

УДК 621.384.3

## Инфракрасный детектор на основе структур с квантовыми проволоками

Э. К. Гусейнов

Институт фотоэлектроники НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

В. М. Салманов

Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

*Рассмотрен вариант SPRITE-детектора на основе структуры с квантовой проволокой, а также технологические принципы создания. Дана оценка некоторых фотоэлектрических параметров такого КРТ-фотоприемника.*

Ранее уже были описаны основные достоинства детекторов ИК-излучения [1], в которых детектирование, задержка и интегрирование сигнала в тепловизионных системах последовательного или последовательно-параллельного сканирования выполняются просто внутри протяженной полоски монокристалла  $Cd_xHg_{1-x}Te$   $n$ -типа проводимости (КРТ). Этот тип детектора известен как SPRITE-прибор с обработкой сигнала внутри элемента.

В SPRITE-детекторе перемещение изображения вдоль полупроводниковой полоски выбирается так, чтобы оно соответствовало скорости дрейфа неравновесных носителей заряда под действием приложенного напряжения. В течение времени жизни, большего, чем время пролета неосновных носителей через область считывания, происходит увеличение их числа. Зарядовый пакет детектируется в зоне считывания, где и фиксируется изменение удельной электропроводности. Как следствие, при использовании SPRITE-прибора задержка и интегрирование сигнала происходят в самом приборе, что ведет к упрощению электронной схемы считывания, упрощению конструкции и повышению надежности прибора. Кроме того, такой SPRITE-детектор оказывается пригодным для использования в последовательно или последовательно-параллельных сканирующих высокоэффективных тепловизионных системах.

В последние годы разработчиков привлекают внимание полупроводниковые малоразмерные структуры типа квантовых ям, проволок и точек. В литературе обсуждаются преимущества и эффективность КРТ-детекторов и квантовых структур GaAs/AlGaAs в плане их применения для средней и далекой ИК-областей спектра. Несмотря на ряд преимуществ QWIP'S на основе GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами — высокая однородность, хорошо контролируемая технология молекулярно-лучевой эпитаксии на пластинах GaAs, высокий выход годных элементов, большая термостойкость — основным преимуществом КРТ-фотодетекторов по сравнению с GaAs/AlGaAs QWIP является время жизни избыточных носителей заряда, которое для КРТ  $n$ -типа больше  $10^{-6}$  с при 80 К по сравнению с  $10^{-11}$  с для GaAs/AlGaAs сверхрешетки [2, 3].

В настоящей работе рассмотрен вариант SPRITE-прибора на основе структуры с квантовыми проволоками, поскольку получение высококачественных наноструктур с малой концентрацией дефектов, большим временем жизни и высокой подвижностью носителей заряда и контролируемым профилем легирования полупроводника могут быть обеспечены современной технологией.

### Технологические вопросы и обсуждение

В простейшем виде SPRITE-детектор представляет собой полосу фоточувствительного материала с тремя омическими контактами. Два из них — это токовые контакты, а третий — потенциальный, используется для считывания сигнала. Токовая нагрузки, определяемая величиной напряженности поля на образце, выбирается такой, чтобы дрейфовая скорость свободных носителей заряда была достаточно большой для достижения фотогенерированных носителей считывающего контакта. Иными словами, необходимо, чтобы время дрейфа носителей вдоль полосы было бы сравнимо или меньше времени жизни неравновесных носителей заряда. Когда изображение щели фокусируется на полосу и сканируется вдоль нее со скоростью, сравнимой с дрейфовой скоростью пакета избыточных носителей, то плотность фотоносителей зависит от координаты того места полосы, на котором находится изображение щели.

