

Оптимизация комплементарного биполярного технологического процесса изготовления ИМС с использованием САПР TCAD

Виноградов Р. Н., Дроздов Д. Г., Корнеев С. В.

Представлены результаты оптимизации комплементарного биполярного технологического процесса с использованием современной системы автоматизированного проектирования TCAD компании SYNOPSIS. Определены предельные возможности варьирования технологических режимов с целью увеличения пробивного напряжения изоляционного кармана р-п-р транзистора.

Введение

Основы биполярной комплементарной технологии были заложены НИИ «Пульсар» уже в 60-е годы, когда были созданы первые планарные кремниевые р-п-р транзисторы. Производство серии кремниевых СВЧ р-п-р транзисторов началось с транзистора КТ363 с граничной частотой 1 ГГц. Разработка в 70-х годах серии малощумящих СВЧ р-п-р транзисторов (КТ3123, КТ658, КТ691) закончилась созданием р-п-р транзистора с граничной частотой 15 ГГц.

Это экспериментально доказало возможность создания комплементарной биполярной технологии, обеспечивающей создание в едином технологическом цикле п-п-п и р-п-р транзисторов, близких не только по статическим, но и по динамическим параметрам, включая СВЧ диапазон.

В начале 80-х годов ФГУП «НПП «Пульсар» одновременно с американской фирмой «Analog Devices» разработало и внедрило высокочастотную комплементарную биполярную технологию с использованием изоляции р-п переходом, которая позволила создавать монолитные микросхемы на комплементарных р-п-р и п-п-п транзисторах с граничными частотами более 2 ГГц при напряжении пробоя коллектор-эмиттер более 30 В (рис. 1).

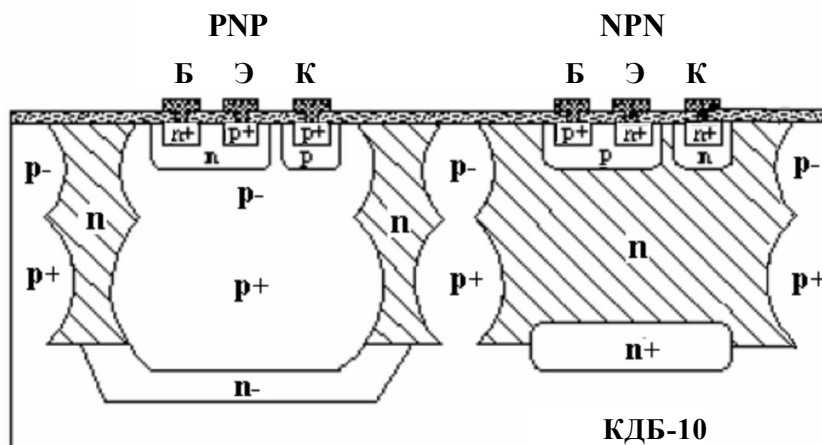


Рис. 1.

Структура с вертикальными СВЧ р-п-р и п-п-п транзисторами

Оптимизация технологического процесса

В процессе изготовления ИМС по данной технологии крайне актуальной является задача оптимизации технологического процесса и последующей коррекции технологических режимов для получения заданных параметров интегральных элементов и увеличения выхода годных микросхем.

При оптимизации комплементарного биполярного технологического процесса выделим ряд вопросов, на которые стоит обратить особое внимание:

1. увеличение выхода годных по партиям (за счёт запаса по пробивному напряжению изоляции р-п-р транзистора);
2. увеличение пробивного напряжения коллекторного перехода ($U_{кэ} > 33В$);
3. уменьшение разницы между статическими параметрами р-п-р и п-р-п транзисторов;
4. улучшение частотных свойств транзисторов.

В данной работе будет рассмотрен вопрос, связанный с увеличением пробивного напряжения изоляционного кармана р-п-р транзистора.

Наиболее целесообразным для решения поставленной задачи является использование САПР TCAD, который позволяет осуществлять моделирование технологического процесса изготовления ИМС, при этом не проводить большого количества дорогостоящих экспериментов. Более того, данная программа позволяет получать не только технологические параметры интегральных элементов, но и приборные параметры.

Для расчёта технологического процесса создания скрытых слоёв в полупроводниковой подложке использовался инструмент DIOS, позволяющий моделировать диффузию примеси из газовой фазы. При этом для расчёта диффузионных профилей использовалась модель Conventional, коэффициенты диффузии в которой берутся на основании модели SUPREM-3 [1].

