

Л. Д. КОНОВАЛЕНКО, Ф. В. МАКОРДЕЙ, В. Ф. МУСАРОВА\*, О. Н. СОЛОВЬЕВА\*

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

\* Одесская государственная академия пищевых технологий

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПИРОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ТОКА

В работе приведены результаты разработки пирофотоэлектрического источника тока (ПФИТ). Основными функциональными элементами ПФИТ является фотопреобразователь и пироизлучатель. Описана их конструкция и приведены электрофизические характеристики.

Разработка резервных источников питания, обладающих специфическими параметрами — быстротой запуска, простотой эксплуатации, надежностью, остается актуальной задачей в связи с развитием автономных объектов специального назначения. Одним из таких специфических источников является полупроводниковый пирофотоэлектрический источник тока (ПФЭИТ). В основе его работы лежит использование фотоэлектрического метода прямого преобразования энергии специальных искусственных излучателей в электрическую энергию. Основным функциональным элементом ПФЭИТ является матричный фотопреобразователь (ФП) и пироизлучатель (ПИ). Предельное значение фото-э.д.с.  $E_{\phi}$  определяется из формулы:

$$E_{\phi} = \frac{E_g}{q} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right), \quad (1)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны полупроводника;  $q$  — заряд электрона;  $T_1$  — температура источника излучения;  $T_2$  — температура ФП. Из анализа выражения (1) вытекает, что для получения больших значений  $E_{\phi}$  нужно использовать ФП, созданные на более широкозонных полупроводниках. Спектральная область чувствительности ФП определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводникового материала. Максимальная длина волны излучения, соответствующая началу диапазона чувствительности ФП, определяется из выражения:  $\lambda = h \cdot c / W$ , где  $W$  — энергия фотона,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света. Отсюда  $\lambda_{\text{макс}}(\text{мкм}) = 1,234 / E_g$  (эВ).

Пироизлучатель должен обеспечивать определенный световой поток для работы ФП. Генерацию фототока в ФП вызывает излучение с энергией квантов больше  $E_g$ . Спектральный диапазон ПИ должен соответствовать спектральному диапазону чувствительности ФП. В качестве пироизлучателя используют пиротехнические составы, имеющие разные температуры горения. Если считать, что излучение пиротехнического состава по спектральному диапазону близко к излучению абсолютно черного тела (а.ч.т.), то, исходя из основных уравнений распределения спектральной плотности излучения а.ч.т., можно рассчитать долю светового потока,

соответствующего спектральному диапазону чувствительности фотоприемника в зависимости от температуры горения ПИ. Полная излучаемость тела во всем диапазоне спектра, т. е. от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ , определяется выражением

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2)$$

где  $r(\lambda, T)$  — функция спектральной плотности излучения а.ч.т.;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  — температура тела.

Необходимо отметить, что в интервале спектра от  $0,5\lambda_{\text{макс}}$  до  $8,0\lambda_{\text{макс}}$  сосредоточено 98% всего излучения а.ч.т., а на диапазон спектра от  $0,5\lambda_{\text{макс}}$  до  $3,0\lambda_{\text{макс}}$  приходится 90% всего излучения. Был проведен расчет доли излучения, приходящейся на спектральный диапазон чувствительности ФП из германия, кремния, арсенида галлия, фосфида галлия и карбида кремния в зависимости от температуры горения ПИ. Исходя из анализа литературных и собственных экспериментальных данных [1], в качестве полупроводникового материала для ФП выбран арсенид галлия ( $E_g = 1,43$  эВ). Наиболее приемлемым пироизлучателем, с точки зрения спектрального распределения энергии излучения, для матрицы ФП на основе GaAs являются термиты и горящие фотосоставы, обладающие температурой горения (2000—4000) К.

