

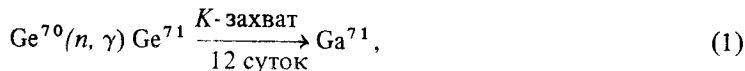
## ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЯХ Se В Ge

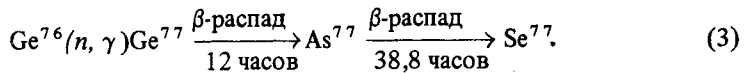
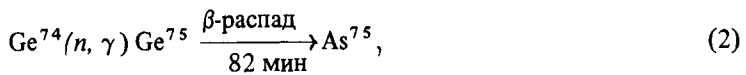
Ю.А.Осипьян, В.М.Проккопенко, В.И.Тальянский

Новым методом исследуется положение энергетических уровней Se в Ge.

К настоящему времени принято считать <sup>1</sup>, что примесный атом Se в Ge является двухзарядным донором с уровнями, отстоящими на 0,14 и 0,28 эВ от дна проводимости ( $E_c$ ). Однако такой точке зрения противоречат, как нам кажется, имеющиеся экспериментальные данные. В частности, в работах <sup>1, 2</sup> (со ссылкой на неопубликованную работу Тайлера) указывается, что Se, введенный в Ge как путем диффузии, так и добавлением в расплав, приводит к появлению в запрещенной зоне Ge двух уровней 0,14 и 0,28 эВ. Однако концентрация центров с уровнем 0,28 эВ оказалась в несколько раз больше концентрации центром с уровнем 0,14 эВ, что противоречит представлению о Se как одвухзарядном доноре. Возможно <sup>1, 2</sup> что с разными уровнями связаны разные состояния Se в решетке Ge.

В настоящей работе мы попытались экспериментально решить проблему, исследуя Se, появляющийся в Ge в результате облучения его тепловыми нейтронами <sup>3-5</sup>. Природный Ge состоит из изотопов  $Ge^{70}$ ,  $Ge^{72}$ ,  $Ge^{73}$ ,  $Ge^{74}$  и  $Ge^{76}$ . После захвата теплового нейтрона изотопы  $Ge^{70}$ ,  $Ge^{74}$  и  $Ge^{76}$  претерпевают следующие превращения:





Окончательные концентрации  $\text{Ga}^{71}$ ,  $\text{As}^{75}$  и  $\text{Se}^{77}$  относятся как 1 : 0,26 : 0,01<sup>6</sup>. Формула (1) описывает появление акцепторов  $\text{Ga}^{71}$ . Изотоп  $\text{Ge}^{70}$ , захватив нейтрон, превращается в  $\text{Ge}^{71}$ , который в результате  $K$ -захвата с периодом полураспада 12 дней превращается в  $\text{Ga}^{71}$ . Появление мелких ( $\text{As}^{75}$ ) и глубоких ( $\text{Se}^{77}$ ) доноров описывается формулами (2) и (3), причем  $\text{Se}^{77}$  появляется в результате более сложного процесса. Доноры  $\text{As}^{75}$  возникают практически сразу после облучения. Акцепторы  $\text{Ga}^{71}$  появляются медленно и только на шестые сутки после облучения их концентрации ( $N_{\text{Ga}}$ ) сравнивается с концентрацией  $\text{As}^{75}$  ( $N_{\text{As}}$ ). К этому моменту концентрация  $\text{Se}^{77}$  ( $N_{\text{Se}}$ ) в кристалле составляет ~ 85% его конечной концентрации (т. е. почти все распады (3) уже произойдут). В интервале времени (его длительность ~ 6 часов), в котором выполняется неравенство

$$N_{\text{As}} < N_{\text{Ga}} < N_{\text{As}} + kN_{\text{Se}}. \quad (4)$$

и в широком интервале температур, электроны в зону проводимости будут возбуждаться только с уровней Se. Коэффициент  $k$  в (4) равен 1 или 2 в зависимости от того является ли Se однозарядным или двухзарядным донором. Исследуя температурную зависимость концентрации электронов в зоне в интервале времени (4) можно определить положение энергетических уровней Se. Перейдем к описанию эксперимента. Облучались образцы сверхчистого  $n$ -Ge ( $n \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ). Дозу облучения мы выбирали такой, чтобы окончательная концентрация  $\text{Ga}^{71}$  была  $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . После облучения образцы отжигали при 450°C (№1) и 500°C (№2) в течение 12 часов, а затем медленно охлаждали. Такой отжиг устраняет радиационные дефекты. Мы измеряли эффект Холла и определяли концентрацию

