

**Терлецкая Л.Л., Копыт Н.Х., Голубцов В.В.**

*Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова.*

### **Особенности улучшения структурно-чувствительных параметров сенсоров на основе гетерогенных дисперсных систем**

*Рассмотрены особенности получения подложек GaAs с улучшенными структурными электрофизическими параметрами для сенсоров. Разработаны оптимальные технологические режимы процессов изотермической обработки и обработки исходных пластин в поле градиента температур, способствующих значительному снижению плотности дислокаций и уменьшению объемной доли проводящих неоднородностей. Комплексное применение разработанных методов предназначено для оптимизации технологии получения подложек GaAs в производстве сенсоров и повышения их надежности.*

Стремительное развитие современной техники требует решения технологических проблем получения полупроводниковых материалов, которые при использовании всех современных технологических средств микроэлектронной техники обеспечили бы высокое быстродействие и способствовали уменьшению энергоёмкости интегральных схем.

Наиболее востребованным материалом в электронной технике является арсенид галлия, преимущества которого неоспоримы: благоприятная зонная структура, высокая подвижность электронов, сравнительная простота получения монокристаллов и плёнок с полуизолирующими (ПИ) свойствами, хорошие теплофизические характеристики. Одно из важнейших свойств ПИ–GaAs для применения его в интегральной сенсорной технике – малые диэлектрические потери [1].

Однако, при выращивании монокристаллов GaAs всеми существующими методами из-за значительной протяжённости его области гомогенности при высоких температурах практически невозможно избежать отклонений от стехиометрии, способствующих образованию точечных дефектов, дислокаций, микровключений второй фазы [2,3]. Поэтому качество подложек GaAs, получаемых из таких монокристаллов, не удовлетворяет растущим требованиям электронной техники.

Одним из наиболее перспективных направлений на пути улучшения качества подложек в настоящее время является разработка методов воздействий на выращенный монокристалл, в результате которых происходило бы снижение внутренних механических напряжений, перераспределение и удаление дефектов, приводящее к улучшению основных характеристик, повышению однородности и термостабильности полупроводникового материала.

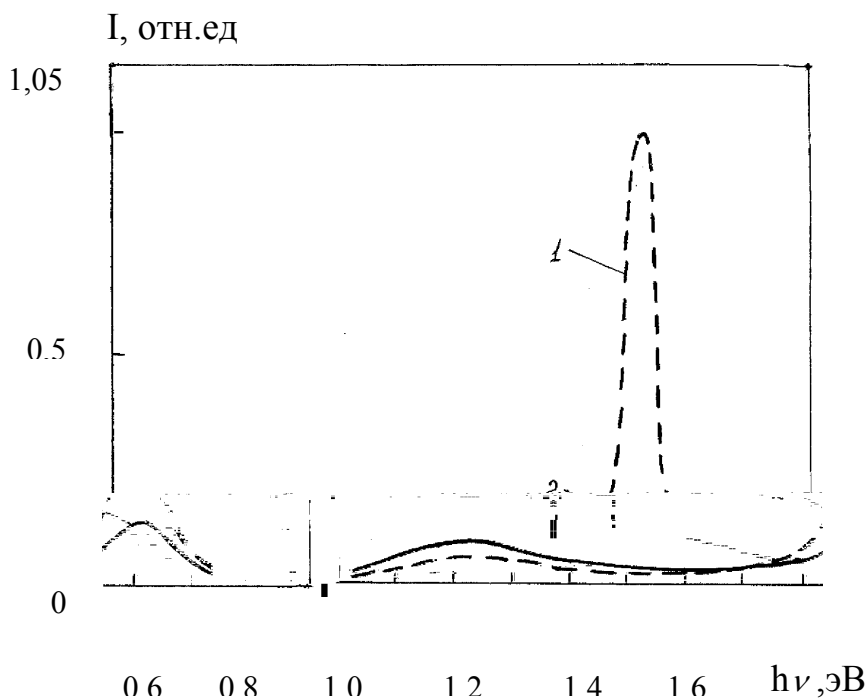
С целью устранения нестабильности и улучшения структурных и электрофизических характеристик подложек ПИ–GaAs нами проводилась различных видов термическая обработка (изотермический отжиг, обработка в поле гради-

ента температур) исходных пластин. При разработке оптимальных технологических режимов термообработки подложечного GaAs исходили из условий необходимости уменьшения влияния основных факторов, обусловленных технологическими параметрами процесса получения монокристаллических слитков (микровключений второй фазы, дислокационной структуры, неконтролируемых неоднородностей). Для отжига использовались пластины ПИ–GaAs (100) n типа проводимости, диаметром 40мм и толщиной 400-500 мкм.

Процесс изотермического отжига образцов проводился в кварцевом реакторе на установке ЖФЭ в атмосфере очищенного водорода. Термическая обработка пластин ПИ–GaAs при температурах  $T_{отж} \leq 600^{\circ}\text{C}$  в течение времени  $t \leq 3$  часа практически не оказывала существенного влияния на состояние их поверхности. При более высоких температурах ( $T_{отж} \geq 700^{\circ}\text{C}$ ) наблюдалось изменение типа проводимости приповерхностного слоя, который впоследствии удалялся методом химического травления. Наблюдалось возрастание удельного сопротивления образцов после отжига практически при всех указанных температурах процесса, что может быть обусловлено изменением состояния акцепторов. Наилучшие результаты (по удельному сопротивлению и подвижности основных носителей) были получены после обработки образцов в режиме:  $T_{отж} = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 0.5$  ч.

Исследованы основные особенности спектров фотолюминесценции (ФЛ) образцов нелегированного ПИ–GaAs, обработанных в различных температурных и временных режимах. Спектры ФЛ измерялись по стандартной методике, описанной ранее в работе [4].

Для образцов с незащищённой рабочей поверхностью после отжига при



**Рис.1.** Спектры ФЛ образца ПИ-GaAs: 1-до отжига; 2-после отжига при  $T_{отж} = 700^{\circ}\text{C}$ ,  $t=0,5$ ч (рабочая поверхность не защищена).

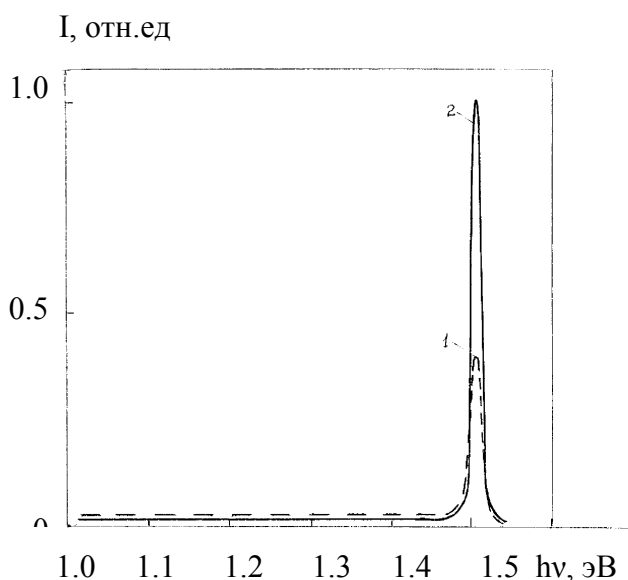
температурах 400-800 °С характерным было появление в спектрах ФЛ кроме краевой полосы излучения дополнительной полосы, соответствующей  $h\nu = 0.83$  эВ (рис.1).

На рисунке 2 представлены типичные спектры ФЛ образцов ПИ–GaAs до (кривая 1) и после термической обработки при  $T_{отж} = 700$  °С в течение 0.5ч (кривая 2). В данном случае при проведении процесса отжига две подложки плотно прижимались рабочими поверхностями одна к другой с целью исключения сублимации мышьяка с их поверхности. В спектрах таких образцов наблюдалась одна полоса излучения, соответствующая  $h\nu = 1.51$  эВ. После отжига интенсивность краевой полосы существенно увеличивалась (кривая 2), что обусловлено значительным уменьшением числа центров безызлучательной рекомбинации в GaAs.

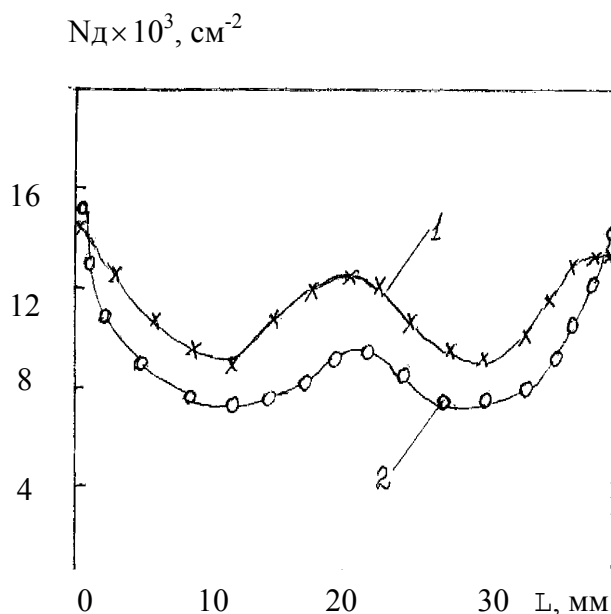
Кратковременная термическая обработка пластин с защищённой рабочей поверхностью (при тех же оптимальных параметрах процесса) способствовала также снижению плотности дислокаций и однородному её распределению в основной центральной части образцов. Наблюдалось небольшое увеличение плотности дислокаций лишь у краёв пластин (рис.3).

Более продолжительная термообработка ( $t > 1$ ч) образцов при  $T_{отж} \geq 800$  °С приводила к ухудшению указанных параметров вплоть до потери полуизолирующих свойств.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показал, что путём оптимизации параметров процесса изотермической обработки пластин ПИ–GaAs при наличии защитного слоя на рабочей поверхности образцов можно получать однородные по свойствам подложки с существенно улучшенными структурными



**Рис.2.** Спектры ФЛ образца ПИ-GaAs: 1 – до отжига; 2 – после отжига при  $T_{отж} = 700$  °С,  $t = 0.5$ ч (рабочая поверхность защищена)



**Рис.3.** Распределение плотности дислокаций в нелегированном ПИ-GaAs: 1 – до отжига; 2 – после отжига при  $T_{отж} = 700$  °С,  $t = 0.5$ ч (рабочая поверхность защищена)

ми и электрофизическими характеристиками.

Исследования показали, что более эффективным методом улучшения качества подложек GaAs является обработка исходных пластин в поле градиента температур. Этот метод позволяет улучшить воспроизводимость результатов (по сравнению с изотермическим отжигом) в связи с тем, что на процесс хаотического перераспределения точечных дефектов и перемещения дислокаций влияет направленное упорядочивающее воздействие поля. При определённых оптимальных параметрах процесса градиент температуры оказывает решающее влияние на упорядочивание структуры. Одним из наиболее существенных преимуществ такого вида термической обработки является возможность резкого уменьшения концентрации и объёмной доли неоднородностей в виде малоизученных легкоплавких микровключений избыточного матричного металла – галлия [5]. Проводящие микровключения Ga являются не только активными концентраторами внутренних механических напряжений в монокристаллах GaAs, но и способствуют быстрой деградации приборных структур, что обусловлено экстрагентной активностью и подвижностью дефектов такого типа в решётке матрицы кристалла.

Термическая обработка пластин ПИ–GaAs в поле градиента температур (перпендикулярно поверхности) проводилась с помощью разработанного для этих целей нагревателя в специально оборудованном вытяжном шкафу. Предварительно с целью предотвращения термического разложения и формирования точечных дефектов на рабочую поверхность пластины наносился защитный слой неактивного вещества (борного ангидрида). После химической очистки, отмывки и сушки пластины укладывались нерабочей поверхностью на графитовый нагреватель. При такой обработке неоднородности галлия перемещались по направлению градиента температур и скапливались на более нагретой поверхности образца. После окончания процесса отжига обогащённый галлием

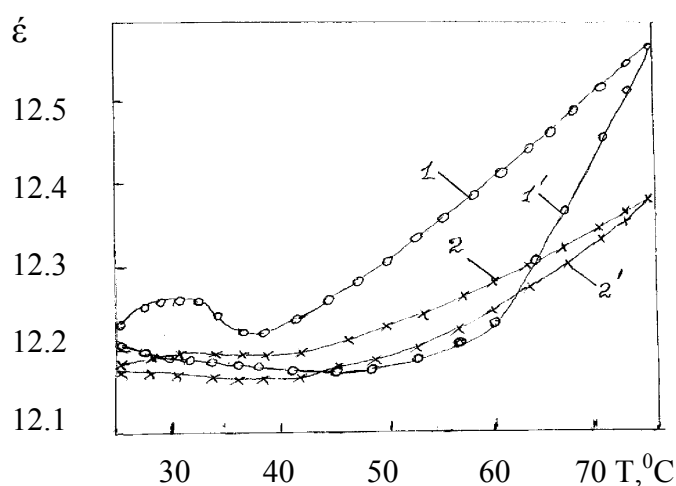


Рис. 4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости подложки ПИ-GaAs: 1, 1' - до отжига; 2-2' - после отжига в градиенте температур  $80^{\circ}\text{C}/\text{см}$ ; 1, 2 - нагрев; 1', 2' - охлаждение

приповерхностный слой (со стороны нагревателя) удалялся методом шлифовки и химического травления.

Исследования и контроль проводящих микровключений галлия в подложечном GaAs осуществлялись методом диэлькометрии, описанном в работе [5]. На рис.4 представлены типичные кривые температурной зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  пластин ПИ – GaAs до (кривые 1, 1') и после термической обработки в поле градиента температур  $80\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$  в течение 1 часа (кривые 2, 2'). Заметное увеличение  $\epsilon'$  при  $T > 25\text{ }^\circ\text{C}$  обусловлено процессами, предшествующими плавлению галлия в микровключениях (кривая 1).

При  $T \approx 9\text{ }^\circ\text{C}$  происходит плавление галлия во включении и дальнейшее объёмное расширение микровключений прекращается, о чём свидетельствует плато на участке кривой нагрева. Процесс плавления включений завершается при  $36\text{ }^\circ\text{C}$ .

Гистерезис, наблюдающийся при охлаждении образца (кривая 1'), может быть обусловлен дисперсией размеров включений и релаксационными процессами. Согласно методике измерений, площадь, ограниченная кривыми 1 и 1', пропорциональна суммарной объёмной доле микровключений и области объёмного заряда. Как видно на рис.4, после отжига образца в поле градиента температур объёмная доля микровключений в нём существенно уменьшилась (кривые 2, 2').

После обработки образцов в полях градиентов температур  $80\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$  в течение 1-3 часов в спектрах ФЛ (измерения проводились в различных точках поверхности) наблюдалось постоянство интенсивности появляющейся полосы излучения, соответствующей  $h\nu = 1.40\text{ эВ}$ , что, согласно данным работы [6], свидетельствует о равномерном по площади испарении атомов мышьяка. Радиальное распределение плотности дислокаций  $N_\delta$  в образцах, обработанных в поле градиента температур  $80\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$  в течение одного часа, было практически однородным. После такой термообработки плотность дислокаций в пластинах уменьшалась не менее, чем на порядок (до обработки:  $N_\delta = 5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5\text{ см}^{-2}$ ; после обработки:  $N_\delta = (3 - 7) \cdot 10^3\text{ см}^{-2}$ ).

Анализ полученных результатов исследований показал, что оптимизация процессов обработки пластин в поле градиента температур перпендикулярно поверхности позволяет не только значительно снижать объёмную долю микровключений галлия в ПИ–GaAs, но и полностью их удалять из объёма кристалла.

Таким образом, разработанные методики обработки исходных пластин GaAs в различных температурных полях и комплексное их применение могут быть использованы для оптимизации технологии получения подложек с улучшенными структурно-чувствительными параметрами и однородным их распределением в кристалле в производстве сенсорных интегральных схем для повышения их надёжности.

### Литература:

1. Арсенид галлия в микроэлектронике /Под ред.Н.Айспрука, У.Уиссмана. – М.: Мир, 1988.– 555 с.
2. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. – М.:Металлургия, 1984. – 256 с.
3. Василенко Н.Д., Терлецкая Л.Л. Анализ качества эпитаксиальных слоёв соединений  $A^3B^5$  для приборов СВЧ-техники (обзор) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 1991. – Вып. 21. – С.28-40.
4. Терлецкая Л.Л., Голубцов В.В., Калинин Л.Ф. Структуры на основе гетероперехода Si-GaAs для интегральных оптронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – №2. – С.51-54.
5. Василенко Н.Д., Терлецкая Л.Л. Диэлькометрическое исследование дефектов в подложках полуизолирующего арсенида галлия // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 1993. – Вып. 25. – С.105-109.
6. Коваленко В.Ф., Лисовенко В.Д., Марончук И.Е. и др. Остаточные напряжения в монокристаллах арсенида галлия // Известия АН СССР. Неорганические материалы. –1990. – Т. 26, №2. – С. 223-236.

*Terletskaia L.L., Kopyt N.Ch., Golubtsov V.V.*

### **The features of structure-sensitive parameters improvement of heterogeneous dispersion system-base sensors**

#### SUMMARY

*Distinctive features of obtaining the sensor-designed GaAs substrates with improved structure and electrophysical characteristics are considered. Optimal regimes for the technological processes of isothermic treatment and treatment of the initial plates in a gradient temperature field have been developed, which promote a significant reduction of the dislocation density and lower the concentration of conductive inhomogeneities. Complex application of the developed methods is designed for the technology optimization of obtaining the GaAs substrates in the sensor manufacturing and increase of their reliability.*

*Терлецька Л.Л., Копит М.Х., Голубцов В.В.*

### **Особливості поліпшування структурно-чутливих параметрів сенсорів на основі гетерогенних дисперсних систем**

#### АНОТАЦІЯ

*Розглянуто особливості отримання підкладнок GaAs з поліпшеними структурними та електрофізичними параметрами для сенсорів. Розроблено оптимальні режими процесів ізотермічної обробки та обробки пластин у полі градієнта температур, що сприяють значному зменшенню щільності дислокацій та об'ємної частки провідних неоднорідностей. Комплексне застосування розроблених методів призначено для оптимізації технології отримання підкладнок GaAs у виробництві сенсорів з підвищеною надійністю.*