



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Регистрация характеристик фотоэлектрического модуля (солнечного элемента) в зависимости от яркости

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерить $I-U$ характеристики фотоэлектрического модуля (солнечного элемента) при разном уровне освещенности.
- Сравнить измеренные характеристики с расчетными в соответствии с моделью диода.
- Определить соотношение напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при разных уровнях освещенности.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Фотоэлектрическая система превращает энергию солнечного света в электрическую энергию. Для этого используются солнечные элементы, состоящие из легированного кремния и, таким образом, представляющие собой увеличенный фотодиод. Свет, поглощенный солнечным элементом, освобождает от внутрикристаллических связей носители заряда, которые создают фотоэлектрический ток, протекающий в обратном направлении по отношению к прямому направлению р-п-перехода. Это диодный ток солнечного элемента, который ограничивает выход тока на внешнюю нагрузку. При так называемом напряжении холостого хода U_{oc} этот ток достигает нулевого значения, т. е. фотоэлектрический ток и ток диода точно компенсируют друг друга, а отрицательным становится только в том случае, если приложенное напряжение превышает напряжение холостого хода. По достижении положительного диапазона тока солнечный элемент может работать в качестве генератора, который подает электричество на внешнюю нагрузку. В опыте вольт-амперные характеристики этого генератора измеряются как функция уровня освещенности и описываются набором простых параметров.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Количество	Наименование	№ по каталогу
1	Набор для учебных опытов по солнечной энергии (230 В, 50/60 Гц)	U8498301-230 или U8498301-115
1	Набор для учебных опытов по солнечной энергии (115 В, 50/60 Гц)	U8498301-115
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	U33020-230 или U33020-115
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	U33020-115

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Термин «photovoltaic» (в переводе «фотоэлектричество») представляет собой комбинацию греческого слова phos (свет) и итальянского имени Volta. Вторая часть названия принята в честь *Алессандро Вольта*, который, помимо прочего, изобрел первую действующую гальваническую батарею. Фотоэлектрическая система превращает неограниченно доступную и бесплатную световую энергию солнца в электрическую энергию без выбросов CO_2 . Для этого нужны солнечные элементы, которые в большинстве случаев изготавливаются из надлежащим образом легированного кремния и, таким образом, представляют собой увеличенный фотодиод. Перед достижением внешних контактов солнечного элемента поглощенный солнечным элементом свет сначала освобождает носители заряда от их внутрикристаллических связей (внутренний фотоэффект) за счет электрического поля, создаваемого надлежащим количеством р-п-переходов, когда электроны переходят на п-легированную сторону, а дырки переходят на р-легированную сторону (рис. 1). В результате возникающий фотоэлектрический ток течет в обратном направлении

по отношению к прямому направлению р-п-перехода, что может позволить подавать электроэнергию на внешнюю нагрузку.

Фотоэлектрический ток I_{ph} пропорционален уровню освещенности Φ :

$$(1) \quad I_{ph} = \text{const} \cdot \Phi$$

На это накладывается ток диода в прямом или проводящем направлении:

$$(2) \quad I_D = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

I_s : ток насыщения, U_T : температурный потенциал и становится тем сильнее, чем больше напряжение U между контактами превышает напряжение диффузии U_D . Таким образом, выходной ток I для внешних нагрузок ограничивается током диода:

$$(3) \quad I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

Ток достигает нулевого значения при так называемом напряжении холостого хода U_{oc} , потому что фотоэлектрический ток и ток диода взаимно уравнивают друг друга, и становится отрицательным только в том случае, если прикладывается напряжение $U > U_{oc}$. В диапазоне положительных токов солнечный элемент может работать как генератор, подающий электрическую энергию на внешнюю нагрузку. Уравнение (3) описывает характеристику $I-U$ этого генератора. Поскольку в действительности фотоэлектрический ток I_{ph} значительно больше тока насыщения I_s , из формулы (3) для напряжения холостого хода можно вывести следующее соотношение:

$$(4) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

Если клеммы солнечного элемента коротко замкнуты, элемент выдает ток короткого замыкания I_{sc} , соответствующий фотоэлектрическому току, т. е. в соответствии с уравнением (3) $U = 0$. Следовательно, получаем:

$$(5) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right), \text{ где } I_{sc} = I_{ph}$$

