

К. ф.-м. н. П. В. ГОРСКИЙ, д. ф.-м. н. И. М. РАРЕНКО,
к. т. н. А. Ф. ЛЯШЕНКО, А. И. ТЫМЧУК

Украина, г. Черновцы, ОКБ "Рута", Черновицкий нац. ун-т
E-mail: ruta@sacura.net

Дата поступления в редакцию
18.04 2001 г.

Оппоненты к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
к. т. н. А. Н. ШМЫРЕВА

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОКОСЪЕМНЫХ КОНТАКТОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Учитывается влияние площади контактов и сопротивления растекания, омического контакта и электродов металлизации на оптимальный ток.

Основными аргументами в пользу солнечной энергетики являются ее экологическая безопасность и практически неисчерпаемость источника [1]. Однако кажущаяся простота преобразования солнечной энергии в электрическую с использованием фотоэффекта на $p-n$ -переходе скрывает существенные технологические ограничения при создании солнечных элементов (СЭ), в силу чего КПД реальных СЭ не превышает 17–20%.

Широкое применение СЭ в силовой энергетике сдерживается их низким КПД и, соответственно, высоким уровнем стоимости одного ватта генерируемой мощности.

В данной работе мы попытались проанализировать влияние конструктивно-технологических факторов при создании токосъемной сетки СЭ и возможности достижения максимальной мощности, выделяемой элементом на согласованную полезную нагрузку.

Вопросы оптимизации конструктивных параметров СЭ рассматривались во многих работах [2–7]. В работе [4] задача оптимизации металлизации СЭ решается для случая токосъемных контактов простейшей формы, причем в качестве последовательного сопротивления учитывается только сопротивление растекания, а сопротивление объема, омических контактов и электродов металлизации не учитывается. Однако даже при этих допущениях решение задачи, предложенное в [4], содержит ряд противоречий.

Первое из них заключается в том, что не учитывается влияние сопротивления растекания на оптимальный ток при подключении СЭ на согласованную нагрузку. Оптимальный ток СЭ, согласно [4, с. 146], определяется из уравнения

$$\ln(n_{\text{св}}) + \ln(1-m) - \frac{m}{1-m} = 0, \quad (1)$$

где $n_{\text{св}}$ — отношение фототока к току насыщения $p-n$ -перехода;

m — доля оптимального тока СЭ по отношению к фототоку.

Но даже при пренебрежении влиянием сопротивления растекания на величину оптимального тока СЭ уравнение (1) справедливо при $n_{\text{св}} \gg 1$.

Если рассматривать СЭ в виде квадрата с токосъемом в виде прямоугольной полоски, проложенной вдоль одной из сторон, то для отношения площади полоски к общей площади СЭ, согласно [4], получим следующее выражение:

$$x = \frac{2\beta m^2 n_{\text{св}}}{\ln[n_{\text{св}}(1-m)+1]}, \quad (2)$$

где

$$\beta = \frac{1}{3} \frac{qI_s R_s}{kT}; \quad (3)$$

q — элементарный заряд;

I_s — общий ток насыщения $p-n$ -перехода;

R_s — поверхностное сопротивление базового слоя;

A — фактор неидеальности характеристики $p-n$ -перехода;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Из уравнения (1), которое определяет оптимальный ток СЭ, вытекает, что когда $n_{\text{св}} \rightarrow \infty$, то $m \rightarrow 1$. Так как при больших $n_{\text{св}}$ $\ln n_{\text{св}} < n_{\text{св}}$, нетрудно определить, что формула (2) при больших $n_{\text{св}}$ теряет физический смысл, потому что в этом случае $x > 1$, хотя по содержанию задачи оптимизации должно быть $x < 1$.

В работе [5] при решении задачи оптимизации, по существу, также рассматривается сопротивление растекания барьерообразующего металла, а размеры контактной гребенки подбираются таким образом, чтобы ее собственное сопротивление не превышало суммы сопротивлений объема, растекания и омического контакта. Влияние всех перечисленных сопротивлений на оптимальный ток СЭ в данной работе не учитывается, т. е. он определяется из уравнения (1).

В работах [6, 7] приводятся уравнения, определяющие конструктивные параметры солнечных элементов через оптимальные значения тока и напряжения, однако последние сами являются функциями конструктивных параметров СЭ.

Целью нашей работы является получение такого решения задачи оптимизации металлизации СЭ, которое было бы свободно от отмеченных выше логических и математических противоречий. Для этого запишем общее выражение для мощности СЭ при

работе на согласованную нагрузку с учетом влияния на нее сопротивлений растекания, омического контакта и металлизации. Рассуждая аналогично [4], получим такое выражение для мощности СЭ:

$$P = \frac{AkT}{q} I \ln \left[1 + \frac{I_\phi - I}{I_s} \right] - I^2 (R_p + R_m + R_{ок}), \quad (4)$$

где I_ϕ — полный фототок;
 I — ток во внешней цепи;
 R_p, R_m и $R_{ок}$ — соответственно сопротивления растекания, электродов металлизации и омического контакта.

