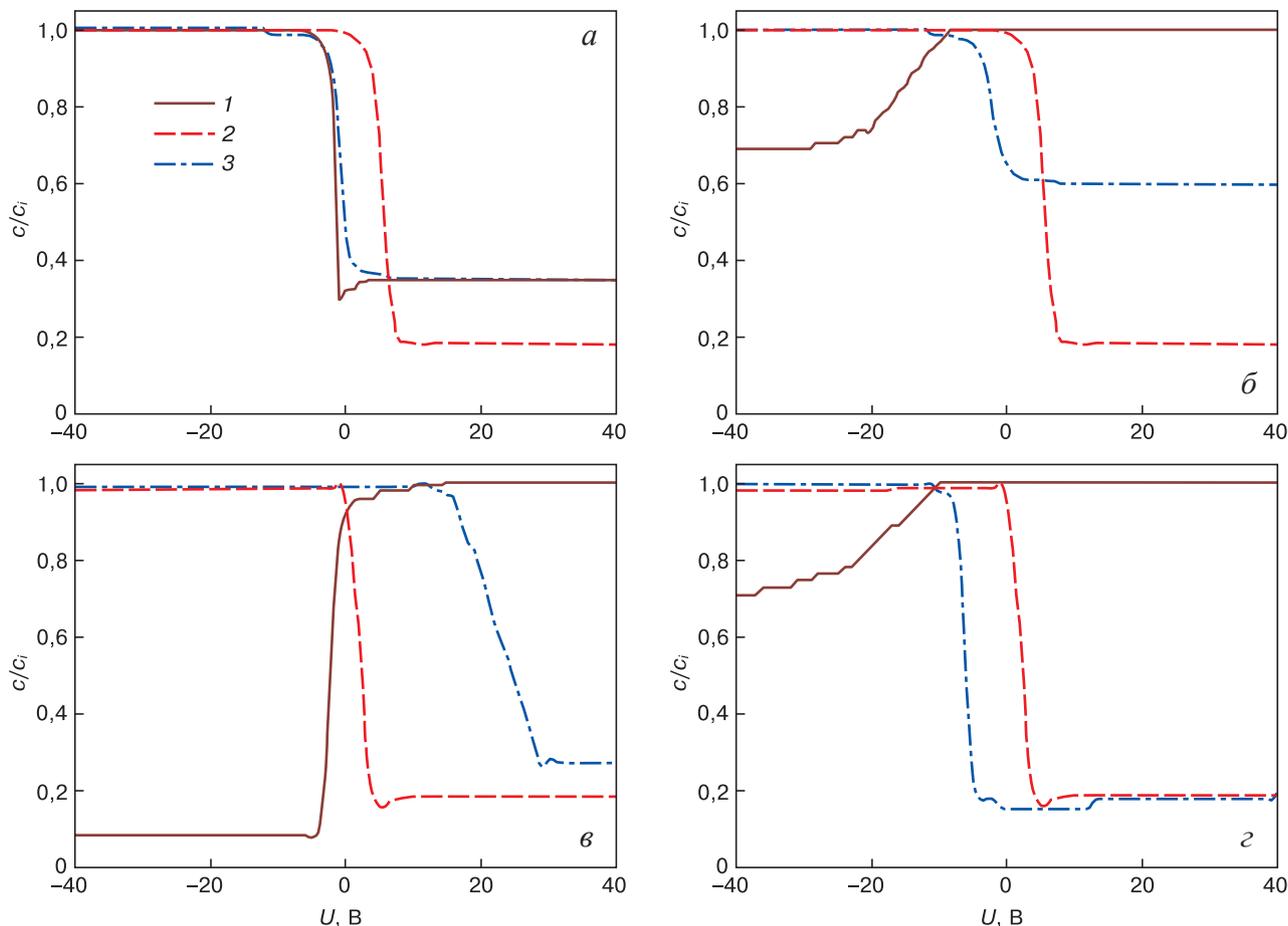


Рис. 2. Нормированные C–V-характеристики для КДБ–4,5 (а, б) и КДБ–5000 (в, г):

