

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, д. ф.-м. н. В. П. МАХНИЙ, А. И. ЯНЧУК

Украина, Черновицкое отд-ние Института проблем материаловедения НАНУ,
Черновицкий нац. университет им. Ю. Федьковича
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию
13.12.2002 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ МОНОСЕЛЕНИДОВ ИНДИЯ И ГАЛЛИЯ

Рассмотрены механизмы формирования темновых и световых характеристик выпрямляющих структур различного типа на базе моноселенидов индия и галлия.

Основой подавляющего большинства современных твердотельных электронных приборов и устройств являются выпрямляющие структуры различного типа. Развитие этого направления требует постоянных исследований в области технологии и физики полупроводниковых материалов и диодов на их основе. Отдельный интерес с этой точки зрения представляют слоистые полупроводники, обладающие целым рядом важных для практики свойств, обусловленных анизотропией физико-химических параметров. К одному из них, в частности, относится явление фотоплекроизма, коэффициент которого для слоистых кристаллов может достигать 90% [1].

Этот эффект на моноселенидах индия и галлия изучался как на однородных материалах, так и на барьерных структурах, с целью их использования в качестве фотоэлектрических анализаторов плоскополяризованного излучения. Создание таких приборов невозможно без детального исследования физических процессов, определяющих их основные фотоэлектрические свойства. Анализ литературы показывает, однако, что этим вопросам посвящено относительно небольшое число публикаций, а результаты отдельных авторов не всегда согласуются друг с другом.

В настоящей работе сделана попытка установления связи основных механизмов формирования темновых и световых характеристик с параметрами диодных структур различного типа на базе моноселенидов индия и галлия.

Объекты и методики исследований

Монокристаллы моноселенидов индия и галлия получены методом Бриджмена. Варьирование типа и величины проводимости осуществлялось изменением состава собственных и примесных точечных дефектов. Для этого обычно используются различные виды отжига либо легирование материала донорами или акцепторами в процессе выращивания [2]. Гетеропереходы (ГП) $p\text{GaSe}-n\text{InSe}$ и $p-n$ -гомопереходы в моноселениде индия создавались оригинальным методом посадки на оптический контакт [3]. Поверхностно-барьерные диоды получены путем отжига на воздухе подложек $p\text{-InSe}$, в результате чего на их

поверхности образуется проводящий слой широкозонного оксидного полупроводника In_2O_3 [1].

Объекты исследований условно разделены на три типа — гетеропереходы (А), поверхностно-барьерные диоды (В) и $p-n$ -гомопереходы (С). Все они обладали ярко выраженными диодными характеристиками с коэффициентом выпрямления не меньше 10^3 при 300 К и напряжении $V=0,5$ В. При внешней засветке диоды генерировали фото-эдс, величина которой определялась типом структуры и условиями ее освещения. В нашем случае оно проводилось со стороны более широкозонного компонента ГП, прозрачного оксида или n -области $p-n$ -гомоперехода.

Изменение уровня возбуждения L осуществлялось с помощью набора калиброванных нейтральных светофильтров. Для спектральных исследований применялся призмный монохроматор ДМР-4, входная щель которого освещалась лампой накаливания с вольфрамовой нитью. Спектры фоточувствительности S_ω построены с учетом аппаратной функции установки, которая определялась при помощи эталонного Si-фотодиода. Измерение темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось на постоянном токе в отсутствие внешней засветки образца.

Обсуждение результатов исследований

Исследования показывают, что электрические и фотоэлектрические свойства определяются не только типом выпрямляющей структуры, но и параметрами контактирующих материалов. Влияние последних на основные фотоэлектрические характеристики диодов наиболее просто изучать на структурах, созданных методом оптического контакта. Он не требует использования высоких температур и, вследствие этого, не изменяет параметров используемых полупроводников.

