

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

О МЕХАНИЗМЕ ПЕРЕСТРОЙКИ КОМПЛЕКСОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХГерасимов А. Б., Гоготшвили М. К., Джибути З. В.,
Коноваленко Б. М.

В работах [1, 2] развивается концепция роли связывающих и разрыхляющих орбиталей и влияния их положения в зонах полупроводника на величину связи дефектов различного типа на примере радиационных дефектов в германии. Предполагалось при этом, что в запрещенной зоне расположена одна из этих орбиталей, а другая расположена в разрешенной зоне. Однако возможен случай, когда обе эти орбитали расположены в запрещенной зоне полупроводника, тогда изменение распределения электронов на этих орбиталях за счет внутрицентровых переходов будет определять процессы образования и разрушения комплексов, которым принадлежат данные орбитали.

Примером, который может иллюстрировать такую ситуацию, на наш взгляд, является поведение светочувствительных дефектов, образующихся в германии при низкотемпературном облучении.

Ранее в работах [3-7] было обнаружено и исследовано явление, выражавшееся в том, что в германии *p*-типа, а также *n*-типа, конвертированном в *p*-тип, в результате облучения при $T=77$ К быстрыми электронами и отжига в области температур $150 \div 200$ К проявляются светочувствительные дефекты, которые изменяют под действием света с $h\nu \geq 0.52$ эВ свой энергетический уровень с $E_c + 0.16$ на $E_c + 0.08$ эВ. Исследование в таких же образцах поглощения в примесной области [8-10] привело к обнаружению не связанной с фотоэффектом полосы поглощения с пиком при $h\nu = 0.52$ эВ, которая после освещения при $T=77$ К частично преобразуется в полосу поглощения с пиком при $h\nu = 0.44$ эВ. Отжиг таких дефектов происходит при температуре около 220 К. Было показано [11], что этот светочувствительный дефект является комплексом, состоящим не менее чем из двух компонент.

Проведенные нами исследования температурных зависимостей концентрации носителей облученного при 77 К германия *n*-типа при изотермическом отжиге показали, что на таких зависимостях при отжиге до 170 К обнаруживается наклон, соответствующий энергии активации $0.04 \div 0.06$ эВ. Примерно такая же величина получилась из зависимости положения уровня Ферми от интегрального флюенса быстрых электронов, на которой был виден участок в области $E_c - 0.05$ эВ. При повышении температуры отжига таких образцов, как известно, начинает формироваться новый тип дефектов, вносящий в запрещенную зону уровень $E_c - 0.21$ эВ.

Можно предположить, что внутрицентровый переход, требующий энергии 0.52 эВ, есть переход электрона с уровня $E_c + 0.16$ эВ, являющегося связывающей орбиталью светочувствительного дефекта, на антисвязывающую орбиталь, находящуюся на расстоянии 0.68 эВ от валентной зоны. Учитывая, что при $T=77$ К ширина запрещенной зоны с учетом ее уменьшения за счет экранирования электрон-дырочного взаимодействия с ионизированными примесями [12] составляет 0.73 эВ, расстояние этой антисвязывающей орбитали от дна зоны проводимости получаем равным 0.05 эВ, что совпадает с положением уровня примерно при $E_c - 0.05$ эВ, наблюдаемого в образцах, оставшихся *n*-типа после

облучения. Этот уровень, по нашим наблюдениям, отжигается в том же температурном интервале, что и светочувствительные дефекты.

Если верно предположение, что данный дефект с уровнем $E_p+0.16$ эВ в результате освещения перестраивается в дефект с уровнем $E_p+0.08$ эВ и при такой перестройке в нем могут осуществляться электронные переходы под действием ИК света с $h\nu=0.44$ эВ, то можно считать уровень $E_p+0.08$ эВ связывающей орбиталью этого перестроенного дефекта, а положение его антисвязывающей орбитали окажется на расстоянии 0.52 эВ ($0.08+0.44$) от валентной зоны или на расстоянии 0.21 эВ от дна зоны проводимости.

