

## Особенности кинетики спада фото-ЭДС в кристаллах кремния, используемых в солнечной энергетике, обусловленные воздействием слабого стационарного магнитного поля

Л.П. Стебленко<sup>1</sup>, О.А. Коротченков<sup>1</sup>, А.А. Подолян<sup>1</sup>, Д.В. Калинин<sup>1</sup>,  
А.Н. Курилюк<sup>1</sup>, Ю.Л. Кобзарь<sup>1</sup>, А.Н. Крит<sup>2</sup>, С.Н. Науменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, физический факультет,  
кафедра физики металлов, ул. Владимирская, 64/13, 01601 Киев, Украина

<sup>2</sup> Учебно-научный центр «Физико-химическое материаловедение»

Киевского национального университета имени Тараса Шевченко и НАН Украины, 01601 Киев, Украина

(Получено 12.09.2014; в отредактированной форме – 17.02.2015; опубликовано online 25.03.2015)

Изучено влияние слабого стационарного магнитного поля на кинетику спада фото-ЭДС в кристаллах «солнечного» кремния (solar-Si). Установленные особенности в поведении электрофизических параметров показали, что кратковременная и долговременная компоненты спада фото-ЭДС определяются длительностью магнитной обработки. Короткое время магнитной обработки приводит к увеличению, а длительная магнитная обработка вызывает уменьшение обеих компонент спада фото-ЭДС по сравнению с контрольными кристаллами. Выявлено, что характер магнитостимулированного изменения кинетики фото-ЭДС коррелирует с зарядовым состоянием поверхности.

**Ключевые слова:** Solar-Si, Время жизни носителей, Магнитное поле, Заряженные примеси.

PACS numbers: 68.35.bg, 61.43.Dg,  
61.72.Hh, 73.40.Qv

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Идея, связанная с возможностью влиять на физические свойства полупроводников с помощью различных обработок всегда привлекала внимание. Проводимый в последние годы научный поиск позволил нам выявить изменение микромеханических и электрофизических свойств кристаллов кремния, используемых для нужд микроэлектроники после их обработки в слабом стационарном магнитном поле [1-4]. Исследования обусловленных магнитной обработкой изменений физических свойств в кристаллах «солнечного» кремния (solar-Si), применяемых в солнечной энергетике, на сегодняшний день, практически, отсутствуют в научной литературе. В тоже время эта информация является достаточно важной, особенно, если речь идет об изменении времени жизни носителей. Последнее имеет большое практическое значение, поскольку направлено на модернизацию производства солнечных элементов, работающих в ряде случаев в экстремальных условиях внешних влияний.

Цель настоящей работы состояла в установлении зависимости между магнитным влиянием и кинетикой спада фото-ЭДС в кристаллах solar-Si.

Нахождение и исследование такой зависимости представляет интерес как для выяснения механизмов воздействия магнитных полей на твердотельные объекты, так и для решения практических задач прогнозирования поведения солнечных элементов, базовыми кристаллами, для изготовления которых являются кристаллы solar-Si.

### 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Используемые в работе кристаллы solar-Si (s-Si) были легированы бором до удельного сопротивления 5 Ом см и имели кристаллографическую ориентацию {100}. Магнитная обработка (МО) состояла в выдержке исследуемых образцов в слабом стационарном магнитном поле с индукцией  $B = 0,17$  Тл в течении

$t_{MO} = 2$  суток,  $t_{MO} = 14$  суток,  $t_{MO} = 200$  суток. По кинетическим зависимостям спада фото-ЭДС определялись две компоненты спада – кратковременная ( $\tau_1$ ) и долговременная ( $\tau_2$ ). Эти компоненты определялись перед началом магнитной обработки, сразу после ее завершения, а также через длительное время, прошедшее после окончания магнитного воздействия. Спад фото-ЭДС измерялся с помощью конденсаторного метода [5]. Для возбуждения фото-ЭДС в кристаллах s-Si использовался лазерный фотодиод с длиной волны 650 нм. При этом длительность импульсов, подаваемых с генератора и возбуждающих фото-ЭДС, была равной  $t = 14$  мкс.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные результаты, связанные с влиянием магнитного поля на кратковременную ( $\tau_1$ ) и долговременную ( $\tau_2$ ) компоненты спада фото-ЭДС, которые представлены на рис. 1 (а, б), свидетельствуют о следующем. Воздействие на кристаллы s-Si короткой магнитной обработки ( $t_{MO} = 2$  суток) приводило к возрастанию обеих компонент по сравнению со значениями, присущими исходным кристаллам s-Si, т.е. кристаллам, не подвергавшимся МО.

