

УДК 621.396

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ СВЧ БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ МИКРОСКОПИИ

А.Б. ОВСЕПЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 1 марта 2009 г.)

Методом СВЧ ближнеполевой микроскопии (СВЧ БПМ) исследована локальная фотопроводимость в приповерхностном слое солнечных элементов. Зависимости фотопроводимости солнечного элемента от интенсивности и длины волны падающего светового излучения определены путем измерения коэффициента отражения диэлектрического резонатора СВЧ БПМ на частоте 4.1 ГГц.

1. Введение

Повышение эффективности солнечных элементов является объектом интенсивных исследований [1-4] ввиду возрастающей роли солнечной энергетики. В этом аспекте крайне важно детальное понимание процессов, протекающих на границе $p-n$ перехода солнечного элемента, в частности, изменения локальной фотопроводимости под воздействием внешнего светового облучения.

В последнее время для исследования поверхностных и локальных свойств различных материалов и микроструктур пристальное внимание привлекает метод СВЧ ближнеполевой микроскопии (СВЧ БПМ) [5-8]. Этот метод позволяет проводить бесконтактные исследования многослойных структур и визуализацию с высоким разрешением электрических особенностей на границах раздела [9-12]. С этой точки зрения практический интерес вызывает вопрос о применимости метода БПМ для исследования локальных характеристик солнечных элементов на основе многослойных гетеропереходов.

В настоящей работе приводятся результаты разработки СВЧ БПМ и ее применения для исследования солнечного элемента промышленного образца. Благодаря достаточно глубокому проникновению СВЧ поля изучены также объемные свойства элемента. Посредством измерения электромагнитного отклика ближнеполевого зонда (антенны) исследованы и отображены изменения электропроводности под воздействием облучения светом разной интенсивности и длины волны.

2. Экспериментальная установка и методика

Схема разработанного СВЧ БПМ приведена на рис.1. Расстояние между зондом и исследуемой поверхностью регулируется и контролируется с помощью камертонного датчика, позволяющего поддерживать неизменной дистанцию 20 нм при сканировании зонда. Зонд изготовлен из нержавеющей стальной проволоки диаметром 50 мкм, заостренный конец которой направлен на исследуемую поверхность, а другой конец связан с диэлектрическим резонатором [6] с резонансной частотой 4,1 ГГц. Ячейка солнечного элемента (рис.2) состоит из пяти слоев – задней металлизированной поверхности из алюминия (Al) толщиной 10 мкм, полупроводникового слоя из кремния (Si) *p*-типа толщиной 250 мкм, полупроводникового кремниевого слоя *n*-типа толщиной 0,5 мкм, антиотражающего покрытия из двуокиси титана (TiO₂) толщиной 0,1 мкм и верхней проводящей контактной сетки из серебра (Ag) толщиной 10 мкм. Равномерное солнечное освещение обеспечивалось с помощью четырех светодиодов белого излучения, расположенных на расстоянии 2 см над поверхностью элемента. Интенсивность светодиодов контролировалась управляемым источником тока и измерялась с помощью калиброванного радиометра. Для спектральных измерений применялись светодиоды, излучающие в различных участках спектра.

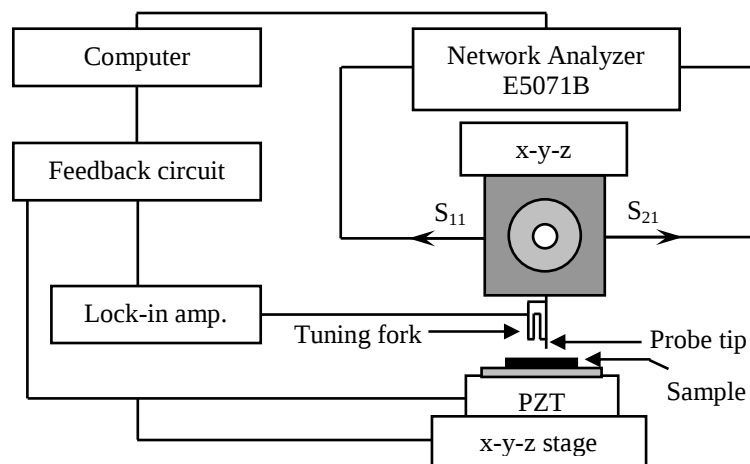


Рис.1. Экспериментальная схема СВЧ БПМ.

