

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 53.087.92

Н. А. Шелепин, канд. техн. наук, доц.,
НПК ТЦ МИЭТ

КРЕМНИЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И КОМПОНЕНТЫ ДАТЧИКОВ. ДАТЧИКИ И МИКРОСИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Описаны преобразователи физических величин и датчики, разработанные НПК "Технологический центр" МИЭТ и представленные на семинаре, состоявшемся 16 мая 2002 г.

НПК "Технологический центр" МИЭТ представляет собой классический образец университетского исследовательского центра, обладающего уникальной технологической линией, позволяющей проводить исследования и разрабатывать изделия микроэлектроники, микросенсоры и микросистемы.

16 мая 2002 г. в НПК был проведен семинар, на котором были представлены следующие доклады:

- Технологический Центр МИЭТ — основные продукты и новые разработки, перспективы рынка (Ковалев А. А., НПК ТЦ).
- Нормативная база разработки преобразователей физических величин и компонентов датчиков (Телец В. А., 22 ЦНИИ МО).
- Интегральные преобразователи давления. Основные технические характеристики и возможности производства (Амеличев В. В., НПК ТЦ; Данилова Н. Л.; Михайлов Ю. А.).
- Тензомодули давления и их применение (Зимин В. Н., НПК ТЦ).
- Исследование радиационной стойкости кремниевых интегральных преобразователей давления (Никифоров А. Ю., ЭНПО "СПЭЛС").
- Разработка преобразователей и датчиков давления промышленного назначения (Аверьянов Н. К., ЗАО ИЦНТ).
- Интегральные магниточувствительные сенсоры и микросистемы (Галушков А. И., НПК ТЦ).
- Акселерометры на основе интегральных тензопреобразователей (Панкратов О. В., НПК ТЦ; Брехов Р. С., ЛИИ им. Громова).
- Фоточувствительные элементы на основе высокоомного кремния. Основные результаты и перспективные разработки (Клемин С. Н., ГУП НПП "Пульсар").

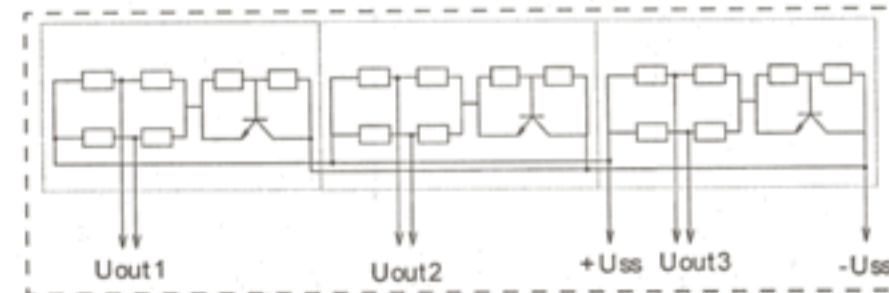
- Применение кремниевых чувствительных элементов в автомобильной электронике (Адарчин С. А., ОАО "Автоэлектроника").
- Особенности датчиков силы на основе кремниевых тензопреобразователей (Синицин Е. В., НПК ТЦ).
- Система обеспечения качества при разработке и производстве кремниевых преобразователей физических величин (Дягилев В. В., НПК ТЦ).
- Перспективные направления разработок микросенсорных систем (Шелепин Н. А., НПК ТЦ).

Во вступительном слове директор Государственного научного центра Российской Федерации государственное учреждение НПК "Технологический центр" МИЭТ д-р техн. наук А. Н. Сауров отметил, что данный Центр представляет собой классический образец университетского исследовательского центра, обладающего уникальной технологической линией, которая позволяет проводить исследования и разрабатывать изделия микроэлектроники, микросенсоры и микросистемы.

Ниже приводится описание преобразователей и датчиков, разработанных в НПК ТЦ МИЭТ.

КРЕМНИЕВЫЙ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

Трехкоординатный пьезорезистивный акселерометр выполнен на основе чувствительного элемента в виде балки из монокристаллического кремния с измерительной мостовой схемой и схемой температурной компенсации чувствительности.



Предназначен для измерения вибрационных и ударных ускорений.

Имеет малые габаритные размеры и массу.

Технические характеристики

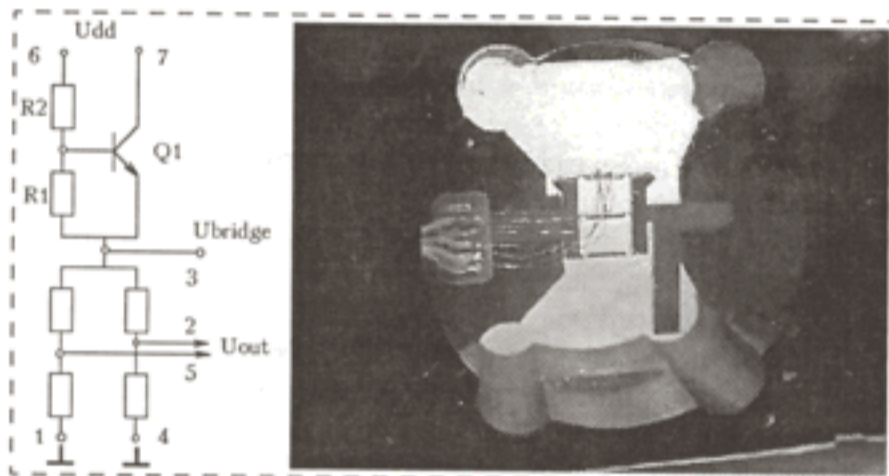
Параметр	АВИ-3-100	АВИ-3-200
Диапазон измерения, g	±100	±200
Прочность, g	1000	2000
Чувствительность, мВ/gВ	>0,6	>0,3
Нелинейность, гистерезис, %FS	<1	
Частотный диапазон, Гц	0-500	0-1000

ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БАЛОЧНЫЙ (ТКБ-5, ТКБ-6)

Преобразователь представляет собой прямоугольную балку из кремния с концентраторами механических напряжений в виде поперечных углублений заданных размеров, на рабочей поверхности которых сформированы тензорезистивные мосты.

Предназначен для преобразования силы, перемещения и ускорения в электрический сигнал в датчиках силы и акселерометрах.

Имеется схема температурной компенсации чувствительности.



Технические характеристики

Параметр	ТКБ-5	ТКБ-6
Номинальная нагрузка, Н	0,2	0,15
Предельно допустимая нагрузка, Н	0,6	0,45
Напряжение питания, В	9	5
Номинальный выходной сигнал, мВ	140 ± 200	70 ± 100

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ

Интегральный преобразователь давления (ИПД) представляет собой кремниевый кристалл с мембраной. На лицевой стороне ИПД в области мембраны сформирован тензорезистивный мост, вне мембраны расположена схема температурной компенсации чувствительности.

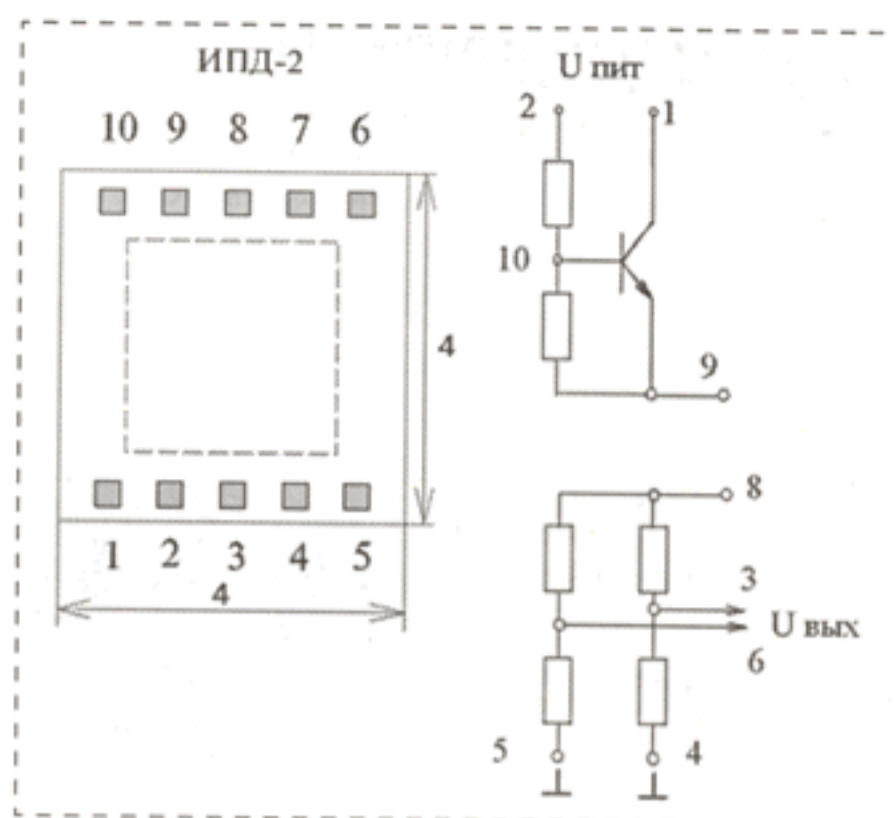


Служит для преобразования давления либо разности давлений в электрический сигнал в датчиках абсолютного и дифференциального давления.

Предусмотрена схема температурной компенсации чувствительности.

Технические характеристики

Диапазон измеряемых давлений, МПа (допускается пятикратная перегрузка)	0,04—30
Напряжение питания, В	4,5—6
Номинальный выходной сигнал, мВ	50—80
Начальный разбаланс моста, % выходного сигнала	< 10
Диапазон рабочих температур, °С	-50—+100
Температурный "уход" чувствительности, %/°С	< 0,02

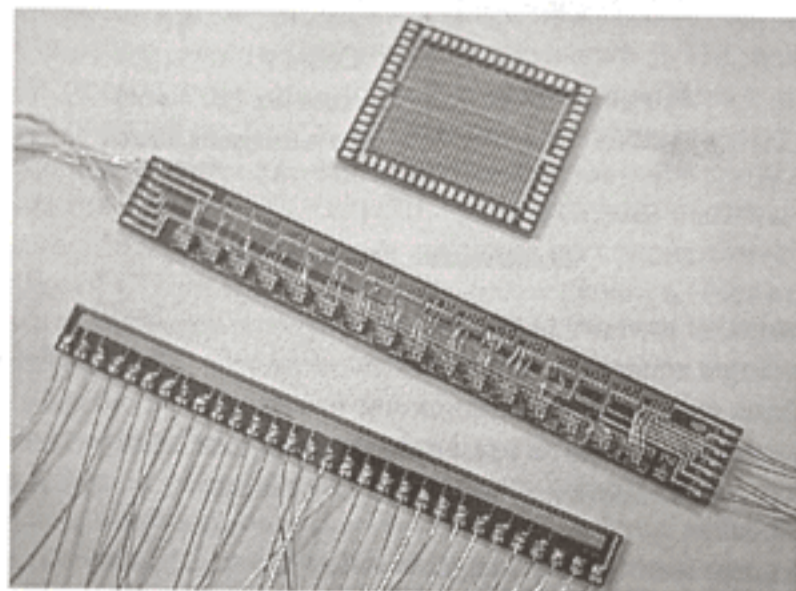


МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ МАТРИЧНОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ось магниточувствительности направлена параллельно или перпендикулярно поверхности кристалла в зависимости от конструктива.

Технические характеристики

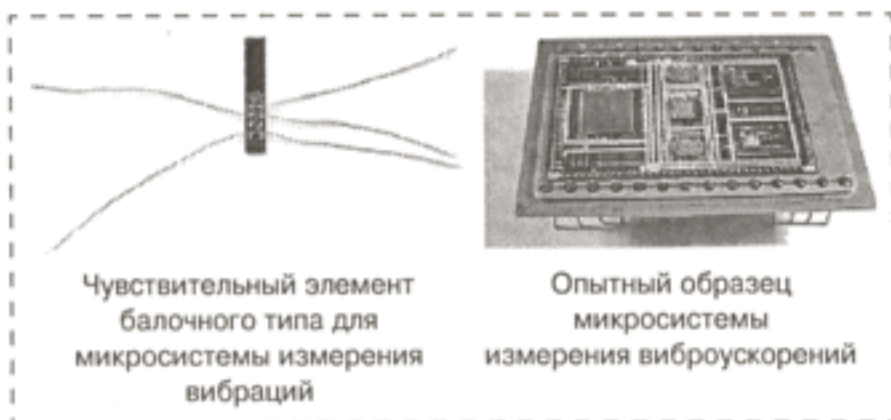
Пространственное разрешение, мкм	200—300
Относительная магниточувствительность, %/Гл	4—10
Температурный диапазон работы, °С	-60—+125
Число магниточувствительных ячеек	32—1000
Характерные размеры кристаллов, мм	8 × 10, 2 × 28, 4 × 30
Число выводов	16—64
Ток потребления, мкА	300—900



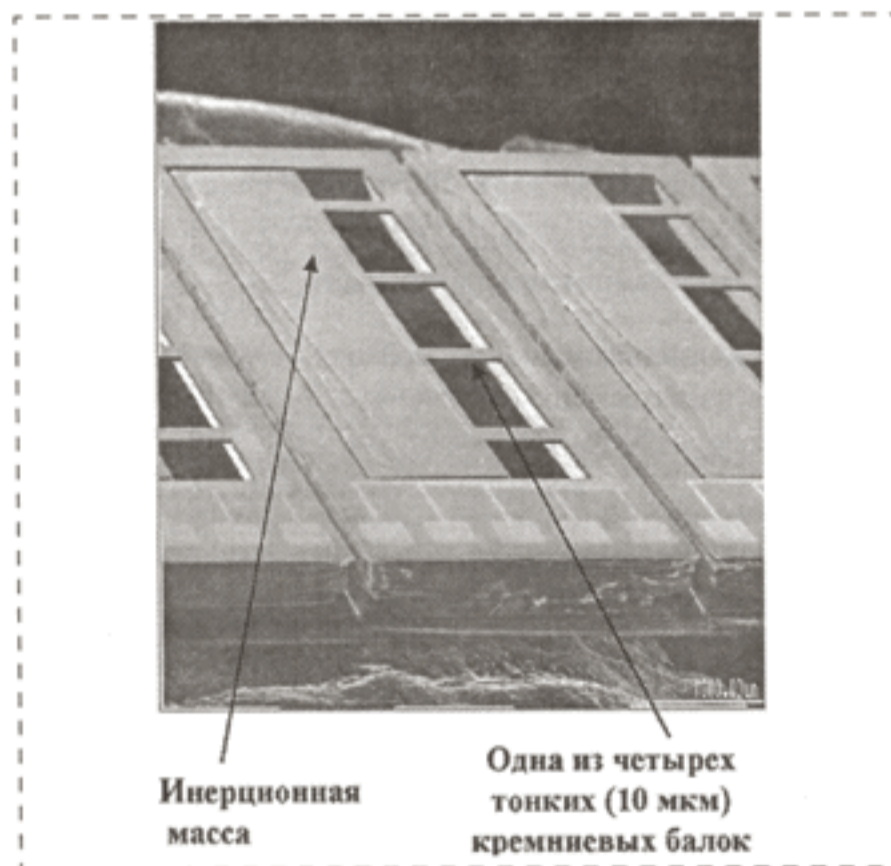
МИКРОСИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ

Технические характеристики

Номинальное ускорение, g	± 5
Диапазон рабочих частот, Гц	5—100
Выходной сигнал — линейный, В	0—5
Нелинейность, %	не более 0,2
Температурный диапазон, °С	от -40 до +70
Габаритные размеры корпуса, мм	39,5 × 29,5 × 7,5



ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ МИКРОСИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ УСКОРЕНИЙ



Технические характеристики

Диапазон измерения ускорений, g	2—10
Размеры кристалла микросистемы, мм	8,0 × 2,5 × 0,44
Масса кремниевой инерционной массы, мг	2
Характерные размеры кремниевых балок, мкм	600 × 20 × 10
Чувствительность при напряжении питания 9 В, мВ/g	1,9
Резонансная частота микросистемы, Гц	1200
Рабочий диапазон частот, Гц	от 0 до 400

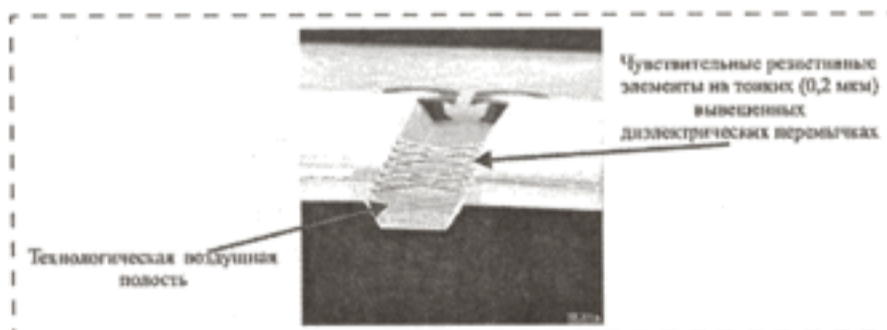
МИКРОСИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ



Технические характеристики

Диапазон измеряемого давления, кПа:	
по входу № 1	0—105
по входу № 2	0—210
Разница давлений между входами № 1 и № 2, кПа	0—105
Напряжение питания, В	$\pm 15 \pm 10 \%$
Выходной сигнал, В	10
Ток потребления, мА	< 40
Сопротивление нагрузки, кОм	> 10
Суммарная погрешность при всех дестабилизирующих факторах, %	< 1
Порог чувствительности, %	0,1
Диапазон рабочих температур, °С	-60—+60
Диапазон предельных температур, °С	-60—+85
Масса, г	< 100

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКАЯ МИКРОСИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ



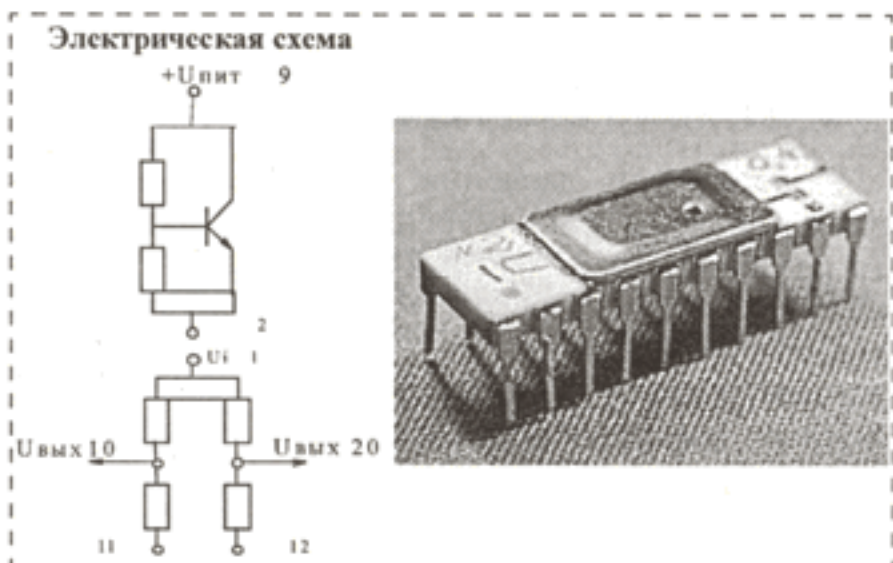
Технические характеристики

Напряжение питания, В	5
Выходной сигнал, мВ	30
Чувствительность, °С	> 0,01
Ток потребления, мА	< 10
Сопротивление выхода, кОм	> 1,0
Суммарная погрешность при всех дестабилизирующих факторах, %	< 1
Порог чувствительности, %	0,5
Диапазон рабочих температур, °С	-60—+125
Диапазон предельных температур, °С	-60—+125
Масса, г	< 10

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ (ПАД)

Преобразователи абсолютного давления применяются для контроля абсолютного давления сухих неагрессивных газов в транспорте, промышленности и др.

Преобразователь абсолютного давления состоит из кремниевого кристалла интегрального преобразователя давления — МПАД и металлокерамического корпуса, имеет схему температурной компенсации.



Технические характеристики

Диапазон измеряемых давлений, МПа.	0,1
Напряжение питания, В.	4,6—5
Номинальный выходной сигнал, мВ.	40—80
Нелинейность выходного сигнала, %	< 0,2
Начальный разбаланс моста, мВ/В	± 10
Диапазон рабочих температур, °С	-60—+85
Температурный коэффициент чувствительности, %/10К	< 0,4
Температурный дрейф "нуля", %/10К	< 0,3
Габаритные размеры, мм	20 × 5 × 5

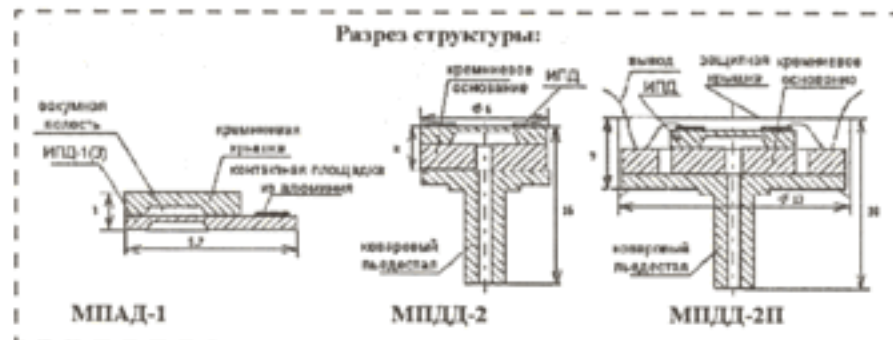
МОДУЛИ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АБСОЛЮТНОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Преобразователи абсолютного или дифференциального давления применяют в различных датчиках давления.

Преобразователь абсолютного давления МПАД-1 состоит из кремниевого кристалла интегрального преобразователя давления — ИПД-1(3) и кристалла-крышки, между которыми под мембраной ИПД расположена вакуумная полость.

Преобразователь дифференциального давления МПДД-2 состоит из кремниевого кристалла ИПД, кремниевого основания и керамической или коваровой трубки. В МПДД-2П дополнительно предусмотрены защитная крышка и плата с гибкими изолированными выводами.

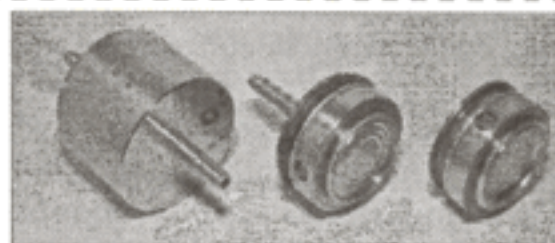
Преобразователи имеют схему температурной компенсации.



Технические характеристики

Диапазон измеряемых давлений, МПа (допускается пятикратная перегрузка)	0,04—30
Напряжение питания, В	4,5—6
Номинальный выходной сигнал, мВ	70 ± 20 %
Нелинейность выходного сигнала, %	< 0,3
Начальный разбаланс моста, мВ/В	< 3
Диапазон рабочих температур, °С	-50—+70
Температурный "уход" чувствительности, %/°С	< 0,02
Температурная погрешность нуля, %/°С	< 0,05

МОДУЛИ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗБЫТОЧНОГО, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ МДР-1 И МДР-2



МДР-1



МДР-2

Модули-преобразователи избыточного дифференциального и абсолютного давления МДР-1 и МДР-2 применяются в качестве чувствительного элемента в датчиках давления для жидких и газообразных сред.

Модуль МДР состоит из тензопреобразователя, представляющего собой кремниевый кристалл с тонкой мембраной, на которой сформирован тензорезистивный мост. Вне мембраны на толстой части кристалла выполнена транзисторная схема температурной компенсации чувствительности. Кристалл размещен в полости, заполненной кремнийорганической жидкостью. От внешней среды тензопреобразователь отделен тонкой разделительной мембраной.

В конструкции модуля МДР-1 измеряемое давление воздействует со стороны разделительной мембраны. В модулях МДР-2 в конструкции пре-

дусмотрен штуцер, герметично соединенный с подмембранной полостью кристалла. Кроме того, тензопреобразователь отделен мембранами как со стороны рабочей поверхности кристалла, так и со стороны подмембранной области.

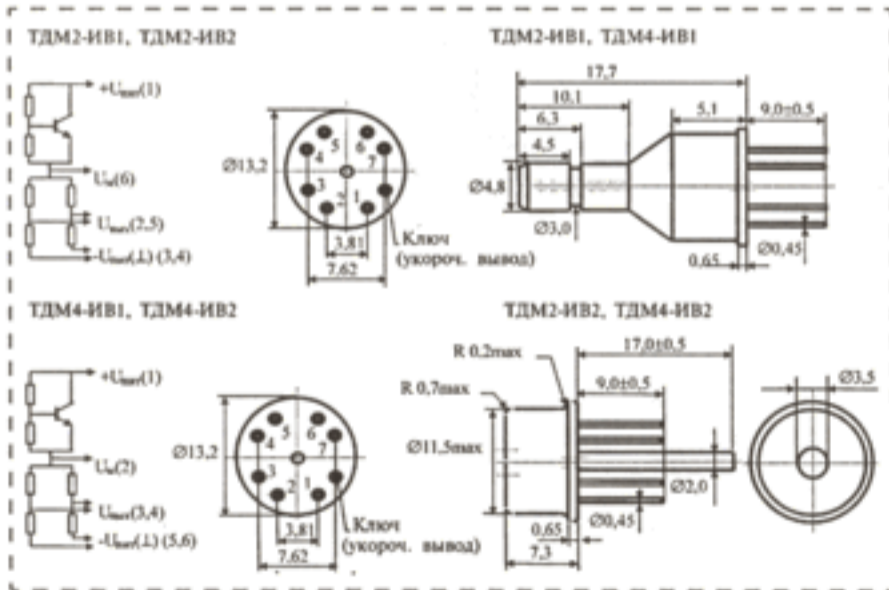
Для подключения питания и снятия сигнала в конструкции модулей применены металlostеклянные выводы.

