

- [1] Harman T. C., Willardson R. K., Beer A. C. — Phys. Rev., 1954, v. 94, N 4, p. 1065—1067.
- [2] Бир Г. Л., Нормантас Э., Пикус Г. Е. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках с вырожденными зонами. — ФТТ, 1962, т. 4, в. 5, с. 1180—1195.
- [3] Fritzsche H., Cuevas M. — Phys. Rev., 1960, v. 119, N 4, p. 1238—1245.
- [4] Willardson R. K., Harman T. C., Beer A. C. — Phys. Rev., 1956, v. 96, N 6, p. 1512—1518.
- [5] Beer A. C. — J. Phys. Chem. Sol., 1959, v. 8, N 3, p. 507—511.
- [6] Забродский А. Г. Экспериментальное определение степени компенсации нейтроном легированного германия. — Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, в. 5, с. 258—262.
- [7] Оспилян Ю. А., Прокопенко В. М., Тальянский В. И. Кинетика трансмутационного легирования как метод спектроскопии глубоких центров. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, в. 1 (7), с. 269—278.
- [8] Ларк-Горовиц К. Бомбардировка полупроводников нуклонами. — В кн.: Полупроводниковые материалы. М., 1954, с. 62—92.
- [9] Mughabhab S. F., Divadeeman M., Holden N. E. Neutron cross sections, BNL-325. N. Y., Upton, 1981. 4-th ed. 418 p.
- [10] Бабич В. М., Баранский П. Н., Даховский И. В., Самойлович А. Г. Концентрационная зависимость коэффициента Холла в *n*-Ge в слабых магнитных полях. — УФЖ, 1969, т. 14, в. 3, с. 418—422.
- [11] Beer A. C., Willardson R. K. — Phys. Rev., 1958, v. 110, N 6, p. 1286—1294.
- [12] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.

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

Получено 7.04.1987
Принято к печати 17.04.1987

ФТТ, том 22, вып. 1, 1988

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА НАКОПЛЕНИЕ А-, Е-ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Бобрикова О. В., Стась В. Ф.

Эксплуатация полупроводниковой аппаратуры при воздействии дефектообразующих излучений, а также трудности, связанные с объяснением ионизационного отжига, поставили вопрос о влиянии электрического поля на процессы радиационного дефектообразования (ПРДО) и роли кулоновского взаимодействия между компонентами пар Френкеля [1].

Целью данной работы являлось выяснение различий в ПРДО в областях с напряженностью электрического поля $E=10^4 \div 10^5$ В/см, которые характерны для активной части полупроводниковых приборов, и нейтральным объемом полупроводника.

Исследования проводились на кремнии *n*-типа, для которого достоверно известна структура радиационных дефектов (РД) [2], методом DLTS, позволяющим получить данные о конкретном дефектном комплексе [3]. На базовом материале КЭФ-4.5 диффузией бора на глубину 2 мкм создавался $p^+ - n$ -переход. РД вводились облучением электронами с энергией $E=3.5$ МэВ на импульсном ускорителе «Микротрон». Частота следования импульсов составляла $\omega=100$ Гц, длительность одного импульса $\Delta t=3$ мкс, средняя плотность тока электронов $j=3 \cdot 10^{-8}$ А/см². Облучение проводилось в интервале доз $\Phi=10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$ см⁻², температура облучения $T_{0.1}=78 \div 300$ К. При облучении к образцам прикладывалось внешнее напряжение $U_{см}$ так, что $p^+ - n$ -переход находился в обратно смещенном состоянии.

На рис. 1 представлены данные относительного изменения концентрации комплексов вакансии—кислород (А-центров) по глубине. При определении профиля концентрации дефектов область зондирования составляла 0.3 мкм.

Видно, что эффективность введения А-центров в базе $p^+ - n$ -структур монотонно уменьшается по мере приближения к границе $p^+ - n$ -перехода. Для об-

разцов, облучаемых без смещения, глубина, с которой начинается уменьшение концентрации А-центров, — глубина «истощения» составляет $d_{\text{ист}}=2.5$ мкм. Подобный эффект, по данным работ [4, 5], имеет место и для структур с барьером Шоттки.

Для структур, облучаемых при смещении, $d_{\text{ист}}$ зависит от величины внешнего напряжения, но не превышает расчетного значения ширины области пространственного заряда. Для $U_{\text{см}}=20$ В $d_{\text{опз}}$ составляет 5.2 мкм, для $U_{\text{см}}=30$ В $d_{\text{опз}}=6.3$ мкм. Относительное изменение эффективности введения А-центров в ОПЗ при заданном $U_{\text{см}}$ в исследуемом интервале доз $\Phi=10^{14}\div 3\cdot 10^{15}$ см⁻² не зависит от дозы облучения. Для Е-центров (комплекс вакансии—фосфор) имеют место аналогичные зависимости, т. е. наличие электрического поля приводит к неоднородному, зависящему от величины внешнего напряжения распределению комплексов вакансии—кислород, вакансии—фосфор.

Вольтамперные измерения показали, что база p^+ — n -структуры равномерно легирована мелкой примесью. Это позволило заключить, что возможной причи-

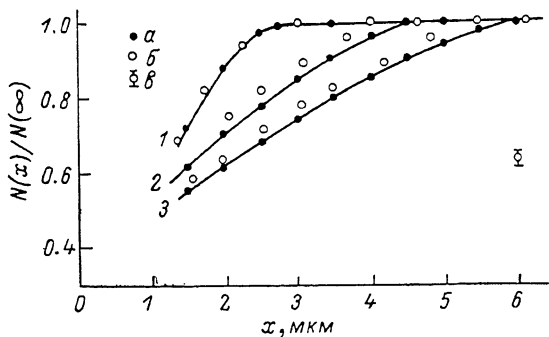


Рис. 1. Относительные изменения концентрации А- (а) и Е-центров (б) в базе p^+ — n -структур после облучения.

$U_{\text{см}}$, В: 1 — 0, 2 — 20, 3 — 30. $T_{\text{обл}}=300$ К. σ — погрешность измерения.

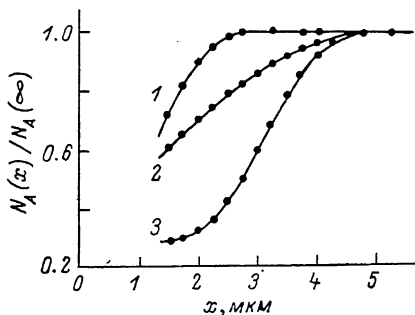


Рис. 2. Относительные изменения концентрации А-центров в базе p^+ — n -структур после облучения.

$U_{\text{см}}$, В: 1 — 0; 2, 3 — 20. $T_{\text{обл}}$, К: 1 — 78+300; 2 — 180, 200, 300; 3 — 78, 120, 160.

ной неравномерного распределения Е- и А-центров по глубине является неоднородное распределение вакансий.

При напряженностях электрического поля $E=10^4\div 10^5$ В/см, которые имеют место в данном случае, основными механизмами воздействия электрического поля на первичные РД являются дрейф и изменение зарядового состояния дефекта. Первый механизм приведет к изменению концентрации вакансий и соответственно вакансионных комплексов в ОПЗ, второй — либо к изменению концентрации вакансий за счет изменения постоянных скоростей реакций аннигиляции (вакансия—сток, вакансия—междоузельный атом), либо непосредственно к изменению постоянных скоростей реакций комплексообразования (вакансия—кислород, вакансия—фосфор).

Определить, какой из механизмов является доминирующим, позволяют температурные зависимости относительного изменения концентрации РД по глубине в базе p^+ — n -структуры.

Если профиль распределения вакансионных комплексов в базе диодной структуры определяется дрейфом вакансий в электрическом поле, то из характера зависимости $N_A(x)$ —насыщение вне ОПЗ и спад в направлении к p^+ — n -переходу следует, что это движение положительно заряженных вакансий по направлению к p^+ -области; уменьшение $T_{\text{обл}}$ приведет к уменьшению подвижности вакансий. Следовательно, эффективность введения РД в ОПЗ должна зависеть от $T_{\text{обл}}$ во всем интервале $T_{\text{обл}}=78\div 300$ К. Уменьшение $T_{\text{обл}}$ приведет к уменьшению разницы концентраций РД вне и в ОПЗ.

