

НЕПЛАНАРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Разработка новых кремниевых силовых приборов на базе высокоомного кремния ($7 \text{ Ом}\cdot\text{см} < \rho \leq 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) сегодня направлена на увеличение прямого тока $I_{пр}$ и обратного напряжения $U_{обр\ max}$ а также на уменьшение прямого напряжения $U_{пр}$ и обратного тока $I_{обр}$. Первая задача решается за счет увеличения рабочей площади $p\text{-}n$ -перехода, остальные – за счет улучшения качества пластин монокристаллического кремния. Но это связано с рядом конструктивно-технологических недостатков: необходимостью формирования охранных колец n - или p -типа, охранных $p\text{-}n$ -переходов или прямых и обратных фасок для ограничения краевого эффекта, применения вольфрамовых или молибденовых термокомпенсаторов для снижения термоупругих механических напряжений, стоимость которых соизмерима со стоимостью исходной кремниевой пластины. Но это не единственно возможные пути совершенствования элементной базы силовой электроники. Успешно устранить указанные недостатки позволяют трубчатые (цилиндрические) непланарные структуры (NONPS – NON-Planar Structures) силовых модулей.

К изделиям силовой электроники относятся модули элементарных выпрямительных диодов, модули на полевых и МОП-транзисторах, БТИЗ, классические тиристоры типа SCR, а также управляемые тиристоры GTO, JGCT, SGCT, и др [1]. Рассмотрим непланарную цилиндрическую (трубчатую) структуру простейшего прибора – элементарного диода. Геометрическое моделирование структуры такой формы проводилось методом конформных последовательных преобразований Кристоффеля-Шварца [2,3] в плоскости XY. При этом потенциалы U и силовые линии электрического поля E на любой поверхности Z задаются в форме комплексного числа

$$z = x + jy = k \cdot \text{ch} \frac{U + j \cdot E}{m} = k \cdot \text{ch} \frac{U}{m} \cdot \cos \frac{E}{m} + j \cdot k \cdot \text{sh} \frac{U}{m} \cdot \sin \frac{E}{m}, \quad (1)$$

в то время как функция преобразования на другой выбранной плоскости, например W , задается в виде

$$W = m \cdot A \cdot \text{ch} \frac{Z}{k} \quad (2)$$

где m, k, A – коэффициенты геометрического моделирования, ch, sh – гиперболические функции косинуса и синуса, соответственно.

Л.Кожитов,
Т.Кондратенко

По законам конформных отображений (уравнение 1), для обратносмещенного кремниевого диода с планарно-эпитаксиальной структурой эквипотенциальные поверхности при $U = \text{const}$ можно описать уравнением конфокальных гипербол

$$\frac{x^2}{k^2 \cdot \cos^2 \frac{U}{m}} - \frac{y^2}{k^2 \cdot \sin^2 \frac{U}{m}} = 1, \quad (3)$$

где $a = k \cdot \cos \frac{U}{m}$, $b = k \cdot \sin \frac{U}{m}$ – полуоси гиперболы, $k = \sqrt{a^2 + b^2}$ – фокусное расстояние, определяющее форму линий равного потенциала (рис.1, пунктирные линии), m – коэффициент масштаба или коэффициент идентификации потенциала U .

В свою очередь, уравнение (1) можно привести к следующему виду относительно напряженности электрического поля, возникающего между контактами $p\text{-}n$ -перехода в структуре такого диода

$$\frac{x^2}{k^2 \cdot \text{ch} \frac{E}{m}} + \frac{y^2}{k^2 \cdot \text{sh}^2 \frac{E}{m}} = 1, \quad (4)$$

Это уравнение описывает семейство конфокальных эллипсов (рис.1) с фокусным расстоянием от общего центра $k = (a^2 + b^2)^{1/2}$ и определяет форму силовых линий напряженности E электрического поля (изогнутые сплошные линии на рис.1) на краях $p\text{-}n$ -перехода планарно-эпитаксиальной структуры. В уравнении (4) $a = k \cdot \text{ch}(E/m)$, $b = k \cdot \text{sh}(E/m)$, m – коэффициент масштаба или коэффициент идентификации напряженности электрического поля E .