В данной работе подобный анализ, без нарушения общности рассмотрения, проведен для гетеропереходов $p\text{GaSe}-n\text{InSe}$. Концентрация свободных электронов n_0 и дырок p_0 в компонентах ГП изменялась в достаточно широких пределах ($10^{14}-10^{15}$ см⁻³) при 300 К. Результаты измерений некоторых важных фотоэлектрических параметров приведены в таблице, где V_{oc} — напряжение холостого хода, I_{sc} — ток короткого замыкания, S_ω^h/S_ω^l — отношение амплитуд высоко- и низкоэнергетического максимумов фоточувствительности.

Как следует из таблицы, вариация отношения n_0/p_0 в пределах почти 1,5 порядков практически не влияет на величину V_{oc} . В то же время изменения I_{sc} гораздо

Параметры ГП *pGaSe—nInSe* при 300 К

Номер образца	n_0/p_0	V_{oc} , В	I_{sc} , мкА	$S_{\omega}^h/S_{\omega}^l$
1	0,3	0,55	3	2
2	1,5	0,65	50	1,25
3	6	0,5	1	0,4

существеннее, причем наибольшее значение этого параметра достигается при близких уровнях легирования компонентов ГП. Для таких образцов наблюдается также наиболее равномерный спектр fotocувствительности, ограниченный энергиями фотонов, близкими к ширине запрещенной зоны E_g контактирующих материалов (рис. 1). Рассмотренные особенности адекватно объясняются предложенной в [4] зонной моделью гетероперехода *pGaSe—nInSe* с учетом положения уровня Ферми и локализации области пространственного заряда (ОПЗ) в компонентах гетероструктуры.

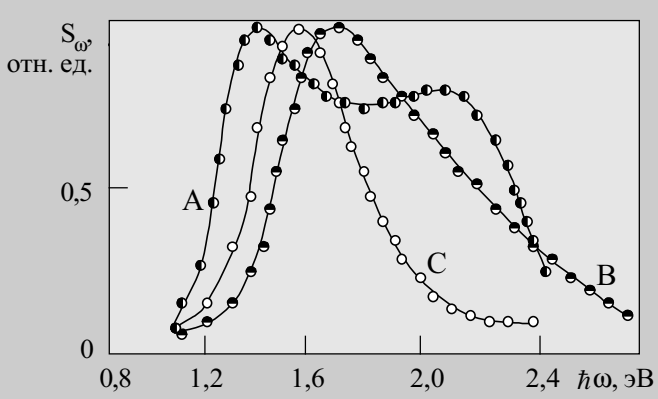
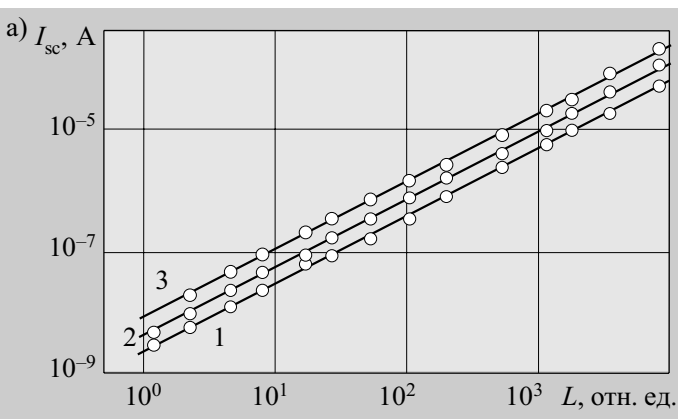


Рис. 1. Типичные спектры fotocувствительности трех типов диодных структур при 300 К

В отличие от ГП, спектры чувствительности двух других типов выпрямляющих структур характеризуются наличием только одного максимума. Для *p—n*-гомопереходов его положение и контур кривой S_{ω} определяется, главным образом, формой спектральной зависимости коэффициента сбора фотоносителей. При этом полуширина $\Delta h\omega$ спектра fotocувствительности увеличивается (уменьшается) при соответствующем уменьшении (увеличении) толщины *n*-слоя, через который проводится освещение.



Укажем на возможность управления величиной $\Delta h\omega$, учитывая простоту изменения толщины *n*-слоя вследствие слоистости моноселенида индия и использования метода посадки на оптический контакт. Вместе с тем сравнительно малая величина E_g селенида индия, несмотря на его непрямозонность, даже при небольших толщинах освещаемой *n*-области ограничивает чувствительность при $h\omega > E_g$. Этот недостаток можно частично устранить использованием в качестве выпрямляющего фронтального контакта более широкозонного проводящего материала, например, оксида индия ($E_g \approx 3,6$ эВ [5, с. 192]). Данное предположение, действительно, реализуется на опыте (рис. 1). Между тем высокоэнергетическая чувствительность таких структур несколько ниже теоретической, несмотря на низкую плотность поверхностных состояний слоистых полупроводников. Решение данной задачи, однако, выходит за рамки настоящей работы и требует отдельного рассмотрения.

При низких смещениях прямой темновой ток I_{gr} исследуемых образцов определяется рекомбинацией заряда в ОПЗ диода, о чем свидетельствуют зависимости вида [5, с. 51]

$$I_{gr} \approx I_{gr}^0 \exp(eV/2kT), \quad (1)$$

где I_{gr}^0 — ток отсечки при $V=0$, остальные обозначения — общепринятые.

Температурная зависимость I_{gr}^0 позволяет найти ширину запрещенной зоны того материала, в котором происходит максимальная рекомбинация, что фактически отвечает области локализации пространственного заряда. Отметим, что экспериментальные значения энергии активации прекрасно согласуются с известной величиной E_g моноселенидов индия и галлия. При прямых смещениях, близких к высоте потенциального барьера ϕ_0 , во всех структурах доминирует надбарьерный ток I_d . Вместе с тем истинная зависимость $I_d(V)$ маскируется достаточно высоким последовательным сопротивлением диода. Обработка прямых ВАХ в этой области смещений по методике, описанной в работе [6], позволяет не только найти эту зависимость, но и определить величину ϕ_0 объектов исследований.

Отметим, что высота барьера во всех случаях согласуется со значениями ϕ_0 , найденными из других

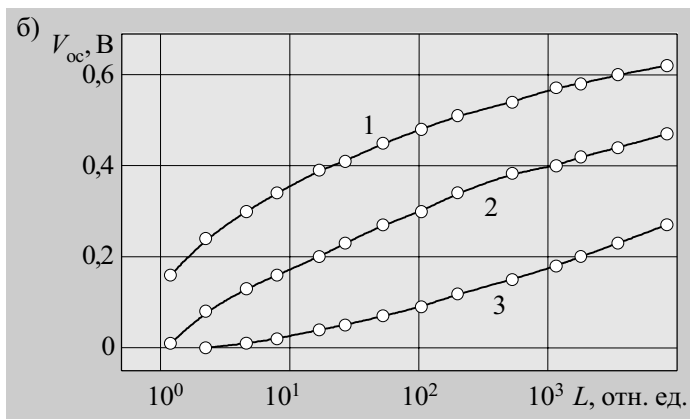


Рис. 2. Зависимости $I_{sc}(L)$ (а), $V_{oc}(L)$ (б) для гетероперехода *pGaSe—nInSe* при разных температурах: 1 — 297 К; 2 — 350 К; 3 — 403 К

независимых измерений. Обратный ток I_R всех диодов в области комнатных температур контролируется туннелированием носителей при низких напряжениях и лавинными процессами — при больших.

Фототок I_p образцов типа А и В определяется генерацией неравновесных носителей в ОПЗ, о чем свидетельствуют зависимости $I_p(V)$, которые подобны уравнению (1). Отметим, что энергетический наклон зависимостей $\ln I_p^0 - 1/T$, как и в случае темнового тока, отвечает E_g^p материала, в котором локализован объемный заряд. Это хорошо подтверждается экспериментально для указанных (А и В) типов диодных структур. Для $p-n$ -гомопереходов фотоносители возникают в n -области диода, а затем диффузионным путем достигают области пространственного заряда и разделяются сильным электрическим полем. В этом случае зависимость $I_p(V)$ описывается отличным от (1) уравнением [5, с. 46; 6]

$$I_p \cong I_p^0 \exp(eV/kT). \quad (2)$$

Найденная из температурной зависимости I_p^0 величина Φ_0 неплохо согласуется со значением высоты барьера, определенного из темновых ВАХ.

