

УДК 546.28

МЕТОД И УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА СЛИТКА GaAs В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ МЕТОДОМ С ЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИЕЙ

А.П. ОКСАНИЧ, С.Э. ПРИТЧИН, В.Р. ПЕТРЕНКО, В.А. ТЕРБАН

Разработан метод измерения диаметра слитка GaAs, выращиваемого по методу с жидкостной герметизацией, который основанный на измерении веса слитка, учитывающий погрешности канала измерения веса и погрешности преобразования. Разработано устройство, реализующее данный метод. Достигнутая абсолютная погрешность измерения для слитков диаметром 100 мм составила $\pm 1,5$ мм.

Ключевые слова: метод Чохральского с жидкостной герметизацией, арсенид галлия, измерение диаметра.

ВВЕДЕНИЕ

Арсенид галлия (GaAs) является важным полупроводником, третьим по масштабам использования в промышленности после кремния и германия. Используется для создания сверхвысокочастотных интегральных схем, светодиодов, лазерных диодов, диодов Ганна, туннельных диодов, фотоприёмников и детекторов ядерных излучений.

Некоторые электронные свойства GaAs превосходят свойства кремния. Арсенид галлия обладает более высокой подвижностью электронов, которая позволяет приборам работать на частотах до 250 ГГц.

Полупроводниковые приборы на основе GaAs генерируют меньше шума, чем кремниевые приборы на той же частоте. Из-за более высокой напряженности электрического поля пробоя в GaAs по сравнению с Si, приборы из арсенида галлия могут работать при большей мощности. Эти свойства делают GaAs широко используемым в полупроводниковых лазерах, некоторых радарных системах. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия имеют более высокую радиационную стойкость, чем кремниевые, что обуславливает их использование в условиях радиационного излучения (например, в солнечных батареях, работающих в космосе).

По физическим характеристикам GaAs - более хрупкий и менее теплопроводный материал, чем кремний. Подложки из арсенида галлия гораздо сложнее для изготовления и примерно в пять раз дороже, чем кремниевые, что ограничивает применение этого материала.

Приборы, созданные на основе легированного GaAs, обладают лучшими параметрами при высоких температурах, чем кремниевые, и лучшими параметрами на более высоких частотах, чем германиевые. GaAs, легированный хромом, используется в инфракрасной оптике. GaAs, легированный цинком или теллуром, применяются в производстве оптоэлектронных приборов [1].

Существуют три метода промышленного производства монокристаллов GaAs:

— метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski— LEC);

— метод горизонтальной направленной кристаллизации в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman—HB) или «кристаллизации в движущемся градиенте температуры» (Horizontal Gradient Freeze — HCF);

— метод вертикальной направленной кристаллизации в тех же двух модификациях (Vertical Bridgman — VB, Vertical Gradient Freeze — VGF).

Метод LEC остается одним из основных в производстве GaAs уже более 40 лет. Основной вариант технологии LEC — совмещенный процесс синтеза GaAs и выращивания монокристалла в установках высокого давления. Типичные значения диаметров выращиваемых слитков составляют 100—150 мм, появились также коммерческие кристаллы диаметром 200 мм [2].

Предприятия Украины, занятые производством GaAs, в основном используют для выращивания слитков метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида. 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 2×10^5 см⁻² в зависимости от диаметра слитка.

Основным направлением развития технологии LEC является увеличение диаметра выращиваемых слитков, что продиктовано необходимостью повышения экономической эффективности производства.

В тоже время сущность LEC метода не позволяет использовать традиционные и хорошо зарекомендовавшие себя при выращивании слитков кремния методом Чохральского способы измерения диаметра слитка [3]. Измерение диаметра слитков GaAs при их выращивании методом LEC

производится методом прямого измерения веса слитка с использованием датчика веса.

Увеличение веса слитков и все повышающиеся требования к качеству получаемой продукции приводят к необходимости разработки новых методов и высокоточной аппаратуры для измерения диаметра слитка арсенида галлия в процессе его выращивания.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ СВЯЗЬ С НАУЧНЫМИ ПРОБЛЕМАМИ

Метод измерения диаметра слитков арсенида галлия в процессе его выращивания, основанный на прямом взвешивании слитка, в настоящее время является самым распространенным. В тоже время этому методу присущ ряд недостатков, которые приводят к погрешности измерения. Основными причинами, приводящими к погрешностям, являются широкий диапазон веса слитка, который изменяется от нескольких граммов в начале выращивания до десятков килограммов в конце, наличие жидкостного герметизатора, под слоем которого происходит кристаллизация, и который приводит к нестационарным гидродинамическим процессам и изменяющимся присоединенным массам, влияющим на вес слитка. Большое влияние также оказывает температура в зоне установки весоизмерительного оборудования и нестабильность питающего напряжения, вызванная работой систем вращения и перемещения слитка с тиглем. С увеличением диаметра слитка усиливается отрицательное влияние погрешностей измерения его веса, которое приводит к недопустимо большой погрешности измерения диаметра слитка. Это в свою очередь приводит к погрешностям работы систем автоматического управления процессом выращивания слитка и, как следствие, к увеличению температурных градиентов, увеличению плотности дислокаций, появлению недопустимых внутренних напряжений в слитке, увеличению процента брака.

Снижение погрешности измерения диаметра слитка в процессе его выращивания возможно при разработке новых методов и устройств, в которых используются преимущества существующих и устраняются их недостатки.

Целью работы является решение задачи снижения погрешности измерения диаметра слитков арсенида галлия, выращиваемых по ЛЕС методу в промышленном производстве.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- разработка метода измерения диаметра слитка арсенида галлия в процессе выращивания, обеспечивающего абсолютную погрешность не более $\pm 1,5$ мм;
- синтез структурной схемы и разработка устройства, реализующего данный метод;
- оценка погрешности разработанного устройства.

2. АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА СЛИТКА GAAS В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ

Существует несколько методов измерения диаметра слитка в процессе его выращивания по методу Чохральского. Самое большое распространение получили оптические методы, в основе которых лежит автоматическое определение границы расплав-кристалл [4]. Граница определяется яркостным кольцом, которое называется мениском. Мениск — это столб жидкости, который образуется над поверхностью расплава благодаря силам поверхностного натяжения, действующих на границах жидкой фазы и слитка, которые образуются при вытягивании слитка из расплава.

К оптическим методам принадлежат метод определения диаметра электронным оптическим датчиком и метод с использованием видеокамеры.

Метод с использованием оптического датчика базируется на позиционировании пирометрического приемника, который является оптическим датчиком, в зону мениска. При изменении диаметра слитка мениск перемещается по зеркалу расплава, согласно изменению диаметра, что в свою очередь приводит к изменению яркости на датчике и, как следствие, к изменению напряжения на его выходе. Этот метод можно использовать только в системах с открытым экранированием. В связи с четким фокусированием пирометра необходима поддержка уровня расплава во время вытягивания в одном и потом же положении. Уровень расплава поддерживается автоматически благодаря подъему тигля по программе или по сигналу от специального датчика.

Метод с использованием видеокамеры устраняет ряд недостатков, присущих оптическому датчику. В основе этого метода лежит измерение диаметра слитка путем обработки видеоизображения, полученного с телекамеры, которая сфокусирована в зону роста. Как показано в [5], данный метод позволяет измерять диаметр слитка на всех этапах его выращивания и исключить погрешности, связанные с неточностью позиционирования оптического датчика.

Точность определения диаметра этим методом зависит от технических характеристик видеооптической системы, которая включает в себя видеокамеру с объективом, устройства оцифровки видеосигнала и качества получаемого видеоизображения.

Недостатком этого метода есть сравнительно небольшой динамический диапазон, который определяется разрядностью представления яркости изображения при его оцифровке, что приводит к погрешности определения границ расплав — мениск, и низкий контраст наблюдаемого изображения.

Система измерения диаметра слитка кремния, реализующая телевизионный метод предложенная в [6], показана на рис. 1.

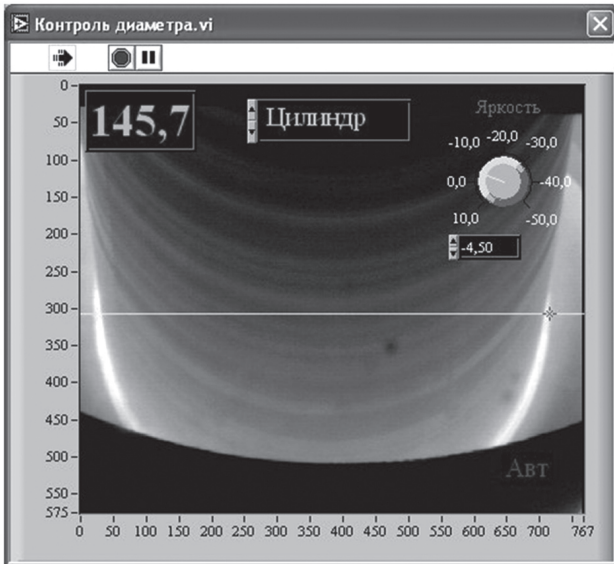


Рис. 1. Система измерения диаметра кремния телевизионным методом [6]

При выращивании слитков арсенида галлия по методу Чохральского с жидкостной герметизацией, не представляется возможным использование оптических методов, так как граница расплав-кристалл находится под слоем жидкого герметизатора. Изображение растущего слитка GaAs показано на рис. 2.

