

# Новое поколение ультрастабильных прецизионных стабилитронов

В. К. АЛАДИНСКИЙ, В. А. ОВЧИННИКОВ, В. П. БАБКИНА, Т. В. ЖДАНОВА, И. С. ПОЗДНЯКОВА, А. М. ТИМЕРБУЛАТОВ

*Рассмотрено новое поколение прецизионных стабилитронов, принципы конструирования и система параметров.*

*The new family of the ultra stable reference diodes, the design features and the system of the parameters are presented.*

За последние годы прогресс в твердотельной электронике в нашей стране и за рубежом привел к созданию нового поколения ультрастабильных прецизионных стабилитронов (УПС), у которых температурная и долговременная стабильности основного параметра — напряжения стабилизации  $U_{ст}$  достигают значений соответственно  $0,0002 \dots 0,00005 \% / ^\circ\text{C}$  и  $0,0005 \dots 0,0002 \%$  за 1000 ч. Создание таких приборов, своего рода эталонов вольта в современной микроэлектронике стало возможным в результате понимания физических процессов, определяющих дрейф параметров приборов при длительных термотоковых нагрузках и различных воздействиях дестабилизирующих факторов, и возможности прецизионного управления электрофизическими характеристиками полупроводниковой структуры.

Цель нашей работы — изложение основных принципов конструирования приборов этого класса и системы их точностных параметров.

## Общая характеристика УПС.

Прецизионные стабилитроны представляют собой, по существу, источник опорного напряжения. Это означает, что наряду со свойствами обычных стабилитронов, прецизионный стабилитрон (ПС) должен обладать не только хорошим коэффициентом стабилизации напряжения при изменении нагрузки, но и обеспечивать высокую температурную стабильность напряжения стабилизации; уникальную долговременную стабильность параметров; крайне низкий уровень собственных низкочастотных шумов; точностные характеристики в самых жестких условиях внешних воздействий окружающей среды.

Схема включения ПС упрощенно представлена на рис. 1. Для шестивольтовых ПС от источника питания  $U_n = 14 \text{ В}$  через токозадающий резистор  $R = 1 \text{ кОм}$  в ПС задается номинальный ток стабилизации  $I_{ст. ном} = 7,5 \text{ мА}$ ; тогда с ПС снимается высокостабильное напряжение, соответствующее его напряжению стабилизации  $U_{ст}$  при заданном токе,

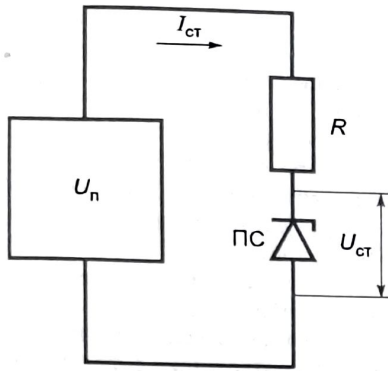


Рис. 1. Схема включения прецизионного стабилизатора ПС:

$U_n$  — источник питания;  $R$  — токозадающий резистор;  $I_{ст}$  — ток стабилизации

которое является опорным  $U_{оп}$ , т. е.  $U_{ст} = U_{оп} \approx 6,5$  В и  $dU_{ст} / dI_{ст}$ ;  $dU_{ст} / dT$ ;  $dU_{ст} / dT \rightarrow 0$ . Справедливость этого утверждения станет понятной из последующего изложения (здесь  $I_{ст}$  — ток стабилизации,  $T$  — температура,  $t$  — время).

#### Температурная компенсация.

Принцип термокомпенсации для прецизионного стабилизатора представляет собой условие  $TKU_{ст} = TKU_B + TKU_F = 0$ , где  $TKU_B$  и  $TKU_F$  — абсолютные значения температурного коэффициента пробивного напряжения  $U_B$  рабочего и прямого напряжения  $U_F$  компенсирующих  $p-n$ -переходов, которое выполняется только в случае  $|TKU_B| = |TKU_F|$ . Однако в действительности точная термокомпенсация осложняется следующими обстоятельствами:

слабой зависимостью вида  $TKU_F = f(U_F)$ ; так, в диапазоне  $U_F = 0,6 \dots 0,8$  В практически  $TKU_F \approx -(1,7 \dots 2)$  мВ/°С;

сильной зависимостью вида  $TKU_B = f(U_B)$ ; в диапазоне напряжения пробоя  $U_B = 5,0 \dots 10$  В практически  $TKU_B$  изменяется от нуля до 7 мВ/°С, причем  $U_B \approx 5,8; 7,7$  и 9,5 В соответствуют  $TKU_B \approx 2,0; 4,0$  и 6 мВ/°С, кратные  $TKU_F$ .

