

зировать результаты экспериментов по модификации электрофизических свойств органических материалов ионными пучками.

Во-вторых, для получения высокопроводящих органических слоев ионной бомбардировкой полимеров лучше использовать ионы не очень больших масс, что приводит к улучшению качества поверхности пленки.

1. Schiestel S., Ensinger W., Wolf G. K. // NIM. 1994. В. 91. P. 473.
2. Brunner S., Ruck D. M., Frank W. F. X. // Ibid. В. 89. P. 373.
3. Biersack J. P., Kallweit R. // Ibid. 1990. В. 46. №-1-4. P. 309.
4. Loh I. H., Oliver R. W., Sioshansi P. // Ibid. 1988. В. 34. P. 337.
5. Davenas J., Boiteux G., Xu X. L. // Ibid. В. 32. P. 136.
6. Okada T., Nishijima S., Katagiri K. et al. // Ibid. 1989. В. 37/38. P. 720.
7. Григорьев В. В., Комаров Ф. Ф., Леонтьев А. В. и др. // Вестн АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1991. № 1. С. 80.
8. Ostretsov E. E., Leontyev A. V., Akimov A. N. // In the Book: Ion Implantation and Ion Beam Equipment. World Sci. 1991. P. 406.
9. Леонтьев А. В., Акимов А. Н., Григорьев В. В. // Физика и техника плазмы. Мн., 1994. С. 232.
10. Комаров Ф. Ф., Леонтьев А. В., Острецов Е. Ф., Туровец О. Л. // Микроэлектроника. 1992. Т. 21. Вып. 1. С. 75.
11. Leontyev A. V., Ostretsov E. F., Grigoryev V. V., Komarov F. F. // NIM. 1992. В. 65. P. 438.
12. Venkatesan T., Feldman M., Wikens B. J., Willenbrak W. E. // J. Appl. Phys. 1884. V. 55(4). P. 1212.

Поступила в редакцию 27.02.95.

УДК 621.315.592

О. П. ЕРМОЛАЕВ, А. Т. РАМДЕ (БУРКИНА ФАСО), С. А. ХАКИМ (ЕГИПЕТ)

## ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ОБЛУЧЕННОГО ГАММА-КВАНТАМИ ГЕРМАНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ГАЛЛИЕМ

The influence of high  $\gamma$ -ray doses in gallium-doped germanium was investigated in the 1.5 — 300 K range by measuring the electrical properties. It was concluded that introduction of donor defects played the main role in the removal of holes from the valence band as a result of  $\gamma$ -ray irradiation.

Известно, что германий, легированный примесями 3-й группы, обладает большой устойчивостью к гамма-облучению при 300 К. Считается [1], что радиационная стойкость германия р-типа при 300 К, по-видимому, обусловлена тем, что комплексы, включающие акцепторы 3-й группы, либо не образуются, либо при этой температуре нестабильны. В то же время в некоторых работах (см., например, [2]) отмечалось, что атомы галлия могут взаимодействовать с собственными дефектами структуры. Таким образом, в настоящее время отсутствует единая точка зрения на поведение примесей 3-й группы при облучении.

Обычно выводы о поведении примесей при облучении делаются из исследования температурных зависимостей коэффициента Холла (ТЗКХ), интерпретация которых в р-германии неоднозначна по ряду причин: зависимость холл-фактора от величины магнитного поля и концентрации акцепторов [3], неопределенность в выборе величины фактора вырождения примесей [4] и др. Известно, что при низких температурах проводимость полупроводников носит прыжковый характер и является весьма чувствительной функцией концентрации основной легирующей примеси и степени компенсации [5]. В работе [6] была показана эффективность изучения радиационных дефектов (РД) в германии п-типа путем исследования температурных зависимостей прыжковой проводимости (ТЗПП). Основная цель настоящей работы заключалась в изучении процесса дефектообразования и взаимодействия примесей 3-й группы с РД в р-германии, облученном гамма-квантами, исследованием ТЗПП.

Исследовались образцы германия с концентрацией галлия  $N_{\text{Ga}} = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , облученные  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  при  $T \approx 350 \text{ К}$  дозами  $\Phi = 2 \cdot 10^{18} \pm 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Измерения удельного сопротивления проводились

в интервале температур 1,5—300 К. Концентрация химических акцепторов ( $N_A$ ) определялась из измерений ТЗПП. Компенсация образцов после  $\gamma$ -облучения определялась из измерений коэффициента Холла при 77 К.

Удельное сопротивление полупроводников в области прыжковой проводимости можно охарактеризовать двумя основными параметрами — энергией активации  $\epsilon_3$  и коэффициентом  $\rho_3$  [5]:

$$\rho = \rho_3 \exp(\epsilon_3/kT), \quad \rho_3 = \rho_{03} \exp\left\{1,73/(N_A^{1/3}\alpha)\right\}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — боровский радиус примеси,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\rho_{03}$  — коэффициент, степенным образом зависящий от концентрации акцепторов  $N_A$ .

Экспериментально  $\epsilon_3$  определяется по наклону прямой зависимости  $\lg \rho = f(1/T)$  в низкотемпературной области, а величина  $\rho_3$  — экстраполяцией низкотемпературных прямолинейных участков к бесконечной температуре, т. е.  $1/T = 0$ .

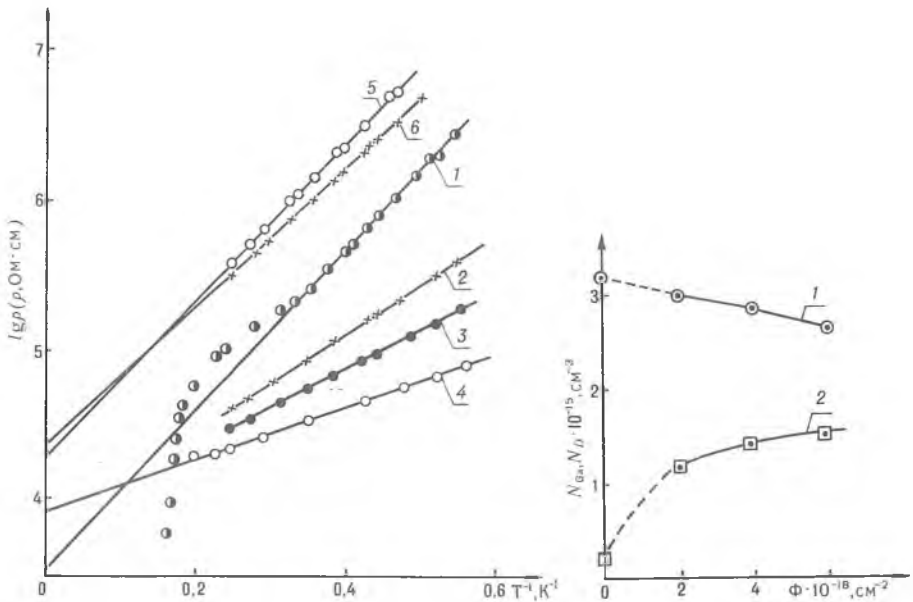


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления германия, облученного различными дозами  $\gamma$ -квантов ( $\Phi$ ):

1—4 — германий, легированный галлием; 5, 6 — германий, «легированный» РД.  $\Phi \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-2}$ : 1—0, 2—2, 3—4, 4—6, 5—0, 6—4.

Рис. 2. Дозные зависимости концентрации акцепторов Ga (1) и радиационных доноров (2) для образцов Ge, легированных Ga, облученных  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ .

Измерение удельного сопротивления в области прыжковой проводимости (низкотемпературные участки кривых на рис. 1) показало, что как энергия активации  $\epsilon_3$ , так и коэффициент  $\rho_3$  сильно изменяются в результате облучения:  $\epsilon_3$  уменьшается, а  $\rho_3$  увеличивается с возрастанием потока  $\gamma$ -квантов.

Энергия активации  $\epsilon_3$ , согласно [5], имеет вид:

$$\epsilon_3 = (e^2 N_A^{1/3} / \kappa) F(K), \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\kappa$  — диэлектрическая проницаемость,  $F(K)$  — функция степени компенсации  $K$ .

