

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

УДК 621.315.592

ИЗОТОПНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СПЕКТРАХ ИК–ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ–28, 29 И 30 С ВЫСОКИМ ИЗОТОПНЫМ ОБОГАЩЕНИЕМ

© 2012 г. Т. В. Котерева, А. В. Гусев, В. А. Гавва, Е. А. Козырев
Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН

Представлены результаты исследования спектров ИК–поглощения мелких доноров и акцепторов в высокочистых монокристаллах стабильных изотопов кремния ^{28}Si (99,99%), ^{29}Si (99,92%) и ^{30}Si (99,97%), выращенных методом бестигельной зонной плавки. Определено содержание остаточных примесей бора, фосфора и мышьяка в исследуемых монокристаллах с пределом обнаружения $1 \cdot 10^{12}$, $4 \cdot 10^{11}$ и $1 \cdot 10^{12}$ ат/см³ соответственно. Результаты ИК–спектроскопического определения содержания мелких доноров и акцепторов хорошо согласуются с данными о концентрации свободных носителей заряда, полученными из измерений эффекта Холла. Изучены параметры линий поглощения примесей бора и фосфора в монокристаллах изотопов кремния. Показано, что изменение изотопного состава кремния приводит к сдвигу энергетического спектра мелких примесных центров в область высоких энергий с ростом атомной массы изотопа.

Ключевые слова: кремний, стабильные изотопы, монокристаллы, спектры ИК–поглощения, электроактивные примеси.

Введение

В последнее десятилетие активно развивается новое направление в технологии кремния — получение высокочистых кристаллов стабильных изотопов кремния [1, 2]. Проводятся исследования влияния изотопного состава на свойства кремния [3].

Наиболее сильное влияние на электрофизические и оптические свойства кремния оказывают примеси элементов III и V групп Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, создающие в запрещенной зоне кремния мелкие акцепторные и донорные уровни. Одним из эффективных методов определения электроактивных примесей в полупроводниках является абсорбционная ИК–спектроскопия. Изотопный состав кремния может заметно влиять на параметры полос ИК–поглощения в кристаллах [4, 5]. Поэтому при ИК–спектроскопическом определении электроактивных примесей необходимо учитывать изотопические эффекты.

Теоретическая зависимость энергии ионизации мелких доноров и акцепторов от средней изотопной массы изучена авторами работы

[4]. Показано, что сдвиг линий поглощения ^{30}Si относительно ^{28}Si составляет $(0,47 + 0,27) \text{ см}^{-1}$ и определяется изотопной зависимостью диэлектрической проницаемости (как $M^{-1/2}$, где M — средняя атомная масса) и эффективной массы носителей. Изотопное обогащение приводит к сужению линий и изменению энергии связи для бора и фосфора [5]. Степень изотопного обогащения ранее изученных образцов кремния ^{29}Si и ^{30}Si составляла ~90 %. Исследование высокочистых монокристаллов кремния ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si с более высокой степенью изотопного обогащения, с содержанием фоновых примесей кислорода и углерода $n \cdot 10^{15}$ ат/см³ позволяет продолжить изучение изотопных эффектов в энергетических спектрах примесей на новом уровне.

Образцы и методы исследования

Образцы изотопов кремния были получены по силановой технологии [1]. Монокристаллы выращивали методом бестигельной зонной плавки в атмосфере аргона в кристаллографическом направлении (100). В исследуемых образцах ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si концентрация углерода и

кислорода составляла $<n \cdot 10^{15}$ ат/см³. Изотопный состав (табл. 1) определяли методом лазерной масс-спектрометрии [6].

Для сравнительных измерений использовали образцы кремния *p*- и *n*-типа проводимости природного изотопного состава, марок КДБ-12, КЭФ-4,5, а также образцы моноизотопного ²⁸Si (Si28-1) со степенью обогащения 99,98 % и ³⁰Si (99,74 %).

