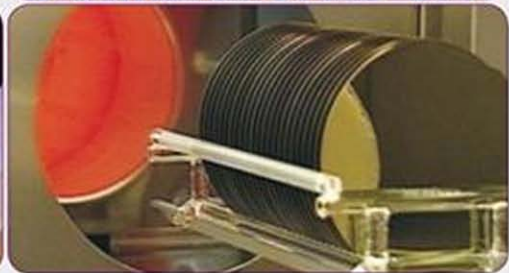
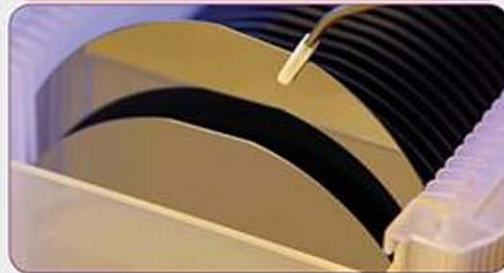
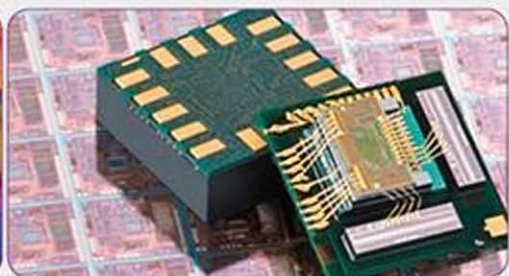
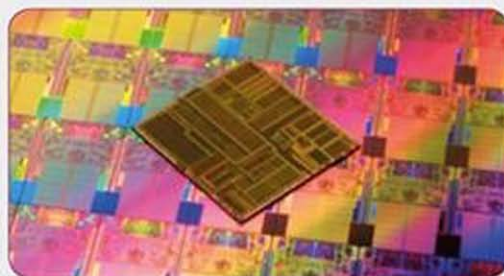


УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Ю.Б. Цветков

ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ МИКРОТЕХНОЛОГИИ



УДК 621.3.049.77 (075.8)
ББК 32.85
Ц27

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/44/book1915.html

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н. Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Цветков, Ю. Б.
Ц27 Процессы и оборудование микротехнологии: Модули 1 и 2 : учебное пособие / Ю. Б. Цветков. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 122, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4864-7

Дано описание общей последовательности процессов микротехнологии на примерах производства интегральных микросхем и кремниевого микродатчика давления. Рассмотрены основные этапы получения кремниевых монокристаллических пластин, ключевые операции микротехнологии — изготовление кремниевых пластин, оксидирование. Акцентировано внимание на взаимосвязи между свойствами материалов, структуры, устройством и электрическими характеристиками микроструктур. Рассмотрены физико-химические модели и методы анализа качества технологических процессов микротехнологии.

Для студентов МГТУ им. Н. Э. Баумана, обучающихся по направлениям «Электроника и микроэлектроника» и «Наноинженерия».

УДК 621.3.049.77 (075.8)
ББК 32.85

ISBN 978-5-7038-4864-7

- © МГТУ им. Н. Э. Баумана, исключительное право, 2018.
- © Цветков Ю. Б., авторские права, 2018.
- © Оформление. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Содержание

Предисловие	3
Введение	6
Модуль 1	
Технологический анализ изделий микротехнологии	12
1.1. Интегральные микросхемы как объект производства.	13
1.1.1. Структура и принцип действия КМОП-микросхем.	13
1.1.2. Технология КМОП-микросхем	18
1.2. Особенности производства микроэлектромеханических систем	37
1.2.1. Принцип действия и структура микродатчика давления.	38
1.2.2. Технические характеристики микродатчика давления	40
1.2.3. Технология изготовления чувствительного элемента	41
1.2.4. Монтаж кремниевого чувствительного элемента на стеклянное основание	47
Заключение	48
Задания для самостоятельной работы и самоконтроля	49
Ресурсы сети Интернет к модулю 1	52
Приложения к модулю 1	53
Приложение 1. Параметры металлических межсоединений	53
Приложение 2. Особенности формирования медных межсоединений	55
Приложение 3. Диэлектрические свойства материалов микротехнологии	58
Приложение 4. Тензо- и пьезоэффект в кремнии	61
Модуль 2	
Изготовление монокристаллических кремниевых пластин	64
2.1. Кремниевые пластины как объект производства.	65
2.1.1. Электрические параметры	67
2.1.2. Геометрические параметры	68
2.2. Получение монокристаллического кремния	77
2.2.1. Этапы производства кремния.	78

