

В соответствии с данными работы [5] учитывались зависимость параметров  $A$ ,  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  от состава  $x$  соединения  $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ , а следовательно, для варизонного полупроводника, и их зависимость от координаты  $Z$ .

Был проведен расчет формы функции генерации (амплитуды  $G_{\text{max}}$  и ширины  $\Delta Z$  по уровню  $0.1 G_{\text{max}}$ ) для трех характерных энергий квантов возбуждающего излучения, соответствующих генерации максимума фотоносителя в широкозонной области, в узкозонной области и объеме полупроводника. Распределение фотоносителей в этих областях будет определять спектральные характеристики основных трех типов фотоприемных элементов, которые могут быть созданы на основе варизонного полупроводника — поверхностно-барьерных и  $p$ - $n$ -фотоприемников.

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы. Амплитуда функции генерации уменьшается при уменьшении энергии квантов возбуждающего излучения и возрастает по мере роста градиента ширины запрещенной зоны. Учет дополнительного ослабления излучения за счет координатной зависимости коэффициента преломления не приводит к заметному изменению амплитуды функции генерации в широкозонной области и в объеме варизонного полупроводника, но существенно снижает расчетную эффективность генерации в узкозонной области. Этот эффект усиливается по мере роста градиента ширины запрещенной зоны. Геометрические размеры области генерации (по уровню  $0.1 G_{\text{max}}$ ) максимальны при генерации фотоносителей в объеме варизонного полупроводника и для всех трех областей спадают по мере увеличения градиента ширины запрещенной зоны. Учет координатной зависимости  $n$  ( $Z$ ) не оказывает влияния на размеры области генерации  $\Delta Z$  в широкозонной области, однако приводит к некоторому (приблизительно на 10 %) расширению области генерации в объеме полупроводника и заметному ее расширению (в 1.1—2.3 раза) в узкозонной области. Расхождение расчетных зависимостей усиливается по мере возрастания градиента ширины запрещенной зоны.

Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют о необходимости учета эффекта изменения функции генерации фотоносителей из-за координатной зависимости коэффициента преломления при расчете фотоэлектрических характеристик фотоприемных элементов, создаваемых на основе варизонного полупроводников. Ослабление оптического возбуждающего излучения, вызываемое его отражением от слоев с различающимися показателями преломления, приводит к снижению амплитуды функции генерации и увеличению толщины области генерации.

#### Список литературы

- [1] Царенков Г. В. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 2. С. 253—262.
- [2] Оптические свойства полупроводников / Под ред. Р. Уиллардсона, А. Бира. М., 1970. 488 с.
- [3] Мосс Т. Оптические свойства полупроводников. М., 1961. 304 с.
- [4] Dow J. D., Redfield D. // Phys. Rev. B. 1972. V. 5. N 2. P. 594—610.
- [5] Пихтин А. Н., Яськов А. Д. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 6. С. 1047—1053.

Институт электроники АН БССР  
Минск

Получено 2.10.1989  
Принято к печати 23.01.1990

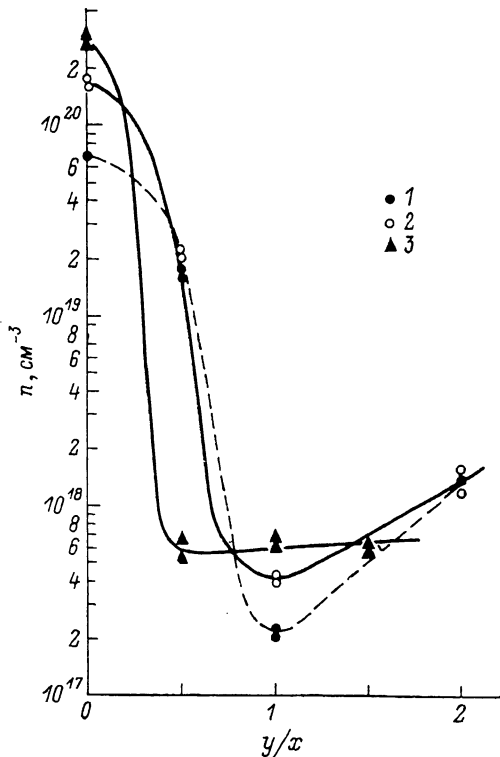
ФТП, том 24, вып. 6, 1990

## ГЛУБОКАЯ САМОКОМПЕНСАЦИЯ В СИСТЕМЕ $\text{PbSe} \langle \text{Cl}, \text{Se}_{\text{вб}} \rangle$

Житинская М. К., Немов С. А., Прошин В. И.

Явление самокомпенсации ранее [1] изучалось в  $\text{PbSe}$ , легированном таллием. Суть его состоит в следующем. При введении в кристалл электрически активной примеси увеличивается растворимость собственных дефектов, ком-

пенсирующих легирующее действие введенной примеси. В PbSe, легированном акцепторной примесью Tl, увеличивается концентрация вакансий селена. Равичем и Бытенским [1] построена теория явления самокомпенсации, основанная на предположении о том, что компенсация примеси осуществляется вакансиями (одно- и двукратно ионизованными). Сопоставление результатов расчета с экспериментом обнаружило хорошее количественное согласие для случая двукратно ионизованных вакансий Se [1]. Типичные концентрации носителей тока в компенсированных образцах были  $n, p \approx (1 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а смена типа проводимости в максимально компенсированных образцах в зависимости от содержания легирующей примеси (другими словами, зависимость разности концентраций дырок и электронов  $p-n$  как функции  $N_{\text{Tl}}$ ) происходила весьма резко вблизи  $N_{\text{Tl}} = 0.23 \text{ ат}\%$ . Указанные особенности системы PbSe (Tl,  $\text{Pb}_{\text{вак}}$ ) делают ее неперспективной с точки зрения применения в фотоэлектричестве. В связи с этим целесообразно изучение других систем. В частности, в настоящей работе исследовано явление самокомпенсации в PbSe, легированном глубокой донорной примесью хлора. Технология приготовления образцов подобна использованной [1]. Примесь хлора вводилась в виде соединения  $\text{PbCl}_2$ . Ее содержание варьировалось в пределах 0.5—1.5 ат%. Для достижения максимальной компенсации (соответствующей границе области гомогенности селенида свинца в присутствии донорной примеси хлора) в шихту образцов вводился избыток селена, про-



