

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315.522; 621.383; 537.226.86

Неохлаждаемый фотовольтаический преобразователь ИК-диапазона на основе $Cd_xHg_{1-x}Te/Si$ ($x = 0,3$)

Р. К. Савкина, Ф. Ф. Сизов, А. Б. Смирнов, В. А. Дериглазов, М. В. Якушев

Предложен неохлаждаемый приемник ИК-излучения на базе напряженной гетероструктуры $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/(310)Si$. Фото-ЭДС прототипа показывает зависимость от интенсивности падающего излучения I и его спектрального состава $I(\lambda)$ на уровне $D^ \sim 3 \cdot 10^8$ ($Вт \cdot см \cdot Гц^{1/2}$) при 300 К. Обсуждается роль пьезосвойств пленки узкозонного полупроводника гетероструктуры $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te/Si$. Проведено физическое моделирование диффузионно-дрейфовой модели для пленки $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te$ при 300 К.*

PACS: 81.05.Dz, 72.40.+w, 77.65.Ly

Ключевые слова: ИК-детектор, деформации, пьезосвойства, $CdHgTe$.

Введение

Ранее приемники инфракрасного (ИК) излучения применялись главным образом в областях специального назначения, где во главу угла ставилась оптимизация их чувствительности, пространственного и временного разрешения. При этом ценовая доступность игнорировалась. Сегодня коммерческие и государственные отрасли (медицина, службы принуждения и спасения, транспорт и т. п.) проявляют все больший интерес к "доступным" ИК-приемникам. Гражданский рынок формирует требования к цене, размерам, удобству в использовании, и, соответственно, "загружаются" такие параметры, как чувствительность, эквивалентная шуму разность температур — NEDT, инерционность приемников и т. п.

По принципу действия фотоприемные устройства (ФПУ) ИК-диапазона разделяют на две группы — фотонные и тепловые. Ценовая политика фотонных детекторов, как правило, жестко привязана к системам охлаждения и термостатирования. Тепловые приемники ИК-излучения менее чувствительны, более инерционны по сравнению с фотонными приемниками, но работают при комнатной или близкой к комнатной температуре и относительно дешевы, что определяет их конкурентную способность и масштабность применения в различных областях. В общем плане, можно выделить следующие задачи, стоящие перед разработчиками "доступных" ФПУ ИК-диапазона:

- оптимизация фотонных приемников для работы при комнатных температурах [1];
- создание матриц тепловых ИК-приемников и достижение предельных характеристик [2];
- создание приемников на новых принципах и подходах [3].

Данная работа ориентирована на первое и последнее из приведенных выше положений. Конкретно, целью работы было создание фотовольтаического ФПУ ИК-излучения, которое бы работало без охлаждения, но с приемлемой чувствительностью.

Обзор

Как отмечено в обзоре [4], несмотря на серьезную конкуренцию высоких технологий в ближайшее время они вряд ли смогут бросить вызов классическим ФПУ на основе твердого раствора

Савкина Рада Константиновна, старший научный сотрудник.
Сизов Федор Федорович, зав. отделом.

Смирнов Алексей Борисович, старший научный сотрудник.
Дериглазов Владимир Александрович, младший научный сотрудник.

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины.

Украина, 03028, Киев, пр. Науки, 41.

Тел. (044) 525-18-13. E-mail: alex_tenet@isp.kiev.ua

Якушев Максим Витальевич, старший научный сотрудник.

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2010 г.

© Савкина Р. К., Сизов Ф. Ф., Смирнов А. Б., Дериглазов В. А., Якушев М. В., 2011

CdHgTe (КРТ), который остается оптимальным материалом для создания фотонных детекторов ИК-излучения. Как правило, детекторы на основе КРТ — это матрицы фотодиодов, эффективно работающие при криогенных температурах [5—7]. Дополнительно необходимо компенсировать тепловыделение, обусловленные током смещения от каждого фоточувствительного элемента. Все это существенно увеличивает размеры, энергоемкость и стоимость таких ИК-систем. Однако сегодня существует несколько типов фотонных детекторов ИК-излучения, которые работают и без охлаждения [8].

