

О. А. АБДУЛХАЕВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,
д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз
E-mail: karimov@uzsci.net

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЕВОЙ ДВУХБАРЬЕРНОЙ СТРУКТУРЫ С ЭФФЕКТОМ СМЫКАНИЯ

Приведены результаты исследования тонкобазовой германиевой $p^+ - n - p$ -структуры с эффектом смыкания при различных режимах включения. Экспериментально показано, что в режиме запира-ния $p^+ - n$ -перехода из-за полного обеднения базовой области структура становится аналогом ограничителя напряжения, а в активном режиме при подсветке базовой области приобретает свойства фототранзистора.

Ключевые слова: фотоприемник, обратный ток, эффект смыкания, тонкая база, область объемно-го заряда, фоточувствительность, ограничитель напряжения.

В последнее время широкое распространение получили оптические системы передачи и приема сигналов. Прием оптического сигнала в таких системах осуществляется модулями, основу которых составляет фотоприемник, задающий качество принимаемого сигнала, дальность связи и быстродействие всей системы. При этом, используемые ранее в оптронных схемах простые фоторезисторы стали практически полностью вытесняться различными полупроводниковыми фотоприемниками на основе $p - n$ -перехода, в частности быстродействующими лавинными фотодиодами, фотодиодами $p - i - n$ -типа, а также фотоприемниками с внутренним усилением типа биполярного и полевого транзисторов. Однако их широкое применение требует решения соответствующих проблем.

Для лавинных фотодиодов характерным является «уход» рабочей точки как из-за их разогрева вследствие протекания тока, так и от незначительного колебания рабочего напряжения, поскольку максимальный коэффициент умножения наблюдается в предпробойной области при $V_{\text{раб}} \approx V_{\text{проб}}$. В этом режиме при большой интенсивности освещения концентрация носителей сильно возрастает, и они экранируют область объемного заряда $p - n$ -перехода, вследствие чего снижается напряженность электрического поля в нем, что приводит к уменьшению коэффициента умножения. Проблемой также является необходимость уменьшения туннельных токов до приемлемых значений [1].

В фотодиодах $p - i - n$ -типа для получения высокой фоточувствительности толщину слоя объемного заряда необходимо увеличить, а для обеспечения максимального быстродействия —

уменьшить, т. е. необходим поиск компромиссного варианта. В этом аспекте, как отмечено в [2], перспективными являются исследования, направленные на оптимизацию параметров базовой области и выбор режимов включения фоточувствительных многобарьерных структур [3].

Таким образом, основным требованием, предъявляемым к используемым в оптических системах связи фотоприемникам, является возможность приема оптических сигналов малой интенсивности, минимальный уровень которых определяется фоточувствительностью фотоприемника и темновыми токами. К числу таких фотоприемников можно отнести биполярные фототранзисторы, усиление тока которых больше, чем у обычных фотодиодов, а интегральная чувствительность равна [4; 5, с. 109 — 112]

$$S_{\text{ф}} = S_{\text{фд}} b, \quad (1)$$

где $S_{\text{фд}}$ — токовая чувствительность коллекторно-го перехода транзистора;

b — коэффициент усиления транзистора.

В биполярных транзисторах площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, при этом для получения большего напряжения пробоя концентрация носителей в нем должна быть меньше. Такая асимметрия существенно влияет на фотоприемные свойства транзистора, которые зависят от схемы включения и физической структуры транзистора, что остается малоиспользуемым [6].

Настоящая работа посвящена исследованию фотоэлектрических характеристик полупроводниковой тонкобазовой транзисторной структуры на основе германия.

Экспериментальные образцы и методика эксперимента

Конструкция исследуемой транзисторной структуры на основе германия приведена на **рис. 1**. Базовая область *n*-типа толщиной 1 мкм и площадью 1 мм², образующая коллекторный переход, получена диффузией сурьмы. На части ее поверхности сплавлением индия, создающего диффузионный слой *p*-типа, сформирована сильнолегированная эмиттерная область толщиной 0,5 мкм.

