

Это значит, что введение в  $a$ -Si : Ge атомов бора или фосфора приводит к смещению уровня Ферми от середины щели подвижности к  $E_v$  или  $E_c$  соответственно. При максимальных дозах ( $\sim 10^{17}$  см $^{-2}$ ) энергетический зазор ( $E_F - E_v$ ) или ( $E_c - E_F$ ) составляет 0.2 эВ. Это хорошо согласуется с литературными данными для легированного бором и фосфором гидрогенизированного аморфного кремния [5].

Если сравнить зависимости  $\sigma_T$  ( $\Phi$ ) для  $a$ -Si : Ge с аналогичными зависимостями для  $a$ -Si : H (рис. 1), то можно видеть, что эффективность легирования  $a$ -Si : H выше. Мы надеемся, однако, что при более тщательном подборе концентрации германия и условий имплантации, в частности температуры мишени, на  $a$ -Si : Ge будут получены лучшие результаты.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Хохлов А. Ф., Машин А. И., Ершов А. В., Машин Н. И., Ларина Е. В. — ФТП, 1985, т. 19, в. 12, с. 2204—2206.
- [2] Хохлов А. Ф., Машин А. И., Ершов А. В., Мордвинова Ю. А., Машин Н. И. — ФТП, 1986, т. 20, в. 7, с. 1288—1291.
- [3] Хохлов А. Ф., Ершов А. В., Машин А. И., Мордвинова Ю. А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1907—1909.
- [4] Ле Комбер П., Спир У. — В кн.: Аморфные полупроводники. М., 1982, с. 312—354.
- [5] Kalbitzer S., Muller G., Le Comber P. G., Spear W. E. — Phil. Mag. B, 1980, v. 41, N 4, p. 439—456.
- [6] Хохлов А. Ф., Ершов А. В., Машин А. И. — В кн.: Тез. докл. VII Межд. конф. «Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах». Вильнюс, 1983, с. 209—210.

Горьковский исследовательский  
физико-технический институт  
ГГУ им. Н. И. Лобачевского

Получено 25.01.1988  
Принято к печати 18.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

## РЕЗОНАНСНЫЕ СОСТОЯНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВАКАНСИЯМИ ХАЛЬКОГЕНА, В ЭЛЕКТРОННОМ СУЛЬФИДЕ СВИНЦА

Вейс А. Н., Крупицкая Р. Ю., Лумер А. В.

Вакансии халькогена ( $V_{xr}$ ) являются электроактивными дефектами в полупроводниках типа  $A^{IV}B^{VI}$  и в настоящее время интенсивно изучаются как электрофизическими методами [1, 2], так и методами ИК спектроскопии [1, 3]. Исключение из всей группы материалов  $A^{IV}B^{VI}$  составляет сульфид свинца, для которого, насколько нам известно, отсутствуют данные по явлениям переноса, а спектры коэффициента поглощения  $\alpha(\hbar\omega)$  были исследованы лишь при 300 К в составах  $Pb_{1-x}Me_xS$  ( $Me - Sn, Ge; 0.01 \leq x \leq 0.03$  [4]). Выявленные в них колоколообразные полосы дополнительного поглощения были приписаны  $V_{xr}$  лишь по аналогии с данными для PbSe [3].

Настоящая работа является продолжением [4] и выполнена с целью получения дополнительных доказательств о связи наблюдавшихся в [4] особенностей спектров  $\alpha(\hbar\omega)$  с  $V_{xr}$ . В ней при 90—300 К исследованы спектры  $\alpha(\hbar\omega)$  как в  $Pb_{0.99}Ge_{0.01}S$ , так и в PbS с варьируемым содержанием вакансий халькогена. Для увеличения концентрации  $V_{xr}$  было использовано явление самокомпенсации [5]. В соответствии с [5] сульфид свинца легировался таллием и сравнимым количеством сверхстехиометрического свинца  $Pb_{n36}$ . Уменьшение содержания  $V_{xr}$  в образцах осуществлялось при помощи введения в шихту примеси хлора, занимающей места в подрешетке халькогена [6].

Полученные в работе экспериментальные результаты показаны на рис. 1. Видно, что спектральные зависимости  $\alpha(\hbar\omega)$  в PbS  $\langle Tl, Pb_{n36} \rangle$  подобны приведенным в [4] для  $Pb_{1-x}Me_xS$ . В длинноволновой области экспериментальных спектров, как и в [4], наблюдаются несимметричные полосы дополнительного поглощения  $\alpha_1$ , обладающие резкой красной границей  $E_{кр1}$ , а в диапазоне средних длин волн — колоколообразные особенности  $\alpha_2, \alpha_3$ . Полосы  $\alpha_1$  были при-

писаны в [4] комплексам, энергетические уровни которых  $E_1$  расположены в запрещенной зоне под дном зоны проводимости (см. схему на рис. 1). В пользу предположения о связи особенностей  $\alpha_1$  с комплексами свидетельствует также характерная для данного типа дефектов [7] слабая зависимость  $E_{кр}$  от температуры и сорта вводимой примеси.

