

УДК 621.382

В.Л. Самотовка

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, каб.419, Киев, 03056, Украина.

Оценка качества фотоэлектрических преобразователей на структурах с р-п переходом

В работе представлены результаты исследований кремниевых фотоэлектрических преобразователей с различными значениями коэффициентов полезного действия и факторов заполнения. Приводятся теоретически полученные выражения параметров качества, основанные на применении модифицированных функций Бесселя, аргументы в которых пропорциональны температуре, m -фактору р-п перехода и амплитудным значениям, применяемых разночастотных гармонических напряжений. Приводится интегральный показатель качества, являющийся наибольшим значением напряжения разностной частоты при нагрузках равных эффективному сопротивлению фотоэлектрической структуры с р-п переходом. Библ. 7, рис. 1, табл. 2.

Ключевые слова: эффективное сопротивление, разностная частота, КПД, модифицированные функции Бесселя, фотоэлектрические преобразователи.

Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе полупроводниковых структур с р-п переходом (ПС), в сравнении с параметрическими диодами, характеризуются низкими значениями активного последовательного и шунтирующего параллельного, относительно р-п перехода, сопротивлений. Это обусловлено относительно большой площадью и минимально-возможным расстоянием р-п перехода к освещаемой поверхности пластины. В работе [1] указано о несущественном влиянии шунтирующего статического активного сопротивления на эффективность ФЭП. Однако при различных нагрузочных сопротивлениях ширина р-п перехода может меняться, вовлекая в область пространственного заряда различное количество структурных дефектов. Это может влиять на величину дифференциального шунтирующего сопротивления.

В работах [2, 3, 4, 5, 6] представлены методы измерения дифференциальных и статиче-

ских, шунтирующих р-п переход сопротивлений, но не рассмотрена возможность определения шунтирующих сопротивлений в диапазоне напряжений прямого смещения р-п перехода. В данной работе представлены методы и результаты определения шунтирующих р-п переход сопротивлений в режиме прямого смещения р-п перехода и отсутствия светового потока.

Модифицированные функции Бесселя в дифференциальной спектроскопии электрического тока в элементе с р-п переходом

Электрическая цепь (ЭЦ), которая применялась для определения параметров ФЭП, представлена на (рис. 1). Где 1-безинерционная электрическая цепь, состоящая из последовательного соединения ПС-2 и линейного нагрузочного резистора R_i ; 3-р-п переход; V -напряжение, прикладываемое к ЭЦ; R_{sh} - шунтирующее р-п переход сопротивление; R_s - последовательное активное сопротивление.

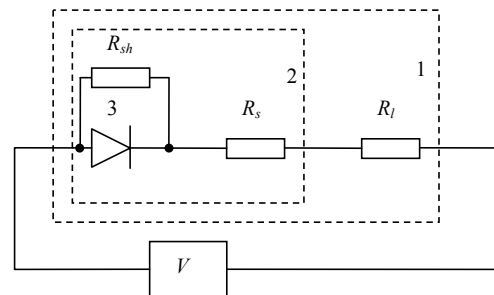


Рис. 1. Структурная схема ЭЦ

Напряжение приложенное к ЭЦ состоит из постоянного напряжения прямого смещения V_0 и двух малосигнальных гармонических напряжений на разных частотах ω_1 и ω_2 :

$$V = V_0 + V_{1m} \cos \omega_1 t + V_{2m} \cos \omega_2 t = V_0 + V_1 + V_2 \quad (1)$$

Статическую ВАХ ПС ФЭП при постоянном напряжении V_0 в интервале напряжений, определяемом суммой гармонических напряжений

V_1+V_2 , аппроксимируем кусочно-экспоненциальной функцией:

$$i_0 = i_s(e^{a(V_0-i_0R)} - 1) + \frac{V_0 - i_0R}{R_{sh}}, \quad (2)$$

где $R=R_s+R_i$; $a=q/(kTm)$; R_s -сопротивление полупроводниковой структуры последовательно соединенное с р-п переходом; R_{sh} -сопротивление параллельное р-п переходу ФЭП.