Поэтому принцип точной термокомпенсации предопределяет не только получаемый  $TKU_{ст}$ , но и напряжение стабилизации ПС. В общем виде напряжение стабилизации ПС выражается формулой

$$U_{ст} = U_B + nU_F, \quad (1)$$

где  $n$  — количество прямо смещенных  $p-n$ -переходов, необходимых для компенсации  $TKU_B$  (при конкретном  $U_B$ ).

Отсюда следует важный вывод — на практике представляется возможным реализовать лишь крайне ограниченный дискретный ряд типовых номиналов напряжения стабилизации прецизионных стабилизаторов (с малым значением суммарного  $TKU_{ст}$ ), а именно: 6,4; 9,0 и 11,7 В. При этом в полупроводниковой структуре ПС неизменным будет только количество обратных смещенных (рабочих)  $p-n$ -переходов — один (с необходимым  $U_B$ ), а число компенсирующих (прямо смещенных)  $p-n$ -переходов будет меняться от одного в случае шестивольтового ПС до трех для ПС с  $U_{ст} \approx 11,7$  В. Другие ряды ПС с высокой степенью термокомпенсации нереализуемы вследствие «насыщения» зависимости  $TKU_B = f(U_B)$  (для  $U_B \geq 10$  В  $TKU_B \approx \text{const} \approx 7$  мВ/°С) и изменения знака  $TKU_B$  на отрицательный для  $U_B < 5$  В, что связано с туннельным механизмом пробоя.

Зависимость  $TKU_{ст}$  (в относительных единицах) в промежуточной области между лавинным и туннельным

пробоем для диапазона  $3 \leq U_B \leq 7$  В можно представить в виде [1]:

$$TKU_{Вотн} = 2 \frac{3,1 \cdot 10^{-4} U_B^{1/2} - 7 \cdot 10^{-3} e^a}{1 + 0,43 U_B^{1/2} + 18 U_B^{1/2} e^a},$$

где  $a = -18(U_B^{1/4} - 1,36)$ .

Для компенсирующих  $p-n$ -переходов

$$TKU_F = \left. \frac{dU_F}{dT} \right|_{I_F = \text{const}} = -\frac{E_g}{kT} + \frac{dE_g}{qdT} + \frac{U_F}{T},$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны;  $q$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $I_F = \text{const}$  выражает условие измерения  $TKU_F$ .

В настоящее время температурный относительный коэффициент напряжения стабилизации в УПС достигает 0,0002 %/°С.

Для того чтобы направленным образом получать выход лучших групп УПС, необходимо очень точно выполнять условие (1). Реально  $TKU_B$  имеют бóльший разброс, чем  $TKU_F$ . Покажем, что этот разброс в значительной степени обусловлен физическими факторами, а не технологическими.

Действительно, разброс  $TKU_B$  при фиксированном напряжении  $U_B$  вызван, так сказать, физической однородностью пробоя в объеме  $p-n$ -перехода. Нижний предел этой «физической однородности» определяется статистическими флуктуациями напряжений пробоя в характерных объемах, линейные размеры которых имеют порядок ширины пространственного заряда. Шокли [2] показал, что средняя квадратическая флуктуация  $\overline{\Delta U_{Вст}}$  в таком объеме обусловлена гауссовыми флуктуациями концентрации доноров и акцепторов, что в случае  $p^* - n$ -перехода дает

$$\overline{\Delta U_{Вст}} = \sqrt{\frac{q E_{мБ}}{4 \varepsilon}},$$

где  $E_{мБ}$  — максимальная напряженность поля при пробое;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая постоянная.

