

**ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА
НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА**Ю. Ю. Логинов^{1*}, А. В. Брильков², А. В. Мозжерин^{1,2}¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, просп. Свободный, 79

*E-mail: loginov@sibsau.ru

Рассмотрено влияние сопротивления лицевого слоя солнечного элемента (СЭ) на выходные характеристики устройства. Солнечные элементы активно используются в производстве солнечных батарей космических аппаратов, и эффективность работы СЭ влияет на время жизни изделия. В настоящее время прилагаются значительные усилия для увеличения эффективности солнечных элементов (СЭ). Минимизация сопротивления n^+ -канала позволяет улучшить качество СЭ при длительной эксплуатации изделия, например, в условиях радиационного воздействия в космосе. Поэтому интересно рассмотреть более точные модели учета влияния омических потерь n^+ -канала на вольт-амперные характеристики СЭ. На основе дифференциальных уравнений для распределения потенциалов и токов в лицевом n^+ -слое солнечных элементов n^+ - p -типа получено выражение для их вольт-амперных характеристик (ВАХ) в зависимости от параметров лицевого слоя. Это позволило уточнить влияние сопротивления лицевого n^+ -слоя (R) на выходные характеристики СЭ ($I_{кз}$, $V_{ох}$, коэффициент заполнения), связав их с параметрами n^+ - p -перехода. Предложен простой алгоритм численного решения указанных уравнений с расчетом ВАХ СЭ. Показано, что при сопротивлении лицевого слоя $R > R_n$ ($\sim 4 \text{ Ом/см}^2$) ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и коэффициент заполнения (η) уменьшаются обратно пропорционально \sqrt{R} , а при $R < R_n$ ВАХ практически не зависит от R . Полученные результаты могут быть использованы при анализе работы солнечных батарей космических аппаратов.

Ключевые слова: солнечные элементы, вольт-амперная характеристика, сопротивление лицевого слоя, p - n -переход, ток короткого замыкания.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 188–192**THE INFLUENCE OF SURFACE LAYER RESISTANCE
ON OUTPUT CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS**Y. Y. Loginov^{1*}, A. V. Brilikov², A. V. Mozherin^{1,2}¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: loginov@sibsau.ru

The influence of surface layer resistance of the solar cell on the output characteristics of the device is considered. The solar cells are widely used in the production of spacecraft solar panels and the efficiency of the solar cell affects the lifetime of the vehicle. Currently, there are significant efforts to increase the efficiency of solar cells (SC). Minimizing resistance of n^+ -channel allows improve quality of solar cells during prolonged operation, for example in terms of radiation exposure in space. It is therefore interesting to consider more accurate models into account the effect of ohmic losses n^+ -channel on current-voltage characteristics of solar cells. On the basis of the differential equations for distribution of potentials and currents in a surface n^+ -layer of n^+ - p -type solar cells new expression for current-voltage characteristics is received. It has allowed to specify influence of surface n^+ -layer resistance (R) on output characteristics of solar cells (short circuit current, open circuit voltage, fill factor) in accordance with parameters of n^+ - p -junction. The simple algorithm of the numerical solution of the specified equations with calculation current-voltage characteristics of solar cells is offered. It is shown, that at the resistance of surface layer $R > R_n$ ($\sim 4 \text{ } \Omega\text{-cm}^2$) the short-circuit current J_{SC} and the fill factor (η) decreases inversely proportional to \sqrt{R} , and for $R < R_n$ the current-

voltage characteristic practically is not depend on R . The obtained results can be used in analysing the operation of spacecraft solar cells.

Keywords: solar cells, the current-voltage characteristic, the resistance of surface layer, p - n -junction, short-circuit current.

Ведение. Солнечные элементы широко используются в космических аппаратах [1–12]. Одной из важнейших задач технологии солнечных элементов (СЭ) с лицевым n^+ -слоем является уменьшение омических потерь этого слоя на фоне других факторов, ухудшающих рабочие параметры СЭ.

Обычное выражение для ВАХ СЭ [11–14]:

$$I_C = -I_{pn} + I_v, \quad (1)$$

где

$$I_{pn} = I_0 \left(e^{\frac{q(V+I_C R)}{\Theta}} - 1 \right), \quad (2)$$

где

$$\Theta = kT; R = \frac{\rho l_1}{w l_2}; \quad (3)$$

R – сопротивление лицевого слоя; ρ – его удельное сопротивление; w – толщина; l_1 – длина (от середины n^+ -слоя до собирающего электрода); l_2 – протяженность собирающего электрода; I_v – фототок СЭ при $R = 0$; I_{pn} – обратный ток из n^+ -канала в p -область; I_0 – обратный темновой ток p - n -перехода.