а, в — толщина слоя SiO<sub>2</sub> 0,10 мкм; б, г — 0,36 мкм;  
1 — SiO<sub>2</sub>/p-Si; 2 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si; 3 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si

Fig. 2. Normalized C–V characteristics for KDB–4.5 (a, б) and KDB–5000 (в, г):

(а, в) SiO<sub>2</sub> layer thickness 0.10 μm; (б, г) 0.36 μm; (1) SiO<sub>2</sub>/p-Si; (2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si; (3) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si

Таблица 1 / Table 1

**Электрофизические параметры пленок**  
Electrophysical parameters of films

Подложка	Пленка	$U_{FB}$ , В	$Q_{ss}$ , $10^{11}$ см <sup>-2</sup>
КДБ–4,5	0,14 мкм Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2	-18,0
	0,10 мкм SiO <sub>2</sub>	-1,8	4,3
	0,36 мкм SiO <sub>2</sub>	-12,3	6,5
КДБ–5000	0,14 мкм Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0	-21,0
	0,10 мкм SiO <sub>2</sub>	-4,0	8,6
	0,36 мкм SiO <sub>2</sub>	-19,8	10,0

щей фотолитографией. Диаметр контакта составлял 1 мм.

### Результаты и их обсуждение

Электрофизические параметры экспериментальных образцов определяли путем измерения высокочастотных вольт–фарадных характеристик в диапазоне напряжений от –40 до 40 В с использованием измерителя 4277ALCZ (Hewlett Packard). Измерения проводили на частоте 10 кГц. Нормированные  $C-V$ -характеристики образцов представлены на рис. 2.

В табл. 1 представлены рассчитанные на основе измеренных  $C-V$ -характеристик электрофизические параметры образцов с однослойными пленками  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Расчет эффективной плотности поверхностного заряда  $Q_{ss}$  проводили по следующей формуле [19]:

$$Q_{ss} = c_i \frac{\varphi_{ms} - U_{FB}}{eA}, \quad (1)$$

где  $c_i$  — емкость пленки;  $\varphi_{ms}$  — разница работ выхода материалов Cr и Si (принимается равной 0, так как значения параметра одинаковы по справочным данным [20, 21]);  $U_{FB}$  — напряжение плоских зон;  $e$  — заряд электрона;  $A$  — площадь электрода.

Из измеренных высокочастотных  $C-V$ -характеристик образцов, изготовленных на пластинах марки КДБ–4,5, следует, что у образца с пленкой термического  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,10 мкм (см. кривая 1, рис. 2, а) в приповерхностной области полупроводника инверсионный слой отсутствует, как и у образцов с однослойной пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,14 мкм (см. кривая 2, рис. 2, а) и их двухслойной композицией  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  (см. кри-

вая 3, рис. 2, а). На отсутствие инверсионного слоя указывает то, что максимальная емкость структур достигается при отрицательных напряжениях, что определяется проводимостью  $p$ -типа на поверхности кремния. Значения измеренной максимальной емкости в режиме обогащения этих образцов соответствуют значениям емкостей диэлектрических пленок и соотносятся с расчетными, представленными в табл. 2.

У образца с пленкой  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,36 мкм (см. кривая 1, рис. 2, б) инверсионный слой присутствует, а его емкость определяется суммой емкостей слоя  $\text{SiO}_2$  и приповерхностной области пространственного заряда, режим обогащения при этом не достигается. На наличие инверсионного слоя указывает то, что максимальная емкость структуры наблюдается при положительных напряжениях, что определяется проводимостью  $n$ -типа на поверхности кремния. У образца с двухслойной композицией пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  (см. кривая 3, рис. 2, б) инверсионный канал отсутствует, при этом в режиме обогащения достигается максимальная емкость, значение которой соответствует расчетной, из чего следует, что пленка оксида алюминия скомпенсировала положительный встроенный заряд в пленке  $\text{SiO}_2$ .

