

Влияние щелочных металлов на электронные свойства межзеренных границ на поверхности поликристаллического кремния

© Л.О. Олимов[†]

Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура,
710000 Андижан, Узбекистан

(Получена 19 сентября 2011 г. Принята к печати 1 декабря 2011 г.)

Экспериментально изучено влияние щелочных металлов на дрейф носителей заряда межзеренных границ на поверхности поликристаллического кремния. Полученные результаты показывают, что увеличение концентрации легирующих примесей в процессе диффузии, десорбции, а также адсорбции щелочных металлов вдоль межзеренных границ приводит к росту потенциального барьера.

В настоящее время влияние щелочных металлов (ЩМ) на электронные свойства поликристаллического кремния (ПК) [1,2] и на его адсорбционные свойства можно считать достаточно хорошо изученным как с экспериментальной, так и теоретической точек зрения [2–4]. Надежно установлено взаимодействие ЩМ с радиационными дефектами с энергетическими уровнями $E \approx 0.15$, ~ 0.17 , ~ 0.3 и ~ 0.36 эВ, что в результате приводит к уменьшению плотности состояний на межзеренных границах (МЗГ) и к росту радиационной стойкости солнечных элементов (СЭ) [1,2]. В процессе диффузии и адсорбции атомов ЩМ вдоль МЗГ происходит рост потенциального барьера [4]. Что же касается влияния ЩМ на электронные свойства МЗГ на поверхности ПК в процессе легирования, то это является пока не решенной задачей, хотя довольно хорошо изучены влияние подобного рода примеси на электрофизические свойства ПК [1,2], а также влияние адсорбции на электронные свойства МЗГ в объеме ПК [4]. Актуальной задачей является изучение влияния ЩМ на электронные свойства МЗГ на поверхности ПК при создании на нем СЭ и других полупроводниковых приборов. Данная работа посвящена исследованию влияния ЩМ на электронные свойства МЗГ на поверхности ПК.

Известно, что из методов определения электронных свойств МЗГ метод варьирования концентрации носителей заряда путем легирования (см., например, [5], а также ссылки, приведенные там) является наиболее привлекательным для исследования поликристаллических элементарных полупроводников. Этот метод позволяет получать информацию в широком диапазоне энергий, особенно, если используются образцы n - и p -типов.

Образцы изготавливали из литого ПК p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx 1$ Ом·см и размерами зерен 100–300 мкм [6]. Образцы представляли собой полированные пластины толщиной 300 мкм. В качестве легирующей примеси выбраны быстро диффундирующие ЩМ: Li, Na, K, Cs. Легирование проводилось методом ионной имплантации (ИИ). После ИИ образцы отжигали в вакууме ~ 6 – 10 Торр в интервале температур от 300 до 1000 К. Для оценки влияния ЩМ на

электронные свойства МЗГ измеряли проводимость (σ) образцов четырехзондовым методом и методом Ван-дер-Пау до и после ИИ, а также после каждой термообработки, проводимой с шагом 50 К.

Известно [5], что проводимость с помощью разложения в ряд Тейлора можно представить следующим выражением:

$$\sigma = \frac{e}{k} \langle a \rangle AT \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right), \quad (1)$$

где e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, $\langle a \rangle$ — размер зерна, A — эффективная постоянная Ричардсона, T — температура, φ — высота потенциального барьера на границе зерен. Величина φ связана с толщинами обедненных слоев (W) по обе стороны МЗГ и концентрации электрически активных легирующих примесей (N_G). Если зерна обеднены не полностью, высота потенциального барьера имеет вид [5]

$$\varphi = \frac{eN_G W^2}{2\varepsilon}, \quad (2)$$

где ε — диэлектрическая постоянная.

Из метода легирования [5] известно, что концентрация электрически активной легирующей примеси N_G связана с концентрациями имплантированных примесей N_D . Концентрация имплантированной примеси N_D теряется при термообработке за счет непосредственного испарения либо за счет сегрегации в оксидных слоях, которые стравливаются на последующих этапах. Тогда N_G может оказаться существенно меньше N_D из-за потерь и сегрегации на МЗГ. Однако до обработки концентрацию электрически активной легирующей примеси N_G можно сравнивать с концентрациями имплантированной примеси N_D .

На рис. 1 приведены зависимости φ от концентрации имплантированной примеси N_D . Видно, что увеличение N_D приводит к росту высоты потенциального барьера. В работе [7] выяснено, что при $N_D \leq 10^{14}$ см⁻³ большинство барьеров в ПК имеют высоты $\varphi = 0.55$ эВ. Высота барьера зависит от уровня легирования и концентрации ловушек и легирующей примеси (см., например, [7] и ссылки, приведенные там).

