

УДК 621.3.049.774

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕМЕНТАРНОЙ СТРУКТУРЫ БИПОЛЯРНЫХ ПАР
ТРАНЗИСТОРОВ****Наврузова Алина Александровна,**студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Калуга
navruzova_aa@student.bmstu.ru**Андреев Дмитрий Владимирович,**преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Калуга
dmitrii_andreev@bmstu.ru**Аннотация**

В статье представлены результаты работ по модернизации технологического процесса микросхемы устройства выборки и хранения (УВХ) с целью получения комплементарных пар транзисторов в составе ИМС. За счет максимально приближенных значений электрических параметров рnp- и npn- транзисторов снижается уровень входных токов. Высокие входные токи при переключении могут вызывать выбросы и нестабильность выходного сигнала, что приводит к ошибкам в последующих этапах обработки. Для достижения поставленной цели были проанализированы электрические параметры транзисторов в составе ИМС, рассмотрены физико-химические процессы при получении структуры. На основании полученных данных предложено решение по оптимизации структуры ИМС. Оценена эффективность нововведения в сравнении с исходным вариантом конструкции.

Ключевые слова: устройство выборки и хранения, комплементарные пары транзисторов, Вольт-Амперные характеристики, ионная имплантация, диффузия.

**DEVELOPMENT OF THE COMPLEMENTARY STRUCTURE OF BIPOLAR
PAIRS OF TRANSISTORS****Navruzova Alina Alexandrovna,**student of the KF Bauman Moscow State Technical University Kaluga
navruzova_aa@student.bmstu.ru**Andreev Dmitry Vladimirovich,**Lecturer at the Bauman Moscow State Technical University of Kaluga
dmitrii_andreev@bmstu.ru**ABSTRACT**

The article presents the results of work on the modernization of the technological process of the sampling and storage device chip in order to obtain complementary pairs of transistors in the IC. Due to the maximally approximate values of the electrical parameters of pnp and npn transistors, the level of input currents is reduced. High input currents during switching can cause outliers and instability of the output signal, which leads to errors in subsequent processing steps. To achieve this goal, the electrical parameters of the transistors in the IC were analyzed and the physico-chemical processes in obtaining the structure were considered. Based on the data obtained, a solution is proposed to optimize the structure and C. The effectiveness of innovation is evaluated in comparison with the original design.

Keywords: device for data collection and storage, complementary pairs of transistors, Volt-Ampere characteristics, ion implantation, diffusion.

Целью данной работы является достижение комплементарности pnp- и npn-транзисторов, находящихся во входном каскаде микросхемы УВХ. Для достижения поставленной цели проанализируем существующую технологию и конструкцию pnp- и npn- транзисторов, измерим электрические параметры. Микросхема УВХ выполнена по планарной технологии с тремя скрытыми слоями на подложке p-типа. Элементы микросхемы разделены p-n-переходом.

Технологический процесс получения npn- и pnp- транзисторов:

Диффузия скрытого слоя n+. В поверхностный слой полупроводниковой пластины КДБ, толщиной 460мкм и объемным сопротивлением 10 Ом/см, диффузией в твердой фазе загоняется донорная примесь замещения (Сурьма). Атомы примеси под влиянием высокой температуры диффундируют в глубь подложки. Этот слой необходим для снижения коллекторного сопротивления, а также для минимизации влияния паразитного транзистора, который образуется в конечной структуре npn-транзистора. Удельное сопротивление скрытого слоя n+ составляет 20 Ом/кв.

Диффузия скрытого слаболегированного обедненного слоя n-. Формируется под pnp-транзистором путем имплантации ионов фосфора с энергией ускорения 100 кэВ и дозой $2 \cdot 10^{14}$ ион/см². Удельное сопротивление скрытого слоя составляет 70 Ом/кв. Используемый материал – красный фосфор.

Диффузия скрытого слоя p+. Скрытый слой p+ образуется в слое n- скрытого слоя диффузией ионов бора с удельным сопротивлением, равным 40 Ом/кв. Этот слой является коллектором для npn-транзистора.

Эпитаксиальное наращивание. Химическим осаждением из газовой фазы наращивается эпитаксиальный слой n-типа. Используемый материал – фосфин РНЗ. Химическая реакция осаждения: $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$ при $T = 1150^\circ\text{C}$. В результате реакции молекулы легирующего газа разлагаются и образующиеся при этом атомы примеси включаются в эпитаксиальный слой. Толщина эпитаксиального слоя составляет 12мкм.

