

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ В ОБЪЕМЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Л.О. Олимов, М. Муйдинова, Ф.Л. Омонбоев

Андижанский Государственный университет, им. З.М. Бабура
Узбекистан

Поступила 15.03.2013

В работе изучены геометрические параметры и электрические свойства межзеренных границ в объеме поликристаллического кремния. Обнаружено изменение направления температурной зависимости проводимости межзеренных границ в интервале температуры $\sim 300 \div 900$ К. Это объясняется проявлением рекомбинационных центров. Предложенные соображения и полученные результаты представляют интерес при исследовании поликристаллических и нанокристаллических полупроводников.

Ключевые слова: межзеренные границы, поликристаллический кремний, полная проводимость ловушек, рекомбинационные центры.

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МІЖЗЕРНОВИХ ГРАНИЦЬ В ОБ'ЄМІ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Л.О. Олімов, М. Муйдінова, Ф.Л. Омонбоев

У роботі вивчені геометричні параметри та електричні властивості міжзернових границь в об'ємі полікристалічного кремнію. Виявлено зміну напрямку температурної залежності провідності міжзернових границь в інтервалі температури $\sim 300 \div 900$ К. Це пояснюється проявом рекомбінаційних центрів. Запропоновані міркування та отримані результати становлять інтерес при дослідженні полікристалічних і нанокристалічних напівпровідників.

Ключові слова: міжзернові границі, полікристалічний кремній, повна провідність пасток, рекомбінаційні центри.

ELECTRICAL PROPERTIES OF INTER GRAIN BOUNDARIES IN VOLUME OF POLYCRYSTALLINE SILICON

L.O. Olimov, M. Muydinova, F.L. Omonboev

In work geometric parameters and the electrical properties of grain boundaries in volume polycrystalline silicon studied. The Found changing the direction of the temperature dependence of the conductivity of grain boundaries in the temperature range $\sim 300 \div 900$ K. This is explained by the manifestation of recombination centers. The proposed ideas and the results are of interest in the study of polycrystalline and nanocrystalline semiconductors.

Keywords: inter grain boundaries, polycrystalline silicon, conductivity, traps, recombination centers.

Известно, что электрические свойства межзеренных границ (МЗГ) в объеме поликристаллического кремния (ПК) можно считать достаточно широко изученными как с экспериментальной, так и теоретической точек зрения [1 – 8]. Надежно установлено, что переход носителей заряда (НЗ) происходит от одного зерна к другому, в результате чего наблюдается захват и эмиссия НЗ (рис. 1а, б). При этом суммарный ток J_{th} основных носителей, текущий слева направо определяется в следующем виде [1]:

$$J_{th} = A^* T^2 \exp(\beta(\zeta + \phi))(1 - \exp(-\beta U)). \quad (1)$$

Здесь, $\beta = e/kT$ – обратная термическая разность потенциалов, e – заряд электрона,

k – постоянная Больцмана, T – температура, A^* – эффективная постоянная Ричардсона, U – приложенное напряжение. Смещенный в прямом направлении (левый) барьер обозначен через $e\phi$, а $e\zeta$ – зависящий от концентрации легирования уровень Ферми в кристаллических зернах.

Как показано на рис. 1а, б, дырки захватываются состояниями на поверхности раздела, лежащими выше уровня Ферми E_p , т.е. в области МЗГ. Соответствующий положительный заряд компенсируется отрицательно заряженными акцепторами в области пространственного заряда. Термоэлектронная эмиссия создаёт ток J_{th} , текущий слева направо. Кроме

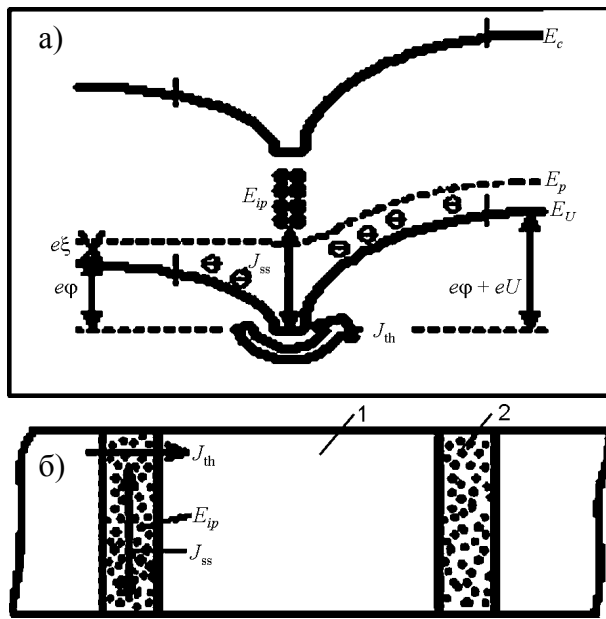


Рис. 1. Зонная диаграмма (а) и упрощенная схема (б) области МЗГ. 1 – зерно ПК, 2 – область МЗГ.

