

УДК 621.382(476)

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

ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ СОБСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Рассмотрены вопросы построения измерительных преобразователей систем дистанционной оптической диагностики с использованием многофункциональных фотоприемников на основе собственных полупроводников. Показана возможность использования одноэлементных фотоприемников для построения измерительных преобразователей с реализацией многопараметрических измерений и измерений в широком динамическом диапазоне. Использование приборов на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет получить ряд новых количественных и качественных характеристик.

This article describes the issues of creation of measurement transducers for the systems of remote optical diagnostics using multi-function photoelectric receivers on the basis of their own semiconductors. It shows the possibility to use one-element photoelectric receivers to create measurement transducers with realizing multi-parameter measurements and measurements in wide dynamic range. Using devices on the basis of semiconductors with deep multi-charge admixtures allows to obtain the set of new quantitative and qualitative characteristics.

Введение

Применение методов оптической диагностики целесообразно в прямо противоположных ситуациях, например, когда необходимо исключить влияние средств измерений на объект контроля или наоборот, когда сам объект контроля представляет опасность для измерительной аппаратуры и оператора (человека). В основе оптических методов диагностики лежат как определенные модели исследуемого объекта, так и модели оптического сигнала и процессов формирования оптических характеристик сложных объектов, каковыми являются, например, неоднородная нестационарная плазма, двигательные реактивные установки, биоткани. Задачи оптической диагностики связаны с анализом и регистрацией изображений областей, находящихся в рассеивающих оптическое излучение средах. В любом случае сущность оптических методов сводится к регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т. п. Важной задачей при разработке принципов построения систем оптической диагностики является оценка возможностей первичных преобразователей системы диагностики на основе фотозлектрических преобразователей. Многообразие свойств объектов контроля требует применения в измерительных преобразователях фотоприемников с различными функциональными свойствами, чувствительных или нечувствительных к спектральному составу оптического излучения, чувствительных к слабым оптическим сигналам или сохраняющих чувствительность при высокой интенсивности сигнала. В ряде случаев

требуется применение фотоприемников чувствительных к нескольким физическим параметрам. Для ряда методов оптической диагностики изменения мощности оптических сигналов достигают 10^6 – 10^7 , причем типовые фотозлектрические преобразователи (ФЭП) характеризуются относительно низким динамическим диапазоном (40–50 дБм) энергетической характеристики [1]. Фотоприемники оптико-электронных систем контроля и диагностики должны обладать не только высокой чувствительностью, но и устойчивостью к оптическим перегрузкам, особенно в оптических системах с использованием лазеров, характеризующихся большими плотностями мощности оптического излучения. Часто функциональность и диапазоны преобразования существующих ФЭП являются недостаточными, что приводит к необходимости в одном диагностическом приборе использовать несколько измерительных преобразователей, содержащих ФЭП с различными диапазонами преобразования и функциональностью. Указанные проблемы могут быть решены при использовании широкодиапазонных ФЭП с расширенными функциональными возможностями [2], позволяющих преобразовывать широкодиапазонные по длине волны и плотности мощности измерительные сигналы без переключения информационных каналов систем оптической диагностики.

Многофункциональные фотоприемники на основе собственных полупроводников

Фотозлектрические преобразователи изготавливают либо на основе полупроводников с примесной (с концентрацией до 10^{19} см⁻³) проводимостью, либо полупроводников с собственной

проводимостью. В первом случае достигается высокая чувствительность, но уже при малой плотности мощности наблюдается насыщение передаточной характеристики. Во втором случае насыщения не происходит и при высоких плотностях мощности оптического излучения, но чувствительность фотоприемника существенно ниже. В основе предлагаемых для построения измерительных преобразователей систем оптической диагностики ФЭП лежит физическая интеграция процессов внутри объема чувствительного элемента, построенного на базе собственного полупроводника с глубокими примесями с поверхностно-барьерной или резистивной структурой (рис. 1). Для формирования таких ФЭП в полупроводник с собственной проводимостью вводится известная многозарядная примесь в заданной концентрации, и путем использования механизмов управления зарядовым состоянием глубоких примесных центров (рис. 1,d) при оптической перезарядке этой примеси в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения продлевается линейность энергетической характеристики до плотностей мощности излучения, превышающих порог насыщения характеристик собственных и примесных фотоприемников, и, таким образом, реализуется увеличенный динамический диапазон энергетической характеристики фотоприемника.

При этом приборная структура ФЭП содержит три физически различных и электрически связанных области (поверхность – область пространственного заряда (ОПЗ) – объем), а использование процессов в такой структуре обеспечивает многофункциональность ФЭП за счет формирования выходного сигнала, связанного с изменением нескольких входных параметров [3]. Основой применения объемно-перезаряжаемых светом или электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности [2] неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и

прилипания многозарядной примеси. В работе диодов Шоттки с длинной базой (рис. 1,b) используется двойная инжекция: неосновных носителей заряда – через барьер металл-полупроводник, основных носителей – из омического электрода. 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. Кроме того, каждая из приведенных элементарных структур может быть модифицирована введением дополнительного электрода для инжекции неосновных носителей заряда с целью управления характеристиками ФЭП. Изменение концентрации носителей заряда в чувствительной области ФЭП может быть достигнуто также и дополнительной подсветкой управляющим оптическим сигналом [2, 3]. Это позволяет реализовать многопараметрические измерительные преобразователи на базе одноэлементного многофункционального датчика (МФД) с одним измерительным каналом [4]. Большим разнообразием передаточных характеристик отличаются явления перезарядки глубоких центров на границах раздела и в приповерхностной ОПЗ полупроводника, где происходит дополнительное расщепление энергетических уровней (проявляется в расширении характеристики спектральной чувствительности ФЭП в длинноволновую область). Процессам перезарядки поверхностных электронных состояний на границах раздела и глубоких примесей в ОПЗ свойственна модуляция параметров приповерхностного потенциального барьера (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.

