

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ВЫРАЩИВАНИЯ
СЛИТКОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРО, НАНО
ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОВОЛЬТАИКИ**

*Оксанич А. П.¹, д.т.н., проф.; Притчин С. Э.¹, к.т.н., доц.,
Тербан В. А.², к.т.н., доц.*

¹ *Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского,
Кременчуг, Украина*

² *ЧП «Галар», Светловодск, Украина*

**DEVELOPMENT OF DEVICES AND SYSTEMS OF GROWTH OF GALLIUM
ARSENIDE INGOTS FOR MICRO, NANO ELECTRONICS AND
PHOTOVOLTAICS**

*A. P. Oksanich¹, Doctor of Engineering, Professor;
S. E. Pritchyn¹, PhD, Associate Professor; V. A. Terban², PhD, Associate Professor,
¹Kremenchuk Mikhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine
²PC «Galar», Svetlovodsk, Ukraine*

Введение

Арсенид галлия (GaAs) является важным полупроводником, третьим по масштабам использования в промышленности после кремния и германия. Полуизолирующий арсенид галлия находит широкое применение при изготовлении оптических элементов ИК-оптики [1]. Это обусловлено его оптическими свойствами, в частности, значением показателя преломления в этой области и практически неселективным оптическим пропусканием в достаточно широком спектральном диапазоне [2]. Широкое применение GaAs находит в фотовольтаике, как в виде солнечных батарей для космического применения, фотогальванических ячеек наземного применения, в гетероструктурных и каскадных элементах солнечных батарей.

В настоящее время развивающимся сектором арсенида галлия является производство светодиодов с высокой яркостью излучения. Рыночная доля светодиодов для задней подсветки дисплеев ноутбуков, по оценке одного из аналитиков, повысилась в 2010 г. до 89% с 46% в 2009 г. В 2009 г. рынок высокоярких светодиодов оценивался в 5,3 млрд. долл., а в 2010 г., по оценке, достиг 8,2 млрд. [3].

В Украине производством слитков GaAs занимается ЧП «Галлар», г. Светловодск.

Основным методом промышленного выращивания слитков GaAs является метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski— LEC).

При выращивании слитков арсенида галлия этим методом процесс осуществляется при достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры вблизи фронта кристаллизации. Это приводит к высокой плотности дислокаций, которая лежит в диапазоне от 1×10^4 до $2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$ в зависимости от диаметра слитка. GaAs очень чувствительным к условиям выращивания, которые и определяют уровень внутренних механических напряжений и плотность дислокаций в нем [4, 5].

Решение задачи повышения качества монокристаллического арсенида галлия в слитках мы видим в разработке новых систем и устройств для выращивания слитков, и совершенствовании существующих технологий, особенно для слитков диаметром 4".

Несомненно, что решение задачи увеличения производства арсенида галлия большого диаметра с одновременным улучшением его структурных качеств является актуальным для полупроводниковой промышленности и науки Украины.

Анализ проблемы и постановка задачи

Основным ограничением к массовому использованию арсенида галлия является его стоимость, которая во многом определяется существующими технологиями его производства.

Параметры пластин арсенида галлия в основном зависят от параметров и качества слитков, из которых они изготавливаются. Главное требование, предъявляемое разработчиками микроэлектронных приборов к монокристаллам GaAs, — это, прежде всего, низкая плотность дислокаций, низкие внутренние напряжения и стабильный диаметр слитка по всей его длине.

В настоящее время промышленно выпускаются слитки арсенида галлия диаметром 40 и 75 мм (2" и 3") с плотностью дислокаций порядка $(5 \div 8) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$, концентрацией носителей заряда $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и подвижностью в диапазоне $300 \div 5000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от легирующей примеси и диаметра слитка. Увеличение диаметра выращиваемых слитков до 100 – 150 мм, приводит к ухудшению параметров слитков, и резкому увеличению внутренних напряжений. В свою очередь внутренние напряжения вызывают растрескивание слитков и пластин при резке и обработке слитков.

Основной причиной, которая вызывает ухудшение структурных параметров слитков является температурный градиент, который формируется в процессе выращивания слитка.

Можно выделить следующие направления усовершенствования технологии:

- разработка нового теплового узла обеспечивающего низкие температурные градиенты;
- совершенствования системы управления процессом выращивания;

- разработка системы измерения диаметра слитка в процессе выращивания;

- разработка системы измерения внутренних напряжения в пластинах GaAs.

