

Таким образом, в результате проведенных исследований обнаружено расщепление на две компоненты полос поглощения, соответствующих нулевому зарядовому состоянию ТД. С помощью машинного анализа показано, что для переходов $1s \rightarrow 2p_0, 2p_{\pm}$ (и, по-видимому, для $1s \rightarrow 3p_0, 3p_{\pm}$ и т. д.) для ТД⁰ и ТД⁺ полосы поглощения имеют триплетную структуру. Наблюдаемая структура, вероятно, связана с расщеплением основного состояния НТД за счет долин-орбитального взаимодействия.

Список литературы

- [1] Wruck D., Gaworzewski P. // Phys. St. Sol. (a). 1979. V. 56. P. 557—564.
- [2] Stavola M., Lee K. M., Nabity J. C., Freeland P. E., Kimerling L. C. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. N 24. P. 2639—2642.
- [3] Stavola M., Lee K. M. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1986. V. 59. P. 95—109.
- [4] Галкин В. Я., Сайфуллин Р. Т. // Численные методы решения обратных задач математической физики. М., 1988. С. 58—63.

ститут физики АН УССР
Киев

Получено 22.01.1990
Принято к печати 31.01.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕРМОДОНОРОВ В КРИСТАЛЛАХ Si : Ge

Критская Т. В., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Яшник В. И.

В настоящей работе проводится исследование влияния изовалентной примеси Ge (ИВП) на термическое дефектообразование в Si, так как известно, что ИВП, являясь электрически пассивными, могут оказывать существенное влияние на процессы дефектообразования при воздействии на кристаллы ионизирующих излучений и термообработок (ТО). Ранее рядом авторов было установлено, что легирование кремния германием приводит к подавлению эффективности генерации низкотемпературных термодоноров (НТД), вводимых в результате ТО при $T \sim 450^\circ\text{C}$ [1-3]. При этом были сделаны выводы о том, что эффект подавления наступает при концентрациях германия $N_{\text{Ge}} \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и что энергетический спектр НТД в Si и Si : Ge одинаков. Эффект подавления образования НТД объясняется в большинстве работ полями упругих напряжений в системе Si : Ge, которые приводят к увеличению энергетического барьера для движения атомов кислорода при образовании НТД. На наш взгляд, данное объяснение является не совсем убедительным, так как проведенные нами исследования показали, что при изменении концентрации Ge от $3 \cdot 10^{18}$ до $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается уширение резонансных линий поглощения ряда центров [4, 5], что свидетельствует о наличии в матрице Si значительных упругих напряжений. В работе [6] было показано, что упругие напряжения в Si : Ge при данной концентрации германия по сравнению с нелегированными кристаллами Si возрастают более чем на порядок. По имеющимся литературным данным (ИК и холл-исследования), не происходит существенного изменения концентрации НТД. Поэтому вопрос о механизме влияния примеси Ge на процессы образования НТД требует дополнительных исследований.

В данной работе изучались кристаллы *n*-типа с удельным сопротивлением $\rho \sim 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Концентрация германия изменялась в пределах $N_{\text{Ge}} = 3 \cdot 10^{18} \div 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Содержание кислорода и углерода, определенное по ИК измерениям, составляло $(8 \div 9) \cdot 10^{17}$ и $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. ТО проводилась при $T \sim 450^\circ\text{C}$ в течение 1—55 ч. ИК спектры исследовались на фурье-спектрометре IFS-113v при $T = 4.2 \text{ К}$ с разрешением не хуже 0.1 см^{-1} . Изучалось нулевое зарядовое состояние НТД, проявляющееся в области спектра $380\text{—}520 \text{ см}^{-1}$.