Согласно (2), уменьшение энергии активации  $\epsilon_3$  может быть связано с увеличением степени компенсации и уменьшением концентрации акцепторов  $N_A$ . Коэффициент  $\rho_3$ , согласно (1), от компенсации не зависит и его рост в результате облучения может быть связан только с уменьшением  $N_A$ .

На рис. 1 (кривые 5, 6) для сравнения показаны ТЗПП образца германия, «легированного» РД с мелкими уровнями [7] и облученного дозой  $\gamma$ -квантов  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Видно, что изменения прыжковых параметров  $\epsilon_3$  и  $\rho_3$  гораздо более слабы, чем у германия, легированного галлием и, следовательно, изменения концентраций «легирующих» дефектов и степени компенсации также меньше. Это свидетельствует о том, что радиационная стойкость германия, «легированного» РД, выше, чем германия с галлием.

Таким образом, изменения параметров прыжковой проводимости, а также концентрации дырок свидетельствуют об уменьшении концентрации акцепторов (Ga) и увеличении компенсации в результате облучения.

Из найденных экспериментально значений  $\rho_3$  с учетом того, что боровский радиус в  $\text{Ge}\langle\text{Ga}\rangle$  равен  $90 \text{ \AA}$  [5], из зависимости (1) определялась концентрация акцепторов  $N_{\text{Ga}}$  после каждой дозы облучения. Концентрация компенсирующих доноров находилась из измерений концентрации дырок при  $77 \text{ K}$ :  $p_{77} = N_{\text{Ga}} - N_{\text{D}}$ . Отметим, что для полученных таким способом значений  $N_{\text{Ga}}$  и  $N_{\text{D}}$  наблюдается удовлетворительное согласие между экспериментально определенными значениями  $\epsilon_3$  и рассчитанными по (2).

На рис. 2 представлены дозные зависимости изменения концентраций электрически активных атомов галлия (в узлах решетки) и компенсирующих доноров. Видно, что при облучении концентрация электрически активного галлия уменьшается. Однако основным процессом, происходящим при облучении, является появление доноров радиационного происхождения, уровни которых, по-видимому, расположены вблизи середины запрещенной зоны. Сечение этого процесса на начальном этапе облучения составляет  $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ .

Считается, что образующиеся в результате  $\gamma$ -облучения Ge при  $T = 300 \text{ K}$  вакансии и междоузельные атомы обладают большой подвижностью. Низкая эффективность взаимодействия примесей 3-й группы с вакансиями в Ge при комнатной температуре связывается [1] с тем, что вакансии не имеет донорного состояния в запрещенной зоне. Однако предполагается наличие глубокого донорного состояния у междоузельного атома Ge [1].

Уменьшение концентрации электрически активных атомов Ga можно объяснить тем, что они вытесняются из узлов в междоузлия собственных междоузельными атомами Ge. В результате междоузельные атомы Ga не проявляют электрической активности как акцепторы. В литературе отсутствуют достоверные данные о возможных зарядовых состояниях междоузельного атома Ga в Ge. Определенное нами сечение процесса удаления акцепторов Ga в  $\approx 3$  раза меньше сечения образования радиационных доноров. Это позволяет предположить, что междоузельные атомы Ga являются электрически нейтральными, а возникновение радиационных доноров связано с собственными междоузельными атомами Ge.

Отметим, что авторы [2] из исследования ТЗКХ наблюдали удаление акцепторов Ga как основной результат  $\gamma$ -облучения при  $300 \text{ K}$ . То, что в наших опытах основным результатом является введение радиационных доноров, может быть связано с более высокой температурой облучения.

Возможным альтернативным объяснением полученных результатов может быть образование заряженных (с зарядом  $-3$ ) комплексов дефектов с участием Ga. Однако, учитывая большое численное значение предполагаемого зарядового состояния, и то, что комплексы с участием атомов 3-й группы нестабильны при  $300 \text{ K}$  (см., например, [1]), следует считать их образование маловероятным.

Таким образом, в настоящей работе при изучении ТЗПП установлено, что в результате  $\gamma$ -облучения происходит уменьшение концентрации акцепторов Ga, однако основным процессом является введение радиационных доноров.

1. Е м ц е в В. В., М а ш о в е ц Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981.

2. В а с и л ь е в а Е. Д., Е м ц е в В. В., М а ш о в е ц Т. В. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 1. С. 35.

