

# Кремниевая и арсенид-галлий-алюминиевая технология: создание М ЭФ СБИС VCSEL и М ФЭ СБИС Si

## Часть 3

Валерий Сведе-Швец, Владислав Сведе-Швец, Максим Зиновьев (Москва)

В статье описываются технологические методы создания матриц лазеров вертикального излучения М ЭФ СБИС VCSEL и фотоприёмников многоканальных оптических сигналов для М ФЭ СБИС Si. Приводятся электрические характеристики и технические параметры работы изделий. Отмечаются преимущества и недостатки их конструкций.

### ЛАЗЕРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАК ГЕНЕРАТОРЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ – М ЭФ СБИС VCSEL

Одним из наиболее оптимальных решений в построении оптических соединений является использование матриц вертикально-излучающих лазеров. Вертикально-излучающие лазерные диоды VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) диапазона длин волн 850/980 нм в последнее время находят всё более широкое применение. Они стали базовыми приборами для оптоволоконных систем передачи данных на большие расстояния (сотни метров) со скоростями от сотен Мбит/с до 10 Гбит/с.

Разработанные 3D М ЭФ М VCSEL совместно с 3D М ФЭ СБИС Si функционального ряда используются для передачи информации в оптическом виде по многоканальным линиям связи. Схематехнические решения конструкции подразумевают использование монта-

жа методом Flip-Chip матрицы ВИЛ для изготовления 3D М ФЭ М функционального ряда.

Конструкция излучателя на основе VCSEL для матрицы 3D М ФЭ М изображена на рисунке 11.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ VCSEL

В данной конструкции излучателя оптический резонатор VCSEL образован верхним оксидированным (AlO/GaAs) или полупроводниковым (AlGaAs/GaAs) распределённым брэгговским отражателем (РБО), нижним нелегированным полупроводниковым РБО AlGaAs/GaAs и активной областью с двумя контактными слоями n- и p-GaAs, содержащей одну или несколько квантовых ям (КЯ) InGaAs. Область протекания тока ограничивается в латеральном направлении оксидированными апертурами.

Технология изготовления матричных излучателей включает: получение эпитаксиальных структур VCSEL мето-

дом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), плазменное травление многоступенчатых матричных меза-структур, селективное оксидирование слоёв AlGaAs, формирование омических контактов к слоям n- и p-типа, пассивацию поверхности диэлектрическими плёнками и формирование контактных площадок. Кроме того, дополнительно используются технология формирования столбиковых выводов и технология пассивации слоев полиамида.

Основными операциями базового технологического процесса изготовления VCSEL для матрицы 3D М ФЭ М являются:

- выращивание эпитаксиальной структуры VCSEL методом МПЭ;
- формирование первой меза-структуры (травление до p-слоя);
- формирование второй меза-структуры (травление до n-слоя);
- селективное оксидирование (формирование токовых апертур);
- формирование p-контакта;
- формирование n-контакта;
- пассивация поверхности диэлектриком;
- формирование металлизации контактных площадок;
- пассивация полиамидом;
- формирование столбиковых выводов;
- контроль параметров VCSEL на пластине.

Перечень слоёв эпитаксиальной гетероструктуры для VCSEL-матрицы представлен в таблице 1.

В используемой конструкции VCSEL омические контакты формируются к скрытым слоям GaAs p- и n-типа. Поэтому необходима прецизионная и воспроизводимая технология травления многослойных гетероструктур с РБО, позволяющая формировать многоступенчатые меза-структуры. При этом требуемая точность по глубине травления составляет ~0,05 мкм.

