

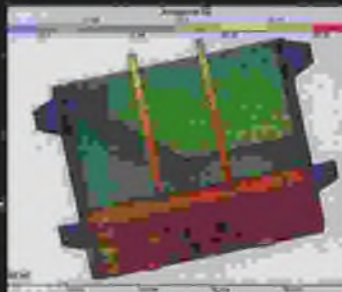
(с. 22) 31

Разработчики сложных систем вольно или невольно копируют структуру биообъектов



(с. 30) 31

Отечественный программный продукт – автоматизированная система моделирования «Прогресс-АСОНИКА»



(с. 84) 31

Современная реализация алгоритмов векторного регулирования электропривода



# Генетика и микроэлектроника?!

# С. 22

# содержание ЭК № 10/2015

## РЫНОК

6 Алексей Черкасов

По всем фронтам силовой электроники

## БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10 Игорь Прохин

Стандарты беспроводной связи для интернета вещей

12 Иван Красноя

Обзор недорогих радиопередатчиков малого размера

## ИСПЫТАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ

17 Джанни Гросслайт

Функциональное тестирование и сертификация систем памяти DDR4 и LPDDR4

22 Квалигенетика полупроводниковой ЭКБ: фантастика или необходимость?

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

26 Антон Лесничин

Контроль над работой мобильных объектов

## РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ

30 Александр Шалумов, Илья Урюпин

Моделирование радиозлектронной аппаратуры с использованием АСКМ «Прогресс-АСОНИКА»

## ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

33 Адуси Кавасима

Оправдают ли суперконденсаторы свое броское название?

## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

38 Игорь Смолянинов

Выбор источника опорного напряжения

42 Сергей Миронов

Модульные DC/DC-преобразователи от РЕАК: параметры выше, стоимость ниже

## СЕТИ И ИНТЕРФЕЙСЫ

46 Андрей Гончаренко

Гальваническая развязка сигнальных и силовых цепей от Silicon Labs

[www.elcp.ru](http://www.elcp.ru)

# Нановольтметр по цене микровольтметра

## 7 1/2-разрядный мультиметр Keysight 34420A

### Основные особенности:

- Чувствительность 100 пВ / 100 нОм
- Уровень шума 1,3 нВ (ска) / 8 нВ (размах)
- Встроенное двухканальное программируемое сканирующее устройство с низким уровнем шума
- Прямые измерения температуры с помощью эталонных платиновых резистивных термометров (SPRT), резистивных датчиков температуры (RTD), терморезисторов и термопар

### Основные характеристики:

Точность измерения напряжения постоянного тока: 0,0030%  
 Скорость измерения напряжения постоянного тока: 250 изм./с  
 Типы измерений: напряжение постоянного тока, сопротивление по 2-х и 4-х проводной схеме, температура  
 Интерфейсы: GPIB, RS-232



«ЭрисКом» - официальный дистрибутор  
 Keysight Technologies в России.

Тел./Факс: +7 (499) 218-2353  
[www.eriscom.ru](http://www.eriscom.ru) / [info@eriscom.ru](mailto:info@eriscom.ru)

50 Илеана Кеджис

**Новейшие решения для человеко-машинного интерфейса**

## АЦП И ЦАП

52 Дерек Редмэйн

**Использование блока частотной развязки на входе быстродействующего АЦП**

## ДИСКРЕТНЫЕ СИЛОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ

56 Александр Хабаров

**Поведение SiC-каскадов компании USC при переключении**

62 Санджай Хаванур

**Выбор максимально допустимых напряжений для силовых MOSFET**

65 Сергей Владимиров

**Преимущества технологии Superjunction для построения силовых MOSFET**

70 Томас Барбьери

**Выбор карбидокремниевых диодов Шоттки**

74 Марчелло Шупбак, Эдгар Аджерби

**Новая технология SiC MOSFET и новые возможности**

## МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ И МИКРОПРОЦЕССОРЫ

80 Майк Гомез

**Использование генератора комплементарных импульсов**

84 Станислав Гусев, Сергей Шумилин, Юрий Калачев

**Специализированный микроконтроллер АО «ПКК Миландр» для реализации алгоритмов управления электроприводами**

## СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

88 Монитор тока от Texas Instruments

90 Конденсаторы от Jianghai

94 Новинка Dunkermotoren; двигатель BG95 1100 Вт!