Зависимости концентрации электронов ( $n$ ) в зоне проводимости от величины избытка селена ( $y$ ) в шихте образцов  $\text{PbSe}_{1-x+y}\text{Cl}_x$ .  
 $x$ , ат%: 1 — 0.5; 2 — 1.0; 3 — 1.5.

вляющий акцепторное действие. Состав исследованных образцов соответствовал химической формуле  $\text{PbSe}_{1-x+y}\text{Cl}_x$ .

Для каждого фиксированного содержания примеси в соответствии с [1] изучалась зависимость концентрации электронов в зоне проводимости  $n$  от величины избытка Se. Концентрация электронов определялась из данных по эффекту Холла при температуре 300 К.

Полученные результаты приведены на рисунке, из которого видно, что в PbSe, легированном хлором и избытком селена, наблюдается глубокая компенсация с типичными концентрациями электронов  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , примерно на порядок меньшими, чем в селениде свинца с примесью таллия и избытком свинца.

Сделаем оценку концентрации электронов в зоне проводимости компенсированных образцов в предположении, что компенсация легирующего действия хлора осуществляется двукратно заряженными вакансиями свинца. Используя формулы (7) и (9) работы [1] и данные [2] для нелегированного PbSe, получим для использованных содержаний хлора значение концентрации  $n \approx (1 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (температура отжига образцов равна 650 °С), что примерно на порядок больше экспериментальных значений  $n$ . (В случае однозарядных вакансий расхождение расчетов с экспериментом еще больше). Полученный результат свидетельствует о том, что механизм самокомпенсации в PbSe с при-

мелью хлора более сложен, чем в случае легирования селенида свинца примесью таллия [1].

Улучшить согласие расчетов с экспериментом можно, если предположит, что компенсация легирующего действия хлора осуществляется не только одинокими вакансиями свинца, но и путем образования комплексов типа примесь—вакансия свинца. Теория самокомпенсации для этого случая развита Бытенским и Равичем в работах [3, 4]. Она содержит неизвестный параметр — энергию связи комплекса, который можно оценить из экспериментальных данных. Из формулы (8) работы [4] получаем значение энергии связи комплекса  $\Delta\varphi_k \approx 0.2$  эВ, которое позволяет согласовать расчет с экспериментом.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что в системе  $\text{PbSe} \langle \text{Cl}, \text{Se}_{\text{проб}} \rangle$  имеет место глубокая самокомпенсация с типичными концентрациями электронов в зоне проводимости  $n \approx (2 \div 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Анализ экспериментальных данных показывает, что механизм самокомпенсации является сложным. Компенсация легирующего действия хлора осуществляется не только одинокими вакансиями РЬ, но и путем образования комплексов типа примесь—вакансия свинца.

#### Список литературы

- [1] Бытенский Л. И., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. // ФТП 1980. Т. 14. В. 1. С. 74—79.
- [2] Абрикосов Н. Х., Шелимова Л. Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений  $\text{Al}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ . М., 1975. 195 с.
- [3] Бытенский Л. И., Кайданов В. И., Кутейников Р. Ф., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 5. С. 981—984.
- [4] Бытенский Л. И., Кайданов В. И., Макеенко В. П., Мельник Р. Б., Немов С. А. // ФТП 1984. Т. 18. В. 3. С. 489—492.

Ленинградский политехнический институт  
им. М. И. Калинина

Получено 22.01.1990  
Принято к печати 23.01.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

## ПАРАМЕТРЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ В $n$ -Si СИЛЬНО КОМПЕНСИРОВАННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Клингер П. М., Фистуль В. И.

Ранее [1] был описан разработанный нами метод температурной зависимости емкости (ТЗЕ), позволяющий определять параметры глубоких уровней в сильно компенсированных полупроводниках. Изложенные в настоящем сообщении результаты демонстрируют возможности метода ТЗЕ в определении характеристик дефектообразования в  $n$ -кремнии для случая полной компенсации мелкой примеси (фосфора) в результате электронного и  $\gamma$ -облучения.

### 1. Импульсное электронное облучение

Исследовался  $n$ -Si  $\langle \text{P} \rangle$  (КЭФ-15), выращенный по методу Чохральского (удельное сопротивление  $\rho \approx 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Проводилось импульсное облучение быстрыми электронами ( $t_{\text{имп}} = 4.8 \text{ мкс}$ , частота следования импульсов  $f = 200 \text{ Гц}$ ). Измерялись температурные зависимости удельной электропроводности и коэффициента Холла в интервале 20—300 К. На тех же образцах проводились измерения по методике ТЗЕ. В результате облучения мелкая примесь (фосфор) оказалась полностью скомпенсированной глубокими радиационными акцепторами, параметры которых представлены в табл. 1. С учетом литературных данных [2] можно заключить, что введенные облучением дефекты являются А-центрами и дивакансиями. Из табл. 1 видно, что результаты, полученные