Образцы представляли собой плоскопараллельные полированные пластины диаметром 5—10 мм; для ^{nat}Si и ²⁸Si толщиной 1—3 мм, *n*- и *p*-типа проводимости, для ²⁹Si и ³⁰Si толщиной 1 мм *p*-типа проводимости.

Спектры поглощения кремния в диапазоне 200—700 см⁻¹ регистрировали с помощью Фурье-спектрометра IFS113v (Bruker), оснащенного детектором (DTGS с окном из полиэтилена), делителем пучка (лавсановая пленка 3,5 мкм), а также криостатом замкнутого цикла с оптическими окнами из КРС-5 для измерений при гелиевых температурах. Для наблюдения основных и компенсирующих примесей использовали межзонный подсвет от лампы накаливания. Измерения проводили путем накопления 100—500 сканов при спектральном разрешении 0,1—1 см⁻¹. Оценки концентрации электрически активных примесей по спектрам ИК-поглощения проводили с использованием калибровочных коэффициентов для кремния природного изотопного состава [7, 8].

Концентрацию нескомпенсированных носителей заряда определяли из измерений эффекта Холла. Погрешность измерений не превышала 20 %.

Результаты и их обсуждение

Исследование влияния изотопного состава кремния на параметры полос ИК-поглощения. На рис. 1 представлены спектры ИК-поглощения кристаллов ²⁸Si, ²⁹Si и ³⁰Si. Основной электроактивной примесью во всех образцах был бор. При межзонном подсвете в спектрах появлялись линии донорных примесей, основной из которых был фосфор. В спектрах наблюдались также линии мышьяка. Форма спектральных линий хорошо описывается функцией Лоренца. Из рис. 1 видно, что изменение изотопного состава образцов приводит к сдвигам полос поглощения. Полосы поглощения фосфора и бора в спектрах кремния ²⁹Si и ³⁰Si по сравнению с кремнием ²⁸Si сдвигаются в область высоких энергий с увеличением средней атомной массы приблизительно на 0,1 и 0,3 см⁻¹ соответственно.

Положения максимумов полос поглощения примесей бора и фосфора, а также их сдвиги, обусловленные изотопными эффектами, представлены в табл. 2. Точность определения положения максимумов пиков составила $\pm 0,01$ см⁻¹.

Сравнение с результатами работы [5], представленными в табл. 2, показало, что рассчитанные

нами сдвиги полос поглощения бора и фосфора в кремнии ²⁸Si относительно кремния ³⁰Si меньше на величину не менее $\sim 0,05$ — $0,1$ см⁻¹. Величина сдвига повышается с увеличением энергии переходов.

Известно, что параметры спектральных полос в изотопно-чистых кристаллах изменяются по сравнению с природным кремнием [5], поэтому необходимо исследовать не только положения максимумов, но и полуширину линий (FWHM — ширина пика на половине его высоты) примесного поглощения. Спектроскопические параметры наиболее интенсивных линий поглощения примесей бора и фосфора в монокристаллах изотопов кремния для спектрального разрешения 0,5 см⁻¹ приведены в табл. 3. Изменение полуширины полос по сравнению с ^{nat}Si составило 100 %.

В табл. 4 приведены спектральные характеристики линий, соответствующих переходам бора 2Г₈ и фосфора 2p₀, полученных описанием функцией Лоренца полос спектров образцов с различным изотопным обогащением. Из данных табл. 4 видно, что частоты максимумов полос сдвигаются в высокоэнергетическую область при увеличении средней атомной массы кремния.

Исследование формы линий поглощения бора и фосфора при различном спектральном разрешении, показало, что влияние изотопного состава на полуширину полос проявляется при разрешении $< 0,3$ см⁻¹.