Изоляция осуществляется травлением двухступенчатой меза-структуры. На рисунке 12 представлена микрофото-

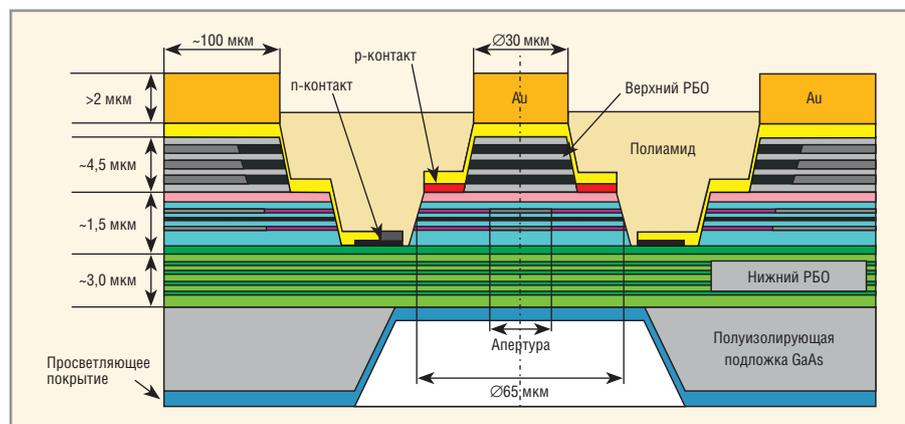


Рис. 11. Конструкция VCSEL для матрицы 3D М ФЭ М

графия меза-структуры VCSEL после сухого травления.

Боковая поверхность меза пассивируется слоем диоксида ( $\text{SiO}_2$ ) или нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Площадка р-контакта размещена непосредственно над активной областью, что существенно улучшает отвод тепла от активной области VCSEL. При этом площадки контактов n- и p-типа расположены строго в одной плоскости, что принципиально для успешной реализации монтажа методом перевёрнутого кристалла (Flip-Chip).

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D М ЭФ СБИС VCSEL**

3D М ЭФ СБИС VCSEL реализует задачу дискретных бинарных или многоуровневых амплитудно-модулированных информационных сигналов и предназначена для скоростного обмена информацией по многоканальным оптическим линиям связи. Для реализации этих целей кристалл содержит матрицу из 64 излучателей:

- формат интегральной матрицы VCSEL составляет  $8 \times 8$ ;
- 64 оптических независимых каналов вывода;
- скорость модуляции до 40 ГГц;
- длина волны 850–970 нм;
- пороговый ток  $I = 0,29$  мА;
- дифференциальная эффективность  $N = 0,7$  Вт/А;
- последовательное сопротивление  $R = 250$  Ом;
- пороговое напряжение  $V = 2$  В;
- модуляция – импульсно-кодовая с непосредственной модуляцией мощности оптического излучения;
- канальное управление с произвольной выборкой.

На рисунке 13 представлены вольт-амперная характеристика и показатель мощности реализованных VCSEL.

Измерения проводились на пластине в непрерывном режиме, вывод излучения – через подложку, диаметр мезы – 28 мкм, диаметр апертуры – 6 мкм. Характеристики разработанного лазерного излучателя VCSEL приведены в таблице 2.

Для передачи информации оптическими импульсами применяются одномодовый или многомодовый режимы оптического излучения, а для реализации 3D М ЭФ СБИС VCSEL выбран 2D-массив излучателей – VCSEL с технологией изготовления интегральных кристаллов на основе гетероструктур InGaAlAsP.

Таблица 1. Перечень слоёв эпитаксиальной гетероструктуры для VCSEL-матрицы

Наименование слоя	Материал	Состав	Толщина слоя, нм
р-контактный слой	GaAs		130
Верхний РБО, часть 3	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,82$	8
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,82$	72
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,82 \dots 0,0$	8
Верхний РБО, часть 2	GaAs		64
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,90$	8
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,90$	72
Верхний РБО, часть 1	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,93$	8
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,93$	72,5
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,93 \dots 0,0$	8
Апертурные слои	GaAs		45
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,98$	15
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,98$	50
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,98 \dots 0,0$	15
	GaAs		45
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,98$	15
Слой активной области	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,15$	130
	GaAs		15
	$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	$y = 0,15$	8
	GaAs		12
	$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	$y = 0,15$	8
	GaAs		15
Нижний РБО, часть 2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,15$	115
	GaAs		64
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Градиент по составу $x = 0,0 \dots 0,82$	8
п-контактный слой	GaAs		0,282
	GaAs		68
Нижний РБО, часть 1	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$x = 0,82$	80,5
	GaAs		200
Буферный слой	GaAs		200
Полуизолирующая подложка	GaAs		625 000

Основными достоинствами VCSEL являются:

- технологичность производства 2D-массива излучателей;
- узконаправленный и интенсивный спектр оптического излучения;
- малое значение порогового тока накачки;
- линейная зависимость мощности оптического излучения от тока накачки.