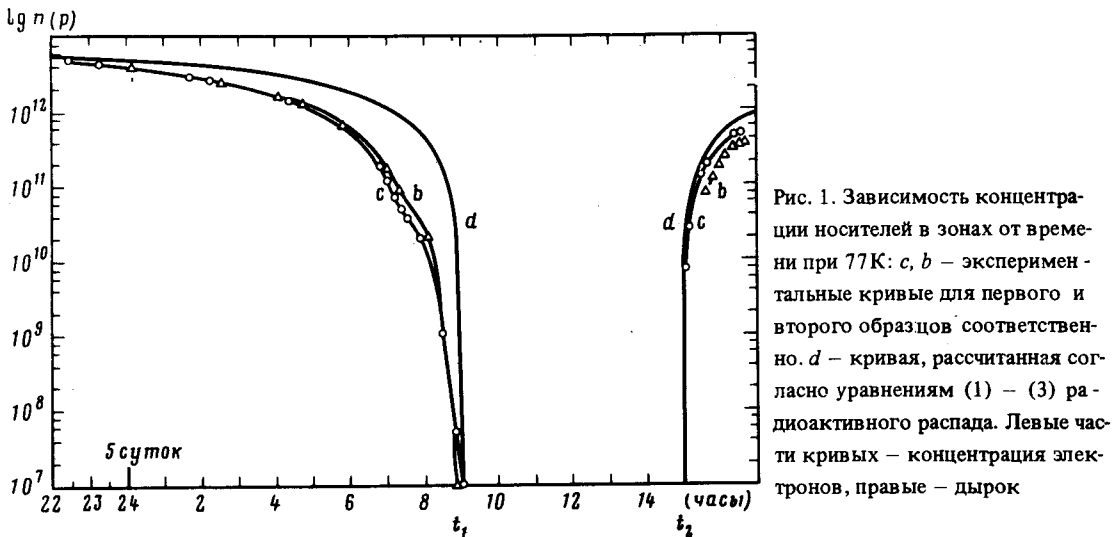


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей в зонах от времени при 77К:  $c$ ,  $b$  – экспериментальные кривые для первого и второго образцов соответственно.  $d$  – кривая, рассчитанная согласно уравнениям (1) – (3) радиоактивного распада. Левые части кривых – концентрация электронов, правые – дырок

носителей в зоне, считая холл-фактор равным единице. На рис. 1 представлены зависимости концентрации носителей в зоне от времени для 77К. "Провал" на рис. 1 соответствует выполнению условия (4) (температура 77 К недостаточно высока, чтобы возбудить электроны с глубоких уровней). На рис. 2 показаны температурные зависимости концентрации электронов, снятые в различные моменты времени. Номер возле экспериментальной точки позволяет с помощью таблицы определить время измерения. Видно, что наклоны кривых,

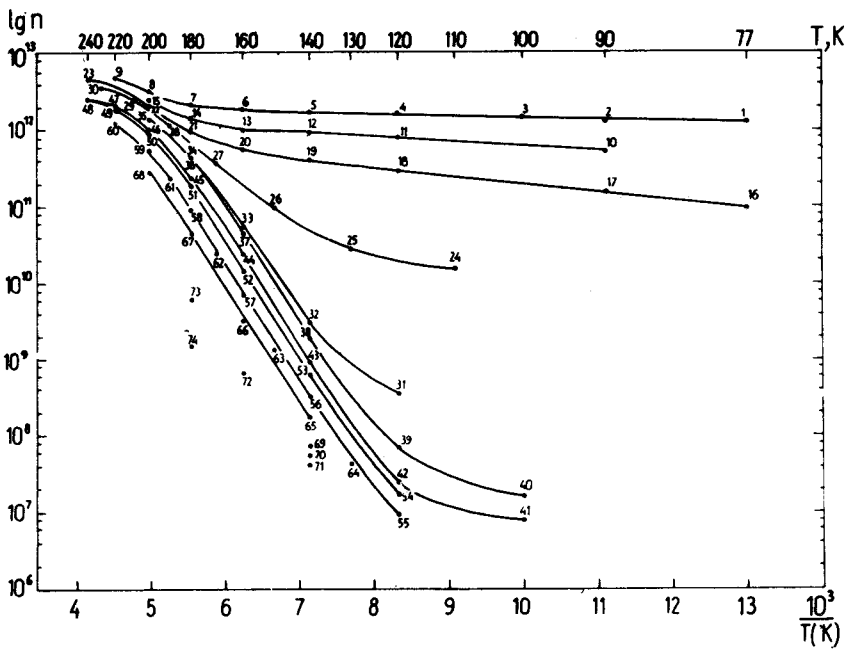


Рис. 2. Зависимости концентрации электронов в зоне от температуры, снятые вблизи момента конверсии из-л- в p-тип