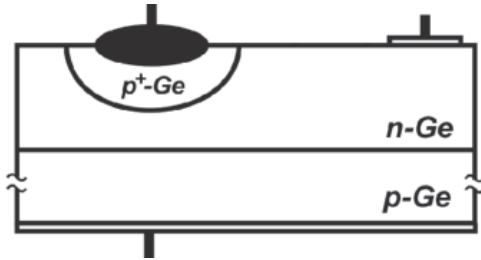


Рис. 1. Диффузионно-сплавная транзисторная *p⁺–n–p*-структура на основе германия

Исследования фотоэлектрических характеристик проводили на основе статических вольт-амперных характеристик (**ВАХ**), измеренных по схеме с общим коллектором. В частности, на переход «коллектор – база» подавали прямое смещающее напряжение от отдельного источника величиной 0,10 и 0,15 В. ВАХ измеряли ламповым вольтметром ВК 7-21А. Подсветку коллекторного перехода осуществляли электрической лампой накаливания (с яркостной температурой нити накаливания $T = 2850$ К). Интенсивность освещения измеряли люксометром Ю116, а вольт-фарадные характеристики (**ВФХ**) – с помощью измерителя емкости Л2-28.

Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из **рис. 2**, в режиме запирания отдельно взятого *p⁺–n*-перехода «база – эмиттер» при увеличении напряжения наблюдается сравнительно плавный рост обратного тока (кривая 1). В то же время, для последовательно соединенного

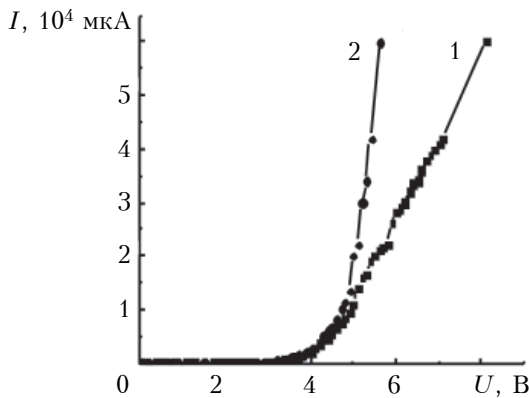


Рис. 2. ВАХ переходов «база – эмиттер» (1) и «коллектор – эмиттер» (2)

с ним коллекторного *p–n*-перехода в режиме прямого смещения ток растет более резко (кривая 2), что можно объяснить эффектом динамического смыкания области объемного заряда эмиттерного перехода с областью объемного заряда коллекторного перехода, когда реализуются условия двойной инжекции носителей в полностью обедненную (безбазовую) область транзистора [7]. В данном режиме этот транзистор можно использовать в качестве низковольтного ограничителя – «стабилизатора» напряжения [8], коэффициент ограничения которого можно определить как

$$Z = \frac{\ln(R_D / R_{\max \text{ огр}}) - \ln(R_D / R_{\max \text{ проб}})}{\ln I_{\text{огр}} - \ln I_{\text{проб}}} = \frac{\ln(R_{\max \text{ проб}} / R_{\max \text{ огр}})}{\ln(I_{\text{огр}} / I_{\text{проб}})}, \quad (2)$$

где R_D – сопротивление по постоянному току; $R_{\max \text{ огр}}$ – максимальное сопротивление ограничения; $R_{\max \text{ проб}}$ – максимальное сопротивление при пробое; $I_{\text{огр}}, I_{\text{проб}}$ – значения тока ограничения и тока при пробое.

