

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЕРМАНИИ, ОБЛУЧЕННОМ БОЛЬШИМИ ФЛЮЕНСАМИ НАДКАДМИЕВЫХ НЕЙТРОНОВ

The low temperature (down to $\sim 1,6$ K) electric conductivity of *n*-type germanium irradiated with the large fluences of epicaldium neutrons and subjected to the isothermal annealing (at 400 °C) was studied. Radiation defects which do not contain doped impurities (Sb) and are stable to the high-temperature annealing are established to form in germanium doped by the epicaldium neutrons.

Метод трансмутационного легирования (ТЛ) полупроводников нейтронами является одним из основных при получении материалов для производства мощных высоковольтных диодов и тиристоров, детекторов излучений и низкотемпературных термометров сопротивления. Это обусловлено более высокой степенью однородности пространственного распределения примесей и точностью легирования по сравнению с традиционными методами, связанными с введением примесей в расплав или диффузией их с поверхности [1].

При облучении в реакторе основной вклад в ТЛ германия связан с тепловыми нейтронами. Так как сечение поглощения нейтронов s изменяется с энергией E по закону $s \sim E^{-1/2}$ (в области энергий, далеких от резонансных), то “ужесточение” нейтронного спектра (т. е. легирование надкадмиевыми нейтронами) увеличивает однородность распределения легирующих примесей. Наличие в реакторном спектре быстрых нейтронов приводит к появлению в материале радиационных дефектов (РД), которые обычно удаляют длительным высокотемпературным отжигом, что является сложной технологической задачей, так как РД образуют комплексы с примесями, содержащимися в кристаллах. В литературе содержатся сведения о наблюдении после длительного высокотемпературного отжига остаточных явлений как в облученном кремнии [2], так и в германии [3]. При исследовании низкотемпературной фотолюминесценции германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами, было установлено существование радиационных дефектов, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу [4]. Поэтому важной задачей является изучение свойств дефектов, остающихся в трансмутационно легированном германии после отжига. Изучение влияния отжига РД на электрические свойства (электропроводность и коэффициент Холла) германия, облученного быстрыми нейтронами реактора, ранее проводилось главным образом в интервале температур 77–300 К (обзор работ см., например, в [5, 6]). Позже в работах [7, 8] было исследовано влияние изохронного отжига РД на низкотемпературную (до 1,6 К) проводимость германия, облученного большими флюенсами быстрых нейтронов, однако изучение изотермического отжига РД не проводилось. Цель настоящей работы – исследовать влияние изотермического отжига РД на низкотемпературную проводимость германия, облученного большими флюенсами быстрых (надкадмиевых) нейтронов.

Эксперименты проводились на образцах германия с концентрацией сурьмы $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, которые облучались быстрыми нейтронами реактора, при этом флюенс быстрых нейтронов с энергией $E=0,1$ МэВ был равен $\Phi=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Для отсежки медленного компонента реакторного спектра

нейтронов ($E < 0,4$ эВ) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием медленными (тепловыми) нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пеналах с толщиной стенок около 0,5 мм. Измерялись температурные зависимости удельного сопротивления в диапазоне температур 1,6–300 К. Концентрация дефектов определялась из измерений коэффициента Холла.

В результате облучения быстрыми реакторными нейтронами исследуемые образцы претерпели конверсию проводимости и стали низкоомными образцами p -типа. Из кривых, представленных на рис. 1, видно, что при $T < 7$ К наблюдается прыжковая проводимость с постоянной энергией активации по мелким уровням РД ($E_v + 0,016$ эВ) [9]

$$\sigma = \sigma_3 \exp(-\varepsilon_3/kT).$$

Предэкспоненциальный множитель σ_3 имеет вид [10, 11]

$$\sigma_3 = \sigma_{03} \exp(-[1,73 + \varphi(K)]/\alpha \cdot N^{1/3}), \quad (1)$$

где α – боровский радиус примеси, N – концентрация основной примеси, $\varphi(K)$ – функция, слабо зависящая от степени компенсации K (особенно при $K < 0,5$), σ_{03} – коэффициент, степенным образом зависящий от N . Величина σ_3 находилась путем экстраполяции прямолинейных низкотемпературных участков зависимости к бесконечной температуре (см. рис. 1).

