

6-1-2019

CAPACITIVE SPECTROSCOPY OF DEFECTS IN SEMICONDUCTORS, DOPED BY ATOMS OF GADOLINIUM

Shoakhriyor B. Norkulov

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, sh.norkulov@nuu.uz

Khodjakbar S. Daliev

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Makhmud Sh. Dehkanov

Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the NUUz, Tashkent, Uzbekista

Uktam K. Erugliev

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors>



Part of the [Electronic Devices and Semiconductor Manufacturing Commons](#)

Recommended Citation

Norkulov, Shoakhriyor B.; Daliev, Khodjakbar S.; Dehkanov, Makhmud Sh.; and Erugliev, Uktam K. (2019) "CAPACITIVE SPECTROSCOPY OF DEFECTS IN SEMICONDUCTORS, DOPED BY ATOMS OF GADOLINIUM," *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*: Vol. 1 : Iss. 1 , Article 47.
Available at: <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors/vol1/iss1/47>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ
АТОМАМИ ГАДОЛИНИЯХ.С. Далиев¹, М.Ш. Дехканов², У. К. Эруглиев¹, Ш.Б. Норкулов^{1□}, Ж.А. Эргашев¹¹Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.²НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан.□e-mail: sh.norkulov@nuu.uz

Аннотация. Методом DLTS исследованы процессы дефектообразования в кремнии, легированном гадолинием. Показано, что диффузионное введение Gd в Si приводит к образованию глубоких уровней с энергиями ионизации $E_c-0.23$ эВ, $E_c-0.35$ эВ, $E_c-0.41$ эВ и $E_c-0.54$ эВ и сечениями захвата электронов σ_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, а в образцах p-Si<Gd> обнаружен только один уровень с $E_v+0.32$ эВ.

Ключевые слова: кремний, легирование, диффузия, гадолиний, глубокий уровень, энергия ионизации.

CAPACITIVE SPECTROSCOPY OF DEFECTS IN SEMICONDUCTORS, DOPED BY
ATOMS OF GADOLINIUMKh.S. Daliev¹, M.Sh. Dehkanov², U.K. Erugliev¹, Sh.B. Norkulov^{1□}, J.A. Ergashev¹¹National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan²Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the NUUz, Tashkent, Uzbekistan,□e-mail: sh.norkulov@nuu.uz

Abstract. The processes of formation of defects in silicon, doped by gadolinium are investigated by the method of DLTS. It is shown that in diffusion the introduction of Gd in the Si leads to the formation of deep levels with ionization energies $E_c-0.23$ eV, $E_c-0.35$ eV, $E_c-0.41$ eV and $E_c-0.54$ eV and a capture cross section of electrons σ_n : $4 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$, $2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, $1.1 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ and $1.5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, respectively, and in samples p-Si<Gd> found only one level with $E_v+0.32$ eV.

Keywords: silicon, doping, diffusion, gadolinium, deep level, ionization energy.

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, обладают высокой химической активностью и склонностью к комплексообразованию, являясь 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. Диффузионное легирование кремния Gd проводилось при 1200°C в течение 40 часов, далее измерялся профиль распределения удельного сопротивления ρ в образцах Si<Gd>. Измерения показали, что профиль распределения ρ не описывается erfc -функцией, а состоит из двух участков: вначале наблюдается резкий рост ρ на $1,5\div 2$ порядка до глубины ~ 50 мкм, далее значение ρ стабилизируется и заметного изменения ρ с глубиной не наблюдается. Аналогичный профиль ρ в Si наблюдался для переходных металлов [4]. Значения ρ в контрольных образцах с глубиной не изменялись.

