

УДК 621.81

**МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫЙ  
С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ****ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ*****Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. И. СВИСТУН, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ,  
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, Л. И. ШАДУРСКАЯ***Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

UDC 621.81

**OPTICAL DRIVEN MAGNETICORECOMBINATIONAL CONVERTER*****R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. I. SVISTUN, A. K. TYAVLOVSKY,  
K. L. TYAVLOVSKY***

**Аннотация.** Рассмотрены особенности фотоэлектрических преобразователей с собственной фотопроводимостью на основе полупроводников с глубокой многозарядной примесью. Использование таких структур позволяет получить новые функциональные свойства магниторекомбинационных одноэлементных преобразователей и измерительных преобразователей оптической диагностики на их основе.

**Ключевые слова:** оптическая диагностика, фотоэлектрический преобразователь, многозарядная примесь, магниторекомбинационный преобразователь, переключение характеристик.

**Abstract.** The features of photovoltaic cells in semiconductors with deep-level multiply-charged impurity are considered. The use of such structures can gain new functional properties of single-element optical driven magneticorecombinational receivers and optical diagnostics measuring transducers based on them.

**Keywords:** optical diagnostics, photoelectric converter, multiply charge impurity, magneticorecombinational converter, switching characteristics.

Оптические методы диагностики [1] применяются как для определения различных характеристик материалов и изделий – от геометрических размеров и дефектности до химического состава, так и для измерения параметров технологических и физических процессов, обеспечивая при этом неразрушающий характер контроля. При этом возможности оптических методов диагностики определяются, в основном, функциональными возможностями и параметрами фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). Перспективным направлением является построение измерительных преобразователей систем оптической диагностики на основе полупроводниковых ФЭП с возможностью преобразования нескольких разнородных физических величин, изменяемой функциональностью и переключением поддиапазонов преобразования [2, 3].

Основу ряда функциональных ФЭП, пригодных для применения в системах оптической диагностики, составляют базовые фоторезистивные и барьерные структуры [3]. Для формирования многофункциональных ФЭП с переключаемыми характеристиками перспективно применение комбинации нескольких базовых структур. Например, для построения ФЭП, чувствительных к магнит-

ному полю и оптическому излучению, предлагается использование структуры магнитотранзистора [4], работающего на основе гальваномагниторекомбинационного (ГМР) эффекта, в котором область базы выполнена на основе полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси [3], формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний.

Если гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП) находится в скрещённых электрическом и магнитном полях (рис. 1), то под действием силы Лоренца произойдёт смещение носителей зарядов к одной из боковых поверхностей, имеющих разные скорости рекомбинации [4] (поверхность 1 – высокую, 2 – низкую). Если направление магнитного поля таково, что заряды перемещаются к поверхности 1, то общая концентрация носителей зарядов уменьшается и, соответственно, возрастает сопротивление ГМРП. При обратном направлении вектора магнитной индукции изменяется направление силы Лоренца, что приводит к перемещению зарядов к поверхности 2, у которой малая скорость рекомбинации, и к общему увеличению концентрации зарядов, т. е. к уменьшению сопротивления ГМРП.

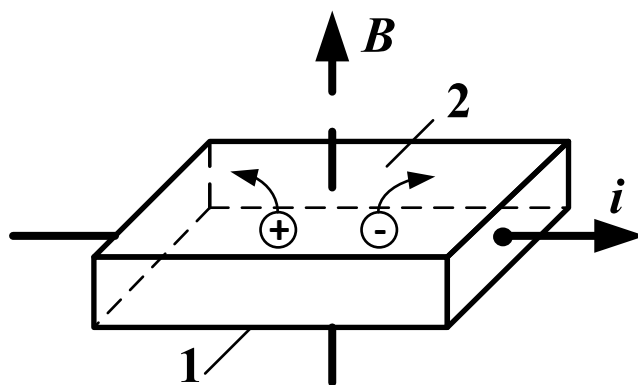


Рис. 1. Структура базового ГМР-преобразователя

Таким образом, в отличие от магниторезисторов, у которых изменение сопротивления не зависит от полярности магнитной индукции, у ГМРП изменение сопротивления зависит от направления вектора  $B$ . Следовательно, в магнитном поле ГМРП имеет свойства, аналогичные свойствам диода. Наиболее выражен рассматриваемый эффект у магнитотранзисторов с электрически управляемой магниточувствительностью. Полевой гальваномагниторекомбинационный транзистор состоит из полупроводниковой пластины (тип полупроводника близок к типу собственной проводимости), металлических электродов, предназначенных для подведения управляющего напряжения и изолированных слоями диэлектрика от полупроводниковой пластины и токовых электродов [4]. В зависимости от соотношения скоростей рекомбинации на гранях канала полевого транзистора и направления силы Лоренца происходит общее уменьшение или увеличение концентрации основных носителей по сравнению с равновесной. Это, в свою очередь, приводит к изменению электрического сопротивления канала полевого транзистора.