тока J_{th} на МЗГ, есть ещё и второй ток J_{ss} , показанный на рис. 1а, б. Этот ток J_{ss} равен разности между интенсивностями захвата и эмиссии дырок. Ток J_{ss} равен:

$$J_{ss} = Y_{ss} \delta\phi. \quad (2)$$

Ток J_{ss} тождественно равен производной по времени от связанного на поверхности раздела заряда. На МЗГ должно возникать следующее явление [1]: в соответствии с процессами захвата и эмиссии НЗ на поверхности раздела, чтобы сохранить полную электронейтральность, должна меняться ширина области пространственного заряда. А это, в свою очередь, влияет на всю зонную диаграмму (рис. 1а) и на изменение высоты барьера $\delta\phi$. Между токами J_{ss} и изменением высоты барьера $\delta\phi$ имеется обратная связь. Колебательные свойства этой обратной связи полностью определяются свойствами ловушек, а сама связь возникает из-за изменения температуры. Например, в работе [3, 7] определен обратный ход кривых зависимости высоты потенциального барьера от температуры, от 0,3 эВ до 0,8 эВ в интервале температур 20 ÷ 300 °С, при её росте и уменьшении. Кроме того, в (2) J_{ss} – характерная полная проводимость ловушек, зависящая от их сечения захвата, распределения по энергиям и положения в пространстве. Следует отметить, что полная проводимость ловушек и ее влияние на процесс переноса НЗ до настоящего время

не изучена. В связи с этим представляет интерес исследование полной проводимости ловушек в области МЗГ.

Принципиальная новизна нашего подхода заключается в применении и объяснении в рамках модели термоэлектронной эмиссии [1] переноса НЗ в МЗГ (рис. 1), выборе в качестве объекта исследования пластин ПК при повышенных температурах.

Важно отметить тип проводимости и структуру образцов, используемых в настоящей работе. Для исследования выбраны образцы *p*-типа проводимости, размером зерен ~250 мкм и толщиной образца 200 мкм. На рис. 2а представлена упрощенная схема подобных структур. В этом случае, НЗ не двигаются от одного зерна к другому, они захватываются на ловушках и двигаются по E_{ip} уровням, находящимся на МЗГ, так возникают наблюдаемые J_{ss} токи. Эквивалентная электрическая схема такой структуры представлена на рис. 2б. Видно, что эквивалентная электрическая схема состоит из параллельно соединенных сопротивлений зерен (R_1) и МЗГ (R_2).

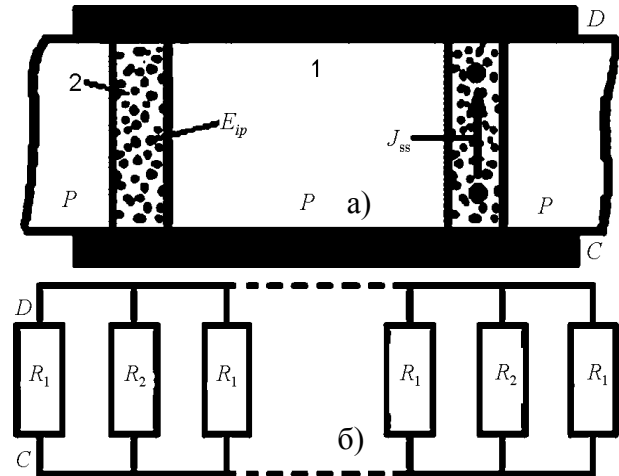


Рис. 2. Упрощенная схема области МЗГ (а) и её эквивалентная электрическая схема (б). 1 – зерно ПК, 2 – область МЗГ. D и C – омические фронтальный и тыльный контакты. R_1 и R_2 , соответственно, сопротивления зерен и МЗГ.

На рис. 3 приведены температурные зависимости проводимости образцов литого ПК и КДБ-10.

