

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ III-V МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЖНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

И. А. Большакова¹⁾, С. И. Круковский²⁾, И. А. Мрыхин²⁾

¹⁾ Госуниверситет "Львовская политехника", ул. Котляревского, 1, Львов 290013, Украина; тел/факс: 380322 970393, e-mail: inessa@mail.lviv.u

²⁾ НПО "Карат", ул. Стрыйская, 202, Львов 290031, Украина; тел/факс: 380322 652244

В работе проведены исследования влияния быстрых нейтронов 100 кэВ – 13 МэВ из флюенсом 10^{14} н/см² на микрокристаллы и эпитаксиальные слои InAs, InSb, GaAs, полученные методами газотранспортных реакций и жидкофазной эпитаксии. Обнаружено, что легирование микрокристаллов редкоземельными и переходными элементами повышает радиационную стойкость материалов. В лучших образцах изменение концентрации основных носителей не превышает 0.1%. Полученные результаты объясняются с точки зрения концепции радиационной стойкости материалов, базирующейся на существовании фундаментального уровня электронейтральности в полупроводниках.

1. Введение

Полупроводниковые материалы, которые выпускаются отечественной промышленностью России и Украины, а также рядом зарубежных фирм являются недостаточно радиационноустойчивыми. Параметры изготовленных на их основе датчиков изменяются в радиационных условиях как минимум на 3-5%. Одновременно с ростом потребления полупроводниковых датчиков возрастают и требования к улучшению их эксплуатационных характеристик, в первую очередь – точности измерений. Для приборов работающих в радиационных условиях это порождает проблему создания материалов с повышенной радиационной стойкостью. Известно несколько методов повышения радиационной стойкости: металлургическое легирование, использование радиационно-стимулированных эффектов на границе раздела фаз, создание в объеме полупроводника дефектного слоя, ядерное легирование. Однако для каждого из рассмотренных способов повышения радиационной стойкости вследствие физических ограничений существует верхний предел радиационной стойкости, который можно достичь каждым из них. Авторами [1] показано, что радиационная стойкость полупроводникового материала будет максимальной, если исходная концентрация носителей заряда равна некоторой лимитной концентрации n_{lim} . Величина n_{lim} может быть определена как расчетным, так и экспериментальным путем. Зная ее, можно выбрать материал, который бы имел максимальную радиационную стойкость. Однако основная проблема состоит в том, что для большинства материалов значения концентраций, при которых достигается наивысшая радиационная стойкость и оптимальные параметры датчиков, как правило, отличаются на несколько порядков. Поэтому для таких материалов актуальной является разработка и совершенствование методов повышения радиационной стойкости. Известно, что введение Yb в кремний методом диффузии уменьшает скорость удаления носителей в 5–6 раз при облучении γ -квантами в диапазоне флюенсов $1 \cdot 10^{16} + 5 \cdot 10^{18}$ см⁻² [2]. Целью данной работы было исследовать влияние металлургического легирования

редкоземельными и переходными элементами на радиационную стойкость III-V материалов.

2. Эксперимент

Микрокристаллы InAs, InSb были получены методом газотранспортных реакций в закрытом объеме. Метод позволяет получать структурно-совершенные кристаллы с заданным уровнем легирования и формой, на основе которых изготавливаются микросенсоры различного назначения. Эпитаксиальные слои GaAs были получены методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии (НТЖФЭ) из галлиевого раствора-расплава на полупроводниковой подложке GaAs. Микрокристаллы легировались основными примесями (Sn, Te) которые обеспечивали оптимальную концентрацию основных носителей в пределах $10^{17} - 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Одновременно с основными донорными примесями микрокристаллы и эпитаксиальные слои легировались одной или несколькими дополнительными примесями Yb (0.0005 вес.%), Cr (0.0075 вес.%), Mn (0.0035 вес.%). В ходе предварительных экспериментов были установлены допустимые соотношения между концентрациями некоторых примесей (Yb и Al) в шихте, при которых возможно получение III-V материалов с оптимальными концентрациями носителей и степенью компенсации. Как правило, концентрация Al не должна превышать 0.02 вес.%. Роль дополнительных примесей состояла в повышении радиационной стойкости полупроводниковых материалов.