Используя выражения для постоянного и гармонических токов [7], протекающих в ЭЦ при условии $R_s=0$ $R_{sh} \rightarrow \infty$ $R_i=0$, протекающих в ЭЦ рис. 1 при действии на нее напряжения (1) получены максимальные значения токов на разностной $\omega_1 \pm \omega_2$ и удвоенной $2\omega_1$ частотах, которые достигаются при постоянном напряжении прямого смещения р-п перехода:

$$V_{0dm}(\omega_1 \pm \omega_2) = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{R + R_{sh}}{8ak_{11}(y_1)k_{12}(y_2)i_s R R_{sh}} \right) \quad (3)$$

$$I_{\omega 1m} = \frac{J_{02}(y_2)}{J_{02}(y_2) + 4k_{12}(y_2)} \times \frac{V_{1c}}{R} + \frac{4k_{12}(y_2)}{J_{02}(y_2) + 4k_{12}(y_2)} \cdot \frac{V_{1c}}{R + R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_{\omega 1 \pm \omega 2} = \frac{2\sqrt{2}k_{11}(y_1)k_{12}(y_2)a^2 i_s e^{a(V_0-i_0R)} V_{1c} V_{2c}}{(1 + R\sigma_{sh} + 4k_{11}(y_1)k_{12}(y_2)R a i_s e^{a(V_0-i_0R)})^3} \quad (5)$$

Если $R_{sh} \gg R$, то выражение для сопротивления R_s используя (3-5) можно выразить:

$$R_s = \varepsilon \cdot \frac{V_{1c}}{I_{\omega 1m}} - R_i = \varepsilon \frac{V_{1c}}{V_{\omega 1m}} R_i - R_i \quad (6)$$

где:

$$\varepsilon = \frac{J_{02}(y_2)}{J_{02}(y_2) + 4k_{12}(y_2)}. \quad (7)$$

Постоянное напряжение прямого смещения р-п перехода, при котором достигается максимальное значение тока разностной частоты V_{0dm} , ток насыщения i_s и m -фактор ВАХ определяют из соотношений:

$$V_{0dm}(\omega_1 \pm \omega_2) = V_{0m} - \varepsilon \cdot \frac{V_{1c}}{I_{\omega 1m}} \cdot i_{0m} \quad (8)$$

$$i_s = \left(54\sqrt{2}\varepsilon^2 k_{11}(y_1)k_{12}(y_2) \frac{V_{1c}}{V_{2c}} \frac{I_{(\omega_1-\omega_2)m}}{I_{\omega 1m}^2} e^{aV_{0dm}(\omega_1-\omega_2)} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$m = \frac{2\sqrt{2} q V_{2c}}{27 k T \varepsilon} \frac{I_{\omega 1m}}{I_{(\omega_1-\omega_2)m}}. \quad (10)$$

Из (4) получили выражения для шунтирующего р-п переход сопротивления R_{sh} :

$$R_{sh} = \frac{(R_i + R_s)^2 - (\varepsilon + \eta)(R_i + R_s)R_{ef1}}{R_{ef1}\varepsilon - (R_i + R_s)}, \quad (11)$$

где:

$$\eta = \frac{4k_{11}(y_2)}{J_{01}(y_2) + 4k_{12}(y_2)}, \quad R_{ef1} = \frac{V_{1c}}{I_{\omega 1m}} = \frac{V_{1c}}{V_{\omega 1m}} R_i. \quad (12)$$

Если аргументы y_1 и y_2 функции Бесселя меньше 0,35, то с погрешностью менее 1% можно принять, что $\varepsilon=1/3$, а $\eta=2/3$. Тогда шунтирующее р-п переход сопротивление:

$$R_{sh} = \frac{3((R_i + R_s)R_{ef1} - (R_i + R_s)^2)}{3(R_i + R_s) - R_{ef1}}. \quad (13)$$

Кроме того, с учетом указанных значений $\varepsilon=1/3$ и $\eta=2/3$, если не выполняется условие $R_{sh} \gg 3(R_i + R_s)$, то m -фактор:

$$m = \frac{2\sqrt{2} q V_{2c}}{9 k T} \frac{R_{sh}^2}{(3(R_i + R_s) + R_{sh}) \cdot (R_i + R_s + R_{sh})} \times \frac{I_{\omega 1m}}{I_{(\omega_1-\omega_2)m}}. \quad (14)$$

Экспериментальная часть

Исследования проведены на образцах кремниевых фотоэлектрических преобразователей на структурах с р-п переходом. Образцы характеризуется значением фактора заполнения (FF) и коэффициентом полезного действия. Фотоэлектрические параметры образцов ФЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры ФЭП

