

УДК 621.383.49:621.793.162

Время автономной работы фотоприемников диапазона спектра 3—5 мкм из InSb и гетероэпитаксиальных структур CdHgTe

А. В. Филатов, Е. В. Сусов, В. В. Карпов, В. А. Жилкин, С. П. Любченко,
Н. С. Кузнецов, А. В. Марущенко

Исследовано время автономной работы $t_{ав}$ глубокоохлаждаемых дроссельной системой Джоуля–Томсона фоторезисторов и фотодиодов из антимонида индия и фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0,3$). Наибольшее время автономной работы ($t_{ав} \geq 28$ с) получено для фоторезисторов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0,3$). Показано, что время $t_{ав}$ фоторезисторов и фотодиодов связано с температурой перехода полупроводниковых материалов из примесной области проводимости в собственную область. Обсуждаются возможности повышения времени $t_{ав}$ фотоприемников за счет оптимизации требований к характеристикам InSb и $Cd_xHg_{1-x}Te$.

PACS: 85.60.Dw

Ключевые слова: фотоприемники, время автономной работы, антимонид индия, гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур.

Введение

Фотоприемники (ФП) с небольшим количеством фоточувствительных площадок обычно используются в системах регистрации ИК-излучения с дроссельными системами охлаждения Джоуля–Томсона, когда необходимо быстро охладить ФП до рабочей температуры ~ 77 К и после завершения работы системы охлаждения продолжить работу в автономном режиме.

Фотоприемники из InSb и твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0,3$) при температуре жидкого азота имеют высокую чувствительность в спектральном диапазоне 3—5 мкм. При повышении температуры до определенного уровня эти материалы

переходят в область собственной проводимости (n -тип), что приводит к резкому падению чувствительности. Представляет несомненный практический интерес вопрос о возможном интервале времени работы ФП в автономном режиме.

Целью данной работы было исследование времени работы в автономном режиме $t_{ав}$ фоточувствительных элементов (ФЧЭ) фоторезисторов и фотодиодов, изготовленных из InSb и твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ в одном конструкционном исполнении фотоприемника.

Постановка задачи

На рис. 1 приведено схематическое изображение конструкции, а на рис. 2 — фотография миниатюрного фотоприемника, работающего при температуре жидкого азота в спектральном диапазоне 3—5 мкм. Основными элементами конструкции ФП (рис. 1) являются: металлический корпус (1), соединенный с оправой (3) и втулкой (2), и капсула с ФЧЭ (7). Металлический корпус соединен с корпусом из реактопласта (6), в который вклеивается входное окно (5). Капсула с ФЧЭ приклеивается на оправу (3), являющуюся резервуаром для аккумуляции жидкого азота, вырабатываемого микротеплообменником брызгающего типа на эффекте Джоуля–Томсона. ИК-излучение через диафрагму (4) попадает на чувствительную площадку ФЧЭ. Капсула фотоприемника состоит из ФЧЭ, корпуса и контактного раstra. Корпус и

Филатов Александр Владимирович, ведущий инженер.
Сусов Евгений Васильевич, главный специалист.
Карпов Владимир Владимирович, заместитель генерального директора по гражданскому приборостроению – начальник ЦКБ.
Жилкин Владимир Алексеевич, ведущий инженер.
Любченко Сергей Павлович, начальник цеха.
Кузнецов Николай Сергеевич, начальник отдела.
Марущенко Андрей Вячеславович, заместитель начальника отдела.
ОАО «Швабе–Фотосистемы».
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4а.
Тел. +7 (495) 315-73-56. E-mail: co-ckb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 марта 2016 г.

© Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В., Жилкин В. А., Любченко С. П., Кузнецов Н. С., Марущенко А. В., 2016

растр выполнены из монокристаллического лейко-сапфира.