При переходе от планарно-эпитаксиальной структуры силового диода к непланарной цилиндрической структуре (рис.2) окружность также можно описать комплексным числом

$$z = x + jy = E + j \cdot U = A \cdot \ln \frac{W}{R_0}, \quad (5)$$

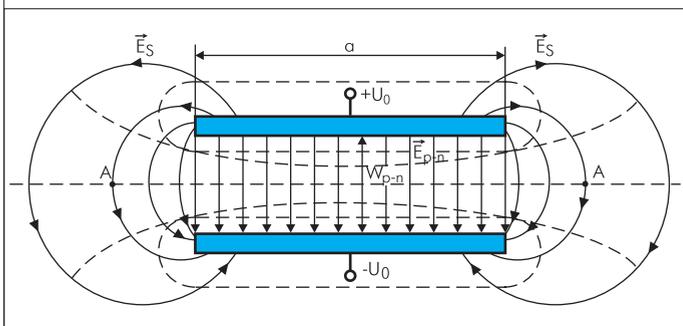


Рис.1. Эквипотенциальные поверхности диода с планарно-эпитаксиальной структурой



Расчет показывает, что $U = A \cdot \ln(R/R_0)$ и, если $A \cdot \ln(R/R_0) = \text{const}$, то это – уравнение окружности равного потенциала $U = \text{const}$ (пунктирная линия на рис.2) с радиусом

$$R = R_0 \cdot \exp \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot m}{d}, \quad (6)$$

где R_0 – начальный (заданный) радиус структуры, равный радиусу внутреннего металлического контакта pn -перехода непланарной структуры цилиндрической формы, b и d – линейный размер кристалла и расстояние между контактами планарно-эпитаксиального pn -перехода, соответственно, m – номер эквипотенциальной окружности или коэффициент геометрической идентификации.

Естественно, силовые линии электрического поля напряженности E_{pn} в такой цилиндрической структуре определяются как

$$E = A \cdot \beta; \quad \beta = 2\pi; \quad A = \frac{d}{2\pi}. \quad (7)$$

Это прямые линии (стрелки на рис.2), перпендикулярные эквипотенциальным линиям потенциала $U = \text{const}$.

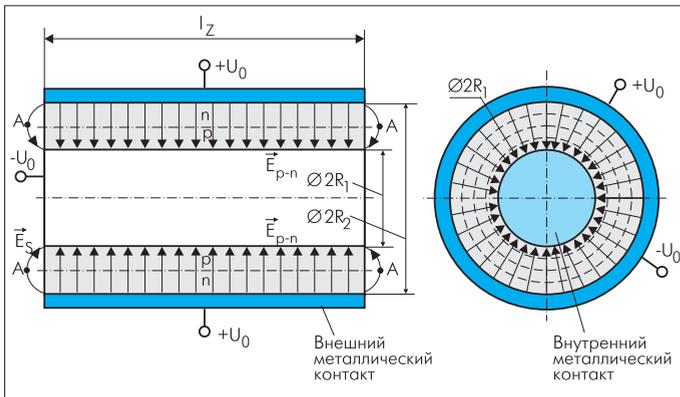


Рис.2. Диод с непланарной цилиндрической структурой

Очевидно, в pn -переходе такой структуры уже нет деформированных, эллипсоидных силовых линий электрического поля напряженностью E_s , ответственных за проявление краевого эффекта в планарно-эпитаксиальных структурах.

Анализ показывает, что степень нестабильности планарно-эпитаксиальных диодов можно оценить отношением

$$\frac{E_{s \max}^{пл}}{E_{p-n \max}^{пл}} \rightarrow 1, \quad (8)$$

тогда как уровень нестабильности непланарных кремниевых диодов равен

$$\frac{E_{s \min}^{цил}}{E_{p-n \max}^{цил}} \ll 1, \quad (9)$$

где $E_{s \max}^{пл}$ – максимальное значение напряженности электрического поля на краях pn -перехода планарно-эпитаксиальной структуры, $E_{s \min}^{цил}$ – минимальное значение напряженности электрического поля на торцах pn -перехода непланарного, цилиндрического диода, $E_{p-n \max}^{цил} = E_{p-n \max}^{пл} \geq 3 \cdot 10^5$ В/см – максимальное стандартное значение напряженности электрического поля на границе раздела pn -перехода любой структуры при лавинном пробое.