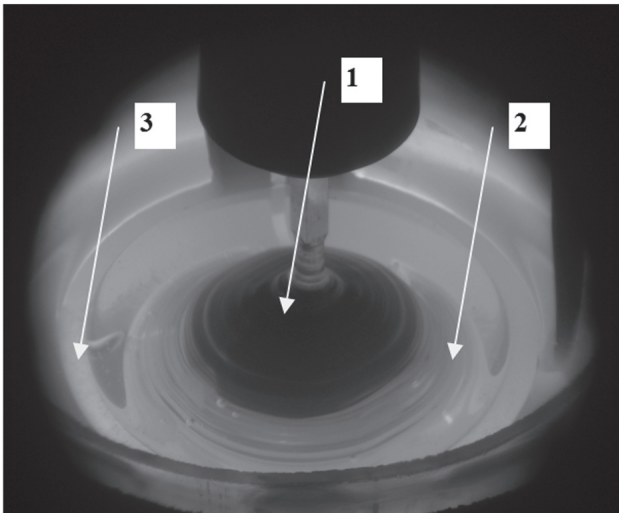


Рис. 2. Изображение процесса роста слитка арсенида галлия с жидкостной герметизацией:
1 – слиток GaAs, стадия выращивания прямого конуса;
2 – жидкостной герметизатор (борный ангидрид);
3 – фоновый нагреватель

Для телевизионного контроля процессов кристаллизации, которые протекают под слоем флюса, применяется просвечивание рентгеновскими лучами тигля с расплавом и флюсом [7, 8]. Рентгеновское изображение проецируется на флуоресцентный экран, откуда лучи света направляются на усилитель яркости изображения, который стоит перед телевизионной камерой. Контраст изображения зависит от угловых размеров фокуса рентгеновской трубки и соотношения

коэффициентов поглощения вещества, которое кристаллизуется, материалов флюса и деталей установки.

В подавляющем большинстве случаев решение задачи измерения диаметра растущего слитка GaAs получают, используя весовой метод [9]. Суть этого метода заключается в том, что значение диаметра определяется расчетным путем на основе показаний датчика веса, которые представляют собой сумму веса штока и образовавшейся до момента измерения части слитка, приращения веса слитка за определенное время, веса мениска и сил поверхностного натяжения.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА СЛИТКА. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Метод Чохральского — метод выращивания кристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава. Он предполагает, что исходное сырье находится в расплавленном состоянии в емкости, которая называется тигель. В процессе выращивания тигель с расплавом вращается вокруг своей оси для равномерного распределения теплового поля и поднимается вверх для обеспечения неизменного расстояния между поверхностью расплава и уровнем нагревателя. Слиток подвешенный на штоке в процессе выращивания поднимается вверх со скоростью, обеспечивающей кристаллизацию при текущем температурном градиенте, и также вращается вокруг своей оси для равномерного распределения тепловых потоков. Процесс проходит в ростовой камере, при вакууме и температуре порядка 1200 °С.

Для реализации весового метода измерения диаметра штоков с подвешенным слитком через вращающийся токопереход механически связан с датчиком веса.

Связь между весом слитка и его радиусом [10] 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.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на погрешность измерения веса. Структурная схема канала измерения веса представлена на рис. 3.

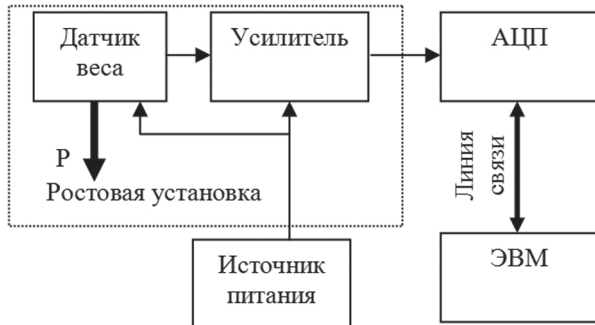


Рис. 3. Структурная схема канала измерения веса слитка GaAs в процессе выращивания

Для анализа влияния элементов схемы на общую погрешность измерения разделим их на две группы.

- погрешности, вызванные аналоговой частью канала, в которую входят датчик веса, усилитель и источник питания;
- погрешности, вызванные цифроаналоговой частью, в которую входит аналогоцифровой преобразователь (АЦП) и линия связи.

Для оценки влияния аналоговой части на общую погрешность измерения можно использовать математическую модель, полученную по схеме полного факторного эксперимента [11].

Выбор такой модели обусловлен следующими ее свойствами:

- коэффициенты модели в статистическом смысле независимы;
- коэффициенты модели максимально устойчивы;
- каждый коэффициент несет семантическую информацию о влиянии соответствующего эффекта на моделируемый критерий качества;
- план эксперимента соответствует большинству критериев оптимальности.

Структура многофакторной математической модели, в общем случае определим исходя из возможного множества эффектов, соответствующих множеству эффектов схемы полного факторного эксперимента. Она задается следующим выражением:

$$(1 + X_1 + X_1^2 + \dots + X_1^{s_1-1}) \times \dots \times (1 + X_k + X_k^2 + \dots + X_k^{s_k-1}) \rightarrow N_o \quad (2)$$

где X_1, \dots, X_k – факторы математической модели; s_1, \dots, s_k – число уровней факторов X_1, \dots, X_k ; k – общее число факторов; N_o – число опытов полного факторного эксперимента, равное числу структурных элементов его схемы.