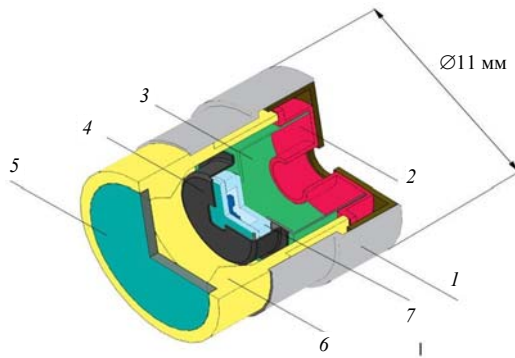


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции фотоприемника.

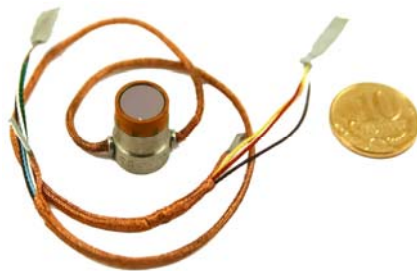


Рис. 2. Фотография миниатюрного фотоприемника рядом с 10-копеечной монетой.

Фоторезисторы (ФР) изготавливались из легированных германием монокристаллов InSb p -типа ($\tau_p \gg \tau_n$) и гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n -типа ($\tau_p = \tau_n$), полученных в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ). Использование монокристаллов InSb p -типа проводимости обеспечивает в условиях монополярной фотопроводимости отсутствие эффекта пролёта носителей и высокий коэффициент усиления [1]. Для изготовления ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ и реализации большего времени жизни неосновных носителей заряда в исходном материале для уменьшения влияния пролёта носителей была использована конструкция ФЧЭ в виде меандра [2]. Для изготовления фотодиодов (ФД) из антимонида индия использовались серийная базовая технология [3]. На монокристаллических пластинах антимонида индия n -типа проводимости легированных теллуром локальной ионной имплантацией бериллия с последующим отжигом создавался p^+n -переход с концентрацией носителей $p^+ \approx (3-5) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В табл. 1 приведены основные фотоэлектрические параметры материалов, используемых для изготовления ФЧЭ фотоприемников.

Таблица 1

Основные фотоэлектрические параметры материалов, используемых для изготовления ФЧЭ фотоприемников

Материал	Тип проводимости	Концентрация при 77К, см^{-3}	Подвижность при 77К, $\text{см}^2/\text{В с}$	Время жизни, мкс
InSb	дырочный	$(0,6-1,2) \times 10^{13}$	$(6,3-7,5) \times 10^3$	$\geq 4,5$
	электронный	$(0,6-2,0) \times 10^{14}$	$(5-7) \times 10^5$	—
ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,299-0,301$	электронный	$(1,0-2,2) \times 10^{14}$	$(3,0-4,0) \times 10^4$	8—9
ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,210-0,213$	электронный	$(2,0-2,5) \times 10^{14}$	$(1,0-1,2) \times 10^5$	1,5—2,0

За время автономной работы фотоприемника $t_{\text{ав}}$ принимался интервал времени с момента прекращения подачи газообразного азота высокого давления на вход микрохолодильника до момента, когда величина сигнала фотоответа уменьшится до 0,7 от его значения, достигнутого к моменту времени 6 сек от начала непрерывной работы микрохолодильника. При этом фотоприемник вращался со скоростью 630 рад/мин относительно неподвижно закрепленного микрохолодильника, расположенного соосно с фотоприемником. Зависимость фотосигнала фотоприемника от времени регистрировалась на самописце. Для определения температуры ФЧЭ во время работы использовался миниатюрный калиброванный бескорпусной датчик температуры на основе кремниевого $p-n$ -перехода с температурным коэффициентом $\approx 2,13 \text{ мВ/град}$, который располагался в капсуле вместо ФЧЭ.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены типичные зависимости сигнала фотоответа S_u фотоприемников на основе антимонида индия и ГЭС КРТ МЛЭ и температуры в капсуле от времени работы t микрохолодильника, работа которого прекращается на шестой секунде. В табл. 2 приведены параметры фотоприемников. Здесь же приведены для сравнения параметры фоторезистора из ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,210-0,213$ в классическом дизайне без меандра с размером площадки $0,05 \times 0,15 \text{ мм}$. В этом случае в качестве входного окна фотоприемника использовался просветленный сульфидом цинка германий. Из рис. 3 и табл. 2 следует, что для ФП на основе антимонида индия наблюдается резкое снижение чувствительности при достижении температуры $\approx 82\text{К}$ для ФР и $\approx 170\text{К}$ для ФД, что ог-