На рисунке 14 представлен чертёж кристалла матрицы VCSEL.

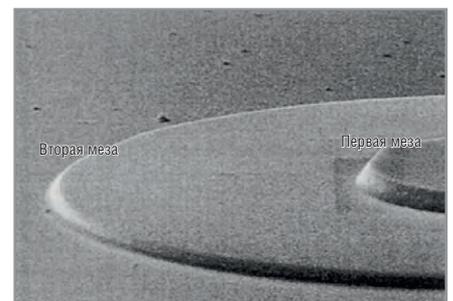


Рис. 12. Микрофотография мезоструктуры VCSEL после сухого травления

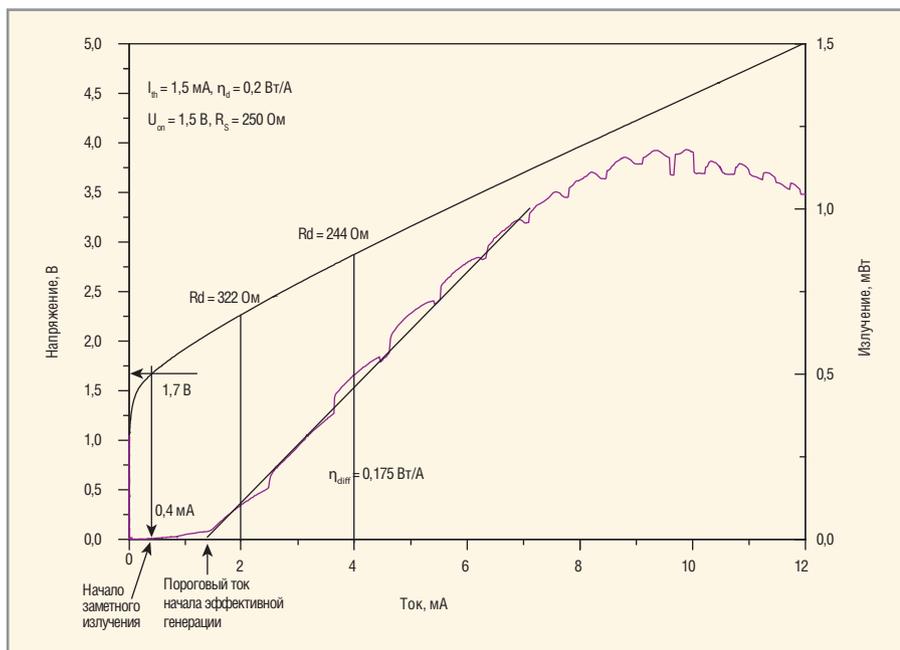


Рис. 13. Вольтамперная характеристика и показатели мощности реализованных вертикально излучающих лазеров

