

3. На опорную базовую плоскость Б, представляющую собой полированную поверхность, устанавливают юстируемую сборочную единицу 6.

4. На место объектива 10 визирного канала устанавливают компенсирующий объектив, исключая влияние линзы 13 на изображение перекрестия автоколлиматора 2.

5. Заклонами зеркала 9 с помощью юстировочных винтов оптическую ось автоколлиматора 2 выставляют параллельно видеокамере 4: добиваются совмещения изображения сетки а) автоколлиматора 2 с ранее установленным электронным перекрестием.

6. Из юстируемой сборочной единицы 6 извлекают ранее установленный компенсирующий объектив и на его место устанавливают объектив 10. Цифровой USB-микроскоп 3 наводят на четкое изображение прицельной марки дальномера (рисунок 5). Используя подвижки цифрового USB-микроскопа вверх-вниз и влево-вправо, наводятся на центр прицельной марки жидкокристаллического индикатора 12.

7. Смещением объектива 10 добиваются резкого изображения сетки а) автоколлиматора 2 в плоскости жидкокристаллического индикатора. Объектив 10 фиксируют в данном положении.

8. Смещением призмы 11 добиваются совмещения изображения сетки а) автоколлиматора 2 с центром прицельной марки жидкокристаллического индикатора 12.

В результате проведения юстировочных операций была достигнута перпендикулярность оптической оси визирного канала относительно базовой поверхности с точностью  $1'$ .

Таким образом, был разработан стенд для обеспечения возможности выполнения юстировки визирного канала сборочной единицы малогабаритного полупроводникового лазерного дальномера, а также разработана методика юстировки.



Рисунок 5 – Изображение жидкокристаллического индикатора

#### Литература

1. Ушаков О.К. Теория юстировки: учебное пособие для вузов / О.К. Ушаков – Новосибирск: СГТА, 2009. – 164 с.
2. Ельников Н.Т., Дитев А.Ф., Юрусов И.К. Сборка и юстировка оптико-механических приборов. М.: «Машиностроение», 1974. – 348 с.

УДК 681.3

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК-ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР Сычик В.А., Глухманчук В.В., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Для использования в структуре преобразователей оптической информации разработан специальный первичный преобразователь ИК-излучений на основе гетеропереходных функциональных элементов с варизонной  $i$ -областью [1, 2].

Типовая структура разработанного ФЭП изображена на рисунке 1а, а раскрывающая механизм его работы зонная диаграмма – на рисунке 1б. ФЭП состоит из р-п перехода на основе широкозонного полупроводника, включающего широкозонную обедненную  $n$ -область перехода и обедненную  $p$ -область перехода, которая контактирует с варизонным и сильнолегированным  $p^+$  слоем из широкозонного полупроводника.  $N$ -область преобразователя содержит широкозонную обедненную  $n$ -область перехода, варизонный  $n_1$ -слой, узкозонную  $n$ - $p^+$  область, состоящую из  $n_2$ -слоя и сильнолегированного  $p^+$ -слоя. Нижний сплошной омический контакт ФЭП

сформирован на  $p^+$ -слое, а верхний решетчатый омический контакт, в проемах решетки которого размещен просветляющий слой, расположен на сильнолегированном  $p^+$ -слое.

Для обоснования выбора материала компонентов, структуры и нахождения размеров областей синтезируемого ФЭП с заданным уровнем основных параметров (токовая, вольтовая фоточувствительность, обнаружительная способность) рассмотрим основные зависимости, описывающие эти параметры и физические процессы в структуре преобразователя. Поскольку интегральная токовая чувствительность, с учетом  $J_\phi \gg J_r$ ,

$$S = \frac{\Delta J}{\Delta J \vartheta} \approx \left( J - \frac{J_r}{J_\vartheta} \right) \approx J_\phi, \quad (1)$$

а интегральная вольтовая чувствительность

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta J \vartheta} \approx (U - U_r) / J \vartheta \approx U_\phi / J_\phi, \quad (2)$$

где  $U_{\Phi} = \left(\frac{kT}{e}\right) \ln \left[\left(\frac{J_{\Phi}}{J_s}\right) + 1\right]$ ,  $J_{\Phi}$ ,  $U_{\Phi}$  – фототок и напряжение;  $J_t$ ,  $U_t$  – темновой ток и напряжение преобразователя,  $J_v$  – интенсивность светового потока, то необходимым условием синтеза высококачественного ФЭП является достижение предельно возможной величины фототока.

