

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БАТАРЕИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ.

При разработке фотоэлектрической батареи для питания малоомощной аппаратуры был разработан метод оптимизации количества последовательно включенных фотоэлементов. Такой метод является универсальным и может успешно применяться при конструировании батарей из любых, в том числе и кремниевых фотоэлементов. Нами этот метод был применен при создании батарей на основе гетероперехода  $\text{CdZnS-Cu}_2\text{S}$ .

Рассмотрим фотоэлектрические характеристики фотоэлемента на основе монокристаллического кремния и фотоэлемента из аморфного кремния, входящего в состав батареи, питающей микрокалькулятор «Cassio». Площадь одного элемента в обоих случаях составляла  $1 \text{ см}^2$ . Нагрузочные характеристики измерялись при освещенности  $L = 100 \text{ лкс}$  от лампы накаливания (рис. 1). Кривая *a* показывает, что элемент на основе монокристаллического кремния генерирует достаточно большой ток короткого замыкания ( $j_{\text{кз}} = 56 \text{ мА/см}$ ), но его ЭДС холостого хода при этой освещенности по сравнению с другими фотоэлементами относительно невелика и составляет всего 230 мВ. С увеличением интенсивности освещения  $U_{\text{xx}}$  существенно растет (рис. 2, кривая *a*) и уже при  $L = 1000 \text{ лкс}$  достигает 400 мВ. Как видно из этого рисунка, зависимость  $U_{\text{xx}}$  от освещения достаточно плавная, поэтому для эффективной работы этого фотоэлемента требуется высокая интенсивность света.

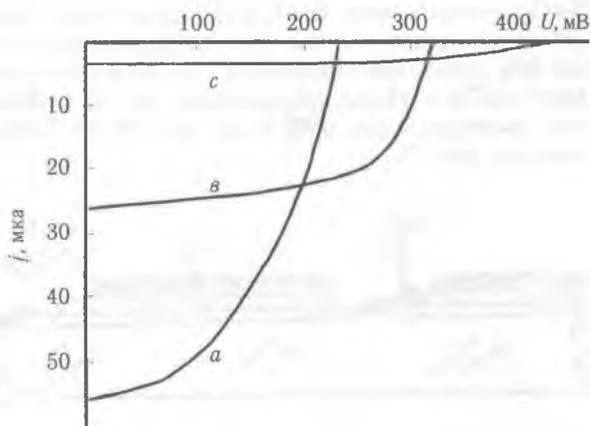


Рис. 1. Нагрузочные характеристики при освещении.  $L = 100 \text{ лкс}$  для 3-х разных фотоэлементов:

*b* — элемент на основе гетероперехода  $\text{CdZnS-Cu}_2\text{S}$ , *a* — на основе монокристаллического кремния, *c* — на основе аморфного кремния

Зависимость  $U_{\text{xx}}(L)$  элемента источника питания микрокалькулятора показывает, что напряжение холостого хода достигает значения 400 мВ уже при  $L = 35 \text{ лкс}$  а при  $L = 100 \text{ лкс}$   $U_{\text{xx}} = 430 \text{ мВ}$ . С дальнейшим увеличением освещенности  $U_{\text{xx}}$  растет довольно слабо. Это позволяет использовать такие элементы для питания различных устройств, потребляющих очень малый ток при низких интенсивностях света. Ток короткого замыкания исследуемого элемента весьма невелик при  $L = 100 \text{ лкс}$   $j_{\text{кз}} = 3 \text{ мкА}$ , что однако, достаточно для питания микрокалькулятора.

Изготовленный нами фотоэлемент на основе гетероперехода  $\text{CdZnS-Cu}_2\text{S}$  (со слоем  $\text{CdZnS}$ , полученным методом пульверизации [1]) также развивает достаточно большую ЭДС холостого хода: при  $L = 100 \text{ лкс}$   $U_{\text{xx}} = 320 \text{ мВ}$  (см. рис. 2, кривую *c*), но обладает гораздо большим значением тока короткого замыкания ( $j_{\text{кз}} = 26 \text{ мкА/см}$ ) (рис. 1, кривая *c*).

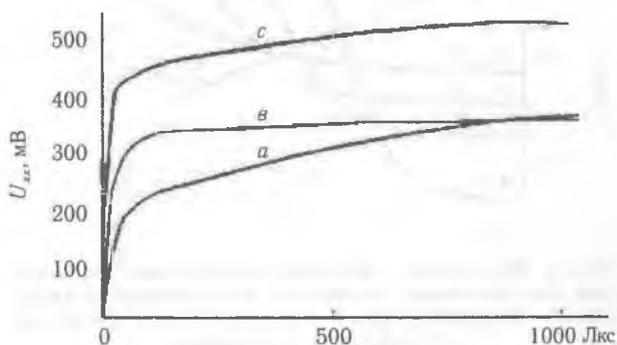


Рис. 2. Зависимость  $U_{\text{xx}}$  от освещенности для фотоэлементов:

*a* — на основе монокристаллического кремния, *b* — на основе гетероперехода  $\text{CdZnS-Cu}_2\text{S}$ , *c* — на основе аморфного кремния

Это позволяет использовать такие фотоэлементы при достаточно низкой освещенности для питания устройств, потребляющих большой ток.