Процесс смыкания переходов подтверждается измерениями вольт-фарадной характеристики (**рис. 3**), а именно: в режиме запирания эмиттерного перехода общая емкость уменьшается до некоторого минимального значения при напряжении 2 В, которое сохраняется вплоть до 3,5 В, а затем наблюдается ее постепенный рост. При изменении напряжения в диапазоне

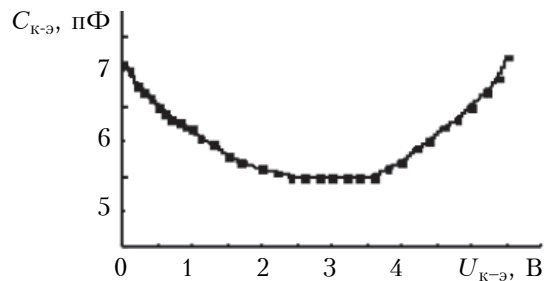


Рис. 3. ВФХ *p⁺–n–p*-структуры в режиме запирания эмиттерного перехода

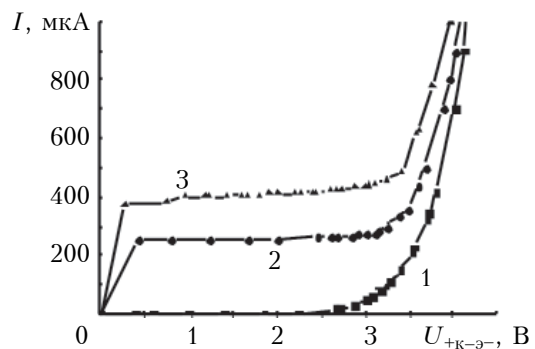


Рис. 4. ВАХ *p⁺–n–p*-структуры в режиме запирания эмиттерного перехода при различных значениях напряжения на переходе «коллектор – база»: 1 – 0 В; 2 – 0,10 В; 3 – 0,15 В

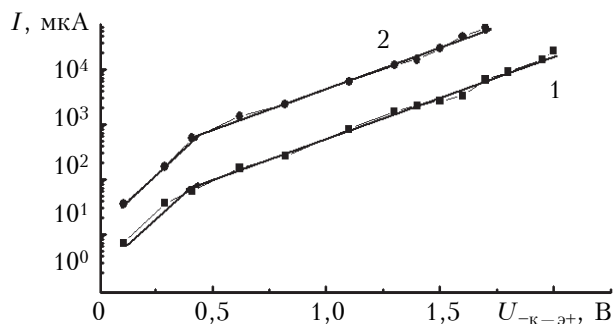


Рис. 5. ВАХ транзисторной структуры при освещенности 50 лк (1) и 3000 лк (2)

2,0–3,5 В емкость, обусловленная смыканием областей объемного заряда, остается практически неизменной, а в дальнейшем за счет возникновения диффузионной емкости эмиттерного перехода наблюдается ее увеличение.

В данном режиме включения при нагрузочном сопротивлении в цепи питания 200 Ом получены вольт-амперные характеристики при отсутствии прямого напряжения на переходе «коллектор – база» и при его наличии. Как видно из рис. 4, при достижении напряжения 4,8 В все кривые сходятся в одной точке, причем в отличие от режима включения с общим эмиттером токи имеют более насыщенный характер, а значит, большее выходное сопротивление. При смене полярности рабочего напряжения, т. е. в режиме включения с общим эмиттером, при отсутствии напряжения в базовой области структура обладает высокой fotocувствительностью. Характер зависимости тока от напряжения такой же, как и в случае смыкания областей объемного заряда коллекторного и эмиттерного переходов, т. е. завершается резким ростом.

Характерным для исследуемого транзистора является то, что при подсветке базовой области интегральным освещением заданной интенсивности (50 и 3000 лк) генерируется световой ток, величина которого по мере увеличения рабочего напряжения существенно возрастает. На рис. 5 видно, что зависимость тока от напряжения экспоненциальная и состоит из двух участков: на первом участке показатель экспоненты равен 4,25, на втором – 10,8, как и в инжекционно-полевом фотодиоде [9]. В интервале напряжений от 0 до 1,7 В токовая чувствительность $S_i^\Phi = I^\Phi / \Phi$ (где I^Φ – фототок, Φ – fotocувствительность) увеличивается до 17 мкА/лк (рис. 6), что в 17 раз больше fotocувствительности фототранзистора ФТГ-5 [10].