Конструктивно ПФЭИТ выполнен в виде матрицы, состоящей из ряда ФП, для обеспечения необходимого рабочего напряжения соединенных последовательно, прозрачной термоизолирующей прослойки, расположенной на поверхности матрицы, и пиросостава, нанесенного на прослойку и поверхность полупроводникового источника микронагрева (ПИМ). В качестве полупроводникового материала, наиболее отвечающего вышеперечисленным требованиям, был выбран арсенид галлия  $n$ -типа проводимости, полупроводниковые фотоэлементы формировались на основе барьеров Шоттки. Пиросостав содержит 2 слоя термита — первый слой состоит из вольфрамо-циркониевого термита, имеющего температуру горения порядка 2000 К, второй — слой быстрогорящего состава, имеющего скорость горения 0,1—0,12 м/сек. Для воспла-

менения пиросостава используется ПИМ, представляющий собой диффузионный резистор, изготовленный по стандартной полупроводниковой технологии [2, 3].

Было изготовлено несколько партий фотоэлементов на основе монокристаллического и эпитаксиального GaAs с концентрацией примесей  $N = (2-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [4]. Получение полупрозрачного выпрямляющего контакта на GaAs осуществлялось термическим напылением золота в вакууме  $P = 2 \cdot 10^{-5}$  торр, скорость напыления —  $5 \text{ \AA/с}$ , время напыления — 30 сек. Напыление производилось на предварительно подогретую подложку ( $T = 120^\circ\text{C}$ ) с последующим 20 минутным отжигом при температуре  $100^\circ\text{C}$ . На полученных образцах ФП измерялись следующие параметры: темновые и световые ВАХ; спектральные и нагрузочные характеристики; быстродействие. Результаты измерений темновых и световых вольтамперных характеристик приведены на рис. 1.

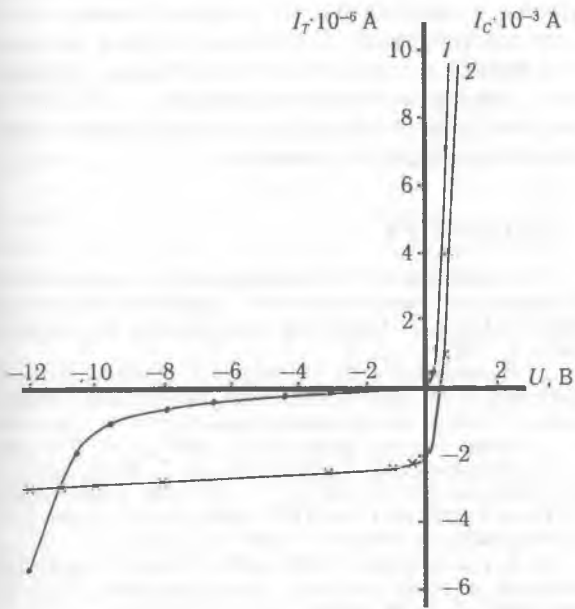


Рис. 1. Типичная вольтамперная характеристика GaAs фотоэлемента на барьере Шоттки.

1 — темновая ВАХ; 2 — световая ВАХ

Измерения спектральных зависимостей фототока проводились в области линейности люксамперной характеристики фотоприемников в режиме тока короткого замыкания. При этом величина фототока пропорциональна мощности излучения. Спектральное распределение падающей мощности  $P_\lambda$  измерялось по калиброванному фотодиоду. На рис. 2 приведены результаты измерений спектральных характеристик фотоэлементов на барьерах Шоттки, а на рис. 3 — нагрузочные характеристики при различных интенсивностях излучения. Под быстродействием фотоприемника понимают время отклика его выходного сигнала на принимаемый оптический сигнал. Исследование быстродействия изготовленных фотоэлементов на барьерах Шоттки проводилось на специально собранной установке.

В данном методе оценка быстродействия производилась по наблюдаемой на экране осциллографа кривой фототока (на уровне 0,7). Определенное таким образом время составило  $2 \cdot 10^{-6}$  сек.

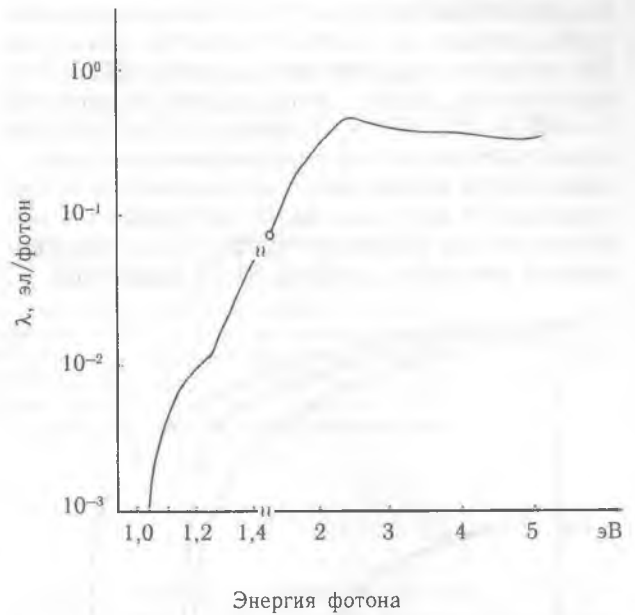


Рис. 2. Спектральная характеристика GaAs фотоэлемента на барьере Шоттки

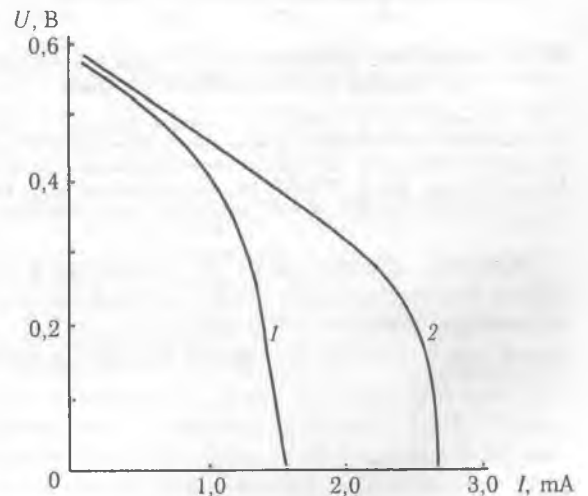


Рис. 3. Нагрузочные характеристики GaAs фотоэлемента на барьере Шоттки при различных интенсивностях излучения:

1 —  $P = 0,18 \text{ Вт/см}^2$ ; 2 —  $P = 0,39 \text{ Вт/см}^2$

Отбор структур для каждой матрицы осуществлялся на основе анализа темновых и световых вольтамперных характеристик. Выбирались фотоприемники с максимальной величиной фототока и минимальным темновым током. Ток в цепи последовательно соединенных фотоприемников определяется параметрами наихудшего элемента, поэтому матрица ФП должна состоять из идентичных фотоэлементов. Величина тока в такой цепи будет определяться током, генерируемым отдельным фотоприемником.

Матрицы монтировались в стандартные фотодиодные корпуса, в которых предварительно

закреплялась термопара, служащая для контроля температуры в процессе испытаний. Часть матриц монтировалась в специально разработанные корпуса.

Были проведены измерения нагрузочных и вольтамперных характеристик и определено время выхода матриц на режим. В качестве имитатора ПИ использовались импульсная лампа ИФК-120 и перекальная лампа накаливания мощностью  $P=300$  Вт. На рис. 4, 5 приведены нагрузочные характеристики матриц с различным числом фотоэлементов на основе монокристаллического и эпитаксиального арсенида галлия (матрицы из 4 и 6 элементов при различной конфигурации выпрямляющих контактов, матрица из 20 элементов).

