

На рис. 3 представлен увеличенный фрагмент интерферограммы колебаний диафрагмы на частоте 11800 Гц, из которого можно определить амплитуду колебаний отдельных ячеек. На амплитудно-частотной характеристике среднечастотной головки громкоговорителя в этой области частот наблюдается увеличение неравномерности и нерегулярности (узкие и высокие пики-провалы).

Для широкополосной головки описанные явления аналогичны, но возникают в других частотных областях.

Обнаруженные нами колебания отдельных ячеек диафрагмы несомненно влияют на амплитудно-частотные характеристики сотовых диафрагм, особенно в области высоких частот.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Романова Т.П. В сб.: Повышение конкурентноспособности радиоэлектронной аппаратуры. Таллин: ВАЛТУС. 1985. С. 95-162.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
20 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 12  
05; 12

26 июня 1989 г.

#### КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ВАКАНСИЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА КАРБИДА КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

А.И. Г и р к а, А.Ю. Д и д ы к,  
А.Д. М о к р у ш и н, Е.Н. М о х о в,  
С.В. С в и р и д а, А.В. Ш и ш к и н,  
В.Г. Ш м а р о в о з

Легированию полупроводников путем ионной имплантации сопутствует введение радиационных дефектов, которые могут существенно влиять на характеристики полупроводниковых приборов. При разработке микроэлектронной технологии с использованием ионной имплантации требуется информация о физической природе возникающих дефектов и их поведении в процессе термического отжига. Следует также отметить и самостоятельное значение исследований дефектов, возникающих при прохождении тяжелых заряженных частиц через различные материалы [1].

В данной работе представлены результаты позитронных исследований структурных дефектов вакансионного типа, образующихся в монокристаллах карбида кремния ( $SiC$ ) при облучении тяжелыми ионами, а также эволюции этих дефектов в процессе изохронного

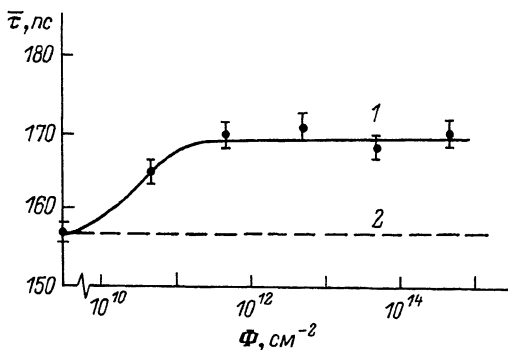


Рис. 1. Зависимость среднего времени жизни позитронов  $\bar{\tau}$  от флюенса ионов ксенона  $\Phi$  (1); 2 -  $\bar{\tau}$  для необлученного  $\text{SiC}$ .

отжига. Объектами исследования служили монокристаллы  $\text{SiC}$  по-литипа 6H, выращенные методом Лели при температуре 2600–2700 °C. Образцы имели  $n$ -тип проводимости за счет легирования азотом до концентраций  $N_D - N_A = (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Облучение ионами ксенона с энергией  $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$  проводилось на ускорителе ионов У-300 лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (г. Дубна) при температуре не выше 50 °C. Диапазон флюенсов облучения  $5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Изохронный отжиг ( $t_{\alpha} = 10 \text{ мин}$  шаг 100 °C) облученных образцов  $\text{SiC}$  осуществлялся на воздухе или в атмосфере чистого аргона в интервале температур  $T_a = 100 - 2000 \text{ °C}$ . Сведения о характеристиках установки для измерения времени жизни позитронов, а также рассмотрение методических вопросов, связанных с анализом аннигиляционных параметров в случае облучения ионами с энергией  $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$  подробно изложены в работе [2].

Известно [3], что при ионном облучении кристалла вдоль трека внедряемого иона образуются разупорядоченные области (РО), характеризующиеся высокой концентрацией дефектов. Захват позитронов этими дефектами и приводит к монотонному увеличению среднего времени жизни позитронов  $\bar{\tau}$  с ростом флюенса тяжелых ионов (см. рис. 1). При флюенсе  $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$   $\bar{\tau}$  достигает насыщения и в пределах экспериментальной ошибки не изменяется с ростом флюенса до  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Такое поведение среднего времени жизни позитронов в диапазоне флюенсов  $5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{14}$  позволяет считать, что практически все термализовавшиеся в поврежденном приповерхностном слое позитроны захватываются в вакансионные дефекты, формирующие РО, а среднее расстояние между разупорядоченными областями уже при флюенсе  $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  не превышает диффузионной длины позитронов в  $\text{SiC}$ , равной  $\sim 120 \text{ нм}$ . Компонентный анализ спектров времени жизни позитронов позволил выделить долгоживущую компоненту  $\tau_{\alpha} = (220 - 230) \text{ пс}$ , интенсивность которой составила  $\sim (13-17)\%$ . Это значение  $\tau_{\alpha}$  соответствует аннигиляции позитронов в дивакансиях