Для всех исследуемых диодов характерна линейная зависимость тока короткого замыкания от уровня освещения при изменении последнего в пределах пяти порядков. Зависимости $V_{oc}(L)$ описываются известным выражением, которое получено для фотодиода при доминирующей линейной генерации фотоносителей. Это иллюстрируется данными **рис. 2**, которые приведены для гетероперехода $pGaSe-nInSe$.

Отметим, что температурные изменения параметров интегральных характеристик также укладываются в рамки известных моделей формирования фототока в диодных структурах [5, с. 136—141].

Заключение

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о возможности создания на базе слоистых моноселенидов индия и галлия ряда фоточувствительных диодов $pGaSe-nInSe$, $pInSe-nInSe$. Такие структуры создаются методом посадки на оптический контакт при комнатной температуре, что не приводит к изменению электрофизических параметров базовых материалов. Кроме того, на моноселениде индия методом термического отжига созданы гетеропереходы " $pInSe$ — собственный оксид", которые обладают фоточувствительностью в высокоэнергетической области спектра вплоть до 3,6 эВ. Варьирование параметров базовых материалов и типа выпрямляющей структуры позволяет в достаточно широких пределах изменять фотоэлектрические параметры и характеристики объектов исследований.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Фотоплеохроизм диодных структур оксид- $p-InSe$ // Письма в ЖТФ.— 1997.— Т. 23, № 10.— С. 1—3.
2. Shigetomi S., Ohkubo H., Ikari T. Photoluminescence of Cd-doped $p-InSe$ // J. Phys. Chem. Solids.— 1990.— Vol. 51.— N 1.— P. 91—92.
3. А. с. 631014 СССР. Способы приготовления $p-n$ и гетеропереходов / В. Л. Бакуменко, В. Ф. Чишко.— Оpubл. в Б. И.— 1976, № 18.
4. Ковалюк З. Д., Махний В. П., Янчук О. І. Вплив параметрів компонент гетеропереходів $p-GaSe-n-InSe$ на їхні фотоелектричні властивості // Вісник Львівськ. ун-ту (Серія фізична).— 2001.— Вип. 34.— С. 218—221.
5. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент.— М.: Энергоатомиздат, 1978.
6. Махний В. П. Физические процессы в диодных структурах на основе широкозонных соединений A_2B_6 // Дис.... докт. физ.-мат. наук.— Черновцы.— 1993.

Д. ф.-м. н. Ю. Ф. ВАКСМАН, В. И. САНТОНИЙ, В. В. ЯНКО,
И. А. ИВАНЧЕНКО, Л. М. БУДИЯНСКАЯ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: oguint@paco.net

Дата поступления в редакцию
02.08 2002 г. — 14.01 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. И. ИЖНИИ
(НИИ материалов, г. Львов)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАЛЬНОМЕР МАЛЫХ ДИСТАНЦИЙ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Описан оптико-электронный дальномер, основанный на фазовом методе измерений и предназначенный для использования в скоростных измерительных системах.

Современные методы измерений с использованием оптического излучения обеспечивают измерение дистанций от долей метра до десятков километров [1]. В ближней зоне, определяемой условием соизмеримости геометрических размеров объектов с расстоянием между ними, что составляет от 0 до десятков метров, используются проекционно-геометрические,

интерференционные и фазовые методы [2]. Каждый из этих методов обеспечивает максимальную точность измерений в пределах ограниченного участка ближней зоны. Максимальной точностью обладают фазовые методы, основанные на измерении фазовых соотношений между излученным и отраженным оптическими сигналами и обеспечивающие измерение дистанций с погрешностью в несколько миллиметров [3]. Образцом достигнутого технического уровня является портативный прибор типа "лазерная рулетка", применяемый при выполнении строительных работ и предназначенный для проведения линейных измерений от 0 до 20 м с точностью порядка 1 мм [4].