

**ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ СЛАБОЛЕГИРОВАННЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ AlGaAs МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ****Н.И. Шумакин**

nikita019kvo@gmail.com

SPIN-код: 6643-5093

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Слаболегированные слои AlGaAs позволяют создавать эпитаксиальные структуры для высокоэффективных приборов различного назначения, которые обладают специальными свойствами. При формировании слаболегированных слоев в тех или иных приложениях возникает ряд проблем с получением низкой концентрации собственных носителей в таких слоях. Одной из основных проблем при формировании таких слоев является присутствие фоновой примеси в исходных компонентах. В статье рассмотрена возможность получения слаболегированного слоя AlGaAs методом жидкофазной эпитаксии путем легирования раствора-расплава редкоземельными элементами и методом компенсации носителей заряда. Описаны преимущества применения каждого из методов для определенного типа приборов.

**Ключевые слова**

Гетероструктура, жидкофазная эпитаксия, слаболегированный слой, фоновые примеси, легирование, компенсация, арсенид галлия, редкоземельные элементы

Поступила в редакцию 22.01.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Эпитаксиальные структуры со слаболегированными слоями широко используются в современной технике и электронике при создании твердотельных приборов, предназначенных для детектирования и преобразования светового потока в электрический сигнал. Такие приборы представляют собой гетероструктуры на основе твердых растворов, которые содержат слаболегированный слой, определяющий основные электрооптические параметры. Получение слаболегированных слоев методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) возможно благодаря легированию элементами, существенно влияющими на физические свойства структуры при малых концентрациях, когда взаимодействие его атомов между собой пренебрежимо мало. При этом его концентрация может быть существенно ниже концентраций других примесей и структурных дефектов, а типы и концентрации фоновых примесей и дефектов определяются случайными факторами и могут быть неизвестными.

Одной из актуальных проблем, которые возникают при формировании слаболегированных слоев, в частности, слаболегированных слоев арсенида галлия-алюминия (AlGaAs), является необходимость получения резкого концентрационного перехода на границе раздела сильно- и слаболегированных слоев. Требования к слаболегированным слоям в структурах такого рода в основном

определяются толщиной слаболегированного слоя и концентрацией собственных носителей. Именно слаболегированный слой обеспечивает возможность получения приборов со специальными свойствами, которые все больше востребованы в области современной электроники различного типа и назначения.

Во многих случаях необходимо управлять структурным совершенством переходной области. Основными причинами возникновения концентрационной и дефектных областей являются процессы диффузионного перераспределения легирующих и фоновых примесей, а также различие периодов кристаллических решеток слоев. Они обусловлены различием типа или концентрацией легирующих примесей. Особенностью слаболегированных слоев является возможность существенного влияния фоновых примесей: диффундирующих из объема или с поверхности сильнолегированного смежного слоя; из ростового оборудования для получения эпитаксиальных структур.

С учетом этого целью исследования являлось выявление принципов получения низкой концентрации основных носителей при использовании метода легирования или компенсации носителей заряда, а также выявление источников фоновых примесей, загрязняющих раствор-расплав.

Основной задачей исследования являлось решение проблемы получения низкой концентрации собственных носителей в слое порядка  $10^{12} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , с высокой воспроизводимостью результатов методом ЖФЭ.

Слаболегированные слои твердотельных композиций граничат со слоями, которые отличаются от них типом и концентрациями легирующих и фоновых примесей. В процессе формирования слаболегированного слоя и при последующих высокотемпературных процессах эти примеси диффундируют в слаболегированный слой, что может влиять на его физические свойства, а также приводить к формированию на границах слаболегированного слоя концентрационной и структурно несовершенной переходных областей, которые в некоторых случаях существенно изменяют параметры приборов.

Примером слаболегированной многослойной композиции, имеющих важное практическое значение, являются эпитаксиальные структуры на основе арсенида галлия-алюминия с концентрацией носителей  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и ниже. При этом типичные концентрации фоновых примесей составляют  $10^{12} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для элементов III и V групп,  $10^{15} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для кислорода, углерода, азота, а концентрации дополнительных легирующих примесей могут достигать  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  [1–3].

Гетероструктура арсенида галлия-алюминия получила широкое распространение при изготовлении силовых полупроводниковых приборов, фотоприемников, детекторов излучений, приборов, предназначенных для работы при сверхнизких температурах, в условиях высокой радиации и других изделий твердотельной электроники. Конструктивной особенностью таких приборов является использование структур со слаболегированными слоями, которые и позволяют получать высокое быстродействие, линейность, радиационную стойкость, повышение обратных напряжений пробоя, чувствительность фотоприемников, уменьшить паразитные емкости  $p$ - $n$ -переходов [4].

Для достижения этих параметров необходимо расширить область пространственного заряда (ОПЗ), которая, работая даже при нулевом обратном смещении, позволяет детектировать самые слабые уровни излучения. Поэтому и необходима реализация слоя, в котором концентрация собственных носителей будет сильно приближена к идеальным ( $\text{GaAs} = 2,1 \cdot 10^6 \text{см}^{-3}$ ), для того чтобы расширить границы ОПЗ, в которой фотон генерирует пары.

В настоящее время для получения структур на основе AlGaAs с толстыми слоями порядка 20...100 мкм широко применяют метод жидкофазной эпитаксии.

Особенностью слабелегированных слоев, получаемых этими методами, является то, что концентрация фоновых примесей, в первую очередь IV и VI группы, в них может быть на несколько порядков выше концентрации легирующего элемента, определяющего удельное электрическое сопротивление кристалла. Во многих случаях эти примеси определяют свойства получаемых структур. В этой связи основной проблемой получения слабелегированных слоев является поиск методов снижения фоновых примесей входящих в состав эпитаксиальных слоев. Основным методом снижения фоновых примесей, применительно к методу жидкофазной эпитаксии, является применение метода комплексного легирования структур на основе AlGaAs, где растворы-расплавы легируются изовалентным и редкоземельными элементами (рис.1). Использование редкоземельных элементов обусловлено их высокой активностью, которая способствует снижению концентрации фоновой примеси и одновременному повышению подвижности основных носителей заряда [5]. Наряду с легированием используется и метод компенсации носителей заряда в случае исполнения структур из одного эпитаксиального слоя (рис. 2).



Рис. 1. Легирование редкоземельными элементами

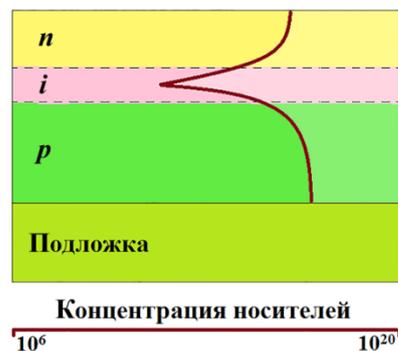


Рис. 2. Компенсация носителей заряда

При жидкофазной эпитаксии монокристаллический слой растет из раствора-расплава, в который помещается подложка. При понижении температуры раствор становится пересыщенным и на подложке растет эпитаксиальный слой, кристаллографическая ориентация которого задана подложкой. Толщина слоя зависит от объема расплава, температуры начала кристаллизации, интервала и скорости охлаждения. Метод жидкофазной эпитаксии прост и надежен, удобен

при выращивании многослойных структур, а также прост в аппаратном исполнении, однако он редко применяется для выращивания тонких слоев. Поэтому этот метод оптимален для получения слабелегированных слоев в многослойных композициях. Это открывает возможность нетрадиционного подхода к конструированию высоковольтных приборов на основе гетероструктур. Кроме того, этот метод по сравнению с другими имеет следующие преимущества: экономическая эффективность (обусловленная относительно низкой стоимостью оборудования и исходных материалов); большие скорости роста; возможность снижения примесного фона, высокая воспроизводимость процессов.

Данные [6–11] свидетельствуют о том, что для различных свойств и различных физико-химических процессов существуют критические концентрации, при превышении которых наблюдаются заметные изменения параметров структур. Их значения существенно зависят от температуры и исследуемого свойства. В качестве граничных значений концентрации или удельного электрического сопротивления для слабелегированных (высокоомных) композиций можно выбрать появление особенностей, связанных с перекрытием электронных оболочек, деформационным или электростатическим взаимодействием примесных атомов, температуру перехода к собственной проводимости, отсутствие или линейность зависимостей их физических и химических свойств от концентрации легирующего элемента, близость подвижности основных носителей к максимальным известным для данного вещества при некоторой (достаточно низкой) температуре значениям. Каждый из этих подходов дает различные критические значения удельного электрического сопротивления и концентраций легирующего элемента.

