

НОВЫЕ МЕЛКИЕ ДОНОРЫ В КРЕМНИИ

Е.А.Сибиряк, Т.М.Лифшиц, Г.И.Воронкова,
С.Г.Джиоева

В кремнии n -типа, выращенном методом Чохральского, обнаружены пять новых мелких донорных центров. Энергии ионизации этих центров лежат в интервале 35,2 — 37,14 эВ, а энергетические спектры подобны спектрам доноров V группы в кремнии.

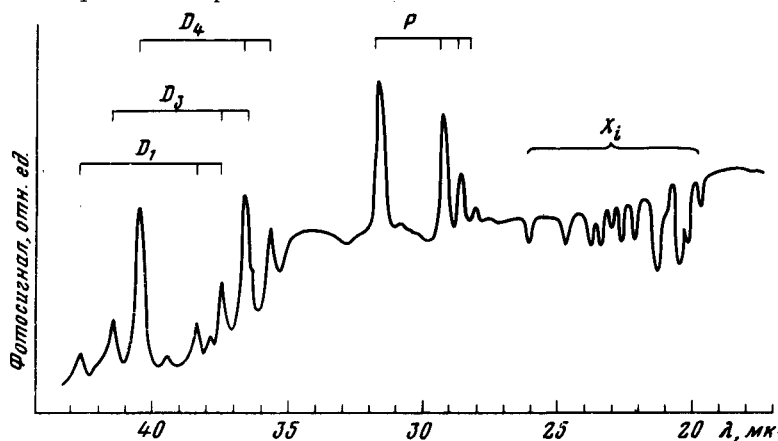
При исследовании методом фотоэлектрической спектроскопии [1] кремния n -типа, нами обнаружена группа мелких доноров с "водородо-подобными" спектрами. Всего таких доноров найдено пять ($D_1 - D_5$). В различных образцах эти доноры встречаются в разных комбинациях. Их основные состояния лежат в интервале энергий ионизации $\tilde{\epsilon}_i$ от 35,2 до 37,14 эВ и, таким образом, энергии ионизации $\tilde{\epsilon}_i$ этих доноров меньше, чем у элементов V группы в кремнии.

Исследованные образцы выращивались методом Чохральского. Помимо доноров D_i , они содержат фосфор, а также кислород в концентрации $1 \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полная концентрация нескомпенсированных доноров в этих образцах $N_D - N_A \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. На рисунке приведен спектр примесной фотопроводимости одного из таких образцов, снятый при $T = 20\text{К}$. Помимо серий линий, обусловленных фототермической ионизацией фосфора и доноров D_1 , D_3 и D_4 , хорошо видна также обычная примесная фотопроводимость, связанная с фотоионизацией названных доноров. В таблице приведены энергии наблюдавшихся нами в спектрах фототермической ионизации оптических переходов и энергии основных состояний доноров D_i . Для сравнения в таблице приведены также энергии основного состояния и соответствующих переходов, вычисленные в приближении эффективной массы [2].

Кроме пиков фототермической ионизации в коротковолновой части спектра фотопроводимости видны глубокие провалы, обусловленные нефотоэлектрическим поглощением излучения более глубокими центрами. В спектрах оптического поглощения эти центры обнаруживались ранее [3, 4] и интерпретировались как термодоноры, возникающие в кремнии при соответствующей обработке.

Донор	Энергии оптических переходов, эВ			
	$1s \rightarrow 2p_{\pm}$	$1s \rightarrow 3p_{\pm}$	$1s \rightarrow 4p_{\pm}$	$\tilde{\epsilon}_i$
Приближение эфф. массы	24,87	28,15	29,08	31,27
D_1	29,03	32,26	33,19	35,20
D_2	29,78	33,00	33,96	35,95
D_3	29,96	33,19	—	36,13
D_4	30,58	33,90	34,8	36,75
D_5	30,97	34,24	35,2	37,14

Для установления того, существует ли связь между обнаруженными нами донорами D_i и известными термодонорами, ответственными за линии поглощения X_i , некоторые образцы были подвергнуты термообработкам, обычно используемым для генерации термодоноров (430°C , 5 – 10 час) и для их разрушения (600°C , 15 – 30 мин). Оказалось, что доноры D_i , присутствующие в исходном материале, остаются и после термообработок при 430, 600 и даже 1250°C . При этом, иногда доноры одного сорта (D_i) переходят в результате термообработки в доноры другого сорта (D_k) из той же группы. Амплитуды пиков фототермической ионизации доноров D_i относительно соответствующих амплитуд пиков фосфора при таких термообработках практически не изменяются. В то же время, линии поглощения X_i после прогрева образцов при $T = 430^\circ\text{C}$ сохраняются или возникают, если их не было в исходном материале, и исчезают после термообработки при более высокой температуре, что характерно для термодоноров. Таким образом, можно утверждать, что пять донорных центров в кремнии $D_1 - D_5$ не связаны с известными термодонорами и что последние проявляются в спектрах примесной фотопроводимости кремния в области фотоионизации фосфора как центры, обладающие нефотозлектрическим поглощением в этой области энергий.



Следует отметить, что доноры D_i присутствуют в кристаллах, выращенных в условиях, когда диаметр растущего кристалла практически равен внутреннему диаметру кварцевого тигля, содержащего расплав, так что свободная поверхность расплава отсутствует и испарение кислорода и других примесей затруднено. В кристаллах, диаметр которых существенно меньше диаметра тигля, из которого они выращивались, доноры D_i не обнаруживаются. В настоящее время мы не можем указать, какие примеси ответственны за возникновение доноров D_i . Тот факт, что различия в энергиях основных состояний доноров D_i малы (доли миллиэлектронвольта между соседними по энергии центрами), а также то, что эти доноры переходят друг в друга при термообработках, позволяет предположить, что названные доноры представляют собой комплексы одинаковой природы, различающиеся только взаимным расположением компонентов в решетке кремния или различным их числом.

Литература

- [1] Sh.M.Kogan. T.M.Lifshits. Phys. St. Sol (a), 39, 11, 1977.
 - [2] R.A.Faulkner. Phys. Rev. 184, 713, 1969.
 - [3] A.R.Bean, R.C.Mewman.J. Phys. Chem. Sol. 33, 265, 1972.
 - [4] D.Helmreich. E.Sirtl. Semiconductor Silicon, Electrochem. Soc. New York, 626, 1977.
-