Для расчёта напряжения пробоя использовался метод, основанный на решении уравнений диффузионно-дрейфовой модели и вычислении ионизационных интегралов [2]. Программа, решая уравнение Пуассона для каждого значения потенциала, получает распределение электрического поля. После этого вычисляется ионизационный интеграл. Условием пробоя считается равенство последнего единице. Моделью лавинной генерации носителей выбрана модель Ван Оверштрайтена - де Мана, наиболее подходящая для рассматриваемых концентраций и, следовательно, полей р-п перехода.

Для увеличения пробивного напряжения коллектор-изоляция р-п-р транзистора (слой п- на рисунке 1) необходимо увеличить напряжение пробоя для скрытого слоя р+ в скрытом слое п- ($U_{р+п-}$) до этапа эпитаксиального роста плёнки. Это обусловлено тем, что на этапе эпитаксиального выращивания, а также последующего смыкания слоёв для образования коллектора р-п-р транзистора пробивное напряжение растёт на почти фиксированную величину $\approx 8 - 10 В$.

Методы увеличения пробивного напряжения $U_{р+п-}$ можно разделить на две подгруппы:

1. технологические:
 - а) увеличение времени разгонки слоя р+;
 - б) уменьшение дозы легирования скрытого слоя п-;
2. конструктивно-технологические:

- а) использование окна одного размера для создания двух скрытых слоёв;
- б) щелевая и полная диэлектрическая изоляция элементов ИМС.

Поскольку целью данной работы ставилась оптимизация, а не модернизация технологического процесса, то были рассмотрены только технологические методы увеличения напряжения U_{p+n-} .

Уменьшения концентрации в области перехода можно добиться за счёт снижения дозы легирования слоя n-. Сейчас при производстве используется доза легирования $Q = 15$ мкКл/см², позволяющая получить пробивное напряжение $U_{p+n-} = 28$ В. При уменьшении дозы легирования до значения $Q = 5$ мкКл/см² согласно расчётам получаем пробивное напряжение $U_{p+n-} = 36$ В. На рис. 2 представлена соответствующая зависимость $U_{p+n-}(Q)$ (точками отмечены экспериментальные данные).

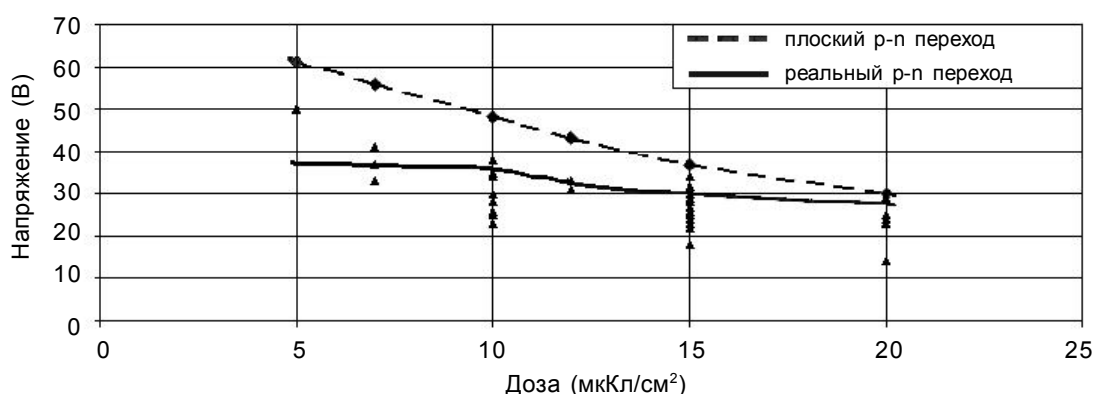


Рис. 2.

Зависимость пробивного напряжения от дозы легирования слоя n-

На рис. 2 приведено сравнение реального и плоского p-n переходов. На основе этих зависимостей видно, что кривизна перехода существенно влияет на пробивное напряжение. Поэтому можно сделать вывод: щелевая изоляция элементов ИМС может давать существенное увеличение по пробивному напряжению, поскольку в этом случае области, где краевые эффекты значительно влияют на уменьшение пробивного напряжения, заменены областями с диэлектрической изоляцией.

Ограничивающим фактором уменьшения дозы легирования слоя n- будет прокол изоляции, поскольку с уменьшением концентрации и при увеличении напряжения области пространственного заряда переходов p+/n- и n-/p(подложка) сильнее проникают в область n-.

