БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ли, Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии / Н.Ч. Ли. – М.: Издательский дом «Технологии», 2006. – 392 с.
2. Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ / А. Р. Новоселов [и др.] // Прикладная физика. – 2010. – № 5. – С. 77–80.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ОПТИКО- МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

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

Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 63, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Рассмотрена структура комбинированного оптико-магнитного преобразователя, который дополняет особенности магниторекомбинационных преобразователей свойствами фотоприёмников 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: фотоэлектрический преобразователь; магниторекомбинационный преобразователь; многозарядная примесь; оптическая диагностика.

THE MAGNETORECOMBINATIONAL COMBINED OPTICS CONVERTER

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

Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 63, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: K. L. Tyavlovsky (ktyavlovsky@bntu.by)

The structure of the combined optiko-magnetic converter which supplements features of magnetorecombinational converters with properties of photodetectors on the basis of semiconductors with deep multicharging impurity is considered. Use of such structures allows to receive new functional properties of magnetorecombinational single-element converters and measuring converters of optical diagnostics on their basis.

Key words: photoelectric converter; magneticorecombinational converter; multiply charge impurity; optical diagnostics.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольший интерес, с точки зрения применения в измерительных преобразователях систем оптической диагностики, представляют фотоприемники, способные осуществлять одновременное измерение нескольких параметров как оптического излучения, так и воздействий с другой физической природой [1–3]. Оптический и магнитный способы измерений широко используются как основа при построении

измерительных преобразователей в методах неразрушающего контроля материалов и изделий. При этом возможности методов диагностики определяются, в основном, функциональными возможностями и параметрами измерительных преобразователей (ИП). Перспективным направлением является построение измерительных преобразователей систем неразрушающей диагностики на основе полупроводниковых приборов с возможностью преобразования нескольких разнородных физических величин, изменяемой функциональностью и переключением поддиапазонов преобразования [1, 2]. Для формирования многофункциональных ИП с переключаемыми или управляемыми характеристиками целесообразно применение комбинации нескольких базовых структур, использующих разные принципы формирования измерительного сигнала. Например, для построения сенсорных структур ИП, чувствительных к магнитному полю и оптическому излучению предлагается использование структуры магнитотранзистора, работающего на основе гальваномагниторекомбинационного (ГМР) эффекта [3], в котором область базы выполнена на основе полупроводника с низкой концентрацией глубокой примеси [2], формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний.

БАЗОВЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Базовая структура сенсора на основе гальваномагниторекомбинационного эффекта [3] представлена на рисунке 1, *а*. Структура представляет собой плоский образец однородного полупроводника, вдоль которого протекает ток. Когда гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП) находится в скрещённых электрическом и магнитном полях (рисунок 1, *а*), то под действием силы Лоренца произойдёт смещение носителей зарядов к одной из боковых поверхностей структуры, имеющих разные скорости рекомбинации (грань *1* – высокую, *2* – низкую). На рисунке 1, *б* изображена модифицированная структура ГМРП, где в области вблизи грани 2 скорость рекомбинации может быть изменена под воздействием внешнего фактора, например, оптического излучения. Относительное изменение проводимости вдоль оси *x* вызвано изменением средней по сечению структуры концентрации носителей заряда пропорционально величине индукции магнитного поля, и обращается в нуль при равенстве скоростей поверхностной рекомбинации на противоположных гранях *1* и *2*. Если направление магнитного поля таково, что свободные носители заряда перемещаются к грани *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 носителей заряда к поверхности *2*, у которой малая скорость рекомбинации, и к общему увеличению концентрации зарядов, т.е. к уменьшению сопротивления ГМРП. Таким образом, эта структура оказывается чувствительна к величине и направлению магнитного поля, в отличие от магниторезисторов, у которых изменение сопротивления не зависит от полярности магнитной индукции [3]. В магнитном поле ГМРП характеризуется биполярными свойствами.

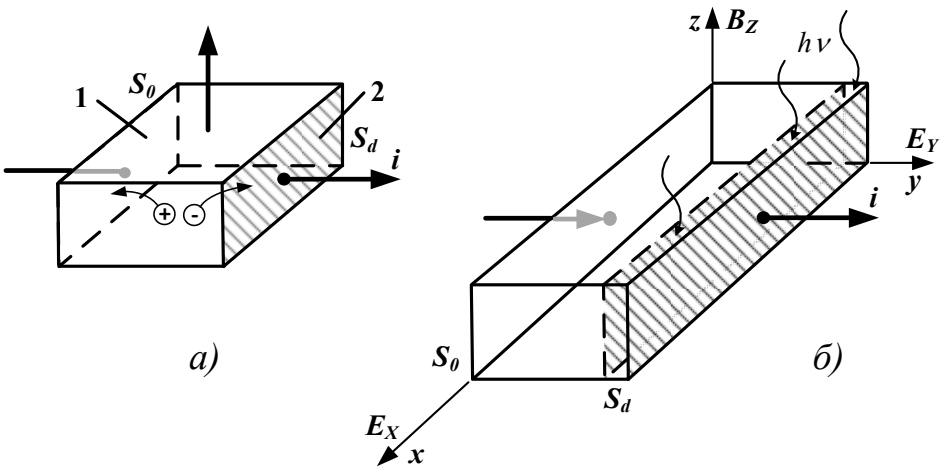


Рисунок 1. Гальваномагниторекомбинационный эффект (*а*) и область полупроводника с разными скоростями рекомбинации на боковых гранях (*б*) в скрещённых электрическом и магнитных полях