Высокочастотные  $C-V$ -характеристики образцов, изготовленных на пластинах марки КДБ–5000, с однослойными пленками  $\text{SiO}_2$  свидетельствуют о том, что и при толщине диоксида кремния 0,10 мкм (см. кривая 1, рис. 2, в), и при толщине 0,36 мкм (см. кривая 1, рис. 2, г) на поверхности высокоомного кремния образуются инверсионные слои. Режим обогащения у обоих образцов не достигается. Спад характеристики образца со слоем  $\text{SiO}_2$  (0,36 мкм) на КДБ–5000 начинается при –10 В, в то время как для образца с такой же однослой-

Таблица 2 / Table 2

Экспериментальные и расчетные значения емкости образцов  
Experimental and calculated values of sample capacitance

Подложка	Пленка	$C_{изм}$ , пФ	$C_{расчет}$ , пФ
КДБ–4,5	0,10 мкм $\text{SiO}_2$	266	271
КДБ–5000		200	
КДБ–4,5	0,36 мкм $\text{SiO}_2$	61	75
КДБ–5000		55	
КДБ–4,5	0,14 мкм $\text{Al}_2\text{O}_3$	467	466
КДБ–5000		462	
КДБ–4,5	0,10 мкм $\text{SiO}_2$ и 0,14 мкм $\text{Al}_2\text{O}_3$	171	171
КДБ–5000		168	
КДБ–4,5	0,36 мкм $\text{SiO}_2$ и 0,14 мкм $\text{Al}_2\text{O}_3$	63	65
КДБ–5000		61	

ной пленкой на КДБ-4,5 — при -8 В. Это говорит о большей толщине инверсионного слоя, образующегося на высокоомном кремнии. У образцов с однослойной пленкой  $Al_2O_3$  (см. кривые 2, рис. 2, в и г) и двухслойной композицией пленок  $Al_2O_3/SiO_2/p-Si$  (см. кривые 3, рис. 2, в и г) инверсионные слои отсутствуют. Значения максимальной емкости в режиме обогащения также хорошо согласуются с расчетными (см. табл. 2).

Можно сделать вывод, что пленка  $Al_2O_3$  толщиной 0,14 мкм, осажденная методом высокочастотного катодного распыления на термически выращенную пленку  $SiO_2$  толщиной 0,10—0,36 мкм, способна скомпенсировать положительный заряд в пленке  $SiO_2$  и предотвратить инверсию поверхности кремния  $p$ -типа проводимости в широком диапазоне значений удельного сопротивления, что подтверждает стабилизирующие свойства  $Al_2O_3$  для границы раздела  $SiO_2/p-Si$ .

**Фотодиоды с двухслойной диэлектрической пленкой**

Для определения возможности применения пленки  $Al_2O_3$  в технологиях изготовления кремниевых фотодиодов и оценки ее влияния на вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЧЭ были изготовлены четыре экспериментальные партии многоплощадочных  $p-i-n$ -фотодиодов. В качестве исходного материала использовали пластины кремния  $p$ -типа проводимости с ориентацией (111) и диаметром 60 мм с удельным сопротивлением 5 кОм · см. Топология изготавливаемых ФЧЭ включает 8 фоточувствительных площадок (ФЧП), расположенных в четырех квадрантах: 4 внешние площадки и 4 внутренние площадки вписаны в концентрические окружности диаметром 4 и 2 мм соответственно. Площадь внешних и внутренних фоточувствительных площадок составила 18 и 0,6 мм<sup>2</sup>. Ширина зазора между ФЧП — 200 мкм [22]. Также имеется охранный элемент в виде планарного  $n^+—p$ -перехода. В качестве пленки, пассивирующей периферию ФЧЭ и изолирующей фоточувствительные площадки, применяется термический  $SiO_2$ . Срез структуры представлен в патенте [23].