Следует, однако, отметить, что для создания кремниевых непланарных силовых приборов с pn -переходами цилиндрической формы необходимо выполнить следующие условия:

- средний радиус R_0 (он же – приблизительно радиус внутреннего цилиндрического контакта) должен значительно превышать ширину области объемного заряда цилиндрического pn -перехода, $R_0 \gg W_{pn}$; (10)

- площадь pn -перехода цилиндрической формы должна быть равна площади планарно-эпитаксиального pn -перехода со стороны квадрата b , т.е.

$$S_{эвк} = S_{pn}^{цил} = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot l_{ц} = S_{pn}^{пл} = b^2; \quad (11)$$

где $l_{ц}$ – длина цилиндрического pn -перехода по образующей;

- концентрация легирующих примесей в базовых областях должна быть однородной и постоянной по радиусу цилиндрического pn -перехода и по образующей цилиндра (оси Z), т.е. $N_D(R,Z) = \text{const}$; $N_A(R,Z) = \text{const}$;
- цилиндрические (трубчатые) подложки по своим электрофизическим параметрам (табл.1) должны соответствовать бездефектному монокристаллическому кремнию, используемому при изготовлении современных планарно-эпитаксиальных силовых приборов.

При таких электрофизических параметрах трубчатой подложки расчетную ВАХ (рис.3) элементарного цилиндрического диода с непланарной структурой можно представить как

$$I_{цил} = I_{обр} \cdot \left[e^{\pm \frac{q \cdot U(R_0)}{k \cdot T}} - 1 \right] \cdot H_1^{(1)} \cdot \frac{R_0}{L_{p,n}}, \quad (12)$$

где $H_1^{(1)}$ – функция Ханкеля 1-го рода, 1-го порядка от аргумента $x = R_0/L_{p,n}$, $L_{p,n}$ – диффузионная длина неосновных носителей; $I_{обр}$ – обратный ток обратносмещенного pn -перехода; k – постоянная Больцмана; T – рабочая температура pn -перехода; $U(R_0)$ – зависимость прямого падения напряжения на диоде от среднего радиуса R_0 цилиндрического pn -перехода.

В идеальном случае обратный ток $I_{обр}$ кремниевое цилиндрического pn -перехода (заданной площади), как и планарного pn -перехода, в основном определяется генерационно-рекомбинационной составляющей $I_{обр}^{цил} \approx I_{sr}^{пл}$. В реальных же планарно-эпитаксиальных диодах обратный ток определяется, как правило, током утечки и на много превышает ток генерации, т.е. $I_{ут}^{цил} \gg I_{sr}^{пл}$. При этом природа тока утечки объясняется физико-химическими процессами на поверхности кремния [4].

По-видимому, вклад в значение обратного тока утечки силовых планарно-эпитаксиальных диодов вносят не только поверхностные состояния (дефекты) кремния. Значителен и вклад металлов контактов, обладающих собственными механическими дефектами (краевыми дислокациями, микротрещинами, следами усталости и пр.) и являющихся источниками механоупругих дополнительных электронов с поверхностной концентрацией $10^8 \text{ см}^{-2} \leq n_{gs} \leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на краях металлических пластин (краевой эффект) [5]. Ток утечки с поверхности металлов (табл.2) определяется как

Табл. 1. Электрофизические параметры кремниевых цилиндрических (трубчатых) подложек

Тип подложки	$\rho_{n,p}^3$, Ом·см	$\Delta\rho/\rho^4$, %	$\Delta R_0/R_0^5$, %	$\mu_{n,p}^6$, см ² /В·с	$N_{деф.}^7$, 1/см ²	$\tau_{n,p}^8$, с
КДБЦТ ¹ 12/0,3	$\geq 1,5$	$\leq \pm 20$	≤ 10	≤ 500	10^4	$> 10^{-6}$
КЭФЦТ ² 12/0,3	$\geq 1,5$	$\leq \pm 20$	≤ 10	≤ 1300	10^4	$> 10^{-6}$

Примечание: ¹ КДБЦТ – цилиндрическая (трубчатая) подложка дырочной проводимости (легирующая бором) с внешним диаметром 12 мм и толщиной стенки 0,3 мм; ² КЭФЦТ – такая же подложка электронной (легирующая фосфором) проводимости; ³ $\rho_{n,p}$ – удельное сопротивление базового слоя; ⁴ $\Delta\rho/\rho$ – разброс удельного сопротивления любого слоя подложки по радиусу и по образующей цилиндра; ⁵ $\Delta R_0/R_0$ – разброс среднего радиуса цилиндрической подложки по ее образующей.