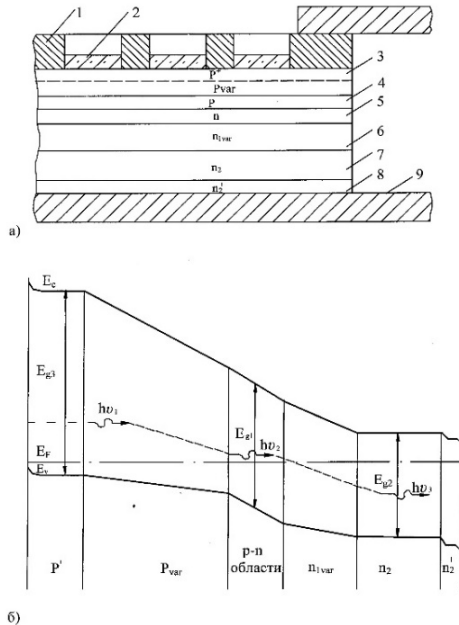


Рисунок 1 – Структура преобразователя оптических излучений на основе двойной гетероструктуры (а) и его зонная диаграмма (б):  
 1 – решетчатый омический контакт;  
 2 – просветляющий слой; 3 – P<sup>+</sup>-слой широкозонного полупроводника с варизонной областью;  
 4, 5 – p-n переход; 6 – варизонный n-слой;  
 7, 8 – узкозонный n-слой и его n<sup>+</sup> сильнолегированная область; 9 – нижний сплошной омический контакт

Созданный ФЭП является преобразователем с p-n переходом на основе арсенида галлия. n-область ФЭП представляет слой n<sup>+</sup> из InAs толщиной 2,8 мкм, легированный Te с концентрацией  $N_D \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; n<sub>2</sub>-слой выполнен также из InAs с концентрацией примеси Te  $N_D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  толщиной 0,3 мкм; варизонный слой n<sub>1var</sub> выполнен из соединения Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As, легирован Te с концентрацией  $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и толщиной 0,5–0,6 мкм. Ширина его запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 0,36 эВ. P-n переход из GaAs включает n-область, легированную Te с концентрацией  $N_D \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и легированную Cd p-область с концентрацией  $N_A \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Суммарная толщина p-n перехода 0,65 мкм, что составляет 0,9W<sub>о</sub>. P-область ФЭП содержит варизонный слой P<sub>var</sub>, выполненный на основе соединения Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As, причем параметр X изменяется от 0 до 0,3, а ширина запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 2,15 эВ. Варизонный p-слой легирован Cd с концентрацией  $N_A \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , обладает толщиной 0,6 мкм;

p<sup>+</sup> – сильнолегированный слой выполнен из арсенида алюминия, легированного Cd с концентрацией  $N_A \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , его толщина составляет 2,3 мкм. Нижний сплошной омический контакт реализован Te-Al-Ni общей толщиной 2 мкм, а верхний омический контакт 1,5 мкм сформирован структурой Cd-Al-Ni.

Занимаемая верхним контактом площадь на p<sup>+</sup>-слое составляет 12 %, рабочая площадь p<sup>+</sup>-слоя  $S = 0,3 \cdot 0,3 \text{ см}$ .

При воздействии квантов света, либо фотонов от других источников излучений на рабочую поверхность ФЭП со стороны решетчатого контакта, как следует из зонной диаграммы (рисунок 1, б), фотоны с энергиями  $E_i = hv < Eg_3 [p^+]$ , где  $Eg_3 [p^+]$  – ширина запрещенной зоны p<sup>+</sup>-слоя, проходят просветляющий слой, p – широкозонный сильнолегированный слой, и достигают P<sub>var</sub>-слоя и p-n перехода. Фотоны с  $hv = Eg_3 \geq E_i \geq Eg_1$  поглощаются в p-варизонном слое и в p-n обедненных областях перехода, а фотоны с  $hv = Eg_1 \geq E_i \geq Eg_2$  поглощаются в слое n<sub>1var</sub> и в n<sub>2</sub>-слое узкозонного полупроводника, создавая в поглощающих фотонах областях ФЭП избыточную концентрацию электронов и дырок в соответствии с зависимостями  $\Delta n = \beta \alpha J_v \tau_n$ ;  $\Delta p = \beta \alpha J_v \tau_p$ , причем результирующий активно поглощаемый фотонный поток

$$J_v = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} J(v) dv, \text{ здесь } \beta, \alpha - \text{квантовый выход}$$

носителей заряда и коэффициент поглощения света;  $\tau_n, \tau_p$  – время жизни фотовозбуждаемых носителей,  $Eg_2 < Eg_3$ ;  $v_{\min} = Eg_2/h$ ;  $v_{\max} = Eg_3/h$ ; h – постоянная Планка.

При заданной плотности фотонов  $J_v$  фототок  $J_{\Phi} = e (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$ .

В легированных примесями слоях p<sub>1var</sub>, n<sub>1var</sub>, n<sub>2</sub> созданы примесные уровни  $\Delta E_D, \Delta E_A$  глубиной 0,12 эВ и 0,08 эВ, которые возбуждаются фотонами дальней инфракрасной области.

Поскольку структурой ФЭП активно поглощается широкий спектр фотонов с энергиями от  $Eg_3, Eg_1$  до  $Eg_2, \Delta E_D$ , то результирующий ток ФЭП, а следовательно  $S_i$  и  $S_u$ , будут значительно выше, чем у известных аналогов. Для сформированного ФЭП указанных размеров экспериментально получены основные характеристики: вольтовая  $J_a = f(U_a)/J_0 = \text{const}$ , спектральная  $J_a = f(\lambda)/\Phi, U_a = \text{const}$  и энергетическая  $J_a = f(\Phi)/U_a = \text{const}$ .