Первая и вторая партии ФЧЭ были проведены по стандартному маршруту, состоящему из следующих технологических операций:

- термическое окисление; загонка и разгонка фосфора для создания областей ФЧП и охранный кольца;
- загонка фосфора в обратную сторону пластины для формирования геттерирующего слоя;
- удаление геттера; диффузионная загонка бора для создания тыльного контактного слоя  $p^+$ -типа проводимости;

Таблица 3 / Table 3

**Типовые значения темновых токов**  
Typical values of dark currents

Параметр	Фоточувствительный элемент	
	по стандартной технологии	с двухслойной диэлектрической пленкой
$I_T$ (внешние ФЧП), нА	60—90	30—75
$I_T$ (внутренние ФЧП), нА	8—10	3—8
$I_T$ (охранное кольцо), нА	700—1000	200—750
$R_{из}$ , МОм	95—110	100—130
Процент выхода годных, %	30	48

– формирование двухслойных металлических контактов к ФЧП, области охранный кольца и тыльному контактного слою  $p^+$ -типа проводимости методом резистивного напыления пленки золота с подслоем хрома, нанесенного магнетронным методом.

Третья и четвертая партии ФЧЭ дополнительно включали нанесение пленки оксида алюминия методом высокочастотного катодного распыления мишени  $Al_2O_3$ . Осажденная пленка  $Al_2O_3$  была расположена над периферийной областью ФЧЭ, зазорами между внешними ФЧП и охранным кольцом, а также над зазорами между внешними и внутренними ФЧП. Таким образом проводилась пассивация  $SiO_2$  на периферии ФЧЭ и между активными элементами. Толщина пленки оксида алюминия составляла 0,14 мкм.

В табл. 3 приведены типовые значения темновых токов при рабочем напряжении 200 В, значения сопротивления изоляции между ФЧП и охранным кольцом, а также проценты выхода годных ФЧЭ, изготовленных по стандартной технологии, и ФЧЭ с дополнительной диэлектрической пленкой  $Al_2O_3$  поверх пассивирующей периферию и изолирующей фоточувствительные площадки слоя  $SiO_2$ .

Как видно из полученных результатов (см. табл. 3), нанесение дополнительной диэлектрической пленки оксида алюминия позволило снизить диапазоны типовых значений темновых токов. При этом нижняя граница темновых токов по внешним ФЧП уменьшилась в 2 раза, по внутренним ФЧП — в 2,6 раза, по охранный элементу — в 3,5 раза в сравнении с аналогичными параметрами ФЧЭ, изготовленных по стандартной технологии. Одновременно с этим интервал значений сопротивления изоляции для ФЧЭ с двухслойной диэлектрической пленкой полностью соответствует требованию, предъявляемому к рассма-

триваемому фотодиоду —  $R_{из} \geq 100$  МОм. Таким образом, было достигнуто повышение процента выхода годных на 18 %. Этим подтверждается применимость пленки  $Al_2O_3$ , полученной методом катодного распыления, в технологиях изготовления фотодиодов на высокоомном кремнии, а также повышение процента выхода годных посредством пассивации  $SiO_2/p-Si$  дополнительной диэлектрической пленкой  $Al_2O_3$ .

### Заключение

Исследовано влияние пленок оксида алюминия, полученных методом высокочастотного катодного распыления мишени  $Al_2O_3$  в среде аргона, на зарядовые свойства границы раздела  $SiO_2/p-Si$ . На пластинах марок КДБ-4,5 и КДБ-5000 созданы МДП-структуры с однослойными диэлектрическими пленками (термический  $SiO_2$  толщиной 0,10 и 0,36 мкм;  $Al_2O_3$  толщиной 0,14 мкм) и с двухслойными композициями на их основе. Осаждение пленок оксида алюминия проведено при мощности источника 300 Вт и длительности процесса 15 мин. Параметры осажденных пленок  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  соответствовали значениям из литературных источников. Диаметр электрода МДП-структур составлял 1 мм.