Если основной причиной неоднородного распределения вакансионных комплексов является изменение зарядового состояния вакансий в электрическом поле, то, поскольку экспериментальные данные свидетельствуют о нейтральном и отрицательных зарядовых состояниях вакансий в кремнии n -типа [6, 7],

в ОПЗ вследствие изменения положения уровня Ферми (относительно зоны проводимости) по сравнению с квазинейтральным объемом следует ожидать увеличения доли нейтральных вакансий; поскольку нейтральные вакансии в кремнии при температурах ниже 180 К «заморожены» (не могут участвовать в процессах комплексообразования с неподвижной примесью) [1], уменьшение $T_{обт}$ приведет не к уменьшению, как при дрейфе, а к увеличению разницы концентраций РД вне и в ОПЗ. Изменения концентрации РД в ОПЗ по сравнению с квазинейтральным объемом следует ожидать не во всем интервале $T_{обт}$, а только при $T_{обт}$ ниже интервала температур отжига нейтральной вакансии.

Действительно, эффективность введения А-центров в ОПЗ постоянна для двух диапазонов $T_{обт}$ — 78 ÷ 160 и 180 ÷ 300 К (рис. 2). Изменение эффективности введения А-центров по глубине в ОПЗ происходит в области $T_{обт} = 160 ÷ 180$ К, коррелирующей с температурой отжига нейтральной вакансии в кремнии.

Таким образом, характер температурных зависимостей эффективности введения А-центров в ОПЗ (уменьшение, а не рост с понижением температуры облучения) и корреляция с температурой отжига нейтральной вакансии свидетельствуют в пользу того, что в ОПЗ часть вакансий изменяет свое зарядовое состояние на нейтральное.

Косвенным подтверждением нейтрального состояния вакансии в ОПЗ является также аналогия в распределении А- и Е-центров. Процесс комплексообразования А(Е)-центров определяется подходом подвижной компоненты — вакансии к кислороду (фосфору) и непосредственно взаимодействием с кислородом (фосфором). Оба процесса — миграция и преодоление барьера комплексообразования — зависят от зарядового состояния дефектов [1]. В кремнии *n*-типа кислород находится в нейтральном состоянии, фосфор — в положительном. Распределение А- и Е-центров по глубине будет аналогичным в том случае, если процесс дефектообразования определяется миграцией вакансий и не зависит от зарядового состояния реагирующих компонентов, т. е. при нейтральном состоянии подвижного компонента комплекса (вакансии).

Экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что доминирующим механизмом воздействия электрического поля, определяющим и распределение вакансионных комплексов в ОПЗ, является не дрейф, а изменение зарядового состояния вакансий.

Изменение зарядового состояния приводит к изменению постоянных скоростей реакций комплексообразования и аннигиляции дефектов. Поэтому можно предположить, что уменьшение эффективности введения А- и Е-центров в ОПЗ связано с ростом вероятности аннигиляции пар вакансия—междоузельный атом. Действительно, уменьшение концентрации А-центров, если отсутствует дрейф вакансий из ОПЗ, возможно только за счет роста вероятности аннигиляции вакансий. Для неподвижных при температурах ниже 180 К вакансий (в нейтральном состоянии) возможна только аннигиляция с подвижными междоузельными атомами. Однако для подтверждения этого предположения необходимы дополнительные экспериментальные данные.

В заключение авторы выражают благодарность Л. С. Смирнову за постановку задачи, Н. Н. Герасименко за постоянный интерес к работе, Г. Н. Камаеву за облучение образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
- [2] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 296 с.
- [3] Lang D. V. — J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 7, p. 3023—3033.
- [4] Wang K. L., Lee Y. H., Corbett J. W. — Appl. Phys. Lett., 1978, v. 33, N 6, p. 547—548.
- [5] Nidaev E. V., Popov A. I. — Phys. St. Sol. (a), 1982, v. 72, p. K193—K195.
- [6] Watkins G. D., Troxell J. R., Chatterjee A. P. — In: Def. Rad. Eff. Semicond. Conf. Ser. N 46. London—Bristol, 1979, p. 16—30.
- [7] Watkins G. D. — In: Latt. Def. Semicond. Conf. Ser. N 23. London—Bristol, 1975, p. 1—22.