В результате исследований установлено, что вид спектра поглощения НТД в Si : Ge существенно зависит от концентрации германия. Полученные результаты представлены на рис. 1. Для наглядности спектр ϵ увеличен в 1.5 раза. Как видно, при $N_{Ge} \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спектр поглощения НТД в Si : Ge мало отличается от спектра НТД в Si. Наблюдаются незначительное уменьшение интенсивности некоторых полос и появление слабой структуры отдельных линий поглощения. При повышении концентрации германия ($N_{Ge} > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) одни полосы претерпевают уширение, другие, характерные для специально не легированного Si, уменьшаются по интенсивности, а также появляется дополнительная хорошо выраженная структура спектра (рис. 1). Причем чем выше N_{Ge} , тем больше подавление концентрации НТД, характерных для Si, при одновременно более медленном росте интенсивностей вновь появляющихся полос. Изменение структуры спектра НТД при легировании Si германием хорошо видно на рис. 1, 2, где представлен дифференциальный спектр Si и Si : Ge при $N_{Ge} \approx 2.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ после ТО в течение 40 ч. Исследования площадь под полосами 470 и 452 см^{-1} в Si : Ge при $N_{Ge} \approx 2.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и при времени ТО ~ 40 ч показали, что она увеличивается по сравнению с Si, прошедшим ту же ТО, в ~ 1.5 раза. Это говорит о сложной природе этих полос в Si : Ge. Выявление в спектрах новых линий

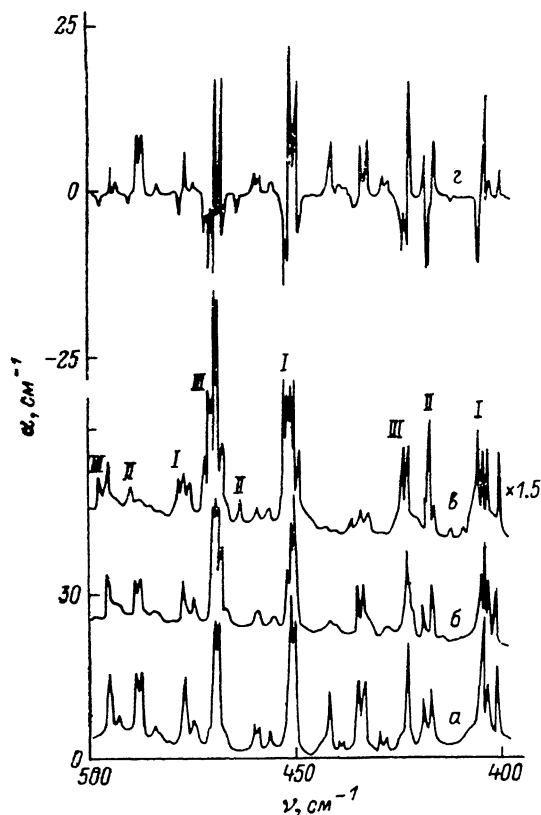


Рис. 1. Спектры поглощения НТД в Si и Si : Ge.

$N_{Ge} \text{ см}^{-3}$: $\alpha - 0$, $\beta - 3 \cdot 10^{18}$, $\gamma - 2.6 \cdot 10^{19}$; разность спектров α и β .

поглощения, а также изменение площади позволяют сделать предположение о наличии в исследуемых кристаллах Si : Ge новых типов ТД центров по сравнению с Si. Близкое энергетическое положение переходов между расщепленными компонентами этих центров и центров, характерных для специально не легированного Si, и приводит, очевидно, к сложной структуре полос. Используя расчеты, выполненные в приближении теории эффективной массы [7], мы провели идентификацию наблюдаемых линий поглощения. Удалось выделить по крайней мере 3 группы линий, принадлежащих различным типам НТД, не наблюдавшихся ранее и обозначенных на рис. 1, ϵ номерами I, II и III. Следует отметить, что вид спектра — соотношение интенсивностей линий, появление и исчезновение структуры — зависит от времени ТО и исходных параметров материала, как это имеет место и для специально не легированного Si.

