

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ НА ЭНЕРГИЮ АКТИВАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЕРМАНИИ, ОБЛУЧЕННОМ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

О.П.Ермолаев, С.О.Ермолаев

Белорусский государственный университет, пр. Ф.Скорины, 4, 220050, Минск, Беларусь,
тел. +375 172095116 (e-mail: ermolaev@phys.bsu.unibel.by)

Проводимость слабо легированного ($N_D = 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$) германия, облученного быстрыми реакторными нейтронами и конвертированного в р-тип, изучена в области температур 7 - 300 К. Экспериментально наблюдается существенное увеличение энергии активации мелких уровней радиационных дефектов ϵ_1 при степени компенсации $K \approx 0.35$. Значительное расхождение между экспериментальными и теоретическими величинами энергии активации ϵ_1 вероятно связано с влиянием разупорядоченных областей. С увеличением интегрального потока быстрых нейтронов концентрация радиационных дефектов в образцах германия конвертированного в р-тип увеличивается, а искривление зон, обусловленное разупорядоченными областями исчезает.

Введение

Облучение кристаллического германия быстрыми реакторными нейтронами приводит к тому, что после п-р-конверсии проводимости свойства материала определяются мелкими радиационными акцепторами с уровнями, расположенными вблизи валентной зоны [1-4]. Изменять концентрацию радиационных акцепторов можно достаточно плавно, в очень широких пределах (вплоть до перехода в металлическое состояние), изменяя интегральный поток быстрых реакторных нейтронов. Однородность полученного таким способом материала высока вследствие достаточно малых сечений взаимодействия быстрых нейтронов с германием. Исследование отжига такого материала позволяет изучать и переход металл - диэлектрик с "металлической" стороны на "диэлектрическую" в одном и том же образце. Поэтому такой материал может служить удобным объектом для изучения прыжковой проводимости и перехода металл - диэлектрик.

В работе [3] была изучена зависимость энергии активации (ϵ_1) мелких уровней радиационных дефектов от концентрации этих дефектов и найдено, что ϵ_1 в случае малой концентрации равна 16 мэВ. В этой же работе отмечалось, что в некоторых образцах наблюдается существенное увеличение ϵ_1 . Отмеченное в [3] увеличение ϵ_1 наблюдалось при степенях компенсации равных 0,4-0,5 в образцах конвертированного в р-тип германия с исходной концентрацией доноров $N_D > 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В [5] влияние компенсации на энергию активации ϵ_1 рассматривалось либо в образцах п-германия, либо в образцах конвертированного в р-тип германия при большой степени компенсации ($K \approx 0,9$) и сильном исходном легировании ($N_D \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Целью настоящей работы было изучить влияние малых концентраций исходных доноров (и, соответственно, малых степеней компенсации) на энергию активации мелких уровней радиационных дефектов.

I. Методика эксперимента

Нами изучалась низкотемпературная проводимость (в интервале 300-7К) образцов нелегированного ($p_0 \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и легированного

сурьмой ($N_d \approx 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $N_d \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) германия, помещенных в кадмиевые пеналы и облученных различными интегральными потоками нейтронов реактора, при этом поток быстрых нейтронов с энергией $E \approx 0.1 \text{ МэВ}$ изменялся в пределах $\Phi = 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Для отсечки медленного компонента реакторного спектра нейтронов ($E < 0,7 \text{ эВ}$) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием медленными (тепловыми) нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пеналах с толщиной стенок около 1 мм. Степень компенсации примеси в образцах определялась из измерений коэффициента Холла в области истощения примесей (дефектов).

II. Результаты и обсуждение

В результате облучения быстрыми реакторными нейтронами все исследованные образцы претерпели конверсию проводимости и стали низкоомными образцами р-типа. При низких температурах проводимость германия, легированного мелкими водородоподобными примесями, носит активационный характер. Например, в германии р-типа при понижении температуры проводимость свободных дырок, связанная с термической ионизацией мелких акцепторов (ϵ_1), переходит в прыжковую проводимость по ближайшим локализованным состояниям мелких примесей (так называемая ϵ_3 - проводимость). Активационная проводимость при низких температурах может быть записана в виде

$$\sigma = \sigma_1 \exp(-\epsilon_1/kT) \quad (1)$$

Экспериментально ϵ_1 определяется по наклону линейной зависимости $\lg \sigma = f(1/T)$ в низкотемпературной области.