С точечными дефектами по аналогии с [4] можно связать компоненты  $\alpha_2, \alpha_3$  дополнительного поглощения.

Симметричная форма полос  $\alpha_2, \alpha_3$ , наличие у них красной и коротковолновой границ свидетельствуют о том, что рассматриваемые особенности спектров  $\alpha(\hbar\omega)$  обусловлены оптическими переходами электронов из зоны проводимости в полосы  $E_2, E_3$  резонансных состояний, расположенные на ее фоне ( $L_6^- \rightarrow E_2, E_3$ ). Сравнение полученных в  $PbS \langle Tl, Pb_{взб} \rangle$  результатов с данными [4] показывает, что энергетическое положение компонент  $\alpha_2, \alpha_3$  дополнительного поглощения не зависит от сорта вводимых примесей (Sn, Ge — в [4], Tl — в настоящей работе).

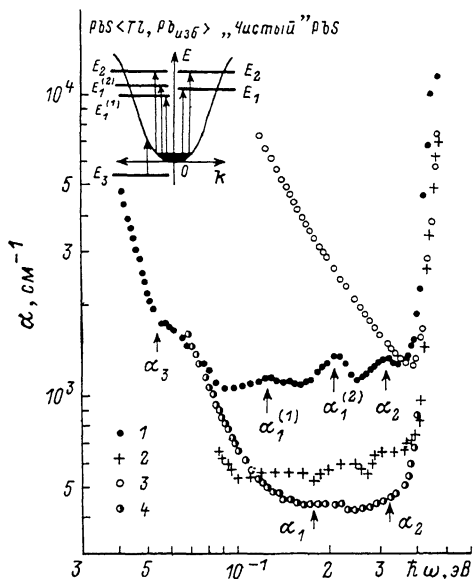


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в  $n$ -PbS при 300 К.

Легирование: 1, 2 — Tl,  $Pb_{взб}$ , 3 — «чистый» PbS, 4 — Cl;  $N_{пр}$ , ат% ( $n \times 10^{-17} \text{ см}^{-3}$ ): 1 — 1 (7.4), 2 — 0.25 (7.8), 3 — 0 (25), 4 — 0.2 (180). Стрелками обозначены компоненты дополнительного поглощения. На вставке показана энергетическая структура PbS, содержащего собственные дефекты.

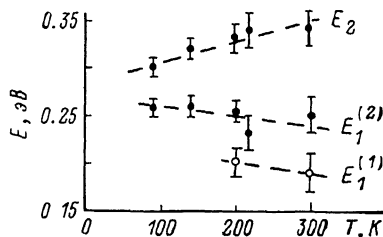


Рис. 2. Температурные зависимости положения квазилокальных уровней, связанных с вакансиями халькогена, в  $n$ -PbS.

Возрастание концентрации введенного таллия  $N_{Tl}$  (и соответственно  $Pb_{взб}$ ) сопровождается увеличением интенсивности колоколообразных особенностей спектров  $\alpha(\hbar\omega)$ , в то время как введение примеси хлора вызывает уменьшение коэффициента поглощения для переходов  $L_6^- \rightarrow E_2, E_3$  вплоть до исчезновения полос  $\alpha_2, \alpha_3$  при  $N_{Cl} = 0.2$  ат%. Полосы  $\alpha_2, \alpha_3$  наблюдались также и в «чистом» PbS, легированном с отклонением от стехиометрии, однако их интенсивность оказалась ниже, чем в  $PbS \langle Tl, Pb_{взб} \rangle$ , несмотря на то что холловские концентрации электронов  $n_x$  в «чистом» PbS существенно превосходили величины  $n_x$  в компенсированных образцах.