Ионное легирование p-областей. При воздействии ускоряющего потенциала 70кэВ в приповерхностный слой эпитаксии загоняются ионы бора В. При температуре порядка 1000°C загнанная примесь разгоняется в глубь эпитаксии, образуя область базы npn-транзистора и область разделения, которая одновременно является коллектором pnp-транзистора. Разная глубина объясняется подбором разных доз.

Травление SiO₂. Поскольку разгонка производится в кислородной среде, над легированной областью образуется тонкий оксидный слой в результате реакции $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$. Для травления окисла SiO₂ пластина погружается в разбавленный раствор плавиковой

кислоты (HF) в соотношении 10:1 $H_2O:HF$. Раствор травит только SiO_2 , но не травят находящийся под окислом кремний. Скорость травления SiO_2 в буферизованном растворе плавиковой кислоты составляет 100 нм/мин при 25°C.

Ионное легирование n-областей. Загонка эмиттера и областей подлегирования к коллектору рпн-транзистора выполняется ионной имплантацией красного фосфора при воздействии ускоряющего потенциала 70кэВ. Формирующий отжиг эмиттера n-типа проводится при температуре меньшей, чем температура формирующего отжига базы р-типа, чтоб не допустить неконтролируемый уход глубины Xj базы, что негативно может сказаться на динамических параметрах микросхемы УВХ.

Травление окисла SiO_2 . В растворе плавиковой кислоты травится образовавшийся слой диоксида кремния SiO_2 .

Наращивание окисла SiO_2 . После формирования активных областей на поверхности пластины методом термического окисления в кислородной среде выращивается окисел SiO_2 порядка 1000Å. Используемая химическая реакция: $SiH_4(силан) + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2$. Силан вводится в реакционную камеру вместе с кислородом с контролируемой скоростью. Подложка, на которую помещаются пластины кремния, нагревается до температуры 600°C. Окисел закрывает всю поверхность пластины и стравливается только в местах под контактные окна.

Вскрытие окон в слое диоксида кремния. Выполняется с перекрытием легированных областей в 2мкм на сторону.

Осаждение Si_3N_4 . В дальнейшем осажденная металлизация будет претерпевать излом на ступеньке окисла. Излом может привести к обрыву металлизации. Для сглаживания наклона проводника на всю поверхность пластины химически осаждается нитрид кремния Si_3N_4 . Протекающая химическая реакция: $3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2$ при температуре 600°C.

Вскрытие окон в слое нитрида кремния. С помощью фотолитографии и метода плазменного химического травления в Si_3N_4 формируется рисунок. Окно в слое нитрида больше окна в слое диоксида кремния на 2мкм на сторону. Таким образом, значительно уменьшается риск обрыва металла на контактных окнах.

Напыление металлизации. На всю поверхность кристалла осаждается тонкая пленка алюминия. Напыление проводится методом вакуумного распыления. В полученной пленке формируется рисунок межсоединений методом фотолитографии. Травление алюминия осуществляется с помощью раствора HCl.

Вжигание контактов. Проводится термообработкой при температуре 500°C

Осаждение SiO_2 . Методом химического осаждения из газовой фазы вся пластина покрывается пассивирующим слоем диоксида кремния. Далее в этом слое вскрываются окна под разварку выводов.

Результирующая структура показана на рисунке 1.

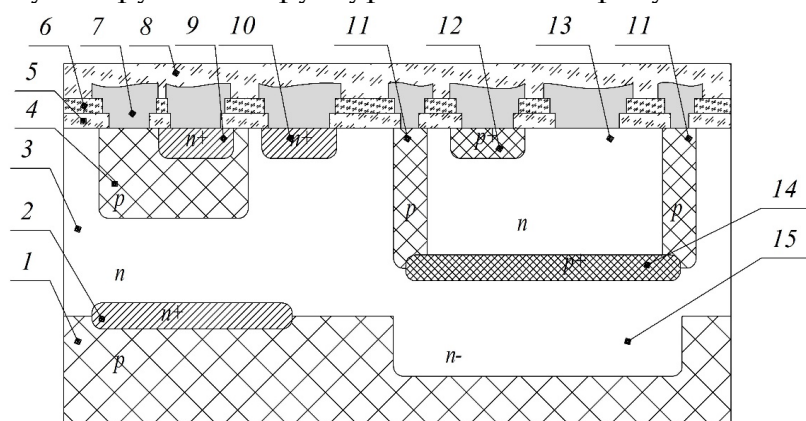


Рис.1 Структура элементов (1-подложка, 2-скрытый слой, 3-эпитаксиальный слой, 4-база pnp, 5-оксид кремния, 6-нитрид кремния, 7-металл, 8-защитный окисел, 9-эмиттер pnp, 10-подлегирование к коллектору pnp, 11-слой разделения и подлегирования к коллектору pnp, 12- эмиттер pnp, 13- эпитаксиальный слой в качестве базы pnp, 14-скрытый слой, 15-скрытый слой)

