

06

Об особенностях поведения атомов лантана и гафния в кремнии

© Ш.Б. Утамурадова, Х.С. Далиев, Э.К. Каландаров, Ш.Х. Далиев

Научно-исследовательский институт прикладной физики
Национального университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: shahrik1985@yandex.ru

В окончательной редакции 25 января 2006 г.

Методом емкостной спектроскопии изучены особенности взаимодействия атомов лантана и гафния в кремнии. Показано, что атомы гафния при его диффузионном введении в кремний образуют два глубоких уровня (ГУ) с энергиями ионизации $E_c - 0.28$ eV и $E_v + 0.35$ eV. Обнаружено, что атомы лантана, введенные в кремний в процессе выращивания из расплава, не проявляют электрической активности. Установлено, что наличие лантана в решетке Si увеличивает эффективность образования ГУ, связанных с дополнительно введенным гафнием. Кроме того, обнаружено, что присутствие лантана в кремнии приводит к стабилизации уровней Hf: отжиг центров гафния происходит гораздо медленнее в образцах Si(La, Hf) по сравнению с Si(Hf).

PACS: 81.05.-t

Изучение влияния редкоземельных элементов (РЗЭ) на свойства полупроводниковых материалов обусловлено, с одной стороны, возможностью создания термостабильных материалов, с другой — способностью РЗЭ повышать их радиационную стойкость [1–5]. Хотя исследования свойств кремния, легированного РЗЭ, ведутся на протяжении многих лет, интерес к этим материалам привлекает пристальное внимание ученых и по сей день. Так, имеются отдельные результаты, посвященные исследованию свойств кремния, легированного иттербием [6,7], европием [8], эрбием [9], лантаном [10]. Среди редкоземельных элементов в кремнии самым малоизученным является лантан. До сих пор нет однозначного мнения о глубоких центрах, создаваемых лантаном в кремнии. Следует отметить, что взаимодействие атомов лантана с другими активными и неактивными примесями в кремнии вообще не изучено.

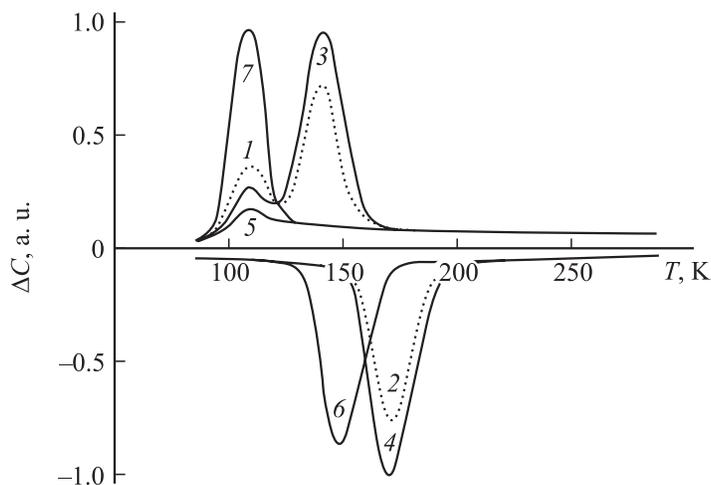
Поэтому представляет определенный интерес изучение влияния примесей редкоземельных элементов, введенных в объем кремния в процессе выращивания из расплава, на поведение атомов специально введенных примесей с глубокими уровнями (ГУ).

Целью данной работы являлось изучение особенностей взаимодействия атомов лантана и гафния в кремнии. Методика изготовления диодных структур, измерения и обработки спектров DLTS детально описана нами в работе [11]. Для экспериментов использовался *n*-Si, легированный лантаном в процессе выращивания из расплава, удельное сопротивление ρ составляло $10 \div 100 \Omega \cdot \text{см}$, ориентация — в направлении $\langle 111 \rangle$.

Измерения спектров DLTS в образцах *n*-Si, легированного лантаном, показали, что каких-либо ГУ в заметной концентрации не наблюдается. Но в то же время, согласно результатам нейтронно-активационного анализа, концентрация атомов лантана в объеме кремния достаточно высокая и составляет $3 \cdot 10^{16} \div 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Эти данные подтверждают предположение об электронейтральности атомов редкоземельных элементов в кремнии [11].

Для изучения влияния атомов лантана на поведение атомов гафния в кремнии проводилась диффузия Hf в интервале температур $900 \div 1250^\circ\text{C}$ с последующей закалкой в *n*-Si, легированный лантаном в процессе выращивания из расплава. При тех же технологических режимах проводился отжиг контрольных образцов *n*-Si(La) без примеси гафния. Одновременно проводился отжиг и исходных образцов Si (без лантана и гафния). Ранее нами было установлено, что La в Si электронейтрален, но высокотемпературный отжиг приводит к активации атомов лантана с образованием ГУ с $E_v + 0.32 \text{ eV}$ [10]. Следовательно, высокотемпературная диффузия, при которой вводится гафний в Si(La), может активировать атомы лантана.