Табл.2. Механоупругие электрофизические параметры чистых контактов планарно-эпитаксиальных силовых диодов

Металл	$E_0, \text{Н/м}^2$	$G, \text{Н/м}^2$	$\sigma_{сж}, \text{Н/м}^2$	$\sigma_{раст}, \text{Н/м}^2$	$\sigma_{кр}, \text{Н/м}^2$	ν^*	$\epsilon_F, \text{эВ}$	$\Delta\epsilon_{эл.мех}, \text{эВ}$	N^{**}	$***\epsilon, \gamma$	$\alpha(\text{ткр}), 1/\text{К}$	$j_{ут(М)}^{пл}, \text{А}$	$j_{с(М)}^{цил}, \text{А}$
Au	$9 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$1,07 \cdot 10^8$	$1,37 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^9$	0,42	5,44	6,0	1	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$14,0 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Ag	$8 \cdot 10^{10}$	$2,88 \cdot 10^{10}$	$1,12 \cdot 10^8$	$1,77 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^9$	0,37	5,51	6,0	1	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$18,62 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$\geq 10^{-8}$
Cu	$12,9 \cdot 10^{10}$	$4,55 \cdot 10^{10}$	$1,08 \cdot 10^8$	$2,35 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^9$	0,35	7,0	7,1	1	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$16,61 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Al	$7,5 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$0,75 \cdot 10^8$	$1,27 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^9$	0,34		5,34	3	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
W	$40,7 \cdot 10^{10}$	$14,9 \cdot 10^{10}$	$3,36 \cdot 10^8$	$7,36 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^9$	0,30	10,88	15,7	6	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$0,83 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Mo	$32,9 \cdot 10^{10}$	$19,7 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^8$	$6,38 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^9$	0,31	10,02	15,0	6	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$0,81 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Pt	$17 \cdot 10^{10}$	$5,2 \cdot 10^{10}$	$0,71 \cdot 10^8$	$1,47 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^9$	0,44	8,16	8,3	10	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Ni	$19,6 \cdot 10^{10}$	$7,36 \cdot 10^{10}$	$2,75 \cdot 10^8$	$3,92 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^9$	0,32	6,05	10,36	2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$13,2 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$\geq 10^{-8}$
Si													

Примечания: *Коэффициент Пуассона, абсолютные единицы; ** Число валентных электронов на один атом; *** Степень остаточной деформации.

$$I_{ут(М)} = I_{sr}^{пл} \cdot F(\epsilon_0, \Delta\epsilon_{эл.мех}, T), \tag{13}$$

где ϵ_0 – энергия сублимации для атомов чистых металлов, или энергия разрыва валентных (химических) связей, или энергия активации процесса разрушения металла контакта, пропорциональная энергии Ферми металла ϵ_F . $\Delta\epsilon_{эл.мех}$ – выражает дополнительную работу, которую выполняет пондермоторная электрическая сила в обратносмещенном *pn*-переходе, приводящая к появлению дополнительных микродефектов на краях контактной металлической пластины, $F(\epsilon_0, \Delta\epsilon_{эл.мех}, T)$ – энергетическая функция возбуждения, требующая табулирования для каждого контактного чистого металла, T – рабочая температура *pn*-перехода.

Как показывает расчет (см. табл.2), значение обратного тока утечки с поверхности контактных металлов реального выпрямительного планарно-эпитаксиального диода может быть соизмеримо с общим током утечки и определяться остаточными термоупругими механическими напряжениями σ_{OZ} , величина которых максимальна для плоских металлических контактов $\sigma_{OZ \max} \rightarrow I_{ут. \max}$. Минимальное значение обратного тока утечки с поверхности контактных металлов реального выпрямительного непланарного диода цилиндрической формы $I_{ут. \min}^{цил} \leq I_{sr}$ определяет минимальное остаточное термоупругое напряжение $\sigma_{OZ \min}$ для цилиндрических металлических оболочек [6].

Таким образом, наличие краевых дислокаций и микротрещин в чистых металлах с поверхностной концентрацией $n_{gs} \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ создает остаточную деформацию порядка $\epsilon, \gamma \approx 1\%$, т.е. $\epsilon, \gamma \approx 0,1$, что эквивалентно появлению механических напряжений $\sigma_{р}, \sigma_{см}, \sigma_{кр} \geq 2,4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, при которых резко ухудшается обратная ветвь ВАХ планарно-эпитаксиального диода. Другими словами, эффект упругого возбуждения любой природы (растяжение, сжатие, пондермоторные электрические и магнитные силы, резка, пайка, сварка и др.) приводит к изменению градиента концентрации механических дефектов на краях металлических пластин планарно-эпитаксиального силового прибора – возникает так называемый механический краевой эффект, провоцирующий электрический краевой эффект при обратном смещении прибора [7]. Кратко это можно объяснить высвобождением некой упругой энергии при образовании механического дефекта в чистых металлах, особенно микротрещин [8], и появлением дополнительной поверхностной энергии $\epsilon_{уд \text{ пов}} \approx 0,1 G \cdot a$, где a – параметр решетки, G – модуль сдвига. Эта энергия расходуется на эмиссию с грани микротрещин дополнительных электронов, добавляющих новую составляющую в значение тока утечки силового полупроводникового прибора, работающего в замкнутой электрической цепи.

