

УДК 621.3.049.77.002

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРОБОЯ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА, ВЫЗВАННОГО ПОПАДАНИЕМ ТЯЖЕЛОЙ ЕДИНИЧНОЙ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ПЛАНАРНЫЙ СИЛОВОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР

**А. Ю. Красюков**, канд. техн. наук;  
**Е. В. Кузнецов**

Проведен сравнительный анализ стойкости вертикального силового ДМОП-транзистора и планарного силового МОП-транзистора к SEGR-эффекту с использованием системы приборно-технологического моделирования TCAD. Исследования показали, что замена вертикального силового ДМОП-транзистора на планарный силовой МОП-транзистор позволяет существенно увеличить стойкость схемы к SEGR-эффекту.

Мощные МОП-транзисторы широко используются в качестве переключательных элементов в схемах управления различными устройствами [1, 2]. Как правило, такие транзисторы должны иметь высокое пробивное напряжение в закрытом состоянии, малое сопротивление в открытом состоянии и малые задержки при переключении. К схемам, работающим в условиях космоса, предъявляются дополнительные требования, в частности, они должны без необратимых последствий выдерживать попадание тяжелых ионов, имеющих большую энергию.

Известно [3–5], что, попадая в полупроводник, тяжелый ион генерирует большое количество электронно-дырочных пар. Попадание тяжелой частицы в МОП-транзистор или КМОП-схему приводит к возникновению ряда негативных эффектов, получивших общее название "эффекты, вызванные попаданием единичной тяжелой частицы", или SEE (Single Event Effect).

Применительно к мощным МОП-транзисторам следует выделить эффект пробоя подзатворного диэлектрика, вызванный попаданием тяжелой частицы, или SEGR-эффект (Single Event Gate Rupture) [6, 7]. Особенно сильно SEGR-эффект проявляется в вертикальных ДМОП-транзисторах, когда тяжелая частица попадает перпендикулярно поверхности пластины в затвор прибора, как показано на рис. 1. Если транзистор закрыт и на стоке достаточно высокое напряжение (например 100 В), то при попадании частицы в канал происходит генерация электронно-дырочных пар, вызывающая перераспределение потенциала в объеме структуры. В результате высокое напряжение на стоке транзистора перераспределяется к его затвору. При этом электрическое поле резко возрастает и превышает критическое значение в подзатворном

диэлектрике, т. е. происходит его пробой. SEGR-эффект зависит от напряжений затвор—исток и сток—исток.

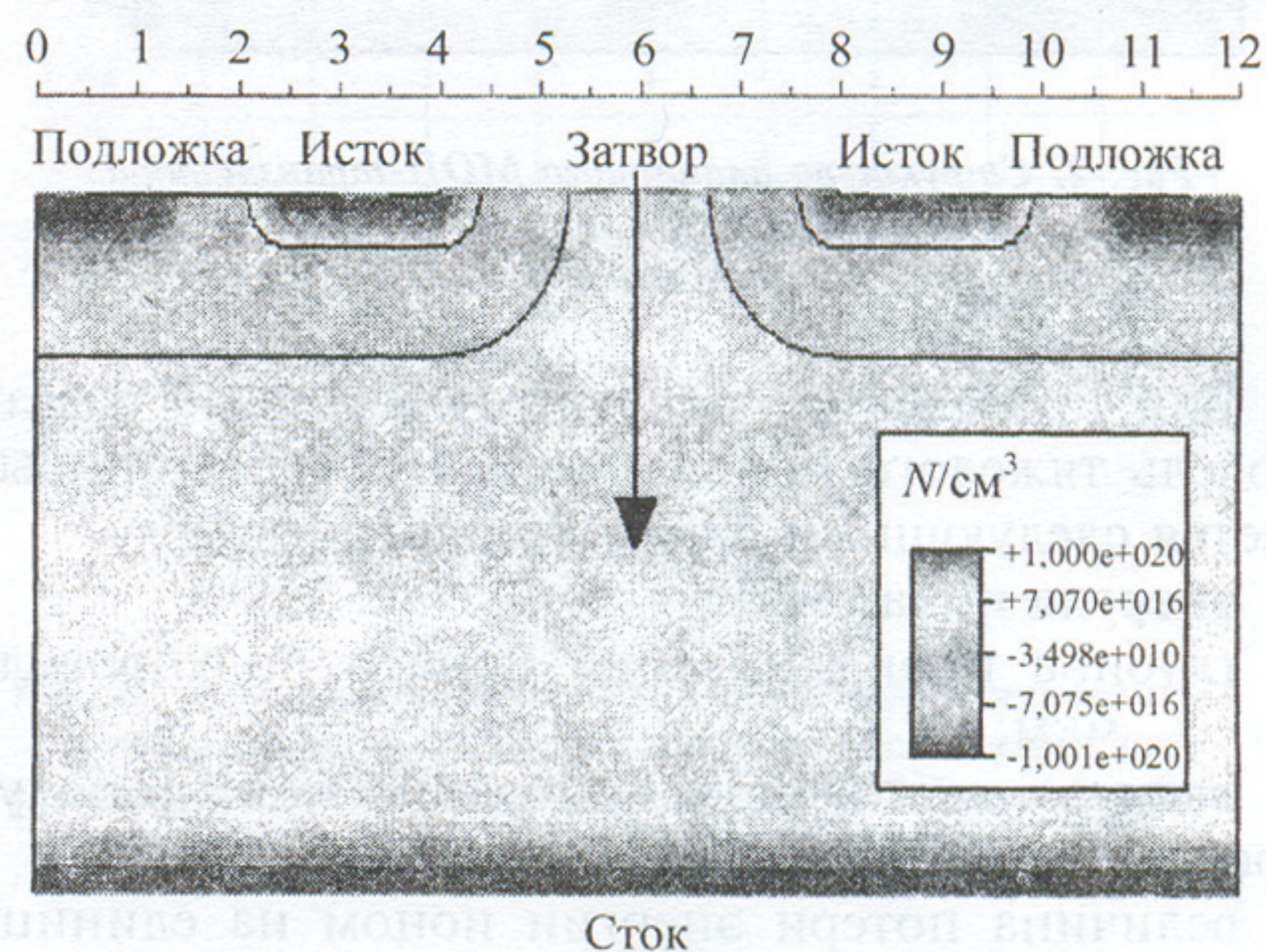


Рис. 1. Структура вертикального ДМОП-транзистора

В ряде работ предлагаются следующие способы увеличения стойкости вертикальных ДМОП-транзисторов к SEGR-эффекту [8]:

увеличение толщины подзатворного диэлектрика в месте попадания частицы;

снижение максимального напряжения между истоком и стоком.

Прибор считается устойчивым к действию тяжелой частицы, если в нем не возникает необратимых изменений при попадании иона с  $LET \geq 100 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ .

В данной работе с использованием системы приборно-технологического моделирования TCAD проводится сравнительный анализ стойкости вертикального силового ДМОП-транзистора и планарного силового МОП-транзистора к SEGR-эффекту. Рассматриваемые структуры по-

казаны на рис. 1–2. Ширина транзисторов 1 мкм, толщина подзатворного оксида — 50 нм. Приборы имеют сходные статические параметры: пробивное напряжение 48 В, пороговое напряжение 1,3 В, ток в открытом состоянии 80 мкА/мкм при  $U_{зи} = 5$  В,  $U_{си} = 2$  В.

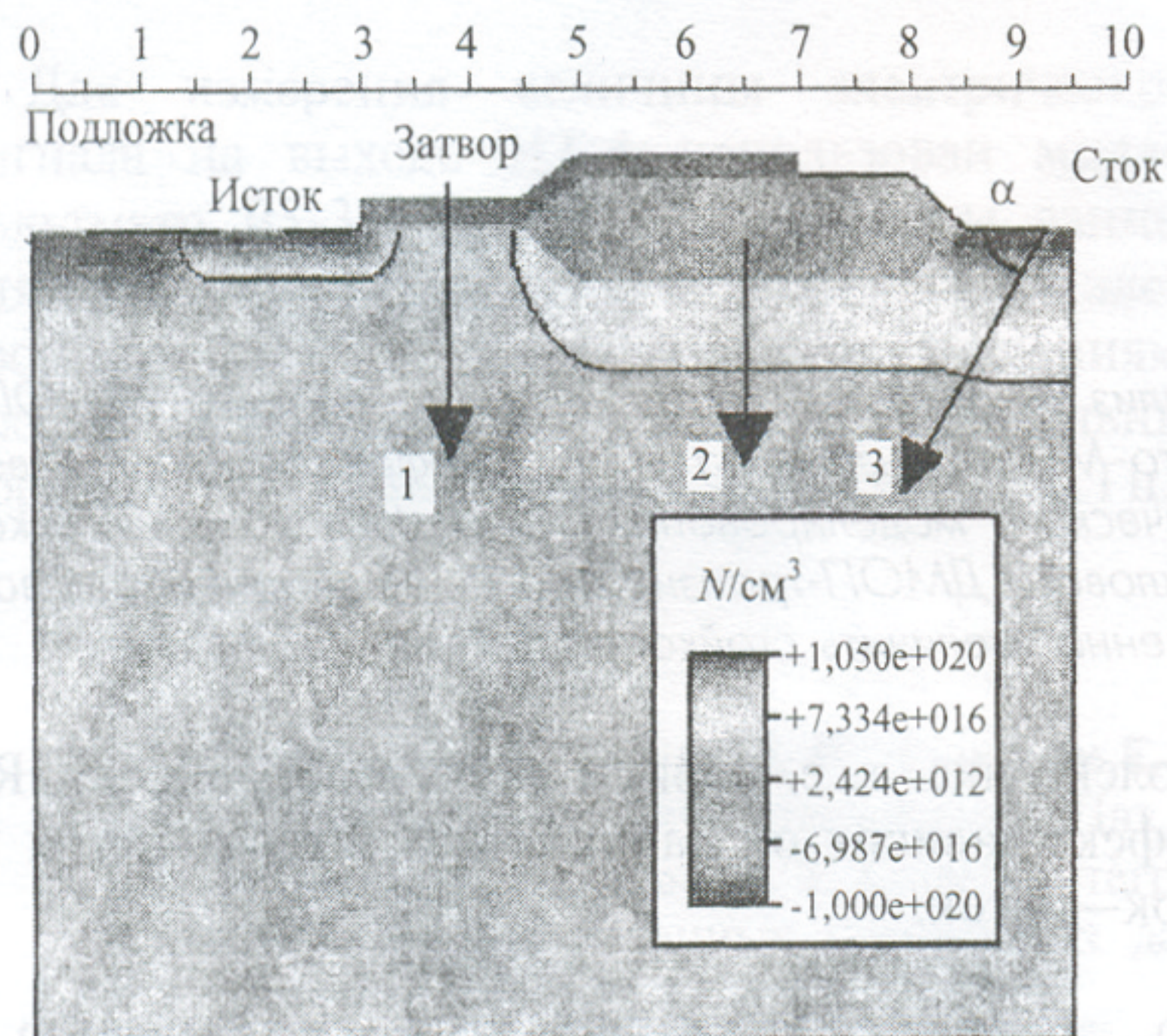


Рис. 2. Структура планарного МОП-транзистора. Стрелками показаны места попадания тяжелого иона при расчете

Для проведения расчетов необходимо задать модель тяжелого иона, который обычно описывается следующими параметрами (рис. 3):

- энергия иона, МэВ;
- глубина проникновения иона в полупроводник  $L$ , мкм;
- радиус сечения проникновения иона в полупроводник  $W = 0,07$  мкм [8];
- величина потери энергии ионом на единицу длины пройденного им пути или LET (Linear Energy Transfer).

