

фекты обеих подрешеток. Наша оценка количественного состава  $M$ -центра не противоречит его атомной модели, предложенной авторами [13] на основании анализа конфигурационно-бистабильных свойств дефекта. Согласно [13], в одной конфигурации центр включает в себя 3 элементарных дефекта решетки, а другой — 5 дефектов. Окончательное формирование  $M$ -центра происходит, видимо, в результате диффузии первичных РД и последующего их объединения. На это указывают прежде всего результаты [3], согласно которым непосредственно после облучения при 78 К  $M$ -центр в образцах отсутствует и формируется только после их нагревания выше 220 К.

#### Список литературы

- [1] Levinson M., Benton J. L., Temkin H., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 4 N 11. P. 990—992.
- [2] Suski J., Sibille A., Bourgoin J. // Sol. St. Commun. 1984. V. 49. N 9. P. 875—878.
- [3] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // Деп. в ВИНТИИ АН СССР. М., 1987 № 755-B88.
- [4] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1075—1078.
- [5] Levinson M., Benton J. L., Kimerling L. C. // Phys. Rev. B. 1983. V. 27. N 10. P. 6216—6221.
- [6] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // ЖПС. 1989. Т. 50. В. 1. С. 136—138.
- [7] Levinson M., Stavola M., Benton J. L., Kimerling L. C. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28 N 10. P. 5848—5855.
- [8] Yamaguchi M., Ando K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 11. P. 5555—5562.
- [9] Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск, 1986. 254 с.
- [10] Sibille A., Suski J., Le Roux G. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. N 2. P. 1119—1121.
- [11] Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках (экспериментальные аспекты). М., 1985. 304 с.
- [12] Massarani B., Bourgoin J. C. // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. N 4. P. 2470—2474.
- [13] Wager J. P., Van Vechten J. A. // Phys. Rev. B. 1985. V. 33. N 8. P. 5251—5258.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Савченко БГУ им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 9.01.1990  
Принято к печати 31.01.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

## СТРУКТУРА ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕРМОДОНОРНЫХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Маринченко А. В., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Яшник В. И.

Несмотря на интенсивные исследования термодонорных (ТД) центров, образующихся в результате термообработки (ТО) при  $T \sim 450^\circ\text{C}$ , до сих пор однозначно не установлены ни атомная структура, ни источник их электрической активности. Поэтому одной из актуальных задач является изучение фундаментальных характеристик ТД.

В настоящей работе приведены полученные новые данные о структуре полос поглощения ТД центров в кремнии.

Исследовались кристаллы  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho \sim 30 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  Концентрации кислорода и углерода, определенные по ИК измерениям, составляли  $(8\div 9)\cdot 10^{17}$  и  $(1\div 2)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соответственно. ТО образцов проводилась при  $T \sim 450^\circ\text{C}$  от 1 до 60 ч. Исследования выполнены на инфракрасном фурье-спектрометре IFS-113v при  $T=4.2 \text{ К}$  с разрешением не хуже  $0.1 \text{ см}^{-1}$ .

Ранее [1, 2] было установлено, что низкотемпературные термодоноры (НТД) образующиеся при  $T \sim 450^\circ\text{C}$ , являются двойными гелиеподобными донорами с зарядами (0) и (+) и симметрией  $C_{2v}$ . К настоящему времени обнаружено де-

ть типов НТД (ТД1—9) с несколько различающимися энергиями ионизации  $E_I$ . Каждый из этих ТД хорошо описывается в приближении теории эффективной массы и дает в спектре поглощения серию линий, соответствующих переходам из основного  $1s$  в возбужденные состояния  $2p_0$ ,  $2p_{\pm}$ ,  $3p_0$  и т. д. В данной работе исследовалось нулевое зарядовое состояние НТД<sup>0</sup>, проявляющееся в области спектра  $520 \div 380 \text{ см}^{-1}$ .

На рис. 1, а приведен спектр поглощения НТД<sup>0</sup> после ТО в течение 55 ч, обычно приводимый в литературе. Обращают на себя внимание факт разли-

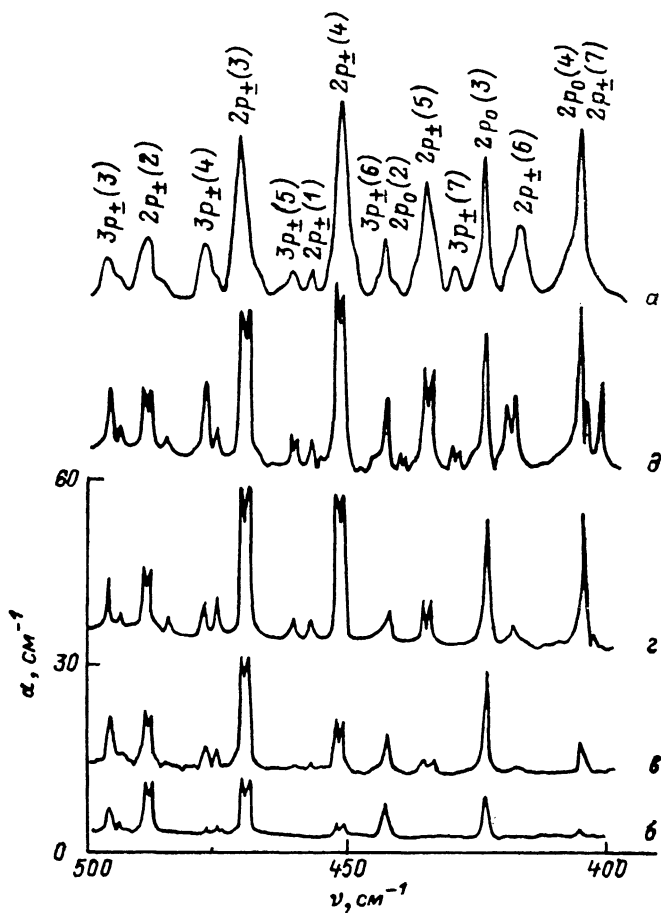


Рис. 1. Спектры поглощения НТД<sup>0</sup> в Si с разрешением 2 (а) и  $0.1 \text{ см}^{-1}$  (б—д).

Время ТО, ч: а — 55, б — 4.5, в — 10, г — 25, д — 55.

ющихся полуширин ( $H$ ) полос поглощения, соответствующих переходам в состояния  $np_0$ ,  $np_{\pm}$ , и их несимметричность. Например, для переходов  $1s \rightarrow 2p_0$ , ДЗ и ТД4) полосы поглощения имеют  $H \sim 1.0 \text{ см}^{-1}$ , а для переходов  $1s \rightarrow 2p_{\pm}$  их же ТД  $H \sim 2.5 \text{ см}^{-1}$ . Это дает возможность предположить сложную структуру наблюдаемых полос, поскольку такая полуширина не наблюдалась ни для одного из известных в кремнии гелие- или водородоподобных центров. Кроме того, ранее Ставолой с соавт. [3] с помощью пьезоспектроскопических исследований в поляризованном свете было показано, что основное и возбужденные состояния ТД центров вследствие долин-орбитального взаимодействия расщепляются на две компоненты, расстояния между которыми определяются величиной приложенного напряжения. Для состояния ТД<sup>+</sup> также расщепление наблюдалось в спектрах поглощения и при нулевом давлении и составляло  $4 \div 15 \text{ см}^{-1}$  у различных типов ТД. Авторы высказали предположение о возможном существовании расщепления и для ТД<sup>0</sup>.

С целью выявления возможной структуры полос поглощения были проведены исследования Si, подвергнутого ТО от 1 до 60 ч через небольшие интервал времени (3—5 ч), так как все наблюдаемые девять ТД центров вводятся с различной скоростью и спектр их постоянно трансформируется. Полученные данные приведены на рис. 1.

Использование повышенного разрешения и подбор оптимальных времен Т дали возможность обнаружить не наблюдавшееся ранее для данного зарядового состояния ТД<sup>0</sup> расщепление полос поглощения, соответствующих перехода из основного  $1s$  в возбужденные  $2p_{\pm}$  и для некоторых ТД в состоянии  $3p$ . Структура отдельных полос, по-видимому, связана с предсказываемым долиной орбитальным расщеплением основного и возбужденного состояний ТД центров в нулевом зарядовом состоянии. Величина расщепления изменяется от  $0.5 \text{ см}^{-1}$  для ТД1 до  $1.5 \text{ см}^{-1}$  для ТД6, что свидетельствует об изменении взаимодействия с окружающей решеткой при увеличении номера ТД.

При рассмотрении спектра, приведенного на рис. 1, б—г, помимо расщепления обращает на себя внимание факт остающейся несимметричности расщепленных полос, а также полос, соответствующих переходам  $1s \rightarrow 2p_0$ . Повышение разрешения не приводит к существенным изменениям вида спектра. Поэтому нами был проведен машинный анализ полос поглощения методом, описанным в [4]. На рис. 2 приведена картина разложения полосы, соответствующей

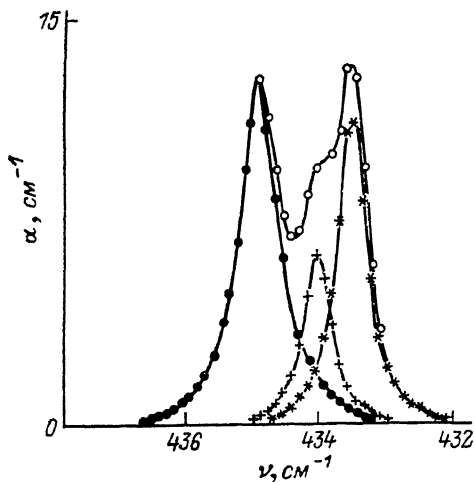


Рис. 2. Машинное разложение полосы, соответствующей переходу  $1s \rightarrow 2p_{\pm}$  для ТД5.

щей переходу  $1s \rightarrow 2p_{\pm}$  для ТД5, после ТО в течение 50 ч. Как видно, разложение дает три компонента полосы. Такая же структура наблюдается и для полос поглощения, соответствующих переходам  $1s \rightarrow 2p_{\pm}$  для ТД3—7. Слабую триплетную структуру можно выделить и для переходов  $1s \rightarrow 2p_0$ .

Известно, что НТД являются гелие(водородо)подобными, а для таких центров в кремнии долины-орбитальное взаимодействие должно приводить к расщеплению основного состояния  $1s$  не на два, а на шесть подуровней. Например для фосфора наблюдается расщепление  $1s$ -состояния на синглет ( $A_1$ ), триплет ( $T_2$ ) и дублет ( $E$ ). В оптических исследованиях в зависимости от температур можно наблюдать практически все переходы. Очевидно, что такая же картина должна наблюдаться и для ТД. Но для ТД в Si взаимодействие с долинами зоны проводимости намного слабее, чем для других центров, описываемых в приближении теории эффективной массы. Об этом свидетельствуют эксперименты с одноосным направленным давлением [3]. Например, уровни водородо-подобных доноров замещения полностью отслеживают зону проводимости, расщепляются при этом подобно зоне проводимости, а расщепление уровней ТД на порядок меньше. Соответственно, по всей вероятности, и в ненапряженном кристалле величины расщеплений уровня  $1s$  для ТД будут много меньше, чем например, для фосфора в кремнии. Это дает нам возможность сделать предположение о том, что наблюдаемое расщепление полос на три компонента, по-видимому, как раз и соответствует расщеплению основного состояния на  $A_1$ ,  $T_2$  и  $E$ . Полное снятие вырождения (расщепление  $T_2$  на триплет и  $E$  на дублет) вероятно, существует, однако оно, по всей видимости, очень мало и при данных условиях эксперимента не может быть обнаружено. Необходимо сочетание более высокого разрешения и пьезоспектроскопических исследований.

Очевидно, что аналогичная трехкомпонентная структура полос должна наблюдаться и для ТД<sup>+</sup>. Проведенный машинный анализ линий  $1s \rightarrow 2p_{\pm}$  также показал их триплетную структуру.

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 ТД<sup>0</sup> и ТД<sup>+</sup> 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  $0.1 \text{ см}^{-1}$ . Изучалось нулевое зарядовое состояние НТД, проявляющееся в области спектра  $380\text{—}520 \text{ см}^{-1}$ .