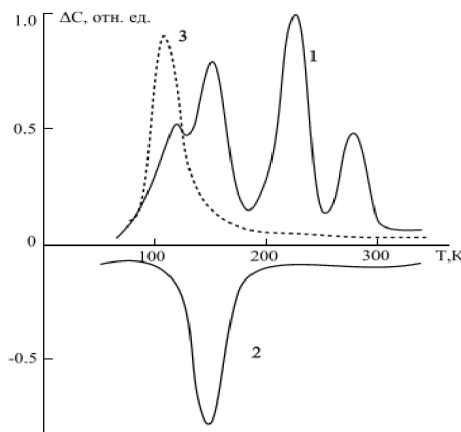


Рис.1. Типичные спектры DLTS образцов $n\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$ (1), $p\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$ (2) и контрольного образца (3).

Измерения энергетического спектра глубоких уровней (ГУ), возникающих в кремнии, легированном гадолинием диффузионным методом проводились с помощью метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (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 $n\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$, $p\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$ и контрольного Si приведены на рис. 1.

На спектрах DLTS образцов $n\text{-Si}\langle\text{Gd}\rangle$, измеренных в режиме постоянного напряжения ($U_{\text{обp}} = 8$ В) в интервале температур $77\div 300\text{K}$ при $t_1 = 10$ мс и $t_2 = 60$ мс, обнаружены 4 пика с максимумами при $T_{\text{M}} = 120\text{K}$ (пик I), $T_{\text{M}} = 155\text{K}$ (пик II), $T_{\text{M}} = 205\text{K}$ (пик III) и $T_{\text{M}} = 255\text{K}$ (пик IV). Расчеты кривых Аррениуса - зависимостей $\lg(\theta) = f(10^3/T)$, полученных из спектров DLTS путем сравнения их с расчетной кривой $\Delta C / \Delta C_{\text{max}}$, 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 σ_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 ионизации $E_v+0.32$ 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, так можно сделать вывод, что этот уровень не связан с атомами гадолиния, а является дефектом термообработки.

Литература

1. В.В.Емцев, В.В.Емцев (мл.), Д.С.Полоскин, Н.А.Соболев, Е.И.Шек, Й.Михель, Л.С.Кимерлинг, Физики и техники полупроводников, 33, 6, 649 (1999).
2. С.К.Лазарук, А.В.Мудрый, А.В.Иванюкович, А.А.Лешок, Д.Н.Унучек, Физики и техники полупроводников, 39, 8, 927 (2005).
3. И.В.Золотухин, Ю.Е.Калинин, О.В.Стонгей. Новые направления физического материаловедения, (Воронеж, Воронежский госуниверситет, 2000).
4. Б.И.Болтакс, М.К.Бахадырханов, С.М.Городецкий, Г.С.Куликов. Компенсированный кремний. (Ленинград, Наука, 1972).

The text of the article is translated by Editorial of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: ispm_uz@mail.ru

In recent years, for a directed change in the properties of Si, it has been doped with the so-called non-traditional impurities - rare-earth elements (REE). They are often present in the Si volume in an electrically inactive state, but have a significant effect on defect formation processes, as well as on the performance of semiconductor devices [1-3]. It is known that rare-earth impurities introduced to silicon from a melt during growth have high chemical activity and a tendency to complexation. They are drains for various defects in the bulk of silicon. Therefore, the study of the behavior of various rare-earth impurities in Si, as well as the role of these impurities in the formation of the electrophysical properties of silicon, is of undoubted interest in solving important problems of semiconductor material science.

The aim of this work is to study the processes of defect formation in Si doped with rare-earth element gadolinium.

We conducted a comprehensive study using capacitive spectroscopy of the behavior of Gd atoms introduced into Si by the diffusion method. Diffusion doping of silicon Gd was carried out at 1200°C for 40 hours, then the profile of the distribution of resistivity ρ in Si <Gd> samples was measured. The measurements showed that the distribution profile ρ is not described by the erfc function, but consists of two sections: at first, a sharp increase ρ by 1.5÷2 orders of magnitude to a depth of $\sim 50 \mu\text{m}$ is observed, then the value ρ stabilizes and there is no noticeable change ρ with depth. A similar profile ρ in Si was observed for transition metals [4]. The ρ values in the control samples did not change with depth.