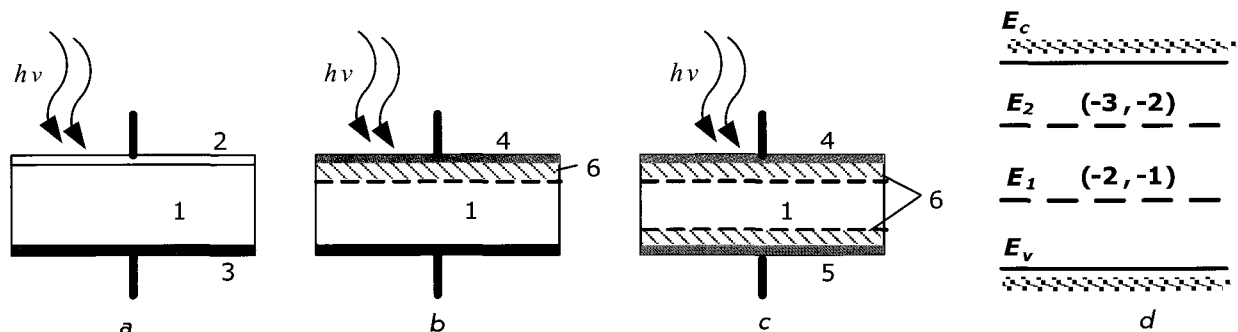


Рис. 1. Фотоэлектрические преобразователи на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью: а – фоторезистивная структура, б – барьерная структура с одним барьером Шоттки, с – барьерная структура с двумя встречно включенными барьерами Шоттки. 1 – полупроводник с глубокой многозарядной примесью; 2 – полупрозрачный омический контакт; 3 – омический контакт; 4 – полупрозрачный барьер Шоттки; 5 – барьер Шоттки; 6 – область пространственного заряда (ОПЗ). d – энергетическая диаграмма собственного полупроводника, легированного глубокой примесью с несколькими зарядовыми состояниями (отмечены в скобках)

Создание МФД на основе поверхностно-барьерных структур с модуляцией высоты барьера предполагает введение в ОПЗ полупроводника глубоких центров с асимметричными сечениями захвата для электронов и дырок. В барьерных структурах (рис. 1,b,c) 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 [1].

В результате комбинации конструкций ФЭП и используемых материалов могут быть сформированы фотоприемники для систем оптической диагностики с протяженной энергетической характеристикой (до 10^8), S-образной характеристикой, причем переключение наступает после накопления в базе диода Шоттки определенной величины заряда неравновесных дырок, переключаемой спектральной характеристикой, двухполярной спектральной характеристикой чувствительности. Так как величина накопленного заряда неравновесных носителей заряда, вызывающего переключение между уровнями в различных зарядовых состояниях, определяется несколькими компонентами экспозиции (интенсивностью освещения, его спектральным составом и временем воздействия), а также зависит от прикладываемого к ФЭП напряжения, то время переключения прибора из высокоомного в низкоомное состояние, интенсивность и длина волны света и напряжение, приложенное к ФЭП, оказываются функционально связанными параметрами. Это позволяет использовать такой прибор в качестве фотоприемника для определения и сравнения интенсивностей излучения в разных спектральных диапазонах, детектора длины волны монохроматического излучения, координаточувствительного элемента, фотоприемника в оптоэлектронных системах приема и передачи информации.

Характеристики фотоприемников с многозарядной примесью

Конструктивно фотозлектрические преобразователи на основе собственных полупроводниковых материалов с глубокими многозарядными примесями представляют одноэлементные фоторезисторные структуры или структуры металл-полупроводник-металл с образованием структуры встречно включенных диодов Шоттки, соединенных фоторезистором. Одной из простейших приборных структур является фоторезистивная структура с омическими контактами, приведенная на рисунке 1,а. Однако при условии легирования собственного полупроводника глубокой примесью, способной находиться в нескольких зарядовых состояниях, она уже обладает переключаемыми характеристиками.

Параметры ФЭП на основе полупроводников с собственной проводимостью, слабо легированных многозарядной примесью, в широком диапа-

зоне плотностей мощности оптического излучения определяются рекомбинационными процессами [2]. Основной модели, описывающей поведение фоторезистивного ФЭП [6, 7], является система кинетических уравнений, описывающая процессы рекомбинации с участием многозарядной примеси, имеющей произвольное количество (i) уровней в запрещенной зоне полупроводника:

$$\begin{aligned} N\gamma_{n,i-1}(F_{i-1}(n_0+\Delta n)-F_i n_{i-1})= \\ =N\gamma_{p,i-1}(F_i(p_0+\Delta p)-F_{i-1}p_{i-1}), \\ \Delta p = \Delta n + \sum_1^i N(F_i - F_{i0}), \\ \sum_0^i F_i = 1, \end{aligned} \tag{1}$$

где N_i – концентрация дефектов i -го типа, γ_{ni}, γ_{pi} – коэффициенты рекомбинации электронов и дырок на дефекте i -го типа, n_0 – концентрация равновесных электронов, Δn – концентрация неравновесных электронов, p_0 – концентрация равновесных дырок, Δp – концентрация неравновесных дырок, n_i, p_i – приведенная плотность состояний в c - и v -зонах; f_i – неравновесная стационарная функция заполнения дефектов i -го типа.