Уравнение 2 описывает реакцию диода в рамках так называемой стандартной модели. Здесь ток насыщения I_s выступает в качестве переменной материала, зависящей от геометрических и электрических характеристик солнечного элемента. Для температурного потенциала U_T тогда верно следующее:

$$(6) \quad U_T = \frac{m \cdot k \cdot T}{e}$$

$m = 1 \dots 2$: коэффициент идеальности

k : постоянная Больцмана, e : элементарный заряд,

T : температура в градусах Кельвина

При более точном исследовании характеристики учитываются токи утечки по краям солнечных элементов и точечных коротких замыканий р-п-переходов, которые можно смоделировать с помощью параллельного сопротивления R_p . Уравнение 3 в таком случае превращается в уравнение

$$(7) \quad I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

Таким образом, чтобы добиться эффективно применимого напряжения в диапазоне от 20 до 50 В, практически требуется значительное количество соединенных последовательно солнечных элементов. Такая конфигурация из последовательно соединенных 18 солнечных элементов в опыте освещается галогенной лампой с регулируемой яркостью, а вольт-амперные характеристики модуля регистрируются при разной яркости света.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Семейство вольт-амперных характеристик фотоэлектрического модуля (рис. 2) можно описать уравнением 7, если независимо от яркости подставить тот же набор параметров, а именно, I_s , U_T и R_p , а фотоэлектрический ток I_{ph} выбирается как функция яркости. Разумеется, температурный потенциал в 18 раз больше определенного по уравнению 6, так как модуль состоит из 18 соединенных последовательно солнечных элементов.

Параллельная цепь состоит из идеального источника питания, 18 последовательно соединенных полупроводниковых диодов и омического сопротивления, эквивалентная принципиальная схема фотоэлектрического модуля представлена на рис. 3. Источник питания подает зависимый от яркости ток в обратном направлении.

Рис. 1. Схематичное изображение солнечного элемента как полупроводникового элемента

n^+ : сильно п-легированная область,
 p : р-легированная область,
 $\oplus$: подвижная дырка, созданная поглощенным светом,
 $\ominus$: свободный электрон, выделенный поглощенным светом,
 $+$: неподвижный положительный заряд,
 $-$: неподвижный отрицательный заряд,
 E_{int} : электрическое поле, создаваемое дифференциалом пространственного заряда,
 R_L : сопротивление нагрузки

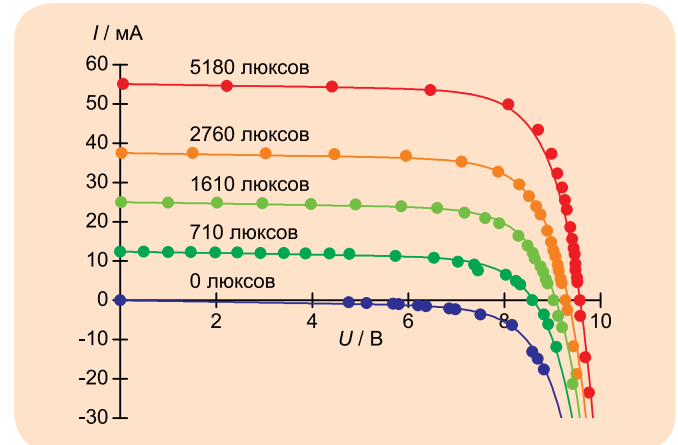
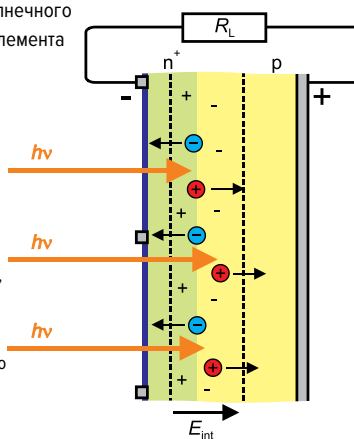


Рис. 2. Серия вольт-амперных характеристик фотоэлектрического модуля при пяти уровнях освещенности

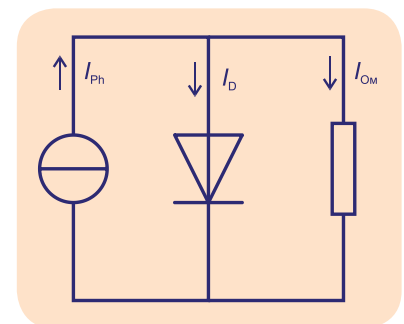


Рис. 3. Эквивалентная принципиальная схема фотоэлектрического модуля



Технические сведения об оборудовании изложены на сайте 3bscientific.com