

УДК 621.383.71/73

Фотодиодные структуры на основе марганец—ртуть—теллур

В. Н. Рыжков, М. И. Ибрагимова, Н. В. Алеева, С. П. Чашин,
И. М. Несмелова, В. А. Андреев
ФГУП «НПО «Государственный институт прикладной оптики»»,
г. Казань, Россия

Рассмотрены возможности формирования фотодиодных структур на основе твердых растворов $Mn_xHg_{1-x}Te$, исследованы их свойства и проведены измерения их основных параметров.

Полумагнитные твердые растворы $Mn_xHg_{1-x}Te$ (МРТ) были получены методами рекристаллизации из двухфазной смеси с подпиткой расплава и жидкофазной эпитаксии из раствора теллура. Монокристаллы и слои имели n - и p -типы проводимости и состав $x = 0,09-0,19$.

Для правильного выбора исходных параметров материала, необходимого для создания n - p -структур на основе монокристаллов МРТ, были проведены расчеты параметров фотодиодов с оптимальными характеристиками.

В случае узкозонных твердых растворов МРТ более предпочтительными являются фотодиоды со структурой n^+ - p -типа вследствие больших диффузионных длин неосновных носителей в p -материалах по сравнению с материалом n -типа и возможности иметь времена жизни, ограниченные межзонной рекомбинацией при температуре жидкого азота [1]. Токперенос в диодах регулируется несколькими механизмами, основные из них — диффузионный d , генерационно-рекомбинационный в области пространственного заряда gr и туннельный t . В n^+ - p -структурах сопротивление p - n -перехода ограничивается диффузией неосновных электронов из p -стороны в область истощения. Ясно, что наибольшие значения R_0A и D^* можно получить только в том случае, когда время жизни носителей определяется межзонами процессами. В материале p -типа это излучательная рекомбинация и ударная с превращением тяжелой дырки в легкую (процесс 7 по Битти). Численные расчеты были проведены для материала p -МРТ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,1$ эВ при $T = 77$ К. На рис. 1 приведены зависимости времен жизни излучательной τ_r , ударной τ_7 рекомбинаций и $\tau = (\tau_r^{-1} + \tau_7^{-1})^{-1}$ от концентрации основных дырок в исходном материале. При низких концентрациях дырок существенна излучательная рекомбинация, тогда как при высоких концентрациях основным становится ударный процесс с участием легких дырок ($\tau_7 \sim 1/p^2$). Для диодов с толстой областью p -типа получена зависимость диффузионной составляющей от концентрации акцепторов, которая в случае мелких уровней совпадает с концентрацией дырок, $(R_0A)_d = 0,177 \cdot 10^{-11} (N_a \sqrt{\tau})$ Ом·см² (рис. 2, кривая 1). Наилучшие значения $(R_0A)_d$, превышающие 4 Ом·см², получены при концентрациях акцепторов, больших $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Для составляющей R_0A , связанной с генерацией-рекомбинацией в области пространственного заряда, значения $(R_0A)_{gr}$ лежат в интервале (20—200) Ом·см² [2] и, следовательно, могут лишь несколько подправлять значения $(R_0A)_d$. Электроны могут туннелировать непосредственно через переход из валентной зоны в зону проводимости или в промежуточные состояния в переходной области. Зависимость

R_0A в случае прямого межзонного туннелирования от концентрации акцепторов в p -области приведена на рис. 2 (кривая 2). Следует отметить очень сильное изменение туннельного тока с концентрацией акцепторов: при возрастании N_a от 10^{16} до 10^{18} см^{-3} величина $(R_0A)_t$ уменьшается на семь порядков. Таким образом, концентрация акцепторов в исходном материале для n^+p -структур не должна быть заметно больше $2 \cdot 10^{16}$ см^{-3} . Наиболее подходящие значения N_a лежат в интервале $(2 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16})$ см^{-3} , которому соответствует теоретическое значение D^*_λ , превышающее 10^{11} $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{ВТ}^{-1}$.

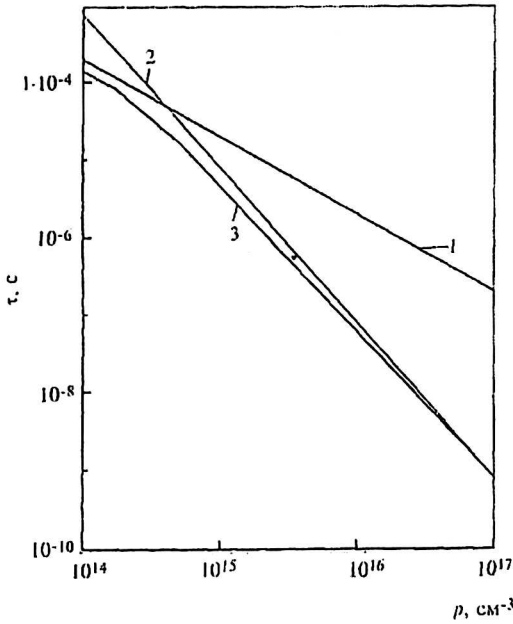
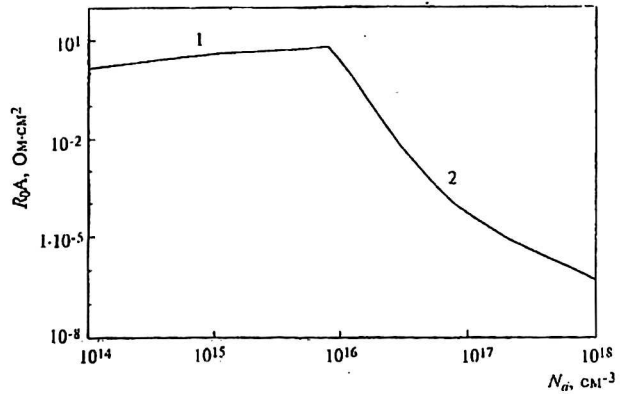


Рис. 1. Зависимость времени жизни τ_r от концентрации дырок в p - $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $E_g = 0,1$ эВ при $T = 77$ К:

1 — τ_r ; 2 — τ_7 ; 3 — $\tau = (\tau_r^{-1} + \tau_7^{-1})^{-1}$

Рис. 2. Зависимость величины R_0A от концентрации акцепторов в p -области n^+p -структуры на основе $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для механизмов токопереноса:

1 — диффузного; 2 — туннельного



Согласно расчетам, для исследований были отобраны образцы с концентрациями дырок в исходном материале $(2 \cdot 10^{15} - 10^{16})$ см^{-3} при температуре жидкого азота.

Метод барьера Шоттки. Наиболее простым методом изготовления фотодиодных структур является формирование барьеров Шоттки на контакте монокристалл — металл. Барьеры формировались на монокристаллах МРТ n - и p -типа, в качестве металла использовался индий. Для монокристаллов различного состава ($x = 0,09 - 0,19$) величина R_0 составляла $(10 - 750)$ Ом, а длинноволновая граница фотоотклика $\lambda_{1/2}$ смещалась от 2 до 11 мкм. Изменялось спектральное распределение фотопроводимости при 77 К. Такие барьеры

еры удобны для отбора материала с необходимой спектральной областью, для контроля однородности образцов вдоль поверхности по составу.

Диффузионный метод. Для формирования диффузионных p - n -переходов монокристаллические образцы p -типа помещались вместе со свободной ртутью в кварцевые вакуумированные ампулы. Изотермический отжиг проводился при температуре 300 °С в течение 1–2 ч, затем формировались фотодиодные структуры.

Ионная имплантация. Одним из основных методов создания n - p -переходов для микро- и нанoeлектроники является ионная имплантация (ИИ). Перед проведением ИИ и диффузии в парах ртути пластины МРТ толщиной (0,8–1,5) мм доводились до величины (50–100) мкм методом химико-динамической полировки и химического травления. Полирование образцов проводилось в (2–10)%-ном растворе йода в йодисто-водородной кислоте с алюмосиликатными наполнителями, химическое травление — в (1–5)%-ном растворе брома в этиловом спирте.

Для создания n^+ - p -переходов на основе p - $Mn_xHg_{1-x}Te$ в качестве легирующей примеси были использованы однозарядные ионы V^+ с энергией 40 кэВ. Эксперименты по ионной имплантации проводились в вакуумной камере ионно-лучевого ускорителя ИЛУ-3 с давлением остаточных газов в камере не хуже $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Температура образцов в процессе ИИ контролировалась термопарой. При использованных плотностях потока ионов не более $6 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$.с $^{-1}$ не происходило заметного нагрева образцов в течение всего времени облучения. Доза имплантируемых ионов варьировалась в интервале (10^{14} – $6 \cdot 10^{15}$) ион/см 2 . Образцы не подвергались постимплантационному термическому отжигу.

Фоточувствительные элементы формировались в виде меза-структур методом фотолитографии на поверхности пластины, подвергнутой ионной имплантации или диффузии в парах ртути. Для стабилизации параметров фотодиодов их поверхность окислялась в одномолярном растворе борного ангидрида (для n -типа) и лимонно-кислого натрия (для p -типа) при плотности тока (0,1–0,5) мА/см 2 , после чего на фоточувствительную поверхность вакуумным напылением наносился защитно-просветляющий слой сернистого цинка. Для формирования омического контакта к n - и p -областям в защитном слое вскрывались окна. Контакт к n -области создавался напылением индия, а к p -области — химическим осаждением во вскрытое окно золота с последующим напылением контактной дорожки. На рис. 3 представлена одна из фоточувствительных мезаструктур.

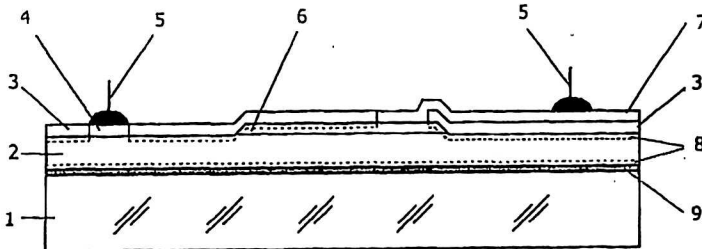


Рис. 3. Фотодиодная мезаструктура на основе $MnHgTe$:

1 — подложка (сапфир); 2 — p - $MnHgTe$; 3 — ZnS ; 4 — Au -контакт; 5 — вывод;
6 — n - $MnHgTe$; 7 — In -контакт; 8 — анодный окисел; 9 — эпоксидный компаунд

Для измерения основных параметров фотодиодных структур при температуре 77 К фотодиодные структуры помещались в специальный криостат. Ос-

новными параметрами, характеризующими фотодиодную структуру, являются произведение сопротивления при нулевом смещении на площадь чувствительного элемента R_0A , вольтовая чувствительность $S_{\lambda, \max}$ и обнаружительная способность $D^*_{\lambda, \max}$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследовались на приборе ПНХТ-1. Величину R_0 определяли по наклону ВАХ при подаче напряжения смещения порядка 10 мВ. Величина произведения R_0A изменялась в пределах 1,7—130 Ом·см² в зависимости от состава образца.

Для измерения спектрального распределения чувствительности S_{λ} использовался спектрометр ИКС-21 с диспергирующей призмой из NaCl при величине входной-выходной щели 1 мм. Сигнал при работе в фотовольтаическом режиме регистрировался селективным усилителем У2-8. Поток излучения модулировался с частотой 900 Гц, форма сигнала отклика контролировалась на экране осциллографа. Для оценки $S_{\lambda, \max}$ и $D^*_{\lambda, \max}$ в качестве излучателя использовалось абсолютно черное тело, нагретое до 500 К. Величина энергетического зазора, оцененная по наклону прямой ветви ВАХ, согласуется с оценкой $\lambda_{1/2}$ по S_{λ} . Диодные структуры имели следующие параметры: $S_{\lambda, \max} \sim 40$ В/Вт для спектральной области (8—14) мкм и $S_{\lambda, \max} \sim 3100$ В/Вт для области спектра (3—5) мкм. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены спектральные кривые чувствительности трех образцов с разными составами и дозами имплантации. Обнаружительная способность фотодиодов близка к значениям при работе в режиме фонового ограничения. Для всех значений исследованных доз имплантаций были получены фоточувствительные диодные структуры.

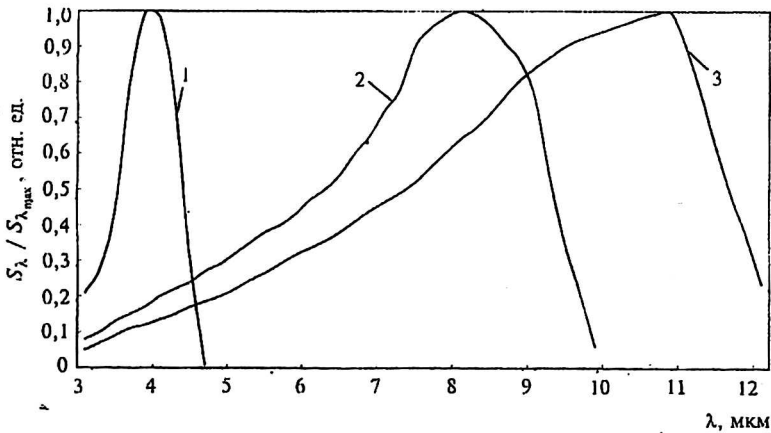


Рис. 4. Спектральное распределение чувствительности фотодиодных структур в твердых растворах $Mn_xHg_{1-x}Te$ (77 К):
1 — $x = 0,16$; 2 — $x = 0,11$; 3 — $x = 0,10$

Заключение

Показана возможность формирования фотодиодных структур на основе монокристаллов и эпитаксиальных слоев $p-Mn_xHg_{1-x}Te$ созданием барьеров Шоттки, диффузионным методом в парах ртути и имплантацией ионами V^+ без использования последующего постимплантационного термического отжига.

Изготовление фотодиодов методом ионной имплантации с применением фотолитографии открывает широкие возможности для получения многоэлементных и матричных фотоприемников.

Выражаем благодарность М. П. Мезенцевой и Т. В. Чугуновой за предоставленные монокристаллы и эпитаксиальные слои теллурида марганца — теллурида ртути и В. Ф. Валееву — за проведение экспериментов по ионной имплантации.

Л и т е р а т у р а

1. Беговатов В. Е., Барышев Н. С., Белый Н. Н., Брязкий М. Н., Горбатюк И. Н. Рекомбинационные процессы в $p\text{-Mn}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ с $x \cong 0,1$ //ФТП. 1989. Т. 23. № 11. С. 2074—2076.
2. Rogalski A. $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ as a new infrared detector material//Infrared Phys. 1991. V. 31. № 2. P. 117—166.

Photodiode structures on the manganese—mercury-tellurium basis

*V. N. Rizhkov, M. I. Ibragimova, N. V. Aleeva, S. P. Chaschin,
I. M. Nesmelova, V. A. Andreev*

The State Institute for Applied Optics, Kazan, Russia

The opportunities of forming the photodiode structures based on $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions is surveyed in this paper. Their properties are explored and measurements of their main parameters are made.