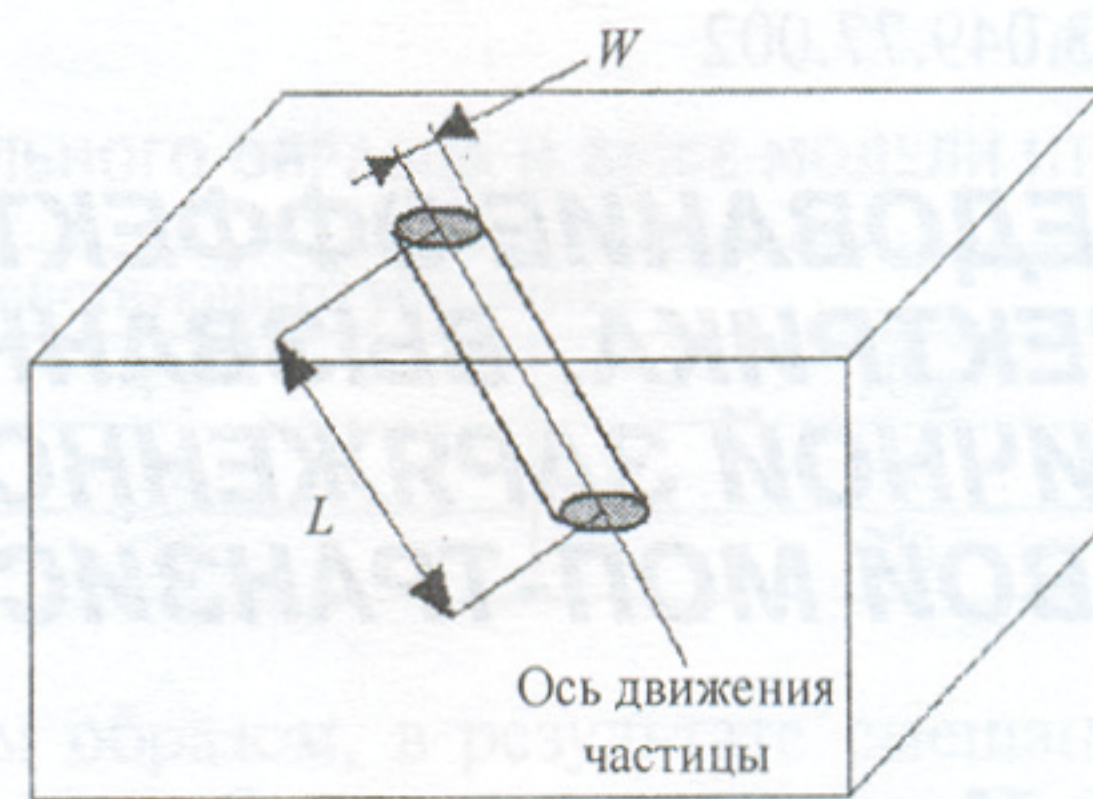


Рис. 3. Прохождение тяжелой частицы через вещество

LET определяется формулой

$$LET = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}, \text{ (МэВ} \cdot \text{см}^2\text{)/мг,} \quad (1)$$

- где  $\rho$  — объемная плотность материала, в который попадает тяжелая частица;
- $E$  — энергия частицы;
- $x$  — координата вдоль оси движения частицы.

Параметры некоторых тяжелых ионов представлены в табл. 1 [9].

Часто в программах приборного моделирования, например в DESSIS из пакета TCAD, требуется задать величину LET в единицах пКл/мкм. Для преобразования размерности необходимо использовать соотношение (2) и параметры материалов (см. табл. 2) [9]:

$$LET(\text{пКл/мкм}) = LET(\text{МэВ} \cdot \text{см}^2\text{)/мг} \frac{e\rho}{E_1} \cdot 100000, \quad (2)$$

- где  $e = 1,6 \cdot 10^{-7}$  пКл — заряд электрона;
- $\rho$  — объемная плотность материала, в который попадает тяжелая частица, г/см<sup>3</sup>;
- $E_1$  — энергия генерации одной электронно-дырочной пары, эВ.

Таблица 1

Элемент	Энергия, МэВ	Глубина проникновения, мкм	LET, (МэВ·см <sup>2</sup> )/мг
Cf-252	—	11–13	42
Br-81	220	40	40
Au-197	330	31	83
Cu	265	41	29
Ag	316	33	53
I	190	22	57
Au	345	28	82

Таблица 2

Параметры	Ge	Si	GaAs	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Тип	Полупроводник	Полупроводник	Полупроводник	Изолятор	Изолятор
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	5,33	2,33	144,63	60,08	140,27
Энергия генерации электронно-дырочной пары $E_1$ , эВ	2,8	3,6	4,8	17	10,8

Таким образом, для кремния соотношение (2) преобразуется в следующее соотношение, т. е.  $(100 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2)/(\text{мг} \cong 1 \text{ пКл/мкм})$ .

$$\text{LET}(\text{пКл/мкм}) = \text{LET}(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2)/\text{мг} \cdot 0,01035. \quad (3)$$

В расчете фиксировались распределения электрического поля в структурах в различные моменты времени после попадания тяжелой частицы в полупроводник, на основе чего были построены зависимости максимального электрического поля в подзатворном диэлектрике от времени.

На рис. 4–6 приведены результаты расчета максимального поля для различных типов транзисторов при  $U_{\text{си}} = 40 \text{ В}$ ;  $U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$ ;  $\text{LET} = 10 \text{ (МэВ}\cdot\text{см}^2)/\text{мг}$ : на рис. 4 — для верти-

Рис. 4. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в канал ДМОП-транзистора