2.2.2. Выращивание монокристаллов	82
2.2.3. Обработка кремниевых слитков и пластин	88
2.3. Термическое оксидирование кремния	105
2.3.1. Свойства диоксида кремния	105
2.3.2. Структура диоксида кремния	106
2.3.3. Получение диоксида кремния термическим оксидированием	108
2.3.4. Стадии оксидирования	109
2.3.5. Модель роста оксида Дила — Гроува (Deal — Grove).	110
2.3.6. Промышленная реализация термического оксидирования	115
Заключение	118
Задания для самостоятельной работы и самоконтроля	119
Ресурсы сети Интернет к модулю 2	121

МОДУЛЬ 1

Технологический анализ изделий микротехнологии

Модуль 1 дисциплины «Процессы и оборудование микротехнологий» посвящен технологическому анализу типовых изделий микротехнологии — интегральной микросхемы и кремниевого микродатчика давления.

Кратко рассмотрены принцип действия, структура и параметры современной интегральной микросхемы на основе МОП-структуры (металл — оксид — полупроводник). Выделены основные этапы процесса изготовления комплементарного МОП-инвертора (КМОП): формирование карманов р- и n-типа, щелевой изоляции, областей истока, стока и затвора, контактов к активным областям, многослойной металлизации. Описаны назначение операций процесса, их режимы и используемые материалы. Дополнительно в Приложениях к модулю 1 рассмотрены особенности масштабирования КМОП-микросхем, параметры металлических межсоединений, технология медных межсоединений — инкрустирование (damascene).

Описан принцип действия кремниевого микродатчика давления, его технические характеристики, маршрут и особенности основных операций изготовления чувствительного элемента из монокристаллического кремния. Приведена последовательность формирования пьезорезисторов мостовой схемы чувствительного элемента, контактов к ним и упругой диафрагмы. Дополнительно в Приложениях к модулю 1 рассмотрена суть тензо- и пьезоэффекта в кремнии.

Ключевые слова: КМОП-инвертор, процесс изготовления, карманы, щелевая изоляция, исток, сток, затвор, контакты к активным областям, многослойная металлизация, инкрустирование (damascene), кремниевая мембрана, пьезоэффект в кремнии, пьезорезисторы, мостовая схема.

Планируемые результаты обучения

После изучения модуля 1 «Технологический анализ изделий микротехнологии» Вы сможете:

- перечислить и объяснить не менее двадцати понятий и терминов, в том числе на английском языке, описывающих процесс изготовления изделий микротехнологии, дать формулировки их назначения и выполняемых функций;
- представить в виде блок-схем типовые маршруты изготовления заданных изделий, выделить в применяемых материалах проводники, диэлектрики, полупроводники;

- привести в соответствие формируемые микроструктуры и применяемые для этого фотошаблоны;
- для заданного изделия микротехнологии продемонстрировать взаимосвязь конструктивных элементов изделий и технологических процессов их изготовления, провести его технологический анализ, выявить и обозначить лимитирующие параметры и критические операции;
- для заданного технологического процесса микротехнологии выбрать характеризующие его ключевые термины и провести по ним поиск Интернет [1–4], в том числе иноязычной, обобщить и провести анализ информации по современному состоянию и перспективам развития процесса;
- представлять результаты работы с информацией в виде концептуальных карт (карт памяти [5]), аналитических обзоров и презентаций по заданным правилам [6–9].

1.1. Интегральные микросхемы как объект производства

В этом разделе приведены краткие сведения о принципе действия полупроводниковых приборов на примере МОП-транзисторов, о структуре и принципе действия интегральной микросхемы на основе комплементарного МОП-инвертора.

Основное внимание уделено рассмотрению маршрута и особенностям ключевых операций планарной технологии изготовления твердотельных интегральных микросхем.

1.1.1. Структура и принцип действия КМОП-микросхем

Полупроводниковые интегральные микросхемы — основной массовый объект современных микротехнологий.