Таблица 1

Изотопный состав исследуемых образцов кремния

| Образец | Содержание изотопа, % (ат.) | | |
|------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| | ²⁸ Si | ²⁹ Si | ³⁰ Si |
| ²⁸ Si | 99,9956 | 0,0042 | 0,00021 |
| ²⁹ Si | 0,023 | 99,923 | 0,054 |
| ³⁰ Si | 0,005 | 0,021 | 99,974 |

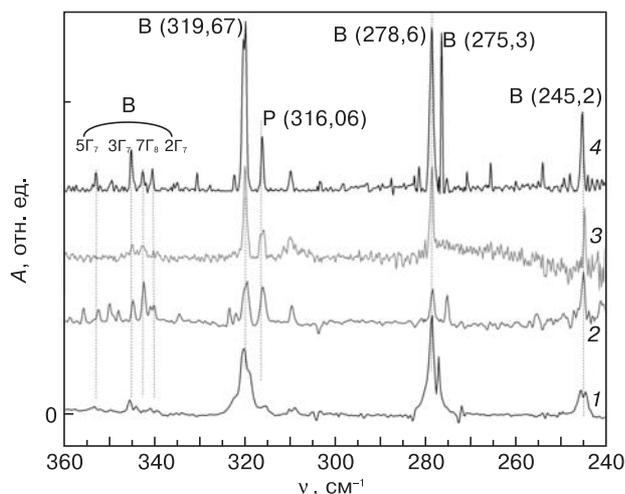


Рис. 1. Спектры поглощения примесей бора и фосфора в образцах изотопов кремния: 1 — ^{nat}Si; 2 — ²⁸Si; 3 — ²⁹Si; 4 — ³⁰Si

Таблица 2

**Положения максимумов линий поглощения и сдвиги частот примесей В и Р
в изотопно-обогащенном кремнии ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si**

| Примесь | Обозначение перехода [9] | Положение максимума линий поглощения, см^{-1} | | | Сдвиг частоты линий поглощения, см^{-1} | | |
|---------|--------------------------|--|------------------|------------------|--|---|---|
| | | ^{28}Si | ^{29}Si | ^{30}Si | $\nu(^{28}\text{Si}) - \nu(^{29}\text{Si})$ | $\nu(^{28}\text{Si}) - \nu(^{30}\text{Si})$ | $\nu(^{28}\text{Si}) - \nu(^{30}\text{Si})$ [5] |
| Р | $2p_0$ | 275,27 | * | 275,33 | * | -0,04 | -0,06 |
| | $2p_{\pm}$ | 315,99 | 316,01 | 316,06 | -0,02 | -0,06 | -0,10 |
| | $3p_0$ | 323,39 | * | 323,46 | * | -0,07 | 0,10 |
| В | $1\Gamma_8$ | 244,94 | * | 245,22 | * | -0,28 | * |
| | $2\Gamma_8$ | 278,26 | 278,42 | 278,56 | -0,16 | -0,30 | -0,31 |
| | $3\Gamma_8$ | 309,49 | 309,52 | 309,81 | -0,30 | -0,32 | -0,32 |
| | $1\Gamma_6$ | 319,34 | 319,40 | 319,67 | -0,06 | -0,33 | -0,35 |
| | $1\Gamma_7$ | 320,15 | 320,31 | 320,440 | -0,16 | -0,29 | -0,31 |
| | $4\Gamma_8$ | 322,04 | 322,06 | 322,300 | -0,03 | -0,28 | -0,37 |
| | $5\Gamma_8$ | 334,47 | 334,58 | 334,77 | -0,12 | -0,30 | -0,36 |
| | $2\Gamma_7$ | 340,07 | 340,32 | 340,35 | -0,05 | -0,28 | -0,38 |
| | $7\Gamma_8$ | 342,30 | 342,46 | 342,49 | -0,16 | -0,19 | * |
| | $3\Gamma_7$ | 344,77 | * | 345,11 | * | -0,33 | -0,38 |
| | $5\Gamma_7$ | 352,56 | * | 352,92 | * | -0,36 | -41 |

* Не определялось.

Таблица 3

**Положения максимумов и полуширины наиболее интенсивных линий поглощения примесей В и Р
в монокристаллах изотопов кремния для спектрального разрешения $0,5 \text{ см}^{-1}$**

| Изотоп | $\nu_{\text{max}}, \text{см}^{-1}$ | FWHM, см^{-1} |
|------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | Бор | | | | Фосфор | | | |
| natSi | 320,09 | 2,48 | 278,70 | 2,20 | 316,34 | 2,11 | 275,07 | 1,90 |
| ^{28}Si | 319,35 | 1,20 | 278,33 | 0,53 | 316,03 | 0,82 | 275,06 | 0,78 |
| ^{29}Si | 319,89 | 1,16 | 278,43 | 1,02 | 316,07 | 1,71 | 276,12 | 0,76 |
| ^{30}Si | 320,12 | 1,26 | 278,68 | 1,04 | 316,05 | 0,81 | 276,27 | 0,51 |

При разрешении 1 и $0,5 \text{ см}^{-1}$ значения полуширины полос составляют $\sim 1 \text{ см}^{-1}$. При разрешении $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$ полосы сужаются, минимальные значения полуширины составляют $0,2 \text{ см}^{-1}$.

В спектрах образцов, обогащенных изотопами ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si , положения максимумов линий фосфора и бора в пределах погрешности совпадают с данными работ [5, 10] для природного и изотопно-обогащенного кремния. Изотопические сдвиги полос поглощения бора и фосфора в ^{28}Si относительно кремния ^{30}Si невелики и не превышают $\sim 0,3 \text{ см}^{-1}$, а полуширина полос поглощения определяется спектральным разрешением.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что полосы поглощения 320, 316 и 382 см^{-1} для примесей бора, фосфора и мышьяка соответственно, можно использовать для определения их концентрации в изотопно-обогащенном кремнии,

с использованием методики, основанной на вычислении площади под кривой.

Определение содержания электрически активных примесей в монокристаллах изотопов кремния. Для определения концентрации примесей бора и фосфора регистрировали спектры образцов ^{29}Si и ^{30}Si при температуре 16 К со спектральным разрешением 0,5 и 1 см^{-1} . Содержание электрически активных примесей определяли, основываясь на подходах, изложенных в стандарте АСТМ. Базовые линии для обнаруженных примесей проводили в соответствии со стандартом для кремния природного изотопного состава [11] (рис. 2). Для определения содержания электрически активных примесей использовали градуировочные коэффициенты из работ [7, 8] для кремния природного изотопного состава.

Концентрации примесей бора и фосфора были вычислены для образцов кремния ^{29}Si и ^{30}Si .

Таблица 4

Характеристики полос поглощения в области 278 см^{-1} в спектрах образцов с различным изотопным обогащением для спектрального разрешения $\text{res } 0,5\text{ см}^{-1}$

| Изотоп | $\nu, \text{см}^{-1}$ | FWHM, см^{-1} | $\nu, \text{см}^{-1}$ | FWHM, см^{-1} |
|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Бор | | Фосфор | |
| ^{28}Si : | 99,91 % | 278,32 | 275,10 | 0,57 |
| | 99,995 % | 278,26 | 275,09[5] | — |
| ^{29}Si : | 91,37 % [5] | 278,44 | 275,13 | — |
| | 99,97 % | 278,51 | 275,0 | 0,98 |
| ^{30}Si : | 89,80 % [5] | 278,57 | 275,147 | — |
| | 99,74 % | 278,79 | 275,23 | 0,97 |
| | 99,92 % | 278,68 | 275,33 | 0,79 |

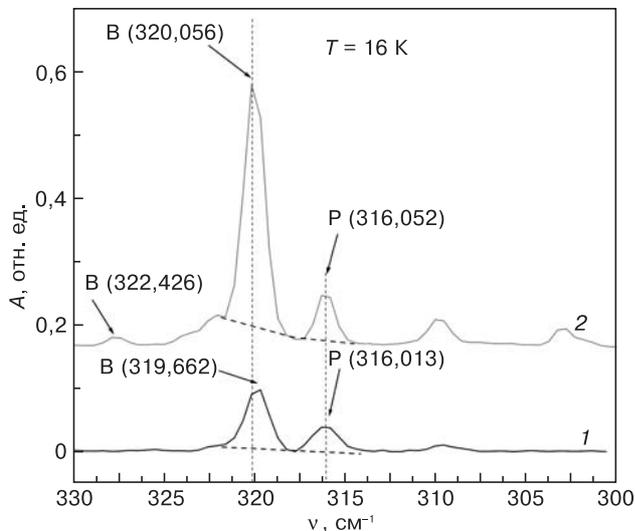


Рис. 2. Базовые линии в спектрах поглощения образцов изотопно-обогащенного кремния ^{29}Si (1) и ^{30}Si (2). Разрешение — 1 см^{-1}

В ИК-спектрах образца ^{30}Si была найдена линия при 382 см^{-1} , которая отнесена к примеси мышьяка. Сдвиг максимума этой линии в ^{30}Si относительно спектра кремния ^{28}Si составил $0,3\text{ см}^{-1}$. По площади под кривой была определена концентрация примеси мышьяка.

Результаты определения содержания примесей бора, фосфора и мышьяка в кремнии природного изотопного состава и в изотопно-обогащенном кремнии представлены в табл. 5.

Проверку правильности проводили путем сопоставления данных о суммарной концентрации электрически активных примесей, полученных методом ИК-спектроскопии, с результатами определения концентрации свободных носителей из измерений эффекта Холла (табл. 6). Результаты измерений эффекта Холла согласуются с данными

Таблица 5

Содержание примесей В, Р и Аs в образцах кремния, обогащенного изотопами, по данным ИК-спектроскопии

| Образец | В, ат/см ³ | Р, ат/см ³ | As, ат/см ³ |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| КДБ-12 | $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{15}$ | $(3,6 \pm 0,2) \cdot 10^{14}$ | $(7,1 \pm 0,5) \cdot 10^{13}$ |
| КЭФ-4,5 | $(2,7 \pm 0,2) \cdot 10^{14}$ | $(1,9 \pm 0,3) \cdot 10^{15}$ | $(3,6 \pm 0,6) \cdot 10^{13}$ |
| ^{28}Si | $(4,1 \pm 0,6) \cdot 10^{13}$ | $< 4 \cdot 10^{11}$ | $< 1 \cdot 10^{12}$ |
| ^{29}Si | $(8,0 \pm 1,2) \cdot 10^{13}$ | $(7,7 \pm 0,3) \cdot 10^{12}$ | $< 5 \cdot 10^{12}$ |
| ^{30}Si | $(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$ | $(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{13}$ | $(6,8 \pm 0,7) \cdot 10^{12}$ |

Таблица 6

Результаты определения концентрации некомпенсированных носителей заряда

| Образец | Концентрация некомпенсированных носителей заряда, ат/см ³ | |
|------------------|--|---------------------|
| | ИК-спектроскопия | Эффект Холла |
| natSi | $(8,4 \pm 1,3) \cdot 10^{14}$ | $1,4 \cdot 10^{15}$ |
| ^{28}Si | $(4,1 \pm 0,6) \cdot 10^{13}$ | $4,2 \cdot 10^{13}$ |
| ^{29}Si | $(7,2 \pm 1,1) \cdot 10^{13}$ | $8,8 \cdot 10^{13}$ |
| ^{30}Si | $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$ | $1,4 \cdot 10^{14}$ |

Таблица 7

Пределы обнаружения метода ИК-спектроскопии для примесей В, Р и Аs в образцах изотопно-обогащенного кремния

| Изотоп кремния | Предел обнаружения, ат/см ³ | | |
|------------------|--|-------------------|-------------------|
| | В | Р | As |
| ^{28}Si | $1 \cdot 10^{12}$ | $4 \cdot 10^{11}$ | $1 \cdot 10^{12}$ |
| ^{29}Si | $2 \cdot 10^{13}$ | $6 \cdot 10^{12}$ | $5 \cdot 10^{12}$ |
| ^{30}Si | $4 \cdot 10^{13}$ | $9 \cdot 10^{12}$ | $2 \cdot 10^{13}$ |

ИК-спектроскопии в пределах погрешности эксперимента.

Погрешность ИК-спектроскопического определения примесей бора, фосфора и мышьяка не превышала 15 %. Возможность определения содержания бора в кремнии, обогащенном ^{28}Si изотопом с помощью коэффициента для кремния природного состава, была показана авторами работы [10].

Пределы обнаружения примесей бора, фосфора и мышьяка в образцах изотопно-обогащенного кремния (табл. 7) были определены по 3σ -критерию для вероятности 0,95 по уровню шума вблизи линий поглощения.

Заключение

В оптическом диапазоне $200\text{—}500\text{ см}^{-1}$ при температуре $T = 16\text{ К}$ исследованы спектры ИК-поглощения изотопно-высокообогащенного кремния ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si . Определены изотопические сдвиги

максимумов полос поглощения фосфора и бора в кремнии ^{29}Si и ^{30}Si относительно ^{28}Si .

Изучена форма полос поглощения примесей бора и фосфора при 278 и 275 cm^{-1} в образцах с разным изотопным составом. Установлена зависимость частот максимумов линий поглощения от средней атомной массы изотопов кремния.

Достигнуты пределы обнаружения для примесей бора, фосфора и мышьяка в изотопно-обогащенном кремнии ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si — $1 \cdot 10^{12}$, $4 \cdot 10^{11}$ и $1 \cdot 10^{12}$ ат/см³ соответственно.

Библиографический список

1. **Девярых, Г. Г.** Высокоочищенный монокристаллический моноизотопный кремний-28 для уточнения числа Авогадро / Г. Г. Девярых, А. Д. Буланов, А. В. Гусев, И. Д. Ковалев, В. А. Крылов, А. М. Потапов, П. Г. Сенников, С. А. Адамчик, В. А. Гавва, А. П. Котков, М. Ф. Чурбанов, Е. М. Дианов, А. К. Калитеевский, О. Н. Годисов, Х.-Й. Поль, П. Беккер, Х. Риман, Н. В. Абросимов // ДАН. – 2008. – Т. 421, № 1. – С. 61–64.
2. **Гусев, А. В.** Получение монокристаллического моноизотопного кремния-29 / А. В. Гусев, В. А. Гавва, Е. А. Козырев, А. М. Потапов, В. Г. Плотноченко // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 7. – С. 773–776.
3. **Cardona, M.** Isotope effects on the optical spectra of semiconductors / M. Cardona, M. L. Thewalt // Rev. of Modern Phys. – 2005. – N 77. – P. 1173–1224.

4. **Karaiskaj, D.** Dependence of the ionization energy of shallow donors and acceptors in silicon on the host isotopic mass / D. Karaiskaj, T. A. Meyer, M. L. W. Thewalt, M. Cardona // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 68, N 7. – P. 121201–1–4.

5. **Steger, M.** Shallow impurity absorption spectroscopy in isotopically enriched silicon / M. Steger, A. Yang, D. Karaiskaj, M. L. W. Thewalt, E. E. Haller, J. W. Ager III, M. Cardona, H. Riemann, N. V. Abrosimov, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, A. K. Kaliteevskii, O. N. Godisov, P. Becker, H.-J. Pohl // Ibid. – 2009. – V. 79. – P. 205210–1–7.