Регистрируемыми параметрами в методе СВЧ БПМ являются изменения резонансной частоты диэлектрического резонатора и коэффициента отражения на резонансной частоте, возникающие вследствие изменения условий взаимодействия зонда и исследуемой поверхности при освещении. Для определения коэффициента отражения воспользуемся известным из теории длинных линий выражением [13]

$$S_{11} = 20 \log \left| \frac{Z_R + Z_C + k_T Z_S^R - Z_0}{Z_R + Z_C + k_T Z_S^R + Z_0} \right|, \quad (1)$$

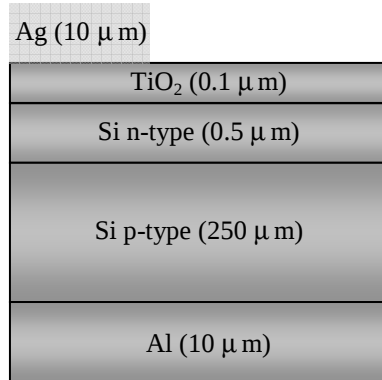


Рис.2. Структура элемента солнечного преобразователя.

где Z_R - импеданс резонатора, Z_C - импеданс связи, k_T - коэффициент трансформации зонда, Z_S^R - реальная часть комплексного импеданса солнечного элемента и Z_0 - импеданс зонда, равный 50 Ом. Величину Z_S^R можно представить в следующем виде:

$$Z_S^R = Z_a^2 k_a^2 t_n t_p (\sigma_n + \sigma_p), \quad (2)$$

где Z_a - импеданс свободного пространства, k_a - волновое число в свободном пространстве, t_n , t_p , σ_n , σ_p - толщины и проводимости кремниевых слоев n - и p -типов, соответственно. Суммарная проводимость представляется как [4]

$$\sigma_n + \sigma_p = \frac{\eta q_e I \tau (\mu_n + \mu_p)}{h\nu(t_n + t_p)}, \quad (3)$$

где η - коэффициент поглощения фотонов, q_e - заряд электрона, τ - время жизни фотоиндуцированных зарядов, μ_n , μ_p - подвижности электронов и дырок, соответственно, I - интенсивность света, $h\nu$ - энергия фотона. Выражения (1)-(3) определяют связь между измеряемым коэффициентом отражения S_{11} и электропроводностью в зависимости от длины волны и интенсивности освещения.

3. Результаты и обсуждение

На рис.3 приведены результаты измерений коэффициента отражения S_{11} при различных интенсивностях облучения солнечного элемента источником белого света. Как видно, облучение с интенсивностью до 122 мВт/см² не вызывает экспериментально различимого изменения электропроводности, вследствие чего кривые (а) и (б) практически совпадают.

Значение коэффициента отражения S_{11} на резонансной частоте 40.7 дБ при темновом режиме является отсчетным уровнем для измерения изменений электропроводности солнечного элемента.

Как показано на вставке рис.3, коэффициент отражения растет с ростом интенсивности освещения, приводящего к увеличению числа носителей и, соответственно, к росту электропроводности. Отметим хорошее согласие рассчитанных из (1)–(3) значений коэффициента отражения (кривая 1 вставки рис.3) с экспериментальными. Одновременно измерялось также выходное напряжение на солнечном элементе. Эти измерения показали, что зависимости изменений выходного напряжения (ΔV) и коэффициента отражения (ΔS_{11}) от интенсивности освещения имеют одинаковый характер и связаны соотношением $\Delta S_{11} / \Delta V \approx 0,2$ дБ/мВ.