Выходные Вольт - Амперные характеристики pnp- и npn- транзисторов с заданной структурой элементов показаны на рисунке 2. Электрические параметры приведены в таблице 1. Измерения проводились на измерителе характеристик ППП Л2-56.

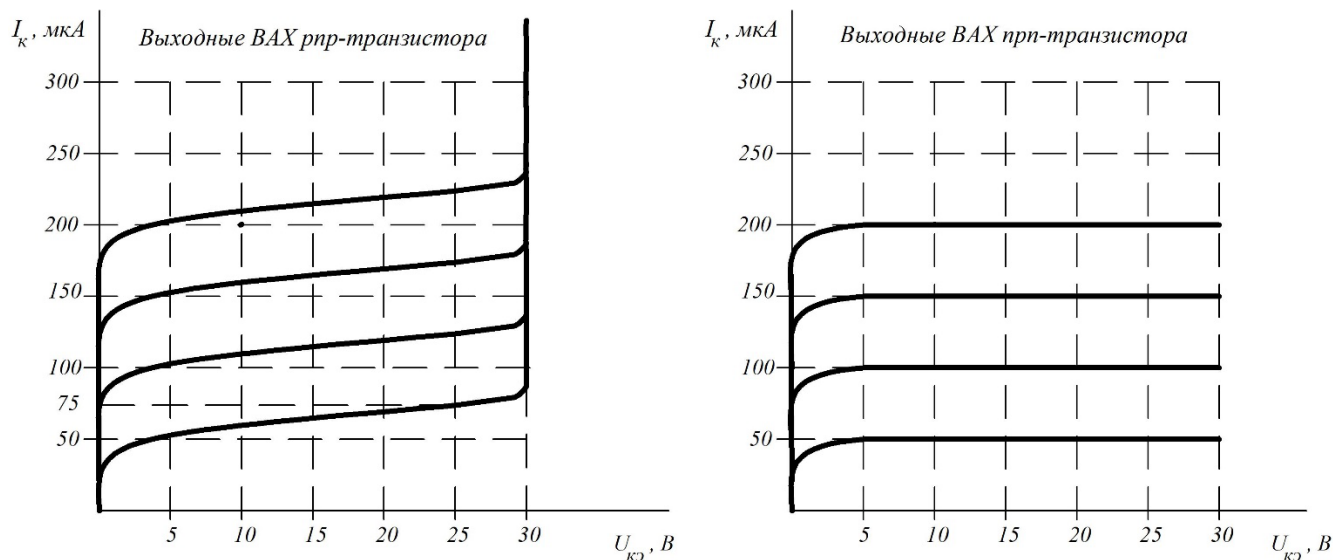


Рис.2 ВАХ pnp- (с инверсией) и npn - транзисторов
Таблица 1

№	Параметр	pnp-транзистор	pnp-транзистор
1	Коэффициент усиления β при $I_b = 10\mu A$	250	60
2	Напряжение пробоя база-эмиттер	6В	7В
3	Напряжение пробоя коллектор-эмиттер	35В	45В
4	Напряжение пробоя коллектор-база	45В	45В
5	Напряжение насыщения база-эмиттер	0,8В	0,9
6	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер	0,3В	0,4В