Среднюю квадратическую флуктуацию температурного коэффициента напряжения пробоя можно представить в виде

$$\overline{\Delta TKU_{Вотн}} = \frac{\partial TKU_{Вотн}}{\partial U_B} \overline{\Delta U_{Вст}}.$$

Для стабилизаторов с напряжением пробоя  $U_B = 6$  В имеем  $\overline{\Delta U_{Вст}} = 0,18$  В,  $\overline{\Delta TKU_{Вотн}} = 5 \cdot 10^{-5}$  /°С,  $TKU_{Вотн} = 3 \cdot 10^{-4}$  /°С, что дает разброс порядка 17...20%. Таким образом, при заданном  $U_B$  соответствующий разброс  $TKU_B$ , обусловленный статистическими флуктуациями доноров и акцепторов, может составлять 1/5 номинального значения, что в конечном итоге определяет процент выхода годных лучших групп УПС по температурному коэффициенту.

#### Временной дрейф параметров.

Рассмотрим механизм временного дрейфа напряжения стабилизации. Для этого необходимо знать закономерности дрейфа напряжений компенсирующего и рабочего  $p-n$ -переходов. Многолетний опыт исследований позволяет сделать следующее заключение.

В компенсирующих  $p-n$ -переходах дрейф напряжения наиболее существенен в первые пятьсот часов испытаний и практически замедляется к отметке 1000 ч. Наблюдаемый дрейф  $\Delta U_F$  не превышает  $-6$  мВ для температуры окружающей среды  $125^\circ\text{C}$  и  $\Delta U_F = -(1 \dots 2)$  мВ при температуре  $60^\circ\text{C}$ . Анализ показал, что такое уменьшение напряжения  $\Delta U_F$  связано с уменьшением времени жизни неосновных носителей заряда. Другими словами, результирующее изменение времени жизни можно выразить как

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + \sigma_t v_t \Delta N,$$

где  $\tau_0, \tau$  — времена жизни до и после деградации;  $\sigma_t, v_t$  — сечение захвата и тепловая скорость носителей;  $\Delta N$  — прирост концентраций дополнительных рекомбинационных центров.

Для обычных компенсирующих  $p^+-n$ -переходов при больших положительных напряжениях можно выразить инжекционную составляющую тока в виде

$$I_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(\frac{qU_F}{kT}\right),$$

где  $D$  — коэффициент диффузии;  $n_i$  — концентрация носителей в собственном полупроводнике;  $N_A$  — концентрация легирующей примеси (доноров в  $n^+$ -области перехода).

Тогда для экспериментально полученного ухода напряжений на компенсирующем  $p-n$ -переходе  $\Delta U_F = -6$  мВ при  $125^\circ\text{C}$ ,  $\tau_0 = 3 \cdot 10^{-7}$  с,  $\sigma_t = 10^{-15}$  см<sup>2</sup>,  $v_t = 10^7$  см/с получим, что концентрация неконтролируемых примесей или дефектов вблизи  $p-n$ -перехода должна быть около  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Это оценка очень реальная, если учесть, что уровень неконтролируемых примесей в кремнии достигает примерно  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

Если уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда при длительных термотоковых нагрузках приводит к соответствующему уменьшению прямого напряжения, то увеличение концентрации глубоких энергетических уровней должно вызывать рост напряжения пробоя  $U_B$  в рабочих  $p-n$ -переходах вследствие компенсации мелких энергетических уровней основных легирующих примесей. Экспериментальные данные по изменению напряжения пробоя  $U_B$  в диапазоне температур  $200 \dots 60^\circ\text{C}$  позволили оценить энергию активации порядка  $0,42$  эВ. При этом изменение напряжения пробоя  $\Delta U_B$  при  $60^\circ\text{C}$  составило около  $30 \dots 40$  мкВ за 500 ч работы и  $150$  мкВ за 1000 ч.

Таким образом, исследование механизма деградации при комнатных и повышенных температурах однозначно позволяет сделать вывод о накоплении в окрестности  $p-n$ -перехода в течение 1000 ч электрически активных глубоких центров, концентрация которых может достигать  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Этот процесс приводит к росту напряжения пробоя в рабочих  $p-n$ -переходах и уменьшению прямого напряжения в компенсирующих.