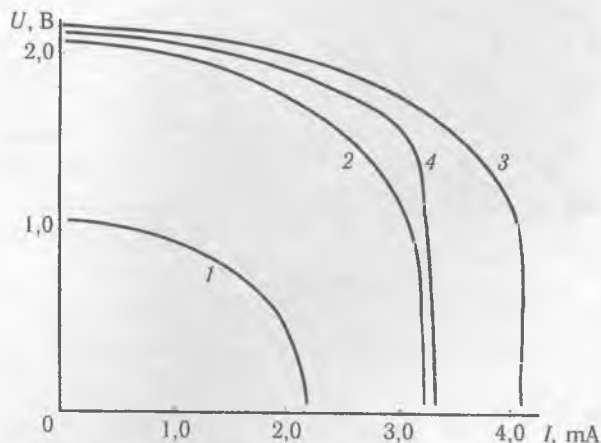


Рис. 4. Нагрузочные характеристики матрицы фотоэлементов на барьерах Шоттки (ФЭБШ) из GaAs

- 1 — матрица из 4 ФЭБШ из эпитаксиального  $n$  GaAs;  
 2 — матрица из 4 ФЭБШ из монокристаллического  $n$  GaAs;  
 3 — матрица из 6 ФЭБШ из эпитаксиального  $n$  GaAs;  
 4 — матрица из 6 ФЭБШ из эпитаксиального  $n$  GaAs с измененной конфигурацией выпрямляющего электрода

Матрица, состоящая из 20 элементов ФП на основе эпитаксиального GaAs, имела следующие параметры: рабочее напряжение  $U_{\text{раб}} = 6$  В, рабочий ток  $I_p = 2,5 \cdot 10^{-3}$  А, время выхода на режим  $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$  сек.

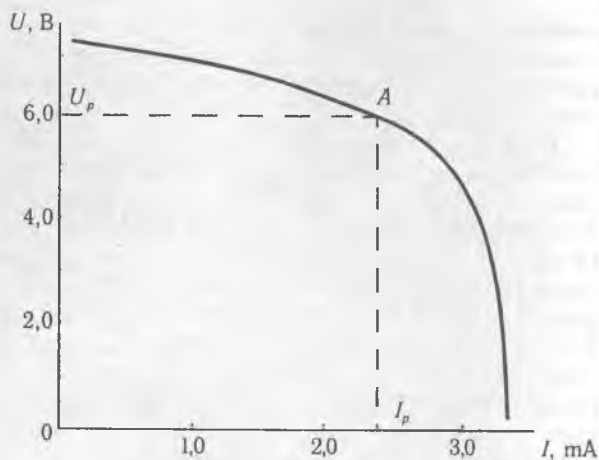


Рис. 5. Нагрузочная характеристика матрицы фотоэлементов на барьере Шоттки из эпитаксиального  $n$ -GaAs, состоящего из 20 элементов

Проведенные испытания макетов ПФЭИТ показали работоспособность всех составных элементов и перспективность использования его в качестве резервного источника питания автономных объектов специального назначения, обладающего специфическими параметрами — быстротой запуска, простотой эксплуатации, надежностью, длительным сроком хранения.

#### Литература

1. Коноваленко Л. Д., Мусарова Ф. В., Соловьева О. Н. О характеристиках фотодиодов с барьером Шоттки на основе  $n$ -GaAs. // Респ. меж. вед. сборник Фотозлектроника. — 1989. — В. 3.
2. Коноваленко Л. Д., Мазуренко В. С., Макордей Ф. В., Мусарова В. Ф. Энергетические характеристики «горячих точек» // Физика аэродисперсных систем. — Вып. 36, ч. 1. — Киев-Одесса: Вища школа, 1997. — С. 101—103.
3. Коноваленко Л. Д., Мазуренко В. С., Макордей Ф. В. Полупроводниковый мостик — источник микронагрева // Тезисы докладов на XVII конференции стран СНГ «Дисперсные системы». — 1996. — С. 84.
4. А. с. СССР № 1389601, МКИ Н 01 L. Способ формирования контактов металл — полупроводник / Л. Д. Коноваленко, В. Ф. Мусарова, О. Н. Соловьева.