Уравнения (1), (2) отражают модель, в которой сопротивление лицевого слоя учтено как последовательно соединенное с p - n^+ -переходом сопротивление.

Минимизация сопротивления n^+ -канала должна осуществляться самосогласованно с конструкцией СЭ, обеспечивать максимальную прозрачность лицевого слоя для проникновения в p -область света, а главное, не ухудшать это качество при длительной эксплуатации СЭ, например, в условиях радиационного воздействия в космосе.

В связи с этим интересно рассмотреть более точные модели учета влияния омических потерь n^+ -канала на вольт-амперные характеристики СЭ.

Влияние сопротивления n^+ -канала на вольт-амперные характеристики СЭ. В [13–15] показано, что для расчета вольт-амперных характеристик СЭ с n^+ -каналом, необходимо использовать уравнения рассредоточенных токов $j(x)$ и потенциалов $\varphi(x)$ в канале. Учитывая, что возрастание тока Δj на пути Δx в канале обусловлено притоком электронов из p -области $-I_\Phi l_2 \Delta x$, запишем:

$$\frac{dj}{dx} = l_2 I_\Phi, \quad (4)$$

где l_2 – протяженность собирающего электрода,

$$I_\Phi = -I_{pn} + I_v; \quad (5)$$

$$I_{pn} = I_0 \left(e^{\frac{q\varphi}{\Theta}} - 1 \right). \quad (6)$$

Аналогичным образом для падения напряжения в n -канале запишем

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{R}{l_1} j. \quad (7)$$

Из (7) получим:

$$\Delta\varphi = (-V + \varphi_0) = R \frac{1}{l_1} \int_0^{l_1} j(x) dx. \quad (8)$$

Решение уравнений (4)–(7) будем рассматривать с учетом граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} j = 0, \varphi = \varphi_0 \text{ при } x = 0 \\ j = I, \varphi = V \text{ при } x = l_1 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где φ_0 – потенциал середины n^+ -слоя.

Влияние сопротивления лицевого слоя на параметры СЭ можно проанализировать с помощью компьютерного интегрирования уравнений (5)–(7). Для этого преобразуем их по методу конечных разностей, превратив их в следующие рекуррентные отношения:

$$j_{k+1} = j_k + I_\Phi(\varphi_k) \Delta k, \quad (10)$$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - R j_k \Delta k, \quad (11)$$

где

$$I_\Phi(\varphi_k) = I_v - I_0 \left(e^{\frac{q\varphi_k}{\Theta}} - 1 \right). \quad (12)$$

Систему рекуррентных соотношений (10)–(12) будем решать при граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} j_k = 0, \varphi_k = \varphi_0 \text{ при } k = 0 (x = 0) \\ j_N = I, \varphi_N = V \text{ при } k = N (x = l_1) \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Здесь $N \Delta k = 1$, $l_1 = N \Delta x$, N – число разбиений участка l_1 на элементы Δx . При этом (как и выше) здесь и ниже токи I_v , I_0 , I_Φ , j_k и сопротивление R будем относить к единице освещенной поверхности СЭ так, что $l_1 l_2 = 1$.

При этом φ_0 (потенциал середины n^+ -слоя) так же, как и все j_k и φ_k , независимы, а I_v , I_0 , R и l_1 являются параметрами модели, от которых следует изучить зависимость ВАХ СЭ.

С учетом нелинейности уравнения (12) решение уравнений (10), (11) требует нестандартного подхода. В нашем случае задача существенно упрощается, если φ_0 рассматривать как аргумент, от которого выходные ток $j_N = I$ и напряжение $\varphi_0 = V$ зависят параметрически.

Из физических соображений следует, что φ_0 лежит в интервале $\varphi_{кз} \leq \varphi_0 \leq V_{xx}$. Каждому φ_0 в этом

интервале однозначно соответствует своя пара значений $\varphi N = V$ и $jN = I$, совокупность которых и образует ВАХ СЭ. При этом $\varphi_{кз}$ определяется как то значение φ_0 , при котором $V = 0$ и $I = I_{кз}$.

На рис. 1 показана серия ВАХ, рассчитанных для типичных СЭ с параметрами $I_v = 25$ мА/см² и $V_{xx} = 0,6$ В и различающимися сопротивлениями лицевого слоя R (на рис. 1 приведены кривые для различных l_1 , так как $R \sim l_1$).

