

**ИОНЫЧЕВ В. К., ЧЕРАШЕВ Д. М.**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  $P-N$  ПЕРЕХОДА С ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫМ КОЛЬЦОМ  
В РЕЖИМЕ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ**

**Аннотация.** В статье приводится описание эффектов, оказывающих негативное влияние на величину напряжения лавинного пробоя. Проведено моделирование планарного  $p-n$  перехода с ограничительным кольцом в режиме лавинного пробоя с целью оптимизации защиты структуры от поверхностного пробоя.

**Ключевые слова:** ограничительное кольцо, ионизационный интеграл, пространственный заряд, электрическое поле.

**IONYCHEV V. K., CHERASHEV D. M.**

**SIMULATION OF  $P-N$  JUNCTION WITH RESTRICTIVE RING  
IN AVALANCHE BREAKDOWN MODE**

**Abstract.** The article describes the effects that have a negative impact on the magnitude of the avalanche breakdown voltage. A simulation of a planar  $p-n$  junction with restrictive rings in the avalanche breakdown mode was carried out in order to optimize protection of the structure from surface breakdown.

**Keywords:** restriction ring, ionization integral, space charge, electric field.

Планарный  $p-n$  переход, полученный диффузией примеси через диффузионное окно круглой формы в окисной пленке, имеет плоскую и цилиндрическую (искривлённую) части. В цилиндрической части  $p-n$  перехода, по сравнению с плоской частью, пробой структуры происходит при меньшем значении обратного напряжения, так как в этой части перехода ширина области пространственного заряда (ОПЗ) меньше, чем в плоской части. Вследствие меньшей ширины ОПЗ, в искривлённой части перехода также максимальное значение напряжённости электрического поля.

На границе раздела окисел-полупроводник и в самом окисле имеются заряды, как правило, положительные. Из-за этого поверхность кремния  $n$ -типа может стать обогащенной основными носителями заряда, вследствие чего ширина ОПЗ у поверхности сужается и проявляется поверхностный пробой структуры. Существует ряд методов защиты от поверхностного пробоя планарного  $p-n$  перехода: использование диффузионного охранного кольца, полевой обкладки, частичного вытравливания перехода, ограничительного (делительного) кольца [1]. Внедрение в структуру планарного  $p-n$  переход полевого ограничительного кольца требует оптимизации этого способа защиты структуры от поверхностного пробоя. Моделированию планарного  $p-n$  перехода с ограничительным

кольцом в режиме лавинного пробоя посвящена данная работа. Моделирование проводилось в САПР TCAD 7.0 в программе DESSIS [2].

Структура планарного перехода изображена на рисунке 1. Она представляет собой полупроводник  $n$ -типа с концентрацией донорной примеси  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (тип примеси – фосфор). Планарный переход образован при помощи диффузии бора через окно круглой формы в окисной пленке диаметром 1 мм. Концентрация легирующей примеси на поверхности  $p^+$ -области  $N_s = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Распределение примеси описывается функцией распределения Гаусса. Глубина залегания  $p$ - $n$  перехода 10 мкм. Поверхность защищена окислом  $\text{SiO}_2$ . Толщина окисла 0,1 мкм. Заряды в окисле отсутствуют. На основания полупроводника наносится металлический контакт, который образует с полупроводником омический контакт (катод). На  $p$ -область так же наносится омический контакт (анод).

