

Султанов Номанжан Акрамович, д. ф.-м.н., профессор,  
Рахимов Эрмат Тожиматович, к. ф.-м.н., доцент,  
Мирзажонов Зокиржон, к. ф.-м.н., доцент,  
Ферганский политехнический институт, Узбекистан

### **ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЭЛЕМЕНТАМИ S, Se, Te**

*В данной работе исследована люминесценция и нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (DLTS) кремния, легированного элементами S, Se, Te. В спектрах люминесценции в области энергий 0,722-0,975 эВ обнаружены электронно-колебательные полосы излучения, появление которых зависит от типа примесных атомов, а также от условий легирования и скорости охлаждения кристаллов. Проведено сравнение с данными электрических и емкостных (DLTS) измерений.*

*Ключевые слова: атом, кристалл, спектроскопия, легированный элемент, емкостная измерения*

Sultanov Nomanzhan Akramovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor,  
Rakhimov Ermat Tozhimatovich, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor,  
Mirzazhonov Zokirzhon Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor  
Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan

### **PHOTOLUMINESCENCE AND CAPACITIVE SPECTROSCOPY OF SILICON DOPED WITH S, SE, TE ELEMENTS**

*In this work, we studied luminescence and non-stationary capacitive spectroscopy of deep levels (DLTS) of silicon doped with S, Se, Te elements. In the luminescence spectra in the energy range 0.722-0.975 eV, electron-vibrational emission bands were detected, the appearance of which depends on the type of impurity atoms, as well as on the doping conditions and the cooling rate of the crystals. Comparison with the data of electrical and capacitive (DLTS) measurements*

*Key words: atom, crystal, spectroscopy, doped element, capacitive measurement*

Рекомбинационное излучение, возникающие при оптическом возбуждений кристалла, то есть фотолюминесценции (ФЛ), позволяют определить микроскопическую структуру центра. Различают "краевую" люминесценцию, являющуюся результатом межзонных оптических переходов в кристалле и примесную люминесценцию, излучательными переходами через локальные уровни дефектов или примесей.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований DLTS и ФЛ кремния, легированного элементами S, Se, Te. В последнее время емкостные методы находят широкое применение для определения свойств центров с глубокими уровнями (ГУ). С помощью DLTS определяются энергии ионизации, сечения захвата носителей заряда и концентрации ГУ. Емкостные методы основанные на изменении барьерной емкости перехода при перезарядке глубоких уровней в слое объемного заряда.

Легирование кремния халькогенидов (S, Se, Te) проводилось методом диффузии в откаченных кварцевых ампулах при температурах 1100 – 1200<sup>0</sup>С в течение (4 – 100) часов, а также методом ионной имплантации. Для изготовления фоторезисторов был использован исходный p – Si с удельным сопротивлением  $\rho = 2 \div 200 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . после диффузии серы, селена и теллура тип проводимости таких образцов изменялся, а  $\rho$  при 300 К было в пределах от 10 до 10<sup>5</sup> Ом.см в зависимости от режима легирования. Образцы для измерения параметров глубоких уровней с помощью DLTS были изготовлены из n–Si с относительно небольшой концентрацией электрически активного серы, селена и теллура.

Ионная имплантация осуществлялась при комнатной температуре на установке ионнолучевого легирования “Юлла”, энергия ионов составляла величину 80 - 150 эВ, доза  $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Плотность ионного тока не превышала 5 мкА/см<sup>2</sup>. После внедрения ионов проводились либо изохронный (20 мин.) отжиг кристаллов в области температур до 700<sup>0</sup>С, либо диффузионная разгонка имплантированной примеси при 1100 - 1250<sup>0</sup>С в течение 2 часов.

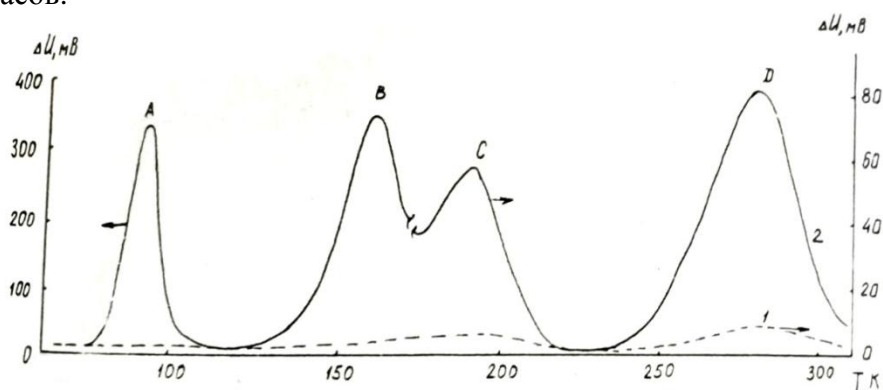


Рис.1. Типичная зависимость DLTS в контрольного образца (1) и диода из – Si(S) (2).