№ образца	Параметры ФЭП			
	Isc, А	V0с, В	КПД, %	FF
1	3,265	0,604	6,0	47,0
2	5,497	0,629	15,6	69,8
3	5,573	0,628	17,3	76,5
4	5,6	0,63	18,2	82,0

Каждый ФЭП включали в электрическую цепь согласно рисунку 1 вместо ПС. В отсутствии светового потока на ЭЦ подавали напряжение (1). Устанавливали различные значения сопротивления нагрузочного регулируемого резистора R_i . Для каждого фиксированного значения сопротивления R_i изменяли величину постоянного напряжения V_0 до уровня V_{0m} , при котором ток разностной частоты $I_{\omega 1-\omega 2}$ достигает максимального значения. На резисторе R_i измеряли падение напряжения $V_{\omega 1m}$, созданное током $I_{\omega 1m}$, напряжения $V_{(\omega_1-\omega_2)m}$, созданное током $I_{(\omega_1-\omega_2)m}$ и постоянное напряжение V_{0m} , приложенное к ЭЦ. Среднеквадратичные значения гармонических напряжений V_{1c} и V_{2c} и соответствующие им амплитудные значения V_{1m} , V_{2m} выбраны из условий $y_1 \leq 0,35$; $y_2 \leq 0,35$.

Расчет шунтирующего сопротивления R_{sh} выполнен, используя (13), R_s (6) и m -фактор (10). R_s и m -фактор определяли при сопротив-

лении нагрузки 0,1 Ом. Результаты исследований приведены в таблице 2. В результате анализа полученных данных выявлен наиболее информативный интегральный параметр качества ПС ФЭП – λ :

$$V_{(\omega_1-\omega_2)m} = \frac{2\sqrt{2}}{27} \cdot \frac{q}{kTm} \cdot \frac{R_{sh}^2 V_{1c} V_{2c} R_l}{R(R+R_{sh})^2} \sim \lambda =$$

$$= \left(m(R_l + R_s) \left(1 + \frac{R_l + R_s}{R_{sh}} \right)^2 \right)^{-1} \quad (15)$$

Он объединяет максимальное значение падения напряжения разностной частоты $V_{(\omega_1-\omega_2)m}$ на фиксированном сопротивлении 0,1 Ом резистора R_l и наибольшее значение максимального

напряжения $V_{(\omega_1-\omega_2)m}^{max}$ и тока $I_{(\omega_1-\omega_2)m}^{max}$ разностной частоты в диапазоне нагрузочных сопротивлений 0,1–0,9 Ом. Указанный интегральный параметр качества включают такие известные показатели качества ПС, как шунтирующее р-п переход сопротивление R_{sh} , последовательно соединенное с р-п переходом сопротивление R_s и m фактор. Кроме того, выявлен такой параметр, как максимальное значение сопротивления нагрузочного резистора R_{lc} . Увеличение сопротивления нагрузочного резистора выше R_{lc} приводит к росту постоянного напряжения V_{0m} и снижению R_{sh} . Таким образом, более высокое значение R_{lc} характеризует более качественные ПС ФЭП.

Таблица 2. Результаты эксперимента

№ обр.	RI= 0,1 Ω, V(ω1-ω2)m, μV	V max (ω1-ω2)m, μV	m, RI= 0,1 Ω	2RImax, Ω	I _{max} (ω1-ω2)m, μA	R _{sh} max, Ω	R _{lc} , Ω	R _{shc} , Ω	V _{0m} , V	R _s , Ω	m	λ, Ω ⁻¹
1	170	190	1,51	0,9	422	7,0	4,0	12	0,45	0,052	1,7	1,02
2	216	256	1,29	0,4	1270	3,5	0,4	4,5	0,53	0,01	1,36	3,12
3	260	282	1,2	0,4	1410	6,0	6,5	11	0,46	0,012	1,25	3,39
4	300	307	1,3	0,25	2456	18	7,0	20	0,45	0,01	1,25	5,63

Заключение

Таким образом, в данной работе выведены теоретические выражения для расчета показателей качества ПС ФЭП таких, как R_s , R_{sh} , m -фактора и i_s , с учетом влияния значений аргументов функций Бесселя. Предложен выбор значений аргументов, при которых функциями Бесселя можно пренебречь. Выявлены показатели качества ПС ФЭП такие, как максимальное значение падения напряжения разностной частоты $V_{(\omega_1-\omega_2)m}$ на фиксированном сопротивлении, наибольшее значение максимального тока разностной частоты и критическое сопротивление нагрузочного резистора R_{lc} .