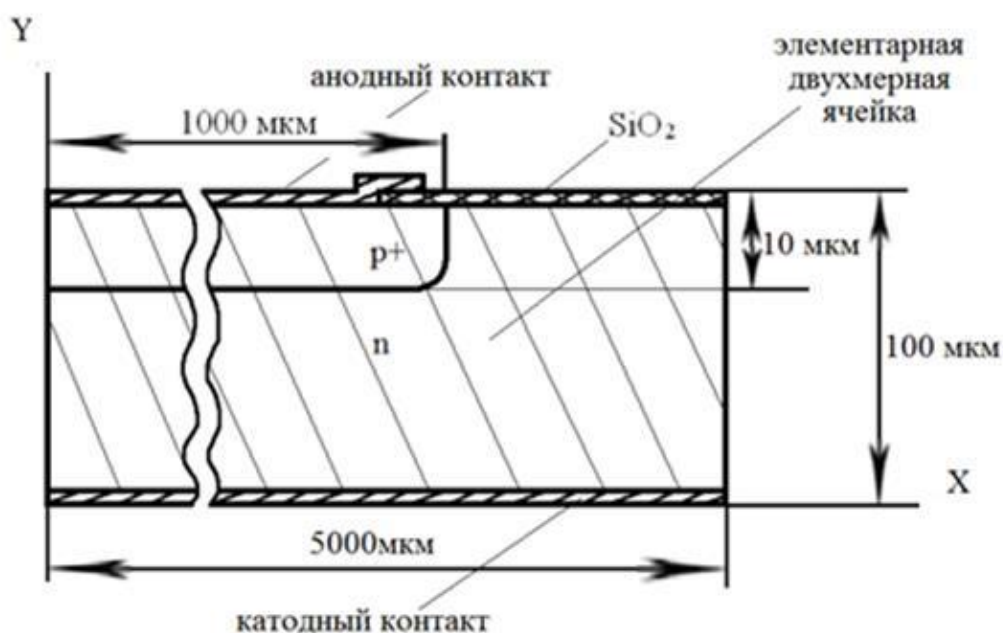


Рис. 1. Структура планарного  $p$ - $n$  перехода.

Результаты моделирования показали, что напряжение лавинного пробоя составляет 178,8 В. На рисунке 2 представлены распределение пространственного заряда, электрического поля и ионизационный интеграл в структуре планарного  $p$ - $n$  перехода при напряжении пробоя.

Ширина ОПЗ в плоской и цилиндрической части различается. В плоской части ОПЗ составляет 17,2 мкм, а в цилиндрической части – 14 мкм. Электрическое поле в искривленной части  $p$ - $n$  перехода максимально и составляет  $2,8 \times 10^5 \text{ В/см}$ . Пробой происходит не в плоской, а в цилиндрической части, так как ширина ОПЗ в этой части перехода меньше. Об этом свидетельствует ионизационный интеграл.

