

Таким образом, наблюдаемый при заряджении поверхности отрицательный фотоакустический сигнал зависит от изгиба зон в приповерхностной области полупроводника. Чем больше напряженность электрического поля в приповерхностном слое, тем больше амплитуда отрицательного фотоакустического отклика.

Аналогичные процессы наблюдаются в сульфиде мышьяка [15] при воздействии внешнего электрического поля либо при изменении концентрации локальных заряженных центров при фотоструктурных превращениях.

Предлагаемый механизм отрицательного фотоакустического эффекта предполагает появление упругих деформаций в приповерхностной области полупроводника при модуляции области пространственного заряда внешним электрическим полем. Об особенностях упругих деформаций халькогенидных стеклообразных полупроводников в электрическом поле будет сообщено дополнительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] C. S. Sunandana. Phys. St. Sol. (a), 105, 11 (1988).
- [2] S. Yamasaky, H. Okushi, A. Matsuda, H. Oheda, N. Hata, K. Tanaka. Japan. J. Appl. Phys., 20, L665 (1981).
- [3] C. L. Cesar, H. Vargas, J. M. Filha, L. C. M. Miranda. Appl. Phys. Lett., 43, 555 (1983).
- [4] O. Goede, W. Heimbrodtt, Th. Kopp. Phys. St. Sol. (a), 108, 443 (1988).
- [5] I. N. Bandeira, H. Closs, C. C. Chison. J. Photoacoustic, 1, 275 (1982).
- [6] L. C. M. Miranda. Appl. Optics, 21, 2923 (1982).
- [7] В. А. Сабликов, В. Б. Сандомирский. ФТП, 17, 81 (1983).
- [8] А. Н. Васильев, В. А. Сабликов, В. Б. Сандомирский. Изв. вузов. Физика, 30, 119 (1987).
- [9] А. Н. Васильев, В. А. Сабликов. ФТП, 23, 33 (1989).
- [10] K. Inabe, S. Nakamura, N. Takeuchi. J. Phys. Soc. Japan., 53, 1621 (1984).
- [11] Л. А. Балагуров, Н. Ю. Карпова, Э. М. Омеляновский, В. Е. Сизов. ФТП, 23, 673 (1989).
- [12] W. Jackson, N. M. Amer. J. Appl. Phys., 51, 3343 (1980).
- [13] O. Goede, W. Heimbrodtt, F. Sittel. Phys. St. Sol. (a), 93, 277 (1986).
- [14] В. И. Круглов, Л. П. Страхов. ФТТ, 12, 3603 (1970).
- [15] В. И. Круглов, В. В. Рыков, Т. С. Рыкова, А. В. Харионовский. ФТТ, 28, 1547 (1985).
- [16] В. В. Рыков, С. Н. Синцов. ФТТ, 26, 2212 (1984).
- [17] Б. Т. Коломиец, А. С. Кочемировский, Т. Н. Мамонтова, Л. В. Пивоварова, Н. И. Чигринская. Вопросы физики полупроводников, 97. Калининград (1975).
- [18] Б. Т. Коломиец, К. П. Корнев, А. С. Кочемировский, Л. В. Пивоварова, Т. Н. Мамонтова. ЖТФ, 52, 2424 (1982).
- [19] Н. Мотт, Э. Девис. Электронные процессы в некристаллических веществах, 2, 658, М. (1982).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 26, вып. 9, 1992

О ВТОРОМ ДОНОРНОМ УРОВНЕ МЕЖДОУЗЕЛЬНОГО ХРОМА В КРЕМНИИ

Е. С. Демидов, В. В. Карзанов

Нижегородский исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород, Россия
(Получено 22.01.1992. Принято к печати 2.04.1992)

Мнение о том, что хром в кремнии является двойным донором, утверждалось в ряде публикаций [1-3]. Авторами работ [2, 3] на основе данных эффекта Холла был сделан вывод: второй донорный уровень находится на

0.11 ÷ 0.13 эВ выше валентной зоны. Как отмечалось в [4], согласно экспериментальным данным [2, 3], концентрация донорных центров с уровнем $E_v + (0.11 \div 0.13)$ эВ значительно превосходила предел растворимости хрома, соответствующий температуре диффузии, но была близка к растворимости железа (данные о растворимости 3d-элементов см. в [5]). Это указывает на то, что энергетический уровень $E_v + (0.11 \div 0.13)$ эВ может быть связан с примесью железа, неконтролируемо загрязнявшей образцы в процессе высокотемпературной диффузии. Однако убедительных экспериментальных данных, подтверждающих такой вывод, до сих пор не опубликовано.

