

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Н. П. Затовская, Ю. Н. Каракис, М. И. Куталова

Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова

Разработана методика определения последовательного сопротивления ФЭ в точке ВАХ, соответствующей максимальной снимаемой мощности. Указан способ нахождения самой этой точки.

Учет влияния различных факторов на выходные характеристики солнечных элементов привел к включению в уравнение ВАХ неидеальных фотопреобразователей дополнительных параметров, среди которых коэффициент неидеальности A , учитывающий особенности токопереноса и R_n — последовательное сопротивление фотоэлемента связанное с омическим сопротивлением базового слоя, сопротивлением растекания и приконтактных областей у электродов и т. д. Реальные характеристики элементов часто имеют непрогнозируемые отклонения от расчетных, особенно у пленочных приборов неопределенной площади из-за развитой поверхности. Одна из причин этого — трудность точного учета последовательного сопротивления фотоэлемента (ФЭ).

При эксплуатации ФЭ значения протекающего тока I_0 и действующего напряжения U_0 выбираются таким образом, чтобы величина снимаемой мощности $I_0 U_0$ была максимальной (т. н. рабочая точка ВАХ). Поэтому, разумеется, вызывает интерес как определение положения этой точки на графике, так и значение последовательного сопротивления именно в ней.

Существует несколько способов определения величины R_n . Однако разработанные методики либо требуют дополнительных измерений, либо связаны с громоздкими расчетами, что затрудняет их использование в практических целях.

Получение величины последовательного сопротивления методом, предложенным в [1], требует определения прямого смещения, подаваемого на образец в темноте, при котором через элемент течет ток, численно равный току короткого замыкания ($I_{кз}$). Помимо неудобства такой методики, необходимо отметить неточность полученного результата, связанную с тем, что значение последовательного сопротивления зависит от приложенного к образцу напряжения и уровня освещенности. По той же причине неприменим способ, приведенный в [2], позволяющий рассчитать последовательное

сопротивление элемента, зная величину коэффициента неидеальности диодной экспоненты A и тока насыщения I_s , определенные из ВАХ при нескольких уровнях освещенности.

В работах Матисика и Ромаса приведена методика получения величины R_n по подинтегральной площади в нагрузочной части ВАХ и дополнительно рассчитанной подинтегральной площади зависимости мощности, снимаемой с фотоэлемента, от протекающего тока. Полученное значение является некоторым интегральным параметром и может значительно отличаться от сопротивления в выбранной рабочей точке.

К недостаткам указанных методов следует также отнести невозможность определения зависимости величины R_n от приложенного напряжения, что необходимо в ряде случаев для уточнения механизмов работы фотопреобразователей, определения коэффициента заполнения и т. д.

В настоящей работе предлагается методика расчета последовательного сопротивления R_n фотоэлемента с использованием только световой ВАХ, не требующая громоздких вычислений и удобная для практического использования.

В общем случае выражение для ВАХ освещенного ФЭ в нагрузочной части имеет вид:

$$-I = I_s \{ \exp[(U + IR_n) / (AkT)] - 1 \} - I_{кз}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура. Шунтирующее сопротивление предполагается достаточно большим.

Коэффициент неидеальности A можно выразить через параметры ВАХ при напряжении равному напряжению холостого хода ($U_{хх}$). В этом случае, поскольку сопротивление внешней цепи бесконечно велико, величина потерь на последовательном сопротивлении $I x R_n$ не сказывается на виде ВАХ. Тогда, пренебрегая единицей в скобках, имеем:

$$I_{кз} = I_s \exp(eU_{хх} / AkT). \quad (2)$$

Откуда

$$A = eU_{xx} / [kT \ln(I_{кс} / I_s)]. \quad (3)$$

Из выражения (1) следует

$$[(I_{кс} - I) / I_s] = \exp[e(U + IR_n) / AkT] \quad (4)$$

или после логарифмирования

$$\ln \{ [(I_{кс} - I) / I_s] + 1 \} = e(U + IR_n) / (AkT) \quad (5)$$

Подставив в выражение (5) значение A из (3) получим

$$\ln \{ [(I_{кс} - I) / I_s] + 1 \} = [\ln(I_{кс} / I_s)](U + IR_n) / U_{xx}, \quad (6)$$

откуда

$$R_n = (U_{xx} / I) \ln \{ [(I_{кс} - I) / I_s] + 1 \} / \ln(I_{кс} / I_s) - U / I. \quad (7)$$