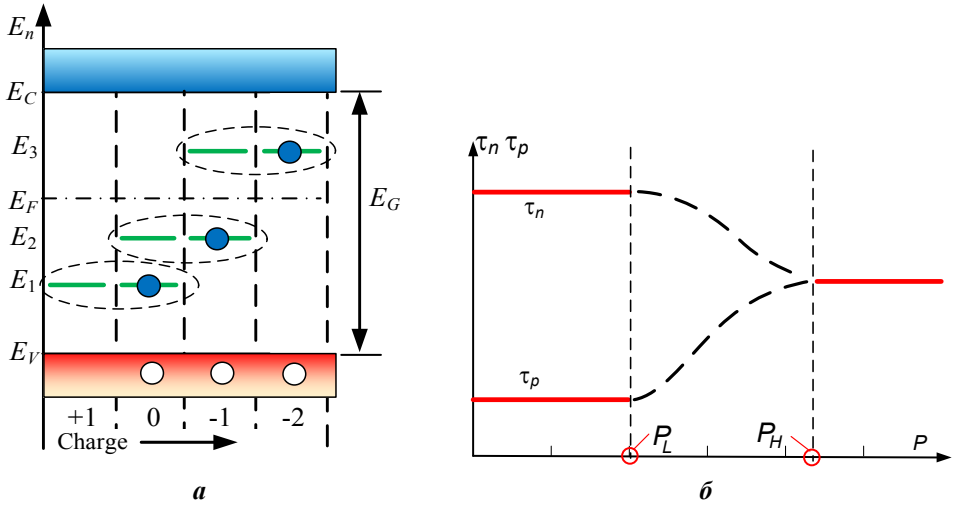
В [3] приведен пример структуры, в которой разные скорости рекомбинации на гранях 1, 2 реализуются на противоположных поверхностях полупроводниковой пластины с различными видами обработки и, следовательно, различающимися скоростями поверхностной рекомбинации. У такой структуры чувствительность к воздействию магнитного поля задается в процессе изготовления и в дальнейшем не изменяется.

В то же время у полупроводников с многозарядной примесью [4] при изменении зарядового состояния примеси (рисунок 2) время жизни и скорость рекомбинации в объеме может быть изменена на несколько десятичных порядков. Многозарядный примесный *M*-центр (МПЦ) может содержать от 0 до *M* электронов и соответственно, находиться в (*M* + 1) различных зарядовых состояниях (рисунок 2, *а*). 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 [4]. Уровни возбуждения, при которых происходит изменение зарядовых состояний МПЦ обозначены на рисунке 2*б* как P_L и P_H.

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. Это обстоятельство составляет основное отличие энергетического спектра многозарядных центров от системы уровней, формируемых несколькими простыми центрами разных типов [4]. То есть 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. В свою очередь это позволяет, управляя заселённостью уровней путём электрической инжекции или оптическим излучением, изменять значения постоянной времени рекомбинации и величину энергии ионизации примесного центра. В фотоприёмниках, принцип работы которых основан на рекомбинационных процессах, дополнительное освещение приводит к изменению характеристик чувствительности преобразователей [5]. Переключение между состояниями преобразовательной характеристики происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда.



а *б*

Рисунок 2. Энергетическая диаграмма примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями (*а*) и зависимости постоянной времени рекомбинации акцепторной примеси (*б*) от уровня оптического возбуждения

Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует достаточно широкий набор примесей, образующих многозарядные центры [6], энергетические уровни которых и сечения захвата позволяют формировать комбинированные оптико магниторекомбинационные преобразователи с широким диапазоном заранее заданных свойств.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый комбинированный оптико магниторекомбинационный преобразователь представляет собой структуры биполярного транзистора с длинной базой (рисунок 3, *а*) или полевого МДП транзисторов (рисунок 3, *б*), в которых базовая область или канал выполнены из полупроводника с примесью, формирующей в запрещённой зоне несколько энергетических уровней для разных зарядовых состояний. В традиционных структурах ГМР транзисторов [3] в активную область вводятся центры рекомбинации, обеспечивающие увеличение её скорости. В предлагаемой структуре активная область однородна, обе грани *1* и *2* имеют одинаковые свойства.