98 **НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ**

# contents #10/2015

## ELECTRONIC COMPONENTS #10 2015

---

### MARKET

6 Alexey Cherkasov  
**Across All Frontlines of Power Electronics**

### WIRELESS

10 Igor Pronin  
**Wireless Standards for IoT**

12 Ivan Krasnov  
**Review of Low-cost Compact Transmitters**

### TESTING

17 Jennie Grosslight  
**Functional Testing and Validation for DDR4 and LPDDR4**

22 Qualigenetics of Semiconductors:  
**Fantasy or Necessity?**

### ENGINEERING

26 Anton Lesnichin  
**Control over Mobile Objects**

### DESIGN AND DEVELOPMENT

30 Alexander Shalunov and Ilya Uryupin  
**Modelling Electronics with Automation System of Complex Simulation «Progress-ASONICA»**

### PASSIVE

33 Atsushi Kawashima  
**Super by Name, Super by Nature**

### POWER SUPPLIES

38 Igor Smolyaninov  
**Selecting Reference Supply Source**

42 Sergey Mironov  
**Modular DC/DC Converters from PEAK**

### NETWORKS AND INTERFACES

46 Andrey Goncharenko  
**Galvanic Isolation of Signal and Power Circuits from Silicon Labs**

50 Ileana Keges  
**The Latest HMI Solutions from 1D to 3D**

### ADC AND DAC

52 Derek Redmayne  
**Differential Diplexer Drives Sampling ADCs**

### DISCRETE POWER

56 Alexander Khabarov  
**Behavior of Switching SiC Cascodes from USC**

62 Sanjay Havanur  
**Demystifying Power MOSFET Voltage Ratings**

65 Sergey Vladimirov  
**Power MOSFET Basics Understanding Superjunction Technology**

70 Thomas Barbieri  
**Understanding Evolution of SiC Schottkys Is Key to Device Selection**

74 Marcelo Schupbach and Edgar Ayerbe  
**Advances in SiC MOSFET Technology Drive down Cost of High-Bay and Outdoor Lighting Fixtures**

### MCU AND MPU

80 Mike Gomez  
**Using a Complementary Waveform Generator**

84 Stanislav Gusev, Sergey Shumilin and Yury Kalachev  
**Dedicated MCU from PKK Milandr for Implementing Electric Drive Control Algorithms**

### REFERENCE PAGES

88 **Current Sense Monitor from Texas Instruments**

90 **New 1100-W Motor from Dunkermotoren**

94 **Capacitors from Jianghai**

98 **NEW COMPONENTS IN THE RUSSIAN MARKET**

# КВАЛИГЕНЕТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭКБ: ФАНТАСТИКА ИЛИ НЕОБХОДИМОСТЬ?

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭКБ



*Возможно, перед вами самый необычный материал из тех, которые когда-либо появлялись на страницах нашего журнала. Поначалу после беседы с Владимиром Крыловым у меня было ощущение, что биомедицинские аналогии, образно выражаясь, притянуты за уши. Однако в процессе работы Владимиру Крылову решить задачу, идя по пути от общего к частному, а не наоборот, как это бывает чаще всего. Фактически перед вами пример того, как широкая эрудиция и отсутствие стереотипов привели к появлению новой стратегии контроля качества.*

– «Генетика в микроэлектронике» звучит странно. Это как-то связано с названием кафедры «Биомедицинские и электронные средства и технологии», на которой вы работаете во ВлГУ?

– В некоторой степени, да, но, скорее, это связано с проектом, который мы выполняем в 2014–2016 гг. в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (ФЦП ИР).

Сразу же оговорюсь, дабы не волновать комитеты по присуждению высоких премий, что речь пойдет всего лишь о полезности междисциплинарных аналогий в научных исследованиях и разработках, которые позволяют по-новому взглянуть на существующие проблемы космической электроники [2], в т. ч. на обеспечение надежности и радиационной стойкости электронных средств (ЭС) беспилотных космических аппаратов (КА) с длительными сроками активного существования на орбите.

**Владимир Павлович Крылов** – д.т.н., руководитель межфакультетского научно-образовательного центра Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ) «САЭС в электронике» (ИОЦ САЭС-Э), профессор кафедры «Биомедицинские и электронные средства и технологии», руководитель магистерской программы «Высокие технологии в проектировании и производстве электронных средств» по направлению подготовки «Инструирование и технология электронных средств».

### Опыт научно-исследовательской и экспертной деятельности в предметной области:

- координатор проекта Ф0047/802 «Формирование проблемно-ориентированной информационной базы релаксационной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках» Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2004 гг.» (головой исполнитель – ВлГУ, соисполнители – МИСиС, ФИАН им. П. Н. Лебедева, ФТИ ИАН им. А. Ф. Иоффе), исполнитель проектов по государственным научно-техническим программам «Стойкость» (головой исполнитель – Московский инженерно-физический институт), ЭКНП-2000 («Эффективность, качество и надежность продукции») (головой исполнитель – Московский государственный университет приборостроения и информатики),
- эксперт Всероссийских конкурсов премии «Живая электроника России», эксперт региональных конкурсов премии им. В. А. Дегтярева Администрации Владимирской области,
- координатор от ВлГУ Технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» (ПНСС) (головное предприятие АО ИСС им. М. Ф. Решетнева), представитель ВлГУ в Ассоциации производителей электронной аппаратуры и приборов (АСЭАП).

### Текущие НИОКР:

- с 2014 г. по н. в. – научный руководитель прикладных научных исследований по Соглашению / Минбразнауки РФ № 14.574.21.0132 в предоставлении субсидии на выполнение проекта ПНСС/57414X0132 «Разработка научно-технических решений проблемы увеличения срока активного функционирования электронных средств космических аппаратов в условиях действия радиационных факторов космического пространства» (2014–2016 гг.);
- с 2008 г. по н. в. – научный руководитель заказных НИОКР по заказу ОАО «Концорп «Автоматика» в области моделирования электронных блоков космических аппаратов.

Детальные подробности и контакты см. на [7].

Термин «квалигенетика», или «генетика качества», не должен вызывать удивление. В электронику пришло немало терминов из медицинской науки. Например, живучесть (не путать с надежностью) или чума: пурпурная чума (дефект микросварных соединений золотых проводников и алюминиевой металлизации), оловянная чума (фазовое превращение олова в припоях).

Разработчики сложных систем вольно или невольно копируют структуру биообъектов и даже сухая терминология (центральный процессор, периферийный процессор и т. д.) ассоциируются с живым организмом – с центральной и периферической нервными системами.

Как и в живой природе, в микроэлектронике существует наследственность и, если хотите, гены качества. Полупроводниковые приборы (ПП) могут унаследовать «болезни» еще на стадии изготовления, при производственном процессе, при использовании дефектных материалов.

Например, использование некачественного припоя может вывести из строя любое чудо техники. Так случилось в тюнере (селекторе каналов) чуда японской бытовой техники конца прошлого века – телевизора SONY-Trinitron KV-2540. Тюнер изготавливался на испанском предприятии. Он вышел из строя ровно через полтора года после покупки. Вылечили эту «болезнь» в телеателье, где догадались заменить испанский припой российским ПОС-61. К чести фирмы SONY следует заметить, что после «пересадки припоя» аппарат исправно работает до сих пор.

– Продолжим аналогии. Если есть генетика, есть и геронтология?

– Верно, авторы [3] использовали в названии научной монографии по проблемам надежности электронных средств термин «геронтология». В работах по «геронтологии» электронных средств два следующих подхода к оценке надежности дополняют друг друга.

1. Статистический (эмпирический), основанный на получении групповой оценки интенсивности отказов при испытаниях большого количества однородных изделий в течение длительного времени. В бытность дискретных компонентов получение указанных оценок было относительно доступно.

Сегодня же приходится пересматривать понятие «элемент ненадежности» и заниматься испытаниями специально разработанных тестовых структур или, как их еще называют, свидетелей про-

цесса рождения полупроводниковой интегральной микросхемы. С точки зрения упомянутых выше аналогий, это, по существу, оценка средней продолжительности жизни, поскольку величина, обратная интенсивности отказов, есть время безотказной работы. Однако мы знаем, что цифра средней продолжительности утешает далеко не всех.

2. Причинный (физический, физико-технологический), основанный на изучении и моделировании различных механизмов отказов во времени. Он ориентирован на получение индивидуальных оценок продолжительности жизни конкретной ИМС или полупроводникового прибора.

Если в медицине и околомедицинских кругах обсуждается моральный аспект использования знаний о генах смерти человека, то применительно к полупроводниковой ЭКБ все значительно проще в моральном плане, но не просто в научно-техническом, поскольку аналогии, к сожалению, не являются инструментом, позволяющим быстро решить задачи поиска причин отказов.

Нормальное функционирование элементов полупроводниковых микросхем основано на нерегулярности структуры полупроводникового материала, что уже является дефектом с точки зрения физики твердого тела. Поскольку в этом смысле бездефектные полупроводниковые приборы просто неинтересны для практики, необходимо скорректировать понятие дефекта от уже принятого определения, означающего недостаток, изъян, недочет, повреждение и т. д., в сторону учета неравновесного характера системы, которой является полупроводниковая интегральная микросхема [4].

В работах по диагностике качества ИМС используется термин «потенциальный дефект», по отношению к которому следует определять информативный с точки зрения потенциальной надежности параметр ИМС. Если между потенциальными дефектами и диагностическими параметрами может существовать детерминированная связь, то между дефектами и последующими отказами связь вероятностная, ибо иммунодефицит – не обязательно болезнь.

– Какова сегодня практическая польза от этих аналогий?

– Смотря по тому, что считать практической пользой. Конечно, мы не можем напрямую применять медико-биологические методы к определению надежности ИМС. Но, развивая биологические аналогии, мы приходим

к выводу, что отказу интегральной микросхемы способствуют два обстоятельства: плохая наследственность, или генетическая предрасположенность (открытые и скрытые технологические дефекты), и условия при испытаниях ИМС на жизненную стойкость, т. е. стрессы.

Именно такую постановку вопроса Ваш покорный слуга впервые услышал от профессора Московского государственного университета леса (МГУЛ) Я. В. Малкова на одном из семинаров кафедры «Полупроводниковые приборы» МЭИ «Шумовые и деградиционные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология)» [5]. Специалисты в области космического приборостроения, а сегодня и все желающие, знают, какое отношение и почему МГУЛ имеет к космическим разработкам.

– Каким образом можно выявить плохую наследственность?

– Вначале несколько слов о нынешнем положении дел. В настоящее время зарубежная ЭКБ поставляется с сертификатами качества от вторых поставщиков, которые едва ли могут контролировать технологические процессы изготовления электронных компонентов. Если у потребителя возникают сомнения в качестве, ему за собственный счет предлагают увеличить объем входного контроля и испытаний (разрушающих и неразрушающих). При этом затраты на испытания и тщательный входной контроль ЭКБ становятся сопоставимыми со стоимостью разработки и изготовления электронного блока КА.

Разумеется, это неприемлемо для разработчиков электронных средств (ЭС) КА. Но при сдаче конечного изделия представителям заказчика от дорогостоящих и длительных испытаний не уйти. Испытатели, конечно, довольны – больше работы, больше денег, но стоимость и срок выполнения работ при этом увеличиваются. Причем, чем сложнее изделие, тем дороже и длительнее испытания.

Есть ли выход из этой ситуации? Да, есть, – это повышение эффективности моделирования поведения ЭС КА. Продолжая нашу аналогию, скажу, что нам нужно изучить генетику ЭКБ, найти гены качества.

Приведу пример, когда моделирование позволило не только сократить затраты, но и заметно снизить вред окружающей среде. Появление конвенции о запрещении ядерных испытаний стало возможным именно благодаря совершенствованию методов моделирования, из-за чего отпала необходимость в натурных испытаниях. И уровень

достигнутых в наших ядерных центрах знаний, реализованных в виде моделирующих программ на суперкомпьютерах того времени (кстати, отечественных), способствовал присоединению СССР к этой конвенции.

– Кто же они – гены качества полупроводниковой ЭКБ – и как их обнаружить?