В случае рекомбинационных процессов с участием двух уровней многозарядной примеси в запрещенной зоне полупроводника, например, для (Ge(Cu)) или (Ni(Si)), система кинетических уравнений модели (1) преобразуется в следующий вид:

$$\begin{aligned} N\gamma_{n1}((n_0+\Delta n)F_1-F_2 n_1)=N\gamma_{p1}((p_0+\Delta p)F_2-F_1 p_1), \\ N\gamma_{n2}((n_0+\Delta n)F_2-F_3 n_2)=N\gamma_{p2}((p_0+\Delta p)F_3-F_2 p_2), \\ \Delta p = \Delta n + N(F_2 - F_{10}) + N(F_3 - F_{20}), \\ F_1 + F_2 + F_3 = 1. \end{aligned} \tag{2}$$

В результате моделирования определяются зависимости концентрации ионов примеси в различных зарядовых состояниях и зависимости времени жизни основных и неосновных носителей заряда от плотности мощности оптического излучения

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{U_{n1} + U_{n2}}, \quad \tau_p = \frac{\Delta p}{U_{p1} + U_{p2}}. \tag{3}$$

Очевидно, что система уравнений модели (1) в общем случае M типов рекомбинационных центров аналитически не решается. Для моделирования процессов рекомбинации при произвольном уровне инжекции в случае любого числа уровней и их зарядовых состояний предложен [8] численный метод расчета неравновесных стационарных функций заполнения центров с учетом их взаимного влияния при произвольном уровне инжекции. В [8] описана методика расчета, позволяющая свести многоуровневую задачу к одноуровневой с помощью введения внешнего самосогласованного возбуждения. В стационарном состоянии справедливо соотношение:

$$\sum_i^M (U_{ni} + \Delta U_{ni}) = \sum_i^M (U_{pi} + \Delta U_{pi}), \tag{4}$$

где U_{ni}, U_{pi} – суммарные скорости захвата электронов и дырок из c - и v -зоны соответственно на i -й центр в отсутствие остальных ($i - 1$) центров; $\Delta U_{ni}, \Delta U_{pi}$ – изменение скорости рекомбинации электронов и дырок на i -м центре, обусловленное присутствием других дефектов.

Использование полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет при создании ФЭП получить ряд новых (рис. 2–4) количественных и качественных характеристик:

- существенно (на несколько десятичных порядков, до 80 дБм) расширить динамический диапазон чувствительности фотоприемника;
- реализовать переключаемую спектральную характеристику чувствительности, причем изменение положения максимума спектральной характеристики может достигать 6,5 мкм.

Фотоприемники с расширенным диапазоном энергетической характеристики

Зависимости, связывающие конструктивные и выходные параметры ФЭП, характеризуют возможность управления границами поддиапазонов линейности ФЭП с глубокими примесями, т. е. динамическим диапазоном за счет целенаправленного изменения концентрации глубокой акцепторной примеси. Для ФЭП с многозарядными

примесями акцепторного типа существуют две области линейной рекомбинации на зависимости времени жизни основных и неосновных носителей заряда от плотности мощности оптического излучения, разделенные областью нелинейной рекомбинации [2, 6]. На рисунке 2 приведена обобщенная характеристика ФЭП на основе собственного полупроводника с глубокими многозарядными примесями и энергетические диаграммы собственных полупроводников с глубокими многозарядными примесями p -типа (рис. 2, b) и n -типа (рис. 2, c). Автоматическая перезарядка уровней примеси [6, 7] в разных зарядовых состояниях глубокой многозарядной примеси при увеличении плотности мощности оптического сигнала приводит к формированию двух поддиапазонов энергетической характеристики фотоприемника. Первый поддиапазон (область I) соответствует линейной рекомбинации при низких плотностях мощности оптического излучения, меньших некоторого порогового значения P_L , а второй поддиапазон линейности (область II) энергетической характеристики наблюдается при высоких плотностях мощности оптического излучения больших P_H . При изменении мощности оптического излучения происходит изменение концентрации зарядовых состояний примеси с разными энергиями ионизации

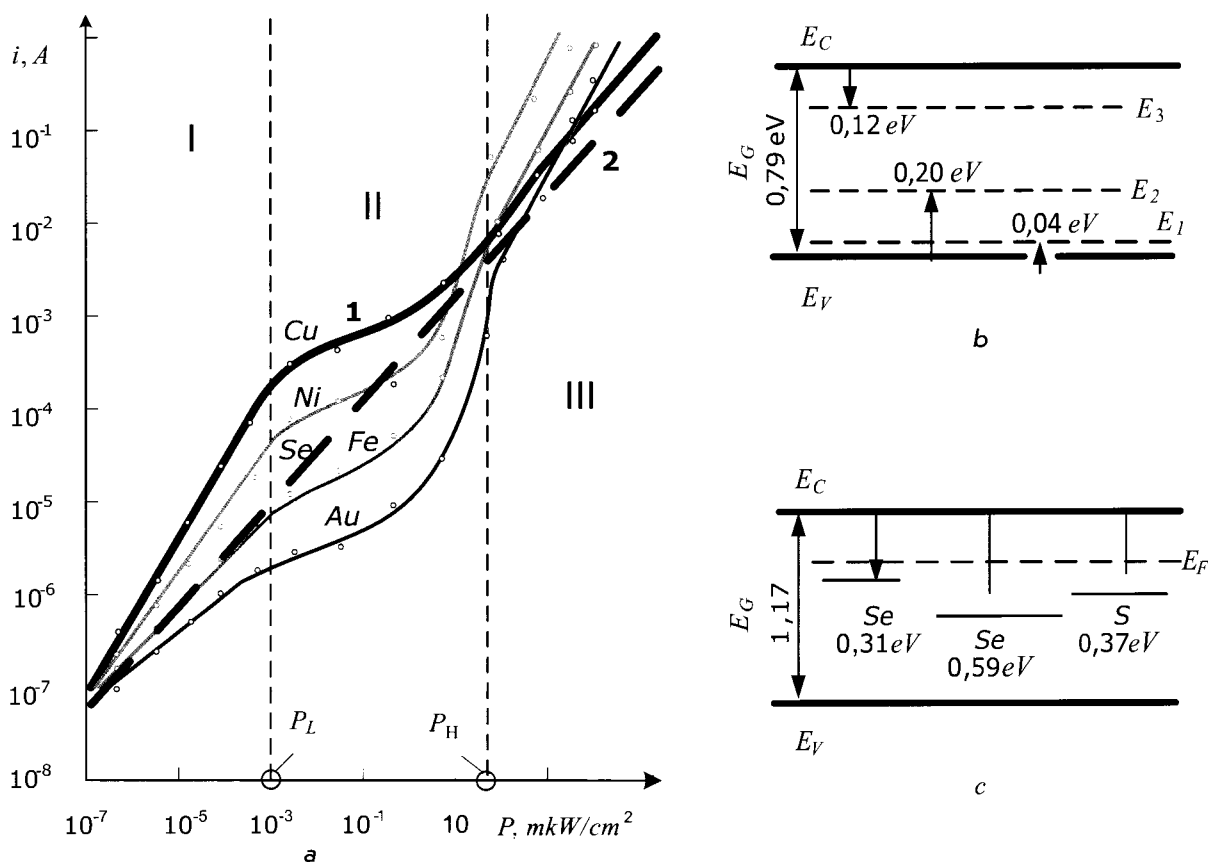


Рис. 2. Обобщенные энергетические характеристики ФЭП на основе собственного полупроводника с глубокой многозарядной примесью (a), b – энергетическая диаграмма собственного Ge, легированного Pt (E_1, E_2, E_3 – энергетические уровни платины в зарядовых состояниях (-2, -1), (-3, -2), (-1, 0) eV) и энергетические уровни примесей Se и S в кремнии (c)

(рис. 2,б) и автоматическое переключение между уровнями по мере изменения их заполненности соответственно мощности оптического излучения с реализацией зависимости типа 1 на рисунке 2,а. Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности фотоприемника [2] с двумя линейными поддиапазонами.

Большее расширение динамического диапазона при близости энергетической характеристики ФЭП к линейной может быть достигнуто при внедрении глубокой примеси акцепторного типа с тремя зарядовыми состояниями, по сравнению с примесью с двумя зарядовыми состояниями. При этом реализуются три области линейной зависимости энергетической характеристики, разделенные двумя более узкими областями с нелинейной зависимостью. Конкретный вид энергетических характеристик ФЭП зависит от вида примеси и ее концентрации. Параметрами ФЭП в областях энергетической характеристики I и II, можно управлять как на стадии изготовления фотоприемной структуры, в частности значениями P_L и P_H , так и в уже готовой структуре, используя, например, дополнительные воздействия (освещение или электрическая инжекция через управляющий электрод). Положение границ областей P_L и P_H можно синхронно изменить на несколько десятичных порядков при изменении концентрации примеси, например, в структуре (Ge(Cu)) от 10^{12} до 10^{15} см⁻³ [2, 7]. Положение конкретной энергетической характеристики ФЭП внутри пространства обобщенных характеристик (рис. 2,а) определяется типом материала полупроводника и примеси. Линия 1, в частности, соответствует структуре (Ge(Ni)).

При введении в собственный полупроводник донорной глубокой примеси [9] уровень Ферми расположен выше уровня примеси (рис. 2,с) и оптическая перезарядка центров в различных зарядовых состояниях не происходит. Примесный центр заполнен электронами как при низком, так и при высоком уровне инжекции, равновесная функция Ферми-Дирака близка к единице и изменяется с ростом уровня возбуждения не более чем на 10^{-3} , а значит τ_n и τ_p также практически не будут зависеть от уровня инжекции (рис. 3,б). Это, в свою очередь, приводит к тому, что на энергетической характеристике будет отсутствовать нелинейность между уровнями мощности P_L и P_H (линия 2 на рис. 1,а).

Одновременно с переходом от одной линейной области к другой происходит и изменение быстродействия фотоприемника на основе полупроводника с многозарядной примесью акцепторного типа. При изменении мощности оптического излучения (уровня инжекции) τ_n и τ_p в случае легирования акцепторной примесью изменяются на несколько десятичных порядков. Это приводит к тому, что при переходе на другой поддиапазон энергетической и спектральной характеристик, также существенно изменяется и быстродействие

фотоприемника с глубокой многозарядной акцепторной примесью. На рисунке 3,а приведена зависимость быстродействия фоторезистивного ФЭП с примесью акцепторного типа, связанная с зависимостью постоянной времени рекомбинации глубокой примеси от уровня возбуждения (рис. 3,б). Из этого также следует, что быстродействие ФЭП с примесью донорного типа практически не зависит от уровня возбуждения.

