

и для ориентации (111), составляли $\sim 90 \text{ А/см}^2$. Неоднородность структур с ориентацией (100) особенно сильно проявлялась при изготовлении лазеров с резонатором Фабри-Перо. Минимальные значения $I_{\text{пор}}$ для таких лазеров составляли величины $\sim 250 \text{ А/см}^2$. На одном из лазеров со сплошным контактом шириной 210 мкм максимальное значение η на два зеркала достигало 42%, а при токе 2.5 А была зарегистрирована оптическая мощность излучения $\approx 0.5 \text{ Вт/грань}$.

Есть основания надеяться, что дальнейшее совершенствование технологии выращивания *InGaAsP/GaAs* квантоворазмерных гетероструктур позволит получить для образцов с ориентацией подложки (100) столь же высокие параметры, как и при ориентации (111).

В заключение авторы благодарят за помощь в изготовлении образцов С.Н. Жигулина, Т.Н. Дрокину, И.А. Мокину, Н.Д. Ильинскую, А.Н. Ермакову.

Л и т е р а т у р а

- [1] Алферов Ж.И., Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.Н., Гарбузов Д.З., Колышкин В.И., Налет Т.А., Стругов Н.А., Тикуннов А.В. - ФТП, 1988, т. 22.
- [2] Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Арсентьев И.Н., Бер Б.Я., Вавилова Л.С., Красовский В.В., Чудинов А.В. - ФТП, 1985, т. 19, в. 6, с. 1108-1114.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
19 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 8 26 апреля 1988 г.

СВОЙСТВА СИСТЕМЫ СЦИНТИЛЛЯТОР-ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ СЕЛЕНИД-ТЕЛЛУРИД ЦИНКА

О.П. В е р б и ц к и й, Л.А. К о с я ч е н к о,
В.П. М а х н и й, В.Д. Р ы ж и к о в

Комбинированные детекторы ионизирующего излучения „сцинтиллятор-фотодиод (С-ФД)“ обладают по сравнению с устройством „сцинтиллятор-фотоэлектронный умножитель“ меньшими габаритами, весом, потребляемой мощностью (как самого детектора, так и источников питания), высокой надежностью и стабильностью, линейностью характеристик в широком диапазоне интенсивности и энергии излучения [1]. Особый интерес представляет создание устройства С-ФД на одном и том же монокристалле. Главная из возникающих при этом проблем в том, что спектральные области радиolumines-

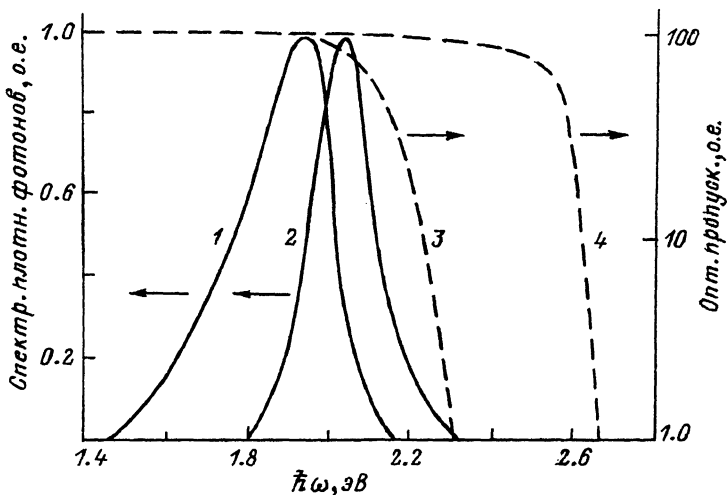


Рис. 1. Спектр радиolumинесценции (1), фоточувствительности (2), оптического пропускания (3) гетероструктуры $ZnSe_xTe_{1-x}$, а также спектр пропускания исходных монокристаллов $ZnSe$ (4). Температура комнатная.

ценции (РЛ) и максимальной фоточувствительности материала не совпадают. Эффективная РЛ, как правило, обусловлена рекомбинацией через глубокие центры с энергией квантов $\hbar\omega$, заметно меньшей ширины запрещенной зоны E_g . Максимальная фоточувствительность соответствует межзонным переходам, т. е. для $ZnSe$ $\hbar\omega > E_g = 2.67$ эВ, а радиolumинесценция с энергетическим выходом 15% приходится на спектральную область 1.5–2.2 эВ [2].

Спектральное согласование „пары“ С-ФД можно существенно улучшить, если в приповерхностном слое монокристалла $ZnSe$ изменить химический состав соединения так, чтобы ширина запрещенной зоны полупроводника уменьшилась и перекрывала спектральную область РЛ. Использовался один из наиболее простых и эффективных методов создания гетероструктур – твердофазная реакция замещения [3]. Гетеропереходы были получены путем отжига кристаллов $ZnSe$ в парах теллура по технологии, описанной в [4]. Исходные монокристаллы $ZnSe$, выращенные из расплава под давлением и содержащие около 1 мольн. проц. теллура, при 300 К обладали электронной проводимостью с удельным сопротивлением, близким к $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, и интенсивной фото- и радиolumинесценцией в оранжевой области спектра (рис. 1, кривая 1). В результате отжига в приповерхностном слое образовывалось соединение, знак термоэдс которого соответствовал дырочной проводимости. Толщина диффузионного слоя при используемых технологических режимах находилась в пределах 100–150 мкм.

Для исследования свойств гетероперехода кристаллы с диффузионным слоем разрезались на пластины, после чего сторона, содержащая n - $ZnSe$, подвергалась механической и химической обработке. Омические контакты создавались вакуумным напылением Ni к диффузионному слою и In к n - $ZnSe$. Полученные структуры обладали ярко выраженными диодными характеристиками с коэффициентом выпрямления не менее 10^7 при 300 К и $V=2$ В. Найденное из прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) значение напряжения отсечки составляет 1.4 В и согласуется с расчетной величиной диффузионного потенциала.