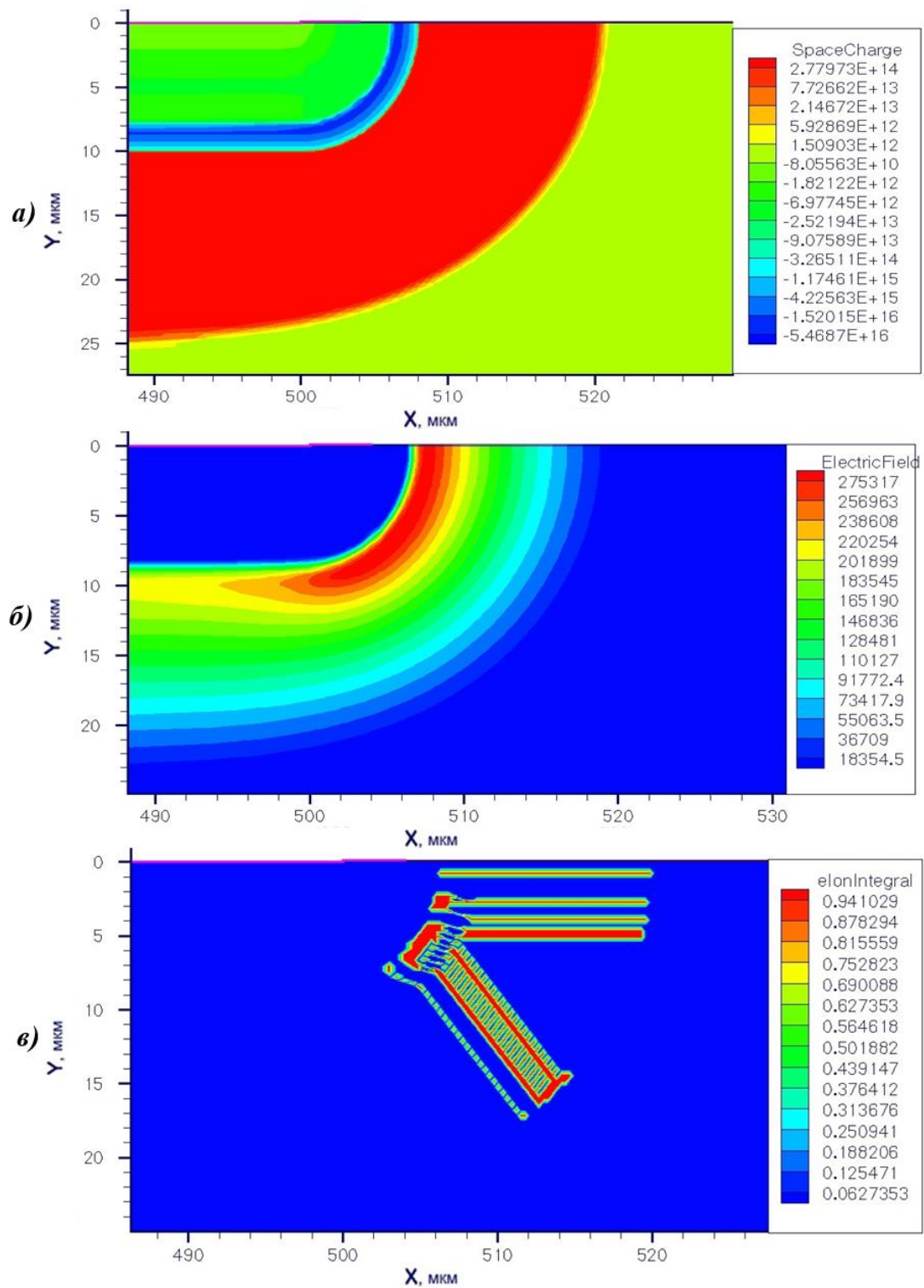


Рис. 2. Результаты моделирования планарного  $p-n$  перехода:

- а) распределение пространственного заряда;
- б) распределение электрического поля;
- в) ионизационный интеграл по сечению структуры.

На рисунке 3 представлено распределение пространственного заряда в  $p-n$  переходе при напряжении пробоя для различных величин поверхностной концентрации заряда в окисле.