Технические характеристики

Номинальное давление, МПа	Типоряд от 0,04 до 1,6
Напряжение питания, В	4,5—6
Номинальный выходной сигнал, мА	70 ± 20
Нелинейность выходного сигнала, %	< 0,3
Начальный разбаланс моста, мВ/В	±3
Диапазон рабочих температур, °С	-50—+70
Температурный уход чувствительности, %/°С	< 0,02
Температурный дрейф нуля, %/°С	< 0,05

ТЕНЗОМОДУЛИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ

Тензомодули давления ТДМ2-ИВ1, ТДМ2-ИВ2, ТДМ4-ИВ1 и ТДМ4-ИВ2 предназначены для измерения дифференциального давления газовых неагрессивных сред. Модуль состоит из кремниевого чувствительного элемента, герметично соединенного с металлическим основанием, в котором по кругу впаяны металlostеклянные электрические выводы. По периферии сверху с основанием герметично соединена крышка. Со стороны выводов герметично впаян штуцер для подсоединения тензомодуля к объему с измеряемым давлением.



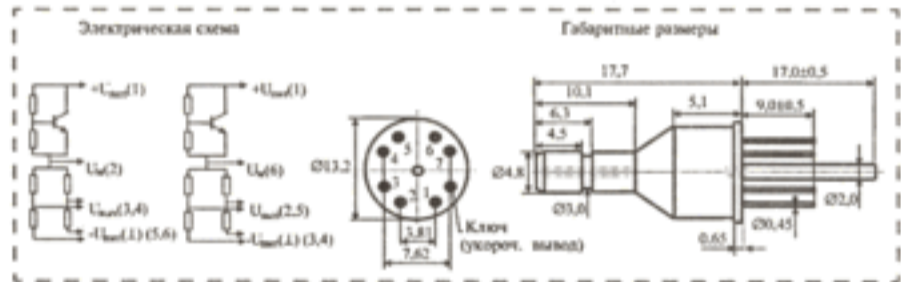
Технические характеристики

Параметр	ТДМ2-ИВ1	ТДМ2-ИВ2	ТДМ4-ИВ1	ТДМ4-ИВ2
Диапазон измеряемых давлений, МПа (допускается двукратная перегрузка)	0,06—2,5	0,06—1,0	0,01—0,04	0,01—0,04
Номинальный выходной сигнал, мВ	50—80		30—70	
Нелинейность выходного сигнала, %	≤0,2		≤0,3	

Напряжение питания, В	5 ± 0,25	5 ± 0,25
Начальный разбаланс моста, мВ/В	<3	<3
Диапазон рабочих температур, °С	от -50 до +85	от -50 до +85
Температурный "уход" чувствительности, %/10 °С	<0,3	<0,3
Температурная погрешность "нуля", %/10 °С	<0,2	<0,3

ТЕНЗОМОДУЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ТДМ2-Д, ТДМ4-Д

Тензомодули давления ТДМ2-Д и ТДМ4-Д предназначены для измерения дифференциального давления газовых неагрессивных сред. Модуль состоит из кремниевого чувствительного элемента, герметично соединенного с металлическим основанием, в котором по кругу впаяны металlostеклянные электрические выводы. По периферии сверху с основанием герметично соединена крышка. Со стороны выводов герметично впаян штуцер для подсоединения тензомодуля к объему с измеряемым давлением.



Технические характеристики

Параметр	ТДМ2-Д	ТДМ4-Д
Диапазон измеряемых давлений, МПа (допускается двукратная перегрузка)	0,06—1,0	0,01—0,04
Номинальный выходной сигнал, мВ	50—80	30—70
Нелинейность выходного сигнала, %	≤0,2	≤0,3
Напряжение питания, В	5 ± 0,25	
Начальный разбаланс моста, мВ/В	<3	
Диапазон рабочих температур, °С	от -50 до +85	
Температурный "уход" чувствительности, %/10 °С	<0,3	
Температурная погрешность "нуля", %/10 °С	<0,3	

ТЕНЗОМОДУЛИ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ ТДМ2-А

Тензомодули давления ТДМ2-А предназначены для измерения абсолютного давления газовых неагрессивных сред. Модуль состоит из кремниевого чувствительного элемента, герметично соединенного с металлическим основанием, в котором по кругу впаяны металlostеклянные электрические выводы. По периферии сверху с основанием герметично соединена крышка со штуцером, предна-

значенным для подсоединения тензомодуля к объему с измеряемым давлением.



Технические характеристики

Диапазон измеряемых давлений, МПа (допускается двукратная перегрузка)	0,06—2,5
Номинальный выходной сигнал, мВ	50—80
Нелинейность выходного сигнала, %	< 0,2
Напряжение питания, В	5 ± 0,25
Начальный разбаланс моста, мВ/В	< 3
Диапазон рабочих температур, °С	от -50 до +85
Температурный "уход" чувствительности, %/10°С	< 0,3
Температурная погрешность "нуля", %/10°С	< 0,2

АДГЕЗИМЕТР ЭЛЕКТРОННЫЙ АМЦ 2-20 И АМЦ 2-50

Адгезиметры электронные АМЦ 2-20 и АМЦ 2-50 предназначены для измерения и контроля адгезионной прочности покрытия на различных конструкциях. Адгезиметр определяет минимальное, максимальное и среднеинтегральное значения усилия отслаивания (отрыва) за определенный интервал времени.

Конструктивное исполнение, характеристики датчика и элементная база позволяют эксплуатировать адгезиметр при отрицательных температурах (до -20 °С), в условиях повышенной влажности и запыленности.



Технические характеристики

Параметр	АМЦ 2-20	АМЦ 2-50
Диапазон взвешивания, кг	0,05—20,0	0,05—50,0
Диапазон измерения среднеинтегральной величины адгезии, кг	0,01—20,0	0,01—50,0
Цена деления, кг	0,01	
Среднеквадратичная погрешность в рабочем диапазоне температур, где N (кг) — показание адгезиметра: текущее, минимальное, максимальное или среднеинтегральное значение	0,01 × N + 0,01	
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+45	
Напряжение питания, В	7,0...9,0	
Ток потребления, мА	< 7	
Потребляемая мощность, мВт	< 40	
Габаритные размеры, мм	170 × 70 × 40	
Тип индикатора	Жидкокристаллический	
Масса, г	300	
Тип датчика	Интегральный тензометрический преобразователь силы	
Средний срок службы, лет	3	

БЕЗМЕН ЭЛЕКТРОННЫЙ БЦ-10К, БЦ-20К, БЦ-50К

Переносные электронные весы (безмен) с малыми габаритными размерами и автономным питанием изготовлены на основе оригинальных датчиков силы. Дизайн весов соответствует мировым аналогам. Весы обладают высокой чувствительностью в широком диапазоне измерений.

Конструктивное исполнение, характеристики датчика и элементная база позволяют эксплуатировать весы в условиях повышенной влажности и запыленности. Весы имеют индикацию перегрузки и разряда батареи.

Безмен выпускается в трех модификациях, различающихся пределами взвешивания.

По индивидуальному заказу можно изготовить весы с диапазоном нагрузок 50 г, 10 г, 500 г, 100 кг, 500 кг.



Технические характеристики

Параметр	БЦ-10К	БЦ-20К	БЦ-50К
Диапазон взвешивания, кг	0,01—10,0	0,02—20,0	0,05—50,0
Допустимая перегрузка, кг	25	30	75
Точность, г	10	20	50
Диапазон рабочих температур, °С	0...40		
Ток потребления, мА	< 4		
Габаритные размеры, мм	190 × 70 × 40		
Тип индикатора	Жидкокристаллический		
Масса, г	300		
Тип датчика	Интегральный тензометрический преобразователь силы		
Средний срок службы, лет	3		

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕСЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, МЕДИЦИНЫ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Весы лабораторные электронные типа ЭВИЦ предназначены для статического взвешивания грузов на предприятиях различных отраслей промышленности, сельского хозяйства, в научно-исследовательских организациях.

Принцип действия весов основан на преобразовании силы тяжести взвешиваемого груза в аналоговый электрический сигнал, с последующей цифровой обработкой на однокристалльной ЭВМ с выдачей результата на цифровое табло и на выходной разъем интерфейса. Для температурной компенсации предусмотрена транзисторная схема. На осно-



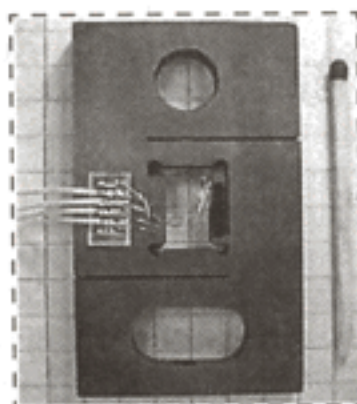
вании имеются регулировочные ножки для установки весов по уровню. Весы имеют автоматическую и полуавтоматическую установку на ноль и последовательный интерфейс RS-232C, обеспечивающий передачу данных об измеряемой массе во внешнее устройство. Весы выпускаются в трех модификациях: ЭВИЦ-240, ЭВИЦ-560, ЭВИЦ-1200, различающиеся пределами взвешивания.

Технические характеристики

Параметр	ЭВИЦ-240	ЭВИЦ-560	ЭВИЦ-1200
Пределы взвешивания, г	0,40—240	1,00—560	2,00—1200
Цена поверочного деления (e), г	0,010	0,025	0,050
Пределы допускаемой погрешности (±), мг	38,0	75,0	150,0
Диапазон выборки массы тары, г	39,98	99,95	199,90
Число разрядов индикации	6	6	6
Класс точности по ГОСТ 24104—88		4	
Время измерения, с, не более		1,5	
Время непрерывной работы от полностью заряженной аккумуляторной батареи, ч, не менее		8	
Время готовности весов к работе после включения, мин, не более		10	
Диапазон рабочих температур, °С		20 ± 5	
Напряжение питания встроенной аккумуляторной батареи, В		6,0—6,9	
Потребляемая мощность, В·А, не более		2,5	
Масса, кг, не более		1,7	
Размеры платформы, мм		∅140	
Габаритные размеры, мм, не более		225 × 165 × 90	

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИЛЫ

Преобразователи силы предназначены для измерения силы в электронных весах и датчиках силы и обладают высоким выходным сигналом. Преобразователи силы выполнены на основе интегральных балочных тензопреобразователей ТКБ-6, которые вмонтированы в силопередающие стальной или алюминиевый параллелограммы.



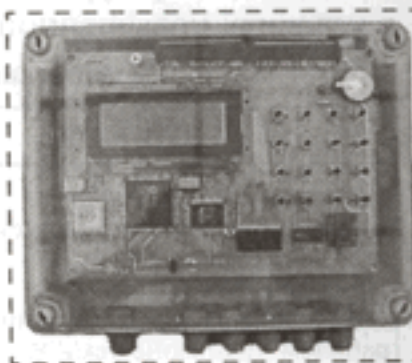
Технические характеристики

Параметр	ПС 1-240	ПС 1-1200	ПС 2-100	ПС 10К	ПС 20К	ПС 50К
Номинальная нагрузка P _{ном} , кг	0,3	1,4	100	10	20	50

Выходной сигнал, мВ	40—50	40—50	70—100	70—100	70—100	70—100
Нелинейность + гистерезис (суммарно), %FS	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05	0,1
Напряжение питания, В	5,4	5,4	5,0	5,0	5,0	5,0
Дополнительная температурная погрешность чувствительности, %/10 К			0,05			
Дополнительная температурная погрешность нуля, %/10 К			0,05—1,0			
Максимальная перегрузка P _{max} % от P _{ном}			300			
Входное сопротивление, кОм			14			
Выходное сопротивление, кОм			10			
Рабочий диапазон температур, °С			-50—+60			
Тип датчика	Single-point		S-образный			
Разрешение, ед.	30000		1000			
Габаритные размеры, мм	79 × 29 × 20	79 × 29 × 20	Заказ	50 × 30 × 5	50 × 30 × 5	50 × 30 × 6
Материал	Алюминий		Сталь коррозионно-стойкая			
Число максимальных циклов нагружения			>10 ⁷			

РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Комплекс автоматического управления системами отопления и горячего водоснабжения предназначен для автоматизации технологических процессов водо- и теплоснабжения и создания автоматизированных систем диспетчерского управления.



Использование комплекса позволит существенно повысить надежность снабжения водой и теплом за счет снижения аварийности и сокращения сроков устранения аварийных ситуаций, а также продлить сроки службы оборудования за счет оптимального его использования и своевременного проведения регламентных работ, что приведет к снижению числа аварий и расходов по их ликвидации, точного соблюдения технологических параметров и режимов экономии тепла, сокращение обслуживающего персонала.

Краткие возможности:

- управление насосами холодного, горячего водоснабжения и отопления;
- управление системой подпитки отопления и системой дренажа;
- регулирование температуры воды по графику;
- контроль состояния оборудования и параметров технологических процессов;
- передача оперативной и статистической информации на диспетчерский пункт различными видами связи.

Технические характеристики

Диапазон измерения температуры, °С -40—+400
 Диапазон измерения разности температур, °С -2—+300
 Предел допускаемой абсолютной погрешности измеряемой температуры, °С 1
 Типы термопреобразователей . . . Pt100, Pt500, Pt1000, кТпТР-01 с номинальными значениями относительного сопротивления
 W100 = 1,385 и W100 = 1,391
 Предел допускаемой относительной погрешности измерения разности температур, °С ±0,5
 Предел допускаемой приведенной погрешности измерения тока (по входным каналам 4...20 мА), % . . ±0,5
 Предел допускаемой относительной погрешности измерения нарабатанного времени, % ±0,1
 Температура эксплуатации, °С . . . +5—+50
 Давление, кПа 66—106,7
 Относительная влажность, %, при 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги. . . . 80
 Частота, Гц 50 ± 1
 Габаритные размеры, мм, не более 190 × 245 × 100
 Масса (без термопреобразователей), кг, не более 4
 Потребляемая мощность, Вт, не более 20

ТЕПЛОСЧЕТЧИК Z-2000

Теплосчетчик Z-2000 предназначен для измерения и коммерческого учета тепло- и водопотребления в закрытых и открытых системах тепло- и водоснабжения на предприятиях жилищно-коммунального хозяйства, энергетики и промышленности.

Теплосчетчик обеспечивает:

- автоматическое измерение объемного расхода, температуры и давления теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, а также объемного расхода подпитки (для систем, подключенных по независимой схеме);
- отсчет календарной даты и астрономического времени;

- вычисление массового расхода теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, массового расхода подпитки, потребляемой тепловой энергии, времени наработки теплосчетчика;
- диагностику состояния оборудования пункта учета и сети теплоснабжения;
- накопление и хранение в энергонезависимой памяти интегральных значений физических параметров;
- индикацию измеряемых, вычисляемых и статусных параметров на встроенном цифробуквенном ЖКИ-индикаторе;
- распечатку на принтере или передачу в ПЭВМ текущей, почасовой и посуточной информации о параметрах тепло- и водопотребления.

Информация об измеряемых и вычисляемых параметрах отображается в физических единицах на встроенном ЖКИ-индикаторе с подсветкой.

Информация о параметрах тепло- и водопотребления, выводимая на печать, представляется в виде суточных сводок и периодических отчетов. Для контроля возможен вывод на печать текущих показаний параметров.

В состав теплосчетчика входят:

- вычислитель универсальный ВУ-2000, выпускается по ТУ ГАВЛ.51.0000.ТУ;
- комплект термосопротивлений типа Pt-500 (100, 1000), подобранных в пару (тройку);
- от одного до пяти расходомеров, указанных в таблице.

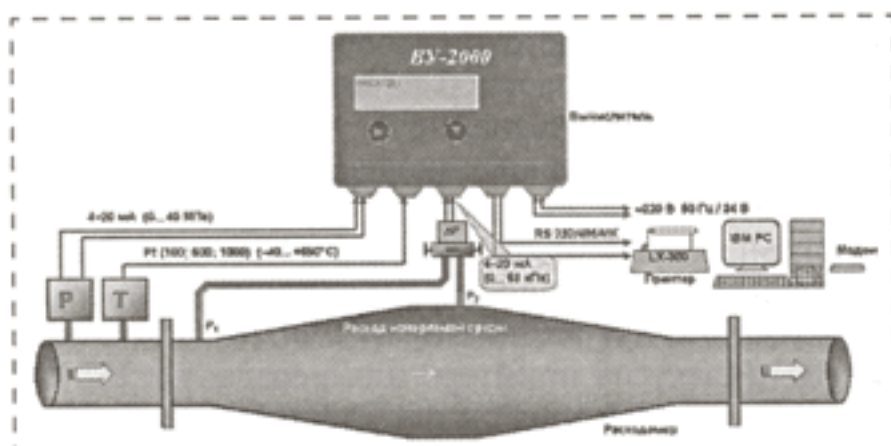
Расходомер	Номер в Госреестре	Расходомер	Номер в Госреестре
ВСТ	13733—96	ИПРЭ-1, ИПРЭ-1М	13867—94
Гидро-Флоу	16849—97	MAGFLO	13935—98
ETWI (ETH1)	13667—96	SONOFLO	14506—98
MTWI (MTH1)	13668—96	VORFLO	13932—98
WPWI (WPHWI)	13669—96	MASSFLO	13934—98
WSWI	13670—96	EEM-VS/VM	15892—96
WPD	15820—96	EEM-QII/QW	new
ВМГ	16185—96	SONOKIT	new
ВЭПС-Т(И)	16766—99	РОСТ 12-13,8	11833—89, 14150—97

РЕГИСТРАТОР-РАСХОДОМЕР ДИФФУЗОРНО-КОНФУЗОРНОГО ТИПА

Регистратор — расходомер диффузорно-конфузорного типа (ДКР-1) (далее — регистратор) предназначен для измерения расхода газа, а также жидкости и пара без индивидуальной градуировки благодаря использованию первичного преобразователя переменного перепада давления оригинальной конструкции, а также для отображения, накопления, обработки и передачи обратной информации и управления внешними устройствами благодаря вторичному преобразователю на базе вычислителя универсального ВУ-2000 (ВУ).

Регистратор применяется в химических и нефтехимических процессах, в линиях добычи и

транспортировки газа и нефти, водоснабжения населенных мест, энергетике, пищевой промышленности и т. д.



Регистратор обеспечивает:

- автоматическое измерение объемного расхода измеряемой среды в трубопроводе в обоих направлениях, а также температуры и давления;
- отсчет календарной даты и астрономического времени;
- вычисление массового расхода измеряемой среды в трубопроводе, времени наработки регистратора;
- диагностику состояния оборудования пункта учета параметров измеряемой среды;
- накопление и хранение в энергонезависимой памяти интегральных значений физических параметров;
- диапазон измерений регистратора:
 - перепад давлений измеряемой среды от 9 до 63 кПа;
 - избыточное (абсолютное) давление измеряемой среды от 0 до 40 мПа;
 - температура измеряемой среды от -40 до $+650$ °С.
- К преимуществам регистратора можно отнести:
 - низкую погрешность измерений (1 % и ниже);
 - существенное (до 30 %) снижение удельных затрат энергии на 1 м^3 перекачиваемой жидкости или газа из-за аномально низких коэффициентов сопротивления;
 - снижение эксплуатационных и ремонтных расходов за счет высокой надежности и увеличения срока службы расходомерных устройств (в 2—3 раза) в сложных условиях эксплуатации (абразивный износ в жидкостях или газах с механическими загрязнениями);
 - определение погрешностей измерения расчетным способом, что исключает необходимость проведения тарировочных стендовых испытаний.

Питание регистратора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В $\pm 10/-15$ %, частотой 50 Гц или регистратор имеет автономное питание напряжением 6 В (12 В, 24 В) постоянного тока.

КОРРЕКТОР ПЛОТНОСТИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Корректор плотности нефтепродуктов (далее корректор) предназначен для вычисления плотности нефтепродуктов, находящихся в металлических

цилиндрах при конкретной температуре (от -50 до $+60$ °С), приведенной к плотности при $t = 20$ °С.

При определении плотности в металлических цилиндрах уровень горючего в них должен быть не ниже 10 мм от верхней кромки цилиндра.

Технические характеристики:

- Электропитание корректора осуществляется от элемента питания напряжением 9 В.
- Используется современная серийно выпускаемая элементная база.
- Информация отображается на шестизначном жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ).
- Ввод данных осуществляется с шестнадцатикнопочной клавиатуры.
- Отключение питания корректора осуществляется автоматически через 150 с после последнего нажатия любой кнопки.

Габаритные размеры корректора $72 \times 115 \times 27$ мм. Масса корректора (без элемента питания) 0,1 кг. Диапазон температуры окружающего воздуха при эксплуатации корректора от -40 до $+50$ °С и относительной влажности до 80 %.

Срок службы корректора — 7 лет (при условии своевременной замены элемента питания).

Принцип работы корректора

Корректор включается нажатием на клавишу "ввод/вкл". При этом на индикаторе появится буква F, обозначающая готовность корректора к вводу параметров. Ввод параметров "?" или "t" начинается нажатием на соответствующую клавишу и заканчивается нажатием на клавишу "ввод/вкл".

Если были введены оба параметра "?" и "t", то после ввода последнего параметра на экране ЖКИ отобразится приведенное значение плотности.

При вводе параметра "?" можно использовать любые цифры и точку. Нажатие на клавишу "отмена/выкл" "стирает" последний введенный символ или отменяет ввод параметра. Диапазон разрешенных значений от 0,69 до $1,00 \text{ г/см}^3$.

Ввод параметра "t" аналогичен вводу параметра "?", кроме того, что параметр "t" может принимать отрицательные значения. Диапазон разрешенных значений от -50 до $+60$ °С.

Если введенный параметр выходит за пределы разрешенного диапазона, то после нажатия на клавишу "ввод/вкл" на экране дисплея появится сообщение ERROR и через 3 с корректор перейдет в режим повторного ввода параметра.

Отключение корректора осуществляется автоматически через 150 с на любом этапе ввода информации после последнего нажатия клавиши.

При двойном нажатии клавиши "отмена/выкл" (при наличии на экране дисплея буквы F) корректор выключится принудительно.



ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3+538.945

В. М. Мухортов, д-р физ.-мат. наук,
Институт общей физики РАН,
В. А. Следков, канд. физ.-мат. наук,
Ростовский-на-Дону Госуниверситет,
Вас. М. Мухортов, канд. физ.-мат. наук,
ФГУП "Ростовский-на-Дону
научно-исследовательский институт радиосвязи"

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ АППАРАТУРЕ СВЯЗИ

(Перспективы применения
и состояние исследований)

Часть II

Приведен краткий обзор последних публикаций, показывающих, что в ближайшем будущем найдут широкое применение высокотемпературные сверхпроводники при построении больших блоков аппаратуры связи. Это подтверждается приведенными конструкциями планарных микроволновых устройств на высокотемпературных сверхпроводниках.

Функциональные блоки из ВТСП-модулей

Достижения в проектировании отдельных элементов систем связи на основе ВТСП и криогенных холодильников позволили разработчикам аппаратуры перейти к созданию функциональных блоков, содержащих в едином охлажденном корпусе несколько соединенных между собой модулей ВТСП и полупроводниковых элементов. Создание таких блоков [1, 2] позволяет получить существенный энергетический выигрыш и уменьшить габаритные размеры благодаря использованию одного холодильника.

В предыдущей части (см. "Микросистемная техника" № 8, 2002 г.) отражены успехи технологии ВТСП в разработке различных элементов для СВЧ аппаратуры. Рассмотренные ВТСП-элементы являются частями приемников или передатчиков. Преимущества таких элементов перед аналогичными элементами, выполненными по обычной технологии, особенно ярко проявились при создании блоков приемопередатчиков, состоящих из множества ВТСП-элементов [3]. Существенное улучшение качества СВЧ аппаратуры при увеличении в ней числа ВТСП-элементов стимулировало интерес разработчиков к дальнейшему расширению области применения технологии ВТСП.

СВЧ приемник

В работе [3] описан СВЧ приемник, состоящий из трех отдельных модулей: селективный малошумящий усилитель (МШУ), гетеродин и преобразователь частоты. Эти модули приемника соединены между собой коаксиальными кабелями и расположены на охлаждаемой до $T = 77$ К медной пластине диаметром 152 мм. Селективный МШУ состоит из трехполосного фильтра с полосой 630 МГц на центральной частоте 5,94 ГГц и четырехкаскадного МШУ. Фильтр изготовлен из ТВССО-пленки на LaAlO_3 -подложке размером $5 \times 9,8 \times 0,25$ мм и вносит потери 0,3 дБ. МШУ также изготовлен на LaAlO_3 -подложке толщиной 0,25 мм и имеет коэффициент усиления $K_y = 36$ дБ и $K_{ш} = 0,7$ дБ. Гетеродин содержит два усилителя и имеет петлю обратной связи, подключенную к входу и выходу усилителей с помощью направленных ответвителей. В петлю обратной связи включен резонатор в виде сапфирового цилиндра, к торцам которого прижаты LaAlO_3 -подложки толщиной 0,25 мм, покрытые ТВССО-пленкой. Такой резонатор имеет $Q = 98100$. Частота гетеродина 10,382 ГГц, уровень мощности 12 дБм, уровень второй гармоники — 32 дБ. При отстройке на 10 кГц измеренный фазовый шум равен -87 дБ/Гц, что соответствует собственному уровню шума спектроанализатора, на котором проведены измерения. Судя по измеренной добротности резонатора фазовый шум этого гетеродина приблизительно на 20 дБ ниже, чем у аналогичного гетеродина с обычным резонатором.

