

## РАДИАЦИОННО—СТИМУЛИРОВАННАЯ ДИФФУЗИЯ ИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

*Арапов Т. Б., Садыкбекова А., Шералиева А., Ошский государственный университет, Кыргызстан, 723500, Ош, ул. Ленина 331, e-mail: [arapov\\_temir@mail.ru](mailto:arapov_temir@mail.ru)*

В данной работе дан краткий обзор о роли ионных процессов радиационно-стимулированной диффузии дефектов в неметаллических кристаллах

**Ключевые слова:** ионные процессы, радиационно-стимулированная диффузия, дефект, неметаллические кристаллы, диссоциация, эффект ускорения.

## RADIATION-STIMULATED DIFFUSION OF IONIC DEFECTS OF NONMETALLIC CRYSTALS

*Arapov T.B., Sadykbekova A. Sheralieva A., Kyrgyzstan, 723500 Osh, Osh State University, e-mail: [arapov\\_temir@mail.ru](mailto:arapov_temir@mail.ru)*

In this paper, a brief review of the role of ionic processes radiation-stimulated diffusion of defects in nonmetallic crystals is given.

**Keywords:** ionic processes, radiation-stimulated diffusion, defects, nonmetallic crystals, dissociation, acceleration effect.

Исследованию влияния ионизирующего излучения на гетеро и самодиффузию ионных дефектов в твердых телах уделяется большое внимание. Это связано с тем, что диффузионно-контролируемые процессы определяют зачастую характер изменения свойств твердых тел при воздействии излучения. Изучения закономерностей низкотемпературной радиационно-стимулированной диффузии ионных дефектов (ИД) в твердых телах дает возможность получить информацию о механизмах процессов, а так же имеет важное практическое значение, в связи с задачей повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов и изыскания методов низкотемпературного легирования полупроводников.

Ускорение диффузии примесей в твердых телах при воздействии радиационного излучения в условиях повышенных температур изучено достаточно подробно и объясняется главным образом введением дополнительной концентрации вакансий.

Ранее нами рассмотрены роли ионных процессов образовании подвижных дефектов в неметаллических ионных кристаллах и полупроводниках [1-4].

В настоящей работе сделана попытка дать по возможности обзор экспериментальных исследований радиационно-ускоренной и радиационно-стимулированной диффузии в полупроводниках, имеющий целью изучения закономерностей и определения механизмов активации элементарного акта диффузии ионных дефектов.

### *1) Рассмотрение влияние предварительного облучения неметаллических кристаллов на тепловую диффузию ионных дефектов*

Устойчивые радиационные диффузии в кремнии представляет собой, как известно, диффузии, вакансии, дивакансии и другие более сложные комплексы нарушений регулярности решетки. Наличие подобных структурных несовершенств может существенным образом влиять на протекание радиационно-термической диффузии примесей.

Еще в середине прошлого столетия Э. П. Савин и В. И. Болтакс [5] изучали влияние нейтронного облучения на диффузию цинка и арсенида индия. Образцы  $p$ -InAs облучались

быстрыми реакторными нейтронами ( $5 \cdot 10^{16} \text{м}^{-2}$  после чего в температурном интервале 600-650 °С проводился диффузионный отжиг. Было установлено, что в области температур 600-700 °С глубина залечения р-п- перехода в облученных образцах больше, чем в необлученных, причем с ростом температуры это разность уменьшается. При температурах, 7500С, р-п- переход в облученных образцах лежит ближе к поверхности, чем в необлученных. Полученные экспериментальные данные авторы объясняют следующим образом. Поскольку в интервале температур 600-7000С цинк в арсениде индия мигрирует главным образом по вакансиям, то повышение их концентрации в облученных материалах приводит к росту коэффициента диффузии. При более высоких температурах механизм диффузии цинка становится диссоциативным, и увеличение концентрации вакансии приводит к уменьшению эффективного коэффициента диффузии.

Авторы работы [6] отметили ускорения тепловой диффузии в кремнии предварительно облученном ионами сурьмы с энергией 20 кэВ. Эффект наблюдался в узком поверхностном слое (до 900 Å). Образцы кремния предварительно облученные ионами сурьмы, отжигались при 7000С. Авторами работ [6] установлено облучения ионами приводит к увеличению коэффициента диффузии сурьмы на пять порядков.

Аналогичный результат получен в случае диффузии алюминия в кремнии [7]. Образцы (п-типа,  $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) облучали ионами алюминия с энергией 10 кэВ, а затем прогревали при 8000С в течение 20 минут в высоком вакууме. Наблюдавшиеся в эксперименте ускорения диффузии, по мнению авторов, объясняется повышенной концентрацией вакансии, возникающей при термической диссоциации стабильных дефектов, введенных предварительным облучением.

Таким образом, воздействие дефектообразующего излучения неметаллических кристаллов ионных дефектов приводит к увеличению эффективного коэффициента диффузии примесей, мигрирующих в соответствии с вакансионным механизмом, и к его уменьшению в случае диссоциативному механизму.

## *2. Ускорения диффузии непосредственно при облучении*

Факт ускорения гетеро - и самодиффузии в твердость телах при воздействии излучения был установлен авторами работ [6,7]. Исследователи наблюдали упорядоченные металлических сплавов, ускорение отжига дефектов, связанное с ускорением их миграция при воздействии излучения, смещение р-п- перехода и т. д. Ускорение диффузии было отмечено в случае воздействия как высокоэнергетичного излучения, так и излучений допороговых энергий.