При концентрациях германия $N_{Ge} > 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ полосы поглощения уширяются, что вызывает перекрытие линий и затрудняет наблюдение полос, принадлежащих различным центрам. Однако в то же время при $N_{Ge} \geq 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается значительное уменьшение суммарной концентрации термодоноров по сравнению с нелегированным Si, что свидетельствует о меньшей эффективности введения новых ТД центров. По-видимому, конкуренция двух процессов в кристаллах Si : Ge — с одной стороны, подавление образования термодоноров, характерных для специально не легированного Si, и, с другой стороны, более низкая эффективность введения новых ТД центров — и приводит к повы-

шению термической стабильности кремния. Так, при $N_{\text{Ge}} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ концентрация ТД по сравнению с Si уменьшается более чем на порядок.

Из экспериментов, проведенных ранее [5, 6], было установлено, что при легировании Si германием наблюдается коррелированное распределение Ge и кислорода — кислород располагается в местах, где он подвергается деформации растяжения, и наблюдается взаимная компенсация деформационных зарядов O и Ge. Такое коррелированное распределение, по всей вероятности, и оказывает существенное влияние на процессы образования термодонорных центров (на образование зародышей).

В работе также исследовано влияние ИВП германия на эффективность введения так называемых мелких термодоноров (МТД), образующихся на начальной стадии термообработок при $T \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ и достигающих максимальной концентрации при временах ТО $\sim 1.5\text{--}2 \text{ ч}$ [8]. Энергии ионизации МТД лежат в преде-

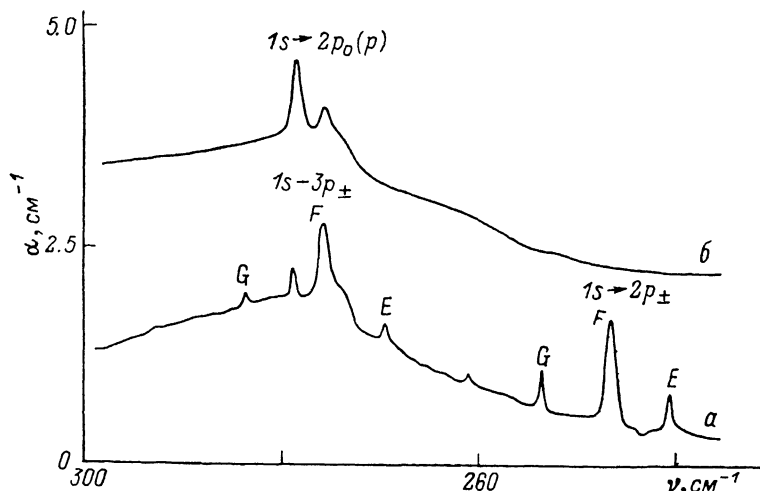


Рис. 2. Спектры поглощения МТД в Si (а) и Si : Ge (б).

лах $\sim 34.7\text{--}37.4 \text{ мэВ}$. Оптически МТД проявляются в области спектра $220\text{--}290 \text{ см}^{-1}$ в виде серии полос. Следует отметить, что мелкие ТД менее изучены, чем НТД, и оба вида ТД, по-видимому, имеют различную природу вследствие большой разницы между их энергиями ионизации, максимально достижимыми концентрациями и зависимостью от времени термообработки.

Полученные результаты представлены на рис. 2 при $N_{\text{Ge}} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и времени ТО 2 ч. Максимальная концентрация МТД значительно ниже, чем НТД, и в спектре поглощения удалось выделить только $1s\text{--}2p_{\pm}$ - и $1s\text{--}3p_{\pm}$ -переходы для трех типов (E, F, G) МТД. Видно, что в кристаллах Si : Ge по сравнению с нелегированным Si полосы поглощения, соответствующие МТД, существенно слабее по интенсивности или же вообще отсутствуют. Это дает нам возможность сделать вывод о том, что германий приводит к снижению эффективности введения ТД, образующихся и на начальных стадиях термообработки.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что легирование германием приводит к появлению ряда новых пиков поглощения ТД центров, энергетически очень близко расположенных с полосами в специально не легированном Si. Наблюдается подавление эффективности образования ТД центров, характерных для специально не легированного Si, увеличивающееся по мере роста концентрации германия при более медленном росте вновь обнаруженных центров. По-видимому, конкуренция этих двух процессов и приводит к повышению термической стабильности Si при $N_{\text{Ge}} \geq 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Список литературы

- [1] Бабицкий Ю. М., Горбачева Н. И., Гряшштейн П. М., Ильин М. А., Мильвидский М. Г., Туровский Б. М. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 7. С. 1309—1311.
- [2] Бабицкий Ю. М., Горбачева Н. И., Гряшштейн П. М., Ильин М. А., Кузнецов В. П., Мильвидский М. Г., Туровский Б. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 2. С. 307—312.