На частоте 10 кГц были сняты высокочастотные  $C-V$ -характеристики образцов в диапазоне напряжений от  $-40$  до  $40$  В, а также рассчитаны

$U_{FB}$  и  $Q_{ss}$ . Результаты измерений показали наличие инверсионных слоев у образцов марки КДБ-4,5  $SiO_2(0,36 \text{ мкм})/p-Si$  и у образцов марки КДБ-5000 с пленками  $SiO_2$  толщиной 0,10 и 0,36 мкм. При этом толщина сформированного инверсионного слоя у образца на высокоомном полупроводнике  $SiO_2(0,36 \text{ мкм})/p-Si$  больше, чем у образца на низкоомном материале с такой же однослойной пленкой. Тем не менее, дополнительная пассивация оксидом алюминия толщиной 0,14 мкм позволила полностью скомпенсировать положительный встроенный заряд в пленках диоксида кремния 0,10—0,36 мкм и предотвратить образование инверсионного слоя на поверхности и низкоомного, и высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости.

На примере многоплощадочного  $p-i-n$ -ФЧЭ было изучено влияние дополнительного диэлектрического покрытия  $Al_2O_3$  на ВАХ и сопротивление изоляции между элементами. Показано, что пассивация диоксида кремния на периферии и между элементами ФЧЭ диэлектрической пленкой оксида алюминия улучшила исследуемые параметры и, как следствие, повысила процент выхода годных фотодиодов. Таким образом, подтверждена применимость пленки  $Al_2O_3$  в качестве дополнительного диэлектрического покрытия для пассивации границы раздела  $SiO_2/p-Si$  в технологиях изготовления фотодиодов на основе высокоомного кремния  $p$ -типа проводимости.

### Библиографический список

1. Курносоев А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Высшая школа; 1979. 368 с.
2. Патент (СССР) № 1072666А1. Манжа Н.М., Кокин В.Н., Чистяков Ю.Д., Патюков С.И. Способ изготовления полупроводниковых приборов с пристеночными  $p-n$ -переходами. Заявл.: 02.12.1981; опублик.: 27.03.1996. URL: <https://patents.google.com/patent/SU1072666A1/ru>
3. Патент (РФ) № 174468U1, МПК H01L 31/028. Будтолаев А.К., Либерова Г.В. Многоплощадочный кремниевый  $p-i-n$ -фоточувствительный элемент. Заявл.: 02.11.2016; опублик.: 16.10.2017. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU174468U1\\_20171016](https://yandex.ru/patents/doc/RU174468U1_20171016); <https://www.elibrary.ru/krtsvh>
4. Патент (РФ) № 181785U1, МПК H01L 31/028. Либерова Г.В., Хакуашев П.Е. Многоплощадочный кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод. Заявл.: 19.02.2018; опублик.: 26.07.2018. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU181785U1\\_20180726](https://yandex.ru/patents/doc/RU181785U1_20180726); <https://www.elibrary.ru/jiwnlc>
5. Robertson J. High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors. *Reports on Progress in Physics*. 2005; 69(2): 327—396. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/2/R02>
6. Aarik J., Mändar H., Kirm M., Pung L. Optical characterization of  $HfO_2$  thin films grown by atomic layer deposition. *Thin Solid Films*. 2004; 466(1–2): 41—47. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.01.110>
7. Зырянова А.С., Телеш Е.В. Исследование электрофизических параметров тонкопленочных структур  $HfO_2/Si$ , полученных реактивным ионно-лучевым распылением. *Материалы IX Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники»*. Минск, 14–16 октября, 2020. Белорус. гос. ун-т. Минск: БГУ; 2020. С. 51—55. URL: <https://www.elibrary.ru/xjrfffb>
8. Hino S., Nakayama M., Takashi K., Funakubo H., Tokumitsu E. Characterization of hafnium oxide thin films by source gas pulse introduced metalorganic chemical vapor deposition using amino-family Hf precursors. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2003; 42:(Pt 1, 9B): 6015—6018. <https://doi.org/10.1143/JJAP42.6015>
9. Wu X., Landheer D., Graham M.J., Chen H.-W., Huang T.-Y., Chao T.-S. Structure and thermal stability of MOCVD  $ZrO_2$  films on Si (100). *Journal of Crystal Growth*. 2003; 250(3–4): 479—485. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)00827-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)00827-3)
10. Исмаилов Т.А., Саркаров Т.Э., Шахмаева А.Р., Пангерева Б.А. Технология получения защитной пленки оксида алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных схем. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2008; (1): 50—56.
11. Романов Н.М., Мокрушина С.А. Влияние гамма-облучения на МДП-структуры с тонким оксидом  $Al_2O_3$ . *Перспективные материалы*. 2018; (2): 17—24. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2018-2-17-22>