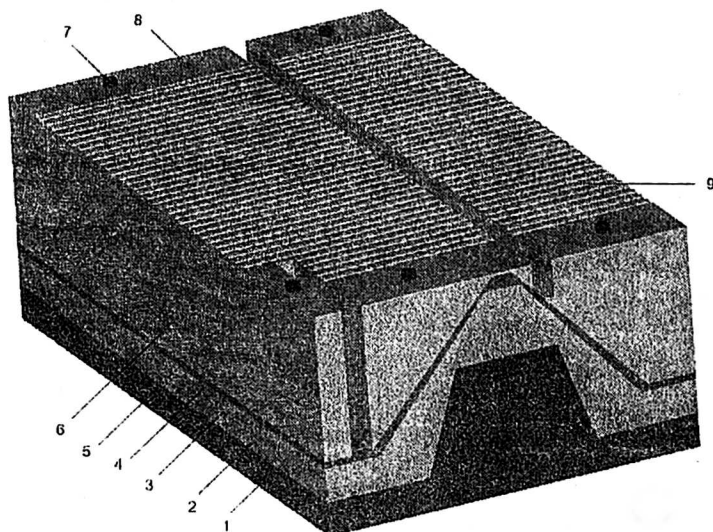
При правильно выбранной скорости сканирования сигнал, снимаемый с потенциального контакта, определяется облученностью изображения, интегрированного за время жизни фотоносителей  $\tau$ . Сигнал усиливается в  $\tau/\tau_c$  раз, поскольку  $\tau$  много больше, чем  $\tau_c$  ( $\tau_c$  — время, приходящееся на один элемент разложения в многоэлементной матрице из дискретных фотодетекторов). В условиях ограничения фона шумы детектора также увеличиваются, но лишь в  $\tau/\tau_c^{1/2}$  раза, поскольку шумы детектора некоррелированы. Таким образом, простая трехэлектродная структура с одним предусилителем обеспечивает детектирование, задержку и последовательное интегрирование сигнала.

Для обеспечения телевизионного стандарта в SPRITE-детекторе на основе КРТ используется матрица из восьми фоточувствительных полосок кристалла. Стандартным технологическим процессом обеспечивается зазор между полосками до 12 мкм.

Уменьшение зазора между полосками (для улучшения пространственного разрешения прибора в направлении, ортогональном к направлению сканирования) может быть достигнуто посредством эпитаксиального выращивания слоев матричной структуры с квантовыми проволоками. Ранее в работе [4] были исследованы структуры КРТ с квантовыми ямами (MQW), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ). Для этих структур толщины квантовых и барьерных слоев равнялись 47 и 100 Å с составами  $x = 0,27$  и  $0,85$ , соответственно. Базируясь на этих результатах, а также результатах М. Ортенберга [5, 6] по созданию квантовых проволок  $\text{HgSe}$  на основе структур  $(\text{GaAs})/\text{ZnTe}/\text{HgSe}$  или  $(\text{GaSb})/\text{ZnTe}_x\text{Se}_{1-x}/\text{HgSe}$ , нами была рассмотрена технологическая возможность создания подобной структуры на КРТ применительно к идеологии SPRITE-прибора.

Общий вид такого детектора представлен на рисунке. Детектор содержит гофрированную изолирующую подложку 1 с восемью равноотстоящими идентичными трапециевидными канавками на поверхности. Методом молекулярной эпитаксии на поверхности такой подложки выращиваются буферные слои  $\text{ZnTe}$  (поз. 2) и  $\text{CdTe}$  (поз. 3), затем барьерный слой КРТ состава  $x = 0,85$  (слои 4 и 6), а также слой КРТ состава  $x = 0,27$  (поз. 5). На поверхности барьерных слоев создается трехэлектродная система металлизации из  $\text{Au}$  (поз. 8), а на неметаллизированной части поверхности — дифракционная решетка 9. Для разделения элементов матрицы проводятся процессы фотолитографии и химического травления. Если устройство освещается со стороны подложки, то для исключения влияния фотогенерированных носителей в области континуума после создания индиевых "столбиков" 7 на эти области нано-

сится непрозрачная маска. Индиевые столбики, химически осаждаемые на контактные поверхности каждого элемента структуры, создаются для гибридизации изготовленного чипа с Si-мультиплексором. После стыковки структур прибор освещается со стороны подложки GaAs.