Сформированный на основе гетеродиодной многослойной структуры типовой образец ФЭП обладает следующими электрофизическими параметрами: токовая чувствительность  $S_i \approx 1,5\text{--}5,0 \text{ А/Вт}$ ; диапазон спектральной чувствительности  $\Delta \lambda = 0,5\text{--}13 \text{ мкм}$ ; порог чувствительности  $\Phi_n = 5 \cdot 10^{-8} \text{ лм Гц}^{-1/2}$ ; темновое сопро-

тивление  $R_T \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$  Ом; постоянная времени  $\tau = 10^{-5}$  с; рабочее напряжение  $U_a = 5 - 20$  В.

Разработанный преобразователь ИК-излучений по сравнению с аналогами имеет более высокие  $S_I$ ,  $\Delta\lambda$ , защищен патентом [3] и используется как важнейший функциональный узел в устройстве контроля тепловых излучений.

**Заключение.** Разработанный на основе многослойной структуры преобразователь ИК-излучений обладает высокими электрофизическими свойствами, в частности токовая чувствительность  $S_I \approx 1,5 - 5,0$  А/Вт, диапазон спектральной чувствительности  $\Delta\lambda = 0,5 - 13$  мкм, темновое сопротивление  $R_T \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$  Ом.

УДК 681.785.554

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Воропай Е.С.<sup>1</sup>, Тарасов Д.С.<sup>1,2</sup>, Гулис И.М.<sup>1</sup>, Самцов М.П.<sup>2</sup>, Радько А.Е.<sup>2</sup>, Ермалицкая К.Ф.<sup>1</sup>,  
Зажогин А.П.<sup>1</sup>, Шевченко К.А.<sup>2</sup>, Кирсанов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь

Задачи проведения элементного анализа состава вещества возникают в большом количестве областей человеческой деятельности. С 1970-ых годов начались разработки лазерных методов исследования состава вещества. С этого времени активное развитие получил метод лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Он обеспечивает высокую чувствительность, оперативность и возможность проведения исследования образцов с пространственным разрешением, лимитируемым размером сфокусированного лазерного пучка на образце [1].

Силами кафедры лазерной физики и лаборатории спектроскопии НИИ Прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный спектрометр (ЛАЭМС), в котором использованы принципиальные и схемные решения, призванные приблизить его к современным потребностям в такой аппаратуре в повседневной практике. Основные конструктивные особенности оптической системы спектрометра представлены в работе [2].

Система возбуждения построена на основе двух лазеров на основе Nd:YAG лазеров с ЭО модуляцией добротности и оптической накачкой излучением полупроводниковых матриц лазерных диодов, объединенных с системой сведения лазерных пучков и системой охлаждения в едином корпусе, работающий в частотном режиме (разработка Института физики НАН Беларуси). Лазеры с полупроводниковой накачкой по сравнению с ламповой отличаются более высоким ресурсом и стабильностью выходных парамет-

Преобразователь ИК-излучений используется как важнейший функциональный узел в устройствах контроля тепловых излучений.

#### Литература

1. Гурта Ф., Микула Д. Инфракрасные датчики температуры / Каучук и резина, 2005. – № 4. – С. 29–33.
2. Васильев В.В., Овсянко В.Н., Шашкин В.В. Инфракрасные фотоприемные модули на варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs/ Оптический журнал, 2005, 72. – № 6. – С. 63–69.
3. Патент RU 2080690, МКИ<sup>6</sup>, H01 L 31/048. Фотovoltaический преобразователь / Сычик В.А.

ров. Лазер обеспечивает генерацию сдвоенных импульсов длительностью не более 15 нс с длиной волны 1064 нм.

Другим принципиальным схемным решением ЛАЭМС стало использование вместо рефрактивных объективов зеркальных (внеосевые параболюиды). Это обеспечило ахроматичность всей системы фокусировки лазерного излучения на объекте и системы светосбора и ввода в оптоволочный вход полихроматоров излучения плазмы. Важность устранения хроматической аберрации вызвана необходимостью соответствия относительных интенсивностей различных спектральных линий в излучении плазмы.

Для размещения исследуемого объекта разработан предметный столик, который обеспечивает перемещение образца в трех взаимноперпендикулярных направлениях. Перемещение вдоль луча осуществляется с использованием линейной низкопрофильной позиционируемой площадки (ручное перемещение), а в двух других направлениях – с помощью программноуправляемых шаговых двигателей.

Для регистрации спектров плазмы используются спектрометры с регистрацией на ПЗС-линейке на основе полихроматора SDH-1 (ЗАО «СОЛАР Лазерные Системы»): спектральный диапазон 190–800 нм, разрешение 0,1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала от 130 нм).

Выполнена разработка программного обеспечения (ПО), которое обеспечивает одновременное управление всеми узлами ЛАЭМС и основные