12. Gorshkov D.V., Sidorov G.Yu., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Marin D.V., Yakushev M.V. The effect of the growth temperature on the passivating properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films formed by atomic layer deposition on the CdHgTe surface. *Technical Physics Letters*. 2020; 46(8): 741—744. <https://doi.org/10.1134/S1063785020080064>

13. Arnold S.M., Cole B.E. Ion beam sputter deposition of low loss  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films for integrated optics. *Thin Solid Films*. 1988; 165(1): 1—9. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90673-6](https://doi.org/10.1016/0040-6090(88)90673-6)

14. Singh M.P., Shivashankar S.A. Low-pressure MOCVD of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films using aluminium acetylacetonate as precursor: nucleation and growth. *Surface and Coatings Technology*. 2002; 161(2–3): 135—143. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00470-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00470-X)

15. Martin I., Vetter M., Orpella A., Puigdollers J., Voz C., Marsal L.F., Pallares J., Alcubilla R. Characterization and application of a-SiC<sub>x</sub>:H films for the passivation of the c-Si surface. *Thin Solid Films*. 2002; 403–404: 476—479. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01648-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01648-0)

16. Arslambekov V.A., Kazarinova I.D., Gorbunova K.M. Oxidation of silicon. *Russian Chemical Reviews*. 1972; 41(1): 36—46. <https://doi.org/10.1070/RC1972v-041n01ABEH002027>

17. Борисова Т.М., Кастро Р.А. Исследование диэлектрических свойств тонких пленок оксида алюминия, выращенных методом молекулярного наслаивания. *Труды МФТИ*. 2013; 5(1(17)): 21—25.

18. Shamala K.S., Murthy L.C.S., Narasimha Rao K. Studies on optical and dielectric properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method. *Materials Science and Engineering B*. 2004; 106(3): 269—274. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.09.036>

19. Зи С. Физика полупроводниковых приборов; пер. с англ. В 2-х кн. М.: Мир; 1984. Кн. 1. 456 с.

20. Равдель А.А., Пономарев А.М. Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: СпецЛит; 1998. 232 с.

21. Бродский А.М., Гуревич Ю.Я., Плесков Ю.В., Ротенберг З.А. Современная фотоэлектрохимия: Фотоэмиссионные явления. М.: Наука; 1974. 167 с.

22. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. М.: ДМК Пресс; 2012. 640 с.

23. Патент (РФ) № 205303 U1, МПК H01L 31/028. Ким А.С., Колкий А.Н. Многоплощадочный кремниевый p-i-n-фотодиод с двухслойной диэлектрической пленкой. Заявл.: 10.03.2021; опублик.: 08.07.2021. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU205303U1\\_20210708](https://yandex.ru/patents/doc/RU205303U1_20210708)

## References

1. Kurnosov A.I., Yudin V.V. Production technology for semiconductor devices. Moscow: Vysshaya shkola; 1979. 368 p. (In Russ.)

