

УДК 621.382

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИСТЕМ
ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ФОТОПРИЕМНИКОМ НА
ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКА С СОБСТВЕННОЙ
ПРОВОДИМОСТЬЮ**

*Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. И. СВИСТУН, К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ,
Л. И. ШАДУРСКАЯ*

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.382

**THE MEASURING CONVERTER OF SYSTEMS OF OPTICAL
DIAGNOSTICS WITH THE PHOTODETECTOR ON THE BASIS OF
THE INTRINSIC SEMICONDUCTOR**

*R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. I. SVISTUN, K. L. TYAVLOVSKY,
L. I. SHADURSKAYA*

Аннотация

Рассмотрены вопросы построения измерительных преобразователей систем дистанционной оптической диагностики. Использование одноэлементных многофункциональных фотоприемников на основе собственных полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет получить ряд новых количественных и качественных характеристик.

Ключевые слова:

оптическая диагностика, измерительный преобразователь, фотоприемник, собственный полупроводник, многозарядная примесь.

Abstract

Questions of construction of measuring transducers of systems of remote optical diagnostics are considered. Use of single-element multipurpose photodetectors on the basis of intrinsic semiconductors with penetrating multiply charged impurities allows to receive a series of new quantitative and qualitative characteristics.

Key words:

photodetector, intrinsic semiconductor, multiply charged impurities, measuring converter, optical diagnostic.

Введение

Сущность любого из методов оптической диагностики сводится к регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т. п. Важной задачей при построении систем оптической диагностики является выбор или разработка чувствительных элементов на основе фотоэлектрических преобразователей, обычно на основе полупроводниковых сенсорных структур. Многообразие свойств объектов контроля требует применения в измери-



тельных преобразователях фотоприёмников с различными функциональными свойствами, чувствительных или нечувствительных к спектральному составу оптического излучения, чувствительных к слабым оптическим сигналам или сохраняющим чувствительность при высокой интенсивности сигнала. В ряде случаев требуется применение фотоприемников чувствительных к нескольким физическим параметрам. Методы оптической диагностики для контроля высокоярких объектов или с использованием лазеров, характеризующимися большими плотностями мощности оптического излучения, требуют применения фотоприемников, защищенных от оптических перегрузок, имеющих широкий динамический диапазон энергетической характеристики или переключаемые энергетические характеристики. Для ряда методов оптической диагностики изменения мощности оптических сигналов достигают 10^6 – 10^7 , а типовые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) характеризуются относительно низким динамическим диапазоном (до 50 дБ) энергетической характеристики [1]. Часто функциональность и диапазоны преобразования существующих ФЭП оказываются недостаточными, что приводит к необходимости в одном диагностическом приборе использовать несколько измерительных преобразователей, содержащих ФЭП с различными диапазонами преобразования и функциональностью. В ряде случаев решение этих проблем становится возможным при использовании ФЭП с расширенными функциональными возможностями [2], позволяющих преобразовывать широкодиапазонные по длине волны и плотности мощности измерительные сигналы без переключения измерительных каналов систем оптической диагностики. 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.

Фотоприемники на основе полупроводников с многозарядными примесями

Отличием ФЭП на основе собственного полупроводника от приемников с высокой концентрацией примеси (до 10^{19} см⁻³) является возможность использования особенностей перезарядки глубоких энергетических уровней (ГУ) примесных центров, находящихся в разных зарядовых состояниях. 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 принципа работы фотоэлектрических преобразователей для построения измерительных преобразователей систем оптической диагностики на основе полупроводников с собственной проводимостью лежит физическая интеграция нескольких процессов внутри объема одноэлементной чувствительной приборной поверхностно-барьерной или резистивной структуры (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 или электрической перезарядке этой примеси в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения продлевается линейность энергетической характеристики до плотностей мощности излучения, превышающих порог насыщения характеристик примесных фотоприемников и, таким образом, реализуется увеличенный динамический диапазон энергетической характеристики фотоприемника.