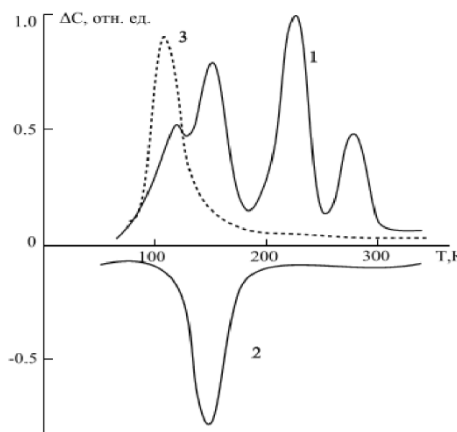


Fig. 1. Typical DLTS spectra of n-Si <Gd> samples (1), p-Si <Gd> (2) and control sample (3).

The energy spectrum of deep levels (DL) arising in gadolinium-doped silicon was measured using the method of non-stationary capacitive spectroscopy of deep levels (DLTS) on Schottky barriers based on the initial Si and doped Si samples with Gd impurity. The concentration of DL in such samples was determined from the maximum of the DLTS peaks, as well as using the CV characteristics. Typical DLTS spectra of n-Si <Gd>, p-Si <Gd> and control Si samples are shown in Fig. 1.

On the DLTS spectra of n-Si <Gd> samples measured in constant voltage mode ($U_{rev} = 8$ V) in the temperature range 77–300 K at $t_1 = 10$ ms and $t_2 = 60$ ms, 4 peaks with maxima at $T_m = 120$ K (peak I), $T_m = 155$ K (peak II), $T_m = 205$ K (peak III) and $T_m = 255$ K (peak IV). The calculations of the Arrhenius curves - the dependences $\lg(\theta) = f(10^3 / T)$ obtained from the DLTS spectra by comparing them with the calculated curve $\Delta C / \Delta C_{max}$. It showed that these peaks are due to the recharging of the deep levels $E_c - 0.23$ eV, $E_c - 0.35$ eV, $E_c - 0.41$ eV and $E_c - 0.54$ eV and electron capture cross sections σ_n : $4 \cdot 10^{-17} \text{cm}^2$, $2 \cdot 10^{-15} \text{cm}^2$, $1.1 \cdot 10^{-16} \text{cm}^2$ and $1.5 \cdot 10^{-15} \text{cm}^2$, respectively.

In control samples of Si, which underwent high-temperature annealing at the same temperature as Gd diffusion, one DL $E_c - 0.23$ eV is observed (see Fig. 1, curve 3). It was found that the concentrations of the observed DL, in particular, DL II, III, and IV, strongly depend on T_{dif} and v_{cool} : the higher T_{dif} , the higher the concentration of Gd atoms in the Si volume. On the contrary, the concentration of DL $E_c - 0.23$ eV, observed in the control samples, also decreases with an increase in T_{dif} . For the same values of T_{dif} and v_{cool} , the concentration of the DL $E_c - 0.23$ eV in n-Si <Gd> samples is almost an order of magnitude lower than in the control samples (without Gd). In p-Si <Gd> samples, only one DL with an ionization energy of $E_v + 0.32$ eV was detected, the formation efficiency of which also depends on T_{dif} and v_{cool} .

Thus as a result of the studies, it was found that the diffusion introduction of gadolinium impurities into single-crystal silicon leads to the formation of four deep levels with fixed ionization energies $E_c - 0.23$ eV, $E_c - 0.35$ eV, $E_c - 0.41$ eV, and $E_c - 0.54$ eV. In this case, the $E_c - 0.23$ eV level is also observed in control thermally treated samples without Gd, so we can conclude that this level is not associated with gadolinium atoms, but is a defect in heat treatment.