После преобразований в первом слагаемом

$$\begin{aligned} & \{ \ln(I_{кс} / I_s) + \ln[1 - (I - I_s) / I_{кс}] \} / \ln(I_{кс} / I_s) = \\ & = 1 + \ln[1 - (I_{кс} - I) / I_{кс}] / \ln(I_{кс} / I_s) \end{aligned} \quad (8)$$

находим

$$\begin{aligned} R_n = & (U_{xx} - U) / I + (U_{xx} / I) \times \\ & \times \ln[1 - (I - I_s) / I_{кс}] / \ln(I_{кс} / I_s) \end{aligned} \quad (9)$$

Для фотоэлементов, ток которых в значительной мере контролируется последовательным сопротивлением справедливо $I - I_s < I_{кс}$, тогда разложение в ряд логарифма в числителе второго слагаемого дает

$$R_n = (U_{xx} - U) / I - [U_{xx}(I - I_s)] / [I I_{кс} \ln(I_{кс} / I_s)] \quad (10)$$

Для рабочей точки $I = I_0 > I_s$ и выражение (10) упрощается

$$R_n = (U_{xx} - U_0) / I_0 - (U_{xx} / I_{кс}) / \ln(I_{кс} / I_s) \quad (11)$$

В силу сделанных допущений формула (11) позволяет получить значение величины последовательного сопротивления в рабочей точке ВАХ (I_0 ; U_0) и ее некоторой окрестности. Все значения параметров второго неизменного в (11) определяют непосредственно из графика (см. рис. 1).

Первое слагаемое выражения (11) имеет простой геометрический смысл. Как видно из рисунка, его величина равна котангенсу угла наклона α прямой, проведенной между точками $U = U_{xx}$ и $(I_0; U_0)$.

Таким образом предлагаемый способ позволяет оперативно получать величину последовательного сопротивления ФЭ в рабочей точке и ее окрестности в нагрузочной части ВАХ.

Определения точного положения самой рабочей точки на вольтамперной характеристике вы-

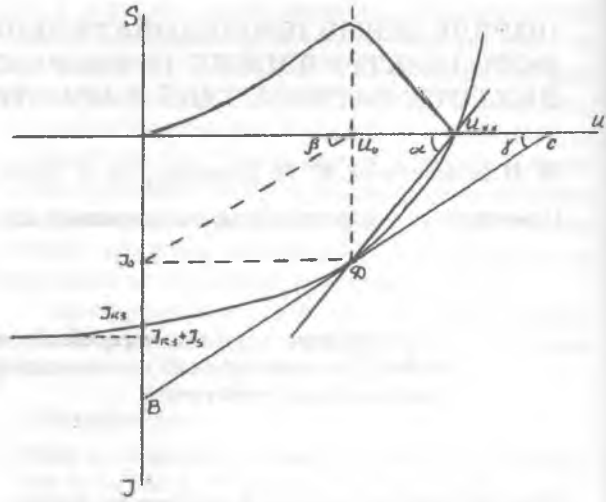


Рис. 1. Вольтамперная характеристика фотоэлемента

зывает определенные трудности и обычно осуществляется методом итераций. Поэтому предлагается простой и удобный способ ее отыскания.

Поскольку точке максимальной снимаемой мощности соответствует наибольшая площадь S вписанного прямоугольника $S = U(I) \times I$, то справедливо

$$dS/dI |_{(u=U_0)} = dU/dI |_{(u=U_0)} I + U_0, \quad (12)$$

откуда

$$-dU/dI |_{(u=U_0)} = U_0 / I_0. \quad (13)$$

Условие (13) определяет равенство углов, образованных с осью абсцисс диагональю вписанного прямоугольника (β) и касательной к графику ВАХ в точке максимальной мощности (D , см. рисунок). Тогда из равенства сторон соответствующих параллелограммов $BD = I_0 U_0$ и $I_0 U_0 = DC$ получаем $BD = DC$.

Следовательно, отрезок касательной к ВАХ, заключенный между осями координат, в точке максимальной мощности делится пополам, что является удобным критерием быстрого отыскания этой точки для фотоэлемента.

Литература

1. Тальнова Г. Н., Пикус Г. Я. Журн. Физ. Химии, 1991, 36, № 3. — С. 78.
2. Mooney J. B., Radding S. B. Ann. Rev. Mater. Sci., 1994, 12. — S. 81.