

РАДИАЦИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ III-V ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Я.Я. Кость¹⁾, И.А. Большакова¹⁾, I. Duran²⁾, А.В. Васильев¹⁾, L. Viererbl²⁾,
Р.Ф. Коноплева³⁾, М.И. Радишевский¹⁾, В.А. Чеканов³⁾, Ф.М. Шурыгин¹⁾

¹⁾Национальный университет «Львовская политехника»,
ул. С. Бандеры 12, 79013 Львов, Украина, inessa@mail.lviv.ua

²⁾Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences,
Za Slovankou 3, 182 00 Prague 8, Czech Republic, duran@ipp.cas.cz

³⁾Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова,
мкр. Орлова роща 1, 188300 Гатчина, Россия, konopleva_rf@pnpi.nrcki.ru

Экспериментально доказана эффективность предварительной радиационной модификации In-содержащих полупроводниковых соединений III-V для повышения стабильности параметров изготовленных на их основе сенсоров Холла при работе в потоках реакторных нейтронов до флюенсов $4 \cdot 10^{17}$ н·см². Описан механизм, отвечающий за стабилизацию чувствительности сенсоров. Определен оптимальный уровень ядерного легирования при радиационной модификации, которая обеспечивает наибольшую стабильность параметров сенсоров в радиационных условиях.

Введение

Повышение стойкости полупроводниковых материалов к воздействию ионизирующих излучений является актуальной задачей для создания на их основе контрольно-измерительных приборов, работающих при высоких радиационных нагрузках, например, в термоядерных реакторах и ускорителях заряженных частиц. Функциональность подобных систем определяется магнитными полями сложной конфигурации, непрерывный мониторинг которых является одним из ключевых факторов обеспечения надежности и безопасности эксплуатации. Для такого мониторинга удобно применять полупроводниковые сенсоры Холла на основе соединений III-V, например, InAs и InSb, которые сочетают высокую точность и линейность измерения постоянных и переменных магнитных полей с низким энергопотреблением, удобством изготовления и малыми габаритами.

Основным методом модификации полупроводников является химическое легирование на этапе изготовления материала, позволяющее, в частности, повысить радиационную стойкость сенсоров Холла на основе соединений III-V [1]. Однако при этом имеется ряд проблем, связанных с ограниченной растворимостью легирующих примесей, их неоднородным распределением в материале, образованием дополнительных дефектов структуры и т. п., что ухудшает функциональные характеристики устройств. Альтернативным подходом является радиационная модификация материала потоками нейтронов, при которой легирование происходит за счет трансмутации ядер, преимущественно, в результате захвата тепловых и резонансных нейтронов [2]. При этом однородность распределения примесей в 10 раз выше, чем при химическом легировании.

Целью данной работы было исследование влияния предварительной радиационной модификации полупроводниковых соединений III-V на стабильность чувствительности изготовленных на их основе сенсоров Холла при работе в потоках реакторных нейтронов.

Образцы и методика исследования

В работе использовались сенсоры Холла на основе пленок InSb толщиной 1.9 мкм, выращенные методом вакуумной эпитаксии на подложках полупроводящего GaAs толщиной 400 мкм. Предварительная радиационная модификация сенсоров проводилась в ядерном реакторе LVR-15 (г. Реж, Чехия) потоком нейтронов с интенсивностью $2.55 \cdot 10^{13}$ н·см⁻²·с⁻¹ до флюенса $F \approx 3.2 \cdot 10^{17}$ н·см⁻² при соотношении количества тепловых и быстрых частиц 8:1. Температура образцов при облучении составляла $T \approx 60^\circ\text{C}$. Для уменьшения количества структурных дефектов, образовавшихся под действием быстрых нейтронов, после облучения образцы отжигались при $T = 200^\circ\text{C}$ на протяжении 20 мин.

Кроме того, использовались промышленные сенсоры на основе сильнолегированных тонких пленок InSb. Это позволило сопоставить стабильность параметров радиационно-модифицированных и химически легированных материалов в потоках реакторных нейтронов.

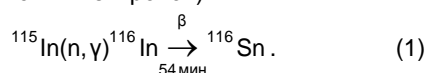
Тестирование сенсоров проводилось в ядерном реакторе ВВР-М (г. Гатчина, Россия). Для приближения к реальным радиационным условиям эксплуатации (например, в термоядерных реакторах, где потоки нейтронов содержат значительную часть быстрых частиц), образцы размещались в кадмиевом экране. Это позволило достичь соотношения количества тепловых и быстрых частиц 1:1. При этом общая интенсивность потока составляла $2.4 \cdot 10^{11}$ н·см⁻²·с⁻¹ при максимальном флюенсе $F_m \approx 4 \cdot 10^{17}$ н·см⁻². Температура образцов при облучении была $T \approx 110^\circ\text{C}$.

Для тестирования в потоках нейтронов ВВР-М радиационно-модифицированных и химически легированных сенсоров измерялись зависимости их чувствительности от флюенса нейтронов $S(F)$. Эксперимент проводился дистанционно в режиме реального времени (on-line). При этом образцы размещались внутри источника тестового магнитного поля (медный соленоид) в общей с ним оснастке, которая, в свою очередь, устанавливалась в облучательный канал реактора. С помощью кабелей типа «витая пара» сенсоры и соле-

ноид подключались к специальной управляющей электронике, расположенной вне канала реактора, которая обеспечивала ток питания образцов, сбор и передачу данных на удаленный сервер.