Результаты проведенных исследований иллюстрирует рисунок, на котором приведен типичный спектр DLTS образцов кремния, легированного лантаном и гафнием. Спектры измерены в режиме постоянного напряжения путем однократного сканирования [11]. Анализ измеренных спектров DLTS показывает, что в образцах *n*-Si(Hf) (см. рисунок, кривая 1) наблюдаются два ГУ с энергиями ионизации $E_c - 0.23 \text{ eV}$ и $E_c - 0.28 \text{ eV}$, а в *p*-Si(Hf) — один ГУ с $E_v + 0.35 \text{ eV}$ (см. рисунок, кривая 2). В образцах *n*-Si(La, Hf) (кривая 3) и *p*-Si(La, Hf) (кривая 4)



Типичные спектры DLTS образцов: 1 — $n\text{-Si(Hf)}$, 2 — $p\text{-Si(Hf)}$, 3 — $n\text{-Si(La, Hf)}$, 4 — $p\text{-Si(La, Hf)}$, 5 — $n\text{-Si(La) + ВТО}$, 6 — $p\text{-Si(La) + ВТО}$, 7 — $n\text{-Si}$ (контр).

наблюдается тот же энергетический спектр, что и в кремнии, легированном только гафнием.

Сопоставление спектров DLTS легированных и контрольных термообработанных образцов показывает, что с атомами гафния в кремнии связаны уровни $E_c - 0.28 \text{ eV}$ и $E_v + 0.35 \text{ eV}$. Добавим, что ГУ с энергией ионизации $E_c - 0.23 \text{ eV}$ наблюдается и в контрольных термообработанных образцах исходного Si, т.е. он является дефектом термообработки (см. рисунок, кривая 7) [12]. Следует отметить, что свойства кремния, легированного гафнием путем имплантации, были исследованы авторами [13], но энергетический спектр уровней, создаваемых гафнием, не был определен.

Из сравнения кривых 1 и 2 с кривыми 3 и 4 приведенного рисунка следует, что наличие лантана в объеме кремния увеличивает концентрацию уровней гафния.

Термообработка образцов $p\text{-Si(La)}$ при тех же технологических условиях, что и диффузионное введение гафния, приводит к активации атомов лантана с образованием ГУ $E_v + 0.32 \text{ eV}$ (кривая 6). Кроме того,

на спектрах DLTS термообработанных образцов $n\text{-Si}\langle\text{La}\rangle$ наблюдаются также ГУ с энергией ионизации $E_c - 0.23\text{ eV}$ (кривая 5). Следует добавить, что концентрация этого уровня в таких образцах на $1 \div 1.5$ порядка меньше, чем в термообработанных образцах исходного Si, т.е. наличие атомов лантана в кремнии уменьшает эффективность образования термодфектов.

Отсутствие уровней лантана в образцах, дополнительно легированных гафнием, объясняется, по-видимому, особенностями взаимодействия атомов La и Hf в кремнии. Добавим, что наличие лантана в решетке Si увеличивает эффективность образования глубоких центров, связанных с гафнием, что обусловлено, вероятно, увеличением электроактивной доли атомов Hf. Кроме того, обнаружено, что отжиг центров гафния происходит гораздо медленнее в образцах $\text{Si}\langle\text{La}, \text{Hf}\rangle$ по сравнению с образцами $\text{Si}\langle\text{Hf}\rangle$.

Таким образом, наличие атомов редкоземельных элементов, в частности, атомов лантана в кремнии, приводит к снижению эффективности образования термических дефектов и увеличению концентрации электроактивных атомов дополнительно введенного гафния и стабилизации параметров их уровней.

Список литературы

- [1] Воронкова Г.И., Иглицын М.И., Салманов А.Р. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 3. С. 499–502.
- [2] Неймаш В.Б., Соснин М.Г., Шаховцов В.И. и др. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 4. С. 786–788.
- [3] Mandelkorn J., Schwarts L., Broder J. et al. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 7. P. 2258–2260.
- [4] Легированные полупроводниковые материалы: Сб. научн. тр. / Под ред. В.С. Земскова. М.: Наука, 1985. 264 с.
- [5] Свойства легированных полупроводниковых материалов: Сб. научн. тр. / Под ред. В.С. Земскова. М.: Наука, 1990. 256 с.
- [6] Талипов Ф.М. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 6. С. 728–729.
- [7] Назиров Д.Э. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 9. С. 1056–1057.
- [8] Назиров Д.Э. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 5. С. 570–571.
- [9] Соболев Н.А. // Рос. хим. журнал. 2001. Т. XLV. № 5–6. С. 95–101.
- [10] Далиев Х.С., Утамурадова Ш.Б., Акбаров А.Ж. и др. // Неорганич. матер. 2001. Т. 37. № 5. С. 527–529.

- [11] *Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С.* Дефектообразование в кремнии. Томск: Университет, 1993. 192 с.
- [12] *Далиев Х.С., Бозорова О.А., Далиев Ш.Х.* Изучение свойств кремния, легированного гафнием: Сб. трудов III Нац. конф. „Рост, свойства и применение кристаллов“. Томск, 2002. С. 168–169.
- [13] *Yuvenko O.F., Sachdeva R. et al.* // Semiconductors Silicon-2002. The Electrochemical Society, Pennington, 2002. P. 410–451.