Для исследования радиационной стойкости полученные материалы облучались быстрыми нейтронами с энергией 100 кэВ–13 МэВ и флюенсом 10^{14} н/см² на быстром импульсном реакторе в ОИЯИ, Дубна.

Контроль радиационной стойкости проводился методом эффекта Холла по анализу изменений концентрации носителей заряда до и после облучения материалов. Относительная ошибка измерения Холловского напряжения от его среднего значения не превышала $\pm 0.04\%$.

3-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 6-8 октября 1999 г. Минск, Беларусь
3-d International Conference «Interaction of Radiation with Solids» October 6-8, 1999, Minsk Belarus



This document has been edited with Infix PDF Editor - free for non-commercial use.

To remove this notice, visit: www.iceni.com/unlock.htm

3. Результаты и обсуждение

Изменение концентрации основных носителей и подвижности в III-V материалах после облучения быстрыми нейтронами приведены в таблице.

Таблица. Изменение концентрации электрофизических параметров в III-V материалах после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом 10^{14} н/см²

Материал	Толщина, мкм	Легирующие примеси		Исх. концентрация, см ⁻³	Изменение подвижности $\Delta\mu/\mu$, %	Изменение концентрации $\Delta n/p$, %
		Основные, вес. % 10^2	Дополнительные, вес. %			
InAs	50÷100	Sn, 1÷5	—	(1÷3) · 10^{18}	1.85	1.0
			Yb, Cr, Mn	(1÷3) · 10^{18}	0.35	0.07
InSb	50÷100	Sn, 0.7÷1	—	(1÷3) · 10^{17}	0.39	0.12
			Yb, Cr, Mn	(1÷3) · 10^{18}	1.14	0.56
GaAs	3÷5	Sn, 6÷9	—	(1÷3) · 10^{18}	1.56	0.19
			Yb, Al	(1÷3) · 10^{18}	0.70	0.12
					0.44	0.08

Как видно из таблицы, для всех исследованных материалов наблюдается уменьшение $\Delta n/p$ и $\Delta\mu/\mu$ при введении дополнительных примесей Yb, Cr, Mn, Al. В образцах InSb с более низкой исходной концентрацией величина $\Delta n/p$ в несколько раз меньше. Эффект существенного снижения $\Delta n/p$ и $\Delta\mu/\mu$ наблюдается в GaAs, легированном одновременно Yb и Al. Пределы изменения $\Delta\mu/\mu$ несколько больше чем $\Delta n/p$, однако наиболее важным параметром, определяющим параметры датчиков, является $\Delta n/p$. Таким образом, в наилучших образцах изменения концентрации и подвижности, вызванные облучением, не превышают 0.1%, что свидетельствует о существенном повышении радиационной стойкости III-V материалов, легированных редкоземельными и переходными элементами.

Для объяснения полученных результатов нами предлагается одна из возможных моделей. Известно, что кислород является одной из важнейших примесей, которая попадает в III-V материалы из компонентов синтеза и материалов оснастки и создает донорные уровни. При взаимодействии с точечными радиационными дефектами кислород создает глубокие акцепторные уровни. Эти уровни эффективно захватывают основ-

ные носители в полупроводниковых материалах при радиационном облучении, что и приводит к изменению электрофизических параметров полупроводников. Таким образом, повысить радиационную стойкость III-V материалов можно, уменьшая концентрацию кислорода. С другой стороны, скорость генерации глубоких акцепторных уровней значительно снизится, если в полупроводник ввести центры геттерирования точечных радиационных дефектов. Алюминий и редкоземельные элементы эффективно геттерируют кислород, и при этом, если их концентрация не превышает некоторой критической величины $0.48 \cdot 10^{-4}$ ат.долей в исходной шихте [3], не создают микровключений. Имея другой, чем атомы матрицы большинства III-V материалов, ковалентный радиус, редкоземельные элементы создают поле упругих деформаций в кристалле, то есть являются одновременно стоками для точечных радиационных дефектов. Поле упругих деформаций могут создавать не только редкоземельные элементы, но и другие электрически активные и нейтральные атомы, ковалентный радиус которых отличается от атомов решетки. Для InAs, InSb, GaAs такими примесями являются Yb, Cr, Mn, Ge, Sn, Gd. Их растворимость в III-V материалах находится в пределах $(1÷6) \cdot 10^{18}$ см⁻³, а разница между геометрическими размерами их атомов и атомов III-V материалов достаточна для возникновения упругих деформаций решетки и изменения процессов дефектообразования.