- [3] Дашевский М. Я., Докучаева А. А., Корляков Д. Н., Салманов А. Р., Хашимов Ф. Р., Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1988. Т. 24. В. 9. С. 1413—1418.
 [4] 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.
 [5] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К. // ФТП. 1986. Т. 20. В. С. 2222—2225.
 [6] Кустов В. Е., Критская Т. В., Трипачко Н. А., Шаховцов В. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. С. 313—315.
 [7] Faulkner R. A. // Phys. Rev. 1969. V. 184. N 3. P. 713—721.
 [8] Navarro H., Griffin J., Weber J., Genzel L. // Sol. St. Commun. 1986. V. 58. N 3. P. 151—155.

Институт физики АН УССР
Киев

Получено 22.01.1990
Принято к печати 31.01.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 19

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ МЫШЬЯКА В КРЕМНИЙ

Александров П. А., Баранова Е. К., Бударагин В. В., Демаков К. Д.,
Котов Е. В., Новиков А. П., Шемардов С. Г.

Решаемая в настоящее время задача создания захороненных инверсионных слоев требует разработки новых технологических режимов введения примеси и специальных методов ионного легирования. Метод высокотемпературной ионной имплантации (ВТИИ) использует повышение температуры мишени в процессе имплантации вплоть до температур, близких к температурам плавления мишени.

Впервые метод ВТИИ был применен для получения захороненного слоя при имплантации Тl в кремний [1]. Впоследствии он был также применен для легирования кремния мелкими примесями, в частности бором [2], галлием [3] и др. Во всех работах, как правило, указывается на глубокое проникновение примеси, высокую степень электрической активации и структурное совершенство получаемых слоев. В настоящей работе с целью изучения возможности получения заглубленного профиля распределения As в Si исследовалось влияние температуры

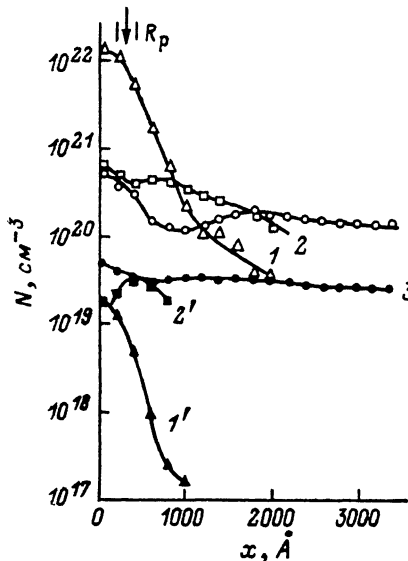


Рис. 1. Распределения внедренного (1—3) и электрически активного (1'—3') As в Si при различных температурах облучения, полученных методами ОРР и эффекта Холла.

$T, ^\circ\text{C}$: 1, 1' — 20, 2, 2' — 600, 3, 3' — 1200.

облучения ($T_{\text{обл}}$) на проникновение и электрическую активацию мышьяка а также на структуру имплантированного слоя.

Мышьяк имплантировали в монокристаллический кремний марки КДБ-4.5 (Ш) на установке ИЛУ-17/4. Энергия ионов 40 кэВ, плотность ионного тока 40 мкА/см², дозы 10^{17} и $2 \cdot 10^{17}$ ион/см². Температуры мишени при облучении изменялись в диапазоне от 20 до 1200 °С.

Профили распределения внедренной примеси исследовались методом обратного резерфордского рассеяния (ОРР) ионов He⁺ с энергией 1.5 МэВ в режима