Фрагмент структуры с квантовой проволокой для SPRITE-детектора

Для создания такой структуры необходимо прежде всего изготовить гофрированную подложку с трапециевидными канавками. Такая подложка из GaAs (001) может быть изготовлена посредством фото- или электроннолучевой литографии с последующим химическим травлением, обеспечивающим трапециевидный профиль канавок с ориентацией сторон граней  $\{111\}$  GaAs и (001) GaAs поверхности вершины трапеции. Далее на гофрированную поверхность наращиваются буферные слои, в качестве которых используются два слоя: слой ZnTe толщиной 0,3 мкм и слой CdTe толщиной 2 мкм. Температура подложки  $T_s$  при выращивании этих слоев приблизительно равна 300 °С.

В соответствии с рекомендациями после осаждения этих буферных слоев, температура подложки понижается до 170–180 °С для выращивания структуры с квантовой проволокой.

Обычно скорость роста слоев на вершине трапеции с (001) — ориентацией выше, чем на ее гранях, так что в пределе горизонтальная составляющая соотношения толщины и ширины слоя уменьшается до нуля. При известных скоростях слоя на вершине  $r_t$  и гранях  $r_s$  трапеции отношение толщина/ширина на вершине трапеции  $h$  за время  $t$  после начала осаждения слоя определяется из формулы

$$h = h_0 = \frac{2(t - t_0)(\cos \alpha - 1)}{\sin \alpha},$$

где  $h_0$  — соотношение толщина/ширина вершины трапеции к моменту начала роста барьерного слоя;

$\alpha$  — угол между ориентацией подложки и граней трапеции.

Толщина барьерного слоя КРТ состава  $x = 0,85$  на вершине трапеции лимитирована отношением

$$d_m = \frac{\left(\frac{r_t}{r_s}\right) h_0 \sin \alpha}{2\left(\frac{r_t}{r_s}\right) (\cos \alpha - 1)}$$

Когда ширина барьерного слоя КРТ на вершине трапеции достигает желаемой для квантовой проволоки величины, стартует осаждение слоя КРТ состава  $x = 0,27$  (осуществляемой соответствующим изменением интенсивностей источников Hg и Cd установки МВЕ). Процесс роста этого слоя заканчивается, когда слой на вершине трапеции примет форму пирамидальной квантовой проволоки. Затем вновь осаждается слой КРТ состава  $x = 0,85$ , заполняющий небольшой зазор между полосками вплоть до уровня квантовой проволоки. Далее поверхности КРТ обоих составов выравниваются (прецизионным ионным травлением) и на структуре осуществляются стандартные технологические процедуры, необходимые для изготовления прибора.

Работа такого прибора сводится к следующему. В течение времени экспозиции кванты падающего излучения возбуждают электронные состояния квантовой проволоки. Носители из нее перетекают в широкозонную часть структуры, где они достигают считывающего контакта под действием соответствующего электрического поля.

Таким образом, в предложенном SPRITE-приборе поглощение излучения происходит в квантовой области структуры, а накопление и задержка сигнала — непосредственно в барьерной ее части.

Оценку фотоэлектрических параметров такого прибора можно проводить по следующим выражениям.

*Обнаружительная способность  $D^*$  прибора определяется как*

$$D^* = \sqrt{A_d \Delta f \left(\frac{R}{I_{noise}}\right)},$$

где  $A_d$  — фотоприемная площадь;

$\Delta f$  — ширина полосы пропускания усилительного тракта.

*Чувствительность прибора выражается как*

$$R = \frac{q \lambda p \eta G}{h\nu},$$

где  $p$ ,  $\eta$  и  $G$  — вероятность туннелирования, квантовая эффективность и коэффициент усиления фотопроводимости, соответственно,

*Квантовая эффективность и коэффициент усиления определяются из выражений*

$$\eta = A[1 - \exp(-B\alpha l_{qw})], \quad G = L \frac{1}{t_c},$$

где  $A$  — постоянная, зависящая от поляризации;

$\alpha$  — коэффициент поглощения;

$l_{qw}$  — ширина квантовой проволоки;

$L$  — длина свободного пробега;

$t_c$  — общая ширина квантовой проволоки и барьерного слоя;

$B$  — постоянная, зависящая от плотности излучения, прошедшего через структуру.

