НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ

SOME PROMISING DESIGNS OF PIEZOELECTRIC ENERGY GENERATORS

А.Чуприн¹, Р.Гаврилов², С.Генералов², С.Никифоров² / andchuprin@rambler.ru

A.Chuprin¹, R.Gavrilov², S.Generalov², S.Nikiforov²

Рассмотрены конструкции однорезонансных и широкополосных пьезоэлектрических генераторов энергии, представлены оценки их ключевых параметров, определены наиболее перспективные материалы и схемы.

The designs of single-resonant and broadband piezoelectric energy generators are considered, their key parameters are estimated, the most promising materials and schemes are defined.

Сбор энергии можно определить как преобразование доступной энергии из окружающей среды в электрическую энергию, которая может быть использована сразу или сохраняться для последующего потребления. В зависимости от масштаба источников различаются способы сбора энергии и области ее дальнейшего применения. Вибрации в окружающем нас мире или градиенты температуры не обеспечивают достаточный уровень выходной мощности для передачи по электросетям, однако могут быть использованы для стабильного питания автономных электронных датчиков или преобразующих элементов.

На современном уровне развития техники в качестве питающих элементов для автономных устройств могут использоваться только батареи. Тенденции к сокращению размеров транзисторов и развитие КМОП- и МЭМС-технологий способствовали массовому производству датчиков и преобразователей с небольшими габаритными размерами и очень низким энергопотреблением. Размер, вес и стоимость этих систем в настоящее время ограничиваются технологией производства батарей. Но наиболее существенный недостаток применения батарей часто заключается в невозможности их замены, что приводит к ограничению срока службы и устойчивости автономных устройств. Развитие методов сбора энергии может привести к значительному увеличению срока службы или даже появ-

лению самоподдерживающихся систем, полностью устраняя необходимость использования батарей.

Существуют три основных механизма преобразования вибраций в электрическую энергию: электромагнитный, электростатический и пьезоэлектрический. В первом случае относительное перемещение между катушкой и магнитным полем вызывает протекание тока в катушке. Электростатический генератор состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком, при перемещении проводников относительно друг друга энергия, хранящаяся в конденсаторе, меняется. В третьем варианте преобразование механической энергии в электрическую происходит на основе пьезоэффекта в пьезокерамическом материале.

Конструкция пьезогенераторов в основном определяется условиями их работы. Например, устройства консольного типа, как правило, применяются при механической вибрации, в то время как системы мембранного типа (устройства режима давления) используются при медленно меняющемся давлении.

Так как не существует стандартных показателей качества, которые могут быть использованы для сопоставления пьезоэлектрических генераторов с разными принципами работы, то рациональное сравнение возможно только для устройств, имеющих одинаковую конструкцию и принцип действия.

¹ НПЦ "СпецЭлектронСистемы" / SpecElectronSystems RPC.

² НПК "Технологический центр" / Technology center RPC.

ОДНОРЕЗОНАНСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Наиболее распространенной конструкцией пьезоэлектрических генераторов является нагруженная массой консоль с пьезоэлектрическими элементами, которая обычно используется в резонансном режиме работы.

В статье [1] описан микромощный генератор, собирающий вибрационную энергию от резонансных колебаний пьезоэлектрического многослойного кантилевера с инерционной массой (рис.1). Активная часть, состоящая из слоя цирконат-титаната свинца (ЦТС) толщиной 2 мкм и кремния толщиной 5 мкм, оснащена штыревыми электродами для достижения более высоких напряжений. Коэффициент связи $K^2 = 5\%$ характеризует разницу резонансных частот для низкого и высокого импеданса. При оптимальном сопротивлении нагрузки и напряжении 1,6 В была получена мощность 1,4 мкВт для кантилевера с размером $0,8 \times 1,2$ мм и площадью активной области $0,8 \times 0,4$ мм при ускорении 2 g на частоте 870 Гц.

В статье [2] проведено сравнение различных резонансных пьезоэлектрических генераторов консольного типа. Как видно из табл.1, ЦТС и AlN являются наиболее широко используемыми пьезоэлектрическими материалами для пьезогенераторов консольного типа. Значения нормализованной удельной мощности у ЦТС-устройств выше, чем у устройств на базе AlN, что в основном связано с более высоким коэффициентом электромеханической связи в ЦТС. Среди ЦТС-устройств, объемные материалы и эпитаксиальные структуры обеспечивают более высокую нормализованную удельную мощность по сравнению с золь-гелями и аэрозолями. Этот факт указывает на то, что выращенный эпитаксиальный слой характеризуется улучшенной электро-механической связью в тонкой пленке ЦТС.