раничивает время автономной работы 15 и 23 с соответственно. Для ФР на основе ГЭС КРТ МЛЭ ($x = 0,3$) наблюдается плавное снижение чувствительности при достижении температуры $\approx 180\text{K}$ с

временем автономной работы 24—28 сек. Из рис. 3 видно, что время автономной работы ФР из ГЭС КРТ МЛЭ ($x = 0,3$) почти в два раза больше, чем у ФР из InSb.

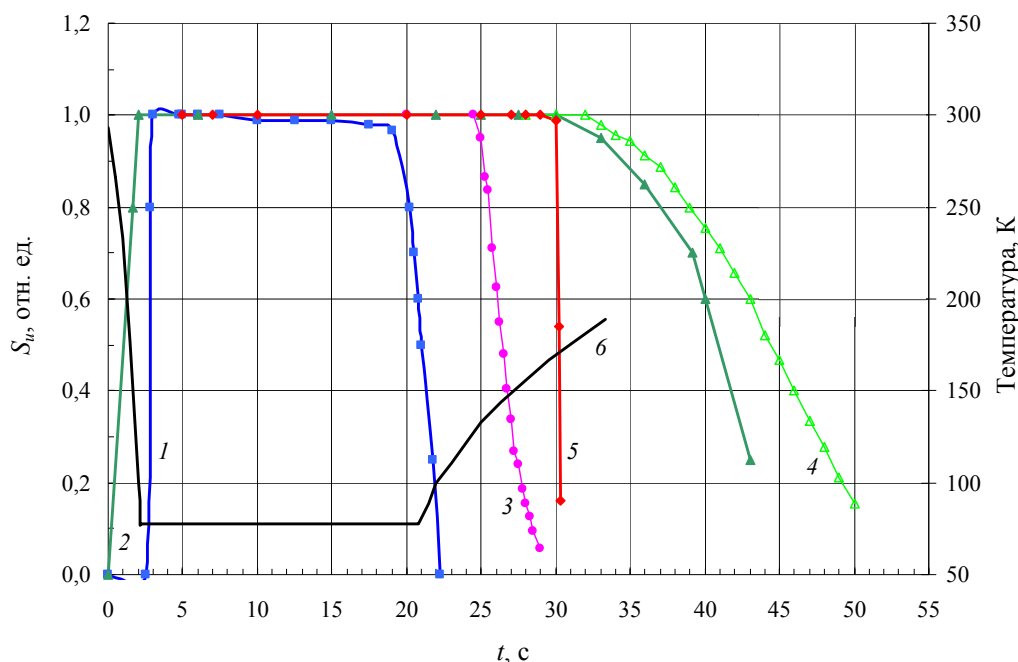


Рис. 3. Зависимости сигнала фототовета S_u фотоприемников на основе антимонида индия и ГЭС КРТ МЛЭ и температуры в капсуле от времени работы t микротеплообменника, работа которого прекращается на шестой секунде. 1 — ФР InSb; 2 — ФР КРТ $x = 0,3$; 3 — ФР КРТ $x = 0,2$; 4 — ФР КРТ $x = 0,3$; 5 — ФД InSb; 6 — T, K .

Таблица 2

Фотоэлектрические параметры фотоприемников на основе антимонида индия и ГЭС КРТ МЛЭ

Тип прибора	Материал	Размер площадки, мм × мм	D^* ($\lambda_{\text{макс}}, 800,1$) 10^{11} см Гц ^{1/2} /Вт	Время выхода на режим, с не более	$t_{\text{ав}},$ с не менее
ФР	InSb	$\approx 0,06 \times 0,3^*$	0,6	2,8	15
	ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,299—0,301$		0,8	1,8	28
	ГЭС КРТ МЛЭ $x = 0,210—0,213$	0,05 × 0,15	2,1	2,3	24
ФД	InSb	0,08 × 0,15	0,7	2,5	20
			1,2	2,6	23

* — размер площадки $1,97 \cdot 10^{-4}$ см².