При увеличении времени МО до 14 суток и 200 суток наблюдается эффект уменьшения обеих компонент вплоть до значений, существенно более низких по сравнению с контрольными кристаллами.

Не исключено, что полученные результаты изменения электрофизических параметров могут быть непротиворечиво объяснены на основе представлений, развитых в работах [6, 7]. Как отмечается в [6], воздействие импульсного магнитного поля на структуру металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) сопровождается распадом химических связей приводит к генерации поверхностных состояний (ПС) и отрицательного заряда в окисле (диэлектрике).

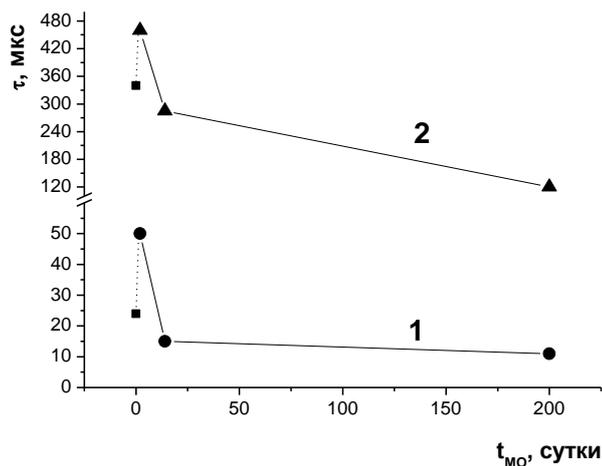


Рис. 1 – Зависимость кратковременной (1) и долговременной (2) компонент спада фото-ЭДС в кристаллах s-Si от времени магнитной обработки:  $B = 0,17$  Тл. ■ – значения  $\tau$  для контрольных образцов, не подвергавшихся магнитной обработке

Таким образом, авторы [6] при объяснении наблюдаемых магниточувствительных эффектов учитывают как магнитостимулированные процессы структурной перестройки, так и процессы, связанные с изменением зарядового состояния поверхности при магнитной обработке. Следует учесть еще один аспект магнитного влияния: магнитное поле активирует поверхность кремния и вызывает усиление процессов адсорбции и геттерирования [7]. Поскольку в наших исследованиях мы имеем дело с системой «s-Si + SiO<sub>2</sub>» (где SiO<sub>2</sub> – природный окисел всегда существующий на поверхности кремния), то, вслед за [6, 7], можно предположить следующую интерпретацию установленных закономерностей.

При малых временах МО ( $t_{MO} = 2$  суток) заряд, формирующийся на поверхности и в приповерхностной области за счет адсорбирования заряженных примесей из окружающей атмосферы и за счет геттерирования поверхностью заряженных примесей из объема кремния является гораздо меньшим по величине, чем заряд, формирующийся на поверхности в течении длительной МО ( $t_{MO} = 200$  суток). Наличие небольшого количества заряженных примесей в пер-

вом случае и значительное его возрастание во втором случае и объясняет различие в поведении параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  при коротком и длительном времени магнитной обработки. Можно предположить, что в первом случае при малом времени МО формирующийся в результате МО заряд нейтрализует присутствующее на поверхности немногочисленные заряженные примеси, что и приводит к увеличению параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Во втором случае (при длительной МО) величина отрицательного заряда, генерируемого на границе интерфейса s-Si-SiO<sub>2</sub>, является недостаточной для полной нейтрализации большого количества заряженных примесей, появившихся на магнитоактивированной поверхности в результате протекания процессов адсорбции и геттерирования. Вероятно, при длительной МО, адсорбционные процессы, с одной стороны, нейтрализуют заряженные центры на поверхности, а с другой стороны, увеличивают ее зарядовое состояние, создавая за счет проадсорбированных частиц дополнительные донорные и акцепторные уровни. Последнее и приводит к тому, что как кратковременная, так и долговременная компоненты спада фото-ЭДС при длительной магнитной обработке резко

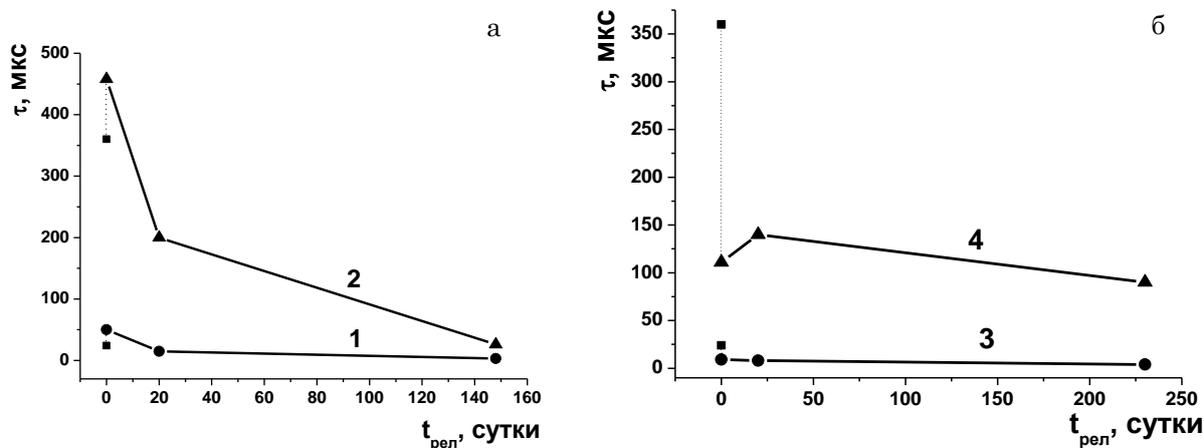


Рис. 2. Зависимость кратковременной (1, 3) и долговременной (2, 4) компонент спада фото-ЭДС в кристаллах s-Si от времени которое прошло после завершения МО.  $B = 0,17$  Тл;  $t_{MO} = 2$  суток (а),  $t_{MO} = 200$  суток (б). ■ – значения  $\tau$  для контрольных образцов, не подвергавшихся магнитной обработке

уменьшается. При этом уменьшение происходит вплоть до значений существенно более низких, чем в контрольных кристаллах, что указывает на более высокое зарядовое состояние магнитоактивированной поверхности по сравнению с зарядовым состоянием поверхности в контрольных (исходных) кристаллах s-Si. Подтверждением увеличения заряда поверхности при длительной МО служат проведенные нами исследования изменения поверхностного электрического потенциала в результате магнитного воздействия [8, 9].

Проведенные в настоящей работе исследования позволили проследить за устойчивостью заряда сформированного при различных длительностях МО. При короткой длительности МО ( $t_{MO} = 2$  суток) (рис. 2 а) значения параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  уже в течение первых 20 суток после завершения МО резко уменьшаются.

В дальнейшем уменьшение параметров продолжается, хотя скорость релаксации несколько замедляется. В противовес этому случаю при длительной МО ( $t_{MO} = 200$  суток) (рис. 2 б) релаксация параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в течение 20 суток практически отсутствует. Через 230 суток после завершения магнитного воздействия имеет место некоторое уменьшение параметра  $\tau_1$ , при этом параметр  $\tau_2$  практически не изменяется.

Вышеизложенные экспериментальные факты свидетельствуют о влиянии длительности МО на стабильность зарядового состояния поверхности кристаллов s-Si. При кратковременной МО зарядовое состояние нестабильное и резко уменьшается после окончания МО. При длительной МО сформированное на поверхности s-Si зарядовое состояние в течение продолжительного времени сохраняет устойчивость.

### Особливості кінетики спаду фото-ЕРС в кристалах кремнію, які використовуються в сонячній енергетиці, обумовлені дією слабкого стаціонарного магнітного поля

Л.П. Стебленко<sup>1</sup>, О.О. Коротченков<sup>1</sup>, А.О. Подолян<sup>1</sup>, Д.В. Калініченко<sup>1</sup>, А.М. Курилук<sup>1</sup>,  
Ю.Л. Кобзар<sup>1</sup>, О.М. Крит<sup>2</sup>, С.М. Науменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет,  
кафедра фізики металів, вул. Володимирська, 64/13, 01601 Київ, Україна

<sup>2</sup> Навчально-науковий центр «Фізико-хімічне матеріалознавство»  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 01601 Київ, Україна

Вивчено вплив слабкого стаціонарного магнітного поля на кінетику спаду фото-ЕРС в кристалах solar-Si. Встановлені особливості в поведінці електрофізичних параметрів показали, що короткотривала і довготривала компоненти спаду фото-ЕРС визначаються тривалістю магнітної обробки. Короткий час магнітної обробки призводить до збільшення, а тривала магнітна обробка викликає зменшення обох компонент спаду фото-ЕРС в порівнянні з контрольними кристалами. Виявлено, що характер магнітостимульованої зміни кінетики фото-ЕРС корелює з зарядовим станом поверхні.