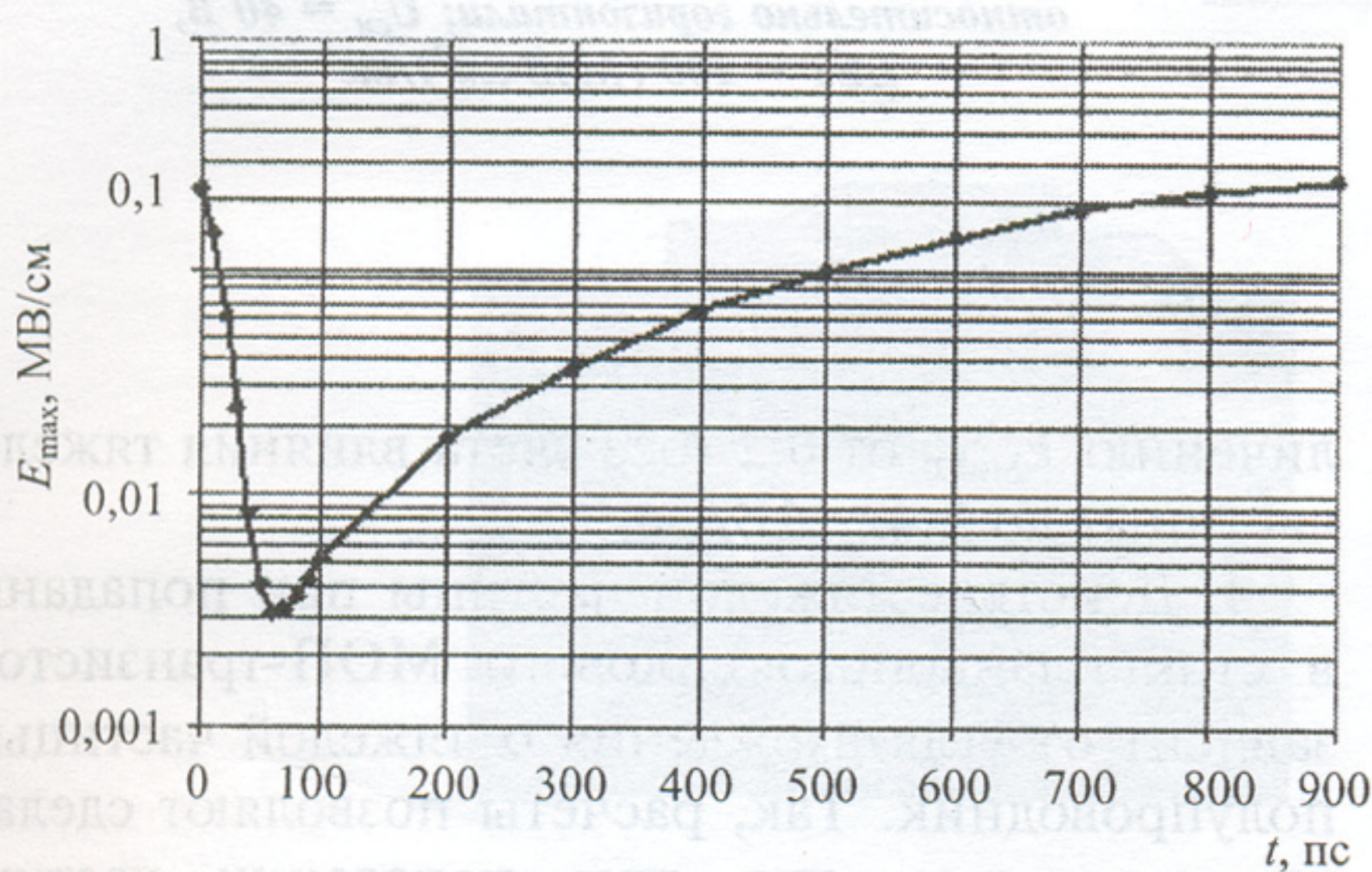


Рис. 6. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в слаболегированную область под LOCOS планарного силового МОП-транзистора

кального ДМОП-транзистора при попадании частицы в центр затвора (по стрелке, см. рис. 1); на рис. 5 — для планарного мощного МОП-транзистора при попадании частицы в центр затвора (по стрелке, сеч. 1, рис. 2); на рис. 6 — для планарного мощного МОП-транзистора при попадании частицы в центр слаболегированной области, расположенной под LOCOS (по стрелке, сеч. 2, рис. 2).

На рис. 7–9 показаны результаты расчета максимального поля для планарного мощного МОП-транзистора при попадании частицы в область стока (по стрелке, сеч. 3, рис. 2) при углах проникновения частицы относительно горизонтали  $\alpha = 90; 45; 22,5^\circ$ , разной величине LET и разном напряжении на затворе.

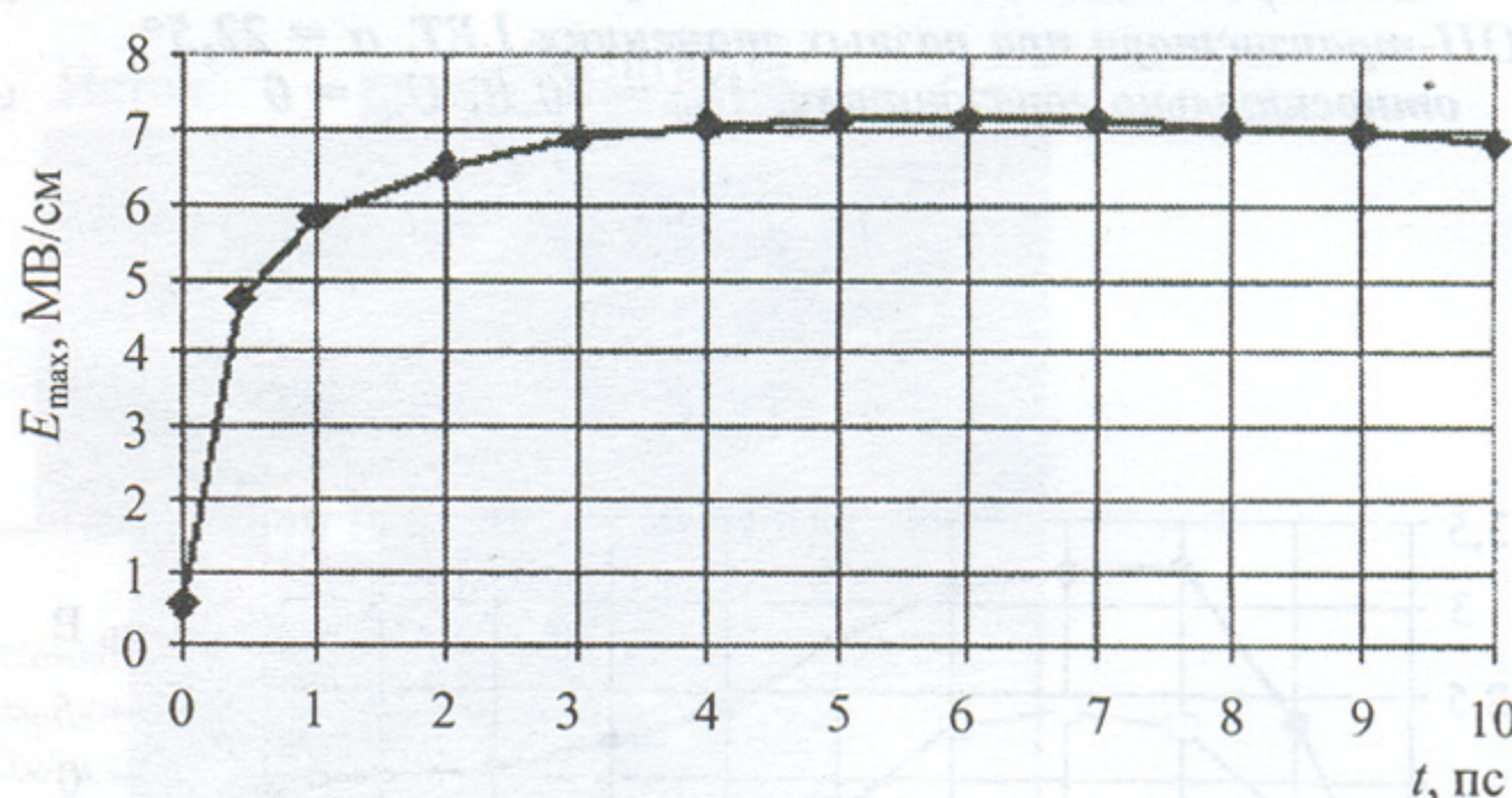
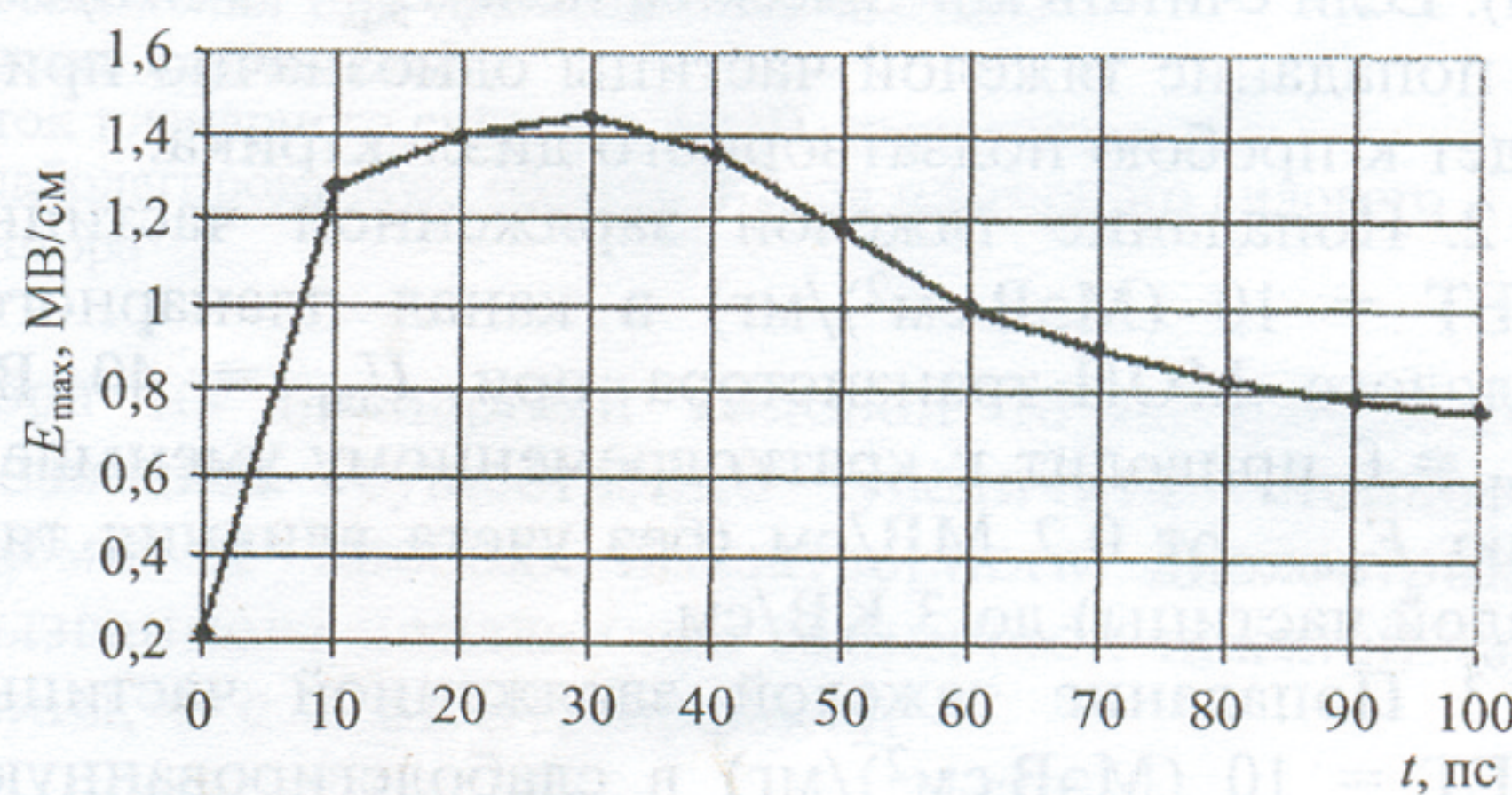