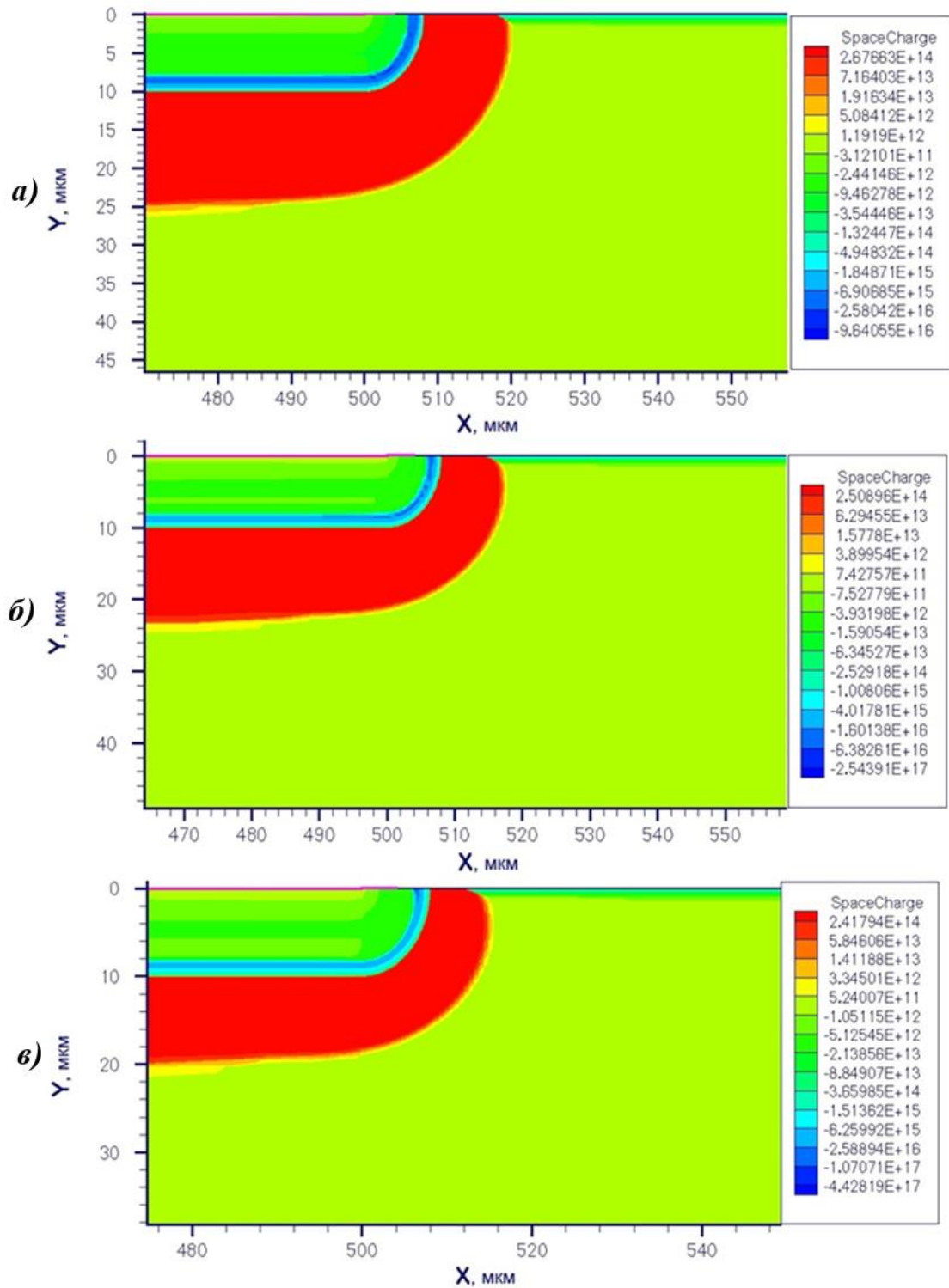


Рис. 3. Распределение ОПЗ для поверхностной концентрации заряда в окисле:  
 а)  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; б)  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; в)  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

При поверхностной концентрации заряда в окисле  $10^{11}$  см<sup>-2</sup> ширина ОПЗ в плоской части составляет 17,8 мкм, а на поверхности почти такая же, как в цилиндрической части перехода и составляет 13 мкм. При поверхностной концентрации заряда в окисле  $5 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> ОПЗ в плоской части соответствует 14,3 мкм, а на поверхности 9 мкм. При поверхностной концентрации заряда в окисле  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> ширина ОПЗ в плоской части и на поверхности соответственно равны 11 мкм и 6 мкм. Заряд в окисле существенно уменьшает ширину ОПЗ в приповерхностной области. Это связано с обогащением приповерхностной области подложки основными носителями заряда (электронами), увеличивается плотность объемного заряда в приповерхностной области и соответственно уменьшается ширина ОПЗ.

Зависимость напряжения лавинного пробоя от поверхностной концентрации заряда в окисле представлена в таблице 1.

Таблица 1

**Зависимость напряжения лавинного пробоя планарного *p-n* перехода от поверхностной концентрации заряда в окисле *SiO<sub>2</sub>***

Поверхностная концентрация заряда в окисле, см <sup>-2</sup>	Напряжение лавинного пробоя, В
$10^{10}$	178
$10^{11}$	172,5
$5 \times 10^{11}$	124,8
$10^{12}$	70,4
$2 \times 10^{12}$	27,6

Внедрение полевого ограничительного кольца в структуру планарного *p-n* перехода при его разработке позволяет избавиться от данных негативных эффектов.

Ограничительное кольцо представляет собой диффузионную *p*-область, аналогичную сильнолегированной части основного *p-n* перехода [3]. Расстояние между кольцом и основным *p-n*-переходом должно быть таким, чтобы обедненные области обоих *p-n* переходов перед лавинным пробоем соединились. В результате этого напряженность электрического поля перед пробоем не достигает критического значения. Если напряжение на *p-n* переходе продолжать увеличивать, то общая область пространственного заряда сложным образом огибает обе диффузионные области. Полевое ограничительное кольцо действует как делитель напряжения и заметно уменьшает кривизну границы обедненной области основного *p-n* перехода.

Для оптимизации полевого ограничительного кольца необходимо варьировать ширину ограничительного кольца и расстояние между основным переходом и ограничительным кольцом. Однако ширина ограничительного кольца не столь критична. Эффективность делительного кольца в части улучшения напряжения пробоя цилиндрического перехода снижается, если его ширина становится слишком малой. Необходимо делать ширину полевого кольца, по меньшей мере, равной толщине обедненной области плоского перехода при пробое [4].

