

- [1] Рудаков Л.И. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. В. 1. С. 72-77.
- [2] Goudsmit S., Saunderson J. L. // Phys. Rev. 1940. V. 57. N 1. P. 24-29.

Институт сильноточной
электроники
СО АН СССР, Томск

Поступило в Редакцию
20 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

07; 09

НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ
МАТРИЦА-ПРИМЕСЬ-ВАКАНСИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ
МЕТОДОМ АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНОВ

А.И. Гирка, А.Д. Мокрушин,
Е.Н. Мохов, В.М. Осадчиев,
С.В. Свирида, А.В. Шишкин

В настоящей работе приведены результаты позитронных исследований фазовых превращений в многокомпонентной системе карбид кремния-азот-вакансии, являющихся результатом эволюции радиационных дефектов в процессе термического отжига облученных кристаллов карбида кремния (*Sic*). Выявлена принципиальная роль примесного азота при кластеризации вакансионных дефектов. Подобные фазовые превращения должны быть присущи различным многокомпонентным системам.

Объектами исследований служили монокристаллы полупроводникового карбида кремния политипа 6H, выращенные по методу Лели при температурах 2600-2700 °С. Образцы имели p- или n-тип проводимости за счет легирования азотом или бором и алюминием соответственно. Диапазон концентраций примесных атомов: $2 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Облучение кристаллов *Sic* осуществлялось реакторными нейтронами [1, 2], тяжелыми ионами ксенона [3] и быстрыми электронами в широком диапазоне флюенсов. Методика измерения времени жизни позитронов и обработки экспериментальных данных, а также условия проведения изохронного отжига облученных образцов, приведены в [2, 3].

Зависимости среднего времени жизни позитронов $\bar{\tau}$ от температуры T_a изохронного отжига приведены на рис. 1 и 2. Хорошо видно, что имеют место два типа кривых изохронного отжига: первый характеризуется только одной высокотемпературной стадией отжига радиационных дефектов (в диапазоне температур $\Delta T_a = 1300 -$

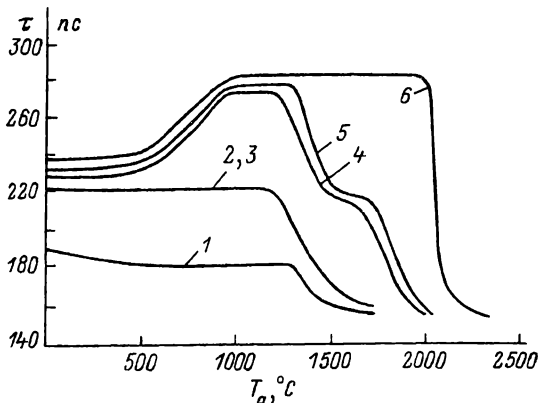


Рис. 1. Зависимости среднего времени жизни позитронов $\bar{\tau}$ от температуры T_a изохронного отжига образцов, облученных нейтронами и ионами ксенона: 1 - $\Phi_n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 2 - $\Phi_n = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, 3 - $\Phi_i \leq 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 4 - $\Phi_n = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, 5 - $\Phi_i \geq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, 6 - $\Phi_n = 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Экспериментальная ошибка в определении $\bar{\tau}$ составляет на кривых 1, 2, 4 и 6 - ± 2 пс; на кривых 3, 5 - ± 10 пс.

1600 °C - кривые 1, 2 и 3 на рис. 1 и кривые 1 и 2 на рис. 2), второй имеет более сложную зависимость $\bar{\tau}$ от T_a . Главная особенность кривых второго типа состоит в наличии стадии "отрицательного" отжига (возрастания $\bar{\tau}$) в интервале $\Delta T_a = 500-1000$ °C для нейтронного и ионного воздействий и $\Delta T_a = 1000-1200$ °C в случае электронного облучения. Важно отметить, что стадия "отрицательного" отжига наблюдается лишь в образцах p-типа проводимости с достаточно высоким уровнем легирования ($N_D - N_A \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и облученных до сравнительно высокого флюенса ($\Phi_n \geq 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_i \geq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_e \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) высокоэнергетических частиц.