Рис. 5. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в канал планарного силового МОП-транзистора



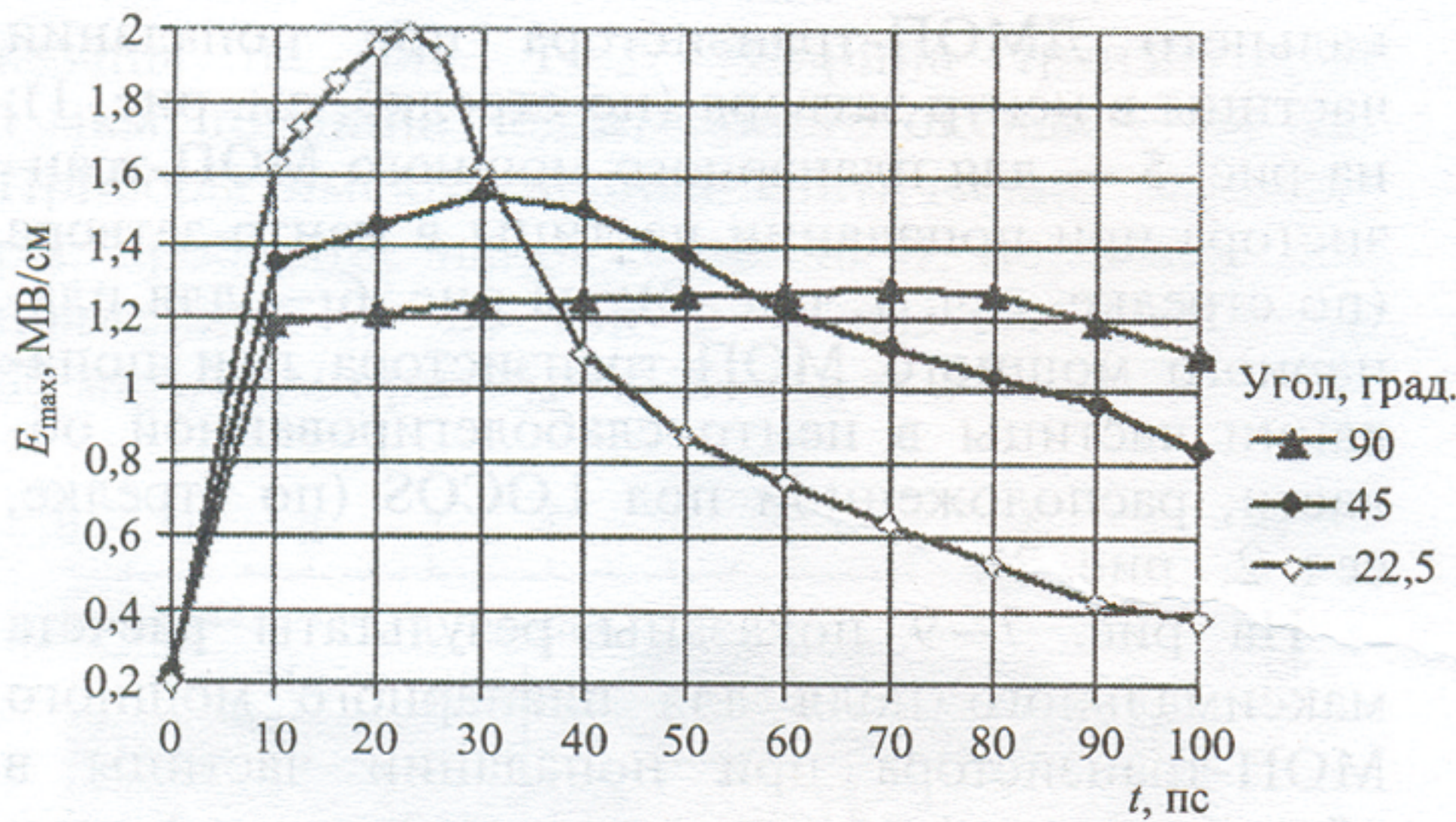


Рис. 8. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в область стока планарного силового МОП-транзистора при разных значениях LET,  $\alpha = 22,5^\circ$  относительно горизонтали,  $U_{си} = 40$  В,  $U_{зи} = 0$