– Просвещенным читателям хорошо известны вещества, которые именуют катализаторами и ингибиторами химических реакций. Их присутствие в относительно малых количествах ускоряет (катализаторы) или, наоборот, замедляет (ингибиторы) скорость химических реакций. Если в растворе химической металлизации имеется палладий или заменяющий его элемент – начнется металлизация именно отверстий печатной платы, а не стенок ванны; если ингибитор – появится технологичный одноупаковочный двухкомпонентный герметик вместо нетехнологичного двухупаковочного (смола и отвердитель). Правда, необходимо уметь в нужный момент «выключить» ингибитор нагревом или другим внешним воздействием.

Требуется быстросохнущая маркировочная краска – вводят добавки, ускоряющие процесс полимеризации под действием ультрафиолетового излучения. Необходим стойкий к солнечным лучам поликарбонат для навесов и теплиц – вводят, наоборот, добавки, предохраняющие полимер от разрушающего воздействия ультрафиолета.

Однако вернемся к полупроводниковой ЭКБ. Уместно напомнить сторонникам ускоренных испытаний ЭКБ, ссылающимся на известное уравнение Сванте Аррениуса, лауреата Нобелевской премии, который еще в конце позапрошлого века предупреждал, что он рассматривал химические реакции без катализаторов. А где гарантия, что их нет в твердых растворах примесей в кремнии? Все знают, какой ценой мы платим за сверхчистые материалы.

Присутствие в объеме полупроводниковой ИМС или на границах ее областей (полупроводник, окисел, металлизация и т. д.) примесей, дефектов кристаллической структуры вследствие внешних воздействий отражается на электрических характеристиках и их поведении во времени. Известна феноменологическая зонная теория полупроводников, оперирующая такими понятиями как ширина запрещенной зоны, мелкие и глубокие уровни.

Т. н. основные примеси (элементы 3-й и 5-й групп таблицы Менделеева) в объеме полупроводника, например

в монокристаллическом кремнии, которые определяют тип рабочей примесной проводимости ( $n$  или  $p$ ), согласно зонной теории приводят к появлению энергетических уровней (донорных и акцепторных) вблизи границ запрещенной зоны ( $B3$ ), отделяющей валентную зону ( $B3$ ) от зоны проводимости ( $ЗП$ ). Если ширина  $ЗЗ$  для кремния составляет 1,12 эВ при комнатной температуре, то расстояние этих уровней от границ  $ЗЗ$  в первом приближении не превышает 0,1 эВ. За это их называют мелкими уровнями.

В отличие от них, посторонние примеси из других групп таблицы Менделеева и различные дефекты кристаллической структуры, например обусловленные радиационными воздействиями, могут породить глубокие уровни ( $ГУ$ ), отстоящие от границ  $ЗЗ$  более чем на 0,1 эВ.

Наиболее доступным средством идентификации  $ГУ$  для использования в промышленных условиях является метод релаксационной (нестационарной) спектроскопии, использующий релаксацию емкости [6] или других параметров барьерной структуры.

Релаксация, как известно, предполагает предварительное стрессовое воздействие на объект. В случае полупроводниковой ЭКБ это может быть электрический импульс, импульс ионизирующего излучения, тепловой или холодный удары, механические воздействия. Кстати, холодные и тепловые пробы в медицине давно используются для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний ввиду их простоты и доступности.

Участие  $ГУ$  в процессах переноса заряда в полупроводнике становится заметным уже при относительно малой концентрации порядка  $10^{10}$  атомов/ $см^3$ . Для справки: плотность упаковки атомов кремния составляет  $5 \cdot 10^{22}$  атомов/ $см^3$ , а концентрации атомов основных (рабочих) примесей в разных областях ИМС находятся в диапазоне  $10^{15}$ – $10^{21}$  атомов/ $см^3$ .

Характер влияния  $ГУ$  до конца не изучен, но уже установлено, что чем ближе глубокий уровень к середине запрещенной зоны, тем значительнее его влияние на быстроедействие (время восстановления)  $p$ - $n$ -перехода. Это используется в технологии модификации кремниевых импульсных диодов золотом. В результате быстроедействие повышается на порядок – чем вам не генно-модифицированный организм (ГМО), генотип которого был искусственно изменен при помощи методов генной инженерии? Согласитесь, название и содержание монографии [7] также настраивает на аналогии.