В смесителе разработанного приемника использована плата обычного коммерчески доступного смесителя и НЧ микрополосковый фильтр, подавляющий интермодуляционные колебания и частоту гетеродина. Потери преобразования охлажденного до $T = 77$ К смесителя изменялись от 8 до 10 дБ в полосе 500 МГц относительно центральной частоты приема 6 ГГц и нижней частоты 4,3 ГГц. Весь приемник имеет полосу 500 МГц относительно центральной частоты приема (5,9 ГГц) и центральной частоты преобразования (4,483 ГГц) и при $T = 77$ К обеспечивает $T_{ш} = 0,7$ дБ и $K_y = 27,5 \pm 3,5$ дБ. Превосходные параметры этого СВЧ приемника свидетельствуют о быстром продвижении ВТСП-технологий от разработки единичных СВЧ элементов к созданию целых систем.

ВТСП успешно применяются и в специальных широкополосных сжимающих приемниках, предназначенных для определения частоты и амплитуды входного сигнала [5]. Такие приемники выполняют спектральный анализ в реальном масштабе времени и обеспечивают прием со 100 %-ным пе-

рекрытием во времени, поэтому они широко используются в военных системах радиоэлектронного противодействия. Это применение требует работы в очень широкой полосе частот. На частотах выше 2 ГГц только ВТСП-технологии могут поддерживать широкую полосу частот гигагерцового диапазона в точных *chip*-фильтрах. Преимущества ВТСП-сжимающего приемника по размеру, массе и мощности по сравнению с полностью числовым приемником и приемником с канальными фильтрами очевидны. Кроме того, сжимающий приемник имеет и более высокую чувствительность. Ключом к достижению этих преимуществ является добавление к ВТСП-аналоговому преобразователю высокоскоростного GaAs-аналогово-цифрового преобразователя, оцифровывающего выходной сигнал, и специальных интегральных цепей для преобразования полученных данных в цифровой блок. Основой *chip*-фильтра является линия задержки с дисперсией, обеспечивающая задержку 40 нс. Линия выполнена на связанных микрополосковых YBCO-линиях, сформированных на LaAlO₃-подложке диаметром 50 мм.

Ретрансляторы в СВЧ диапазоне

Другим примером, доказывающим преимущества ВТСП-технологии при создании сложного СВЧ блока, является ретранслятор диапазона 3,4—4,2 ГГц, предназначенный для установки на спутнике [6]. На входе ретранслятора включен полосовой фильтр, который выделяет рабочий диапазон 3,4—4,2 ГГц. Потери экспериментального образца такого восьмиполосного ВТСП-фильтра приблизительно 0,05 дБ, а потери на отражение всего 23 дБ, благодаря чему он эффективно подавляет внеполосные шумы и практически не увеличивает шумы в рабочей полосе частот. После этого фильтра стоят МШУ, смеситель и входной мультиплексор. Все эти элементы расположены на охлаждаемом основании вместе с выходным мультиплексором. Неохлаждаемыми элементами в ретрансляторе являются переключающие матрицы и усилители мощности. Входные канальные восьмиполосные фильтры мультиплексора рассчитаны на полосы 36 МГц и имеют квазиэллиптические характеристики для улучшения изоляции между каналами. Прямые потери этих фильтров составляют приблизительно 1 дБ, а обратные — около 16 дБ. Цепь фазового корректора вносит дополнительные потери 1,1 дБ. Выходные канальные четырехполосные фильтры выполнены на микрополосковых резонаторах с TM₀₁₀-волной, обеспечивающих $Q = 60\,000$, и вносят потери менее 0,1 дБ при $T = 77\text{ К}$ и входной мощности 50 Вт.

Таким образом, при достигнутой к 1998 г. добротности резонатора, превышающей 10 000, входные ВТСП-фильтры имели такие же электрические параметры, как и их волноводные аналоги, но обеспечивали существенную экономию в габаритных размерах и массе. Схема приемной части при

этом оставалась без изменений. Дальнейшее улучшение качества ВТСП-пленок обеспечило к 2000 г. увеличение добротности микрополосковых резонаторов до уровня $(2\div 5)10^5$, что позволяет говорить о ближайшем внедрении ВТСП-технологий в современные системы связи, которое повлечет достаточно серьезные изменения в архитектуре систем. Использование ВТСП в выходных фильтрах позволяет уменьшить потери и, следовательно, снизить мощность усилителей. Это обеспечивает уменьшение их массы и габаритных размеров, а также экономию потребляемой ими энергии.

Устройства дециметрового диапазона

В устройствах дециметрового диапазона, где волноводы имеют очень большие габаритные размеры, преимущества ВТСП-технологии бесспорно. Например, уже в середине 1998 г. для диапазона 1710—1880 МГц разработаны миниатюрные микрополосковые резонаторы, имеющие $Q = 50\,000$ при $T = 60\text{ К}$, и ряд пассивных СВЧ элементов (пропускающие и запирающие полосковые фильтры, ответвители и диплексоры) [7]. Восьмиполосный квазиэллиптический фильтр, изготовленный из YBCO-пленки на MgO-подложке толщиной 0,3 мм и размером 39 × 22,5 мм, имеет потери менее 1 дБ. Полосовой трехполосный запирающий фильтр, изготовленный из YBCO-пленки на LaAlO₃-подложке толщиной 0,5 мм и размером 38 × 13 мм, в полосе 1770—1785 МГц вносит потери выше 25 дБ, а вне ее — менее 0,3 дБ. На такой же подложке изготовлен октавный гибридный ответвитель в виде тандема (потери 3 дБ). На одной подложке изготовлен ВТСП-диплексор для подключения приемника (1770—1785 МГц) и передатчика (1800—1880 МГц) к одной антенне. Диплексор содержит пару полосовых запирающих фильтров, включенных между двумя гибридными ответвителями. Потери на отражение на всех входах диплексора менее 25 дБ, прямые потери при передаче сигнала от антенны к приемнику и от антенны к передатчику менее 0,3 дБ, а развязка между приемником и передатчиком выше 35 дБ. Такие диплексоры использованы в шестиканальном приемопередатчике [3], разработанном для третьего поколения мобильных систем связи. Этот приемопередатчик объединен с одним криохолодильником и вместе с системой охранной сигнализации и защитой от молнии предназначен для установки на вершине мачты внутри влагозащитного корпуса. Три канала имеют восьмиполосные фильтры и МШУ. Три другие канала содержат девятиполосные фильтры. Дополнительные модули содержат мощные диплексоры, передающие фильтры, гетеродины и смесители. Охлаждение обеспечило и улучшение параметров МШУ, его $K_{ш}$ уменьшился с 0,8 дБ при нормальной температуре до 0,2 дБ при $T = 77\text{ К}$, а K_y увеличился на 1 дБ. Размещение такого сложного блока на вершине мачты стало возможным благодаря тому, что применение ВТСП-

технологии позволило уменьшить размеры блока до $650 \times 550 \times 300$ мм, а его массу — до 37 кг. Благодаря размещению всего приемопередатчика на вершине мачты отпала необходимость в длинном радиочастотном кабеле, который ранее был необходим для соединения расположенного на земле передатчика с антенной. Отсутствие потерь в кабеле позволило уменьшить мощность источника питания. Разработанный приемопередатчик демонстрирует явные преимущества СВЧ блока на основе ВТСП по сравнению с обычным.

Суммирующие устройства и антенны

Настоящий раздел посвящен описанию антенно-фидерных элементов, созданных с использованием технологии ВТСП. В этом направлении сделан шаг к созданию ВТСП диаграммо-образующих устройств (ДОУ). Эти схемы расположены между антенной и входом приемника или выходом передатчика и формируют требуемую форму луча антенны и обычно содержат множество элементов, потери в которых ухудшают параметры аппаратуры. Поэтому ликвидация потерь в ДОУ сулит существенные выгоды.

Одним из основных элементов ДОУ является квадратурный направленный ответвитель (НО), имеющий потери 3дБ. Данные НО используются и в схемах ВТСП-диплексоров. Авторами в работе [1] приводится описание двухшлейфного НО, а в [7] — НО типа Ланге. Первый из приведенных НО является узкополосным устройством и не может быть использован для создания широкополосных ДОУ, а НО типа Ланге содержит навесные перемычки, изготовление которых на микрополосковых линиях требует дополнительных технологических операций. Поэтому актуальна разработка широкополосных НО, наиболее подходящих к изготовлению по технологии ВТСП. В [8] предложена новая схема четырехшлейфного НО, которая в 25 %-ной полосе частот обеспечивает деление с теоретическим разбалансом амплитуд менее 0,05 дБ, а фаз — менее 0,5°. Изменением ширины шлейфов можно получить НО с переходным ослаблением 0 дБ. Такой НО при обеспечении изоляции четвертого плеча может выполнять функцию устройства пересечения микрополосковых линий, которое часто встречается в конструкциях ДОУ. В [8] приведены теоретические и экспериментальные частотные характеристики нольдецибельного и трехдецибельного НО в полосе от 8 до 12 ГГц при $T = 60$ К. Данные НО изготовлены на $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -пленках на подложке из монокристаллического MgO . При $T = 78$ К нольдецибельный НО выдержал мощность 30 дБм, а его потери составляют менее 0,1 дБ в полосе 30 %. Трехдецибельный НО перекрыл полосу 45 %. В этой же работе приводится топология четырехлучевой матрицы Батлера, состоящей из трехдецибельного и нольдецибельного НО и размещенной на одной подложке диаметром 76 мм.

Таким образом, громоздкую и тяжелую волноводную конструкцию матрицы Батлера можно заменить одной миниатюрной микрополосковой платой и снизить при этом вносимые устройством потери.

В современных системах космической связи PCS-диапазона (1,6 ГГц) используют ДОУ для создания множества лучей, освещающих поверхность Земли со спутника. Ранее ДОУ этого диапазона проектировались на многослойных полосковых или коаксиальных линиях и характеризовались большими потерями. В [9] описана структура ДОУ, формирующая 16 лучей 64-элементной антенной решетки (в составе этой ДОУ имеется 16 восьмилучевых матриц Батлера). Приводятся результаты расчетов и измерений экспериментального образца восьмилучевой матрицы Батлера, изготовленной из ТВССО-пленки на LaAlO_3 -подложке толщиной 0,5 мм. Матрица в корпусе вместе с разъемами имеет размер 76×51 мм. В полосе 300 МГц двухшлейфные НО обеспечили изоляцию выше 30 дБ и потери на отражение 25 дБ. Пересечение микрополосковых линий выполнено нанесением слоя диэлектрика на первый микрополосковый проводник и напылением на этот слой золотой перемычки, соединяющей разомкнутые концы второго проводника. Такая конструкция пересечения обеспечила изоляцию выше 40 дБ и потери на отражение 30 дБ. Прямые потери всей матрицы имели значение менее 0,2 дБ.

На спутнике необходимо размещать три 16-лучевых ДОУ. Полная масса трех таких ДОУ составляет 12,5 кг вместе с криогенным холодильником. Сравнение показывает, что ВТСП ДОУ обеспечивает наименьшие потери и почти в 10 раз легче коаксиального ДОУ, потери которого на 0,4 дБ выше.

Таким образом, к настоящему времени преимущества ВТСП-технологии при создании СВЧ техники продемонстрированы на многих устройствах вплоть до элементов антенно-фидерного тракта. Использование ВТСП является проблематичным только при конструировании антенн, поскольку в этом случае необходимо преодолеть трудности, связанные с охлаждением объектов, которые должны взаимодействовать с внешним пространством. Размеры антенны не всегда можно уменьшить, поскольку они определяют ее диаграмму направленности и коэффициент усиления K_u . Тем не менее и в этой области ведутся активные исследования. В [10] исследована узкополосная передающая ВТСП-антенна сантиметрового диапазона (центральная частота 6,5 ГГц) с круговой поляризацией, изготовленная на $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -пленках на LaAlO_3 -подложке толщиной 0,5 мм и площадью 10×15 мм. Антенна представляет собой квадратный проводник, к серединам смежных сторон которого подключены выходы квадратурного шлейфного НО. Антенна выдерживала подаваемую на нее мощность до 5 Вт без ухудшения K_u , а при 5,5 Вт наблюдалось резкое снижение значений ее параметров.

Антенна такой же конструкции на подложке размером $20 \times 20 \times 0,5$ мм со средней частотой 4,5 ГГц исследована в работе [11]. Сравнительные испытания антенны на ВТСП-проводниках и антенны с серебряными проводниками показали, что при $T = 77$ К первая из них имеет K_y на 3,1 дБ больше (по расчету на 2,7 дБ).

Похожие результаты получены в [12] при исследовании миниатюрных антенн дециметрового диапазона (500—700 МГц) с линейной поляризацией, изготовленной из YBCO толстой пленки на циркониевой подложке толщиной 0,9 мм. Укороченный резонатор в виде узкой полоски с широкими прямоугольными проводниками на концах возбуждался через емкость. Сравнение двух вариантов ВТСП-антенн и таких же антенн с серебряным проводником показало, что при $T = 77$ К ВТСП-антенны имеют K_y на 4—5,5 дБ больше.

В [13] исследована микрополосковая четырехэлементная решетка (2×2) с линейной поляризацией, изготовленная из ВТСП-пленки на ZrO_2 -подложке размерами $0,9 \times 30 \times 30$ мм. Резонаторы в виде прямоугольников возбуждались микрополосковыми проводниками, подключенными к середине широкой стороны прямоугольников. При $T = 77$ К на резонансной частоте 7,9 ГГц ВТСП-антенна имеет измеренный K_y на 1,2 дБ больше (по расчету на 1,02 дБ), чем ее аналог с серебряными проводниками.

Анализ приведенных выше результатов позволяет сделать вывод: чем меньше размеры антенны по сравнению с длиной излучаемой волны, тем больший выигрыш в коэффициенте усиления обеспечивает применение ВТСП. Поэтому ВТСП-антенны будут использоваться там, где недостаток места не позволяет расположить обычные излучатели, например, в бортовых многочастотных приемных антенных решетках. Они могут найти применение и на кораблях в загоризонтных низкочастотных локаторах. Другая область применения ВТСП — антенные решетки миллиметрового диапазона, которые могут быть изготовлены на одной подложке вместе с суммирующей схемой. Исключение потерь в излучателе и суммирующей схеме позволяет существенно увеличить коэффициент усиления. Например, в [14] приведены результаты измерений 64-элементной решетки, работающей на частоте 30,5 ГГц. Решетка изготовлена из ТСВСО-пленки на $LaAlO_3$ -подложке толщиной 0,25 мм и диаметром 50,8 мм. При $T = 77$ К измеренный K_y этой решетки равен 20,3 дБ, что на 4,7 дБ больше K_y такой же решетки с золотыми проводниками при нормальной температуре.

Современное состояние ВТСП-технологии уже сейчас позволяет делать такие антенные решетки электрически управляемыми, включая в состав суммирующей схемы фазовращатели, которые могут быть изготовлены вместе с решеткой в едином

технологическом цикле. Открывающиеся при этом перспективы рассмотрены в ниже.

Фазированные антенные решетки

Управление лучом фазированной антенной решетки (ФАР) осуществляется изменением фазы сигналов, поданных на излучатели или отраженных от участков облучаемой поверхности. Известно много типов микроволновых фазовращателей (ФВ) с электронным управлением, использующих различные физические эффекты: полупроводниковые, ферритовые, сегнетоэлектрические, электронно-лучевые, пьезоэлектрические, лазерные, жидкокристаллические. В настоящее время наибольшее распространение получили ферритовые и полупроводниковые ФВ, поскольку они обеспечивают малые потери мощности проходящего сигнала, термостабильность и воспроизводимость параметров при серийном производстве. Однако эти ФВ характеризуются большим расходом энергии в управляющих цепях, поскольку управление осуществляется током, протекающим через обмотки магнитов ферритовых ФВ и рpn-диоды или варакторы полупроводниковых ФВ. Большое энергопотребление ФАР с ферритовыми и полупроводниковыми ФВ затрудняет их использование на объектах космического базирования, имеющих ограниченные энергоресурсы. Поэтому для работы в космосе необходимо разработать ФАР на основе таких физических эффектов, которые позволяют обеспечить минимальное энергопотребление.

С точки зрения минимального энергопотребления наиболее перспективны сегнетоэлектрические ФВ, которые управляются не током, а электрическим полем. Фазовый сдвиг таких ФВ зависит от напряжения, поданного на сегнетоэлектрические конденсаторы. Если в течение какого-то времени направление луча ФАР не изменяется, то напряжение остается постоянным и токи по управляющим цепям не протекают. В управляющих цепях таких ФВ энергия расходуется на перезарядку сегнетоэлектрических конденсаторов только при изменении положения луча, поэтому энергопотребление их управляющих цепей минимально. Однако сильная зависимость параметров сегнетоэлектрических ФВ от температуры и разброс параметров при серийном производстве препятствовали использованию этих ФВ в ФАР. Сейчас благодаря совершенствованию технологии изготовления тонких сегнетоэлектрических пленок появились предпосылки для успешного преодоления этих недостатков и созданию ФАР с малым энергопотреблением.

Историю развития сегнетоэлектрических управляемых СВЧ устройств можно разделить на два этапа. Началом первого этапа можно считать переход к исследованию сегнетоэлектрических пленок, поскольку пленочные технологии многократно расширяют возможности конструирования управляемых СВЧ устройств на сегнетоэлектрических

материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Первые исследования сегнетоэлектрических пленок были проведены в начале 70-х годов на низких частотах. К середине 70-х исследования свойств сегнетоэлектрических пленок были проведены в СВЧ диапазоне, а к концу 70-х были созданы пленочные ФВ с приемлемыми для практических приложений параметрами. В 80-х годах продолжалось совершенствование технологии создания пленочных сегнетоэлектриков и конструкций ФВ. Однако в связи с вышеуказанными недостатками сегнетоэлектрические ФВ не смогли успешно конкурировать с ферритовыми и полупроводниковыми ФВ, и поэтому работы по этой тематике в СССР были практически свернуты в конце 80-х годов. Следует отметить, что подавляющее число результатов по сегнетоэлектрическим пленкам и ФВ, опубликованных в 70-х и 80-х годах, было получено в СССР, поэтому в конце первого этапа исследования сегнетоэлектрических управляемых СВЧ устройств приоритет принадлежал советским ученым.

На Западе интерес к сегнетоэлектрическим ФВ проявился в начале 90-х годов, которые можно считать началом второго этапа. Анализируя полученные в СССР результаты, зарубежные специалисты пришли к выводу о необходимости продолжения исследований в этом направлении в целях создания ФАР с малой мощностью управления. Приведенные ниже ссылки свидетельствуют о том, что за рубежом активно ведутся исследования в этом направлении и патентуются разработанные конструкции.

В [15] приводятся результаты исследования мощных сегнетоэлектрических ФВ с малой мощностью управления для ФАР диапазона 0,4—18 ГГц. Найдены добавки в сегнетоэлектрический материал, позволяющие снизить тангенс потерь до 0,005 при управлении диэлектрической проницаемостью до 50 %. Исследованы полосковые и волноводные ФВ.

В [16] запатентованы варианты сегнетоэлектрического ФВ на микрополосковой и щелевой линиях.

В [17] представлены конструкция и характеристики сканирующей антенны с электронным сканированием, работающей в диапазоне 12—18 ГГц. Новые возможности конструкции обусловлены использованием сегнетоэлектрических материалов, диэлектрическая проницаемость которых изменяется приложенным электрическим полем.

В [18] запатентована ФАР, сканирование которой осуществляется сегнетоэлектрическими ФВ, расположенными в прямоугольных участках волноводных излучателей. Описанные ФВ работают в диапазоне 8,2—18,6 ГГц, а в принципе такие конструкции могут работать до 100 ГГц.

Электронное управление с помощью сегнетоэлектрика признано оптимальным не только для ФВ, но и для перестраиваемых сверхширокополосных фильтров, используемых для задач распозна-

вания радиолокационной цели [19], а также в широкополосных сканирующих приемниках, используемых для радиоконтроля.

Особенно перспективной для создания высококачественных СВЧ ФВ и перестраиваемых фильтров является структура ВТСП—сегнетоэлектрик, позволяющая во много раз снизить потери СВЧ сигналов. К настоящему моменту опубликовано несколько работ, посвященных их исследованию. Например, в [20] приведены результаты измерений, подтверждающие возможность использования структуры ВТСП—сегнетоэлектрик в СВЧ приборах, работающих до 40 ГГц. На частоте 20 ГГц получен тангенс потерь менее 0,005. В качестве ФВ можно использовать и все управляемые ВТСП-линии передачи, на основе которых построены перестраиваемые резонаторы и фильтры, рассмотренные в части I (см. "Микросистемная техника", № 8, 2002 г.).

Сканирующая ВТСП-антенная решетка в США создана еще в 1992 г. В работе [21] описана конструкция четырехэлементной ВТСП ФАР, работающей в диапазоне 11,5—12,5 ГГц. Излучатели ФАР в виде квадратных резонаторов расположены в неохлаждаемом пространстве на поверхности кварцевой пластины, выполняющей роль радиопрозрачного окна вакуумной камеры. Напротив излучателей в вакууме расположена LaAlO_3 -подложка, на которой из YBCO-пленки сформирована суммирующая цепь и возбудители резонаторов. При $T = 77$ К измеренный K_y этой решетки равен 14 дБ, потери на отражение менее 10 дБ, ширина луча по уровню 3 дБ равна 33° , боковые лепестки ослаблены на 21 дБ. Такие результаты получены с помощью полноволнового анализа всей этой сложной структуры, учета поверхностной волны и учета взаимных связей между элементами. Включение в суммирующую цепь ФВ обеспечило отклонение луча на 45° . При этом усиление упало до 12 дБ, а ослабление боковых лепестков уменьшилось до 10 дБ. Конструкция ФВ в работе не описана, но в заключении сказано, что следующая цель авторов — разработка ВТСП ФАР с электронным управлением для работы на частоте 20 ГГц. Успехи ВТСП-технологии, достигнутые за восемь лет, прошедших с момента создания этой ФАР, позволяют предположить, что сейчас в США созданы ВТСП ФАР, работающие и на более высоких частотах.

Таким образом, на втором этапе разработки сегнетоэлектрических управляемых СВЧ устройств, когда стало реальным создание ВТСП ФАР космического базирования с малым энергопотреблением в управляющих цепях, приоритет и в научных исследованиях, и в практических разработках нами утрачен.

Криогенные холодильники

Криогенные холодильники (КХ) являются частью современной СВЧ аппаратуры, в состав ко-

торой входят ВТСП-элементы. Их надежность, долговечность, экономичность и другие параметры являются определяющими факторами при решении об установке новой аппаратуры на спутнике, на базовой станции сотовой связи или о принятии на вооружение. Поэтому параллельно с развитием пленочных ВТСП-технологий и разработкой СВЧ элементов большие усилия прилагались для совершенствования КХ.

К 1999 г. для устанавливаемого на мачте приемопередатчика базовой станции сотовой связи создан КХ [3], который при рабочей $T = 60$ К обеспечивает мощность отбора теплоты 5 Вт при изменении температуры окружающей среды от -40 до $+65$ °С. Этот КХ имеет воздушное охлаждение компрессора, потребляет мощность 250 Вт и охлаждает установленные в вакуумной камере СВЧ блоки до рабочей $T = 60$ К менее чем за два часа. Изготовители гарантируют продолжительность работы более 40 000 ч. Такую высокую надежность еще предстоит доказать, однако КХ такого типа уже более 25 000 ч эксплуатируется в рабочем режиме без сбоев. Таким образом, к настоящему моменту за рубежом производятся КХ, обеспечивающие работу ВТСП при температуре, значительно ниже температуры фазового перехода. Это позволило улучшить добротность ВТСП-резонаторов и, следовательно, параметры фильтров. ТВССО-пленки могут работать и при $T = 80$ К. При такой температуре экономичность КХ гораздо выше: мощность отбора теплоты 5 Вт обеспечивается при потребляемой мощности 80 Вт [22].

Американская фирма *Superconductor Technologies, Inc.* создала КХ с аналогичными параметрами еще в 1997 г. и изготавливает его для охлаждения выпускаемых ею фильтров [23]. При рабочей $T = 77$ К КХ обеспечивает мощность отбора теплоты 4 Вт при изменении температуры окружающей среды до $+70$ °С. Этот КХ имеет массу менее 5 кг, потребляет мощность 150 Вт и охлаждает вакуумную камеру до рабочей $T = 77$ К за 30 мин. Фирма гарантирует продолжительность работы 40 000 ч. В [23] приведен рисунок с поперечным сечением КХ и перечислены особенности его конструкции. Показан и вид камеры с охлажденными СВЧ модулями. Финансирование работ по созданию КХ осуществлялось *Naval Research Laboratory*.

Имеющийся в продаже КХ марки КС 100 (crotiger) производства фирмы *Joule-Thomson* имеет компрессор [24] с воздушным охлаждением и позволяет охлаждать удаленные от компрессора объекты до предельной $T = 70$ К за 40 мин, если тепловая нагрузка отсутствует. Длина газопровода между компрессором и холодильником 3 м, а при необходимости может достигать 15 м. Мощность компрессора 500 Вт. При рабочей $T = 75$ К КС 100 обеспечивает мощность отбора теплоты 2 Вт. Сравнение КС 100 с первым экземпляром КХ типа Pulse-Tube, разработанного в Институте приклад-

ной физики университета г. Гессена (Германия) в 1998 г. и названного Р-Т, проведено в [25]. Р-Т потребляет мощность 2 кВт, имеет водяное охлаждение и позволяет охлаждать удаленные от компрессора объекты до предельной $T = 28$ К за 160 мин, если тепловая нагрузка отсутствует. Длина газопровода между компрессором и холодильником 4 м, а при необходимости может достигать 10 м. При рабочей $T = 75$ К Р-Т обеспечивает мощность отбора теплоты 5 Вт. Масса охлаждаемой головки 1,7 кг.

