

УДК 621.3.049.77

Расчет фотоэлектрических характеристик фотодиодных матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 2,0—3,5 мкм на основе арсенида индия

А. В. Артамонов, В. П. Астахов, В. В. Карпов, В. Ф. Чишко, В. Л. Левшин

Проведен расчет температурных зависимостей темнового и фонового токов p^+ -переходов с размерами 20×20 мкм, обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности $D_{\lambda \max}^$, а также пороговой мощности P и времени накопления предполагаемого МФПУ формата 640×512 элементов. Показано, что улучшение пороговых параметров при температурах кристалла $T \leq 100$ К возможно за счет снижения фонового тока, а при $T > 100$ К — за счет снижения темнового тока p^+ -переходов.*

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz, 42.82.Fw, 07.50.Qx

Ключевые слова: расчет, матричное фотоприемное устройство, формат, обнаружительная способность, пороговая мощность.

Введение

Для ряда космических задач, в том числе для дистанционного зондирования Земли, важнейшую роль играет информация, полученная с помощью фотодиодных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) спектрального диапазона 2,0—3,5 мкм. Такие МФПУ востребованы также для двух- и многоспектральных систем пеленгации. Прием излучения в данном диапазоне может быть обеспечен фотодиодами на основе одного из трех полупроводниковых материалов, а именно, арсенида индия, антимонида индия и твердого раствора CdTe-HgTe (КРТ). Как правило, лучшие фотоэлектрические параметры при одинаковых условиях охлаждения могут быть достигнуты на фотодиодах из InAs.

В настоящее время отсутствует информация о наличии в России и за рубежом освоённой опытной или серийной технологии изготовления фотодиодных МФПУ на основе этого материала. Однако известны результаты исследования экспериментальных образцов планарных фотодиодов в составе 64-элементных линеек с размерами элемен-

тов 150×150 мкм и шагом 180 мкм [1]. Основные элементы этой технологии включают локальную имплантацию ионов бериллия в исходный кристалл n -типа проводимости и импульсный фотонный отжиг для создания планарных площадок p^+ -типа, защиту и пассивацию поверхности анодной окисной пленкой и поверхностной пленкой Si_3N_4 , а также создание локальных контактов системы Cr+Au.

В данной работе проведен расчет основных фотоэлектрических характеристик предполагаемого фотодиодного МФПУ формата 640×512 элементов с шагом 20 мкм на основе фотоэлектрических характеристик, представленных в работе [1] для отдельных фотодиодных площадок.

Расчет

Предполагалось, что перевернутый утоненный фотодиодный матричный кристалл с планарными p^+ - n -переходами в качестве площадок состыкован при помощи индиевых микростолбиков с кремниевым мультиплексором с прямой токовой инжекцией, имеющим емкость накопления 0,3 пФ. При этом кристалл облучается со стороны, противоположной p^+ -слою, однако сигналы элементов соответствуют сигналам, получаемым при облучении через p^+ -слой. Такая возможность подтверждена на модельных фотодиодных кристаллах из InSb [2].

На рис. 1 представлены температурные зависимости дифференциального сопротивления R_0 при нулевом смещении фотодиодных площадок размером 150×150 мкм (экспериментальные данные работы [1]) и 20×20 мкм, рассчитанные по данным работы [1].

Артамонов Антон Вячеславович, инженер.

Астахов Владимир Петрович, заместитель начальника ЦКБ.

Карпов Владимир Владимирович, главный конструктор.

Чишко Владимир Федорович, начальник отдела.

Московский завод "САПФИР"

Тел. (495) 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр., 4а

Левшин Владимир Львович, старший научный сотрудник.

НПП "Геофизика-Космос".

Россия, 107497, Москва, ул. Иркутская, 11, корп. 1.

Статья поступила в редакцию 20 мая 2011 г.

© Артамонов А. В., Астахов В. П., Карпов В. В., Чишко В. Ф., Левшин В. Л., 2011

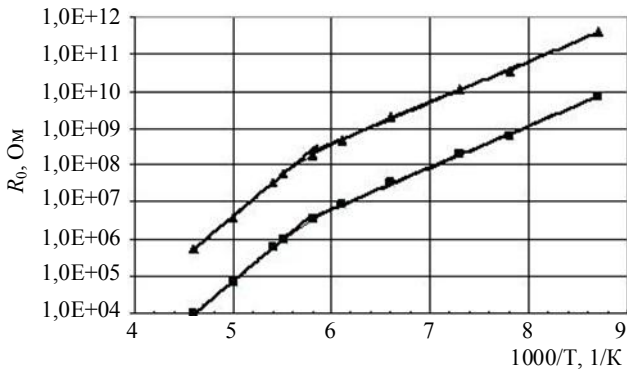


Рис. 1. Температурные зависимости дифференциального сопротивления при нулевом смещении R_0 для площадки размером 150×150 мкм² (■ — данные работы [1]) и для площадки размером 20×20 мкм² (▲ — результаты перерасчета данных работы [1])

Из данных этого рисунка следует, что энергия активации темного тока составляет $W \cong E_g/2$ (E_g — ширина запрещенной зоны InAs) при $T \leq 160$ К и $W \cong E_g$ при $T > 160$ К. Это означает, что в первом случае вольт-амперная характеристика (ВАХ) p^+ - n -переходов соответствует теории Шокли—Нойса—Саа, а во втором случае — диодной теории.