И в этом случае нас встречают исторические аналогии. Вспомним хотя бы по известному роману В. Дудинцева «Белые одежды» трагические страницы развития генетики в России, когда вопросы истины в науке решали политики. Второй раз этот сюжет в относительно безобидном виде вернулся в спорах физиков относительно вида базовой модели процесса релаксации глубоких уровней, когда некоторые ученые, очевидно по старой привычке, пытались решить эту проблему, направляя соответствующие письма в ЦК КПСС. Об этом эпизоде мне рассказал известный физик, которого в ту пору по партийной линии назначили третейским судьей. Отзвуки тех неоконченных баталий остались лишь на страницах специальных журналов [8].

Продолжая биомедицинские аналогии, можно провести в определенном смысле параллель между генной мутацией живых организмов под воздействием проникающих ионизирующих излучений и радиационно-технологической обработкой полупроводниковых приборов и микросхем, которой давно и успешно занимаются изготовители полупроводниковой ЭКБ [9].

– Можно ли в настоящее время вести речь об использовании квалитетики полупроводниковой ЭКБ для управления качеством электронных средств?

– С некоторых пор мне не нравится термин «управление качеством электронных средств» применительно к космической электронике, хотя есть такая дисциплина в образовательном стандарте нашего направления и даже учебник с таким названием [10]. В моем понимании этот термин означает некий двунаправленный процесс, вызывающий неприятные аналогии с термином «управление продолжительностью жизни человека».

Наверное, правильнее вести речь об обеспечении качества электронных средств космических аппаратов [4] в пределах неизбежного набора ограничений – финансовых, временных, информационных и т. д., трактуя его как процесс, направленный исключительно в одну сторону. К сожалению, имеются примеры такого «управления качеством», когда электронная техника, особенно бытовая, служит недолго.

Производители некоторых видов бытовой электроники оправдывают свои действия малым сроком морального старения электронной аппаратуры по сравнению с физическим старением, скрывая при этом желание

снизить себестоимость и обеспечить свои предприятия новыми заказами. Это и некоторые эксперименты с безотмывными паяльными флюсами, и манипуляции с бессвинцовыми припоями.

Теоретически методы инженерного дефектообразования, основанные на знании механизмов поведения дефектов, позволяют заложить в полупроводниковую ЭКБ технологические мины с часовым механизмом физико-химического действия. Разминировать эти мины невозможно, для них не требуются внешние «сигналы подрыва». В этом отличие их от алгоритмических закладок (бэкдоров), которых так боятся серьезные заказчики при согласовании применения импортной ЭКБ.

В лучшем случае «зараженные» образцы можно обнаружить и изъять в процессе т. н. «чистки» партий комплектующих изделий, используя методы и средства контроля штатных (обозначенных в ТУ) и дополнительных параметров качества (не включенных в ТУ, но регламентируемых нормативными документами различного уровня и защищенных многочисленными патентами).

В основном, современные российские центры сертификации и испытаний ЭКБ для космических аппаратов, например ОАО ИТЦ ИСС им. М. Ф. Решетнева [11] или НЦ СЭО ОАО РКС [12], имеют дело с контрафактом, неумышленным «минированием», обусловленным недостаточным уровнем знаний о причинах плохой генетики полупроводниковой ЭКБ или обычным разгильдяйством.

В условиях нестабильных объемов поставок и сокращения объемов производства некоторые поставщики иногда практикуют смешение производственных партий при поставке продукции, чего раньше категорически не допускали представители заказчика.

Последовательный партионный запуск отличается существенным разбросом параметров ЭКБ от партии к партии и относительной однородностью внутри партии. Ее качество оценивается при проведении при-

емо-сдаточных испытаний, когда небольшая случайная выборка подвергается разрушающим испытаниям, например на стойкость к ионизирующим воздействиям. По результатам испытаний выборки судят о качестве партии ЭКБ.

В итоге принципиально возможна ситуация, когда образцы ЭКБ в процессе исследовательских разрушающих испытаний покажут высокую надежность, а в серийную продукцию попадут экземпляры с технологическими минами, которые проявят себя на приемосдаточных испытаниях ЭС.