Проведенный краткий обзор некоторых зарубежных КХ позволяет сделать вывод о том, что к настоящему моменту созданы и серийно выпускаются КХ, технические характеристики которых позволяют комплектовать ими СВЧ аппаратуру, включающую в себя ВТСП-модули. Продолжаются разработки новых КХ в целях улучшения их надежности, долговечности, экономичности мощности и других параметров. Ведутся разработки и других элементов криогенной техники. Например, японская фирма *Advanced Mobile Telecommunication Technology, Inc.* сообщает о разработке специального коаксиального кабеля с большим температурным сопротивлением, предназначенного для уменьшения тепловых потерь из охлаждаемой вакуумной камеры [26]. Внешний проводник кабеля изготовлен методом осаждения пленки меди толщиной всего 5,0 мкм на диэлектрик PTFE (политетрафлуорэтан). Внутренний стальной проводник имеет покрытие с подслоем меди, на которую сверху нанесен слой серебра. Исследованы кабели с внешним диаметром 1,06; 1,68 и 2,19 мм. Обнаружено, что оптимальное соотношение электрических потерь к тепловым имеет кабель с внешним диаметром 1,68 мм. Тепловые потери внешнего и внутреннего проводника этого кабеля приблизительно одинаковы. Отрезок такого кабеля длиной 100 мм, снабженный SMA-разъемами на концах, на частоте 2 ГГц вносит затухание 0,175 дБ и имеет тепловые потери 48 мВт при температуре на его концах 77 и 300 К.

По мнению автора работы [27], ВТСП-системы будут работать при $T = 65, 80, 35, 10$ и 5 К. Он выдвигает следующие аргументы. При малой тепловой нагрузке выпускаемые в настоящее время однокаскадные криогенные холодильники обеспечивают $T = 25\text{--}40$ К в зависимости от температуры окружающей среды. Свойства ВТСП улучшаются с понижением T , поэтому ВТСП-элементы с малым тепловыделением целесообразно охлаждать до предельных возможностей криогенного холодильника. Двухкаскадные криогенные холодильники при малой тепловой нагрузке обеспечивают $T = 10$ К, а при модификации теплообменника или при добавлении третьего каскада достигают $T = 5$ К или даже ниже. Например, уже разработан криогенный холодильник, обеспечивающий тепловую мощность 0,25 Вт при $T = 4,2$ К.

Стоимость криогенного холодильника не для всех систем является определяющей. Например, це-

на функциональных ВТСП-блоках базовых станций сотовой связи около 25 тыс. долл. США, цена SQUID микроскопа 100 тыс., а стоимость криогенных холодильников, используемых в этих системах, около 8 тыс. Для ускорения продвижения ВТСП-блоков на рынок средств мобильной связи автор рекомендует модифицировать используемый сейчас одноступенчатый криогенный холодильник для работы с двумя ступенями охлаждения, чтобы обеспечить рабочую температуру 10 К. Такой криогенный холодильник можно будет использовать для охлаждения NbN-сверхпроводников. Это позволит в несколько раз снизить потери в сверхпроводящих пленках и, следовательно, существенно улучшит параметры СВЧ блоков. Если такой холодильник продемонстрирует при $T = 4,2$ К тепловую мощность 0,1 Вт, его можно будет использовать для охлаждения NbN-сверхпроводников. В дальнейшем тепловую мощность при $T = 4,2$ К необходимо довести до 0,25 Вт.

Выводы

К настоящему моменту за рубежом достигнуты настолько впечатляющие успехи ВТСП-технологии, что уже давно не стоит вопрос о целесообразности использования ВТСП в технике СВЧ. Сейчас созданная ВТСП СВЧ техника успешно эксплуатируется. Если государственная программа исследований в области ВТСП "Technology Roadmap for the Superconducting Electronics Industry" ранее действовала только в США, то сейчас аналогичные программы сформированы в Европе и Японии. Они направлены на решение стратегических проблем, требующих долговременных вложений крупных средств. На повестке дня западных разработчиков сегодня в качестве главного вопроса стоит вопрос разработки законченных функциональных систем.

- ◆ В результате проведенных за рубежом исследований за последние годы разработана технология, обеспечивающая создание ВТСП-пленок. Разработан весь спектр пассивных СВЧ устройств на их основе для систем связи, тактико-технические характеристики (ТТХ) которых не изменяются в процессе эксплуатации (накопленный опыт эксплуатации превышает четыре года).
- ◆ Разработаны и запатентованы новые конструкции ВТСП-резонаторов, существенно превосходящие по добротности ранее известные.
- ◆ Достижения в технологии изготовления ВТСП-пленок и разработка точных методик расчета сложных многосвязных микрополосковых линий передачи открыли новые возможности для совершенствования фильтров. Для наиболее распространенных диапазонов частот, используемых в современных средствах мобильной связи, высококачественные приемные полосовые фильтры уже созданы, и во всех развитых странах ведется активная работа по их совершенствованию.

Основными расчеты выполняются мощными коммерческими программами, позволяющими с высокой точностью проводить всеволновой анализ трехмерных фильтрующих структур.

- ◆ Разработаны выходные полосовые ВТСП-фильтры для передатчиков с выходной мощностью 30–100 Вт. Использование ВТСП уменьшает потери в фильтрах и позволяет снизить мощность выходных усилителей. Это экономит энергию, расходуемую на питание усилителей, что особенно важно для бортовой аппаратуры.
- ◆ Работы по перестраиваемым ВТСП-фильтрам находятся на начальной стадии и параметры созданных фильтров пока далеки от совершенства. Однако важность этого класса устройств в технике СВЧ настолько высока, что и первые образцы перестраиваемых ВТСП-фильтров нашли применение в разрабатываемой аппаратуре связи.
- ◆ Успешно разрабатываются различные СВЧ модули и блоки, состоящие из ВТСП и полупроводниковых элементов, для приемников и передатчиков. Их преимущества особенно ярко проявились при комплексном использовании большого числа ВТСП-элементов для создания блоков приемников и передатчиков. Разработанные образцы демонстрируют существенное улучшение качества СВЧ аппаратуры при увеличении в ней числа ВТСП-элементов.
- ◆ Исследования малогабаритных ВТСП-антенн доказали их существенные преимущества в тех случаях, когда размеры антенны малы по сравнению с длиной излучаемой волны. Использование ВТСП-антенн планируется там, где недостаток места не позволяет расположить обычные излучатели, например, в бортовых многочастотных приемных антенных решетках, в корабельных горизонтальных низкочастотных локаторах.
- ◆ Многообещающей областью применения ВТСП является создание решеток миллиметрового диапазона. Они могут быть изготовлены на одной подложке вместе с суммирующей схемой. Исключение потерь в излучателях и суммирующей схеме позволяет существенно увеличить коэффициент усиления. Современное состояние ВТСП-технологии уже сейчас позволяет делать такие антенные решетки электрически управляемыми, включая в состав суммирующей схемы фазовращатели, которые могут быть изготовлены вместе с решеткой в едином технологическом цикле.
- ◆ Созданы и серийно выпускаются криогенные холодильники, параметры которых позволяют комплектовать ими СВЧ аппаратуру, содержащую ВТСП-модули. Продолжаются разработки новых криогенных холодильников в комплексе с остальными элементами криогенной техники в целях улучшения их надежности, долговечности, экономичности, мощности и других параметров.

Быстрый прогресс внедрения ВТСП СВЧ устройств в системы связи с качественными изменениями в их ТТХ, естественно, потребуют соответствующего пересмотра принципов построения систем радиоконтроля.

В области СВЧ приборов ВТСП на ближайшие несколько лет планируется проведение исследования в следующих направлениях [27]:

- разработка более эффективных средств настройки фильтров, чем используемые сейчас диэлектрические винты в каждом резонаторе;
- разработка гибкого ВТСП-кабеля и входного кабеля МШУ с малыми потерями и высокой изоляцией;
- разработка материалов и средств настройки для мощных фильтров;
- разработка приборов для измерений дефектов в пленках;
- организация космического эксперимента HTSSE III с СВЧ аппаратурой на борту;
- организация космического эксперимента HTSSE IV с цифровыми процессорами и переключателями на основе сверхпроводников NbN и, возможно, Nb на борту.

Анализ направлений исследований позволяет сделать крайне важный вывод: *США, Европа и Япония взяли курс на создание полностью криогенной малогабаритной аппаратуры для приема, передачи и цифровой обработки сигналов.*

Реализация этой программы может настолько кардинально изменить сигнальную ситуацию в эфире, что существующие сейчас системы радиоконтроля не смогут контролировать потоки информации.

Список литературы

1. Humphreys R. G., Barrett C. P., Chew N. G., Hedges S. J., Greed R. B., Hunt B. D., Nicholson B. F., Hensen S., Muller G. Narrow-Band HTS Microstrip Combiner Technology // IEEE Transactions on Appl. Supercond., June 1997. Vol. 7. N 2. P. 3075—3078.
2. Gregory L. Hey-Shipton, Neal O. Fenzi, Kurt F. Raihn. HTS Diplexer & Low Noise Amplifier RF Module // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4C-1. 1997 IEEE.
3. Greed R. B., Joyce D. C., Jedamzik D., Hong J. S., Lancaster M. J., Reppel M., Chaloupka H. J., Mage J. C., Marcilhac B., Mistry R., Hafner H. U., Auger G., Rebernak W. An HTS Transceiver for Third Generation Mobile Communication // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. N 2. P. 4002—4005.
4. Antonio Romano, Raafat R. Mansour, Fraser Thomson. A Hybrid Superconductive/Semiconductive Microwave Receiver // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1997. Vol. 7, N 2. P. 3067—3070.
5. Gregory Lyons W., Arsenault D. R., Keast Craig L., Shaver David C., Berger R., Anderson Alfredo C., Murphy P. G. T. C. L. Gerhard Sollner, R. W. Ralston. Wideband Compressive Receiver Based on Advanced Superconductors and Semiconductor Circuits // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1997. Vol. 7. N 2. P. 2462—2466.
6. Kasser T., Klauda M., Neumann C., Guha E., Kolesov S., Baumfalk A., Chaloupka H. A Satellite Repeater Comprising Superconducting Filters // 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4E-4. 1998 IEEE.
7. Jia-Sheng Hong, Lancaster M. J., Greed Robert B., Joyce Daniel, Jedamzik Dieter, Holland J. A. Thin Film HTS Passive Microwave Components for Advanced Communications Systems // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. N 2. P. 3893—3896.
8. Bechteler Th., Mayer B., Weigel R. A New High-temperature Superconducting Double-Hybrid Coupler With Wide Bandwidth //

1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4C-5. 1997 IEEE.

9. Peik S. F., Jolley B., Mansour R. E. High-Temperature Superconductive Butler Matrix Beamformer for Satellite Applications // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-1. 1999 IEEE.
10. Zhu M. H., Cao B. S., Zhang X. X., Li N., Wang Y. J., Yuan H. J., Chen Y., Zhao Y. G., Dong D. J., Gu B. L., Zhou Y. L., Chen Z. H., Lu H. B., Wang X. P., Liu T. J. Power Dependence of Radiation Efficiency of Circularly Polarized YBa₂Cu₃O₇ Microstrip Antennas // Physica C 282—287 (1997). P. 2513—2514.
11. Zhu M. H., Cao B. S., Zhang X. X., Li W. H., Wang Y. J., Yuan H. J., Zhang L. W., Dong D. J., Liu M. L., Cui D. F., He M., Zhou Y. L., Liu T. J. Design and Performance of a 4.5 GHz Circularly Polarized YBa₂Cu₃O₇ Microstrip Antenna // Physica C 282—287 (1997). P. 2515—2516.
12. Wu Z., Lacey D., Drossos G., Davis L. E., Button T. W., Smith P. Comparative Study of Miniaturised HTS Microstrip H-Shaped Antennas with and without Enhanced Capacitance // Physica C 282—287 (1997). P. 2511—2512.
13. Zhu M. H., Cao B. S., Zhang X. X., Li N., Wang Y. J., Zhang L. W., Dong D. J., He A. S., Zhao Y. G., Wang P., Liu T. J. Research and Design of High Tc Superconducting Microstrip Antenna Array // Physica C 282-287 (1997)/ P. 2517—2518.
14. Lewis L. L., Koepf G., Bhasin K. B., Richard M. A. Performance of TlCaBaCuO 30 GHz 64 Element Antenna Array // IEEE Trans. on Appl. Supercond. March 1993. Vol. 3. N 1.
15. Ferroelectric-scanned phased array antenna: Пат. 5309166 США, МКИ5 H 01 Q 3/30/ Collier Donald C., Krug Kevin J., Kustom Brittan; United Technologies Corp. — № 806528; Заявл. 13.12.91; Опубл. 3.5.94; НКИ 343/778.
16. Electronically steerable leaky wave antenna using a tunable ferroelectric material / Varadan Vijay K., Varadan Vasundra V., Jose K. A., Kelley James F. // Smart Mater. And Struct. 1994. N 4. P. 470—475.
17. Planar ferroelectric phase shifter: Пат. 521463 США, МКИ5 H 01 P 1/18/ Balobitt Richard W., Drach William C., Koscius Thomas E.; USA Secretary of the Army. — № 916741; Заявл. 22.7.92; Опубл. 18.5.93; НКИ 333/161.
18. Ceramic phase shifters for electronically steerable antenna systems / Varadan V. K., Chodgaonkara D. K., Varadan V. V., Kelly J. F., Glikerdas P. // Microwave J. 1992. 35. N 1. P. 116, 119, 121—122, 125, 127.
19. Чернышев С. Л., Пеньков А. И. Выбор физических принципов построения перестраиваемых сверхширокополосных фильтров // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. 1999. Т. 7. № 3. С. 93.
20. Peter Kr. Petrov and Erik F. Carlsson, Peter Larsson, Milan Friesel, Zdravko G. Ivanov. Improved SrTiO₃ multilayers for microwave application: Growth and properties // Journal of Applied Physics. November 1996. Vol. 84. P. 3134.
21. Herd J. S., Hayes P., Kenney J. P., Poles L. D., Herd K. G., Lyons W. G. Experimental results on a scanned beam microstrip antenna array with a proximity coupled YBCO feed network // Appl. Supercond. Conf., Chicago, Ill, Aug. 23—28, 1992. Pt. 3. Electronics.
22. Jenkins A. P., Dew-Hughes D., Edwards D. J., Hyland D., Grovenor C. R. M. Application of TBCCO Based HTS Devices to Digital Cellular Communications // IEEE Transaction on App. Supercond. June 1999. Vol. 9. N 2. P. 2849—2852.
23. Scharen M. J., Chase D. R., Ho A. M., O'Baid A., Raihn K. R., Force R. J. Filter Subsystems for Wireless Communications // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 7. N 2. P. 3744—3749.
24. Hohmann R., Krause H. J., Soltner H., Zhang Y., Copetti C. A., Bousack H., Braginski A. I., Faley M. I. HTS SQUID System with Joule-Thomson Cryocooler for Eddy Current Nondestructive Evaluation of Aircraft Structures // IEEE Trans. on Appl. Supercond. June 1997. Col. 7. N 2.
25. Hohmann R., Leinerth C., Zhang Y., Bousack H., Thummes G., Heiden C. Comparison of Low Noise Cooling Performance of a Joule-Thomson Cooler and a Pulse-Tube Coller Using a HT SQUID // IEEE Trans. on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. N 2.
26. Kubota H., Takeuchi H. Low Thermal Leakage Coaxial Cable for HTS Devices // IEEE Transaction on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. N. 2. P. 3117—3120.
27. John M. Rowell. Recommended Directions of Research and Development in Superconducting Electronic // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. N. 2. P. 2837—2848.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.389:004.2

Г. И. Леонович, д-р техн. наук,
Самарский государственный аэрокосмический
университет

СОГЛАСОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Обоснован и изложен принцип согласования энергетических и пространственных параметров оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений, позволяющий при проектировании преобразователей исключить ситуации, когда требуемое отношение сигнал/шум на нагрузке фотоприемника не обеспечивается величиной отверстия кодирующего элемента и когда площадь отверстия существенно превышает величину, достаточную для надежной регистрации оптического сигнала.

Оптоэлектронные цифровые преобразователи линейных и угловых перемещений (ОЦПП), работающие с некогерентными источниками излучения, нашли широкое применение при решении задач контроля и управления микротурбинами, измерения перемещения исполнительных устройств в мини- и микроробототехнических системах и в других объектах микросистемной техники.

ОЦПП по принципу квантования преобразуемой величины можно разделить на две основные группы [1, 2, 5, 7].

Первая группа — *одноотсчетные преобразователи* — содержит кодирующий элемент (КЭ), который преобразует перемещение x непосредственно в дискретный оптический или электрический сигнал. Цифровой эквивалент перемещения получается либо методом реверсивного счета единичных приращений, либо методом считывания.

Вторая группа (рис. 1) — *двухотсчетные ОЦПП* — содержит помимо одноотсчетного ОЦПП второй функциональный узел — вторичный преобразователь, в котором цифровому преобразованию подвергается аналоговый сигнал, пропорциональный смещению в дискретных участках, на которые разбит весь диапазон перемещения. Дискретности задаются КЭ или модуляторами светового потока типа муаровых, матричных, нониусных и других шкал. Двухотсчетные ОЦПП строятся, как правило, по следующему принципу: первый отсчет — накапливающий или считывающий, второй — с интерпо-

ляцией амплитуды или пространственной фазы промежуточных сигналов. Связь ОЦПП с объектом измерения может быть механической или оптической; связь между функциональными узлами, формирующими первый и второй отсчеты, — оптической или гальванической.

Информационная емкость ОЦПП определяется как максимально возможное количество информации, получаемое при единичном отсчете по отдельной k -й кодовой комбинации, где $k = 0, 1, \dots, N$; $N = 2^n - 1$; n — число разрядов ОЦПП [5]. В двухотсчетных преобразователях код N перемещения получается путем суммирования кодов первого N_1 и второго N_2 отсчетов ($N = N_1 + N_2$) по k -й кодовой комбинации. При диапазоне X изменения перемещения x истинное значение измеряемого параметра должно находиться внутри одного из интервалов $\pm 0,5\Delta x$, где $\Delta x = X/2^n$ — шаг квантования. В реальных ОЦПП координаты границ квантов не совпадают с расчетными на величину E_k , которая называется *погрешностью воспроизведения уровня квантования*. Текущие значения этой погрешности при k -й кодовой комбинации обозначаются e_k .

Количество информации в k -й кодовой комбинации с учетом этой погрешности оценивается величиной [5]:

$$I_k = \log_2 \left[\frac{X}{2(0,5\Delta x + |e_k|)} \right]. \quad (1)$$

Погрешности e_k формируются из большого числа доминирующих и слабо зависимых величин, которые по функциональным признакам можно представить суммой групп независимых слагаемых. В первую группу входят инструментальные погрешности, параметры которых определяются конструкцией ОЦПП, принятыми технологиями изготовления считывающей системы и КЭ, нанесения на КЭ кодового поля, изготовления ком-

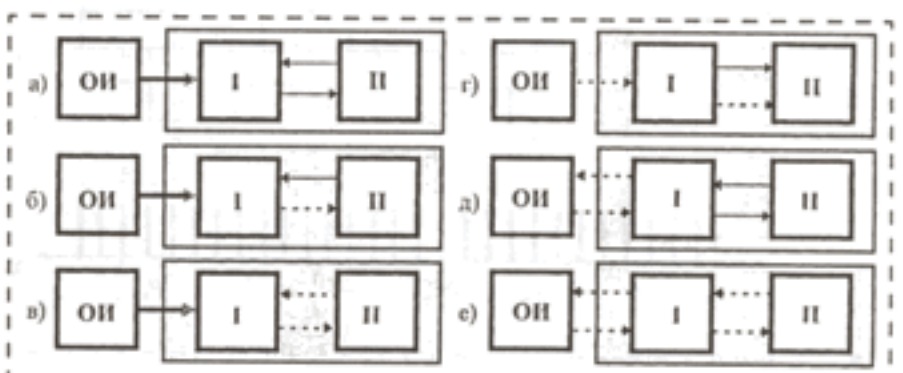


Рис. 1. Варианты разделения функциональных узлов при механической и оптической связи ОЦПП с измеряемым объектом (ОИ — объект измерения; I, II — первый и второй функциональные узлы; — — гальваническая связь; ···· — оптическая связь; — — механическая связь)

плекующих деталей и элементов, их сборки в единую конструкцию с последующей юстировкой и настройкой. Вторая группа представляет собой совокупность дополнительных погрешностей воспроизведения квантованных уровней, порождаемых воздействием внешних дестабилизирующих факторов в процессе функционирования ОЦПП, а также естественным износом и старением материалов.

Вместе с тем, точность ОЦПП определяется энергетическими показателями информационно-энергетических каналов (ИЭК), каждый из которых включает j -й или общий для всех фотоприемников источник излучения, среду распространения света, оптическую систему, диафрагмы, i -е профилированное отверстие (зону прозрачности) КЭ и j -й фотоприемник. На рис. 2 в качестве примера пред-

ставлена структурная схема (а) и эпюры сигналов (б) нониусного ОЦПП [3]. Здесь при общем протяженном источнике излучения код N_1 формируется реверсивным счетом числа отверстий, перемещающихся относительно друг друга по правилу нониусной шкалы. Такой тип интерполяции является пространственно-фазовым.

Энергетический динамический диапазон ИЭК определяется формулой [7]

$$D_{ij\max} = \frac{P_{cij\max}}{P_{cij\min}}, \quad (2)$$

где $P_{cij\max}$ и $P_{cij\min}$ — максимальное и минимальное значения мощности информационного сигнала при прохождении светового потока от j -го или общего излучателя через i -е отверстие КЭ к j -му фотоприемнику.

Для упрощения анализа в дальнейшем будем считать, что $j = 1$, т. е. исследуется сигнал на выходе одного фотоприемника. Тогда текущее количество информации в ИЭК при k -й кодовой комбинации, пространственно соответствующей i -му отверстию КЭ без учета информационной емкости самого КЭ, можно в виде формулы

$$I_{эik} = 0,5 \log_2(1 + D_i), \quad (3)$$

где $D_i = P_{ci}/P_{c\min}$; P_{ci} — текущее значение мощности сигнала при k -й кодовой комбинации; $P_{c\min}$ — минимальное значение мощности сигнала, различимого на фоне помех.

Уравнение (3) позволяет сформулировать требования, предъявляемые к энергетическим характеристикам ОЦПП. Для одноотсчетного ОЦПП условия, обеспечивающие согласование пространственных и энергетических параметров, записываются в виде неравенства

$$1 \geq I_{ikэ} = 0,5 \log_2(1 + \rho_{кл}) \geq \log_2\left(\frac{\Delta x}{2|e_k|}\right), \quad (4)$$

а для двухотсчетного — в виде неравенства

$$\begin{aligned} \log_2\left(\frac{a_0}{\Delta x}\right) &\geq I_{ikэ} = 0,5 \log_2[1 + D_i] \geq \\ &\geq \log_2\left(\frac{a_0}{2(0,5\Delta x + |e_k|)}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где a_0 — шаг нанесения отверстия младшей разрядной дорожки КЭ (в одноотсчетном ОЦПП $a_0 = \Delta x$); $\rho_{кл} = P_{скл}/P_{шк}$ — допустимое отношение сигнал/шум, обеспечивающее устойчивое выделение сигнала из смеси сигнала и шума выбранным методом; $P_{скл} = P_{c\min}$ — допустимая мощность сигнала; $P_{шк}$ — мощность шума на выходе регистратора при k -й кодовой комбинации.