*Длина свободного пробега носителей определяется как*

$$L = \tau T_{qw} \mu_{ef} E,$$

где  $\tau$  — время жизни носителей, освобожденных от квантовой ямы;  
 $T_{qw}$  — коэффициент трансмиссии через квантовую проволоку;  
 $\mu_{ef}$  — эффективная подвижность носителей заряда;  
 $E$  — электрическое поле.

Шумы темнового тока вычисляются как

$$I_{noise} = (4A_d q G \Delta f J_{dark})^{1/2},$$

где  $J_{dark} \sim T^2 m^* \exp(-\Delta E/kT)$ ;

$m^*$  — эффективная масса;

$\Delta E$  — разность энергий между высотой барьера и состояния квантовой проволоки.

Для рассмотренного типа прибора при 77 К оценки дают значение для обнаружительной способности  $D^*(500 \text{ К}, 1200, 1) = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и токовой чувствительности 0,25 А/Вт на длине волны 5 мкм.

### Заключение

Рассмотрена возможность создания многоэлементной фоточувствительной матрицы на основе GaAs/CdTe/HgCdTe структуры с квантовой проволокой, работающей по принципу SPRITE-прибора. Показано, что для предлагаемой структуры, обладающей свойствами SPRITE-детектора, могут быть достигнуты высокая однородность и пространственное разрешение.

### Литература

1. Elliott C. T., Day D., Wilson D. J. An integrated detector for serial scan thermal imaging//Infrared Physics. 1982. V. 22. P. 31—42.
2. Gunapala Sarath D., Lin John K., Para Jin S., etc. 9- $\mu\text{m}$  cutoff 256x256 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum well infrared photodetector hand-held camera//IEEE Transactions on electron devices, 1997. V. 44. P. 51—57.
3. Rogalski Antoni. GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors versus HgCdTe photodiodes for longwavelength infrared applications//Proceeding of SPIE, 1994. V. 2225. P. 118—129.
4. Feldman R. D., Cesar C. L., Islam M. V., etc. Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te based quantum wells for the 3  $\mu\text{m}$  wavelength region//J. Vac. Sci. Technology, A, 1989. V. 7. № 2. P. 431—434.
5. T. Than Anh, Wissmann H., Rogaschewski S., Von Ortenberg M. Selforganized growth of HgSe quantum wires//Journal of Growth Crystal, 2000. № 214/215. P. 40—44.
6. Wissmann H., Than Anh T., Rogaschewski S., Von Ortenberg M. Selforganized MBE growth of II-VI epilayers on patterned GaSb substrates//Journal of Growth Crystal, 1999. № 201/202. P. 619—622.

## Infrared photoreceiver on the basis of the structure with quantum wires

*E. K. Huseynov*

Institute of Photoelectronics of the Azerbaijan National Academy of Sciences,  
 Baku, Azerbaijan

*V. M. Salmanov*

Baku State University, Baku, Azerbaijan

*The original technology of IR-photodetectors operating on the effect of the signal processing in the element (SPRITE) is considered. In contrast to known of such type*

*devices, in which the narrow near-arranged semiconductor stripes ( $Cd_xHg_{1-x}Te$ ) are used as a sensitive element, the structure with quantum wires are applied for considered variant of the device. The offered structure are created on pre-patterned GaAs substrate with the ZnSe and CdTe buffer layers. Above buffers the barrier layer of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  with  $x = 0.85$  and the layer of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  with  $x = 0.27$  grow by the molecular-beam epitaxy, consecutively, at the condition of preservation of the dimension and number of elements the matrix, recommended by the theory for ensuring of the ensuring of the television standard. Also general analysis of infrared, SPRITE-photodetector performance on the basic of structure with quantum wires is carried out.*