В связи с этим мы выполнили следующий эксперимент: образцы кремния марки КДБ-2 легировались методом диффузии при температуре 1200 °С в течение 1 ч в эвакуированных кварцевых ампулах с последующей закалкой хромом или железом, или хромом и железом одновременно. Кремний марки КДБ-2 практически совпадает по своим характеристикам (удельное сопротивление, концентрация дырок) с исходными образцами, применявшимися в работах [2, 3]. Размеры наших образцов были 12 × 5 × 0.7 мм. Перед легированием и после него с их поверхности удалялись слои ~ 100 мкм. Источниками диффузии служили порошки Cr_2O_3 или Fe_2O_3 . Для снижения уровня загрязнения неконтролируемыми примесями в ампулы добавлялись крупинки металлического алюминия. Об эффективном действии алюминия как геттера нежелательных примесей при диффузионном легировании полупроводников 3d-элементами мы сообщали в [6].

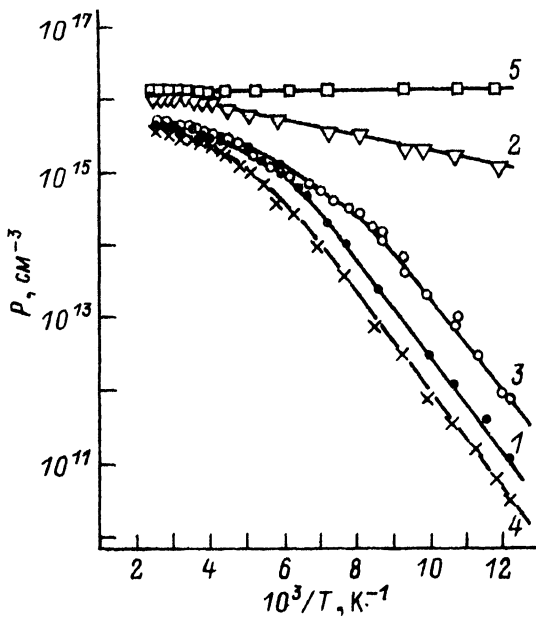
В описываемом здесь эксперименте все образцы были разделены на четыре группы: в первой в качестве навески использовался порошок Cr_2O_3 , во второй — к Cr_2O_3 добавлялся алюминий в весовом соотношении 1 : 3, для третьей партии образцов применялась навеска $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ (1 : 1 : 6), для четвертой — $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ (1 : 3). В каждую из партий добавлялось по одному образцу кремния марки КДБ-35 в качестве свидетеля присутствия источника железа в кварцевой ампуле, так как в таких кристаллах, адсорбировавших железо, легко наблюдается спектр ЭПР межузельных атомов Fe^0 ($g = 2.0099$ [7]).

На третьи сутки после легирования на этих образцах были записаны спектры ЭПР и измерены температурные зависимости постоянной Холла R_H . Спектры ЭПР от исследуемых образцов регистрировались вместе со спектром эталона, в качестве которого применялся порошок MgO с примесью марганца. Эталон калибровался парамагнитными кристаллами пентагидрата серноокислой меди. Полученные данные представлены в таблице и на рисунке.

Концентрация межузельных парамагнитных ионов Cr^+ и Fe^0 в образцах КДБ-2 и КДБ-35

№ партии	Материал	Навеска	N_{Cr^+} , см ⁻³	N_{Fe^0} , см ⁻³
1	КДБ-2	Cr_2O_3	$6 \cdot 10^{14}$	—
	КДБ-35		$4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{15}$
2	КДБ-2	$\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}$	10^{15}	—
	КДБ-35		$2.5 \cdot 10^{14}$	—
3	КДБ-2	$\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$	$1.5 \cdot 10^{15}$	—
	КДБ-35		$3 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$
4	КДБ-2	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$	—	—
	КДБ-35		—	$7 \cdot 10^{15}$

Оказалось, что все образцы КДБ-2 после диффузионного отжига сохранили проводимость p -типа. В кристаллах из первых трех партий наблюдался спектр ЭПР иона Cr^+ ($g = 1.9978$ [7]).



Температурные зависимости концентрации дырок p ($p = 1/R_x e$) в кремнии КДБ-2 после диффузионных отжигов. 1—4 соответствуют номеру партии в таблице, 5 — исходный образец.

В образцах КДБ-35 из групп 1, 3 и 4 регистрировался спектр иона Fe^0 , а в образце партии 2 его не было (см. таблицу). Ход температурных зависимостей R_x в образцах КДБ-2 (см. рисунок) указывал на то, что в группах 1, 3 и 4 концентрации дырок определяются перезарядкой центров с уровнем $E_v + (0.11 \pm 0.02)$ эВ. В образцах партии 2 концентрация дырок определялась частично компенсированными акцепторами бора [$E_v + (0.044 \pm 0.002)$ эВ]. На одном из кристаллов второй группы были выполнены измерения НЕСГУ (нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней), использовался барьер Шоттки Ni—Si. В этих измерениях была возможность регистрировать глубокие энергетические уровни в интервале $0.09 \div 0.5$ эВ над потолком валентной зоны при концентрациях $10^{12} \div 10^{16}$ cm^{-3} . В нижней половине запрещенной зоны был обнаружен единственный глубокий донорный уровень $E_v + (0.28 \pm 0.01)$ эВ с концентрацией $\sim 10^{15}$ cm^{-3} . Согласно известным данным [8], он соответствует донорно-акцепторной паре Cr—V.

