

**Электрополевая дефектоскопия полупроводниковых фотопреобразователей в режиме бесконтактного сканирования***О. Н. Шишканов, А. П. Бойченко*

*Продемонстрирована возможность дефектоскопии фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе монокристаллического кремния путем их бесконтактной (дистантной) электрополевой визуализации на рентгеновской фотопленке Retina. С помощью специально разработанного устройства для ее реализации диагностирован технологический дефект, возникший на поверхности заготовки кремния при его подготовке к диффузионному легированию и маскированный различными покрытиями на последующих стадиях изготовления ФЭП.*

*Ключевые слова:* фотоэлектрический преобразователь, монокристаллический кремний, электрополевая визуализация, электрополевое изображение, рентгеновская фотопленка, поляризационный заряд.

**Ссылка:** Шишканов О. Н., Бойченко А. П. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 93.

**Reference:** O. N. Shishkanov and A. P. Boychenko, Prikl. Fiz., No. 4, 93 (2019).

**Введение**

Одной из важнейших стадий производства солнечных батарей является контроль качества изготовления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Как правило, для неразрушающей визуализации их внутренней структуры на предмет скрытых технологических дефектов привлекают различные методы: от термографического [1, 2] и рентгенографического [1, 3] до ультразвукового [4] и электролюминесцентного [2, 5]. Начиная с 1970 г., получил развитие новый метод визуализации, названный его авторами «электротопографи-

ческий» (ЭТГ) [6, 7], основанный на обнаруженном ими эффекте образования проявляемых центров скрытого изображения в фотоэмульсионных микрокристаллах галоидного серебра (AgHal) под действием неоднородного электрического поля без какого-либо освещения [7, 8]. Несмотря на то, что позднее эффект формирования электрополевых изображений (ЭПИ) был обнаружен на некоторых электретах (живичной канифоли и сополимера стирола с октилметакрилатом) и электролюминофорах [7], наилучшие результаты в выявлении закороток диэлектрической изоляции, радиационных дефектов в кристаллах, сквозных пор и микротрещин (менее 100 нм) в полимерных материалах были достигнуты при использовании электронографических, спектрографических и ядерных AgHal-фотопластинок, а также технических AgHal-фотопленок как отечественного (ФТ-20, ФТ-30), так и зарубежного производства (FO-41) [7]. Благодаря разработанной технологии получения ЭПИ на AgHal-фотоматериалах ЭТГ-метод был успешно применен на орбитальной станции «Салют-7» для выполнения ряда исследований по динамике деградации модельных и конструкционных материалов под действием

**Шишканов Олег Николаевич**<sup>1,2</sup>, аспирант, инженер.  
**Бойченко Александр Павлович**<sup>1</sup>, зав. лаб., д.ф.-м.н., доцент.

<sup>1</sup> Кубанский государственный университет.  
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.  
Тел. +7(861) 219-95-66.

E-mail: bojchenco@yandex.ru

<sup>2</sup> ПАО «Сатурн».

Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Солнечная, 6.  
Тел. +7(967) 651-48-40.

E-mail: shishkanovoleg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 мая 2019 г.

© Шишканов О. Н., Бойченко А. П., 2019

физических факторов космического пространства [9]. При этом авторами показано отсутствие какого-либо разрушающего или загрязняющего воздействия на объект [6, 7].

Однако в то время ЭТГ-технология не предусматривала бесконтактный (дистантный) вариант электрополевой визуализации (ЭПВ) объектов, когда между поверхностью последних и высоковольтным электродом имеется воздушный зазор. Его наличие расценивалось не только как разрыв электрической цепи, резко уменьшающей среднюю напряженность электрического поля в системе конденсатора, но и нарушение условий концентрации на границе раздела объект визуализации – AgHal-фотоэмульсия поляризованных зарядов большой плотности  $\rho$ , в поле которых и создаются Ag-центры скрытого ЭПИ [7]. Действительно, такой вывод обоснован тем, что при описанных условиях область с наибольшей  $\rho$  смещается к границе раздела подложки фотоматериала и низкопотенциального электрода. Проведенные нами расчеты с учетом воздушного промежутка толщиной 0,2 мм показали возможность сохранения  $\rho$  на интересующей границе раздела при соблюдении баланса удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости между подложкой фотоматериала ( $\sigma_p, \epsilon_p$ ) и его фотослоем ( $\sigma_f, \epsilon_f$ ), подчиняющегося условию:

$$0,09 \leq \sqrt{\frac{\sigma_p \epsilon_f}{\sigma_f \epsilon_p}} \leq 0,23. \text{ Оказалось, что ему удо-}$$

влетворяет весьма ограниченный круг промышленно выпускаемых AgHal-фотопленок для рентгенографии, но обладающих большой электрополевой чувствительностью. К настоящему времени ее рекордно высокая величина выявлена у фотопленки Agfa [10], выпускаемой бельгийской фирмой Agfa HealthCare NV, тогда как хорошей разрешающей способностью к дефектам менее 1 мкм обладает фото-

пленка Retina [11], выпускаемая немецкой фирмой Foto-Handelsgesellschaft MBH.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке теоретических выводов и первым результатам по дистантной электрополевой дефектоскопии на примере полупроводниковых ФЭП на основе кремния (Si) с привлечением последнего фотоматериала – фотопленки Retina.

### Эксперимент, его обсуждение и анализ

В исследованиях использовались изделия на основе монокристаллического Si *p*-типа, выпускаемые ПАО «Сатурн» (г. Краснодар). Контролю подвергались технологические дефекты, возникающие на стадии диффузионного легирования Si, а затем маскированные различными покрытиями при финальном получении изделий. Обычно источником таких дефектов может служить случайно образовавшаяся неоднородность при нанесении на поверхность Si-заготовок легирующих растворов для последующей термодиффузии из них легирующих компонент. Дистантная ЭПВ образцов фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) осуществлялась на ранее описанном устройстве – «Электрополевом сканере» [12] со скоростью сканирования 1,5 мм/с при внешнем постоянном напряжении 3 кВ. Схема организации эксперимента представлена на рис. 1.

После электрополевого экспонирования (оно проводится в светонепроницаемом боксе сканера) осуществлялась пятиминутная обработка фотопленки в водном растворе фенидон-гидрохинонового восстановителя Ag (проявителя), специально разработанный для ЭПВ состав которого приведен в [13]. Для сравнительной оценки результатов ЭПВ ФЭП привлекался рентгенографический метод визуализации на том же фотоматериале, а также оптические изображения изделий. Полученные результаты исследований приведены последовательно на рис. 2–4.

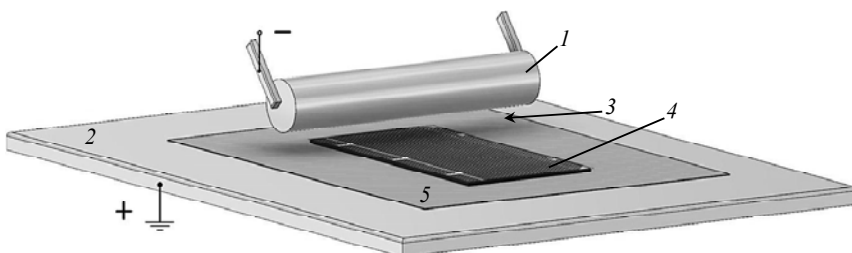


Рис. 1. Схема установки для дистантной ЭПВ ФЭП: 1 – цилиндрический и 2 – плоский электроды; 3 – воздушный зазор (0,2 мм) между электродом 1 и объектом ЭПВ – 4, контактирующим с фотопленкой Retina – 5.

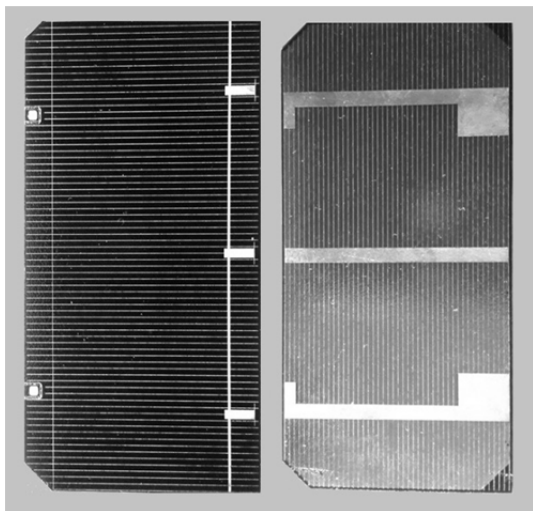


Рис. 2. Оптические изображения ФЭП: фронтальная сторона (слева); тыльная сторона (справа).

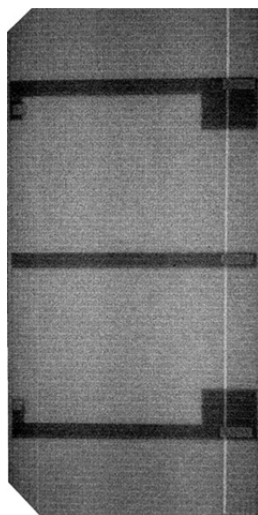


Рис. 3. R-изображение ФЭП.

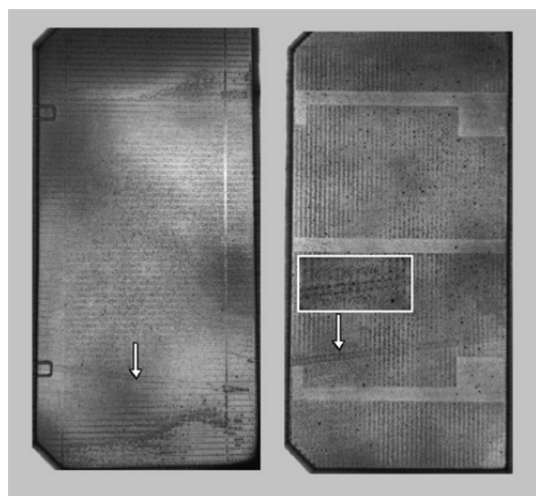


Рис. 4. ЭПИ ФЭП: фронтальная сторона (слева); тыльная сторона (справа).

Как видно по оптическим изображениям ФЭП (см. рис. 2), изделие содержит все необходимые элементы для функционирования: шины фронтального и тыльного электродов, соединительные контакты, а также обработанные лазером края с разделенными проводниками между противоположными сторонами Si-пластины. Каких-либо видимых дефектов в изделии не выявлено. Аналогичную бездефектную структуру ФЭП демонстрирует его рентгенографическое (R) изображение на рис. 3. При R-лучевом просвечивании ФЭП хорошо видны наложенные друг на друга с различной контрастностью вышеописанные элементы изделия.

В случае ЭПВ, кроме перечисленных элементов функционирования ФЭП, на его двусторонних ЭПИ хорошо видны пересекающиеся образец полосы (показаны стрелками на рис. 4), отражающие механические повреждения пленок легирующих растворов, нанесенных на Si-пластину, и, вероятно, возникшие случайно при ее размещении в диффузионной печи. Изображения полос имеют градиентно убывающую слева-направо оптическую плотность. Как видно по рис. 4, пересекающиеся полосы токоведущие дорожки создают «разрывы» на ее ЭПИ с повышенной оптической плотностью в местах пересечения (увеличенная вкладка на рис. 4), что указывает как на локальное увеличение  $\rho$  в этих местах (соответственно, на усиление напряженности созданного ими электрического поля), так и на возникновение описываемых дефектов до процедуры формирования дорожек и последующих процессов по доведению к финальному получению изделия. Кроме того, рис. 4 отображает в отдельности каждую из сторон ФЭП, без их взаимного наложения, которое присутствует на R-снимке (см. рис. 3).

Описанная закономерность говорит о том, что ЭТГ-метод – это метод визуализации поверхностных и приповерхностных дефектов, глубину выявления которых определяет глубина локализации  $\rho$ , зависящая от электропроводящих свойств объекта визуализации и фотоэмульсионного слоя [7]. В фотоэмульсии используемой пленки Retina она составляет ~ 1 мкм, чего вполне достаточно для визуализации легирующих слоев, толщина которых

в Si не превышает 400 нм [5]. Кроме перечисленных дефектов ФЭП, на его двусторонних ЭПИ видна россыпь отдельных точек большой оптической плотности. С помощью оптической микровизуализации поверхности ФЭП и их ЭПИ установлено, что этим точкам соответствуют микрокаверны Si, очевидно, возникшие на подготовительной стадии его химического травления. Характерно, что некоторые участки ЭПИ с одними и теми же токоведущими дорожками имеют как негативный, так и позитивный вид, что, по видимому, говорит о наличии на этих участках тонких слоев воздуха, возникших от неровностей поверхности ФЭП. Например, при ЭПВ стеклянных матриц микролинз [11] такая инверсия изображений отсутствует, так как отсутствует топологическая неоднородность поверхности стекла, обеспечивающая плотный контакт изделия с AgHal-эмульсионным слоем фотоматериала. Однако, как следует из рис. 4, наличие воздушных слоев и выявленный эффект инверсии ЭПИ не мешают формированию целостной картины ФЭП и визуализации дефектов в нем, что также согласуется с данными работы [7] по электрополевой дефектоскопии тонких диэлектрических покрытий.

### Заключение

Как известно, современные изделия микроэлектроники и фотоники, в частности, изготовленные на основе Si различной степени кристалличности, обладают повышенной хрупкостью. Это налагает определенные требования в технологии их диагностики, исключаяющей какой-либо контакт или механическое воздействие, чего в первых «электротопографах» промышленного производства не предусматривалось [7]. Рассмотренная в настоящей работе новая технология ЭПВ на примере кремниевых ФЭП не только удовлетворяет перечисленным требованиям, но и допускает принципиальную возможность диагностики таких или подобных изделий неограниченных размеров в непрерывном режиме дистантного сканирования.

*Авторы выражают большую благодарность специалистам отдела по разработке конструкций солнечных батарей ПАО «Сатурн» (г. Краснодар): ведущему инженеру-технологу С. Г. Ханову и ведущему инженеру-конструктору А. В. Красильникову за полезные замечания и обсуждение результатов работы.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов М. И., Сергеев В. А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. – Ульяновск: УлГТУ, 2015.
2. Dirk Veldman, Ian J. Bennett, Bart Brockholz, Paul C de Jong // Energy Procedia. 2011. Vol. 8. P. 377. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.06.153
3. Ануфриев Л. П., Бордусов С. В., Гурский Л. И. и др. Технология интегральной электроники. – Минск: Интегралполиграф, 2009.
4. Zhenying Xia, Shuyuan Gao, Jun Huang, Yun Wang // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 764. P. 9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.764.9
5. Попов В. М., Клименко А. С., Поканевич А. П., Шустов Ю. М., Гаврилюк И. И., Панин А. И. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 4. С. 43.
6. Кравцов А. Е., Резников М. А. Способ контроля дефектов слоев материалов. А.с. № 360599. Бюл. изобр. 1972. № 36.
7. Кравцов А. Е., Пипа В. А., Резников М. А., Фок М. В. // Труды ФИАН. 1981. Т. 129. С. 13.
8. Fok M. V., Reznikow M. A., Kravtsov A. E. // J. Signal AM. 1982. Vol. 10. No. 5. P. 303.
9. Гречко Г. М. Современные достижения космонавтики: Сб. статей. – М.: Знание, 1983. № 12. Сер. Космонавтика, астрономия. С. 3–32.
10. Шишканов О. Н., Бойченко А. П. / Сб. науч. трудов междунар. науч.-практ. конф. «Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты» (Тамбов, 2014). Ч. 8. С. 170–171.
11. Шишканов О. Н., Бойченко А. П. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 4 (72). С. 436. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.72.4.436.441
12. Шишканов О. Н., Бойченко А. П. / Сб. науч. трудов междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития науки и образования» (Тамбов, 2015). Ч. 12. С. 168–169.
13. Шишканов О. Н., Бойченко А. П. // Научный альманах. 2018. № 10-2 (48). С. 87. DOI: 10.17117/na.201810.02.087