Для управления преобразовательной характеристикой магниточувствительности используется локальное освещение одной из боковых граней активной области [2, 5]. В зависимости от соотношения скоростей рекомбинации на гранях канала полевого транзистора и направления силы Лоренца происходит общее уменьшение или увеличение концентрации основных носителей в сечении канала, по сравнению с равновесной. Это, в свою очередь, приводит к изменению электрического сопротивления канала полевого транзистора. Так как конструктивно обе грани активной области выполнены в однородном полупроводнике, то управляющее оптическое излучение, вводимое только в область грани *1*, изменяет коэффициент магнитной чувствительности от нуля до величины, пропорциональной отношению времён жизни носителей заряда на освещённой и неосвещённых гранях *1* и *2* τ_d / τ_0.

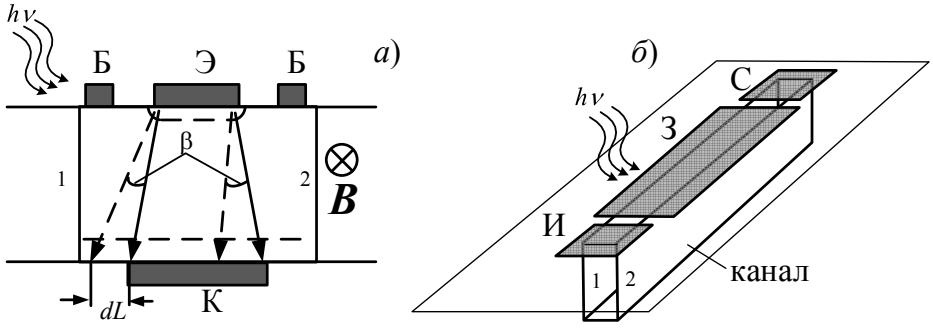


Рисунок 3. Базовые приборные структуры ГМР биполярного (*а*) и полевого (*б*) транзисторов

Таким образом ГМР транзисторы с активной областью на основе полупроводника с многозарядной примесью чувствительны к двум физическим параметрам: магнитному полю и оптическому излучению [3]. Необходимо также отметить, что в традиционных ГМР сенсорах с использованием различных скоростей поверхностной рекомбинации коэффициент магнитной чувствительности может снижаться вследствие большой ширины области пространственного заряда, что может послужить препятствием для рекомбинации [1, 3]. Причём этот эффект в большей степени проявляется на кремнии, чем на германии. Поэтому в ГМР с традиционной структурой максимальная чувствительность к изменениям магнитного поля реализуется для структур на основе германия [3].

Однако в предлагаемой структуре изменение скорости рекомбинации не связано с изменением потенциального барьера на границе раздела, так как поверхностная рекомбинация заменена на объемную [3, 5]. Пространственно ограниченное воздействие оптического излучения на область полупроводника вблизи одной из граней активной области сенсора позволяет изменить отношение времён жизни носителей заряда на освещённой и неосвещённых гранях τ_d / τ_0 от единицы до нескольких десятичных порядков. Это позволяет регулировать чувствительность к магнитному полю от нуля до величины пропорциональной корню квадратному от отношения τ_d / τ_0. Следовательно, во-первых, снимается ограничение на применяемые материалы, связанное с возможным большим значением потенциального барьера приповерхностной области полупроводника; во-вторых, как на германии или кремнии, так и на других полупроводниках, могут быть достигнуты значительно большие значения отноше-

ний скоростей рекомбинации [5] на противоположных гранях активной области ГМР сенсора. Это расширяет число типов, применяемых в ГМР структурах, материалов, что в свою очередь позволяет выбрать материал в соответствии требованиям к спектральной характеристике чувствительности оптико магнитного преобразователя.

Физическая основа работы комбинированого оптико магнитного преобразователя составляет интеграция процессов внутри объема чувствительной области, связанная с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси. Это позволяет реализовать чувствительный элемент функционального преобразователя в виде одноэлементного прибора. Такой преобразователь выполняется в одном объеме полупроводника с собственной фотопроводимостью, легированного глубокой примесью, образующей два и более энергетических уровня для разных зарядовых состояний. Изменение или расширение функциональности комбинированого оптико магнитного преобразователя возможно благодаря использованию механизма управления зарядовым состоянием многозарядных примесных центров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гальваномагниторекомбинационные преобразователи с активной областью на основе полупроводника с многозарядной примесью обладают одновременной чувствительностью к двум разнородным физическим параметрам. Это позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей магнитного поля или оптического излучения, когда другой физический параметр служит для управления преобразовательной характеристикой.

Применение эффектов, проявляющихся в объёме полупроводника, по сравнению с использованием разности поверхностной и объёмной скоростей рекомбинации, позволяет повысить повторяемость и стабильность характеристик ГРМП при одновременном увеличении чувствительности преобразователя.

Комбинированные оптико магниторекомбинационные преобразователи могут использоваться как функциональные умножители воздействий различной физической природы, компараторы оптического излучения и т.д.

Конкретный диапазон параметров преобразовательных характеристик комбинированных оптико магниторекомбинационных преобразователей, их спектральный диапазон чувствительности, определяются их конструкцией, типом материалов полупроводника и многозарядной примеси.

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, – Pp. 108-116.
3. 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.
4. 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.
5. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. I. Vorobey [et al.] // Przeglad Elektrotechniczny. – 2015, № 8 – pp. 81– 85.
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.