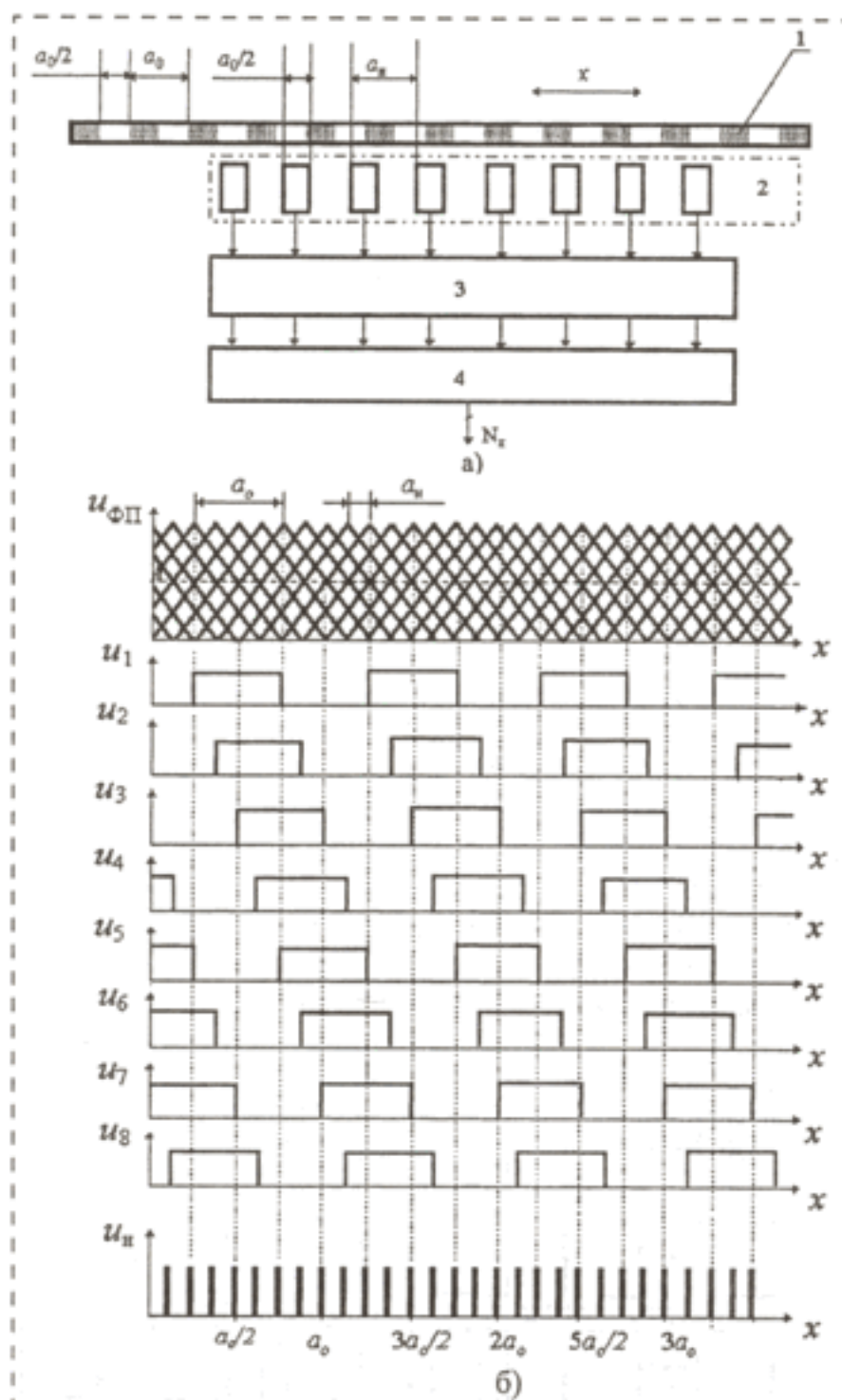


Рис. 2. Двухотсчетный нониусный ОЦПП: а — структурная схема (1 — кодирующий элемент; 2 — блок фотоприемников; 3 — блок компараторов; 4 — формирователь кода; б — эпюры сигналов ($u_{ФП}$ — сигналы на выходах фотоприемников; u_1 — u_8 — сигналы на выходе компараторов; u_n — последовательность нониусных импульсов)

Левые части неравенств (4) и (5) обозначают пространственную границу точности, выше которой поднимать энергетическую информационную способность нецелесообразно, так как рост энергетических показателей не ведет к улучшению точности из-за погрешностей e_k . Правые части неравенств показывают энергетическую границу, ниже которой происходит полная потеря информации в одноотсчетном преобразователе и потеря от одного до нескольких разрядов информации — в двухотсчетном.

Одно- и двухотсчетный ОЦПП можно представить как совокупность из N_i одноканальных модуляторов, по одному на каждое отверстие КЭ. Тогда по значениям $\rho_d = \rho_{kd \max}$ и $I_3 = I_{ikz \min}$, подставляемым в уравнение (4) и (5), можно сформулировать условия энергетического обеспечения достоверности всех $N = N_1 + N_2$ кодовых комбинаций.

Для одноотсчетного ОЦПП можно считать, что источник излучения создает одинаковую освещенность по всей площади отверстия КЭ, а для двухотсчетного — по площади части отверстия, пропорциональной цене младшего разряда кода перемещения. Тогда максимальное значение амплитуды потока, соответствующее младшему разряду кода для одно- и двухотсчетного преобразователей, может быть определено по формуле [2]

$$\Phi_0 = \frac{E_0 A_{кэ} \tau_{ос} \tau_{кэ}}{N_2}, \quad (6)$$

где E_0 — амплитуда освещенности, создаваемой источником излучения на чувствительной поверхности фотоприемника (ФП) при единичном значении функции пропускания оптического канала; $\tau_{ос}$ и $\tau_{кэ}$ — интегральные коэффициенты пропускания оптической среды (вместе с оптической системой) и прозрачных частей КЭ для потока излучения полезного сигнала соответственно; $A_{кэ}$ — площадь единичного отверстия на младшей разрядной дорожке КЭ; N_2 — число разрядов во втором отчете (для одноотсчетного преобразователя $N_2 = 1$).

Суммарную спектральную плотность мощности помех можно представить в виде суммы слагаемых, по-разному зависящих от параметров оптической системы и электронного тракта. Внутренние шумы фотоприемника — дробовые, токовые, тепловые и генерационно-рекомбинационные шумы (в том числе шумы типа $1/f$) — имеют спектральные плотности мощности, которые в общем виде определяются по следующим формулам [1, 4]:

$$S_{idr}(\omega) = k_{др} q \langle i \rangle; \quad S_{иток}(\omega) = k_{ток} \frac{\langle i \rangle^a}{\omega^\beta};$$

$$S_{итеп}(\omega) = \frac{2kT}{R_{ФП}}; \quad S_{igr-p}(\omega) = \frac{k_{г-р} \langle i \rangle^2}{(1 + \omega^2 \tau_n^2)},$$

где $\langle i \rangle$ — среднее значение силы тока, протекающего через ФП; q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура ФП; τ_n — среднее время жизни носителя заряда в полупроводниковых ФП; $R_{ФП}$ — внутреннее сопротивление инфракрасного ФП; $\omega = 2\pi/\lambda$ — частота колебаний; $\alpha, \beta, k_{др}, k_{ток}, k_{г-р}$ — коэффициенты, получаемые эмпирическим путем.

При работе фотоприемника в фотодиодном режиме можно считать, что $\langle i \rangle = I_p$, $\alpha \approx 2$, $\beta \approx 0,8 \dots 1,5$ [1]. Шумы типа $1/f$ резко ослабляются введением модуляции светового потока по каналу питания излучателя.

Дополнительные внутренние шумы генерируются активными сопротивлениями нагрузочной цепи $R_{нш}$ и в элементах усилителя фототока $R_{уш}$. В точке приложения на входе в усилитель суммарный шум можно представить спектральной плотностью мощности [4]:

$$S_{шз}(\omega) = 2kT(R_{нш} + R_{уш})|W_y(j\omega)|^2,$$

где $W_y(j\omega)$ — частотная передаточная функция усилителя фототока.

Суммарная спектральная плотность мощности помех описывается выражением

$$S_{\Sigma ш} = S_{if}(\omega) + S_{idr}(\omega) + S_{иток}(\omega) + S_{итеп}(\omega) + S_{igr-p}(\omega) + S_{шз}(\omega), \quad (7)$$

где $S_{if}(\omega)$ — спектральная плотность фотонных шумов.

В общем случае отношение сигнал/шум определяется по формуле [4]

$$\rho = \frac{(\Phi_0 s_{ic} k_y k_n)^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|U_c(j\omega)|^2}{S_{шз}(\omega)} d\omega, \quad (8)$$

где $U_c(j\omega)$ — спектр полезного сигнала; k_y, k_n — коэффициенты усиления и нагрузки фотоприемного усилителя соответственно; s_{ic} — интегральная чувствительность фотодиода.

Если значение отношения вычислено по заданному отношению сигнал/шум, то в правой части уравнения (8) регулируемые или выбираемыми параметрами являются значения Φ_0, k_y, k_n и s_{ic} . Нахождение этих параметров осуществляется численным способом в форме решения оптимизационной задачи. Дополнительно накладываемые условия — ограничение габаритных размеров, массы, энергоемкости и др.

В качестве примера можно привести методику расчета высоты отверстий младшей разрядной дорожки КЭ в одноотсчетном ОЦПП. Для упроще-

ния расчетов будем считать, что суммарный шум состоит из дробовых шумов ФП и тепловых шумов на нагрузочном сопротивлении. Максимальная скорость v_{\max} перемещения отверстия КЭ определяет период и время съема информации в одной выборке k -й кодовой комбинации соответственно как $T_0 = Ha_0/v_{\max}$ (H — число выборок) и $t_c = T_0/(2H)$. Максимальная амплитуда силы тока в процессе отсчета на нагрузочном сопротивлении, соответствующая совпадению геометрических проекций отверстий КЭ и диафрагмы, определяется выражением

$$I_{p \max} = \Phi_0 s_{ic} = E_0 A_{кэ} \tau_{oc} \tau_{кэ} s_{ic}.$$

Среднее значение амплитуды тока при перемещении отверстия через линию считывания в пределах диапазона $[(i-1)a_0, ia_0]$, равно $\langle i \rangle = I_{p \max}/2$.

Считая все параметры, кроме $A_{кэ}$, известными, запишем:

$$\langle i \rangle = K_c A_{кэ} / 2,$$

где $K_c = E_0 \tau_{oc} \tau_{кэ} s_{ic}$.

С учетом дробового и теплового шумов спектральная плотность мощности флуктуаций тока в нагрузочном сопротивлении равна:

$$S_{\Sigma ш}(\omega) = qk_{др} A_{кэ} + \frac{2kT}{R_H}. \quad (9)$$

Подставляя значения параметров сигнала и помехи из (9) в формулу (8), получим:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(\langle i \rangle)^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\tilde{i}(j\omega)|^2}{S_{\Sigma ш}(\omega)} d\omega = \\ &= \frac{(K_c A_{кэ})^2}{4\pi \left[qk_{др} A_{кэ} + \frac{2kT}{R_H} \right]} \int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{i}(j\omega)|^2 d\omega, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\tilde{i}(j\omega)$ — спектр последовательности из H прямоугольных импульсов единичной амплитуды длительностью t_c и периодом следования T_0 . В соответствии с теоремой Парсеваля при периоде наблюдения $T_H = HT_0$ [6]:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{i}(j\omega)|^2 d\omega = \int_0^{T_H} \tilde{i}^2(t) dt = H t_c. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), получим:

$$\rho = \frac{K_c^2 A_{кэ}^2 H t_c}{qk_{др} A_{кэ} + K_c A_{кэ} + \frac{2kT}{R_H}}. \quad (12)$$

Будем считать, что величина $\rho = \rho_d = 1,83$. Зададимся величиной информационной емкости КЭ $n = I_{\max} = 15$. Диапазон линейного перемещения $X = 50,000$ мм, период нанесения отверстий КЭ $a_0 = Q/2^{15} = 1,5259$ мкм. Будем также считать, что за период считывания, равный $T_H = HT_0 = 18$ мкс, проводится три отсчета информации ($H = 3$), длительность импульсов $t_c = 3$ мкс. Исходя из принятых стандартных параметров осветителей и оптической среды ($E_0 = 50$ мкВт; $\tau_{oc} = 0,1$; $\tau_{кэ} = 0,9$; $s_{ic} = 0,5$ мкА/мкВт; $N_2 = 1$), получим значение $K_c = 2,25$.

Решая уравнение (12) относительно неизвестного $A_{кэ}$, определим значение площади отверстия КЭ:

$$\begin{aligned} A_{кэ} &= \frac{\rho_d (qk_{др} + K_c)}{2K_c^2 H t_c} \left[1 + 1 + \frac{8kTK_c^2 H t_c}{\rho_d R_H (qk_{др} + K_c)^2} \right] = \\ &= 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ [мм}^2\text{]}. \end{aligned} \quad (13)$$

При известных значениях периода нанесения и ширины отверстий КЭ получается, что высота одного отверстия (нижняя граница), обеспечивающего по энергетике оптического сигнала заданную пространственно-позиционную точность, равна $h_0 = 0,37$ мм.

Для двухотсчетного преобразователя вместо порогового значения отношения сигнал/шум в (13) подставляется величина энергетического диапазона $D = D_{i \min}$, а варьируемой (искомой) величиной при заданных e_{\max} и фиксированной высоте h_0 отверстий выбирается значение периода a_0 нанесения меток на КЭ.

Рассмотренная методика согласования энергетических и пространственных параметров может применяться для всех типов оптоэлектронных датчиков, построенных на принципе амплитудной модуляции некогерентного светового потока.

Список литературы

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В двух книгах. Кн. 1 // Пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.
2. Якушенок Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Советское радио, 1980. 380 с.
3. Колюхов Н. Е. Оптоэлектронные измерительные преобразователи. Л.: Энергия, 1977. 160 с.
4. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. 387 с.
5. Домрачев В. Г., Скрипник А. Б. Определение количества информации на выходе цифрового преобразователя угла // Измерительная техника. 1995. № 1. С. 14–15.
6. Вайнштейн Л. А., Зубаков В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1960. 448 с.
7. Леонович Г. И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации. — Самара: Изд-во СГАУ, 1998. 264 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 66.017

А. Л. Асеев, д-р физ.-мат. наук,
член-корр. РАН, проф.,
В. П. Попов, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики полупроводников СО РАН
(г. Новосибирск),
В. П. Володин, В. Н. Марютин, МО РФ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУКТУР КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ В МИКРО-, НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Проведен анализ причин перехода кремниевой микро- и нанoeлектроники на структуры кремний-на-изоляторе (КНИ). На примере разработок ИФП СО РАН показаны преимущества и недостатки КНИ-технологии при разработке и изготовлении КНИ-приборов для микро- и оптоэлектроники, сенсоров и нанотранзисторов. Дан анализ перспективных применений КНИ-структур для интегрированных систем-на-чипе. Предполагается быстрый рост производства КНИ-структур на высокоомной подложке из высокочистого кремния для микросхем со встроенным радиоканалом.

Введение

Полупроводниковый кремний на протяжении 50 лет является основным материалом твердотельной электроники. По прогнозам экспертов, он сохранит свое лидирующее положение в ближайшие 40 лет в микроэлектронике, силовой электронике и таких новых быстроразвивающихся областях, как телекоммуникационная электроника, солнечная энергетика, микромеханика и др. Проблемы с теплоотводом в высокопроизводительных кремниевых интегральных схемах (ИС) с увеличением тактовой частоты в гигагерцовой области выдвинули технологию кремний-на-изоляторе (КНИ) в качестве главной альтернативы обычной кремниевой технологии. В последние годы в США, Японии, Франции и ряде других стран дальнего зарубежья проводится интенсивный целенаправленный научно-технический поиск в области разработки технологий изготовления высокопроизводительных многофункциональных систем на базе структур КНИ.

КНИ-технология рядом ведущих мировых фирм (IBM, AMD, Motorola) выбрана генеральным направлением развития кремниевой микроэлектроники, обеспечивающей наибольшие преимущества при создании сверхбыстрых транзисто-

ров (например, 3,3 ТГц в варианте IBM) и ультрабольших интегральных схем (УБИС). Результаты этих исследований практически закрыты, поскольку одновременно затрагиваются аспекты двойного применения, такие как обеспечение радиационной и термической стойкости. Ограничен экспорт как КНИ-ИС, так и КНИ-пластин. По коммерческим каналам в Россию поставляются намеренно непригодные для создания радиационнстойких СБИС КНИ-структуры, скрываются существенные результаты, важные для разработки библиотечных элементов для КНИ-ИС.

Известно, что в этих выдвинувшихся на первые позиции странах ежегодно выделяется около миллиарда долларов на проведение поисковых исследований и разработку технологий изготовления однокристалльных многофункциональных устройств на основе БиКМОП КНИ-процессов.

Целью настоящей статьи будет анализ причин перехода кремниевой микроэлектроники на КНИ-технологию на основе опыта, полученного в ходе реализации программ по разработке технологий создания КНИ-структур и приборов в Институте физики полупроводников Сибирского Отделения РАН.

Методы производства КНИ-структур

Известно, что переход от кремниевых пластин, в том числе с эпитаксиальным слоем, на КНИ-структуры при производстве большого класса полупроводниковых приборов и микросхем дает заметные преимущества по сравнению с объемным материалом и, в частности, снижение потребляемой мощности и увеличение быстродействия. Для производства СБИС используются два основных метода изготовления КНИ-пластин (зарубежное название Silicon On Insulator — SOI):

- имплантационный метод — внедрение в глубину кристалла ионов кислорода (Silicon Implanted by Oxygen — SIMOX) с последующим синтезом скрытого оксида при высокотемпературном (> 1300 °C) отжиге;
- прямое сращивание (бондинг) облученной водородом донорной окисленной пластины кремния с опорной подложкой с последующим почти полным удалением донорной пластины путем ее скалывания имплантированным водородом (метод водородного переноса кремния с оксидом Smart-Cut® SOI [1]).

В Институте физики полупроводников СО РАН в 1996—2001 гг. была разработана технология, обеспечившая возможность экономически эффективного производства в России высококачественных структур КНИ для микроэлектроники. Технология,

названная "DeleCut" (hydrogen irradiated Deleted oxide Cutting), является вариантом метода Smart Cut[®]. На технологию DeleCut получен Российский патент [2], изучается также возможность ее патентования в США.

В технологии изготовления КНИ-пластин DeleCut, объединяющей методы гидрофильного соединения [3] и водородного отслоения [4], устранены недостатки прототипа. Соответствие различных методов изготовления КНИ-пластин требованиям СБИС-технологии с проектными нормами 0,1 мкм отражено в табл. 1. Главным достоинством запатентованного метода DeleCut является структурное и электрофизическое совершенство границы сращивания, находящейся между слоем перенесенного кремния и скрытым термическим оксидом Si/SiO₂, что позволило получать слои монокристаллического кремния и оксида толщиной до 3 нм. Метод DeleCut опробован также при создании структур кремний-на-кремнии, перспективных для изготовления силовых приборов и упорядоченных массивов квантовых точек.

По технологии DeleCut изготовлены экспериментальные партии КНИ-пластин диаметром 76—150 мм с бездислокационными КНИ-слоями толщиной от 0,01 до 1,8 мкм со скрытым термическим оксидом SiO₂ (0,05—1,9 мкм). Показано, что полученные КНИ-пластины обладают высокими электрофизическими характеристиками, пригодными для создания КМОП СБИС, СВЧ БИС, оптоэлектронных приборов и различных сенсоров (давления, температуры, излучения) [5].

КНИ-структуры в технологии СБИС

С начала семидесятых годов развитие микроэлектронной техники следует закону Мура — производительность микропроцессоров удваивается каждые 18 месяцев. По мнению зарубежных и отечественных специалистов, развитие микроэлектроники будет проходить в направлении дальнейшего уменьшения топологических норм до 30—50 нм, обеспечивая реальный переход к нанoeлектронике. Предполагается, что уже к 2008 г. длина каналов КМОП-транзисторов уменьшится до 20—30 нм в большинстве вычислительных систем [6]. В настоящее время размер ключевых элементов интегральных схем быстро приближается к 50 нм. Несмотря на прорыв отдельных фирм (Intel, NEC, Lucent Technology) за область меньше 50 и даже 30 нм, физические и технологические пределы могут существенно затормозить прогресс микроэлектроники, основанный на масштабированном уменьшении размеров элементов в рамках стандартной КМОП-технологии на объемном кремнии [7]. Единственной альтернативой сегодня являются приборы на КНИ-структурах.

Однако переход на новые типы приборов требует обширной деятельности по разработке и проектированию новых библиотечных топологических элементов, технологических процессов, логических элементов и новой архитектуры чипов. Вместе с тем сохраняются возможности адаптации существующих конструктивных и технологических решений стандартной КМОП-технологии к КНИ-подложкам. Сочетание этих двух подходов уже про-

Таблица 1

Сравнительные оценки пригодности КНИ-пластин, изготовленных разными методами, для проектной нормы 0,1 мкм

Параметр	Метод изготовления КНИ-пластин				Примечания
	SIMOX	Smart-cut	ELTRAN	DeleCut	
Толщина слоя Si 30—100 нм	Хор.	Хор.	Удовл.	Отл.	Импантация и окисление вместо полировки обеспечивают воспроизводимость толщины
Разброс толщины Si ±5 %	Отл.	Хор.	Хор.	Отл.	Нет проблем на существующем оборудовании
Плотность дислокаций $\leq 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$	Удовл.	Удовл.	Удовл.	Удовл.	ОДУ характерны для всех методов с плотностью 10^4 см^{-2}
Плотность HF-дефектов $\leq 1 \text{ см}^{-2}$	Плохо	Плохо	Хор.	Плохо	SIMOX ITOX и ELTRAN достигли 0,1 дефект/см ²
Плотность BOX-дефектов (Seco) $\leq 1 \text{ см}^{-2}$	Плохо	Хор.	Отл.	Отл.	Включения частиц Si для SIMOX является критическим
Шероховатость Si/BOX $\leq 1 \text{ нм}$	Плохо	Хор.	Хор.	Отл.	Шероховатый интерфейс для Si/SiO ₂ в SIMOX и атомно плоский для DeleCut
Плотность BOX-дефектов (GOI) $\leq 1 \text{ см}^{-2}$	Удовл.	Хор.	Отл.	Отл.	Исходное качество термического оксида для BOX в методе DeleCut
Пригодность для 300-миллиметровых пластин	Удовл.	Хор.	Удовл.	Хор.	КНИ Smart Cut поставляется в больших объемах для CPU AMD Hammer
Основные недостатки	Низкий выход, высокие температуры отжига	Мягкая полировка, HF-дефекты	Гидролиз, эпитаксия	HF-дефекты	Расходящиеся по методам технологии, низкий объем рынка для всех методов, за исключением Smart Cut

демонстрировали корпорации IBM, Sony и Toshiba, объявившие в марте 2001 г. о создании корпорации для разработки технологии производства "суперкомпьютеров-на-чипе". Главным материалом таких чипов будут структуры КНИ. Фирма IBM имеет опыт создания и производства трех поколений RISC-процессоров типа RS-6000 на КНИ-пластинах собственного производства (IBM, 1999 г.). Аналогичный альянс создан фирмами Motorola и Advanced Micro Devices (AMD) для адаптации технологии изготовления их 64-разрядных процессоров G4 PowerPC и Hammer, выполненных на объемном кремнии, к 0,18-микрометровой КНИ-технологии (Motorola, 2000 г.). В 2002 г. в лидеры вышла фирма AMD Corp., которая на основе лицензионной библиотеки IBM выпустила высокоэкономичный сверхбыстрый процессор Claw-Hammer для переносных персональных компьютеров и серверов, изготовленный на Smart Cut® КНИ-пластинах по 0,13-микрометровой технологии (AMD, 2002 г.). Этот процессор на 20—25 % производительнее процессора Athlon XP с той же тактовой частотой, хотя и потребляет не большую, чем Athlon XP мощность.

КНИ-структуры в технологии нанотранзисторов

Наиболее перспективными структурами для нанотранзисторов также считаются КНИ-структуры. В мире разработано несколько вариантов конструкций КНИ КМОП-нанотранзисторов. Это классические транзисторы с планарным поликремниевым затвором, транзисторы на ультратонких (до 10 нм) слоях кремния (UT SOI MOSFET), транзисторы с планарным затвором (in-plan-gate — IPG), транзисторы с двойным затвором (double gate — DG), а также транзисторы, использующие технологию опоясывающего затвора (gate all around — GAA) для минимизации последствий накопления заряда в скрытом оксиде, в том числе так называемые "вертикальные" нанотранзисторы.

Использование КНИ-структур позволяет уменьшать длину канала МОП-транзистора до 15 нм (см. например [7]), а дизайн двойного затвора позволяет достичь длины канала 5—6 нм [6]. В КНИ-транзисторе вклады квантовых эффектов не являются доминирующими, и нанотранзистор ведет себя подобно классическому субмикронному КМОП-транзистору кремниевой микроэлектроники. Этот подход был опробован в ИФП СО РАН с использованием стандартной оптической литографии и плазмохимии для достижения размеров менее 100 нм. Были разработаны, изготовлены и исследованы характеристики тестовых полевых КНИ-транзисторов и логических элементов с размерами около 100 нм. При толщине отсеченного слоя кремния 100 нм и концентрации бора в нем $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ классические *n*-канальные транзисторы имеют минимальную длину для канала без смыкания менее

100 нм. В *p*-канальных транзисторах минимальная длина канала без смыкания около 200 нм. Транзисторы показывали классические характеристики с крутизной около 100 и 120 мВ/дек для *n*- и *p*-канальных транзисторов соответственно без заметных "king"-эффектов. Токи утечек транзисторов существенно меньше 10^{-9} А при ширине канала 20 мкм [3].

Другим вариантом является переход к неклассическим конструкциям нанотранзисторов [6]. В рамках этого направления в ИФП СО РАН были разработаны, изготовлены и исследованы характеристики полевых КНИ-нанотранзисторов с латеральными затворами и размерами элементов в нанометровом диапазоне [8, 9]. При толщине отсеченного слоя кремния 5—50 нм длина канала транзистора уменьшалась до 40—50 нм. Электронная литография сфокусированным электронным пучком при использовании высокомолекулярного полиметилметакрилата ($MW = 1\,000\,000$ и $MW = 2\,000\,000$) в качестве резиста позволила изготовить планарные кремниевые (КНИ) полевые транзисторы четырех конструкций. Были изготовлены нанотранзисторы на легированном слое кремния с одним и двумя расщепленными латеральными затворами с минимальными размерами элементов до 20 нм (рис. 1, см. вторую сторону обложки) и на нелегированном канале с дополнительными затворами из титана или поликремния, лежащими над каналом поверх подзатворного оксида толщиной 10 нм (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Создание дополнительных затворов потребовалось из-за чрезвычайно низких емкостей латеральных затворов при использовании в качестве изолятора двуокиси кремния. Приборы с латеральным затвором обладают прекрасными высокочастотными характеристиками, однако для модуляции сильно легированных каналов требуются напряжения на затворе в десятки и сотни вольт. Альтернативным вариантом для литографического разрешения 10—20 нм является применение в качестве изолятора диэлектриков с большой диэлектрической постоянной (например, SrBaTiO₃).

