

В.П. Крылов, А.М. Богачев, Т.Ю. Пронин, А.А. Мищенко  
(г. Владимир, Владимирский государственный университет  
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

## **МУЛЬТИСКАНОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ЕМКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР**

*Обсуждаются возможности одновременного использования нескольких частотных сканов для параметрической идентификации моделей процессов релаксации емкости барьерной полупроводниковой структуры.*

*The possibilities of simultaneous use of several frequency scans for parametric identification of models of capacitance relaxation processes of a barrier semiconductor structure are discussed.*

*Ключевые слова: релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ), частотное сканирование, мультискан.*

*Keywords: deep-level transient spectroscopy (DLTS), frequency scan, multiskan.*

Известные проблемы неоднозначной интерпретации экспериментальных результатов в релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ, DLTS - Deep Level Transient Spectroscopy) сдерживают широкое внедрение методов РСГУ в практику контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. Сложившаяся ситуация, по мнению авторов, во многом обусловлена низкой точностью косвенных измерений, что, в свою очередь, не позволяет реализовать статистическую процедуру опровержения той или иной модели с помощью эксперимента, опираясь на пороговое значение невязки (среднеквадратичного отклонения экспериментальных результатов от теоретического предсказания).

Комплексное моделирование физических процессов и аппаратных преобразований в релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ГУ) позволяет расширить состав идентифицируемых параметров областей полупроводниковой структуры [1]. Структура комплексных моделей обычно базируется на известном преобразовании Лапласа [2] с учетом эквивалентной опорной функции коррелятора в случае слабых сигналов релаксации на фоне инструментальных шумов [3] в предположении аддитивного характера взаимодействия шумов и информативного сигнала.

Параметрическая идентификация моделей сводится к решению обратных некорректных задач путем минимизации среднеквадратичной невязки и использованием типовых приемов обеспечения устойчивости и сходимости решения. Наиболее эффективным средством минимизации

невязки является сочетание ненаправленного случайного поиска с покоординатным спуском по каждому параметру модели.

Широко распространенное в экспериментальных установках РСГУ температурно-частотное сканирование образца (медленное непрерывное повышение температуры от нижней границы к верхней на фоне дискретных значений частоты следования импульсов заполнения глубоких уровней) не способствует повышению точности определения параметров ГУ вследствие зависимости большинства параметров от температуры. Дополнительные трудности обусловлены точностью измерения меняющейся температуры и ограниченным набором указанных частот (так называемых временных окон).

Иная ситуация возникает при переходе на частотно-температурное сканирование, при котором практически неограниченное количество временных окон можно наблюдать при постоянной температуре образца. Процесс параметрической идентификации моделей в этом случае не осложняется неизвестными зависимостями параметров от температуры, и таким образом формируются объективные предпосылки повышения точности измерений параметров ГУ. Однако при этом появляются новые проблемы комплексного моделирования [1], иллюстрируя известный закон перехода количественных изменений в качественные.

Частотным сканом в релаксационной спектроскопии глубоких уровней [1,3] называется зависимость выходного сигнала коррелятора (селектора релаксационных сигналов) от частоты следования импульсов электрического заполнения ГУ. В качестве дополнительных параметров используются напряжения заполнения и опустошения ГУ, температура образца, длительность импульса заполнения. На рис. 1 представлены основные стадии решения обратной задачи параметрической идентификации так называемой однопиковой модели, описывающей один дискретный ГУ диода КД-521.

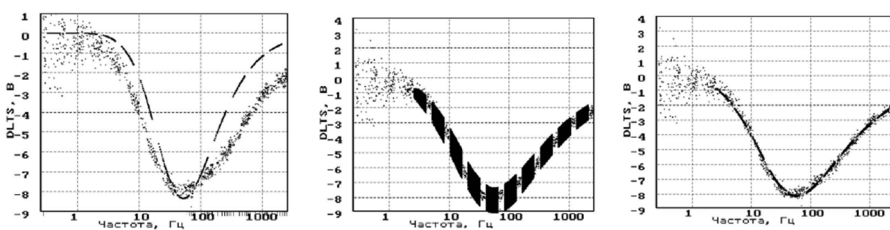


Рис. 1. Стадии моноскановой идентификации модели

Левый график отражает результаты параметрической идентификации двухпараметрической модели частотного скана (амплитуда и постоянная времени релаксационного сигнала). Нетрудно заметить, что идеальная экспонента (штриховая линия) не очень хорошо отражает эксперимент (точки). Ввод третьего параметра, учитывающего одновременно неэкспоненциальность сигнала релаксации и нелинейность аппаратных преобразователей с оптимальным выбором границ случайного поиска (см.

рис. 1, средний график), позволяет в конечном итоге более точно отразить эксперимент (см. рис.1, правый график).

На рис. 2 слева приведены частотные сканы, полученные при разных длительностях импульса заполнения ГУ. Это позволило усложнить структуру модели и ввести четвертый параметр – постоянную заполнения ГУ.

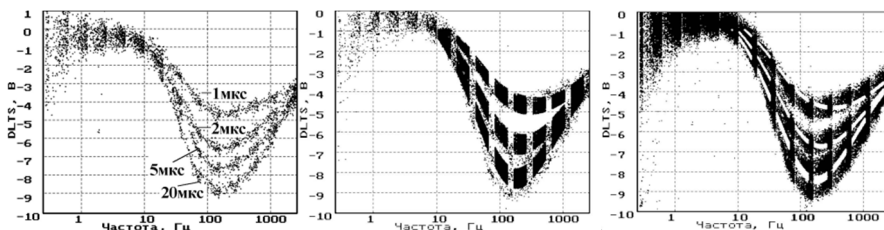


Рис. 2. Мультикановая идентификация модели

Для идентификации четырехпараметрической модели предложено использовать одновременно несколько сканов при расчете невязки (см. рис.2, средний график). Многократное повторение экспериментов позволило увеличить количество сканов и выявить несовершенство предложенной четырехпараметрической модели (см. рис.2, правый график).

#### Список литературы

1. Крылов, В.П. Комплексное моделирование физических процессов и аппаратных преобразований в релаксационной спектроскопии глубоких уровней / Крылов В.П., Богачев А.М., Пронин Т.Ю., Мищенко А.А. // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» 22-23 ноября 2017 г. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 9 – 11.
2. Литвинов, В.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и ее применение для исследования полупроводниковых структур микро- и нанoeлектроники / Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. // Датчики и системы. – 2009. – №9. – С. 71 – 78.
3. Крылов, В.П. Корреляционная обработка и моделирование процессов релаксации емкости микрoeлектронных барьерных структур / Крылов В.П., Богачев А.М., Мищенко А.А., Пронин Т.Ю. // V Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Энергосбережение и эффективность в технических системах", г. Тамбов 4-6 июня 2018 г. – Тамбов: ТГТУ. – С.136 – 137.

Материал поступил в редколлегию 11.10.18.