**Ключові слова:** Solar-Si, Час життя носіїв, Магнітне поле, Заряджені домішки.

### The Features of Decay Kinetics of Photovoltage in Silicon Crystals Used in Solar Energy Caused by Weak Stationary Magnetic Field

L.P. Steblenko<sup>1</sup>, O.A. Korotchenkov<sup>1</sup>, A.A. Podolyan<sup>1</sup>, D.V. Kalinichenko<sup>1</sup>,  
A.N. Kuryliuk<sup>1</sup>, Yu.L. Kobzar<sup>1</sup>, A.N. Krit<sup>2</sup>, S.N. Naumenko

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Str., 01601 Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Scientific Research Center "Physicochemical materials"  
Taras Shevchenko National University of Kyiv and NAS of Ukraine, 01601 Kyiv, Ukraine

The influence of a weak stationary magnetic field on the decay kinetics of photovoltage in solar-Si crystals is studied. The features in the behavior of electrophysical parameters showed that the stability of the short-term and long-term components of photovoltage depends on the duration of magnetic treatment. Short time of magnetic treatment leads to increase, and long magnetic treatment causes reduction both components of photovoltage in comparison with control crystals. It is revealed that character of magnetostimulated change of photovoltage kinetics correlates with a charge condition of surface.

**Keywords:** Solar-Si, Carrier lifetime, Magnetic field, Charged impurities.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Makara, M.A. Vasiliev, L.P. Steblenko, O.V. Koplak, A.N. Kurilyuk, Yu.L. Kobzar, S.N. Naumenko, *Semiconductors* **42** No 9, 1044 (2008).
2. V.V. Trachevsky, L.P. Steblenko, P.Y. Demchenko, O.V. Koplak, A.M. Kuryliuk, A.K. Melnik, *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron* **13** No 4, 389 (2010).
3. В.А. Макара, А.С. Драненко, Ю.Л. Кольченко, Л.П. Стебленко, *Металлофиз. новейшие технол.* **26** No 4, 509 (2004) (V.A. Makara, A.S. Dranenko, Yu.L. Kol'chenko, L.P. Steblenko, *Metallofiz. Noveyshiye Tekhnol.* **26** No 4, 509 (2004)).
4. Б.В. Павлик, Л.П. Стебленко, О.В. Коплак, А.С. Грипа, Д.П. Слободзян, Р.М. Лис, Й.А. Шикоряк, Р.І. Дідик, *Металлофиз. новейшие технол.* **31** No 9, 1169 (2009) (B.V. Pavlyuk, L.P. Steblenko, O.V. Koplak, A.S. Hrypa, D.P. Slobodzyan, R.M. Lys, Y.A. Shykoryak, R.I. Didyk, *Metallofiz. Noveyshiye Tekhnol.* **31** No 9, 1169 (2009)).
5. C. Munakata, S. Nishimatsu, N. Honma, K. Yagi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **23**, 1451 (1984).
6. А.Г. Кадменский, С.Г. Кадменский, М.Н. Левин, В.М. Масловский, В.Е. Чернышев, *Письма ЖТФ* **19** No 3, 41 (1993) (A.G. Kadmenskiy, S.G. Kadmenskiy, M.N. Levin, V.M. Maslovskiy, V.E. Chernyshev, *JETP Lett.* **19** No 3, 41 (1993)).
7. М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, О.А. Косцов, А.М. Косцов, О.А. Костов, А.М. Костов, *Tech. Phys.* **48**, 1304 (2003) (M.N. Levin, A.V. Tatarintsev, O.A. Kostsov, A.M. Kostov, *Tech. Phys.* **48**, 1304 (2003)).
8. V.A. Makara, L.P. Steblenko, O.A. Korotchenkov, A.B. Nadtochiy, D.V. Kalinichenko, A.M. Kuryliuk, Yu.L. Kobzar, O.M. Krit, *Metallofiz. Noveyshiye Tekhnol.* **36** No 2, 189 (2014).
9. V.A. Makara, L.P. Steblenko, O.A. Korotchenkov, A.B. Nadtochiy, D.V. Kalinichenko, A.N. Kuryliuk, Yu.L. Kobzar, A.N. Krit, and S.N. Naumenko, *Semiconductors* **48** No 6, 722 (2014).