Заключение

Проведенные исследования вольт-амперных и световых характеристик тонкобазовой $p^+ - n - p$ -структуры с эффектом смыкания при различных режимах включения показали, что в режиме запирающего $p^+ - n$ -перехода с полным обеднением базовой области в таких структурах так же, как

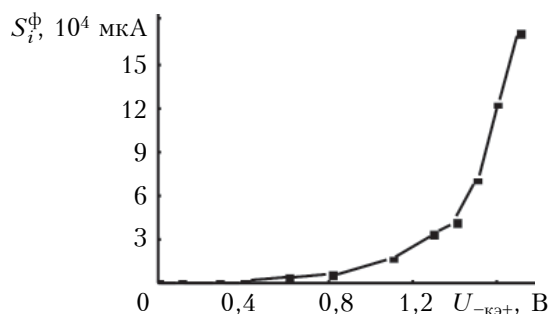


Рис. 6. Зависимости токовой fotocувствительности германиевой $p^+ - n - p$ -структуры от рабочего напряжения

и в ограничителях напряжения, происходит резкий рост тока в узком интервале приращения рабочего напряжения. При подсветке базовая область генерирует фототок, величина которого нелинейно увеличивается с повышением рабочего напряжения, причем с увеличением интенсивности освещения кривая ВАХ смещается в область меньших напряжений. Фоточувствительность тонкобазовой $p^+ - n - p$ -структуры более чем на порядок выше, чем в германиевом биполярном фототранзисторе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nishida K., Taguchi K., Matsumoto Y. InGaAsP heterostructure avalanche photodiodes with high avalanche gain // Appl. Phys. Lett. – 1979. – Vol. 35, N 3. – P. 251–252.
2. Маргулис В.А., Пятаев М.А., Ульянов С.Н. Фототок в квантовом канале с примесью // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 9. – С. 1221–1226.
3. Karimov A. V., Yodgorova D. M. Some features of photocurrent generation in single and multibarrier photodiode structures // Semiconductors. – 2010. – Vol. 44, N 5. – P. 647–652.
4. Шинкаренко В.Г. Фототранзистор. Сигнальные и пороговые характеристики // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 7. – С. 40–64.
5. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Москва: Радио и связь, 1990.
6. Дьяконов В.П. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 49–58.
7. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Арсенид-галлиевые $p^+ - n - p^+$ -структуры с обедняемой базовой областью // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 28–31.
8. Рахматов А.З., Каримов А.В., Скорняков С.П., Ёдгорова Д.М., Абдулхаев О.А. Малогабаритные бескорпусные ограничители напряжения // Компоненты и технологии. – 2011. – № 9. – С. 54–55.
9. Karimov A.V., Yodgorova D.M. An injection-type field-emission photodiode // Radioelectronics and communication systems. – 2006. – N 2. – P. 55–58.
10. Варганян С.П. Оптоэлектронные приборы и устройства в полиграфии. – Москва: Издательство МГУИ, 2000. 187 с. <http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.05 2015 г.

ВИСОКОЧУТЛИВИЙ ФОТОПРИЙМАЧ НА ОСНОВІ ГЕРМАНІЄВОЇ ДВОБАР'ЄРНОЇ СТРУКТУРИ ІЗ ЕФЕКТОМ ЗМИКАННЯ

Наведено результати дослідження тонкобазової германієвої $p^+ - n - p$ -структури з ефектом змикання при різних режимах включення. Експериментально показано, що в режимі замикання $p^+ - n$ -переходу через повне збідніння базовій області структура стає аналогом обмежувача напруги, а в активному режимі при підсвічуванні базової області набуває властивості фототранзистора.

Ключові слова: фотоприймач, зворотний струм, ефект змикання, тонка база, область об'ємного заряду, фоточутливість, обмежувач напруги.