Поведение энергетических уровней многозарядных примесей связано с сильным взаимодействием зарядов примесных центров [3]. Так, если один из энергетических уровней уже занят электроном, а примесный центр захватывает еще один электрон на вышележащий энергетический уровень, то энергия уровня уже не может проявиться в опытах из-за неразличимости между двумя электронами примесного центра. Действительно, если электрон с нижнего уровня переводить в зону проводимости, то электрон с более высокого уровня перейдет на освободившийся нижний уровень, передавая высвобождающуюся энергию электрону с уровня с нижнего уровня. В результате на ионизацию израсходуется энергия, соответствующая разности энергий зоны проводимости и более высокого уровня. Таким образом, существование более высоких энергетических уровней определяется тем, занят ли электрон или нет, уровень лежащий ниже

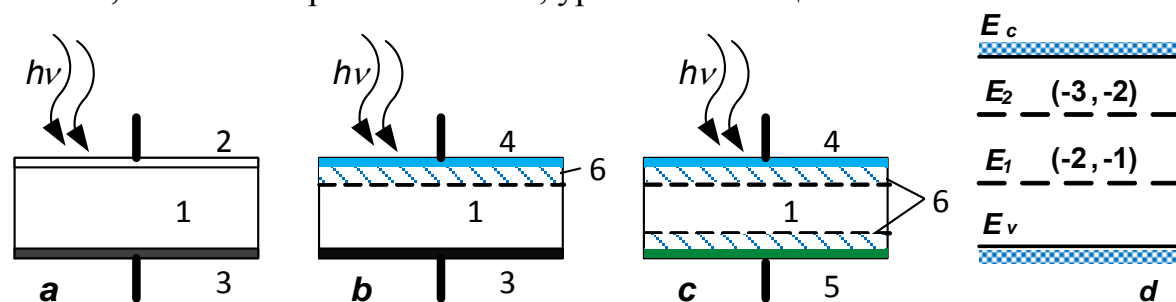


Рис. 1. ФЭП на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью: а – фоторезистивная структура; б – барьерная структура с барьером Шоттки; с – барьерная структура с двумя встречно включенными барьерами Шоттки; d – энергетическая диаграмма собственного полупроводника, легированного глубокой примесью с несколькими зарядовыми состояниями (отмечены в скобках) : 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)

Например, фоточувствительность германия с примесью, формирующей три зарядовых состояния (-1, -2, -3), определяется энергетическими переходами на глубокие уровни E_1 и E_2 (рис. 1,d). При мощности оптического излучения $P < P_L$ большинство примесных ионов находится в зарядовом состоянии (-3), а концентрация зарядовых состояний (-2) и (-1) существенно меньше, и реализуется энергетический переход 1 с уровня E_2 (рис. 1, d, рис. 2). При мощности оптического излучения $P > P_H$ большин-

ство ионов многозарядной примеси находятся в зарядовом состоянии (-1), включается энергетический уровень E_1 , а уровень E_2 не работает. При последовательном заполнении уровней многозарядной примеси во время освещения с увеличивающейся плотностью мощности реализуется передаточная характеристика (рис. 3), обусловленная суммой зависимостей заполненности уровней E_1 и E_2 . Таким образом, при изменении мощности оптического излучения производится изменение концентрации зарядовых состояний примеси с разными энергиями ионизации и автоматическое переключение между уровнями по мере их заполненности, соответственно мощности оптического излучения. Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности ФЭП (рис. 3). Отметим, что внутри поддиапазонов $P > P_H$ и $P < P_L$ энергетическая характеристика фотоприемника линейна, а внутри поддиапазона $P_L < P < P_H$ вид энергетической характеристики может отличаться от линейной. Положение конкретной энергетической характеристики ФЭП внутри пространства обобщенных характеристик (рис. 3), границы поддиапазонов чувствительности, определяются типом материала полупроводника и примеси, ее концентрацией.