Таким образом, из совокупности приведенных выше данных следует, что появление уровня $E_v + 0.11$ эВ связано с попаданием в кремний железа. В случае групп 3 и 4 образцов эта примесь вводилась намеренно, а в первой партии источником атомов Fe служила окружающая среда. Подобный эффект загрязнения кремния железом наблюдался в работах [9—11]. Обнаруженный в данной серии экспериментов уровень $E_v + 0.11$ эВ в соответствии с опубликованными данными [12, 13] обусловлен донорно-акцепторной парой Fe—V.

На основании всего сказанного выше можно сделать вывод: заключение авторов [2, 3] о соответствии перехода $Cr^+ \rightarrow Cr^{2+}$ уровню $E_v + (0.11 \div 0.13)$ эВ является ошибочным. Принимая во внимание данные НЕСГУ, можно утверждать, что в интервале $0.09 \div 0.5$ эВ над потолком валентной зоны второго донорного уровня хрома нет.

В заключение авторы выражают благодарность С. И. Карповичу за измерения НЕСГУ.

- [1] H. H. Woodbury, G. W. Ludwig. Phys. Rev., 117, 102 (1960).
- [2] А. А. Золотухин, Л. С. Милевский. ФТТ, 13, 1906 (1971).
- [3] T. Kunio et al. Sol. St. Electron., 24, 1082 (1981).
- [4] H. Feichtinger, R. Czaputa. Phys. St. Sol. (a), 79, K143 (1983).
- [5] E. R. Weber. Def. Semicond. 2: Symp. Boston, Mass. Nov. 1982. N. Y. e. a. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 14, 19 (1983).
- [6] Е. С. Демидов, А. А. Ежевский, В. В. Карзанов. Тез. докл. V Всес. совещ. по исслед. арсенида галлия, 29. Томск (1982).
- [7] Дж. Людвиг, Г. Вудбери. Электронный спиновый резонанс в полупроводниках, 148. М. (1964).
- [8] H. Kanzelmann, K. Graff, E. R. Weber. Appl. Phys. A, 30, 169 (1983).
- [9] J. D. Gerson, L. J. Cheng, J. W. Corbett. J. Appl. Phys., 48, 4821 (1977).
- [10] P. F. Schmidt, C. W. Pearce. J. Electrochem. Soc., 128, 630 (1981).
- [11] H. J. Rijks, J. Bloem, L. J. Gilling. J. Appl. Phys., 50, 1370 (1979).
- [12] S. D. Brotherton, P. Bradley, A. Gill. J. Appl. Phys., 57, 1941 (1985).
- [13] K. Wunstel, K. H. Froehner, P. Wagner. Physica B+C, 116, 301 (1983).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 26, вып. 9, 1992

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СПЕКТР ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ ЗАХВАТА В ZnSe

А. П. Оконечников, Н. Н. Мельник

Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова, Екатеринбург, Россия
(Получено 12.02.1992. Принято к печати 2.04.1992)

Проблема стабильности электрофизических характеристик полупроводников и параметров приборов на их основе является одной из основных в электронике. Много внимания уделяется вопросам деградации солнечных элементов, светодиодов и лазеров, утомляемости фоторезисторов, стабильности параметров диодов, транзисторов и микросхем [1-3].

В данной работе приведены результаты изучения впервые обнаруженной нами термической нестабильности спектров глубоких центров захвата (ГЦЗ) в нелегированном изолирующем моно- и поликристаллическом ZnSe, выращенном соответственно из расплава [ZnSe(I)] и химическим осаждением из газовой фазы [ZnSe(II)]. Средний размер кристаллитов последнего — 70 мкм.

Концентрация примесей в ZnSe(I) не превышала (ат%): Al, Pb, Cr, Ti — 10^{-4} , Cd, Si — 10^{-2} , C — 10^{-1} , O — 1. Для образцов ZnSe(II) содержание примесей не превышает (10^{-5} ат%): Mg — 0.3; Mn, Al — 1; Cu, Ni — 2; Si, Cd — 3; Fe, Cr — 5; Pb — 6. Концентрация кислорода составляет $1 \cdot 10^{-2}$ ат%.

Образцы представляли собой пластинки размерами $5 \times 5 \times 0.7$ мм с омическими контактами из сплава In—Ga. Для изучения термической стабильности производился изохронный отжиг кристаллов в вакууме (с целью предотвращения окисления поверхности) в интервале температур 100—250 °C с шагом 50 °C в течение 3 мин при каждой температуре.

Параметры ГЦЗ определялись методом оптической нестационарной токовой спектроскопии глубоких уровней (ОНТСГУ) [4, 5] при помощи прибора, описанного ранее [6]. Необходимо отметить, что метод ОНТСГУ, являющийся модификацией для высокоомных полупроводников метода DLTS [7], удобен для подобных исследований, поскольку положение пиков в спектре на шкале температур зависит только от величины окна скорости и параметров ГЦЗ, и в отличие от других термоактивационных методов, например метода термостимулированной проводимости, не зависит от скорости температурного