Максимальное значение нормализованной удельной мощности ($104,7 \text{ мкВт/мм}^3/\text{g}^2$) в табл.1 получено в конструкции с использованием объемного ЦТС [5]. При этом, самое низкое значение нормализованной удельной мощности ($0,055 \text{ мкВт/мм}^3/\text{g}^2$) получено в устройстве с применением AlN на стальной подложке [11], что в основном объясняется неоптимальным соотношением толщин пленок.

Следует отметить, что нормализованная удельная мощность устройства зависит не только от пьезоэлектрического материала, но и от плотности и расположения пробных масс, а также от других факторов.

Рис.1. Структурная схема и принцип работы пьезоэлектрического многослойного кантилевера для сбора энергии вибрации основания [1]

Fig.1. Schematic structure and operation principle of piezoelectric laminated cantilever for harvesting vibration energy of the frame

Рис.2. Схема системы на основе пьезоэлектретных слоев, установленной на шейкере [15]

Fig.2. Diagram of the system based on piezoelectric layers, mounted on a shaker [15]

Помимо балочных конструкций, разработаны преобразователи вибрационной энергии, состоящие из нескольких слоев пьезоэлектрета (ферроэлектрета) на основе ячеистых полимеров. Одна из таких конструкций представлена в статье [15].

На рис.2 показана система на основе двух трехслойных складчатых элементов. Пьезоэлектретные слои, расположенные между грузиком и основанием, удерживаются вместе с помощью двух магнитов. Для измерения эле-

Таблица 1. Сравнение пьезогенераторов консольного типа [2]

Table 1. Comparison of piezo generators of cantilever type [2]

Авторы Authors	Материал Material	Мода Mode	Объем, мм ³ Volume, mm ³	Мощность, мкВт Power, μW	Ускорение, g Acceleration, g	Частота, Гц Frequency, Hz	Нормализованная удельная мощ- ность, (мкВт/мм ³ /г ²) Normalized specific power (μW/mm ³ /g ²)
Roundy и Wright [3]	Объемный ЦТС Bulk PZT	d31	535	375	0,255	120	10,8
Aktakka и др. [4]	Объемный ЦТС Bulk PZT	d31	19,7	2,74	0,1	167	13,91
Reilly и др. [5]	Объемный ЦТС Bulk PZT	d31	61,3	4000	0,25	100	104,7
Fang и др. [6]	Золь-гель ЦТС Sol-gel PZT	d31	0,20	2,16	1,0	461	10,8
Shen и др. [7]	Золь-гель ЦТС Sol-gel PZT	d31	0,77	0,24	0,5	184	1,25
Murali и др. [1]	Золь-гель ЦТС Sol-gel PZT	d33	0,32	1,40	2,0	855	1,09
Lee и др. [8]	Аэрозоль ЦТС Aerosol PZT	d31	0,43	2,10	2,0	256	1,24
		d33	0,61	1,29	2,0	214	0,53
Isarakorn и др. [9]	Эпитаксиаль- ный ЦТС Epitaxial PZT	d31	0,15	13,0	1,0	2300	85,25
Morimoto и др. [10]	Эпитаксиаль- ный ЦТС Epitaxial PZT	d31	4,88	5,30	0,51	126	4,18
Сао и др. [11]	AlN	d31	114	0,24	0,2	69	0,055
Marzencki и др. [12]	AlN	d31	0,34	0,80	2,0	1495	0,59
Elfrink и др. [13]	AlN	d31	1,28	1,46 (атм.)	0,2	597	2,85
				6,90 (вакуум)	0,2	599	13,48
Defosseux и др. [14]	AlN	d31	1,32	0,59 (атм.)	0,2	212	11,17
				0,53 (вакуум)	0,07	212	84,45

мент установлен на электромагнитный шейкер. В цепи с резистором R_1 измеряется электрическая мощность, вызванная механическими колебаниями. При ускорении в пьезоэлектрическом слое происходит генерация электрического тока и напряжения, которые во многом зависят от массы грузика и пьезоэлектрических коэффициентов используемых материалов. После преобразования переменного тока в постоянный полученная энергия может использоваться для питания электронных компонентов.

