

УДК 621.039

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В GaAs : D⁺ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

В. И. Козловский, А. Б. Крыса

Исследовано изменение постимплантационного концентрационного профиля дейтерия в кристалле GaAs:D⁺ после облучения электронами с энергией 30 кэВ при температуре 40 К. Обнаружено сужение профиля и смещение его максимума к поверхности кристалла. Наблюдаемые изменения объясняются освобождением атомов дейтерия из ловушек и их миграцией в область с повышенной концентрацией радиационных дефектов, являющихся при электронном облучении эффективным стоком для дейтерия.

Проблема водорода в кристаллических полупроводниковых материалах вызывает значительный интерес, поскольку он присутствует практически во всех технологических операциях современной микроэлектроники и оказывает существенное влияние на электрические и оптические характеристики полупроводниковых приборов [1]. Одним из наиболее эффективных способов преднамеренного внедрения водорода в кристалл является протонная имплантация. Однако имплантация сопровождается образованием большой концентрации радиационных дефектов. Учитывая высокую подвижность водорода и влияния на его диффузию состава и концентрации примесей и собственных дефектов [1], можно предположить, что концентрационный профиль водорода после имплантации будет неустойчив при температурных отжигах или различного рода облучениях, и на его изменение будет оказывать влияние отличный от него концентрационный профиль радиационных дефектов.

В данной работе мы исследовали влияние электронного облучения на постимплантационный профиль дейтерия в монокристаллическом GaAs. Дейтерий использовался

вместо водорода для повышения чувствительности масс-спектрометрических измерений.

Дейтерий имплантировался при комнатной температуре в монокристаллические полупроводниковые пластины $GaAs$, поверхность которых была подготовлена для эпитаксиального роста. Энергия ионов D^+ была 50 кэВ , доза облучения – $8,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Имплантированные дейтерием образцы хранились несколько лет при комнатной температуре. Затем образцы облучались при $T = 40 \text{ К}$ электронами с энергией $E = 30 \text{ кэВ}$ и флюенсом 10^{19} см^{-2} . Это значение флюенса было выбрано, исходя из того значения, при котором в [2] наблюдалась характерная перестройка водородосодержащих комплексов в $ZnTe:H$ при электронном облучении. До и после электронного облучения концентрационный профиль дейтерия определялся методом масс-спектрометрии вторичных ионов на установке IMS-3F CAMECA.

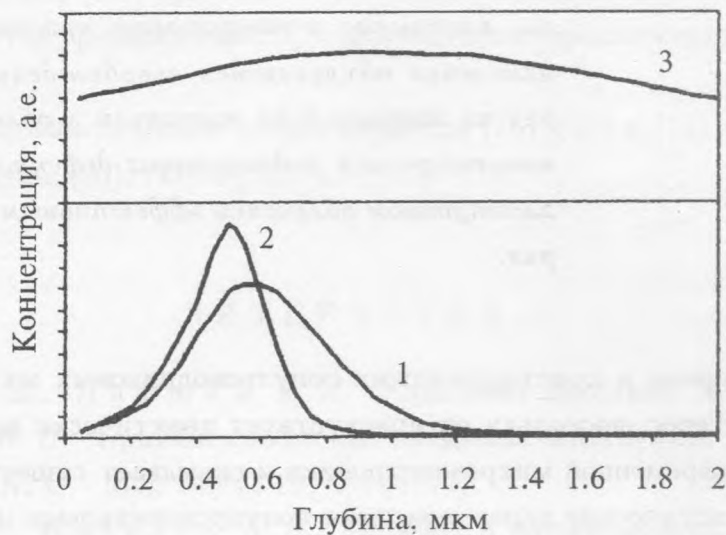


Рис. 1. Концентрационный профиль дейтерия до (кривая 1) и после (кривая 2) облучения электронами с $E = 30 \text{ кэВ}$, а также ионизационная кривая электронов (3) с этой энергией.

На рис. 1 представлены экспериментально определенные профили концентрации дейтерия до (кривая 1) и после (кривая 2) электронного облучения. Здесь также представлена ионизационная кривая (3) для электронов с $E = 30 \text{ кэВ}$, взятая из [3].

