

УДК 621.383.522

Иммерсионные фотоприемники для среднего инфракрасного диапазона оптического излучения

В. В. Гаврушко, С. Г. Кузюков, Ю. Н. Прошкин

Исследованы неохлаждаемые иммерсионные фотоприемники для среднего инфракрасного диапазона на основе гетероэпитаксиальных структур $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}/GaSb$ при значениях $x = 0,18$, $y = 0,17$. Приведены сведения о технологии и конструкции фотодиодов. Произведена оценка потерь излучения в стыковочном узле, составляющая от 19 до 24 % для линз, изготовленных из стекла, CdTe, SrTiO₃. Измерены диаграммы направленности излучения иммерсионных фотоприемников, которые показали усиление сигнала на оси в 2—3 раза при углах обзора 80—90 градусов по уровню 0,5. Приведена спектральная характеристика, имеющая необычный вид с границами чувствительности 1,8—2,24 мкм.

PACS: 85.60.Dw

Ключевые слова: фотодиод, иммерсионная линза, угол обзора, чувствительность, спектральная характеристика.

Введение

Интересным способом улучшения чувствительности и пороговых характеристик фотоприемников (ФП) является использование иммерсионной оптики. Особенно это актуально для пламенных пожарных извещателей, в которых повышение чувствительности датчиков увеличивает зону обслуживания и снижает число необходимых извещателей. Известна работа, в которой описаны иммерсионные фотоприемники на аналогичных материалах [1]. Было достигнуто 7-кратное увеличение обнаружительной способности фотоприемников. Однако, при этом было значительно сужено поле зрения, составляющее всего 15 градусов, что неприемлемо для широкообзорных систем.

В настоящей работе сообщается о результатах исследования характеристик фотоприемников для среднего инфракрасного диапазона с иммер-

сионными линзами из различных материалов, обладающих широкими углами зрения. В качестве объекта исследования были выбраны фотодиоды на основе гетероструктур $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}/GaSb$ при значениях $x = 0,18$, $y = 0,17$ [2—6]. Состав четверного соединения обеспечивал работу фотоприемника без охлаждения. Считается, что для полупроводниковых ФП их рабочая температура T должна удовлетворять соотношению Мооса [7]:

$$T < 0,05(\Delta E_g/k),$$

где ΔE_g — ширина запрещенной зоны, k — постоянная Больцмана. Если принять этот критерий, то при комнатной температуре ($T = 300$ К) фотоприемник должен иметь $\Delta E_g > 0,5$ эВ и длинноволновую границу чувствительности $\lambda'' < 2,5$ мкм. Исследование спектральной чувствительности наших фотоприемников давало значение $\lambda'' \approx 2,3$ мкм, что делало их особенно интересными для практического применения, поскольку они могут быть достаточно эффективными без дополнительных устройств охлаждения.

Технология и конструкция фотоприемника

Гетероструктуры получены методом жидкофазной эпитаксии и представляли собой трехслойную композицию. В качестве подложки использовались пластины n^+ -GaSb исходной тол-

Гаврушко Валерий Владимирович, зав. кафедрой.
Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого (НовГУ).
Россия, 173003, Великий Новгород, ул. Большая
Санкт-Петербургская, 41.
Тел. 8 (911) 609-75-86. E-mail: valery.gavrushko@novsu.ru
Кузюков Станислав Григорьевич, начальник КБ.
Прошкин Юрий Николаевич, начальник отдела.
АО «Швабе-фотосистемы».
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр-д, 4а.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2016 г.

© Гаврушко В. В., Кузюков С. Г., Прошкин Ю. Н., 2016

щиной 500 мкм. На ней выращивался фоточувствительный слой InGaAsSb толщиной 1,4–3 мкм, в котором формировался p – n -переход. Сверху на фоточувствительный осаждался контактный слой сильнолегированного широкозонного материала p^+ -GaSb толщиной 3–13 мкм. После выделения чувствительной площадки методом химического травления наносилась защитная анодная пленка в безводном электролите на основе этиленгликоля. Пленка наносилась на начальном этапе процесса в гальваностатическом режиме с плотностью тока 1,0 мА/см², а затем ток падал и режим переходил в вольтстатический с величиной $U = 30$ В. Применение такого режима обеспечивало высокое качество защитного покрытия.

На рис. 1 приведена конструкция разработанного иммерсионного фотоприемника. К линзе 1, имеющей сферическую и плоскую поверхности, эпоксидным компаундом приклеены фотоприемник 2 и керамическое кольцо 3. На внешнюю сторону кольца 3 напылялись две токоведущие дорожки 4, к которым припаивались выводы от фотоприемника. После распайки фотоприемник герметизировался приклейкой крышки 6 и керамической проставки 5. Были исследованы фотоприемники с обычно используемыми для таких целей линзами, выполненными из материалов: CdTe, SrTiO₃ и оптического стекла.

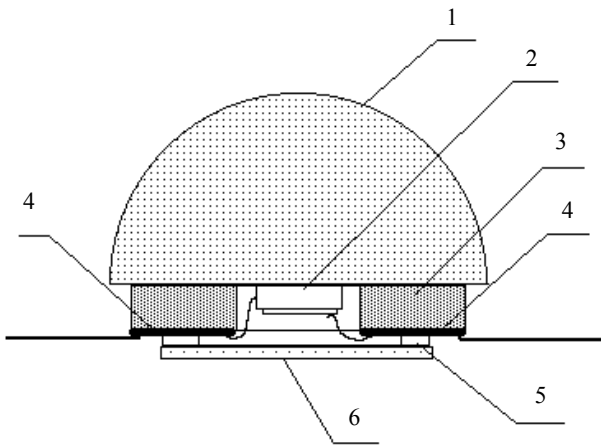


Рис. 1. Конструкция иммерсионного фотоприемника.

Оценка потерь излучения в стыковочном узле

Обычно толщина компаунда в иммерсионном приемнике значительно превышает значение $\lambda/40$, что требует учета потерь в стыковочном узле [8]. Принимая во внимание большие значения показателей преломления материалов как линзы, так и фотоприемника, была произведена оценка потерь излучения в узле стыковки линзы с поверхностью фоточувствительной структуры. Интенсив-

ность света в фоточувствительном слое может быть найдена, как сумма последовательного ряда отраженных от границ раздела лучей:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Сумма представляет собой геометрическую прогрессию, значение которой можно найти, как:

$$I = \frac{I_0(1 - R_1)(1 - R_2)}{1 - R_1R_2}.$$

Здесь I_0 — интенсивность падающего на узел стыковки излучения,

R_1 и R_2 — коэффициенты отражения от верхней и нижней границ раздела.

Для оценок ограничимся случаем нормального падения лучей. Если принять показатель преломления линзы n_1 , компаунда — n_2 и фотоприемника — n_3 , тогда имеем следующие выражения:

$$R_1 = \left(\frac{\frac{n_1}{n_2} - 1}{\frac{n_1}{n_2} + 1} \right)^2, \quad R_2 = \left(\frac{\frac{n_3}{n_2} - 1}{\frac{n_3}{n_2} + 1} \right)^2.$$

Если пренебречь потерями на поглощение в слое компаунда, что вполне приемлемо с учетом его малой толщины, то приняв для GaSb значение $n_3 = 3,85$, а для компаунда $n_2 = 1,5$, получим оценочные формулы:

- в случае оптического стекла ($n_1 = 1,5$) $I = 0,81I_0$,
- в случае SrTiO₃ ($n_1 = 2,21$) $I = 0,79I_0$,
- в случае CdTe ($n_1 = 2,6$) $I = 0,76I_0$.

Таким образом, несмотря на значительное различие в коэффициентах преломления материалов линз, потери в стыковочном узле оказываются близкими (от 19 до 24 %) и определяются доминирующим влиянием коэффициента отражения на второй границе, а именно, $R_2 = 0,19$ (при $R_1 < 0,07$).

Исследование фотозлектрических характеристик

При выборе формы линзы мы стремились обеспечить широкий угол обзора. Сведения о размерах линз и результаты измерения параметров иммерсионных фотоприемников приведены в таблице, а на рис. 2 изображены диаграммы направленности фотоприемников. Для всех фотоприем-

ников диаметр чувствительной площадки мезоструктуры оставался неизменным ($D = 0,95$ мм). Оценивался коэффициент увеличения фототока по сравнению с обычным фотоприемником той же площади. Как видно, для всех иммерсионных фотоприемников наблюдалось увеличение чувствительности. Наиболее интересным оказался фотоприемник с линзой из CdTe, диаметром 4,3 мм, при использовании которой достигнуто усиление

сигнала на оси в 2,9 раза. Другой важной характеристикой является угловая апертура фотоприемника. Если фотоприемники используются в устройствах обзора, например, в пожарных извещателях, то желательно иметь широкий угол обзора. Полученные нами значения показали достаточно большие углы $2\beta = 80\text{—}90^\circ$ (по уровню 0,5), способные удовлетворить требованиям обзорных систем.