3. А л е к с е е н к о М. В., А н д р е е в А. Г., З а б р о д с к и й А. Г., П о п о в В. В. // Там же. 1988. Т. 22. Вып. 1. С. 140.

4. Блекмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках. М., 1969.  
 5. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979.  
 6. Добрего В. П., Ермолаев О. П. // ФТП. 1977. Т. 11. Вып. 10. С. 1897.  
 7. Добрего В. П., Ермолаев О. П., Ткачев В. Д. // Physica status solidi (a). 1977. V. 44. № 2. P. 435.

Поступила в редакцию 10.04.95.

УДК 621.382.2.029.65.

В. И. ШАЛАТОНИН

## МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ХАОТИЧЕСКИХ КВЧ КОЛЕБАНИЙ В ДИОДАХ ГАННА

Possible mechanism of complicated nonlinear generation dynamics in transferred-electron device oscillators, leading to simultaneous generation of chaotic extremely high-frequency signal and periodic sequence in high-frequency band, is shown theoretically and experimentally.

В настоящей работе в развитие [1—3] приведены результаты экспериментов и численного моделирования динамики установления автоколебаний в диодах Ганна (ДГ) диапазона крайне высоких частот (КВЧ). Сделана попытка объяснить механизм нелинейного взаимодействия колебаний, приводящий к полученным натурным и численным результатам.

Эксперименты проводились с волноводным генератором Ганна сечением  $5,2 \times 2,6$  мм на основе дискового резонатора с использованием ДГ 3А741 [4]. Подстройка мощности и частоты производилась с помощью подвижного короткозамыкающего поршня. Установлено, что при  $U_p < U_0 < U_b$  ( $U_p$  — пороговое напряжение ДГ,  $U_b$  — напряжение включения, т. е. перехода в одночастотный режим генерации) на выходе генератора формируются шумоподобные колебания в диапазоне 30—45 ГГц, модулированные по амплитуде высокочастотными (ВЧ) периодическими импульсными автоколебаниями (1—20 МГц) с длительностью импульсов 10—25 нс. Переход в одночастотный режим при увеличении  $U_0$  до значения  $U_b$  ( $U_b - 2,5 U_p$ ) иногда предварялся формированием из шумового КВЧ спектра нескольких спектральных линий в этом же диапазоне, разнесенных по частоте на  $\Delta F$ . Одновременно с этим изменялась и ВЧ компонента спектра: сигнал на выходе детекторной секции приближался по форме к гармоническому с частотой  $\Delta F$ .

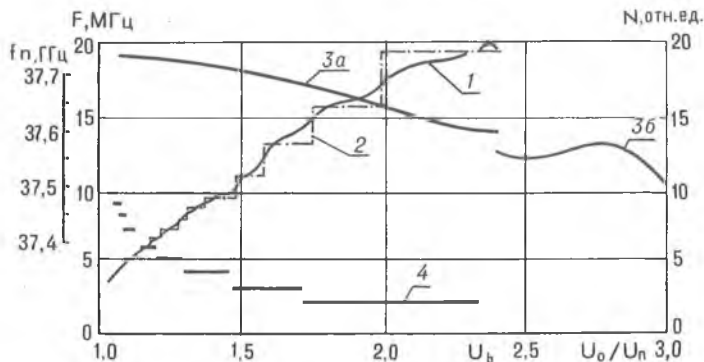


Рис. 1. Динамика автоколебательных процессов в генераторе КВЧ на диоде Ганна:

1, 3, 4 — эксперимент; 2 — расчет

Увеличение напряжения питания от величины  $U_p$  и выше сопровождалось ростом частоты повторения импульсов, изменением их формы и длительности, уменьшением количества спектральных составляющих. При этом изменялась и форма огибающей шумоподобного спектра КВЧ сигнала с постепенным уменьшением его ширины. Зависимость, характеризующая увеличение частоты импульсов, содержит ряд наклонных «ступенек» с резко увеличенной скоростью возрастания частоты между ними (рис. 1, кривая 1). Одновременно изменяется и количество  $N$  спектральных составляющих (рис. 1, кривая 4), образуя зависимость,