2. Patent (USSR) No 1072666A1. Manzha N.M., Kokin V.N., Chistyakov Yu.D., Patyukov S.I. A method of manufacturing semiconducting devices with near-wall p-n-transitions. Appl.: 02.12.1981; publ.: 27.03.1996. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/SU1072666A1/ru>

3. Patent (RU) No 174468U1, MPC H01L 31/028. Budtolaev A.K., Liberova G.V. A multi-element silicon p-i-n-photosensitive element. Appl.: 02.11.2016; publ.: 16.10.2017. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU174468U1\\_20171016](https://yandex.ru/patents/doc/RU174468U1_20171016)

4. Patent (RU) No 181785U1, MPC H01L 31/028. Liberova G.V., Khakuashev P.E. A multi-element silicon p-i-n-photodiode. Appl.: 19.02.2018; publ.: 26.07.2018. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU181785U1\\_20180726](https://yandex.ru/patents/doc/RU181785U1_20180726)

5. Robertson J. High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors. *Reports on Progress in Physics*. 2005; 69(2): 327—396. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/2/R02>

6. Aarik J., Mändar H., Kirm M., Pung L. Optical characterization of HfO<sub>2</sub> thin films grown by atomic layer deposition. *Thin Solid Films*. 2004; 466(1–2): 41—47. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.01.110>

7. Zyrianova A.S., Telesh E.V. Investigation of the electrophysical parameters of HfO<sub>2</sub>/Si thin film structures obtained by reactive ion beam sputtering. *Materials of the IX Inter. Scient. conf. "Materials and structures of modern electronics". Minsk, October 14–16, 2020. Belarus. St. Un-t. Minsk: BGU; 2020. P. 51—55. (In Russ.)*

8. Hino S., Nakayama M., Takashi K., Funakubo H., Tokumitsu E. Characterization of hafnium oxide thin films by source gas pulse introduced metalorganic chemical vapor deposition using amino-family Hf precursors. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2003; 42:(Part 1, 9B): 6015—6018. <https://doi.org/10.1143/JJAP42.6015>

9. Wu X., Landheer D., Graham M.J., Chen H.-W., Huang T.-Y., Chao T.-S. Structure and thermal stability of MOCVD ZrO<sub>2</sub> films on Si (100). *Journal of Crystal Growth*. 2003; 250(3–4): 479—485. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)00827-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)00827-3)

10. Ismailov T.A., Sarkarov T.E., Shahmaeva A.R., Shangereeva B.A. Technology of get defensive film of alumina for semiconductor instruments and integral schemes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2008; (1): 50—56. (In Russ.)

11. Romanov N., Mokrushina S. Gamma irradiation effect to MOS structures with thin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oxide. *Perspektivnye materialy*. 2018; (2): 17—24. (In Russ.). <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2018-2-17-22>

12. Gorshkov D.V., Sidorov G.Yu., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Marin D.V., Yakushev M.V. The effect of the growth temperature on the passivating properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films formed by atomic layer deposition on the CdHgTe surface. *Technical Physics Letters*. 2020; 46(8): 741—744. <https://doi.org/10.1134/S1063785020080064>

13. Arnold S.M., Cole B.E. Ion beam sputter deposition of low loss  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films for integrated optics. *Thin Solid Films*. 1988; 165(1): 1—9. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90673-6](https://doi.org/10.1016/0040-6090(88)90673-6)

14. Singh M.P., Shivashankar S.A. Low-pressure MOCVD of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films using aluminium acetylacetonate as precursor: nucleation and growth. *Surface and Coatings Technology*. 2002; 161(2–3): 135—143. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00470-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00470-X)

15. Martin I., Vetter M., Orpella A., Puigdollers J., Voz C., Marsal L.F., Pallares J., Alcubilla R. Characterization and application of a-SiC<sub>x</sub>:H films for the passivation of the c-Si surface. *Thin Solid Films*. 2002; 403–404: 476—479. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01648-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01648-0)

16. Arslambekov V.A., Kazarinova I.D., Gorbunova K.M. Oxidation of silicon. *Russian Chemical Reviews*. 1972; 41(1): 36—46. <https://doi.org/10.1070/RC1972v-041n01ABEH002027>

17. Borisova T.M., Kastro R.A. Study of dielectric properties of thin aluminium oxide layers grown by atomic layer deposition. *Trudy MFTI*. 2013; 5(1(17)): 21—25. (In Russ.)