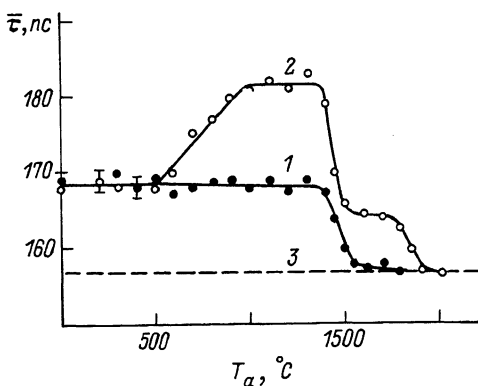


Рис. 2. Зависимости среднего времени жизни позитронов  $\bar{\tau}$  от температуры  $T_\alpha$  изохронного отжига облученных ионами ксенона образцов карбида кремния: 1 – образцы  $SiC$ , облученные до флюенсов  $\Phi \leq 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; 2 – образцы  $SiC$ , облученные до флюенсов  $\Phi \geq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 3 – необлученные образцы  $SiC$ .

или комплексах вакансия–примесный атом. Сравнительно небольшая интенсивность долгоживущей компоненты  $I_\alpha \approx 15\%$  в облученном ионами  $SiC$  обусловлена малостью толщины дефектного слоя по сравнению с величиной среднего пробега позитронов от изотопа  $^{22}Na$ . Отсюда, согласно [2], можно оценить толщину дефектного слоя, которая составляет  $\sim 14$  мкм и совпадает с длиной пробега ионов ксенона с энергией  $\sim 1$  МэВ/нуклон, рассчитанной по программе EДЕР-1 [4].

Зависимости среднего времени жизни позитронов от температуры изохронного отжига облученных до различных флюенсов образцов  $SiC$  приведены на рис. 2. Хорошо видно, что имеют место два типа кривых изохронного отжига: первый характеризуется одной стадией отжига радиационных дефектов в диапазоне  $T_\alpha = 1400\text{--}1600$  °С (с энергией активации миграции дефектов  $2.2 \pm 0.3$  эВ), второй имеет более сложную зависимость  $\tau = \tau^2(T_\alpha)$ . Здесь наблюдаются стадия отрицательного отжига (увеличение  $\bar{\tau}$ ) в интервале  $T_\alpha = 500\text{--}1000$  °С и две высокотемпературные стадии изменения  $\bar{\tau}$  (диапазоны  $T = 1400\text{--}1500$  и  $1750\text{--}1950$  °С). Наличие одной стадии отжига для образцов  $SiC$ , облученных дозой менее  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , свидетельствует о том, что позитроны аннигилируют преимущественно в вакансионных дефектах одного типа. Как было упомянуто выше, этими дефектами являются дивакансии или комплексы вакансия–примесный атом. Наблюдаемое на рис. 1 насыщение  $\bar{\tau}$  при  $\Phi > 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  обусловлено захватом всех позитронов в дефекты, однако концентрация таких дефектов продолжает расти с дальнейшим повышением дозы облучения и достигает некоего „критического“ значения при флюенсе  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . При этом,

как это видно из рис. 2, становится возможной кластеризация вакансий в процессе отжига при  $T = 500-1000$  °С, причем процесс кластеризации вакансий, по-видимому, связан с присутствием в образцах SiC примесей (азот, кислород). Две высокотемпературные стадии отжига связаны с диссоциацией вакансионных кластеров.

Таким образом, в данной работе показано, что облучение монокристаллов карбида кремния ионами  $^{120}\text{Xe}$  с энергией  $\sim 1$  МэВ/нуклон приводит к образованию вакансионных дефектов, сосредоточенных внутри приповерхностного слоя толщиной  $\sim 14$  мкм. Существует критический флюенс ионов ксенона, равный  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$ , начиная с которого облученная система в процессе отжига становится неустойчивой, что приводит к кластеризации первичных вакансий в диапазоне температур 500–1000 °С. Такие вакансионные кластеры могут вызывать деградацию электронных свойств приборов на основе карбида кремния. Устранение подобных дефектов требует проведения термообработки при температурах порядка 2000 °С.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц. // Вестник АН СССР. 1980. № 12. С. 28–45.
- [2] Гирка А.И., Клопиков Е.Б., Скуратов В.А., Шишкин А.В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 2. С. 328–331.
- [3] Бару В.Г., Волькенштейн Ф.Ф. Влияние облучения на поверхностные свойства полупроводников. М.: Наука, 1978. 288 с.
- [4] Davison С.М., Manning I. // Comput. Phys. Commun. 1986. N 42. P. 137.

Московский  
инженерно-физический  
институт

Поступило в Редакцию  
1 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 12  
11

26 июня 1989 г.

#### КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПЛЕНОК $\dot{\zeta}$ -УГЛЕРОДА ПРИ ОТЖИГЕ

А.В. С т а н и ш е в с к и й

Процессы графитизации и кристаллизации при термообработке аморфных пленок углерода, полученных осаждением атомарных и молекулярных потоков углерода в вакууме и имеющих в основном графитоподобную структуру, достаточно хорошо изучены, однако при отжиге пленок так называемого  $\dot{\zeta}$ -углерода, полученных конденсацией частиц с повышенной энергией, в некоторых случаях имеют место структурные изменения, которые нельзя объяснить в рамках известных моделей [1, 2].