На рис. 1 приведены спектры DLTS образцов Si(S). Из рисунка видно, что после диффузии серы в кремнии образуются четыре ГУ с энергиями ионизации:  $E_1$  (A) =  $E_c - 0,182$ ,  $E_2$  (B) =  $E_c - 0,366$ ,  $E_3$  (C) =  $E_c - 0,30$  и  $E_4$  (D) =  $E_c - 0,53$  эВ.

Таблица 1

Параметры ГУ

Уровень	$T_M \cdot K$ при $t_1 = 2 \text{ мс}$	$E_t$ , эВ	$\sigma_n(T_M)$ , см <sup>2</sup>	$N_t$ , см <sup>-3</sup>	$N_I$ см <sup>-3</sup>
A	88	0,182	$1 \cdot 15 \cdot 10^{-13}$	$8,2 \cdot 10^{14}$	$8,7 \cdot 10^{14}$
B	161	0,366	$2,46 \cdot 10^{-13}$	$8,3 \cdot 10^{14}$	$8,8 \cdot 10^{14}$
C	190	0,30	$8,8 \cdot 10^{-17}$	$3,5 \cdot 10^{14}$	$3,3 \cdot 10^{14}$
Д	286	0,53	$2,5 \cdot 10^{-15}$	$4,1 \cdot 10^{14}$	$8,8 \cdot 10^{14}$

где  $N_I$  – полная концентрация ионизированных в слое объемного заряда.  $N_I$  можно определить при температуре пика DLTS одновременное изменением  $\Delta U$  по формуле (1) и (2).

$$N_I = \frac{2}{q\epsilon} \cdot \frac{|V_s - V_n|}{C_s^{-2} - C_n^{-2}}; \quad (1)$$

где  $V_0 = V(t_0)$ ,  $V_n$  -напряжение на диоде в конце состояния заполнения, при  $t=0$  эмиссия электронов из исследуемого ГУ практически еще не началось, индексы "э" и "н" относятся к режимам термической эмиссии и заполнения ГУ, соответственно.

Зная  $E_i$ ,  $N_i$  и  $W - h$ ; ( $W - h = \sqrt{\frac{2 \varepsilon k T}{q^2 N_i} \ln \frac{N_i}{n}}$ ) можно определить концентрации ГУ.

$$N_i = \frac{2\varepsilon}{q\beta} \cdot \frac{\Delta U}{h_3^2 - h_n^2}; \quad (2)$$

где  $\beta = n^{\frac{n}{1-n}} - n^{\frac{1}{1-n}}$ ,  $n = \frac{t_2}{t_1}$ ,  $\Delta U = \frac{q}{\varepsilon} \beta \int_{h_n}^{h_3} N_i(x) dx$ ;

концентрация уровней серы определялись по формуле (2) (см. табл.1).

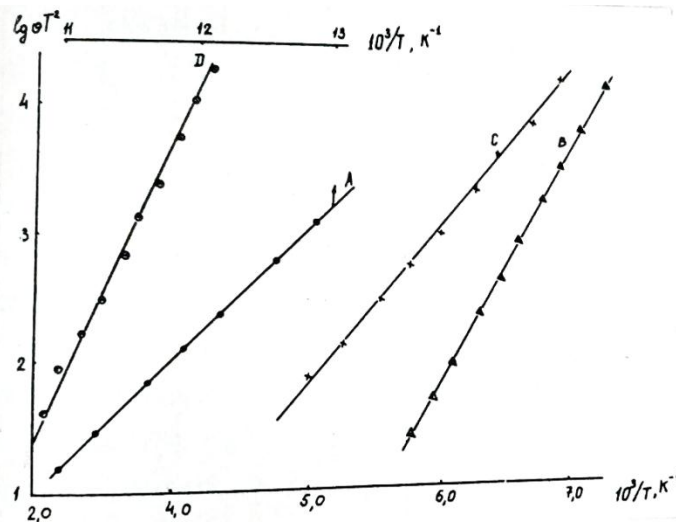


Рис.2.Зависимость постоянной времени термической перезарядки уровней серы от обратной температуры.

