

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В Si  
С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПАССИВНЫМИ ПРИМЕСЯМИМизрухин Л. В., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И.,  
Шинкаренко В. К., Яшник В. И.

Существует широкий класс точечных дефектов — изовалентных примесных атомов (ИВП), являющихся электрически пассивными (ЭП) центрами в ковалентных кристаллах (например, атомы C, Sn, Ge в Si, Si в Ge). Однако наряду с точечными ЭП дефектами имеются ЭП центры с существенно большим линейным размером по сравнению с размером атомов. Так, известно, что введение при выращивании тигельного кремния редкоземельных элементов (РЗЭ), в частности атомов Gd, приводит к появлению ЭП кластеров (скоплений) атомов Gd с большим разбросом по размерам (от  $10^2 \text{ \AA}$  до 10 мкм).

ЭП дефекты при определенных концентрациях могут заметно влиять на некоторые физические свойства кристаллов кремния. В качестве примера можно привести экспериментальные данные по сильному неоднородному уширению полос ИК поглощения водородоподобных центров (ВПЦ) [1] и кислорода ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) [2] в  $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ , линий ЭПР тензозондов в Si с ИВП [3], полос экситонной люминесценции в сплавах  $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$  [4], существенному влиянию ЭП дефектов на кинетику накопления радиационных дефектов (центры непрямои аннигиляции [5], стоки [6]). Во всех перечисленных случаях основной причиной описанных эффектов является, как считает большинство авторов этих работ, наличие внутренних хаотических деформационных полей, создаваемых ЭП примесями. В случае точечных изовалентных примесей упругие поля возникают вследствие несовпадения ковалентных радиусов атомов матрицы и примеси. Для ЭП примесей типа кластеров РЗЭ деформационные поля возникают на границе матрица—кластер.

Одним из наиболее ярко выраженных эффектов, связанных с ЭП примесями, является неоднородное уширение полос ИК поглощения (ВПЦ) в Si. Ранее нами этот эффект изучался для ИВП Ge в Si [1]. В настоящей работе исследовалось влияние примесей Sn, Gd в Si и Si в Ge на полуширину и форму полос поглощения ВПЦ.

Спектры ИК поглощения исследовались на инфракрасном фурье-спектрометре IFS-113V в интервале температур  $2\div 77 \text{ K}$  с разрешением не хуже  $0.1 \text{ см}^{-1}$ . Кристаллы выращивались методом Чохральского. Концентрация электрически активных примесей (P и Sb) определялась из холловских измерений и составляла  $(1\div 2) \cdot 10^{14}$  для P и  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  для Sb. Исследуемые кристаллы подбирались близкими по содержанию основных технологических примесей — кислорода [ $N_{\text{O}} = (4\div 7) \cdot 10^{17}$ ] и углерода [ $N_{\text{C}} = (2\div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ]. Концентрация Si в германии измерялась рентгеноспектральным анализатором SP-733 с абсолютной погрешностью не более  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и составляла  $1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Содержание Sn и Gd определялось нейтронно-активационным анализом и изменялось в пределах  $2 \cdot 10^{18} \div 1.7 \cdot 10^{19}$  для Sn и  $8 \cdot 10^{14} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для Gd.

На рис. 1, а представлены спектры поглощения P в Si с примесью Sn. Видно, что с ростом концентрации атомов Sn до  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  резонансные линии существенно уширяются. Проведенное исследование температурной зависимости

полуширин полос поглощения показало, что уширение является неоднородным, поскольку в диапазоне температур 3–45 К полуширина полос практически не изменяется.

Аналогичные результаты получены при изучении спектров поглощения Sb в твердом растворе Ge<Si> (рис. 1, б). В отличие от P в Si для Sb в Ge спектр поглощения более сложен и состоит из накладывающихся друг на друга линий, что связано с небольшими расстояниями между подуровнями основного и возбужденных состояний мелкого центра Sb ( $E_1 = 0.0098$  эВ). Как видно из рис. 1, б, легирование кремнием приводит к уширению линий поглощения Sb и к еще большему перекрытию линий.

Аналогичная картина наблюдается для P в Si с примесью Gd. Однако в отличие от ИВП неоднородное уширение наблюдается начиная с концентраций  $N_{Gd} \geq 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. По-видимому, это может свидетельствовать о коррелированном распределении P и кластеров Gd.

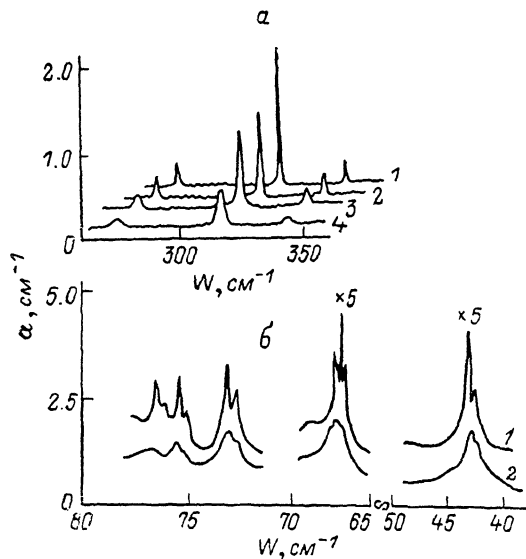


Рис. 1. Спектр поглощения фосфора в кристаллах Si<Sn> и Sb в Ge<Si> при  $T \leq 4$  К. а: 1 — Si (P), 2 — Si (Sn, P) ( $N_{Sn} = 4.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>), 3 — Si (Sn, P) ( $N_{Sn} = 1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>), 4 — Si (Sn, P) ( $N_{Sn} = 1.7 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>). б: 1 — Ge (Sb), 2 — Ge (Si, Sb) ( $N_{Si} = 1.4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>).

