

V. Skytsiouk, T. Klotchko, M. Bulyk // Bulletin KPI. Series Instrument Making. – 2019. – Vol. 57, № 1. – P. 62–71.

4. Скицюк, В. І. Визначення координати у явно-реальній поверхні межової панданної зони об'єкта /

В. І. Скицюк, Ключко, Т. Р. // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2017. – Т. 53, № 1. – С.49–56.

УДК 621.383

ФОТОПРИЕМНИК С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

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

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Полупроводниковые приборные структуры с глубокой многозарядной примесью позволяют создавать фотоприемники для систем оптической диагностики с переключаемым видом спектральной характеристики чувствительности. Реализуемая спектральная характеристика чувствительности определяется заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси. Набор спектральных характеристик, между которыми осуществляется переключение, определяется комбинацией материалов полупроводника и глубокой многозарядной примеси.

Ключевые слова: измерительный фотоприемник, полупроводник, многозарядная примесь, спектральная характеристика чувствительности, управление характеристикой чувствительности.

PHOTODETECTOR WITH THE SWITCHED CHARACTERISTIC OF SPECTRAL RESPONSE

Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Semi-conductor structures with deep multicharge impurity allow to create photodetectors for systems of optical diagnostic with a switched aspect of spectral characteristics of sensitivity. The implemented spectral characteristics of sensitivity are defined by population of power levels многозарядной impurity. The set of spectral characteristics between which switching is carried out, is defined by a combination of materials of the semi-conductor and deep multicharge impurity.

Key words: photodetector, the semiconductor, multicharge impurity, sensitivity spectral characteristics, control of the sensitivity characteristic.

*Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Наибольший интерес, с точки зрения применения в измерительных фотоэлектрических преобразователях систем оптической диагностики, представляют фотоприемники (ФП), способные осуществлять одновременное измерение нескольких параметров оптического излучения: абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и др. [1–4]. Физическую основу работы фотоприемника, построенного на базе полупроводника с собственной фотопроводимостью [2–4], составляет интеграция процессов внутри объема чувствительной области, связанных с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси. Расширение функциональности ФП возможно благодаря использованию механизма управления зарядовым состоянием многозарядных примесных центров. Такой фотоприемник выполняется в одном объеме полупроводника с собственной фотопроводимостью, легированного глубокой примесью, образующей два и более энергетиче-

ских уровня для разных зарядовых состояний [3]. Многозарядный примесный M -центр может содержать от 0 до M электронов и соответственно, находиться в $(M + 1)$ различных зарядовых состояниях. Схема полупроводника для $M = 3$ приведена на рис. 1.

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. Причем уровня энергии E_2 не существует, пока уровень E_1 не занят хотя бы одним электроном. Это обстоятельство составляет основное отличие энергетического спектра многозарядных центров от системы уровней, формируемых несколькими простыми центрами разных типов. 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 при-

местного 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. Само существование активного уровня и энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра и не может быть представлено набором независимых уровней. В зависимости от точного положения уровня Ферми в глубине запрещенной зоны в качестве активной выступает та или иная пара уровней.

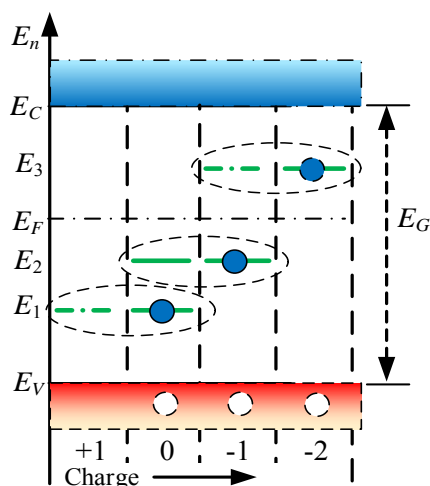


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма полупроводника для примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями

Последнее обстоятельство позволяет изменять вид энергетического спектра примесного центра, управляя заселенностью уровней путем электрической инжекции или дополнительной подсветкой [3, 4]. Переключение между видами энергетического спектра примесного центра происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда, и, в свою очередь, приводит к изменению вида спектральной чувствительности ФП. Длинноволновая граница примесной фотопроводимости

$$\lambda_i = \frac{hc}{E_i}, \quad (1)$$

где E_i – энергии ионизации примеси.

При этом, реализуется механизм прыжковой проводимости при переходе между уровнями E_1 и E_2 . Однако в отличие от действительно прыжковой проводимости в случае простых центров разных типов [5], для многозарядной примеси длина прыжка равна нулю, так как оба уровня формируются одним тем же атомом, и значение проводимости при таком переходе сравнимо с проводимостью при переходе из валентной зоны

на уровни E_1 или E_2 . И длинноволновая граница спектральной чувствительности при реализации «прыжковой» проводимости для многозарядной примеси

$$\lambda_{12} = \frac{hc}{E_2 - E_1}, \quad (2)$$

и, т. к. разница энергий между уровнями ($E_2 - E_1$) часто меньше разности между этими уровнями и краем валентной зоны, то и значение λ_{12} часто оказывается существенно больше λ_1 и λ_2 [3, 5].

Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует достаточно большой набор примесей, формирующих многозарядные центры [6], и в фоторезистивных структурах на их основе реализуется переключение между спектральными характеристиками чувствительности в ближнем и среднем ИК-диапазоне с переключением между положением «красной» границы чувствительности (1, 2) до 8 мкм [3]. Например, в табл. 1 представлены энергии ионизации некоторых примесей в Ge и Si, а также соответствующие значения длинноволновой границы [6–7].

Таблица 1. Энергия ионизации E_i и длинноволновая граница примесной фотопроводимости λ в Ge и Si

Полупроводник: примесь	E_i , эВ	λ , мкм
Ge:Au	0,15	8,3
Ge:Hg	0,09	14
Ge:Cd	0,06	21
Ge:Cu	0,041	30
Si:In	0,155	8
Si:Ga	0,0723	17
Si:P	0,045	28
Si:As	0,0537	23

Применение фотоприемников на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет реализовать управление видом спектральной характеристики чувствительности преобразователя.

Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники для заданного спектрального диапазона.

Литература

1. Филачев А. М. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко – М. : Физматкнига, 2016. – 104 с.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев, [и др.] ; под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 8. – P. 81–85.
4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

5. Поклонский, Н. А. Ионизационное равновесие и прыжковая электропроводность в легированных полупроводниках / Н. А. Поклонский. – Минск : БГУ, 2004. – 195 с.

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. Никитина, А.Г., Зуев, В.В.. Бистабильные амфотерные центры в полупроводнике // Физика и техника полупроводников, 2008, т. 42, вып. 2, – С. 141–146.

УДК 621.382.33

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТТЕРИРУЮЩЕГО СКРЫТОГО СЛОЯ Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹, Пилипенко В.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен способ формирования геттерирующего слоя в составе транзисторной структуры интегральной схемы. Для введения вольфрама в качестве геттерирующей примеси предлагается использовать метод газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда или интенсификацию процесса методом лазерного распыления материала мишени.

Ключевые слова: биполярный транзистор, эпитаксия, скрытый слой, геттерирование, легирование.

METHOD OF FORMATION OF THE GETTERING LATENT LAYER

Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Tyavlovsky K.¹, Shadurskaya L.¹, Pilipenko V.²

¹Belarusian National Technical University

²JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company

Minsk, Belarus

Abstract. The method of formation of a gettering layer as a part of transistor structure of the integrated circuit is considered. For introduction of tungsten as a gettering impurity it is offered to use a method of gas-discharge alloying in a mode of decaying discharge or an intensification of process by a method of a laser pulverization of a material of a target.

Key words: bipolar transistor, the epitaxy, the latent layer, gettering, alloying.

Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Наряду с интегральными схемами, созданными по передовым технологиям с технологическими нормами менее 10 нм, востребованы и электронная промышленностью производятся и приборы с использованием «традиционной» технологии (<https://integral.by/ru/products/>) с проектными нормами до 10 мкм. Для изготовления интегральных схем малой и средней степени интеграции хорошо освоенным и наиболее употребительным является планарно-эпитаксиальный процесс [1, 2].

Основным схемным элементом биполярных ИС является биполярный n - p - n транзистор. Упрощенная классическая планарная структура биполярного n^+ - p - n транзистора интегральной схемы со скрытым подколлекторным слоем приведена на рис. 1.

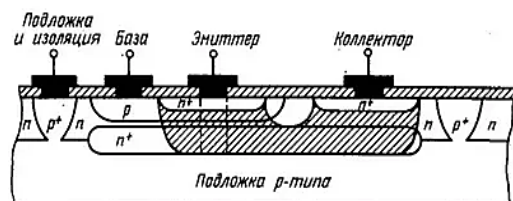


Рисунок 1 – Структура биполярного транзистора

Так как вывод коллектора интегрального транзистора расположен на поверхности прибора (рис. 1), то это приводит к увеличению сопротивления тела коллектора и, как следствие, к ухудшению частотных и переключательных характеристик транзистора [1]. Увеличение степени легирования всего объема коллекторной области снижает ее удельное сопротивление, но одновременно приводит к уменьшению напряжения пробоя перехода коллектор – база и увеличению емкости этого перехода. Компромиссным решением проблемы является создание скрытого высоколегированного n^+ -слоя на границе коллектора и подложки [1, 2]. Этот слой обеспечивает низкоомный путь току (заштриховано на рис. 1) от активной коллекторной зоны к коллекторному контакту без снижения пробивного напряжения перехода коллектор – база. Происходит уменьшение сопротивления тела коллектора в несколько, до десяти, раз. Скрытый слой также уменьшает коэффициент передачи дырок в подложку, так как инжектированные слоем базы дырки рекомбинируют с электронами n^+ скрытого слоя и ток замыкается по цепи база-коллектор.

Вследствие того, что скрытый слой формируется на подложке перед нанесением эпитаксиального n -слоя, то n^+ скрытый слой выполняет