Для анализа результатов рассмотрим уравнения (4)–(7) интегрированием их отношения:

$$j dj = -\frac{1}{R} I_\Phi(\varphi) d\varphi. \quad (14)$$

Здесь и ниже положено $l_1 l_2 = 1$, и поэтому I_Φ, I_v, I , а также R будут рассматриваться на единицу освещаемой поверхности СЭ.

Учитывая (5), интегрирование (14) дает

$$j^2 = \frac{2}{R} [\Phi(\varphi_0) - \Phi(\varphi)],$$

где
$$\Phi(\varphi) = (I_v + I_0)\varphi - \frac{\Theta}{q} \left(e^{\frac{q\varphi}{\Theta}} - 1 \right) I_0. \quad (15)$$

Здесь φ_0 (как и выше) – потенциал середины ($x = 0$) n^+ -слоя. Это уравнение справедливо и для $x = l_1$, где $j = I$ и $\varphi = V$. При этом для ВАХ СЭ получается следующее уравнение:

$$I^2 = \frac{2}{R} [\Phi(\varphi_0) - \Phi(V)],$$

$$I^2 = \frac{2}{R} \Delta\varphi \left[I_v + I_0 - I_0 e^{\frac{qV}{\Theta}} F(\alpha) \right], \quad (16)$$

где

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - V, \quad \alpha = \frac{q}{\Theta} \Delta\varphi, \quad F(\alpha) = \frac{e^\alpha - 1}{\alpha}. \quad (17)$$

В этих уравнениях фигурирует параметр φ_0 , для определения которого можно использовать уравнение (7) в интегральной форме:

$$R = \int_V^{\varphi_0} \frac{d\varphi}{j(\varphi)}. \quad (18)$$

Из (15) и (16) устанавливается следующая связь между $\varphi_{кз}$ и $I_{кз}$:

$$I_{кз}^2 = \frac{2}{R} \Phi(\varphi_{кз}). \quad (19)$$

При больших R ($R \sim \frac{V_{xx}}{I_{кз}}$) максимальное значение

$I_{кз}^2$ достигается при $\varphi \approx V_{xx}$ и согласно (19) зависит от R по закону

$$I_{кз}^2 = \frac{2}{R} \Phi(\varphi_{кз}). \quad (20)$$

В то же время при малых R ($R \ll \frac{V_{xx}}{I_{кз}}$) величина

$\varphi_{кз} \approx \frac{1}{2} R I_{кз}$ и поэтому $I_{кз} \approx I_v$, т. е. слабо зависит от R .

На рис. 1 видно, что при $R < R_n \approx 4$ Ом/см² вольт-амперная характеристика СЭ приближается к идеальной, у которой $I_{кз}$ не зависит от R . В то же время при $R > R_n$ эти параметры уменьшаются обратно пропорционально \sqrt{R} в полном соответствии с (19) и (20).

Необходимо отметить, что при больших расстояниях между электродами в середине межэлектродного пространства даже при токе короткого замыкания должна существовать «нейтральная» зона, в которой фототоки сбалансированы обратными токами из n^+ -канала в базовую p -область. Протяженность этой части канала будет определяться из условия $j(x = l_1 - \lambda) = \gamma I$, где $\gamma \ll 1$ – величина, задающая требуемую точность расчетов ($\sim 0,01$), λ – протяженность активного участка канала, прилегающего к электродам, в котором собирается основная часть фототока.

Если на этом ($l_1 - \lambda < x < l_1$) участке n^+ -канала пренебречь обратными токами, то возрастание тока в n^+ -канале в λ -области будет происходить по линейному закону, и тогда, как не трудно показать с помощью (8),

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{l_1} \frac{1}{2} R I. \quad (21)$$

Здесь величина $v = \lambda/l_1$ представляет собой долю активной части лицевого слоя СЭ. Она зависит не только от l_1 (точнее – от R), но и от выходных тока и напряжения СЭ. Пользуясь численными методами, изложенными выше, мы рассчитали $\Delta\varphi$ и $v = \Delta\varphi/2IR$ в зависимости от I и V серии СЭ с разными R . Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Из этих расчетов видим, что в хорошем приближении ВАХ СЭ приближается к идеальной ($v \approx 1$) при $R < R_n$, где $R_n = 4$ Ом/см². В то же время при $R > R_n$ область идеальности уменьшается в сторону меньших выходных напряжений ($V < V_n$, где $V_n = 0,45$ В для $R = 6$ Ом/см² и $V_n = 0,22$ В для $R = 25$ Ом/см²) и, следовательно, больших токов. Параметр неидеальности v связан с коэффициентом заполнения ВАХ СЭ $\eta = I_m V_m / I_{кз} V_{xx}$, где $I_m V_m$ – максимальная мощность выходного тока при заданных I_v и V_{xx} . Расчет показывает, что $V_m \approx V_n$, так что определение V_n и, соответственно, I_m очень важно для оптимизации электрических режимов эксплуатации СЭ.

