

- [10] Герасимов А. Б., Долидзе Н. Д., Коноваленко Б. М., Мцхведадзе 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.

Обработка облученных структур в атомарном водороде при низкой (вплоть до комнатной) температуре приводит к существенному изменению энергетического спектра (рис. 1, кривая 2). Прежде всего следует отметить, что в результате такой обработки в запрещенной зоне Si возникают новые энергетические уровни со значениями энергии активации $E_4 = E_c - 0.22$ и $E_5 = E_v + 0.32$ эВ. (Расположение уровня E_5 в нижней половине запрещенной зоны Si подтверждается тем обстоятельством, что соответствующий ему пик отсутствует в спектре РСГУ на барьере Шоттки, сформированном на кристалле после стравливания диффузионного p -слоя).

Вместе с появлением новых энергетических уровней наблюдаются значительное уменьшение концентрации A -центров и практически полное исчезнове-

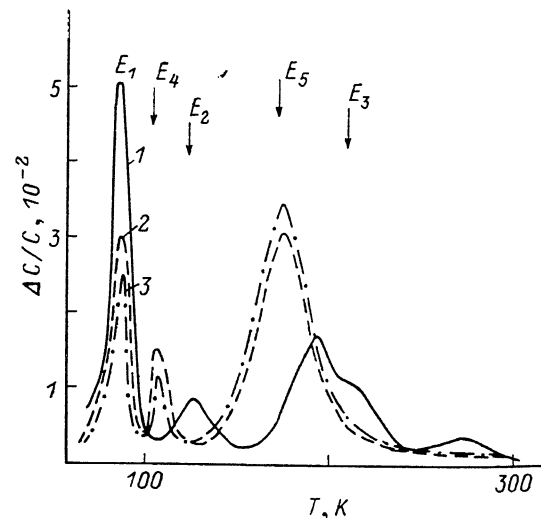


Рис. 1. Спектры РСГУ, полученные на p - n -переходах, облученных высокоэнергетическими электронами с дозой $5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ (1), обработанных после облучения в атомарном водороде при $T=100^\circ\text{C}$, 10 мин (2) и отожженных после облучения при 330°C , 1 ч (3).

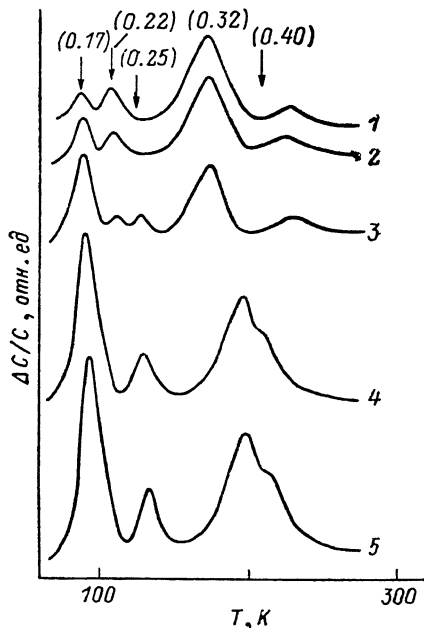


Рис. 2. Изменение спектров РСГУ облученных p - n -переходов в зависимости от расстояния между образцами и источником атомарного водорода.

Обработка производилась в одном процессе при комнатной температуре в течение 10 мин. d , см: 1 — 2, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 15, 5 — 25.

ние других радиационных дефектов. При обработке в атомарном водороде исходных, не подвергавшихся облучению структур появления новых энергетических уровней в запрещенной зоне кремния не обнаружено.

На рис. 2 представлены результаты обработки в атомарном водороде облученных структур, расположенных на различных расстояниях от границы свечения водородной плазмы. Подчеркнем, что обработка этих структур осуществлялась в одном процессе без специального подогрева. Наиболее существенные изменения спектра глубоких уровней, как видно из данного рисунка, происходят в образцах, расположенных на минимальном расстоянии от источника атомарного водорода. По мере удаления в область послесвечения, где концентрация водорода уменьшается по экспоненциальному закону [14], уменьшение концентрации радиационных дефектов и появление новых центров происходит менее эффективно.