Во-первых, это фоторезисторы на основе КРТ, которые демонстрируют высокую обнаружительную способность D^* (до $2 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при 300 К и до $3 \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при охлаждении до 220 К) и малую инерционность ($\leq 1 \text{ нс}$), но работают только со смещением, величина которого, а следовательно, и величина полезного сигнала ограничена тепловой мощностью, которая рассеивается во время работы ФПУ.

Умеренно охлаждаемые (170, 200 и 245 К) фотодиоды на основе КРТ вследствие низкой квантовой эффективности и дифференциального сопротивления до недавнего времени не находили широкого практического применения. Необходимость охлаждения для них считалась фундаментальной и неизбежной. Однако развитие ростовых технологий с прецизионным контролем состава и уровня легирования в последнее время позволило получить сложные многослойные фотодиодные структуры на основе КРТ, в которых реализован принцип подавления процесса Оже-рекомбинации [9] и которые пригодны для детектирования ИК-излучения, как правило, в области MWIR (3—5 мкм) при температурах выше 200 К [10].

Кроме фоторезисторов и фотодиодов известны также фотовольтаические детекторы на основе эффекта Дембера и фотоэлектромагнитного (ФЭМ) эффекта [11]. Принцип действия таких фотовольтаических детекторов основан на появлении в полупроводнике ЭДС вследствие пространственного разделения электронов и дырок. Детекторы данного класса характеризуются быстродействием и не нуждаются в прикладывании электрического смещения, однако имеют меньшую обнаружительную способность по сравнению с фоторезисторами на КРТ (до $\sim 10^7 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при 300 К). Существенным недостатком, например, детектора на ФЭМ-эффекте является необходимость применения сильного магнитного поля (до 2 Тл), которое делает его громоздким, усложняет использование термоэлектрического охлаждения для повышения обнаружительной способности и интеграцию в электронные схемы.

Предложен приемник ИК-излучения на основе напряженной гетероструктуры $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}/(310)\text{Si}$ (рис. 1), аналогом которого можно считать фотовольтаическое ФПУ ИК-излучения на основе ФЭМ-эффекта [12]. Предложенное устройство работает в режиме без электрического смещения и охлаждения. Предварительная оценка вольтовой чувствительности S_V и обнаружительной способности D^* предложенного ФПУ показала величины 3 В/Вт и $\sim 10^9 \text{ (Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2})$, соответственно, т. е. на уровне современных оптимизированных аналогов. Следует отметить, что использование кремниевой подложки облегчает интеграцию предложенного ФПУ в электронные цепи и снижает, в целом, стоимость конечного продукта.

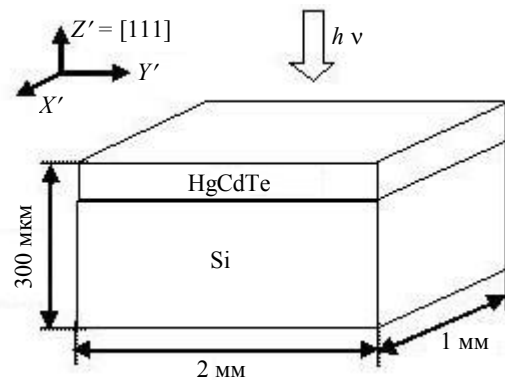


Рис. 1. Пленка КРТ (111) на Si-подложке

Напряженная гетероструктура как ИК-приемник

Принцип действия предложенного устройства базируется на том, что при поглощении в пленке ИК-излучения с длиной волны, которой соответствует энергия фотона больше ширины запрещенной зоны E_g , релаксация фотовозбуждения приводит к тепловому расширению и дилатации кристаллической решетки, вызываемой избытком электронов в зоне проводимости [13].

При этом на границе гетероструктуры между пленкой и подложкой возникают механические напряжения σ , обусловленные деформацией гетерограницы вследствие различия линейных коэффициентов теплового расширения материалов подложки и пленки (ϵ_{th}) и генерации в пленке свободных носителей (ϵ_{el}):

$$\sigma = k (\epsilon_{th} + \epsilon_{el}) = k((\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T + 1/3 \sum \Delta n \partial \epsilon_g / \partial p), \quad (1)$$

где $k = E/3(1-2\nu)$;

E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона;

$\alpha_{1,2}$ — линейный коэффициент теплового расширения материалов подложки и пленки;

$\Delta n = (\beta \tau I) / V$ — концентрация фотовозбужденных носителей заряда;

β — квантовая эффективность материала;

τ — время жизни носителей заряда;

V — объем, в котором поглощается излучение с интенсивностью I ;

ΔT — нагрев.