Используя конструкцию из девяти слоев пьезоэлектрика и груза массой 8 г, можно получить энергию до 1,3 мВт на частоте 140 Гц при ускорении 1 g. При улучшении связи между грузиком и слоями пьезоэлектрика, что приводит к снижению влияния затухания, можно увеличить получаемую мощность до 5 мВт при частоте 700 Гц. Моделирование показало, что для десятичного пьезоэлектрика и массы 80 г можно получить мощность на уровне от 0,1 до 1,0 мВт на частотах ниже 100 Гц.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Большинство вибрационных генераторов предназначены для работы на одной резонансной частоте, но окружающие вибрации, как правило, широкополосные и изменяющиеся во времени, что делает сбор вибрационной энергии затруднительным. Кроме того, выходное напряжение многих вибрационных генераторов гораздо меньше порогового напряжения выпрямительных диодов, что приводит к значительным потерям энергии в процессе выпрямления. По этим причинам вибрационные генераторы энергии до сих пор не нашли широкого практического применения.

Для расширения пропускной способности (частотного диапазона) было предложено множество методов. Один из них заключается в использовании нескольких независимых вибрационных систем, которые имеют различную резонансную частоту. Другой подход основан на пассивной или активной настройке резонансной частоты. Пассивная настройка может быть осуществлена путем ручной регулировки инерционной массы или изменения нагрузки на консольной балке. Активная же настройка обычно реализуется путем интеграции дополнительных приводов и может проводиться в режиме реального времени, но такая система более сложна и дорогостояща. Кроме того, исполнительные механизмы всегда потребляют энергию, которая может быть больше генерируемой мощности.

Еще одним популярным подходом [16], основанным на нелинейных колебаниях, является применение осциллятора Дuffинга. Например, когда

Рис.3. Конструкция широкополосного вибрационного генератора [16]

Fig.3. Design of broadband vibration generator [16]

амплитуда колебаний велика, то закрепленная с двух концов консоль из-за растягивающих напряжений может войти в нелинейную область колебания. Нелинейная вибрация также может быть вызвана с помощью биустойчивых систем.

Инженерами университета Уэйна (Electrical and Computer Engineering, Wayne State University, США) разработан широкополосный высокоэффективный вибрационный генератор на основе многоступенчатой сложно-асимметричной консоли (рис.3).

Рис.4. Частотные характеристики трехступенчатого сложно-каскадного вибрационного генератора [16]

Fig.4. Frequency characteristics of three-stage cascade vibration generator [16]

Таблица 2. Параметры конструкции широкополосного вибрационного генератора [16]

Table 2. Design parameters of broadband vibration generator [16]

Элемент конструкции Structural element	Параметр Parameter	Степень 1 Stage 1	Степень 2 Stage 2	Степень 3 Stage 3
Пьезоэлектрический слой Piezoelectric layer	Геометрические размеры (Д × Ш × Т), мм Dimensions (L × W × T), mm	8,5 × 10 × 0,127	8,5 × 10 × 0,127	8,5 × 10 × 0,127
	Материал Material	ЦТС PZT		
	Плотность материала, ×10 ³ кг/м ³ Density ×10 ³ kg/m ³	7,8		
	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	66		
Механические консоли Mechanical console	Геометрические размеры (Д × Ш × Т), мм Dimensions (L × W × T), mm	8,5 × 8 × 1	8,5 × 8 × 1	8,5 × 8 × 1
	Материал Material	Al		
	Плотность материала, ×10 ³ кг/м ³ Density ×10 ³ kg/m ³	2,7		
	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	69		
Инерционная масса Inertial mass	Масса, г Mass, g	29	20	50
	Материал Material	Al		
	Плотность материала, ×10 ³ кг/м ³ Density ×10 ³ kg/m ³	2,7		
	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	69		

Предложенная конструкция за счет S-образной формы изгиба и ассиметрично расположенных консолей позволяет максимально увеличить напряжения в пьезоэлектрическом слое и эффективно осуществлять сбор энергии при нескольких степенях свободы. Дальнейшее развитие ассиметрии конструкции позволит расширить рабочий диапазон частот. Параметры устройства указаны в табл.2.