Для наглядности представления прокола на рис. 3 приведено сравнение структур, для которых: а) не наблюдается прокол изоляции; б) наблюдается прокол изоляции.

Для структуры со стандартными временами отжига и дозой легирования слоя n напряжение прокола составляет ≈ -370 В. Оценка изменения границы ОПЗ для стандартных времён разгонки представлена на рис. 4.

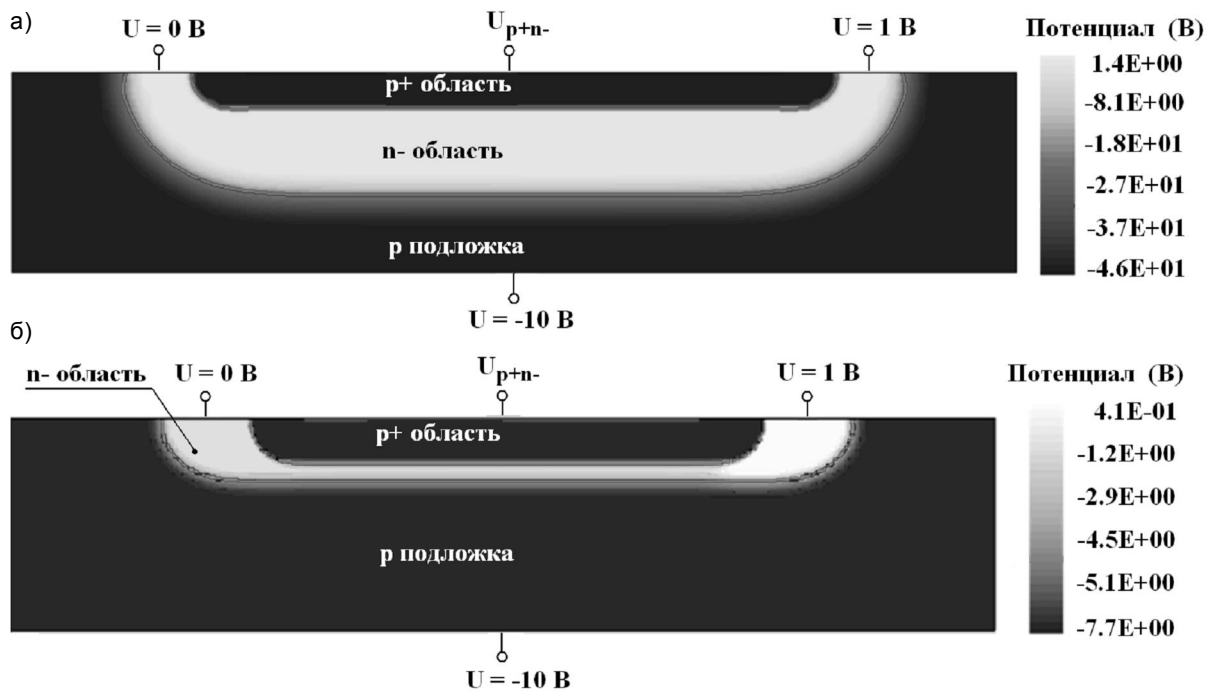


Рис. 3.
Структура: а) без прокола; б) с проколом

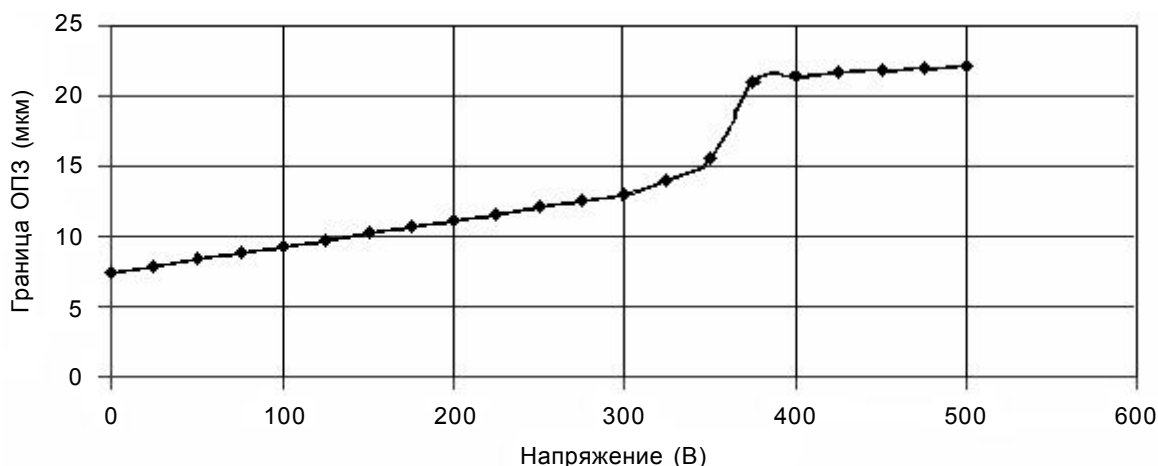


Рис. 4.
Изменение границы области пространственного заряда от приложенного напряжения U_{p+n-}

Для оценки величины напряжения прокола был предложен следующий метод: между двумя контактами к n- области изоляции прикладывается напряжение 1В. Далее снимается зависимость тока через n- область от прикладываемого напряжения на p+ область. При достижении напряжения прокола произойдёт существенное уменьшение тока. На рис. 5 представлена зависимость тока через n- область от напряжения на p+ область для стандартного режима. Видно, что величина напряжения прокола совпадает с величиной, полученной из оценки изменения границы ОПЗ.

Также на рис. 5 представлены зависимости тока через n- область от напряжения на p+ область для структур с дозами легирования слоя n- $Q=7.5$ мкКл/см² и $Q=5$ мкКл/см². Видно, что при уменьшении дозы до 5 мкКл/см² происходит уменьшение

напряжения прокола в 2, 3 раза. Видно, что на этапе формирования скрытых слоёв напряжение прокола имеет величину существенно больше, чем напряжения пробоя U_{p+n} . Однако при проведении дальнейших технологических операций по созданию транзисторов напряжение прокола существенно уменьшится. Это обусловлено тем, что глубина перехода $p+n$ - по сравнению с глубиной перехода n/p (подложка) растёт значительно быстрее. Кроме того, реальные глубины переходов имеют существенный разброс (порядка 1-2 мкм). Поэтому с целью выработки маршрута для увеличения выхода годных необходимо иметь существенный запас по напряжению прокола.

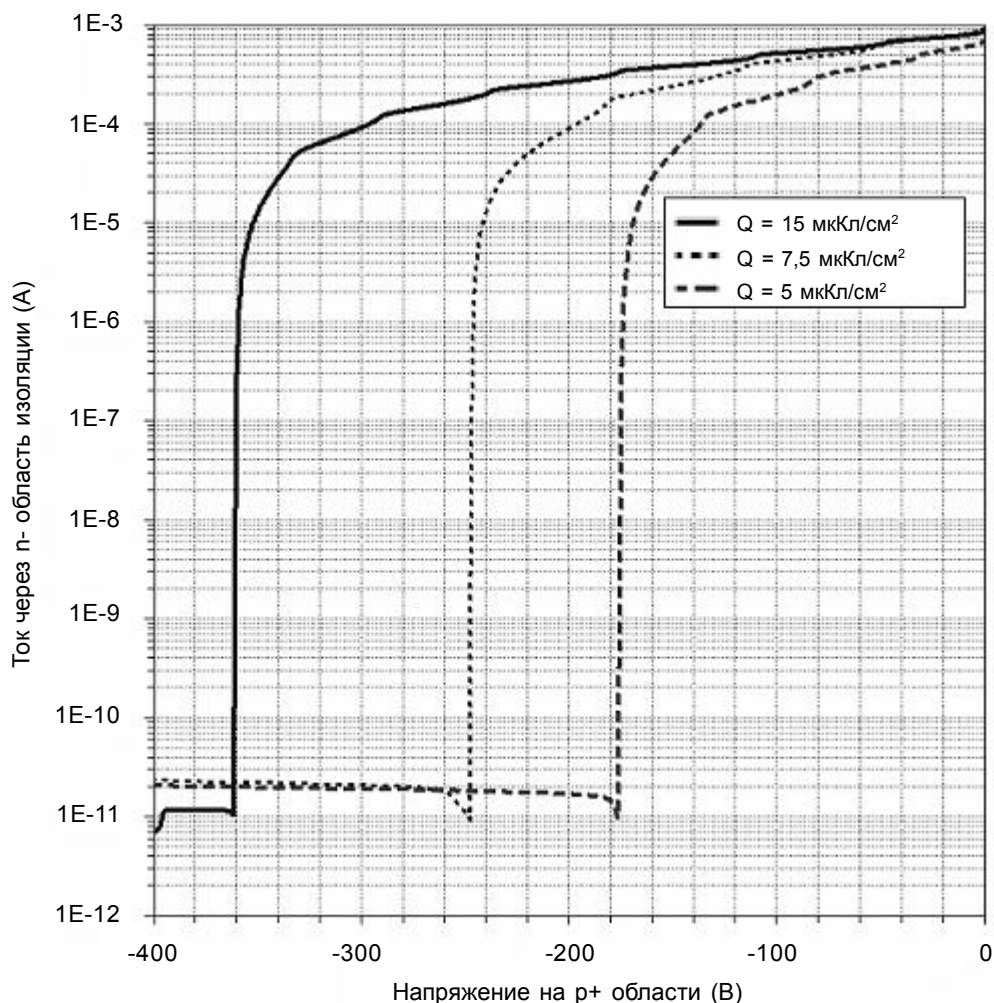


Рис. 5.

Зависимость тока через изоляцию от напряжения на р-области

Другим способом повышения пробивного напряжения для данной биполярной технологии является дополнительная разгонка слоя $p+$. На рис. 6 представлена соответствующая зависимость напряжения пробоя U_{p+n} от времени разгонки. На графике отмечен стандартный технологический процесс, обеспечивающий величину пробивного напряжения 28 В.

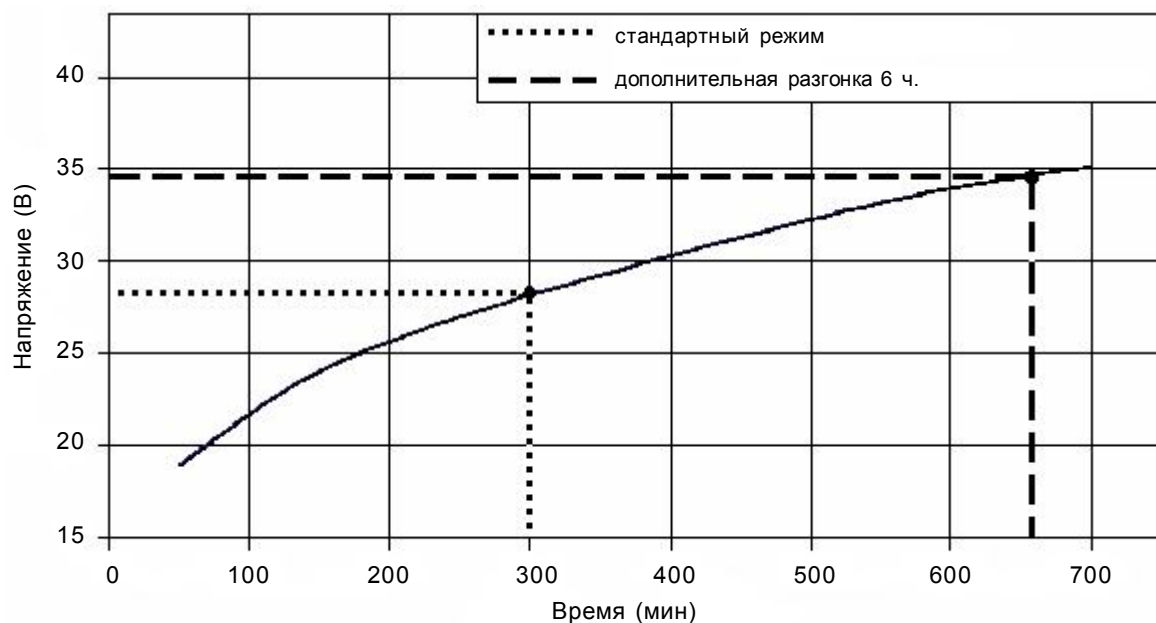


Рис. 6.
Зависимость напряжения U_{p+n-} от времени разгонки слоя $p+$

При этом необходимо отметить, что увеличивать время разгонки можно только в ограниченном диапазоне, поскольку, как и в случае с изменением дозы легирования слоя $n-$, все ограничивается уменьшением напряжения прокола. На рис. 7 представлена зависимость изменения глубин залегания переходов $p+/n-$ и $p(\text{подложка})/n-$ от времени разгонки слоя $p+$. Из данной зависимости видно, что вследствие разницы в коэффициентах диффузии при увеличении времени диффузии глубина перехода $p+/n-$ растёт значительно быстрее, чем глубина перехода $n-/p(\text{подложка})$, что и влияет на существенное уменьшение напряжения прокола.