Целью работы является решение задачи усовершенствование технологии выращивания слитков арсенида галлия.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- разработка устройства измерения диаметра слитка арсенида галлия в процессе выращивания;

- разработка устройства управления выращиванием слитков арсенида галлия;

- разработка экспрессного бесконтактного метода и устройства измерения внутренних напряжений.

Практические результаты. Особо важную роль в получении структурно-совершенных слитков арсенида галлия играет система управления. Исследования, выполненные авторами работы, позволили сделать вывод о не оптимальности существующих систем управления промышленными установками. Одним из основных информационных параметров для системы управления является диаметр слитка, который необходимо измерять в процессе роста. Нами было разработано устройство измерения диаметра слитка по весовому методу.

Связь между весом слитка и его радиусом [6] в процессе выращивания определяется как:

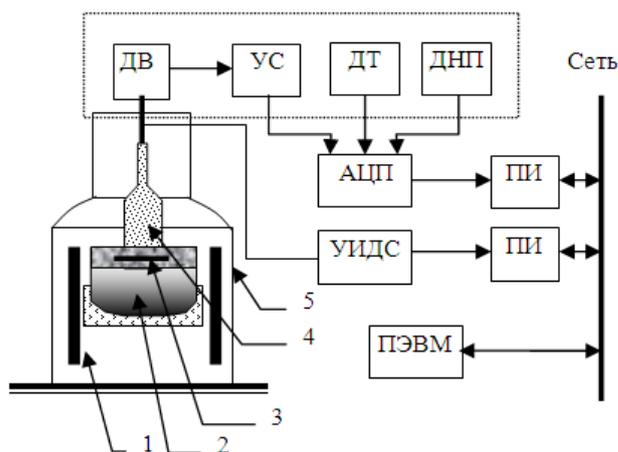
$$F(t) = m_0 g + \int_0^t \pi r^2 \rho_k g v dt + \pi r_m^2 \rho_{ж} g h + 2\pi r \sigma_{ж} \sin \alpha \quad (1)$$

где m_0 — масса штока со слитком; ρ_k и $\rho_{ж}$ — плотности GaAs в твердом и расплавленном состоянии; r — радиус слитка; r_m — усредненный радиус мениска; v — скорость выращивания; h — высота мениска; $\sigma_{ж}$ — коэффициент поверхностного натяжения расплава, α - угол между поверхностью мениска и поверхностью расплава.

Таким образом для определения диаметра слитка GaAs достаточно измерять его вес через определенные промежутки времени при известной скорости выращивания.

Как видно из выражения (1) погрешности измерения веса слитка непосредственно влияет на погрешность определения его диаметра.

Предложенная система измерения диаметра учитывает основные возмущающие факторы влияющие на измерение веса, и производит необходимую корректировку результата измерения. Структурная схема разработанного устройства приведена на рисунке 1. В результате нами была достигнута абсолютная точность измерения диаметра слитка в процессе выращивания $\pm 1,0$ мм.



1 – основной нагреватель; 2 – тигель с расплавом и жидкостным герметизатором; 3 – фоновый нагреватель; 4 – слиток; 5 – ростовая камера; ДВ – датчик веса, УС – усилитель, ДТ – датчик температуры установленный возле датчика веса, ДНП – датчик напряжения питания усилителя и датчика веса, измеряющий колебания питающего напряжения датчика веса и усилителя, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, УИДС – устройство измерения длины слитка, ПИ – преобразователь интерфейса, ПЭВМ – промышленная ЭВМ.

Рис. 1. Структурная схема устройства измерения диаметра слитка.

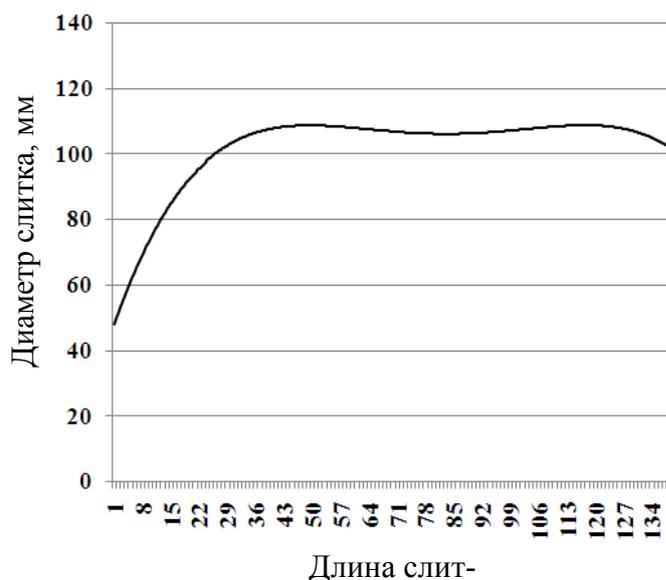


Рис.2. Профиль слитка GaAs полученный в процессе выращивания.

Проведенный нами анализ существующих систем управления процессом выращивания слитков арсенида галлия показал, что малыми отклонениями скорости вытягивания слитка не удастся обеспечить требуемую точность регулирования диаметра, а при больших отклонениях — наблюдается ухудшение качественных параметров кристаллов. Кроме того, существенные колебания скорости вытягивания могут приводить к срыву монокристалличности роста слитка. Для решения задачи регулирования диаметра слитка авторами было предложено использовать канал фонового нагревателя с регулятором, работающем по методу прогнозного управления [7]. В процессе работы впервые была синтезирована адекватная ARMAX-модель процесса вытягивания монокристаллических слитков арсенида галлия, на основе использования которой был впервые выполнен синтез оптимального прогнозного регулятора процесса выращивания слитков GaAs.

Предложенная система является двух-уровневой, при этом нижний уровень оснащен микроконтроллерными регуляторами, поддерживающими заданное значение технологического параметра, и верхний уровень на промышленном ПК реализует интерфейс технолога и аппаратчика, формирует

управляющие воздействия и ведение логов процесса. На рисунке 2 показан результат работы системы управления в виде профиля слитка GaAs.

Тепловой узел является определяющим элементом ростовой установки. Формируемое этим узлом тепловое поле в основном определяет параметры, структурное совершенство и выход готовой продукции. Для решения

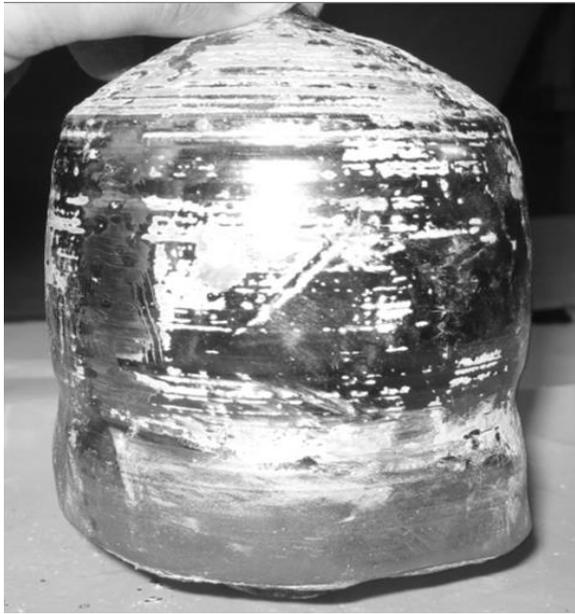


Рис.3. Слиток арсенида галлия диаметром 100 мм выращенный по усовершенствованной технологии.

задачи создания теплового узла с пониженными осевыми градиентами нами была разработана математическая модель теплообмена на поверхности слитка с учетом геометрических параметров теплового узла и разработана методика оптимизации размеров и расположения теплового экрана ростовой установки. Результатом этих работ явилась разработка теплового узла, который позволяет снизить осевые температурные градиенты до 51..53 К/см и обеспечить равномерное распределение температуры по оси выращиваемого слитка. Слиток GaAs выращенный по усовершенствованной технологии показан на рисунке 3.

