

## ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ БЕСПЕРЕХОДНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЩЕЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ В ОБЛАСТИ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ

Л. О. Олимов, Б. М. Абдурахманов, Ф. Л. Омонбоев  
*Андижанский государственный университет им. З. М. Бабура*  
(Узбекистан)

Поступила в редакцию 5. 11. 2013

Обнаружен эффект смены полярности напряжения и направления тока в однородно нагреваемых беспереходных образцах поликристаллического кремния, легированного щелочными металлами в области межзеренных границ, происходящие в результате совместного проявления процессов эмиссии и захвата носителей заряда на глубоких энергетических состояниях, обусловленных дефектами на межзеренных границах и миграцией в эту область атомов, растворенного в кремнии кислорода.

**Ключевые слова:** межзеренные границы, поликристаллический кремний, примесный тепловольтатический эффект.

## ПЕРЕМИКАННЯ СТРУМУ І НАПРУГИ ПРИ НАГРІВАННІ БЕСПЕРЕХІДНОГО ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ, ЛЕГОВАНОГО ЛУЖНИМИ МЕТАЛАМИ НА ДІЛЯНЦІ МІЖЗЕРЕННИХ ГРАНИЦЬ

Л. О. Олімов, Б. М. Абдурахманов, Ф. Л. Омонбоев

Виявлено ефект змінювання полярності напруги і напрямку струму в однорідно нагрітих бесперехідних зразках полікристалічного кремнію, легованого лужними металами на ділянці міжзеренних границь, що відбуваються в результаті спільного проявлення процесів емісії та захоплення носіїв заряду на глибоких енергетичних станах, обумовлених дефектами на міжзеренних границях і міграцією в цю область атомів, розчиненого в кремнії кисню.

**Ключові слова:** міжзеренні границі, полікристалічний кремній, домішковий тепловольтатичний ефект.

## SWITCHING CURRENT AND VOLTAGE WITH HEATING BESPEREHODNYH POLYCRYSTALLINE SILICON DOPED WITH ALKALI METALS IN REGION OF INTER-GRAIN BOUNDARIES

L. O. Olimov, B. M. Abdurachmanov, F. L. Omonboiev

The effect of changing the polarity of the voltage and current direction in a uniformly heated besperehodnyh samples of polycrystalline silicon doped with alkali metals in the grain boundaries, occurring as a result of the joint manifestations of the processes of emission and capture of carriers in deep energy states due to defects at the grain boundaries and the migration of atoms in this area dissolved in silicon oxygen.

**Keywords:** inter-grain boundaries, polycrystalline silicon, impurity thermal-voltaic effects.

В последнее время на поликристаллических кремниевых (ПК) структурах широко изучаются, как экспериментально, так и теоретически механизм и условия проявления примесного  $\delta\phi$  тепловольтатического (ПТВ) эффекта, обусловленного генерацией электронно-дырочных пар с участием глубоких энергетических уровней, характерных

для межзеренных границ (МЗГ) ПК [1—4]. Недавно в работе [4], нами были обнаружены эффект смены полярности напряжения и направления тока у однородно нагреваемых изотипных образцов ПК, происходящие в результате совместного проявления процессов эмиссии и захвата носителей заряда на глубоких энергетических состояниях,

обусловленных дефектами на МЗГ и миграцией в эту область атомов, растворённого в кремнии, кислорода. Однако, механизм проявления такого эффекта и, соответственно, вышеупомянутых явлений, связанных с переключением тока и напряжения применительно к беспереходным ПК образцам, легированными щелочными металлами (ЩМ) в области межзеренных границ (МЗГ), является нерешенной задачей. Данная работа посвящена решению этой задачи для ПК легированных ЩМ в области МЗГ.

В качестве образцов использовались вторичный литой ПК, который в работе [4], нами был использован для исследования условия проявления ПТВ эффекта, а в качестве легирующей примеси выбраны быстро диффундирующие атомы ЩМ: Li, Na, K, Cs. Легирование проводилось методом ионной имплантации (ИИ) с глубиной 3 мкм. После ИИ образцы отжигали в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Торр  $T \sim 750$  К. (Следует отметить, что в работе [5] экспериментально определено образование *p-n*-структур на основе ПК и монокристаллического кремния, с использованием имплантированных атомов ЩМ при термообработке в интервале 700—800 К.) После термоотжига поверхности образца, т. е. легированный слой, шлифовались с глубиной 50 мкм. При этом толщина образца составляет 200 мкм. Также следует отметить, что в процессе термообработки наблюдается адсорбированный слой в области МЗГ [6], что иллюстрируется на рис. 2б (области 2).