[†] E-mail: O.Lut@mail.ru; O.Lut@rambler.ru

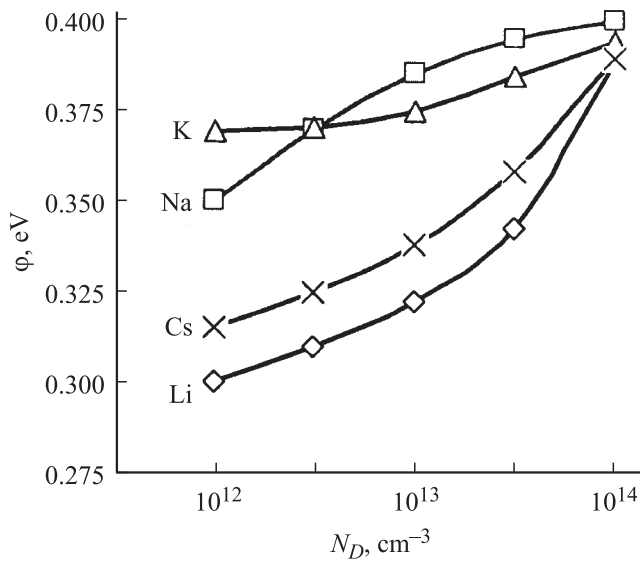


Рис. 1. Высоты потенциального барьера межзеренных границ поликристаллического кремния в зависимости от концентрации активных легирующих примесей.

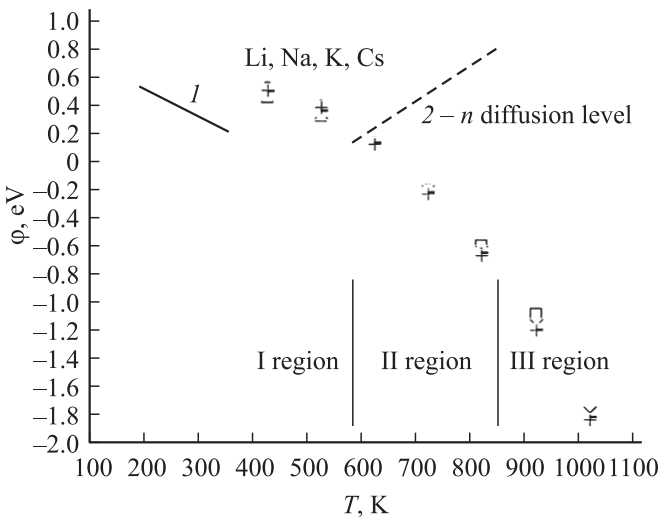


Рис. 2. Высоты потенциального барьера межзеренных границ поликристаллического кремния в зависимости от термообработки. 1 — [7].

Это изменение высоты вызывается двойным слоем заряда, образованным ионизованными примесями и заполненными ловушками. Ширина этого слоя растет с увеличением концентрации примеси. В нашем случае высота потенциального барьера удовлетворительно совпадает с результатами [7], т.е. увеличение N_D приводит к росту N_G , а также W и одновременно к росту ϕ .

Полученные в этих работах данные показывают, что модель с двойным слоем обеднения и тепловым возбуждением носителей заряда достаточно хорошо объясняет природу границ зерен в кремнии [7]. Главный вывод этого исследования состоит в том, что высота барьера

зависит также от температуры. Высота барьера МЗГ в ПК линейно изменяется с температурой (как показано на рис. 2, линия 1). При заполнении ловушки или их пассивации ширина двойного слоя и высота барьера начинает убывать, тогда как величина полного заряда в этой области остается неизменной [7]. В нашем случае линейные изменения высоты барьера совпадают с результатами в I области при $T \leq 600 \text{ K}$ [7]. Однако с увеличением температуры (II и III области при $T \geq 600 \text{ K}$) наблюдается изменение знака высоты барьера.

Известно, что ЦМ в кремнии является донорной примесью. В работах [1,8] экспериментально определено образование $p-n$ -структур на основе ПК и монокристаллического кремния, с использованием имплантированных атомов ЦМ при термообработке в интервале 700–800 К. В нашем случае для оценки образования $p-n$ -структур измеряли вольт-амперные характеристики исследуемых образцов до и после ИИ, а также после каждой термообработки, проводимой с шагом 50 К. Полученные результаты показали, что качество электронно-дырочных переходов существенно зависит от температуры термообработки. Воздействие термообработки вызывает заметное улучшение выпрямляющего свойства $p-n$ -перехода при $T \leq 700-800 \text{ K}$ (рис. 3). Однако с дальнейшим увеличением температуры наблюдалось ухудшение диодных характеристик исследуемых образцов. Это может быть связано с диффузией ЦМ вдоль МЗГ, а именно — при адсорбции атомов ЦМ на МЗГ в ПК в процессе диффузии образуются металл-оксидные или металлические пленки на поверхности зерен, что приводит к росту зерен и высоты потенциального барьера [4]. Таким образом, в нашем случае изменение высоты барьера при $T \geq 600 \text{ K}$ (II и III области) может быть связано с n областями $p-n$ -структур (рис. 4, области 3 и 4), т.е. с диффузными n -слоями (рис. 2, линия 2).