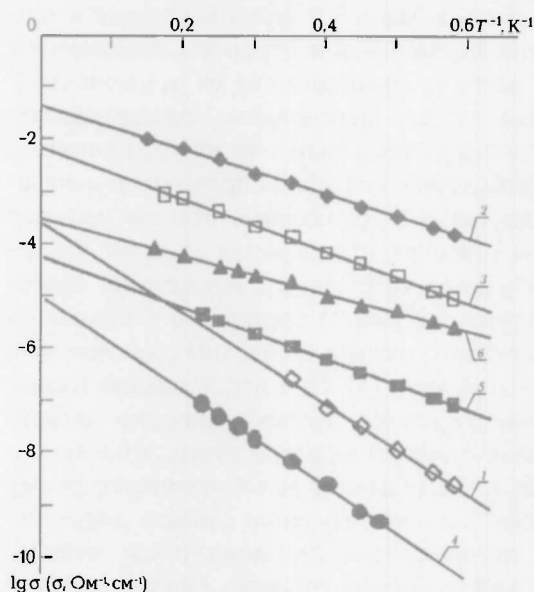


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности в прыжковой области:

1 – исходный (до облучения) образец; 2 – после облучения нейтронами ($\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$); 3–6 – на различных стадиях отжига. $t_3 < t_4 < t_5 < t_6 = 24$ ч

Из рис. 1 видно, что в поведении σ при отжиге обнаружился ряд особенностей. Вначале при $t > t_3$ (t – время отжига) отжиг идет обычным путем, т. е. проводимость уменьшается вследствие снижения концентрации РД, что подтверждается величиной концентрации дырок. Затем, достигнув минимума при $t = t_4$, проводимость начинает возрастать, стремясь к предельному состоянию, что свидетельствует об увеличении концентрации основных примесей, определяющих прыжковую проводимость. При $t > t_4$ образец претерпевает p – n -конверсию типа проводимости, после чего и концентрация электронов, и проводимость возрастают, стремясь к исходным (предельным) значениям. Предельным оказалось состояние, полученное в результате полного отжига (24 ч при 400 °С). Важно отметить, что коэффициенты σ_3 после отжига при $t > t_3$ имели значения ниже предельного и ниже исходного, что объясняется возникновением в процессе отжига конкурирующего механизма проводимости, связанного с примесями Ga и Sb. В облученных, но не отожженных образцах исходные примеси и трансмутационно введенная примесь Ga не обладают электрической активностью. В результате отжига $t > t_4$ исходные примеси Sb, а также Ga, введенные трансмутационным легированием, проявляют электрическую активность.

Из полученных экспериментально значений σ_3 с учетом того, что боровский радиус в Ge(Sb) равен 43 \AA [10], а в Ge с РД – 40 \AA [9], с помощью зависимости (1) можно определить концентрацию основных примесей N , определяющих прыжковую проводимость. Для $t < t_4$ N соответствует концентрации РД, а для $t > t_4$ $N \sim N_{\text{Sb}}$.

Для случая ТЛ Ge надкадмиевыми нейтронами в [12] получено значение степени компенсации $K=0,54$. Отметим, что в наших экспериментах значение компенсации было около $0,65$ (кривая б).

После отжига при $t \leq t_4$ экспериментальные точки в координатах рис. 2 хорошо ложатся на прямую с наклоном, соответствующим боровскому радиусу 40 \AA . Это доказывает, что при $t \leq t_4$ происходит отжиг РД. В результате дальнейшего отжига экспериментальные точки смещаются в сторону от прямой (а), а при $t > t_4$ хорошо ложатся на прямую (б), соответствующую боровскому радиусу 43 \AA . Это означает, что определяющим механизмом проводимости после отжига при $t > t_4$ является проводимость по примесям сурьмы, а не по РД. Из равенства величин σ_3 для образца, подвергнутого полному отжигу (см. рис. 1, кривая б) и исходного (см. рис. 1, кривая 1), следует, что концентрация доноров сурьмы после облучения и отжига полностью восстановилась.

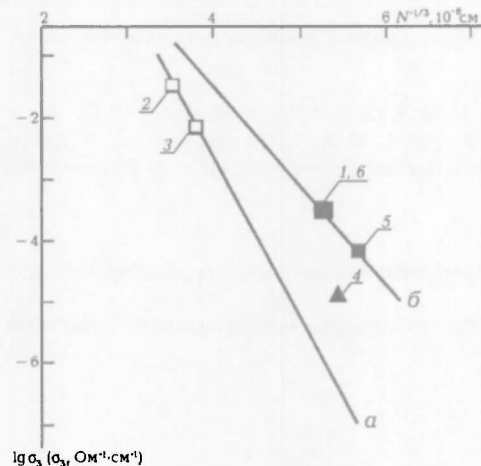


Рис. 2. Прыжковая проводимость σ_3 как функция концентрации основных примесей N : а – германий с РД, $a = 40 \text{ \AA}$; б – германий с Sb, $a = 43 \text{ \AA}$. Номера точек соответствуют номерам на кривых рис. 1

Наши результаты хорошо согласуются с данными и моделью изменения электрической активности примесей [8], в которой показано, что электрические свойства облученного германия обусловлены мелкими уровнями радиационных дефектов. После облучения исходные примеси (Sb), а также примеси (Ga, As и Se), образующиеся в результате ядерных реакций с нейтронами, становятся электрически неактивными. Примеси начинают проявлять электрическую активность при отжиге ($t > t_4$). После завершения процесса полного отжига все исходные и трансмутационно введенные примеси становятся электрически активными.

Из исследования изотермического отжига можно определить энергию активации отжига, например, методом отношения угловых коэффициентов (см. [6]). Найденная нами величина энергии активации отжига, равная $2,5 \text{ эВ}$, возможно характеризует отжиг многовакансионных комплексов с уровнями $E_v + 16 \text{ МэВ}$ [9].

Исходя из известного значения коэффициента легирования надкадмиевыми нейтронами, можно оценить концентрацию трансмутационно введенного галлия [9, 13]

$$N_{\text{Ga}} = \alpha_{\text{Cd}} \cdot \Phi, \quad (2)$$

где для природного германия величина $\alpha_{\text{Cd}} = (5 \div 6) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Из соотношения (2) следует, что в наших образцах концентрация галлия, введенного транс-

мутационным легированием, значительно меньше (в 3–4 раза) концентрации компенсирующих акцепторов, определенных из экспериментальных величин степени компенсации. Следовательно, необходимо сделать вывод о том, что в результате облучения Ge быстрыми (надкадмиевыми) нейтронами реактора и последующего отжига образуются радиационные дефекты, играющие роль акцепторов. Восстановление после облучения и отжига концентрации основной легирующей примеси (Sb) свидетельствует о том, что сурьма не входит в состав образующихся дефектов. Возможно, в состав радиационных дефектов входят глубокие остаточные технологические примеси, такие, например, как кислород или углерод.

1. Шлимак И. С. // ФТТ. 1999. Т. 41. № 5. С. 794.
2. Yong R., Cleland J., Wood R., Abraham M. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. P. 4752.
3. Доброго В. П., Ермолаев О. П. // ФТП. 1980. Т. 14. № 6. С. 1120.
4. Ермолаев О. П. // ЖПС. 1997. Т. 64. № 4. С. 479.
5. Коноплева Р. Ф., Литвинов В. Л., Ухин Н. А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. М., 1971.
6. Коноплева Р. Ф., Остроумов В. Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. М., 1975.
7. Кожух М. Л., Липкина Н. С. // ФТП. 1987. Т. 21. № 2. С. 284.
8. Ермолаев О. П. // ФТП. 1994. Т. 28. № 11. С. 2021.
9. Dobrego V. P., Ermolaev O. P., Tkachev V. D. // Phys. stat. sol. (a). 1977. Vol. 44. № 2. P. 435.
10. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979.
11. Они же // ФТП. 1980. Т. 14. № 5. С. 825.
12. Забродский А. Г., Алексеенко М. В. // ФТП. 1994. Т. 28. № 1. С. 168.
13. Рывкин С. М., Кожух М. Л., Трунов В. А., Шлимак И. С. // Труды Международной конференции по радиационной физике полупроводников и родственных материалов. Тбилиси, 1979. С. 789.

Поступила в редакцию 29.05.2001.

Олег Павлович Ермолаев – доктор физико-математических наук, профессор кафедры атомной физики и физической информатики.

Татьяна Юрьевна Микельчик – аспирант кафедры физики полупроводников. Научный руководитель – О. П. Ермолаев.

УДК 621.315.542

Д. А. СКРИПКА, М. Г. ЛУКАШЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

The influence of electric field on the magnetoresistance of *n*-type epitaxial gallium arsenide with free electrons concentration $n_e=1,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in the temperature range 1,5–300 K has been studied in the magnetic field up to 1,5 T. Positive magnetoresistance increases with increasing electric field at 300 and 77 K due to heating of electron gas by the electric field and redistribution of charge carriers between valleys. In spite of the fact that impurity and conduction bands are coincided in the investigated samples, the transition from negative to positive magnetoresistance is found to occur at low temperature because of the sample heating by the current.

Электрические эффекты в гальваномагнитных явлениях могут быть обусловлены, например, следующими изменениями: 1) числа свободных носителей заряда вследствие ударной ионизации, 2) их подвижности из-за разогрева электрическим полем, 3) функции распределения в скрещенных магнитном и электрическом полях. Влияние электрического поля на магнито-