#### Радиационное воздействие.

Аналогичная ситуация, которая наблюдается при естественной деградации кремниевых переходов, должна проявляться и при радиационном воздействии. Воздействие радиации на параметры полупроводника описывается соотношениями

$$n_\Phi = n_0 \exp(-\Phi / K_n);$$

$$\tau_\Phi^{-1} = \tau_0^{-1} + K_\tau \Phi;$$

$$\mu_\Phi^{-1} = \mu_0^{-1} + K_\mu \Phi,$$

где  $n_0, n_\Phi$  — концентрация основных носителей (электронов) до и после радиационного воздействия;  $\tau_0, \tau_\Phi$  — время жизни неосновных носителей заряда (дырок) для  $p^+-n$ -перехода до и после воздействия;  $\mu_0, \mu_\Phi$  — соответствующие подвижности носителей заряда.

Коэффициенты  $K_n, K_\tau, K_\mu$  определяют интенсивность изменения параметров полупроводника (коэффициенты повреждения) в результате воздействия потока радиационных частиц (флюенса  $\Phi$ ).

Реакция на воздействие, например, нейтронов в ультрапрецизионных стабилитронах определится суммой уходов компенсирующего напряжения и напряжения пробоя рабочего перехода в соответствии с формулами

$$\Delta U_F = \frac{bkT}{q} \left[ \frac{\Phi}{K_n} + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + \tau_0 K_\tau \Phi}{1 + \mu_0 K_\mu \Phi} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\Delta U_B = \frac{\varepsilon E_{mB}^2}{2q N_A} \left[ \exp(\Phi / K_n) - 1 \right],$$

где  $1 < b < 2$  — эмпирический коэффициент.

Из подробного анализа следует, что деградация времени жизни в компенсирующем  $p-n$ -переходе доминирует над изменением концентрации (ростом напряжения пробоя), модуляцией проводимости базы и деградацией подвижности [3]. Поэтому изменения напряжения стабилизации можно записать в виде

$$\Delta U_{ст}(\Phi) = \Delta U_B(\Phi) + \Delta U_F(\Phi) \approx -\frac{bkT}{2q} \ln(1 + \tau_0 K_\tau \Phi).$$

Оценки показывают, что для УПС с одним компенсирующим  $p-n$ -переходом при облучении потоком быстрых нейтронов  $\Phi \approx 10^{13}$  нейтр./см<sup>2</sup> имеем  $\Delta U_{ст} = -(60 \dots 70)$  мВ. Из расчетов получено, что изменение напряжения пробоя рабочего  $p-n$ -перехода существенно меньше и при потоках порядка  $10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> может составить  $\Delta U_B(\Phi) = 7$  мВ для  $U_B = 6$  В. Однако для диодов с  $U_B = 3 \dots 6$  В, как показано в [4], величина  $\Delta U_B(\Phi)$  меняет знак вблизи  $U_B = 5$  В. Так, для диодов с  $U_B = 5$  В при потоке  $10^{15}$  нейтр./см<sup>2</sup>  $\Delta U_B = 5$  мВ, а для диодов с  $U_B = 3$  В  $\Delta U_B(\Phi) = -180$  мВ. Отрицательный уход напряжения пробоя при туннельном эффекте объясняется возникновением еще одной составляющей тока, обусловленной туннелированием через радиационные уровни в запрещенной зоне.

Исследованные закономерности деградации при длительных термотоковых нагрузках и радиационном воздействии позволили использовать технологический прием, который существенно снизил интенсивность деградационных процессов в УПС. Этот прием связан с диффузией золота для резкого уменьшения времени жизни в полупроводниковых структурах, прежде всего, в компенсирующих  $p-n$ -переходах. Время жизни в кремнии после диффузии золота составляет [5]

$$\tau_0 = \frac{2,5 \cdot 10^7}{N_{Au}},$$

что даёт для концентрации  $N_{Au} > 10^{17}$  см<sup>-3</sup>  $\tau_0 = 1$  нс.

Тогда при потоке нейтронов  $10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> в соответствии с (2) получаем  $\Delta U_F = -5$  мВ. Таким образом, радиационная стойкость УПС так же, как и их температурная ста-

бильность объясняется противоположными по знаку уходами  $\Delta U_B(\Phi) = \Delta U_F(\Phi)$  напряжений компенсирующего  $p-n$ -перехода.

Экспериментальные результаты показывают, что результирующий уход напряжений стабилизации в УПС для потока  $10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> может быть менее 1 мВ. При этом надо иметь в виду, что так же, как и в случае температурной компенсации статистические флуктуации доноров и акцепторов влияют на разброс значений  $\Delta U_{ст}(\Phi)$ . Для потока  $\Phi = 10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> оценки дают

$$\overline{\Delta U_B(\Phi)} = \frac{d \Delta U_B(\Phi)}{d U_B} \overline{\Delta U_{B ст}} \approx 0,6 \text{ мВ,}$$

где  $\overline{\Delta U_{B ст}} = 0,18 \text{ В.}$

Таким образом, можно сделать вывод, что достигнутый уровень стабильности параметров УПС основан на точном выравнивании с помощью конструктивных и технологических методов равного и противоположного по знаку дрейфа напряжения в рабочих и компенсирующих  $p-n$ -переходах.

В предыдущем разделе рассматривались физические аспекты конструирования УПС. Однако достижение такого технического уровня параметров могло быть реализовано лишь в результате комплексного подхода в разработке и практической реализации оригинальных конструктивно-технологических принципов создания этого нового класса изделий электронной техники и методов метрологического обеспечения его серийного производства.

#### Конструктивно-технологические принципы создания УПС.

Многоцелевой комплекс разработанных оригинальных технических решений защищен в общей сложности почти 20-ю авторскими свидетельствами на изобретение (см., например, [6]). Ниже отмечены основные из этих решений, позволивших принципиальным образом выполнить поставленные задачи.

1) Локализация рабочих областей  $p-n$ -переходов в объеме полупроводника, что позволило подавлением мик-

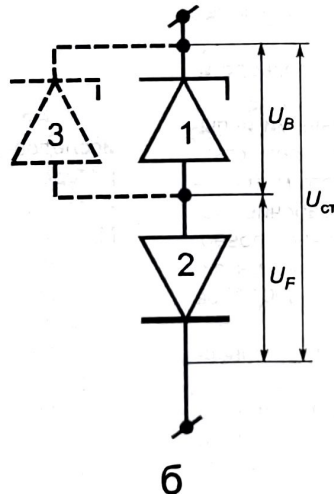
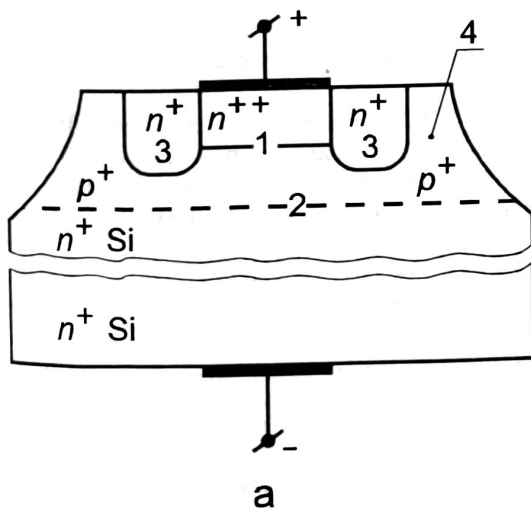


Рис. 2. Типовая структура (а) и эквивалентная схема (б) прецизионного стабилизатора:

1 — рабочий (обратно смещенный), 2 — компенсирующий (прямо смещенный) и 3 — охранный  $p-n$ -переходы; 4 — эпитаксиальная пленка

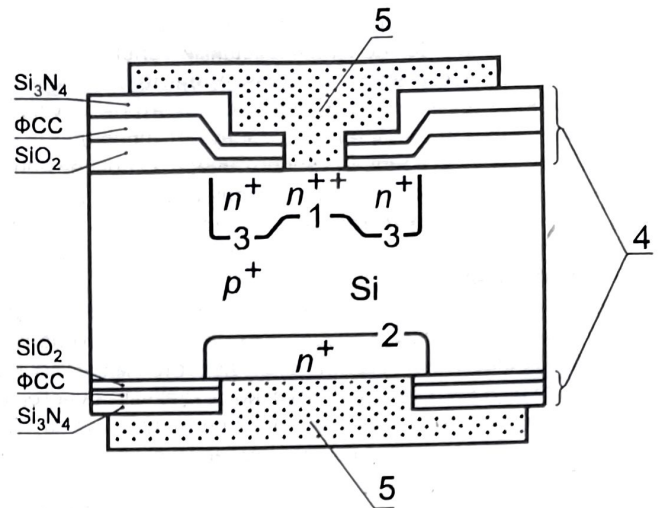


Рис. 3. Защита  $p-n$ -переходов в кристаллах прецизионных стабилизаторов:

1 — рабочий, 2 — компенсирующий и 3 — охранный  $p-n$ -переходы; 4 — комплексная защита ( $\text{SiO}_2 + \text{ФСС} + \text{Si}_3\text{N}_4$ ); 5 — контактная металлизация (многослойный омический контакт типа  $\text{TiNiAu}$ )

ро- и мезо-плазменных эффектов обеспечить однородность пробоя по всему объему перехода, а также избежать влияния поверхностных эффектов. Это обеспечивается:

созданием глубоких («скрытых»)  $p-n$ -переходов; оптимизацией размеров их активных областей;

формированием дополнительных охранных  $p-n$ -переходов, изолирующих обратно смещенный (рабочий)  $p-n$ -переход ПС от поверхности кристалла (рис. 2).

2) Ликвидация влияния поверхностных эффектов и взаимодействия активных элементов структуры ПС между собой через поверхностные состояния, что достигнуто:

конструктивным исключением выхода рабочего и компенсирующего  $p-n$ -переходов на одну и ту же поверхность кристалла;

getterированием защитной диэлектрической пленки двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) фосфоро- и боросиликатными стеклами (ФСС или БСС) на границе раздела кремний — диэлектрик ( $\text{Si} - \text{SiO}_2$ );

применением разработанной технологии создания комплексных многослойных защитных диэлектрических покрытий типа: термический (высокотемпературный)  $\text{SiO}_2 + \text{ФСС}$  (или БСС) + поликремний (или нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) (рис. 3).

3) Прецизионное управление электрофизическими параметрами рабочего и компенсирующего  $p-n$ -переходов, соответственно: увеличение концентрации основных носителей заряда и уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда, что позволило повысить радиационную стойкость и обеспечить линейность температурных характеристик ПС. Это реализовано:

применением сильно легированных исходных материалов (кремний электронного или дырочного типа проводимости) с концентрацией атомов основной легирующей примеси в пределах  $10^{19} \dots 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;

специально разработанной комбинированной технологией и конструкцией ПС, обеспечивающими селективное формирование при изготовлении активных элементов структуры ПС дополнительных рекомбинационных центров, осуществляемое введением в запрещенную зону полупроводника глубоких термически стабильных энергетических уровней или точечных радиационных дефектов различных типов (легирование атомами тяжелых металлов или радиационно-термическая обработка различными типами частиц: быстрыми электронами или  $\alpha$ -частицами).

4) Определение оптимального состава материалов для контактных соединений и разработка технологии их нанесения, обеспечивающих высокую стабильность омических контактов, что осуществлено специально созданными многокомпонентными контактными соединениями типа TiNiAu; TiAl; NiAu и др., наносимыми высокотемпературным распылением в вакууме.

5) Введение в структуру ПС термокомпенсирующих  $p-n$ -переходов и создание управляемой технологии получения рабочих и компенсирующих  $p-n$ -переходов с оптимизированными параметрами в едином монокристалле, обеспечивающих высокую точность термокомпенсации. Это достигнуто оптимальными соотношениями электрофизических параметров, размеров активных областей рабочих и компенсирующих  $p-n$ -переходов, глубинами их залегания, а также специальными разработанными эпитаксиально-планарными и эпитаксиально-диффузионными технологическими процессами создания монокристаллических и дискретных полупроводниковых структур ПС.