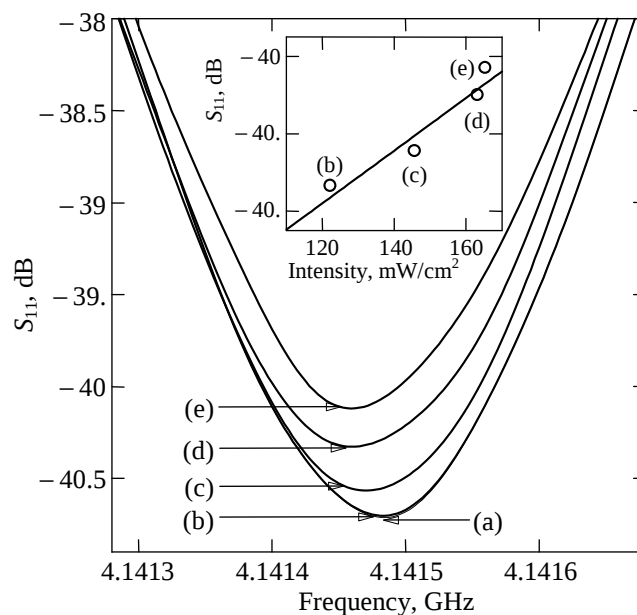


Рис.3. Частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ БПМ при различных значениях интенсивности освещения белым светом: (a) – темновой режим, (b) – 122 мВт/см², (c) – 146 мВт/см², (d) – 163 мВт/см², (e) – 166 мВт/см². На вставке – зависимость коэффициента отражения на резонансной частоте от интенсивности освещения.

На рис.4 приведены частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} от солнечного элемента для различных длин волн падающего света при фиксированной интенсивности освещения 166 мВт/см², а на вставке – зависимости значения S_{11} на резонансной частоте от длины волны светового излучения. Сплошная линия здесь соответствует расчетам по формулам (1)–(3), а кружками отмечены экспериментальные значения. Так как интенсивность освещения на всех длинах волн поддерживалась неизменной, то причиной подобного поведения является частотная зависимость коэффициента

поглощения фотонов η . Из экспериментальных зависимостей выявлено, что длинам волн освещения 460 нм; 526 нм; 590 нм и 625 нм соответствуют значения коэффициента поглощения фотонов 0.31; 0.36; 0.25; 0.19. Частотные зависимости коэффициента отражения и выходного напряжения элемента находятся в полном согласии.

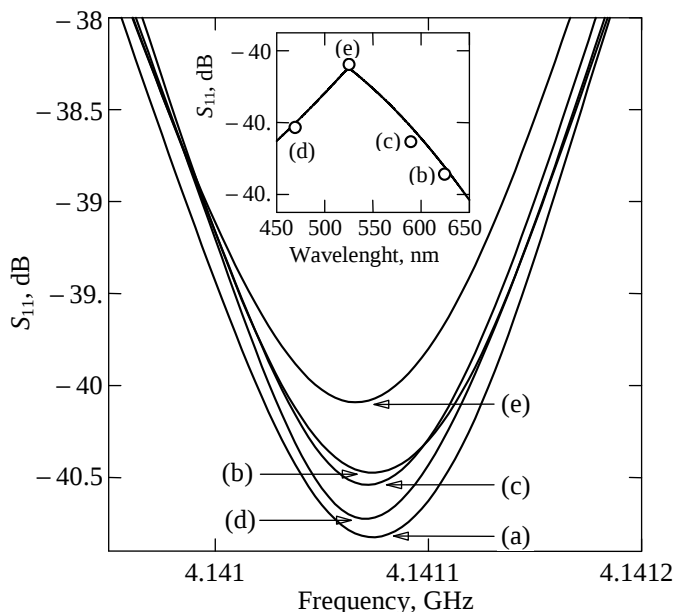


Рис.4. Частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ БПМ при различных значениях длин волн падающего света с фиксированной интенсивностью 166 мВт/см²: (a) – темновой режим, (b) – 625 нм, (c) – 590 нм, (d) – 460 нм, (e) – 526 нм. На вставке – зависимость значения коэффициента отражения на резонансной частоте от длины волны падающего света.