18. Shamala K.S., Murthy L.C.S., Narasimha Rao K. Studies on optical and dielectric properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method. *Materials Science and Engineering B*. 2004; 106(3): 269—274. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.09.036>

19. Sze S.M. Physics of semiconductor devices. In 2 books. NY; Chichester Brisbane; Toronto; Singapore: Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons; 1981. Book 1. 456 p. (Russ. Transl.: Zi S. Fizika poluprovodnikovykh priborov. Moscow: Mir, 1984. V 2-kh kn. Kniga 1; 1984. 456 p.)

20. Ravdel' A.A., Ponomareva A.M. Short guide of physical-chemical quantities]. St. Petersburg: SpetsLit; 1998. 232 p. (In Russ.)

21. Brodskii A.M., Gurevich Yu.Ya., Pleskov Yu.V., Rotenberg Z.A. Modern photoelectrochemistry: Photoemission. Moscow: Nauka; 1974. 167 p. (In Russ.)

22. Baranochnikov M.L. Receivers and radiation detectors. Directory. Moscow: DMK press; 2012. 640 p. (In Russ.)

23. Patent (RU) No 205303 U1, IPC H01L 31/028. Kim A.S., Kolky A.N. A multi-element silicon *p-i-n*-photodiode with double-layer dielectric film. Appl.: 10.03.2021; publ.: 08.07.2021. (In Russ.). URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU205303U1\\_20210708](https://yandex.ru/patents/doc/RU205303U1_20210708)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Ким Александра Сергеевна** — инженер-технолог 2 категории, АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация; аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e-mail: [aleks6dodds@gmail.com](mailto:aleks6dodds@gmail.com)

**Серко Наталья Александровна** — инженер-технолог 2 категории; АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

**Хакушев Павел Евгеньевич** — канд. техн. наук, начальник производственно-технологического комплекса; АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

**Колкий Алексей Николаевич** — аспирант, инженер-технолог 2 категории; АО «НПО «Орион», ул. Косинская, д. 9, Москва, 111538, Российская Федерация

**Сергей Юрьевич Юрчук** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-3823>; e-mail: [yurchuk60@mail.ru](mailto:yurchuk60@mail.ru)

**Aleksandra S. Kim** — 2nd Category Engineer-Technologist; JSC «SPA «Orion», 9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russian Federation; Postgraduate Student, National University of Science and Technology «MISIS», 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: [aleks6dodds@gmail.com](mailto:aleks6dodds@gmail.com)

**Natalya A. Serko** — 2nd Category Engineer-Technologist; JSC «SPA «Orion», 9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russian Federation

**Pavel E. Khakuashev** — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Production-Technological Department; JSC «SPA «Orion», 9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russian Federation

**Aleksey N. Kolky** — Postgraduate Student, 2nd Category Engineer-Technologist; JSC «SPA «Orion», 9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russian Federation

**Sergey Yu. Yurchuk** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Semiconductor Electronics and Semiconductor Physics, National University of Science and Technology «MISIS», 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-3823>; e-mail: [yurchuk60@mail.ru](mailto:yurchuk60@mail.ru)

*Поступила в редакцию 26.02.2023; поступила после доработки 17.03.2023; принята к публикации 05.04.2023  
Received 26 February 2023; Revised 17 March 2023; Accepted 5 April 2023*

\* \* \*