Обращает на себя внимание тот факт, что в этом же месте, по холловским измерениям, виден уровень $E_c-0.21$ эВ, который возникает в той же температурной области отжига, где проявляются светочувствительные дефекты. Однако в отличие от светочувствительных дефектов, которые полностью отжигаются при 220 К (исчезают полоса поглощения $h\nu=0.52$ эВ и уровень $E_p+0.16$ эВ), концентрация уровня $E_c-0.21$ эВ в процессе отжига возрастает до 320 К, затем имеет некоторую область насыщения и новый температурный участок роста до 370 К [2]. Такой характер изменения концентрации уровня $E_c-0.21$ эВ связан с тем, что в одном и том же месте запрещенной зоны расположены уровни двух разных дефектов [13].

Таким образом, из этих данных можно заключить, что квазистабильный светочувствительный дефект в состоянии, когда его связывающей орбитали соответствует уровень $E_p+0.16$ эВ, в результате внутрицентрового перехода электрона под действием света со связывающей орбитали на антисвязывающую переходит в менее стабильное состояние, у которого энергетический зазор между связывающей и антисвязывающей орбиталью уменьшен от 0.52 до 0.44 эВ.¹

При действии света с $h\nu=0.52$ эВ происходит перестройка дефекта с уровнем $E_p+0.16$ эВ, а при действии света с $h\nu=0.44$ эВ происходит разрушение этого перестроенного дефекта, о чем свидетельствуют увеличение концентрации дырок после такого освещения [14] и увеличение поглощения в области $h\nu < 0.4$ эВ.

Нагрев образцов до $T_{отж} \geq 130$ К приводит к восстановлению концентрации дефектов с уровнем $E_p+0.16$ эВ [15] и исчезновению поглощения в области $h\nu < 0.4$ эВ и полосы при $h\nu=0.44$ эВ. Это происходит вследствие перехода электрона при таком нагреве из валентной зоны на уровень $E_p+0.08$ эВ дефекта, что означает увеличение числа электронов на его связывающей орбитали и, как результат, усиление связи между компонентами комплекса, что при данной температуре нагрева позволяет компонентам приблизиться друг к другу. Тем самым восстанавливается состояние дефекта, обладающее уровнем $E_p+0.16$ эВ.

Таким образом, из вышеизложенного и результатов работ [1, 2] видно, что привлечение понятий о связывающих и антисвязывающих (разрыхляющих) орбиталях и перераспределении электронов между ними позволяет объяснить процессы образования и распада комплексов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Герасимов А. Б., Гоготшвили М. К., Коноваленко Б. М. — ФТП, 1986, т. 20, в. 4, с. 641—644.
- [2] Герасимов А. Б., Гоготшвили М. К., Коноваленко Б. М. — ФТП, 1986, т. 20, в. 11, с. 1980—1983.
- [3] Brown W. L., Augustyniak W. M., Waite T. R. — J. Appl. Phys., 1959, v. 30, p. 1258—1262.
- [4] Klontz E. E., Mc Kay J. W. — J. Phys. Soc. Japan, 1963, v. 18, p. 216—221.
- [5] Герасимов А. Б., Долидзе Н. Д., Кахидзе Н. Г., Коноваленко Б. М., Челидзе Н. В. — ФТП, 1967, т. 1, в. 7, с. 982—987.
- [6] Saito H., Fukuoka N., Tatsumi Y. — Japan. J. Appl. Phys., 1971, v. 10, p. 389—394.
- [7] Стась В. Ф., Смирнов Л. С. — ФТП, 1973, т. 7, в. 7, с. 1377—1381.
- [8] Stein H. J. — In.: Rad. Dam. Def. Semicond. Proc. Int. Conf. Reading, 1972, p. 315—320.
- [9] Morrison S. R., Newman R. S. — J. Phys. C, 1972, v. 6, N 11, p. 1981—1988.