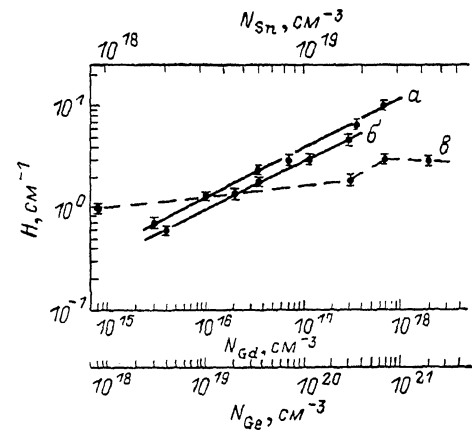


Рис. 2. Зависимость полуширины линии поглощения  $1s-2p$  фосфора от концентрации ЭП примесей.

а — Si(Ge, P), б — Si(Sn, P), в — Si(Gd, P).

Отметим следующую закономерность, наблюдавшуюся в наших экспериментах: увеличение ковалентного радиуса ИВП при равных концентрациях приводит к росту величины неоднородного уширения ВПЦ в Si. Это позволяет подтвердить сделанный ранее вывод [1] о том, что основной причиной неоднородного уширения являются хаотические деформационные поля, возникающие из-за несоответствия ковалентных радиусов матрицы и ИВП. В литературе [4] высказывалась другая точка зрения на причину уширения резонансных полос ИК поглощения при наличии в кристаллах Si ИВП. Предполагалось, что при увеличении концентрации ИВП уменьшается время жизни экситонов, что через соотношение неопределенности Гейзенберга приводит к увеличению неопределенности в ширине линий. Однако наш эксперимент не подтверждает эту точку зрения, поскольку при одной и той же концентрации ИВП величина неоднородного уширения при переходе к ИВП с большим ковалентным радиусом возрастает. Об этом же свидетельствует и независимость спектров от температуры в интервале 3–45 К. Дополнительным подтверждением существования хаотических деформационных полей является наличие сильно неоднородного уширения колебательного перехода (колебание  $\nu_2$ ) в квазимолекуле Si<sub>2</sub>O [2].

В предыдущей работе [1] нами установлено, что форма полос поглощения в Si с ИВП близка к Гауссовой, а полуширина резонансных линий

$$H \sim \sqrt{N_{\text{ИВП}} |A|}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ИВП}}$  — концентрация ИВП, а  $A$  — деформационный заряд ИВП.

На рис. 2 в двойных логарифмических координатах представлены экспериментальные зависимости  $H$  для линий  $1s-2p$  фосфора от  $N_{\text{ИВП}}$ . Видно, что экспериментальные точки для ИВП хорошо ложатся на теоретические прямые, соответствующие наклону  $1/2$ , как это и следует из формулы (1). Сдвиг прямой по вертикальной оси обусловлен различными значениями деформационных зарядов и разбросом в ширине линий для кристаллов с различным исходным примесным составом. Сложность спектра поглощения Sb в Ge затрудняет проведение аппроксимации полуширины линий поглощения и построения зависимости  $H$  от  $N_{\text{Si}}$ .

Некоторой особенностью обладает зависимость  $H$  от  $N_{\text{Gd}}$ . Во-первых, наклон прямой заметно меньше  $1/2$ , а, во-вторых, при концентрации  $N_{\text{Gd}} \approx 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  возникает скачок с последующим выходом на полочку при  $N_{\text{Gd}} \geq 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . По всей видимости, скачок является следствием изменения характера распределения Gd в Si. Что же касается линейного участка в диапазоне концентраций  $N_{\text{Gd}} = 8 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , то здесь причиной отклонения от теоретической зависимости (1) является то, что в теории центрами, создающими упругие поля, являются атомы ИВП, а в данном случае такими центрами являются кластеры Gd.

Таким образом, экспериментально установлено, что имеется однозначная корреляция между полушириной неоднородно уширенных резонансных линий ВПЦ и ковалентным радиусом ИВП: увеличение ковалентного радиуса при фиксированной концентрации ИВП соответствует росту полуширины линий в согласии с теоретической зависимостью (1). Можно считать, по-видимому, что основной причиной неоднородного уширения линий поглощения ВПЦ в ковалентных кристаллах — кремнии и германии с ЭП примесями является наличие хаотических деформационных полей, возникающих в случае ИВП за счет несоответствия ковалентных радиусов матрицы и ИВП, а в случае РЗЭ — упругих полей, создаваемых кластерами атомов примеси.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Мизрухин Л. В., Мильвидский М. Г., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Горбачева Н. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 9. С. 1647—1653.
- [2] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2222—2225.
- [3] Кустов В. Е., Мильвидский М. Г., Семенов Ю. Г., Туровский Б. М., Шаховцов В. И., Шиндич В. Л. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 2. С. 270—274.
- [4] Лопатин А. Б., Покровский Я. Е. // ФТП. 1986. Т. 28. В. 8. С. 2373—2378.
- [5] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 563—565.
- [6] Неймаш В. Б., Соснин М. Г., Туровский Б. М., Шаховцов В. И., Шиндич В. Л. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 901—903.

Институт физики АН УССР  
Киев

Получено 29.08.1988  
Принято к печати 19.10.1988

ФТП, том 23, вып. 4, 1989

### О СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ В СТЕКЛООБРАЗНОМ AsGeSe, ОБЛУЧЕННОМ БОЛЬШИМИ ДОЗАМИ НЕЙТРОНОВ

Конорова Л. Ф., Жданович Н. С., Дидик В. А., Прудников И. М.

Проблема структурных превращений в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП), индуцированных воздействием проникающего излучения, вызывает большой интерес исследователей в связи с необходимостью