Непрерывное совершенствование интегральных микросхем является катализатором прогресса важнейших отраслей народного хозяйства, поэтому уровень и объемы производства интегральных микросхем определяют научно-технический и оборонный потенциалы развитых стран.

Подавляющее большинство современных микросхем (и цифровых, и аналоговых) построено на полевых или МОП-транзисторах. Различают *p*- и *n*-канальные МОП-транзисторы.

Структуры *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов аналогичны и отличаются видом носителей (электроны и дырки соответственно), переносящих заряд от истока к стоку при приложении порогового напряжения.

Так, *n*-канальный МОП-транзистор — это транзистор, в котором области истока и стока имеют *n*-тип проводимости. Они сформированы в подложке *p*-типа. Область между истоком и стоком формирует канал, над которым размещен металлический или поликремниевый затвор, отделенный от канала диэлектриком — диоксидом кремния (SiO_2).

При подаче на затвор положительного напряжения возникает электрическое поле, отталкивающее от затвора носители заряда p -типа — положительные дырки (рис. 1.1).

В то же время поле притягивает в область канала электроны. По дости-

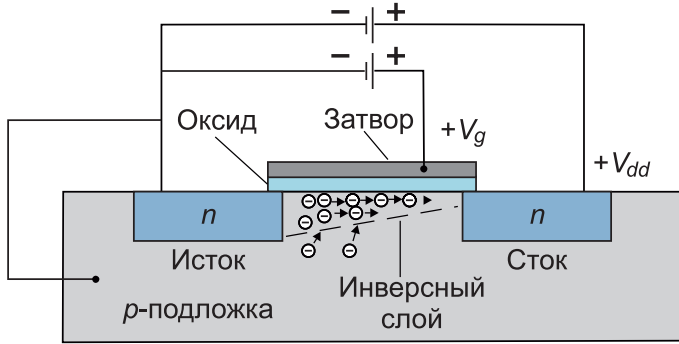


Рис. 1.1. Структура n -канального МОП-транзистора

жении порогового напряжения количество электронов в канале существенно превосходит количество дырок — происходит инвертирование.

При этом образуется проводящий канал n -типа, соединяющий исток со стоком, причем подзатворный диэлектрик предотвращает попадание электронов в затвор.

В p -канальном МОП-транзисторе исток и сток — это области p -типа в подложке n -типа, а переносчиками заряда являются дырки. Подача на затвор отрицательного напряжения ведет к инвертированию и формированию канала p -типа.

Объединение пары дополняющих друг друга (комплементарных) n - и p -канальных МОП-транзисторов в единую КМОП-структуру позволяет получить, например, схему инвертора, широко применяемого в современных микросхемах (рис. 1.2).

В КМОП-инверторе МОП-транзисторы $T1$ и $T2$ соединены последовательно так, что к их затворам подведено общее входное напряжение V_{in} , а стоки имеют общий выход V_{out} (рис. 1.2, а).

В n -канальном МОП-транзисторе $T1$ подложка p -типа обозначена стрелкой, направленной внутрь, а в p -канальном МОП-транзисторе $T2$ подложка n -типа обозначена стрелкой, направленной наружу (см. рис. 1.2, а).

Подложка n -канального МОП-транзистора $T1$ соединена с землей, а на подложку p -канального МОП-транзистора $T2$ подается напряжение питания V_{dd} (около +5 В).

КМОП-инвертор работает следующим образом. При подаче высокого входного напряжения V_{in} (сопоставимого с V_{dd}) n -канальный МОП-транзистор $T1$ включается. Напряжение между затвором и подложкой p -канального

МОП-транзистора $T2$ при этом близко к нулю, поскольку и затвор, и подложка имеют один и тот же потенциал V_{dd} . Поэтому МОП-транзистор $T2$ будет выключен, а выходное напряжение V_{out} будет низким.