Необходимым условием для построения модели является выбор числа уровней факторов,

значение которого должно быть на 1 больше максимальной степени полинома, необходимой для адекватного описания этим фактором поверхности отклика. Необходимое число экспериментов определяется как:

$$N_o \cong 1,5 \dots 2 \sum_{i=1}^k (S_i - 1), \quad (3)$$

где S_i – число уровней фактора X_i ; $1 \leq i \leq k$.

В качестве факторов примем внешние воздействия, оказывающие влияние на датчик веса и усилитель. Отнесем к ним температуру в месте установки датчика и усилителя и нестабильность питающего напряжения.

Учитывая что в нашем случае число факторов не превышает 10, выбираем коэффициент в выражении (3) равным 2.

Таким образом основными влияющими факторами на показания датчика веса и усилителя являются следующие:

- изменение температуры в месте расположения датчика веса, вызванное колебаниями температуры в процессе выращивания, которое может меняться в диапазоне от 20 до 100 °С;
- колебания питающего напряжения, вызванное работой силовых агрегатов установки, которое изменяется в диапазоне от 22 до 26 В.

Исследование точности измерения диаметра слитка без учета влияния изменений температуры и нестабильности источника питания показали, что средняя абсолютная погрешность аппроксимации составляет 0,13%, а среднеквадратичная погрешность остатка (в единицах измерения выходной величины взвешивания) равна 1,32.

Введем обозначение факторов и значения их уровней.

X_1 – температура в месте расположения датчика веса. Уровни: 20; 50; 100 °С.

X_2 – напряжение питания. Уровни: 22; 24,0; 26 В.

X_3 – измеряемый вес слитка. Уровни: 1; 2000; 4000; 6000; 8000; 10000 г.

В нашем случае необходимое число экспериментов в соответствии с (3) составило 18.

Значения уровней варьирования факторов после преобразования в ортогональные контрасты, позволили получить структуру полного факторного эксперимента будет иметь следующий вид:

$$(1 + x_1) (1 + x_2 + z_1) (1 + x_3 + z_2) \rightarrow N_{18}. \quad (4)$$

где x_1, x_2, x_3, z_1, z_2 – соответственно линейные, квадратичные и кубические контрасты факторов X_1, X_2, X_3 ; N_{18} – число структурных элементов для схемы полного факторного эксперимента.

Выполненный предварительный расчет математической модели показал, что в качестве оценки дисперсии воспроизводимости можно выбрать величину равную 1,6.

Число степеней свободы было принято равным 18.

Дисперсия была использована для определения стандартной ошибки коэффициентов уравнения регрессии.

Для вычисления математической модели и ее критериев качества использовалась программа Minitab Statistical Software.

Полученная математическая модель имеет вид

$$\hat{y} = 373,42x_3 + 4,2634x_2 - 3,0341z_1 + 3,1341x_1 - 0,08941x_1z_1 - 0,84136z_1x_2 + 0,1931z_1x_3, \quad (5)$$

где:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,00739821 (X_1 - 3,2273); \\ z_1 &= 0,202954 (x^2_1 - 0,035873x_1 - 0,05876); \\ x_2 &= 0,229878 (X_2 - 1); \\ z_2 &= 0,15 (x^2_2 - 0,067208); \\ x_3 &= 0,0021 (X_3 - 4,5). \end{aligned}$$

Проведенный информационный анализ полученной модели с учетом доли участия каждого элемента показывает, что:

– нелинейность z_3 сравнительно мала ($1,72 \cdot 10^{-5}$) и ее учет в модели повышает точность измерения;

– элемент x_3 сравнительно слабо ($3,73 \cdot 10^{-6}$) взаимодействует с квадратичным элементов z_1 (температура в месте расположения датчика веса): взаимодействие z_1x_3 . Таким образом математическая модель должна включать эффект влияния температуры в месте расположения датчика веса.

Колебания напряжения питания приводит к изменению результатов взвешивания как через x_2 , так и через z_2 . Их суммарная доля участия составляет $2,75 \cdot 10^{-1}$.

Изменение температуры в месте расположения датчика веса влияет в виде квадратичного z_1 и линейного x_1 эффектов с суммарной долей участия $1,17 \cdot 10^{-2}$.

Изменение температуры в месте расположения датчика веса и изменение напряжения питания образуют парное взаимодействие x_1z_2 с долей участия $3,05 \cdot 10^{-6}$.

Погрешности, вызванные цифроаналоговой частью, формируются в основном шумом АЦП. Минимизацию такой погрешности можно осуществить, используя фильтрацию числового ряда, который представляет из себя данные измерения веса, собираемые с частотой дискретизации АЦП. Для решения этой задачи можно применить метод скользящего среднего с использованием критерия минимального среднего квадрата ошибки [12].