В настоящее время, при решении практических задач анализа формирования структурных нарушений используют расчетные методы определения уровня внутренних напряжений. Такой подход не обеспечивает требуемой точности. Для решения задачи определения величины и распределения внутренних напряжений мы использовали хорошо зарекомендовавший себя метод фотоупругости, который реализуется на разработанном нами устройстве «Полярон М». Обеспечить высокую точность измерения внутренних напряжений удалось при использовании гелий-неонового лазера на длину волны 3,13 мкм и фотоприемника на основе

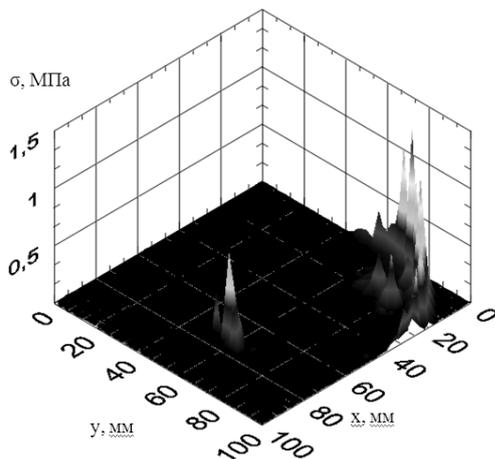


Рис.5. Внутренние напряжения в пластине GaAs измеренные устройством «Полярон М»

сульфида свинца с термостатированием.

Полученное распределение напряжений в пластине арсенида галлия диаметром 100 мм на рисунке 5.

Выводы

1. Разработаны устройства и системы позволяющие усовершенствовать технологию выращивания слитков арсенида галлия диаметром до 100 мм, позволяющая выращивать слитки со следующими характеристиками: номинальный диаметр слитка, мм до 100; подвижность носителей заряда, $\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ - $2500 \div 3500$ легированным телуром; концентрация свободных носителей заряда, см^{-3} - $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18}$; плотность дислокаций, см^{-2} - до 8×10^4 .

2. Разработан тепловой узел, позволяющий снизить температурные градиенты до 51..53 К/см;

3. Разработан оптимальный прогнозный регулятор по каналу фонового нагревателя, обеспечивающий точность поддержания диаметра ± 2 мм;

4. Разработан метод и устройство измерения диаметра слитка в процессе его выращивания, обеспечивающая точность измерения диаметра с абсолютной погрешностью, $\pm 1,0$ мм;

5. Разработано устройство измерения внутренних напряжений в пластинах арсенида галлия, позволяющий определять структурные нарушения и выполнять корректировку технологического процесса в случае необходимости.

Литература

1. Moss T. S., Burrell G. J., Ellis B. Semiconductor Opto-Electronics. Butterworth&Co (Publishers) Ltd, 1973.

2. Ключ Н. И. Применение алмазоподобных углеродных пленок для просветления кристаллов полуизолирующего GaAs в ИК-области спектра / Н. И. Ключ, А. И. Липтуга, В. Б. Лозинский, А. Н. Лукьянов, А. П. Оксанич, В. А. Тербан // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, № 13. — С.27— 34.

3. Ситуация на мировом рынке галлия. [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.realty3.ru/news/Situaciy_na_mirovom_rynke.html — Назва з екрана.

4. Atanassova E. D. Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures / E. D. Atanassova, A. E. Belyaev, R. V. Konakova et. al., — Kharkiv, NTC “Institute of Single Crystals” — 2007, — 216 p.

5. Kryshtab T. G. The structural relaxation in single crystals stimulated by microwave radiation / T. G. Kryshtab, P. M. Lytvyn, M. A. Mazin, // Металлофизика и новейшие технологии. — 1997. — т. 19, №5 — С. 21–26.

6. Antonov V. A. Analysis of crystal-meniscus system behaviour under Czochralski crystal growth. // J.Crystal Growth.— 2001. — v.226. — P. 555-561

7. Загирняк М. В. Разработка математической модели и прогнозного регулятора для процесса выращивания монокристаллов полуизолирующего арсенида галлия / М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, С. Э Притчин, В. А. Тербан. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. — 2011. — Вып. 155.— С. 33–42.

References

1. Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. Semiconductor Opto-Electronics. Butterworth&Co (Publishers) Ltd, 1973.

2. Cliuy N.I. Primeneniealmazopodobnykhuglerodnykh plenok dlia prosvetleniia kristallov poluizolirueshchogo GaAs v IK-oblasti spektra / N.I. Cliuy, A.I. Leeptuga, V.B. Lozinskii, A.N. Lukianov, A.P. Oksanich, V.A. Terban // Pisma v ZHTF. — 2012. — T. 38, № 13. — S.27— 34.

