

# ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ АТОМАМИ ГАДОЛИНИЯ

Далиев Х.С., Дехканов М.Ш., Эруглиев У.К., Норкулов Ш., Эргашев Ж.

*Национальный университет Узбекистана, Республика Узбекистан*

[dalievkhs@yandex.ru](mailto:dalievkhs@yandex.ru)

В последние годы для направленного изменения свойств Si его легируют так называемыми нетрадиционными примесями – редкоземельными элементами (РЗЭ), которые зачастую присутствуют в объеме Si в электрически неактивном состоянии, но оказывают существенное влияние на процессы дефектообразования, а также на рабочие характеристики полупроводниковых приборов [1-3]. Известно, что примеси редкоземельных элементов, введенные в кремний из расплава при выращивании, обладая высокой химической активностью и склонностью к комплексообразованию и являются стоками для различных дефектов в объеме кремния. Поэтому исследование поведения различных примесей редкоземельных элементов в Si, а также изучение роли этих примесей в формировании электрофизических свойств кремния представляет несомненный интерес для решения важных проблем полупроводникового материаловедения.

Цель данной работы - изучение процессов дефектообразования в Si, легированном редкоземельным элементом – гадолинием.

Нами проведено комплексное изучение с помощью емкостной спектроскопии поведения атомов Gd, введенных в Si диффузионным методом или в процессе выращивания из расплава. Диффузионное легирование кремния Gd проводилось при 1200<sup>0</sup>C в течение 40 часов, далее измерялся профиль распределения удельного сопротивления  $\rho$  в образцах Si<Gd>. Измерения показали, что профиль распределения  $\rho$  не описывается erfс-функцией, а состоит из двух участков: вначале наблюдается резкий рост  $\rho$  на 1,5÷2 порядка до глубины ~ 50 мкм, далее значение  $\rho$  стабилизируется и заметного изменения  $\rho$  с глубиной не наблюдается. Аналогичный профиль  $\rho$  в Si наблюдался для переходных металлов [4]. Значения  $\rho$  в контрольных образцах с глубиной не изменялись.

Измерения энергетического спектра глубоких уровней (ГУ), возникающих в кремнии, легированном гадолинием диффузионным методом проводились с помощью метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) DLTS на барьерах Шоттки, созданных на основе исходного Si и легированных образцов Si с примесью Gd. Концентрация ГУ в таких образцах определялась из максимума пиков DLTS, а также с помощью ВФХ. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Gd>, p-Si<Gd> и контрольного Si приведены на рис.1.

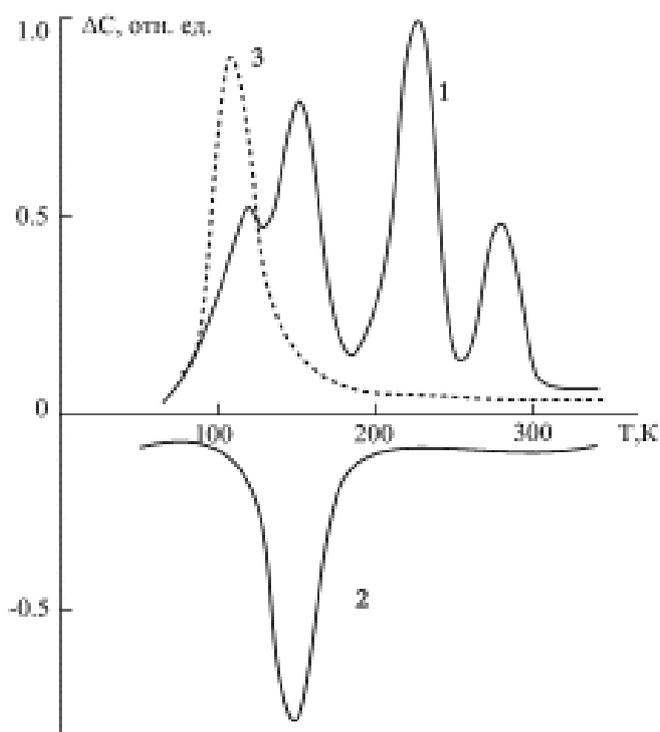


Рис.1. Типичные спектры DLTS образцов n-Si<Gd> (1), p-Si<Gd> (2) и контрольного образца (3).