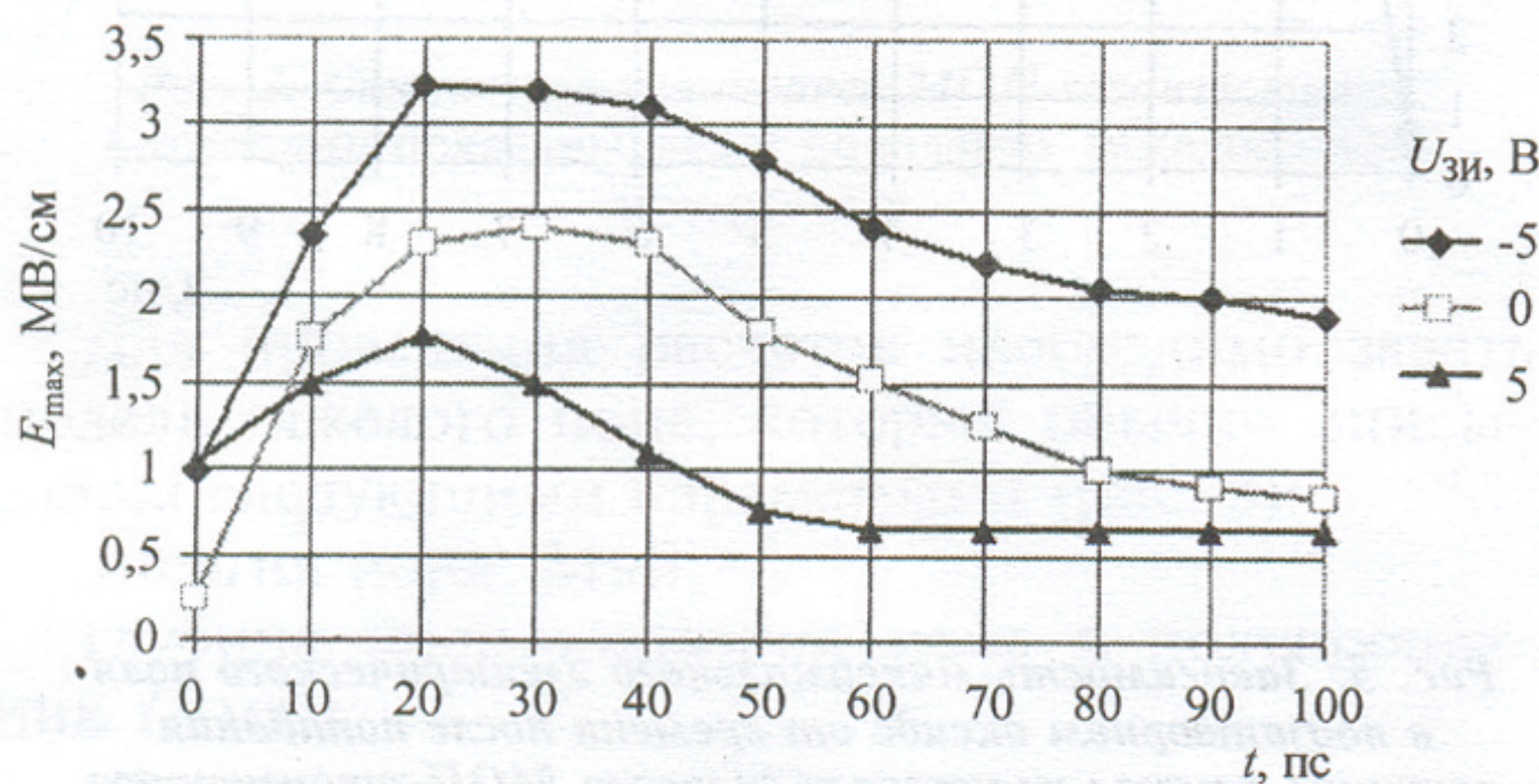


Рис. 7. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в область стока планарного силового МОП-транзистора под разными углами ( $\alpha$ ) относительно горизонтали

