

сутствии допирования йодного органического перовскита. Наименьшее пропускание достигается при введении моноэтаноламмония иодида, наибольшее – при отсутствии модификаций.

Зернистость достигается за счёт введения иодидов аммиака, моноэтаноламина и анилина, остальные амины способствуют образованию кристаллитов. Качественные плёнки (равномерные, без аморфных фаз и пустот) получаются при моноэтаноламиниевом внедрении.

Реакция замещения между первоначальным перовскитом и добавляемым четвертичным иодидаммониевым соединением повышает светопоглощение и понижает светопропускание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. McNelis, B. The Photovoltaic Business: Manufactures and Markets. / B. McNelis // Series on Photoconversion of Solar Energy. – 2001. – №1. – P. 713.
2. Barboni, D. The Thermodynamics and Kinetics of Iodine Vacancies in the Hybrid Perovskite Methylammonium Lead Iodide / D. Barboni, R.A. De Souza // Energy Environ. Sci. – 2018. – Vol. 11. – P. 3266–3274.
3. Ching-Ho, T. Methylammonium halide salt interfacial modification of perovskite quantum dots/triple-cation perovskites enable efficient solar cells / T. Ching-Ho, L. Hong-Ye, L. Chen // Nature. – 2023. – Vol 13. – № 5387. – P. 13–20.
4. Eperon, G. The role of dimethylammonium in bandgap modulation for stable halide perovskites / G. Eperon // ACS Energy Lett. – 2020. – Vol 5. – № 6. – P. 1856–1864.

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

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

*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,
220013, Минск, Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Одним из способов решения многообразных задач оптической диагностики является использование фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими несколько уровней с разными зарядовыми состояниями в запрещённой зоне. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней позволяют создавать фотоприёмники с различными функциональными возможностями на основе ряда простых приборных структур.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь; мультипараметрический сенсор; приборная структура; глубокая примесь; преобразовательная характеристика; измерительный преобразователь.

MULTI-PARAMETRIC SENSORS BASED ON SEMICONDUCTORS WITH MULTICHARGING IMPURITIES

**R. I. Vorobey, O. K. Gusev, A. I. Svistun, K. V. Pantsialejev,
K. L. Tyavlovsky, L. I. Shadurskaya**

Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 65, 220013, Minsk, Belarus
Corresponding author: K. L. Tyavlovsky (ktyavlovsky@bntu.by)

One of the ways to solve multiple problems of optical diagnostics is to use photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurities, which form several energy levels with different charge states within the semiconductor's bandgap. Peculiarities of physical processes of recharging these levels make it possible to construct photodetectors with different functionality based on a range of simple device structures

Key words: photovoltaic converter; multi-parametric sensor; device structure; deep impurity; conversion characteristic; measurement transducer.

ВВЕДЕНИЕ

При использовании методов оптической диагностики многообразие свойств объектов контроля требует применения сенсоров с различными свойствами, чувствительных к слабым оптическим сигналам или сохраняющим чувствительность при высокой интенсивности излучения, чувствительных одновременно к нескольким входным факторам. Функциональные возможности измерительных преобразователей систем оптической диагностики во многом определяют фотоэлектрические преобразователи, осуществляющие преобразование одного или одновременно нескольких параметров оптического излучения и других физических факторов. Отдельный тип сенсоров, характеризующихся возможностью управления преобразовательными характеристиками и чувствительностью к нескольким входным факторам различной физической природы с возможностью разделения измерительных сигналов, представляют одноэлементные сенсорные структуры на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, содержащих малую концентрацию многозарядной примеси [1, 2]. Одним из свойств таких приборов является возможность управления их характеристиками дополнительным оптическим излучением. Под действием управляющего оптического сигнала возможно переключение между поддиапазонами энергетической и спектральной характеристиками преобразования оптического излучения в ближнем и среднем ИК-диапазоне, включение чувствительности к дополнительным физическим факторам, например, к магнитному полю [2]. При этом приборная структура таких сенсоров достаточно проста: от фоторезистивной до транзисторной (биполярной или полевой). Использование дополнительных электродов обеспечивает реализацию чувствительности к положению светового пятна на поверхности сенсора. Их преобразовательными характеристиками можно управлять выбором типа приборной структуры, материалов основного полупроводника и многозарядной примеси, их концентрациями, технологией изготовления, режимами питания и смещения сенсора, параметрами управляющего оптического излучения.

БАЗОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Физическую основу принципов работы сенсоров, построенных на базе полупроводника с собственной фотопроводимостью [2], составляет интеграция процессов внутри объёма чувствительной области [3–5], связанных с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси (рис. 1). В фотоприёмниках с собственной фотопроводимостью, слабо легированных рядом примесей с акцепторными свойствами, примесь формирует два или три глубоких уровня в нескольких зарядовых состояниях. При этом характеристики приборной структуры с глубокими многозарядными примесями определяются, в основном, характером рекомбинационных процессов через уровни примеси. При изменении зарядового состояния примеси, например, под действием оптического излучения, время жизни и скорость рекомбинации носителей заряда могут быть изменены на несколько десятичных порядков. Многозарядный примесный М-центр (МПЦ) может содержать от 0 до M электронов и соответственно, находиться в $(M + 1)$ различных зарядовых состояниях (рис. 1, *a*). При пустом центре для электрона существует основное вакантное состояние, описываемое локальным уровнем энергии E_1 . При заполнении уровня E_1 для электронов «возникает» новое квантовое состояние с энергией E_2 , которое может быть занято вторым захваченным электроном.

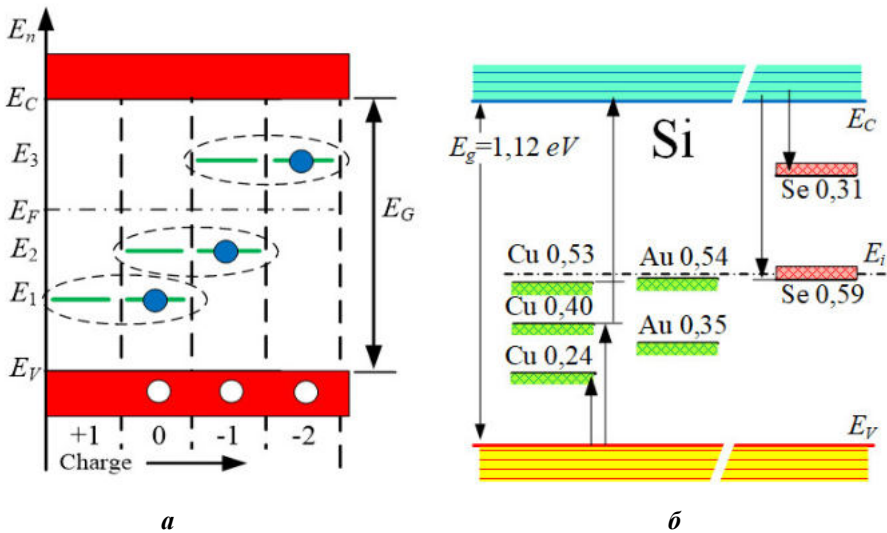


Рис. 1. Энергетическая диаграммы: *a* – примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями; *б* – примеси акцепторного (Cu, Au) и донорного (Se) типа в кремнии, формирующими многозарядные уровни, с приведёнными значениями энергии ионизации

Примечательно, что уровня энергии E_2 не существует, пока уровень E_1 не занят хотя бы одним электроном. Само существование активного уровня и энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра и не может быть представлено набором независимых уровней. В этом заключается основное отличие энергетического спектра многозарядных центров от системы уровней, формируемых несколькими простыми центрами разных типов [5, 6]. В случае нескольких

однозарядных центров разных типов вся совокупность локальных уровней всегда существует полностью, независимо от степени заполнения отдельных уровней. Для многозарядной примеси нейтральному состоянию примесного центра соответствует нижний уровень E_1 , занятый электроном и свободный уровень E_2 . При захвате электронов вышележащим уровнем, энергия нижележащего уровня уже не может проявиться из-за сильного взаимодействия между двумя электронами центра и их неразличимости.

Особенности физических процессов перезарядки этих уровней и тот факт, что чувствительность сенсора к оптическому излучению определяется процессами рекомбинации, позволяют создавать фотоприёмники с различными функциональными возможностями на основе ряда простых приборных структур. Так уже простая фоторезистивная структура из-за последовательной перезарядки уровней с различными зарядовыми состояниями обеспечивает формирование энергетической характеристики чувствительности с несколькими поддиапазонами и, в результате, увеличение динамического диапазона энергетической характеристики. Удлинение энергетической характеристики (область II на рис. 2, а), по сравнению с энергетической характеристикой фотоприёмников с примесной проводимостью, весьма существенно, и зависит от параметров структуры и применяемых материалов основного полупроводника и примеси [2, 5]. Отличия коэффициентов чувствительности в различных поддиапазонах преобразования компенсируются контроллером измерительного преобразователя (рис. 2, б). Продление линейности энергетической характеристики возможно до плотностей мощности оптического излучения, превышающих порог насыщения характеристик собственных и примесных фотоприёмников. Необходимо отметить, что абсолютные значения чувствительности сенсоров с собственной фотопроводимостью меньше чувствительности фотоприёмников с примесной проводимостью.

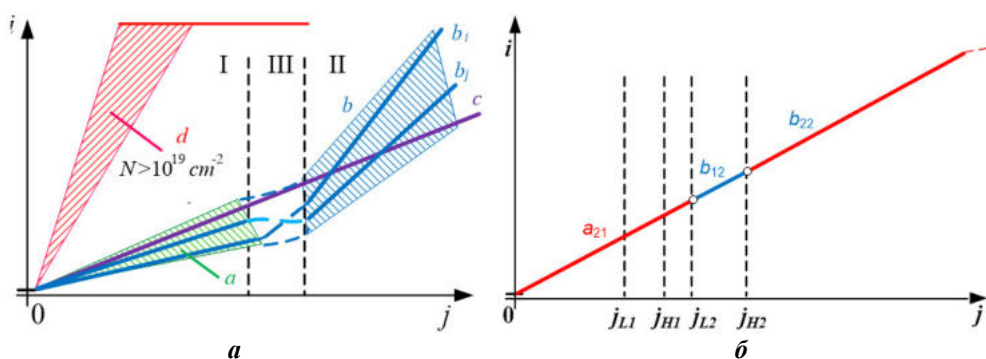


Рис. 2. Энергетическая преобразовательная характеристика (а) и результирующая передаточная характеристика измерительного преобразователя на основе сенсоров с многозарядными примесными центрами (б)

Внешняя управляющая подсветка позволяет включать/выключать нижележащие уровни многозарядной примеси, что обеспечивает возможность переключения вида спектральной характеристики чувствительности [7], приводящую к изменению «красной границы» чувствительности, причём переключение вида характеристики происходит за время, определяемое временем жизни носителей заряда. Измерительный преобразователь на основе сенсора с переключаемыми дополнительным сигнала-

лом поддиапазонами может быть построен как с целью реализации одной преобразовательной характеристики с широким динамическим диапазоном, так и с целью построения преобразователя с несколькими характеристиками, переключаемыми оптическим сигналом с высокой скоростью.

Отметим, что сенсоры с переключаемыми энергетическими и спектральными характеристиками могут быть выполнены на основе простейшей фоторезисторной структуры с возможностью ввода управляющего оптического излучения. При этом фотоприёмные сенсорные структуры с отличающимися характеристиками выполняются в одном объёме и переключение диапазонов преобразования измерительного преобразователя происходит без использования дополнительных оптических и механических элементов.

Применение в сенсорной структуре дополнительных электродов (рис. 3) и обработка измерительного сигнала латеральной фото-ЭДС позволяет определять координаты светового пятна внутри фоточувствительной площадки и, таким образом, использовать такую структуру как позиционно-чувствительный фотоприёмник. Усложнение структуры позиционно-чувствительного сенсора путём нанесения электродов симметрично на «лицевую» и «тыльную» стороны приводит к формированию структуры оптического компаратора, позволяющей сравнивать два оптических сигнала S_1 и S_2 по таким параметрам, как: интенсивность оптического излучения, длина волны монохроматического излучения, положение и форма оптического пятна [2] оптических сигналов, подаваемых на разные стороны одноэлементного мультипараметрического сенсора. При этом использование для легирования глубоких многозарядных примесей и дополнительного управляющего сигнала обеспечивает работу сенсора с переключаемыми энергетическими и спектральными характеристиками чувствительности.