В качестве основного материала транзисторного ГМР-преобразователя предлагается использовать полупроводник с низкой концентрацией примеси [3], формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний. Физическую основу работы фотоприёмника, построенного на базе полупроводника с собственной фотопроводимостью [2, 3], составляет интеграция процессов внутри объёма чувствительной области, связанных с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси. Многозарядный примесный  $M$ -центр (МПЦ) может содержать от 0 до  $M$  электронов и, соответственно, находиться в  $(M + 1)$  различных зарядовых состояниях (рис. 2).

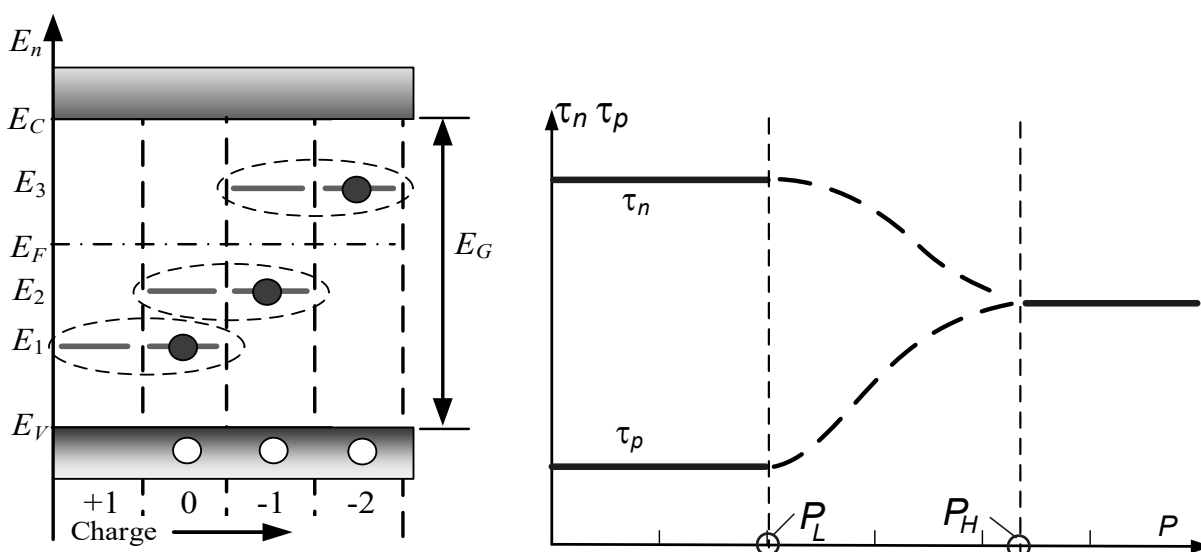


Рис. 2. Энергетическая диаграмма для примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями и зависимости постоянной времени рекомбинации акцепторной примеси от уровня оптического возбуждения

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 [5]. Уровни возбуждения, при которых происходит изменение зарядовых состояний МПЦ, обозначены на рис. 2 как  $P_L$  и  $P_H$ . Причём 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 [5]. 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. В зависимости от точного положения уровня Ферми в глубине запрещённой зоны в качестве активной выступает та или иная пара уровней.

Последнее обстоятельство позволяет, управляя заселённостью уровней путём электрической инжекции или дополнительной подсветкой [6], изменять значения постоянной времени рекомбинации и величину энергии ионизации примесного центра. Это приводит к изменению характеристик чувствительности преобразователей, принцип работы которых основан на рекомбинационных процессах, с одновременным изменением вида спектральной чувствительности ФЭП. Переключение между состояниями ФЭП происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда. Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует достаточно большой набор примесей, формирующих многозарядные центры [5].