6. **Ковалев, И. Д.** Измерение изотопного состава изотопно-обогащенного кремния и его летучих соединений методом лазерной масс-спектрометрии / И. Д. Ковалев, А. М. Потапов, А. Д. Буланов // Масс-спектрометрия. – 2004. – Т. 1, № 1. – С. 37–44.

7. **Baber, S. Ch.** Net and total shallow impurity analysis of silicon by low temperature fourier transform infrared spectroscopy / S. Ch. Baber // Thin solid films. – 1980. – V. 72, Iss. 1. – P. 201–210.

8. **Kolbesen, B. O.** Simultaneous determination of the total content of boron and phosphorus in high-resistivity silicon by IR spectroscopy at low temperature / B. O. Kolbesen // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 27. – P. 353–355.

9. **Lewis, R. A.** Spectroscopic and piezospectroscopic studies of the energy states of boron in silicon / R. A. Lewis, P. Fisher, N. A. McLean // Australian J. Physics. – 1994. – V. 47. – P. 329–360.

10. **Zakel, S.** Infrared spectrometric measurement of impurities in highly enriched ^{28}Si / S. Zakel, S. Wundrack, H. Niemann, O. Rienitz, D. Schiel // Metrologia. – 2011. – V. 48. – P. 14–19.

11. ASTM Designation: F 1630–00 Standard test method for low temperature FT-IR analysis of single crystal silicon for III-V impurities. – P. 1–7.

УДК 621.315.592

РАССЛОЕНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА GeSi НА ПОДЛОЖКАХ GaAs И Si

© 2012 г. **Е. Ф. Венгер, Л. А. Матвеева, П. Л. Нелюба**
Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева
Национальной академии наук Украины

Введение

Интерес к твердым растворам GeSi вызван разнообразием их электронных, оптических и механических свойств, которые определяются составом твердого раствора и перспективностью использования для создания приборов, способных работать в условиях повышенной радиации. Гетеросистемы на основе твердых растворов германий—кремний на разных подложках изучают с целью создания солнечных элементов, приемников излучения и других фотоэлектрических приборов. Наноструктурные гетеросистемы с твердым раствором $\text{Ge}_{0,25}\text{Si}_{0,75}$ на Si используют для производства сверхвысокочастотных транзисторов и фотоприемников. В процессе изготовления гетеросистем в них

возникают внутренние механические напряжения (**ВМН**). Это сопровождается генерацией структурных дефектов на границе раздела (**ГР**) пленка—подложка, приводит к изгибу гетеросистемы, ухудшает характеристики приборов и снижает их надежность [1].

Работа посвящена исследованию электронных, оптических и механических свойств гетеросистем с пленками твердого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ на подложках GaAs и Si , выявлению особенностей их электронной зонной структуры, релаксации **ВМН** в зависимости от состава пленки и типа подложки, а также влияния на них γ -облучения. Цель работы — повышение качества гетеросистем за счет снижения уровня **ВМН** в них, а также выявление возможности получения гетеросистем без деформации

Изучены электронные, оптические и механические свойства гетеросистем $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ на подложках GaAs ($x = 0 \div 0,04$) и Si ($x = 0,75$). Исследования проводили с помощью модуляционной спектроскопии электроотражения света для пленок и подложек, классической спектроскопии в области собственного поглощения пленок, измерения кривизны гетеросистем для определения знака и величины внутренних механических напряжений в них. Установлено изменение состава твердого раствора с образованием новых структур как в процессе осаждения пленок, так и под влиянием γ -облучения. Найдена возможность уменьшения внутренних механических напряжений и улучшения электронных параметров пленки и подложки на границе раздела, а также получения гетеросистем с твердым раствором без деформации изгиба.

Ключевые слова: гетероструктуры, твердые растворы GeSi , γ -облучение, электроотражение, релаксация механических напряжений.