Применение для построения сенсора транзисторных структур даёт возможность построения приборов, чувствительных к физическому параметру неоптической природы, например, магнитному полю (рис. 4).

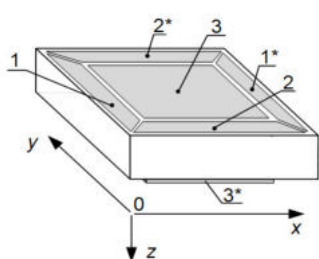


Рис. 3. Структура трёх-координатного позиционно-чувствительного сенсора и оптико-электронного компаратора

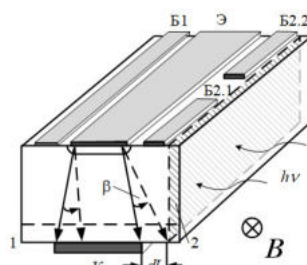
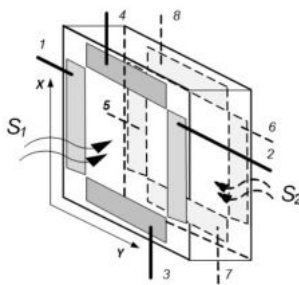


Рис. 4. Оптико-магниторекомбинационный транзистор

При отсутствии освещения одной грани или равномерном освещении всей структуры, когда обе грани сенсора находятся в одинаковых условиях, чувствительность к магнитному полю отсутствует. Наличие отдельных выводов базы Б1 и Б2 позволяет использовать саму базу как фоторезистор для разделения измерительного сигнала от различных входных воздействий и определения параметров только оптического из-

лучения при одновременном воздействии двух физических параметров, магнитного поля и оптического излучения, например, в односигнальной модели многопараметрических измерений [1]. В целом, оптико-магнитный преобразователь характеризуется свойствами функционального умножителя индукции магнитного поля и интенсивности оптического излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ионизация глубокой примеси с несколькими энергетическими уровнями для разных зарядовых состояний может происходить под действием входных факторов различной физической природы, что позволяет создавать мультипараметрические сенсоры. Чувствительность таких сенсоров к нескольким воздействиям различной физической природы реализуется в одноэлементной приборной структуре и исключает необходимость применения дополнительных оптических элементов. Как и в случае традиционных фотоприёмников, для улучшения или модификации фоточувствительных характеристик могут использоваться различные конструктивные и технологические приёмы, например, профилирование поверхности сенсора с целью уменьшения коэффициента оптического отражения, или использовании технологий типа полупроводник на сапфире и др.

Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует широкий набор примесей [5], образующих многозарядные центры, значения энергетических уровней и сечения захвата которых позволяют формировать разнообразные сенсоры с широким диапазоном заранее заданных свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределёнными состояниями / под общ ред. О.К. Гусева – Минск: Изд-во БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R.I. Vorobey [et al.] // *Devices and Methods of Measurements* – 2021, №2, – P. 108–116.
3. 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.
4. 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.
5. Никитина, А.Г. Бистабильные амфотерные центры в полупроводнике / А.Г. Никитина, В.В. Зуев // *Физика и техника полупроводников*. – 2008. Т. 42, вып. 2. – С. 141–146.
6. Lauwaert, J. Majority carrier capture rates for transition metal impurities in germanium / J. Lauwaert, P. Clauws // *Thin solid films*. – 2010. Vol. 518 (9). – P. 2330–2333.
7. Гусев, О. К. Фотоприёмники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей. / О.К. Гусев, К.Л. Тяловский, Р.И. Воробей, А.И. Свистун, Л.И. Шадурская // *Метрология и приборостроение*. – 2017, № 2. – С.34–42.
8. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин / под общ. ред. О.А. Агеева, В.В. Петрова. – 2-е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2018. – 158 с.