Следовательно, при формировании металлических контактов непланарных выпрямительных силовых диодов с цилиндрическими *pn*-переходами или барьерами Шоттки необходимо исключить опе-

рации механического скрайбирования, резки, сварки (в том числе термокомпрессии), а также операции пайки и др., и обеспечивать такие значения электрофизических, упругих параметров чистых металлов контактов, которые удовлетворяли бы заданным критериям стабильности, т.е.

$$\begin{aligned} \sigma_{сж}, \sigma_{раст}, \sigma_{сдв} &\leq 10^7 \text{ Н/м}^2; \quad \epsilon, \gamma \leq 10^{-3}; \\ n_{gs} &\leq 10^8 \text{ см}^{-2}; \quad j_{ут(М)}^{цил} \leq 10^{-10} \text{ А/см}^2, \end{aligned} \tag{14}$$

где $j_{ут(М)}^{цил}$ – плотность механоэлектрического тока утечки с поверхности металлических контактов обратносмещенного цилиндрического диода с *pn*-переходом или барьером Шоттки.

Анализ ВАХ экспериментальных образцов непланарных выпрямительных диодов как с *pn*-переходом, так и с барьером Шоттки, изготовленных по экспериментальной непланарной технологии (NON Planar Technology – NONPT), показал, что при обратном смещении ток утечки отдельных диодов близок по значению к обратному току расчетной ВАХ (см. рис.3). В то же время обратные токи других образцов диодов на порядок и более превышали обратный ток расчетной ВАХ, а падение прямого напряжения $U(R_0)$ этих образцов, при котором появляется прямой рабочий ток, находится далеко за пределами прогнозируемой прямой ветви ВАХ и равно или превышает 20 В. Такие нестабильные результаты, тем не менее, свидетельствуют о формировании потенциального барьера в кремниевых структурах цилиндрической формы как с *pn*-переходом, так и с барьером Шоттки, образованных на кремниевых цилиндрических (трубчатых) подложках КДБЦТ и КЭФЦТ, выращенных методом А.В. Степанова [9,10,]. Большое же значение падения прямого напряжения $U(R_0)$ (> 50 %) обусловлено значительным разбросом удельного сопротивления

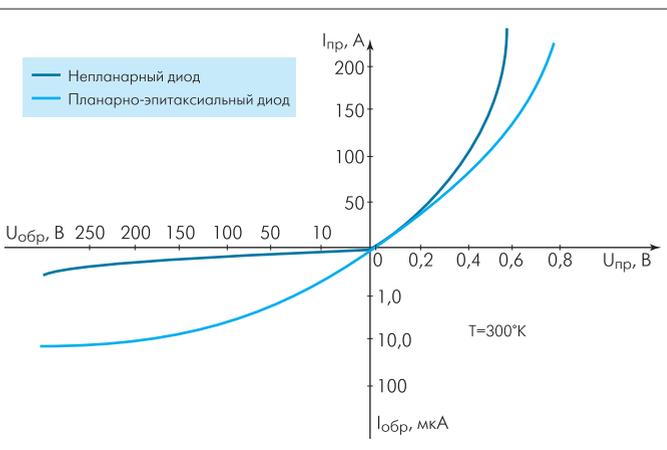


Рис.3. Расчетные вольт-амперные характеристики планарно-эпитаксиального и трубчатого непланарного кремниевых диодов



цилиндрических слоев кремниевой подложки, вопреки данным табл. 1. Следовательно, метод Степанова не позволяет точно выдерживать заданное значение удельного сопротивления и геометрию основной базы диода, поэтому цилиндрические монокристаллы имеют блокные структуры по радиусу и по образующей цилиндра.

Расчет омического сопротивления любого кремниевого цилиндрического слоя на основе его геометрии не вызывает затруднений:

$$R_s = \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{ц} \cdot \sigma_{\rho,n}} = \frac{\rho_{\rho,n} \cdot \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{ц}}, \quad (15)$$

где r_i, r_{i-1} – радиус, $\sigma_{\rho,n}$ – удельная электропроводность, $l_{ц}$ – длина по образующей цилиндра и $\rho_{\rho,n}$ – удельное сопротивление соответствующих слоев кремния.