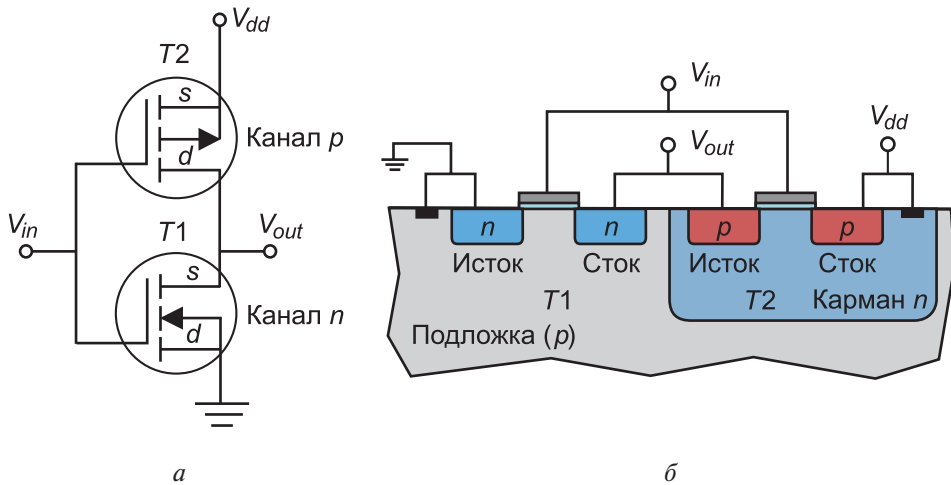


Рис. 1.2. КМОП-инвертор:
a — принципиальная схема; *б* — структура

Если же входное напряжение V_{in} будет низким (близко к потенциалу земли), n -канальный МОП-транзистор $T1$ выключится и напряжение между затвором и подложкой p -канального транзистора $T2$ будет равно $-V_{dd}$, так как потенциалы затвора и подложки равны 0 и $+V_{dd}$ соответственно.

Поскольку пороговое напряжение p -канального МОП-транзистора составляет примерно -2 В, он включится и выходное напряжение будет высоким.

Таким образом, высокое напряжение на входе КМОП-инвертора (логическая единица) даст на выходе низкое напряжение — логический ноль, напротив, низкое напряжение на входе (логический ноль) дает на выходе высокое напряжение — логическую единицу.

Следует отметить важное обстоятельство. Для формирования КМОП-инвертора в виде интегральной микросхемы на едином кремниевом кристалле необходимо учесть, что подложки МОП-транзисторов $T1$ и $T2$ имеют разный тип проводимости: p и n соответственно.

Кремниевые подложки, полученные из монокристаллических слитков, имеют определенный тип проводимости по всему рабочему полю. Поэтому в подложке создается локальная область с противоположным типом проводимости — карман (рис. 1.2, *б*), в котором формируется один из транзисторов.

В КМОП-инверторе, помимо контактов к стокам, истокам и затворам транзисторов, формируются также контакты к подложке и выделенному

в ней карману. Так, p -подложка n -канального МОП-транзистора $T1$ соединена с землей (см. рис. 1.2).

Напротив, n -карман p -канального МОП-транзистора $T2$ подключен к источнику питания V_{dd} (примерно +5 В). Таким образом, каждый транзистор имеет четыре контакта к своим активным элементам. При этом исток всегда подключен к подложке (или карману) и имеет с ней один потенциал.

Поскольку p -подложка подключена к земле, а n -карман — к положительному потенциалу, они образуют обратно смещенный p - n -переход, предотвращая протекание между ними электрического тока.

КМОП-структуры современных интегральных микросхем, в частности КМОП-инверторы (рис. 1.3), имеют минимальные размеры структур в диапазоне 25...180 нм. В рассматриваемом примере слой, в котором сформированы карманы МОП-транзисторов (рис. 1.3, a) — это *эпитаксиальный слой* p -типа толщиной 6...10 мкм, который наращивают на сильнолегированную пластину кремния (p^+)-типа.

Сочетание сильно- и слаболегированных слоев кремния традиционно применяют при формировании транзисторных структур.

В структуре, приведенной на рис. 1.3, a , в слаболегированном эпитаксиальном слое выполнен не только n -карман, как на рис. 1.2, b , но дополнительно и p -карман. В этих карманах формируют МОП-транзисторы. В p -кармане выполнен МОП-транзистор n -типа, который включает две сильнолегированные близлежащие области (n^+)-типа (исток и сток) (см. рис. 1.3, a).

Над узкой промежуточной областью между стоком и истоком (см. рис. 1.3, a) размещен тонкий (200 нм и менее) изолирующий слой диоксида кремния — подзатворный диэлектрик. На диэлектрик нанесен слой металла или легированного поликристаллического (поликремния) (n^+)-типа, который служит управляющим электродом — затвором.