Наличие стадии "отрицательного" отжига несомненно связано с образованием кластеров, состоящих из 5-8 и более чем 20 вакансий для нейтронно- и ионно-облученных кристаллов SiC [1, 2]. В процессе термического отжига облученных электронами образцов образуются кластеры меньшего размера. Однако качественно похожий характер кривых отжига для всех видов излучения позволяет предполагать, что процесс кластеризации имеет единую природу во всех наблюдаемых случаях. Размеры кластеров и их изменение в процессе термического отжига определяют параметр порядка фазового состояния гетерогенной системы матрица-примесь-вакансионные дефекты.

Отсутствие стадии "отрицательного" отжига в электронно- и нейтронно-облученных до больших доз образцах SiC p-типа свидетельствует о принципиальной роли примесного азота в процессе

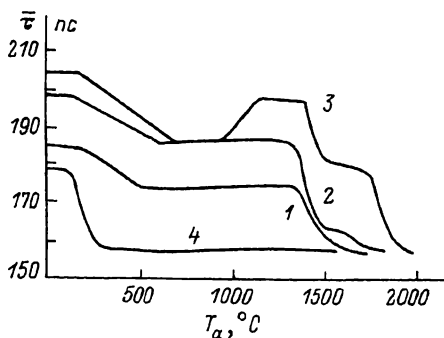


Рис. 2. Зависимости среднего времени жизни позитронов $\bar{\tau}$ от температуры T_α изохронного отжига электронно-облученных образцов: 1 - для образцов, легированных до $N_D - N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и облученных до флюенса $\Phi_e = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 2 - для образцов, легированных до $N_D - N_A = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и облученных до флюенса $\Phi_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$; 3 - для образцов, легированных до $N_D - N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и облученных до флюенса $\Phi_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$; 4 - для образцов, легированных до $N_A - N_D = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и облученных до флюенса $\Phi_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Экспериментальная ошибка в определении $\bar{\tau}$ составляет ± 2 пс.

кластеризации вакансионных дефектов. Для осуществления в процессе отжига кластеризации необходимо, чтобы концентрация азота в SiC п-типа превышала некоторое критическое ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) значение (сравните кривые 2 и 3 на рис. 2). Кроме того, требуется и достаточно большая доза облучения (сравните кривые 1 и 3 на рис. 2). На основании полученных нами экспериментальных данных можно предположить, что исходными структурами, необходимыми для процесса кластерообразования, служат комплексы, состоящие из примесных атомов азота и вакансий, а в случае нейтронного и ионного воздействий дополнительно и дивакансий [2].

Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в процессе термического отжига облученных до высоких флюенсов и легированных до больших концентраций азота кристаллов карбида кремния возникают критические ситуации, приводящие к неустойчивости системы матрица-примесь-радиационные вакансии. Результатом развития этой неустойчивости являются фазовые превращения - образование и эволюция вакансионных кластеров, причем размеры, концентрация и термическая устойчивость кластеров зависят от вида и флюенса облучения. Такого рода фазовые превращения должны быть присущи различным многокомпонентным системам, содержащим вакансии и примесные атомы. Как оказывается, они наблюдались в матрицах металлов, сплавов, полупроводников.

Например, в работе [4] при одинаковой для всех исследованных образцов $Al - Li$ концентрации закалочных вакансий обнаружена критическая концентрация ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) атомов лития, когда в процессе термического отжига имеет место „отрицательная“ стадия -

образование вакансионных кластеров. В данном случае атомы лития играют роль, аналогичную примесному азоту в карбиде кремния и их взаимодействие с закалочными вакансиями приводит к фазовым превращениям в системе алюминий-литий-вакансии, выражающимся в кластеризации литий-вакансионных комплексов в процессе отжига. В работе [5] обнаружено, что уровень легирования теллуром имеет решающее значение в характере поведения облученного быстрыми электронами арсенида галлия. При больших концентрациях теллура ($\sim 4.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в процессе изохронного отжига наблюдалась стадия „отрицательного” отжига. Согласно нашим представлениям, эта стадия связана с образованием вакансионных кластеров и соответствует фазовому превращению в системе арсенид галлия-теллур-радиационные вакансии.

