

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЙТРОННО ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЯ С ИЗМЕНЕННЫМ ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ

Ионов А. Н., Матвеев М. Н., Шлимак И. С., Воробкало Ф. М.,  
Зарубин Л. И., Немиш И. Ю.

Исследованы однородные образцы компенсированного германия *n*-типа с заданными степенями компенсации, полученные путем искусственного изменения изотопного состава кристалла и последующего нейтронного трансмутационного легирования. Обнаружено проявление крупномасштабной составляющей рельефа потенциала, связанного с отсутствием в образцах корреляций во взаимном расположении доноров и акцепторов.

Электрические свойства сильно легированных и особенно сильно легированных компенсированных полупроводников в значительной мере определяются флуктуациями потенциала, обусловленными случайным характером пространственного распределения примесей. Однако в реальных полупроводниках, легированных металлургическими методами при выращивании кристалла, роль статистических флуктуаций маскируется гораздо более сильными макроскопическими неоднородностями технологического происхождения. Поэтому для исследования влияния компенсации на различные физические свойства полупроводников необходимо обеспечить макроскопически однородное легирование. Такую однородность может обеспечить метод нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ), в котором примеси вводятся в результате ядерных превращений атомов основного вещества равномерно по всему объему [1]. Уникальные возможности открываются в германии, поскольку в нем в результате НТЛ вводятся как акцепторная примесь галлия [ $^{70}\text{Ge}(n, \gamma) ^{71}\text{Ge} \rightarrow ^{71}\text{Ga}$ ], так и донорная примесь мышьяка [ $^{74}\text{Ge}(n, \gamma) ^{75}\text{Ge} \rightarrow ^{75}\text{As}$ ]. В этом случае, искусственно меняя изотопный состав и соотношение между изотопами 70 и 74, можно методом НТЛ получать однородно легированный материал как *n*-, так и *p*-типа с любой наперед заданной компенсацией.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования электрофизических свойств — проводимости и ее энергии активации, холловской концентрации носителей заряда для двух изотопных композиций (серии *A* и *B*).

Изотопные композиции приготавливались смешиванием порошков германия естественного состава с изотопом  $^{74}\text{Ge}$ , затем смесь расплавлялась и смешивалась дополнительно в расплавленном состоянии. После этого выращивались монокристаллы горизонтальным контейнерным методом. В результате очистки концентрация остаточных примесей в передней части слитка не превышала  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Вырезанные из этих частей слитков образцы вместе с контрольными образцами, имеющими природный изотопный состав, облучались различными интегральными дозами реакторных нейтронов.

Результаты измерения холловской концентрации показали, что все образцы до отжига радиационных дефектов (РД) обладают *p*-типом проводимости, что естественно, поскольку уровни РД в германии имеют акцепторную природу. Однако в изотопно обогащенных образцах концентрация дырок *p* меньше, и, кроме этого, *p* немонотонно зависит от дозы облучения  $\Phi$  (рис. 1). Это объясняется тем, что часть трансмутационно введенных примесей еще до отжига оказы-

ваются в узлах кристаллической решетки и проявляет электрическую активность [2], причем эта часть возрастает с увеличением дозы облучения. Тогда в образцах, обогащенных изотопом 74, дающим донорную примесь мышьяка,

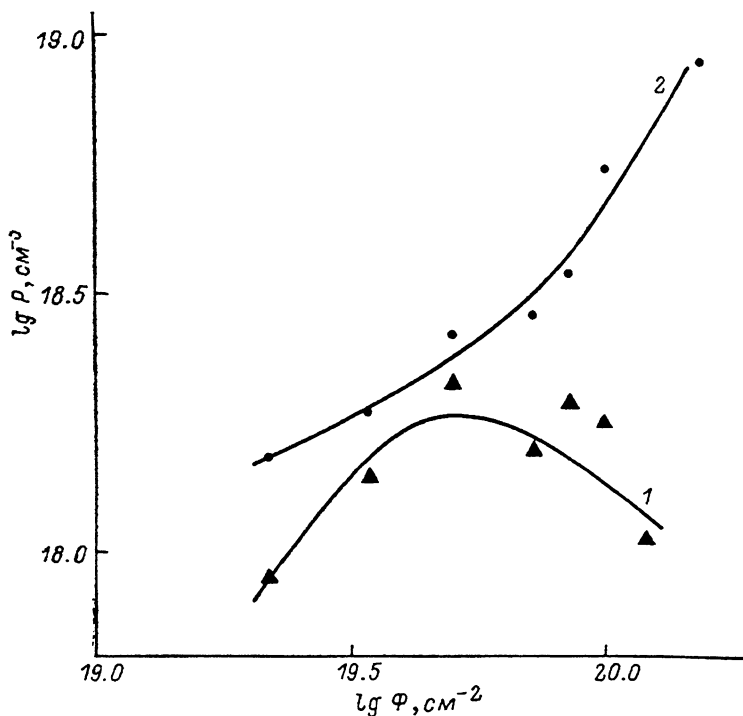
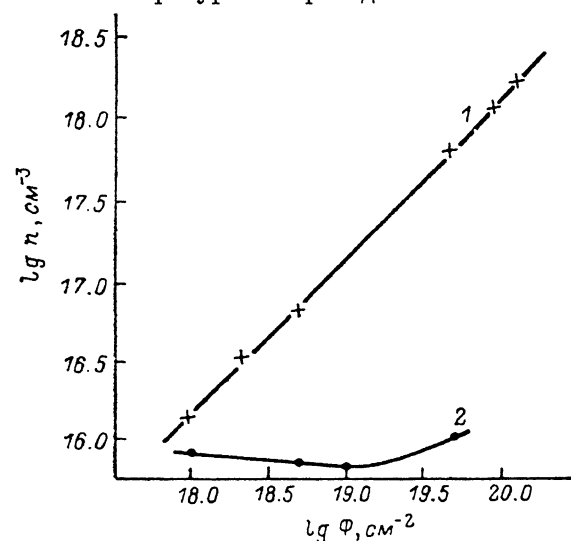


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок от дозы тепловых нейтронов у неотожженных образцов.

