

МЕЖУЗЕЛЬНАЯ ДИФФУЗИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО БОРА В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

О. И. Величко, А. П. Ковалева

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
velichkomail@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для формирования мелких *p-n* переходов используется высокодозное внедрение ионов с низкой энергией имплантации. При имплантации и во время последующей термообработки генерируется большое количество неравновесных межузельных атомов кремния, что приводит к скоротечной диффузии примеси. Поэтому, для формирования легированных областей с крутыми распределениями примесных атомов необходимо применять отжиги с чрезвычайно малым термическим бюджетом [1]. Один из способов обеспечения такого бюджета является использование низкотемпературного отжига малой длительности [2]. Также используется имплантация бора в слой кремния, предварительно аморфизованном внедрением ионов Ge [3]. В результате твердофазной рекристаллизации аморфного слоя образуется совершенная структура без видимых электронной микроскопией дефектов. Однако скоротечная диффузия наблюдается и в этих случаях, хотя имеет совершенно иной характер. Так, на профиле распределения бора в области низкой концентрации примеси формируется протяженный “хвост”. Как показано в [4, 5], большинство случаев формирования “хвостов”, включая имплантацию бора в предварительно аморфизованный кремний, связано с явлением длиннопробежной миграции межузельных атомов примеси. В работе [6] подобное исследование было выполнено для имплантации бора в кристаллический кремний в диапазоне доз, недостаточных для создания аморфного слоя. Было найдено, что средняя длина пробега межузельных атомов бора l_{AI} равна 24 нанометрам при температуре отжига 600 °C и длительности 10 с. Это значение в два раза больше, чем аналогичные длины пробега $l_{AI} = 12$ нм и $l_{AI} = 11$ нм для перераспределения бора в аморфизованном и рекристаллизованном Si при отжигах длительностью 60 с и температурах 850 °C [4] и 800 °C [7] соответственно. Следует отметить, что в двух последних случаях имело место существенное увеличение термического бюджета. Поэтому, имеет смысл продолжить исследование [6] для отжигов с длительностью большей 10 с.

МОДЕЛЬ МЕЖУЗЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ БОРА

Для моделирования межузельной диффузии атомов бора используем модель, предложенную в [4,5], которая включает следующую систему уравнений: 1. Закон сохранения для неподвижных атомов примеси: 2. Уравнение диффузии неравновесных межузельных атомов бора. В отличие от модели [4, 5], было использовано распределение Пирсон-IV для описания пространственного распределения атомов бора после имплантации. Также учитывалась межузельная диффузия небольшой части атомов бора в процессе имплантации ионов [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования межузельной диффузии атомов бора в рамках описанной выше модели представлены на Рис. 1 и Рис. 2.

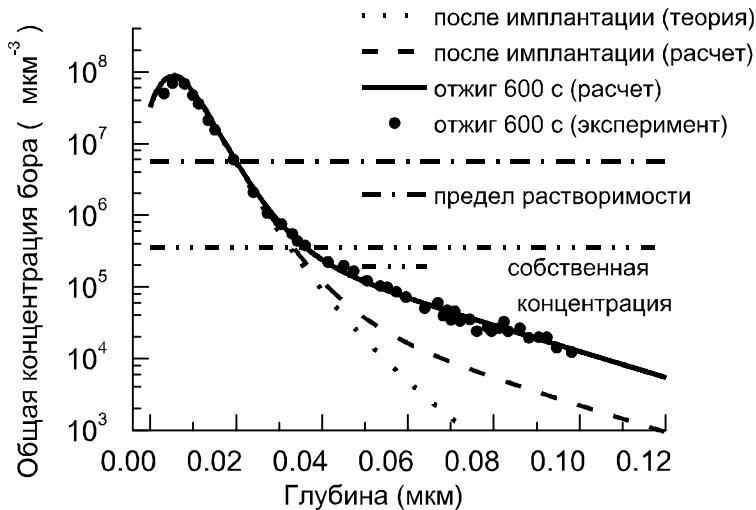


Рис.1. Рассчитанный профиль распределения концентрации бора после отжига в течение 600 с при температуре 600 °C. Пунктирная кривая представляет профиль распределения концентрации примеси после имплантации согласно распределению Пирсон-IV. Штриховая кривая — расчет начального распределения в предположении длиннопробежной миграции части атомов бора во время внедрения ионов, который хорошо согласуется с экспериментом. Экспериментальные данные по распределению бора после отжига (зачерненные кружки) взяты из [2]

Для сравнения использовались экспериментальные данные [2]. В работе [2] имплантация ионов бора была выполнена с дозой $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией 1 кэВ в кремниевые подложки ориентации (100) в условиях, препятствующих канализированию ионов. Перед внедрением ионов был эпитаксиально выращен слой кремния толщиной 10 мкм с проводимостью *p*-типа и удельным сопротивлением 10 Ом·см. Профили распределения концентрации атомов бора перед началом и после термообработки были измерены методом вторичной ионной масс-спектроскопии с высоким разрешением по глубине. Отжиг образцов был проведен при температуре 600 °C с длительностью 10, 600 и 1200 с.