На спектрах DLTS образцов n-Si<Gd>, измеренных в режиме постоянного напряжения ( $U_{обр} = 8$  В) в интервале температур  $77 \div 300$  К при  $t_1 = 10$  мс и  $t_2 = 60$  мс, обнаружены 4 пика с максимумами при  $T_m = 120$  К (пик I),  $T_m = 155$  К (пик II),  $T_m = 205$  К (пик III) и  $T_m = 255$  К (пик IV). Расчеты кривых Аррениуса - зависимостей  $\lg(\theta) = f(10^3/T)$ , полученных из спектров DLTS путем сравнения их с расчетной кривой  $\Delta C / \Delta C_{max}$ , показали, что эти пики обусловлены перезарядкой глубоких уровней  $E_c - 0.23$  эВ,  $E_c - 0.35$  эВ,  $E_c - 0.41$  эВ и  $E_c - 0.54$  эВ и сечениями захвата электронов  $\sigma_n$ :  $4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ ,  $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $1.1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и  $1.5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , соответственно.

В контрольных образцах Si, прошедших высокотемпературный отжиг при той же температуре, что и диффузия Gd, наблюдается один ГУ  $E_c-0.23$  эВ (см. рис. 1, кривая 3). Обнаружено, что концентрации наблюдаемых ГУ, в особенности ГУ II, III и IV, сильно зависят от  $T_{\text{диф}}$  и  $v_{\text{охл}}$ : чем выше  $T_{\text{диф}}$ , тем больше концентрация атомов Gd в объеме Si. Напротив, концентрация ГУ  $E_c-0.23$  эВ, наблюдаемого и в контрольных образцах, с ростом  $T_{\text{диф}}$  падает. При одинаковых значениях  $T_{\text{диф}}$  и  $v_{\text{охл}}$  концентрация ГУ  $E_c-0.23$  эВ в образцах n-Si<Gd> почти на порядок меньше, чем в контрольных образцах (без Gd). В образцах p-Si<Gd> обнаружен лишь один ГУ с энергией ионизацией  $E_v+0.32$  эВ, эффективность образования которого также зависит от  $T_{\text{диф}}$  и  $v_{\text{охл}}$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что диффузионное введение примеси гадолиния в монокристаллический кремний приводит к образованию четырех глубоких уровней с фиксированными энергиями ионизации  $E_c-0.23$  эВ,  $E_c-0.35$  эВ,  $E_c-0.41$  эВ и  $E_c-0.54$  эВ. При этом уровень  $E_c-0.23$  эВ наблюдается и в контрольных термически обработанных образцах без Gd, отсюда можно сделать вывод, что этот уровень не связан с атомами гадолиния, а является дефектом термообработки.

#### Литература:

1. Емцев В. В., Емцев В. В. (мл.), Полоскин Д. С., Соболев Н. А., Шек Е.И., Михель Й., Кимерлинг Л.С. Примесные центры в кремнии, легированном редкоземельными примесями диспрозием, гольмием, эрбием и иттербием. ФТП, 1999, Т. 33, В. 6, С.649-651.
2. Лазарук С.К., Мудрый А.В., Иванюкович А.В., Лешок А.А., Унучек Д.Н., Фотолюминесценция легированных эрбием алюмооксидных пленок со встроенными кремниевыми наночастицами. ФТП, 2005, Т.39, В.8, С.927-930.
3. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стонгей О.В. Новые направления физического материаловедения. Воронеж: Изд. Воронежского госуни-верситета, 2000. – 360 с.
4. Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.М., Куликов Г.С. Компенсированный кремний. Л., Наука, 1972, 122 с.