Независимость  $E_2, E_3$  от сорта вводимых примесей, возрастание амплитуд  $\alpha_2, \alpha_3$  при легировании сульфида свинца акцепторной примесью Tl и сверхстехиометрическим свинцом и резкое уменьшение величин  $\alpha_2, \alpha_3$  при введении в образцы хлора не противоречат предположению [4] о связи полос  $\alpha_2, \alpha_3$  с вакансиями халькогена. При этом полоса  $\alpha_3$  должна быть приписана синглету, а  $\alpha_2$  — дублету в модели [8]. Об этом свидетельствует появление тонкой структуры полосы  $\alpha_2$ , наблюдаемой в виде двух составляющих  $\alpha_2^{(1)}$  и  $\alpha_2^{(2)}$  как в  $PbS \langle Tl, Pb_{взб} \rangle$ , так и в  $Pb_{0.97}Sn_{0.03}S$  [4].

В пользу высказанного предположения о связи наблюдаемых в спектрах  $\alpha(\hbar\omega)$  колоколообразных особенностей с вакансиями халькогена свидетельствуют также температурные зависимости энергий  $E_2$  и  $E_3$  (рис. 2), определенные по методике, подробно описанной в [4, 9]. Как оказалось,  $E_2(T)$  и  $E_3(T)$  близки к соответствующим зависимостям для селенида [3] и теллурида [9] свинца.

- [1] Palmetshofer L. — Appl. Phys. A, 1984, v. 34, N 3, p. 139—153.  
 [2] Heinrich H. — Lect. Not. Phys., 1980, v. 133, p. 407—426.  
 [3] Вейс А. Н. — ДАН СССР, 1986, т. 289, в. 6, с. 1355—1359.  
 [4] Вейс А. Н., Прокофьева Л. В. — ФТП, 1987, т. 21, в. 4, с. 743—746.  
 [5] Бытенский Л. И., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. — ФТП, 1980, т. 14, в. 1, с. 74—79.  
 [6] Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., 1968. 383 с.  
 [7] Вейс А. Н., Кайданов В. И., Крупицкая Р. Ю., Мельник Р. Б., Немов С. А. — ФТП, 1980, т. 14, в. 12, с. 2349—2356.  
 [8] Волков Б. А., Панкратов О. А. — ЖЭТФ, 1985, т. 88, в. 1, с. 280—293.  
 [9] Беспалова Н. С., Вейс А. Н., Дашевский З. М. — ФТП, 1987, т. 21, в. 5, с. 946—948.

Ленинградский политехнический институт  
им. М. И. Калинина

Получено 1.03.1988  
Принято к печати 22.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ВОЛН В КРЕМНИИ

Гостев А. В., Корнилов Б. В., Привезенцев В. В.,  
Рау Э. И., Щетинин А. Г.

Известно, что при возбуждении неустойчивости электронно-дырочной плазмы типа рекомбинационных волн (РВ) [1] образец становится электрически неоднородным: вблизи одного из контактов наблюдается существенное изменение потенциала, составляющее значительную долю от всего падения потенциала на образце. При возбуждении быстрых РВ в германии с примесью марганца [2] такая область локализуется вблизи анода [3, 4], а при возбуждении медленных РВ в кремнии, компенсированном цинком в процессе вытягивания из расплава, — вблизи катода [5]. Одним из теоретических выводов работы [4] является заключение о том, что при возбуждении медленных РВ в полупроводнике *n*-типа область существенного изменения потенциала должна располагаться у анода. В настоящей работе методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) визуализированы области существенного изменения потенциала при возбуждении медленных РВ в кремнии, компенсированном цинком в процессе диффузионного отжига. Изучены местоположение, зарождение и развитие этой области, эффекты в которой находят свое отражение в особенностях вольтамперной характеристики (ВАХ) образца.

Исследовались образцы *n*-типа с концентрацией цинка  $N_{Zn} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Компенсация исходного кремния была проведена так, что выполнялось необходимое условие для генерации медленных РВ  $p_0/n_0 > \tau_p/\tau_n$  [1], где  $n_0 = 1.2 \cdot 10^{11}$ ,  $p_0 = 5.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_n = 9.2 \text{ мс}$ ,  $\tau_p = 4.3 \text{ мкс}$  — соответственно концентрации и времена жизни электронов и дырок. Расстояние между планарными алюминиевыми контактами составляло 2.5 мм.

Исследования проводились в режиме потенциального контраста в РЭМ JSM-35CF. В экспериментах использовалась коаксиально-симметричная конструкция коллектора-анализатора вторичных электронов с анализирующим тормозящим электрическим и удерживающим магнитным полями, обладающая высокой эффективностью их сбора [6]. Конструкция обеспечивала линейность передаточной характеристики в диапазоне напряжений  $\pm 10 \text{ В}$ . С целью уменьшения полевых эффектов на образце, которые наиболее заметны в области сильного электрического поля, вытягивающее поле коллектора было повышено до 750 В/мм. Электрическая схема включения образца обеспечивала режим