При выборе методов роста используют несколько подходов к анализу и описанию процессов, происходящих в процессе эпитаксиального наращивания. С точки зрения термодинамики слабелегированные структурные слои представляют собой разбавленные твердые растворы. Теория разбавленных твердых растворов предполагает, что концентрации фоновых примесей и плотности структурных дефектов малы и не оказывают существенного влияния на физические свойства. Взаимодействие атомов легирующего элемента с другими примесями и структурными дефектами может существенно влиять на их поведение в слабелегированных слоях. В частности, это взаимодействие приводит к изменению энергетического и зарядового состояния атомов примеси, частот их локальных колебаний, искажений решетки вблизи примесного атома и т. д. В свою очередь, это ведет к изменению распределения атомов примеси по позициям различного типа, предела текучести, удельного электрического сопротивления, спектров оптического пропускания, коэффициентов диффузии и растворимостей примесей, а также других физических свойств. Независимо от типа дефекта вблизи него существуют позиции как с повышенной, так и с пониженной энергией атомов легирующей примеси. Во многих системах атомы примеси могут быть распределены между узлами и междоузлиями или между междоузлиями различного типа. При этом их энергии в различных позициях также будут раз-

личны. В полупроводниковых и диэлектрических кристаллах энергии примесных атомов могут различаться также из-за различия степени их ионизации. Равновесное распределение примесных атомов по различным состояниям описывается статистикой Ферми, применение которой позволяет, в принципе, определить химический потенциал примеси и, следовательно, термодинамические функции раствора и его свойства, обусловленные распределением примесей. Однако при расчете термодинамических свойств твердых растворов предпочтение отдается квазихимическим моделям, основанным на упрощенных и не всегда оправданных предположениях о характере взаимодействия примесных атомов. Это связано с тем, что надежные данные об энергиях примесных атомов в различных позициях имеются лишь для небольшого числа систем.

Таким образом, существует потребность в дальнейших исследованиях закономерностей влияния фоновых примесей и структурных дефектов на физические свойства слабелегированных слоев многослойных композиций для лучшего понимания того, как получать слои с низкой концентрацией фоновых примесей, поскольку с физико-химической точки зрения слабелегированные слои являются идеальными или неидеальными разбавленными твердыми растворами. Область идеальности твердого раствора в зависимости от температуры и характера взаимодействия легирующего элемента с фоновыми примесями и дефектами может быть ограничена как со стороны высоких концентраций, так и со стороны низких концентраций легирующего элемента. При определенных условиях она может вообще отсутствовать. Поскольку применение термина «слабелегированный» предполагает, что мы говорим о концентрации собственных носителей, число которых снижается за счет легирования редкоземельными элементами, поиск как режимов получения, так и самих легирующих элементов остается актуальной проблемой.

На данный момент можно лишь говорить о том, что метод легирования раствора-расплава редкоземельных элементов применим для многослойных структур, где нужно обеспечить низкую концентрацию в отдельном слое. Основным привлекательным преимуществом метода является простота и отсутствие изменений в технологическом процессе. Методика компенсации носителей заряда отличается технологической простотой и возможностью получения *p-n*-перехода (*pin*-структуры) в одном эпитаксиальном слое.

## Литература

- [1] Салли И.В., Фалькевич Э.С. Производство полупроводникового кремния. М., Металлургия, 1970.
- [2] Нашельский А.Я. Технология полупроводниковых материалов. М., Металлургия, 1987.
- [3] Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. и др. Технология полупроводникового кремния. М., Металлургия, 1996.
- [4] Kaniewska M. Deep levels in Yb-Al co-doped GaAs grown by liquid phase epitaxy. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2006, vol. 9, no. 1-3, pp. 366–370. DOI: 10.1016/j.mssp.2006.01.018 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800106000308>