Причем здесь решетка КРТ расширяется ($\partial \varepsilon_g / \partial p > 0$), а решетка Si сжимается ($\partial \varepsilon_g / \partial p < 0$).

Предварительная оценка по выражению (1) дает значение $\sigma \sim 16,8$ кПа при условии, что излучение поглощается площадкой (1×1) мм, толщина пленки КРТ составляет $h = 5$ мкм, а величина $\Delta T = 0,1$ °C. Сила F , с которой напряженная пленка действует на подложку, равняется $F = \sigma h$ [14]. Поскольку твердый раствор КРТ обладает пьезоэлектрическими свойствами [15], то следствием механической деформации будет генерация электрического сигнала $U = q/C = (F d_{ik}) / (\varepsilon \varepsilon_0 S/a)$, где S — площадь контакта, a — расстояние между контактами, ε_0 — электрическая постоянная (в системе СИ), ε — диэлектрическая проницаемость материала пленки, d_{ik} — пьезомодуль материала пленки. Если принять площадь контакта 1 мм^2 , а расстояние между контактами 1 мм , то напряженность поля и разность потенциалов между контактами составит $\sim 2 \text{ В/м}$ и 2 мВ , соответственно.

Для прототипа ФПУ было получено спектральное распределение фоточувствительности $S_V(\lambda)$ на ИК-спектрометре SPM-2 с призмой NaCl при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$) в фотовольтаическом режиме и в диапазоне длин волн $1\text{—}15 \text{ мкм}$ (рис. 2). Сигнал детектировался нановольтметром УНИПАН-232 В. Индиевые контакты располагались на верхней и нижней поверхности образца и специально закрывались. Омическое темновое сопротивление конструкции элемента ФПУ было в пределах $R_{\text{вн}} = 1,24\text{—}1,3 \text{ кОм}$, а емкость $C_0 = 0,5 \text{ нФ}$ — $0,3 \text{ мкФ}$. В качестве образцового (по отношению к объекту исследования) был задействован пьезоэлектрический датчик марки ПМ-4. Спектральное распределение чувствительности образца определялось для двух опорных частот модуляции светового потока $f_{\text{мод}1} = 50 \text{ Гц}$ и $f_{\text{мод}2} = 338 \text{ Гц}$ по методике синхронного детектирования сигнала.

Интегральная вольтовая чувствительность оценивалась из соотношения $S_{V,\lambda,\text{max}} S_V(\lambda) / P_{\text{эл}}$ путем интегрирования экспериментальной зависимости $S_V(\lambda)$, где $S_{V,\lambda,\text{max}}$ — максимум чувствительности ($\lambda_{\text{max}} = 2,7 \text{ мкм}$, рис. 2). Примем, что доля ИК-излучения падающего на элемент прототипа составила $P_{\text{эл}} = 0,2\text{—}0,7 \text{ Вт/элемент}$. Электрическая мощность $P_{\text{эл}} = 37,5 \text{ Вт}$ и энергетическая мощность излучения $P_{\text{эл}} = 31,45 \text{ Вт}$ для глобара (карбид кремния, $U = 2,5 \text{ А}$, $I = 15 \text{ В}$) оценивались из

соотношения $P = UI = S_{\text{эл}} \varepsilon \beta \sigma T^4 \text{ Вт}$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$, ε — излучательная способность материала глобара, β — оптические потери, $S_{\text{эл}} = 10^{-6} \text{ м}^2$. Таким образом, вольтовая чувствительность ФПУ составляет $S_{V338} = 1200 \text{ В}\cdot\text{Вт}^{-1}$ и $S_{V50} = 2400 \text{ В}\cdot\text{Вт}^{-1}$ на частотах $f_{\text{мод}1}$ и $f_{\text{мод}2}$, соответственно. Величина шумовой составляющей $(U_{\text{ш}}^2)^{0,5}$ выбиралась как для фотонного ИК-приемника [5] на уровне $1,236 \cdot 10^{-8} \text{ В}$. Отсюда для полосы $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ получаем величины $D^* = 3 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ и $\text{NEP} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$.

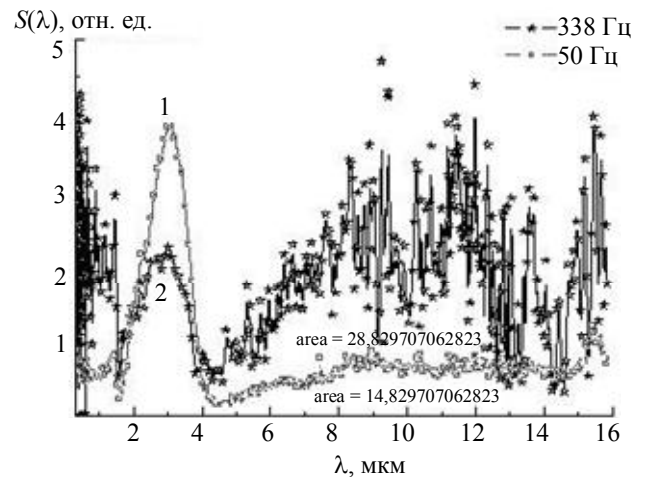


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность ФПУ на базе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}(111)/\text{Si}$ ($x = 0,3$) с толщиной пленки КРТ, равной $h = 5 \text{ мкм}$:
1 — частота модуляции 50 Гц; 2 — частота модуляции 338 Гц

При дальнейшем изучении характеристик ФПУ на базе напряженной гетероструктуры $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}/(310)\text{Si}$ необходим учет "ацентричных" свойств КРТ (т. е. пиро- и термоэлектрических характеристик). Но уже сейчас можно сделать некоторые замечания. Для КРТ, которое имеет низкую температуропроводность $\chi \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [16], частоты мгновенного остывания области фотопоглощения ω_T (коэффициент поглощения ИК-излучения $\alpha_h = 10^4 \text{ м}^{-1}$ [16]) и прохождения тепла ω_L по его толщине ($L = 5 \text{ мкм}$) составляют, соответственно, $\omega_T = \alpha_h^2 \chi \sim 200 \text{ Гц}$ и $\omega_L = L^2 \chi \sim 10 \text{ Гц}$. Как видно из рис. 2, спектральное распределение чувствительности прототипа имеет две характерные области, а именно, пик на 3 мкм и повышенную чувствительность в области $6\text{—}14 \text{ мкм}$. Очевидно, что первый участок соответствует области собственного поглощения $\text{Hg}_{0,7}\text{Cd}_{0,3}\text{Te}$. При повышении частоты модуляции падающего излучения с 50 до 338 Гц происходит рост чувствительности ФПУ в первой области с одновременным снижением интегральной чувствительности прототипа приблизительно в два раза за счет второй области. По мнению авторов, частотная зависимость чувствительности демонстрирует конкуренцию механиз-

мов термодформации образца, отображенных в правой части (1). Для уточнения характера этих процессов необходимы данные о внутренних механических напряжениях гетероэпитаксиальной системы, исходя из условий когерентности и симметрии кристаллов, составляющих гетеропару.

Пьезоэлектрические свойства твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$

Остановимся отдельно на пьезоэлектрических свойствах КРТ. В элементарной ячейке A^2B^6 собственная полярность скомпенсирована, и поэтому при любых скалярных воздействиях на кристалл, в том числе и при однородном изменении температуры, в свободных кристаллах структуры сфалерита (в том числе и КРТ) полярные свойства не проявляются. Компенсация электрической полярности кристаллов группы A^2B^6 может быть нарушена в специально ориентированных пластинках (слоях) при анизотропном ограничении однородной термодформации.

Конструкция предложенного устройства такова, что пьезополупроводниковая пленка жестко ограничена на подложке и свободно деформируется только в одном направлении, перпендикулярно к границе раздела. Таким образом, в рассматриваемой системе вдоль определенных направлений пространственно реализуются анизотропные граничные условия, известные как условия частичного зажатия. Внешнее воздействие, в нашем случае это поглощенное ИК-излучение, индуцирует в пленке узкозонного полупроводника упругие напряжения, которые, в свою очередь, инициируют возникновение электрического поля, что означает появление в материале электрической поляризации.