| №        | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>t</i> | 4 <sup>45</sup>  | 4 <sup>51</sup>  | 4 <sup>54</sup>  | 5                | 5 <sup>07</sup>  | 5 <sup>15</sup>  | 5 <sup>25</sup>  | 5 <sup>33</sup>  | 5 <sup>40</sup>  | 6 <sup>30</sup>  |
| <i>N</i> | 11               | 12               | 13               | 14               | 15               | 16               | 17               | 18               | 19               | 20               |
| <i>t</i> | 6 <sup>32</sup>  | 6 <sup>37</sup>  | 6 <sup>42</sup>  | 6 <sup>45</sup>  | 6 <sup>55</sup>  | 7 <sup>20</sup>  | 7 <sup>25</sup>  | 7 <sup>30</sup>  | 7 <sup>33</sup>  | 7 <sup>36</sup>  |
| <i>N</i> | 21               | 22               | 23               | 24               | 25               | 26               | 27               | 28               | 29               | 30               |
| <i>t</i> | 7 <sup>40</sup>  | 7 <sup>48</sup>  | 7 <sup>55</sup>  | 8 <sup>15</sup>  | 8 <sup>20</sup>  | 8 <sup>25</sup>  | 8 <sup>30</sup>  | 8 <sup>35</sup>  | 8 <sup>40</sup>  | 8 <sup>45</sup>  |
| <i>N</i> | 31               | 32               | 33               | 34               | 35               | 36               | 37               | 38               | 39               | 40               |
| <i>t</i> | 9 <sup>10</sup>  | 9 <sup>15</sup>  | 9 <sup>20</sup>  | 9 <sup>25</sup>  | 9 <sup>30</sup>  | 9 <sup>35</sup>  | 9 <sup>40</sup>  | 9 <sup>43</sup>  | 9 <sup>46</sup>  | 9 <sup>50</sup>  |
| <i>N</i> | 41               | 42               | 43               | 44               | 45               | 46               | 47               | 48               | 49               | 50               |
| <i>t</i> | 9 <sup>55</sup>  | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>20</sup> | 10 <sup>25</sup> | 10 <sup>30</sup> | 10 <sup>35</sup> | 10 <sup>50</sup> | 11               | 11 <sup>04</sup> |
| <i>N</i> | 51               | 52               | 53               | 54               | 55               | 56               | 57               | 58               | 59               | 60               |
| <i>t</i> | 11 <sup>07</sup> | 11 <sup>13</sup> | 11 <sup>20</sup> | 11 <sup>24</sup> | 11 <sup>45</sup> | 11 <sup>55</sup> | 12               | 12 <sup>05</sup> | 12 <sup>10</sup> | 12 <sup>15</sup> |
| <i>N</i> | 61               | 62               | 63               | 64               | 65               | 66               | 67               | 68               | 69               | 70               |
| <i>t</i> | 11 <sup>21</sup> | 11 <sup>28</sup> | 11 <sup>34</sup> | 11 <sup>37</sup> | 12               | 12 <sup>06</sup> | 12 <sup>13</sup> | 12 <sup>21</sup> | 12 <sup>50</sup> | 13               |
| <i>N</i> | 71               | 72               | 73               | 74               |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| <i>t</i> | 13 <sup>20</sup> | 13 <sup>30</sup> | 13 <sup>40</sup> | 14               |                  |                  |                  |                  |                  |                  |

В таблице показано время измерения (отсчитанное с начала шестых суток после облучения) экспериментальных точек, изображенных на рис. 2

снятых в интервале времени от 7 до 9 часов (время отсчитывается с начала шестых суток) не соответствуют определенной энергии активации. Мы полагаем, что связано с уровнями, распределенными в некотором энергетическом интервале в верхней половине запрещенной зоны. Возможно, что эти уровни связаны с неотожженными дефектами. За два часа эти уровни компенсируются возникающими акцепторами Ga<sup>71</sup> и начиная с 9 часов кривые на рис. 2 соответствуют энергии активации 0,28 эВ от дна зоны проводимости E<sub>c</sub>. При

нашей дозе облучения на шестые сутки за два часа концентрация Ga в образце увеличивается на  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , поэтому концентрация центров с уровнями, распределенными в интервале  $[E_c, E_c - 0,28 \text{ эВ}]$  также равна  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Эти центры замедляют падение концентрации электронов на рис. 1 в интервале времени с 7 до 9 часов. Во время "провала" на рис. 1, т. е. с 9 до 15 часов, электроны возбуждаются в зону с уровня 0,28 эВ. Длительность провала позволяет определить концентрацию центров с этим уровнем равной  $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Такое же значение получается из кривых на рис. 2. Согласно описанной схеме нейтронного легирования <sup>3</sup> уровень 0,28 эВ должен принадлежать Se. Таким образом из наших результатов следует, что Se в Ge — однозарядный донор с уровнем 0,28 эВ. Действительно, если бы с Se было связано два уровня 0,14 и 0,28 эВ, то в первой половине "провала" мы наблюдали бы энергию активации 0,14 эВ, а во второй — 0,28 эВ. По-видимому, Se, вводимый при нейтронном облучении, находится в узлах решетки Ge, а уровень 0,14 эВ <sup>1, 2</sup> соответствует либо комплексу с участием Se, либо атому Se в междоузлии.

В заключение отметим, что использованный метод, связанный с движением уровня Ферми из верхней в нижнюю часть запрещенной зоны, может с успехом быть применен вообще для спектроскопии локальных центров в Ge.

#### Литература

1. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977, с. 562.
2. Tyler W.W. Journ. Phys. Chem. Solids, 1959, 8, '59.
3. Cleland J.W., Lark-Horovitz K., Figg J.C. Phys. Rev., 1950, 78, 814.
4. Забродский А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 258.
5. Осипьян Ю.А., Прокопенко В.М., Тальянский В.И. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 64.
6. Осипьян Ю.А., Прокопенко В.М., Тальянский В.И. ЖЭТФ, в печати .