Комплементарность транзисторов заключается в максимально приближенных значениях коэффициентов усиления npn- и pnp-транзисторов [2]. Рассмотрим зависимость усиления по току от структуры транзистора. Если бы ток эмиттера был равен току коллектора, то $\beta=1$, а $I_b=0$. В реальном транзисторе имеется несколько факторов, обуславливающих появление тока базы: низкая эффективность эмиттера, объемная рекомбинация, поверхностная рекомбинация. С учетом суммарного действия этих факторов ток базы будет равен: $I_b = I_{pэ} + I_{vб} + I_{рек б}$, где $I_{pэ}$ – дырочный ток, инжектируемый в эмиттер, смещенный в прямом направлении, $I_{vб}$ и $I_{рек б}$ – соответственно токи рекомбинации в объеме и в поверхностном слое базы. Воспользуемся известными математическими моделями, описывающими зависимость β от структуры: если считать, что общий ток эмиттера приблизительно равен электронной составляющей тока через переход ($I_{nэ} \gg I_{pэ}$), то

$$\frac{1}{\beta} \approx \frac{I_{p3}}{I_{n3}} + \frac{I_{v6}}{I_{n3}} + \frac{I_{рек6}}{I_{n3}}, \text{ где } \frac{I_{p3}}{I_{n3}} = \frac{\rho_3 W_6}{\rho_6 L_{p3}}, \frac{I_{v6}}{I_{n3}} = \frac{W_6^2}{2L_{n6}^2}, \frac{I_{рек6}}{I_{n3}} = \frac{sA_s W_6}{A_3} [1].$$

Тогда $\frac{1}{\beta} \approx \frac{\rho_3 W_6}{\rho_6 L_{p3}} + \frac{W_6^2}{2L_{n6}^2} + \frac{sA_s W_6}{A_3}$, где ρ_3 – удельное сопротивление эмиттера; W_6 – толщина активной базы; ρ_6 – удельное сопротивление базы; L_{p3} – длина пробега дырки в области n; L_{n6} – длина пробега электрона в области p; s – скорость поверхностной рекомбинации; A_s – эффективная площадь поверхностной рекомбинации; A_3 – площадь эмиттера.

Из уравнения следует, что для обеспечения максимального значения β необходимо, чтобы величина каждого из трех членов была достаточно малой. Это означает, что во-первых, все времена жизни носителей должны быть достаточно большими; во-вторых, толщина базы – малой; в-третьих, удельное сопротивление эмиттера – весьма низким и, в-четвертых, поверхностная рекомбинация – незначительной. Поскольку толщина базы присутствует во всех слагаемых, то будет оказывать наибольшее влияние на коэффициент передачи. Соответственно, для ррп-транзистора толщину активной базы необходимо уменьшать, а для рпн-транзистора – увеличивать.

Область базы рпн-транзистора выполнена методом ионной имплантации бора. Глубина слоя прямо пропорционально зависит от таких параметров, как доза, температура и время [2]. Повышение дозы и времени разгонки повлечет за собой не только уход загнанной примеси в глубь эпитаксии, но и снижение удельного сопротивления слоя базы. От удельного сопротивления зависит пробивное напряжение эмиттер-база, так как база в данном случае является менее легированной областью. Это условие накладывает ограничение на режим разгонки [4]. При корректировке операций загонки и разгонки базы рпн будем оперировать только дозой и временем, поскольку повышение температуры повлечет за собой всплытие ранее отлегированных областей.

Теоретически повысить коэффициент усиления ррп-транзистора возможно двумя способами. Поскольку активной базой называется область базы, находящаяся под эмиттером, то уменьшить ее можно, увеличив глубину эмиттера, или, еще сильнее разогнав область скрытого слоя р+. Эмиттер ррп-транзистора разгоняется в одном термоцикле с эмиттером рпн-транзистора, что означает одновременный уход примесей в глубь базы, то есть увеличение коэффициентов усиления как в рпн-, так и в ррп-транзисторах. Соответственно, увеличение глубины эмиттера не может быть решением поставленной задачи.

Рассмотрим математическую модель, описывающую диффузию скрытого слоя р+. Второе уравнение Фика, решенное при граничных условиях, описывает результирующее распределение акцепторной примеси бора в толще фосфора (скрытый слой n-): $N(x, t) = Q(\pi Dt)^{-\frac{1}{2}} \exp(-x^2/4Dt)$, где Q – единица площади; D – коэффициент диффузии; t – время разгонки; x – координата, означающая глубину; N – концентрация бора [3]. На рисунке 3 представлены профили распределения для нескольких значений времени разгонки ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$).