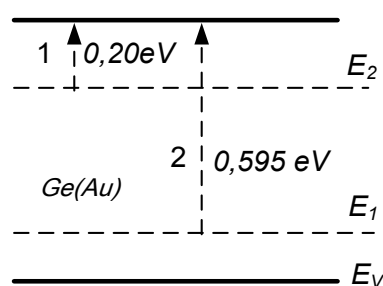


Рис. 2. Энергетическая диаграмма Ge , легированного глубокой примесью Au

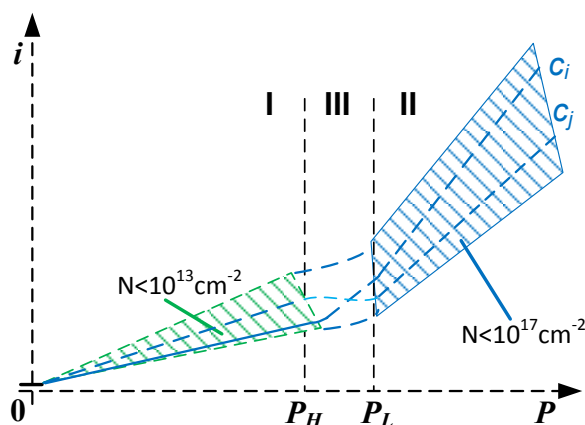


Рис. 3. Энергетическая характеристика ФЭП с многозарядной глубокой примесью

Параметрами ФЭП в областях энергетической характеристики I и II, можно управлять как на стадии изготовления фотоприёмной структуры, 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} cm^{-3} [2, 4].

Изменение интенсивности управляющей подсветки на длине волны λ_0 из области собственного поглощения позволяет изменять относительную чувствительность ФЭП (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 волны λ_0 , причем при работе с интенсивностью управляющего излучения $P > P_H$ также существенно расширяется и динамический диапазон чувствительности ФЭП. Переключение производится за время порядка постоянной времени рекомбинации ($10^{-5} - 10^{-8}$ с), в зависимости от материала ФЭП и уровня оптического сигнала. Одновременно с переходом от одной линейной области к другой (I и II) и переключением спектральной характеристики чувствительности происходит и изменение быстродействия фотоприёмника.

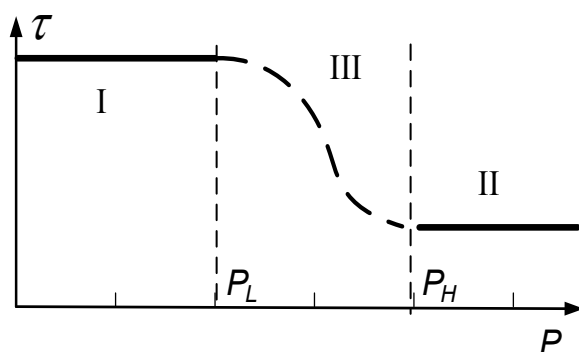


Рис. 4. Зависимость постоянной времени переключения фоторезистивного ФЭП от уровня оптического возбуждения

В случае легирования акцепторной примесью времена рекомбинации τ_n и τ_p при изменении мощности оптического излучения (уровня инжекции) изменяются на несколько десятичных порядков, что приводит к тому, что при переходе на другой поддиапазон энергетической и спектральной характеристик, также существенно изменяется и быстродействие фотоприёмника (рис. 5).

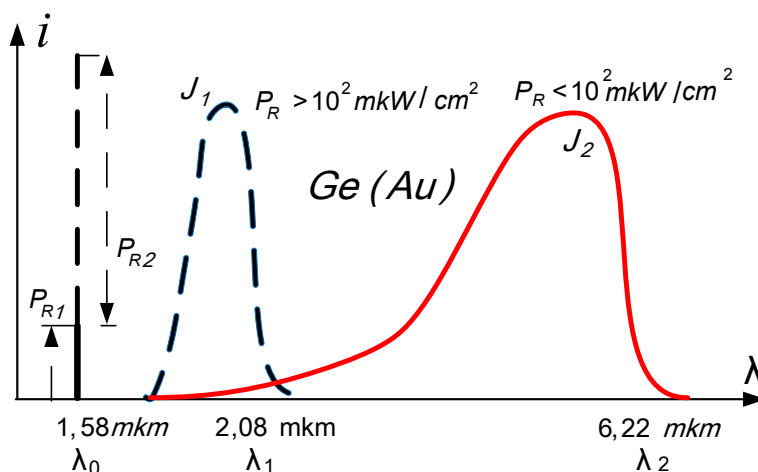


Рис. 5. Переключение спектральной характеристики фотоприемника с глубокой многозарядной примесью при дополнительной подсветке с длиной волны λ_0