Таким образом, предлагаемый ГМР-преобразователь представляет собой структуры биполярного транзистора с длинной базой (рис. 3, а) или полевого МДП-транзистора (рис. 3, б), в которых базовая область или канал выполнены из полупроводника с примесью, формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний.

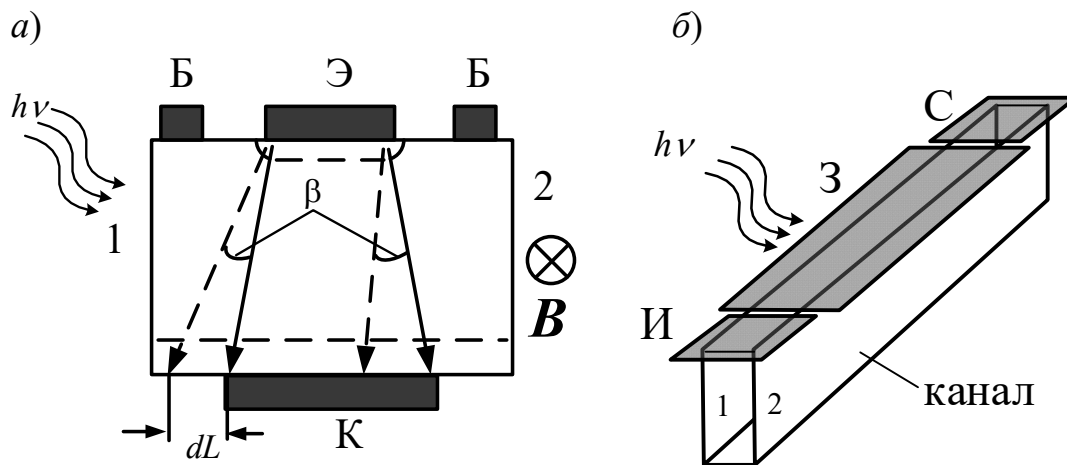


Рис. 3. Базовые приборные структуры ГМР биполярного (а) и полевого (б) транзисторов: 1 – освещаемая грань активной области структуры; 2 – неосвещаемая

Причём одна из сторон (на рис. 3 грань 1) активной области (базы или канала) для управления характеристиками ГМРП может быть освещена дополнительным оптическим излучением управляющего сигнала, а другая (грань 2) – всегда находится в «темноте». Под действием освещения в полупроводнике с примесью, формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний, скорость рекомбинации существенно изменяется (см. рис. 2). Отметим [3], что скорость рекомбинации в полупроводниках с многозарядной примесью под действием внешних факторов (оптическое излучение) можно изменять на несколько десятичных порядков. Поток носителей заряда под действием магнитного поля  $B$  отклоняется на угол  $\beta$  и ток через приборную структуру уменьшается.

Относительное изменение проводимости активной области ГМРП под действием магнитного поля обращается в нуль при равенстве скоростей рекомбинации на обеих гранях и увеличивается при увеличении их разности [4].

Таким образом ГМР-транзисторы с активной областью на основе полупроводника с многозарядной примесью чувствительны к двум физическим величинам: магнитному полю и оптическому излучению. Это позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей систем оптической диагностики, функциональных умножителей, компараторов оптического излучения при освещении обеих граней активной области, управляемых сенсоров, в которых чувствительность к одному параметру изменяется при воздействии на ГМРП фактора другой физической природы. Использование физической интеграции процессов внутри объёма чувствительного элемента и его приповерхностной области дает возможность сформировать ряд уникальных свойств таких ФЭП при простой конструкции и технологии изготовления приборной структуры. Применение эффектов, формируемых в объёме полупроводника по сравнению с использованием разности поверхностной и объёмной скоростей рекомбинации, позволяет повысить повторяемость свойств ГМРП при одновременном увеличении чувствительности преобразователя. Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и её концентрации дает возможность создавать фотоприёмники для заданных значений коэффициентов преобразования и спектрального диапазона оптического излучения (от 1 до 12 мкм).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 53696–2009.** Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределёнными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. 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.
4. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин / Под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2018. – 158 с.
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. Фотоприёмники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / О. К. Гусев [и др.] // *Метрология и приборостроение*. – 2017. – № 2. – С. 34–42.

E-mail: ktyavlovsky@bntu.by.