

УДК 621.315.592

Д. И. БРИНКЕВИЧ, Н. И. ГОРБАЧЕВА,
В. В. ПЕТРОВ, Б. М. ТУРОВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ГЕРМАНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ТЕРМОДОНОРОВ В КРЕМНИИ

Легирование кремния изовалентной примесью германия подавляет процесс генерации термодоноров (ТД) [1—4]. Учитывая, что вследствие различия в величинах ковалентных радиусов этих элементов в кристаллах возникают внутренние упругие деформации, представляет интерес определение энергетического спектра ТД в $\text{Si} < \text{Ge} >$.

Исследовался кремний с исходным удельным сопротивлением 20 Ом·см, легированный германием в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского. Концентрация германия (N_{Ge}), по данным нейтронно-активационного анализа, составляла $3 \cdot 10^{18}$ — $1,5 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$, содержание кислорода в узловом и углерода в междоузельном положениях, определенное по полосам ИК поглощения (ИКП) при 9,1 и 16,5 мкм [5],— $9,0 \cdot 10^{17}$ и $5,6 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ соответственно. Параллельно изучались контрольные образцы с идентичными исходными параметрами. Измерения эффекта Холла и проводимости выполнялись в температурном интервале 60—300 К. Спектры ИКП регистрировались на спектрофотометре Specord-75IR при 80 К. Термообработка (ТО) проводилась при 450, 650 и 800 °С. Для стимулирования процесса генерации высокотемпературных ТД часть образцов подвергалась предварительному нагреву при 450 °С.

Как установлено, примесь Ge не влияет на энергетическое положение ТД, генерируемых в кремнии при 450 °С. Во всех исследовавшихся ма-

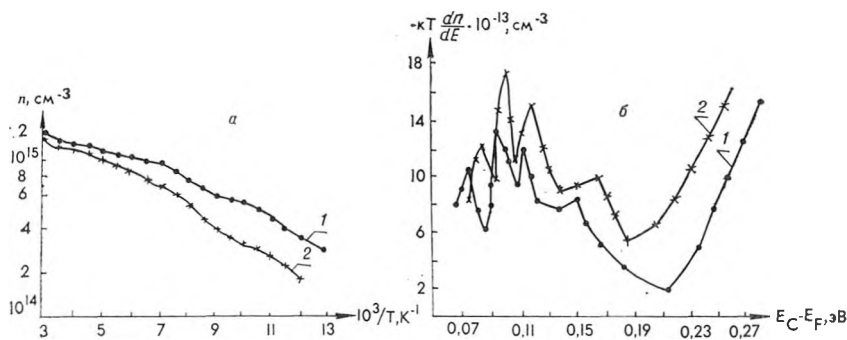


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации основных носителей заряда (а) и зависимости $kT \frac{dn}{dE} = f(E_i - E_F)$ (б) образцов, термообработанных в течение 64 ч при 650 °С. Длительность предварительной ТО 128 ч; N_{Ge} , см $^{-3}$:

1 — 0; 2 — $3 \cdot 10^{19}$

териалах наблюдались только известные кислородсодержащие ТД с уровнями $\sim E_C - 0,135$ и $E_C - 0,06$ эВ [4]. Присутствие германия не изменяло энергетического положения полос ИКП, связанных с термодонарами. При $N_{Ge} \geq 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ имело место лишь отмеченное ранее [4] уширение полос, обусловленное деформационными напряжениями, создаваемыми примесными атомами германия.

Влияние Ge на энергетическое положение ТД проявлялось в кристаллах, подвергнутых ТО при более высоких температурах. Следует отметить, что температурные зависимости холловской подвижности в термообработанных кристаллах Si и Si<Ge> были идентичны, т. е. присутствие Ge не оказывало заметного влияния на процессы рассеяния основных носителей заряда. По температурным зависимостям концентрации носителей заряда (рис. 1, а) определить энергетическое положение ТД с помощью традиционного метода, основанного на решении уравнения электронейтральности для легированного компенсированного полупроводника, не представляется возможным. В данном случае нельзя установить число действующих электрически активных центров с близкой энергией ионизации. В такой ситуации обычно пользуются дифференциальным методом [6]. На рис. 1, б представлены зависимости $-kT \frac{dn}{dE} = f(E_C - E_F)$, где k — постоянная Больцмана; T — температура; E_F — энергия, соответствующая положению уровня Ферми; E_C — энергия дна зоны проводимости. Значения $E_C - E_F$, соответствующие максимумам указанных зависимостей, позволяют определить энергетическое положение ТД. Как установлено, вид рассматриваемых зависимостей, полученных для всех концентраций Ge, идентичен. В Si<Ge> наблюдалось смещение уровней ТД к середине запрещенной зоны, причем величина сдвига возрастала с повышением энергии ионизации центров. В термообработанных при 650 °С образцах, согласно рис. 1, б, наблюдались следующие энергетические уровни ТД. В контрольном: $E_C - 0,078$; $E_C - 0,090$; $E_C - 0,115$ и $\sim E_C - 0,15$ эВ; в Si<Ge> с $N_{Ge} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ $E_C - 0,085$; $E_C - 0,098$; $E_C - 0,124$ и $\sim E_C - 0,17$ эВ.

Влияние примеси Ge на энергетическое положение ТД, вводимых в ходе термообработки при 800 °С, аналогично ранее рассмотренному случаю: имеет место смещение уровней к середине запрещенной зоны, причем его величина более чем в два раза превышает соответствующее значение для образцов, подвергнутых ТО при 650 °С (рис. 2).