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.4.24
UDC 621.315.592.2:546.681'19

О. А. ABDULKHAEV, D. M. YODGOROVA,
A. V. KARIMOV, S. M. KULIYEV
Uzbekistan, Tashkent, Physical-Technical Institute
of «Physics-Sun» SPA of Uzbekistan Academy of Sciences
E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

HIGHLY SENSITIVE PHOTODETECTOR BASED ON Ge DOUBLE-BARRIER PUNCH-THROUGH STRUCTURE

In recent years, transmission and reception systems of optical signals are widely used. Receiving the optical signal in such systems is carried by photoreceiving modules based on a photodetector, which defines the quality of the received signal, the range and speed of the entire system. However, hitherto used $p-i-n$ - and avalanche photodiodes do not fully meet the growing demands.

The present work is devoted to investigate the photovoltaic characteristics of semiconductor thin base transistor structure based on germanium, which is superior the silicon counterparts by speed and gain.

Investigated $p^+ - n - p$ -structures were obtained by diffusion of antimony onto the substrate of p -type germanium to a depth of 1 micron and alloying of indium to the part of its surface which creates diffusion layer of p^+ -type and with thickness of 0,5 microns.

Experiments have shown that the reverse biasing of a single $p^+ - n$ -emitter-base junction leads to a smooth increase in reverse current, at the same time when it is connected in series to forward biased collector $p - n$ -junction there is a sharp increase in the current by voltage, giving properties of voltage surge suppressor. This behavior of the current-voltage characteristics can be explained by the punch-through effect when the space charge regions of the emitter junction and the space charge region of collector junction touch each other and the conditions are realized for double carrier injection into a fully depleted region of the transistor. At the same time giving small fixed voltages 0,1–0,15 V to the collector-base junction the output static characteristics can be received with an operating voltage of 3–3,5 V.

A characteristic feature of the investigated transistor is that when the base region under illumination by integrated light intensity (50 and 3000 lux) light current appears, whose magnitude with the increase of operating voltage (up to 1.7 V) increases nonlinearly, resulting in increased current photosensitivity up to 17 $\mu\text{A}/\text{lux}$, which is one and a half orders of magnitude greater than photosensitivity of germanium phototransistor "ФТГ-5".

Keywords: photodetector, reverse current, punch-through effect, thin base, space charge region, photosensitivity, voltage surge suppressor.

REFERENCES

1. Nishida K., Taguchi K., Matsumoto Y. InGaAsP heterostructure avalanche photodiodes with high avalanche gain // *Applied Physics Letters*. 1979, vol. 35, no 3, pp. 251-252. DOI: 10.1063/1.91089.
2. Margulis V. A., Pyataev M. A., Ulyanov S. N. [Photocurrent in a quantum channel with an impurity]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2013, vol. 47, no 9, pp. 1209-1214. DOI: 10.1134/S1063782613090145. (Rus)
3. Karimov A. V., Yodgorova D. M. [Some features of photocurrent generation in single and multibarrier photodiode structures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2010, vol. 44, no 5, pp. 647-652. – DOI: 10.1134/S1063782610050179. (Rus)
4. Shinkarenko V. G. [Phototransistor. Signal and threshold characteristics]. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*. 2009, vol. 14, no 7, pp. 40-64. (Rus)

5. Vikulin I. M., Stafeev V. I. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, pp. 109-112. (Rus)
6. D'yakonov V. P. [Avalanche transistors yesterday, today and tomorrow]. *Komponenty i tekhnologii*. 2010, no 8, pp. 49-58. (Rus)
7. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. GaAs $p^+ - n - p^+$ structures with depleted base area]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2009, no 3, pp. 28-31. (Rus)
8. Rakhmatov A. Z., Karimov A. V., Skornyakov S. P., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. [Small frameless voltage limiters]. *Komponenty i tekhnologii*. 2011, no 9, pp. 54-55. (Rus)
9. Karimov A. V., Yodgorova D. M. [An injection-type field-emission photodiode]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika*. 2006, vol. 49, no 2, pp. 55-57. (Rus)
10. Vartanyan S. P. *Optoelektronnyye pribory i ustroystva v poligrafii* [Optoelectronic devices and devices in the printing industry]. Moscow: Izdatel'stvo MGUP, 2000. (Rus)