6) Стабилизация электрических параметров и гарантия классов точности ультрастабильных прецизионных стабилизаторов. Это реализовано:

введением в технологический процесс 100 %-ного искусственного старения путем длительной термотокерной тренировки в предельных статических режимах (до 1000 ч);

применением 100 %-ной ускоренной импульсной тренировки приборов с целью отжига неравновесных дефектов решетки, возникающих при высокотемпературных диффузионных процессах в сильнолегированном полупроводнике;

введением в технологический процесс 100 %-ной индивидуальной аттестации временной нестабильности напряжения стабилизации в течение 1000 ч и системы других точностных характеристик с выдачей индивидуального для каждого прибора «сертификата стабильности», гарантирующего класс точности УПС;

организацией всеобъемлющего контроля технологических процессов с целью их управления;

прогнозированием надежности УПС ускоренными испытаниями на безопасность, долговечность и сохраняемость;

разработкой методов и средств прецизионного метрологического обеспечения производства, включая рабочие эталоны ЭДС вольта, ома, кельвина, систему первичной поверки, автоматизированные измерительные комплексы с максимальной погрешностью  $\pm 0,00005\%$  за 1000 ч и  $\pm 0,0001\%$  за год.

**Заключение.** Впервые в отечественной промышленности создано и освоено в серийном производстве новое поколение УПС класса точности 0,01 . . . 0,0003, устойчивых к внешним дестабилизирующим воздействиям с точностными характеристиками на уровне десятитысячных и сотых долей процента.

Одновременно впервые в нашей стране в условиях промышленных предприятий для осуществления производственного контроля параметров разработанных УПС реализованы автоматизированные прецизионные метрологические комплексы высшей точности на базе рабочих эталонов ЭДС вольта, ома, кельвина.

Всего создано около 100 типов дискретных и интегральных УПС на напряжение стабилизации 1,2; 6,4; 7,5 и 9 В; серии 2С (КС) 166 А . . . К; 2С (КС) 190 Б . . . Ф; 2С (КС) 108 А . . . С; 2С117 А . . . П; 2С120 А . . . Д; 2С122 А . . . Е; 2С133 А . . . Е; 2С483 А . . . Д и др.

По гарантируемому предельному уровню прецизионности основных точностных параметров, например, температурного коэффициента ( $0,0005 \dots 0,00005\% / ^\circ\text{C}$ ) и долговременной стабильности напряжения стабилизации ( $0,0005 \dots 0,0003\%$  за 1000 ч) лучшие отечественные УПС нового поколения соответствуют широко известным в мировой промышленности лучшим зарубежным УПС типов МЗ 605 «Motorola» и LM 199НАI «National Semiconductor» (США).

Рассмотренные в настоящей работе УПС нашли широкое применение в спецтехнике и народном хозяйстве. В частности, с использованием УПС в качестве источников опорного (эталонного) напряжения созданы и выпускаются промышленностью следующие средства прецизионной измерительной техники: цифровые вольтметры, мультиметры, калибраторы тока и напряжения, переносные образцовые меры ЭДС, потенциометры классов точности 0,01 . . . 0,0005 (В1-18, В1-18А, В1-28, Ц31, Р-3003 и т. д.), не уступающие по своим точностным характеристикам лучшим приборам ведущих зарубежных фирм «Fluke» и «Datron». Это имеет важное значение для метрологического обеспечения производства специальной прецизионной радиоэлектронной аппаратуры и позволило существенно поднять общий метрологический уровень отечественной промышленности.

Разработки прецизионных стабилизаторов были удостоены Ленинской премии (В. К. Аладинский, А. С. Сущик) и Государственной премии СССР (В. А. Овчинников, А. Е. Булах, Ю. Ф. Лезжов, Н. Н. Максимова, А. Б. Юханов). Отдельные достижения удостоивались почетных дипломов Международных салонов по электронике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аладинский В. К. Теоретическое экспериментальное исследование электронных процессов при пробое  $p-n$ -переходов и некоторые аспекты их практического применения. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. физ.-мат. наук. — М., 1974.
2. Шокли В. // УФН. — 1962. — Т. 77. — № 1. — С. 161.
3. Millward D. G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1978. — V. NS-25. — № 6. — P. 1517.
4. Мельник В. Г. и др. // ФТП. — 1975. — Т. 9. — Вып. 6. — С. 1168.
5. Милнс Л. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. — М.: Мир, 1977.
6. А. с. 154960 СССР / В. К. Аладинский и др. — Бюл. изобрет. 1963. — № 11.