- [5] Шумакин Н.И., Стрельченко С.С. Особенности получения слаболегированных слоев алюминия-галлия арсенида для фотоприемных устройств. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-6-1628 URL: <http://engjournal.ru/catalog/msm/nnm/1628.html>
- [6] Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л., Наука, 1972.
- [7] Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепции и применения в физике, электронике и технологии. *УФН*, 2002, т. 172, № 9, с. 1072–1086. DOI: 10.3367/UFNr.0172.200209e.1068 URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2002/9/e/>
- [8] Тейлор П. Расчет и проектирование тиристорov. М., Атомиздат, 1990.
- [9] Чарыков Н.А. Физические явления в р-п переходах. М., МЭИ, 1994.
- [10] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М., Мир, 2004.
- [11] Бахрушин В.Е. Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций. Запорожье, ЗИГМУ, 2001.

**Шумакин Никита Игоревич** — аспирант кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Валерий Павлович Михайлов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## THE PROBLEMS OF OBTAINING LIGHTLY DOPED EPITAXIAL AlGaAs LAYERS BY THE METHOD OF LIQUID PHASE EPITAXY

N.I. Shumakin

nikita019kvo@gmail.com

SPIN-code: 6643-5093

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

Lightly doped AlGaAs layers allow to create epitaxial structures for high-performance devices for various purposes, which have special properties. A number of problems with obtaining a low concentration of intrinsic carriers in such layers arises during forming lightly doped layers in various applications. One of the main problems in the formation of such layers is the presence of background impurities in the initial components. The article considers the possibility of obtaining a lightly doped AlGaAs layer by the method of liquid phase epitaxy of doping the solution-melt with rare-earth elements and the method of charge carrier compensation. The advantages of using each of the methods for a particular type of instrument are described.

### Keywords

Heterostructure, liquid phase epitaxy, lightly doped layer, background impurities, doping, compensation, gallium arsenide, rare-earth elements

Received 21.01.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Salli I.V., Fal'kevich E.S. Proizvodstvo poluprovodnikovogo kremniya [Production of semiconductor silicon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970 (in Russ.).
- [2] Nashel'skiy A.Ya. Tekhnologiya poluprovodnikovoykh materialov [Semiconductor materials technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987 (in Russ.).
- [3] Fal'kevich E.S., Pul'ner E.O., Chervonny I.F., et al. Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya [Semiconductor silicon technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1996 (in Russ.).
- [4] Kaniewska M. Deep levels in Yb–Al co-doped GaAs grown by liquid phase epitaxy. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2006, vol. 9, no. 1-3, pp. 366–370. DOI: 10.1016/j.mssp.2006.01.018 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800106000308>
- [5] Shumakin N.I., Strel'chenko S.S. Specifics of obtaining lightly-doped aluminium gallium arsenide layers for photodetectors. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-6-1628 URL: <http://engjournal.ru/catalog/msm/nnm/1628.html> (in Russ.).
- [6] Boltaks B.I. Diffuziya i tochechnye defekty v poluprovodnikakh [Diffusion and point defects in semiconductors]. Leningrad, Nauka Publ., 1972 (in Russ.).
- [7] Alferov Zh.I. Double heterostructures: conception and application in physics, electronics and technology. *UFN*, 2002, vol. 172, no. 9, pp. 1072–1086. DOI: 10.3367/UFN.0172.200209e.1068 URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2002/9/e/> (in Russ.).
- [8] Taylor P.D. Thyristor design and realization. Wiley, 1987. (Russ. ed.: Raschet i proektirovanie tiristorov. Moscow, Atomizdat Publ., 1990.)
- [9] Charykov N.A. Fizicheskie yavleniya v p-n perekhodakh [Physical phenomena in p-n junctions]. Moscow, MEI Publ., 1994 (in Russ.).

- [10] Muller R.S., Kamins T.I. Device electronics for integrated circuits. Wiley, 2002. (Russ. ed.: Elementy integral'nykh skhem. Moscow, Mir Publ., 2004.)
- [11] Bakhrushin V.E. Poluchenie i fizicheskie svoystva slabolegirovannykh sloev mnogosloynnykh kompozitsiy [Realization and physical properties of lightly doped layers in multi-layer compositions]. Zaporozh'ye, ZIGMU Publ., 2001 (in Russ.).

**Shumakin N.I.** — Postgraduate Student, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.P. Mikhailov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.