При малом расстоянии между диффузионными областями основной переход отбирает малую часть обратного напряжения, то есть практически все обратное напряжение будет падать на ограничительном кольце, а максимальное пробивное поле будет находиться в обедненной области кольца. В этом случае эффект полевого кольца не значителен.

При большом расстоянии между диффузионными областями практически все обратное напряжение будет падать на основном переходе, и пробой будет наблюдаться на основном переходе. Эффективность кольца также незначительна.

Структура планарного  $p-n$ -перехода с полевым ограничительным кольцом представлена на рисунке 4.

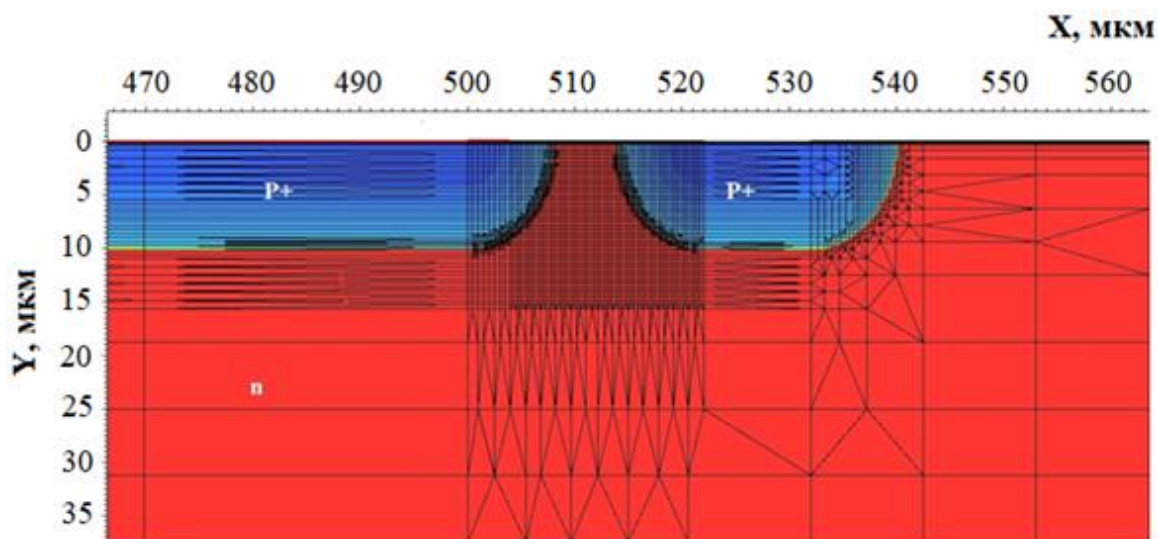


Рис. 4. Структура планарного  $p-n$  перехода с ограничительным кольцом.

Диаметр диффузионного окна в окисной пленке для создания делительного кольца брался равным 10 мкм. Моделирование  $p-n$  перехода с ограничительным кольцом проводилось при положительном заряде в окисле с поверхностной концентрацией  $N_s = 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Результаты моделирования показали, что при оптимальном расстоянии между переходом и кольцом 5 мкм, получено напряжение пробоя 223,7 В.

Распределение объемного заряда, электрического поля и ионизационный интеграл при пробое структуры с ограничительным кольцом представлены на рисунке 5.