Учитывая, что в кристаллах Si<Ge> примесными атомами германия создаются локальные напряжения [3], можно было бы предположить, что они определяют сдвиг уровней ТД, однако оценки, согласно [7, 8], дают средние значения гидростатического давления, необходимого для получения наблюдавшихся смещений, $\sim 1000 \text{ Т/см}^2$. Наличие таких давлений в кристаллах Si<Ge> маловероятно. Аналогичные оценки и в случае одноосного сжатия вдоль главных кристаллографических направлений дают физически нереальные значения давлений и скоростей смещения уровней.

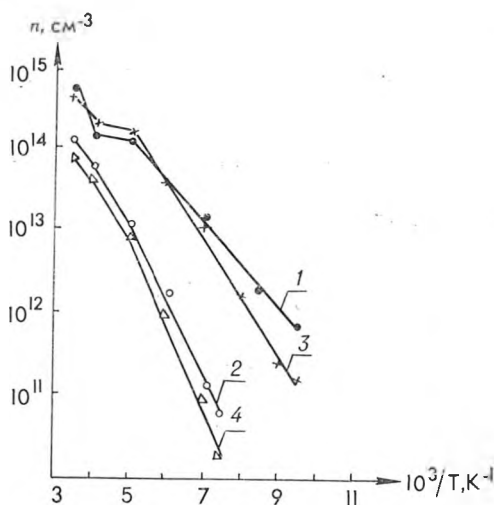


Рис. 2. Температурные зависимости концентрации основных носителей заряда образцов, термообработанных в течение 18 ч при 800 °С. Длительность предварительной ТО 350 ч, N_{Ge} , см^{-3} :

1 — 0; 2 — $3 \cdot 10^{18}$; 3 — $3 \cdot 10^{19}$; 4 — $1,5 \cdot 10^{20}$

Не исключено, что Ge входит в состав высокотемпературных термодоноров и, по всей вероятности, изменение их структуры определяет смещение соответствующих уровней.

Приведенные данные свидетельствуют о существенном влиянии примеси Ge на энергетическое положение высокотемпературных ТД. Однако анализ этого влияния весьма затруднен тем, что природа этих центров к настоящему времени не установлена. Кроме того, при ТО в диапазоне температур 600—800 °С одновременно вводится несколько видов как донорных, так и акцепторных центров [9, 10], причем энергетический спектр и концентрация ТД существенно зависят от режима термообработки.

В заключение отметим, что необходимы дополнительные исследования для изучения влияния Ge на процессы генерации высокотемпературных термодоноров в кремнии.

Авторы признательны М. И. Тарасику и В. С. Просоловичу за полезные дискуссии, В. В. Борщенскому за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

1. Бабицкий Ю. М., Горбачева Н. И., Гринштейн П. М., Ильин М. А., Мильвидский М. Г., Туровский Б. М. // ФТП. 1984. Т. 18. № 7. С. 1309.
2. Дашевский М. Я., Лымарь С. Г., Докучаева А. А., Итальянцев А. Г., Антонова И. А. // Изв. АН СССР: Неорганические материалы. 1985. Т. 21. № 11. С. 1827.
3. Бабицкий Ю. М., Гринштейн П. М., Ильин М. А., Кузнецов В. П., Мильвидский М. Г. // ФТП. 1985. Т. 19. № 11. С. 1982.
4. Бринкевич Д. И., Горбачева Н. И., Петров В. В., Ткачев В. Д., Туровский Б. М., Черный В. В. // Докл. АН БССР. 1986. Т. 30. № 4. С. 308.
5. Ильин М. А., Коварский В. Я., Орлов А. Ф. // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50. № 1. С. 24.
6. Hoffman H. J. // Appl. Phys. A. 1979. V. 19. № 2. P. 307.
7. Tayaata N., Otsuji T. // Journ. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 10. P. 4623.
8. Пол В., Варшауэр Д. Твердые тела под высоким давлением. М., 1966.
9. Глинчук К. Д., Литовченко Н. М., Меркер Р. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника: Республ. междуведомств. сб. Киев, 1977. Т. 25. С. 17.
10. Schmalz K., Gaworzewski P. // Phys. status solidi. 1981. V. A64. № 1. P. 151.

Поступила в редакцию 22.09.86.

УДК 621.315.592

А. А. ПАТРИН

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНОЙ ДИФФУЗИИ ПРИМЕСИ В ПРОФИЛИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ

Профилированный кремний (ПК) является перспективным материалом для изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии в электрическую. Кристаллы ПК характеризуются, как правило, наличием когерентных и малоугловых границ, блоков и других дефектов, вытянутых вдоль направления роста [1, 2]. Эти дефекты могут влиять на процессы диффузии примеси при формировании n — p -переходов и в конечном счете — на характеристики фотопреобразователей, изготовленных на основе ПК.

В настоящей работе решена задача визуализации фронта неоднородной диффузии примеси в профилированный кремний. Использован метод анализа в режиме наведенного электронным лучом тока РЭМ изображений плоскостей прецизионных клиньев в области их пересечений с плоскостью n — p -перехода. Эксперименты выполнены на образцах ПК, выращенных по методу Степанова, аналогично [3], в виде тонкостенных замкнутых профилей шестигранной формы с шириной грани 37 мм. Образцы ПК толщиной 0,4—0,5 мм имели p -тип проводимости и удельное