

их перенос на подложку, и методы, обеспечивающие изменение структуры или состава подложки по этим рисункам (рис.).

С помощью планарной технологии можно одновременно формировать на подложке  $10^3$ — $10^6$  транзисторов и осуществлять многостадийные процессы, а благодаря этому создавать И. с. со сложной структурой. Таковы, напр., микропроцессор — центр. часть ЭВМ, выполненная в одной или неск. И. с.; запоминающее устройство, содержащее св.  $10^6$  ячеек памяти, и т. д.

На одной подложке обычно формируется множество И. с. Затем она разделяется на отд. кристаллики — «чипы» (англ. chip — отбитый кусок). Чип — это И. с. без корпуса и внеш. выводов. Его масса 0,5—50 мг, объём 0,2—50 мм<sup>3</sup>. Т. о., на каждый мм<sup>3</sup> чипа и на каждый мг его массы приходится  $10^4$  транзисторов. После установки чипа в корпус эти характеристики снижаются в сотни раз (из-за сравнительно больших габаритов и массы корпуса). Но чип может устанавливаться и без корпуса в аппаратуру и даже в организм человека (вживляемые кристаллы). С 80-х гг. интенсивно развивается технология твердотельных И. с. на целых пластинах.

**Гибридная технология** объединяет принципы планарной технологии, с помощью к-рой предварительно формируются микроприборы, и плёночной технологии, средствами к-рой формируются пассивные элементы (сопротивления, конденсаторы, индуктивности) и сеть внутр. связей. В качестве подложки гибридной И. с., на к-рой устанавливаются бескорпусные чипы, используется диэлектрик, иногда металл или полупроводник, защищённые диэлектрич. слоем. Плёночная технология реализует принцип печатного монтажа в миниатюрном интегральном исполнении. Она расширяет диапазон параметров и повышает точность изготовления пассивных элементов. Поэтому она служит важным дополнением планарной технологии.

**Степень интеграции.** Важнейшая характеристика И. с. — степень интеграции, т. е. число активных элементов (для определённости — транзисторов) в одной И. с. По этому показателю И. с. классифицируются на малые (МИС), содержащие до  $2^5$  транзисторов, средние (СИС) — до  $2^{10}$ , большие (БИС) — до  $2^{15}$  и сверхбольшие (СБИС) —  $2^{20}$  транзисторов. Для более высокой степени интеграции предложен термин «ультрабис». Но в действительности более сложные твердотельные структуры представляют не И. с., а интегральные системы.

Максимально возможная (при данном уровне технологии) степень интеграции определяется прежде всего мин. шириной линий рисунка И. с., ограниченной возможностью микролитографии. В совр. И. с. это 2—3 мкм, а в нек-рых И. с. достигается 1 мкм. В структурах, полученных с помощью острофокусированных электронных и ионных пучков, сформированы линии шириной до 2 нм. Оптимальный предел 0,1—0,2 мкм. Для его реализации необходимы коротковолновая фотолитография, рентгенолитографии, электронная и ионная микролитография.

Кроме ширины линии, существенна максимально возможная площадь чипа, к-рая определяется качеством подложек и совершенством планарной технологии. Важную роль играет обеспечение надёжности — резервирование, самодиагностика и саморемонт. Они позволяют создавать устройства на частично дефектных и не вполне надёжных элементах. Предельная степень интеграции пластины — системы порядка  $10^9$ .

Степень интеграции можно увеличить последовательным формированием в одной И. с. неск. активных слоёв (транзисторы и связи), разделённых диэлектрич. слоями. При этом для каждого активного слоя Si наносится в виде тонкой поликристаллич. плёнки и подвергается рекристаллизационному отжигу. Трёхмерная интеграция позволяет повысить степень интеграции ещё на 1—2 порядка.

Степень интеграции и функциональные возможности И. с. ограничены сложностью их внутр. организации и потребляемой мощностью. Планарный принцип синтеза ограничивает число внутр. связей между элементами И. с. Это ограничение влияет на «архитектуру» интегральных устройств. Напр., в одном устройстве можно осуществить только простейшие системы. В более сложных случаях требуется иерархия, организация структуры (в случае ЭВМ — многопроцессорная система с распределённой памятью).

Локальная плотность потребляемой мощности, несмотря на низкое энергопотребление каждого транзистора, велика (иногда превышает плотность мощности на поверхности Солнца). Кроме того, при высоких плотностях тока из-за нестабильности токоплёночных проводников происходит увлечение ионов металла электронами или электрическим полем. Наиб. экономичны И. с. на парах МОП-транзисторов, почти не потребляющие мощности между циклами переключения, а также на МДП-транзисторах с двухслойным диэлектриком (металлы — нитрид — оксид — полупроводник), с плавающим затвором и др., к-рые не потребляют мощности в режиме хранения информации.

**Развитие интегральной электроники.** Уже первые МИС изменили принцип проектирования радиоэлектронной аппаратуры, особенно ЭВМ. Вместо конструирования устройств, измерения характеристик приборов и их взаимного согласования синтез стал осуществляться на логич. уровне. Согласование характеристик транзисторов перешло к технологии. Поскольку И. с. (независимо от степени интеграции) сбоят примерно столько же, сколько транзисторы домикроелектронного периода, то стоимость ЭВМ снижается (в среднем) пропорц. степени интеграции.

Однако в МИС интеграция распространилась в основном на цифровые логич. схемы. Практически все МИС выполнялись на основе биполярных транзисторов (см. *Транзистор*). С переходом к БИС (60—70-е гг.) доминирующее место заняли полевые транзисторы с МДП-структурой. Они потребляют меньше энергии на каждый бит перерабатываемой информации и обладают более простой структурой, что позволило создать интегральные запоминающие устройства.

Переход от БИС к СБИС (2-я пол. 70-х гг.) привёл к созданию 8-, 16- и 32-разрядных микропроцессоров и И. с. с ёмкостью памяти  $10^4$ — $10^6$  бит. Выпускаются также БИС и СБИС для управления автомобильными двигателями, телевизорами (неск. кристаллов заменяют всю низковольтную аппаратуру телеприёмника) и т. д. Интенсивно развиваются аналоговые и цифроаналоговые БИС и СБИС, а также интегральная схемотехника СВЧ-диапазона. И. с. позволяют упростить и усовершенствовать и механ. системы (печатные устройства, пилежные машины, фотоаппараты и др.), в к-рых большинство механ. узлов, выполняющих управляющие ф-ции, могут быть заменены на БИС или СБИС.

Проектирование самих И. с. стало осуществляться с помощью систем автоматич. проектирования (САПР), позволяющих формировать СБИС для конкретной задачи из базовых кристаллов, «библиотек» стандартных элементов, а также спец. сети внутр. связей. Кроме того, СБИС дают возможность создавать персональные ЭВМ. СБИС — одновременно и почти готовое вычислит. устройство, и элемент многопроцессорной ЭВМ, позволяющей достичь производительности в  $10^{10}$ — $10^{11}$  операций в 1 с и осуществлять моделирование физ. явлений.

*Лит.:* Дорфман В. Ф., Твердотельные интегральные структуры и их синтез, М., 1981; Муроган С., Системное проектирование сверхбольших интегральных схем, пер. с англ., т. 1—2, М., 1985; см. также *лит.* при ст. *Микроэлектроника*.

**ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ** — преобразование вида

$$F(x) = \int_C K(x, t) f(t) dt,$$