Форма профиля дейтерия после имплантации и последующей длительной выдержки будет определяться диффузионным расплыванием дейтерия, учитывая его достаточно

высокую подвижность при комнатной температуре. Согласно данным работы [4] по диффузии водорода в полуизолирующем $GaAs$, коэффициент диффузии дейтерия при комнатной температуре составляет $1,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$. Тогда характерная величина расплывания за время хранения составит порядка 1 мкм , что сравнимо с действительной шириной на полувысоте (примерно $0,5 \text{ мкм}$) профиля дейтерия до облучения.

Хорошо известно, что максимум профиля радиационных дефектов после имплантации не совпадает с максимумом профиля имплантанта и расположен ближе к поверхности [5]. Так как диффузионное расплывание профиля дейтерия носит симметричный характер, можно сделать вывод, что распределение радиационных дефектов не оказывает заметного влияния на диффузионный процесс во время хранения при комнатной температуре.

После электронного облучения концентрационный профиль дейтерия сместился ближе к поверхности, при этом его ширина на полувысоте уменьшилась примерно в два раза, а максимум увеличился в 1,5 раза, так что интегральная концентрация дейтерия несколько уменьшилась (на 20%). Такое смещение концентрационного профиля дейтерия можно объяснить несимметричным относительно этого профиля распределением радиационных дефектов, которые под электронным облучением становятся более эффективными стоками для подвижного при этих условиях дейтерия.

Механизм влияния электронного облучения на процесс перераспределения дейтерия по глубине мы связываем с ионизирующим действием электронов. В результате ионизации содержащего дейтерий комплекса или ближайшего к нему узельного атома кристаллической решетки образовавшийся ион за время своего существования успевает вытолкнуть атом дейтерия из комплекса по меньшей мере в ближайшее межузельное положение, в результате чего происходит распад комплекса по механизму, близкому к "примесно-ионизационному" [6]. Несвязанный атом дейтерия имеет высокую подвижность из-за малости активационного барьера [1], а также из-за генерации при электронном облучении неравновесных фононов. С другой стороны, радиационные дефекты, которые при обычных условиях присутствуют в имплантированных образцах в виде комплексов друг с другом и поэтому не являются эффективным стоком для дейтерия, под действием ионизирующего облучения существенно активизируются, в частности за счет распада этих комплексов. Незначительный выход дейтерия из кристалла, по сравнению с качественными кристаллами GaN [7] и $ZnSe$ [8], также объясняется высокой концентрацией радиационных дефектов и высокой эффективностью захвата ими атомов дейтерия, что препятствует выходу дейтерия в вакуум.

Таким образом, в работе показано, что облучение кристалла $GaAs:D^+$ электронами с $E = 30$ кэВ приводит к перераспределению имплантированного дейтерия по глубине кристалла, а именно, к смещению его концентрационного профиля к максимуму распределения радиационных дефектов, которые при электронном облучении становятся эффективным стоком для дейтерия.

Авторы благодарны В. А. Дравину за проведение ионной имплантации образцов и связанные с этим расчеты, а также П. Б. Орлову за масс-спектрометрические измерения.

Результаты, представленные в данной публикации, стали возможными отчасти благодаря поддержке Международного научного фонда и Российского правительства, грант MD-1300.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pearson S. J., Corbett J. W., Stavola M. Hydrogen in Crystalline Semiconductors. Springer Series in Materials Science, vol. 16.
- [2] Козловский В. И., Крыса А. Б., Попов Ю. М. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 38 (1994).
- [3] Trager-Cowan C., Yang F., O'Donnell K. P. Advanced Materials for Optics and Electronics, **3**, 295 (1994).
- [4] Omeljanovskiy E. M., Rakhomov A. V., Poljakov A. J., Govorkov A. N. Proc. Semi-Insulating Mat. Conf. (Malmo, Sweden 1988) p. 75.
- [5] Физические процессы в облученных полупроводниках. Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, Наука, 1977.
- [6] Клиггер М. Н. и др. УФН, **147**, N 3, 523 (1985).
- [7] Nakamura S., Senoh M., Mukai T. Jpn. J. Appl. Phys., **30**, L1708 (1991).
- [8] Козловский В. И., Крыса А. Б., Таудт В., Зёлнер Й., Хойкен М. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 23 (1996).

Поступила в редакцию 2 июля 1996 г.