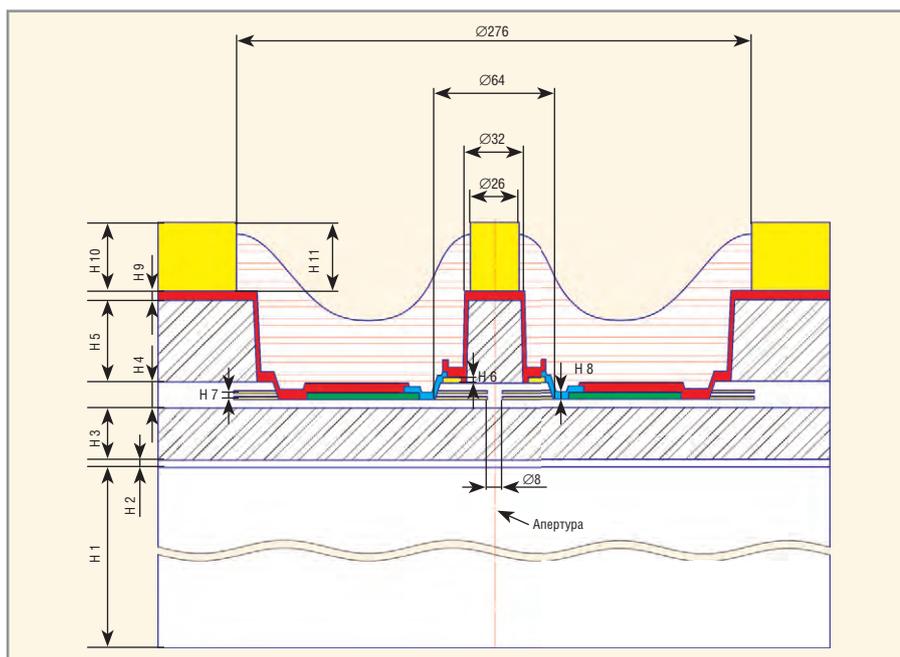


Рис. 14. Чертёж кристалла матрицы VCSEL

Таблица 3. Стоимость производства кристалла по технологии 180 нм КМОП SOI фирмы XFAB с технологическими нормами XT018 (цены 2013 г.)

Технологические операции	Стоимость технологических операций, €	
Подготовка	1050	
Изготовление одной фотолитографии шаблона	1150	
Маска	2xMLM	75 100
	Однослойная	104 500
Запуск	3/1	15 500
	6/3	29 300
Прерывание производственного цикла	1 060	

Таблица 4. Некоторые параметры диодов, которые могут быть сформированы в используемом технологическом процессе

Параметр	Nwell/Sub	DeepNwell/Sub	N+/Pwell1	N+/Pwell2
Глубина перехода, мкм	1,5	2,8	0,035	0,035
Слоевое сопротивление R <sub>s</sub> , Ом/кв	840–1100	390–490	42–82	42–82
Удельная ёмкость дна перехода, фФ/мкм <sup>2</sup>	0,12	0,5	1,12	0,87
Удельная ёмкость края перехода, фФ/мкм	0,47	0,33	0,26	0,19
Потенциал перехода, В	0,62	0,95	0,86	0,79
Ток утечки дна перехода, фА/мкм <sup>2</sup>	0,001	0,0003	0,0005	0,0007
Ток утечки края перехода, фА/мкм	0,002	0,08	0,001	0,001
Напряжение пробоя, В (мин)	9	9	6	6

Таблица 2. Характеристики разработанного лазерного излучателя VCSEL

Параметр	Данные
Пороговый ток начала линейной зоны излучения	1,7 ± 0,05 мА
Пороговое напряжение начала заметного излучения	1,7 ± 0,1 В при токе 0,4 мА
Дифференциальное сопротивление, типовое	322 Ом при токе 2 мА; 244 Ом при токе 4 мА
Крутизна характеристики излучения, типовая	0,175 Вт/А при токе 2 мА
Ёмкость при нулевом смещении, не более	1,5 пФ
Длина волны излучения	970–980 нм

Достигнутые результаты работы 3D М ЭФ СБИС VCSEL позволяют использовать устройства в следующих областях применений:

- реализация скоростных оптических связей в двумерном массиве с произвольным доступом;
- параллельный обмен большими массивами информации;
- развязка каналов с электромагнитной совместимостью.

### ФОТОПРИЁМНИКИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ М ЭФ СБИС Si

Фотодиод изготавливается на основе стандартного диода DNW5 в технологии XT018 с вскрытием окна над его рабочей областью. Эта операция не является стандартной для данной технологии. Толщина остаточного окисла на поверхности фотодиода составляет около 1 мкм, что не приводит к значительному ослаблению светового потока лазерного излучения.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА И ФОТОДИОДА

Кристалл изготавливается по технологии 180 нм КМОП SOI фирмы XFAB с технологическими нормами XT018.

В таблице 3 представлена стоимость производства кристалла.

Кристалл фотодиодной структуры формируется в подложке р-типа с удельным сопротивлением от 8 до 12 Ом·см.

