

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОВЕДЕНИЯ АТОМОВ ЛАНТАНА И ГАФНИЯ В КРЕМНИИ

Аннотация: В данной статье изучено 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.

Ключевые слова: полупроводник, кремний, лантан, Методика, спектр, термообработка, эксперимент, гафний

ON THE REGULARITIES OF THE BEHAVIOR OF LANTHAN AND HAFNIUM ATOMS IN SILICON

Abstract: In this article, the presence of rare-earth atoms, in particular, lanthanum atoms in silicon, has been studied, reducing the efficiency of thermal defect formation and increasing the concentration of electroactive atoms of additionally introduced hafnium and stabilizing the parameters of their levels.

Key words: semiconductor, silicon, lanthanum, methods, spectrum, heat treatment, experiment, hafnium.

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. Хотя исследования свойств кремния, легированного РЗЭ ведутся на протяжении многих лет, интерес к этим материалам привлекает пристальное внимание ученых и по сей день. Так, выше было показано, что имеются отдельные

результаты, посвященные исследованию свойств кремния, легированного иттербием, европием, эрбием [2], лантаном [1]. 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.

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 работах [2]. Для экспериментов использовался n-Si, легированный лантаном в процессе выращивания из расплава, удельное сопротивление ρ составляло $10 \div 100$ Ом·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 $3 \cdot 10^{16} \div 7 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Эти данные подтверждают сделанное нами ранее предположение об электронейтральности атомов редкоземельных элементов в кремнии.

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). Выше

нами было установлено, что атомы La в Si электронейтральны, но ВТО приводит к активации атомов лантана с образованием ГУ с $E_v+0.32$ эВ. Следовательно, высокотемпературная диффузия, при которой вводится гафний в Si<La>, может активировать атомы лантана.

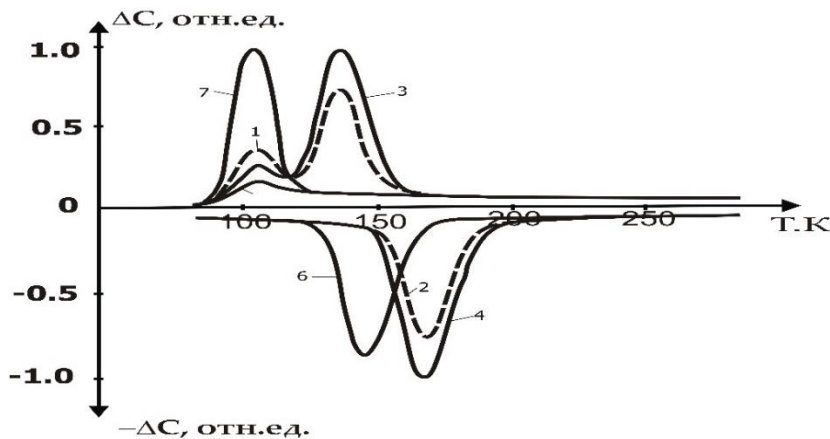


Рис. Спектры DLTS образцов: 1- n-Si<Hf>, 2- p-Si<Hf>
 3- n-Si<La,Hf> 4- p-Si<La,Hf>, 5- n-Si<La> +ВТО
 6- p-Si<La>+ВТО, 7- n-Si (контр.)

Результаты проведенных исследований иллюстрирует рис. на котором приведен типичный спектр DLTS образцов кремния, легированного лантаном и гафнием. Спектры измерены в режиме постоянного напряжения путем однократного сканирования [3]. Анализ измеренных спектров DLTS показывает, что в образцах n-Si<Hf> (см. рис., кривая 1) наблюдаются два ГУ с энергиями ионизации $E_c-0.23$ эВ и $E_c-0.28$ эВ, а в p-Si<Hf> - один ГУ с $E_v+0.35$ эВ (см рис. кривая 2). В образцах n-Si<La,Hf> (кривая 3) и p-Si<La,Hf> (кривая 4) 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 $E_c-0.28$ эВ и $E_v+0.35$ эВ. Добавим, что ГУ с энергией ионизации $E_c-0.23$ эВ наблюдается и в контрольных термообработанных образцах исходного кремния, то есть он является дефектом термообработки (см. рис. кривая 7). Следует отметить, что свойства кремния, легированного

гафнием путем имплантации были исследованы авторами [1], 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-Si<La> при тех же технологических условиях, что и диффузионное введение гафния, приводит к активации атомов лантана с образованием ГУ $E_v+0.32$ эВ (кривая 6). Кроме того, на спектрах DLTS термообработанных образцов n-Si<La> наблюдаются также ГУ с энергией ионизации $E_c-0.23$ эВ (кривая 5). Следует добавить, что концентрация этого уровня в таких образцах на $1\div 1.5$ порядка меньше, чем в термообработанных образцах исходного Si, то есть 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 гафния. Кроме того, обнаружено, что отжиг центров гафния происходит гораздо медленнее в образцах Si<La, Hf> по сравнению с образцами Si<Hf>.

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.

Литературы:

1. Vyvenko O.F., Sachdeva R. et.al. Study of diffusivity and electrical properties of Zn and Hf in silicon // in: Semiconductors Silicon, 2002, The Electrochemical Society. –Penninigton, 2002. –P. 410-451.
2. Mandelkorn J., Schwarts L., Broder J. et. al. Effect of impurities on radiation damage of silicon solar sells // J. Appl. Phys. – 1964. –N 7(35). –P. 2258-2260.
3. Зайнабидинов С.З., Далиев Х.С. Дефектообразование в кремнии. – Т. Университет, 1993. – 192 с.