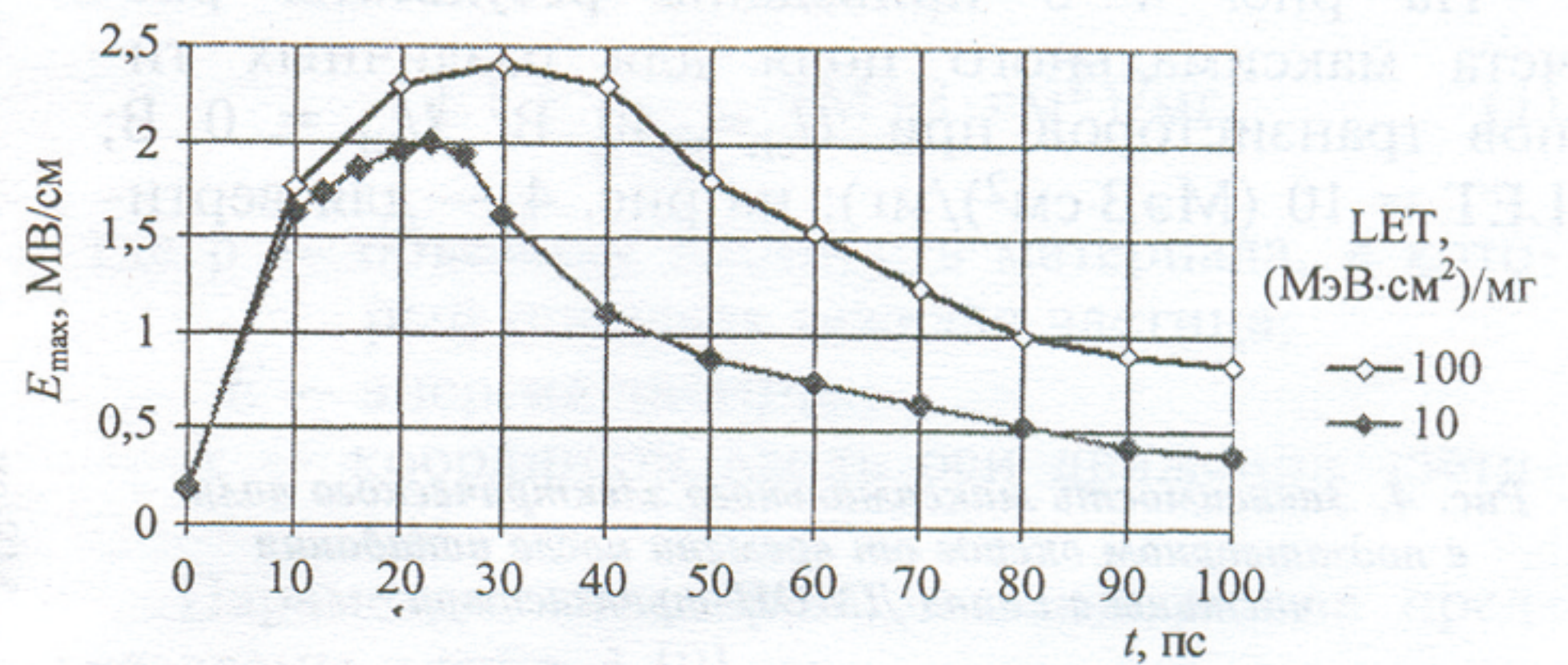


Рис. 9. Зависимость максимального электрического поля в подзатворном оксиде от времени после попадания частицы в область стока планарного силового МОП-транзистора при разных напряжениях  $U_{зи}$ ,  $\alpha = 22,5^\circ$  относительно горизонтали;  $U_{си} = 40$  В,  $LET = 100$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг

Результаты расчетов (см. рис. 7—9) позволяют сделать следующие выводы:

1. Попадание тяжелой заряженной частицы ( $LET = 10$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг) в канал вертикального ДМОП-транзистора при  $U_{си} = 40$  В,  $U_{зи} = 0$  приводит к увеличению максимального электрического поля в подзатворном диэлектрике  $E_{\max} = 0,5—7$  МВ/см (без учета влияния тяжелой частицы). Если считать критическим поле  $E_{кр} = 5$  МВ/см, то попадание тяжелой частицы однозначно приведет к пробое подзатворного диэлектрика.

2. Попадание тяжелой заряженной частицы ( $LET = 10$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг) в канал планарного силового МОП-транзистора при  $U_{си} = 40$  В,  $U_{зи} = 0$  приводит к кратковременному уменьшению  $E_{\max}$  от 0,2 МВ/см (без учета влияния тяжелой частицы) до 3 КВ/см.

3. Попадание тяжелой заряженной частицы ( $LET = 10$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг) в слаболегированную часть  $n$ -типа планарного силового МОП-транзистора при  $U_{си} = 40$  В,  $U_{зи} = 0$  приводит к уве-

личению  $E_{\max}$  от 0,2 (без учета влияния тяжелой частицы) до 1,42 МВ/см.

4. Действие тяжелой частицы при попадании в сток планарного силового МОП-транзистора зависит от угла вхождения  $\alpha$  тяжелой частицы в полупроводник. Так, расчеты позволяют сделать вывод о том, что при попадании частицы ( $LET = 10$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг) в сток под углами  $\alpha \leq 22,5^\circ$  относительно горизонтали происходит наибольшее увеличение  $E_{\max}$  от 0,2 до 2 МВ/см.

5. При попадании тяжелой частицы в сток планарного силового МОП-транзистора под углом  $\alpha = 22,5^\circ$  при  $U_{зи} = 0$ ,  $U_{си} = 40$  В увеличение LET частицы на порядок от 10 до 100 (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг приводит лишь к незначительному увеличению  $E_{\max}$  — от 2 до 2,35 МВ/см.

6. При положительных  $U_{зи} = 5$  В и  $U_{си} = 40$  В попадание частицы, имеющей  $LET = 100$  (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг, в сток планарного силового МОП-транзистора под углом  $\alpha = 22,5^\circ$  приводит

к уменьшению  $E_{\text{макс}}$  от 2,4 (максимальное поле при  $U_{\text{зи}} = 0$ ) до 1,7 МВ/см.

7. При отрицательных  $U_{\text{зи}} = -5$  В и  $U_{\text{си}} = 40$  В попадание частицы, имеющей LET = 100 (МэВ·см<sup>2</sup>)/мг, в сток планарного силового МОП-транзистора под углом  $\alpha = 22,5^\circ$  приводит к увеличению  $E_{\text{макс}}$  от 2,4 (максимальное поле при  $U_{\text{зи}} = 0$ ) до 3,3 МВ/см.

Таким образом, установлено, что наиболее сильное увеличение электрического поля в подзатворном оксиде планарного силового МОП-транзистора происходит при одновременном выполнении двух условий:

- попадании частицы в область максимального потенциала (т. е. в сток,  $U_{\text{си}} = 40$  В) под малым углом относительно горизонтали;

пробую его подзатворного диэлектрика. Для иллюстрации эффектов, происходящих в объеме полупроводника при попадании тяжелой частицы, на рис. 10 показаны распределения потенциала в структурах силовых вертикального ДМОП и планарного МОП-транзисторов. В отличие от ДМОП-транзистора в планарном силовом МОП-транзисторе имеется расширенный электрод затвора, который сдерживает распределение потенциала от стока к каналу. Таким образом, потенциал подзатворной области слабо меняется от внешних условий.

Проведенные исследования показали, что замена вертикального силового ДМОП-транзис-