Таблица

Параметры иммерсионных приемников

Материал линзы	Показатель преломления	Диаметр линзы, мм	Коэффициент усиления	Апертура 2β , град.
Без линзы		-	1,0	115
Оптическое стекло	1.5	8,9	2,0	94
SrTiO ₃	2.21	3,2	2,7	78
CdTe	2.6	4,3	2,9	85

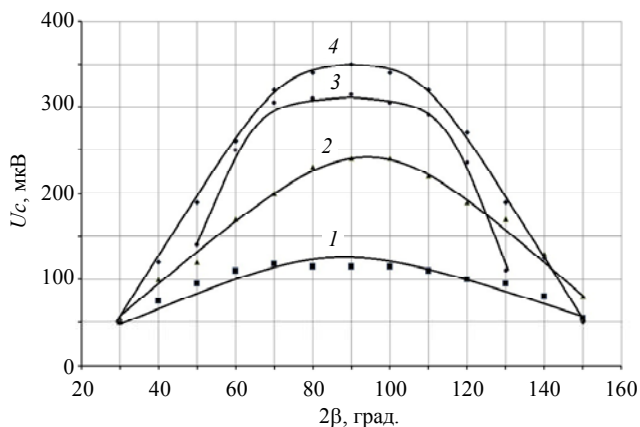


Рис. 2. Диаграммы направленности фотоприемников: кривая 1 — без линзы; 2 — иммерсионная линза — стекло; 3 — SrTiO₃; 4 — CdTe.

На рис. 3 приведена относительная спектральная чувствительность фотоприемников S_i . Поскольку все линзы имели хорошее пропускание в рабочем диапазоне, то спектральные характеристики определялись свойствами гетероструктуры и были аналогичными для всех фотоприемников. Достоинством таких фотоприемников являлось четкое ограничение диапазона спектральной чувствительности как со стороны длинноволнового края (λ''), так и со стороны коротковолнового (λ'). Длинноволновая граница составляла $\lambda'' = 2,24$ мкм (по уровню 0,1). Коротковолновая граница $\lambda' = 1,8$ мкм определялась пропусканием подложки, выполненной из слаболегированного n^+ -GaSb, который играл роль абсорбционного фильтра. Большая толщина подложки обеспечивала глубокое подавление коротковолновой составляющей оптического излучения. Такое качество во многих случаях является полезным, поскольку повышает по-

мехозащищенность фотоприемника от действия коротковолнового видимого света.

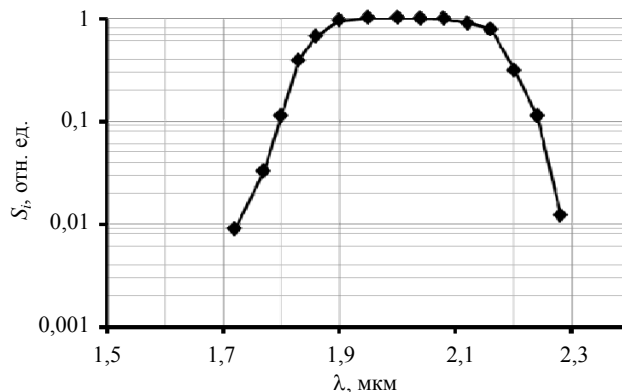


Рис. 3. Относительная спектральная чувствительность фотоприемников S_i .

Заключение

Проведенные исследования показали, что неохлаждаемые иммерсионные фотоприемники на основе гетероструктур InGaAsSb/GaSb, позволяющие в 2—3 раза увеличить токовую чувствительность при широких углах обзора, должны представлять практический интерес и являются во многих случаях оптимальными для спектрального диапазона 1,8—2,3 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Шленский А. А., Лунин Л. С., Ратушный В. И., Корюк А. В., Тараканова Н. Г. // ФТП. 2007. Т. 41. № 11. С. 1389.
2. Андреева Т. В., Гаврушко В. В., Кузюков С. Г., Прошкин Ю. Н., Сапожников А. А., Чупраков А. М., Шленский А. А. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 75.

3. Куницына Е. В., Андреев И. А., Львова Т. В., Яковлев Ю. П. / Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2008). С. 105.

4. Гаврушко В. В., Кузюков С. Г., Прошкин Ю. Н., Сапожников А. А., Чупраков А. М. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 9.

5. Стоянов Н. Д., Михайлова М. П., Андрейчук О. В., Моисеев К. Д., Андреев И. А., Афрайлов М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 4. С. 467.

6. Андреев И. А., Дюделев В. В., Ильинская Н. Д., Конавалов Г. Г., Куницына Е. В., Серебренникова О. Ю., Соколовский Г. С., Яковлев Ю. П. / Тезисы докладов XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2012). С. 122.

7. Амбозьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. — М.: Сов. Радио. 1970.

8. Smith S. D., Crowder J. G., Hardaway H. R. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4651. P. 157.

Immersion photodetectors for the middle infrared range of optical radiation

V. V. Gavruško¹, S. G. Kuzúkov², and Y. N. Proshkin²

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (NovSU)
41 Bolshaya Petersburgskaya str., Veliky Novgorod, 173003, Russia
E-mail: valery.gavrushko@novsu.ru

²Shvabe-Photosystems, Inc.
4a Dnepropetrovsky passage, Moscow, 117545, Russia

Received June 28, 2016

Consideration is given to results of research of photodetectors characteristics for the middle infrared range with immersion lenses from different materials. The objects of research were based on photodiode heterostructures of $In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}/GaSb$ when values $x = 0.18$ $y = 0.17$. A composition of the quadruple compounds provided a work of the sensor without cooling. The heterostructures were received by the LPE method. Shown is a design of the immersion sensor. Assessed was the radiation losses of a lens docking node with a photodiode. For lenses of glass, $SrTiO_3$, $CdTe$, the losses were amounted from 19 to 24 %. Directional characteristics of detectors have been investigated. Magnification of a photocurrent (compared to conventional monochrome image sensor with the same square) had a value from 2 to 2.9. The apertures of photodetectors were 80—90° (according to the level of 0.5). The spectral response range was 1.8—2.24 μm .

PACS: 85.60. Dw

Keywords: photodiode, immersion lens, viewing angle, sensitivity, spectral characteristics.

REFERENCES

1. S. A. Karandashev, B. A. Matveyev, M. A. Remennyi, A. A. Shlenskiy, L. S. Luninof, V. I. Ratushnyy, A. V. Koryuk, and N. G. Tarakanova, *Semiconductors* **41**, 1389 (2007).
2. T. V. Andreeva, V. V. Gawrushko, S. G. Kuzukov, Y. N. Proshkin, A. A. Sapozhnikov, A. M. Zchuprakov, and A. A. Shlenskiy, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 75 (2005).
3. E. V. Kunitsyna, I. A. Andreev, T. V. L'vov, and Y. P. Yakovlev, in *Proc. XX Intern. Conf. Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, 2008). P. 105.
4. V. V. Gavrusko, S. G. Kuzyukov, Y. N. Proshkin, A. A. Sapozhnikov, and A. M. Chuprakov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 9 (2013).
5. N. D. Stoyanov, M. P. Mikhaylov, O. V. Andreychuk, K. D. Moiseev, I. A. Andreev, M. A. Afrailov, and Y. P. Yakovlev, *Semiconductors* **35**, 467 (2001).
6. I. A. Andreev, V. V. Dyudelev, N. D. Ilinskaya, G. G. Konovalov, E. V. Kunitsyna, O. Yu. Serebrennikova, G. S. Sokolovskiy, and Y. P. Yakovlev, in *Proc. XXII Intern. Conf. Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, 2012). P. 122.
7. A. Ambozyak, *Construction and Technology of Semiconductor Photoelectric Devices* (Sov. Radio, Moscow, 1970) [in Russian].
8. S. D. Smith, J. G. Crowder, and H. R. Hardaway, *Proc. SPIE* **4651**, 157 (2002).