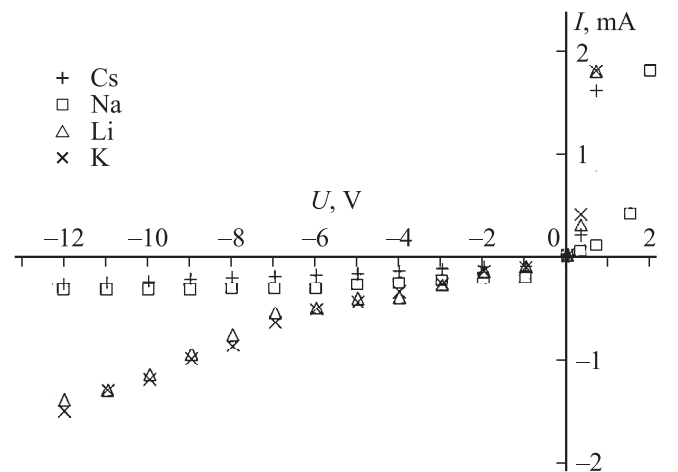


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов в зависимости от видов щелочных металлов (при термообработке $T = 750 \text{ K}$).

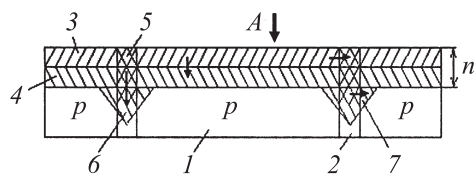


Рис. 4. Упрощенная схема части образца: 1 — зерна Si p -типа, 2 — области границ зерен, 3 — ионно-имплантированный слой атомов щелочных металлов, 4 — диффузионный слой атомов щелочных металлов, 5 — десорбционный слой атомов щелочных металлов в области МЗГ, 6 — диффузия щелочных металлов по границам зерен, 7 — адсорбционный слой атомов щелочных металлов. A — измеряемая сторона образца.

Известно, что в объеме структур на основе ПК примесь диффундирует по зернам и по МЗГ, как показано на рис. 4 (области 4 и 6). Следует отметить интересные явления: в этом процессе примесь диффундирует не только по зернам и по МЗГ, одновременно при увеличении температуры до 800 К происходит десорбция атомов ЩМ на МЗГ, как показано на рис. 4 (область 5). Эти процессы приводят к увеличению ширины легированных слоев (области 4 и 6) и одновременно к сегрегации ЩМ в МЗГ. В этом случае диполь-дипольное отталкивание примеси на МЗГ [3,4] приводит к росту высоты потенциального барьера n -области p - n -структур. При дальнейшем увеличении температуры изменение высоты барьера (область III на рис. 2) связано с адсорбциями атомов ЩМ на МЗГ в объеме ПК, которые нами были обсуждены в работе [4]. Атомы ЩМ в основном диффундируют по МЗГ (рис. 4, область 6), и это приводит к сегрегации ЩМ в МЗГ и одновременно к адсорбции на поверхности зерен (рис. 4, область 7).

Таким образом, увеличение концентрации активной легирующей примеси и процесс диффузии, десорбции атомов ЩМ в области МЗГ на поверхности ПК приводит к росту высоты потенциального барьера. Эти результаты могут быть использованы для создания p - n -структур на основе поликристаллических полупроводников, а также для объяснения электронных свойств МЗГ.

Список литературы

- [1] Л.О. Олимов. Автореф. канд. дис. (Андижан, Андижан гос. ун-т, 1999).
- [2] А.В. Заставной, В.М. Король. ФТП, **23** (2), 369 (1989).
- [3] С.Ю. Давыдов, А.В. Павлык. ФТП, **38** (8), 95 (2004).
- [4] Л.О. Олимов. ФТП, **44** (5), 628 (2010).
- [5] *Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения*, пер. с англ. под ред. Г. Харбек (М., Мир, 1989).
- [6] Б.М. Абдурахманов, Т.Х. Ачилов, А.Л. Кадыров и др. Гелиотехника, № 4, 8 (1992).
- [7] *Тонкие поликристаллические и аморфные пленки. Физика и применения*, пер. с англ. под ред. Л. Казмерски (М., Мир, 1983).

[8] В.П. Чирва, Ш.А. Абляев. Деп. в ВИНТИ (Ташкент, 1968).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of alkali metals on electronic properties of grain boundaries at the surface of polycrystalline silicon

L.O. Olimov

Babur Andizhan State University,
710000 Andizhan, Uzbekistan

Abstract Influence of alkali metals on the drift charge carriers of grain boundaries at the surface of polycrystalline silicon has been studied experimentally. The results obtained shown that the potential barrier increasing concentrations of dopants and grows during diffusion, desorption and adsorption of alkali metal atoms along grain boundaries.