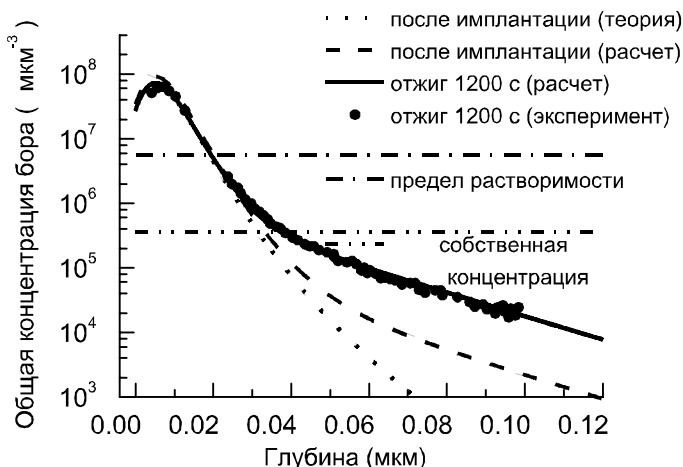


Рис.2. Рассчитанный профиль распределения концентрации бора после отжига в течение 1200 с при температуре 600 °C. Экспериментальные данные (зачерненные кружки) взяты из [2]

Отсюда следует, что длина пробега межузельных атомов бора практически не меняется с увеличением длительности термообработки и совпадает со средней длиной миграции межузельных атомов примеси во время имплантации ионов [6]. Это подтверждает корректность разработанной модели длиннопробежной миграции неравновесных межузельных атомов бора в ионно-имплантированных слоях кремния в процессе низкотемпературного отжига.

Наилучшее совпадение с экспериментальными профилями распределения концентрации бора после отжига, представленными на Рис. 1 и Рис. 2, было получено в предположении, что соответственно 1.5 % and 2.29 % внедренных атомов бора участвовали в скоротечной межузельной диффузии и затем опять стали неподвижными, перейдя в положение замещения или образовав комплексы с дефектами кристаллической структуры. Следует отметить, что полученное значение $l_{AI} = 24 \text{ нм}$ для разных длительностей обработки приблизительно в два раза больше, чем средняя длина пробега межузельных атомов бора в слоях кремния, предварительно аморфизованных имплантацией ионов Ge и рекристаллизованных на начальной стадии отжига. Это означает, что мигрирующие межузельные атомы бора интенсивно взаимодействуют с атомами Ge, которые использовались для формирования приповерхностного аморфного слоя перед внедрением ионов бора.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2011 Edition. Front End Processes. P. 36. (<http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>)
2. Napolitani, E. Microscopical aspects of boron diffusion in ultralow energy implanted silicon / E. Napolitani [et al.] // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75. № 13. P. 1869.
3. Hamilton, J. J. Boron deactivation in preamorphized silicon on insulator: Efficiency of the buried oxide as an interstitial sink / J. J. Hamilton [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. Art. No. 092122.
4. Velichko, O. I. Modeling of the long-range interstitial migration of ion implanted boron / O. I. Velichko, N. V. Kniazhava // Comput. Mat. Sci. 2010. Vol. 48. P. 409.

5. *Velichko, O. I.* Modeling of the transient interstitial diffusion of implanted atoms during low-temperature annealing of silicon substrates / O. I. Velichko, A. P. Kovaliova // Physica B. 2012. Vol. 407. P. 2176.
6. *Величко, О. И.* Моделирование межузельной диффузии бора в кристаллическом кремнии / О. И. Величко, В. В. Аксенов, А. П. Ковалева // ИФЖ. 2012. Том. 85. № 4. С. 851.
7. *Velichko, O. I.* Change in the diffusion mechanisms of boron implanted into silicon with increase in the annealing temperature / O. I. Velichko, A. A. Hundorina // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2011. Vol.14. № 4. P. 384.