Измеренные зависимости $S(F)$ демонстрируют монотонное уменьшения чувствительности S при росте флюенса нейтронов F . При этом для химически легированного промышленного сенсора функция $S(F)$ является сильно нелинейной, а относительное изменение чувствительности составляет $\Delta S / S_0 \approx 35\%$, где $S_0 = S(F = 0)$ – чувствительность сенсора до облучения в ВВР-М, а $\Delta S = S(F = F_m) - S_0$ – абсолютное изменение чувствительности после получения образцом максимального флюенса. Для сенсора с предварительной радиационной модификацией $\Delta S / S_0 \leq 5\%$, что говорит о его значительно более высокой стойкости к реакторным нейтронам. При этом $S(F)$ для этого образца имеет линейный характер.

Основными механизмами действия реакторных нейтронов с широким энергетическим спектром на InSb являются [2] образование: (а) радиационных дефектов акцепторного типа (за счет быстрых нейтронов) и (б) донорных примесей в результате реакции трансмутации (за счет тепловых и резонансных нейтронов):



Соответственно, данные процессы влияют противоположно на концентрацию носителей заряда n , что можно представить как [2]:

$$\frac{\Delta n}{\Delta F} \approx \alpha - \beta n, \quad (2)$$

где $\Delta n / \Delta F$ – скорость изменения концентрации по флюенсу; α – коэффициент легирования InSb оловом; β – поперечное сечение образования радиационных дефектов акцепторного типа. Очевидно, что максимальная стабильность электрофизических параметров материала будет достигнута при $\Delta n / \Delta F \rightarrow 0$.

Из зависимостей $S(F)$ было рассчитано, что $\Delta n / \Delta F$ составляет $\approx 0.03 \text{ см}^{-1}$ для радиационно-модифицированного и $\approx 0.3 \text{ см}^{-1}$ для химически легированного сенсора. Величина α для InSb оценивалась как $\alpha = \sigma \cdot N_{\text{In}} \approx 0.70 \text{ см}^{-1}$, где σ – поперечное сечение реакции трансмутации индия в олово, а N_{In} – концентрация атомов In в InSb.

Соответственно, из (2) было найдено, что $\beta \approx 1.2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ для предварительно радиацион-

но-модифицированного сенсора и $\beta \approx 6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ для химически легированного сенсора.

Таким образом, для промышленного сенсора с химическим легированием образованием радиационных дефектов акцепторного типа при росте F влияет на n слабо и не может скомпенсировать эффект от ядерного легирования атомами Sn, донорной примесью для InSb. В результате это приводит к сильному изменению чувствительности S . В то же время, для сенсора с предварительной радиационной модификацией значение β на порядок выше, т. е. радиационные дефекты намного сильнее компенсируют действие трансмутационных донорных примесей Sn, что приводит к уменьшению $\Delta n / \Delta F$ и, соответственно, стабилизирует значение чувствительности S в процессе тестирования в потоках реакторных нейтронов.

Из условия $\Delta n / \Delta F = 0$ в (2) для сенсоров с предварительной радиационной модификацией можно оценить оптимальный уровень ядерного легирования, который обеспечивает максимальную стабильность их параметров в потоках реакторных нейтронов с рассмотренным энергетическим спектром. Оценка дает значение $n_{\text{опт}} = \alpha / \beta \approx (6-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Очевидно, что для другого спектрального состава реакторных нейтронов величина $n_{\text{опт}}$ будет отличаться.

Заключение

Таким образом, радиационная модификация In-содержащих полупроводниковых соединений III-V является эффективным способом стабилизации их электрофизических характеристик при работе в условиях облучения нейтронами ядерных реакторов. Это позволяет расширить область применения таких материалов для создания радиационноустойчивых сенсоров магнитного поля холлового типа, предназначенных для длительного мониторинга магнитных полей в термоядерных реакторах, ускорителях заряженных частиц, космической технике и т. д.

Список литературы

1. Terra F., Большакова И., Голяка Р. и др. // Известия ВУЗов. Физика. 2003. Т. 46. № 6. С. 67–74.
2. Kolin N. // Russian Physics Journal. 2003. V. 45. № 6. P. 543–551.

RADIATION MODIFICATION OF III-V SEMICONDUCTOR COMPOUNDS FOR ENHANCEMENT OF THE MAGNETIC FIELD SENSORS PARAMETERS STABILITY

Yaroslav Kost¹⁾, Inessa Bolshakova¹⁾, Ivan Duran²⁾, Alexander Vasyliiev¹⁾, Ladislav Viererbl²⁾, Raisa Konopleva³⁾, Maxim Radishevskiy¹⁾, Valery Chekanov³⁾, Fedor Shurygin¹⁾

¹⁾Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera str., 79013 Lviv, Ukraine, inessa@mail.lviv.ua

²⁾Institute of Plasma Physics of the CAS, 3 Za Slovankou, 182 00 Prague 8, Czech Republic, duran@ipp.cas.cz

³⁾Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov,

1 Orlova roscha mcr., 188300 Gatchina, Russia, konopleva_rf@pnpi.nrcki.ru

It is experimentally confirmed that a preliminary radiation modification of In-containing III-V semiconductor compounds is effective method for a parameters stability improvement of Hall sensors based on these compounds when operating in the fluxes of reactor neutrons up to fluence $4 \times 10^{17} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$. The mechanism responsible for a sensor sensitivity stabilization is described. The optimal level of nuclear doping taken place at radiation modification is determined, which provides the largest sensors parameters stability in radiation environment.