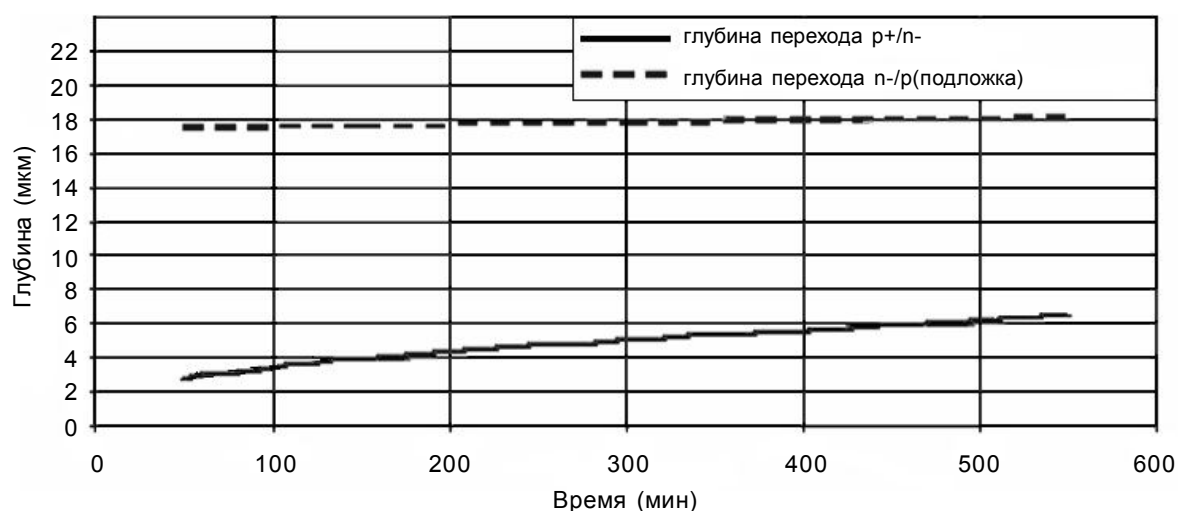


Рис. 7.
Изменение глубины слоёв $p+$ и $n-$ от времени разгонки слоя $p+$

Было показано, что при дополнительной разгонке более 6 часов относительно стандартного технологического режима дальнейшие температурные операции могут привести к смыканию изоляционного кармана в рабочем диапазоне напряжений, то есть максимальным напряжением пробоя, которое можно получить при использовании метода дополнительной разгонки слоя p^+ , будет величина напряжения $U_{p+n} = 34$ В.

При варьировании технологических режимов для получения необходимых пробивных напряжений стоит учитывать и другие факторы, влияющие на параметры транзисторов в составе ИМС: паразитные ёмкости изоляции, сопротивление коллекторной области и др. Поскольку область коллектора p - n - p транзистора создаётся встречной диффузией, а коллектор n - p - n транзистора – это эпитаксиальная плёнка, то дополнительная разгонка слоя p^+ может внести изменения в сопротивление коллекторной области p - n - p транзистора, что отразится на различиях параметров комплементарной пары.

Заключение

На основе полученных результатов моделирования технологического процесса сформулируем вывод: при выработке оптимального технологического маршрута необходимо учитывать целый комплекс взаимосвязанных факторов. В частности, для рассматриваемого технологического процесса уменьшение дозы легирования с 15 до 5 мкКл/см² не целесообразно, поскольку значительно уменьшается напряжение прокола (в 2, 3 раза). Также получено, что при дополнительной разгонке слоя p^+ более 6 часов относительно стандартного режима дальнейшие технологические операции приведут к проколу изоляции. Поэтому оптимальным режимом является: доза легирования слоя n - $Q = 10$ мкКл/см², разгонка слоя p^+ 7 часов, который позволяет получить напряжение пробоя $U_{p+n} = 35$ В.

Литература

1. Ho C. P., Plummer J. D., Hansen S. E. and Dutton R. W. VLSI Process Modeling-SUPREM III. - *IEEE Transactions of Electron Devices*, 1983, vol. ED-30, No 11, pp. 1438-1453.
2. SYNOPSIS SENTAURUS TCAD, Ver. A-2008.09, Manuals "DEVICE".