Рассмотрим пленку КРТ основной кристаллографической установки [111] на кремниевой подложке (см. рис. 1). Кристаллическая решетка твердых растворов КРТ относится к F43m классу кубической сингонии (точечная группа симметрии T_d). Влияние симметрии существенно упрощает матрицу пьезоэлектрических модулей для этого класса кристаллов. В основной кристаллографической установке в нормальных условиях пьезоэлектрические свойства КРТ характеризуются матрицей пьезокоэффициентов [17]:

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Компоненты продольного и поперечного пьезомодуля — нулевые, а сдвиговые компоненты пьезомодуля равны: $e_{14} = e_{25} = e_{36} = e = 0,0136$ Кл·м⁻² [15]. Для сравнения, в случае CdTe имеем $e = 0,034$ Кл·м⁻².

Для пленки КРТ [111] основная система координат XYZ должна быть приведена к реальной системе координат X'Y'Z' путем поворотов на углы Эйлера. В нашем случае они составляют $\alpha = -45^\circ$, $\beta = 54,73^\circ$, $\gamma = 0^\circ$. При этом величина третьего угла определяется точной ориентацией пленки КРТ в плоскости xy. Следовательно, матрица тензора пьезокоэффициентов (2) в новой системе координат будет иметь вид:

$$e'_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e}{\sqrt{3}} & -\frac{2e}{\sqrt{6}} \\ -\frac{e}{\sqrt{6}} & \frac{e}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{e}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ \frac{e}{2\sqrt{3}} & \frac{e}{2\sqrt{3}} & -\frac{e}{\sqrt{3}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Третья строка матрицы (3) характеризует пьезоэлектрические свойства пленки КРТ, которая выращена нормально к оси $Z' = [111]$, где продольный пьезоэффект характеризуется модулем $e_{33'} = e/\sqrt{3}$, а поперечный $e_{31'} = e_{32'} = e/2\sqrt{3}$. Сдвиговые компоненты модуля e в пленке такой ориентации отсутствуют. Преобразование тензоров третьего ранга осуществляется суммированием по повторяющимся индексам, согласно правилу Эйнштейна: $e''_{ijk} = R_{im}R_{jn}R_{kp}e_{mnp}$, где матрица перехода принимает вид:

$$R = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Легко показать, что пьезоотклик вследствие термической деформации $\varepsilon_j = (\varepsilon\varepsilon\varepsilon 0 0 0)^T$ при однородном нагреве не возникает: $P_i = e'_{ij}\varepsilon_j = 0$. При реализации неоднородных граничных условий, когда кремниевая подложка задает деформацию пленки КРТ по осям OX' и OY' и не влияет на деформацию вдоль оси OZ', тензор деформаций будет иметь вид: $\bar{\varepsilon}_j = (\varepsilon_{sub} \varepsilon_{sub} \varepsilon 0 0 0)^T$. При этом индуцированная поляризация $P_3 = e'_{3j}\varepsilon_j = \frac{e}{\sqrt{3}} \times (\varepsilon_{sub} - \varepsilon)$ будет отлична от нуля по оси Z'. Таким образом, при наличии электрических контактов на верхней и нижней поверхностях пленки КРТ [111]

гетероструктура будет давать фотовольтаический отклик на падающее излучение.

Следует отметить, что при ориентации пленки в направлениях [100], [010], [001] индуцированная термодформацией поляризация не возникает, тогда как при ориентации пленки в направлении [110] и [310] (ось X') поляризация должна появиться в плоскости пленки. Тензоры пьезокоэффициентов, деформации и поляризация для направления [310] будут, соответственно, выглядеть следующим образом (результаты для [110] похожи и не приводятся для краткости):

$$e'_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -0,436e & -0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9e & -0,36e & 0 \\ -0,45e & 0,45e & 0 & 0 & 0 & -0,436e \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_j = (\varepsilon \varepsilon_{sub} \varepsilon_{sub} \ 0 \ 0 \ 0)^T; \quad (6)$$

$$P_3 = e'_{3j} \varepsilon_j = -0,45e(\varepsilon - \varepsilon_{sub}). \quad (7)$$