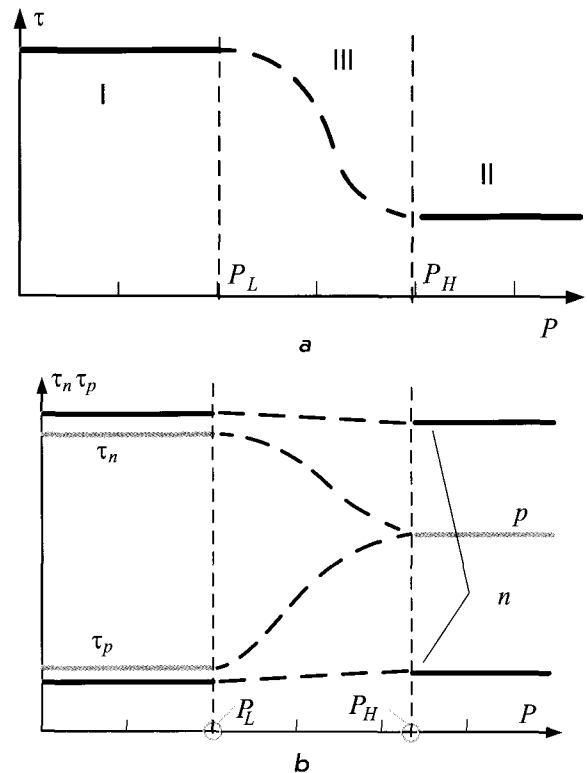


Рис. 3. Зависимость постоянной времени фоторезистивного ФЭП от уровня оптического возбуждения (а) и зависимости постоянной времени рекомбинации глубокой акцепторной и донорной примеси от уровня возбуждения (б)

Фотоприемники с переключаемой спектральной характеристикой чувствительности

Изменяя интенсивность излучения из области собственного поглощения, можно управлять концентрацией примеси в различных зарядовых состояниях с разными уровнями энергии ионизации. Изменение интенсивности управляющей подсветки на длине волны λ_0 позволяет изменять относительную чувствительность фотоприемного устройства (рис. 1,а) к излучению в диапазоне длин волн $\lambda_1 \dots \lambda_n$ из области примесного поглощения. В зависимости от плотности мощности оптического сигнала (дополнительного из области собственного поглощения или основного) реализуются различные зарядовые состояния многозарядной примеси и, соответственно, спектральные характеристики чувствительности с максимумами на длине волны λ_1 или λ_2 (рис. 4), переключаемые под воздействием управляющего излучения с длиной

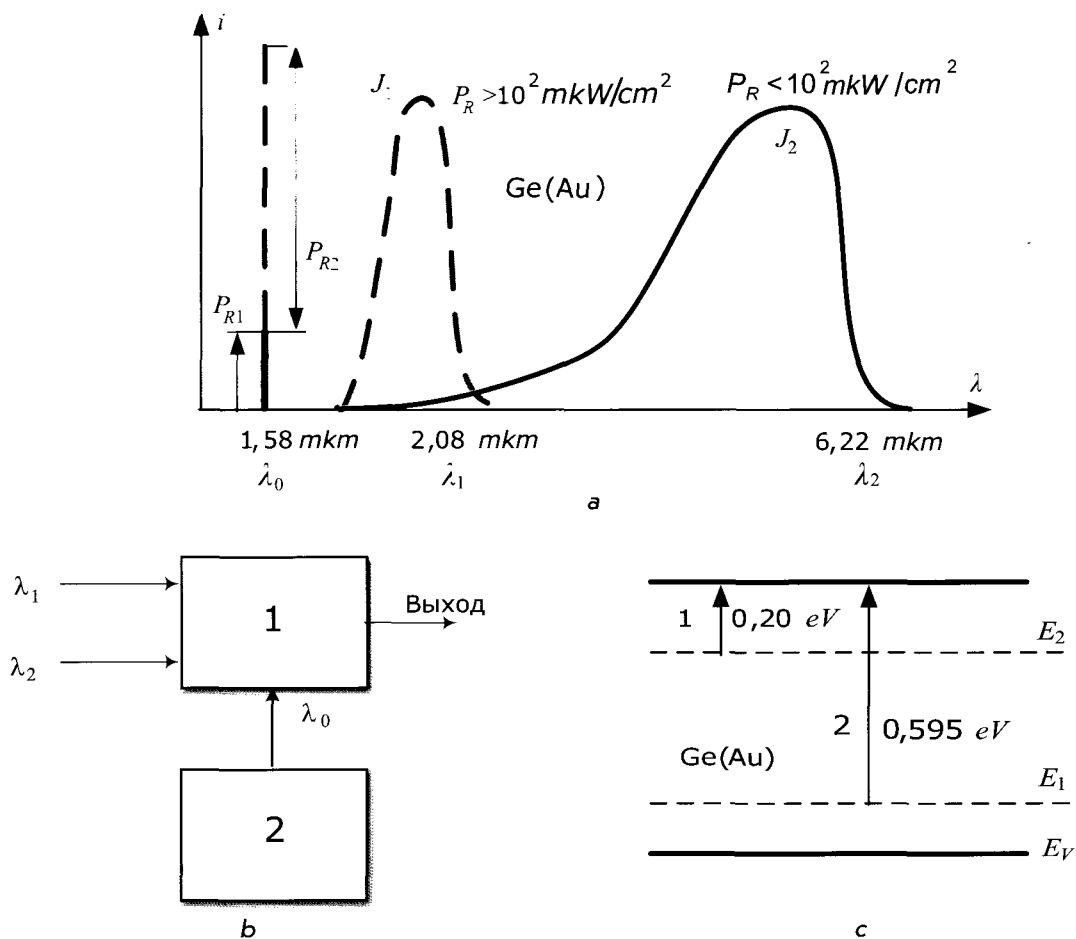


Рис. 4. Переключение спектральной характеристики фотоприемника с глубокой многозарядной примесью при дополнительной подсветке с длиной волны λ_0 (а), структура ФЭП с переключаемой спектральной характеристикой (б): 1 – чувствительная область ФЭП, 2 – управляющее воздействие; энергетическая диаграмма собственного Ge, легированного глубокой примесью Au