Переход к нанотранзисторам неизбежен для дальнейшего прогресса в информационных технологиях, поскольку только на этом пути в ближайшем будущем возможно изготовление терагерцевых процессоров и терабитных схем памяти.

КНИ-структуры в экстремальной электронике

Интерес к КНИ-структурам вызван не только перспективностью данного материала для миниатюризации ИС и возможностью перехода к нанотехнологии. КНИ-подложки обеспечивают полную электрическую изоляцию отдельных приборов на чипе (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Это ведет к целому набору достоинств: увеличение быстродействия, снижение энергопотребления, воз-

возможность создания радиационно стойких схем и схем, работающих при высоких температурах (вплоть до 350 °С).

Основными причинами деградации КМОП СБИС при радиационных воздействиях являются поверхностные и межслойные ионизационные эффекты, связанные с накоплением заряда в подзатворных и разделительных диэлектриках, а также на границах раздела Si/SiO₂. Эти эффекты оказывают наибольшее влияние на характеристики МОП-транзисторов в КМОП ультрабольших интегральных схемах (УБИС), ограничивая их работоспособность на уровне до 10³ Гр. Существенное увеличение до 5 · 10⁵ Гр достигнуто французской фирмой TEMIC при переходе на КНИ-пластины, изготовленные по SIMOX-технологии, и к специальной технологии БиКМОП на КНИ-пластинах (Durci Mixtte Isolant Logico Lineaire — DMILL) [10]. Таким образом, переход на КНИ-структуры весьма эффективен. Данная технология обеспечивает работоспособность КМОП ИС при дозах свыше 10⁵ Гр. Технология двойного вертикального затвора реализована в конце 2001 г. фирмой IBM в виде так называемых "плавниковых" КНИ КМОП-нанотранзисторов с двойным вертикальным затвором (Fin FET, или double vertical gate — DG). Оптимизация новейших КНИ КМОП-технологий и разработка оригинальных конструкций КМОП-нанотранзисторов может обеспечить дополнительные преимущества по иммунитету к ионизирующему излучению по сравнению с DMILL-технологией на SIMOX-пластинах.

Различают конструктивные и технологические методы понижения чувствительности КНИ КМОП УБИС к воздействию ионизирующего излучения. Существуют методы адаптации известных конструктивных и технологических решений стандартной КМОП-технологии к КНИ-подложкам. Этот подход уже продемонстрировали корпорации IBM и AMD Согр. в своих микропроцессорах, изготовленных на КНИ-пластинах по 0,13-микрометровой технологии.

В ИФП СО РАН были изготовлены КНИ-пластины методом DeleCut и на их основе субмикронные (0,5—0,2 мкм) КМОП-транзисторы, элементы логики. Испытания данных транзисторов на радиационную стойкость показали, что чувствительность к гамма-радиации у них значительно ниже (до 10⁵ Гр), чем у радиационностойких КМОП приборов (до 10³ Гр), изготовленных на объемном кремнии. Кроме того, КНИ КМОП-транзисторы сохраняли свои электрические параметры при температурах до 250—300 °С.

Были исследованы температурные зависимости токов утечек для *n*- и *p*-канальных транзисторов. Токи утечки измерялись при $U_g = 0$ и $U_d = \pm 3$ В. Токи увеличиваются от 10⁻² до 40 нА при возрастании температуры от 50 до 250 °С. Это означает,

что схема, содержащая 10⁶ транзисторов, будет потреблять в "горячем" состоянии 40 мА тока в ждущем режиме и расходовать мощность 120 мВт. Измерены затворные характеристики КНИ КМОП-транзисторов ($U_d = 0,1$ В). С повышением температуры до 250 °С пороги транзисторов, которые при нормальной температуре составляют около ± 1,4 В, уменьшаются на 0,5 В. Кроме того, почти в 2 раза уменьшается крутизна транзисторов при температурах выше 200 °С. Эти изменения не влияют на работоспособность тестовых КНИ КМОП ИС при повышенных температурах.

Были исследованы процессы деградации физических и приборных свойств устройств на КНИ-структурах при спецвоздействиях до доз 10⁵ Гр. Исследования показали [11], что в КНИ-структурах под действием облучения происходит накопление положительного заряда, значение которого больше, чем заряд в МОП-структуре при тех же толщине диэлектрика и дозе облучения. Изменения плотности ловушек в КНИ-структуре при облучении электронами и гамма-квантами практически не наблюдается вплоть до доз 10⁵ Гр. В КНИ КМОП ИС радиационная стойкость растет при уменьшении толщины подзатворного оксида. При толщине подзатворного диэлектрика 12 нм транзисторы практически не меняют своих характеристик при облучении до 10⁴ Гр. При толщине 18 нм изменение порогов уже заметно, но *n*-канальные транзисторы остаются закрытыми при нулевом напряжении на затворе до дозы облучения около 10⁵ Гр. Порог *p*-канальных транзисторов возрастает достаточно мало, что не приводит к их запираению и выходу схем из строя. Инверторы также остаются работоспособными до дозы около 10⁵ Гр для схем с тонким подзатворным оксидом (рис. 4).

Причиной выхода из строя части схем при дозе облучения выше 3 · 10⁴ Гр является отпирание тылового *n*-канального транзистора. Для повышения радиационной стойкости схем необходимо пода-

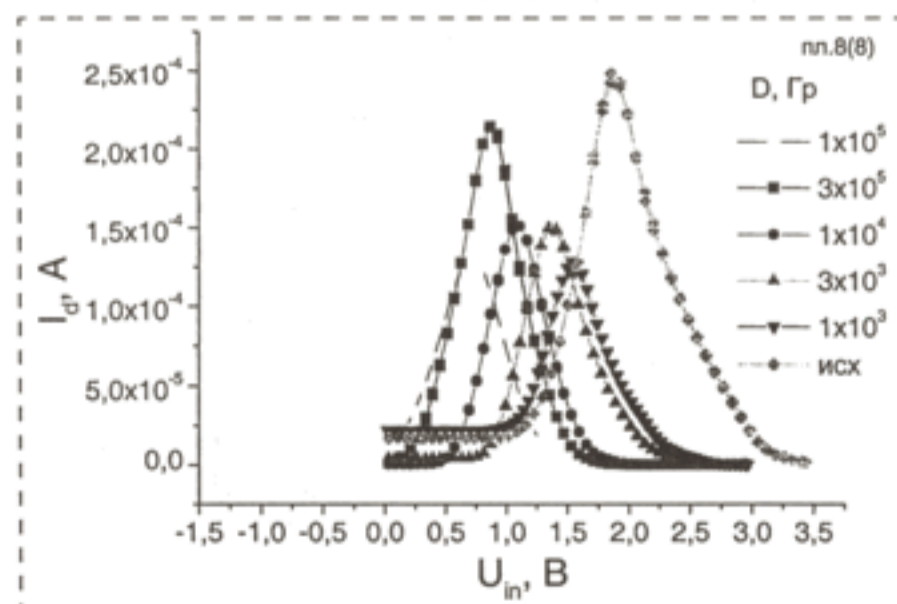


Рис. 4. Изменение статистических характеристик инвертора при гамма-облучении до доз 10⁵ Гр

вать запирающее напряжение на подложку. При отрицательном напряжении на подложке — 10 В транзисторы и схемы остаются работоспособными до доз 10^5 Гр. Предложены технологические и схемотехнические решения, позволяющие расширить эксплуатационные режимы КНИ ИС выше 300°C и дозы 10^5 Гр.

КНИ КМОП ИС с полностью изолированными транзисторами обладают иммунитетом к воздействию электромагнитного импульса и однократному воздействию сильно ионизирующих частиц. В них отсутствует эффект защелкивания [10]. Эти достоинства делают КНИ СБИС перспективными приборами для использования в бортовых системах военной и космической техники.

Высокочастотные приборы на КНИ-структурах

В последнее время наблюдается быстрый рост числа устройств беспроводной связи. Катализатором этого процесса явилось развитие мобильной, а в последующем цифровой сотовой связи, с одной стороны, и переносных компьютеров с периферией и стационарными компьютерами, с другой. К настоящему времени цифровые технологии и протоколы обменов для такого рода устройств (например, WiFi или Bluetooth), позволяющие объединять в сложные многоуровневые системы большинство устройств беспроводной связи. Эксперты предсказывают бурный рост этого сегмента рынка в ближайшие пять лет. Например, периферийные устройства с гигагерцовым радиоканалом (2–6 ГГц) на гибридных НЕМТ-транзисторах на GaAs появились только в прошлом году, но уже сегодня в мире их насчитывается около 50 млн. По прогнозам, число устройств с беспроводной связью превысит в 2005 г. 1,5 млрд.

В настоящее время этот рынок обеспечен гибридными 10–20-долларовыми ИС на GaAs и SiGe с низким уровнем интеграции. Это автоматически ведет к удорожанию устройств с радиоканалом на 30–100 долл. Требуется разработка СБИС и УБИС со встроенным радиоканалом, удорожающим все устройство не более чем на 5 долл. Специалисты фирм Honeywell и Oki Corp. отдают предпочтение КНИ СБИС [12, 13]. Для СБИС с радиоканалом опорная подложка КНИ-структуры должна быть

Таблица 2

Потери СВЧ мощности в микроstriповых линиях на подложках, подобных арсениду галлия и КНИ-подложках с различным удельным сопротивлением

Подложка	Удельное сопротивление, Ом · см	Потери, дБ/мм
Полуизолирующий GaAs	10^6	0,03
Низкоомная	50	0,54
Высокоомная	10^3	0,05

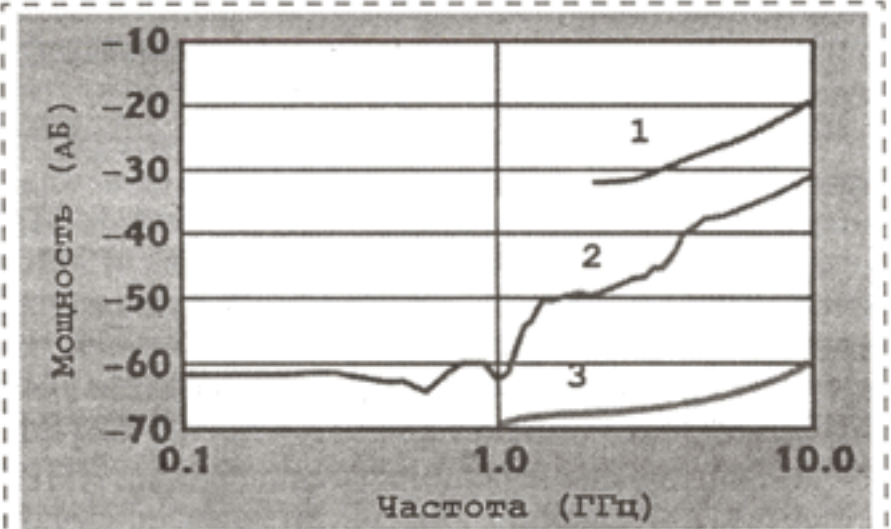


Рис. 5. Частотная зависимость ослабления мощности перекрестных наводок между шинами на объемном кремнии (1) и на низкоомных (2) и высокоомных (3) КНИ-подложках при расстоянии между ними 160 мкм [13]

из высокоомного кремния, выращиваемого методом бестигельной зонной плавки (БЗП). Такой материал обладает поглощением СВЧ излучения на уровне 0,05 дБ/мм в сравнении с полуизолирующим GaAs — 0,03 дБ/мм (табл. 2, [13]). На рис. 5 представлены графики потерь СВЧ излучения в объемном кремнии, стандартных КНИ ИС и оптимизированных КНИ ИС на высокоомных подложках.

В ИФП СО РАН на основе высокочистого БЗП-кремния собственного производства изготовлены высокоомные КНИ-структуры [14, 15]. Продемонстрировано сохранение свойств исходного кремния в процессе изготовления КНИ-структур методом DeleCut [14], показана стабильность и малый разброс параметров электрофизических и приборных свойств КНИ-структур на БЗП-кремнии в ходе терморadiационных обработок [15].

Мы предполагаем, что именно сегмент рынка КНИ, связанный с производством сетевых КНИ СБИС беспроводной связи окажется локомотивом для массового применения КНИ-пластин в микроэлектронике.

Оптоэлектронные ключи, актюаторы и сенсоры на КНИ-структурах

КНИ-структуры давно привлекали внимание разработчиков оптоэлектронных и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Большая разница в оптических коэффициентах преломления для Si и SiO₂ (6,55 и 1,46 для лазера на парах иода при $\lambda = 383; 3,44; 1$ мкм, для светодиодов с эрбием при $\lambda = 1,54$ мкм) и низкие потери в волноводах (0,1 дВ/см) делают эту систему универсальной для большинства оптоэлектронных приложений: мультиплексоров, демультимплексоров, триггеров, усилителей и электрически управляемых дифракционных решеток (см. например, обзор [16]). В отличие от волноводов на стекле, использование диапа-

зона 1,3—1,6 мкм делает высокопроизводительные волноводные схемы полностью совместимыми с существующими КМОП СБИС и УБИС.

Огромная разница в скоростях избирательного травления для Si и SiCO₂ (до 10⁶) [17] и совместимость с высокоразрешающей интегральной МОП-технологией упрощают методы создания МЭМС. Особенно перспективны для этих двух приложений многослойные КНИ-структуры, поскольку они открывают прямой путь к трехмерной интеграции в оптоэлектронных и микросистемных устройствах [18].

Отличительная особенность сенсоров на КНИ-структурах — низкий уровень шумов в широком диапазоне рабочих температур. Накопленный в ИФП СО РАН опыт разработки и создания датчиков давления, газовых потоков и температур на КНИ-структурах [19] показал также возможность двух—трехкратного увеличения эксплуатационных диапазонов сенсорных устройств. Возможность их интеграции с операционными усилителями, ЦАП и АЦП на КНИ-структурах позволяет разрабатывать уникальные кремниевые "песчинки", способные автономно собирать информацию о параметрах окружающей среды в труднодоступных местах и в экстремальных условиях и передавать ее в "интеллектуальные" сети сенсоров и актюаторов [20].

КНИ-структуры для систем-на-чипе

Предполагается, что КНИ-структуры найдут широкое применение в большинстве необходимых для практики сравнительно недорогих однокристалльных КНИ-микросистемах, ориентированных на различные применения в любых климатических условиях, на относительно невысокую при этом стоимость, высокую эффективность и надежность работы. Отличительной особенностью таких микросистем будут интегрированные функции оптической и радиосвязи и наличие интегрированных сенсоров и актюаторов [20].

Особенно перспективным, по нашему мнению, является использование в КНИ-структурах в качестве подложек пластин БЗП-кремния. Высокоомная БЗП-подложка в сочетании с декананометровым приборным слоем, отсеченным от нее тонким скрытым оксидом, позволит производить КНИ СБИС и УБИС типа систем-на-чипе со встроенным гигагерцовым радиоканалом для беспроводных сетевых технологий.

Заключение

Проведенные исследования свойств КНИ-структур, КНИ-сенсоров, КНИ МОП-транзисторов и интегральных схем позволяют предложить технологию DeleCut в качестве базовой промышленной технологии производства КНИ-пластин и КНИ-микросхем с глубоко субмикронными топологическими нормами.

Актуальность поисковых исследований и разработки технологий изготовления КНИ-нанотранзисторов и интегральных схем определяется прежде всего тем, что в обозримом будущем прогнозируется разработка и производство на основе КНИ-структур новейших интеллектуальных систем гигагерцового и терабитного диапазонов интегрированными функциональными возможностями беспроводной и волоконно-оптической связи, сенсорами и актюаторами.

Высокопроизводительные БиКМОП СБИС и УБИС на основе КНИ-структур являются прорывной технологией, имеющей двойное применение. Их разработка и реализация в России позволит:

- создать отечественные межвидовые комплектующие изделия на основе КНИ-структур, не уступающие мировому уровню;
- обеспечить новый технологический уровень для широкого класса устройств микроэлектроники, интегральной оптоэлектроники и микросистемной техники.

Применение разрабатываемых методов и средств позволит в 10 и более раз снизить производительность и терморационную стойкость оптоэлектронных компонентов, в 2—3 раза увеличить их эксплуатационный диапазон по температурам, на 25—30 % снизить энергопотребление и уменьшить в 2—10 раз массогабаритные показатели.

Список литературы

1. Bruel M. Silicon on insulator material technology // *Electron. Lett.* 31, 1201 (1995).
2. Попов В. П., Антонова И. В., Стась Ф. В., Миронова Л. В. Способ изготовления структуры кремний-на-изоляторе // Патент РФ № 2164719. Приоритет от 27.09.99. Получен 27.03.2001.
3. Stengl R., Gösele U. Method for bubble-free bonding of silicon wafers // U. S. Patent N US5024723 from 11/1989.
4. Реутов В. Ф., Ибрагимов Ш. Ш. Способ изготовления тонких пластин кремния // Авторское свидетельство СССР № 1282757 от 30.12.1983.
5. Попов В. П., Антонова И. В., Французов А. А., Наумова О. В., Сапожникова Н. В. Кремний-на-изоляторе: материал и приборные структуры // *Микросистемная техника.* 2001. № 10. С. 35—43.
6. International Technology Roadmaps for Semiconductors (ITRS-01), November 2001, Santa-Clara, Calif., USA, 2001.
7. Chau R., Kavalieros J., Schenker R., Roberds B., Lionberger D., Barlage D., Doyle B., Arghavani R. and Murthy A. Abstracts of Session 3: CMOS Devices-Sub-50nm Devices. In: Abstracts of International Electron Device Meeting (IEDM—2000) // Technical Program, San-Francisco (2000).
8. Hastaushev Y. V., Gavrilova T. A., Kachanova M., Nenashva L., Kolosanov V. A., Naumova O. V., Popov V. P., Aseev A. L. 20-nm Resolution of electron lithography for the nano-devices on ultrathin SOI film // *Materials Science and Engineering C.* 2002. V. 19. P. 189—192.
9. Настаушев Ю. В., Гаврилова Т. А., Асеев А. Л., Колосанов В. А., Качанова М. М., Ненашева Л. А., Антонова И. В., Наумова О. В., Попов В. П. Применение электронной литографии для изготовления кремниевых (КНИ) устройств микроэлектроники // *Микроэлектроника* (в печати)
10. *Radiation* // TEMIC Semiconductors. June 1999. P. 1—5.

11. Артамонов А. С., Никифоров А. Ю., Согоян А. В., Французов А. А., Попов В. П. Экспериментальное исследование радиационного поведения SMART-CUT КНИ-структур // ВАИТ, Научно-технический сборник Радиационная стойкость электронных систем ("Стойкость—2001"). 2001. Вып. 4. С. 37—38.

12. Fukudo Y., Ito S., Ito M. SOI-CMOS device technology // OKI Technical Review 2001. N 185. V. 68. P. 54—57.

13. Yue J., Kriz J. SOI CMOS technology for RF system-on-chip application // Microwave Journ., Jan. 2002.

14. Antonova I. V., Neustroev E. P., Popov V. P., Stas V. F., Obodnikov V. I. Donor center formation in hydrogen implanted silicon // Physica B. 1999. V 70. N 1 & 2. P. 1—5.

15. Popov V. P., Antonova I. V., Stas V. F., Mironova L. V., Neustroev E. P., Gutakovskii A. K., Franzusov A. A., Feofanov G. N. Structural and Electrical Properties of Silicon On Insulator Structures Manufactured on FZ-and Cz-Silicon by Smart-Cut Technology // P. L. F. Hemment (eds.). Perspectives, Science and Technologies for Novel SOI Devices, Kluwer. 2000. P. 47—54.

16. Jalali B., Yegnanarayanan S., Yoon T., Yoshimoto T., Rendina I., Coppinger F. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics // IEEE Journ. of Selected Topics in quantum electronics. 1998. V. 4. N 6. P. 938—947.

17. Tong Q.-Y., Gosele U. Semiconductor wafer bonding: science and technology. John Wiley and Sons, Inc., N.-Y. 1999. 297 p.

18. Current M. I., Farrens S. N., Fuerfanger M., Kang S., Kirk H. R., Malik I. J., Feng L., Henley F. J. Atomic-Layer Cleaving and Non-contact Thinning and Thickening for Fabrication of Laminated Electronic and Photonic Materials // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2001. V. 681E.

19. Гридчин В. А., Любимский В. М., Неизвестный И. Г., Попов В. П., Антонова И. В., Придачин Н. Б., Ободников В. И. Создание тензорезистивных сенсоров на основе сильно легированных бором структур кремний-на-изоляторе // Материалы II Российской конференции "Кремний—2000", февраль 2000.

20. Gelsinger P. P. Expanding Moore's law. Intel Developer Forum, Spring 2002.

УДК 621.049.77:681.586.32:539.319

Е. С. Горнев, д-р техн. наук, Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
М. Ф. Равилов, И. М. Романов, канд. техн. наук, С. О. Ранчин,
АООТ НИИМЭ и "Микрон"

МИКРООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ОТРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ — МИКРОЗЕРКАЛ

Дан обзор микрооптических устройств, в которых основным элементом является микрозеркало: волоконно-оптических переключателей; устройств управления лучом; отражателей; микросканеров; матриц микрозеркал.

Микроэлектромеханические (МЭМ) структуры (любой элемент, выполненный по указанной технологии) изготавливают, используя процессы объемной или поверхностной микрообработки. При объемной микромеханической обработке (ОМО) структуры "высекают" непосредственно в объеме подложки, таким образом формируя 3D-элементы. Подложки травятся, используя жидкостное, либо сухое травление. Обработка может осуществляться как с одной, так и с обеих сторон пластины, при этом второй вариант требует совмещения структур с лицевой и обратной сторон пластины. В других случаях МЭМ структуры формируют на поверхности подложки, не затрагивая ее объема. Обычно используется жертвенный слой, действующий как "временная платформа", которая стравливается после формирования МЭМ структуры.

Процесс этого типа относится к технологии поверхностной микромеханической обработки (ПМО). При этом жертвенный слой необходимо выбрать так, чтобы обеспечить хорошую селективность травления относительно других материалов устройства.

МЭМ технология и технология микрооптики совместимы с технологией изготовления ИС. Это дает возможность производить устройства в больших количествах по низкой стоимости, используя групповые методы обработки. Стандартный процесс изготовления ИС ограничен поверхностью пластины (Si или GaAs) с охватом объема пластины только на несколько микрометров. Использование технологических процессов изготовления ИС, предназначенных для точного управления глубиной травления и формированием боковых стенок внутри объема, позволяет получить "трех-

мерную" интегральную схему, или микромеханическую схему. Микрообработка — это общее требование к процессам микрооптических и МЭМ-технологий. Пересечение трех главных областей — электроники, механики и оптики, представленных в появляющейся микрооптике и микромеханике (МОЭМС) — требуется для успешной интеграции в системы оптической обработки.

За прошедшие несколько лет было предложено и показано много областей применения МОЭМС. Большинство этих примеров основывались на миниатюрных системах с микрооптикой и микромеханикой, где изготовление всех оптических и МЭМ компонентов на одном кристалле не было необходимым.

Разработка в начале 90-х годов Лос-Анжелесским Калифорнийским Университетом (UCLA) поверхностной микромеханической микропетли [1] и микрооптики в "свободном пространстве" [2—4] привела к появлению микрооптической скамьи (МОС), которая привлекла большое внимание как инструмент оптической обработки на кристалле. Интегральная оптика в свободном пространстве имеет много преимуществ по сравнению с волноводным подходом: большой пространственный диапазон (ограниченный дифрак-

11. Артамонов А. С., Никифоров А. Ю., Согоян А. В., Французов А. А., Попов В. П. Экспериментальное исследование радиационного поведения SMART-CUT КНИ-структур // ВАИТ, Научно-технический сборник Радиационная стойкость электронных систем ("Стойкость—2001"). 2001. Вып. 4. С. 37—38.

12. Fukudo Y., Ito S., Ito M. SOI-CMOS device technology // OKI Technical Review 2001. N 185. V. 68. P. 54—57.

13. Yue J., Kriz J. SOI CMOS technology for RF system-on-chip application // Microwave Journ., Jan. 2002.

14. Antonova I. V., Neustroev E. P., Popov V. P., Stas V. F., Obodnikov V. I. Donor center formation in hydrogen implanted silicon // Physica B. 1999. V 70. N 1 & 2. P. 1—5.

15. Popov V. P., Antonova I. V., Stas V. F., Mironova L. V., Neustroev E. P., Gutakovskii A. K., Franzusov A. A., Feofanov G. N. Structural and Electrical Properties of Silicon On Insulator Structures Manufactured on FZ-and Cz-Silicon by Smart-Cut Technology // P. L. F. Hemment (eds.). Perspectives, Science and Technologies for Novel SOI Devices, Kluwer. 2000. P. 47—54.

16. Jalali B., Yegnanarayanan S., Yoon T., Yoshimoto T., Rendina L., Coppinger F. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics // IEEE Journ. of Selected Topics in quantum electronics. 1998. V. 4. N 6. P. 938—947.

17. Tong Q.-Y., Gosele U. Semiconductor wafer bonding: science and technology. John Wiley and Sons, Inc., N.-Y. 1999. 297 p.