Моделирование распределения неравновесных носителей при $T = 300$ К

Для нахождения концентрации неравновесных носителей заряда (ННЗ) в полупроводниковой структуре при фотовозбуждении следует решить так называемую фундаментальную систему уравнений (ФСУ), состоящую из уравнений Пуассона, неразрывности и кинетического уравнения Больцмана для носителей заряда. ФСУ в диффузионно-дрейфовом приближении [18] имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = -\frac{q}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (N_D - N_A + p - n) \\ \vec{J}_h = -qD_h \text{grad}(p) - q\mu_h p \cdot \text{grad}(\varphi) \\ \vec{J}_e = qD_e \text{grad}(n) - q\mu_e n \cdot \text{grad}(\varphi) \\ \text{div}(\vec{J}_h) - q(G - R) + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \\ \text{div}(\vec{J}_e) + q(G - R) - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где J_h, J_e — плотность тока дырок и электронов;
 D_h, D_e — коэффициенты диффузии дырок и электронов;
 μ_h, μ_e — подвижность дырок и электронов;
 q — модуль заряда электрона;
 p, n — концентрации дырок и электронов;
 G, R — уровень генерации и рекомбинации носителей, соответственно;
 N_D, N_A — концентрации доноров и акцепторов;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²·Н⁻¹·м⁻²;
 ε — диэлектрическая проницаемость;
 φ — электрический потенциал.

Система уравнений (8) показала существенную нелинейность и жесткость [19], что вызывает трудности при ее решении даже в одномерном стационарном случае.

При 300 К подвижность носителей в КРТ относительно мала ($\mu_e = 10\,000$ см²·В⁻¹·с⁻¹, $\mu_h = 100$ см²·В⁻¹·с⁻¹ [16, 20]), что вызывает незначительное "растекание" неравновесного заряда в гетероструктуре. Кроме того, в данной задаче оси OX и OY (при засветке вдоль оси OZ) эквивалентны, поэтому далее рассматриваются два частных одномерных случая — продольная засветка (рис. 3, схема А) и поперечная засветка (рис. 3, схема В). Оценка плотности ННЗ рассматривается в однородной пленке КРТ без Si-подложки. Такое упрощение оправдано, если падающее излучение практически полностью поглощается пленкой КРТ, т. е. $\alpha h \gg 1$, где α — коэффициент поглощения. После приведения к безразмерному виду система уравнений (8) в одномерном случае для однородного материала примет вид:

$$\begin{aligned} j_h &= -\mu_h \left(\frac{\partial p}{\partial z} - pE \right); \quad j_e = -\mu_e \left(\frac{\partial n}{\partial z} + nE \right); \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{\partial j_h}{\partial z} + G - R; \quad \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial j_e}{\partial z} + G - R; \\ k^2 \frac{\partial E}{\partial z} &- (N + p - n) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $k = \frac{l_D}{d}$, $l_D = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \Phi_T}{qN_0} \right)^{0.5}$ — длина экранирования Дебая, $E = -\nabla\varphi$ — напряженность электрического поля. Нормировка проводилась на уровень легирования N_0 или на значение собственной концентрации (в случае нелегированного полупроводника), на тепловой потенциал Φ_T , длину полупроводника — d и подвижность дырок — μ_h .

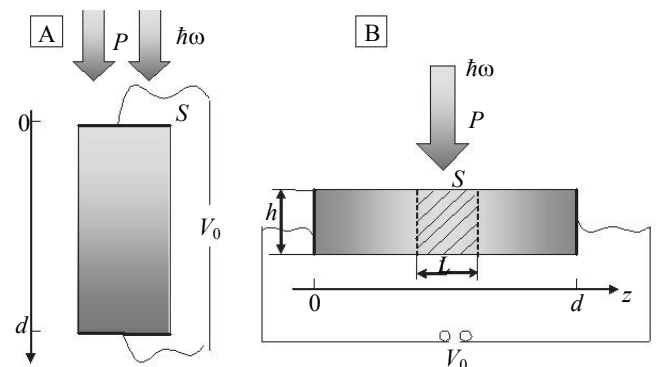


Рис. 3. Одномерные случаи продольной (А) и поперечной (В) засветки при решении ФСУ

В результате имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} N_0 &= \max(N_D - N_A); \quad \mu = \min(\mu_e, \mu_h); \\ \tilde{n} &= \frac{n}{N_0}; \quad \tilde{p} = \frac{p}{N_0}; \quad \tilde{z} = \frac{z}{d}; \quad \tilde{\varphi} = \frac{\varphi}{\Phi_T}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_T &= \frac{kT}{q}; \quad t_0 = \frac{d^2}{\varphi_T \mu}; \quad \tilde{G}\tilde{R} = \frac{t_0}{N_0}(G-R); \\ \tilde{j} &= \frac{t_0}{N_0 d} j; \quad \tilde{N} = \frac{N_D - N_A}{N_0}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь учтено соотношение Эйнштейна—Нернста для подвижности μ и коэффициента диффузии D носителей в виде $D = \mu \frac{kT}{q} = \mu \varphi_T$. Систему уравнений (9) следует дополнить граничными условиями:

$$\begin{cases} p(0) = p(d) = p_0; \\ n(0) = n(d) = n_0; \end{cases} \quad (11)$$

$$\int_0^d E(x,t) dx = V_0. \quad (12)$$

Условия (11) моделируют металлические контакты, за счет чего реализуется такой уровень рекомбинации ННЗ, что на контактах равновесные значения концентраций независимы от падающего излучения. Условием (12) определяется разность потенциалов на контактах, т. е. внешнее приложенное напряжение V_0 .

В работе применялась схема Шарфеттера—Гуммеля [21]. Для схемы А на рис. 3 конечно-разностный аналог (9) выглядит так (предварительно первые четыре уравнения первого порядка системы сводятся к двум уравнениям второго порядка относительно концентраций электронов и дырок):

$$\begin{aligned} \frac{p_i^{t+1} - p_i^t}{dt} &= -\frac{((j_p)_{i+0.5} - (j_p)_{i-0.5})}{dz} + \\ &+ G - R + \frac{P_0(1-r)}{S} \frac{\alpha\lambda}{hc} \exp(-\alpha idz); \\ \frac{n_i^{t+1} - n_i^t}{dt} &= -\frac{((j_n)_{i+0.5} - (j_n)_{i-0.5})}{dz} + \\ &+ G - R + \frac{P_0(1-r)}{S} \frac{\alpha\lambda}{hc} \exp(-\alpha idz) \times \\ &\times \frac{\varphi_{i+1}^{t+1} - 2\varphi_i^{t+1} + \varphi_{i-1}^{t+1}}{(dz)^2} = -\frac{1}{k^2} (N + p_i^{t+1} - n_i^{t+1}), \end{aligned}$$

где потоки носителей зарядов можно расписать как:

$$(j_p)_{i+0.5} = -\mu_h \frac{E^+(z_{i+0.5}^t) p_{i+1}^{t+1} - E^-(z_{i+0.5}^t) p_i^{t+1}}{dz};$$

$$(j_n)_{i+0.5} = -\mu_e \frac{E^-(z_{i+0.5}^t) n_{i+1}^{t+1} - E^+(z_{i+0.5}^t) n_i^{t+1}}{dz};$$

$$E^\pm(z_{i\pm 0.5}^t) = 1 \pm z_{i\pm 0.5}^t;$$

$$E^\pm(z_{i\pm 0.5}^t) = \frac{\pm 2z_{i\pm 0.5}^t}{1 - \exp(\mp 2z_{i\pm 0.5}^t)};$$

$$\begin{aligned} E^\pm(z_{i\pm 0.5}^t) &= \exp(\pm z_{i\pm 0.5}^t); \\ E^\pm(z_{i\pm 0.5}^t) &= \frac{2}{1 + \exp(\pm 2z_{i\pm 0.5}^t)^\pm}; \\ z_{i+0.5}^t &= \frac{\varphi_{i+1}^t - \varphi_i^t}{2}; \quad z_i^t = \frac{\varphi_i^t - \varphi_{i-1}^t}{2}. \end{aligned}$$

Согласно подходу Гуммеля применялось раздельное решение уравнений с последующим итерационным согласованием. Проблема нелинейности системы уравнений решалась за счет явной схемы, в которой нелинейные члены брались с предыдущего момента времени. Такой подход вполне обоснован для достижения поставленной цели — нахождения стационарного распределения ННЗ. Уравнения решались методом прогонки [22], который позволяет получить результат без формирования громоздкой системы линейных алгебраических уравнений.