Рассмотрим конкретный случай, как, используя гетерофотоэлементы  $\text{CdZnS-Cu}_2\text{S}$ , при помощи предложенной методики оптимизации параметров батареи можно получить источник тока, например, для питания устройства, потребляющего ток 15 мкА, при напряжении не менее 2 В (это соответствует величине нагрузки  $R_H = 125 \text{ кОм}$ ). Пусть освещенность не превышает 100 лкс, а общая площадь  $S$  фотоэлементов —  $10 \text{ см}^2$ . Ясно, что для получения таких параметров источник тока должен представлять собой батарею последовательно соединенных фотоэлементов.

тов. Рассмотрим подробно, как определить оптимальное число элементов для такого источника тока. Предположим, что батарея составлена из одинаковых фотопреобразователей. При этом следует иметь в виду, что площадь отдельного элемента  $S_1$  зависит от их количества в батарее и определяется соотношением  $S_1 = S/n$  (здесь  $S$  — площадь фотоэлементов,  $n$  — их количество).

Рассмотрим семейство нагрузочных характеристик источника питания, рассчитанных при различных значениях и последовательно соединенных элементов (нагрузочная характеристика одного из них, измеренная при освещенности 100 Лкс для элемента с  $S_1 = 1 \text{ см}^2$ , соответствует кривой  $c$ , приведенной на рис. 1). С увеличением количества элементов величина  $U_{xx}$ , которая от  $S_1$  не зависит, растет пропорционально  $n$  ( $U_{xx}^B = U_{xx}^A n$ ), а ток короткого замыкания батареи определяется  $j_{K3}$  отдельного элемента и поэтому уменьшается пропорционально величине  $S_1$ . Хорошо видно, что на выбранной внешней нагрузке ( $R_H = 125 \text{ кОм}$ ) максимальная мощность развивается при  $n = 10-12$ , а при больших  $n$  начинает уменьшаться (рис. 3). Видно также, что для батареи, составленной из таких элементов, при оптимальном  $n$  на заданной нагрузке рабочие значения  $U$  и  $I$  оказываются даже несколько выше заданных и батарея может обеспечивать требуемые параметры даже при несколько меньшей освещенности.

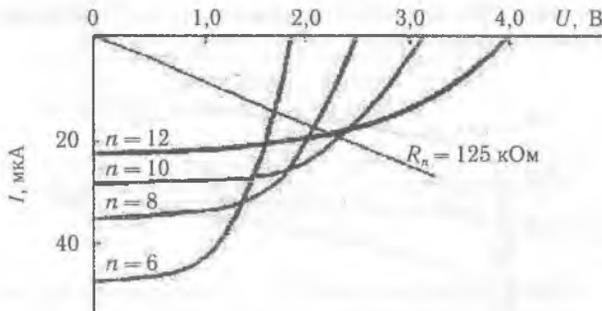


Рис. 3. Нагрузочные характеристики батареи, рассчитанные при различных значениях  $n$  последовательно соединенных элементов. Общая площадь батареи  $S = 10 \text{ см}^2$ , освещенность  $L = 100 \text{ Лкс}$ .

Определим, при какой минимальной освещенности может работать такой источник питания, и какое оптимальное количество отдельных элементов  $n$  он при этом должен содержать. Измерим для этого нагрузочные характеристики, аналогичные кривой  $c$ , приведенной на рис. 1, для разных освещенностей и рассчитаем для каждой из них мощность, выделяющуюся на заданной нагрузке при разном количестве элементов в батарее. Полученные кривые представлены на рис. 4. Хорошо видно, что в зависимости от освещенности максимум достигается для разного количества элементов. Если провести через точки максимума кривую, то соответствующее величине максимальной мощности на этой кривой значение  $n$  и определит оптимальное количество элементов для минимальной освещенности, при которой батарея заданной площади еще

может давать заданные нами параметры. Из рис. 4 видно, что величине  $L_{\min} = 75 \text{ Лкс}$  соответствует  $n_{\text{opt}} = 9,5$ . Аналогичные исследования были проделаны нами для облучения люминесцентной лампой ЛБУ-30. В этом случае оказалось также, что  $n_{\text{opt}} = 9,5$ , но этой величине соответствует  $L_{\min} = 300 \text{ лкс}$ . Таким образом, для источника питания с заданными параметрами оптимальное число последовательно соединенных элементов равно 10.