Список использованных источников

1. С. Зу. Физика полупроводниковых приборов.–М.:Мир, 1984.–Т. 2.–456 с.
2. M.-K. Lee, J.-C. Wang, S.-F. Horng, H.-F. Meng, "Extractoin of solar cell series resistance without presumed current-voltage function form," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 94, pp. 578-582, March 2010.
3. D. Coffas, P. Coffas, S. Kaplanis, D. Ursutiu, "Results on series and shunt resistance in a c-Si PV cell. Comparison using existing methods and a new one," Journal of optoelectronics and

advanced materials, vol. 10, #11, pp. 3124-3130, November 2008.

4. J. Thongpron, K. Kirtikara, C. Jivacate, "A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 90, pp. 3078-3084, November 2006.
5. D.L. King, B.R. Hansen, J.A. Kratochvil and M.A. Quintana, "Dark current-voltage measurements on photovoltaic modules as a diagnostic or manufacturing tool," 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1125-1128, September 29–October 3, 1997, Anaheim, California.
6. M. Wolf and H. Rauschenbach, "Series resistance effects on solar cell measurements," Advanced energy conversion, vol. 3, pp. 455-479, Pergamon Press, Great Britain, 1963.
7. Самотовка Л.И., Самотовка В.Л. Математическое моделирование токов полупроводниковой структуры с р-п переходом.// Электроника и связь. Тематический выпуск "Проблемы электроники".–2008.–ч.1.–с.38–42.

Поступила в редакцию 20 сентября 2014 г.

УДК 621.382

В.Л. Самотовка

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, каб.419, Київ, 03056, Україна.

Оцінка якості фотоелектричних перетворювачів на структурах з р-п переходом

В роботі наводяться результати досліджень кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з різними значеннями коефіцієнтів корисної дії та факторів заповнення. Також наводяться теоретичні вирази для параметрів якості, які отримуються з використанням модифікованих функцій Бесселя, аргументи в яких пропорційні температурі, m -фактору р-п переходу та амплітудним значенням, різночастотних гармонічних напруг. Пропонується інтегральний показник якості, який є найбільшим значенням напруги різницевої частоти коли навантаження рівні ефективному опорі фотоелектричної структури з р-п переходом. Бібл. 7, рис. 1, табл. 2

Ключові слова: ефективний опір, різницева частота, ККД, модифіковані функції Бесселя, фотоелектричні перетворювачі.

UDC 621.382

V. Samotovka

The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, off. 419, Kyiv, 03056, Ukraine.

Quality assessment of photovoltaic cells with p-n junction

In this work research results for photovoltaic cells with different efficiencies and fill factors are given. Perfection factors' expressions are theoretically derived using modified Bessel functions. Bessel functions have arguments that proportional to temperature, p-n junction's m factor and amplitudes of used harmonic voltages with different frequencies. It is determined that the integral perfection index is the most differential frequency voltage's value measured when load is less than effective resistance of photovoltaic structure with p-n junction. References 7, figures 1, tables 2.

Keywords: effective resistance, differential frequency, efficiency factor, modified Bessel functions, photovoltaic cells.

References

1. Cotfas D., Cotfas P., Kaplanis S., Ursutiu D. (2008), "Results on series and shunt resistance in a c-Si PV cell. Comparison using existing methods and a new one". Journal of optoelectronics and advanced materials, vol. 3, # 11, pp. 3124-3130.
2. King D.L., Hansen B.R., Kratochvil J.A., Quintana M.A. (1997), "Dark current-voltage measurements on photovoltaic modules as a diagnostic or manufacturing tool". «26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.», pp. 1125-1128.
3. Lee M. K., Wang J. C., Horng S. F., Meng H. F. (2010), "Extractoin of solar cell series resistance without presumed current-voltage function form". Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 94, pp. 578-582.
4. Thongpron J., Kirtikara K., Jivacate C. (2006), "A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination". Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 90, pp. 3078-3084.
5. Wolf M. and Rauschenbach H. (1963), "Series resistance effects on solar cell measurements". Advanced energy conversion, vol. 3, pp. 455-479.
6. Sze S. (1984), "Physics of semiconductor devices", Moscow: «Mir», vol. 2, p.456. (Rus)
7. Samotovka L.I., Samotovka V.L. (2008), "Mathematic modelling of currents in semiconductor structure with p-n junction" Electronics and Communications. «Problem in electronics», vol. 1, pp.38-42. (Rus)