волны λ_0 , причем при работе с интенсивностью управляющего излучения $P > P_H$ также существенно расширяется и динамический диапазон чувствительности фотоприемного устройства. Переключение производится за время порядка постоянной времени рекомбинации ($10^{-5} - 10^{-8}$ с) в зависимости от материала МФД и уровня оптического сигнала.

Для реализации оперативного управления видом спектральной характеристики при использовании традиционных фотоприемников понадобилось бы использование в одном устройстве нескольких фотоприемников, каждый с оптическим фильтрующим элементом, настроенным на различные области спектра, светоделительное устройство и схему объединения электрических сигналов. Необходимо отметить, что также как и в случае с энергетической характеристикой, ФЭП с примесью донорного типа имеет не переключаемую при изменении уровня возбуждения спектральную характеристику чувствительности.

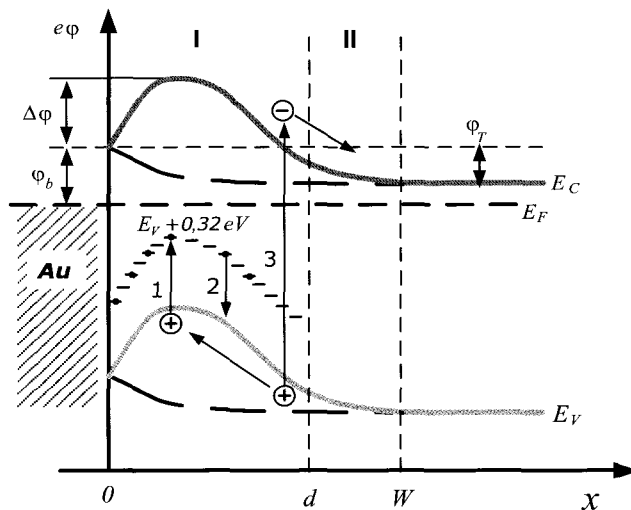
Таким образом, ФЭП на основе полупроводников с глубокой примесью донорного типа будут иметь существенно лучшие метрологические ха-

рактеристики по сравнению с ФЭП, легированных примесью акцепторного типа, но, с другой стороны, не смогут реализовать переключаемые при изменении плотности мощности оптического излучения характеристики. Если точнее, то появление дополнительной спектральной области чувствительности будет наблюдаться и для ФЭП с донорной примесью, но с интенсивностью на 4–6 десятичных порядка слабее, чем для ФЭП с акцепторной примесью. При температуре около 100 К энергетическая характеристика ФЭП на основе собственного полупроводника линейна с отклонением от линейности не более 1 % (линия 2, рис. 1,а). Характеристика чувствительности линейна на всем динамическом диапазоне, при этом не изменяется и быстродействие фотоприемника с изменением мощности оптического излучения.

Фотоприемники с внутренним усилением

При использовании в качестве ФЭП барьерных структур (рис. 1а,б) оптическая модуляция высоты барьера Шоттки приводит к появлению эффекта внутреннего умножения фототока

(рис. 5). Высота потенциального барьера в полупроводниках, неоднородно легированных глубокими примесями, зависит от параметров глубокой примеси (сечения захвата для электронов и дырок, глубины залегания энергетических уровней) и концентрации глубокой примеси. Зависимости времени жизни электронов и дырок τ_n и τ_p , соответственно, от уровня возбуждения определяются как инжекционной перезарядкой дефектов, так и снижением потенциального барьера с ростом уровня инжекции. Высотой потенциального барьера можно управлять, подбирая глубокую примесь с соответствующими параметрами и концентрацией, а также изменяя уровень инжекции.



1, 2 – термическая эмиссия и рекомбинация дырок; 3 – переходы под действием света из области собственного возбуждения полупроводника; d – область, легированная глубокой примесью; W – ширина ОПЗ

Рис. 5. Схема электронных переходов с участием уровней глубокой примеси в ОПЗ барьерных структур

Функциональный фотоприемник для определения длины волны и мощности оптического излучения

Кроме того, наличие в структуре ФЭП встречно включенных барьерных структур (рис. 1,с) может привести к появлению на спектральной характеристике чувствительности (рис. 6) области с инверсией знака фото-ЭДС [10, 11]. Двухбарьерные полупроводниковые фотоприемники позволяют только изменением режима питания ФЭП производить определение длины волны оптического излучения [11]. Для разных длин волн оптического излучения точка перехода фототока короткого замыкания через нуль λ_0 реализуется для других напряжений смещения U_D , что проявляется в смещении характеристик (линия 1*, рис. 6,а) спектральной чувствительности ФЭП. Процедура определения длины волны оптического сигнала заключается в фиксации значения напряжения смещения ФЭП, при котором достигается нулевое значение выходного

сигнала, и не зависит от его мощности (рис. 6), при этом исключается необходимость применения дополнительных оптических или механических элементов. Для повышения чувствительности измерительного преобразователя и снижения погрешности определения длины волны оптического излучения измерения проводятся на переменном токе с использованием фазового детектирования. В результате передаточные характеристики измерительного преобразователя на базе двухбарьерного ФЭП имеют вид, представленный на рисунках 6,б, 6,с. Типичный реализуемый диапазон измерения длины волны составляет для разных ФЭП от 1,2 до 2,4 мкм. Конкретные диапазоны и коэффициенты преобразования определяются типом материала основного материала, материала примеси, конструктивно-технологических характеристик. Отметим, что для большинства ФЭП передаточная характеристика $U_D(\lambda)$ образована двумя линейными участками (рис. 6,с).