1 — серия А, 2 — природный германий.

уровни РД оказываются компенсированными, с ростом дозы степень компенсации растет, что и объясняет результат, приведенный на рис. 1. В поведении низкотемпературной проводимости также проявляется наличие компенсации.



Так, в отличие от природного в германии с измененным изотопным составом (серия В) мы не достигли металлической проводимости при самых больших дозах облучения. В германии природного изотопного состава основной трансмутационно вводимой примесью является акцепторная примесь галлия и компенсация уровней РД не происходит. Возможной причиной того, что часть примесей оказывается в узлах решетки еще до отжига, является то, что при боль-

Рис. 2. Зависимость концентрации некомпенсированных носителей от дозы.

1 — серия А, 2 — серия В.

ших дозах облучения возрастает вероятность попадания быстрого нейтрона в уже разупорядоченную область. В этом случае энерговыделение при торможении нейтрона приведет к частичному упорядочению этой области. Таким образом,

при больших дозах происходит частичный самоотжиг в процессе облучения, и этот эффект тем больше, чем больше доза.

Рассмотрим теперь свойства образцов после отжига радиационных дефектов.<sup>1</sup> Вследствие выбранных изотопных составов образцы стали иметь  $n$ -тип проводимости<sup>2</sup> с компенсацией  $K = N_{\text{неосн}}/N_{\text{осн}}$  вблизи 0.5 (серия А) и вблизи 0.8 (серия В). При измерении эффекта Холла следовало ожидать линейную зависимость концентрации свободных электронов  $n$  при 300 К от дозы облучения  $\Phi$ , поскольку  $N = N(1 - K)$ , где  $K$  — степень компенсации, постоянная для каждой серии, а  $N$  — концентрация примесей, которая, безусловно, пропорциональна  $\Phi$ . Действительно, такой характер зависимости наблюдается для образцов серии А. Что же касается более компенсированной серии В, то для нее наблюдается аномальный ход  $n$  ( $\Phi$ ) (рис. 2). Возникает парадоксальная, на первый взгляд, ситуация: чем сильнее легирование при постоянной компенсации,

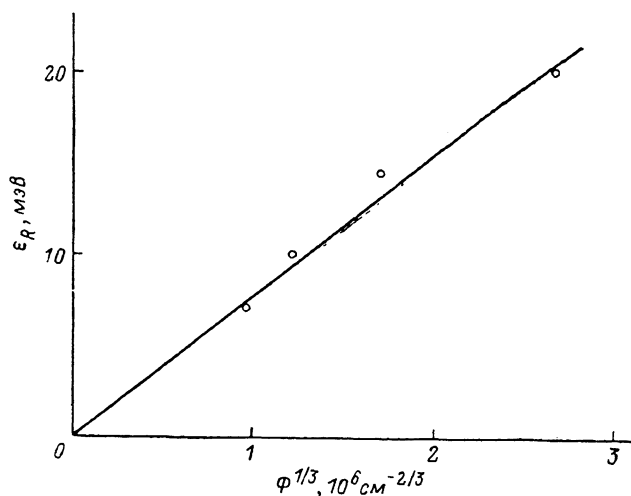


Рис. 3. Зависимость холловской энергии активации  $\epsilon_R$  от дозы для образцов серии В.

тем более изолирующим является образец. Измерение температурной зависимости постоянной Холла  $R_X(T)$  показало, что этот эффект обусловлен возрастанием энергии ионизации примесей  $\epsilon_R$  с ростом уровня легирования. Характер зависимости  $\epsilon_R$  от  $\Phi$  или, что то же, от  $N$  оказался линейным в масштабе  $\epsilon_R = f(N^{1/3})$  (рис. 3), что прямо указывает на роль крупномасштабного рельефа потенциала, характерного для сильно компенсированных полупроводников [4]. Обычно считается, что этот эффект важен в случае очень сильной компенсации, когда  $1 - K \ll 1$ . Тот факт, что в нашем случае он проявился при не слишком сильной компенсации (порядка 0.8), связан, как нам представляется, с тем, что в образцах, легированных методом НТЛ, примеси распределены в пространстве совершенно случайно, без корреляций, характерных для случая, когда компенсированные образцы получались из расплава.

Измерения низкотемпературной проводимости на образцах серии А показали, что компенсация ( $K \geq 50\%$ ) сдвигает переход металл—изолятор с  $N_c = 3.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ( $K=0$ ) до  $N_c = (8 \div 9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На диэлектрической стороне перехода наблюдается моттовская проводимость  $\sigma(T) = \sigma_0 \exp[-(T_1/T)^x]$  с  $x=1/2$ , что указывает на квадратичную зависимость плотности состояний от энергии вблизи уровня Ферми [4].

<sup>1</sup> Отжиг РД проводился в вакууме при 450 °С в течение 48 ч.

<sup>2</sup> В работе [3] мы сообщали о низкотемпературной проводимости образцов германия, обогащенного изотопом 74 до 98 %, что позволило получить в результате НТЛ серию образцов  $n$ -типа с компенсацией  $K=2.5\%$ .

Список литературы

- [1] Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, 1981. 180 с.
- [2] Palaio N. P., Pearton S. J., Haller E. E. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. N 6. P. 1437.
- [3] Шлимак И. С. и др. // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 9. С. 877—881.
- [4] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 14.02.1990  
Принята к печати 31.10.1990

---