Из приведенных данных следует, что зависимости изменения коэффициента отражения зонда СВЧ БПМ от интенсивности и длины волны освещения солнечного элемента характеризуются крутизной $\Delta S_{11}/\Delta I = 0.014$ дБ/мВт·см⁻² и $\Delta S_{11}/\Delta \lambda = \pm 0.0063$ дБ/нм, а отношение сигнал/шум составляет 25.4 дБ и 17.4 дБ, соответственно.

4. Заключение

Таким образом, метод ближнеполевой СВЧ микроскопии может быть успешно применен для исследования солнечных элементов. Благодаря высокой чувствительности и малым размерам зонда метод позволяет бесконтактным образом исследовать не только интегральные параметры солнечных элементов, но и их локальные неоднородности.

В заключение автор выражает благодарность профессору Согангского университета (Сеул) К. Ли за поддержку и помощь в проведении работы, а также А. Кечиянцу и А. Ахумяну за плодотворные обсуждения результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **T.Kirchartz, U.Rau, et al.** Thin Solid Films, **515**, 6238 (2007).
 2. **J.Thongprona et al.** Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **90**, 3078 (2006).
 3. **D.Pysch, A.Mette, S.W.Glunz.** Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **91**, 1698 (2007).
 4. **W.Brutting.** Physics of Organic Semiconductors, Weinheim, Wiley-VCH, 2005.
 5. **M.Abu-Teir, M.Golosovsky, D.Davidov, et al.** Rev. Sci. Instrum., **72**, 2073 (2001).
 6. **J.Kim, M.S.Kim, K.Lee, J.Lee, D.Cha, B.Friedman.** Meas. Sci. Technol., **14**, 7 (2003).
 7. **S.Dutta, C.Vlahacos, D.Steinbauer, et al.** Appl. Phys. Lett., **74**, 156 (1999).
 8. **B.Knoll, F.Keilmann, A.Kramer, R.Guckenberger.** Appl. Phys. Lett., **70**, 2667 (1997).
 9. **M.Tabib-Azar, P.Pathak, G.Ponchak, S.Le Clair.** Rev. Sci. Instrum., **70**, 2783 (1999).
 10. **A.Lann, M.Golosovsky, D.Davidov, A.Frenkel.** Appl. Phys. Lett., **73**, 2823 (1998).
 11. **A.Hovsepyan, H.Lee, T.Sargsyan, H.Melikyan, Y.Yoon, A.Babajanyan, B.Friedman, K.Lee.** Ultramicroscopy, **108**, 1058 (2008).
 12. **L.Hao, J.Gallop.** IEEE Trans. Appl. Supercond., **9**, 1944 (1999).
- D.M.Pozar.** Microwave Engineering, New York, Addison-Wesley, 1990.

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑԻ ՏԵՂԱՅԻՆ ՖՈՏՈՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ՄՈՏԻՎ ԴԱՇՏԻ ՄԻԿՐՈԱԼԻՔԱՅԻՆ ՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ

Ա.Բ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

Մոտիվ դաշտի միկրոալիքային մանրադիտակի (ՄԴՄ) եղանակով հետազոտված է արևային մարտկոցի տեղային ֆոտոհաղորդականությունը ենթամակերկրային շերտում: Արևային մարտկոցի ֆոտոհաղորդականության կախվածությունը արտաքին լույսի ալիքի երկարությունից և ինտենսիվությունից որոշվել է ՄԴՄ-ի 4.1 ԳՀց հաճախության դիէլեկտրական ռեզոնատորի անդրադարձման գործակցի չափումներից:

EVALUATION OF SOLAR CELL LOCAL PHOTOCONDUCTIVITY BY A NEAR-FIELD MICROWAVE MICROSCOPE

A.B. HOVSEPYAN

A near-field microwave microscope (NFMM) technique has been used to study the evolution of the photoconductivity in the subsurface layer of solar cells. The dependence of photoconductivity on the incident light wavelength and intensity was determined by measuring the change of reflection coefficient of the microscope at an operating frequency near 4.1 GHz.