Соотношение между геометрическими размерами $r_i, r_{i-1}, l_{ц}$ (см. рис.2) любой непланиарной силовой структуры цилиндрической (трубчатой) формы и ее эквивалентной площади, исходя из условий, необходимых для ее формирования, описывается уравнением 11. С тепловыми параметрами геометрические размеры связаны через мощность рассеяния $P_{расс}$ по закону теплопроводности Фурье

$$P_{расс} = \frac{l \cdot (T - T_0) \cdot S_{эkv}}{r_i - r_{i-1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T - T_0) \cdot r_i \cdot l_{ц}}{r_i - r_{i-1}}, \quad (16)$$

где T – температура цилиндрического кремниевого кристалла; T_0 – температура окружающей среды; $\lambda \leq 200$ Вт/м·°С – удельная теплопроводность кремния.

Очевидно, трубчатая конструкция силового кремниевого прибора облегчает проблему отвода Джоулева тепла за счет естественной или вынужденной конвекции охлаждающей среды сквозь прибор. Ближайшие зарубежные аналоги отечественных непланиарных приборов – устройства фирмы Ball Semiconductor – представляют собой сплошные кремниевые гранулы сферической формы диаметром 1–1,2 мм. PN-переходы или МДП-структуры формируются на поверхности сферы. Сферы собирают в блоки на единой платформе. Но такая конструкция не позволяет избежать краевых эффектов на поверхности и затрудняет отвод тепла от гранул. Таким образом, предложенные структуры непланиарных кремниевых диодов [11] более эффективны, чем зарубежные сферические микросхемы и маломощный силовой преобразователь /12/, сформированные на поверхности сферы в виде дискретных модулей без центрального, расположенного по оси симметрии, металлического контакта. Следовательно, разработка кремниевых структур с поверхностью второго порядка, с центральным по оси симметрии контактом (более перспективных, нежели зарубежные аналоги) – новое направление создания стабильных и надежных кремниевых силовых выпрямительных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грехов И.В.** Кремниевая силовая электроника: состояние, перспективы развития. Материалы электронной техники – Известия высших учебных заведений, Москва, МИСиС, 2000, №3.
2. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники, М.: Высшая школа, 1973.–500 с.
3. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1984.–832 с.
4. **Агаларзаде П.С., Петрин А.И., Изидинов С.О.** Основы конструирования и технологии обработки поверхности рп-перехода.– М.: Сов. радио, 1978.–223 с.
5. Четвертый всесоюзный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел (Иркутск).– М.: Наука, 1973.–328 с.

6. **Вольмир А.С.** Нелинейная динамика пластинок и оболочек.–М., 1972.
7. Введение в микромеханику. Под ред. М. Онами/Пер. с яп.– М.: Металлургия, 1987.–280 с.
8. **Ван Бюрен.** Дефекты в кристаллах/Пер. с англ.–М.; ИЛ, 1962.–584 с.
9. **Антонов П.И., Затуловский Л.М., Костычев А.С. и др.** Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова.– Л.: Наука, 1987.–176 с.
10. **Степанов А.В.** – ЖЭТФ, 1959, т. 29, вып. 3, с.381–393.
11. Патент 2165661, РФ. Выпрямительный диод Шоттки./Приоритет от 27.03.2000. Патент 2168799 РФ. Полупроводниковый выпрямительный диод/ Л.В.Кожитов, В.В.Крапухин, Т.Я.Кондратенко, Г.Г.Тимошина, А.М.Косарев, Т.Т.Кондратенко. Приоритет от 07.07.2000.
12. Патент: 00.5945725А США, Transistor on spherical surface. Ball semiconductor Inc., Alln, Texas, October 1998; Spherical shaped integrated circuit utilizing an inductor. 31 August, 1999/Akira Jshikawa
13. **Абросимов Н.В., Брантов С.К., Татарченко В.А., Эдельбаум Б.М.** –Известия АН СССР, Неорг. материалы, 1982, т. 18, вып. 2, с.181–184.
14. **Евтодий Б.Н., Егоров Л.П., Гринюге Г.А.** – Известия АН СССР. Серия физ., т. 49, вып. 12, с.2349–2354.
15. **Енишерлова К.Л., Концевой Ю.А.** Проблемы кремния в силовой электронике: монокристаллы, пластины, структуры.– Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.– Москва, МИСиС, 2000, №4, с.4–9.