Зависимость  $\ln(\Theta T^2) = f(\frac{1}{T})$  показана на рис.2, где  $\Theta$  - постоянная времени перезарядки уровня. Как видно из рисунка, экспериментальные значения  $\Theta(T)$  хорошо ложатся на прямые Аррениуса, т.е все четыре уровня серы имеют фиксированную энергию ионизации. Из прямых Аррениуса определены значения  $\sigma_n$  (см. табл. 1)

Результаты измерений на большинстве образцов n-Si, легированного серой, показали, что при закалке концентрация уровней А,В всегда на порядок больше (см. табл. 1), чем концентрация уровней С,Д и эта разница растет с увеличением температуры диффузии. После диффузии при 1200<sup>0</sup>С преобладают уровни серы  $E_c - 0,18$  (А) и  $E_c - 0,366$  эВ (В) и хотя уровень  $E_c - 0,30$  эВ (С) тоже присутствует, но его трудно обнаружить с помощью Холл-эффекта и фотопроводимость(ФП) на фоне уровня  $E_c - 0,366$  эВ.  $E_c - 0,53$  эВ (Д) в работе [5] обнаружен по ФП и связан с фотоионизацией неконтролируемых ГУ ( $N_i$ ).

Таким образом, сопоставление полученных результатов спомощью Холл-эффекта, ФП и DLTS с результатами других авторов показывает, что параметры уровней С и Д практически совпадают с параметрами уровней термодетфектов [6], но концентрация их в контрольных образцах на (1,5-2) порядка ниже (см.рис.1 кривая 1), чем в Si(S). Параметры уровня А близки к параметрам А-центра радиационного дефекта, но сечение захвата уровня А на порядке больше, чем А-центра.Здесь следует отметить, что сечение захвата для уровня С ( $E_c - 0,30$  эВ) при 200К в  $4 \cdot 10^4$  раз меньше, чем для

уровня В ( $E_c - 0,366$  эВ), поэтому в спектре DLTS пик, соответствующий уровню В появляется при более низких температурах, чем пик, соответствующий уровню С.

Из приведенных выше результатов можно сделать вывод, что сера вводит в Si ряд дефектов с ГУ (А,В и С,Д), причем уровни А и В являются двойными донорами.

Таблица 2

Зависимости DLTS в диодах из n-Si(Se).

Уровне нь	Энергия ионизации, эВ	Сечение электрона, см <sup>2</sup>	захвата
А	0,19	$2 \cdot 10^{-15}$	
В	0,29	$1,5 \cdot 10^{-16}$	
С	0,51	$6 \cdot 10^{-16}$	

Концентрации уровней В и С, вычисленные с учетом области неполной ионизации ГУ, были практически одинаковыми во всех исследованных образцах. Это подтверждает предположение, что указанные ГУ связаны с 2-х зарядным центром. Концентрация уровня А не коррелировала с концентрациями уровней В и С. Приведенных в таблице параметры ГУ хорошо согласуются с литературными данными [1-4].

Измерение спектров ФЛ кристаллов кремния проводилось при 4,2 и 77К (образец погружали в жидкий гелий или азот).

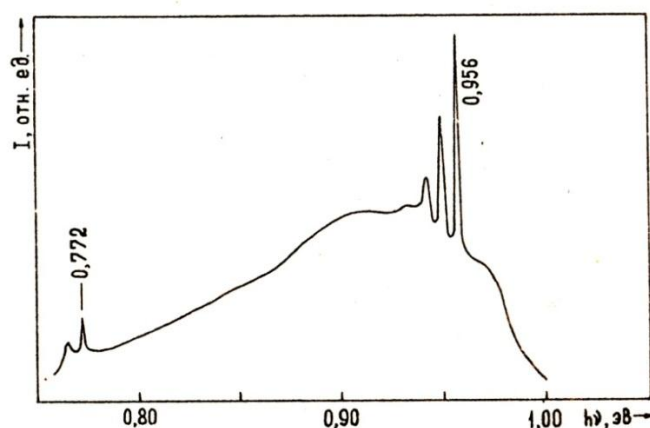


Рис.3. Спектры ФЛ Si(Se); 4,2 К. Диффузия из паровой фазы при 1200<sup>0</sup>С, 100 час., быстрое охлаждение.

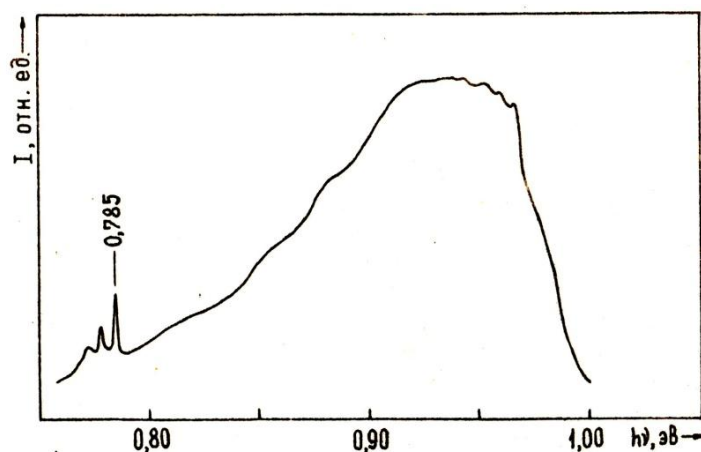


Рис.4 Спектр ФЛ Si(Se); 4,2К. Диффузия из паровой фазы при 1200<sup>0</sup>С, 100 час., охлаждение на воздухе.