Сам кристалл фотодиодной структуры содержит три процесса легирования: N<sup>+</sup> истоки, стоки; N-карман (Nwell) и глубокий N-карман (DeepNwell), также могут быть сформированы N-области фотодиода. В таблице 4 приведены некоторые параметры диодов, которые могут быть сформированы в используемом технологическом процессе.

При такой конструкции переход Nwell/Sub диода имеет минимальную ёмкость, поэтому для обеспечения заданного максимального быстродействия решено использовать его в качестве фотодиода.

С целью уменьшения последовательного сопротивления, повышения квантовой эффективности и уменьшения шумов использованы следующие топологические приёмы:

- по периферии Nwell-диода использовано кольцо DeepNwell-слоя;
- по всей площади Nwell-диода использовано подлегирование слоем N<sup>+</sup>;
- по всей площади Nwell-диода использован отражающий экран в первом (нижнем) слое металла;
- размер Nwell диода (30 × 30 мкм) должен быть меньше окна, вытравливаемого в подложке.

С целью уменьшения взаимовлияния соседних диодов и уменьшения времени рассасывания сгенерированного заряда, по периферии Nwell-диода в р-подложке сформировано кольцо земли P+/Pwell.

Для уменьшения шумов излучателей в третьем слое металла сформирован заземлённый экран, а углы Nwell-диода протравлены под 45°.

Структурная схема фотодиода и топология кремниевого кристалла 3D М ФЭ СБИС Si в разрезе с многоуровневой металлизацией, выполненного по кремниевой КМОП-технологии, представлена на рисунке 15.

В соответствии с концепцией кремниво-фотонной технологии 3D М ФЭ СБИС Si массив 2D кремниевых фотодиодов изготовлен по мембранной технологии и совмещён с усилителями и функциональными устройствами в едином матричном объёме интегрального кремниевого кристалла.

На рисунке 16 представлена структура фотодиода с охранным кольцом и без, на рисунке 17 – вольтамперная

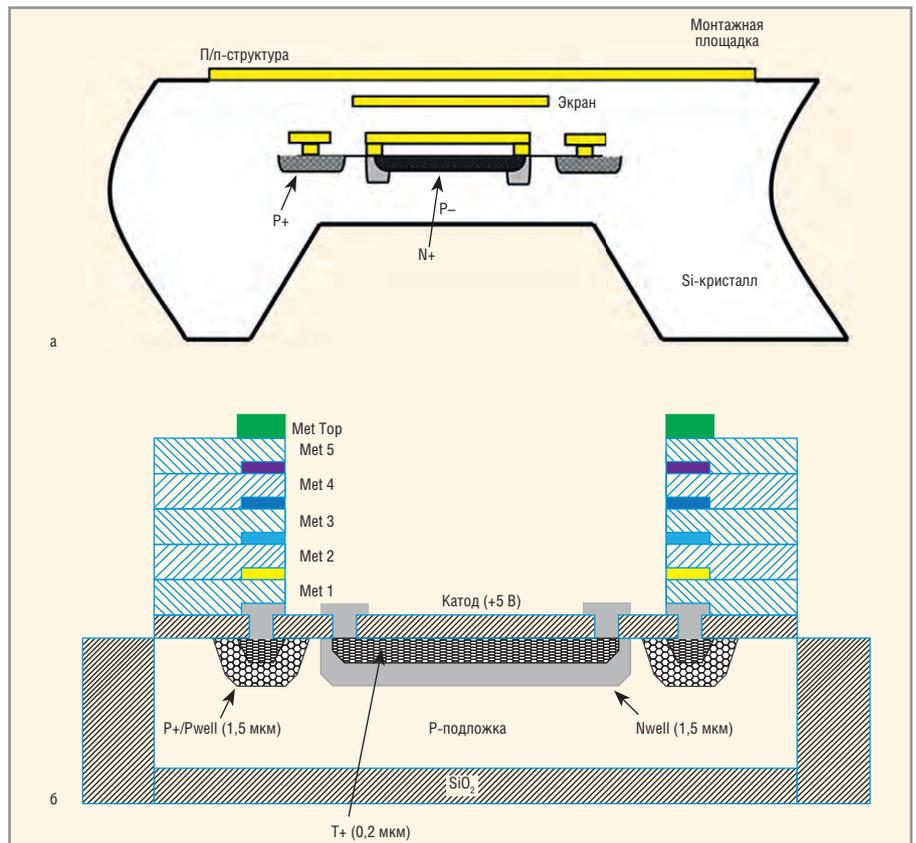


Рис. 15. Представление в разрезе:

а – структурной схемы фотодиода; б – топологии кремниевого кристалла 3D М ФЭ СБИС Si

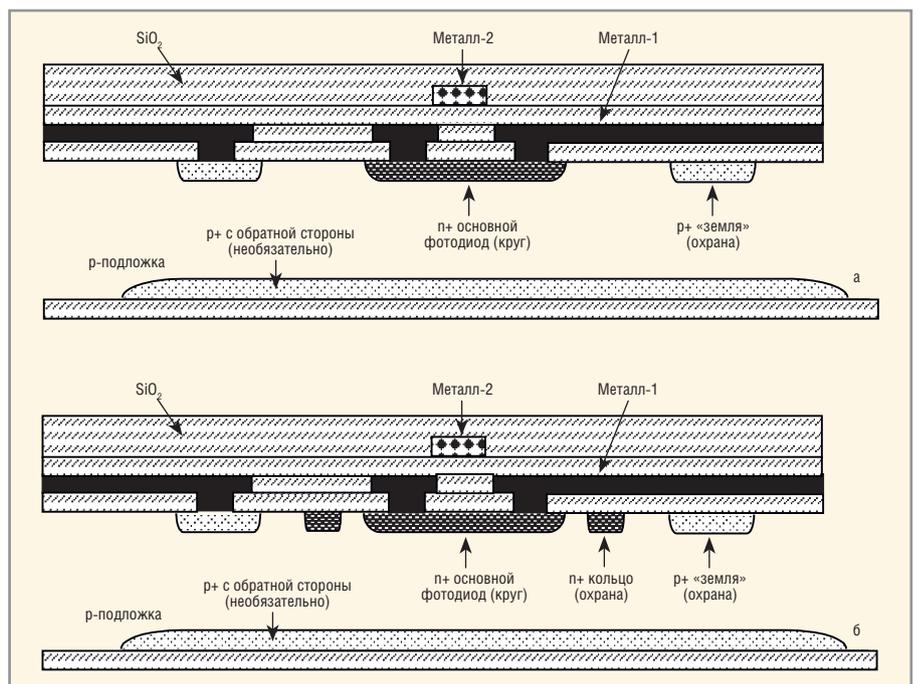


Рис. 16. Базовая структура фотодиода: а – без охранный кольца; б – с охранным кольцом

характеристика фотодиода на кристалле, а на рисунке 18 – характеристика быстродействия фотодиода.

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА КРИСТАЛЛА С ФОТОДИОДАМИ

Разработанный оптоэлектронный матричный кристалл преобразований

оптических и электрических сигналов (3D М ФЭ СБИС Si) представляет собой матрицу из многоканальных оптических и электрических каналов связи, управляемых микропроцессором. На рисунке 19 приведена схема размещения фотодиодов в матрице пикселей 3D М ФЭ СБИС Si.