На рис.1 представлены результаты измерений низкотемпературной проводимости в образцах германия п-типа, облученных одинаковым интегральным потоком быстрых (надкадмиевых) нейтронов реактора (кривые 1-3). Кривая 4 соответствует образцу, облученному более высоким интегральным потоком быстрых реакторных нейтронов. При температурах выше $\sim 10 \text{ К}$ по

наклону кривых были определены значения энергии активации ε_1 .

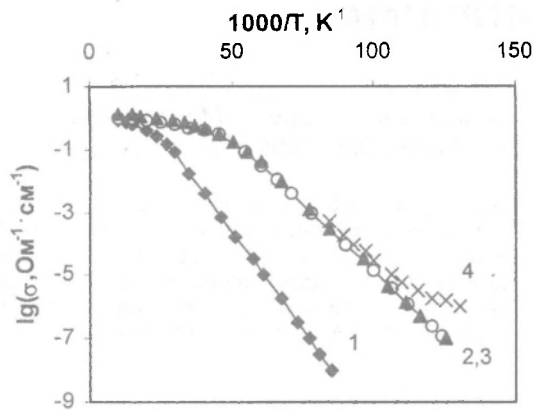


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности:

1 - $N_d \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 2 - $N_d \approx 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 3 - $N_d \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 4 - $N_d \approx 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\Phi \approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

У образцов 2 и 3 (облученных одинаковым интегральным потоком нейтронов и имеющих одинаковую концентрацию радиационных дефектов) наблюдается практически полное совпадение экспериментальных точек. В образце 1 с наибольшей концентрацией исходных доноров величина ε_1 наибольшая. В образце 4 (облученном большим интегральным потоком нейтронов и имеющем большую концентрацию радиационных дефектов) при температурах ниже 10 К наблюдается переход к другому механизму проводимости – прыжковой проводимости по мелким уровням радиационных дефектов. Такая проводимость изучалась ранее в [3].

Степень компенсации образцов оценивалась из выражения

$$K = n_0 / (n_0 + p_0), \quad (2)$$

где n_0 – концентрация электронов в исходных кристаллах германия п-типа, а p_0 – концентрация дырок в облученных образцах, конвертированных облучением в р-тип..

Значения степени компенсации образцов, полученные из (2) и определенные из наклона кривых рис.1 значения энергии активации дефектов ε_1 представлены в таблице.

Таблица
Значения величин энергии активации ε_1 и степени компенсации K образцов 1-4

№	$N_D, \text{см}^{-3}$	K, %	ε_1 , мэВ
1	$5 \cdot 10^{14}$	35	25
2	$1,5 \cdot 10^{14}$	20	16
3	$5 \cdot 10^{13}$	7	16
4	$1,5 \cdot 10^{14}$	<1	14

Меньшее значение энергии активации ε_1 в образце 4 связано с большей концентрацией радиационных дефектов в этом образце [3].

Наблюдаемое изменение энергии ионизации ε_1 примесей в полупроводниках по мере их легирования и компенсации в течение многих лет описывают с помощью формулы [6]

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1(0) - \Delta\varepsilon_1, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1(0)$ соответствует изолированной примеси, когда концентрация основной примеси $N \rightarrow 0$.

Проблема теоретического описания зависимости $\Delta\varepsilon_1$ от N и степени компенсации K затруднена необходимостью учета ряда механизмов влияния случайного поля и квантовых эффектов перекрытия, меняющих спектр состояний. Лиен и Шкловский (ЛШ) рассмотрели уширение примесной зоны и учли зависимость $\Delta\varepsilon_1$ от N и K [7]. Ими получено выражение

$$\Delta\varepsilon_1 = f(K) \cdot eN^{1/3}/\varepsilon, \quad (4)$$

где $f(K)$ – была рассчитана на ЭВМ, e – заряд электрона, N – концентрация основной примеси, ε – диэлектрическая проницаемость. Функция $f(K)$ в пределе $K \rightarrow 0$ равна единице. Затем она слабо возрастает с увеличением K до своего максимального значения, потом убывает и при $K \approx 0,9$ меняет знак, уходя при $(1-K) \ll 1$ на $-\infty$. Последняя особенность обусловлена резким заглублением уровня Ферми в крупномасштабных флуктуациях потенциала при $K \rightarrow 1$.

Выражение (4) модели ЛШ применимо, когда ширина примесной зоны ($W = eN^{1/3}/\varepsilon$) значительно больше тепловой энергии

$$W \gg kT. \quad (5)$$

Тогда носители в примесной зоне занимают наиболее глубокие места потенциального рельефа, образованные крупномасштабными флуктуациями потенциала.

Известно [8,9], что образование разупорядоченных областей в германии, при облучении быстрыми нейтронами приводит к сильной неупорядоченности структуры кристалла и к появлению электростатического потенциала, модулирующего (изгибающего) энергетические зоны. В связи с этим теория [7] может быть использована для объяснения изменения ε_1 с компенсацией. Однако ожидать хорошего согласия трудно, так как в нашем случае критерий (5) не выполняется строго. Согласно (4) значительное увеличение ε_1 может происходить лишь при степенях компенсации $K > 0,9$. Экспериментальные данные (см. таблицу) показывают существенное увеличение энергии активации ε_1 при $K=0,35$. В работах [5,9] было показано, что зависимость ε_1 от компенсации может быть объяснена влиянием разупорядоченных областей на положение уровня Ферми и предложена зависимость для расчета его положения. Однако в этих работах хорошее согласие рассчитанных зависимостей $\varepsilon_1(K)$ с экспери-

ментальными наблюдалось при степенях компенсации существенно больших, чем в наших экспериментах.

Заключение

В результате облучения Ge быстрыми нейтронами и п-р-конверсии проводимости наблюдается существенное увеличение энергии активации ϵ_1 мелких уровней радиационных дефектов при степени компенсации 0,3-0,4. При меньших компенсациях величина энергии активации ϵ_1 определяется ее зависимостью от концентрации РД.

Наблюдаемое расхождение теоретических (модель ЛШ, разработанная для химических примесей) и экспериментальных результатов связано с особенностями потенциального рельефа, сформированного разупорядоченными областями. С увеличением интегрального потока быстрых реакторных нейтронов концентрация радиационных дефектов с мелкими уровнями в образцах конвертированного в р-тип германия увеличивается, а изгиб зон связанный с разупорядоченными областями исчезает.

Таким образом, в слабо компенсированном ($K < 0,3$), конвертированном в р-тип германии вдали от п-р-конверсии особенности потенциального рельефа, образующегося при пе-

рекрытии разупорядоченных областей, не оказывают существенного влияния на движение носителей заряда, и положение уровня Ферми определяется, главным образом, распределением носителей по дискретным уровням в запрещенной зоне.

Список литературы

1. Cleland J.W., Crawford J.H. and Pigg J.C. // Phys.Rev. - 1955. - V.99, N4. - P.1170.
2. Коноплева Р.Ф., Новиков С.Р., Рывкин С.М. // ФТП. - 1963. - Т.5, N7. - С.1842.
3. Dobrego V.P., Ermolaev O.P., Tkachev V.D. // Phys Stat. Sol. (a).-1977. - V.44, N2. - P.435.
4. Кожух М.Л., Липкина Н.С., Шлимак И.С. // ФТП. - 1985. - Т.19, N2. - С. 331.
5. Konopleva R.F., Evseev V.A., Borisov B.A., Nazarkin I.V. and Chekanov V.A. // Phys. Stat. Sol.(b). - 1984. - V.122. - P.349.
7. Pearson G.L., Bardeen J. // Phys.Rev.- 1949. - V.88. - P.865.
8. Лиен Н.В., Шкловский Б.И. // ФТП. - 1979. - Т.13, N9. - С.1763.
9. Гаджиев А.Р., Рывкин С.М., Шлимак И.С // Письма в ЖЭТФ.- 1972.- Т.15. - С.605.
10. Коноплева Р.Ф., Юферева А.А. // ФТП. - 1973. - Т.7, N 11. - С.2086.

INFLUENCE OF A COMPENSATION ON THE RADIATION DEFECTS ACTIVATION ENERGY IN GERMANIUM IRRADIATED WITH FAST NEUTRONS

O.P.Ermolaev, S.O.Ermolaev

Belarus State University, F. Scorina Avenue 4, 220050, Minsk, Republic of Belarus,
tel: +375 172095116 (e-mail: ermolaev@phys.bsu.unibel.by)

The conductivity of a light doped ($N_D = 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) germanium irradiated with fast reactor neutrons and converted in p-type are studied in the temperature range 7 - 300 K. The experimentally observed strong growth of the shallow radiation defect level activation energy ϵ_1 with compensation. Lien - Shklovskii theory show that up to compensation value $K \approx 0,95$ a small deepening of the Fermi level is observed which exhibits itself in a slight increase of the ionization energy of the shallow chemical impurity. In our experiment an essential increase of the shallow radiation defect level activation energy is observed at $K \approx 0,35$. The observed substantial discrepancy between the experimental and theoretical values of activation energy ϵ_1 is apparently connected with the presence of disordered regions. With increasing neutron dose the radiation defects concentration in the converted in p-type samples increases and the band bending attributed to the disordered regions disappears.