Резонансные частоты ступеней 1-3 равны соответственно 35,4, 74,2 и 126,4 Гц. При нагрузке выходов пьезоэлектрических (ЦТС) элементов тремя резисторами с сопротивлением 1 кОм первые три резонансные частоты составили

34,5, 73,7 и 124,9 Гц соответственно. Как показано на рис.4, в первом резонансном режиме три ступени имеют практически одинаковые выходные напряжения, во втором резонансном режиме вторая ступень доминирует и имеет самое большое выходное напряжение, тогда как в третьем резонансном режиме, самое большое выходное напряжение показывает третья ступень.

Для измерения переменного тока к выходам устройства были отдельно подключены мостовые выпрямители в сочетании с емкостью 2200 фФ. Зарядная кривая емкости представлена на рис.5. Среднее значение собранной мощности оценивается в 1,1 мкВт. Мощность

может быть увеличена путем разработки оптимизированного устройства с подстроенными резонансными частотами.

На рис.6 изображен другой вариант структуры микромеханического широкополосного накопителя энергии [17]. Она состоит из четырех закрепленных с двух сторон одинаковых балок, которые связаны с одной внешней массой. Устройство изготовлено путем комбинации поверхностных и объемных процессов микрообработки. Основную структуру образуют слои термического окисла, нитрида, полученного путем химического осаждения из паровой фазы низкого давления, и низкотемпературного оксида (рис.6с). Активный слой состоит из титановых/алюминиевых встречно-штыревых электродов, слоя ЦТС толщиной 0,27 мкм и диффузионного барьерного слоя из ZrO_2 . Пленка, нанесенная плазменно-химическим осаждением из газовой фазы, добавлена для защиты активного слоя, а также для контроля остаточного механического напряжения. Структурный слой сформирован с помощью реактивного ионного травления. Чтобы избежать чрезмерного механического напряжения, струк-

Рис.5. Кривая зависимости напряжения от времени [16]

Fig.5. Graph of voltage versus time [16]

тура "освобождается" с помощью XeF_2 -травления кремния.

На верхней части слоя ЦТС расположены 1000 пар встречно-штыревых электродов, которые

Рис.6. Сверхширокополосный накопитель энергии [17]: а – общая деформация; б – главная часть накопителя; в – схема поперечного сечения накопителя; г – изображение готового устройства

Fig.6. Ultra-wideband energy storage device [17]: a – total deformation; б – main part of device; в – transverse cross section of device; г – image of the device

Рис.7. Частотная характеристика СШП-накопителя энергии [17]

Fig.7. Frequency characteristic of the UWB energy storage device [17]

группируются в 16 внешних цепей и извлекают электрический заряд, генерируемый в слое ЦТС при пьезоэлектрическом эффекте.

Заключенное в корпус устройство было установлено на электромеханический вибростенд, который приводился в действие входным напряжением 1В, и возбуждено синусоидальным сигналом, изменявшимся от 500 до 2000 Гц. Деформация измерялась дистанционно с помощью лазерной доплеровской виброметрии. Нелинейный накопитель показал резонанс в более широком диапазоне частот по сравнению с линейным резонатором с аналогичной добротностью. В отличие от линейного резонатора, отклик нелинейного накопителя зависит от траектории возбуждения. При увеличении частоты колебаний резонатора вдоль устойчивой области высоких энергий с помощью автоматической подстройки происходит "спрыгивание" с высокого энергетического состояния в низко-

энергетическое в тот момент, когда неустойчивость превышает жесткость нелинейной обратной связи (рис.7).

Частоты, на которых происходит "скачок" вниз, отмечены зелеными стрелками (рис.7а). Выходное напряжение, генерируемое накопителем энергии, контролируется с помощью анализатора быстрого преобразования Фурье. Для каждой частоты возбуждения были измерены две компоненты напряжения. Первой гармонике соответствует деформация изгиба (рис.7б), гармонике на частоте в два раза выше – деформация растяжения (рис.7с).

На рис.8 синяя кривая показывает теоретическую мощность нелинейного резонатора ДUFFинга, полученную на основе механического анализа при условии идеальной электрической нагрузки, а красная кривая изображает генерируемую мощность, определенную на основе измерения напряжения холостого хода.