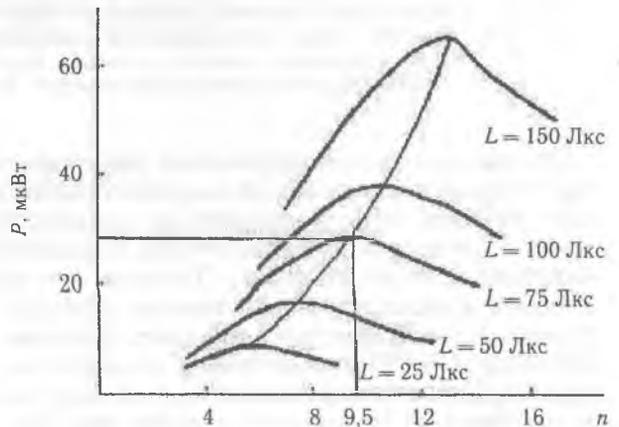


Рис. 4. Зависимость мощности, выделяющейся на нагрузке  $R = 125 \text{ кОм}$ , от количества последовательно соединенных элементов, составляющих батарею с площадью  $S = 10 \text{ см}^2$ , при различных уровнях освещенности. Видно, что минимальная требуемая мощность  $P_m = 28 \text{ мкВт}$  достигается при  $L_{\min} = 75 \text{ лкс}$  для  $n_{\text{opt}} = 9,5$ .

Такая батарея нами была изготовлена. Отдельные элементы были расположены на одной подложке размером  $10 \times 140 \text{ мм}$ . Для их последовательной коммутации слой  $\text{CdZnS}$  наносился на стеклянную подложку с проводящим слоем  $\text{SnO}_2$ , разделенным протравленными полосками на 10 площадок, служащих тыльными контактами для отдельных элементов. Затем на базовом слое  $\text{CdZnS}$ , также разделенном на 10 элементов, формировался слой  $\text{Cu}_2\text{S}$  так, как это показано на рис. 5.

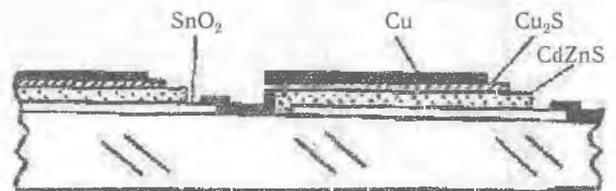


Рис. 5. Схематическое изображение фрагмента фотоэлектрической батареи

Последовательная коммутация полученных на одной подложке фотоэлементов проводилась одновременно с нанесением второго контакта путем напыления через маску необходимой конфигурации тонкого слоя меди (рис. 5). Контактные выводы приклеивались с помощью проводящего клея на основе никелевого порошка, от атмосферного воздействия полученная батарея защищалась лаком БМК-5, который наносился в

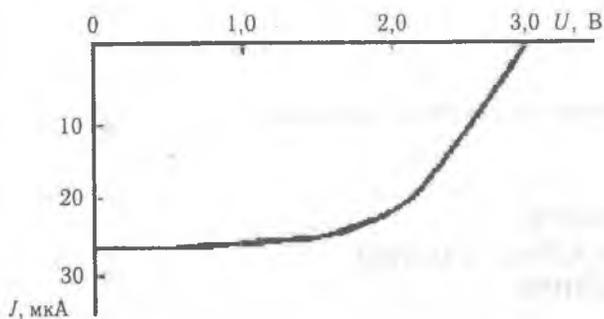


Рис. 6. Экспериментальная нагрузочная характеристика фотоэлектрической батареи из 10 последовательно соединенных элементов. Общая площадь  $P=10$  см<sup>2</sup>, освещенность  $L=100$  Лкс.

жидком виде и полимеризовался под действием ультрафиолетового излучения. Нагрузочная характеристика полученной батареи при  $L=100$  Лкс

приведена на рис. 6. Основные фотоэлектрические параметры данного источника питания составляют: КПД = 5,5%,  $FF=0,66$ ,  $U_{xx}=2,9$  В,  $J_{K3}=26$  мкА. На нагрузке  $R_H=125$  кОм  $U=2,3$  В,  $I=20$  мкА. Видно, что для реальной батареи значения основных параметров  $U_{xx}$  и  $J_{K3}$  оказываются несколько заниженными, чем для расчетной (см. рис. 3 кривую, рассчитанную при  $n=10$ ). Это связано с некоторым разбросом фотоэлектрических параметров отдельных элементов батареи.

Таким образом, мы получили экспериментальное подтверждение эффективности предложенного нами метода оптимизации параметров батареи фотоэлементов.

#### Литература

1. В. А. Борщак, Н. П. Затовская, М. И. Куталова, В. А. Смытына. Создание эффективных преобразователей солнечной энергии на основе гетероперехода CdZnS-Cu<sub>2</sub>S // Фотоэлектроника. — 1998. — Т. 7. — С. 47—48.