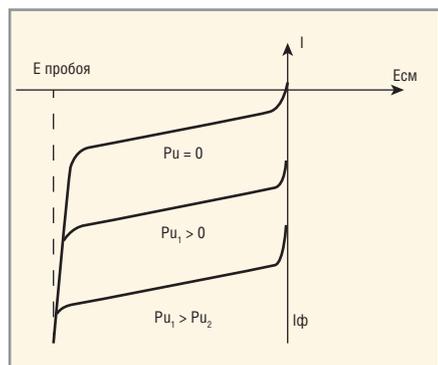


Рис. 17. Вольтамперная характеристика фотодиода

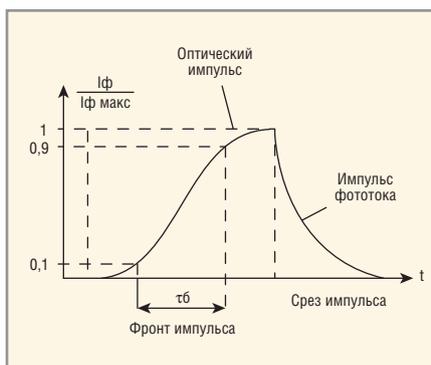


Рис. 18. Характеристика быстродействия фотодиода

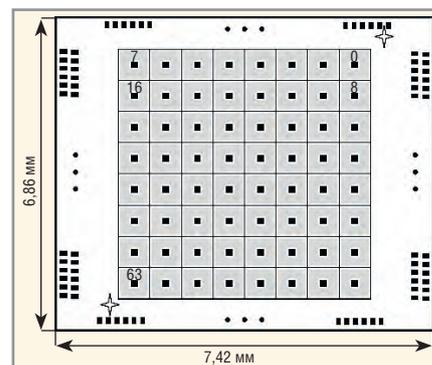


Рис. 19. Эскиз рабочей стороны в матрице пикселей 3D М ФЭ СБИС Si

Процессор управления по многоканальной электрической внешней шине организует управление работой матрицы пикселей 3D М ФЭ СБИС Si. Для этого формируется набор сигналов инструкций. Часть из них являются общими для всех пикселей, другая часть служит для выбора пикселей. Особенности управления являются:

- выполнение потока команд и обмен данными по многоканальным оптическим и электрическим каналам с внешними абонентами;

- механизм отложенной команды, позволяющий синхронизовать действия нескольких оптически связанных кристаллов;
- микропрограммирование команд загружаемым микрокодом;
- общесистемная команда «Транзит»;
- общая шина данных для загрузки микрокода, потока команд, загрузки и выгрузки информационных и калибровочных регистров пикселей;
- выбор пикселей, участвующих в операциях (отдельный пиксель – строка – столбец – вся матрица);

- контроллер внешней шины данных и управления 3D М ФЭ СБИС Si совместим с интерфейсом EMIFA процессора TMS320C 6455.

В следующей статье будет представлен базовый ряд и технические характеристики оптоэлектронных элементов с матричной организацией функциональных пикселей, таких как матрицы лазеров вертикального излучения и различные функциональные СБИС обработки фотонных сигналов при передаче информации по многоканальным оптическим и локальным электрическим каналам. ☺

## Новости мира News of the World Новости мира

### Роль суперкомпьютеров в развитии науки

26 апреля 2017 г. одновременно в Москве и Новосибирске прошло масштабное мероприятие «Суперкомпьютерные вычисления для развития российской науки», организованное научными учреждениями РФ, группой компаний РСК и представительством корпорации Intel в России. От лица российских учёных выступили представители Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН) и Центра коллективного пользования «Сибирский суперкомпьютерный центр» Сибирского отделения (ЦКП ССКЦ СО) РАН на базе Института вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ).

Загрузка суперкомпьютеров стабильно высокая ввиду широкого спектра задач, стоящих перед российской наукой. В числе таких задач имеются, например, численный прогноз погоды и моделирование изменений климата. Подобные решения активно разрабатываются всего в девяти странах и регионах мира – США, Великобритании (два центра), Франции, Германии, Канаде, Японии, Китае, Южной Корее и России.

Многие биологические исследования ведутся уже не на уровне клеток, а на уровне отдельных молекул и их ансамблей. Углублённые исследования такого рода неэффективны без использования мощности суперкомпьютеров.

Проблемой всего человечества сегодня является адаптация бактерий к имеющимся антибиотикам, и ресурсоёмкие вычисления на суперкомпьютерах помогут создать новых «убийц» бактерий, в том числе на основе биохимических процессов, с помощью которых бактерии уничтожают друг друга. Кроме работы над новыми антибиотиками, российские учёные с помощью суперкомпьютеров создают специальные пептидные обезболивающие. Эти лекарства должны обеспечивать сильный обезболивающий эффект и не вызывать привыкания.