Переход в область собственной проводимости при повышении температуры для p -типа сопровождается инверсией типа проводимости [4]. Инверсия типа проводимости наступает при температуре T_n , когда выполняется условие $p = b^2 n_i$, где b — отношение подвижностей электронов и дырок, n_i — собственная концентрация носителей, p — концентрация дырок в области примесной проводимости ($p = N_a - N_d$). На рис. 4 приведены

результаты расчета зависимости температуры инверсии от концентрации дырок в области примесной проводимости при трех величинах отношения подвижности носителей заряда ($b = 20, 45$ и 140). Здесь же приведены усредненные значения температуры резкого снижения чувствительности для нескольких ФР и ФД, полученные экспериментально.

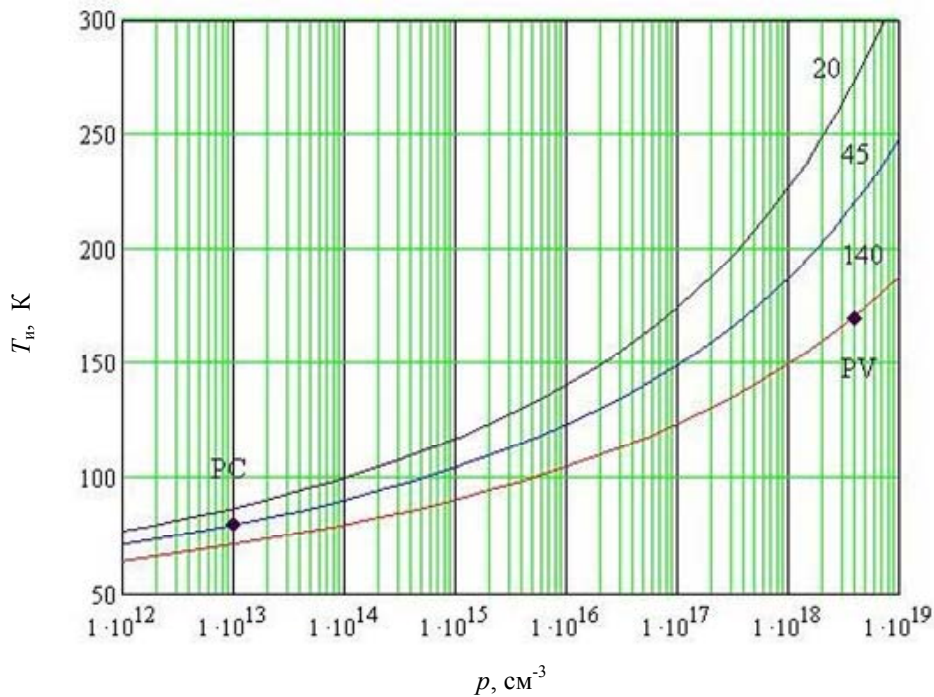


Рис. 4. Зависимости температуры инверсии типа проводимости T_n от концентрации дырок p в области примесной проводимости при трех величинах отношения подвижности носителей заряда ($b = 20, 45$ и 140) и усредненные экспериментальные результаты температуры резкого снижения чувствительности для нескольких ФР (PC, $p = 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и ФД (PV, $p = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) из InSb.