Рассмотрим СЭ с токосъемом простейшей формы. Пусть этот СЭ есть квадрат со стороной L , а его токосъем — прямоугольник со сторонами L и Lx , проложенный вдоль одного из его краев. Тогда площадь освещенной поверхности СЭ равняется $L^2(1-x)$. Определим также сопротивления, которые входят в формулу (4).

Сопротивление растекания, в соответствии с [4, с. 143–144], равно $1/3R_s(1-x)$, где R_s имеет тот же смысл, что и в формуле (3).

Сопротивление омического контакта может быть определено как

$$R_{ок} = \frac{\rho_{ок}}{L^2 x}, \quad (5)$$

где $\rho_{ок}$ — удельное сопротивление омического контакта в расчете на единицу поверхности [4, с. 137].

Собственное сопротивление металлизации определим по формуле

$$R_m = \frac{\rho_m}{d_m x}, \quad (6)$$

где ρ_m — удельное сопротивление металлизации;
 d_m — толщина слоя.

Учитывая, что фототок I_ϕ связан со световым потоком Φ соотношением [2, с. 282]

$$I_\phi = C\Phi^\alpha \quad (\alpha \geq 1), \quad (7)$$

и приняв в качестве единицы тока величину I_s , а в качестве единицы мощности величину $AkTI_s/q$, формулу для мощности (4) с учетом значений всех вышеупомянутых сопротивлений можно записать в такой форме:

$$p = i \ln(1 + n_{св}(1-x)^\alpha - i) - i^2 \left(\beta(1-x) + \frac{\mu}{x} \right), \quad (8)$$

где p — мощность в единицах $AkTI_s/q$;
 i — ток внешней цепи в единицах I_s ;
 $\mu = (qI_s/AkT)(\rho_{ок}/L^2 + \rho_m/d_m)$.

Решение задачи максимизации (8) как функции двух независимых переменных i и x после исключения i приводит к такому уравнению относительно x :

$$\begin{aligned} & \ln(0,5(1 + n_{св}(1-x)^\alpha)(1 + (1 - 4\alpha n_{св}(1-x)^{\alpha-1} \times \\ & \times (1 + n_{св}(1-x)^\alpha)^{-2}(\beta + \mu x^{-2})^{-1})^{0,5})) - (\beta + \mu x^{-2}) \times \\ & \times (1 + n_{св}(1-x)^\alpha)^2 (4\alpha n_{св}(1-x)^{\alpha-1})^{-1} \times \\ & \times (1 - (1 - 4\alpha n_{св}(1-x)^\alpha)^{-2}(\beta + \mu x^{-2})^{-1})^{0,5})^2 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - (\beta(1-x) + \mu x^{-1})(1 + n_{св}(1-x)^\alpha)(1 - (1 - 4\alpha n_{св}(1-x)^{\alpha-1} \times \\ & \times (1 + n_{св}(1-x)^\alpha)^{-2}(\beta + \mu x^{-2})^{-1})^{0,5}) = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

Уравнение (9) при произвольных значениях параметров можно решить только численно.

Отличие наших результатов от результатов работы [3] заключается в том, что в последней в общем выражении для мощности (8) сначала отбрасывается член, пропорциональный i^2 , и не учитывается зависимость фототока от x , что при $n_{св} \gg 1$ приводит к уравнению (1), потом по формуле (2) вычисляется x , т. е. не учитывается контактная составляющая сопротивления, что равнозначно условию $\mu=0$.

С целью более детального исследования уравнения (9) допустим, что $n_{св} < 1$ (это отвечает высокой скорости рекомбинации электронно-дырочных пар и характерно для СЭ с низкой эффективностью). В этом случае после разложения левой части уравнения (9) в ряд по $n_{св}$ при ограничении линейным приближением оно приобретает вид

$$\frac{2\alpha + \beta(2\alpha - 1)}{\mu} (x^3 - x^2) - (2\alpha + 1)x + 1 = 0. \quad (10)$$

Анализируя уравнение (10), легко увидеть, что оно имеет, по крайней мере, один действительный корень x_0 , который подходит по смыслу задачи оптимизации, причем он удовлетворяет условию $x_0 < 1/(2\alpha + 1)$. Это условие остается в силе даже при $I_s \rightarrow \infty$, поскольку отношение β/μ при этом условии является конечным и равняется $R_s/(3(\rho_{ок}/L^2 + \rho_m/d_m))$, так что при $x=0$ левая часть уравнения (10) является положительной, а при $x=1/(2\alpha+1)$ — отрицательной. Пользуясь теоремой Безу [8, с. 4], можно выразить другие два корня уравнения (10) через корень x_0 по формуле

$$x_{2,3} = (1-x_0)(1 \pm (1+4x_0(1-x_0)^{-1} + 4k(2\alpha+1)(1-x_0)^{-2})^{1/2}) = 0. \quad (11)$$

Из (11) видно, что если $x_0 < 1/(2\alpha+1)$, то $x_2 > 1$, а $x_3 < 0$, т. е. корни x_2 и x_3 по смыслу задачи не подходят. Следовательно, решение задачи оптимизации существует, и единственно для любых уровней инжекции, хотя исключительно в целях математической простоты мы рассмотрели случай, когда $n_{св} < 1$.