Интересно, что при воздействии ионизирующего излучения диффузия атомных дефектов, в частности примесных атомов, происходила зачастую в температурном интервале, где вклад обычной тепловой диффузии малосуществен.

Предполагая, что введение радиационных дефектов ионизирующим излучением должно оказывать стимулирующее воздействие на самодиффузию и миграцию примесей по вакансионному механизму, многие исследователи изучали радиационно — ускоренную диффузию в рамках этих представлений, теоретически обоснованных в работ. При этом предполагалось, что активация элементарного акта диффузии происходит обычным (термическим) путем. В связи с этим они проводили эксперименты при довольно высоких температурах.

Последователи другого направления считали, что активация элементарного акта диффузии может осуществляться и нетермическим путем, например, в соответствии с моделями, учитывающими возбуждения и ионизацию электронной подсистемы кристалла. В этом случае нет необходимости создать для проведения диффузии высокую концентрацию атомных дефектов, применяя высокоэнергичное излучение, поэтому имеет смысл исследовать данный процесс при пониженных (вплоть до 8К) температурах в условиях воздействия излучений с энергией ниже порога упругого смещения атомов, способных, однако, создавать высокую плотность элементарных возбуждений.

### 3. Воздействие высокоэнергичных протоков и электронов

Авторы некоторых работ исследовали ускорения гетеродиффузии в полупроводниках высокоэнергичным излучением при сравнительно высоких температурах. Они обнаружили увеличение скорости диффузии примесей в кремнии (бор, фосфор, галлий) и германий (сурьма, мышьяк) при воздействии электронов с энергией 1 МэВ и протонов с энергией 0,2-1,5 МэВ. Для наблюдения эффекта был использован метод локального облучения пластин кремния или германия, содержащих гетеропереходов, полученный термической диффузией исследуемой примеси. Скорость диффузии в облучении образцах определялась по смещению р-п-перехода, выявляемого методом окрашивания. Локальное облучение позволяло исключить вклад возможного термического смещения перехода.

Основные результаты работ могут быть сформулированы следующим образом:

- диффузионные смещения перехода имеет место при воздействии протонов со средней длиной пробега, как сравнимой с глубиной залечивания перехода, так и меньшей ее;
- эффект ускорения диффузии нечувствителен к зарядовому состоянию и ионному примеси;
- ускорения диффузии наблюдается при температурах не ниже 8000С для кремния и 400 °С для германия;
- в интервале температур 900-12000 С (для кремния) и 600-9500 С (для германия) эффект не зависит ни от плотности потока частиц, ни от температуры облучения.

Зависимость скорости диффузии от температуры, появляющаяся при температурах облучения ниже 9000 С (кремний) и 6000 С (германий), смещается в область более низких температур с увеличением интенсивности излучения.

Предполагается, что перемещенные примесей, образующих р-п-переходов, происходит по вакансионному механизму. Этот вывод следует из отсутствия зависимости скорости диффузии от зарядового состояния и ионного радиуса примеси. В случае миграции по междоузелиям электростатическое и упругое взаимодействия примеси с атомами решетки должны значительно влиять на скорость их диффузии. Отсутствие температурной зависимости коэффициента радиационно-ускоренной диффузии в высокотемпературной области вызвано процессами отжига атомных дефектов первого порядка. Замедление диффузии вакансии в низкотемпературной области обусловлено образованием комплексов вакансии с атомами легирующей примеси.

**Выводы.** Таким образом из вышеприведенных данных следует, что в образовании устойчивых дефектов неметаллических кристаллах важную роль играют радиационно-стимулированные ионные процессы происходящих в твердых телах

### Список литературы

1. Арапов.Б Ионные, ионно-дырочные и ионно-электронные процессы распада и взаимопревращения радиационных дефектов в ЩГК / Диссертация на соискание... доктора ф.-м.наук. – Ош: 1993. –270 с.
2. Арапов Б. Жарым өткөргүчтөрдөгү иондук процесстер жана дефекттердин радиациялык стимулдаштырылган диффузиясы / Б Арапов, А. Садыкбекова // Вестник Ошского государственного университета.-2014.- №3.- в.5 – С. 93-96.
3. Арапов Т. Б.Ионные процессы и трофические цепи дефектов в неметаллических кристаллах / Т. Б Арапов, А. Садыкбекова, Б. Арапов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Москва: 2016, –№8, ч. 1.-С.106.
4. Садыкбекова А. Непрямая рекомбинация ионных дефектов ян-теллеровских примесей в полупроводниках / А. Садыкбекова, Т. Б. Арапов, Б. Арапов/ Сборник трудов XI Иссык-Кульской международной школа-конференция по радиационной физике твердого тела. Бишкек: 2015 – С.32-36
5. Савин Э.П., Болтакс Б.И. ФТП, 1970, Т. 4, В. 3, 567-570 с; 1971, Т. 5, В.7, –1331-1335 с.
6. Gamo., Iwaki M., Masuda G. Jap., J. Appl. 1970, V. 9, №3, P. 333-338.
7. Itoh T., Odomari J.J., Appl. Phys., 1970, V.41, №1, P.434-440.