[www.servernews.ru](http://www.servernews.ru)

### «Росэлектроника» освоила выпуск твердотельного усилителя мощности в мм-диапазоне

Объединённый холдинг «Росэлектроника» госкорпорации «Ростех» освоил производство твердотельного усилителя мощ-

ности мм-диапазона длин волн с выходной мощностью более 100 Вт. Конструкторские особенности позволяют модернизировать усилитель под специфические потребности изготовителей различной радиоэлектронной аппаратуры в широком круге задач и в краткие сроки. Серийный выпуск планируется начать в IV квартале текущего года.

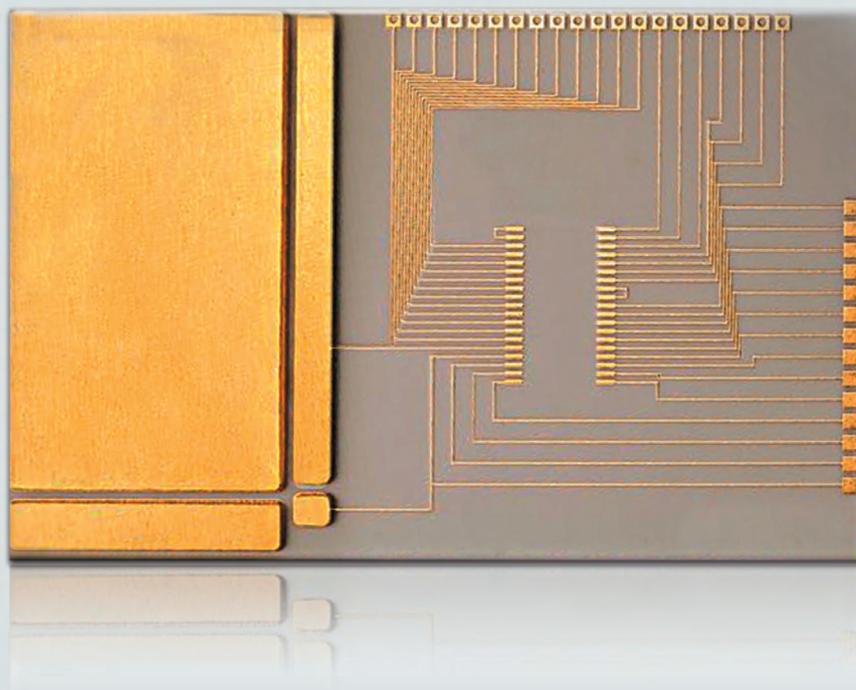
В ходе разработки прибора специалисты томского предприятия холдинга – АО «НИИ полупроводниковых приборов», решили ряд сложных конструкторских и технологических задач. Изделие уникально для российского рынка благодаря использованию монокристаллических интегральных схем на нитриде галлия (GaN) и новых теплоотводящих материалов на основе композитов Al-SiC (алюминий-карбид кремния), Ag-алмаз.

Усилитель работает в импульсном режиме, ввод и вывод СВЧ-энергии сигнала осуществляется через волноводные фланцы с сечением 7,2 × 3,4 мм, обеспечивая усиление в Ka-диапазоне 33–36 ГГц длин волн. Обладает относительно малыми габаритными размерами (220 × 170 × 30 мм), массой (до 4 кг) и высоким коэффициентом полезного действия.

[www.ruselectronics.ru](http://www.ruselectronics.ru)

# КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ

ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



**АО «ТЕСПРИБОР» ПРЕДОСТАВЛЯЕТ УСЛУГИ В ОБЛАСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК ПО ДОКУМЕНТАЦИИ ЗАКАЗЧИКА ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ( $Al_2O_3$ ) И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ (AlN).**

■ **96% ОКСИД АЛЮМИНИЯ**  
для использования в технологии нанесения толстопленочных паст и систем металлизации.

■ **99,6% ОКСИД АЛЮМИНИЯ (ПОЛИКОР)**  
для использования в технологии нанесения тонкопленочных материалов.

■ **НИТРИД АЛЮМИНИЯ (AlN)**  
для использования в теплоэнергетических системах и силовых гибридах.



125480, г. Москва  
ул. Планерная, д. 7А  
тел./факс: (495) 657-87-37  
testpribor@test-expert.ru  
www.test-expert.ru