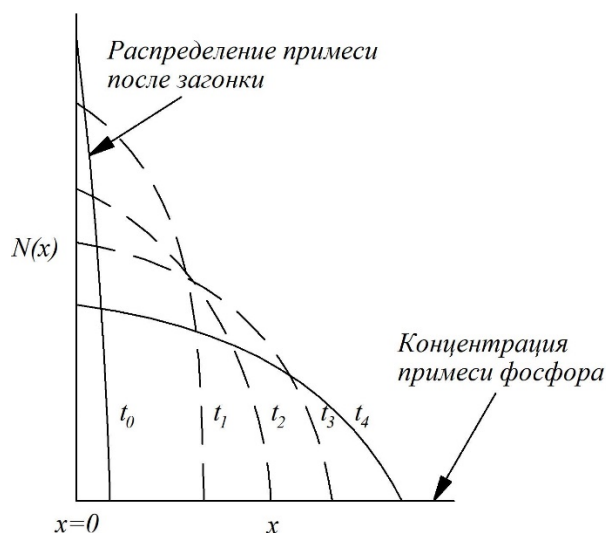


Рис. 3 Профили распределения примеси

Чем больше время разгонки, тем выше всплывет скрытый слой p+. По мере ухода в толщину кармана n-типа концентрация бора экспоненциально снижается. В точке p-n перехода концентрация акцепторной примеси равна концентрации донорной примеси. Из второго уравнения Фика следует, что глубина перехода x_j пропорциональна корню квадратному из времени диффузии $x_j \sim \sqrt{t}$.

База nрп-транзистора выполняется методом ионной имплантации. Профиль распределения имплантированной примеси описывается функцией Гаусса $N(x) = N_p \exp(-(x - R_p)^2 / 2\Delta R_p^2)$, где x -расстояние от поверхности, $R_p=0,2202\text{мкм}$ - проекция длины волны пробега ионов бора, $\Delta R_p=0,053\text{мкм}$ - разброс пробегов ионов бора при ускоряющем потенциале 70кэВ, N_p -максимальная концентрация имплантированных ионов [3]. Профиль распределения примеси показан на рисунке 4.

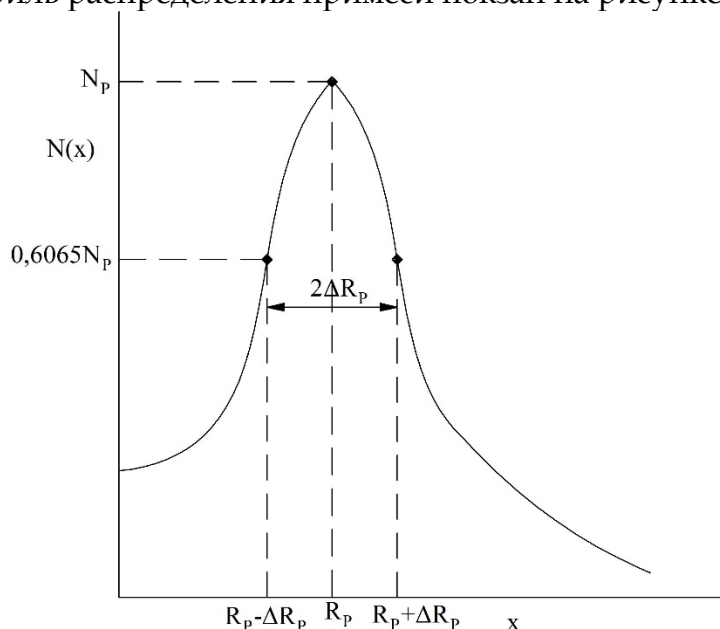


Рис. 4 Профиль распределения примеси

Максимальная концентрация имплантированных ионов N_p рассчитывается по следующей формуле: $N_p = 0,4 \frac{Q}{\Delta R_p}$, где Q - доза имплантации [3]. Глубина залегания базы находится из условия равенства коллекторной и базовой концентраций. Зная необходимую поверхностную концентрацию базовой примеси $N = 7 \cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$, выведем из функции Гаусса зависимость глубины базы nрп-транзистора от дозы $x(Q)$:

$$x = \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{Q}{0,93 \cdot 10^{18}}} + R_p$$

На основе импирических исследований были скорректированы режимы загонки и разгонки базовых областей pnp-, и pnp-транзисторов, разработаны и изготовлены макеты микросхем УВХ по модернизированному технологическому процессу. Экспериментальные образцы ИМС были измерены на измерителе характеристик ППП Л2-56, выходные Вольт-Амперные характеристики и значения электрических параметров представлены на рисунке 5 и в таблице 2 соответственно.