При расчете использовались зависимость величины запрещенной зоны и собственной концентрации носителей заряда от температуры для антимонида индия, приведенные в обзоре работ [5]:

$$E_g = 0,235 - (3,4 \times 10^{-4} T^2) / (210 + T), \quad (1)$$

$$n_i = (3,12 + 2,69 \times 10^{-3} T) \times 10^{14} T^{3/2} E_g^{3/4} \exp(-E_g / 2kT). \quad (2)$$

Как видно из сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета, температура инверсии типа проводимости хорошо согласуется с температурой спада чувствительности для ФР и ФД, изготовленных из антимонида индия, при отношении подвижностей электронов и дырок 45 и 140 соответственно. Из этих соотношений можно определить величины подвижности электронов в InSb p -типа проводимости для температуры работы ФР при ≈ 80 К и для температуры работы ФД при 170 К. Подвижность электронов при ≈ 80 К составляет $\approx 3 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ($b = 45$, $\mu_h \approx 7000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$). Подвижность электронов при ≈ 170 К составляет $\approx 1,1 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ($b = 140$, $\mu_h \approx 800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при $p = 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [6]). Эти величины подвижности электронов находятся в хорошем соответствии с величинами подвижности электронов в InSb n -типа проводимости при степени компенсации $N_a/N_d \approx 0,9$ [6]. Необходимо отметить, что температуру инверсии типа проводимости (время автономной работы) можно повы-

сить, используя материал с более низким отношением подвижностей носителей заряда. Причем для ФД диапазон изменения температуры значительно шире, чем для ФР.

В работе [7] исследовалось влияние уровня легирования исходных кристаллов InSb на рабочую температуру пороговых ФД. Изменение уровня легирования от $(0,2-3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $(5-8) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ привело к повышению рабочей температуры ФД на 15 К без ухудшения пороговых характеристик ФД. При этом увеличение концентрации носителей заряда сопровождается снижением подвижности электронов при температуре жидкого азота с $7 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ (марка ИСЭ-0) до $2 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ (марка ИСЭ-2у). Если принять, что температура инверсии типа проводимости в p -области ФД также сместится на 15 К, то отношение подвижностей в данном случае ($T \approx 185 \text{ К}$, $p = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) составит $b = 95$. Расчет подвижности электронов дает величину $\approx 0,8 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ($\mu_h \approx 800 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$), при этом степень компенсации (Na/Nd) значительно увеличилась.

В случае использования гетерозпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n -типа проводимости за температуру перехода из примесной области проводимости в собственную область проводимости принималась температура T_n , при которой положение собственного энергетического уровня в запрещенной зоне совпадало с уровнем ферми ($E_i = E_F$) [8—11], где:

$$E_i = \frac{1}{2} E_g - \frac{3}{4} kT \ln(m_h^* / m_e^*), \quad (3)$$

$$E_g = -0,302 + 1,93x - 0,81x^2 + 0,832x^3 + 5,35 \times 10^{-4} (1 - 2x)T \quad (4)$$

$$N_c = 2(2\pi m_e^* kT / h^2)^{3/2} \quad (5)$$

$$n_o = N_c \exp(-E_F / kT) \quad (6)$$

$$m_h^* / m_0 = 0,45 \quad (0 \leq x \leq 0,35), \quad (7)$$

$$m_e^* / m_0 = 0,071 E_g \text{ (эВ)}.$$

На рис. 5 приведены расчетные зависимости температуры T_n от мольной доли CdTe для трех величин концентрации электронов в примесной области проводимости ($\sim 77\text{K}$): 1×10^{14} , 5×10^{14} и $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На рис. 5 также приведены усредненные экспериментальные результаты значения температуры начала снижения чувствительности для

нескольких ФР, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ ($x = 0,2$ и $0,3$). Следует иметь ввиду, что изготовление малоразмерных ФР из ГЭС КРТ МЛЭ ($x = 0,2$) с использованием ионного травления сопровождается увеличением концентрации основных носителей заряда минимум на порядок [12]. Из сравнения результатов расчетов для материалов InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, используемых для изготовления ФР, приведенных на рис. 5, следует, что для КРТ электронного типа проводимости ($x \sim 0,3$) переход из примесной в область в собственную область проводимости наступает при более высокой температуре, чем для антимонида индия p -типа проводимости. Температура перехода из примесной в собственную область проводимости для КРТ ($x \sim 0,3$) электронного типа проводимости с концентрацией более $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ более 230 К. Следовательно, использование КРТ ($x \sim 0,3$) в фоторезисторах позволяет (табл. 2) быстрее охладить ФР до рабочей температуры и существенно увеличить автономный режим работы.