Металлургическое легирование вышеуказанными примесями позволяет сформировать полупроводниковый материал, в котором под действием ионизирующего облучения генерируется одинаковое количество донорно-акцепторных пар, то есть в целом сохраняется его электронейтральность.

4. Выводы

Использование сложного металлургического легирования с использованием редкоземельных элементов в процессе получения III-V материалов позволяет существенно повысить их радиационную стойкость. Показано, что в лучших образцах InAs, InSb, GaAs изменение концентрации основных носителей после облучения быстрыми нейтронами с флюенсом 10^{14} н/см² не превышает 0.1%.

Список литературы

1. В.Н.Брудный, С.Н.Гриняев. ФТП, 1998, т.32, №3, с.315-318.
2. В.Ф.Мастеров. Редкоземельные элементы в A³B⁵. ФТП, 1990, т.24, в.4, с.610.
3. Г.Н.Семенова, Т.Г.Крыштаб, В.П.Кладько, С.И.Круковский, А.В.Свительский. Неорганические материалы, 1996, т.32, №8, с.916-919.

MODIFICATION OF III-V MATERIAL PROPERTIES WITH THE USE OF COMPLEX DOPING

I.A. Bolshakova¹⁾, S.I. Krukovsky²⁾, I.A. Mrykhin²⁾

¹⁾ State University "Lviv Polytechnics"; Tel./fax: 380322, 970393, e-mail: inessa@mail.lviv.ua

²⁾ Scientific Research Company "Carat"; Tel./fax: 380322, 652244

Semiconductor materials which are produced by the domestic industries of Russia and Ukraine, and by a number of foreign companies, are featured by insufficient radiation resistance. Parameters of sensors based on the semiconductor materials are subject to change by 3-5% minimum under hard radiation conditions. For devices intended for use under radiation conditions, this defines the problem of semiconductor material generation with improved radiation resistance. Aim of this work is to investigate the influence of metallurgical doping by rare-earth and transitional elements upon radiation resistance of III-V materials.

InSb and InAs microcrystals were obtained by means of vapor-transport reactions in closed volume, GaAs epitaxial layers were obtained by means of low-temperature LPE from gallium melt. To study radiation resistance of investigated materials they were exposed to fast neutrons with the energy of 100 keV-13 MeV and fluence of 10^{14} n·cm⁻² in the pulsed neutron reactor at the Joint Institute for Nuclear Research (Moscow region, Dubna). $\Delta n/n$ value (n - initial carrier concentration in samples, Δn - concentration change under irradiation) served as a measure of radiation resistance of a material.

For all investigated materials one can observe that $\Delta n/n$ decreases when Yb, Cr, Mn, Al doping is used. For InSb samples with concentration of $(1+3) \cdot 10^{17}$ cm⁻³ $\Delta n/n$ value does not exceed 0.12%. One can notice a significant decrease of $\Delta n/n$ in GaAs doped by Yb and Al simultaneously. Carrier concentration changes caused by irradiation do not exceed 0.1% for the best samples.

In order to explain the obtained results we propose one of the possible models. It is known that oxygen is one of essential impurities which is induced to the III-V materials from the synthesis components and the accessory materials, and which generates donor levels. It interacts with primary radiation defects and generate complexes with deep acceptor levels. These levels efficiently bond main carriers in semiconductor materials under radiation exposure, which leads to changes of electro-physical parameters of semiconductors. From the other side, generation rate of deep acceptor levels would decrease much if one induces gettering centers of point radiation defects into a semiconductor. Featuring by covalent radius which differs from lattice atom radiuses for most of III-V materials, rare-earth elements (REE) form an elastic field in the crystal, that means in the same time they are drains for primary radiation defects.

The use of complex metallurgical doping by rare-earth elements for obtaining of III-V material allows one to improve radiation resistance significantly. It is found out that changes of main carrier concentration caused by fast neutron irradiation with the fluence of 10^{14} n·cm⁻², do not exceed 0.1% for the best InAs, InSb and GaAs samples.