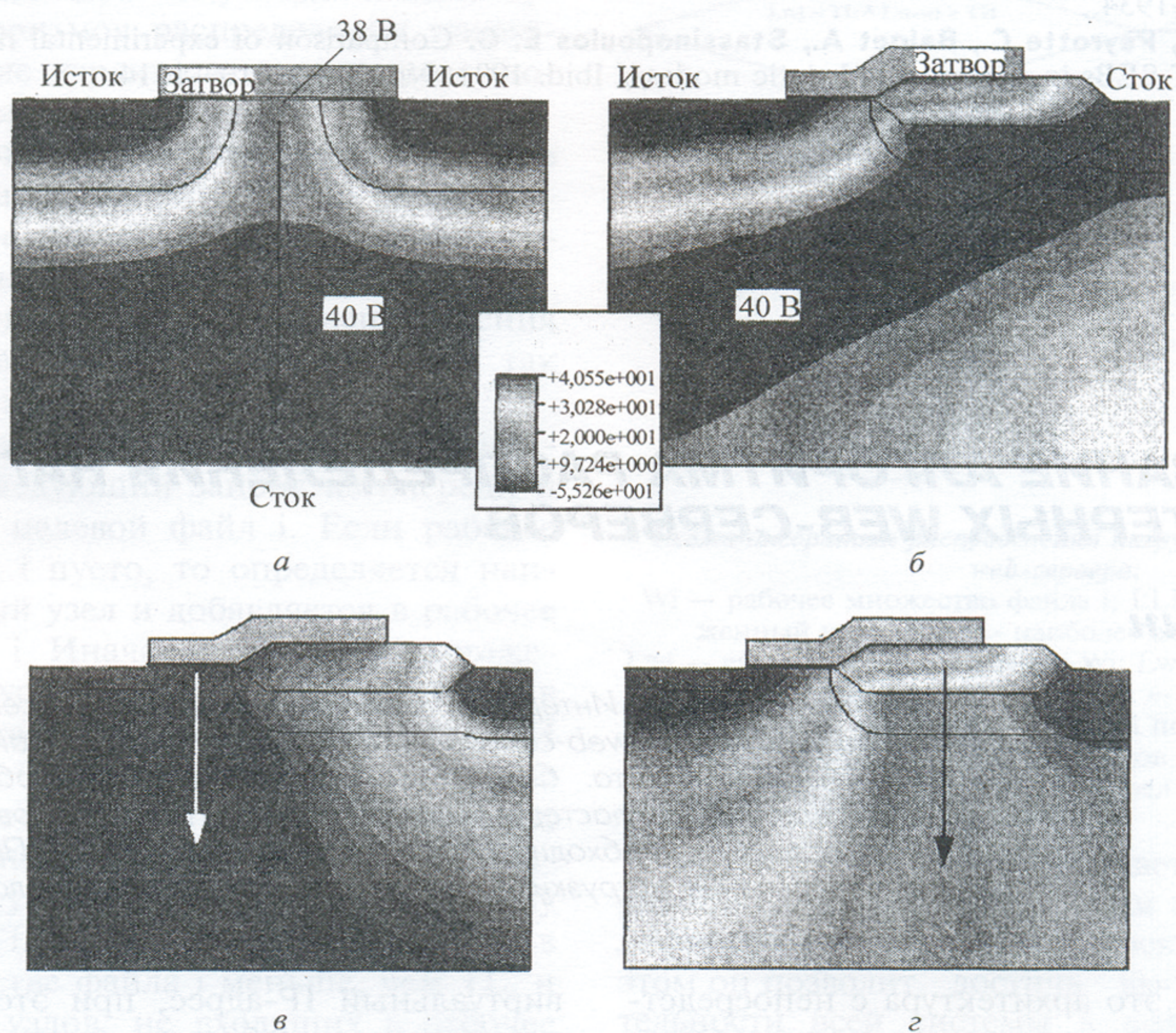


Рис. 10. Распределение потенциала в момент достижения  $E_{\text{макс}}$  при попадании частицы вдоль обозначенных стрелками направлений:

- а — в затвор силового ДМОП-транзистора; б — в сток планарного силового МОП-транзистора;
- в — в затвор планарного силового МОП-транзистора; г — в слаболегированную область *n*-типа планарного силового МОП-транзистора

- большом отрицательном напряжении на затворе  $|U_{\text{зи}}| > 5-10$  В.

В то же время попадание тяжелой частицы в затвор вертикального ДМОП-транзистора уже при  $U_{\text{зи}} = 0$ ,  $U_{\text{си}} = 40$  В однозначно приводит к

тора на планарный силовой МОП-транзистор позволяет существенно увеличить стойкость схемы к пробую подзатворного диэлектрика, вызванному попаданием единичной тяжелой частицы, т. е. к SEGR-эффекту.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Baliga B. J.** An overview of smart power technology// IEEE Trans. Electron Devices. 1991. № 7. P. 1568—1575.
2. **Воронин П. А.** Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. — М.: Додэка-XXI, 2001. — 384 с.
3. **Wallmark T., Marcus S. M.** Minimum size and maximum packaging density of non-redundant semiconductor devices// Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 286—298.
4. **Binder D., Smith E. C., Holman A. B.** Satellite anomalies from galactic cosmic rays// IEEE Trans. on Nuclear Science. 1975. V. NS-22. № 6. P. 2675—2680.
5. **May T. C., Woods M. H.** Alpha-particle-induced soft errors in dynamic memories// IEEE Trans. on Electron Devices. 1979. V. ED-26. № 1. P. 2—9.
6. **Fischer T. A.** Heavy-ion-induced, gate-rupture in power MOSFETs// IEEE Trans. on Nuclear Science. 1987. V. 34. № 6. P. 1786—1791.
7. **Titus J., Wheatley C. F.** Experimental studies of single-event gate rupture and burnout in vertical power MOSFETs// Ibid. 1996. V. 43. № 2. P. 533—545.
8. **Titus J. L., Wheatley C. F., Burton D. I., Allenspach M., Brews J., Schrimpf R., Galloway K., Mouret I., Pease R. L.** Impact of Oxide Thickness on SEGR; Development of a Semi-Empirical Expression// Ibid. 1995. № 12. P. 1928—1934.
9. **Calvel P., Peyrotte C., Baiget A., Stassinopoulos E. G.** Comparison of experimental measurements of power MOSFET SEBs in dynamic and static modes// Ibid. 1991. № 12. P. 1310—1314.

*Статья поступила в редакцию в январе 2007 г.*

УДК 004.4

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ДЛЯ КЛАСТЕРНЫХ WEB-СЕРВЕРОВ**

**Зар Ней Лин**

*С ростом популярности Интернета увеличивается число посещений web-сайтов. При этом из-за перегрузки web-серверы наиболее популярных сайтов имеют неудовлетворительное время ответа. Одним из решений данной проблемы является построение web-сервера на кластере компьютеров. Для балансирования нагрузки кластерных web-серверов необходимы специальные алгоритмы. Предлагается новый алгоритм распределения нагрузки, учитывающий как нагрузку узлов, так и локализацию ссылок.*

Web-кластер — это архитектура с непосредственными связями, расположенная в одном месте и имеющая единый виртуальный IP-адрес. Построение web-серверов на кластере компьютеров дает следующие преимущества: выигрыш в стоимости по сравнению с системой на основе суперкомпьютера; высокая производительность; естественная распределенность и наращиваемость системы; высокие надежность и устойчивость к отказам.

Кластерные web-серверы можно разделить на два типа — централизованные и распределенные [1]. В *централизованных* системах все запросы направляются на выделенный узел. В таком web-сервере все компьютеры кластера имеют один

виртуальный IP-адрес, при этом на каждом из компьютеров работает отдельный web-сервер. Все запросы клиентов поступают на узел, являющийся координатором или распределителем нагрузки. Координатор на основании своего алгоритма распределения нагрузки распределяет запросы между web-серверами. При *распределенном* способе построения все компьютеры кластера также имеют один IP-адрес, но между стекком TCP/IP и драйвером сетевой карты каждого компьютера внедряется фильтр, который определяет, какой из серверов должен обработать запрос. Все серверы в кластере фильтруют трафик, и только определенный сервер отвечает на запрос.