¹ Чем меньше расщепление (энергетический зазор между связывающей и антисвязывающей орбиталями), тем меньше стабильность комплекса.

- [10] Герасимов А. Б., Долидзе Н. Д., Коноваленко Б. М., Мцхветадзе М. Г. — ФТП, 1977, т. 11, в. 7, с. 1349—1352.
- [11] Gerasimov A. B., Dolidze N. D., Donina R. M., Konovalenko B. M., Ofengeim G. L., Tsertsvadze A. A. — Phys. St. Sol. (a), 1982, v. 70, N 23, p. 23—28.
- [12] Рогачев А. А. — Автореф. канд. дис. Л., 1967.
- [13] Fukuoka N., Saito H., Tatsumi Y. — In: Int. Conf. Latt. Def. Semicond. Freiburg, 1974, p. 206—211.
- [14] Басман А. Р., Герасимов А. Б., Долидзе Н. Д., Кахидзе Н. Г., Коноваленко Б. М., Шилло А. Г. — В кн.: Радиационная физика неметаллических кристаллов. Киев, 1971, т. 3, ч. 1, с. 210—215.
- [15] Басман А. Г., Герасимов А. Б., Кахидзе Н. Г., Коноваленко Б. М., Церцвадзе А. А. — ФТП, 1973, т. 7, в. 7, с. 1347—1351.

Тбилисский государственный университет
Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 5.01.1987
Принято к печати 29.09.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ПЕРЕСТРОЙКА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В Si, СТИМУЛИРОВАННАЯ АТОМАРНЫМ ВОДОРОДОМ

Ковешников С. В., Носенко С. В., Якимов Е. Б.

В последние годы достаточно интенсивно проводятся исследования процессов пассивации водородом электрически активных центров в кристаллах полупроводников [1-7]. Экспериментально установлено, что обработка в атомарном водороде приводит к значительному уменьшению электрической активности как точечных [3, 7-9], так и линейных [4-6] дефектов кристаллической структуры кремния. Однако микроскопические механизмы этого явления окончательно не выяснены. В имеющихся в настоящее время моделях обсуждаются лишь возможности замыкания водородом ненасыщенных либо искаженных связей электрически активных дефектов [1, 5, 6] или формирования нейтральных пар акцептор—положительно заряженный водород [10].

В настоящей работе проведены исследования по влиянию обработки в атомарном водороде на свойства радиационных дефектов, образованных в кремнии в процессе предварительного облучения кристаллов высокоэнергетичными электронами. Представленные результаты показывают, что нейтрализация электрически активных центров может осуществляться путем стимулированной водородом перестройки этих дефектов.

В работе использовались кристаллы кремния, легированные фосфором ($N_D = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), на которых напылением золота формировались барьеры Шоттки или создавались диффузионные $p-n$ -переходы. Структуры облучались высокоэнергетичными ($E = 2.5 \text{ МэВ}$) электронами с дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Спектр энергетических состояний в запрещенной зоне Si исследовался методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней РСГУ [11]. Облученные и исходные структуры подвергались воздействию атомарного водорода в области послесвечения водородной плазмы. Температура обработки выбиралась ниже 150°C , чтобы исключить термический распад радиационных дефектов.

Спектр глубоких уровней, возникающих в запрещенной зоне при облучении структур высокоэнергетичными электронами, представлен на рис. 1. Анализ данного спектра показывает, что он хорошо согласуется с описанным в [12, 13] и обусловлен вакансионными комплексами $V-O$ (A -центр, $E_1 = E_c - 0.17 \text{ эВ}$), $V-V$ (дивакансия, $E_2 = E_c - 0.25$ и $E_3 = E_c - 0.40 \text{ эВ}$), $V-P$ (E -центр), его энергетическое положение практически совпадает с положением уровня дивакансии E_3 . Кроме этих дефектов, при облучении вводятся и некоторые другие электрически активные центры, имеющие, по-видимому, также вакансионную природу.