## Electric-field testing of semiconductor photoelectric cell in the distant scanning mode

O. N. Shishkanov<sup>1,2</sup> and A. P. Boychenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kuban State University  
149 Stavropolskaya st., Krasnodar, 350040, Russia  
E-mail: bojchenco@yandex.ru

<sup>2</sup> Saturn, PJSC  
6 Solnechnaya st., Krasnodar, 350072, Russia  
E-mail: shishkanovoleg@mail.ru

Received May 30, 2019

***The possibility of testing of photoelectric cell based on monocrystalline silicon was demonstrated by their non-contact (distant) electric-field visualization on a «Retina» X-ray film. With the help of a specially developed device for its implementation, a technological defect has been diagnosed that has arisen on the surface of a silicon billet during its preparation for diffusion-doping and masked by various coatings at subsequent stages of photoelectric cell production.***

**Keywords:** photoelectric cell, monocrystalline silicon, electric-field visualization, electric-field image, x-ray film, polarization charge.

### REFERENCES

1. M. I. Gorlov and V. A. Sergeev V. A. *Modern diagnostic methods for quality control and reliability of semiconductor products* (UIGTU Publ., Ulyanovsk, 2015). 406 p. [in Russian].
2. Dirk Veldman, Ian J. Bennett, Bart Brockholz, Paul C de Jong. *Energy Procedia* **8**, 377 (2011) DOI: 10.1016/j.egypro.2011.06.153
3. L. P. Anufriyev, S. V. Bordusov, L. I. Gurskiy et al. *Integrated Electronics Technology*. (Integralpoligraf Publ., Minsk, 2009). 379 p. [in Russian].
4. Zhenying Xua, Shuyuan Gao, Jun Huang, Yun Wang. *Advanced Materials Research*. **764**, 9 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.764.9
5. V. M., Popov A. S. Klimenko, A. P. Pokanevich, Yu. M. Shustov, I. I. Gavrilyuk, and A. I. Panin, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, No. 4, 43 (2010).
6. A. E. Kravtsov and M. A. Reznikov, *Sposob kontrolya defektov slojev materialov*. A.s. No. 360599. *Bull. 36* (1972) [in Russian].
7. A. E. Kravtsov, V. A. Pipa, M. A. Reznikov, M. V. Fok, *Trudy FIAN* **129**, 13 (1981).
8. M. V. Fok, M. A. Reznikow, and A. E. Kravtsov, *J. Signal AM* **10**, 5 (1982).
9. G. M. Grechko, *Modern achievements of astronautics*. No. 12. Ser. «Astronautics». p. 3 (Znaniye Publ., Moscow, 1983) [in Russian].
10. O. N. Shishkanov and A. P. Boychenko, in *Proc. Intern. scient.-pract. conference «Issues of education and science: theoretical and methodological aspects»* (Tambov, 2014). Iss. 8. pp. 170–171 [in Russian].
11. O. N. Shishkanov and A. P. Boychenko, *Fotonika*. **12** (4), 436 (2018). DOI: 10.22184/1993-7296.2018.72.4.436.441
12. O. N. Shishkanov and A. P. Boychenko, in *Proc. Intern. scient.-pract. conference «Prospects for the development of science and education»* (Tambov, 2015). Iss. 12. pp. 168–169. [in Russian].
13. O. N. Shishkanov and A. P. Boychenko, *Nauchnyy al'manakh*, No. 10-2, 87 (2018). DOI: 10.17117/na.2018.10.02.087