Из рис. 3 видно, что проводимость образцов обоих типов увеличивается с ростом температуры. Т.к. структура зерна монокристаллическая, можно определить проводимость

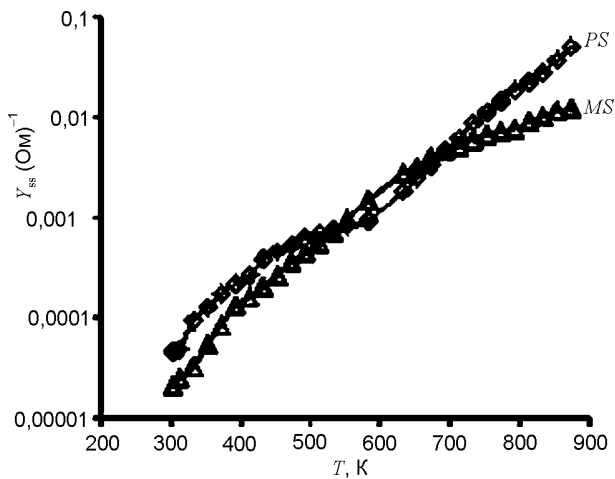


Рис. 3. Зависимость проводимости образцов от температуры. PS – вторичный “литой” ПК, MS – монокристаллический кремний.

МЗГ, из эквивалентной электрической схемы (рис. 2б):

$$Y_{ss(IGB)} = Y_{ss(PS)} - Y_{ss(MS)}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлены температурные зависимости проводимости МЗГ, т.е. полной проводимости ловушек ($Y_{ss(IGB)}$) в области МЗГ. Видно, что $Y_{ss(IGB)}$ изменяется немонотонно с температурой. Немонотонные изменения $Y_{ss(IGB)}$ совпадают с экспериментально определенными нами данными [4, 8], т.е., в этом температурном интервале наблюдается скачкообразное изменение концентрации и подвижности НЗ. Например, после монотонного роста $Y_{ss(IGB)}$ в интервале $\sim 325 \div 343$ К, наблюдается резкий рост этой величины, что соответствует усредненным уровням ловушек $E \approx 0,15$ эВ и $E \approx 0,17$ эВ, а также её резкий рост в интервале $\sim 325 \div 343$ К, что соответствует проявлению уровня $E \approx 0,36$ эВ. А затем наблюдается резкое падение и изменение направления $Y_{ss(IGB)}$, т.е. эффект температурного переключения, что соответствует проявлению уровня $E \approx 0,3$ эВ. При дальнейшем повышении температуры, ≥ 643 К, наблюдается резкий рост и изменение направления $Y_{ss(IGB)}$. Абсолютная величина $Y_{ss(IGB)}$ при втором переключении, в ~ 1000 раз больше чем при первом.

В процессе изменения температуры наблюдается захват и эмиссия НЗ на ловушках. В этом случае, в работе [7] для направления тока J_{ss} нами предложены следующие условия: при количестве захватов НЗ больше,

чем их эмиссия, заряд движется по уровням ловушек вдоль границы двух контактирующих зерен, и идет увеличение полной проводимости ловушек. Это направление тока J_{ss} условно обозначено знаком “минус”. Если эмиссия превалирует над захватом, то заряд движется в противоположном направлении, и направление тока J_{ss} условно обозначено знаком “плюс”. В первом случае основные НЗ движутся по уровням ловушек вдоль границы двух контактирующих зерен, во втором случае они движутся в противоположном направлении, в обоих случаях проводимость ловушек увеличивается.

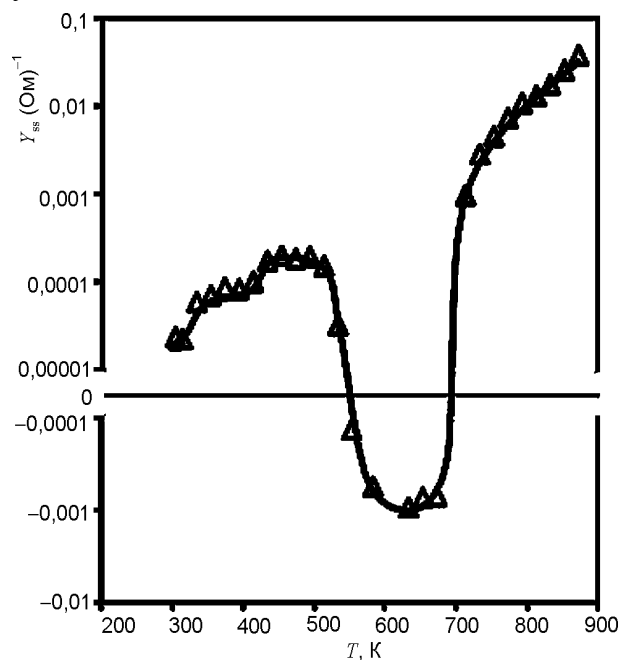


Рис. 4. Зависимость полной проводимости ловушек (Y_{ss}) в области МЗГ от температуры.