Заключение. Таким образом, с учетом распределения потенциалов и токов в лицевом n^+ -слое солнечных элементов n^+p -типа получено выражение для их вольт-амперных характеристик в зависимости от параметров лицевого слоя. Проведенный анализ уравнений (4)–(8) позволил представить уравнение ВАХ СЭ в новой форме, более точно описывающей зависимость выходных параметров СЭ от R , а также от характеристик p - n -перехода. Показано, что при сопротивлении лицевого слоя $R > R_n$ (~ 4 Ом/см²) ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и коэффициент заполнения (η) уменьшаются обратно пропорционально \sqrt{R} , а при $R < R_n$ ВАХ практически не зависит от R . Сопротивление лицевого слоя солнечного элемента влияет на вольт-амперные характеристики. В условиях космоса деградация параметров СЭ происходит в значительной степени из-за возрастания сопротивления лицевого n^+ -слоя, пересыщенного донорами в условиях облучения.

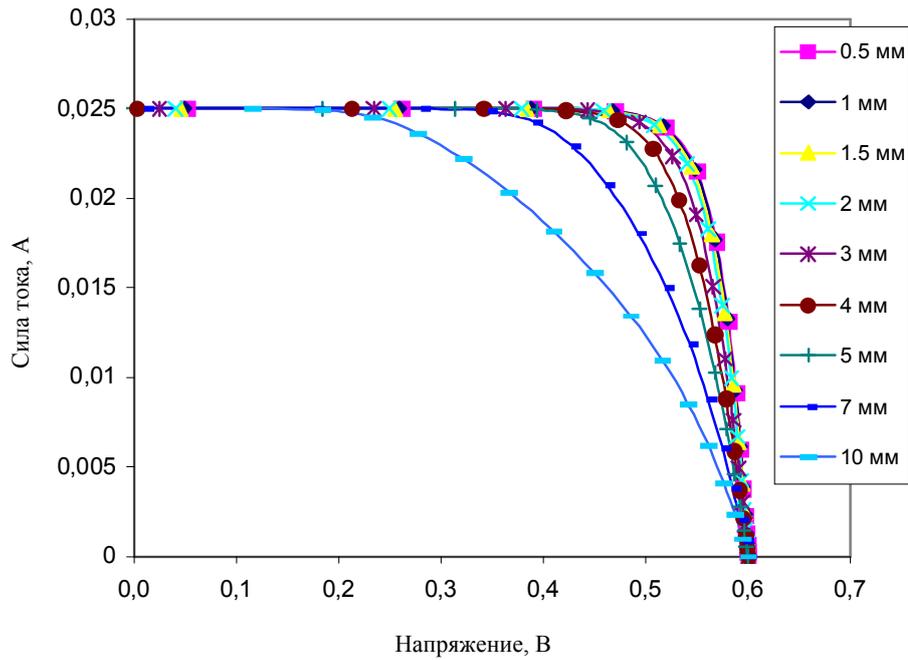


Рис. 1. Расчетные ВАХ для СЭ с $I_{\text{ф}} = 25 \text{ мА/см}^2$ и $V_{\text{xx}} = 0,6 \text{ В}$