Расчет температурной зависимости темного тока площадки I_t проводился на основе данных рис. 1 и в предположении, что I_t обусловлен током насыщения I_s в соответствии с выражением:

$$I_t = I_s = \beta kT/qR_0, \quad (1)$$

где β — коэффициент, учитывающий механизм генерации темного тока. В соответствии с теорией Шокли—Нойса—Саа $\beta = 2$ (в нашем случае при $T \leq 160$ К), а в соответствии с диодной теорией $\beta = 1$ (в нашем случае при $T > 160$ К), k — постоянная Больцмана, q — элементарный заряд.

Фоновый ток площадки рассчитывался по формуле:

$$I_\phi = S_{i\lambda_{\max}} \cdot A \cdot \Phi_{2\pi} \cdot \sin^2\theta, \quad (2)$$

где $S_{i\lambda_{\max}}$ — токовая чувствительность в максимуме спектральной чувствительности, которая по данным [1] слабо зависит от температуры и составляет, в среднем, $S_{i\lambda_{\max}} = 1,65$ А/Вт, A — площадь p^+ - n -перехода, $\Phi_{2\pi} = 6 \cdot 10^{-9}$ Вт/см² — мощность фонового излучения ($T_{\text{ЛНТ}} = 240$ К) в апертурном угле $2\theta = 180^\circ$.

Результаты расчета температурных зависимостей I_s , I_ϕ и суммарного тока $I_\Sigma = I_t + I_\phi$ представлены на рис. 2.

Расчет температурной зависимости обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности $D_{\lambda_{\max}}^*$ проводился в соответствии с выражением:

$$D_{\lambda_{\max}}^* = D_t^* \cdot D_\phi^* / (D_t^{*2} + D_\phi^{*2})^{1/2}, \quad (3)$$

где D_t^* и D_ϕ^* — удельные обнаружительные способности в максимуме спектральной чувствительности, определяемые, соответственно, флуктуациями темного или фонового тока и рассчитанные с использованием данных рис. 2 по формуле:

$$D_{t(\phi)}^* = \frac{S_{i\lambda_{\max}} \sqrt{A}}{\sqrt{2qI_{t(\phi)}}}. \quad (4)$$

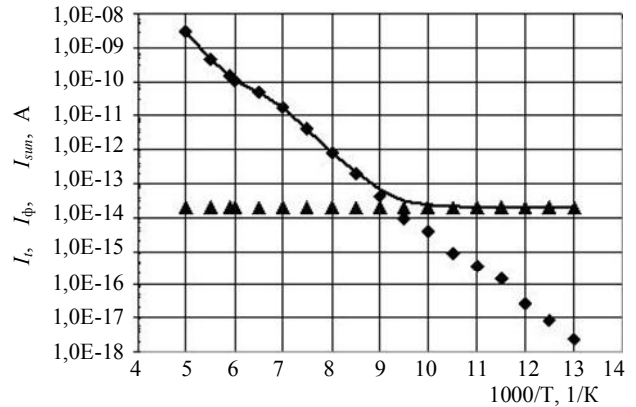


Рис. 2. Температурные зависимости темного тока I_t (■), фонового тока I_ϕ (▲) и суммарного тока I_Σ (сплошная линия)

На рис. 3 приведены результаты этих расчетов.

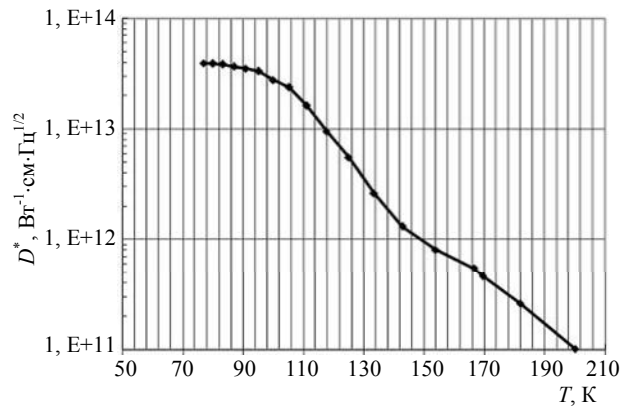


Рис. 3. Температурная зависимость удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности

Расчет пороговой мощности проводился в соответствии с выражением (5) с использованием данных рис. 3.

$$P = A^{1/2} / \{(2T_n)^{1/2} \cdot D_{\lambda_{\max}}^*\}, \quad (5)$$

где T_n — время накопления.

Время накопления T_n вычислялось с использованием данных рис. 2 из соотношения:

$$T_n = C_n \cdot U / I_\Sigma, \quad (6)$$

где C_n — емкость накопления (0,3 пФ); U — напряжение разряда емкости накопления (в расчете

принято $U = 2,5$ В, что соответствует половине полного напряжения на емкости, когда обеспечивается стандартное требование по динамическому диапазону — 60 дБ).

Результаты расчета температурной зависимости пороговой мощности и времени накопления представлены на рис. 4.

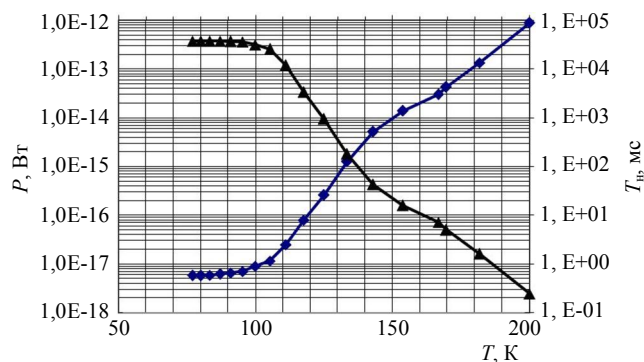


Рис. 4. Температурные зависимости пороговой мощности P на элемент (■) и времени накопления T_n (▲)

Итоговые результаты

Из полученных данных следует, что фотодиодные МФПУ с площадками размером 20×20 мкм на основе фоточувствительных кристаллов из InAs, изготовленных по технологии работы [1], при оптимальных временах накопления могут иметь следующие пороговые фотоэлектрические параметры (см. таблицу) при наиболее важных для практики температурах T охлаждаемого кристалла:

T, K	80	100	120	150	170	200
$D_{\lambda, \max}^*$, $Вт^{-1} см \cdot Гц^{1/2}$	$4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{12}$	$9 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	10^{11}
$P_{\lambda, \max}$, Вт	$6 \cdot 10^{-18}$	10^{-17}	10^{-16}	10^{-14}	$5 \cdot 10^{-14}$	10^{-12}
τ_n (не менее), с	35	30	2,5	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Отметим, что при $T \leq 100$ К пороговые параметры ограничены фоновым током, а при $T > 100$ К — темновым током, который в соответствии с результатами работы [3], полученными на модельном материале — InSb, может быть уменьшен за счет применения исходного материала с увеличенным уровнем легирования.

Заключение

На основе опубликованных экспериментальных результатов исследований фотоэлектрических характеристик планарных малоразмерных фотодиодов $p^+ - n$ -типа, изготовленных на монокристаллах InAs методом локальной имплантации ионов бериллия, проведен расчет температурных зависимостей темнового и фонового токов $p^+ - n$ -переходов с размерами 20×20 мкм, обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности $D_{\lambda, \max}^*$, а также пороговой мощности P и времени накопления предполагаемого МФПУ формата 640×512 элементов с емкостью накопления $0,3$ пФ и при напряжении разряда емкости накопления $2,5$ В. Показано, что улучшение пороговых параметров при температурах кристалла $T \leq 100$ К возможно за счет снижения фонового тока, а при $T > 100$ К — за счет снижения темнового тока $p^+ - n$ -переходов.

При этом предполагалось, что данные, полученные при облучении фоточувствительного кристалла со стороны p^+ -слоя, соответствуют данным, получаемым при облучении обратной стороны кристалла.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей практической разработки МФПУ на базе фотодиодов из InAs.

Литература

1. Астахов В. П., Данилов Ю. А., Дудкин В. Ф., Сидорова Г. Ю., Таубкин И. И., Эскин Ю. М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 3. С. 1.

2. Астахов В. П., Карнов В. В., Крапухин В. В., Чижко В. Ф., Шленский А. А. Планарные фотодиоды с эффектом Мосса — Бурштейна на основе структур из InSb. // Тезисы докладов XXI междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике. Москва. 2010.

3. Астахов В. П., Карнов В. В. Особенности фотодиодов на основе "низкоомного" антимонида индия. // Материалы докладов междунар. науч.-техн. семинара "Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах". Москва. 2004.

Calculation of photoelectric characteristics of the 2.0—3.5 μm FPA on basis of the InAs photodiodes

A. V. Artamonov, V. P. Astakhov, V. V. Karpov, V. F. Chishko

Moscovskiy Zavod "Sapfir",
4a Dnepropetovsk av., Moscow, 117545, Russia
E-mail: ko-ckb@mail.ru

V. L. Levshin

Geofizika-Cosmos R&P Plant, Moscow, Russia

Calculation of photoelectric characteristics of the 2.0—3.5 μm FPA on basis of the InAs photodiodes has been made. The hypothetical FPA has the 640×512 format and 20×20 μm elements.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz, 42.82.Fw, 07.50.Qx

Keywords: calculation, focal plane array, format, detectivity, threshold power.

Bibliography — 3 references.

Received May 20, 2011