На рис. 1 приведены температурные зависимости относительного изменения темнового тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ) упомянутых образцов. Видно, что  $I_{кз}$  (кривая 1) растёт до  $\sim 375$  К, а затем наблюдается его резкое падение, изменение направления и рост, продолжающийся до  $\sim 550$  К. При дальнейшем повышении температуры, вблизи 600 К, вновь наблюдается резкое изменение направления тока, т. е. эффект температурного переключения.

Подобным нетривиальным образом изменяется с температурой и темновое  $U_{xx}$  (кривая 2). Данные рис. 2, указывают на генерацию носителей заряда (НЗ) с участием

глубоких уровней и являются доказательством проявления ПТВ эффекта в этих ПК образцах. Важно отметить воспроизводимость результатов, а также их соответствующее изменение при повороте образцов на  $180^\circ$ .

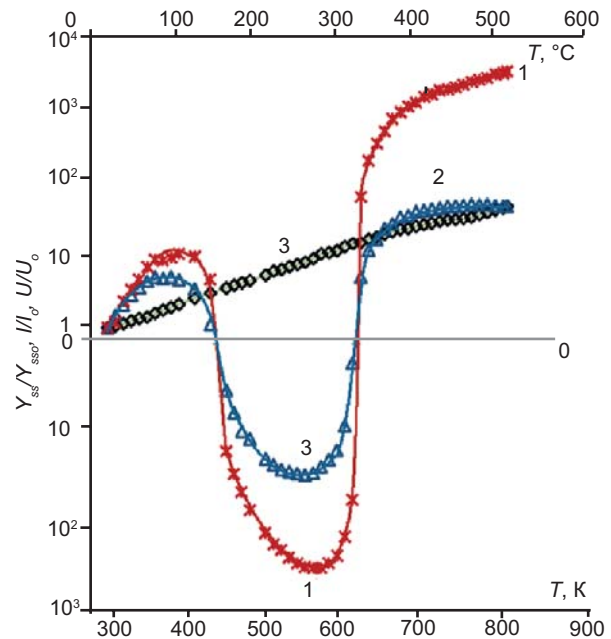


Рис. 1. Относительные изменения темнового тока (1) и напряжения (2), а также проводимости ловушек (3) от температуры на образцах с присутствием щелочных металлов.  $I_{кзо}$ ,  $U_{xx0}$ ,  $Y_{sso}$  измерены при 300 К

При их охлаждении до 300 К и повторном нагреве изменения тока и напряжения совпадают с наблюдавшимися в предыдущем цикле нагрева, а различия в ходе кривых, снятых при нагреве и остывании образцов, не превышают 5%. Проводимость ловушек ( $Y_{ss}$  кривая 3) растёт во всём диапазоне нагрева. Следует отметить, что в работе [4], нами обнаружены смены полярности напряжения и направления тока у однородно нагреваемых изотипных образцов ПК, в другом температурном диапазоне, например,  $I_{кз}$  и  $U_{xx}$  растёт до  $\sim 325$  К, а затем наблюдается его резкое изменение направления до  $\sim 600$  К, вновь наблюдается резкое изменение. Для объяснения результатов воспользуемся моделью термоэлектронной эмиссии [7] с дополнениями, касающимися учета токов, возникающих в процессе захвата и эмиссии НЗ на ловушках, которые сформулированы нами в [8, 9], а также зонной диаграммой заряженной МЗГ (рис. 2а) и упрощенной схемой образца (рис. 2б).

Из рис. 2а, следует, что НЗ захватываются состояниями на границе раздела, лежащими выше уровня Ферми  $E_p$ . Возникший заряд компенсируется ионизованными акцепто-

ловушек. Естественно, что в процессе изменения температуры наблюдается, как захват, так и эмиссия НЗ с участием ловушек. До температур  $\sim 600$  К оба эти процесса идут с

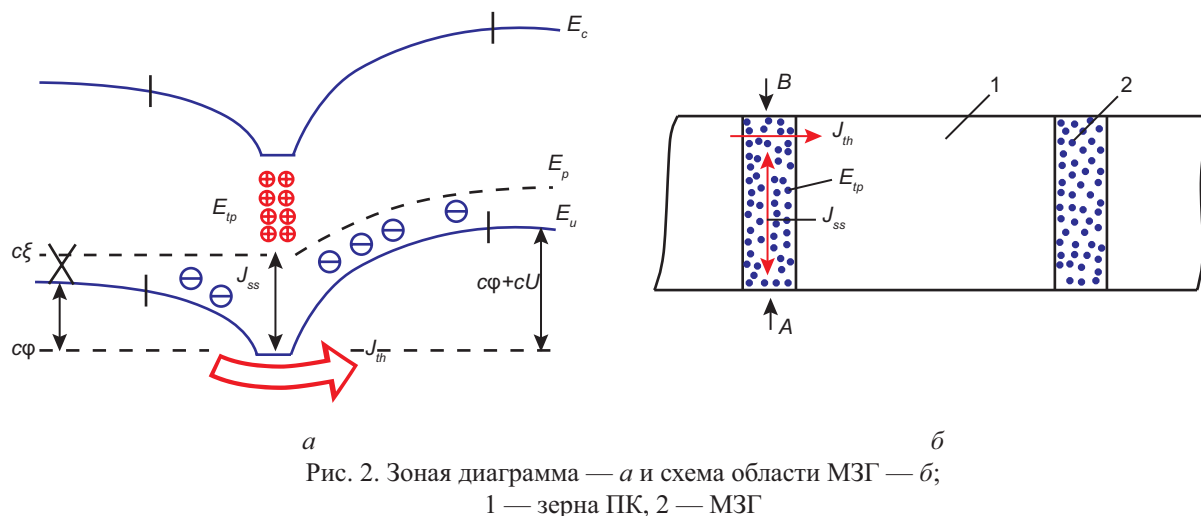


Рис. 2. Зоная диаграмма — а и схема области МЗГ — б;  
1 — зерна ПК, 2 — МЗГ

рами, находящимися в области пространственного заряда. Исходя из модели термоэлектронной эмиссии, кроме основного тока  $J_{th}$ , обусловленного генерацией электронно-дырочных пар, возникает также ток  $J_{ss}$ , обусловленный динамическим равновесием между процессами захвата и эмиссии НЗ, связанный с проводимостью ловушек. Ток  $J_{ss}$  равен:

$$J_{ss} = Y_{ss} \delta\phi, \quad (1)$$

где  $Y_{ss}$  — характерная полная проводимость ловушек, зависящая, как от их сечения захвата, так и от распределения по энергиям, а также от положения в пространстве, т. е. местонахождения на МЗГ,  $\delta\phi$  — изменение высоты потенциального барьера.

Ток  $J_{ss}$  тождественно равен производной по времени от связанного на поверхности раздела заряда. На МЗГ имеет место следующая ситуация [7, 8]: в ходе процессов захвата и эмиссии НЗ, исходя из требования электронейтральности на поверхности раздела, должна меняться ширина области пространственного заряда.

А это, в свою очередь, влияет на всю зонную диаграмму (рис. 2а), т. е., как на изменение высоты барьера  $\delta\phi$ , так и на  $Y_{ss}$ . Это означает, что ток  $J_{ss}$  и изменение высоты барьера  $\delta\phi$  взаимосвязаны, а колебательные свойства этой взаимосвязи определяются свойствами

участием центров, характерных для областей МЗГ ПК [8, 9], например, с  $E \sim 0,15$  эВ и  $E \sim 0,17$  эВ, которые проявляются при температурах 323—343 К, с  $E \sim 0,36$  эВ, наблюдающихся до 383 К, и с  $E \sim 0,3$  эВ, которые наблюдаются до 600 К.

Когда количество захватов НЗ больше, чем их эмиссия, движение заряда по уровням ловушек вдоль границы двух контактирующих зерен сопровождается ростом полной проводимости ловушек. Если эмиссия превалирует над захватом, то проводимость ловушек также растет, несмотря на то, что заряд движется в противоположном направлении. В первом случае высота потенциального барьера увеличивается, во втором уменьшается, что было экспериментально показано в [8—10]. Важным обстоятельством являются, как тип проводимости, так и геометрия образца. Как указывалось, для исследования нами выбраны образцы *p*-типа проводимости и толщиной  $\sim 200$  мкм, соизмеримой со средним размером зерен использованного вторичного литого поликристаллического кремния (ВЛПК).

Из рис. 2б видно, что НЗ, определяющие ток  $J_{ss}$  двигаются не от зерна к зерну, как таковые, обуславливающие ток термоэлектронной эмиссии  $J_{th}$ , а перемещаются по уровням ловушек МЗГ. Суммарный ток при этом, несмотря на рост проводимости ловушек,

будет определяться или суммой, или разностью токов  $J_{th}$  и  $J_{ss}$ . Итак, рассматривая с этих позиций до температур  $\sim 325$  К [4, 8], генерируемые за счет возбуждения, как мелких, так и глубоких уровней, НЗ двигаются по направлению от  $A$  в сторону  $B$  (рис. 2б). В нашем случае, рост наблюдается до температур  $\sim 375$  К (рис. 2, кривые 1 и 2). Это может быть связано с пассивацией рекомбинационных центров  $E \sim 0,15$  эВ,  $E \sim 0,17$  эВ и  $E \sim 0,36$  эВ, которые проявляются в этом температурном диапазоне.

С дальнейшим повышением температуры на участке до  $\sim 580$  К последовательно проявляются упомянутые выше рекомбинационные центры, локализованные в области МЗГ, т. е. между  $A$  и  $B$  (рис. 2б), и активно захватывающие НЗ. По мере роста захвата НЗ, направление их движения становится от  $B$  в сторону  $A$  (рис. 2б), при этом суммарный ток сначала уменьшается до нуля, а затем изменяется его направление (рис. 1).

Атомная структура МЗГ в ПК имеет нарушения типа разорванных связей, которые образуют энергетические уровни в запрещенной зоне [12]. При температурах  $> 500$  К начинается, а при  $600$  К интенсивно идет и даже превалирует над всеми другими процессами дрейф атомов, растворенного в ВЛПК кислорода, концентрация которого по крайней мере, исходя из технологии ВЛПК [2], превышает  $10^{18}$  см $^{-3}$ .

Атомы кислорода дрейфуют из объема зерен на их поверхность [4, 7—11], где взаимодействуют с оборванными связями или вакансиями, что сопровождается заполнением вышеупомянутых рекомбинационных центров. Кроме того, в присутствии атомов кислорода в области МЗГ в дополнение к существующим, образуются преципитаты  $\text{SiO}_x$  или  $\text{Si}_y\text{O}_x$  [7—11].

Оксиды, как кремния, так и примесных элементов, вытесненных на МЗГ сегрегацией, как это следует из [4, 7—11] имеют дырочную проводимость и по мере роста их концентрации, они начинают доминировать, что сопровождается, с начала замедлением роста тока с ростом температуры с выходом на плато, а затем в связи с полным преобладанием этого процесса над захватом

НЗ, вообще изменением направления их движения, а именно от  $A$  в сторону  $B$  (рис. 2б), что сопровождается, вблизи температуры  $600$  К резким изменением направления тока. Отметим, что полный ток, практически во всем рассмотренном диапазоне температур фактически определяется током  $J_{ss}$ , включая и диапазон  $650—850$  К, в котором, как видно из рис. 1, при неизменном значении  $U_{xx}$  проводимость ловушек увеличивается почти на  $1,5$  порядка и, примерно, в  $\leq 10$  раз вырастает темновой ток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Abdurakhmanov B. M., Olimov L. O., and Saidov M. S. // Applied Solar Energy ISSN 0003-701X. — 2008. — Vol. 44, No. 1. — P. 46—52.
2. Saidov M. S., Abdurakhmanov B. M., and Olimov L. O. // Applied Solar Energy ISSN 0003-701X. — 2007. — Vol. 43, No. 4. — P. 203—207.
3. Olimov L. O. // Applied Solar Energy ISSN 0003-701X. — 2010. — Vol. 46, No. 2. — P. 118—121.
4. Абдурахманов Б. М., Олимов Л. О., Кучканов Ш. Переключение тока и напряжения при нагреве поликристаллического кремния легированными щелочными металлами // Журнал ДАН АН РУЗ. — 2012. — № 3.
5. Олимов Л. О. Автореф. канд. дис. (Андижан, Андижан гос. ун-т, 1999).
6. Olimov L. O., Adsorption of Alkali Metals and Their Effect on Electronic Properties of Grain Boundaries in Bulk of Polycrystalline Silicon. // Semiconductors. — 2010. — Vol. 44, No. 5. — P. 602—604.
7. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения / Пер. с англ. / Под. ред. Г. Харбек. — М.: Мир, 1989. — 344 с.
8. Олимов Л. О., Модель межзеренной границы в  $p-n$  структурах на основе поликристаллических полупроводников // Физическая инженерия поверхности. — 2010. — Т. 8, № 2. — С. 173—179.
9. Олимов Л. О. Влияние межзеренных границ на перенос носителей заряда в поликристаллическом кремнии // Узбекский Физический Журнал. — 2005. — № 3. — С. 231—233.
10. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. — М.: Наука. Физматлит, 1990. — 260 с.
11. Олимов Л. О., Муйдинова М., Омонбоев Ф. Л. Электрические свойства межзеренных границ в объеме поликристаллического кремния // Физическая инженерия поверхности.

— 2013. — № 2. — С. 212—215.

12. Абдурахманов Б. М., Олимов Л. О., Абдура-  
ззаков Ф. С. // Физическая инженерия пове-  
рхности. — 2010. — Т. 8, № 1. — С. 72 —76.

## LITERATURA

1. Abdurakhmanov B. M., Olimov L. O., and Sa-  
idov M. S. // Applied Solar Energy ISSN 0003-  
701X. — 2008. — Vol. 44, No. 1. — P. 46—52.
2. Saidov M. S., Abdurakhmanov B. M., and Oli-  
mov L. O. // Applied Solar Energy ISSN 0003-  
701X. — 2007. — Vol. 43, No. 4. — P. 203—207.
3. Olimov L. O. // Applied Solar Energy ISSN 0003-  
701X. — 2010. — Vol. 46, No. 2. — P. 118—121.
4. Abdurakhmanov B. M., Olimov L. O., Kuchka-  
nov Sh. Pereklyucheniye toka i napryazheniya  
pri nagreve polikristallicheskogo kremniya  
legirovannymi shchelochnymi metallami.  
Zhurnal DAN AN RUZ. — 2012. — No. 3.
5. Olimov L. O. Avtoref. kand. dis. (Andizhan,  
Andizhan gos. un-t, 1999).
6. Olimov L. O., Adsorption of Alkali Metals and  
Their Effect on Electronic Properties of Grain  
Boundaries in Bulk of Polycrystalline Silicon.  
// Semiconductors. — 2010. — Vol. 44, No. 5.  
— P. 602—604.
7. Polikristallicheskiye poluprovodniki. Fiziches-  
kiye svoystva i primeneniya / Per. s angl. / Pod.  
red. G. Kharbek. — M.: Mir, 1989. — 344 p.
8. Olimov L. O., Model mezhzerennoy granitsy v  
r-n strukturakh na osnove polikristallicheskikh  
poluprovodnikov // Fizicheskaya inzheneriya  
poverkhnosti. — 2010. — Vol. 8, No. 2. —  
P. 173—179.
9. Olimov L. O. Vliyaniye mezhzerennykh gra-  
nits na perenos nositeley zaryada v polikris-  
tallicheskom kremnii // Uzbekskiy Fizicheskiy  
Zhurnal. — 2005. — No. 3. — P. 231—233.
10. Vavilov V. S., Kiselev V. F., Mukashev B. N. // De-  
fekty v kremnii i na yego poverkhnosti. — M.:  
Nauka. Fizmatlit, 1990. — 260 p.
11. Olimov L. O., Muydinova M., Omonboyev F. L.  
Elektricheskiye svoystva mezhzerennykh gra-  
nits v obyeme polikristallicheskogo kremniya  
// Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. —  
2013. — No. 2. — P. 212—215.
12. Abdurakhmanov B. M., Olimov L. O., Abdura-  
zzakov F. S. // Fizicheskaya inzheneriya pover-  
khnosti. — 2010. — Vol. 8, No. 1. — P. 72—76.