Пьезоэлектрический источник питания может быть охарактеризован как идеальный источник напряжения (или тока) с определенной внутренней емкостью. Соответственно, фактическая генерируемая мощность рассчитывается с учетом измеренного напряжения холостого хода (рис.8), внутренней емкости (8,5 нФ) и сопротивления (3,5 МОм). На рис.8 она показана красной кривой в сравнении с теоретической максимальной мощностью (синяя кривая). В отличие от чисто резистивной нагрузки, переключение индуктивности используется для повышения эффективности получения электроэнергии до $P_{\max}$:

$$P_{\max} = \frac{Q_L I_p^2}{4\pi^2 C_0 \omega_{\text{вх}}},$$

где I_p , C_0 и $\omega_{\text{вх}}$ – пьезоэлектрический источник тока, внутренняя емкость и частота возбуждения соответственно. С учетом объема ЦТС ($4 \times 5 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 265 \text{ нм} \approx 0,021 \text{ мм}^3$) генерируемая удельная мощность равна 2 Вт/см^3 .

Способность подобного устройства, но со смещенным электродом, к генерации электроэнергии проверяется с помощью прямых резистивных нагрузок. Деформация растяжения в балке между электродами приведет к уменьшению механического напряжения в пять раз, в такой же степени уменьшается электрическое выходное напряжение и в 25 раз снижается мощность по сравнению с базовым устройством. При испытаниях на частоте 450 Гц устройство генерирует 140 нВт мощности, измеряемой при оптималь-

Рис.8. Механический отклик системы как функция частоты возбуждения [17]

Fig.8. Mechanical response of the system as a function of frequency of excitation [17]

ной резистивной нагрузке 290 кОм. Исправляя ориентацию электрода и повышая качество устройства, можно увеличить напряжение холостого хода более чем в семь раз (до 0,8 В) на частоте 1,3 кГц (рис.8). Учитывая емкость и сопротивление обоих устройств, полученная электрическая мощность при оптимальной прямой резистивной нагрузке составит 22 мкВт, и это значение можно сравнить с ожидаемой мощностью 45 мкВт, показанной на рис.8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время многие исследования получения энергии сосредоточены на извлечении ее из окружающих колебаний. Наиболее перспективным направлением выглядят пьезоэлектрические устройства благодаря таким их преимуществам по сравнению с механическими способами, как более высокая плотность выходной мощности, масштабируемость, простота внешних электрических схем.

Большинство конструкций пьезоэлектрических генераторов создается на основе консолей с инерционной массой. Пьезоэлектрические элементы выполняются на базе ЦТС или нитрида алюминия. ЦТС может быть использован в форме объемного материала, золь-геля, аэрозоля. Максимальное значение нормализованной удельной мощности для консоли превышает 100 мкВт/мм³/g², достигаемое при использовании объемного ЦТС.

Наиболее перспективными выглядят конструкции, позволяющие расширить частотный диапазон разрабатываемых пьезогенераторов. Для решения этих задач применяются различные методы, среди которых использование нескольких независимых вибрационных систем, имеющих различную резонансную частоту, или осциллятора Дуффинга.

Работа выполнена в ЗАО "НПЦ СпецЭлектронСистемы" совместно с НПК "Технологический центр" при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.579.21.0086 от 21.11.2014 г.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Muralt P., Marzencki M., Belgacem B., Calame F., Basrour S. Vibration energy harvesting with PZT micro device. *Procedia Chemistry*, vol.1, 2009, pp. 1191-1194.
2. Toprak A., Tigli O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges. *Applied Physics Reviews*, vol.1, 031104 (2014), doi: 10.1063/1.4896166.
3. Roundy S., Wright P.K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Mater. Struct.*, 13 (2004), pp. 1131-1142.
4. Aktakka E.E., Peterson R.L., Najafi K. Thinned-PZT on SOI process and design optimization for piezoelectric inertial energy harvesting. Paper presented at 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), Beijing, 2011, pp. 1649-1652.
5. Reilly E.K., Burghardt F., Fain R., Wright P. Powering a wireless sensor node with a vibration-driven piezoelectric energy harvester, 2011, *Smart Mater. Struct.*, 20 125006.
6. Reilly E.K., Reilly F., Fain R., Wright P. Powering a wireless sensor node with a vibration-driven piezoelectric energy harvester. *Smart Mater. Struct.*, 2011, 20:125006, doi: 10.1088/0964-1726/20/12/125006.
7. Fang H.B., Liu J.Q., Xu Z.Y., Dong L., Wang L., Chen D., Cai B.C., Liu Y. Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting, *Microelectron. J.*, 37(11), pp. 1280-1284 (2006).
8. Shen D.N., Park J.H., Noh J.H., Choe S.Y., Kim S.H., Wickle H.C., Kim D.J. Micromachined PZT cantilever based on SOI structure for low frequency vibration energy harvesting. *Sens. Actuators, A* 154(1), pp. 103-108 (2009).
9. Lee B., Lin S., Wu W., Wang X., Chang P., Lee C. Piezoelectric MEMS generators fabricated with an aerosol deposition PZT thin film. *Micromech. Microeng.*, 19(6), 065014 (2009).

