

К вопросу о надежности радиоэлектронных средств на наноприборах

© Н.А. Ветрова, Е.А. Скороходов, В.Д. Шашурин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Устройства наногетероструктурной электроники позволяют получить совершенно новые, ранее недостижимые свойства РЭС. Принцип работы таких устройств основан на квантоворазмерных эффектах в наноразмерных слоях составляющих их полупроводниковых гетероструктур. Одна из основных проблем, сдерживающих широкое применение указанных изделий в различных радиоэлектронных системах, состоит в недостаточном уровне их надежности (гамма-процентная наработка, согласно опубликованным данным, составляет «четыре девятки» 3–4 года). Это недостаточно для РЭС, используемых в тех областях приборостроения, где цена отказа чрезвычайно велика. Так, для авиационного приборостроения необходимы приемные и передающие устройства с гамма-процентной наработкой в два раза большей, для космической отрасли — в три-четыре раза. В связи с чем, актуальным и важным является вопрос обеспечения надежности таких приборов. Авторами разработана математическая модель и алгоритм проведения конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных средств нового поколения на базе приборов, функционирующих на квантоворазмерных эффектах в их полупроводниковых гетероструктурах, по критерию их надежности. Показано, что выбор рациональных конструкторско-технологических решений позволяет обеспечить заданный уровень надежности этих изделий.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноприборы, надежность, конструкторско-технологическая оптимизация, радиоэлектронные средства нового поколения, приборы на квантоворазмерных эффектах, полупроводниковые гетероструктуры.

Тенденции развития радиоэлектронных средств (РЭС) связи и вытекающие отсюда изменения требований к функциональным модулям изделий актуализируют не только вопрос миниатюризации радиоэлектронных систем связи, но и проблему перехода на более высокие рабочие частоты, поиска пути расширения полосы пропускания узлов приемных и передающих устройств.

Обеспечить указанные требования позволяет использование устройств наногетероструктурной электроники, принцип работы которых основан на квантоворазмерных эффектах в наноразмерных слоях, составляющих их полупроводниковых гетероструктур. Действительно, такие устройства позволяют получить совершенно новые, ранее недостижимые свойства РЭС. Свойства наноструктур определяются явлениями на их поверхности и на границах раздела фаз. Однако когда тол-

щина слоя внутри гетероструктуры составляет несколько атомных слоев, даже незначительное ее отклонение, вызванное технологическими погрешностями, или ее изменение в процессе функционирования может стать причиной значительного изменения параметров полупроводникового прибора и устройства на его основе, что в итоге ведет к отказу. В связи с этим актуальным и важным является вопрос обеспечения надежности таких приборов.

Задача достижения требуемых значений надежности РЭС нового поколения на базе приборов, функционирующих на квантоворазмерных эффектах в их полупроводниковых гетероструктурах (далее РЭС на базе наноприборов), может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении причинно-следственных факторов, определяющих формирование отказов таких РЭС на базе наноприборов и учитывающих конструкторско-технологические особенности их производства.

Основным элементом наноприбора, определяющим его технические характеристики, является нелинейный элемент (диод или транзистор) с характеристиками, оптимальными для данного узла РЭС связи (например, резонансно-туннельный диод (РТД) с заданной формой (вольтамперной характеристики) ВАХ под конкретный тип преобразователя радиосигналов) [1].

Одной из основных проблем, сдерживающих широкое применение указанных изделий в различных радиоэлектронных системах, состоит в недостаточном уровне их надежности (гамма-процентная наработка $T_{\gamma=0,9999} = 3-4$ года) [2, 3]. Это недостаточно для РЭС, используемых в тех областях приборостроения, где цена отказа чрезвычайно велика. Так, для авиационного приборостроения необходимы приемные и передающие устройства с гамма-процентной наработкой в два раза большей, для космической отрасли — в три-четыре раза.

Задача достижения заданных показателей надежности РЭС на базе наноприборов может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении факторов, определяющих формирование отказов изделий и учитывающих конструкторско-технологические особенности их производства [4]. В итоге это позволит разработать инженерные методики и связанные с ними технологические мероприятия для расчетно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений в производстве РЭС на базе наноприборов, позволяющие повысить их надежность и обеспечить требуемые для изделий спецназначения показатели надежности.

Для выявления причинно-следственных факторов, определяющих постепенные отказы нанозлемента (а именно они являются доминирующими), разработана структурная схема формирования эксплуатационных параметров радиоэлектронного прибора с учетом деградиационных процессов, обусловленных диффузионными явлениями в гетеро-

структуре нанозлемента, и конструкторско-технологических особенностей производства изделия [4]. Особенность этой схемы состоит в том, что пространство ее «исходов» определяется множеством различных вариантов построения гетероструктуры, которая обеспечивает заданные выходные электрические характеристики изделия в целом.

Формализация структурной схемы в виде математической модели позволяет исследовать характер изменения показателей надежности наноприбора в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в гетероструктуре. Системно модель объединяет три расчетных модуля. Модуль 1 предназначен для расчета изменения характеристик гетероструктуры наноприбора в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов. Модуль 2 предназначен для моделирования ВАХ нанозлемента, имеющих в своем составе полупроводниковые гетероструктуры с различным составом слоев (GaAs, AlGaAs и др.). Модуль 3 предназначен для оценивания изменения электрических параметров наноприбора в зависимости от дрейфа ВАХ нанозлемента.

Так, например, проведенный расчет деградационных процессов в гетероструктуре РТД в программном пакете DiRL, расчет ВАХ РТД в программном продукте VARMA, расчет выходных электрических параметров смесителя радиосигналов с учетом технологических погрешностей в Microwave Office позволили определить характеристики РТС, изменение которых оказывает доминирующее влияние на дрейф ВАХ РТД и, как следствие, на значения выходных электрических параметров смесителя радиосигналов [4].

Таким образом, установлено, что возможность повышения надежности См РТД СВЧ лежит в оптимизации характеристик нанозлемента и выборе технологической операции формирования его гетероструктуры.

Структуру математической модели конструкторско-технологической оптимизации определяет задача максимизации гамма-процентной наработки партии наноприборов при заданных конструкторских допусках на их выходные параметры и технологических погрешностях на элементную базу наноприборов, исходя из вариантности построения гетероструктуры и технологии ее формирования:

$$\begin{cases} \max T_\gamma(\bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_d, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d, \bar{\Delta Y}_k), \\ \varphi, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d = \text{const}, \quad \bar{Y} \in \bar{\Delta Y}_k, \end{cases} \quad (1)$$

где $T_\gamma(\bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_d, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d, \bar{\Delta Y}_k)$ — гамма-процентная наработка до отказа (целевая функция); $\bar{\Pi}, \bar{\Pi}_d$ — векторы параметров конструкции (пассивных элементов и подложки соответственно) наноприбора;

$\bar{\Gamma}$ — вектор параметров гетероструктуры; $\bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi_d}, \bar{\Delta\Gamma}$ — векторы технологических погрешностей соответствующих параметров; $\bar{\Delta Y}_k$ — допуски на электрические параметры \bar{Y} наноприбора.

Для оптимизации наноприбора по критерию максимальной гамма-процентной наработки до отказа необходимо решить задачу поиска условного экстремума, т. е. найти такое решение $\{\bar{\Gamma}^*; \bar{\Pi}^*; \bar{\Pi}_d^*, T_\gamma^*\}$ из множества допустимых решений (заданного условием достижения экстремальных значений выходных электрических параметров наноприбора), которое обеспечит максимальную надежность наноприбора.

Поставленная задача может быть решена методом перебора возможных значений управляемых параметров с использованием математической модели формирования эксплуатационных характеристик наноприбора с учетом деградационных процессов [4]. При решении поставленной задачи технологической оптимизации наноприбора с целью повышения его надежности последовательно моделируют: профиль потенциальной энергии электронов проводимости поперек слоев гетероструктуры, определяемый химическим составом и толщинами слоев гетероструктуры; зависимость потока электронов от напряжения (математическая модель реализована в таких программных продуктах, как VARMA, WinGreen и т. д.). Далее проводится расчет, исходя из конструкторско-технологических параметров гетероструктуры (толщина и состав слоев), изменения состава слоев в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов. Так, для смесителей радиосигналов моделирование изменений может быть проведено в программном продукте DiRL. Синтез параметров пассивных элементов проводится согласно стандартным методам [5] по критерию экстремальности выходных электрических параметров наноприбора. Оценка изменения электрических параметров наноприбора в зависимости от дрейфа ВАХ наноэлемента с учетом технологических погрешностей может быть осуществлена, например, в Microwave Office. После этого проводится оценка целевой функции, соответствующая полученным параметрам, и принимается решение о необходимости следующей итерации. На последнем итерационном шаге выполняется выбор в матрице рассмотренных $\{\bar{\Gamma}; \bar{\Pi}; \bar{\Pi}_d, T_\gamma\}$ решения $\{\bar{\Gamma}^*; \bar{\Pi}^*; \bar{\Pi}_d^*, T_\gamma^*\}$ по критерию (в соответствии с (1)) максимума целевой функции.

В связи с тем что переход наноприбора в неработоспособное состояние обусловлен постепенным отказом, наблюдается тенденция выделения экспертами в поле допуска электрических параметров наноприборов областей с различным «качеством» выполнения функций изделием (с различной «вероятностью выполнения рабочих функций»

[6]). Поэтому полученные при решении задачи (1) перспективные варианты наноприборов следует проранжировать по уровню групповой надежности с учетом вероятности выполнения рабочих функций наноприбором, полученной методом экспертных оценок [4, 6]. Для обеспечения максимального времени пребывания наноприбора в области поля допуска с максимальной вероятностью выполнения функций необходимо решить следующую задачу:

$$\begin{cases} \max \tilde{P}_{\text{фп}} \left(P_{\text{ф}}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_{\text{д}}, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_{\text{д}}, \bar{\Delta Y}_k, t \right), \\ \varphi, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_{\text{д}} = \text{const}, \quad \bar{Y} \in \bar{\Delta Y}_k, \quad P_{\text{ф}}(\bar{Y}) = P_{\text{фзад}}(\bar{Y}), \end{cases} \quad (2)$$

где $\tilde{P}_{\text{фп}} \left(P_{\text{ф}}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_{\text{д}}, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_{\text{д}}, \bar{\Delta Y}_k, t \right)$ — интегральная функция качества партии наноприборов; $P_{\text{ф}}(\bar{Y}) = P_{\text{фзад}}(\bar{Y})$ — заданная экспертами вероятность выполнения функций наноприбором. Интегральная функция качества партии наноприборов рассчитывается по формуле

$$\tilde{P}_{\text{фп}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фп}}(t) dt,$$

где $P_{\text{фп}}(t)$ — интегральная функция качества партии наноприборов в момент времени t , рассчитываемая по формуле

$$P_{\text{фп}}(t) = \frac{P_{\text{эквп}}^{Y_1}(t)}{P_{\text{п}}^{Y_1}(t)} \cdot \frac{P_{\text{эквп}}^{Y_2}(t)}{P_{\text{п}}^{Y_2}(t)} \cdots \frac{P_{\text{эквп}}^{Y_i}(t)}{P_{\text{п}}^{Y_i}(t)} \cdots \frac{P_{\text{эквп}}^{Y_n}(t)}{P_{\text{п}}^{Y_n}(t)},$$

где i -й множитель представляет собой интегральную функцию качества партии наноприборов в момент времени t по выходному электрическому параметру Y_i , равную отношению вероятности $P_{\text{п}}^{Y_i}(t)$ попадания выходного параметра Y_i наноприбора в момент времени t в допустимые пределы ΔY_{ik} ; к эквивалентной вероятности $P_{\text{эквп}}^{Y_i}(t)$, полученной в результате учета $P_{\text{ф}}(Y_i)$ [4, 6].

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что за счет оптимизации характеристик гетероструктуры и технологических погрешностей изготовления может быть достигнут достаточно высокий уровень надежности партии наноэлементов (для СВЧ смесителей радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов была получена гамма-процентная наработка $T_{\gamma=0,9999} \approx 10$ лет). Вместе с тем надо отметить, что достижение более высоких значений надежности связано с расширением зоны конструк-

торско-технологической оптимизации за счет дополнительных технологических контрольно-диагностических мероприятий, направленных на определение индивидуальной надежности наноприборов в партии.

Для реализации рассмотренной конструкторско-технологической оптимизации наноприборов и РЭС связи на их основе построен алгоритм (рис. 1) методики ее выполнения, который состоит из двух модулей. Первый модуль позволяет решить задачу достижения максимально возможного или требуемого значения выбранного показателя надежности (например, гамма-процентной наработки T_γ — в случае 100%-й вероятности выполнения функций наноприбором в пределах допуска на выходные электрические параметры; или интегральной функции качества партии наноприборов — в случае проранжированного экспертами поля допуска выходных электрических параметров наноприбора).

Входными данными алгоритма являются: заданное значение γ (для задачи максимизации T_γ) или T_γ (для задачи достижения заданного уровня надежности); предельные значения выходных электрических параметров наноприбора, а также массив возможных параметров слоев гетероструктуры (толщины и состав слоев) нелинейного наноэлемента, технологических погрешностей выбранного метода эпитаксии. На выходе, исходя из физических закономерностей старения гетероструктуры, получаются конструктивно-технологические характеристики РЭС связи на базе наноприбора с прогнозом значения показателя надежности.

Для случая, если первый модуль технологической оптимизации не позволил получить заданный уровень надежности (рис. 2), т. е. фактически для селекции изделий партии по группам с различным уровнем показателей надежности, в методике технологической оптимизации предусмотрен второй модуль. Этот модуль предусматривает введение в технологический процесс производства наноприбора операции термотестирования. Ее задача — непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого наноприбора в партии и последующая селекция высоконадежных изделий, обеспечивающих требуемый уровень надежности. В основу термотестирования заложен принцип искусственного старения изделия за счет воздействия температурного фактора (ускоренные испытания). Выбор температурного режима, в зависимости от заданного временного диапазона эксплуатации изделия, осуществляется на основе моделирования процессов деградации изделия в диапазоне физически допустимых температур. Испытания при таких температурах инициируют отказы, связанные с высокой энергией активации процесса деградации.

Таким образом, реализация разработанной методики конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных средств нового

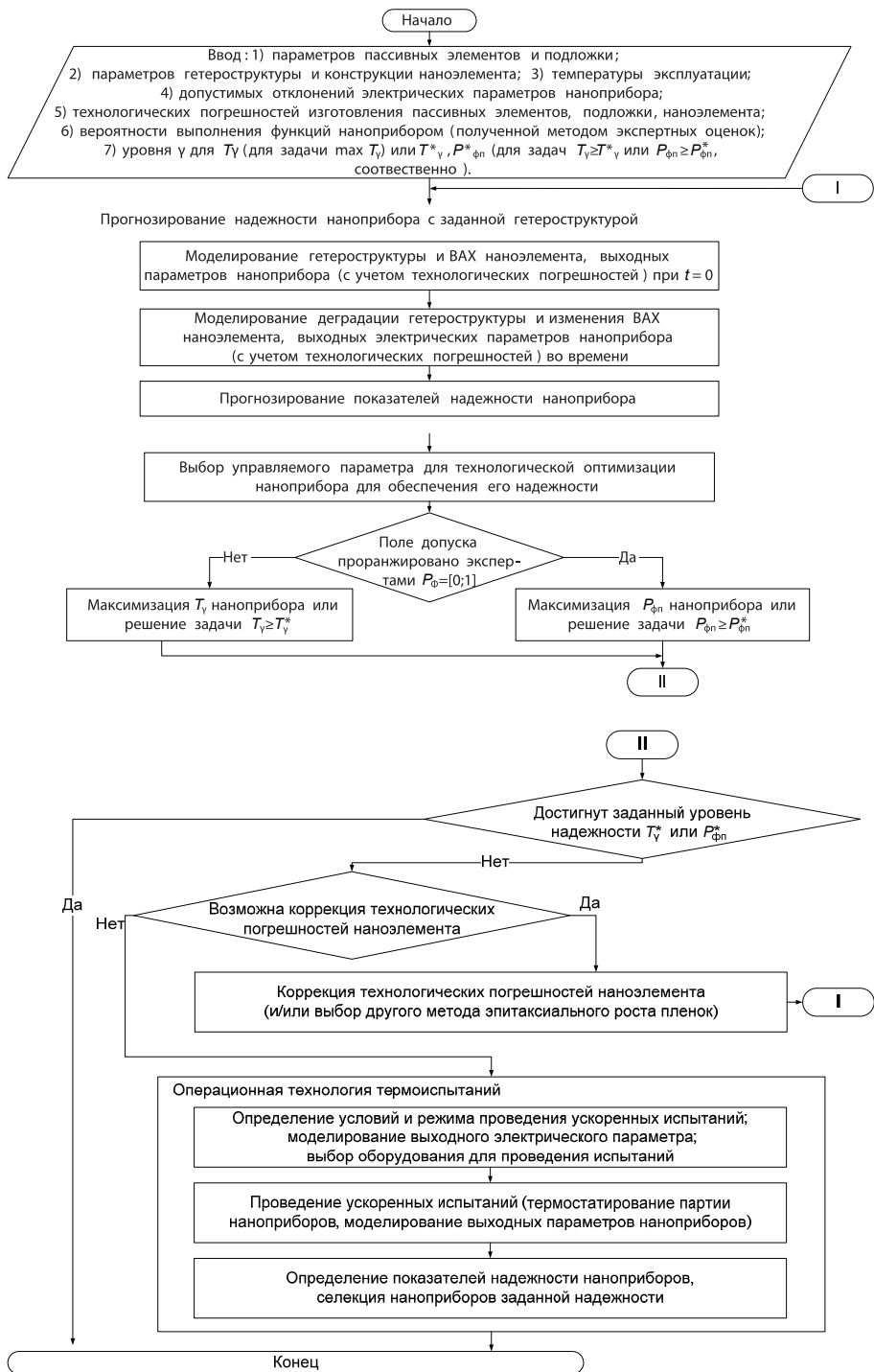


Рис. 1. Методика конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на наноприборах

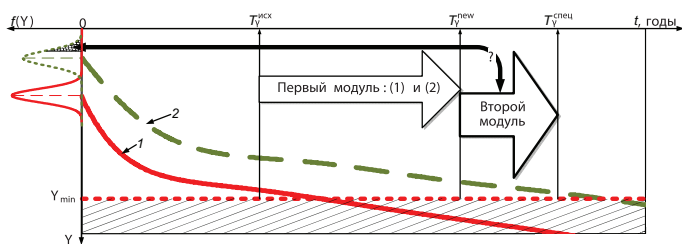


Рис. 2. Иллюстрация к задаче повышения показателя надежности (гамма-процентной наработке до отказа): 1 — исходный прибор, 2 — оптимизированный прибор по критерию (1) и/или (2)

поколения на базе приборов, функционирующих на квантоворазмерных эффектах в их полупроводниковых гетероструктурах, позволяет обеспечить заданный уровень надежности изделий.

Результаты получены в ходе поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д., Федоренко И.А. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. *Наноинженения в приборостроении*, 2011, № 1, с. 34–43.
- [2] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов (продолжение). *Наноинженения в приборостроении*, 2011, № 2, с. 20–22.
- [3] Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Шашурин В.Д. К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2010, № 4, с. 30–37.
- [4] Ветрова Н.А., Иванов Ю.А., Шашурин В.Д. Исследования закономерностей формирования постепенных отказов СВЧ смесителей радиосигналов нового поколения на резонансно-туннельных нанодиодах. *Наноинженерия*, 2012, № 1, с. 32–36.
- [5] Гудков А.Г. *Разработка принципов и методов комплексной технологической оптимизации радиоэлектронных средств для различных этапов их жизненного цикла*. Дис. ... докт. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 332 с.
- [6] Ермолаев Ю.П., Насыров И.К., Застела М.Ю., Пьянков Б.Л. *Оценка показателей качества на этапах проектирования и производства электронных устройств в условиях применения высоких технологий*. Казань, Новое знание, 2006, 96 с.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ветрова Н.А., Скороходов Е.А., Шашурин В.Д. К вопросу о надежности радиоэлектронных средств на приборах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/799.html>

Ветрова Наталия Алексеевна окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: надежность технических систем, нанотехнологии. e-mail: vetrova@bmstu.ru

Скороходов Евгений Александрович окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1962 г. Канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: надежность технических систем, нанотехнологии. e-mail: skorokhodov39@mail.ru

Шашурин Василий Дмитриевич окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: надежность технических систем, нанотехнологии. e-mail: shashurin@bmstu.ru