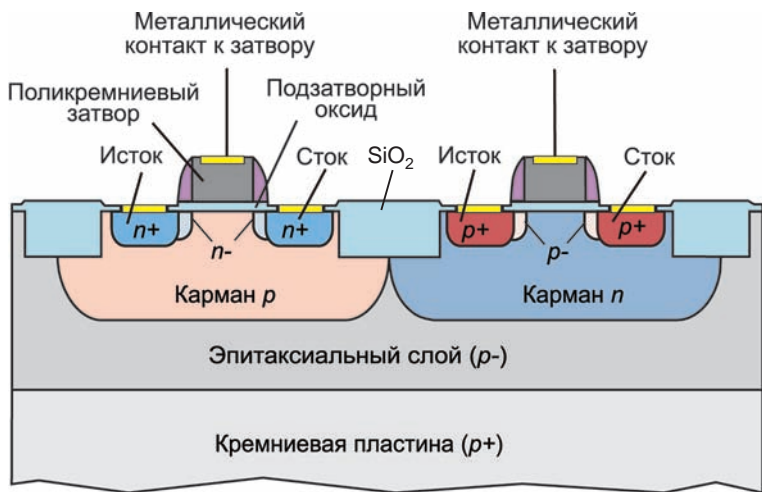
По обеим сторонам поликремниевого затвора формируют спейсеры (*spacer*) — разделители, которые изолируют затвор от контактов стока и истока.

На поверхности стока, истока и затвора локально наносят силицид (например, силицид кобальта $CoSi_2$) для электрического контакта к этим элементам.

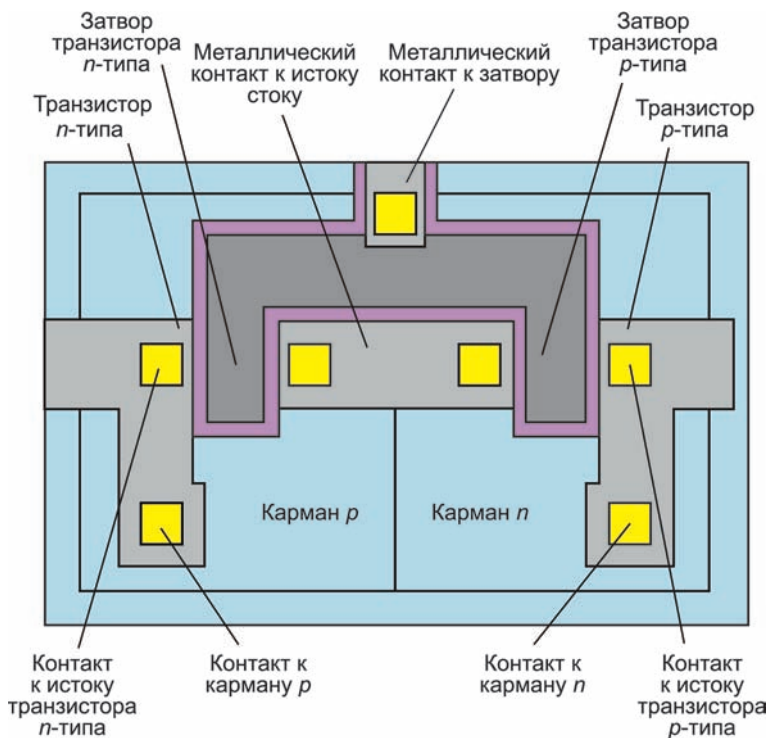
В МОП-транзисторе (см. рис. 1.3, a) использованы мелкие слаболегированные области (*LDD — Lightly Doped Drain*), которые продлевают области истока и стока в сторону канала. Концентрация примеси (фосфор и бор) этой области составляет $(4-10) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при этом в (n^+)-областях она достигает $(5-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

МОП-транзистор p -канального типа отличается от МОП-транзистора n -канального типа тем, что в нем исток и сток — две сильнолегированные области (p^+)-типа, сам он выполнен в кармане n -типа, а его затвор — из поликремния (p^+)-типа.

Напомним, что активные области двух транзисторов КМОП-инверторов разделены изоляцией из диоксида кремния SiO_2 (см. рис. 1.3, a).



a



b

Рис. 1.3. КМОП-инвертор:
a — структура; *b* — топология

Основные геометрические параметры КМОП-инвертора

Толщина подзатворного диэлектрика, нм.....	3
Минимальная ширина затвора, нм.....	140
Толщина поликремния, нм.....	250
Допустимые рассовмещения, нм.....	25
Шаг проводников на 1-м уровне металлизации, нм.....	500
Толщина проводников на 1-м уровне металлизации, нм.....	480
Шаг проводников на 2-м уровне металлизации, нм.....	640
Толщина проводников на 2-м уровне металлизации, нм.....	700
Габариты контактных площадок, мкм.....	100×100

1.1.2. Технология КМОП-микросхем

В технологическом процессе КМОП-микросхемы можно выделить несколько важных этапов, на которых формируются:

- карманы *p*- и *n*-типа;
- изоляция между областями *p*- и *n*-канальных МОП-транзисторов;
- области истока, стока и затвора;
- контакты к активным областям;
- многослойная металлизация.

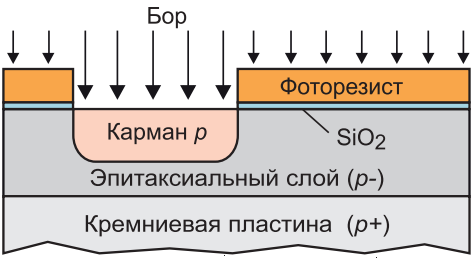
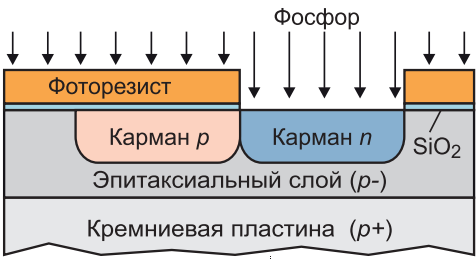

Формирование карманов *p*- и *n*-типа

Создание КМОП-структуры обычно начинают с выделения активных зон — карманов *p*- и *n*-типа (см. рис. 1.3, *a*), в которых будут размещаться соответственно *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы. Предварительно на поверхность пластины из монокристаллического кремния ориентации (100) (*p*⁺)-типа проводимости наносят эпитаксиальный слой *p*-типа с удельным сопротивлением 5...50 Ом·см. Именно в этом слое и формируют активную структуру интегральной микросхемы.

Кремниевую пластину подвергают жидкостной очистке и сушат. С ее поверхности удаляют тонкие пленки естественного диоксида (*native oxide*) SiO₂ толщиной в несколько десятков ангстрем, образующегося на поверхности кремниевой пластины даже при комнатной температуре под воздействием влаги воздуха.

После этого на кремниевой пластине наращивают так называемый жертвенный слой SiO₂ толщиной 10...15 нм. Он служит для защиты поверхности эпитаксиального слоя от загрязнений.

Операции формирования карманов приведены в табл. 1.1.

Эскиз	Операция
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме p-карманов. 2. Ионная имплантация бора для формирования p-карманов
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нанесение фоторезиста и вскрытие окон по форме n-карманов. 2. Ионная имплантация фосфора для формирования n-карманов
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление фоторезиста от предыдущей операции. 2. Быстрый термический отжиг легированных областей p- и n-карманов

Структура со сформированными n - и p -карманами показана на рис. 1.4.

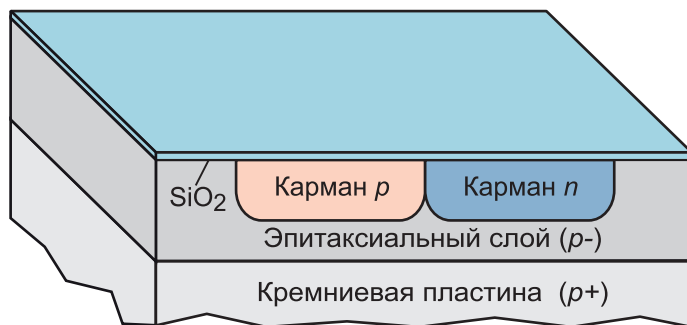


Рис. 1.4. Карманы p - и n -типа