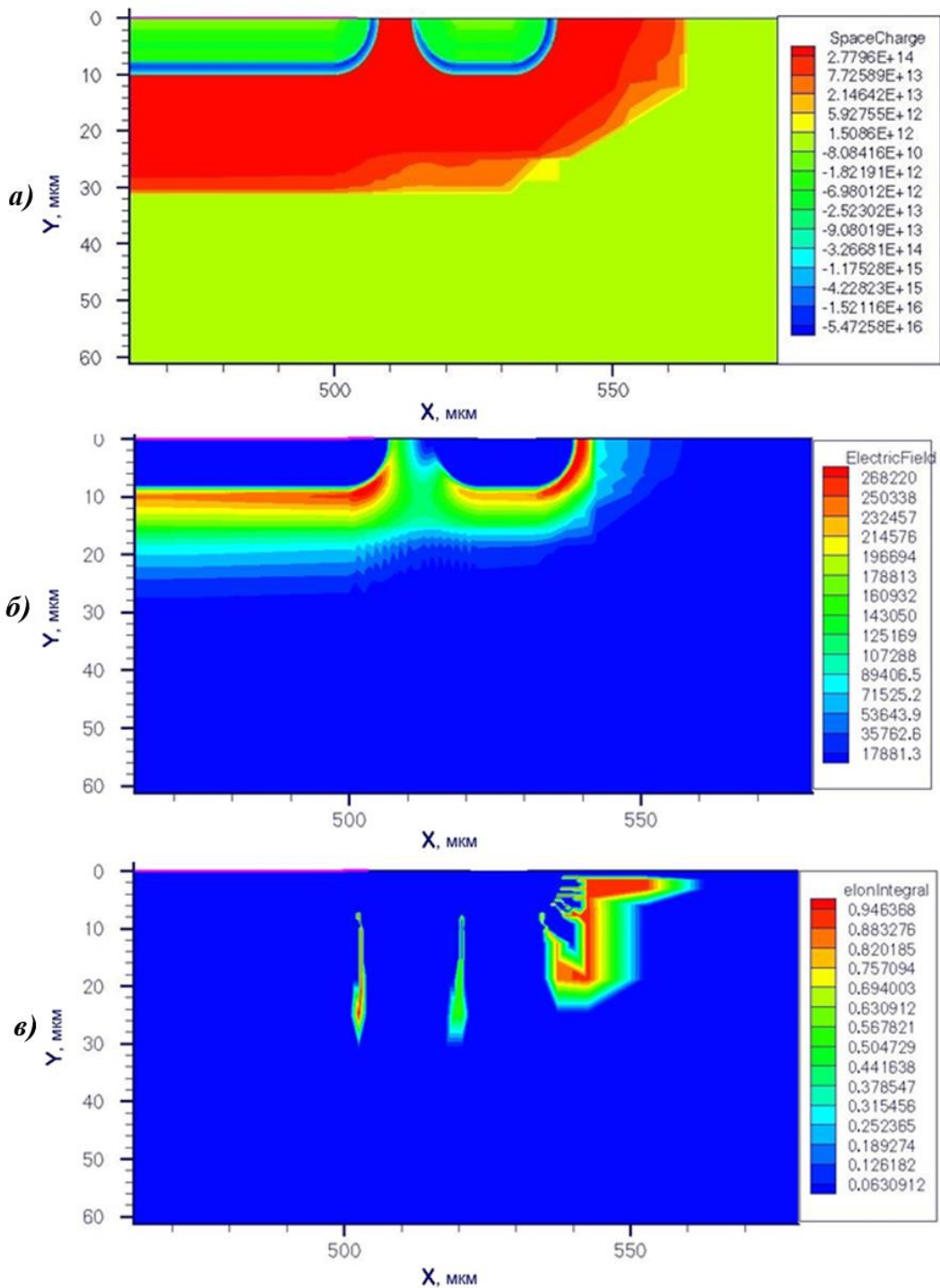


Рис. 5. Результаты моделирования планарного  $p-n$  перехода с ограничительным кольцом:

- а) распределение пространственного заряда; б) распределение электрического поля;
- в) ионизационный интеграл по сечению структуры.

При оптимальном подборе параметров полевого ограничительного кольца, можно значительно увеличить напряжение пробоя планарного  $p-n$  перехода. Для моделируемого диода с поверхностной концентрацией заряда в окисле  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  с помощью полевого ограничительного кольца при его оптимальных параметрах удалось увеличить напряжение пробоя с 124,8 до 223,7 В.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сережкин Ю. Н., Ионычев В. К. Проектирование полупроводниковых низкочастотных выпрямительных диодов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. – 60 с.
2. Горячкин Ю. В., Нестеров С. А., Сурин Б. П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
3. Блихер А. Физика тиристоров / пер. с англ. И. В. Грехова. – Л.: Энергоиздат. Ленинград. отделение, 1981. – 264 с.
4. Baliga В. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2008. – 2069 p.