Таким образом, решение задачи оптимизации токосъемной сетки СЭ, проведенное с учетом влияния площади контактов и величины сопротивлений растекания, омического контакта и металлизации на оптимальный ток СЭ, показало, что относительная площадь металлизации не превышает $1/(2\alpha+1)$, где α — показатель степени в законе зависимости фототока от светового потока.

Результаты работы использованы при расчете топологии металлической токосъемной сетки СЭ в ОКБ «Рута» (г. Черновцы).

Численный учет вклада всех составляющих последовательного сопротивления при расчете мощности СЭ возможен после сопоставления теоретических расчетов с практическими результатами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Карабанов С. Солнечная энергетика. Современное состояние и перспективы развития // Живая электроника России. — 1999. — С. 78—81.
2. Чопра К. Л., Дас С. Р. Тонкопленочные солнечные элементы. — М.: Мир, 1986.
3. Chen M. T., Wu C. Y. A new method for computer-aided optimization of solar cell structures // Solid St. Electronics. — 1985. — Vol. 28. — P. 751.
4. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. — М.: Сов. радио, 1971.

5. Стриха В. И., Кильчицкая С. С. Солнечные элементы на основе контакта металл — полупроводник. — СПб: Энергоатомиздат, 1991.
6. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. — М.: Мир, 1987.
7. Ван П., Ван В. Конструирование сеточных электродов в кремниевых многоэлементных солнечных батареях // Тайяньнэн сюэбао. — 1983. — Т. 4, №3. — С. 289—295.
8. Корн Г. А., Корн Т. Н. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1978.

УГОЛ ЗРЕНИЯ

INTRINSIC SEMICONDUCTOR — КАК ЭТО ПО-РУССКИ?

Известно, что вопросы терминологии настолько же сложны, насколько важны. Однажды войдя в обиход, термин практически уже не поддается коррекции, им пользуются, даже если он был не совсем удачным. И все же термины не вечны, и если параллельно существующему появляется другой, более точно отражающий суть явления, он в конце концов приходит на смену термину-неудачнику...

Машинный перевод англоязычного термина "intrinsic semiconductor" на русский язык дает сочетание "свойственный полупроводник". Это, конечно, звучит не по-русски. Специальный словарь [1, с. 157] дает два варианта перевода — "собственный полупроводник" и "полупроводник с собственной проводимостью". На первом месте стоит "собственный полупроводник" — и в силу краткости (что так существенно для термина), и в силу большей употребительности.

Вместе с тем и это сочетание вряд ли можно считать удачным. Слово "собственный" имеет собственный смысл, значение ("собственный дом", "собственными глазами", "собственный вес" [2, с. 173]), и сочетание его со словом "полупроводник" представляется таким же неестественным, как и "свойственный полупроводник". Однако сочетание это устойчиво используется в научном обороте, и это не случайно. (Как не может быть случайной шуткой машинный перевод "свойственный полупроводник"; недаром слово "intrinsic" в несвязанном состоянии переводится как "2) присущий, свойственный" [3, с. 852]).

Термины "собственный полупроводник", "полупроводник с собственной проводимостью" имеют задачу охарактеризовать полупроводник, и эту задачу слово "intrinsic" в английском языке выполняет в значении "сущность", "основное свойство", "характерная особенность", "отличительный признак" кого-либо,

чего-либо (см. in-trin-sic [4, с. 554]). В немецком термине "Eigenhalbleiter" [1, с. 157] слово "ei-gen" также означает "свойственный, присущий" кому-либо, чему-либо [5, с. 381]. В русском языке уместно "примерить" к слову "полупроводник" слово "собственно" [2, с. 172] — "полупроводник в собственном, буквальном смысле слова", "именно, только, непосредственно полупроводник" — "собственно полупроводник".

Сочетание "собственно полупроводник" представляется нам более точным, то есть более "по-русски". Если это мнение может быть поддержано, то вариант "собственно полупроводник" получит хождение параллельно варианту "собственный полупроводник". Его предпочтительное использование может происходить мягко, поскольку не будет резко контрастировать с принятым.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Словарь по микроэлектронике (английский, русский, немецкий, французский, нидерландский) / Прохоров К. Я., Зайчик Б. И., Боровикова Л. И. — М.: Рус. яз., 1991.
2. Словарь русского языка: В 4-х т. / Под ред. А. П. Евгеньевой. — Т. 4. — М.: Рус. яз., 1988.
3. Большой англо-русский словарь: В 2-х т. / Ю. Д. Апресян, И. Р. Гальперин, Р. С. Гинзбург и др. — т. I. — М.: Рус. яз., 1987.
4. Longman dictionary of contemporary english. — М.: Рус. яз., 1992.
5. Lexikon der deutschen Sprachlehre / Redaktion: dr. Ernö Zeltner. — Gütersloh / München. — Verlagsgruppe Bertelsmann GMBH, 1991.

Е. А. ТИХОНОВА, В. Ю. ТКАЧЕНКО
Украина, г. Одесса