Использование двухбарьерных фотоприемников в оптических измерительных преобразователях предоставляет ряд функциональных преимуществ, позволяя при использовании одноэлементного ФЭП определять и мощность оптического излучения, и его длину волны без каких-либо диспергирующих элементов, что существенно упрощает конструкцию измерительного преобразователя. Модуляция оптического излучения несколькими значениями длин волн и мощности позволяет анализировать пространство информационных сигналов J, λ . Таким образом, 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 длиной базой, демонстрируют неомонотонную зависимость выходного сигнала i от длины волны λ , интенсивности света J , величины приложенного напряжения V и геометрического смещения Δz , спроецированного изображения от фронтальной к тыльной плоскости структуры. Такая структура представляет собой, по существу, функциональный преобразователь [4], в котором взаимосвязь четырех параметров $J, \lambda, V, \Delta z$ дает возможность функционального выражения одной физической величины (или совокупности нескольких величин) через другую.

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 струк-

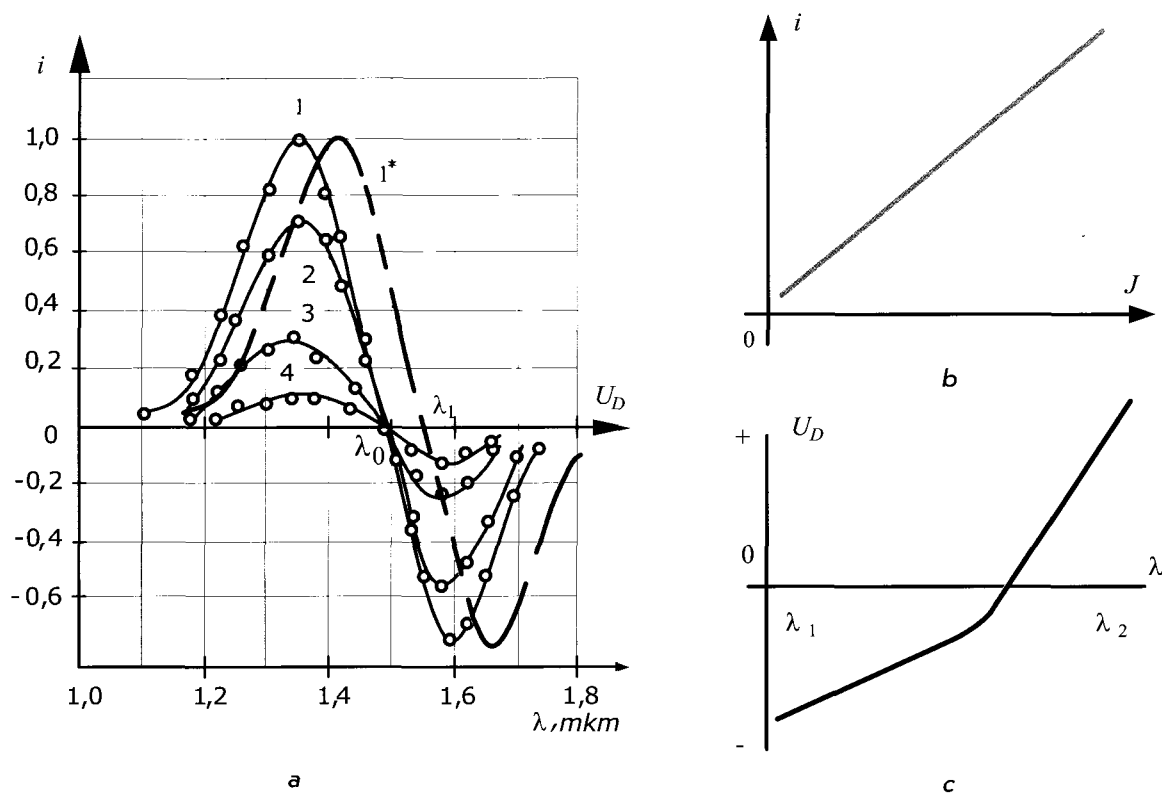


Рис. 6. Спектральные характеристики фототока короткого замыкания одноэлементного двухбарьерного преобразователя (Ni-nGe(Cu)-Ni) при нулевом смещении для различных плотностей мощности оптического излучения: 1 – $J = 10$ мкВт/см², 2 – $J = 5$ мкВт/см², 3 – $J = 3$ мкВт/см², 4 – $J = 1,5$ мкВт/см² (а), и передаточные характеристики измерительного преобразователя (b, c)

туру (ПБС) МФД, например, металл-полупроводник-металл (с прослойкой окисла, глубокими и мелкими примесными центрами). Основой применения объемно перезаряжаемых светом и электрическим смещением структур является изменение времени жизни и подвижности неравновесных носителей заряда в результате их перераспределения по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси.

