

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь*

Современные тенденции развития информационных технологий и обработки измерительной информации связаны с развитием функциональной электроники и применением распределенных информационно-измерительных систем. Для последних характерна децентрализация первичной обработки данных путем "интеллектуализации" датчиков. Внесение "интеллекта" в первичные преобразователи возможно различными способами, среди которых одним из перспективных является создание функциональных датчиков, работающих на принципах интеграции физических процессов в чувствительном элементе. Например, разработка принципов действия многофункциональных фотоэлектрических датчиков (МФД) основана на использовании неравновесных электронных процессов в полупроводниковых структурах, протекающих при комбинации факторов внешних воздействий (электрическое и магнитное поле, свет, температура, давление и др.) и систематизации их особенностей.

Структура многофункционального датчика в общем случае может включать совокупность одного или нескольких конструктивно объединенных чувствительных элементов, размещенных в зоне действия нескольких физических величин, а также формирующих соответствующие сигналы посредством преобразовательных (передаточных) функций. Целесообразно воспользоваться физической интеграцией процессов внутри объема чувствительного элемента, приняв за основу полупроводниковую поверхностно-барьерную структуру (ПБС) МФД, например, металл-полупроводник-металл (с прослойкой окисла, глубокими и мелкими примесями центрами).

Как среда, в которой возможны хранение и обработка информации ПБС содержит три физически различимых и электрически связанных области (поверхность – область пространственного заряда (ОПЗ) – объем), границы которых, представляющие собой статические неоднородности, могут служить средством выявления диффузионно-дрейфовых потоков носителей заряда, создаваемых внешними воздействиями.

Преобразование входной физической (чаще неэлектрической) величины в выходной сигнал датчика (напряжение, ток) осуществляется через протекание определенного физического процесса в объеме чувствительного элемента. Такое преобразование отличается тем, что на входе действуют одновременно несколько физических

величин, изменение даже одной из которых сопровождается протеканием целого ряда физических явлений. Таким образом, преобразовательная (передаточная) характеристика датчика является сложной функцией параметров  $x_i$ , исследуемого (на входе) процесса и параметров  $z$  измерительного сигнала. Выбор структуры многофункционального датчика зависит от условий формирования и измерения передаточной характеристики, способа ее экспериментальной реализации с учетом выявленных особых точек характеристик чувствительности и особенностей измерительного сигнала.

Исследования базовых структур на основе полупроводников с собственной проводимостью с глубокими многозарядными примесями показывают, что основой создания оптоэлектронных многофункциональных датчиков являются нелинейные фотоэлектрические явления в поверхностно-барьерных структурах, легированных глубокими примесями. Основой применения объемно перезаряжаемых светом и электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности [1] неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси.

Например, для МФД на основе германиевого диода Шоттки с длиной компенсированной медью базой (ДШДБ) исследовались вольтамперные характеристики (ВАХ) темного тока и полного тока при освещении излучением с длиной волны  $\lambda = 1,5$  мкм. При этом наблюдалось S-образное переключение тока, несколько квазустойчивых по току состояний и внутреннее усиление сигнала (до  $10^6$  раз). В работе ДШДБ используется двойная инжекция (неосновных носителей заряда через барьер металл-полупроводник, основных носителей – из омического электрода) и  $(\tau, \mu)$  – механизм инжекционного тока. S-образное переключение наступает после накопления в базе диода определенной величины заряда  $Q$  неравновесных дырок, для генерации которых в приборе имеется три возможных физических канала: инжекция через контакт, фотозвозбуждение в полупроводнике и фотоэмиссия из металла, управляемая соответственно напряжением и светом. Поскольку величина  $Q$  определяется обоими компонентами экспозиции  $H = I \times t$  (и интенсивностью света  $I$  и временем воздействия  $t$ , т.е. выдержкой), а также зависит от прикладываемого напряжения  $V$ , то время пере-

ключения  $t_{\text{пер}}$  прибора из высокоомного в низкоомное состояние, интенсивность света и напряжение, приложенное к диоду, оказываются функционально связанными параметрами. Это позволяет при заданном значении  $V$  получить функциональную зависимость  $t_{\text{пер}} = f(I)$ , а при фиксированном значении  $I$  – однозначную связь между временем переключения и приложенным смещением  $t_{\text{пер}} = \varphi(V)$ .

Используя разные величины смещения прибора, можно "запрограммировать" время переключения на определенное значение освещенности (при данной длине волны) и использовать таким образом МФД в качестве фотореле для отключения исполнительного устройства при достижении заданной экспозиции.

Большим разнообразием передаточных характеристик отличаются явления перезарядки глубоких центров на границах раздела и в приповерхностной ОПЗ полупроводника, где происходит дополнительное расщепление энергетических уровней. Процессом перезарядки поверхностных электронных состояний на границах раздела и глубоких примесей в ОПЗ свойственны модуляция параметров приповерхностного потенциального барьера [2] (в первую очередь, ширина и высота). Изменение ширины потенциального барьера существенно влияет на протекание тока в тех структурах, где превалирует туннельный механизм переноса, а изменение высоты барьера влияет на величину тока надбарьерной эмиссии. Создание МФД на основе ПБС с модуляцией высоты барьера предполагает введение в ОПЗ полупроводника глубоких центров с асимметричными сечениями захвата для электронов и дырок. Захват фотовозбужденных дырок на глубокие уровни в ОПЗ вызывает уменьшение высоты потенциального барьера. Поэтому такие структуры, в отличие от обычных диодов и диодов Шоттки, приобретают фоточувствительность на прямой ветви ВАХ [2]. На основе базовой структуры разработаны модифицированные диоды Шоттки с компенсацией ОПЗ примесью меди, формирующей глубокую примесь акцепторного типа с несколькими зарядовыми состояниями. Наряду с высокой чувствительностью, управляемой напряжением и приемлемым быстродействием ( $\sim 1$  мкс) такие чувствительные элементы обладают расширенной областью спектральной чувствительности, поскольку работают в режиме примесного фотоэффекта.

Поверхностно-барьерные структуры с двумя потенциальными барьерами с глубокими многозарядными примесями в ОПЗ, сформированные с противоположных сторон приборной структуры, и образующие два встречно включенных диода Шоттки разделенных длинной базой, демонстрируют немонотонную зависимость выходного

сигнала от длины волны  $\lambda$ , интенсивности света  $I$ , величины приложенного напряжения  $V$  и геометрического смещения  $\Delta z$ , спроецированного изображения от фронтальной к тыльной плоскости структуры. Такая структура представляет собой по существу функциональный преобразователь, в котором взаимосвязь четырех параметров  $I$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $\Delta z$  дает возможность функционального выражения одной физической величины через другую (или совокупность нескольких величин) и использования прибора в качестве фотоприемника для определения и сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения, фотоприемника в оптоэлектронных системах приема и передачи информации, координаточувствительного элемента.

Таким образом, одноэлементные чувствительные элементы, физические процессы в которых связаны с явлениями перезарядки глубоких многозарядных примесей как в объеме, так и в ОПЗ полупроводника, характеризуются большим разнообразием передаточных характеристик чувствительности к одному или нескольким физическим факторам. Это позволяет реализовать многопараметрические измерительные преобразователи на базе одноэлементного МФД с одним измерительным каналом.

Многообразие характеристик оптоэлектронных многофункциональных датчиков гораздо шире приведенных примеров. Накопленные экспериментальные данные и теоретические модели дают основание рассматривать ПБС с глубокими многозарядными примесями в качестве единой физической и технологической основы для создания многофункциональных датчиков неэлектрических величин.

1. Гусев, О.К. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями / О.К. Гусев, А.И. Свистун, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Датчики и системы. 2011, № 1. – С. 19-23.
2. Гусев, О.К. Управление высотой потенциального барьера в приборных структурах на основе полупроводников с глубокими примесями / О.К. Гусев, Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. IV Международной научной конференции, Минск, 23-24 сентября 2010 г., БГУ; редкол.: В.Б.Оджаев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 116-118.