Эти данные дают нам основание утверждать, что к наблюдаемым изменениям энергетического спектра приводит воздействие атомарного водорода. В принципе, существует вероятность разогрева кристалла за счет рекомбинации атомарного водорода [14], что может приводить к термическому распаду радиационных дефектов. Однако то обстоятельство, что на глубинах порядка 100–150 мкм от обработанной поверхности кремния энергетический спектр

радиационных дефектов остается неизменным, свидетельствует о достаточно низкой температуре кристалла, не превышающей по крайней мере 150°C , при которой отжигаются E -центры [12, 13]. Проведенные нами оценки показывают, что значения коэффициента диффузии водорода находятся в соответствии с данными, полученными экстраполированием температурной зависимости D_H в область низких температур [1]. Так, в наших экспериментах изменения энергетического спектра наблюдались в приповерхностных слоях толщиной $40\div 80$ мкм.

Было обнаружено, что термический отжиг облученных структур при $300\div 330^\circ\text{C}$ приводил к изменениям спектра, аналогичным наблюдаемым при обработке таких же структур в атомарном водороде. Согласно экспериментальным данным, полученным различными авторами с использованием методов РСГУ и ЭПР [12, 13, 15], в процессе термического отжига в интервале температур $300\div 330^\circ\text{C}$ происходит отжиг дивакансий и уменьшение концентрации $V-O$ -комплексов. При этом наблюдается возникновение новых электрически активных центров, вносящих в запрещенную зону Si уровни $E_c - 0.22$ и $E_v + 0.32$ эВ, образующихся из точечных дефектов, возникающих при распаде $V-O$ -комплексов. Это позволяет нам связывать изменения энергетического спектра облученных кремниевых структур со стимулированным водородом процессом распада радиационных дефектов и образованием вторичных вакансионных комплексов. Таким образом, полученные результаты демонстрируют не рассматриваемый ранее способ нейтрализации атомарным водородом электрически активных дефектов в кремнии. Для построения микроскопической модели взаимодействия водорода со структурными дефектами требуются дополнительные исследования.

Л и т е р а т у р а

- [1] Pearton S. J. — In: Proc. 13 Int. Conf. Def. Semicond. California, 1984, p. 737—743.
- [2] Johnson N. M., Hahn S. K., Stein H. J. — In: Proc. 14 Int. Conf. Def. Semicond. Paris, 1986, p. 585—590.
- [3] Pearton S. J. — Phys. St. Sol. (a), 1982, v. 72, N 1, p. K73—K75.
- [4] Осипьян Ю. А., Ртищев А. М., Штейман Э. А., Якимов Е. Б., Ярыкин Н. А. — ЖЭТФ, 1982, т. 82, в. 2, с. 509—514.
- [5] Kveder V. V., Labusch R., Ossipyan Yu. A. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 84, N 1, p. 149—156.
- [6] Pohoryles B. — Phys. St. Sol. (a), 1981, v. 67, N 1, p. K75—K80.
- [7] Slaoni A., Barhdadi A., Miller J. C., Siffert P. — Appl. Phys. A, 1986, v. 39, p. 159—162.
- [8] Мукашев Б. Н., Тамендаров М. Ф., Колодин Л. Г., Смирнов В. В., Токмолдин С. Ж. — ФТП, 1986, т. 20, в. 4, с. 773—775.
- [9] Benton J. L., Doherty C. J., Ferris S. D., Flamm D. L., Kimerling L. C., Leamy H. J. — Appl. Phys. Lett., 1980, v. 36, N 8, p. 670—671.
- [10] Pantelides S. T. — In: Proc. 14 Int. Conf. Def. Semicond. Paris, 1986, p. 573—578.
- [11] Miller B. L., Lang D. V., Kimerling L. C. — Ann. Rev. Mater. Sci., 1977, v. 7, p. 377—447.
- [12] Brotherton S. D., Bradley P. — J. Appl. Phys., 1982, v. 53, N 8, p. 5720—5732.
- [13] Barnes C. E. — J. Electron. Mater., 1979, v. 8, N 4, p. 437—457.
- [14] Лавренко В. А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел. Киев, 1973. 203 с.
- [15] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. — Phys. St. Sol. (a), 1977, v. 41, p. 637—647.

Институт проблем микроэлектроники
и особо чистых материалов АН СССР
Черноголовка

Получено 25.05.1987
Принято к печати 8.10.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРЫ ФРЕНКЕЛЯ В ГЕРМАНИИ

Емцев В. В., Дабагян А. В., Витовский Н. А., Машовец Т. В.

В настоящей работе получены новые данные о дозовой зависимости концентрации пар Френкеля в германии в условиях его облучения гамма-лучами ^{60}Co при 6.5 K с мощностью дозы $2 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Эти данные заставляют вер-