10. Isarakorn D., Briand D., Janphuang P., Sambri A., Gariglio S., Triscone J.M., Guy F., Reiner J.W., Ahn C.H., de Rooij N. F. The realization and performance of vibration energy harvesting MEMS devices based on an epitaxial piezoelectric thin film. *Smart Mater. Struct.*, 20(2), 025015 (2011).
11. Morimoto K., Kanno I., Wasa K., and Kotera H. High-efficiency piezoelectric energy harvesters of c-axis-oriented epitaxial PZT films transferred onto stainless steel cantilevers. *Sens. Actuators, A* 163(1), pp. 428–432 (2010).
12. Cao Z.P., Zhang J.Y., Kuwano H. Design and characterization of miniature piezoelectric generators with low resonant frequency. *Sens. Actuators, A* 179, pp. 178–184 (2012).
13. Marzencki M., Ammar Y., Basrour S. Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit. *Sens. Actuators, A* 145–146, 363–370 (2008).
14. Elfrink R., Renaud M., Kamel T., De Nooijer C., Jambunathan M., Goedbloed M., Hohlfeld D., Matova S., Pop V., Caballero L. Vacuum-packaged piezoelectric vibration energy harvesters: damping contributions and autonomy for a wireless sensor system. *J. Micromech. Microeng.*, 20(10), 104001 (2010).
15. Defosseux M., Allain M., Defay E., Basrour S. Highly efficient piezoelectric micro harvester for low level of acceleration fabricated with a CMOS compatible process. *Sens. Actuators, A* 188, pp. 489–494 (2012).
16. Pondrom P., Hillenbrand J., Sessler G. M., Bös J., Melz T. Vibration-based energy harvesting with stacked piezoelectrets. *Applied Physics Letters*, 104, 2014, doi: 10.1063/1.4874305.
17. Hu Y., Xu Y. A wideband vibration energy harvester based on a folded asymmetric gapped cantilever. *Applied Physics Letters*, 104, 053902 (2014); doi: 10.1063/1.4863923.
18. Hajati A., Kim S.G. Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 99, 083105 (2011); doi: 10.1063/1.3629551.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

Цена 975 руб.

КОНТРОЛЬ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКЕ Груздов В.В., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А.

В книге представлено обобщение накопленного опыта по созданию методов входного и технологического контроля при разработке и производстве СВЧ транзисторов на основе широкозонных материалов, в частности, транзисторов на гетероструктурах типа AlGaIn/GaN. Рассмотрены системы отечественных и зарубежных стандартов, на основе которых проводятся разработки СВЧ транзисторов. Подробно описаны физические основы гетероструктур, описаны свойства широкозонных полупроводников, методы изготовления СВЧ транзисторов. Детально анализируется технология производства транзисторов с учетом имеющегося опыта их реального изготовления. Рассмотрены электрические, оптические, рентгеновские, электронно-микроскопические и аналитические методы, которые применяются при входном и технологическом методах контроля. Рассмотрен опыт создания в ОАО "НПП "Пульсар" СВЧ транзисторов и СВЧ блоков на их основе.

Книга будет полезна специалистам в области электроники, исследователям, инженерам-практикам и разработчикам радиоэлектронной аппаратуры.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2016. – 328 с.
ISBN 978-5-94836-426-1

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru