

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

## ***МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА***

Лабораторный практикум  
по курсу «Микро- и наноэлектромеханические устройства»  
для студентов специальности 1-41 01 03  
«Квантовые информационные системы»  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2009

УДК 621.3.049.77(076)  
ББК 32.844.1я73  
М59

Составитель  
С. В. Гранько

Рецензент:  
заведующий кафедрой информационных систем и технологий  
Института информационных технологий  
учреждения образования «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»,  
кандидат технических наук, доцент В. И. Пачинин

**Микроэлектромеханические** устройства : лаб. практикум по курсу  
М59 «Микро- и наноэлектромеханические устройства» для студ. спец. 1-41 01 03  
«Квантовые информационные системы» всех форм обуч. / сост.  
С. В. Гранько. – Минск : БГУИР, 2009. – 23 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-478-3

В практикуме обобщены основные сведения о микроэлектромеханических устройствах. Даны методики анализа МЭМС- и МОЭМС-компонентов устройств медицинского назначения, основанных на явлениях дифракции излучения на фрактальных топологиях; акустоэлектронных компонентов; сенсорно-драйверных устройств.

Предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Квантовые информационные системы».

УДК 621.3.049.77(076)  
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-488-478-3

© Гранько С. В., составление, 2009  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1	
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ МОЭМС-СТРУКТУР	
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОГРАФИЙ РАСТРОВОГО	
ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА.....	4
1.1. Основные теоретические положения.....	4
1.2. Порядок выполнения работы.....	9
1.3. Содержание отчета.....	9
1.4. Контрольные вопросы.....	9
Литература.....	9
Лабораторная работа №2	
ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.	
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	10
2.1. Основные теоретические положения.....	10
2.2. Порядок выполнения работы.....	14
2.3. Содержание отчета.....	15
2.4. Контрольные вопросы.....	15
Литература.....	15
Лабораторная работа №3	
ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ. КОНСТРУКЦИЯ	
И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	16
3.1. Основные теоретические положения.....	16
3.2. Порядок выполнения работы.....	22
3.3. Содержание отчета.....	22
3.4. Контрольные вопросы.....	22
Литература.....	22

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ МОЭМС-СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОГРАФИЙ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

*Цель:* изучить принцип работы МОЭМС-компонентов в качестве дифракционной решетки на отражение, полученной методом микрообработки кремния.

*Оборудование:* микроскоп, ПК с графическим редактором, РЭМ-снимки.

#### 1.1. Основные теоретические положения

Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах, – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн [1].

Представим, что в падающем свете присутствует излучение разных длин волн. Можно выбрать угол падения таким образом, что волны определенной длины при отражении от отдельных линий решетки будут отличаться по фазе друг от друга ровно на одну длину волны. В этом случае все отраженные волны будут усиливать друг друга. Такой угол будет углом максимального пропускания для заданной длины волны падающего света (рис. 1.1).

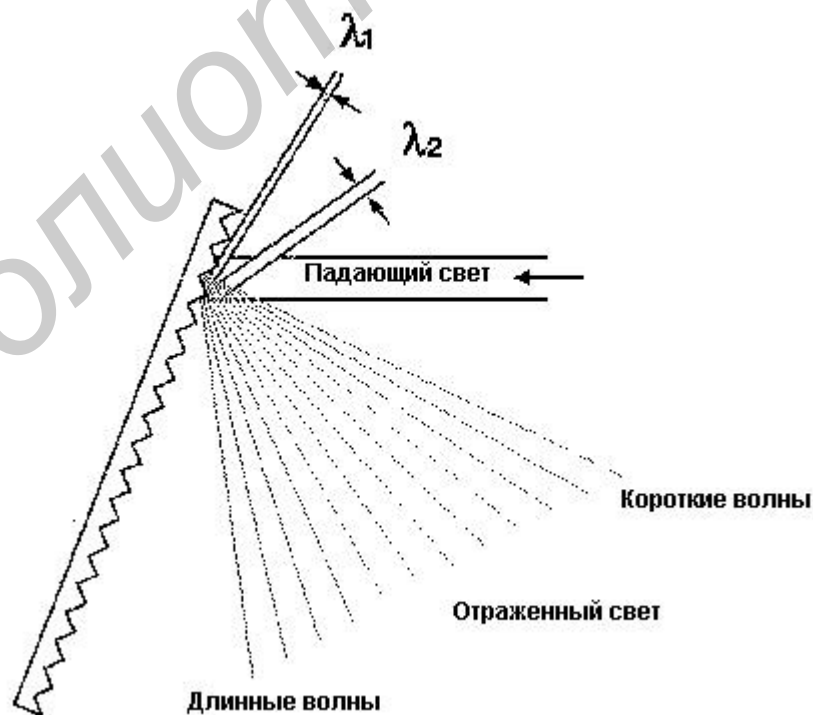


Рис. 1.1. Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

В устройствах мультиплексирования и демultipлексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлен в него. Хотя устройства на основе дифракционных решеток дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери света практически не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов. Однако при этом требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.

В медицинских целях дифракцию света применяют для формирования излучения оптимального распределения по интенсивности и поляризации. Это возможно при применении дифракции на структурах, обладающих свойствами фрактала. Фракталом является объект, имеющий разветвленную структуру, части которого подобны всему объекту [2].

Пример фрактальной топологии представлен на рис. 1.2. Конфигурации топологий, расположенных в областях 2, 3 и 4 подобны топологии в области 1 при уменьшении масштаба в два раза. Внешний вид такой конфигурации представлен на рис. 1.3.

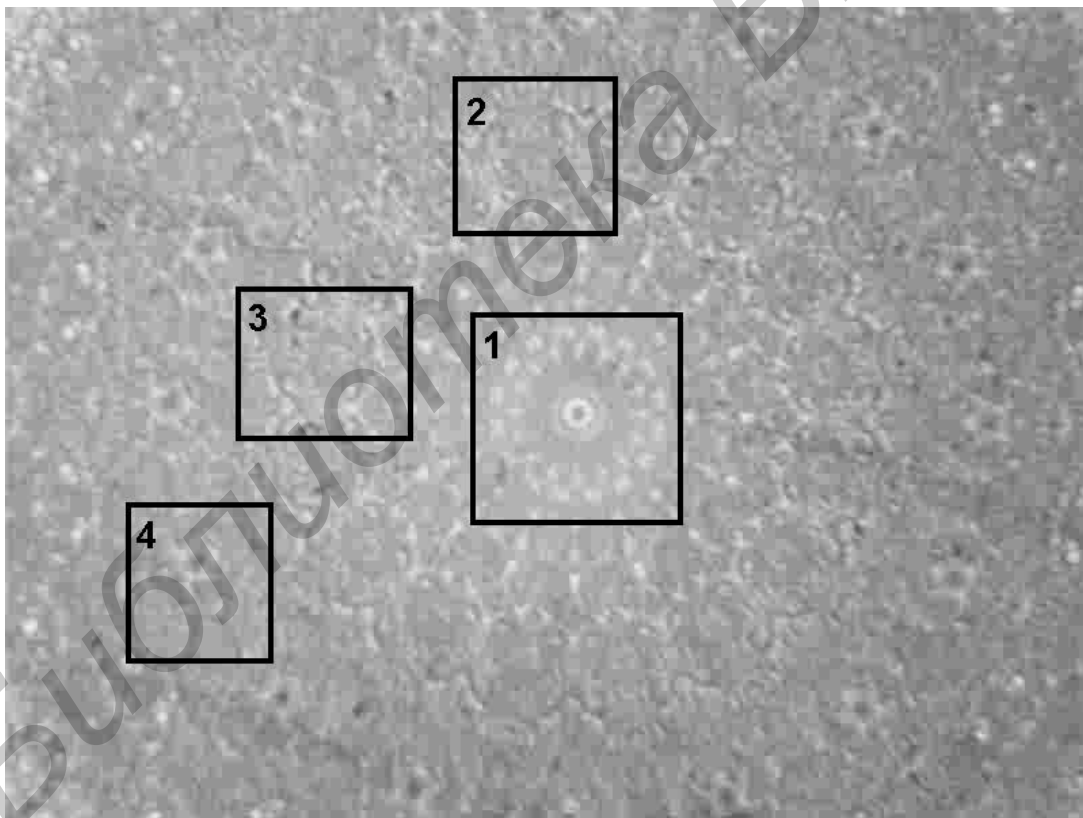


Рис. 1.2. Фрактальная топология дифракционной решетки, применяемая в медицинских целях. Увеличение 16×

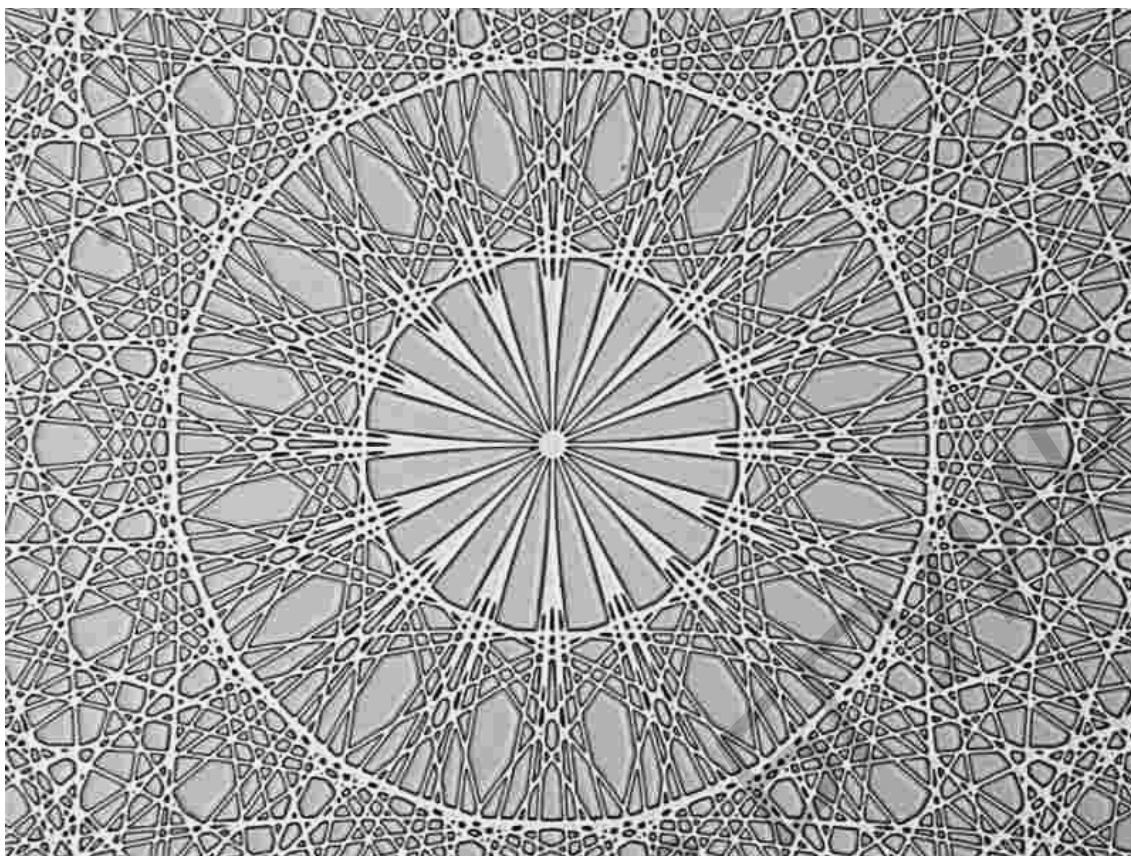


Рис. 1.3. Фрагмент фрактальной топологии дифракционной решетки. Увеличение 200×

Из рис. 1.3 видно, что линии дифракции не являются прямыми, значит изготовление таких дифракционных структур технологиями оптического производства невозможно. Однако применение технологии микроэлектроники позволяет реализовать такие структуры. Для этого требуется комплексное применение процессов фотолитографии, химической обработки и плазмохимического травления. Способность структуры эффективно обеспечивать дифракцию света определяется профилем травления линий дифракции, который контролируется по внешнему виду линии при увеличении 1000× или методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Внешний вид линий в поле микроскопа представлен на рис. 1.4. Данный метод позволяет оценить ширину линии и ее горизонтальные характеристики, такие как затрав и боковой уход. Для анализа данных характеристик выбираются участки, на которых линии не накладываются, а также наиболее спрямленные. Визуальная оценка ширины линии представлена на фрагменте 1, горизонтальных характеристик – на фрагменте 2, оценка производится по размытости края. Несмотря на низкую точность, данный метод контроля имеет преимущества – оперативность и неразрушаемость.

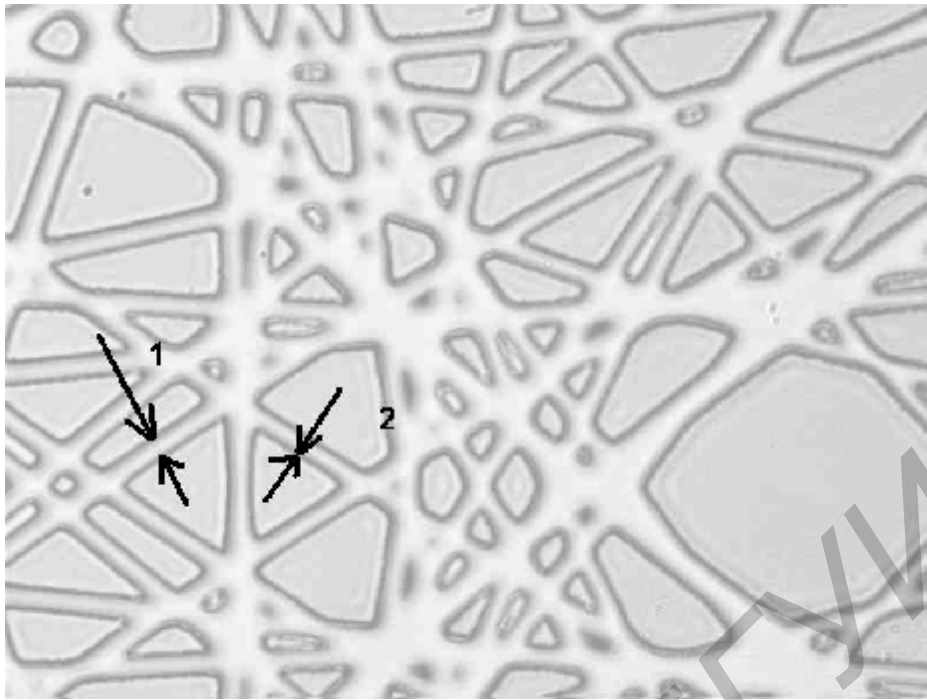
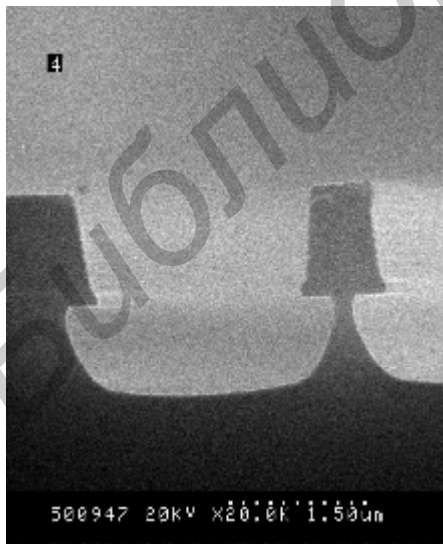
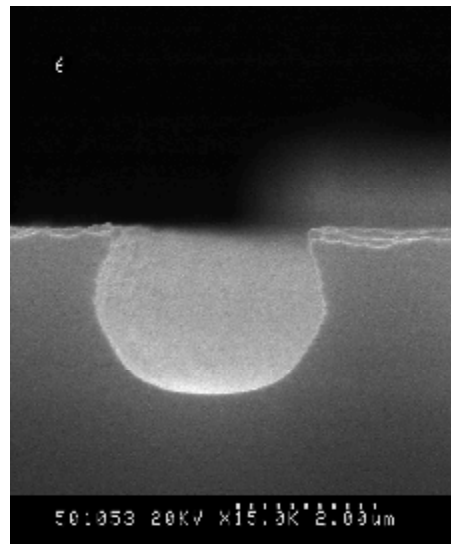


Рис.1.4. Пример анализа линий травления с помощью оптического микроскопа. Увеличение 1000×

Фотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, представлены на рис. 1.5. В правом нижнем углу обозначен масштаб изображения в виде десяти интервалов, состоящих из точек. Расстояние на фотографии, равное расстоянию между левой и правой точками, составляет значение, представленное в правом нижнем углу. На рис. 1.5, *а* на поверхности структуры имеется окисел, для расчетов параметров следует использовать нижнюю часть структуры. На рис. 1.5, *б* имеет место плавный переход от стенки канавки ко дну.



*а*



*б*

Рис. 1.5. Фотографии профилей травления, полученные с помощью РЭМ: *а* – над структурой имеется слой окисла; *б* – имеет место плавный переход от стенки канавки ко дну

Ключевыми параметрами структур являются (рис. 1.6):

1)  $d_1$  – ширина по поверхности. В качестве поверхности принимается линия раздела окисел – кремний;

2)  $d_2$  – ширина по глубине. В случае если дно не обозначается (рис. 1.5, б), в качестве начала дна принимаются точки, в которых наклон касательной к поверхности составляет  $45^\circ$ ;

3)  $h$  – глубина. Расстояние от поверхности до дна. Под стенкой понимается прямая, соединяющая точки, обозначающие ширину по поверхности и ширину по глубине;

4)  $\Delta d$  – неровность стенок – расстояние от точки максимального отклонения поверхности профиля до стенки;

5)  $\Delta h$  – неровность дна – расстояние от точки максимального отклонения поверхности профиля до дна;

6)  $\alpha$  – угол наклона стенок.

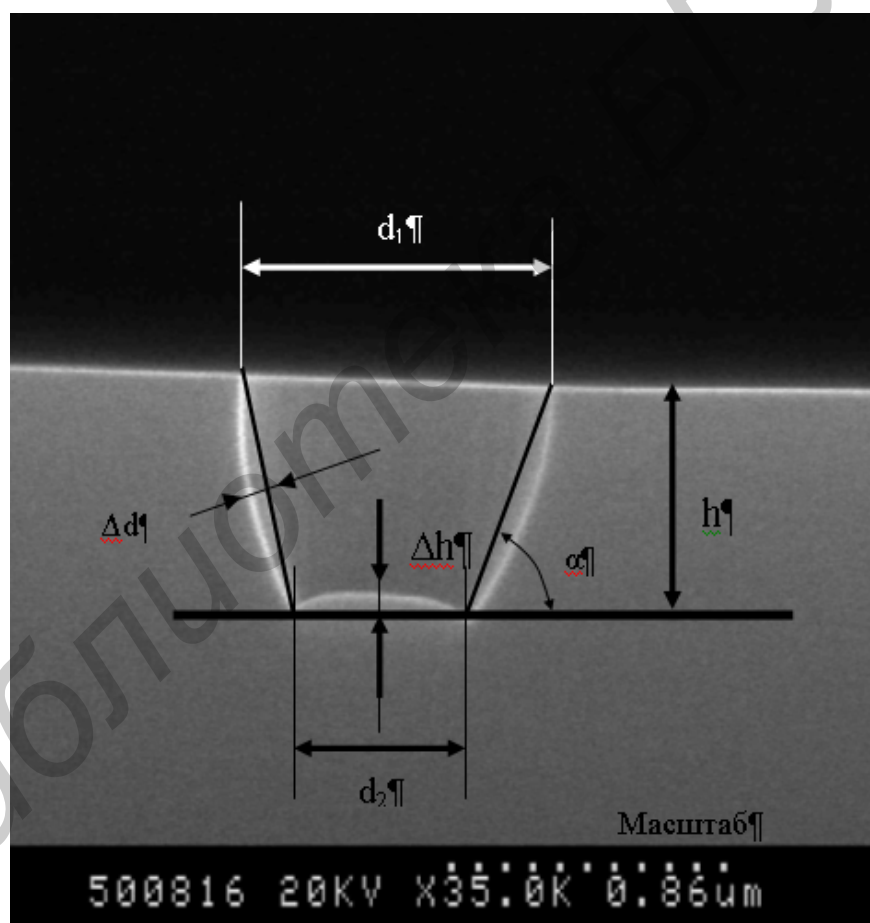


Рис. 1.6. Пример анализа профилей травления



## 1.2. Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя образец структуры.
2. Провести анализ с помощью оптического микроскопа: а) найти центральную структуру; б) найти несколько структур, подобных центральной на поверхности образца.
3. Проанализировать линию травления. Оценить ширину и размытость края.
4. Получить у преподавателя РЭМ-снимки профилей.
5. Проанализировать профили травления, рассчитать описанные выше параметры.

## 1.3. Содержание отчета

1. Описание явления дифракции света, принципа работы дифракционной решетки на отражение.
2. Описание технологического процесса формирования МОЭМС-структур с использованием планарной технологии.
3. Результаты анализа РЭМ-снимков.

## 1.4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия фрактальной дифракционной решетки?
2. В чем технологические сложности получения фрактальной дифракционной решетки механическим способом?
3. Чем характеризуется профиль плазмохимического травления в монокремнии?

## Литература

1. Лансберг, Г. С. Оптика : учеб. пособие для вузов / Г. С. Лансберг. – 6-е изд., стереотип. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
2. Бондаренко, В. А. Фрактальное сжатие изображений по Барнсли – Слоану / В. А. Бондаренко, В. Л. Дольников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №5. – С. 12–20.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*Цель:* изучить принцип работы и конструкцию встречно-штыревых преобразователей.

*Оборудование:* микроскоп, микроинтерферометр МИИ-4

#### 2.1. Основные теоретические положения

Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) являются типичными представителями современных датчиков. Эта группа датчиков в последние годы нашла широкое применение в различных областях науки и техники: от детектирования газов и паров до измерений напряжений и разработки приводов на ПАВ для микросистем [1]. Первоначально устройства на ПАВ использовались в радарх и системах связи в качестве фильтров и линий задержек, но в дальнейшем оказалось очень перспективным применять чувствительные элементы на ПАВ для определения ряда физических величин: силы, давления, электрических и магнитных полей, химических компонентов.

Обычно устройства на ПАВ представляют собой пьезоэлектрическую подложку, на поверхности которой расположены встречно-штыревой преобразователь (ВШП) и рефлекторы [2]. ВШП – главный элемент любых устройств на ПАВ. Его основной задачей является преобразование электрической энергии в механическую и наоборот с целью генерации и детектирования ПАВ. Вид акустических волн, возбуждаемых в пьезоэлектрическом материале, зависит от свойств самого материала, от среза кристалла и структуры электродов, используемых для преобразования электрической энергии в механическую. Были исследованы возможности применения в качестве датчиков различных типов акустических устройств, основанных на ПАВ Рэлея и поперечных ПАВ с горизонтальной поляризацией (SH-ПАВ), на плоских акустических волнах и плоских волнах изгиба, а также на волнах Лэмба.

Волну Рэлея можно разложить на две составляющие: перпендикулярную поверхности и параллельную поверхности. Вторая составляющая совпадает с направлением распространения волны. В движении частиц в волне Рэлея, если их рассматривать в векторной плоскости, также присутствуют два компонента. Частицы перемещаются по эллиптической траектории, и их движение можно разложить на две составляющие: перпендикулярную и параллельную поверхности. Электромагнитное поле, связанное с распространением волны Рэлея, имеет то же самое направление. Скорость волны определяется материалом подложки и срезом кристаллов. Мощность ПАВ ограничивается зоной шириной в несколько длин волн, прилегающей к поверхности (Campbell, 1998).

При использовании других срезов кристаллов вместо волны Рэлея можно получить SH-ПАВ. В этом случае перемещение частиц происходит в двух на-

правлениях: поперечном распространению волны и параллельном плоскости поверхности. Рабочая частота здесь определяется конструктивными особенностями ВШП и скоростью распространения поперечной волны с горизонтальной поляризацией в материале подложки. На устройства, основанные на данном типе волн, возлагают большие надежды при разработке датчиков для работы в жидких средах и биосенсоров (Kondoh, Matsui, Shiokawa, 1993, Nakamura, Kazumi, Shimizu, 1977, Shiokawa, Moriizumi, 1987).

Датчики на SH-ПАВ могут использоваться для определения удельной массы, вязкости, проводимости и диэлектрической проницаемости окружающей жидкой среды. Конструкция датчиков на поперечных плоских акустических волнах с горизонтальной поляризацией подобна устройствам на волнах Рэлея, но подложка в них тоньше, обычно ее толщина составляет несколько длин акустических волн. ВШП генерируют поперечные волны с горизонтальной поляризацией, распространяющиеся в объеме под углом к поверхности. Эти волны отражаются от поверхностей пластины при перемещении внутри подложки между ВШП. Рабочая частота определяется толщиной подложки и конструктивными особенностями ВШП. Датчики на этом типе волн используются для измерений в жидких средах. В них в качестве чувствительной зоны можно использовать всю нижнюю поверхность пластины, что является их достоинством.

Волны Лэмба, также называемые плоскими акустическими волнами, являются упругими волнами, распространяющимися в пластине ограниченной толщины. Они применяются в медицинских системах для мониторинга структур и акустических потоков.

ВШП состоит из двух гребенчатых электродов, размещенных на пьезоэлектрической подложке (рис. 2.1).

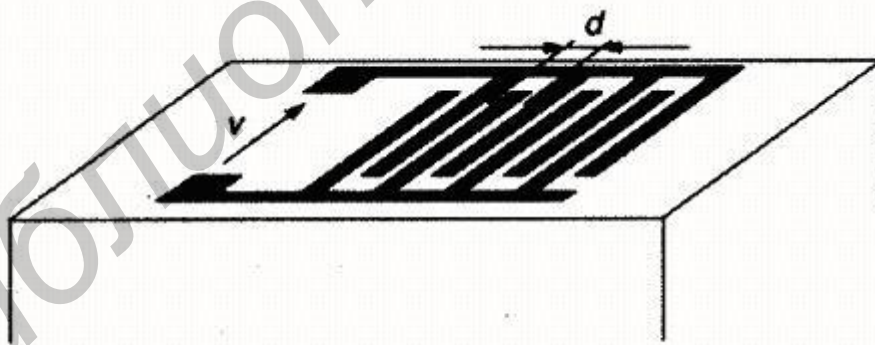


Рис. 2.1. Структура встречно-штыревого преобразователя

Когда на электроды подается напряжение, возникает электрическое поле, что приводит к появлению на пьезоэлектрической подложке динамических напряжений, которые, в свою очередь, запускают упругие волны. Эти волны состоят из волн Рэлея, распространяющихся перпендикулярно к электродам со скоростью  $v_R$ .

Если на электроды ВШП подать гармонический сигнал, равный

$$n = n_0 \exp(j\omega t), \quad (2.1)$$

появившаяся волна механического напряжения начнет распространяться по поверхности кристалла в двух направлениях. Для обеспечения усиления интерференции и синфазности напряжений расстояние между соседними зубцами ВШП должно быть равно половине длины упругой волны  $\lambda_R$ :

$$d = \frac{\lambda_R}{2}. \quad (2.2)$$

Соответствующая частота, называемая частотой синхронизации, определяется следующим соотношением:

$$f_0 = \frac{n_R}{\lambda_R}. \quad (2.3)$$

На этой частоте достигается максимальная эффективность ВШП при преобразовании электрической энергии в акустическую и наоборот. Точное определение характеристик пьезоэлектрического поля, управляемого ВШП, довольно трудоемкий процесс. На практике анализ ВШП часто выполняется методами цифрового моделирования. Частотная характеристика ВШП упрощенно может быть представлена в виде дельта-функции.

Принцип действия чувствительных элементов на ПАВ основан на том, что время распространения ПАВ между двумя ВШП зависит от изменений некоторых физических величин.

Один из ВШП, показанный на рис. 2.2, является входным устройством и используется для преобразования сигнала изменяющегося напряжения в механические ПАВ. Другой ВШП работает как выходной приемник и применяется для преобразования колебаний механических ПАВ обратно в электрический сигнал. Поскольку эти два ВШП имеют одинаковую природу, каждый из них может быть и входным, и выходным устройством.

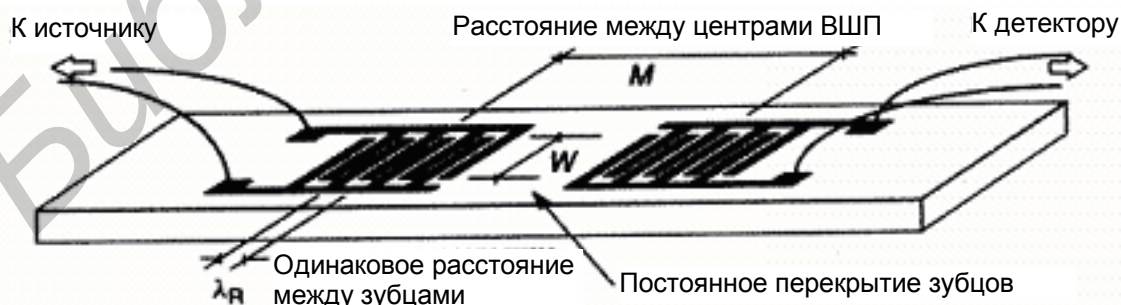


Рис. 2.2. Конструкция ПАВ-структуры

На основе акустических чувствительных элементов разрабатываются надежные и сравнительно недорогие датчики для различных областей примене-

ния. Уникальной особенностью акустических датчиков является прямая зависимость их выходных характеристик от изменения ряда физических и химических параметров, таких, как масса, напряжение, деформация; для жидкостей: плотность, вязкость, проводимость и диэлектрическая проницаемость.

Более того, анизотропная природа пьезоэлектрических кристаллов позволяет, изменяя углы среза, получать уникальные характеристики чувствительных элементов, реализованных на их основе. Например, в акселерометрах на ПАВ применяются кварцевые кристаллы с ST-срезом, обладающие практически нулевым температурным коэффициентом, что обеспечивает незначительный уход частоты при изменении температуры. Также отметим, что, изменяя ориентацию срезов кристалла, можно реализовывать разные виды поверхностных акустических волн. При этом для каждого конкретного случая применения можно подобрать оптимальную ПАВ, и с учетом этого уже разрабатывать датчик. Другими преимуществами пьезоэлектрических материалов являются их низкие внутренние потери, равномерная плотность и упругость, а также хорошие механические свойства.

При разработке акустических датчиков важным является выбор устройства для преобразования ПАВ, в которых заключена информация о преобразованиях измеряемых физических параметров в выходной электрический сигнал. Любое малое возмущение, появляющееся в акустических волнах, должно вызывать значительный отклик в преобразованном выходном электромагнитном сигнале, что является следствием огромной разности скоростей распространения акустической и электромагнитной волн. Например, если приложенное к электродам ВШП переменное напряжение имеет частоту 1 ГГц, а скорость распространения ПАВ по пьезоэлектрической подложке равна 3488 м/с, длину волны ПАВ можно определить при помощи соотношения

$$l_C = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}} = 3,488 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (2.4)$$

где  $c$  – скорость света.

Для электромагнитной волны будет справедливо следующее соотношение

$$l_C = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}} = 0,3 \text{ м}. \quad (2.5)$$

Отношение между длинами волн равно

$$\frac{l_R}{l_C} = \frac{3,488 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0,3 \text{ м}} = 1,162 \cdot 10^{-5}. \quad (2.6)$$

Исследуемый образец представляет собой пластину ниобата лития толщиной 0,6 мм со сформированным микрорисунком ВШП. На каждом ВШП

имеются контактные площадки (рис. 2.3) и непосредственно рабочая структура ВШП (рис. 2.4), а также тестовая структура.

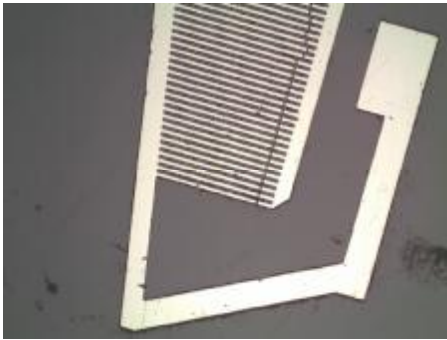


Рис. 2.3. Контактная площадка преобразователя



Рис. 2.4. Фрагмент преобразователя

## 2.2. Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя образец с ПАВ-структурой.
2. Изучить конструкцию ВШП с помощью микроскопа, найти контактные площадки, рабочую и тестовую структуру (см. рис. 2.3 и 2.4).
3. Измерить шаг между зубцами с помощью микроинтерферометра МИИ-4, (метод измерения представлен на рис. 2.5).
4. Рассчитать длину волны и рабочую частоту, используя соотношения (2.2), (2.4).

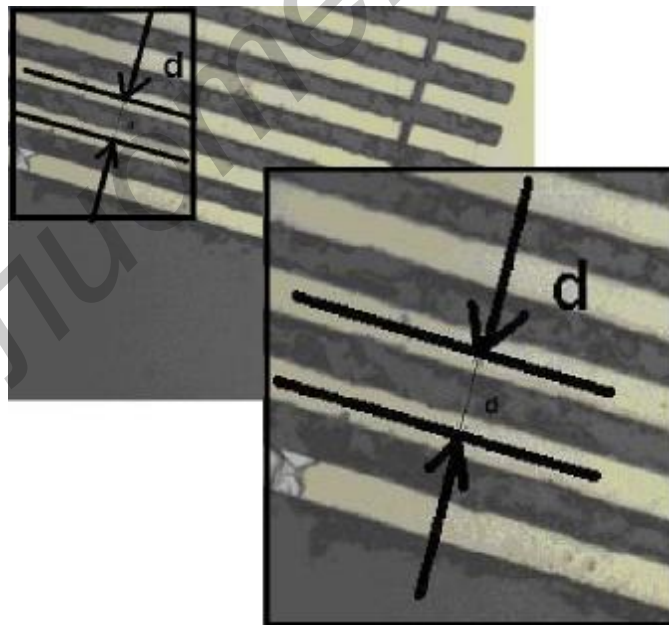


Рис. 2.5. Измерение шага между зубцами

### **2.3. Содержание отчета**

1. Описание генерации и поглощения на ПАВ; принципа работы устройств на ПАВ.
2. Результаты анализа ВШП методом микроскопии: описание расположения контактных площадок и штыревых структур, результат измерения расстояний и разрывов.
3. Результаты расчета рабочей частоты.

### **2.4. Контрольные вопросы**

1. Из какого материала выполняется подложка акустоэлектронных элементов?
2. Как осуществляется возбуждение объемных акустических волн? (Как осуществляется возбуждение ПАВ?)
3. Как осуществляется управление распространением ПАВ?
4. Назовите основные особенности акустоэлектронных элементов на ПАВ.
5. В чем особенности технологии изготовления акустоэлектронных элементов на ПАВ?

### **Литература**

1. Варадан, В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Винной, К. Джитте. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
2. Речицкий, В. Н. Акустоэлектронные радиокомпоненты / В. Н. Речицкий. – М. : Сов. радио, 1980. – 338 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*Цель:* изучить принцип работы, конструкцию и технологию изготовления интегральных оптических сенсоров.

*Оборудование:* микроскоп, микроинтерферометр МИИ-4.

#### 3.1. Основные теоретические положения

Матрица или светочувствительная матрица – специализированная аналоговая или цифроаналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных элементов – фотодиодов [1]. Свойства матрицы:

- предназначена для преобразования спроецированного на нее оптического изображения в аналоговый электрический сигнал или в поток цифровых данных (при наличии АЦП непосредственно в составе матрицы);
- является основным элементом цифровых фотоаппаратов, современных видео- и телевизионных камер, фотокамер, встроенных в мобильный телефон, камер систем видеонаблюдения и многих других устройств;
- применяется в оптических детекторах перемещения компьютерных мышей, сканерах штрих-кодов, планшетных и проекционных сканерах, системах астро- и солнечной навигации.

КМОП-матрица – светочувствительная матрица, выполненная на основе КМОП-технологии. В КМОП-матрицах используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости.

Особенностью топологии интегральных схем сенсорного назначения является наличие сенсорной и процессорной частей. Сенсорная часть представляет собой упорядоченную структуру (матрицу) ячеек, эквивалентная схема которых представлена на рис. 3.1. Для данной области характерна регулярность повторения фрагментов топологии, конфигурации шин и контактных площадок. Процессорная часть является блоком обработки информации и представляет собой топологию интегральной схемы процессорного назначения. На рис. 3.2 приставлена фотография фрагмента кристалла сенсорной схемы, в левой части расположена сенсорная часть, что подтверждает наличие параллельных металлизационных полос и регулярно расположенных контактных площадок. В правой части фотографии размещена процессорная часть. Топология носит сложный характер.



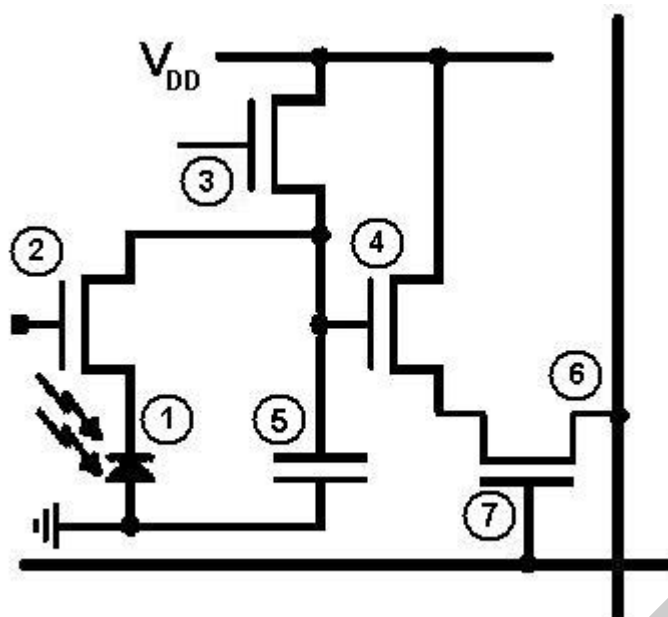


Рис. 3.1. Эквивалентная схема ячейки КМОП-матрицы:  
 1 – светочувствительный элемент (диод); 2 – затвор; 3 – сигнал сброса;  
 4 – усилитель; 5 – конденсатор, сохраняющий заряд с диода;  
 6 – вертикальная шина, передающая сигнал процессору;  
 7 – шина выбора строки

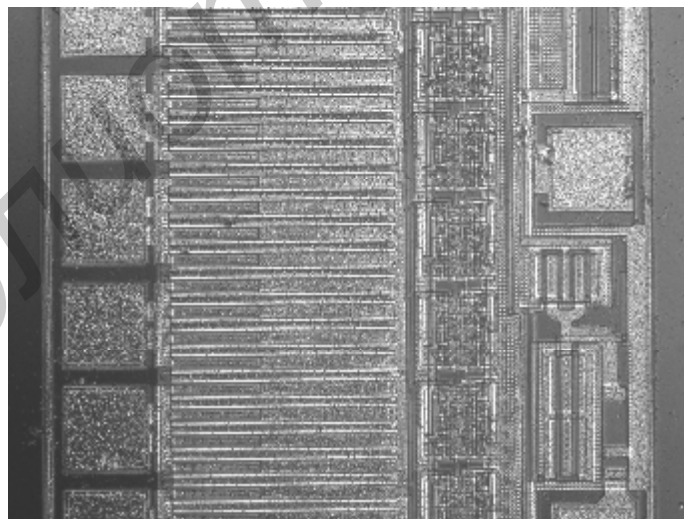


Рис. 3.2. Сенсорная и процессорная части модуля

Наличие упорядоченности сенсорной части требует увеличения линейных размеров одной из сторон кристалла. Характерные отношения линейных размеров составляют 1:10 и выше. Пример «вытянутого» кристалла представлен на рис. 3.3, в поле фотографии уместилось четыре кристалла по ширине, но по длине кристалл не уместился в поле фотографии. Визуальный анализ кристалла позволяет выделить отдельную ячейку сенсора (эквивалентная схема) и рассчитать оптическое разрешение сенсора.

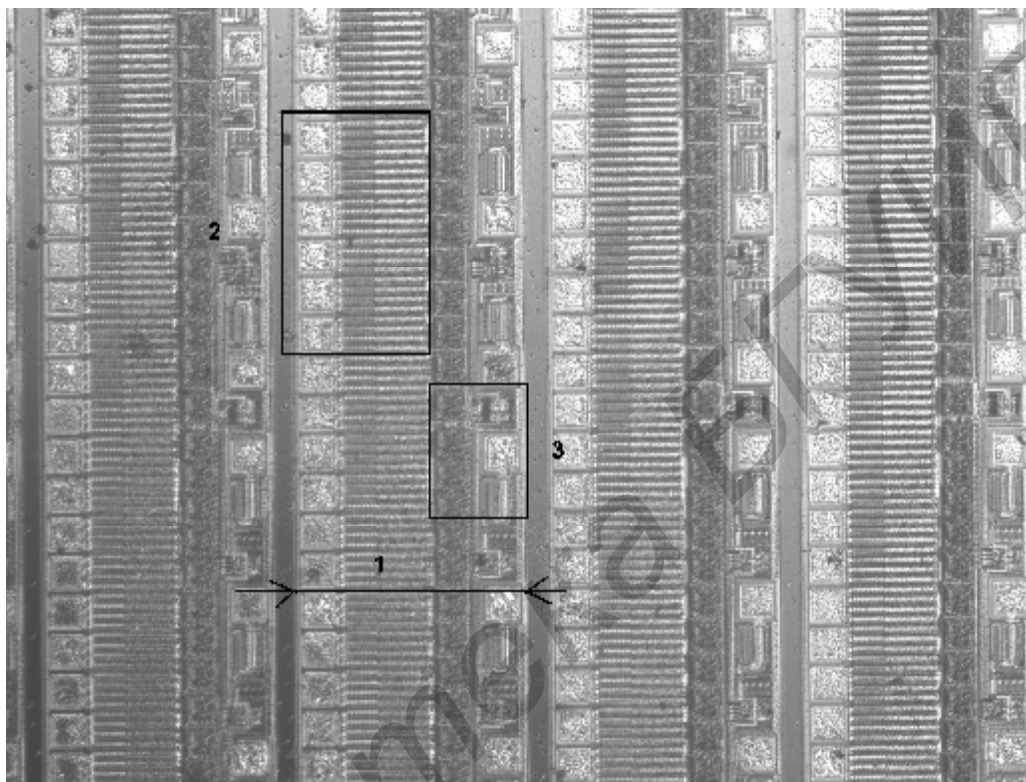


Рис. 3.3. Общий вид фрагмента модуля с кристаллами:  
1 – ширина кристалла; 2 – фрагмент процессорной части;  
3 – фрагмент сенсорной части

Для обозначения и идентификации в процессе производства изделию присваивается специальный краткий шифр – топономинал. Данный шифр обозначается на поверхности кристалла с начальных этапов формирования и располагается на рабочей части кристалла. На рис. 3.4 топономинал расположен между контактными площадками схемы.

Для контроля параметров формируемых микроструктур в состав изделия вводятся тестовые элементы, которые располагаются на скрайберных дорожках (рис. 3.5). Это могут быть отдельные элементы схемы в интегральном исполнении (транзисторы, резисторы и пр.), коллективные тесты для контроля дефектности (цепи контактов, параллельные активные элементы и пр.) и тесты для контроля отдельных операций. На рис. 3.6 представлен тестовый пМОП-транзистор, контактные площадки имеют следующие обозначения:

S – подложка, В, D – сток-исток, G – затвор. На рис. 3.7 и 3.8 представлены тестовые структуры для операции «фотолитография».

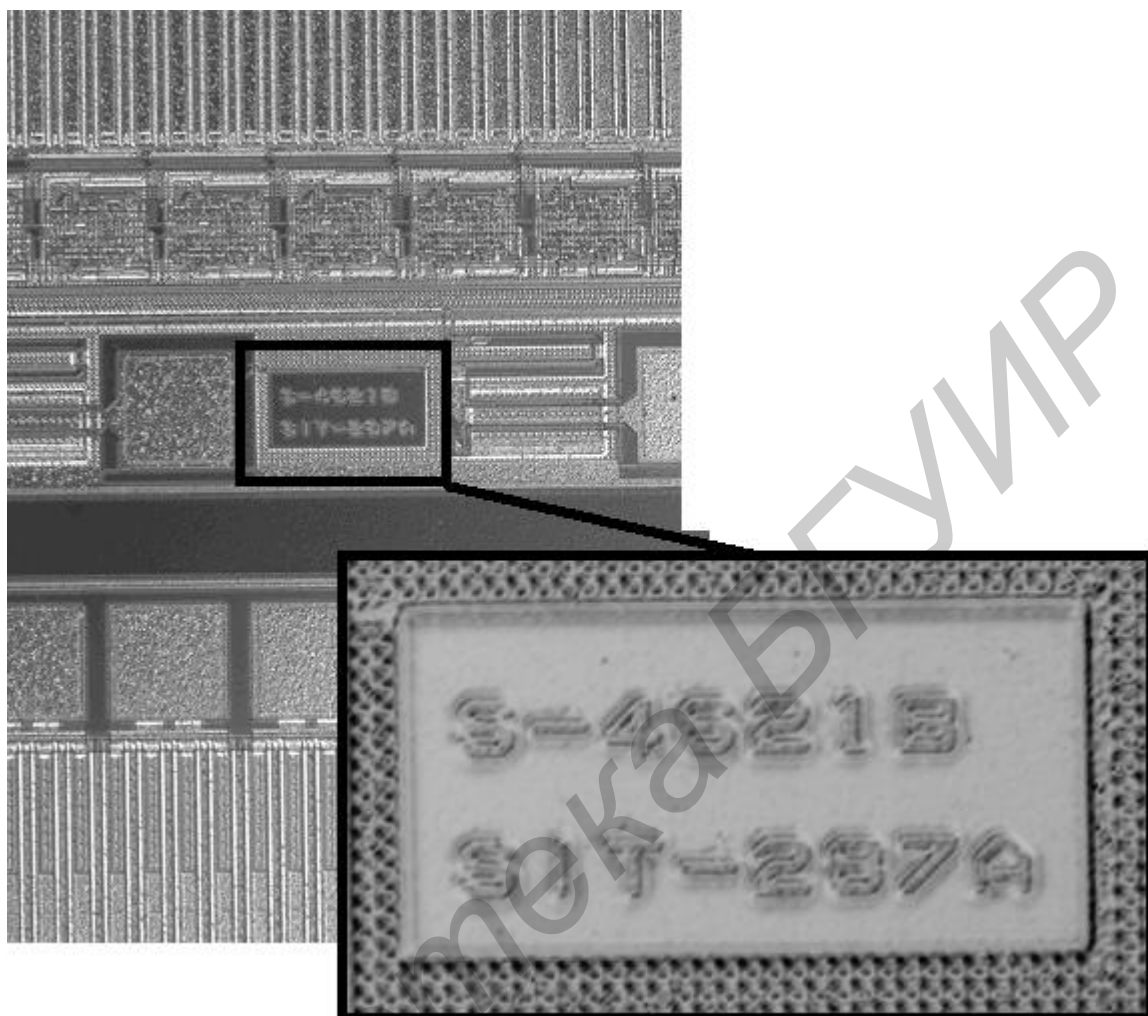


Рис. 3.4. Топономинал кристалла

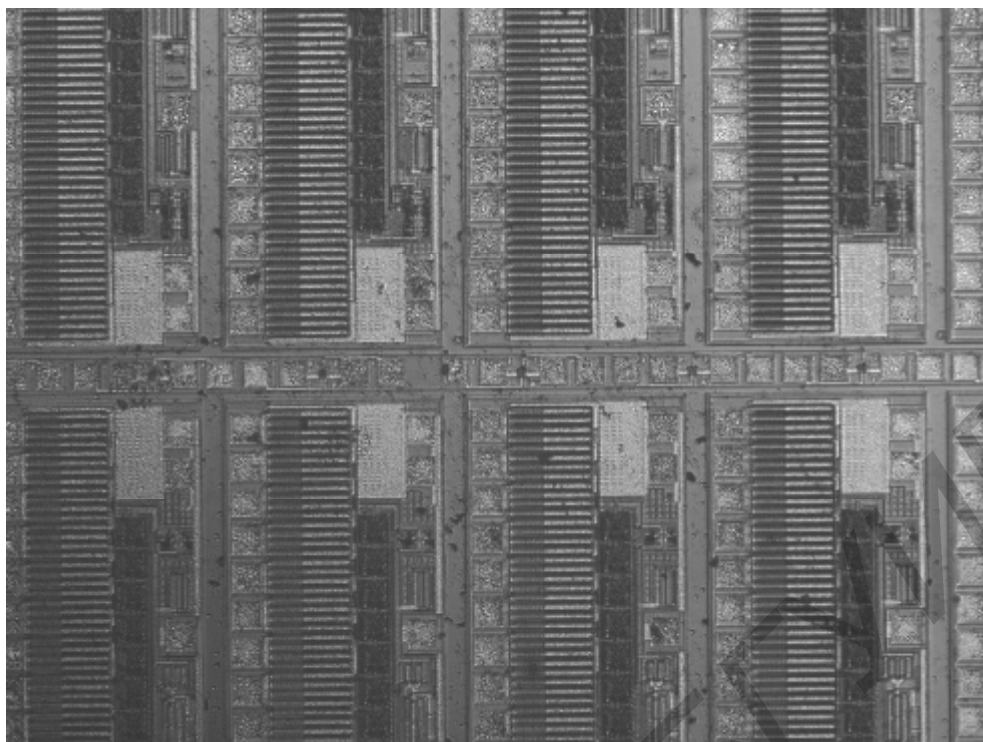


Рис. 3.5. Расположение тестовых структур на скрайберных дорожках



Рис. 3.6. Контактные площадки тестовых структур

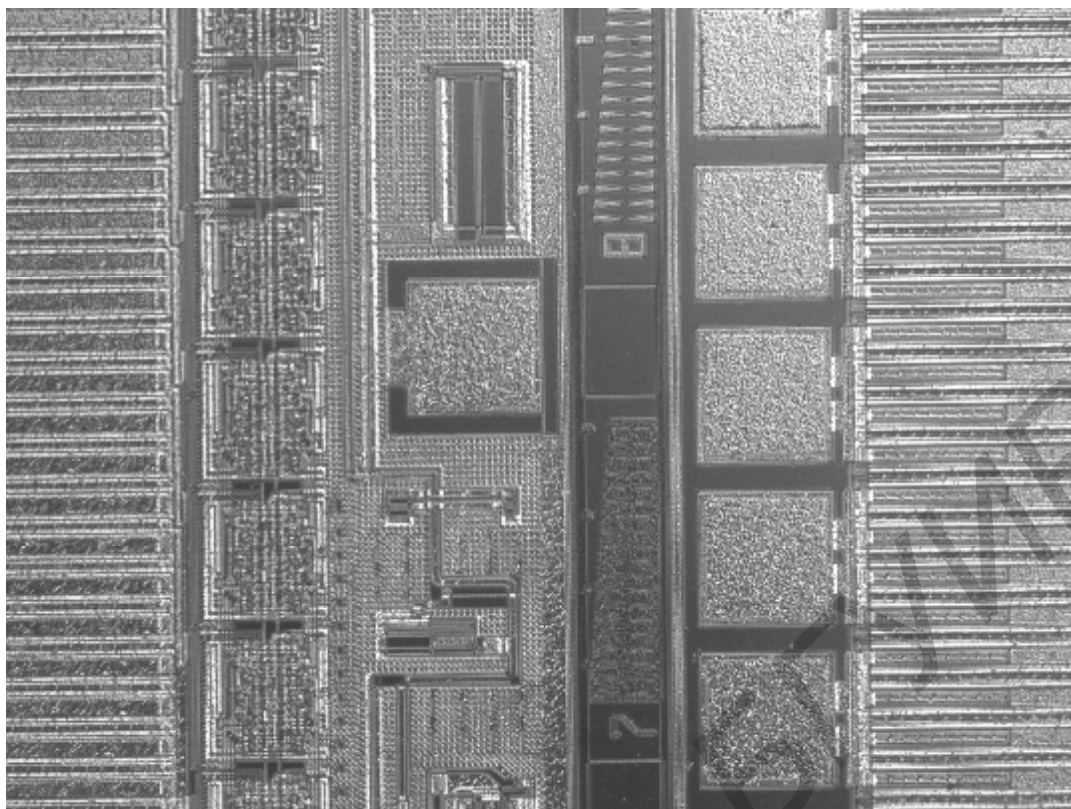


Рис. 3.7. Тестовые структуры для операции «фотолитография».  
Тест для контроля линейных размеров

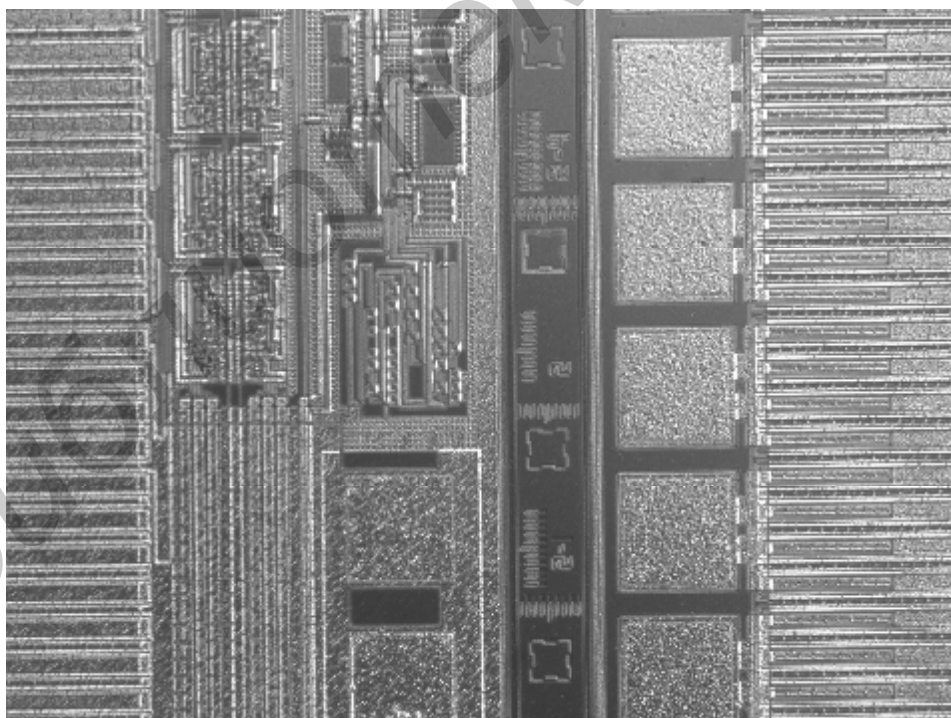


Рис. 3.8. Тестовые структуры для операции «фотолитография».  
Тест для контроля совмещения

### **3.2. Порядок выполнения работы**

1. Изучить конструкцию кристалла. Оценить линейные размеры, количество кристаллов на пластине. Найти границы фотолитографического модуля и определить его кратность.
2. Выявить процессорную и сенсорную части, измерить чувствительность сенсорной части по повторяемости структур и контактных площадок.
3. Изучить блок обработки информации.
4. Описать тестовые структуры.

### **3.3. Содержание отчета**

1. Описание генерации и поглощения на ПАВ. Описание принципа работы устройств на ПАВ.
2. Результаты анализа кристалла методом микроскопии: описание расположения контактных площадок и тестовых структур.
3. Результаты расчета параметров технологического процесса из анализа тестовых структур.

### **3.4. Контрольные вопросы**

1. Что такое КМОП-матрица?
2. В чем особенности интегрального оптического сенсора?
3. Зачем требуется процессорная часть?
4. Зачем требуется тестовые структуры?

### **Литература**

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам : сб. ст. / под ред. П. П. Мальцева. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

Учебное издание

## **МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

Лабораторный практикум  
по курсу «Микро- и наноэлектромеханические устройства»  
для студентов специальности 1-41 01 03  
«Квантовые информационные системы»  
всех форм обучения

Составитель  
**Гранько Сергей Владимирович**

Редактор Т. П. Андрейченко  
Корректор Л. А. Шичко  
Компьютерная верстка Е. Г. Бабичева

---

Подписано в печать 09.09.2009.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,51.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 201.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6