Если известна высота потенциального барьера (ϕ) и концентрация НЗ (n), можно определить толщину обедненных слоев (W) по обе стороны МЗГ [1]:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\phi}{eN_G}}. \quad (4)$$

Здесь ε – электрическая постоянная,

$$N_G = \left(\sqrt{n} + \frac{2}{\langle a \rangle} \sqrt{\frac{2\varepsilon\phi}{e}} \right)^2.$$

Для расчета W использованы значения ϕ и n из работы [4, 7, 8]. В нашем случае, определена $W \sim 7$ нм, т.е. длина R_2 равна

$\sim 2 \cdot 10^4$ нм, а его толщина составляет ~ 7 нм. Видно, что геометрические параметры R_2 находятся в нанометровом диапазоне.

Из полученных результатов следует, что переключение или изменение движения НЗ происходит только в области МЗГ, т.е. в структуре нанометровых размеров. В подобных структурах движение НЗ сопровождается кванторазмерными эффектами. Это означает, что в области МЗГ поликристаллических полупроводников кванторазмерные эффекты отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения/Пер. с англ. Под ред. Харбек Г. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
2. Тонкие поликристаллические и аморфные плёнки. Физика и применения/Пер. с англ. Под ред. Л. Казмерски. – М.: Мир, 1983. – 304 с.
3. Олимов Л.О. Влияние межзеренных границ на перенос носителей заряда в поликристаллическом кремнии//Узбекский Физический Журнал. – 2005. – № 3. – С. 231-233.
4. Zaynabidinov S., Aliev R., Olimov L.O. High temperature features of the polycrystalline silicon physical properties. ISSN 0503-1265//Ukr. J. Phys. – 2006. – Vol. 51, No. 7. – P. 699-702.
5. Олимов Л.О. Исследование структуры и электрофизических свойств межзеренных границ поликристаллического кремния//Узбекский Физический Журнал. – 2007. – № 5-6. – С. 361-365.
6. Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О., Абдуразаков Ф.С. Микроструктура межзеренных границ в поликристаллическом кремнии и её влияние на перенос носителей заряда//Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8, №.1. – С. 72-76
7. Олимов Л.О. Модель межзеренной границы в p - n -структурах на основе поликристаллических полупроводников//Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8, №.2. – С. 173-179.
8. Abdurakhmanov B.M., Olimov L.O., Saidov M. Electrophysical Properties of Solar Polycrystalline Silicon and Its n^+ - p -Structures at Elevated Temperatures//Applied Solar Energy ISSN 0003-701X. – 2008. – Vol. 44, No. 1. – P. 46-52.

LITERATURA

1. Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svojstva i primeneniya/Per. s angl. Pod red. Harbek G. – M.: Mir, 1989. – 344 s.
2. Tonkie polikristallicheskie i amorfnye plenki. Fizika i primeneniya/Per. s angl. Pod red. L. Kazmerski. – M.: Mir, 1983. – 304 s.
3. Olimov L.O. Vliyanie mezhzerennyh granic na perenos nositelej zaryada v polikristallicheskom kremnii//Uzbekskij Fizicheskij Zhurnal. – 2005. – № 3. – S. 231-233.
4. Zaynabidinov S., Aliev R., Olimov L.O. High temperature features of the polycrystalline silicon physical properties. ISSN 0503-1265//Ukr. J. Phys. – 2006. – Vol. 51, No. 7. – P. 699-702.
5. Olimov L.O. Issledovanie struktury i 'elektrofizicheskikh svojstv mezhzerennyh granic polikristallicheskogo kremniya//Uzbekskij Fizicheskij Zhurnal. – 2007. – № 5-6. – S. 361-365.
6. Abdurahmanov B.M., Olimov L.O., Abdurazzakov F.S. Mikrostruktura mezhzerennyh granic v polikristallicheskom kremnii i ee vliyanie na perenos nositelej zaryada//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2010. – T. 8, №.1. – S. 72-76
7. Olimov L.O. Model' mezhzerennoj granicy v p - n -strukturah na osnove polikristallicheskih poluprovodnikov//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. 2010. – T. 8, №. 2. – S. 173-179.
8. Abdurakhmanov B.M., Olimov L.O., Saidov M.S. Electrophysical Properties of Solar Polycrystalline Silicon and Its n^+ - p -Structures at Elevated Temperatures//Applied Solar Energy ISSN 0003-701X. – 2008. – Vol. 44, No. 1. – P. 46-52