

Таблица 2 – Сравнение технических характеристик ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ, разработанным ФГБОУ ВО ТулГУ

Параметр	INNALABS	ФГБОУ ВО ТулГУ
Количество осей	2	до 3 включительно
Формат выходных данных	цифровой	Цифровой, аналоговый
Интерфейс	RS-232/422/485	CAN, RS-232/422/485, SPI
Частота передачи выходных данных	2000–9000 Гц	500–10000 Гц
Температурная компенсация	есть	есть
Диапазон измерения	до ± 250 °/с*	до ± 2000 °/с*
Полоса пропускания	до 150 Гц*	до 50 Гц*
Нестабильность нулевого сигнала	не более 0,1 °/ч	не более 0,6 °/ч
Случайное блуждание	0,01 °/√час	0,06 °/√час
Шум покоя, RMS	не более 0,01 °/с	не более 0,025 °/с
Ошибка масштабного коэффициента во всем диапазоне температур	не более 0,35%	не более 0,05 %** не более 0,005 %***
Время запуска	не более 1 с	не более 3 с
Время выхода на режим	не более 50 с	не более 6 с
Потребляемая мощность	не более 3,3 Вт	не более 4 Вт
Диапазон рабочих температур	от –40 °С до +85 °С	от –40 °С до +85 °С
Диапазон температур хранения	от –55 °С до +90 °С	от –55 °С до +90 °С
Электромагнитные влияния	не защищено	не защищено

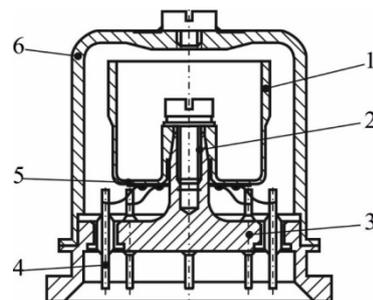


Рисунок 1 – Основные узлы ВТГ:
1 – резонатор; 2 – узел крепления; 3 – основание (корпус); 4 – гермовывод; 5 – пьезоэлемент; 6 – крышка (кожух)

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ ФГБОУ ВО ТулГУ.

Литература

- Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 125 с.
- Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. «Проектирование волнового твердотельного гироскопа». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 165 с.
- Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором / В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин // Вестник РФФИ. Фундаментальная инженерия. – 2015. – № 3 (87). – С. 84–96.
- Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / Под ред. В.Я.Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
- Chikovani V.V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V.A., Scherban V.I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG//Proc/ Symposium Gyro Technology, 2006, Stuttgart. – P. 40–47.

УДК 539.2

ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ЭПИТАКСИЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Свистун А.И.

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Выращивание эпитаксиальных слоев является одним из важнейших этапов формирования полупроводниковых приборных структур. Увеличение разнообразия применяемых материалов, типов приборных структур и готовых приборов требует применения либо принципиально новых технологических приемов, либо пересмотра известных методов. Как правило, эпитаксиальные структуры содержат множество слоев, включая переходные и компенсирующие, с существенно отличающимися концентрацией различного типа проводимости.

Одним из технологических приемов формирования эпитаксиальных слоев является метод газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда. При этом легирование слоев осуществляется формированием примесных соединений в лазерной плазме. В методе эпитаксиального выращивания в режиме тлеющего разряда в газоразрядную камеру помещаются электроды, содержащие основную легирующую примесь и редкоземельную геттерирующую примесь [1]. При подаче напряжения на электроды (несколько кВ) в межэлектродном пространстве форми-

руется газоразрядная плазма, содержащая и легирующую, и геттерирующую примеси. В процессе выращивания редкоземельные элементы активно взаимодействуют с кислородом в кремнии, осуществляя при этом своеобразную очистку кремния. Атомы редкоземельных элементов влияют на накопление термодфектов, возникающих при термообработке в процессе изготовления кремниевых полупроводниковых приборов. Геттерирование кремния редкоземельными элементами приводит к увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда в 4–6 раз, в зависимости от вида редкоземельного элемента. Для легирования эпитаксиальных слоев основной примесью одновременно с геттерированием используются методы твердофазного легирования, например, газоразрядный в режиме тлеющего разряда или лазерный метод, при котором материал мишени испаряется при воздействии лазерного излучения.

Для оценки качества таких эпитаксиальных слоев использовались различные методы. Так, например, анализ спектров низкотемпературной люминесценции показал, что отличительная особенность спектров эпитаксиальных структур по отношению к спектрам монокристаллического кремния состоит в наличии дополнительной полосы с энергией 1,042 эВ и полушириной 0,012 эВ. Наиболее вероятно, что эта полоса связана с рекомбинацией носителей заряда на центрах, включающих атомы лантана, как материала электродов, используемых при получении газового разряда. Интенсивная полоса с энергией 1,093 эВ обусловлена излучательной рекомбинацией экситонов, локализованных на атомах бора. Изменение режима выращивания эпитаксиальных пленок приводит и к изменению интенсивности полос люминесценции, структура и интенсивность которых отражает уровень легирования. Большая ширина полос экситонного поглощения в эпитаксиальных пленках по сравнению с монокристаллической подложкой очевидно связана с наличием внутренних напряжений в эпитаксиальной пленке, особенно на границе раздела.

В процессе газоразрядного выращивания формировались эпитаксиальные слои с удельным электрическим сопротивлением от 1 до 10 Ом/кв с разбросом значений не хуже 10 % [2]. Плотность дефектов упаковки для 80 % просмотренных полей составляет не более $0,4 \times 10^2 / \text{см}^2$, а плотность дислокаций – не более $10 / \text{см}^2$.

Как подложка, так и эпитаксиальный слой после выращивания контролировались методом сильносигнальной поверхностной фото-ЭДС (SPV) [3]. Благодаря выбору неразрушающего метода контроля стало возможным сопоставление пространственных распределений поверх-

ностного потенциала на разных стадиях изготовления эпитаксиальных структур. При этом обнаружено совпадение пространственных распределений поверхностной фото-ЭДС подложки и эпитаксиального слоя, что свидетельствует о том, что дефекты эпитаксиального слоя обуславливаются в основном дефектами подложки, прорастающими при эпитаксии. После измерений SPV поверхность эпитаксиальной пленки протравливалась в травителе Сиртла для выявления дефектов. Следует отметить, что участкам с повышенной плотностью дефектов соответствуют участки с отклонениями значений SPV от среднего значения, как в сторону уменьшения, так и увеличения электрического потенциала, причем величина отклонения также не пропорциональна плотности дефектов (рисунок 1). Иными словами, по картине пространственного распределения SPV можно судить о местоположении скоплений дефектов, но не об их плотности. На рисунке 2 представлены типичные картины морфологии, полученных методом электронной микроскопии, участков поверхности эпитаксиальных слоев и соответствующие им распределения поверхностной фото-ЭДС – слева для низкодефектных участков поверхности (размер дефектов около 250 нм), справа для участков с повышенной плотностью дефектов (размер дефектов от 150 до 1500 нм).

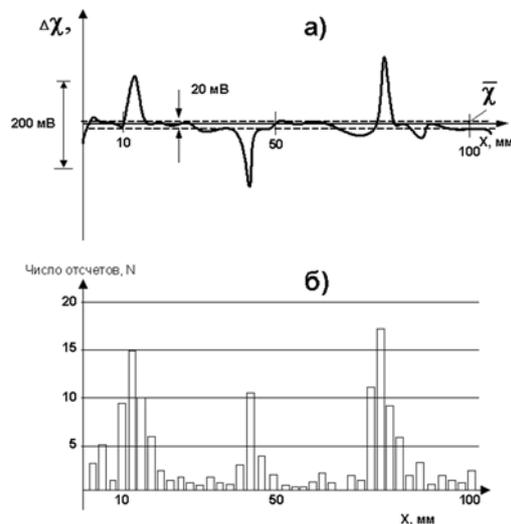


Рисунок 1 – Пространственное распределение поверхностной фото-ЭДС на Si подложке (а) и соответствующее ему распределение плотности дефектов N в эпитаксиальном слое (б)

Прослеживается четкая взаимосвязь резких изменений SPV с микроморфологией поверхности монокристаллической подложки и структурным совершенством эпитаксиальных слоев, выращенных на этих поверхностях. Пространственные координаты резких отклонений поверхностного потенциала соответствуют лока-

лизации макроскопических дефектов, выходящих на поверхность. Обнаружено, что локальным отклонениям потенциала поверхности SPV более 25 мВ соответствует локализация повышенной плотности дефектов (дислокации, микроскопления примеси).

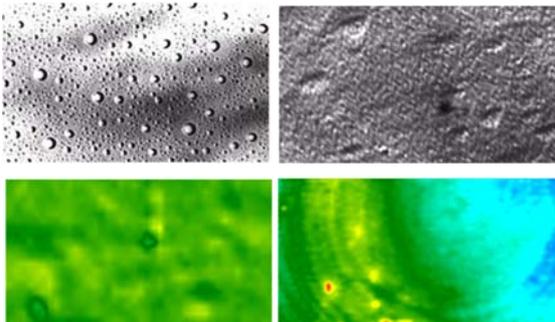


Рисунок 2 – Микроморфологии участков поверхности эпитаксиальных слоев и соответствующие им распределения поверхностной фото-ЭДС

Пространственное распределение сильно-сигнальной поверхностной фото-ЭДС, соответствующей приповерхностному изгибу энергетических зон, и распределение дефектов эпитаксиального слоя совпадают не для всех участков полупроводниковых пластин. Очевидно, это связано с тем, что локальные отклонения в распределении поверхностной фото-ЭДС от среднего обусловлены неоднородным распределением остаточных примесей из обрабатывающих растворов при подготовке пластин к эпитаксии, адсорбцией отдельных загрязняющих частиц. Эти неоднородности в распределении SPV и адсорбированных частиц не всегда связаны со структурными дефектами и не во всех случаях

приводят к генерации дефектов в эпитаксиальной пленке.

Таким образом, изменения распределения поверхностного потенциала связаны с изменениями распределения остаточных загрязнений на поверхности подложки и дефектов в подложках, наследуемых эпитаксиальными слоями.

Локальные изменения сильно-сигнальной поверхностной фото-ЭДС соответствуют локализации структурных неоднородностей с характерными размерами более 500 нм/

Интенсивность полос низкотемпературной люминесценции пропорциональна концентрации гетеррирующей примеси, а смещение узких полос люминесценции и их уширение соответствует величине внутренних напряжений в эпитаксиальных структурах.

Литература

1. Пилипенко В.А., Горушко В.В., Петлицкий А.Н., Турцевич А.С., Шведов С.В. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. // Технология и конструирование в производстве интегральных схем, – 2013, № 2–3. – С. 43–57.
2. Зондовые электрометрические методы для измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев / А.К. Тявловский [и др.] // Приборостроение: материалы 12 между-нар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 36–38.
3. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017, Т. 8, № 4. – С. 344–356.

УДК 629.7.054

ИНЕРЦИОННЫЕ МОМЕНТЫ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лихошерст В.В., Родионов В.И.

ТулГУ «Тулский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Современная система бортового электрооборудования летательного аппарата (ЭЛА) имеет в своем составе приборы наблюдения, которые устанавливаются на корпусе летательного аппарата (ЛА) в кардановых подвесах, позволяющих им совершать сложное угловое движение относительно корпуса ЛА. Электродвигатели (ЭД), обеспечивающие такое движение по осям карданова подвеса работают в условиях постоянно изменяющихся управляющих и возмущающих воздействий. При этом они должны преодолевать инерционные моменты, создаваемые угловыми ускорениями и скоростями наведения оси визирования (ОВ) прибора и качки ЛА.

В докладе рассматривается двухосная система слежения оптико-электронного прибора, работающая в режиме стабилизированного наведения. Такая следящая система (СС) имеет платформу, наружную рамку и ЭД карданова подвеса (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: НП – направление полета ЛА; ЗЛВ – заданная линия визирования, связанная с объектом наблюдения; $X_0Y_0Z_0$, $X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$ – системы координат, связанные с ЛА, наружной рамкой и ОВ соответственно; $\omega_{y2}, \omega_{z2}, \omega_{ly}, \omega_{lz}, \omega_{ox}, \omega_{oy}, \omega_{oz}$ – проекции абсолютных угловых скоростей