Многофункциональные датчики можно применить и в различных оптических схемах обработки сигнала, например, схеме синхронного оптического детектора, реализующего передачу и информационного, и опорного сигнала синхронизации одним оптическим сигналом, причем информационный сигнал передается, например, параметром «мощность оптического сигнала», а сигнал синхронизации – параметром «длина волны оптического сигнала». При этом в обоих каналах используются МФД с переключаемыми характеристиками энергетической и спектральной чувствительности.

Заключение

Фотоэлектрические одноэлементные преобразователи на основе собственных полупроводниковых материалов с глубокими многозарядными примесями характеризуются расширенными функциональными характеристиками и увеличен-

ным диапазоном энергетической характеристики. В многоэлементных приборах пространственное разнесение фотоприемных площадок вносит временные, фазовые и другие искажения сигнала, увеличивает габариты устройств, создает дополнительные помехи.

Использование при создании фотоэлектрических преобразователей полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет получить ряд новых количественных и качественных характеристик:

- существенно (до 80 дБм) расширить динамический диапазон чувствительности фотоприемника или реализовать переключение диапазона чувствительности под действием управляющего оптического или электрического сигнала;
- реализовать для ФЭП с использованием примеси акцепторного типа переключаемую внешним оптическим излучением или при изменении уровня возбуждения сигнала спектральную характеристику чувствительности, причем изменение положения максимума спектральной характеристики может достигать 6,5 мкм;
- реализовать для ФЭП с барьерной структурой передаточную характеристику чувствительности с внутренним усилением, с формированием сублинейной энергетической характеристики;

– реализовать в одном измерительном преобразователе с одноканальной схемой измерения одновременное определение длины волны и мощности оптического излучения.

Границами линейных областей передаточных характеристик измерительных преобразователей многофункциональных ФЭП с многозарядными примесями *p*-типа можно управлять, меняя тип основного материала фотоприемника и концентрацию многозарядной примеси. Для ФЭП с использованием примеси *n*-типа границы между поддиапазонами линейных областей практически отсутствуют, а изменение линейности энергетической характеристики не превышает 1 %. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники для заданного диапазона плотностей мощности излучения, спектрального диапазона и функциональности.

Применение в измерительных и преобразовательных приборах многофункциональных компактных одноэлементных ФЭП, способных обрабатывать входной сигнал по многим параметрам, позволяет повысить помехозащищенность, точность и достоверность обрабатываемой информации, что в целом позволяет расширить как возможности измерительных преобразователей, так и область применения систем оптической диагностики. Свойства одноэлементных фотоэлектрических преобразователей на основе собственных полупроводников с малой концентрацией глубоких примесей, формирующих несколько зарядовых состояний, позволяют реализовывать оригинальные способы измерения характеристик оптического излучения в бесконтактных дистанционных системах диагностики.

Список использованной литературы

1. Формозов Б.Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. / Б.Н. Формозов. – СПб.: СПбГУАП. 2002. – 120 с.
2. R. Vorobey, O. Gusev, K. Tyavlovsky, A. Svistun, L. Shadurskaya, N. Yarzhebetskaya, K. Kierczynski. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors. // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015, № 8 – Pp. 81–85.
3. Бондарь И.В. Фотоэлектрические явления в барьерах Шоттки Cu (Al, In) / *p*-CuIn₃Se₅ / И.В. Бондарь [и др.] // ФТП. – 2007. Т. 41, вып. 1. – С. 44–47.
4. Гусев О.К. и др. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. / О.К. Гусев, Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский; под общ. ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.

5. R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebetskaya, K. Kierczynski. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. // Przegląd elektrotechniczny, – № 5/ 2014, – Pp. 5–78.
6. Глинчук К.Д. Рекомбинационные характеристики германия и кремния, используемых в полупроводниковом приборостроении. / К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, Е.Г. Миселюк // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. – 1978. – № 21. – С. 3–22.
7. Яшин А.Н. Применимость упрощенной модели Шокли-Рида-Холла для полупроводников с различными типами дефектов / Электронные и оптические свойства полупроводников / А.Н. Яшин // Физика и техника полупроводников/ – 2005. Т. 39, № 11. – С. 131–133.
8. Шадурская Л.И. Методика расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с несколькими типами дефектов / Л.И. Шадурская, Н.В. Яржембицкая // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. научн. статей. – Минск, 2005. – Вып. 18. – С. 217–223.
9. Impurities and Defects in Group IV elements and III-V Compounds. Part a: Group IV Elements // Landolt- Börnstein- Group III Condensed Matter Volume 41 A2a, 2002, – pp. 1–11.
10. S. Kh. Khudaverdyan, Photo-detecting characteristics of double barrier structures // ELSEVIER, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – Vol 504/1–3. 2003, – P. 350–353.
11. Double-barrier long wavelength SiGe/Si heterojunction internal photoemission infrared photodetectors / B. Aslan [et al] // Appl. Phys. B: Lasers and Optics. – 2004. Vol. 78, № 2. – P. 225–228.

Олег Константинович Гусев, проректор по учебной работе БНТУ, профессор, кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии», доктор технических наук;

Константин Леонидович Тявловский, доцент, кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии», кандидат физико-математических наук;

Роман Иванович Воробей, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и технологии», кандидат технических наук;

Александр Иванович Свистун, декан приборостроительного факультета, кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии», кандидат технических наук;

Людмила Иосифовна Шадурская, доцент, кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии», кандидат физико-математических наук

Дата поступления 27.02.2017.