Спектральное распределение фототока короткого замыкания I_{K3} исследуемых гетеропереходов при освещении со стороны $ZnSe$ представлено на рис. 1 (кривая 2). (Аналогичный ход имеет и зависимость напряжения холостого хода V_{xx} от энергии фотонов $\hbar\omega$). Сравнение с приведенным на этом же рисунке спектром радиoluminesценции кристаллов $ZnSe$ (кривая 1) показывает, что коэффициент использования спектров K_u составляет величину около 30%. Однако монокристаллическая конструкция С-ФД резко увеличивает светосбор за счет устранения потерь на границах раздела. Кроме того, если фоточувствительный слой нанесен на все грани скитиллятора, то выходной ток увеличивается еще примерно на порядок (при одной и той же падающей мощности излучения). При этом возможно некоторое ухудшение быстродействия фотодиода, однако измерения показали, что даже при больших площадях фоточувствительного слоя (~ 0.5 см²) времена нарастания и спада фототока не превышают 10^{-6} с, что вполне приемлемо, т. к. время высвечивания РЛ исходных кристаллов составляет 10^{-5} с [1].

Ток короткого замыкания исследуемых структур практически линейно зависит от мощности падающего излучения P в широком интервале ее изменения (рис. 2). В этом же диапазоне изменения P напряжение холостого хода (при $I_{K3} \gg I_S$) описывается выражением $V_{xx} = \frac{nKT}{e} \ln(I_{K3}/I_S)$, где I_S - ток отсечки при $V=0$,

n - коэффициент неидеальности прямой ветви ВАХ. Учитывая, что для исследуемого образца (рис. 2) $n \approx 2$, $I_S \approx 10^{-11}$ А, $I_{K3} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ А при $P=100$ мВт/см², из приведенного выражения получим при 300 К величину $V_{xx} \approx 0.9$ В, что хорошо согласуется с опытным значением V_{xx} (рис. 2).

Исследование спектров оптического пропускания гетероструктур свидетельствует о наличии слоя переменного состава $ZnSe_xTe_{1-x}$. Следует учесть, что зависимость ширины запрещенной зоны от состава x [5] носит немонокотонный характер и в достаточно широком диапазоне изменения $x=0.1-0.5$ E_g находится в пределах 2.05-2.10 эВ. Тот факт, что фоточувствительность и поглощение начинаются с энергией фотонов $\hbar\omega \approx 1.85$ эВ (рис. 1), свидетельствует о наличии хвостов плотности состояний в запрещенной зоне твердого раствора $ZnSe_xTe_{1-x}$. Ограничение фоточувствительности и пропускания при больших энергиях величиной $\hbar\omega \approx 2.3$ эВ обусловлено поглощением фотонов в $ZnTe$. Полученные результаты позволяют

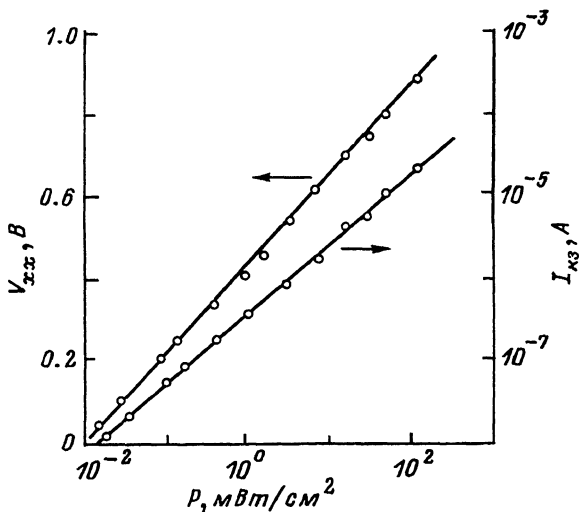


Рис. 2. Зависимость напряжения холостого хода V_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$ от мощности падающего излучения P лампы накаливания с цветовой температурой 2800 К.

заклучить, что гетеропереход образован $p\text{-ZnTe}$ и $n\text{-ZnSe}_x\text{Te}_{1-x}$ при $x=0.1-0.5$.

Для возбуждения сцинтилляций использовался источник рентгеновского излучения с энергией квантов около 20 кэВ, а также γ -источник ^{241}Am с энергией квантов ~ 60 кэВ. Характеристики системы С-СД аналогичны для обоих способов возбуждения. С практической точки зрения важным является линейная зависимость фототока от мощности дозы облучения в широком диапазоне ее изменения ($10^{-1}-10^4$ Р/час). Чувствительность структуры достигает величины 10^{-7} А·Р $^{-1}$ ·час и сравнима с ее значением для „дискретной“ пары $\text{ZnSe}:\text{Te} - \text{Si}$ - фотодиод [1], сохраняя при этом все достоинства и преимущества монолитной конструкции.

Л и т е р а т у р а

- [1] Рыжиков В.Д., Стадник П.Е., Яковлев Ю.А. - ПТЭ, 1984, № 5, с. 6-16.
- [2] Рыжиков В.Д., Чайковский Э.Ф. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, т. 46, № 6, с. 1150-1154.
- [3] Булах Б.М. и др. - ФТП, 1981, т. 15, в. 2, с. 357-360.
- [4] Баранюк В.Е. и др. - ФТП, 1987, т. 21, в. 5, с. 1264.
- [5] Барченко Н.Н., Кревс В.Е., Среди́н В.Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М.: Воениздат, 1982. 208 с.