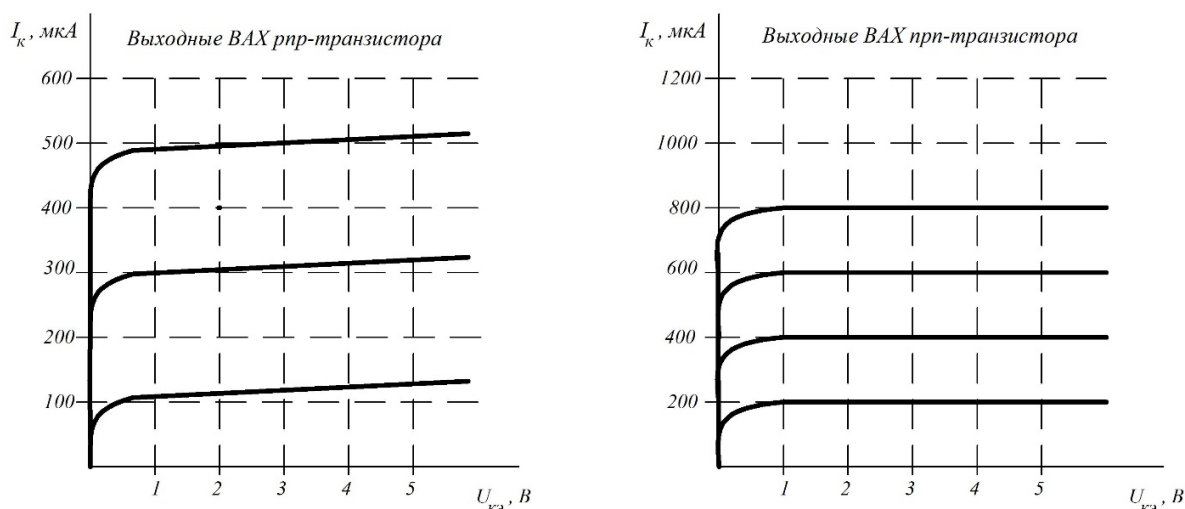


Рис.5 ВАХ pnp- (с инверсией) и pnp – транзисторов
Таблица 2

№	Параметр	pnp- транзистор	pnp- транзистор
1	Коэффициент усиления β при $I_b = 10 \mu\text{A}$	230	193
2	Напряжение пробоя база-эмиттер	6,4В	7,5В
3	Напряжение пробоя коллектор-эмиттер	51,2В	89,3В
4	Напряжение пробоя коллектор-база	45В	89,3В
5	Напряжение насыщения база-эмиттер	0,68В	0,77В
6	Напряжение насыщения коллектор-эмиттер	0,1В	0,1В

Таким образом, разница коэффициентов усиления пары транзисторов значительно уменьшилась. Предложенные нововведения не оказали отрицательного влияния на другие электрические параметры транзисторов, приведенных в таблице, что говорит о приемлемости данных методов модернизации технологического процесса.

Список литературы:

1. Андреев Д.В., Масловский В.М., Андреев В.В., Столяров А.А. Модифицированный метод повышения напряжения по нарастающему току для контроля надежности тонких диэлектриков и снижения заряда // Физика. Статус Solidi A. 2022, том 219. Is. 9. P. 2100400(1-5). <https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>

2. Бланшетт Э.А., Кэппон А.М., Гамильтон Д.Дж. Анализ и проектирование интегральных схем. Нью-Йорк, издательство MCGRAW - HILL BOOKCOMPANY, 1967, 360 стр.
3. Колосницын, Б. С. Расчет параметров элементов интегральных микросхем: учебно-методическое пособие / Б. С. Колосницын, Д. А. Котов. - Минск: БГУИР, 2017. - 68 стр. 246-600
4. Колосов А.А. Интегральные схемы. Принципы проектирования и производства, пер. с англ., под ред. А. А. Колосова, М., 1968, с.90-95

References:

1. Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modified Ramped Current Stress Technique for Monitoring Thin Dielectrics Reliability and Charge Degradation // Phys. Status Solidi A. 2022, vol. 219. Is. 9. P. 2100400(1-5). <https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>
2. E.A. Blanchette, A.M. Cappon, D.J.Hamilton Analysis and design of integrated circuits. New York, MCGRAW - HILL BOOKCOMPANY, 1967, 360p.
3. Kolosnitsyn, B. S. Calculation of parameters of elements of integrated circuits: an educational and methodical manual / B. S. Kolosnitsyn, D. A. Kотов. - Minsk: BGUIR, 2017. - 68 pp. 246-600
4. Kolosov A.A. Integrated circuits. Principles of design and production, trans., from English, edited by A. A. Kolosov, M., 1968, pp.90-95