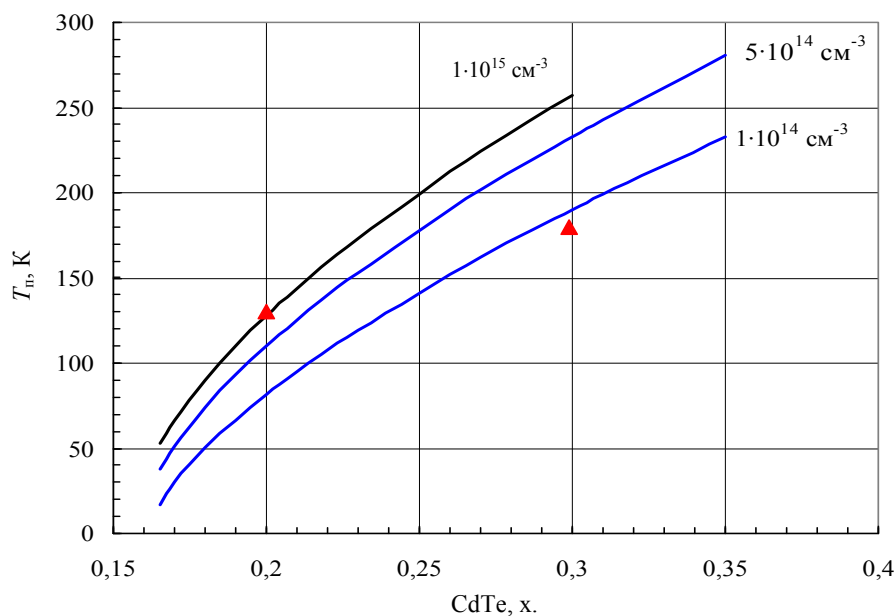


Рис. 5. Расчетные зависимости температуры перехода из примесной в область собственной проводимости для КРТ электронного типа проводимости от мольной доли x для CdTe (сплошные кривые) и усредненные экспериментальные результаты температуры снижения чувствительности (треугольники) для нескольких ФР ($x = 0,2$ и $0,3$).

Заключение

Исследовано время автономной работы глубокоохлаждаемых дроссельной системой Джоуля–Томсона фоторезисторов и фотодиодов из антимонида индия и фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,3$) на спектральный диапазон 3—5 мкм. Наибольшее время автономной работы (не менее 28 с) получено для фоторезисторов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,3$). В отличие от фоторезисторов и фотодиодов из InSb сигнал фоторезисторов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,3$) медленно

падает с температурой за пределами времени автономной работы, существенно увеличивая время работы в автономном режиме. Показано, что время автономной работы фоторезисторов и фотодиодов связано с температурой перехода полупроводниковых материалов из примесной области проводимости в собственную область.

Для повышения времени автономной работы фотодиодов из антимонида индия целесообразно использовать марки материала с более низкой подвижностью электронов, а для фоторезисторов

из КРТ ($x \sim 0,3$) электронного типа проводимости с концентрацией электронов не менее $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Авторы признательны сотрудникам ИФП СО РАН Ю. Г. Сидорову, С. А. Дворецкому, Н. Н. Михайлову и В. С. Варавину за создание и исследования эпитаксиальных структур КРТ для фоторезисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов А. В., Сусов Е. В., Астахов В. П., Карпов В. В., Гиндин П. Д. Патент на полезную модель RU № 121102 U1. 2012.
2. Филатов А. В., Сусов Е. В., Карпов В. В., Гиндин П. Д., Акимова Н. М., Любченко С. П., Жилкин В. А. Патент на полезную модель RU № 126512 U1. 2013.
3. Астахов В. П., Гиндин П. Д., Ежов В. П., Карпов В. В., Соловьева Г. С. Патент на изобретение RU № 2324259 H 01 L. 2008.

4. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп: Пер. с англ. / Под ред. Б. И. Болтакса. — М.: Мир, 1967.
5. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. / Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
6. Electrical properties InSb. www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/electric.html.
7. Астахов В. П., Соловьева Г. С., Артамонов А. В. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 71.
8. Kinch M. A., Brau M. J., Simmons A. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. No. 4. P. 1649.
9. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 7099.
10. Dubowski J. J., Dieltl T., Szymanska W., Gakazka R. R. // J. Phys. Chem. Solids. 1981. Vol. 42. P. 351.
11. Weiler M. H. In Book: Semiconductors and Semimetals. Vol. 6. P. 119. Ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer. — Academic Press, N.-Y. 1981.
12. Филатов А. В., Сусов Е. В., Гусаров А. В., Акимова Н. М., Крапухин В. В., Карпов В. В., Шаевич В. И. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. Вып. 12. С. 49.

Work in the independent mode of photodetectors from InSb and hetero-structures CdHgTe of the 3—5 μm band

A. V. Filatov, E. V. Susov, V. V. Karpov, V. A. Zhilkin, S. P. Lyubchenko, H. C. Smiths, and A. V. Marushchenko

JSC «Shvabe-Photosystem»
4a Dnepropetrovsky passage, Moscow, 117545, Russia
E-mail: co-ckb@mail.ru

Received March 31, 2016

A time of an independent work of photoresistors and photodiodes from InSb and photoresistors from hetero-structures Cd_xHg_{1-x}Te ($x \sim 0,3$) is investigated. The greatest time of independent work ($t \geq 28$ s) is received for photoresistors from Cd_xHg_{1-x}Te ($x \sim 0,3$). It is shown that this time is connected with a junction temperature of materials from impurity conduction in the self area. Opportunities of increase of independent work of photodetectors due to optimization of requirements to characteristics InSb and Cd_xHg_{1-x}Te are discussed.

PACS: 85.60.Dw

Keywords: photodetectors, time of independent work, InSb, heteroepitaxial structures CdHgTe.

REFERENCES

1. A. V. Filatov, E. V. Susov, V. P. Astakhov, V. V. Karpov, and P. D. Gindin, RF Patent, RU No. 121102 U1. 2012.
2. A. V. Filatov, E. V. Susov, V. V. Karpov, P. D. Gindin, N. M. Akimova, S. P. Lyubchenko, and V. A. Zhilkin, RF Patent, RU No. 126512 U1. 2013.
3. V. P. Astakhov, P. D. Gindin, V. P. Ezhov, V. V. Karpov, and G. S. Solov'eva, RF Patent, RU No. 2324259 H 01 L. 2008.
4. O. Madelung, *Physics of Semiconductor Compounds for Elements of the III and V Groups* (Mir, Moscow, 1967) [in Russian].
5. A. Rogalski, IR Detectors (Nauka, Novosibirsk, 2003) [in Russian].
6. *Electrical properties InSb*. www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/electric.html.
7. V. P. Astakhov, G. S. Solov'eva, and A. V. Artamonov, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 71 (2015).
8. M. A. Kinch, M. J. Brau, and A. Simmons, *J. Appl. Phys.* **44**, 1649 (1973).
9. G. L. Hansen, J. L. Schmit, and T. N. Casselman, *J. Appl. Phys.* **53**, 7099 (1982).
10. J. J. Dubowski, T. Dieltl, W. Szymanska, and R. R. Gakazka, *J. Phys. Chem. Solids* **42**, 351 (1981).
11. M. H. Weiler, In Book: *Semiconductors and Semimetals. Vol. 6. P. 119*. Ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer. (Academic Press, N.-Y. 1981).
12. A. V. Filatov, E. V. Susov, A. V. Gusarov, N. M. Akimova, V. V. Krapukhin, V. V. Karpov, and V. P. Shaevich, *Journal of Optical Technology* **76** (12), 49 (2009).