Заключение

В данной работе предложен неохлаждаемый приемник ИК-излучения на основе напряженной гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te/(310)Si$. Элемент прототипа демонстрирует фотовольтаическую спектральную чувствительность на уровне $D^* = 3 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при 300 К. Установлено, что ЭДС, которая возникает в гетероструктуре $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te/(310)Si$ при фотовозбуждении ИК-излучением, определяется кристаллографической установкой, зависит от интенсивности и спектрального состава падающего излучения. Обсуждены модель возникновения фотоотклика в гетероструктуре $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te/(310)Si$ при комнатной температуре и фотовольтаическая природа наблюдаемого явления. Проведена апробация физического моделирования путем решения диффузионно-дрейфовой модели неразрывности для $Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te/Si$ при 300 К.

Авторы выражают благодарность
канд. физ.-мат. наук В. Б. Самойлову
(ИФ НАНУ) за стимулирующие дискуссии
и интерес к работе.

Литература

1. Niedziela T., Ciupa R. // Electron Technology. 2000. V. 33. No. 4. P. 542
2. Norton P. // Opto-electronics review. 2002. V. 10. No. 3. P. 159.
3. Datskos P. G. et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. No. 16. P. 2319; 2006. No. 89. P. 073118-1.

4. Rogalski A. Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program, Wroclaw. 2006.
5. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра. — Киев: Академперіодика, 2008.
6. Овсяк В. Н. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
7. Rogalski A. Infrared detectors. — Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
8. Piotrowski J., Rogalski A. // Infrared Physics & Technology. 2004. No. 46. P. 115.
9. Ashley T., Elliott C. T., Harker A. T. // Infrared Physics. 1986. No. 26. P. 303.
10. Velicu S., Badano G., Selamet Y., Grein C. H., Faurie J. P., Sivananthan S., Boieriu P., Don Rafol, Ashokan R. // Journal of Electronic Materials. 2001. V. 30. No. 6. P. 711.
11. Piotrowski J. // Optoelectronics review. 2004. No. 12. P. 111.
12. Пат. 40 000 Украины от 25 марта 2009 г.
13. Figielski T. // Phys. Status Solidi. 1961. No. 1. P. 306.
14. von Preissig F. J. // J. Appl. Phys. 1989. No. 66. P. 4262.
15. Wan C. F., Luttmer J. D., List R. S., Strong R. L. // Journal of Electronic Materials. 1995. V. 24. No. 9. P. 1293.
16. Гергобиани А. Н. и др. Физика соединений А^{II}В^{VI}. — М.: Наука, 1986.
17. Шаскольская М. П. Кристаллография. — М.: Высшая школа, 1976.
18. Гершианов В. Ю., Гармаилов С. И. Методические указания. "Методы и алгоритмы структурно-физического моделирования элементов интегральных схем в диффузионно-дрейфовом приближении". Часть II. — Ростов-на-Дону, 2000.
19. Калиткин Н. Н. // Математическое моделирование. 1995. Т. 71. № 5. С. 8.
20. Chu J., Sher A. Devices Physics of Narrow Gap Semiconductors, Springer, 2009.
21. Gummel H. K. // IEEE Trans. 1964. ED-11. No. 10.
22. Гарбер Г. З. // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 10. С. 1.

IR uncooled photovoltaic cell on basis of Cd_xHg_{1-x}Te/Si (x = 0.3)

R. K. Savkina, F. F. Sizov, A. V. Smirnov, V. A. Deriglazov

Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of National Academy Science of Ukraine,
41 Nauka av., Kiev, 03028, Ukraine
E-mail: alex_tenet@isp.kiev.ua

M. V. Yakushev

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Science,
13 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia

An uncooled IR detector on basis of Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te/(310)Si heterostructure is investigated. The physical simulation of a diffusion-drift model has been made at 300 K.

PACS: 81.05.Dz, 72.40.+w, 77.65.Ly

Keywords: IR detector, deformation, piezoproperties, CdHgTe, heterostructure.

Bibliography — 22 references.

Received September 30, 2010