18. Current M. I., Farrens S. N., Fuerfanger M., Kang S., Kirk H. R., Malik I. J., Feng L., Henley F. J. Atomic-Layer Cleaving and Non-contact Thinning and Thickening for Fabrication of Laminated Electronic and Photonic Materials // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2001. V. 681E.

19. Гридчин В. А., Любимский В. М., Неизвестный И. Г., Попов В. П., Антонова И. В., Придачин Н. Б., Ободников В. И. Создание тензорезистивных сенсоров на основе сильно легированных бором структур кремний-на-изоляторе // Материалы II Российской конференции "Кремний—2000", февраль 2000.

20. Gelsinger P. P. Expanding Moore's law. Intel Developer Forum, Spring 2002.

УДК 621.049.77:681.586.32:539.319

Е. С. Горнев, д-р техн. наук, Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
М. Ф. Равилов, И. М. Романов, канд. техн. наук, С. О. Ранчин,
АООТ НИИМЭ и "Микрон"

МИКРООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ОТРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ — МИКРОЗЕРКАЛ

Дан обзор микрооптических устройств, в которых основным элементом является микрозеркало: волоконно-оптических переключателей; устройств управления лучом; отражателей; микросканеров; матриц микрозеркал.

Микроэлектромеханические (МЭМ) структуры (любой элемент, выполненный по указанной технологии) изготавливают, используя процессы объемной или поверхностной микрообработки. При объемной микромеханической обработке (ОМО) структуры "высекают" непосредственно в объеме подложки, таким образом формируя 3D-элементы. Подложки травятся, используя жидкостное, либо сухое травление. Обработка может осуществляться как с одной, так и с обеих сторон пластины, при этом второй вариант требует совмещения структур с лицевой и обратной сторон пластины. В других случаях МЭМ структуры формируют на поверхности подложки, не затрагивая ее объема. Обычно используется жертвенный слой, действующий как "временная платформа", которая стравливается после формирования МЭМ структуры.

Процесс этого типа относится к технологии поверхностной микромеханической обработки (ПМО). При этом жертвенный слой необходимо выбрать так, чтобы обеспечить хорошую селективность травления относительно других материалов устройства.

МЭМ технология и технология микрооптики совместимы с технологией изготовления ИС. Это дает возможность производить устройства в больших количествах по низкой стоимости, используя групповые методы обработки. Стандартный процесс изготовления ИС ограничен поверхностью пластины (Si или GaAs) с охватом объема пластины только на несколько микрометров. Использование технологических процессов изготовления ИС, предназначенных для точного управления глубиной травления и формированием боковых стенок внутри объема, позволяет получить "трех-

мерную" интегральную схему, или микромеханическую схему. Микрообработка — это общее требование к процессам микрооптических и МЭМ-технологий. Пересечение трех главных областей — электроники, механики и оптики, представленных в появляющейся микрооптике и микромеханике (МОЭМС) — требуется для успешной интеграции в системы оптической обработки.

За прошедшие несколько лет было предложено и показано много областей применения МОЭМС. Большинство этих примеров основывались на миниатюрных системах с микрооптикой и микромеханикой, где изготовление всех оптических и МЭМ компонентов на одном кристалле не было необходимым.

Разработка в начале 90-х годов Лос-Анжелесским Калифорнийским Университетом (UCLA) поверхностной микромеханической микропетли [1] и микрооптики в "свободном пространстве" [2—4] привела к появлению микрооптической скамьи (МОС), которая привлекла большое внимание как инструмент оптической обработки на кристалле. Интегральная оптика в свободном пространстве имеет много преимуществ по сравнению с волноводным подходом: большой пространственный диапазон (ограниченный дифрак-

цией), неинтерференционный оптический путь, трехмерное оптическое соединение и возможность оптической сигнальной обработки (т. е. оптика Фурье). Однако довольно сложно интегрировать оптику в свободном пространстве на одной подложке, поскольку большинство монолитно изготовленных оптических элементов лежат на поверхности подложки. Поэтому при реализации миниатюрной оптической скамьи были применены ПМО и ОМО (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Для преобразования изготовленных на подложке оптических пленочных структур в трехмерную микрооптику обычно используются поверхностные микромеханические петли и пружинные захваты (рис. 2, см. третью сторону обложки). Принцип работы элемента следующий: при поднятии пластины вверх, верхняя часть упругого фиксатора проскальзывает в прорезь на пластине и защелкивается в более узкой части прорези, таким образом, предотвращая дальнейшее движение пластин.

Вращательная пружина, соединяющая упругий фиксатор с подложкой, создает упругую силу, которая прижимает фиксатор к подложке, тем самым, фиксируя пластину в заданном положении. Длина упругого фиксатора определяет угол между пластиной и подложкой. Применение таких элементов открыло новую возможность реализации интегральной оптики в свободном пространстве. При этом кремниевая подложка используется как микрооптическая скамья, на которой можно разместить микролинзы, микрозеркала, решетки и другие оптические компоненты и совместить их на этапе прорисовки топологии. Используя расположенные на кристалле микроактюаторы [5, 6] и микропозиционеры, такие как вращательные и передаточные платформы [7], можно достигнуть хорошей юстировки. При использовании гибридной интеграции с активными оптиче-

скими устройствами можно создать целую оптическую систему.

Микрооптические пластины, используемые для зеркал, расщепителей луча, массивов микролинз, решеток и коллиматоров, обрабатывают поверхностной микромеханической обработкой и высвобождают после изготовления с подложки селективным удалением жертвенного материала (слои осажденного SiO_2 или силикатного стекла) с применением плавиковой кислоты. После высвободительного травления поликремниевые пластины с микрооптическими элементами способны свободно вращаться на петлях вокруг оси.

На поликремневую поверхность оптического элемента, как правило, наносится слой золота. Для пластин с зонами Френеля или полностью отражающих микрозеркал требуется толстый слой золота, чтобы полностью блокировать свет, проходящий через темные зоны. Для частично пропускающих зеркал или расщепителей луча используется более тонкий слой золота.

Наиболее распространены следующие виды устройств, основным элементом которых являются микрозеркало:

- волоконно-оптические переключатели;
- устройства управления лучом;
- отражатели;
- микросканеры;
- матрицы микрозеркал.

1. Волоконно-оптические переключатели

На современном этапе развития телекоммуникационной сферы особые требования предъявляются к скорости передачи данных с одновременным частотным уплотнением каналов связи. Таким требованиям отвечают волоконно-оптические переключатели: сравнительно высокая скорость переключения, нечувствительность к поляризации, низкий уровень потерь в широком диапазоне длин волн. При этом групповые методы производства, приме-

няемые в микроэлектронике, позволяют изготавливать изделия по низкой цене.

Волоконно-оптические переключатели изготавливают как по технологии ПМО, так и технологии ОМО. При использовании ОМО во многих случаях дальнейшая сборка не требуется (необходимы только установка оптических волокон и корпусирование). Так, оптический обводной переключатель 2×2 на одном кристалле [8], используемый в волоконном интерфейсе передачи данных (FDDI) в локальных сетях, изготовлен по технологии ПМО. Обводной переключатель применяется в волоконных кольцевых сетях, чтобы исключить неисправные компьютерные узлы и повысить надежность сети. Переключатель также полезен для реконфигурируемых оптоволоконных сетей. "Свободно-пространственные" оптомеханические переключатели имеют ряд преимуществ перед обыкновенными волноводными переключателями. "Свободно-пространственным" подходом можно добиться очень низких вносимых потерь и маленьких перекрестных помех. К тому же после переключения не требуется резервного питания. Для реализации "свободно-пространственных" оптомеханических переключателей были использованы методы объемной микрообработки и скрепления пластин. Однако единая интеграция трудна и требуется сборка.

Переключатель состоит из трехмерного подвижного микрозеркала и четырех направляющих оптоволоконных рельсов (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Четыре многорежимных волокна скомпонованы крест-накрест, а подвижное зеркало располагается в центре. Зеркало состоит из покрытой золотом поликремниевой пластины, закрепленной на скользящей пластине. Отражающая способность зеркала была оценена в 93 %. В такой конструкции переключателя критическим моментом является вырав-

нивание волокон относительно зеркала и друг друга.

Реализуемые по технологии ОМО волоконно-оптические переключатели представлены в работах [9, 10]. В работе [9] предлагается конструкция, которая решает проблему юстировки элементов. Маленькие допуски на юстировку для оптики в свободном пространстве, особенно угловое выравнивание оптического луча относительно принимающего волокна и качество зеркала, представляют главные ограничения создания больших матричных переключателей. Авторы используют самовыровненную структуру, которая позволяет выполнить пассивную юстировку зеркала и оптических волокон, за счет чего значительно уменьшить стоимость производства. Структура выполнена с использованием одноуровневой маски на кремниевой пластине (100). В методе используется ориентационно-чувствительное травление объема пластины. Если в процессе литографии произойдет маленькое отклонение совмещения в масках, зеркало останется под углом 45° к V-канавкам благодаря кристаллографической зависимости процесса жидкостного травления. Полученное таким способом зеркало имело следующие размеры: 185 мкм высотой, 100 мкм в длину и 5 мкм в толщину.

В работе [10] описана конструкция переключателя, изготовленного на КНИ (кремний-на изоляторе) структуре методом глубокого реактивно-ионного травления. Подвижные структуры (зеркало и электростатический актuator) выполнены травлением жертвенного слоя, т. е. удалением части скрытого слоя оксида. Использование КНИ-пластин позволяет добиться однородной глубины травления, так как травление останавливается по достижении скрытого оксида. Высота полученной структуры 75 мкм. Чтобы улучшить отражение зеркала, на него осадил слой золота методом электронно-лучевого осаждения. При толщине зеркала 1,6 мкм

его отражение оставило 80 %. Потери в отражении, равные 17 % (отражение идеально плоского зеркала со слоем золота — 97 %), получаются вследствие рассеяния на шероховатостях поверхности.

2. Устройства управления лучом

Для применения, где просматривается линия между передатчиком и получателем, оптические коммуникационные системы "в свободном пространстве" могут обеспечить громадную экономию энергии по сравнению с радиочастотными (РЧ) аналогами, благодаря плотно сфокусированным лучам. Это приводит к чрезвычайно высокому коэффициенту направленности антенны даже в передатчиках с малой апертурой, таких как микромеханический лазерный передатчик, позволяя обычно достигать преимущества свыше 66 дБ по сравнению с изотропной антенной. При этом виде передатчика можно послать микроваттные сигналы на многокилометровые расстояния с большим отношением сигнал-шум. Однако такие устройства имеют серьезный недостаток: необходимость точной установки по одной прямой источника луча и приемника. В настоящее время системы управления лучом (*beam steering devices*), подобные используемым при связи здания со зданием, или спутниковой перекрестной связи, громоздки, дороги и медлительны. МЭМС скоростные устройства управления лучом имеют потенциал для высокоуровневой интеграции в малые корпуса.

В мире разработаны и другие системы для скоростного управления лучом. Они делятся на две категории: сканирующие микрзеркала и устройства управления лучом в режиме дифракции. Были изготовлены сканирующие микрзеркала [11] и [12], которые имеют большие значения угла отклонения лазерного луча — свыше 28 оптических градусов. Эти зеркала работают на частоте резонанса и не могут обеспечить такое значение отклонения на дру-

гих частотах. В устройствах режима дифракции используется зеркальная матрица, где каждый элемент может передавать луч перпендикулярно плоскости этой матрицы, для того чтобы сдвинуть фазу проходящего света. Такое устройство способно управлять лучом гелий-неонового лазера на ширину свыше шести дифракционных порядков при общем отражении $\pm 2,5$ оптических градусов [13]. При использовании единичного зеркала, работающего в квазистатическом режиме, возрастает оптическая эффективность, по сравнению с применением дифракционной оптики, кроме того, обеспечивается меньшее время задержки, поскольку луч лазера непрерывно падает на приемник. Хотя зеркало более инерционно, за счет более высокой массы, но оно позволяет устойчиво следить за большими углами отклонения луча. В работе [14] описано микрзеркало с двумя степенями свободы, которое разработано и изготовлено через многопользовательский МЭМС процесс MUMPS фирмой *Cronos Integrated Microsystems* [15].

Рис. 4 (см. третью сторону обложки) показывает РЭМ снимок устройства управления лучом. Оно состоит из двух больших пластин ($500 \times 500 \times 4,25$ мкм), соединенных в слоеную структуру слоя из поликремния 1 толщиной 2 мкм, слоя из поликремния 2 толщиной 1,5 мкм и слоя оксида между ними толщиной 0,75 мкм. В этом приборе золото не использовалось в качестве отражающего покрытия по причине большого остаточного растягивающего напряжения. Панель с правой стороны — поддерживающая структура, которая вращается вокруг оси на петлях в плоскости подложки. Панель с левой стороны — само зеркало, прикрепленное к поддерживающей структуре двумя крутящими (торсионными) пружинами U-образной формы. Подвешенная структура приводится в движение через элемент сцепки. Этот элемент

используется, чтобы перенаправить силу, прикладываемую актюатором, на 90° и обеспечить большее расстояние перемещения, чем это могли бы сделать актюаторы. Перенаправляющий силу элемент сцепки такой конструкции способен отклонить зеркало более чем на 45° . Каждая ось приводится в движение с помощью 16 параллельных термических актюаторов Comptois-типа [16]. Термические актюаторы были выбраны благодаря их высокой надежности и большой статической силе, которую они обеспечивают. Тесты показали, что актюаторы способны перемещать зеркало с частотой более чем 200 Гц.

3. Отражатели

Другим типом устройства управления лучом является микромеханический угловой кубический отражатель (УКО), разработанный Калифорнийским университетом UCLA [16], который демонстрирует принцип цифровой передачи данных модулированием интенсивности отраженного света. Описываемые отражатели имеют размеры от 100 до 200 мкм. Измеренная отражающая способность поликремния составляет 24 %, общая отраженная энергия от угла куба равна 1...2 % от падающей энергии. Ортогональность между пластинами составляла примерно 8 мрад. Отражение от каждой поликремниевой пластины модулируется с помощью электростатического привода при напряжении менее 8 В.

УКО используются в оптических системах связи [17, 18] главным образом потому, что в отличие от других оптических компонентов они не слишком чувствительны к разъюстировке. Световой луч, падающий в определенную активную область на внутренней стороне трехстороннего ортогонального угла, отражается обратно вдоль оси, возвращаясь к источнику. Если ортогональность углов куба нарушена, свет не будет отражен обратно к источнику. Таким образом, интенсивность отраженного света можно

модулировать маленькими перемещениями одной или более сторон куба. Данное устройство спроектировано с использованием MUMPS-технологии. Каждый угол куба выполнен четырьмя поликремниевыми поднятыми с поверхности подложки пластинами, прикрепленными к подложке кремниевыми микропетлями, и длинной пластиной, поддерживаемой с каждой стороны лучами длиной 100—200 мкм. Две повернутые пластины образуют правильный угол, а оставшиеся две пластины служат в качестве поддерживающих и юстировочных элементов для УКО. Длинная поддерживаемая пластина функционирует как интегральный отклоняющий актюатор. Эта пластина отклоняется за счет электростатики, таким образом модулируя отраженную интенсивность. Под этой пластиной находятся два электрода: стопорный электрод конца пластины и приводной электрод (рис. 5).

УКО используется как коммуникационное звено системы, которая состоит из цифровых отдельных блоков и одной или нескольких базовых станций. Каждый отдельный блок содержит сенсор, электронную систему УКО, фотодиод и источник энергии. Базовая станция содержит лазер-

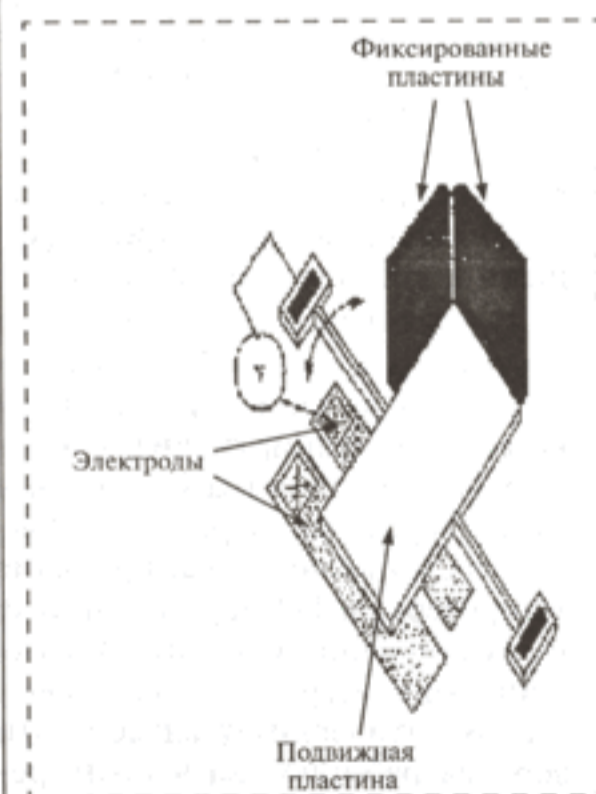


Рис. 5. Схематическое изображение углового кубического отражателя

ный источник и фотосенсор, улавливающий сигнал, отраженный от углового куба. Когда фотодиод определяет закодированный сигнал от запрашивающего лазера, электронная система усиливает, преобразует в цифровой вид информацию с выхода сенсора и передает данные в сдвиговый регистр, который начинает передавать выходной сигнал по одному биту в промежуток времени в форме напряжения, которое воздействует на УКО. Фотодетектор, расположенный около источника, определит переданные данные и демодулирует их в удобную для считывания форму цифровой информации с выхода сенсора. В более совершенных системах связи устройство управления построено таким образом, что базовая станция способна посылать указания дистанционному сенсору.

4. Оптические сканеры

Оптические сканеры используются в таких областях, как полиграфия, графическое искусство, цифровая обработка изображения, проверка качества, считывание штрих-кода, конфокальная микроскопия, хранение данных, изготовление прецизионных шаблонов, индикация, наблюдение и отображение в медицинских целях [19]. Оптические сканеры, как правило, базируются на осцилляторе или гальванометрической системе. Гальванометрический сканер управляется электрически и направляет отраженный луч непосредственно на мишень; осцилляторный сканер работает через механический резонанс зеркальной подставки, который обычно ограничивает частоту сканирования. Эти механизмы сложные, дорогостоящие и малонадежные, поэтому в течение последнего десятилетия разработаны низкостоимостные, высоконадежные, миниатюрные, упрощенные оптические сканеры для коммерческих и военных целей.

В настоящее время существуют различные конструкции сканеров. В работе [16] описаны два вида оптических сканеров, разра-

ботанных в Научном центре Роквелл (Rockwell Science Center). Первый вид — это миниатюрный микролинзовый сканер с 2D-системой, управляемой пьезоэлектрическими актюаторами, второй вид — это 1D-сканер, покрывающий все точки при линейном сканировании.

Оптические 2D-сканеры применяются в следующих системах: волоконно-оптических переключателях [19, 20], проекционных дисплеях [21–25], конфокальных микроскопах [26, 27], системах лазерных коммуникаций в "свободном пространстве" [28] и лазерных радарах.

Спроектированный оптический 1D-сканер имеет угол сканирования в диапазоне 10...20°. Сканер состоит из двух главных компонентов — актюатора и зеркала на поверхности консоли. Актюатор помещается вблизи оси изгиба консоли. Консоль изгибается за счет биморфного термического эффекта. Микромеханическая консоль состоит из пленки ZnO, покрытой двумя слоями металла, которые действуют как верхний и нижний электроды.

В работе [29] представлен 2D-сканер с электростатическим приводом. Сканер с электростатическим приводом имеет много преимуществ — это быстродействие и простая управляющая электроника, малое потребление энергии. Главный недостаток — это сильно нелинейные передаточные характеристики преобразования приложенного напряжения в угол вращения, которые приводят к искажениям проецируемых изображений для дисплеев, плохой точности нацеливания лазерных радаров и большим вносимым потерям волоконно-оптических переключателей. Поэтому обычно применяют сложную систему управления с обратной связью.

В этой же работе [29] представлена конструкция сканера, реализованная по MUMPS-технологии. Сканер представляет собой рамку, к которой посредством торсионных прикреплается зерка-

ло размером 400 × 400 мкм. Рамка в процессе самосборки с помощью электростатических актюаторов приподнимается над поверхностью подложки на высоту 70 мкм и фиксируется в таком положении (рис. 6, см. четвертую сторону обложки).

Работа [30] описывает процесс изготовления микросканера с гребенчатым электростатическим приводом. Сканер обеспечивает высокоскоростное оптическое сканирование с большими угловыми отклонениями. Сканер имеет зеркало диаметром 550 мкм, способное сканировать на оптический угол 24,9° на резонансной частоте 34 кГц при менее чем 30 нм статической и динамической деформации. Прибор реализован на КНИ-пластине с использованием глубокого реактивно-ионного травления (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

В работе [31] описано изготовление и рабочие характеристики поверхностного микромеханического 2D-сканера с присоединенным зеркалом, выполненным в виде сот из монокристалла. Кремниевые соты изготовлены из КНИ-структур и устраняют проблему кривизны, наблюдаемую у зеркал из тонких поликремниевых пленок, без увеличения массы полной кремниевой структуры. Были представлены микрозеркала в виде сот с шероховатостью поверхности менее 12 нм и радиусом кривизны 143 см. Описываемый 2D-сканер приводится в движение электростатически и имеет механический угол сканирования 6°. Оптические характеристики присоединенного микрозеркала, выполненного в виде сот, сравнимы с характеристиками зеркал из объемного кремния.

5. Матрицы микрозеркал

Фирма Texas Instruments создала в 1987 г. проекционный дисплей и выпустила его на рынок дисплеев с цифровой обработкой светового сигнала "Digital Light Processing" (DLP). DLP-технология [32–34] основана на приме-

нении цифровых микрозеркальных устройств "Digital Micromirror Device" (DMD), т. е. матриц МЭМ цифровых переключателей светового сигнала, выполненных в полупроводнике. DMD переключающая матрица точно управляет световым пучком проекционного дисплея или цифровым отображением.

DMD световой переключатель — это МЭМС структура, которая изготавливается по КМОП-совместимой технологии над КМОП-кристаллом памяти [16] (рис. 8, см. четвертую сторону обложки).

Каждый переключатель имеет алюминиевое зеркало площадью 16 × 16 мкм, которое может отражать свет в одном из двух направлений в зависимости от состояния ячейки памяти. При "1" зеркало отклонено на +10° при "0" зеркало отклонено на -10°. Объединение DMD с источником света и проекционной оптикой образует систему. В этой системе зеркало отражает входящий свет в проекционные линзы или мимо них. Таким образом, в состоянии "1" зеркало является ярким, в состоянии "0" — темным, а серый фон достигается двоичной модуляцией ширины импульса входящего луча. Цвет достигается использованием цветных фильтров — либо стационарных, либо вращающихся, в комбинации с одним, двумя или тремя DMD-кристаллами.

Позднее зеркальная структура была дополнена до 848 × 600 (SVGA) пикселей DMD, коэффициенты контрастности проекционных систем, базирующихся на таких зеркалах, превышают сто к одному. В некоторых системах наблюдались коэффициенты контрастности, превышающие 400:1.

В настоящее время фирмой Texas Instruments изготовлены DMD более высокого разрешения 1280 × 1024 (SXGA). Хотя имеются серьезные трудности, связанные с изготовлением таких DMD, все же эти устройства являются перспективными для соз-

дания больших дисплеев с высоким разрешением.

Выводы

Основываясь на анализе литературных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Использование микрозеркал в устройствах и системах обработки оптического сигнала/изображения позволит расширить их функциональные возможности, уменьшить массогабаритные и повысить технико-экономические показатели.

2. Наиболее близким к условиям кристалльного производства является конструкция и технология изготовления 2D-сканера [29], выполненного по технологии ПМО на основе MUMPS. Сканер способен работать как в резонансном, так и в квазистационарном режимах.

3. Для получения высокого разрешения системы на основе микрозеркал необходимо выполнение следующих условий:

1) малые значения статического и динамического искривления зеркала;

2) высокий коэффициент отражения поверхности зеркала, зависящий от материала покрытия и поверхностного рельефа (рельеф менее $\lambda/10$, где λ — длина волны излучения; материал покрытия — золото).

При этом максимальное разрешение системы ограничивается дифракцией ее оптических элементов.

4. Для управления перемещением зеркала следует использовать электростатический привод, обладающий такими основными преимуществами как высокое быстродействие и малое потребление энергии. При этом вероятно для достижения высокой точности позиционирования потребуется разработка специальной схемы управления с обратной связью.

Список литературы

1. Pister K. S., Judy M. W., Burgett S. R., Fearing R. S. Microfabricated hinges // *Sensors and Actuators*. 1992. A 33. P. 249—256.

2. Wu M. C., Lin L. Y., Lee S. S., Pister K. S. J. Micromachined free-space integrated micro-optics // *Sensors and Actuators*. Dec. 1995. A 50 (1—2). P. 127—134.

3. Lin L. Y., Lee S. S., Pister K. S. J., Wu M. C. Three-dimensional micro-Fresnel optical elements fabricated // *Micromachining Technique by Electron. Lett.* 30 (5).

4. Lin L. Y., Lee S. S., Pister K. S. J., Wu M. C. Micro-machined three-dimensional micro-optics for integrated free-space optical systems // *IEEE Photon. Technol. Lett.* Dec. 1994. 6 (12).

5. Akiyama T., Collard D., Fujita H. Scratch Drive Actuator with Mechanical Links for Self-Assembly of Three-Dimensional MEMS // *Journal of MEMS*. March 1997. V. 6. N 1.

6. Comtois J. H., Bright V. M. Thermal microactuators for surface-micromachining processes // *Proc. SPIE*. 1995. Vol. 2642. P. 10—21.