Использование фотоприемников с встречно включенными барьерами Шоттки (рис. 1, с) предоставляет ряд функциональных преимуществ, позволяя при использовании одноэлементного ФЭП определять и мощность оптического излучения, и его длину волны без каких-либо диспергирующих элементов [2], что существенно упрощает конструкцию измерительного преобразователя. Модуляция оптического излучения значениями длин волн и мощности позволяет анализировать пространство информационных сигналов J, λ . Приборные структуры с двумя потенциальными барьерами, разделенными длинной базой с глубокими многозарядными примесями в ОПЗ, демонстрируют немонотонную 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, 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 измерительного преобразователя (рис. 6) 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.

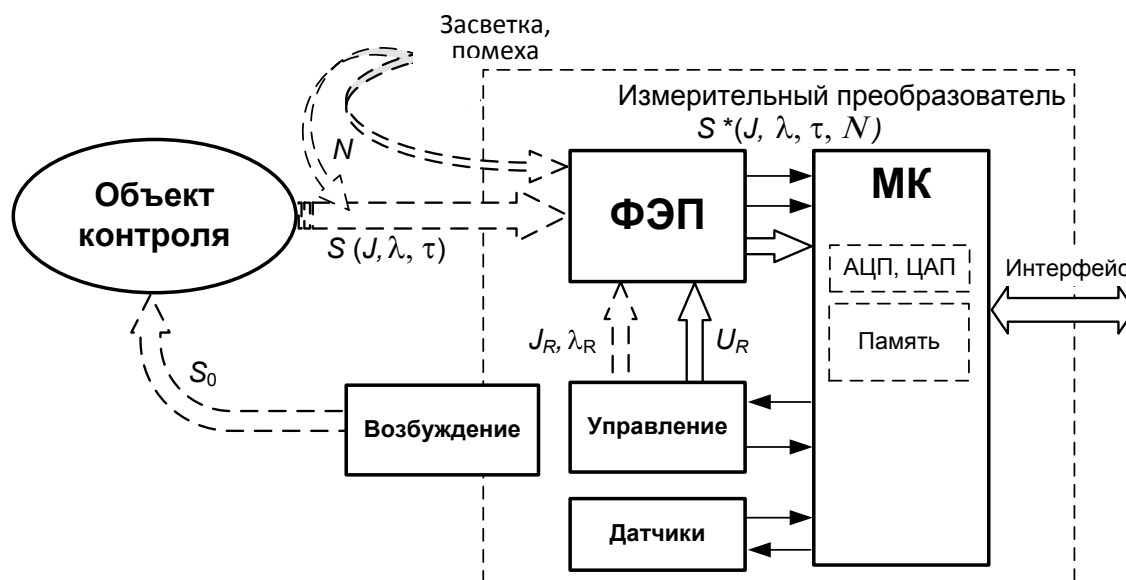


Рис. 6. Схема измерительного преобразователя системы оптической диагностики с ФЭП на основе собственного полупроводника с многозарядной примесью

Многофункциональные ФЭП можно применить 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".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Формозов, Б. Н.** Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / Б. Н. Формозов. – СПб. : СПбГУАП, 2002. – 120 с.
2. **Vorobey, R.** Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey [et.al.] // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2015. – № 8 – P. 81–85
3. **Ali, A.** Influence of deep level defects on the performance of crystalline silicon solar cells: experimental and simulation study / A. Ali // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2011. – Т. 95, № 10. – P. 2805–2810.
4. **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. 1331–1333.
5. **Aslan, B.** 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.

E-mail: nil_pt@bntu.by