Полученных результатов ФЛ кремния, легированного селеном видно, что в спектрах присутствуют как квазилинейчатые полосы излучения с головными бесфононными линиями (0,975; 0,956; 0,785; 0,772 эВ) (см. на рис.3-5), так и электронно-колебательная полоса 0,822 эВ, где она была обнаружена в спектрах ФЛ Si, диффузионно-легированного ванадием. Кроме того, полоса 0,822 эВ наблюдалась нами также в спектрах ФЛ Si, легированного серой.

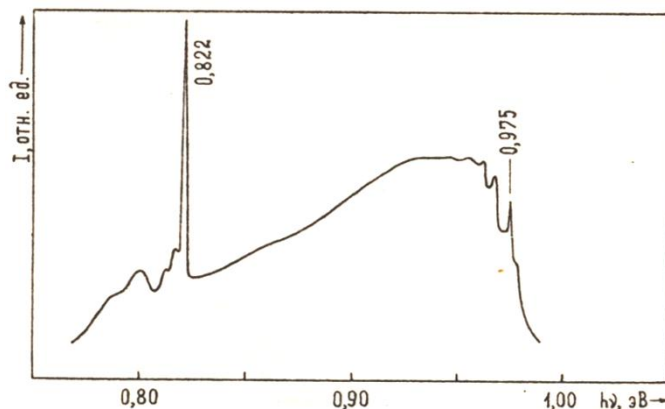


Рис.5. Спектр ФЛ Si(Se); 30К. Легирование методом ионной имплантации  $\text{Se}^{+c}$  энергией 150 кэВ дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ , затем разгонка при  $1200^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа.

В настоящее время говорить о корреляции этих полос какой-либо конкретной примесью сложно. Нужны дальнейшие экспериментальные исследования. Тем не менее, появление в спектрах ФЛ Si(Se) полос излучения с квазилинейчатой структурой, характерной для полос излучения кремния, легированного переходными элементами не исключает возможности участия примесей переходных металлов в образовании центров, ответственных за полосы с 0,975; 0,956; 0,785; 0,772 эВ [2].

Впервые было проведено исследование ФЛ Si, легированного халькогенидов (S, Se, Te) и обнаружены в спектрах ФЛ Si(Se) как квазилинейчатые полосы излучения, так и электронно-колебательная полоса.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что халькогенидов (S, Se, T) в кремнии образуют примесные центры люминесценции. Характерной особенностью спектров ФЛ кремния, содержащего элемента S, Se, Te, является наличие электронно-колебательных полос, большинство их которых имеет квазилинейчатую структуру. Полосы обусловлены аннигиляцией экситонов, локализованных на глубоких примесных центрах. Кроме того, результаты данной работе указывают на перспективность совместного применения методов ФЛ и DLTS для изучения электронной структуры примесных центров в кремнии, легированном элементами S, Se, Te.

#### Литература:

1. Султанов Н.А. Фотоэлектрические свойства кремния с примесью селена. [Текст] // ФТП, 1974. т.8. Вып. 9. С.1777-1780.
2. Капитонова Л.М. Фотолюминесценция и емкостная спектроскопия кремния, легированного переходными элементами. А.А.Лебедев, Н.А.Султанов и др. [Текст] // Препринт ФТИ АН СССР Л. 1987. № 1186. 31 с.
3. Султанов Н.А. Влияние фототермических переходов на фотопроводимость кремния легированного селеном. [Текст] / Э.Т.Рахимов, В.Т.Мирзаев. // Международный центр научного сотрудничества "Наука и просвещение" "INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE "ADVANCED SCIENCE" Сборник статей V международной научно-практической конференции, состоявшейся 20 ноября 2018 году в г. Пенза. Пенза МЦНС "Наука и просвещение" 2018. С. 18-22.

4. **Султанов Н.А.** Спектры фотолюминесценция (ФЛ) закаленного и легированного кремни. [Текст] / Э.Т. Рахимов, З. Мирзажонов // Точная наука, естественный журнал, вып. № 44, Издательство “Плутон”, Кемерово – 2019С.23-26.
5. **Лебедев. А.А.** Исследование диодов с S-образным отрицательным сопротивлением на основе кремния, легированного серой [Текст] / А.Т. Мамадалимов, Н.А. Султанов // ФТП,1971,т.5, вып.1, С.22-30.
6. **Yan L.D.** Quenched-in centers in silicon  $p^+ - n$  junctions [Text] / C.T.Sah // J.Sol. St. Electron. 1974.Vol.17.N2.P.193-201