7. Lin L. Y., Shen J. L., Lee S. S., Wu M. C. Surface-Micromachined Micro-XYZ Stage for Free-Space Microoptical Bench // *IEEE Photonic Technology Letters*. March 1997. Vol. 9. N 3.

8. Lee S. S., Lin L. Y., Wu M. C. Realization of FDDI optical bypass switches using surface micromachining technology // *Proceeding of SPIE*. Vol. 2641. P. 41—48.

9. Helin P., Mita M., Fujita H. Self-aligned mirror and V-grooves in free-space micromachined optical switches // *Electronics Letters*. Vol. 36, N 6. P. 563—564.

10. Marxer C., DeRooij N. F. Micro-Opto-Mechanical 2 × 2 Switch for Single-Mod Fibers Based on Plasma-Etched Silicon and Electrostatic Actuation // *Journal of Lightwave Technology*. January 1999. Vol. 17. N 1. P. 2—6.

11. Conant R., Hagelin P., Krishnamoorthy U., Solgaard O., Lau K. Y., Muller R. // A Raster-Scanning Full-Motion Video Display Using Polysilicon Micromachined Mirrors // *Transducers'99 Digest of Technical Papers*. 1999. Vol 1. P. 376—379.

12. Piyawattanametha W., Fan L., Lee S. S., Su G. D., Wu M. C. MEMS Technology for Optical Crosslinks for Micro/Nano Satellites, International Conference on Integrated Nano/Microtechnology for Space Applications, Houston, Texas, November 1—6, 1998.

13. Burns D., Bright V., Gustafson S. et al. Optical Beam Steering using Surface Micromachined Gratings and Optical Phased Arrays // *Proc. SPIE*, San Diego, CA 1997.

14. Last M., Pister K. S. J. 2-DOF Actuated Micromirror Designed for Large DC Deflection // Presented at MOEM'99, Mainz, Germany, Aug. 1999.

15. Cronos Integrated Microsystems, Inc, Research Triangle Park, North Carolina.

16. Motamedi M. E., Wu M. C., Pister K. S. J. Micro-opto-electro-mechanical devices and on-chip optical processing // *Optical Engineering*. May 1997. 36 (5). P. 1282—1297.

17. Chu P. B., Lo N. R. and al. Optical communication link using corner cube reflector, presented of Proceeding of the SPIE, San Jose, California, 1997.

18. Gunawan D. S., Lin L.-Y., Pister K. S. J. Micromachined corner cube reflector as a communication link, *Sensors and Actuators A*. 1995. Vol. A47. P. 580—583.

19. Marshal G. F. Advances in oscillatory optical scanners // *Microoptics, Micromechanics and Laser Scanning and Shaping / Proc. SPIE* 2383, 440—448.

20. Hagelin P. M., Krishnamoorthy U., Arft C. M., Heritage J. P., Solgaard O. Scal-

able fiber optic switch using micromachined mirrors // *Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, Sendai, Japan, June 7—10, 1999, 2P6-2.

21. Neilson D. T. et al. Fully provisioned micro-mechanical optical crossconnect with 35.8 Tb/s demonstrated capacity // *Proc. Tech. Digest Optical Fiber Comm. Conf. (OFC2000)*, Baltimore, MD, Mar. 7—10, 2000, PD12-1; Kurth S., Hahn R., Kaufmann C., Kehr K., Mehner J., Wollmann U., Silicon mirrors and micromirror arrays for spatial laser beam modulation // *Sensors Actuators* 1998. A66. P. 76—82.

22. Goto H. Two-dimensional micro-optical scanner excited by PZT thin film micro-actuator // *Proc. SPIE*. 1998. Vol. 3419, P. 227—235.

23. Kiang M.-H., Solgaard O., Lau K. Y., Muller R. Polysilicon optical microscanners for laser scanning displays // *Sensors Actuators*. 1998. A70. P. 195—199.

24. Conant R. A., Hagelin P. M., Krishnamoorthy U., Solgaard O. A raster-scanning full-motion video display using polysilicon micromachined mirrors // *Proc. 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, Sendai, Japan, June 7—10, 1999, 2P3-2.

25. Garnier A., Bourouina T., Fujita H., Orsier E., Masuzawa T., Hiramoto T., Peuzin J.-C. A fast, robust and simple 2-D micro-optical scanner based on contactless magnetostrictive actuation // *Proc. IEEE 13th Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000)*, Miyazaki, Japan, Jan. 23—27, 2000. P. 715—720.

26. Dickensheets D. L., Kino G. S. Silicon-micromachined scanning confocal optical microscope // *J. Microelectromech. Syst.* Mar. 1998. Vol. 7. P. 37—38.

27. Piyawattanametha W., Toshiyoshi H., LaCosse J., Wu M. C. Surface-micromachined confocal scanning optical microscope // *Proc. Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronic and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2000)*, San Francisco, CA, May 7—10, 2000.

28. Piyawattanametha W., Fan L., Lee S.-S., Wu M. C. MEMS technology for optical crosslinks for micro/nano satellites // *Proc. Int. Conf. on Integrated Nano/Microtechnology for Space Applications*, Houston, TX, Nov. 1—6, 1998.

29. Toshiyoshi H., Piyawattanametha W., Chan C.-T., Wu M. C. Linearization of Electrostatically Actuated Surface Micromachined 2-D Optical Scanner // *Journal of MEMS*. June 2001. Vol. 10. N 2. P. 205—214.

30. Conant R. A., Nee J. T., Lau K. Y., Muller R. S. A Flat high-frequency scanning micromirror // *Berkeley Sensor & Actuator Center*, University of California.

31. Patterson P. R., Su G.-D. J., Toshiyoshi H., Wu M. C. A MEMS 2-D Scanner with Bonded Single-Crystalline Honeycomb Micromirror // *Web page Electrical Engineering Department*, University of California, Los Angeles.

32. Sampell J. M. An overview of the digital micromirror device (DMD) and its application to projection displays // *SID International Symposium Digest of Technical Papers*. 1993. Vol. 24. P. 1012.

33. Tew C. Electronic control of a digital micromirror device for projection displays. 1994 IEEE Solid-State Circuit Digest of Technical Papers. 1994. Vol. 37. P. 130.

34. Younse J. Mirrors on a chip // *IEEE Spectrum* 30 (11), 27 (Nov. 1993).



В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1–12, 2001 г., № 1–8, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Электронно-микроскопическое исследование необычного структурного состояния, возникающего в тонких пленках при переходе аморфная фаза—кристалл

Номер проекта: 97-02-17784-а

Год предоставления отчета: 1997

На примере ряда веществ установлено, что с уменьшением толщины аморфной пленки (от ~90 до ~15 нм) при кристаллизации с внутренним искривлением решетки степень этой необычной дефектности возрастает приблизительно на порядок, при этом скорость роста резко замедляется, вплоть до полной остановки кристаллизации.

Исследована тонкая структура кристаллов $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с искривлением решетки, состоящих из периодически чередующихся концентрических зон с переменной скоростью роста, дефектностью и ориентировкой. Получены прямые изображения решетки. Особенности строения кристаллов, границ и зерен объясняются совместным действием двух факторов: постоянно реализующегося искривления решетки на фронте роста и анизотропии кристалла.

На примере системы Se—Te поставлен эксперимент по исследованию влияния увеличения концентрации добавочного элемента (Te) в аморфной пленке на кристаллизацию с искривлением кристаллической решетки (при одинаковых ориентировках зародышей кристаллов, скорости роста и геометрии внутреннего искривления решетки). Показано, что при этом увеличивается искривление решетки растущих кристаллов и еще сильнее увеличивается число центров нуклеации.

Начаты работы по экспериментальному анализу тонкой структуры и интенсивности изгибных экстинкционных контуров электронно-микроскопических изображений кристаллов с искривлением решетки.

Записаны профили распределения интенсивностей для наиболее ярких отражений для монокристаллов селена в светлом поле.

Изучение фазовых переходов в низкоразмерных системах

Номер проекта: 97-02-18267-а

Год предоставления отчета: 1997

Впервые получены трехмерные наборы нанометровых сегнетоэлектрических частиц (с наименьшими раз-

мерами 7 нм), в том числе регулярные наборы частиц KDP с диаметрами порядка 200 нм, с помощью введения сегнетоэлектрика в пустоты различных пористых матриц (пористые стекла, искусственные опалы).

Разработана технология, позволяющая получать значительные количества таких дисперсных материалов (до нескольких кубических сантиметров), что дает возможность использовать для их исследования методики, связанные с рассеянием нейтронов.

Впервые измерены температурные зависимости диэлектрической проницаемости (в температурном интервале 100—300 К, на частотах 1, 10 и 100 Гц) таких объектов в области сегнетоэлектрического фазового перехода. Обнаружено температурное уширение области фазового перехода, увеличивающееся с уменьшением размеров сегнетоэлектрических частиц. Такое размытие фазового перехода может быть связано с увеличивающимся влиянием флуктуаций в дисперсных системах.

Обнаружен сдвиг сегнетоэлектрического фазового перехода в таких объектах в область более высоких температур по отношению к температуре фазового перехода массивного материала. Этот сдвиг тем больше, чем меньше размеры сегнетоэлектрических частиц. Так, для частиц с диаметрами 100 нм максимум диэлектрической проницаемости находится при температуре 130 К, для частиц с диаметрами 20 нм — при температуре 160 К, а для частиц с диаметрами 7 нм — 190 К, в то время как температура перехода в массивном KDP равна 123 К.

Исследование закономерностей и физических механизмов активации границ зерен диффузионными потоками атомов примесей

Номер проекта: 97-02-17170-а

Год предоставления отчета: 1997

С применением методов механических испытаний на ползучесть в вакууме в широком интервале температур и нагрузок проведено исследование закономерностей развития пластической деформации при ползучести крупно- и субмикроструктурных металлов в условиях воздействия зернограницными диффузионными потоками примесей из внешнего источника (покрытия). Методами просвечивающей электронной микроскопии, оптической металлографии, измерениями механических

свойств при растяжении, микротвердости и электросопротивления параллельно проводилось изучение изменений структуры, механических и электрофизических свойств при отжигах и одновременном воздействии температуры и нагрузки (при ползучести) в исследованных условиях.

С применением высокоразрешающего метода вторичной ионной масс-спектропии проведены прямые экспериментальные исследования диффузионной проницаемости границ зерен в субмикро- и крупнокристаллическом никеле. Рассмотрены физические причины значительного увеличения диффузионной проницаемости границ зерен в субмикрокристаллическом состоянии по сравнению с соответствующей для крупнокристаллического состояния.

Проведен анализ возможности применения методов инженерного расчета температурного и временного интервалов реализации активированного состояния границ зерен в условиях воздействия диффузионными потоками примеси и связанных с таким состоянием явлений значительного уменьшения сопротивления высокотемпературной ползучести и проявления эффекта структурной сверхпластичности для случая субмикрокристаллических металлов.

Нелинейная оптика наноструктур, поверхности полупроводников и систем с пониженной размерностью

Номер проекта: 97-02-17919-а

Год предоставления отчета: 1997

Проведены систематические экспериментальные и теоретические исследования казимировской нелокальности квадратичного нелинейно-оптического отклика планарной структуры Si(001)—SiO₂, в которой тонкий слой оксида играет роль микрорезонатора для темновых мод квантованного электромагнитного поля. Показано, что механизм этого нового типа оптической нелокальности связан с нелокальностью электрон-электронного взаимодействия через вакуумные флуктуации квантованного электромагнитного поля. Проведены систематические экспериментальные и теоретические исследования квантово-размерных эффектов в электронном квадратичном отклике кремний—оксид кремния сверхрешеток методом спектроскопии второй гармоники. Развита новая модель для расчета электронных спектров сверхрешеток, учитывающая эффекты кулоновского взаимодействия электронов с электростатическим изображением в сверхрешетках с большой разницей диэлектрических проницаемостей материалов, образующих потенциальную яму. Проведены систематические экспериментальные и теоретические исследования некогерентной диффузной второй гармоники (гиперрелеевского рассеяния) в тонких пленках бактериородопсина, сегнетоэлектриков, ленгмюровских пленках фуллеренов и гранулированных пленках кобальта. Продемонстрированы диагностические возможности гиперрелеевского рассеяния для исследования тонких неоднородных пленок.

Неупорядоченные состояния в высокосимметричных конденсированных средах со структурой пирохлора

Номер проекта: 97-02-18099-а

Год предоставления отчета: 1997

В целях выяснения природы неупорядоченного (релаксаторного, стеклообразного, несоразмерно-модулированного) и упорядоченного (сегнетоэлектрического) состояний системы в соединении со структурой пирохлора Cd₂Nb₂O₇, причин их сосуществования и эволюции при понижении температуры работа развивалась по трем направлениям:

1) релаксационные процессы в сегнетоэлектрической фазе ($T_{inc} < T < T_c$, где $T_{inc} = 86$ К, $T_c = 196$ К) и в области фазовых переходов при $T_s (= 205$ К) и T_c ;

2) эволюция этих состояний при понижении температуры;

3) влияние примесей и дефектов на релаксаторное поведение системы и эффекты термического гистерезиса в области фазовых переходов второго рода.

На основе изучения диэлектрической релаксации в Cd₂Nb₂O₇ в диапазоне радиочастот (250 Гц — 2 МГц) и интервале температур 77—300 К показано, что релаксаторное поведение системы вызвано неупорядоченностью в ориентации диполей Cd—O(7) за счет динамических смещений ионов Cd²⁺ относительно центральных позиций в (CdO₈)_n-подрешетке. При понижении температуры динамические смещения диполей и неупорядоченность структуры постепенно "замораживаются", что приводит к температурно-зависимому параметру диэлектрической релаксации $h(T)$ в сегнетоэлектрической фазе и появлению стеклообразного состояния системы при более низкой температуре $T_g < 18$ К. Случайные примеси и дефекты структуры (типа вакансий по катионам), образующиеся в процессе синтеза в (CdO₈)_n-подрешетке, увеличивают неупорядоченность структуры в этой подрешетке, повышают релаксаторные свойства системы вблизи T_c и подавляют сегнетоэлектрический фазовый переход (ФП).

На основе данных по диэлектрической релаксации и динамике решетки, полученных спектроскопическими методами (КРС — комбинационное рассеяние света и ЭПР), предложена модель, в которой структурная неустойчивость (CdO₈)_n-подрешетки является триггерным механизмом для последовательности структурных ФП при T_s , T_c и T_{inc} .

Поскольку эволюция состояний ферроика непосредственно связана с эволюцией доменов, проведены исследования доменной структуры соединения оптическим методом и методом ЭПР. Учитывая, что кристаллы Cd₂Nb₂O₇ фоточувствительны и доменная структура в них изменяется при освещении, нами впервые была предложена методика исследования доменной структуры фоточувствительных кристаллов "в темноте". Это позволило получить реальную картину эволюции доменов с температурой и, основываясь на этих результатах, провести корректно анализ данных, полученных диэлектрическими, тепловыми и ЭПР методами. Впервые установлена природа доменов, наблюдаемых ниже T_c . Показано, что ниже этой температуры, с одной стороны, появляется новое состояние системы, которое характеризуется как собственный сегнетоэлектрик-сегнетоэластик, а с другой стороны, состояние предшествующей несобствен-

ной сегнетоэластической фазы становится несобственным сегнетоэлектриком-сегнетоэластиком. Оба состояния ферроика сосуществуют во всем интервале температур сегнетоэлектрической фазы, $T_{inc}(= 86 \text{ К}) < T < T_c$, наряду с релаксаторным состоянием системы. Однако домены, соответствующие несобственному сегнетоэлектрическому-сегнетоэластическому состоянию, постепенно становятся более мелкими при понижении температуры и вдали от T_c не наблюдаются оптическими методами.

Закрепление мелких сегнетоэлектрических доменов, размеры которых вдали от T_c становятся соизмеримыми с размером механических дефектов в решетке и/или с размером доменов мезоскопической структуры (релаксаторное состояние), на этих дефектах решетки является причиной аномального термического гистерезиса типа "перегретого" сегнетоэлектрического состояния в области ФП второго рода. Существование мелкой ячеистой дислокационной сверхструктуры с плотностью дислокаций 10^4 см^{-2} и размером ячеек около 10 мкм в этом соединении обнаружено при исследовании реальной структуры кристаллов методом рентгеновской дифракционной топографии. Поскольку при исследовании кристаллов этим методом исключительно важным является высокое качество химической полировки поверхности, проводилась также работа по изучению реактивной способности соединений со структурой пирохлора.

Исследования нового класса диэлектриков-ферроэластиков с многомерной несоразмерной модуляцией структуры

Номер проекта: 97-02-18024-а

Год предоставления отчета: 1997

Методом Бриджмена выращены монокристаллы $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ и $\text{Cs}_3\text{Sb}_2\text{I}_9$. Спектры ЯКР 127I исследованы в широком интервале температур 77–300 К. В $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ проведены измерения упругих постоянных в области температур 210–300 К и теплоемкости в интервале 50–300 К. Исследованы порошковые дифрактограммы $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ при нормальной и нескольких других температурах в модулированной фазе. Проведены дифракционные исследования на монокристаллах $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ и $\text{Cs}_3\text{Sb}_2\text{I}_9$ при нормальной температуре и в модулированных фазах. Получены следующие результаты. В $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ обнаружен фазовый переход при $T_i = 224 \text{ К}$ в несоразмерную фазу. Переход наблюдается в центре зоны и сопровождается изменением симметрии $R\bar{6}3/mmc \rightarrow P21/m$. Аналоги подобного перехода в несоразмерную сегнетоэластическую фазу неизвестны. Теоретико-групповой анализ указывает, что решеточная нестабильность может быть связана с взаимодействием оптической и акустической ветвей определенной симметрии вблизи центра зоны. Экспериментально наблюдаемое уменьшение почти до нуля упругой постоянной C_{44} вблизи перехода в нормальной фазе согласуется с этим выводом. Показано, что модуляция в области примерно на 5 К ниже T_i достаточно хорошо описывается плосковолновым приближением, с понижением температуры формируется спектр ЯКР, соответствующий квазисоразмерным доменам. Переход в низкотемпературную фазу не наблюдается как методом

ЯКР, так и по кривой теплоемкости до 50 К. В $\text{Cs}_3\text{Sb}_2\text{I}_9$ при $T_1 = 85 \text{ К}$ происходит фазовый переход на границе зоны. Ниже $T_2 = 73 \text{ К}$ появляется модуляция и вдоль второго направления, причем возникают множественные сателлитные рефлексы. Вдоль одного из направлений модуляция, по-видимому, несоразмерна. В области 50–65 К существует еще один фазовый переход, так как система сателлитных рефлексов вновь меняется. Природа решеточной нестабильности при переходах в модулированные фазы различна в двух исследованных представителях семейства $\text{A}3\text{B}2\text{X}9$. Отметим, что, согласно нашим данным, эти кристаллы не изоморфны при нормальной температуре.

Нелинейные оптические эффекты на поверхности при распространении поверхностных электромагнитных волн

Номер проекта: 97-02-16792-а

Год предоставления отчета: 1997

Для выполнения поставленных задач был использован разработанный в лаборатории метод фазовой спектроскопии поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), основанный на интерференционных измерениях. Этот метод позволяет определять напрямую как мнимую, так и действительную части комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого образца без привлечения каких-либо модельных расчетов. Впервые ПЭВ были возбуждены в области остаточных лучей на двухосном кристалле KTiOPO_4 (КТР) с использованием CO_2 -лазера в 10-микрометровой области и на кристаллах CaF_2 , BaF_2 , MgO (кубические кристаллы), LiNbO_3 (одноосный кристалл) в дальней ИК области с использованием лазера на свободных электронах (ЛСЭ FELIX, Нивехайн, Нидерланды). Были исследованы линейные оптические постоянные приповерхностного слоя этих кристаллов. Существенную роль в этих экспериментах сыграло применение лазера на свободных электронах, имеющего широкую область перестройки частоты излучения, большую мощность, малую ширину линии генерации и коллимированный пучок.

Совместно с Лейденским Университетом на ЛСЭ FELIX была изучена генерация суммарной частоты (ГСЧ) на поверхности серебра при распространении ПЭВ. Было зарегистрировано гигантское усиление сигнала ГСЧ при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на серебре. Исследования ГСЧ видимого и ИК излучений проводились на гладкой и гофрированной поверхностях серебра. При возбуждении поверхностного плазмон-поляритона видимого диапазона на гофрированной границе серебро–воздух сигнал суммарной частоты возрастал более чем на четыре порядка по сравнению с сигналом ГСЧ на гладкой поверхности серебра. Проведенные измерения однозначно указывают на то, что именно возбуждение плазмон-поляритона является причиной усиления ГСЧ, однако значение полученного коэффициента усиления примерно на два порядка превосходит ожидаемое усиление интенсивности электрического поля волны возбуждающего излучения на гофрированной поверхности. Для выяснения причин столь большого расхождения будут проведены дальнейшие исследования.

ИНФОРМАЦИЯ



МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ФОРУМ "ЭЛЕКТРОННАЯ РОССИЯ"

Россия, 129223, Москва, а/я 10. Тел./факс: (095) 937 40 81. E-mail: b95@online.ru. Http://www.mvd-expo.ru

Широкое применение информационных и коммуникационных технологий является глобальной тенденцией мирового развития последнего десятилетия. Эффективность управления любой компании на три четверти зависит от полноты и своевременности передачи информации, поэтому в рамках Международной акции "Национальная безопасность" и Федеральной целевой программы "Электронная Россия" в период с 11—14 ноября 2002 г. в г. Москве во Всероссийском Выставочном Центре (павильон 69) будет проводиться Московский Международный специализированный Форум "Электронная Россия".

Форум состоит из нескольких самостоятельных выставок, объединенных общей тематикой.

"ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ"

Международная специализированная выставка средств и систем связи

- Проектирование, строительство, монтаж и эксплуатация магистральных аналоговых и цифровых линий связи.
- Спутниковая связь — оборудование и услуги.
- Технологии беспроводной связи.
- Радиопередающие и радиоприемные системы и устройства, антенны и мачты.
- Цифровые сети сотовой связи (высокоскоростная передача данных в режиме коммутации пакетов с доступом в Интернет, услуги передачи пакетных данных по радиоканалу).
- Оборудование для аналого-цифрового преобразования.
- Создание и эксплуатация мультисервисных магистральных сетей, оборудование для IP телефонии, построение интеллектуальной сети, инфраструктуры публичных сетей доступа.
- Построение и модернизация корпоративных сетей передачи данных.
- Телематические и мультимедийные услуги.
- Телекоммуникационное оборудование для сетей связи общего и ведомственного пользования.
- АТС аналоговые, цифровые учрежденческие и офисные.
- Специальные справочно-информационные службы АТС.
- Системы автоматизированного учета стоимости телефонных переговоров для АТС.
- Запоминающие устройства автоматизированного набора номера для АТС, системы обработки вызовов.
- Системы бесперебойного электропитания и аккумуляторные батареи для стационарной и мобильной аппаратуры.
- Кроссовое и распределительное оборудование.
- Монтажные провода и кабели.
- Инструмент для монтажных и ремонтных работ.
- Аналоговые и цифровые абонентские телефонные аппараты: обычные и с памятью, переадресацией вызова, бесшнуровые и с другими дополнительными функциями.
- Таксофоны: электронно-карточные, магнитно-карточные, системы управления таксофонами, телефонные карточки.
- Телефонные аналоговые и цифровые коммутационные системы.
- Контрольно-измерительная аппаратура и приборы АТС, и средств автоматики.
- Запасные части и ремонтные комплекты для АТС, телефонных аппаратов, таксофонов, факсимильной аппаратуры.
- Услуги междугородней и международной телефонной связи.

- Аренда телекоммуникационного оборудования для построения телефонных сетей.
- Уплотняющая и разуплотняющая аппаратура малоканальная.
- Кредитование телекоммуникационной индустрии.
- Лицензирование, сертификация и надзор в сфере телекоммуникаций.
- Аксессуары.

"КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ И КАНАЛООБРАЗУЮЩАЯ АППАРАТУРА"

Международная специализированная выставка оборудования проводной электрической связи

- Кабели и линии связи: специальные медные кабели и провода, коаксиальные кабели, волоконно-оптические кабели и линии связи — разработка, изготовление, монтаж.
- Эмали, лаки для покрытия эмаль-проводов.
- Арматура и принадлежности для: симметричных медных кабелей, коаксиальных кабелей, волоконно-оптических линий и волноводов.
- Оборудование для спайки медно-жильных и волоконно-оптических кабелей в сетях общего пользования.
- Металлические экраны для волоконно-оптических кабелей.
- Вводные распределители, соединительные элементы, в т. ч. не требующие пайки.
- Системы передачи с частотным разделением каналов.
- Системы передачи с временным разделением каналов.
- Проектирование сетей и узлов проводной и радиорелейной связи.
- Резервирование проводных систем связи (радиорелейное приемо-передающее оборудование, транкинговые системы радиосвязи, ретрансляторы).
- Антенны, волноводы, элементы СВЧ техники, объемные резонаторы.
- Оборудование для защиты от ЭМИ.
- Измерительная аппаратура для ВЧ и ИКМ телефонии.
- Системы бесперебойного электропитания и аккумуляторные батареи для стационарной и мобильной аппаратуры.
- Аренда телекоммуникационного оборудования и кабельных линий для построения сетей связи.
- Контрольно-измерительная аппаратура для отыскания мест повреждения кабелей связи.
- Контрольно-измерительная аппаратура для измерения параметров и настройки техники связи, медных и оптико-волоконных линий связи.
- Оснастка и инструмент.