3. Situatsiia na mirovom rynke galliia. [Elektronniirekurs] — Rezhim dostupu: http://www.realty3.ru/news/Situaciy_na_mirovom_rynke.html — Nazva z ekrana.

4. Atanassova E.D., Belyaev A.E., Konakova R.V. et. al., Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures. Kharkiv, NTC “Institute of Single Crystals”, 2007, 216 p.

5. Kryshtab T.G. The structural relaxation in single crystals stimulated by microwave radiation / T.G. Kryshtab, P.M. Lytvyn, M.A. Mazin, // Metallofizika i noveishie tekhnologii. - 1997. -t. 19, №5 c. 21-26.

6. V.A. Antonov. Analysis of crystal-meniscus system behaviour under Czochralski crystal growth. // J.Crystal Growth. – 2001. – v.226. – P. 555-561

7. Zagirnyak M.V. Razrabotka matematicheskoi modeli i prognoznoho reguliatora dlia protsessa vyrashchivaniia monokristallov poluizoliruiushchego arsenida galliia / M.V. Zagirnyak, A.P. Oksanich, V.R. Petrenko, S.E. Pritchyn, V.A. Terban. // Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i pribory avtomatiki. – 2011. – Vyp. 155. – s. 33-42.

Оксанич А.П., Притчин С.Е., Тербан В.А. Розробка пристроїв і систем вирощування злитків арсеніду галію для виробів мікро, нано електроніки та фотовольтаїки. У роботі представлені результати розробки системи керування процесом вирощування зливків арсеніду галія, теплового вузла, методу й системи виміру внутрішніх напружень у пластинах арсеніду галію. Представлені в роботі технічні рішення дозволили одержати злитки кремнію діаметром 100 мм. с рухливістю, $\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ - 2500 ÷ 3500; концентрацій носіїв заряду, см^{-3} - 5×10^{17} ÷ 5×10^{18} ; густиною дислокацій, см^{-2} до 8×10^4 .

Ключові слова: арсенід галію, злиток, пластина, температурний градієнт, діаметр, внутрішні напруження.

Оксанич А.П., Притчин С.Э., Тербан В.А. Разработка устройств и систем выращивания слитков арсенида галлия для изделий микро, нано электроники и фотовольтаики. В работе представлены результаты разработки системы управления процессом выращивания слитков арсенида галлия, теплового узла, метода и системы измерения внутренних напряжений в пластинах арсенида галлия. Представленные в работе технические решения позволили получить слитки кремния диаметром 100 мм. с подвижностью, $\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ - 2500 ÷ 3500; концентраций носителей заряда, см^{-3} - 5×10^{17} ÷ 5×10^{18} ; плотность дислокаций, см^{-2} до 8×10^4 .

Ключевые слова: арсенид галлия, слиток, пластина, температурный градиент, диаметр, внутренние напряжения.

A. P. Oksanich, S. E. Pritchyn, V. A. Terban. Development of devices and systems of growth of gallium arsenide ingots for micro, nano electronics and photovoltaics.

Gallium arsenide is a perspective semiconductor, the need for which is constantly increasing. This is associated with the development of electronic components operating in excess of the high frequency range and development of terrestrial photovoltaics based on gallium arsenide solar cells. Increase in diameter of grown ingots leads to a deterioration in their performance, which is caused by the imperfection of growing technology. The paper presents the results of the development of systems and devices which help to improve existing technol-

ogy to produce GaAs ingots and wafers with a diameter of 100 mm with the best technical parameters. Developed a system to manage growing GaAs ingot. As a sensor of diameter ingot it uses a weighting method provides a measurement error in the process of growing $\pm 1,0$ mm. The system allows to grow GaAs ingots with an error of ± 2 mm. For the formation of temperature gradients developed thermal unit, which provides a gradient of 51 .. 53 K /cm in growing of ingots with diameter of 100 mm. For adjusting the process parameters were developed measuring device of the internal stresses that are generated in the ingot during the growth of the GaAs ingot. Presented in paper technical solutions provided a silicon ingot with a diameter of 100 mm. with mobility, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ - 2500 \div 3500, the charge carrier density, cm^{-3} - $5 \times 10^{17} \div 5 \times 10^{18}$; dislocation density, cm^{-2} - to 8×10^4 .

Keywords: gallium arsenide, ingot, wafer, the temperature gradient, the diameter, the internal stresses.