Практическую пользу от прикладных научных исследований, направленных на поиск новых информативных параметров качества полупроводниковой ЭКБ, следует связывать, прежде всего, с повышением эффективности обратных связей, необходимых для обеспечения качества полупроводниковой ЭКБ для ответственных применений на этапе производства, включая организацию новых обратных связей, которые базируются на новых методах диагностики ЭКБ.

Если говорить о вкладе вузов в решение этих проблем, то наш опыт участия в различных госбюджетных и хоздоговорных НИОКР привел нас совместно с экспертами Программы развития ФЦП ИР [13] к выводу о необходимости совершенствования бизнес-модели подготовки высококвалифицированных специалистов, которых с легкой руки уважаемого Андрея Насонова из фирмы ОСТЕК стали называть тестовыми инженерами. Но об этом – в следующий раз. —

*В интервью использованы материалы, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению №14.574.21.0132 о предоставлении субсидии на выполнение проекта RFMEFI57414X0132.*

**Интервью подготовил  
Леонид Чанов**

#### ИСТОЧНИКИ

1. Сайт ВлГУ//<http://ktes.vlsu.ru/index.php?id=284>.

2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. *Космическая электроника в двух книгах*. М. Техносфера. 2015.

3. Горлов М. И., Емельянов В. А., Строганов А. В. *Геронтология кремниевых интегральных схем*. М.: Наука. 2004.

4. Кейджян Г. А. *Основы обеспечения качества микроэлектронной аппаратуры*. М. Радио и связь. 1991.

5. Малков Я. В. *Деградационные процессы в полупроводниках с позиций общих теорий (термодинамика, теория информации, синергетика, теория катастроф, теория нечетких множеств)*. Попытка постановки задачи. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология). *Материалы докл. науч.-техн. семинара*. Москва. 28 ноября – 1 декабря 1994 г. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова. 1995.

6. ASTM F 978–02 *Standard Test Method for Characterizing Semiconductor Deep Levels by Transient Capacitance Techniques*//Current edition approved Jan 10. 2002. Originally published as F 978–86. Last previous edition F 978–90//Annual Book of ASTM Standards. Vol. 10.05.

7. Булярский С. В., Светухин В. В. *Физические основы управления дефектообразованием в полупроводниках*. Ульяновск. УлГУ. 2002.

8. Берман Л. С., Лебедев А. А. *Об интерпретации результатов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких центров в полупроводниковых структурах*. *Изв. вузов. Физика*. 1989. 32. № 12.

9. В. С. Вавилов, Б. М. Горин, Н. С. Данилин и др. *Радиационные методы в твердотельной электронике*. М.: Радио и связь. 1990.

10. Глудкин О. П., Гуров А. И., Коробов А. И. и др. *Управление качеством электронных средств*. Учеб. для вузов. Под ред. О. П. Глудкина. М.: Высшая школа. 1994.

11. Сайт ОАО Испытательный технический центр – НПО ПМ//<http://ttc-nppormt.ru>.

12. Сайт НЦ СЭО ОАО РКС//[www.spacecorp.ru/press/corpnnews/item8916.php](http://www.spacecorp.ru/press/corpnnews/item8916.php).

13. Информационный ресурс Программы развития ФЦП ИР в системе Эксперт//<https://acc.xpir.ru>.

## КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА

**Владимир Стешенко**, к.т.н., доцент, заместитель генерального конструктора ОАО «Российские космические системы»

Профессора Крылова знаю давно – вот только пару недель назад у нас в РКС был. Мы обсуждали наболевшую проблему о том, как разумно определить объем испытаний – ведь если испытывать все и на все факторы, разорить можно любую компанию. На мой взгляд, сравнение теории надежности с генетикой является интересным. Это своего рода попытка перенести модели. Ведь в отказах больших систем зачастую

причиной является «слабое звено» – хлор и фосфор в клее для крепления кристалла, неправильный режим пайки и т. д. Увы, в таких случаях критерий один – отработка. Недаром в старые времена в каждом ведомстве, производящем приборы, был свой технологический институт – увы, сейчас на это не всегда есть ресурсы. Безусловно, мнение Владимира Павловича интересно.