

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, У. М. БУЗРУКОВ,
к. ф.-м. н. М. А. МИРДЖАЛИЛОВА, Ш. Ш. БОЛТАЕВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика-Солнце»
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
14.11.2005 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОФОТОТЕРМИНАЛА

Рассмотренная конструкция микрофототерминала может использоваться для изготовления матриц фотовольтаических элементов или фотоприемных устройств с высокой вольтовой чувствительностью.

Для получения большого выходного сигнала с фотоэлектрических приборов в фотогальваническом или фотоприемном режимах возникает необходимость коммутации дискретных элементов в единую цепочку. Решение этой проблемы может быть осуществлено непосредственным электрическим соединением одного элемента с другим или физико-технологическим путем, что предусматривает разработку твердотельных матричных фотопреобразователей и фотоприемников. Матрицу получают путем соединения последовательно расположенных фотопреобразователей — светочувствительных диодов — через металлические шины, соединяющие омические контакты области одного типа проводимости с областью другого типа следующего элемента. При координатном освещении или при освещении всей поверхности невозможно получить большой выходной сигнал из-за потерь на затененных элементах и за счет различия параметров элементов [1].

Авторы работы [2] с целью перекодировки двумерного оптического изображения в систему электрических сигналов создали матрицу фотодиодно-диодной структуры типа «сэндвич», которая выполнялась на основе трехслойной гетероструктуры с обратновключенными переходами $nCdS-pCdTe-nCdS$ площадью 1 мм^2 . Один элемент с другим соединялся горизонтальными и вертикальными шинами.

В этом аспекте представляет интерес конструкция фотодиодно-диодной структуры, которая обеспечивает сохранение выходного сигнала как фотопреобразователя, так и фотодиода. Здесь светочувствительный и темновой диоды выполнены в отдельности на слое первого типа проводимости в виде двух изолированных областей [3].

Контактные площадки выполнены таким образом, что каждый предыдущий элемент соединяется со следующим с одновременной блокировкой темновым диодом (рис. 1). Тогда световое излучение, падающее на любой из светочувствительных диодов, без

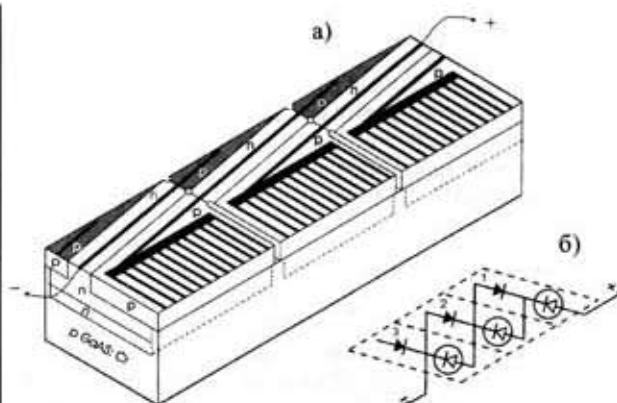


Рис. 1. Общий вид матрицы фотоэлектрического генератора (а) и его эквивалентная схема (б)

потерь будет вызывать фото-эдс на выходе, т. е. полезный ток в затененных участках будет проходить через блокирующие диоды. В результате потери в матрице, по сравнению с последовательным соединением дискретных фотопреобразователей, должны уменьшиться с 40% [1] до 20% за счет исключения потерь в межсоединениях и разности параметров каждого элемента.

В другом случае, за счет возникновения шунтирующего проводящего слоя под диэлектрическим слоем шины, соединяющей один элемент с другим, выходной сигнал уменьшился на 33% по сравнению с дискретным элементом [1].

Матрица состоит из нескольких блокирующих и светочувствительных диодов, соединенных, как показано на рис. 1. Дискретную часть предлагаемой конструкции — отдельный блокирующий диод с последовательно соединенным встречным светочувствительным диодом — мы назвали микрофототерминалом [4]. Толщина его активной области n -типа составляет $2-4\text{ мкм}$, а диффузионный слой p -типа и того меньше — $0,2-1\text{ мкм}$. Изучение свойств дискретной части фотоэлектрического генератора [3] с выполненными в едином технологическом процессе темновым диодным и световым фотодиодным $p-n$ -переходами (рис. 1, а, ячейки 1), позволит выявить его функциональные возможности, преимущества и недостатки.

В настоящей работе приводятся результаты исследования фотодиодно-диодной структуры на основе арсенида галлия в фотогальваническом и фотоприемном режимах.

Исследуемая структура содержит светочувствительный элемент большой площади (16 мм^2) и темновой диод (5 мм^2), сформированные на единой подложке (рис. 2). На поверхности арсенида галлия n -типа проводимости выращивается эпитаксиальный слой n -типа с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 4 мкм. На поверхность слоя избирательно наносится окисный слой кремния — таким образом, что открытыми остаются две площадки — одна для темнового, другая для светочувствительного диодов. Затем из газовой фазы осуществляют диффузию цинка до уровня концентрации $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и таким образом одновременно получают отдельные друг от друга два $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}$ -перехода, соединенных между собой через эпитаксиальный слой $n\text{GaAs}$. Омические контактные площадки получают напылением в вакууме сплава $\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$ через Ш-образную маску на светочувствительный диод, а на поверхность темнового диода — сплошного слоя этого же сплава и сверху Ni .

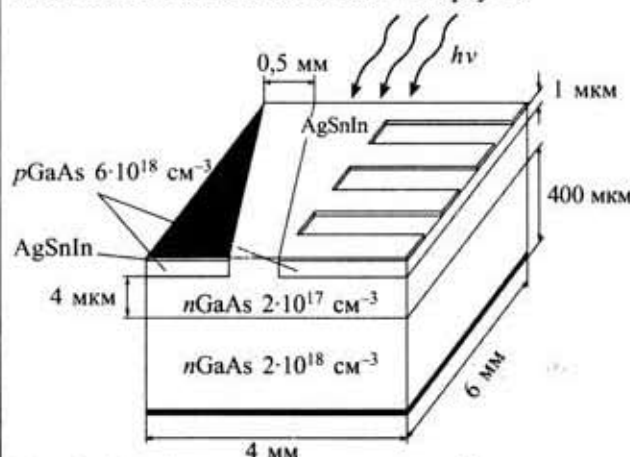


Рис. 2. Общий вид исследуемого микрофототерминала

Для исследования параметров микрофототерминала использовали блок-схему рис. 3. Фотогальванический режим получали путем отключения источника питания тумблером ТЗ, при этом переключением тумблера Т2 снимались нагрузочные характеристики светочувствительного диода ($n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$) как в отдельности, так и с последовательно соединенным с ним темновым диодом ($p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$).

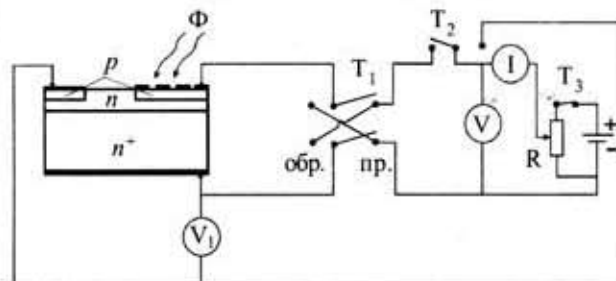


Рис. 3. Принципиальная схема установки для измерений

Сравнение нагрузочных характеристик отдельной фотодиодной и диодно-фотодиодной структур показывает, что в фотогальваническом режиме фототок короткого замыкания претерпевает небольшие изменения (рис. 4). Его величина с 1,794 мА уменьшается до 1,68 мА при диодно-фотодиодном включении.

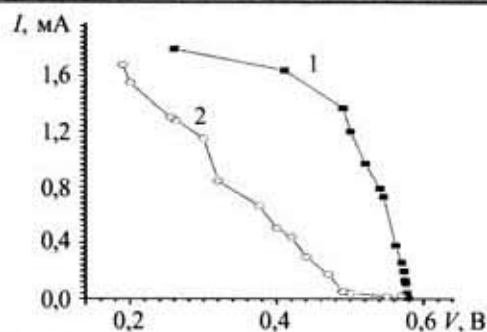


Рис. 4. Нагрузочные характеристики отдельной фотодиодной (1) и диодно-фотодиодной структуры (2)

Здесь необходимо отметить, что сопротивление темнового диода в режиме короткого замыкания, по расчетным данным, составляет 200 Ом.

Рассчитанные потери на основе нагрузочной характеристики без светочувствительного диода, подключаемого к темновому диоду, составили 6,3%.

При коммутации, т. е. при подключении второй и третьей ячеек (рис. 1), блокирующий темновой диод тоже будет нагружен на светочувствительный фотодиод, т. е. ток в цепи увеличится. Кроме того, необходимо исключить сопротивление амперметра, выступающего как дополнительное нагрузочное сопротивление.

Возможность создания матрицы из светочувствительного и блокирующего диодов определяется, прежде всего, воспроизводимостью и надежностью принципа коммутации дискретных элементов. С этой точки зрения важным является то, что все коммутируемые элементы исследуемой матрицы выполняются в едином процессе. В принципе, за счет простоты конструкции и возможности упрощенного соединения элементов рассмотренный микрофототерминал может быть использован для создания на его основе матрицы.

В фотодиодно-диодной структуре, используемой для обработки световых сигналов, темновые и световые параметры при данном рабочем напряжении должны существенно различаться [2]. Кроме того, темновые и световые характеристики не должны иметь каких-либо аномалий, т. е. изменений механизмов токообразования.

Фотоприемный режим создается при подаче напряжения положительной полярности к p -области ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}$ -структуры и отрицательной полярности к p -области $n\text{GaAs}-p\text{GaAs}$ -($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)-структуры. Параметры светочувствительного ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-\text{Sn}$ -диода исследовались при подаче прямого и обратного напряжения к верхнему контакту ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$), с одной стороны, и к сплошному нижнему контакту из Sn , с другой стороны, при переключении тумблера Т₁ (рис. 3). Освещение осуществлялось от интегрального источника с максимумом длины волны $\lambda=0,55 \text{ мкм}$.

На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики фотодиодной части ($\text{Ag}+\text{Sn}+\text{In}$)- $p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-\text{Sn}$ -перехода. Видно, что в темноте прямой ток изменяется в зависимости от напряжения по экспоненциальному закону с коэффициентом неидеальности

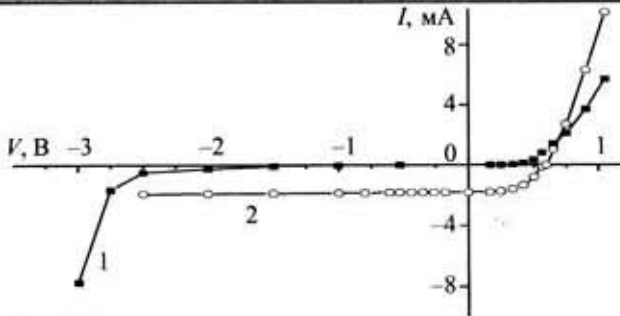


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики светочувствительного диода в темноте (1) и при освещении (2)

$n=2,71$, а обратный ток — по степенному закону с показателем степени $\gamma=0,85$ [5], что обусловлено генерационно-рекомбинационными процессами в слое объемного заряда p - n -перехода.

При освещении в прямом направлении возникает вентильная фотоздс с напряжением холостого хода, определяемым точкой пересечения кривой 2 с осью абсцисс ($V_{xx}=0,6$ В), и величиной тока короткого замыкания, определяемой точкой пересечения с осью ординат ($I_{кз}=1,8$ мА). При освещении прямое сопротивление p - n -перехода уменьшается. В обратном направлении с увеличением приложенного напряжения вплоть до 2,5 В фототок (разность светового и темнового значений) сохраняется на одном уровне.

Как показали исследования полученной фотодиодно-диодной ($Ag+Sn+In$)- $pGaAs$ - $nGaAs$ - $pGaAs$ - $(Ag+Sn+In)Ni$ -структуры, в фотоприемном режиме (при подключении источника напряжения между планарными контактами $Ag+Sn+In$ и Ni тумблер T_2 соединяет «+» источника питания с p -областью темнового диода, а тумблер T_1 находится в положении «обр.» — см. рис. 3) происходит перераспределение прикладываемого напряжения между темновым диодом и фотодиодом. При этом фотодиод по отношению к прикладываемому напряжению включен в обратном запирающем направлении, а темновой диод — в прямом («пр.»).

В целом микрофототерминал представляет собой двухбарьерную структуру на основе прямовключенных p - n -переходов. Поэтому прикладываемое извне напряжение перераспределяется между переходами таким образом, что мы можем измерить напряжение, падающее в темновом диоде:

$$V_{p-n-p}^{общ} = V_{пр}^{TD} + V_{обр}^{FD} \quad (1)$$

Напряжение прикладываемое $V_{p-n-p}^{общ}$ и падающее на темновом диоде $V_{пр}^{TD}$ измеряются вольтметрами, а падающее на фотодиоде $V_{обр}^{FD}$ вычисляется из (1).

Значения падающих на соответствующих переходах напряжений и толщины слоя обеднения запираемого фотодиода W^{p-n} в зависимости от общего напряжения в исследованном диапазоне приведены в таблице.

Как видно из таблицы, основная часть напряжения падает на запираемом фотодиоде, увеличивая толщину слоя объемного заряда:

$$W^{p-n} = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 (N_p + N_n)(V_k + V_{2(обр.)})}{q N_p N_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$V_{p-n-p}^{общ}$	В темноте			При освещении		
	$V_{пр}^{TD}$, В	$V_{обр}^{FD}$, В	W^{p-n} , см	$V_{пр}^{TD}$, В	$V_{обр}^{FD}$, В	W^{p-n} , см
—	—	—	0,0000089	—	—	—
3,5	—	—	—	0,32	3,18	0,0000167
4	0,25	3,75	0,0000178	0,35	3,65	0,0000176
4,5	0,28	4,22	0,0000186	0,4	4,1	0,0000184
5	0,3	4,7	0,0000194	0,41	4,59	0,0000192
5,5	0,34	5,16	0,00002	0,43	5,07	0,0000199
6	0,4	5,6	0,000021	0,48	5,52	0,0000207
6,5	0,45	6,05	0,0000215	0,52	5,98	0,0000214
7	0,53	6,47	0,0000221	—	—	—

где ϵ, ϵ_0 — диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума, соответственно;

$N_p=6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ — концентрация носителей в диффузионном слое p -типа;

$N_n=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — концентрация носителей в эпитаксиальном слое n -типа проводимости;

V_k — контактная разность потенциалов p - n -перехода:

$$V_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_p N_n}{n_i^2} = 1,27 \text{ В}.$$

Значение толщины слоя объемного заряда запираемого p - n -перехода фотодиода в темноте и при освещении изменяется по одному и тому же закону. Отсюда должно следовать, что если под воздействием света фотоносители генерируются в слое объемного заряда, то с увеличением его толщины фототок должен увеличиваться. Однако в данном случае наблюдается постоянство величины фототока. Очевидно, генерация носителей осуществляется в p -области на глубине диффузионной длины неосновных носителей L_p . Тогда фототок в запираемом переходе будет определяться выражением [6, с. 56]

$$I_\phi = qS(\Delta p/\tau_n)d, \quad (3)$$

где S — площадь p - n -перехода;

Δp — концентрация генерированных светом носителей;

τ_n — время жизни неосновных носителей;

d — толщина фронтального слоя p -области.

В данном случае, т. к. $d \approx L_p$, фототок будет определяться только интенсивностью света, и вольт-амперная характеристика будет определяться выражением

$$-I = (I_0 + I^\phi) = \frac{qn_i W}{2\tau_{n,p}} + qS(\Delta p/\tau_n)d, \quad (4)$$

где I_0 — темновой ток насыщения;

n_i — собственная концентрация носителей;

W — толщина слоя объемного заряда.

На рис. 6 видно, что величина обратного тока в темноте и при освещении возрастает по одному и тому же закону, что позволяет получить управляемый рабочим напряжением выходной сигнал. Величина этого сигнала (разность темнового и светового напряжения для заданного тока) по сравнению с диодным включением увеличивается в два раза, а фототок (разность темнового и светового тока для заданного напряжения) остается на том же уровне.

Таким образом, фотоэлектрические свойства светочувствительной $nGaAs$ - $pGaAs$ -структуры при фотодиодно-диодном включении $pGaAs$ - $nGaAs$ - $pGaAs$

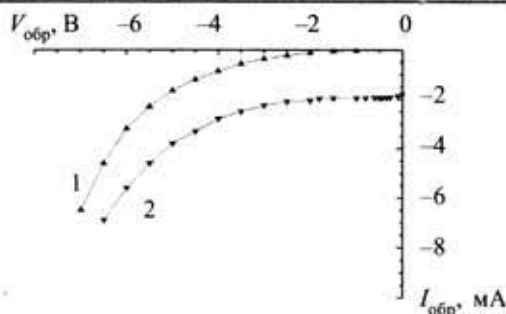


Рис. 6. Обратные ВАХ фотодиодно-диодной структуры: 1 — темновая; 2 — световая

в режиме запирающего не только сохраняются, но и улучшаются. В частности, если токовая фоточувствительность

$$S_i^{\Phi} = \frac{I^{\Phi} - I'}{\Phi} = \frac{I^{\Phi}}{\Phi} \quad (5)$$

(Φ — освещенность) не изменяется, то вольтовая фоточувствительность

$$S_v^{\Phi} = \frac{V^{\Phi} - V^{\text{тн}}}{\Phi} = \frac{V^{\Phi}}{\Phi} \quad (6)$$

возрастает в два раза за счет увеличения фотонапряжения V^{Φ} с 2,5 В до 5 В.

Так, токовая (вольтовая) фоточувствительность диодной структуры определяется отношением вырабатываемого фототока (фотонапряжения) к падающей световой мощности $S_i^{\Phi} = I^{\Phi} / (E_{\text{лк}} \cdot S_{\text{м}}^2)$. Здесь $E_{\text{лк}} \cdot S_{\text{м}}^2 = \Phi_{\text{лм}}$ ($E_{\text{лк}}$ — освещенность фотоприемной поверхности, лк; $S_{\text{м}}^2$ — площадь фотоприемной поверхности, м²; $\Phi_{\text{лм}}$ — мощность падающего светового потока, лм). Для интегрального света с максимумом длины волны 0,55 мкм $1 \text{ лм} = 0,0015 \text{ Вт}$ [7, с. 52—56].

Фототок при заданной освещенности $\Phi = 10^3 \text{ лк}$ во всем диапазоне напряжений, начиная от нуля, равен $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$. Максимальное значение фотонапряжения в окрестности 5 В составляет 5,05 В, а затем уменьшается до 1,3 В при напряжении 5,95 В (рис. 7).

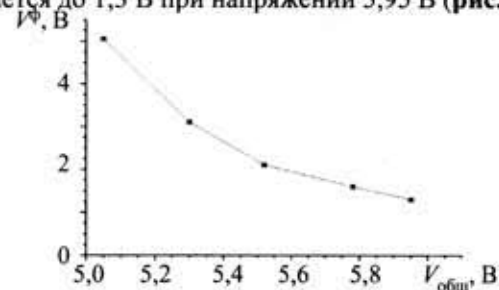


Рис. 7. Зависимость фотонапряжения от прикладываемого напряжения

При площади светочувствительной структуры 16 мм^2 токовая и вольтовая фоточувствительности соответственно составят:

$$S_i^{\Phi} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{10000 \cdot 0,000016 \text{ лк} \cdot \text{м}^2} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,16 \text{ лм}} =$$

$$= \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,0015 \cdot 0,16 \text{ Вт}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,00024 \text{ Вт}} = 0,75 \text{ А/Вт};$$

$$S_v^{\Phi} = \frac{5,05 \text{ В}}{0,00024 \text{ Вт}} = 21041 \text{ В/Вт}.$$

(При рабочем напряжении 5,95 В S_v^{Φ} уменьшается до 5416 В/Вт.)

Таким образом, фотодиодно-диодная структура с фронтальным диффузионным p -слоем, толщина которого сравнима с диффузионной длиной, обладает зависимой от прикладываемого напряжения высокой вольтовой фоточувствительностью, имеющей максимум ($2 \cdot 10^4 \text{ В/Вт}$), в то время как токовая фоточувствительность остается неизменной [8; 9, с. 193—197] ($S_i^{\Phi} \approx 0,75 \text{ А/Вт}$).

Заключение

Исследованы фотоэлектрические параметры фотодиодно-диодной (Ag+Sn+In)— $p\text{GaAs}$ — $n\text{GaAs}$ — $p\text{GaAs}$ —(Ag+Sn+In)Ni-структуры, состоящей из встречно-соединенных фото- и темнового диода, в фотогальваническом и фотоприемном режимах. Показано, что даже при последовательно соединенном встречном темновом диоде фотовольтаические параметры микрофототерминала подвержены незначительным изменениям, а фотоприемные свойства при этом улучшаются. Простота конструкции и возможность упрощенного соединения каждого элемента с последующим делают перспективным использование микрофототерминала для создания на его основе матриц с малыми потерями полезного сигнала на межсоединениях и увеличения плотности упаковки. Высокая вольтовая фоточувствительность, управляемая рабочим напряжением, при неизменной токовой фоточувствительности делает возможным использование фотодиодно-диодной структуры для обработки световых сигналов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев В. М., Егоров Б. В., Лантратов В. М., Сулима О. В. Интегральная солнечная батарея на основе гетерофотоэлементов // Тезисы докладов Всесоюз. конф. «Пути использования солнечной энергии». — Черногоровка. — 1981. — С. 12.
2. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника / Под ред. Э. И. Адировича. — Ташкент: ФАН, 1972.
3. А. с. 1106367 СССР. Полупроводниковый фотоэлектрический генератор / С. А. Азимов, А. В. Каримов — 01.04.84.
4. Каримов А. В. Микрофототерминалы для гелиоэнергетических систем // Гелиотехника. — 1994. — № 6. — С. 14—16.
5. Каримов А. В., Конакова Р. В., Ёдгорова Д. М. и др. Влияние морфологических неоднородностей на механизмы токопереноса в солнечных элементах на основе гетероструктур // Петербургский журнал электроники. — 2004. — № 4. — С. 25—30.
6. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М. Радио и связь, 1990.
7. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: ГИИТЛ, 1957.
8. Азимов С. А., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Каримов А. В., Нирзабаев М. Особенности фоточувствительности арсенидгаллиевых структур типа полевого транзистора // Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. — 1979. — № 2. — С. 44—48.
9. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом. — Ташкент: Фан, 2005.