Экспоненциальное скользящее среднее рассчитывается по формуле:

$$P_{cci} = P_{cci-1} + \alpha * (p_i(t) - P_{cci-1}), \quad (6)$$

где P_{cci} – результат фильтрации в текущий момент времени, P_{cci-1} – результат фильтрации в предыдущий момент времени, α – коэффициент экспоненциального усреднения равный $2/(n+1)$, где n – величина временного ряда окна

усреднения равная 100, $p_i(t)$ – значение измеренного веса.

4. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА СЛИТКА. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Структурная схема устройства измерения диаметра слитка, реализующая предложенный метод, представлена на рис. 4.

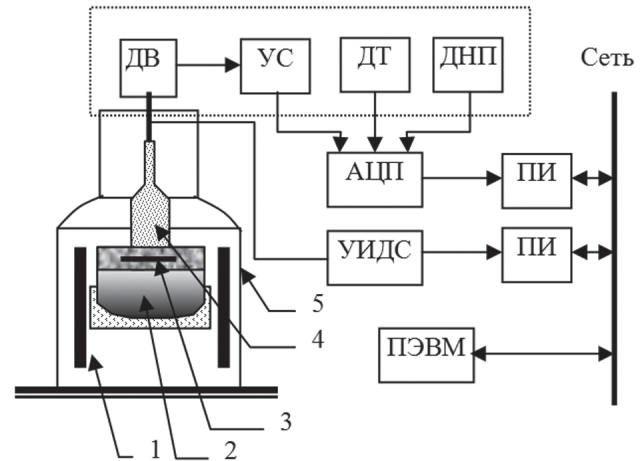


Рис. 4. Структурная схема устройства измерения диаметра слитка: 1 – основной нагреватель; 2 – тигель с расплавом и жидкостным герметизатором; 3 – фоновый нагреватель; 4 – слиток; 5 – ростовая камера

В состав устройства входит: 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.

Информация о весе слитка, полученная датчиком веса, связанного через вращающийся токопереход и разделительную камеру со слитком, поступает на вход усилителя напряжения. Выход усилителя связан со входом АЦП. К другим входам АЦП подключены датчик температуры и датчик напряжения питания УС и ДВ, информация с которых позволяет минимизировать влияние возмущающих факторов на точность измерения веса. Конструктивно, датчик веса, усилитель и датчики установлены в верхней части ростовой установки, как показано на рис. 5. Цифровой выход АЦП через преобразователь интерфейса передает информацию по промышленной сети ModBus ПЭВМ. Через эту же сеть в ПЭВМ передаются данные о длине слитка.

Учитывая, что датчик веса совместно с усилителем имеет наклон амплитудной характеристики, не соответствующий выбранному нами диапазону веса слитка GaAs (1 – 10 кг), возникла необходимость в корректировке характеристики, которая была выполнена нами путем натурных

испытаний. Полученная характеристика представлена на рис. 6.

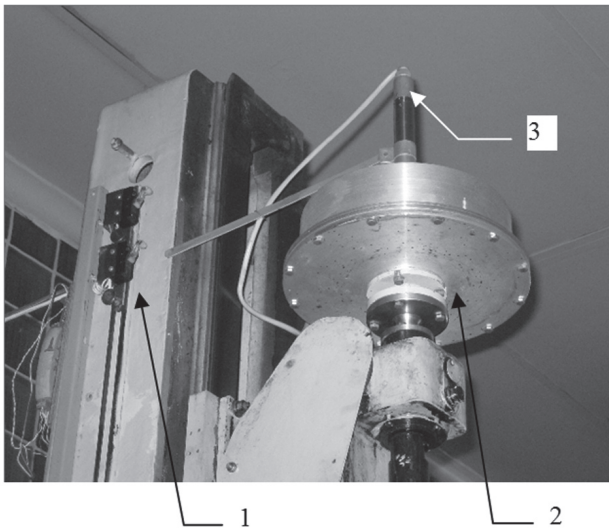


Рис. 5. Ростовая установка «Арсенид 1» с установленными датчики:

1 – колонна ростовой установки, 2 – корзина с установленными внутри датчиком веса, усилителем, датчиком температуры и датчиком напряжения питания, 3 – вращающийся токопереход

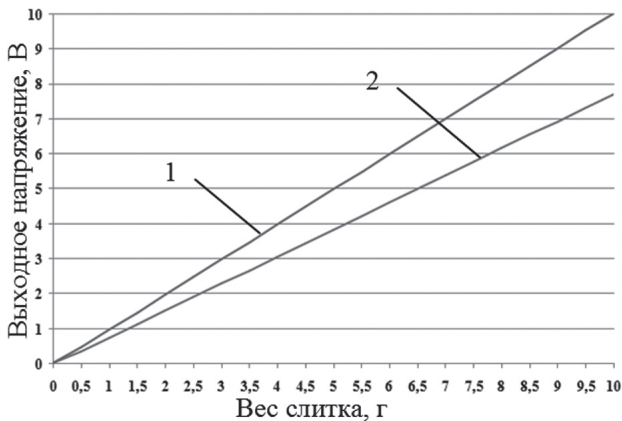


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения усилителя датчика веса от веса слитка. 1 – график нормированной измерительной характеристики усилителя датчика веса. 2 – график заводской измерительной характеристики усилителя датчика веса.

В результате проведенных испытаний нами было получено уравнение корректировки измерительной характеристики:

$$U_{сл} = (0,386x - 0,404), \quad (7)$$

где x – выходное значение датчика в текущий момент времени.

Расчет диаметра слитка, реализации фильтрации и корректировка возмущающих факторов производится программным путем. Алгоритм работы программы представлен на рис. 7.

Применение фильтрации результатов измерения веса слитка позволило снизить нестабильность измерения веса и, как следствие увеличить точность определения диаметра. Результат применения фильтра, основанного на методе

экспоненциальной скользящей средней представлен на рис. 8.

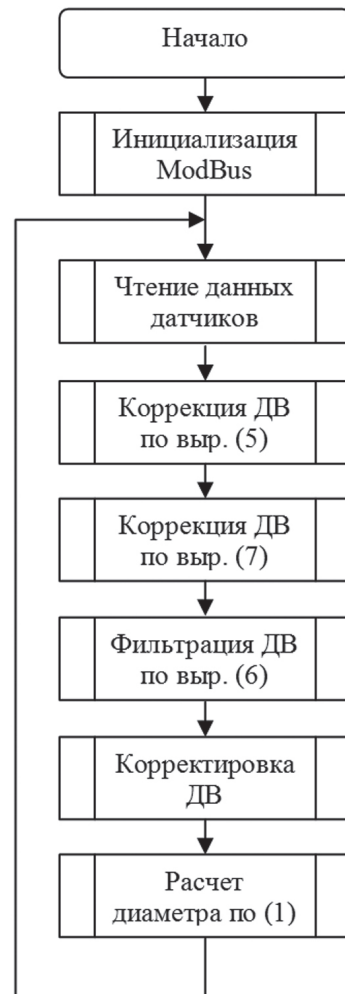


Рис. 7. Алгоритм работы устройства измерения диаметра слитка GaAs

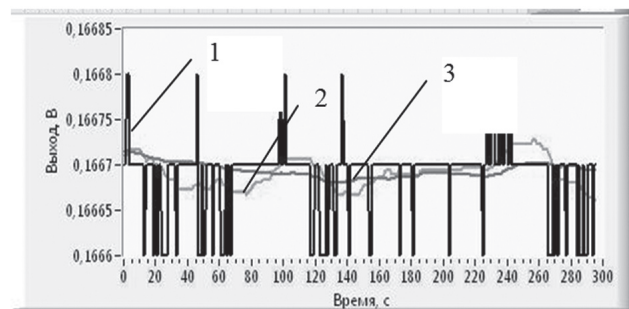


Рис. 8. Результат работы фильтра весоизмерительного канала: 1 – выходное напряжение усилителя датчика веса с шумом АЦП; 2 – выходное напряжение датчика веса после фильтрации методом скользящего среднего; 3 – выходное напряжение датчика веса после фильтрации экспоненциальным скользящим средним

Выращенный слиток GaAs диаметром 100 мм. показан на рис. 11.

Анализ датчиков измерения веса показывает, что для решения задачи определения диаметра слитка арсенида галлия требуется пьезоэлектрический датчик с включением элементов по мостовой схеме.

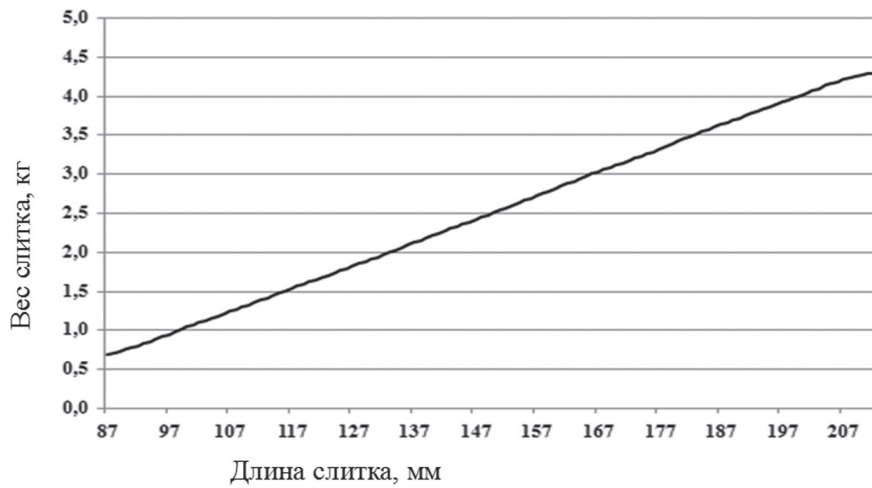


Рис. 9. График изменения веса слитка GaAs в процессе выращивания

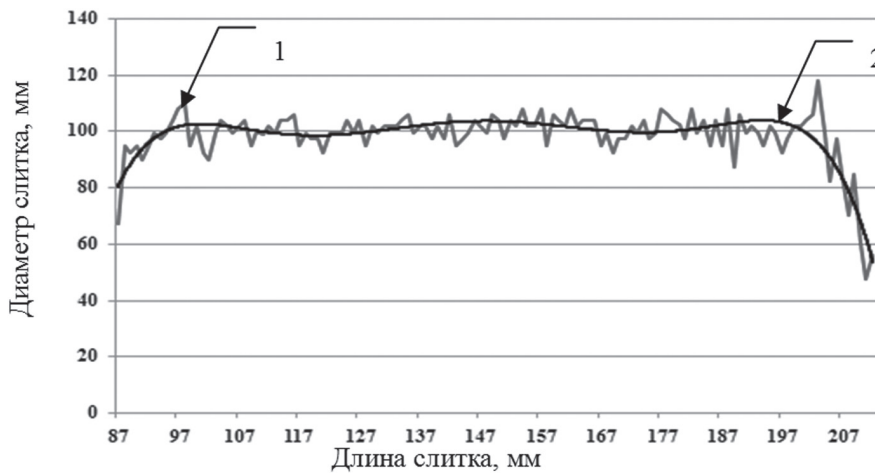


Рис. 10. Результат реализации метода и устройства измерения диаметра слитка GaAs в процессе выращивания: 1 – измеренный диаметр слитка без коррекции возмущающих факторов и шумов АЦП, 2 – измеренный диаметр слитка с применением коррекции и фильтрации

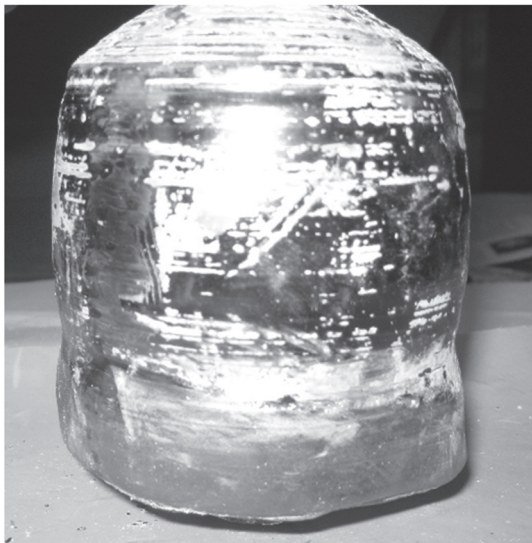


Рис. 11. Слиток GaAs, диаметр которого измерялся разработанным устройством с использованием предложенного метода

Датчики такого типа производятся фирмой Scaime (Франция). С учетом максимального веса выращиваемого слитка, можно использовать

датчик марки F60X10 C3 SN 5e, который имеет суммарную погрешность измерения равную 0,08 % при максимальном измеряемом весе 10 кг.

Натурные испытания устройства измерения диаметра слитка GaAs проводились на базе ЧП “Галар” по следующей методике, согласованной с центральной заводской лабораторией измерений:

- разработанным устройством измерялся диаметр растущего слитка GaAs;
- фиксировалась длина слитка GaAs;
- по завершению процесса измерялось значение диаметра полученного слитка при помощи штангенциркуля в контрольных точках, привязанных к длине слитка.

Для определения основных метрологических характеристик вычислялись следующие величины:

- систематическая составляющая абсолютной погрешности определялась как:

$$A_i = |d_i - d_k|, \text{ мм}$$

где d_i – диаметр, измеренный устройством, d_k – диаметр слитка, измеренный штангенциркулем.

— абсолютная погрешность диаметра, измеренного устройством, определялась как:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \text{ мм,}$$

где n — количество измерений.

Полученная абсолютная погрешность измерения диаметра разработанным устройством составила 1,5 мм.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель, полученная по схеме полнофакторного эксперимента, при помощи которой выполнена оценка влияния погрешностей аналоговой части весоизмерительного канала на погрешность измерения диаметра. Показано, что колебания напряжения питания усилителя датчика веса приводит к изменению результатов с долей участия $2,75 \cdot 10^{-1}$, а изменение температуры в месте расположения датчика веса с долей участия $1,17 \cdot 10^{-2}$. Показано, что для уменьшения погрешности, вызванной цифроаналоговой частью канала измерения веса слитка, необходимо использовать фильтрацию методом скользящего среднего с использованием критерия минимального среднего квадрата ошибки.

2. Разработан метод измерения диаметра слитка GaAs, позволяющий уменьшить погрешность измерения. Метод основан на измерении веса слитка в дискретные моменты времени с последующей коррекцией погрешностей аналоговой и цифроаналоговой частей. Разработано устройство, реализующее данный метод, в которое включены канал измерения нестабильности питающего напряжения и канал измерения температуры в зоне установки датчика веса слитка. Предложенные решения позволили обеспечить абсолютную погрешность измерения диаметра слитка GaAs, не превышающую $\pm 1,5$ мм.

3. Промышленное применение разработанного авторами метода и устройства позволили снизить отклонение диаметра выращиваемого слитка от номинального до 2 мм (для слитков диаметром 100 мм), что в свою очередь снизило потери при калибровке слитка до 3%.

Литература.

- [1] *Наумов А. В.* Обзор мирового рынка арсенида галлия. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* — 2005. — № 6. С. 53 — 57.
- [2] *Shenai-Khatkhate D. V.* Environment, health and safety issues for sources used in MOVPE growth of compound semiconductors. / D. V. Shenai-Khatkhate R Goyette, R L DiCarlo and G Dripps. // *Journal of Crystal Growth* — 2004. Vol.4, P. 816—821.
- [3] *Zinnes A. E.* Automatic diameter control of Czochralski grown crystals. / A. E. Zinnes, B. E. Nevis C. D. Brandle. // *Journal of Crystal Growth.* — 1973. — Vol. 19, Issue 3. P. 187-192.
- [4] *Digges T. G.* The basis of automatic diameter control utilizing “bright ring” meniscus reflections/ T. G. Dig-

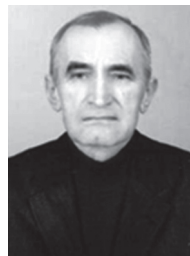
ges, Jr. R. H. Hopkins, R. G. Seidensticker // *Journal of Crystal Growth,* — July 1975, Vol. 29, Issue 3, P. 326-328.

- [5] *Притчин С.Э.* Способ повышения точности измерения диаметра слитка монокристаллического кремния в процессе роста телевизионным методом. IX Научно-техническая конференция «Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах», Вып. № 9 (2002) — Хмельницкий, с. 111—113.
- [6] *А.П. Оксанич.* Определение телевизионным способом диаметра монокристалла кремния на разных стадиях его роста / Оксанич А.П. Притчин С.Э. // *Научные труды КГПИ.* — 2001. — № 2 (8). — Кременчуг: КГПИ. — С. 376—381.
- [7] *H. J. Dijk.* Diameter control of LEG grown GaP crystals/ Dijk H. J. A. Yochem C. M. Scholl G. J., Werf // *Journal of Crystal Growth.* 1974. Vol. 21, P. 310—312.
- [8] *Pruett H. D.* X-ray imaging technique for observing liquid encapsulation Czochralski crystal growth/ H.D. Pruet, S.I.Lien // *Journal Electrochim.* — 1974. Vol. 121, P. 822—826.
- [9] *T.H. Johansen.* Analysis of the crystal weighing method applied to liquid encapsulated Czochralski growth. // *Journal of Crystal Growth.* — 1987. v.84. С. 609-620.
- [10] *V.A. Antonov.* Analysis of crystal-meniscus system behaviour under Czochralski crystal growth. // *J.Crystal Growth.* — 2001. — v.226. — P. 555-561.
- [11] *С.Г. Радченко.* Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. // ЗАО «Укрспецмонтажпроект» — Киев. — 1998. — 274 с.
- [12] *Сиргиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов // Питер. — 2006. — 750 с.

Поступила в редколлегию 10.01.2012



Оксанич Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. Область научных интересов: оборудование и производство материалов электронной техники.



Петренко Василий Радиславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. Область научных интересов: автоматизация процессов управления в производственных системах



Притчин Сергей Эмильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. Область научных интересов: оборудование и производство материалов электронной техники.



Тербан Виктор Андреевич, главный инженер ЧП «Галар». Область научных интересов: оборудование и производство материалов электронной техники.

УДК 546.28

Метод та засіб виміру діаметра зливка GaAs у процесі вирощування методом рідинної герметизації / А.П. Оксанич, С.Е. Притчин, В.Р. Петренко, В.А. Тербан // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 54-62.

Розроблено метод виміру діаметра зливка арсеніду галія, який заснований на вимірюванні ваги зливка з урахуванням похибки каналу вимірювання ваги та похибки перетворення. Розроблено пристрій, який реалі-

зує даний метод. Досягнута абсолютна похибка вимірювання для злиwkів діаметром 100 мм склала $\pm 1,5$ мм.

Ключові слова: метод Чохральського з рідиною герметизацією, арсенід галію, вимір діаметра зливка.

Л. 11. Бібліогр.: 12 найм.

UDC 546.28

Method and arrangement of measuring diameter of ingot GaAs during growth by the Liquid Encapsulated Czochralski / A.P. Oksanich, S.E. Pritchyn, V.R. Petrenko, V.A. Terban // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 54-62.

A method for measuring the diameter of an ingot of GaAs grown by LEC method based on measuring the weight of the ingot taking into account the errors of a weight measurement channel and conversion errors is developed. A device is developed which implements the method. The achieved absolute error of measurement for ingots of a 100 mm diameter has constituted $\pm 1,5$ mm.

Keywords: Liquid Encapsulated Czochralski, GaAs, diameter measurement.

Fig. 11. Ref.: 12.