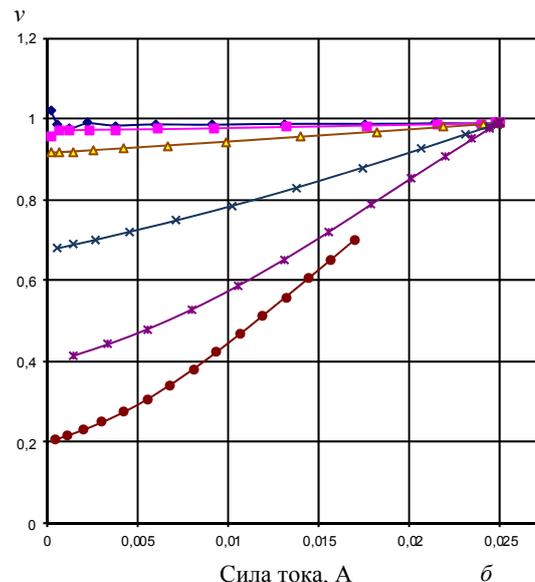
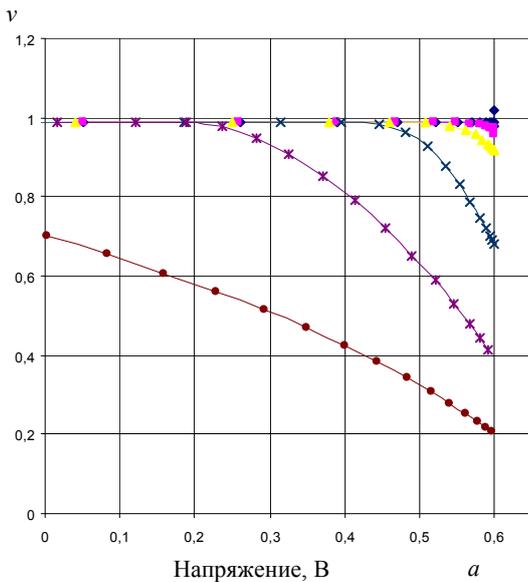


Рис. 2. Зависимость γ от V (а) и I (б) для разных значений $R(I_1)$

Библиографические ссылки

1. Филачев А., Таубкин И., Тришенков М. Твердотельная электроника. М. : Физматкнига, 2007. 384 с.
2. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena theory, experiment, and applications. Elsevier Ltd, 1999. 206 p.
3. Clean electricity from photovoltaics / Edited by M. Archer, R. Hill. London : Imperial College Press, 2001. 868 p.
4. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003. 1179 p.

5. Markvart T., Castafier L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier Ltd, 2003. 1015 p.
6. Байерс Т. 20 конструкций с солнечными элементами. М. : Мир, 1988. 197 с.
7. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы // Электроника-НТБ. 2000. № 6. С. 40–47.
8. Härkönen J. Processing of High Efficiency Silicon Solar Cells. Helsinki : Helsinki University of Technology, 2001. 106 p.
9. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2nd Edition. Wiley, 2010. 1162 p.

10. Würfel P. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2010. 241 p.

11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М. : Мир, 1984. 456 с.

12. Колтун М. Солнечные элементы. М. : Наука, 1987. 192 с.

13. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М. : Сов. радио, 1971. 248 с.

14. Фаренбрук А., Бьюб Р. Солнечные элементы (теория и эксперимент). М. : Энергоатомиздат, 1987. 280 с.

15. Nelson J. The Physics of Solar Cells. London : Imperial College Press, 2003. 384 p.

References

1. Filachev A., Taubkin I., Trishenkov M. *Tverdotelnaya elektronika* [Solid State Electronics]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2007, 384 p.

2. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena theory, experiment, and applications. Elsevier Ltd, 1999. 206 p.

3. Clean electricity from photovoltaics. Edited by Archer M., Hill R. London, Imperial College Press, 2001. 868 p.

4. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003, 1179 p.

5. Markvart T., Castafier L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier Ltd, 2003. 1015 p.

6. Baiers T. *20 konstruktii s solnechnimi elementami* [20 structures with solar cells]. Moscow, Mir Publ., 1988, 197 p.

7. Meitin M. [Photovoltaics: Materials, Technologies and Perspective]. *Elektronika-NTB*. 2000, no. 6, p. 40–47 (In Russ.).

8. Härkönen J. Processing of High Efficiency Silicon Solar Cells. Helsinki, Helsinki University of Technology, 2001, 106 p.

9. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition. Wiley, 2010, 1162 p.

10. Würfel P. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010, 241 p.

11. Zi S. *Fizika poluprovodnikovikh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow, Mir Publ., 1984, 456 p.

12. Koltun M. *Solnechnye elementy* [Solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 192 p.

13. Vasiliev A., Landsman A. *Poluprovodnikovye preobrazovateli* [Semiconductor photovoltaics] Moscow, Sov. Radio Publ., 1971, 248 p.

14. Farenbruk A., Bube R. *Solnechnye elementy (teoria I eksperiment)* [Solar cells (theory and experiment)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 280 p.

15. Nelson J. The Physics of Solar Cells. London: Imperial College Press, 2003, 384 p.

© Логинов Ю. Ю., Брильков А. В.,
Мозжерин А. В., 2015