Развитие неустойчивости в металлах, пересыщенных вакансиями, с образованием новой фазы – вакансионных кластеров – теоретически рассматривалось в ряде работ (см., например, [6]). Как показано в [7], присутствие в облученном материале атомов примеси при определенных условиях может привести к тому, что взаимодействие „газа” вакансий приобретает характер притяжения.

Результаты представленной работы свидетельствуют о том, что метод аннигиляции позитронов позволяет исследовать динамику фазовых превращений систем с малым параметром порядка, т.е. в тех случаях, когда образование новой мелкодисперсной фазы, состоящей из вакансионных кластеров с размерами порядка нескольких ангстрем, практически невозможно диагностировать такими методами, как электронная микроскопия и рентгеновская спектроскопия.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G i r k a A.I., M o k r u s h i n A.D., M o k h o v E.N., O s a d c h i e v V.M., P o g r e b n j a k A.D., S h i s h k i n A.V. Proc. 8-th Int. Conf. Positron Annihilation / Ed. Dorikens-Vanpraet L., Dorikens M., Segers D. Singapore, 1989. P. 458-460.
- [2] Гирка А.И., Кулешин В.А., Мокрушин А.Д., Мохов Е.Н., Свирида С.В., Шишкин А.В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1270-1274.
- [3] Гирка А.И., Дидык А.Ю., Мокрушин А.Д., Мохов Е.Н., Свирида С.В., Шишкин А.В., Шмаровоз В.Г. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 12. С. 24-27.
- [4] L e i g h l y H.P., C o l e m a n P.G., W e s t R.N. Proc. 8-th Int. Conf. Positron Annihilation / Ed. Dorikens-Vanpraet L., Dorikens M., Segers D. Singapore, 1989. P. 470-473.
- [5] S t u c k y M., C o r b e l C., G e f f r o y B. In: Defects in Semiconductors. / Ed. H.J. von Bardeleben. Materials Science Forum, 1986. V. 10-12. Part II. P. 265-270.

[6] Л и ф ш и ц И.М., С л е з о в В.В. // ЖЭТФ. 1956.
Т. 35. С. 479-492.

[7] Д е в я т к о Ю.Н., Т р о н и н В.Н. // ФММ. 1987.
Т. 63. В. 4. С. 635-644.

Московский
инженерно-физический
институт

Поступило в Редакцию
13 сентября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

07; 09

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

П.Д. К у х а р ч и к, Н.И. К у р и л о,
И.А. Т и т о в и ц к и й, Е.В. Б ы ч и н о в,
В.В. Р у б а н и к

В работе [1] предложена голографическая схема для синтезирования двумерных длинноволновых голограмм ортогональными линейными антенными решетками. Данная схема обеспечивает синтезирование двумерной матрицы голографических данных с количеством $M_1 \times M_2$ дискретных отсчетов посредством $M_1 + M_2$ элементов линейных антенных решеток, что дает существенный выигрыш в количестве антенных элементов по сравнению с матричными голографическими схемами [2]. Однако данной голографической схеме присущи некоторые специфические aberrации, существование которых было обнаружено авторами работы [1] экспериментальным путем, и которые оказывают существенное влияние на качество голографических изображений. Цель данной работы состояла в проведении теоретического анализа aberrаций в голографической схеме в ортогональными линейными антенными решетками для параболических восстанавливающих волновых фронтов и оценке возможности их уменьшения.

Анализ схемы синтезирования построен с учетом предположений, что элементы передающей антенной решетки являются изотропными излучателями, а диаграмма направленности элементов приемной антенной решетки равномерна в пределах исследуемой зоны пространства. Геометрия голографической схемы приведена на рис. 1. Система координат x, y, z выбрана таким образом, чтобы оси координат были параллельны обеим решеткам и делили их в точках пересечения на две равные части. В основу анализа положена методика классификации aberrаций, изложенная в работе [3].

В результате проведенного исследования авторами получено следующее выражение для волновых aberrаций третьего порядка: