

управляемую модель. Для модели Эберса — Молла имеем соответственно схему замещения на рис. 6.29, а:

$$I_D = I_0 [\exp(U/m\varphi_T) - 1];$$

$$C_D = C_{бар1} + C_{диф};$$

$$C_{бар1} = C_{бар0} (1 - U/\varphi)^{-\gamma};$$

$$C_{диф} = I_0 \exp(U/m\varphi_T) (m\varphi_T/\tau),$$

где $\varphi_T = 0,026$ В (при $T = 25^\circ\text{C}$); $\gamma = 0,7 \div 0,75$ В.

Параметры модели I_0 , m , φ_T можно вычислить из условия аппроксимации статической ВАХ излучающего диода по выражению

$$I_j = I_0 [\exp(U_j - I_j r_{дин})/m\varphi_T], \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

где I_j , U_j — соответствующие j -й экспериментальной точке ВАХ диода значения тока и напряжения диода; N — число экспериментальных точек. Вычисления проводят, например, методом наименьших квадратов.

Модель фотоприемника для фотодиодного режима работы состоит из источника фототока $I_\phi = k_f I_D$, источника тока p - n перехода, управляемого напряжением, $I = I_0 \exp[(U/m\varphi_T) - 1]$ и барьерной емкости фотодиода $C_{бар2}$. Следует подчеркнуть, что быстроедействие оптопары заметно ограничивается барьерными емкостями $C_{бар1}$, $C_{бар2}$. Даже у маломощных излучающих диодов $C_{бар1} = 50 \div 200$ пФ; значения емкости фотодиода $C_{бар2}$ существенно меньше (1—10 пФ), однако она заряжается малым током I_ϕ , и ее влияние на скорость переключения оптопары также оказывается значительным.

Параметры электрической изоляции оптопары описываются проходной емкостью $C_{пр}$ и сопротивлением изоляции $r_{из}$. Особенно важную роль в динамике работы оптопар играет емкость $C_{пр}$. Емкостный ток в цепи изоляции оптопары зависит от скорости изменения напряжения как на входе оптопары, так и на выходе, т. е. возможна электрическая обратная связь через проходную емкость и соответственно ложное переключение или самовозбуждение устройства.

Контрольные вопросы

1. Определите основные требования, предъявляемые к моделям полупроводниковых приборов. Раскройте противоречивость этих требований.

2. Перечислите и обоснуйте классификационные признаки моделей полупроводниковых приборов.

3. Определите с помощью ВАХ диода заданного типа (из справочника) параметры модели диода.

4. С помощью справочной типовой зависимости барьерной емкости диода или транзистора от обратного напряжения определите параметры аппроксимирующей зависимости $C_{бо}$, γ , ($\varphi = 1$).

5. Рассчитайте усредненное значение барьерной емкости, используя результаты предыдущего задания, на основе выражений (6.15) и (6.23) и сравните расчетные значения емкости перехода.

6. С помощью ВАХ стабилитрона (из справочника) определите параметры модели стабилитрона в рабочем режиме.

7. Из схемы замещения биполярного транзистора выведите формулу для расчета входного сопротивления транзистора.

8. По выходным ВАХ заданного типа биполярного транзистора (из справочника) определите параметры модели транзистора.

9. Используя результаты расчетов пп. 7, 8 и входные ВАХ заданного типа биполярного транзистора (из справочника), определите параметры модели транзистора.

10. По входным и выходным ВАХ биполярного транзистора (из справочника) определите параметры модели транзистора.

11. Приведите динамические модели мощных МДП-транзисторов для разных частот, поясните методы определения параметров моделей.

12. Определите сущность построения двухступенчатой модели тиристора, поясните возможности учета эффекта du/dt в моделях тиристора.

Глава седьмая

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

7.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

7.1.1. ТЕПЛООБМЕН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПРИБОР — ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Аналогично тому, как температура тела является важнейшим критерием состояния организма человека, температура структуры T_j определяет надежность работы полупроводникового прибора: чем выше температура структу-

ры, чем сильнее и резче колебания температуры, тем ниже надежность работы полупроводникового прибора.

Кривые на рис. 7.1 показывают, как изменяется интенсивность отказов λ полупроводниковых приборов с ростом температуры структуры: уже при температуре около 100 °C надежность работы приборов снижается в 5—10 раз по сравнению с надежностью при температуре 25 °C. Если при этом прибор одновременно предельно используется по какому-либо электрическому параметру, то интенсивность отказов может возрасти в 100 раз и более (рис. 7.1). Следует

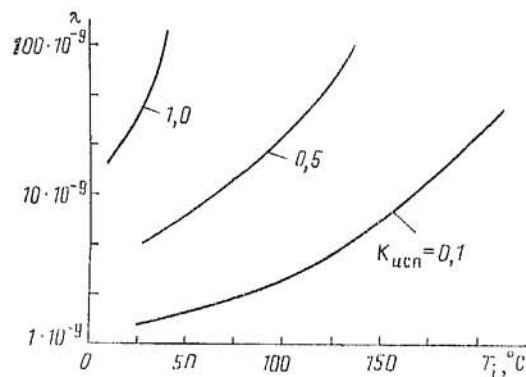


Рис. 7.1. Зависимости интенсивности отказов полупроводниковых приборов от температуры структуры

подчеркнуть, что чем выше коэффициент использования параметра $k_{исп}$, тем больше крутизна характеристик $\lambda = f(T_j)$, т.е. зависимость интенсивности отказов от температуры усиливается.

Способность полупроводникового прибора кратковременно или длительно выдерживать воздействие повышенной температуры, а также резкие изменения температуры характеризуют его *теплостойкость*. Нарушение теплостойкости определяют, как правило, по началу существенных необратимых изменений параметров — критериев годности приборов: температура структуры полупроводникового прибора при этом достигает своего максимально допустимого или предельного значения $T_{j\max}$.

Тепловой режим, т.е. тепловое состояние полупроводникового прибора характеризуют с помощью скалярного *температурного поля*, которое описывает распределение температуры в приборе: $T = f(x, y, z, t)$.

Температурное поле, которое изменяется во времени, называется нестационарным и описывает *нестационарный тепловой режим*; если температурное поле постоянно, то соответственно *тепловой режим стационарный*. Наглядным представлением температурного поля являются изотермические поверхности $T = \text{const}$; изотермические поверхности не пересекаются, так как в любой точке пространства температура может иметь только одно значение.

Количество теплоты, передаваемое через изотермическую поверхность площадью S , называется тепловым потоком Q ; тепловой поток через единицу площади изотермической поверхности называется плотностью теплового потока q .

Источником тепла в полупроводниковом приборе является так называемый *активный элемент* — элемент конструкции, через который протекает ток и в котором в основном рассеивается электрическая энергия; эта энергия преобразуется в тепло и определяет тепловой режим прибора. Между активным элементом полупроводникового прибора и остальным объемом электронного устройства (окружающей средой) возникает тепловой поток и развиваются процессы, направленные на установление теплового равновесия, — это и есть *теплообмен*. Различают три механизма теплообмена в системе полупроводниковый прибор — среда: теплопроводность, конвекцию и излучение.

В активном полупроводниковом элементе прибора *теплопроводность* обеспечивается за счет колебаний атомов кристаллической решетки — фононной теплопроводности; тепловой поток при этом в основном направлен в сторону массивного основания корпуса полупроводникового прибора.

Конвекция в теплообмене полупроводниковый прибор — среда — это перемещение макроскопических элементов среды (теплоносителя) с одновременным переносом переданного им тепла; конвекция наблюдается только в подвижных теплоносителях — жидкостях и газах. Различают свободную и вынужденную конвекцию. При свободной конвекции причиной движения теплоносителя является создаваемая разностью температур неоднородность поля массовых сил, т.е. сил, действующих на элементы теплоносителя и пропорциональных их массе. При вынужденной конвекции движение теплоносителя задается вентилятором, насосом и т.п. Конвекция участвует в теплообмене прибор — среда всегда в совокупности с теплопроводностью. Движение

теплоносителя может быть ламинарным и турбулентным; при ламинарном движении тепло передается в основном теплопроводностью и интенсивность теплообмена мала. При возникновении турбулентности и перемешивания теплоносителя теплообмен усиливается.

Тепловое излучение — это некогерентное излучение электронов и ионов вещества в процессе хаотического теплового движения. В полупроводниковых приборах, в которых поглощение излучения велико, можно считать, что излучает поверхность тела. Следует подчеркнуть, что перенос тепла излучением — наиболее быстродействующий механизм теплообмена.

Теплообмен теплопроводностью хорошо описывается законом Фурье:

$$Q = -\lambda \operatorname{grad} T dS, \quad (7.1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; Q — тепловой поток; T — температура; S — площадь изотермической поверхности.

Физический смысл уравнения (7.1): тепловой поток Q пропорционален температурному градиенту $\operatorname{grad} T$, знак минус указывает на то, что тепловой поток распространяется в сторону снижения температуры.

Конвективный теплообмен между поверхностью источника тепла и теплоносителем подчиняется закону Ньютона:

$$Q = \alpha_k S (T - T_{\text{ср}}), \quad (7.2)$$

где α_k — коэффициент конвективного теплообмена.

Теплообмен излучением в системе полупроводниковый прибор — среда играет существенную роль при использовании прибора совместно с охладителем, значительном перепаде температур прибор — среда, пониженном атмосферном давлении. Тепловой поток излучения определяется выражением

$$Q = \epsilon S f (\Delta T) = \epsilon S C_0 [(T/100)^4 - (T_{\text{ср}}/100)^4], \quad (7.3)$$

где ϵ — коэффициент излучения поверхности тела; $C_0 = 5.67$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

При анализе тепловых режимов полупроводниковых приборов наибольший интерес представляют стационарные тепловые режимы, когда определяется установившееся температурное поле при $t = \infty$ в состоянии постоянства источников тепла и условий теплообмена. Важность решения стационарной тепловой задачи связана с тем, что имен-

но в установившемся температурном режиме температура структуры достигает своего максимального значения. В системе прибор — среда стационарная тепловая задача практически сводится к расчету перегрева полупроводникового прибора (или его активного элемента) над окружающей средой при заданных условиях теплообмена.

В условиях нестационарного теплового режима температурное поле системы полупроводниковый прибор — среда изменяется во времени вследствие изменения условий теплообмена; изменение температурного поля — процесс инерционный, определяемый скоростью накопления энергии и теплоемкостью системы прибор — среда. Типичный нестационарный тепловой режим такой системы — установление теплового режима после включения устройства или после изменения температуры окружающей среды.

7.1.2. ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ АНАЛОГИЯ

Процессы переноса тепла (тепловой энергии) и переноса электрического заряда подобны. В самом деле, электрический ток I (поток зарядов) согласно закону сохранения заряда течет из одной области в другую, причем плотность потока заряда пропорциональна градиенту потенциала $\operatorname{grad} \varphi$. Аналогично тепловой поток Q по закону сохранения энергии течет из одной области в другую, и плотность теплового потока пропорциональна $\operatorname{grad} T$. Электрический заряд может накапливаться в локальной области соответственно ее электрической емкости; тепловой поток запасается в теплоемкости локальной области и т. д. Указанная физическая общность приводит к подобию (изоморфизму) математического описания процессов переноса тепла и заряда или, как принято называть, к электротепловой аналогии.

Теплота	Электричество
Тепловой поток Q , Дж/с = Вт	Ток, I , Кл/с = А
Плотность потока $Q/S = q$, Вт/м ²	Плотность тока $I/S = j$, А/м ²
Температура T , К	Потенциал φ , В
Градиент температуры $\operatorname{grad} T$, К/м	Градиент потенциала $\operatorname{grad} \varphi$, В/м
Тепловое сопротивление R , К/Вт	Сопротивление R , В/А
Теплоемкость C , Дж/К	Емкость C , Кл/В

На основе электротепловой аналогии процесс теплообмена прибор — среда (тепловую модель системы прибор —

среда) можно представить в виде электрической схемы замещения, при этом интегральным параметрам теплообмена $Q, \Delta T$ соответствуют электрические параметры $I, \Delta \phi$.

Мгновенная (безынерционная) связь между тепловым потоком и перепадом температуры в электрической схеме замещения усредненно по некоторой области, ограниченной изотермическими поверхностями, моделируется тепловыми сопротивлениями R ; инерционная связь между температурой и запасом энергии в данной области отображается в схеме замещения усредненной теплоемкостью C . Если тепловое сопротивление R или теплоемкость C зависят от температуры, т.е. нелинейны, то для их описания используют зависимости типа $Q(T)$ — аналог ВАХ $I(U)$.

Проведем оценку тепловых сопротивлений для различных механизмов теплообмена. Тепловое сопротивление теплопроводности определим из уравнения Фурье (7.1) при переходе к конечному объему с равномерным температурным полем:

$$R = \Delta T / P = l / \lambda S \quad (7.4)$$

Тепловое сопротивление, моделирующее конвективный теплообмен, можем получить из выражения (7.2):

$$R = (\alpha_k S)^{-1}. \quad (7.5)$$

В режиме естественной конвекции выделяют три типа движения теплоносителя:

ламинарный

$$\alpha_k = A_1 l (T - T_{cp})^{1/5}; \quad (7.6a)$$

интенсивный ламинарный

$$\alpha_k = k A_2 l (T - T_{cp})^{1/4}; \quad (7.6b)$$

турбулентный

$$\alpha_k = k A_3 (T - T_{cp})^{1/3}, \quad (7.6b)$$

где $A_1 - A_3$ — коэффициенты, характеризующие состояние теплоносителя при температуре $T_r = 0,5(T + T_{cp})$; k — коэффициент пространственной ориентации поверхности теплообмена (рис. 7.2); l — характерный размер поверхности. Значения коэффициентов $A_1 - A_3$ для воздуха и воды приведены в табл. 7.1 при разных значениях температуры T_r .

При вынужденной конвекции переход от ламинарного режима к турбулентному определяется скоростью движения теплоносителя v , коэффициентом вязкости теплоносителя ν и характерным размером l поверхности, участвующей

Таблица 7.1. Значения коэффициентов теплоносителя

Теплоноситель	Температура 0,5 $(T + T_{cp})$, °C								A_i
	0	20	40	60	80	100	120	150	
Воздух	0,291	0,295	0,300	0,306	0,310	0,315	0,320	—	A_1
Вода	9,4	13,1	15,7	17,6	19,0	20,0	—	—	
Воздух	1,42	1,38	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,24	A_2
Вода	90	105	149	178	205	227	—	—	
Воздух	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,28	1,23	A_3
Вода	102	198	290	363	425	480	—	—	

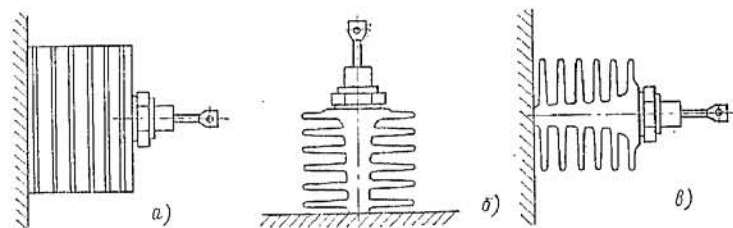


Рис. 7.2. Примеры пространственной ориентации поверхности теплообмена:

$a - k=1,3$; $b - k=1,0$; $в - k=0,7$

в теплообмене. Для воздуха при $(vl/\nu) < 4 \cdot 10^4$ имеем ламинарное движение теплоносителя и коэффициент конвективного теплообмена

$$\alpha_k = 0,57 \lambda \sqrt{\frac{vl}{\nu}} / l. \quad (7.7a)$$

При $(vl/\nu) > 4 \cdot 10^4$ движение теплоносителя турбулентное и

$$\alpha_k = 0,032 \lambda (vl/\nu)^{0,8} / l. \quad (7.7b)$$

Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности λ , Вт/(м·К), и вязкости ν , м²/с, для воздуха имеют линейный характер:

$$\lambda \approx (2,6 + 0,08 \Delta T) \cdot 10^{-2}, \quad (7.8a)$$

$$\nu \approx (15 + 0,1 \Delta T) \cdot 10^{-6}. \quad (7.8b)$$

Процесс теплообмена излучением между нагретой поверхностью и окружающей средой в соответствии с (7.3) определяется *тепловым сопротивлением излучения* $R_{\text{из}}$:

$$R_{\text{из}} = \Delta T / Q = (T - T_{\text{ср}}) / \epsilon S f(\Delta T). \quad (7.9)$$

7.1.3. ТЕПЛОВЫЕ МОДЕЛИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

При определении тепловой модели системы полупроводниковый прибор—окружающая среда необходимо выделить изотермические поверхности моделируемой системы, т. е. дискретные уровни температурного поля. Каждая область, заключенная между изотермическими поверхностями, описывается своими тепловым сопротивлением и теплоемкостью. Мощность, выделяемая источником тепла—активным элементом полупроводникового прибора—в виде теплового потока P , частично отводится через тепловое сопротивление P_R , частично накапливается в теплоемкости P_C (рис. 7.3, а). Трехзвенная тепловая модель системы полупроводниковый прибор — среда содержит три RC -звена: R_1C_1 —тепловое сопротивление и теплоемкость полупроводникового прибора; R_2C_2 —то же контактного корпуса полупроводникового прибора—охладитель; R_3C_3 —то же системы охладитель—среда (рис. 7.3, б).

Используют также тепловую модель в приведенных параметрах по схеме замещения на рис. 7.4. Она представляет собой преобразованную схему замещения (рис. 7.3, б) (ее часто называют тепловой моделью в истинных параметрах) при условии сохранения значения входного сопротивления схемы, т. е. $Z_{\text{вх,ист}} = Z_{\text{вх,прив}}$. Тогда искомая температура—температура структуры T_j —имеет одинаковое значение в обеих моделях:

$$T_j = P / Z_{\text{вх}}.$$

Применение для анализа тепловых режимов тепловой модели в приведенных параметрах может упростить определение параметров модели. При необходимости оценки температуры других изотермических поверхностей конструкции полупроводникового прибора (не только температуры структуры) используют формулы перехода от приведенных параметров к истинным [28].

Таким образом, RC -звенья тепловой модели характеризуют конечную область системы полупроводниковый прибор—среда, усредняя в этой области значения температур и теплофизических параметров. Число RC -звеньев в схеме замещения определяется заданной точностью расчета теплового режима, и оно тем больше, чем при меньших временах оценивается температура структуры. Естественно, что с ростом количества RC -звеньев вычислительные затраты увеличиваются.

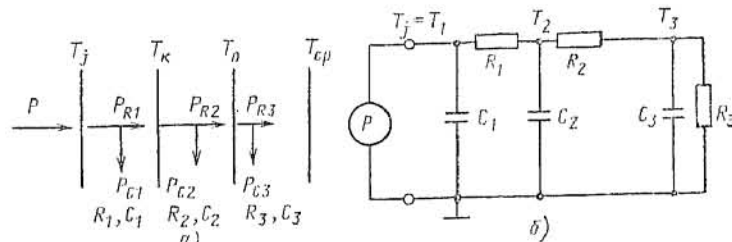


Рис. 7.3. Изотермические поверхности системы полупроводниковый прибор—окружающая среда (а) и тепловая модель этой системы в истинных параметрах (б)

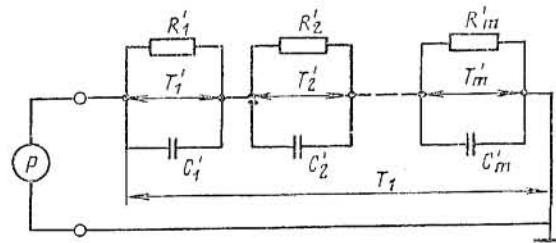


Рис. 7.4. Тепловая модель системы полупроводниковый прибор—среда в приведенных параметрах

Тепловой режим и тепловая модель полупроводникового прибора в значительной степени определяются характером электрических процессов, протекающих в активном элементе прибора. С этих позиций различают:

1. *Режим постоянного тока*—через прибор протекает

¹ Возможно повышение точности с помощью итерационных процедур, при этом тепловой режим по схеме замещения просчитывается несколько раз и в каждом цикле параметры модели уточняются соответственно значениям температур предыдущего цикла.

постоянный ток, рассеиваемая в приборе мощность и температура структуры также постоянны. Тепловая модель состоит только из тепловых сопротивлений.

2. *Импульсный режим* — открытое и закрытое состояние полупроводникового прибора периодически чередуются, соответственно следуют друг за другом процессы нагревания и охлаждения. Электрическая мощность потерь в импульсном режиме складывается

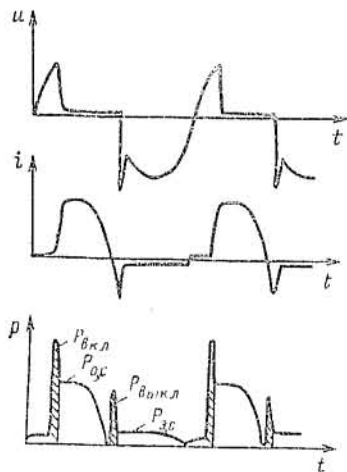


Рис. 7.5. Составляющие мощности потерь полупроводникового прибора в импульсном режиме

тепловой режим и тепловая модель прибора. Поэтому импульсные режимы дополнительно разбивают на подклассы:

2а. *Импульсный низкочастотный режим* — при низких рабочих частотах и индуктивном характере нагрузки оказывается возможным пренебречь коммутационными потерями в приборе и считать, что тепловой режим определяется только мощностью потерь в открытом состоянии. Тепловая модель состоит только из тепловых сопротивлений.

2б. *Импульсный высокочастотный режим* — с ростом рабочей частоты увеличивается «удельный вес» коммутационных потерь, так как длительность открытого состояния сокращается (рис. 7.5). Хотя колебания температуры структуры с ростом частоты обычно уменьшаются, расчет мощ-

ности потерь в открытом состоянии $P_{о.с.}$, в закрытом состоянии $P_{з.с.}$, во время переходных процессов включения $P_{вкл}$ и выключения $P_{выкл}$ (коммутационных потерь) (рис. 7.5):

$$P = P_{о.с.} + P_{з.с.} + P_{вкл} + P_{выкл}$$

Для управляемых полупроводниковых приборов добавляются потери управляющей мощности $P_{у.}$

В зависимости от удельного «веса» коммутационных потерь (запущены на рис. 7.5) в общей мощности потерь, а также от равномерности распределения мощности потерь по объему полупроводниковой структуры существенно меняются

мощности потерь и теплового режима в высокочастотном режиме значительно усложняется; нагрузочная способность прибора по сравнению с низкочастотным режимом снижается (причем не прямо пропорционально росту частоты, а, как правило, значительно резче). Тепловая модель содержит 3—4 RC-звена.

2в. *Импульсный неоднородный режим* — характеризуется ростом влияния неоднородных эффектов при переключении полупроводниковых приборов, т. е. неравномерным рассеиванием мощности потерь по объему структуры (эффект локализации энергии). Процессы нагревания и охлаждения становятся несимметричными. При этом теплостойкость прибора определяется не интегральной температурой структуры, а температурой «горячей точки» — локализованного объема выделения энергии в структуре полупроводникового прибора. Тепловая модель в этом режиме усложняется и содержит для прибора 4—5 RC-звеньев.

Разновидностью импульсного режима является «пакетный режим» следования импульсов электрической мощности (см. § 7.3.2 и рис. 7.20). При прочих равных условиях пакетный режим по сравнению с импульсным периодическим режимом характеризуется большими колебаниями температур системы полупроводниковый прибор — среда.

7.1.4. ТЕПЛОВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Выделение тепла в полупроводниковом приборе — неотделимый от режима его эксплуатации процесс, вызывающий изменение температуры структуры; температурная зависимость параметров структуры приводит к изменению электрического режима прибора и далее, через электрическую мощность потерь, к новым изменениям температуры. Такую взаимозависимость теплового и электрического режимов полупроводникового прибора называют *тепловой обратной связью*; механизм ее действия поясняет рис. 7.6. Электрическая энергия источника питания $P_{и.}$ передается в нагрузку $P_{н.}$, частично P рассеивается в структуре прибора и преобразуется в тепло Q . Тепловое сопротивление $R_{т.}$ определяет нагрев структуры $\Delta T_j = QR_{т.}$; под действием температурной зависимости параметров структуры, которая отражена на рис. 7.6, блоком $P(T_j)$ замыкается цепь тепловой обратной связи. В зависимости от глубины обратной

связи, теплового сопротивления, температуры окружающей среды и других факторов температура структуры ограничивается на определенном уровне либо растет неограниченно вплоть до отказа прибора.

Рассмотрим подробнее наиболее типичные физические механизмы тепловой обратной связи в полупроводниковых приборах.

В открытом состоянии биполярных приборов (диодов, транзисторов, тиристоров) при некотором значении плотности тока температурный коэффициент напряжения (ТКН)

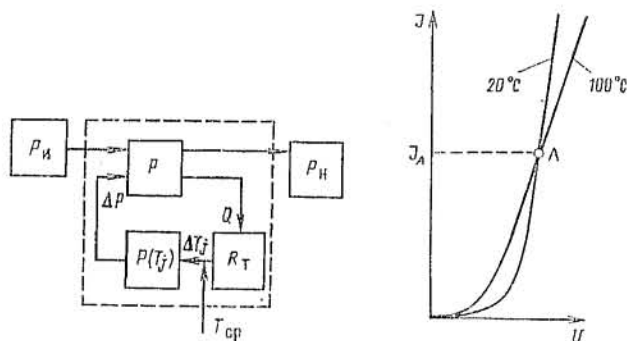


Рис. 7.6. Тепловая обратная связь в открытом состоянии прибора

Рис. 7.7. Механизм возникновения тепловой положительной обратной связи в полупроводниковых приборах

становится положительным (рис. 7.7), тогда при плотности тока выше точки А увеличение температуры структуры приводит к росту падения напряжения на приборе ($\text{ТКН} > 0$), т. е. мощность потерь повышается, что вызывает дальнейшее увеличение температуры, и т. д. Для обеспечения теплостойкости прибора необходимо создать эффективный теплоотвод возрастающей тепловой энергии, температура структуры T_j при этом возрастает до тех пор, пока не достигается тепловое равновесие, определяемое скоростью охлаждения прибора; максимально допустимое значение температуры структуры в этом режиме заметно ниже предельного значения $T_{j \max}$.

Для мощных биполярных высоковольтных приборов¹ воз-

¹ В высоковольтных приборах ($U = 2 \div 3$ кВ) значения токов утечки составляют сотни мА, а мощность $P_{\text{д.с}}$ — соответственно сотни ватт.

никает необходимость учета тепловой обратной связи в закрытом состоянии прибора: ее влияние проявляется через температурную зависимость обратных токов (токов утечки). Нарушение теплостойкости в этом режиме иллюстрирует рис. 7.8. Мощность потерь в закрытом состоянии прибора $P_{\text{д.с}}$ имеет степенную зависимость от температуры [см. (1.160)] — кривая 1 на рис. 7.8, прямые 2, 3 — тепловые характеристики полупроводникового прибора при двух значениях теплового сопротивления R . В точке А обеспечивается тепловое равновесие; точка В — точка критической тепловой обратной связи (точка тепловой неустойчивости); при увеличении теплового сопротивления прибор — среда (прямая 4) баланс нагрев — охлаждение нарушается, прибор перегревается и выходит из строя.

Следствием тепловой обратной связи может быть появление неоднородных эффектов, например эффекта «шнурования тока». При этом из-за отрицательного температурного коэффициента радиального сопротивления структуры прибора ток по площади структуры распределяется неравномерно, что приводит к еще большему росту температуры локального объема и снижению его сопротивления и т. д. — ток «стягивается в шнур», прибор может разрушиться.

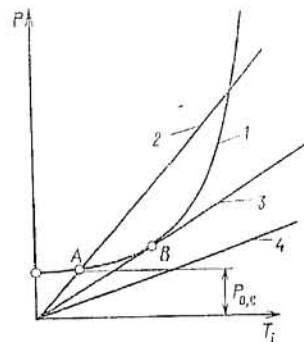


Рис. 7.8. Тепловая обратная связь в закрытом состоянии прибора

7.2. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тепловой расчет в режиме постоянного тока сводится к расчету температуры структуры T_j при условии обеспечения теплостойкости полупроводникового прибора:

$$T_j \leq T_{j \max} \quad (7.10)$$

где $T_{j \max}$ — максимально допустимая температура структуры (предельная температура), превышение которой в длительных режимах эксплуатации запрещается.

Типичные значения предельных температур различных классов полупроводниковых приборов приведены ниже.

Диоды при:	$T_{max}, ^\circ C$
$U_{обр} \leq 1600$ В	190
$U_{обр} \leq 2800$ В	175
$U_{обр} \leq 4000$ В	150
Стабилитроны	140
Тиристоры:	
лавинные	140
нелавинные	125
быстродействующие	110
симисторы	125
Транзисторы:	
биполярные кремниевые	200
биполярные германиевые	85—100
полевые МДП-транзисторы	150
полевые с управляющим переходом	125—175
Оптопары	100—120
Приборы с зарядовой связью	110—140

Для определения температуры структуры T_j в режиме постоянного тока полупроводниковый прибор представляют схемой замещения, состоящей только из тепловых сопро-

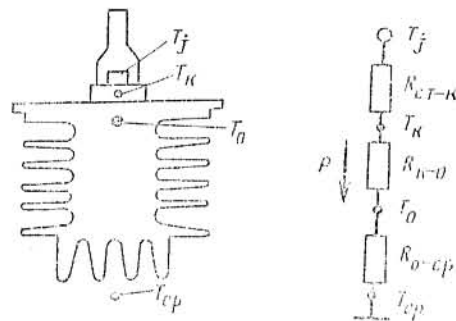


Рис. 7.9. Тепловая модель полупроводникового прибора в режиме постоянного тока

тивлений (теплоемкости при постоянном тепловом потоке не играют роли) (рис. 7.9). Из схемы замещения выразим температуру структуры:

$$T_j = P(R_{ct-k} + R_{k-o} + R_{o-ср}) + T_{ср} \quad (7.11)$$

где $R_{ct-k}(R_{tc})$ — тепловое сопротивление участка между структурой и корпусом полупроводникового прибора (внутреннее тепловое сопротивление); $R_{k-o}(R_{cr})$ — тепловое сопротивление контакта корпуса прибора и охладителя;

$R_{o-ср}(R_{ca})$ — тепловое сопротивление между охладителем и окружающей средой (R_{tc} , R_{ct} , R_{ca} — обозначения, принятые Международной электротехнической комиссией).

Тепловой расчет полупроводникового прибора в режиме постоянного тока сводится к последовательному определению:

1. Полного теплового сопротивления системы структура — среда:

$$R_{ct-ср} = R_{ct-k} + R_{k-o} + R_{o-ср}. \quad (7.12a)$$

Максимально допустимой мощности потерь по заданным значениям T_{jmax} и T_a :

$$P = (T_{jmax} - T_a)/R_{ct-ср}. \quad (7.12б)$$

3. Максимально допустимого прямого тока (предельного тока) по связи между током и допустимой мощностью потерь.

Уменьшение температуры структуры, а значит, повышение надежности работы прибора возможны либо за счет интенсивного охлаждения (снижения $R_{ct-ср}$), либо за счет снижения мощности потерь.

7.2.1. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ И ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Открытый полупроводниковый прибор заменяется эквивалентной электрической схемой, состоящей из источника напряжения U_0 и динамического сопротивления $r_{дин}$ (рис. 7.10). При протекании постоянного тока I мощность потерь

$$P = IU_0 + I^2 r_{дин}. \quad (7.13)$$

В табл. 7.2 приводятся параметры схемы замещения (рис. 7.10) для различных классов полупроводниковых приборов, методика определения параметров по ВАХ, а также формулы расчета мощности потерь.

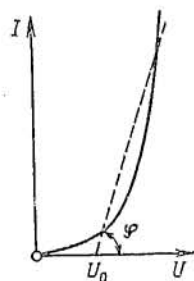
Поток тепла от полупроводниковой структуры определяется рядом внутренних факторов: теплопроводностью, формой и размерами кристалла, качеством соединения кристалла с основанием, теплопроводностью материала основания, формой и размерами основания прибора, а также тепловым сопротивлением выводов. Все эти факторы задают значение внутреннего теплового сопротивления прибора R_{ct-k} . Следует подчеркнуть, что R_{ct-k} определяет предел нагрузочной способности полупроводникового прибора, за-

Таблица 7.2. Параметры схемы замещения полупроводниковых приборов в открытом состоянии

Тип прибора

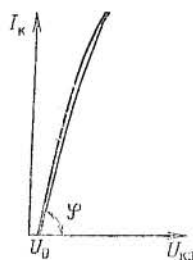
Параметры

Дiod и тиристор

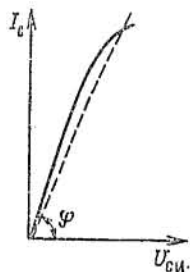


$$\begin{aligned} \text{ctg} \varphi &= r_{\text{дин}}; \\ P &= I_A U_0 + I_A^2 r_{\text{дин}} \end{aligned}$$

Биполярный транзистор



$$\begin{aligned} \text{ctg} \varphi &= r_{\text{дин}}; \\ P &= I_{K\text{H}} U_0 + I_{K\text{H}}^2 r_{\text{дин}} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{ctg} \varphi &= r_{\text{дин}}; \\ P &= I_C^2 r_{\text{дин}}; \\ U_0 &= 0 \end{aligned}$$

МДП-транзистор

даваемый выражением (7.126) при $R_{\text{к-о}} + R_{\text{о-ср}}$, стремящийся к нулю:

$$P = (T_{\text{max}} - T_a) / R_{\text{ст-к}}, \quad (7.14)$$

т. е. никакими усовершенствованиями охладителя и условий охлаждения этот предел не может быть превышен. Применяя полупроводниковый прибор, разработчик устройства не может влиять на перечисленные факторы и пользуется значением теплового сопротивления $R_{\text{ст-к}}$, приводимым в справочных данных. Тем не менее температуру структуры можно снизить за счет выбора прибора с лучшими теплофизическими параметрами корпуса. Ниже приведены примерные значения тепловых сопротивлений типичных корпусов полупроводниковых приборов.

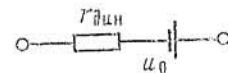


Рис. 7.10. Электрическая модель полупроводникового прибора в открытом состоянии

Тип корпуса	$R_{\text{ст-к}}, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
ТО-3, 61, 66, 127; ДО-5	0,4—2,0
ТО-220; ДО-4	2,0—5,0
ТО-126	4,0—15,0
ТО-5, 18, 92	30,0—100,0

Внутреннее тепловое сопротивление прежде всего определяется конструкцией прибора. Наибольшее применение в настоящее время нашли конструкции штыревого и таблеточного типов.

На рис. 7.11, а показана в качестве примера прибора штыревого типа конструкция тиристора Т160. Основным элементом конструкции является вентильный элемент, состоящий из кремниевого диска 1 и двух припаянных к нему термокомпенсирующих вольфрамовых дисков 2. Нижний вольфрамовый диск припаявается к медному основанию 3, которое изготавливается совместно с резьбовой шпилькой 4 для крепления в охладителе. На верхнем вольфрамовом диске имеется отверстие, служащее для размещения молибденовой пластины, к которой припаяется внутренний управляющий вывод 5. К верхнему вольфрамовому диску припаяна контактная чашка 6 с внутренним силовым выводом 7. Внешний управляющий вывод 10 и внешний силовой вывод 12 с накопительником 13 напаяны на соответствующие стальные втулки 9 и 11, которые заделаны в металлостеклянную крышку 8. В основании имеется кольцевой паз, в который перед установкой крышки закладывается фторопластовая прокладка, обеспечивающая при завальцовке необходимую герметизацию прибора.

Конструкция таблеточного тиристора типа Т500 приводится на рис. 7.11, б. Вентильный элемент, образованный сваркой кремниевых диска 1 с вольфрамовым термокомпенсатором 2, помещен на поверхности медной мембраны 3, которая соединена с керамическим корпусом 5. Второй термокомпенсирующий диск из молибдена 7 прижат к кремниевому диску медным основанием 8, связанным с корпусом посредством манжеты 6. Внутри основания расположен внутренний управляю-

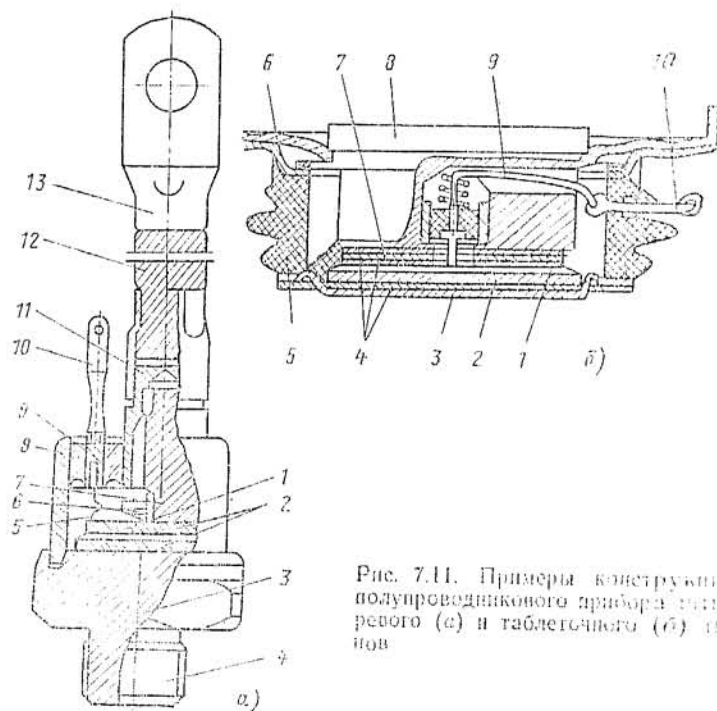


Рис. 7.11. Примеры конструкции полупроводникового прибора штыревого (а) и таблеточного (б) типов

щий вывод 9, который припаян к внешнему управляющему выводу 10. Для уменьшения контактных сопротивлений используются прокладки 4. Электрический и тепловой контакты обеспечиваются внешним прижимающим усилием через мембрану и основание.

Для полупроводниковых приборов штыревой конструкции основной тепловой поток (свыше 85—95 % тепла) направлен от источника тепла — активного элемента — к основанию и далее к охладителю в окружающую среду. Это приборы с односторонним теплоотводом; перенос тепла в на-

Рис. 7.12. Тепловая модель прибора таблеточной конструкции в режиме постоянного тока

правлении верхнего вывода в них практически отсутствует.

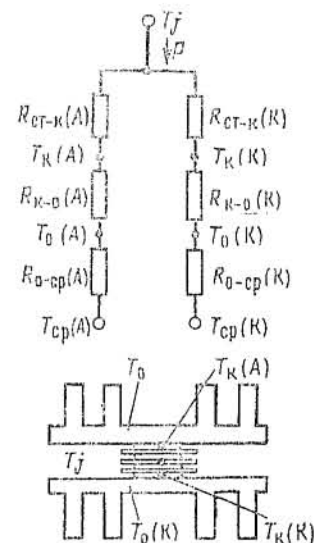
В приборах таблеточной конструкции тепловой поток разделяется на две части и теплоотвод становится двусторонним (рис. 7.12). Внутреннее тепловое сопротивление прибора уменьшается и при симметрии теплоотвода равно:

$$1/R_{\text{ст-к}} = 1/R_{(\text{ст-к})_1} + 1/R_{(\text{ст-к})_2}, \quad (7.15)$$

где

$$R_{(\text{ст-к})_1} = (T_j - T_K) / P_1;$$

$$R_{(\text{ст-к})_2} = (T_j - T_K) / P_2$$



7.2.2. ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРПУС — ОХЛАДИТЕЛЬ

Меры по снижению теплового сопротивления между корпусом и охладителем оказывают существенное влияние на улучшение теплового режима полупроводникового прибора. Так, например, для транзистора, собранного на корпусе ТО-3, значение $R_{к-о}$ может меняться от 0,1 °C/Вт (в случае отсутствия изолирующей прокладки и использования теплопроводящей смазки) до значения 2 °C/Вт. Если мощность потерь при этом составляет 20 Вт, то в последнем случае корпус прибора (а следовательно, и структура) будет на 20 Вт · (2,0—0,1) °C/Вт, т. е. на 38 °C, нагрет сильнее.

Тепловое сопротивление на любой границе раздела является функцией площади контакта, степени неровности контактирующих поверхностей, нагрузки, приложенной между поверхностями, и теплопроводности материала, заполняющего небольшие зазоры на границе раздела. Снижение теплового сопротивления $R_{к-о}$ обеспечивается выполнением следующих требований:

между поверхностями необходимо вводить теплопроводящие смазки;

контактирующие поверхности должны быть плоскими и гладкими;

площадь контакта должна быть максимально возможной;

закручивающий момент должен соответствовать значениям, которые рекомендованы изготовителем прибора, увеличение закручивающего момента в допустимых пределах позволяет уменьшить $R_{к-о}$;

при необходимости изоляции корпуса прибора от охлаждаителя следует выбирать изолирующий материал с минимальными тепловыми сопротивлениями (табл. 7.3).

Таблица 7.3. Значения $R_{к-о}$ изолирующих прокладок (при наличии теплопроводящей смазки)

Материал прокладки	Толщина, мм	Закручивающий момент M/M_{max}	Тип корпуса	$R_{к-о}$, °C/Вт
Оксид бериллия	2,87	1	ТО-3	0,22
		2/3	ТО-66	0,45
		1/3	ТО-220	1,40
Слюда	0,145	1	ТО-3	0,8
		2/3	ТО-66	1,6
		1/3	ТО-220	5,2
Пластик	0,051	1	ТО-3	0,8
		2/3	ТО-66	1,6
		1/3	ТО-220	5,2
Органическая резина	3,05	1	ТО-3	1,2
		2/3	ТО-66	2,4
		1,3	ТО-220	7,9
Без изоляции	—	1	ТО-3	0,15—0,25
		2,3	ТО-66	0,35—0,45
		1,3	ТО-220	0,55—0,65

В процессе эксплуатации полупроводникового прибора значение $R_{к-о}$ может увеличиваться вследствие снижения силы прижатия поверхностей из-за колебаний и вибрации, окисления соприкасающихся поверхностей, утечки смазки. Необходимо периодически проверять качество контакта корпус — охлаждаитель, чтобы обеспечить надежную работу полупроводникового устройства. Важно предохранить этот контакт

от попадания влаги, способствующей коррозии корпуса и охлаждаителя и увеличению теплового сопротивления $R_{к-о}$.

Для снижения отрицательного влияния силового тока на тепловое сопротивление $R_{к-о}$ основание охлаждаителя армируют медной втулкой, которая запрессовывается в корпус охлаждаителя.

Иногда токоведущую шину прижимают непосредственно к прибору, тем самым исключается протекание тока через контакт медь — алюминий.

7.2.3. ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОХЛАДИТЕЛЬ — СРЕДА

Отечественной промышленностью изготавливаются медные и алюминиевые охлаждаители, а также охлаждаители из алюминиевых сплавов. На рис. 7.13, а показан типичный семиреберный охлаждаитель в сборе с прибором витрепной конструкции, на рис. 7.13, б — охлаждаитель в сборе с прибором таблеточного типа.

Охлаждаители изготовлены из алюминия методом литья под давлением и применяются с естественным и принудительным воздушным охлаждением.

Тепловое сопротивление охлаждаителя изменяется в широких пределах в зависимости от условий охлаждения. Благодаря простоте и удобству в эксплуатации распространено воздушное охлаждение. Теплопередача от охлаждаителя к окружающей среде осуществляется конвекцией и излучением. Конвективный теплообмен подчиняется закону Ньютона [см. (7.2)].

Коэффициент конвективного теплообмена α_k является функцией теплофизических свойств, температуры и скорости движения теплоносителя, а также конфигурации и размеров поверхности теплообмена.

Теплообмен при излучении прежде всего зависит от коэффициента излучения (степени черноты) материала охлаждаителя ϵ . Термин «черный материал» имеет мало общего с цветом в оптическом смысле: тела любого цвета могут иметь высокую излучательную способность и называться «черными». Матовая поверхность излучает эффективнее, чем блестящая. Коэффициенты излучения материалов охлаждаителей приведены ниже.

Алюминий анодированный	0,05—0,10
Алюминий анодированный	0,70—0,90
Медь анодированная	0,05—0,1
Сталь	0,55—0,65
Масляные краски любого цвета	0,92—0,96
Лак любого цвета	0,8—0,95

Естественное воздушное охлаждение имеет низкий коэффициент теплообмена, не превышающий значения $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Такой теплоотвод при заданном уровне надежности работы приборов позволяет использовать полупроводниковые приборы примерно на 25 % их предельной

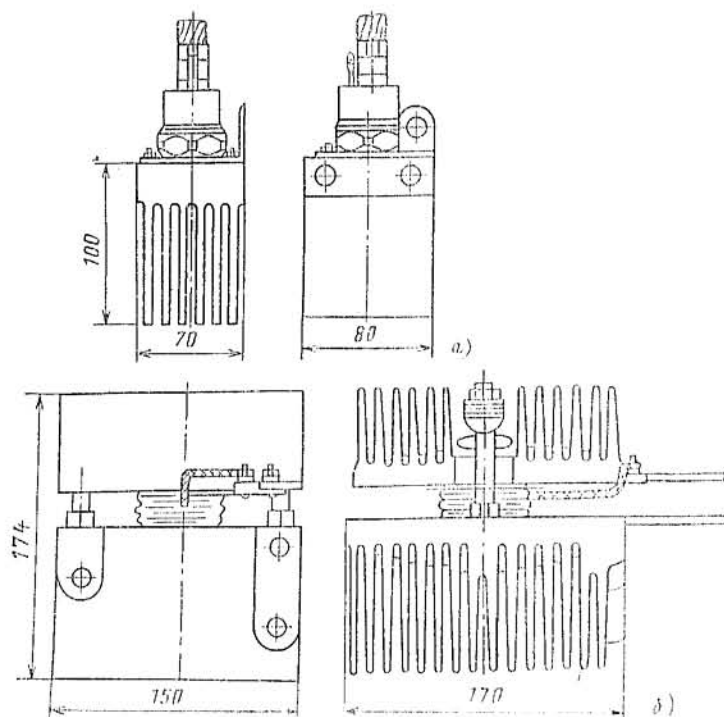


Рис. 7.13. Прибор в сборе с охладителем при естественном охлаждении

нагрузочной способности. Мощность полупроводниковых устройств с естественным воздушным охлаждением не превышает $10\text{--}15 \text{ кВт}$.

В большинстве выпускаемых промышленностью полупроводниковых устройств на мощности более 10 кВт применяется принудительное воздушное охлаждение, что позволяет увеличить теплоотдачу за счет вынужденной конвекции и повысить нагрузочную способность приборов. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи при

этом составляет $70\text{--}150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в зависимости от скорости воздуха.

При естественном воздушном теплоотводе примерно 70 % тепла отводится конвекцией и 30 % — излучением. Принудительная конвекция снижает роль излучательного теплоотвода до 2—7 %, при этом снижается влияние экранирования и конструкция охладителей становится более компактной.

Основные требования к монтажу охладителей при конвективном охлаждении полупроводниковых приборов:

при естественной конвекции максимальная длина участвующей в теплоотводе поверхности должна располагаться в вертикальной плоскости;

полупроводниковые приборы, являющиеся источниками тепла, не должны возвышаться над охладителем;

при принудительной конвекции маломощные полупроводниковые приборы нужно монтировать в начале потока, а мощные — в конце.

Возможности принудительного воздушного охлаждения ограничивают скорость обдува (не более $15\text{--}20 \text{ м/с}$) и низкая интенсивность теплоотдачи в воздух. В результате приходится увеличивать поверхность охладителей, что ведет к росту массы и габаритов, усложнению конструкции. Переход к жидкостному (водяному) охлаждению позволяет повысить коэффициент теплообмена до $10^3\text{--}7 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Типичный пример водяного охлаждения для приборов интегрального исполнения представлен на рис. 7.14, а. Охладитель состоит из массивной медной цилиндрической рубашки 1 и латунного доньшка 2, соединенных пайкой и образующих два канала движения жидкости. Подвод и отвод воды обеспечиваются через патрубки 3. Для крепления к токоведущей шине один из патрубков имеет резьбу.

На рис. 7.14, б показана конструкция водяного охладителя таблеточных приборов. Рубашка 1 охладителя для увеличения поверхности теплообмена с жидкостью снабжена ребрами, которые вместе с доньшком 2 образуют каналы движения воды. Подвод и отвод воды — через патрубки 3.

Использование воды в качестве теплоносителя имеет два наиболее существенных недостатка: сравнительно высокая температура замерзания и малая электрическая прочность. Это ограничивает применение водяного охлаж-

дения при отрицательных температурах и в высоковольтных устройствах.

При большой плотности теплового потока (более 20 Вт/см²) применение жидкостного охлаждения становится малоэффективным и переходят к испарительному охлаждению. Интенсивное поглощение тепла в этом режиме теплообмена обеспечивается во время фазовых превращений теплоносителя — при испарении и кипении с последующим

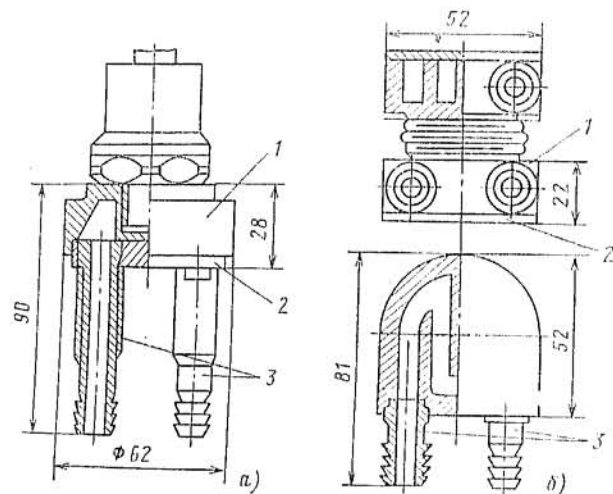


Рис. 7.14. Прибор в сборе с охладителем при жидкостном охлаждении

переносом тепла кипящей жидкостью или паром [30]. Температура кипения теплоносителя должна быть, естественно, ниже максимально допустимой температуры структуры прибора. Для приборов с $T_{max} \geq 100^\circ\text{C}$ используется кипящая вода, при более низких температурах применяются фреоны, имеющие температуру кипения 39—45 °С.

7.2.4. ВЫБОР ТИПА ОХЛАЖДЕНИЯ И ОХЛАДИТЕЛЯ

Выбор типа охлаждения полупроводникового прибора и, чаще всего, электронного устройства в целом можно в первом приближении сделать по диаграммам рис. 7.15, а, которые связывают плотность излучаемого прибором теп-

лового потока с температурой структуры T_f . По типу рекомендуемого охлаждения диаграмма распадается на следующие области: 1 — область естественного воздушного

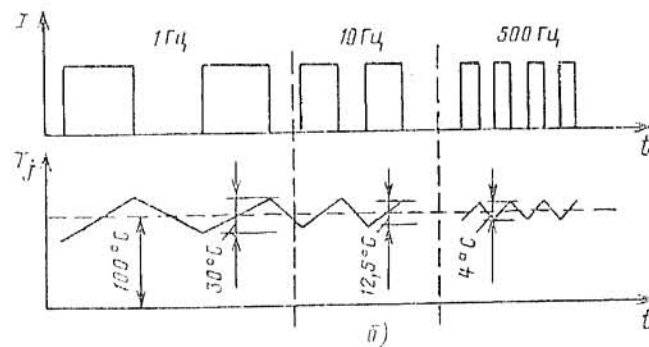
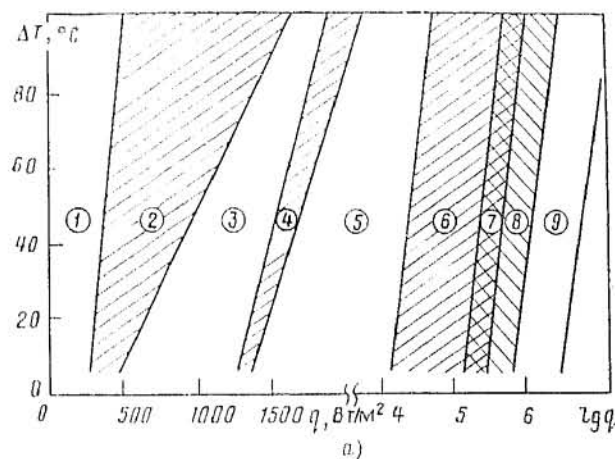


Рис. 7.15. Диаграммы выбора типа охлаждения прибора (а) и изменения температуры структуры в импульсном режиме (б)

охлаждения, 3 — принудительного воздушного, 5 — жидкостного (водяного) принудительного, 9 — испарительного принудительного. Выбор типа охлаждения для заштрихованных областей диаграммы неоднозначен: в области 2 возможно применение естественного и принудительного

воздушного охлаждения, 4 — принудительного воздушного и жидкостного, 6 — принудительного жидкостного и естественного испарительного, 7 — принудительного жидкостного, естественного и принудительного испарительного, 8 — естественного и принудительного испарительного.

Для выбора охладителя полупроводникового прибора учитываются следующие данные: параметры режима эксплуатации прибора (амплитуда и форма тока, длительность открытого состояния, рабочая частота, диапазон рабочих температур — верхняя граница диапазона — максимальная температура структуры), класс прибора (диод, тиристор, биполярный или полевой транзистор, оптопара и т. д.), класс теплового режима (см. § 7.1.3), элементы конструкции (наличие изолирующей прокладки между корпусом прибора и охладителем, тепловые параметры прокладки, наличие теплопроводящей смазки между корпусом прибора и охладителем, тепловые параметры смазки), количество приборов на одном охладителе, расстояние между охладителями, параметры окружающей среды (температура среды, давление, скорость потока теплоносителя).

В отличие от режима постоянного тока импульсный режим характеризуется изменяющейся во времени температурой структуры (рис. 7.15, б). Амплитуда колебаний температуры структуры относительно своего среднего значения определяется кроме тепловых сопротивлений также значениями теплоемкостей конструкции прибора. Тепловой расчет прибора в импульсном режиме необходимо проводить по тепловой схеме замещения.

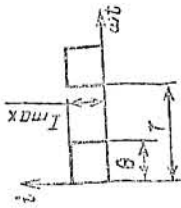
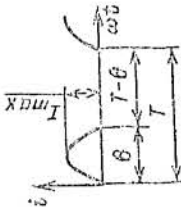
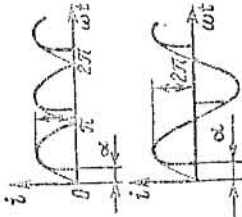
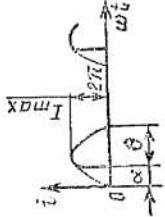
Однако в первом приближении тепловой расчет импульсного режима также можно свести к расчету на постоянном токе, при этом в соответствующие формулы подставляется среднее значение мощности потерь. Точность такого оценочного расчета будет тем выше, чем больше рабочая частота и чем больше тепловые постоянные времени полупроводникового прибора.

Пусть через полупроводниковый прибор проходят импульсы тока $i(t)$ с периодом T . Тогда из схемы замещения открытого прибора (см. рис. 7.10) получим мгновенное значение мощности потерь $P(t)$:

$$P(t) = U i(t) + r_{\text{дин}} i^2(t), \quad (7.16)$$

откуда для расчета среднего значения мощности потерь имеем

Таблица 7.4. Коэффициенты формы тока

Параметр		$I_{\text{max}} \frac{\delta}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{\delta}}$
		$\frac{2 I_{\text{max}}}{\pi} \frac{\delta}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{\pi \frac{\delta}{2}}}$
		$\frac{I_{\text{max}}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$	$\sqrt{\frac{\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}{1 + \cos \alpha}}$
		$\frac{I_{\text{max}}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$	$\sqrt{\frac{\frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha}{\pi}} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}{1 + \cos \alpha}}$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = U_0 \int_0^T i(t) dt + r_{\text{дин}} \int_0^T i^2(t) dt = U_0 I + k_{\text{ф}}^2 I^2 r_{\text{дин}}, \quad (7.17)$$

где U_0 — пороговое напряжение прибора; $r_{\text{дин}}$ — динамическое сопротивление прибора; I — среднее значение тока, протекающего через прибор; $I_{\text{д}}$ — действующее значение тока; $k_{\text{ф}} = I/I_{\text{д}}$ — коэффициент формы тока. Значения коэффициента формы тока $k_{\text{ф}}$ для типичных импульсных низкочастотных режимов эксплуатации полупроводниковых приборов приведены в табл. 7.4.

Выбор охладителя сводится к определению его конструкции и размеров, обеспечивающих теплостойкость прибора, т. е. удовлетворяющих условию $T_j \leq T_{j \text{ max}}$. Задача решается методом последовательных приближений. В первом приближении из ряда типовых охладителей, выпускаемых промышленностью, по максимально допустимому значению мощности потерь или по тепловому сопротивлению охладителя R_0 (табл. 7.5) выбирают с некоторым запасом наи-

Таблица 7.5. Типовые охладители полупроводниковых приборов

Тип охладителя	Масса, кг	Тепловое сопротивление R_0 , °C/Вт	Мощность потерь, Вт
<i>Для приборов штыревой конструкции</i>			
0-111-60	0,11	5,5	10
0-121-60			
0-131-60	0,189	2,8	16
0-141-60			
0-151-80	0,42	1,82	50
0-161-80	0,8	1,1	70
0-171-80			
0-181-110	1,75	0,68	130
<i>Для приборов таблеточной конструкции</i>			
0-123-100	2,0	0,7 (0,21) ¹	120
0-143-150	3,0	0,5 (0,2)	120
0-353-150	5,3	0,36 (0,095)	220
0-343-150			
0-153-150	6,0	0,27 (0,075)	220
0-243-150			
0-173-200	17,0	0,15 (0,045)	400
0-273-250	20,0	0,13 (0,043)	460

¹ В скобках приведены значения теплового сопротивления для принудительного воздушного охлаждения со скоростью теплоносителя $v=6$ м/с.

более подходящий для заданного режима эксплуатации полупроводникового прибора охладитель. Ряд типовых охладителей ограничен, и получающийся «запас» может оказаться значительным, что приводит к увеличению массы и габаритов устройства в целом.

Рассчитаем минимально необходимое значение теплового сопротивления охладителя по тепловой модели в режиме постоянного тока (рис. 7.16, а), где $R_{\text{ст-к}}$ — тепловое сопротивление структура—корпус; $R_{\text{к-о}}$ — тепловое сопротивление корпус — охладитель; $R_{\text{о-ср}}$ — тепловое сопротивление

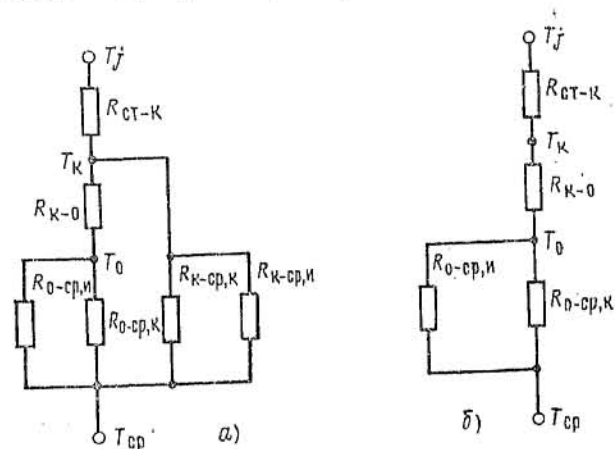


Рис. 7.16. Полная (а) и упрощенная (б) тепловые модели прибора в режиме постоянного тока

охладитель — среда (индексы «к» и «и» соответствуют конвективной и излучательной составляющим тепловых сопротивлений).

Обычно можно пренебречь теплообменом корпус — среда, так как

$$R_{\text{к-ср}} = (R_{\text{к-ср,к}} \parallel R_{\text{к-ср,и}}) \gg (R_{\text{к-о}} + R_{\text{о-ср}}),$$

и тепловую модель представить в виде упрощенной схемы замещения рис. 7.16, б, откуда по закону Ома имеем

$$T_j - T_{\text{ср}} = P(R_{\text{ст-к}} + R_{\text{к-о}} + R_{\text{о-ср}}). \quad (7.18)$$

В выражении (7.18) определим последовательно значения тепловых сопротивлений $R_{\text{ст-к}}$, $R_{\text{к-о}}$ и $R_{\text{о-ср}}$. Внутреннее тепловое сопротивление $R_{\text{ст-к}}$ выбирается из справоч-

ных данных с учетом влияния типа корпуса прибора на теплоотвод (см. табл. 7.3).

Тепловое сопротивление контакта корпус—охладитель

$$R_{к-о} = (1/\sigma_{уд} S) + l/\lambda S, \quad (7.19)$$

где $\sigma_{уд}$ — удельная поверхностная тепловая проводимость контакта корпус—охладитель; $l/\lambda S$ — тепловое сопротивление изолирующей прокладки.

Ниже приведены значения $\sigma_{уд}$ контактов различных пар материалов при заданной шероховатости контактирующих поверхностей и давлении сжатия 10 Н/м^2 .

Удельная тепловая проводимость контактов материалов

Медь — алюминий	12,5
Медь — медь	10,0
Медь — дюралюминий	5,0

Максимально допустимый перегрев охлаждаителя ограничивается предельной температурой структуры $T_{j \max}$ и равен:

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\text{ср}} \leq k_T (T_{j \max} - T_{\text{ср}} - P(R_{\text{сг-к}} + R_{к-о})), \quad (7.20)$$

где $k_T = f(L)$ — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева охлаждаителя при увеличении его размеров (L — наибольший линейный размер охлаждаителя).

В случае, если охлаждаитель является общим для m полупроводниковых приборов, то для температуры структуры i -го прибора имеем

$$T_{ji} - T_{\text{ср}} = P_i (R_{\text{сг-к}} + R_{к-о}) + \left(\sum_{i=1}^m P_i R_{о-ср} \right) / k_T. \quad (7.21)$$

На основе требований к массе, габаритным размерам и стоимости устройства с учетом возможностей производства (технологические возможности и серийность выпуска разрабатываемых устройств) выбирают конструкцию охлаждаителя и его размеры. Далее на каждом шаге расчета определяются площади поверхностей S_k , S_n , участвующих в конвективном и излучательном теплообмене. Рассчитывается тепловая характеристика охлаждаителя [см. (7.2), (7.3)]:

$$\Delta T_o = P / [\alpha_k (\Delta T_o) S_k + \epsilon S_n f(\Delta T_o)]. \quad (7.22)$$

При $\Delta T_o > \Delta T_{\max}$ на следующем шаге вычислений размеры охлаждаителя увеличивают, при $\Delta T_o \ll \Delta T_{\max}$ уменьша-

ют. Останов вычислений происходит при условии, что $\Delta T_o \leq \Delta T_{\max}$, а размеры и масса охлаждаителя удовлетворяют массогабаритным требованиям к устройству.

Приведем тепловые характеристики наиболее употребительных типов охлаждаителей. Для плоской пластины в качестве охлаждаителя полагают, что $S_k = S_n = 2S_o = S$, и тепловую характеристику представляют в виде

$$P = \Delta T_o S [2,84 \cdot 10^{-8} \epsilon (\Delta T_o + 2T_{\text{ср}})^3 + \alpha_k (\Delta T_o)], \quad (7.23)$$

где ϵ — коэффициент излучения поверхности охлаждаителя, а значения α_k определяются выражениями (7.8).

Охладитель-пластина прост в изготовлении, имеет низкую стоимость, но требует больших объемов.

В целях повышения эффективности теплоотвода и уменьшения габаритов переходят к ребристым и штыревым охлаждаителям (рис. 7.17). При расчете ребристого охлаждаителя необходимо учитывать, что в излучательном теплообмене участвует в основном наружная поверхность охлаждаителя, а в конвективном принимают участие обе поверхности: наружная и внутренняя — межреберное пространство. Тогда площади поверхностей теплообмена

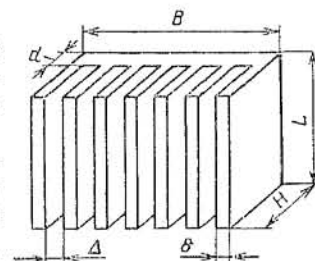


Рис. 7.17. Конструкция ребристого охлаждаителя полупроводникового прибора

$$S_n = 2L(B + H) + 2BH; \quad (7.24)$$

$$S_k = [2(H - d) + \Delta](n - 1)L + L(B + 2H + \delta n), \quad (7.25)$$

где n — количество ребер охлаждаителя.

Тепловая характеристика ребристого охлаждаителя задается выражением

$$P = \Delta T_o [\alpha_k (\Delta T_o) S_k + \epsilon S_n f(\Delta T_o)]. \quad (7.26)$$

Значения $\alpha_k (\Delta T_o)$, $f(\Delta T_o)$ и ϵ определяются из справочных данных [28]. Ребристые охлаждаители также просты в изготовлении, позволяют отводить значительные мощности, но эффективность теплоотвода для этой конструкции охлаждаителей сильно зависит от ориентации по отношению к потоку теплоносителя, что не всегда удобно при разработке конструкции устройства в целом.

Штыревые охладители не требуют строгой пространственной ориентации, но сложнее в изготовлении. Тепловая характеристика штыревого охладителя приведена в [28].

7.2.5. УЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Влияние тепловой обратной связи на рабочий режим полупроводникового прибора достаточно разнообразно (см. § 7.1.4). Рассмотрим методику количественного учета такого влияния на примере тепловой обратной связи в мощном МДП-транзисторе.

Механизм тепловой обратной связи в МДП-транзисторе можно представить следующим образом. Электрическая мощность в открытом состоянии транзистора выделяется на сопротивлении стока r_c :

$$P = I_c^2 r_c(T_j). \quad (7.27)$$

Температура структуры транзистора в режиме постоянного тока определяется тепловым сопротивлением $R_{ст-ср}$:

$$T_j = P(T_j) R_{ст-ср} + T_{ср}. \quad (7.28)$$

Сопротивление r_c растет с увеличением температуры T_j , т. е. электрическая мощность потерь P и температура структуры T_j в МДП-транзисторе взаимозависимы [ср. (7.27) и (7.28)]. Для оценки влияния тепловой обратной связи введем нормированную мощность потерь:

$$\begin{aligned} P_*(T_j) &= P(T_j)/P(25^\circ\text{C}) = \\ &= I_c^2(T_j) r_c(T_j)/I_c^2(25^\circ\text{C}) r_c(25^\circ\text{C}). \end{aligned} \quad (7.29)$$

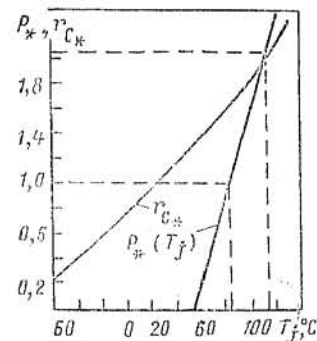
Действующее значение тока стока I_c практически не зависит от температуры T_j (ток задается внешней цепью), т. е. нормированные зависимости $P_*(T_j)$ и $r_c(T_j)$ совпадают.

Тепловую характеристику МДП-транзистора представим в виде

$$T_j = T_{ср} + R_{ст-ср} [P_* I_c^2 r_c(25^\circ\text{C})] \quad (7.30)$$

и определим влияние тепловой обратной связи при следующих исходных данных: $r_c(25^\circ\text{C}) = 1,7 \text{ Ом}$; $I_c = 2,1 \text{ А}$; $R_{ст-ср} = 4,06^\circ\text{C/Вт}$; $T_{ср} = 55^\circ\text{C}$. Зависимость $r_c(T_j)$ реального МДП-транзистора изображена на рис. 7.18 (приводится в справочных данных). Тепловую характеристику (7.30) построим по двум точкам: 1) $P_* = 0$, $T_j = T_{ср} = 55^\circ\text{C}$;

Рис. 7.18. Учет влияния тепловой обратной связи на примере МДП-транзистора



2) $P_* = 1$, $T_j = 85,4^\circ\text{C}$ (рис. 7.18). Искомая температура структуры должна удовлетворять обоим характеристикам и определяется точкой пересечения, т. е. $T_j = 115^\circ\text{C}$, при этом в транзисторе рассеивается мощность

$$P = P_* I_c^2 r_c(25^\circ\text{C}) = 1,9 (2,1)^2 1,7 = 14,24 \text{ Вт}. \quad (7.31)$$

Таким образом, под действием тепловой обратной связи мощность потерь увеличилась почти в 2 раза по сравнению с данными при 25°C .

7.3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

7.3.1. ИМПУЛЬСНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Тепловой расчет импульсного режима по методике режима постоянного тока может дать значительную погрешность — особенно в режимах с прямоугольной формой тока, характерных для работы полупроводниковых приборов в ключах постоянного тока, импульсных генераторах и других ключевых устройствах.

На рис. 7.19 изображены диаграммы изменения мощности потерь и температуры структуры в установившемся периодическом импульсном режиме. Параметры импульсной последовательности: t_n — длительность импульса (через прибор протекает ток); t_n — длительность паузы между импульсами (прибор закрыт, ток не протекает); $T = t_n + t_n$ — период следования импульсов.

Рассчитаем максимальную температуру структуры T_{jmax} с помощью тепловой схемы замещения полупроводникового прибора в приведенных параметрах (см. рис. 7.4). Значение максимальной температуры структуры определяется суммой температур отдельных $R_h C_h$ -элементов схемы:

$$T_{jmax} = \sum_{k=1}^m T_{kmax}. \quad (7.32)$$

Воспользуемся электротепловой аналогией: тепловая схема замещения k -го $R_k C_k$ -элемента эквивалентна электрической цепи с источником тока I (рис. 7.19, в). Переходный процесс изменения напряжения U_C в такой электрической схеме определяется известным из электротехники выражением:

$$u_C(t) = U_C(\infty) - [U_C(\infty) - U_C(0)] e^{-t/\tau_C} = IR(1 - e^{-t/\tau_C}) + U_C(0) e^{-t/\tau_C}. \quad (7.33)$$

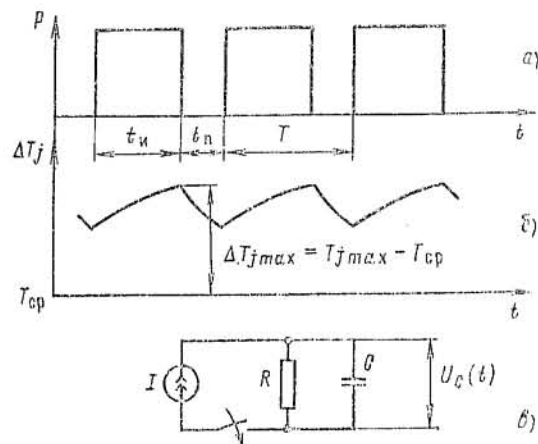


Рис. 7.19. К расчету импульсного теплового режима:

а — диаграмма изменения мощности потерь; б — диаграмма температуры структуры; в — электрический аналог звена тепловой схемы замещения

По аналогии с (7.33) для k -го элемента тепловой схемы замещения на интервале t_n , когда происходит нагревание прибора и температура структуры увеличивается, можно записать

$$T_k(t) = PR_k(1 - e^{-t/\tau_k}) + T_k(0) e^{-t/\tau_k}, \quad (7.34)$$

где τ_k — тепловая постоянная времени k -го элемента.

В момент окончания импульса мощности температура элемента имеет максимальное значение:

$$T_k(t_n) = T_{kmax} = PR_k(1 - e^{-t_n/\tau_k}) + T_{kmin} e^{-t_n/\tau_k}. \quad (7.35)$$

На интервале паузы между импульсами t_n , когда выделения мощности в приборе нет, происходит охлаждение структуры, и для k -го элемента имеем

$$T_k(t) = T_{kmax} e^{-t/\tau_k}. \quad (7.36)$$

В момент окончания паузы t_n температура k -го элемента принимает минимальное значение (рис. 7.19, б):

$$T_k(t_n) = T_{kmin} = T_{kmax} e^{-t_n/\tau_k}. \quad (7.37)$$

Объединяя (7.37) и (7.35), получаем после некоторых преобразований для максимальной температуры k -го элемента

$$T_{kmax} = PR_k(1 - e^{-t_n/\tau_k})/(1 - e^{-T/\tau_k}). \quad (7.38)$$

С учетом выражения (7.32) для расчета максимальной температуры структуры окончательно имеем

$$T_{Jmax} = T_{ср} + \sum_{k=1}^m T_{kmax} = T_{ср} + \sum_{k=1}^m PR_k \frac{1 - e^{-t_n/\tau_k}}{1 - e^{-T/\tau_k}}. \quad (7.39)$$

Напомним, что надежная работа полупроводникового прибора обеспечивается, если полученное значение T_{Jmax} не превышает значения предельной температуры структуры данного прибора.

7.3.2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО «ПАКЕТНОГО» РЕЖИМА

Достаточно широко полупроводниковые приборы используют в режимах эксплуатации, когда импульсы мощности проходят через прибор в виде периодических «пакетов» из n импульсов (рис. 7.20). Электрический режим при этом характеризуют такими параметрами: t_n — длительность импульса внутри пакета; $t_{п}$ — длительность паузы между импульсами внутри пакета; $T = t_n + t_{п}$ — период повторения импульсов внутри пакета; T_n — период следования импульсных пакетов; t_s — длительность паузы между импульсными пакетами.

На интервале t_n для k -го элемента схемы замещения справедливо выражение (7.34); предварительно для сокращения записи введем обозначения

$$PR_k(1 - e^{-t_n/\tau_k}) = A; \\ T_k(0) e^{-t_n/\tau_k} = B. \quad (7.40)$$

Тогда

$$T_k(t_n) = A + B. \quad (7.41)$$

В момент окончания паузы между первым и вторым импульсами в пакете имеем

$$T_h(t_n) = T_h(t_n) e^{-t_n/\tau_h} = (A+B) e^{-t_n/\tau_h} = T_{h02}. \quad (7.42)$$

Полученное значение температуры T_{h02} является начальным значением температуры для второго импульса. Легко показать, что конечное значение температуры каждого предыдущего импульса есть начальное значение температуры для каждого последующего импульса в импульсном пакете. В частности, для второго импульса можно записать

$$T_{hmax2} = A + (A+B) e^{-t_n/\tau_h} e^{-t_n/\tau_h} = A + (A+B) e^{-T/\tau_h}, \quad (7.43)$$

и начальная температура для третьего импульса принимает вид

$$T_{h03} = [A + (A+B) e^{-T/\tau_h}] e^{-t_n/\tau_h}. \quad (7.44)$$

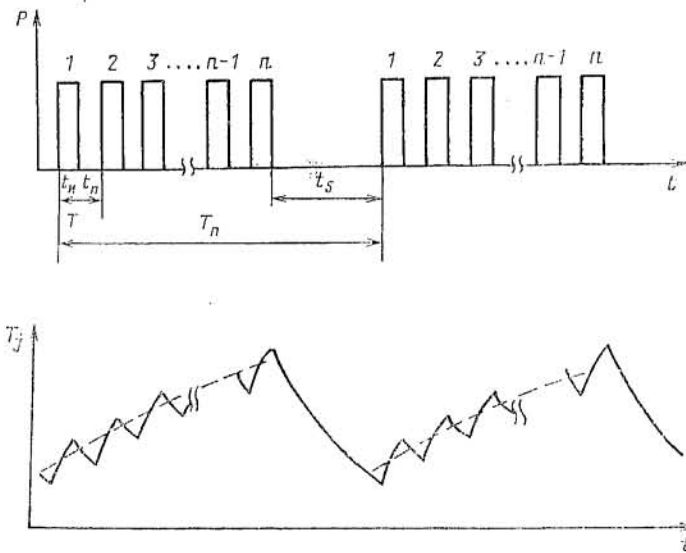


Рис. 7.20. К расчету теплового пакетного импульсного режима

Вообще для n -го импульса в пакете можем записать

$$\begin{aligned} T_{hmax}^{(n)} = & A + B e^{-T/\tau_h} + \dots + A e^{-(n-2)T/\tau_h} + \\ & + A e^{-(n-1)T/\tau_h} + B e^{-(n-1)T/\tau_h} = \left(A \sum_{i=1}^n e^{-(n-i)T/\tau_h} \right) + \\ & + B e^{-(n-1)T/\tau_h}. \end{aligned} \quad (7.45)$$

После n -го импульса во время паузы t_s между импульсными пакетами температура структуры k -го элемента снижается, и в момент T_n имеем

$$T_k(T_n) = T_{kmax}^{(n)} e^{-t_s/\tau_h}. \quad (7.46)$$

При достаточно большой паузе между пакетами (7.46) представим в следующем виде:

$$T_h(T_n) = T_{h0} = \left[\left(A \sum_{i=1}^n e^{-(n-i)T/\tau_h} \right) + B e^{-(n-1)T/\tau_h} \right] e^{-t_s/\tau_h}. \quad (7.47)$$

Учитывая, что справедливо соотношение

$$\sum_{i=1}^n e^{-(n-i)T/\tau_h} = (1 - e^{-nT/\tau_h}) / (1 - e^{-T/\tau_h}), \quad (7.48)$$

можем записать, проделав некоторые преобразования, максимальную температуру k -го элемента после окончания пакета импульсов:

$$T_{kmax}^{(n)} = \frac{P R_h (1 - e^{-t_n/\tau_h})}{(1 - e^{-T/\tau_h})} \frac{(1 - e^{-nT/\tau_h})}{(1 - e^{-T_n/\tau_h})}. \quad (7.49)$$

Максимальная температура структуры определяется выражением

$$T_{jmax} = T_{ср} + P \sum_{k=1}^m R_h \frac{(1 - e^{-t_n/\tau_h}) (1 - e^{-nT/\tau_h})}{(1 - e^{-T/\tau_h}) (1 - e^{-T_n/\tau_h})}. \quad (7.50)$$

Колебания температуры структуры относительно своего среднего значения по сравнению с периодическим режимом увеличиваются.

7.3.3. ПЕРЕХОДНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Переходное тепловое сопротивление полупроводникового прибора — это температурная реакция прибора на мгновенное изменение мощности потерь в приборе:

$$r_T = T_j(t)/P, \quad (7.51)$$

где $T_j(t)$ — приращение температуры структуры относительно температуры корпуса прибора к моменту времени t , которое отсчитывается от момента подачи «скачка» мощности P (рис. 7.21).

Сравнивая выражение (7.51) с (7.35), легко выразить

переходное тепловое сопротивление через параметры тепловой схемы замещения полупроводникового прибора:

$$r_T = \sum_{k=1}^m R_k (1 - e^{-t/t_k}) \quad (7.52)$$

Типичные зависимости $r_T = f(t)$ изображены на рис. 7.22. Горизонтальная часть кривой показывает, что достигнут установившийся тепловой режим и соответственно установившееся тепловое сопротивление системы $R_{ст-ст}$ при разных режимах охлаждения. Для прибора без охладителя установившееся r_T равно внутреннему статическому тепловому сопротивлению структура — корпус $R_{ст-к}$.

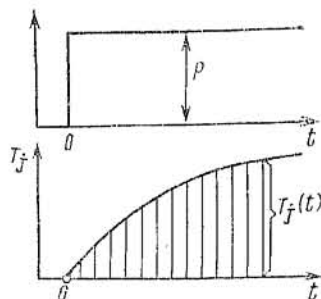


Рис. 7.21. К определению переходного теплового сопротивления

Рассмотрим методику применения переходного теплового сопротивления для расчета теплового режима прибора. Типичная форма импульса мощности, рассеиваемой в активном элементе прибора, приведена на рис. 7.23. Основным условием, определяющим возможность применения для расчета нагрузочной способности переходного

теплового сопротивления, является аппроксимация этой кривой соответствующей ступенчатой функцией, как показано на рис. 7.23 пунктиром.

Рассмотрим расчет температуры структуры с помощью r_T на простом примере воздействия одиночного прямоугольного импульса мощности (рис. 7.24, а). При этом температура структуры возрастает по кривой нагрева до значения, зависящего от теплового сопротивления, мощности и длительности импульса. К моменту t_1 температура достигает величины T_{j1} и превышает начальную температуру T_0 на величину (рис. 7.24, б)

$$\Delta T_{j1} = T_{j1} - T_0 = P r_T(t_1) \quad (7.53)$$

где $r_T(t_1)$ — значение переходного теплового сопротивления в момент времени t_1 .

В следующий момент времени температура структуры начнет снижаться и к моменту t_2 снизится до величины T_{j2} .

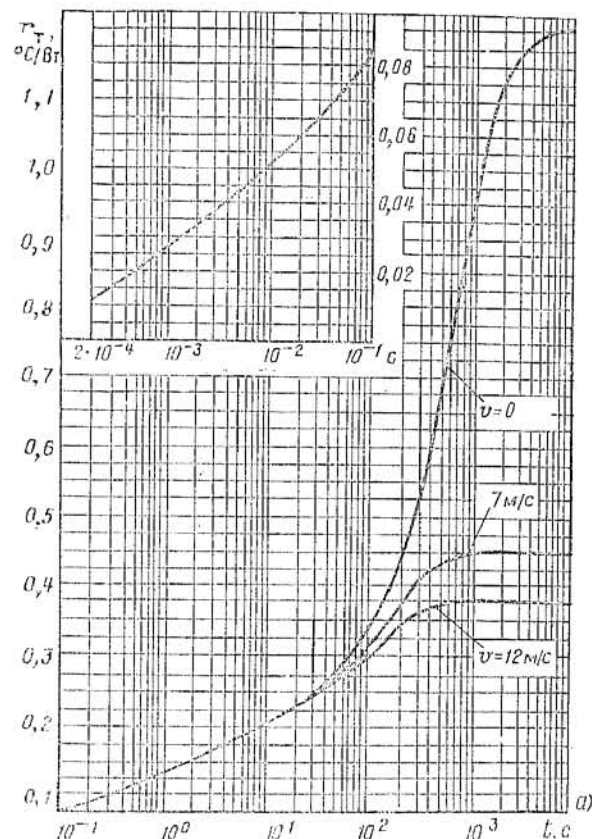


Рис. 7.22. Типичные временные зависимости переходного теплового сопротивления

Для определения превышения $T_{j2} - T_0$ в момент t_2 относительно начальной температуры T_0 используют метод наложения: вводят два одинаковых по амплитуде импульса мощности $+P$ и $-P$ разной полярности длительностью $t_2 - t_1$, амплитуды которых по абсолютному значению равны амплитуде основного импульса P (рис. 7.24, в). Тогда превышение температуры над T_0 в результате нагрева в момент времени t_2

$$T'_{j2} = P r_T(t_2), \quad (7.54)$$

где $r_T(t_2)$ — переходное тепловое сопротивление на интервале (t_0-t_2) , определяемое по кривой типа показанной на рис. 7.22.

В результате действия отрицательного импульса мощности температура в момент t_2 понизится на величину

$$T_j' = Pr_T(t_2 - t_1), \quad (7.55)$$

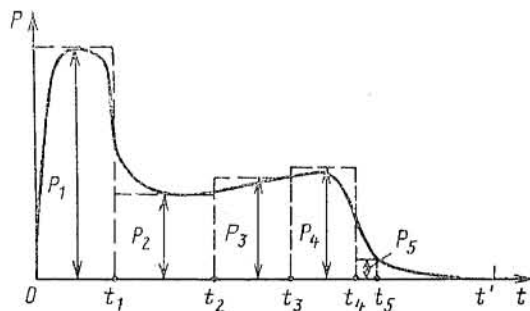


Рис. 7.23. Типичная форма импульса мощности потерь

где $r_T(t_2-t_1)$ — переходное тепловое сопротивление на интервале t_2-t_1 .

Суммарная температура структуры в момент t_2

$$T_{j2} = T_{j2}' - T_{j2}'' + T_0 = Pr_T(t_2) - Pr_T(t_2 - t_1) + T_0, \quad (7.56)$$

и превышение температуры

$$\Delta T_j = T_{j2} - T_0 = P[r_T(t_2) - r_T(t_2 - t_1)] = P(r_2 - r_{2-1}). \quad (7.57)$$

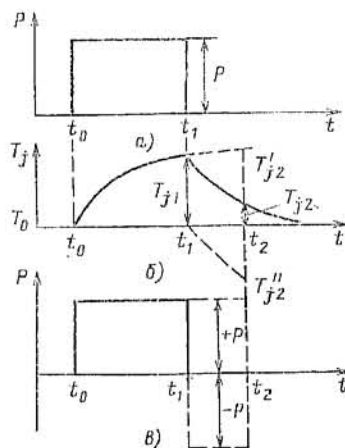


Рис. 7.24. К расчету температуры структуры при воздействии одиночного прямоугольного импульса мощности

В общем случае сложного импульса греющей мощности можно записать (рис. 7.23)

$$T_j(t_i) = P_1(r_i - r_{i-1}) - P_2(r_{i-1} - r_{i-2}) + \dots + P_{i-1} \times [r_{i-1} - r_{i-2}] + P_i r_{i-1}, \quad (7.58)$$

где $T_j(t_i)$ — температура структуры в момент окончания i -го элементарного импульса прямоугольной формы ($i = 1 \div 5$ для рис. 7.23); r_i — переходное тепловое сопротивление прибора, соответствующее интервалу t_i ; r_{i-1} — переходное тепловое сопротивление прибора, соответствующее интервалу времени t_{i-1} ; $P_1, \dots, P_i$ — ординаты мощностей рассеяния, показанные на рис. 7.23.

7.4. ИМПУЛЬСНЫЕ НЕОДНОМЕРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

7.4.1. ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ НЕОДНОМЕРНЫХ РЕЖИМОВ

Неоднородные тепловые режимы характеризуются неравномерным распределением тепла по объему структуры прибора. В таких режимах под теплостойкостью понимают способность прибора выдерживать кратковременное возрастание температуры в микрообъеме структуры — температуры «горячей точки». Значение предельной температуры неоднородных режимов, как правило, много больше предельной температуры одномерных тепловых режимов.

Кратковременное повышение температуры какой-либо части структуры прибора связано с локализацией энергии электрических потерь (прежде всего коммутационных потерь) в объеме, составляющем лишь малую часть всего объема структуры. Основной причиной эффекта локализации энергии в полупроводниковых приборах является микроненормодность структуры как в радиальном (по площади структуры), так и в осевом направлениях. С ростом мощности прибора и соответственно объема структуры относительная роль эффекта локализации энергии также возрастает, так как возрастает разброс электрофизических параметров.

В управляемых полупроводниковых приборах причиной локализации энергии является неодинаковость условий отпираания или запираания прибора по всей площади структуры: вследствие падения напряжения в биполярных приборах, например, на радиальном сопротивлении базы выход-

ной ток распределяется неравномерно по площади структуры. Локализация энергии в осевом направлении связана с неравномерным распределением напряжения вдоль оси структуры.

В простейшем случае воздействие локализации энергии сводится к проплавлению структуры, и теплостойкость при этом характеризуют температурой плавления полупроводника.

Увеличение длительности импульса выходного тока (свыше 500 мкс) может привести к разрушению прибора из-за расплавления припоя в местах соединения кремневой пластины с термокомпенсаторами и термокомпенсатора с медным основанием. В этом случае предельная температура структуры $T_{пр} \approx 500^\circ\text{C}$; эта величина сильно зависит от конструкции прибора, его теплофизических параметров и параметров режима эксплуатации.

Для повторяющихся импульсов выходного тока, т. е. при рабочих нагрузках в течение всего срока службы, воздействие эффекта локализации энергии усугубляется термциклированием, т. е. быстрым периодическим изменением температуры в малом объеме. Дело в том, что температурный градиент, имеющийся в структуре, может привести к растрескиванию кристалла из-за периодических термических напряжений. Экспериментально показано, что при по-

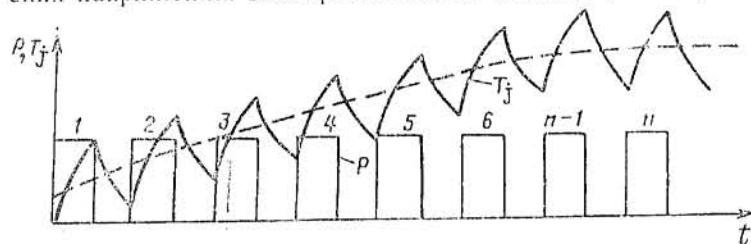


Рис. 7.25. К расчету температуры структуры при периодической последовательности импульсов мощности

вторяющихся импульсах $T_{пр}$ снижается в 3—5 раз по сравнению с режимом неповторяющихся импульсов.

Термциклирование, возникающее в прилегающих к кристаллу слоях при прохождении импульсов тока длительностью свыше 500 мкс, вызывает изменение в припоях (микротрещины, кристаллизация, ухудшение теплопроводности и т. п.) и также приводит к отказу прибора.

При работе на повышенных частотах (свыше 500—1000 Гц) (рис. 7.25), а также в случае переключения пакета

импульсов с малой паузой между импульсами внутри пакета (менее 500—1000 мкс) и в других подобных случаях оказывает воздействие на надежность работы прибора эффект накопления тепловой энергии внутри активного элемента прибора или в прилегающих слоях, связанное с инерционностью тепловых процессов. При этом увеличивается вероятность отказа прибора, так как температура структуры увеличивается. Эффект накопления энергии может существенно изменить механизм отказа. Например, при принудительном запираании тиристоров приложением обратного напряжения (рис. 7.26), если температура анодного перехода достигает значения, соответствующего собственной проводимости высокоомной области перехода, последний шунтируется проводящей областью, и напряжение на нем падает. Анодный переход не успевает восстановить обратную запирающую способность, в этом случае $T_{пр}$, $^\circ\text{C}$, определяется по формуле

$$T_{пр} = 273 \left(\frac{10}{4,53 + \lg \rho_n} - 1 \right), \quad (7.59)$$

где ρ_n — удельное сопротивление n -базы.

Для мощных отечественных диодов, тиристоров эта температура лежит в диапазоне 200—300 $^\circ\text{C}$, для транзисторов

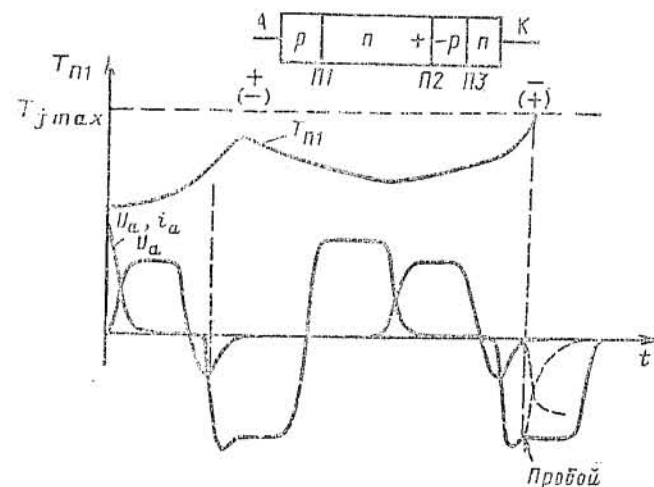


Рис. 7.26. Нарушение теплостойкости тиристора при приложении обратного напряжения

150—200 °С. В принципе процесс обратим, и при остывании переход восстанавливается и приобретает вновь свои свойства. В условиях эксплуатации такой пробой p - n перехода чаще всего приводит к разрушению структуры. На рис. 7.27 иллюстрируется случай, когда к моменту приложения повторного прямого напряжения температура центрального перехода тиристора достигает $T_{пр}$ и этот переход не успевает восстановить запирающую способность в прямом направлении.

Дополнительный нагрев структуры прибора вследствие накопления энергии может явиться в импульсных режимах эксплуатации причиной увеличения инерционности прибора, обратного тока и тока в закрытом состоянии.

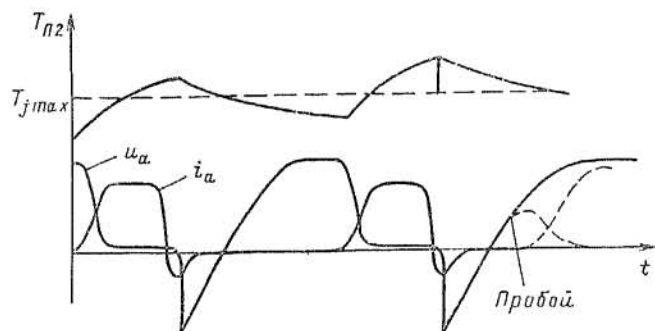


Рис. 7.27. Нарушение теплостойкости тиристора при приложении прямого напряжения

7.4.2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ БЕЗ УЧЕТА НАКОПЛЕНИЯ ТЕПЛА

При расчете предельных неоднородных тепловых режимов прежде всего необходимо учесть влияние локализации энергии.

Определим изменение температуры объема, в котором выделяется энергия во время переходного процесса переключения прибора, при этом пренебрежем влиянием тепловой анизотропии, конвекции и излучения, а также влиянием термоэлектрических эффектов и предположим, что тепловой источник расположен в месте локализованного выделения тепла (в «горячей точке») и поверхность теплообмена имеет в общем случае с учетом неравномерной плотности тока форму эллипсоида вращения. Предельным считается режим, когда максимальная температура объема T_{Vmax} достигает предельного значения $T_{пр}$; теплофизические параметры структуры считаем постоянными.

Тогда процесс изменения температуры локализованного объема во времени и по координате описывается в первом приближении уравнением теплопроводности параболического типа:

$$\frac{\partial T_V}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_V}{\partial r} \right) + \frac{1}{c\rho} \frac{dP_0}{dV_0}, \quad (7.60)$$

где T_V — температура внутри объема (температура «горячей точки»); c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; a — коэффициент температуропроводности; P_0 — выделяющаяся мощность; V_0 — объем, в котором рассеивается мощность; R_0 — максимальный радиус объема, в котором рассеивается мощность; r — радиус.

Причем полагаем, что при $r > R_0$ $dP/dV=0$, а при $r \leq R_0$ $dP/dV = \text{const}$, т. е. вся мощность, которая рассеивается в приборе, выделяется в локализованном объеме.

Начальное условие для уравнения теплопроводности состоит в задании температуры во всех точках объема в момент $t=0$:

$$T_V(0, r) = T_{V0}, \quad (7.61a)$$

где T_{V0} — температура «окружения» объема V_0 , т. е. предполагается, что при $t=0$ температура объема V_0 , в котором будет выделяться мощность, не отличается от температуры среды, окружающей этот объем.

Крайние условия должны выполняться там, где объем имеет теплообмен с окружающей средой, т. е. при $r=R_0$.

Возьмем крайнее условие в виде

$$T_V(t, R_0) = T_{V0}, \quad (7.61b)$$

т. е. считаем, что граница объема поддерживается при постоянной температуре.

Для максимальной температуры структуры (при $r \rightarrow 0$), решая уравнение (7.60), получаем

$$T_{max}(t) = \frac{P}{c_T} t \left[\frac{2\tau_T}{t} + \left(1 - \frac{\tau_T}{t} \right) \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\tau_T}{t}} - 2 \sqrt{\frac{\tau_T}{t\pi}} e^{-\tau_T/t} \right], \quad (7.62)$$

где $c_T = c\rho V$ — теплоемкость локализованного объема; $\tau_T = (R_0/2a)^2$ — тепловая постоянная времени локализованного объема.

Температура T_{V0} оценивается методами, изложенными в § 7.3 и 7.4; фактически T_{V0} — это температура, до которой нагревается структура при одномерном переключении.

Установившееся значение превышения температуры локализованного объема равно:

$$\Delta T_V(\infty) = T_{Vmax}(\infty) - T_{V0} = \lim_{t \rightarrow \infty} T_{Vmax}(t) = 2\tau_r P / C_V \quad (7.65)$$

Тогда в нормированном виде получим для максимальной температуры объема

$$T_{Vmax}(t) = \frac{\Delta T_V(t)}{\Delta T_V(\infty)} = 1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{\tau_r} + 1 \right) \operatorname{erf} \sqrt{\frac{t}{\tau_r}} - \sqrt{\frac{t}{\tau_r}} e^{-t/\tau_r} \quad (7.66)$$

Семейство характеристик $T_{Vmax}(t)$ изображено на рис. 7.28; параметр семейства τ_r — тепловая постоянная времени. Анализируя кривые $T_{Vmax}(t)$, отметим следующее:

1) при $t/\tau_r > 2,5$ рост температуры локализованного объема замедляется;

2) для малых $t(t/\tau_r < 2)$ вид функции $T_{Vmax}(t)$ существенно упрощается:

$$\Delta T_V = T_{Vmax} - T_{V0} = \Delta T_V(\infty) \frac{dT_{Vmax}}{dt} t = \frac{Pt}{C_V} \quad (7.67)$$

где $dT_{Vmax}/dt = \lim_{t \rightarrow 0} T_{Vmax}'(t) = 1/2\tau_r$.

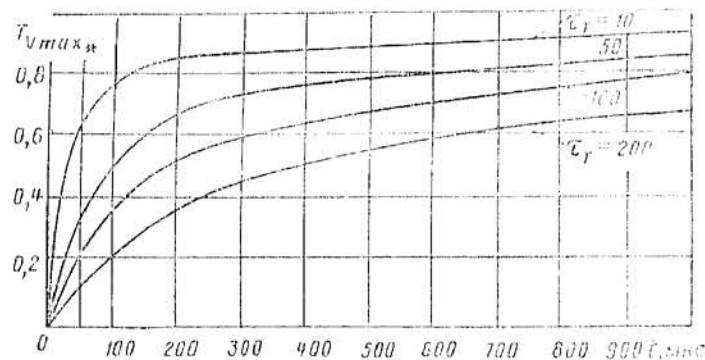


Рис. 7.28. Зависимость максимальной температуры локализованного объема структуры прибора от времени переходного процесса включения

Анализ показывает, что для реальных параметров прибора и величины выделяющейся в приборе энергии A с учетом температурной за-

висимости параметров структуры температура перегрева структуры однократным импульсом мощности в первом приближении линейно связана с выделяющейся в приборе энергией:

$$\Delta T_V = A/C_{эф}, \quad (7.66)$$

где $C_{эф}$ — эффективная теплоемкость локализованного объема.

7.4.3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ С УЧЕТОМ НАКОПЛЕНИЯ ТЕПЛА

Рассмотрим теперь, как меняется температура локализованного объема в периодических режимах, т. е. при бесконечной последовательности импульсов мощности. Если при этом к моменту прихода каждого следующего импульса температура перегрева T_{Vmax} успевает снизиться до T_{V0} (рис. 7.29), то формула (7.66) остается справедливой и для периодических режимов.

Если же температура T_{Vmax} не успевает установиться, т. е. если во время паузы между импульсами мощности локализованный объем не охлаждается до окружающей температуры T_{V0} , то имеет место накопление тепла (рис. 7.29). Дополнительный нагрев структуры можно характеризовать функцией теплового накопления $\bar{I}_\Sigma$, с учетом которой температура локализованного объема записывается в виде

$$T_V(t) = \bar{I}_\Sigma(t_n, t) \Delta T_V(t_n) + T_{V0}, \quad (7.67a)$$

где

$$\bar{I}_\Sigma = (1 + \delta + \delta^2 + \dots + \delta^n) = 1/(1 - \delta); \quad (7.67b)$$

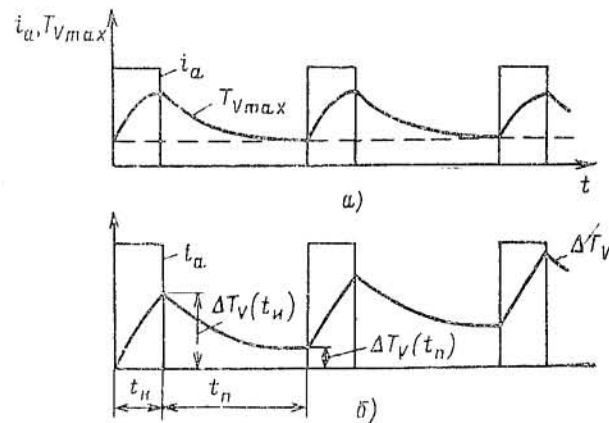


Рис. 7.29. Изменение максимальной температуры локализованного объема в отсутствие (а) и при воздействии накопления энергии (б)

$\delta = \Delta T_V(t_n) / \Delta T_V(t_n) < 1$ — доля от превышения температурой локализованного объема окружающей температуры T_{r0} , сохраняющаяся к моменту поступления каждого следующего импульса (рис. 7.29); $\Delta T_V(t_n) = T_V(t_n) - T_{r0}$ — перегрев локализованного объема в момент окончания импульса t_n .

Определим функцию f_Σ в случае работы прибора в режиме коротких импульсов, когда момент окончания импульса мощности t_n есть одновременно момент достижения максимальной температуры структуры. Для этого необходимо решить уравнение (7.60) на интервале $1/f > t > t_n$ (при этом $P=0$).

Начальное и краевое условия имеют вид

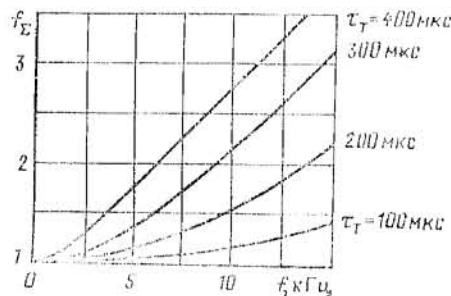
$$T_V(0, r) = \Delta T_V(t_n); \quad T_V(t, R_0) = T_{r0}, \quad (7.68)$$

где $\Delta T_V(t_n)$ — перегрев локализованного объема к моменту t_n .

Решение краевой задачи для спада температуры на интервале $1/f > t > t_n$ имеет вид

$$T_V(r, t) = \frac{\Delta T_V(t_n) R_0}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} n^2 \frac{t}{\tau_T}\right) \sin \frac{n\pi r}{R_0}, \quad (7.69)$$

Рис. 7.30. Семейство характеристик функции теплового накопления



и для снижения максимальной температуры $\Delta T_{Vmax}(f)$ локализованного объема получим соответственно

$$\Delta T_{Vmax}(f) = \lim_{r \rightarrow 0} T_V(r, t) = \Delta T_{Vmax}(t_n) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \times \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} n^2 \frac{t}{\tau_T}\right). \quad (7.70)$$

Из (7.67) и (7.70) с учетом обычно выполняемого для импульсных

режимов условия $1/f \gg t_n$ имеем функцию теплового накопления в виде

$$f_\Sigma = \frac{1}{1 - \delta} = \frac{1}{1 - \exp(-\pi^2/4f\tau_T)}, \quad (7.71)$$

где $\delta = \Delta T_M(1/f) / \Delta T_M(t_n)$ и учитывается лишь первый член функционального ряда.

На рис. 7.30 приводится семейство характеристик $f_\Sigma(f)$ с параметром τ_T . Анализ характеристик показывает, что:

- 1) для $\tau_T = 50 \div 500$ мкс в режиме коротких импульсов накопление энергии проявляется при частотах $f = 0,1\pi^2\tau_T/4 = 500 \div 5000$ Гц;
- 2) накопление тепла сказывается тем быстрее (при меньших частотах), чем больше тепловая постоянная времени, т. е. чем больше объем локализации энергии.

Контрольные вопросы

1. Определите основные особенности тепловых режимов полупроводниковых приборов.
2. Приведите тепловые модели полупроводниковых приборов и определите критерии выбора количества звеньев моделей.
3. Какую роль играет электротепловая обратная связь при эксплуатации полупроводниковых приборов и каким образом производится учет электротепловой обратной связи в тепловых расчетах?
4. Транзистор с корпусом типа ТО-3, без изолирующей прокладки, с теплопроводящей смазкой работает в режиме постоянного тока: $T_{jmax} = 200^\circ\text{C}$, $T_{cp} = 50^\circ\text{C}$, $R_{0-ep} = 2,5$ C/Вт. Определите максимально допустимую мощность потерь в транзисторе.
5. Через тиристор таблеточной конструкции протекает ток синусоидальной формы амплитудой 650 А, частотой 100 Гц; максимальная длительность открытого состояния тиристора 5 мс; $R_{ct-k} = 0,03$ C/Вт, $R_{k-o} = 0,01$ C/Вт, $T_{jmax} = 125^\circ\text{C}$, $T_{cp} = 35^\circ\text{C}$. Рассчитать охладитель штыревого типа.
6. Каким образом определить переходное тепловое сопротивление полупроводникового прибора? Какая связь между параметрами тепловой модели и переходным тепловым сопротивлением полупроводникового прибора?

7. Рассчитать пластинчатый охладитель из черной меди толщиной 3 мм для дна с мощностью потерь 12,5 Вт, $T_{jmax} = 140^\circ\text{C}$, $T_{cp} = 40^\circ\text{C}$, $R_{ct-k} = 2,5$ C/Вт, $R_{k-o} = 0,3$ C/Вт.

8. Какое влияние оказывают неоднородные явления на теплоустойчивость полупроводниковых приборов в импульсном режиме, как сказывается эффект накопления тепла в импульсных неоднородных режимах на параметрах предельного режима эксплуатации прибора, например, предельной частоте?

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ
СОЕДИНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ8.1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДУЛЕЙ
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ
СОЕДИНЕНИЕМ ПРИБОРОВ

Во многих применениях требуемые значения параметров по току, напряжению и мощности во много раз превышают возможности современных полупроводниковых приборов. Например, в линиях передачи электрической энергии необходимы приборы на напряжения в сотни киловольт; в электрохимии используются токи, превышающие десятки тысяч ампер, и т. д. В подобных режимах эксплуатации применяют модули с групповым соединением полупроводниковых приборов: последовательным, параллельным или последовательно-параллельным.

Принципиально возможен другой путь увеличения передаваемой в нагрузку мощности: многоячейковое построение преобразователей, при этом мощность каждой ячейки относительно невелика, а в нагрузку передается мощность всех ячеек. Однако и в многоячейковых преобразователях для повышения мощности отдельных ячеек используется групповое соединение полупроводниковых приборов.

Применение последовательно-параллельного соединения приборов позволяет разработчику преобразователей следующее:

1. Расширить предельные возможности устройства: повысить предельное значение общей мощности потерь до значения

$$P_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^n P_k \quad (8.1)$$

где P_k — максимально допустимая мощность потерь отдельного прибора в соединении; n — количество приборов в соединении;

- повысить предельное значение напряжения в закрытом состоянии (при последовательном соединении) до значения

$$U_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^n U_k \quad (8.2)$$

увеличить предельное значение тока в открытом состоянии (при параллельном соединении) до значения

$$I_{\text{общ}} = \sum_{k=1}^n I_k \quad (8.3)$$

2. «Уйти» от предельного режима эксплуатации по какому-либо параметру, что позволяет повысить надежность работы прибора (см. рис. 7.1) и всего устройства в целом. Например, для обеспечения напряжения 2000 В используем два последовательно соединенных прибора с напряжением 1000 В, при этом мощность потерь в каждом приборе снижается в 2 раза, соответственно снижается температура структуры и повышается надежность работы.

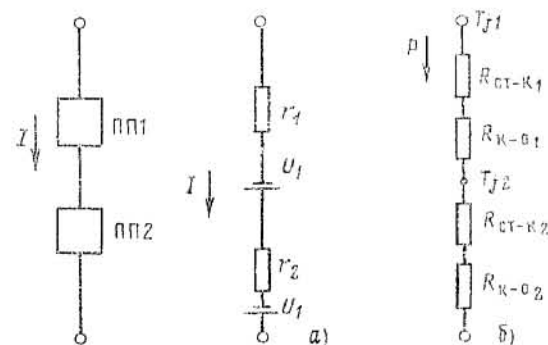


Рис. 8.1. Электрическая (а) и тепловая (б) схемы замещения двух последовательно соединенных полупроводниковых приборов

Однако показанные выше преимущества группового соединения полупроводниковых приборов полностью проявляются только при абсолютной идентичности приборов. Но даже внутри одного типа имеется значительный разброс электрических и тепловых параметров от прибора к прибору, который существенно снижает эффективность последовательно-параллельного соединения: появляется неравномерность распределения токов и напряжений между приборами в соединении, и требуются специальные меры для выравнивания этой неравномерности.

Поясним это общее положение на простом примере двух последовательно соединенных приборов. Пусть оба прибора открыты и через них протекает постоянный ток I . Элек-

трическая и тепловая схемы замещения такого соединения изображены на рис. 8.1, а, б. Оценим температуру структуры приборов при абсолютной идентичности приборов и с учетом разброса параметров. Пусть $I = 200 \text{ А}$; $P = 200 \div 300 \text{ Вт}$; $R_{\text{ст-к}} = 0,08 \div 0,16 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$; $R_{\text{к-о}} = 0,1 \div 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$. Тогда расчет на равные (средние) значения дает для температуры структуры

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{к}} = T_{\text{ж}} = P(R_{\text{ст-к}} + R_{\text{к-о}}) = 250(0,12 + 0,3) = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расчет на наихудший случай распределения параметров приводит к следующим результатам:

$$T_{\text{ст}} = 200(0,08 + 0,1) = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad T_{\text{ж}} = 300(0,16 + 0,5) = 198 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Неравномерность распределения температуры еще более может увеличиться в импульсном режиме вследствие дополнительного влияния разброса тепловых постоянных времени и т. д. [см. (7.39), (7.50)]. Следует подчеркнуть, что электрические и тепловые параметры полупроводниковых приборов слабо коррелированы: в частности, мощность потерь определяется в основном состоянием структуры, а тепловое сопротивление системы — состоянием контактных соединений конструкции и условиями охлаждения.

8.2. ВЫРАВНИВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИБОРОВ

Неравномерность распределения напряжения в последовательном соединении полупроводниковых приборов связана с разбросом ВАХ в закрытом состоянии. Поясним это общее положение на примере последовательного соединения тиристоров.

Рисунок 8.2, а иллюстрирует возможное распределение напряжений между тремя последовательно соединенными тиристорами в статическом режиме (на постоянном токе). Причиной неравномерного распределения напряжения является разброс ВАХ приборов в запертом состоянии (рис. 8.2, в). Нетрудно сделать вывод, что наибольшая часть напряжения прикладывается к приборам с наименьшим током утечки.

Неравномерно распределяется напряжение в последовательном соединении приборов и во время переходных процессов включения и выключения (рис. 8.2, б). Эта неравномерность связана с разбросом динамических параметров приборов. Например, если прибор в последователь-

ном соединении отпирается последним, то к нему прикладывается все напряжение последовательной цепочки приборов. При заперении наибольшее перенапряжение возникает на приборе, который первым восстанавливает свою запирающую способность.

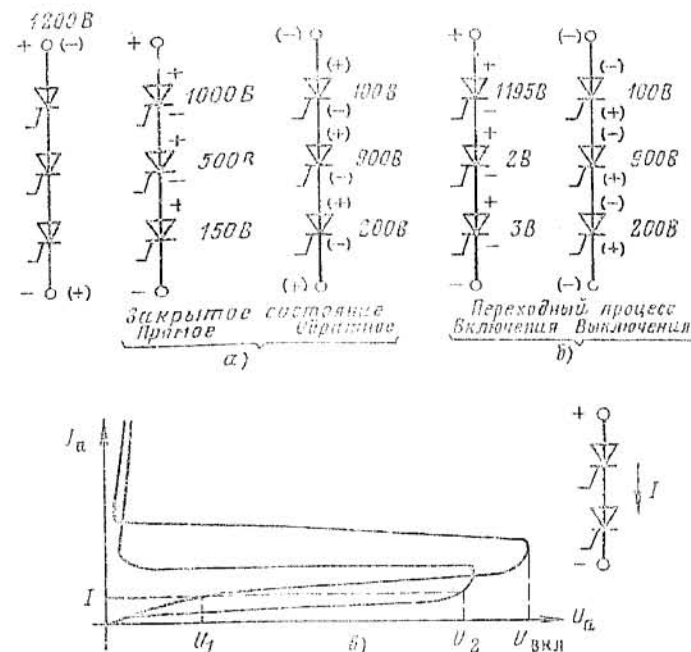


Рис. 8.2. Распределение напряжения между последовательно соединенными тиристорами в статике (а) и динамике (б) и ВАХ тиристора (в)

Рассмотрим некоторые способы выравнивания распределения напряжения и тока в групповом соединении приборов.

Равномерное распределение напряжения необходимо обеспечить как при постоянном или медленно изменяющемся напряжении, так и в переходном режиме — при быстро изменяющемся напряжении.

Рассмотрим выбор элементов, обеспечивающих равномерное распределение напряжения между последовательно соединенными приборами при постоянном напряжении (рис. 8.3).

Заменяем каждый прибор в последовательном соединении источником тока утечки (рис. 8.4). Пусть один прибор (нижний на рис. 8.4) имеет минимально возможный ток утечки для данного класса приборов $I_{y\min}$, а все остальные — максимально возможный $I_{y\max}$. Очевидно, что при этом возникает наибольшая неравномерность в распределении напряжения.

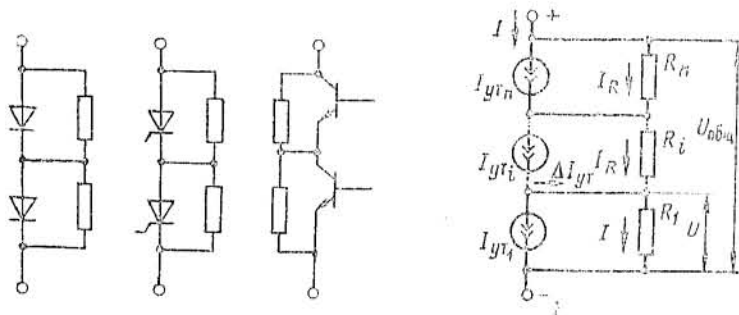


Рис. 8.3. Схема включения выравнивающих резисторов в последовательном соединении полупроводниковых приборов

Рис. 8.4. Схема замещения последовательно соединенных приборов в статике

Определим максимальное значение сопротивления шунтирующих резисторов R , при котором перенапряжение не превышает максимально допустимого напряжения на выходных зажимах прибора. По рис. 8.4 можем записать

$$U_{\text{общ}} = IR + (n-1) I_R R = nU - (n-1) R(I_{y\max} - I_{y\min}), \quad (8.4)$$

где $U_{\text{общ}}$ — общее напряжение на приборах при их последовательном соединении; U — максимально допустимое постоянное напряжение между выходными зажимами прибора; R — шунтирующие резисторы (их сопротивления выбираются обычно равными); I_R — ток, протекающий через резистор; n — количество приборов в последовательном соединении.

Из (8.4) получим для расчетов максимального значения сопротивления шунтирующего резистора

$$R \leq (nU - U_{\text{общ}}) / (n-1) \Delta I_{y\text{т}}. \quad (8.5a)$$

Как правило, завод-изготовитель указывает в паспорте только максимальный ток утечки; поэтому при расчете R обычно полагают $I_{y\min} = 0$. Тогда

$$R \leq (nU - U_{\text{общ}}) / (n-1) I_{y\max}. \quad (8.5b)$$

Шунтирующие резисторы вносят дополнительные активные потери, снижая КПД преобразователя. Поэтому обычно проводят «вероятностный» расчет, а не расчет для наихудшего случая. В самом деле, имеется большая вероятность того, что в каждой данной группе приборов величина $\Delta I_{y\text{т}}$ значительно меньше, чем $I_{y\max}$. Для определения $\Delta I_{y\text{т}}$ надо измерить ток утечки при максимально допустимой рабочей температуре и напряжении перехода, разбить приборы на группы и затем проверить величину $\Delta I_{y\text{т}}$ при комнатной температуре.

8.3. ВЫРАВНИВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

При приложении обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ после протекания прямого тока восстанавливается обратная запирающая способность прибора. Очевидно, что прибор, первым восстановивший обратную запирающую способность, принимает на себя все обратное напряжение, приложенное к последовательно соединенным приборам. Для выравнивания распределения переходного напряжения применяются шунтирующие конденсаторы или RC -цепи (рис. 8.5).

Наибольшая неравномерность в распределении обратного напряжения между последовательно соединенными приборами возникает тогда, когда один из приборов имеет наименьший заряд восстановления $Q_{\text{вmin}}$, а все остальные — наибольший $Q_{\text{вmax}}$. На рис. 8.6 показаны диаграммы изменения токов для прибора, который первым восстановил свою обратную запирающую способность в момент $t_{\text{восmin}}$; остальные $(n-1)$ приборов восстанавливают свою обратную запирающую способность одновременно в момент времени $t_{\text{восmax}}$. При большой скорости спада прямого тока определим перенапряжение, которое возникает на приборе, первым восстановившем запирающую способность.

На интервале времени $0-t_{\text{восmin}}$ напряжение на всех приборах и шунтирующих конденсаторах примерно равно нулю. В момент $t_{\text{восmin}}$, когда запирается наиболее «быстрый» прибор, конденсатор C_1 начинает заряжаться обрат-

ным током, протекающим через остальные приборы (рис. 8.7). К моменту $t_{восстmax}$ напряжение на конденсаторе C_1

$$U_{C1} = \Delta U = \Delta Q_n / C_1, \quad (8.5)$$

где $\Delta Q_n = Q_{восстmax} - Q_{восстmin}$ — заряд, переносимый обратным током и заряжающий конденсатор C_1 на интервале $t_{восстmin} - t_{восстmax}$ (см. рис. 8.6).

На остальных конденсаторах напряжение сохраняет нулевое значение. В момент восстановления обратной запирающей способности всеми приборами $t_{восстmax}$ можно написать из схемы замещения на рис. 8.7

$$U_{обр} = (n-1)U_0 + U, \quad (8.7)$$

где $U = U_0 + \Delta U$ — напряжение на приборе, который первым восстановил запирающую способность, т. е. макси-

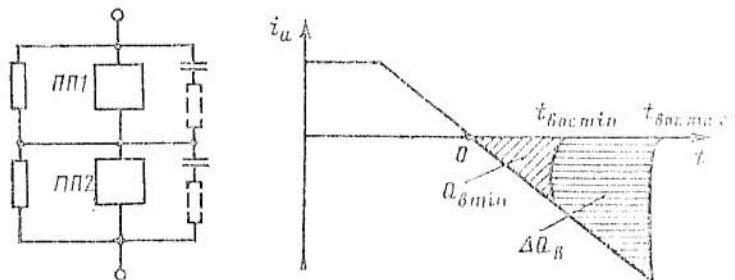


Рис. 8.5. Схема включения выравнивающих RC-цепей

Рис. 8.6. Диаграммы изменения токов через последовательно соединенные приборы на интервале восстановления обратной запирающей способности

мально возможное в последовательном соединении приборов перенапряжение в обратном направлении; значение этого перенапряжения приравнивают к максимально допустимому обратному напряжению приборов в последовательном соединении; U_0 — напряжение на остальных $(n-1)$ приборах.

Выражение (8.7) преобразуем к виду

$$U_{обр} = nU = (n-1)\Delta U, \quad (8.8)$$

откуда с учетом (8.6) получим для расчета емкости шунтирующего конденсатора

$$C = \Delta Q_n (n-1) / (nU - U_{обр}). \quad (8.9)$$

Затем возникшее перенапряжение спадает по экспоненциальному закону при разряде конденсатора через резистор R (см. рис. 8.5).

В реальной схеме напряжения на шунтирующем конденсаторе и на полупроводниковом приборе могут отличаться друг от друга вследствие влияния монтажной индуктивно-

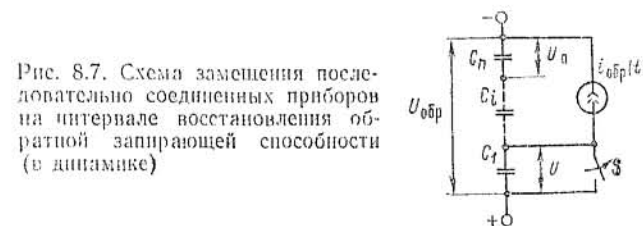


Рис. 8.7. Схема замещения последовательно соединенных приборов на интервале восстановления обратной запирающей способности (в динамике)

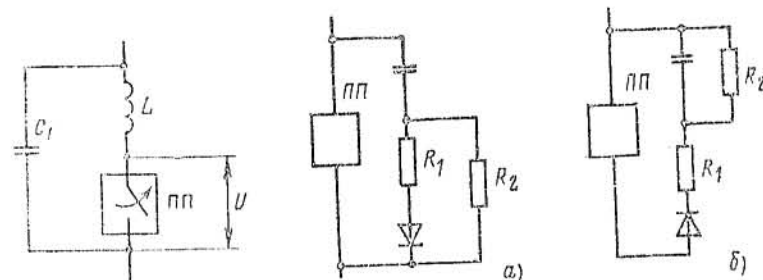


Рис. 8.8. К влиянию монтажной индуктивности на распределение напряжения

Рис. 8.9. Схема включения выравнивающих однонаправленных RC-цепей с прямой поляризацией (а) и обратной поляризацией (б)

сти L контура конденсатор—прибор (рис. 8.8). При быстром спадании обратного тока напряжение U на приборе за счет самоиндукции

$$u = \Delta u + u_L = \Delta u + L di_{обр} / dt. \quad (8.10)$$

Так, при $L = 1$ мкГн и $di_{обр}/dt = 500$ А/мкс получим $U_L = 500$ В, что может нарушить работу схемы. Поэтому при конструировании последовательного соединения полупроводниковых приборов на монтаж шунтирующих элементов нужно обратить внимание и стремиться к минимальной индуктивности монтажа этого контура.

Для ограничения разрядного тока конденсатора после-

довательно с конденсатором включают низкоомный резистор (2—10 Ом); такой резистор, кроме того, способствует подавлению высокочастотных колебаний, возникающих в контуре монтажная индуктивность—шунтирующий конденсатор (см. рис. 8.5).

Постановка шунтирующих RC -цепей существенно увеличивает как потери энергии в полупроводниковых приборах, так и общие потери в устройстве. Снижение указанных потерь возможно при использовании так называемых «отноразнаправленных» RC -цепей. Так, например, если назначение шунтирующей цепи — ограничение прямых перенапряжений на приборе, то применяется схема с «прямой поляризацией» (рис. 8.9, а). Резистор $R_2 \gg R_1$ и служит для ограничения разрядного тока цепи при отпирании прибора ПП.

Если шунтирующая RC -цепь служит для ограничения «скачков» обратного напряжения, то применяется схема с «обратной поляризацией» (рис. 8.9, б). Цепь R_1C ограничивает перенапряжения на приборе ПП при запертии, а через резистор R_2 происходит разряд конденсатора в интервале, когда к прибору прикладывается прямое напряжение.

8.4. ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Основная проблема при параллельном соединении полупроводниковых приборов — обеспечение равномерного токораспределения между параллельными ветвями. Прежде всего неравномерное распределение тока связано с разбросом прямых ветвей ВАХ (точнее, ВАХ полупроводниковых приборов в открытом состоянии) (рис. 8.10) или параметров, описывающих ВАХ приборов в открытом состоянии (см. § 7.2).

Выявим особенности такого соединения полупроводниковых приборов на примере параллельного соединения двух приборов (рис. 8.10).

Пусть один из двух приборов имеет наименьшее для этого типа приборов падение напряжения в открытом состоянии, т. е. этот прибор ПП1 будет максимально нагружен по току (рис. 8.10). Допустим, что он работает при максимально допустимом прямом токе и максимально допустимой температуре структуры (120°C в примере). Мощность потерь в приборе составляет

$$P_1 = U_0 I_1 + I_1^2 r_{динт}. \quad (8.11)$$

Прямое падение напряжения на обоих приборах в соединении одинаково и равно U . На рис. 8.10 приведены граничные ВАХ приборов

в открытом состоянии для двух значений температуры структуры (120 и 25°C). Прибор ПП2 проводит меньший ток, рассеивает меньшую мощность и нагревается до меньшего значения температуры. Предположим, что температура структуры прибора ПП2 равна некоторому промежуточному значению 75°C. Тогда по ВАХ можно определить мощность потерь P_2 в приборе ПП2. Тепловая схема замещения на постоянном токе для параллельного соединения двух приборов имеет вид, показанный на рис. 8.11 (приборы обычно монтируют на общем охладителе)¹. Тогда температура охладителя

$$T_0 = T_{j1} - P_1 (R_{ст-к} + R_{к-о}). \quad (8.12)$$

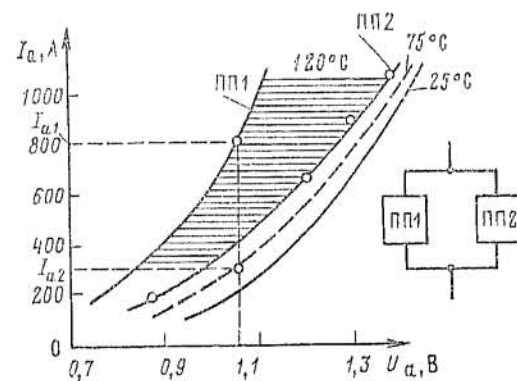


Рис. 8.10. ВАХ приборов в открытом состоянии

Далее, зная значения мощности потерь P_2 и тепловые сопротивления $R_{ст-к}$ и $R_{к-о}$, проверяем температуру структуры T_{j2} :

$$T_{j2} = T_0 + P_2 (R_{ст-к} + R_{к-о})_{min}. \quad (8.13)$$

Полученная температура T_{j2} — это минимальная температура структуры прибора при заданном разбросе тепловых параметров; если ее значение соответствует с определенной точностью значению, которое принималось в начале расчета, то расчет заканчивается. В противном случае следует провести дополнительное уточнение, задавшись в качестве исходного значения полученным значением T_{j2} .

При большом количестве параллельно соединенных приборов (в электрохимии, например, требуются токи до 100 кА) для равномер-

¹ В схеме замещения на рис. 8.11 $R_{ст-к}$ — тепловое сопротивление структура — корпус, $R_{к-о}$ — тепловое сопротивление корпус — охладитель.

ного распределения тока между приборами подбирают приборы с минимальным разбросом ВАХ проводящего состояния.

Равномерность распределения тока между приборами в параллельном соединении характеризуют коэффициентом токораспределения:

$$D = I/nI_{\max}$$

где I — общий ток, протекающий через параллельное соединение приборов; $I_{\max}$ — максимально допустимый ток одного прибора; n — количество приборов в соединении.

Например, для параллельного соединения двух приборов, имеющих ВАХ, показанную на рис. 7.42 при 120 и 75 °С,

$$D = (815 + 320)/2 \cdot 815 = 0,7.$$

Очевидно, что с ростом n — количества приборов в соединении — коэффициент токораспределения уменьшается, т. е. эффективность параллельного соединения снижается.

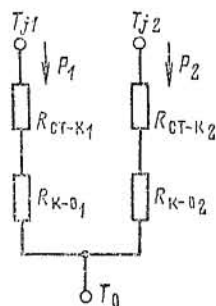


Рис. 8.11. Статическая тепловая схема замещения двух параллельно соединенных полупроводниковых приборов в открытом состоянии

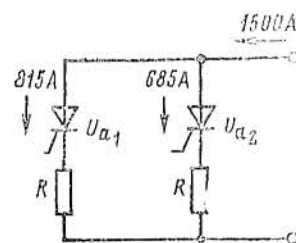


Рис. 8.12. Равномерное распределение токов в параллельном соединении приборов с помощью резисторов

Подбор приборов по ВАХ в открытом состоянии позволяет значительно улучшить токораспределение. Приведенные ниже данные иллюстрируют изменение коэффициента токораспределения D при параллельном соединении приборов с разной степенью совпадения ВАХ в открытом состоянии.

Приборы	Допустимый ток, А, при $n = 2$:		
	лучший	худший	D
Без подбора	815	320	0,7
Из одной группы	815	770	0,97
Из двух смежных групп	815	730	0,95
Из трех смежных	815	680	0,92
Из четырех смежных	815	650	0,9

Дополнительно распределение тока улучшают с помощью резисторов R (рис. 8.12). Пусть общий ток в соединении из двух приборов составляет 1500 А. Тогда при максимально допустимом токе 815 А ток через второй прибор должен быть равен 685 А. Из схемы рис. 8.12 имеем

$$U_{a1} + 815R = U_{a2} + 685R.$$

По ВАХ приборов определяются падения напряжения на каждом из приборов в соединении; пусть они равны соответственно $U_1 = 1,05$ В; $U_2 = 1,2$ В (приборы не подбирались):

$$1,05 + 815R = 1,2 + 685R,$$

откуда $R = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Ом и коэффициент токораспределения $D = 0,92$. Если одновременно используются приборы из одной группы, то практически $D = 1$, сопротивление и потери мощности резистора R уменьшаются.

Контрольные вопросы

1. С какой целью используется последовательное и параллельное включение полупроводниковых приборов?
2. Каковы особенности монтажа полупроводниковых приборов при их последовательном соединении в электронной цепи?
3. От каких факторов зависит эффективность повышения рабочего напряжения при последовательном соединении полупроводниковых приборов?
4. Предложите конкретные варианты построения цепей управления для схемы, состоящей из последовательно соединенных транзисторов (тиристоров).
5. Предложите конкретные варианты построения цепи управления для схемы, состоящей из параллельно включенных транзисторов (тиристоров).
6. Определите требования, предъявляемые к конструктивному исполнению электронной цепи, содержащей параллельно соединенные полупроводниковые приборы.
7. Определите особенности конструкции монтажа модуля, состоящего из параллельно-последовательного соединения диодов (транзисторов, тиристоров).
8. Каковы особенности методики расчета теплового режима модуля, состоящего из n параллельно соединенных приборов?

Частотные свойства и характеристические частоты
биполярного транзистора

На повышенных частотах коэффициент передачи тока (КПТ) с увеличением частоты уменьшается, что связано с инерционностью процессов пролета и рекомбинации основных носителей заряда в базе, а также с инерционностью процессов, связанных с перезарядом барьерных емкостей эмиттера и коллектора.

Проведем анализ частотных свойств *n-p-n* биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (см. рис. 2.26) методом заряда. Будем считать, что на входе транзистора базовая цепь E_B , R_1 обеспечивает условие источника тока базы. На постоянную составляющую тока базы I_B , обеспечивающую работу транзистора в заданной рабочей точке (U_K, I_K), наложим малую (по амплитуде) переменную составляющую тока синусоидальной формы $I_{Bmax} \exp(j\omega t)$, т.е.

$$i_B(t) = I_B + i_B = I_B + I_{Bmax} \exp(j\omega t), \quad (П.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; f — циклическая частота.

Аналогично разложим на постоянную и переменную составляющие ток эмиттера, коллектора, напряжения транзистора и составляющие заряда в базе. Например,

$$q_n(t) = Q_n + Q_{nmax} \exp(j\omega t). \quad (П.2)$$

В связи с этим основное уравнение метода заряда (2.186) распадается на два — для постоянной и переменной составляющей:

$$\Delta Q_n / \tau = I_B; \quad (П.3a)$$

$$dq_n/dt + q_n/\tau + dq_{CK}/dt + dq_{CЭ}/dt = i_B. \quad (П.3b)$$

Необходимо особо отметить, что представление уравнения (2.186) в форме (П.3) возможно лишь в случае малого сигнала по переменной составляющей, когда четные гармоники токов настолько малы, что не дают заметного сдвига рабочей точки по постоянной составляющей. Воспользуемся соотношениями

$$dq_{CЭ}/dt \approx C_{Э} r_{Э} di_K/dt, \quad dq_{CK}/dt = C_K (r_{KK} + R_K) di_K/dt, \quad (П.4)$$

где $i_{Э} \approx i_K$; $C_{Э}$ и C_K — дифференциальные барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов; $r_{Э}$ — дифференциальное сопротивление эмиттера.

Воспользовавшись (2.183) и (П.4), представим решение уравнения (П.3б) в виде

$$\beta(\omega) = I_{Kmax}/I_{Bmax} = \beta / (1 + j\omega\tau_{OЭ}) = \beta / (1 + j\omega/\omega_B), \quad (П.5)$$

где β — статический КПТ базы в заданной рабочей точке — см. (2.185), $\omega_B = 1/\tau_{OЭ}$ — предельная частота транзистора с ОЭ.

Постоянная времени транзистора с ОЭ

$$\tau_{OЭ} = [\tau_F + r_{Э} C_{Э} + (r_{KB} + R_K) C_K] \beta = \tau + \beta [r_{Э} C_{Э} + (r_{KK} + R_K) C_K] \quad (П.6)$$

Частотной характеристикой транзистора с ОЭ называют зависимость отношения амплитуд переменных составляющих токов коллекто-

ра и базы в функции частоты при коротком замыкании по переменной составляющей на выходе транзистора (т.е. при $R_K = 0$).

С помощью (П.5) можно определить модуль и фазу β КПТ транзистора с ОЭ:

$$|\beta(\omega)| = \beta / \sqrt{1 + (\omega/\omega_B)^2}; \quad (П.7)$$

$$\lg \varphi = -\omega/\omega_B. \quad (П.8)$$

С ростом частоты $\omega = 2\pi f$ модуль КПТ уменьшается, а фаза нарастает, причем отрицательный знак в (П.8) означает, что ток коллектора отстает по фазе от тока базы. На частотах $\omega > 3\omega_B$ из (П.7) следует, что

$$|\beta(\omega)| \approx \beta\omega_B = \omega_T = 2\pi f_T. \quad (П.9)$$

Частота ω_T называется граничной частотой транзистора. На этой частоте модуль КПТ базы биполярного транзистора равен единице.

В соответствии с (П.6) граничная частота определяется выражением

$$\omega_T = [\tau_F + r_{Э} C_{Э} + (r_{KK} + R_K) C_K]^{-1}. \quad (П.10)$$

При измерении ω_T сопротивление резистора R_K выбирают настолько малым, чтобы оно не влияло на результаты. По значению граничной частоты проводят классификацию транзисторов на низкочастотные, высокочастотные и СВЧ-транзисторы. Значение f_T дано в справочных данных транзистора либо непосредственно, либо указанием значения модуля КПТ и частоты, на которой производят измерения. В последнем случае

$$f_T = |\beta(f)| f.$$

Для силовых биполярных транзисторов, предназначенных для ключевого режима работы, значения граничной частоты не приводят.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Теплофизические и электрические свойства некоторых металлов,
полупроводников и диэлектриков при 300 К

	λ , Вт/(см·К)	ρ , Ом·см	$T_{пл}$, °С
Алюминий	2,0	$3,0 \cdot 10^{-6}$	661
Вольфрам	1,6	$5,6 \cdot 10^{-6}$	3380
Золото	3,1	$2,4 \cdot 10^{-6}$	1063
Ковар 29 НК	1,7	$48 \cdot 10^{-6}$	1450
Мель	3,8	$1,7 \cdot 10^{-6}$	1088
Молибден	1,4	$5,7 \cdot 10^{-6}$	2620
Никель	0,85	$7,8 \cdot 10^{-6}$	1455
Олово	0,65	$11,3 \cdot 10^{-6}$	232
Сталь Ст10	0,72	$9,6 \cdot 10^{-6}$	1535
Алмаз	5,4	$\sim 10^{14}$	3747
Бериллиевая керамика	2,1	$\sim 10^{14}$	—
Керамика 22ХС (96 % Al_2O_3)	0,1	$\sim 10^{14}$	—
Керамика «Поликор»	0,3—0,45	—	—
Эпоксидная пластмасса	0,03	—	—
Ситалл СТ-50-1	0,015	—	—
Стекла С-41-1, С-48-3	0,01—0,015	$10^{12}—10^{17}$	585

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Свойства собственного Si, Ge и GaAs при 300 К

	Si	Ge	GaAs
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	1,11	0,66	1,43
Эффективная плотность состояний, см^{-3} :			
N_c	2,8E19	1,04E19	4,4E17
N_v	1,02E19	6,1E18	8,6E18
Собственная концентрация n_i , см^{-3}	1,45E10	2,4E13	1,3E7
Дрейфовая подвижность электронов и дырок, $\text{см}^2/(\text{В} \times \text{с})$:			
μ_n	1350	3900	8500
μ_p	480	1900	100
Дрейфовая скорость насыщения электронов и дырок, см/с :			
V_{sn}	1E7	6E6	$\sim 1E7$ (max $\sim 2,1E7$)
V_{sp}	8E6	6E6	—
Удельное сопротивление ρ , Ом·см	2,3E5	47	5E6
Относительная электрическая проницаемость ϵ_r	12	16	11
Электронное средство χ , эВ	4,05	4,01	4,07
Длина Дебая l_D , мкм	24	0,68	2200
Энергия оптического фотона, $E_{\text{оп-ф}}$, мэВ	63	37	15
Электрическое поле пробоя $E_{\text{пр}}$, кВ/см	300	100	400
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К)	1,45	0,61	0,46
Удельная теплоемкость c , Дж/(г·К)	0,7	0,31	0,35

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Фундаментальные физические постоянные

Скорость света в вакууме $c = 2,997924 \cdot 10^{10}$ см/с
 Магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м
 Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/см
 Элементарный заряд $q = 1,602182 \cdot 10^{-19}$ Кл
 Постоянная Планка $h = 6,626124 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
 Постоянная (число) Авогадро $N_{\text{Ав}} = 6,0220921 \cdot 10^{23}$ 1/моль
 Масса покоя электрона $m_0 = 9,109463 \cdot 10^{-31}$ кг
 Масса покоя протона $m_p = 1,672635 \cdot 10^{-27}$ кг
 Универсальная газовая постоянная $R = 8,314472$ Дж/(моль·К)
 Постоянная Больцмана $k = R/N_{\text{Ав}} = 1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К
 Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma = 5,670287 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)
 Гравитационная постоянная $\gamma = 6,672041 \cdot 10^{-11}$ м³/(с²·кг)
 Энергия фотона с длиной волны $\lambda = 1$ мкм $E_{ph} = 1,239847$ эВ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БТ — биполярный транзистор
 ВАХ — вольт-амперная характеристика
 ВКХ — вольт-кулоновая характеристика
 ВУЛ — высокий уровень инжекции (носителей заряда)
 ВУЛ — высокий уровень легирования
 ВФХ — вольт-фарадная характеристика
 Д — диэлектрик
 ДОС — дифференциальное отрицательное сопротивление
 ДШ — диод Шоттки
 И — исток, излучатель
 ИК — инфракрасное излучение
 ИС — интегральная микросхема
 КМДП — комплементарная МДП-структура
 КПД — коэффициент полезного действия
 МДП — металл — диэлектрик — полупроводник (структура)
 МОП — металл — оксид (диоксид кремния) — полупроводник
 М-П — металл — полупроводник (структура)
 МЭМ — модель Эберса—Молла
 ННЗ — основные носители заряда
 НУИ — низкий уровень инжекции (носителей заряда)
 ОБ — общая база (схема включения БТ)
 ОБР — область безопасных режимов
 ОЗ — общий затвор (схема включения ПТ)
 ОИ — общий исток (схема включения ПТ)
 ОК — общий коллектор (схема включения БТ)
 ОНВ — область начального включения (тиристора)
 ОНЗ — основные носители заряда
 ООС — отрицательная обратная связь
 ОПЗ — область пространственного заряда
 ОЭ — общий эмиттер (схема включения БТ)
 П — подложка
 ПЭС — прибор с зарядовой связью
 ПОС — положительная обратная связь
 ПП — полупроводниковый прибор
 ПТ — полевой транзистор
 ПТУП — полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом
 САПР — система автоматизированного проектирования
 СВЧ — сверхвысокая частота ($f \geq 300$ МГц)
 СЗЗ — сужение запрещенной зоны
 СИД — светонизлучающий диод
 СИТ — транзистор со статической индукцией
 ТДР — термодинамическое равновесие
 ТК — температурный коэффициент
 ТКН — температурный коэффициент напряжения
 ТКР — температурный коэффициент расширения
 ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика (на основе БТ)
 УЭ — управляющий электрод (тиристора или симистора)
 ФП — фотоприемник
 ФСУ — фундаментальная система уравнений
 ЭВМ — электронно-вычислительная машина
 ЭДР — электронно-дырочное рассеяние (носителей заряда)
 ЭДС — электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б. В., Белов Б. И., Норенков И. П. Машинный расчет элементов ЭВМ. М.: Высшая школа, 1976.
2. Берг А., Дин П. Светодиоды: Пер. с англ./Под ред. А. Э. Юнгерча. М.: Мир, 1979.
3. Зи С. Физика полупроводников: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
4. Батушев В. А. Электронные приборы. М.: Высшая школа, 1980.
5. Евсеев Ю. А. Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М.: Энергия, 1978.
6. Агаханян Т. М. Интегральные микросхемы. М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Кузьмин В. А. Тиристоры малой и средней мощности. М.: Советское радио, 1971.
8. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Динамические режимы эксплуатации мощных тиристоров. М.: Энергия, 1977.
9. Носов Ю. Р., Петросян К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Советское радио, 1976.
10. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. М.: Советское радио, 1989.
11. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1987.
12. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977.
13. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1980.
14. Трутко А. Ф. Методы расчета транзисторов. М.: Энергия, 1971.
15. Челноков В. Е., Евсеев Ю. А. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.
16. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1969.
17. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
18. ГОСТ 151332-77. Полупроводниковые приборы. Термины и определения.
19. ГОСТ 26003-74. Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения.
20. ГОСТ 19095-73. Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения.
21. ГОСТ 20332-84. Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
22. ОСТ НаАО. 336.010-77. Приборы полупроводниковые излучающие. Система параметров.
23. ОСТ 11.073.911-79. Изделия полупроводниковые оптоэлектронные. Классификация и система обозначения.
24. Оксер Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985.

25. Блинхер А. Физика тиристоров: Пер. с англ./Под ред. И. В. Грехова. Л.: Энергоиздат, 1981.
26. Блинхер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: Пер. с англ./Под ред. И. В. Грехова. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
27. Ильин В. И., Коган В. И. Разработка и применение программ автоматизации схемотехнического проектирования. М.: Радио и связь, 1984.
28. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/Под ред. Р. Г. Варламова. М.: Советское радио, 1980.
29. Дульнев Г. И., Тарновский Н. И. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971.
30. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. К. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Советское радио, 1976.
31. Кремниевые планарные транзисторы/В. Г. Колесников, В. И. Никишин, В. Ф. Смпоров и др./Под ред. Я. А. Федотова. М.: Советское радио, 1973.
32. Матанов А. В., Мешков О. М., Потанчук В. А. Силовые транзисторы//Силовые полупроводниковые приборы (Сб. статей). Таллин: Валгус, 1986.
33. Мощные высокочастотные транзисторы/Ю. В. Завражнов, Н. И. Каганова, Е. З. Мазель и др. Под ред. Е. З. Мазеля. М.: Радио и связь, 1985.
34. Отблеск А. Е., Челноков В. Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике. Л.: Наука, 1984.
35. Видулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1980.
36. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1981.
37. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986.
38. Автоматизация схемотехнического проектирования/В. Н. Ильин, В. Т. Фролкин, А. И. Бутко и др. Под ред. В. Н. Ильина. М.: Радио и связь, 1987.
39. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник/Е. В. Авдеев, А. Т. Еремин, И. П. Норенков, М. И. Песков; Под ред. И. П. Норенкова. М.: Радио и связь, 1986.
40. Крутякова М. Г., Чарыков Н. А., Юдин В. В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. М.: Радио и связь, 1983.
41. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/Э. Т. Романьчева, А. К. Иванова, А. С. Куликов и др.: Под ред. Э. Т. Романьчевой. М.: Радио и связь, 1989.
42. Лаппе Р., Фишер Ф. Измерения в энергетической электронике: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1986.
43. Курносоев А. И. Материалы для полупроводниковых приборов и ИС. М.: Высшая школа, 1980.
44. Шарупич Л. С., Тугов Н. М. Оптоэлектроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
45. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат, 1988.
46. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов/В. П. Григоренко, П. Г. Дерменжи, В. А. Кузьмин, Т. Т. Мнацаканов. М.: Энергоатомиздат, 1983.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Акнентор 28
- Аналогия электротепловая 505
- База 71
- Время жизни неосновных носителей заряда 186
- Генерация носителей заряда 26
- Гетеронепереход 23
- Глубина поглощения 404
- Дефект инжекции эмиттера 140
- Диод 12
- выпрямительный 105
- импульсный 107
- инфракрасный излучающий 370
- светоизлучающий 370
- Шоттки 110
- Диффузия носителей заряда 33
- Длина волны доминирующая 378
- — — излучения 376
- — — свободного пробега 44
- Донор 28
- Дрейф носителей заряда 30
- Емкость барьерная 57
- диффузионная 102
- Заряд тиристора критический 241, 259
- Затвор 290
- Зона:
 - запрещенная 25
 - примесная 26
 - проводимости 25
 - разрешенная 25
 - свободная 25
 - энергетическая 25
- Излучение тепловое 504
- Измерения населенности 387
- Инжекция неосновных носителей заряда 66
- Источник 299
- Когерентность 362
- Конвекция 503
- Коэффициент:
 - выхода света 370
 - инжекции 117
 - передачи тока базы 118
 - — — эмиттера 118
 - — — дифференциальный 139
 - — — интегральный 139
 - переноса 117
 - спектрального согласования 133
 - ударной ионизации 33
 - усиления по мощности 120, 121
 - — — напряженно 120, 121
- Кривизна характеристики 308, 310, 313, 329
- Лазер 386
- гетерогенный 399
- инжекционный 397
- Люминесценция 364
- инжекционная 365
- МДП-структура 291
- МДП-транзистор 287
- — — с индуцированным каналом 288, 299
- — — со встроенным каналом 288
- Метод заряда 183, 233
- Модель биполярного транзистора 469
- динамическая зарядоуправляемая 474
- малого сигнала 478
- — — в h -параметрах 482
- — — в g -параметрах 480
- — — П-образная 480
- — — Т-образная 479
- Эберса—Молла 469
- — — передаточная 477
- статическая 472
- Модель диода 462
- динамическая 464
- зарядоуправляемая 465
- статическая 463
- Модель диодной онтопары 498
- индукционного транзистора 490
- математическая 450
- мощного полевого транзистора
- динамическая 488
- — — статическая 487
- полевого транзистора динамическая большого сигнала 483
- — — малого сигнала 486
- тепловая в истинных параметрах 508
- в приведенных параметрах 508
- технологическая 452
- тиристора динамическая двухступенчатая 492
- — — трехэлектродная 495
- — — статическая 490
- физико-топологическая 452, 459
- функциональная 452, 457
- электрическая 452
- большого сигнала 455
- динамическая 456
- малого сигнала 454
- статическая 456
- Накачка лазера 390
- Населенность уровня энергии 387
- Низкий уровень инжекции 36
- Область безопасных режимов (ОБР) 18, 199, 347
- начального включения (ОНВ) 230
- пространственного заряда (ОПЗ) 49
- Онтопара:
 - диодная 435, 439
 - диодно-транзисторная 435
 - дифференциальная 442
 - с составным фототранзистором 435
 - тиристорная 435
 - транзисторная 435, 443
- Охладитель:
 - пластинчатый 531
 - ребристый 531
 - штыревой 532
- Переход:
 - дырочно-дырочный 23
 - гетерогенный 23
 - гомогенный 23
 - омический 24, 52
 - плавный 61
 - резкий 55
 - Шоттки 24
 - электрический 23
 - электронно-дырочный 23
 - электронно-электронный 23
- Прибор дискретный 11
- интегральный 11
- с зарядовой связью (ПЗС) 289, 350
- Порог измерения населенности 390
- Пробой перехода:
 - лавинный 83
 - тепловой 83, 92
 - туннельный 83, 90
- Работа выхода 47
- на комплексную нагрузку 19
- Разность потенциалов контактная 42, 48
- Рассеяние электронно-дырочное 43
- Режим работы транзистора:
 - активный 14
 - ключевой 12
 - насыщения 176
 - отсечки 14
 - усилительный 12
- Сопротивление тепловое:
 - внутреннее 515
 - излучения 508
 - конвекции 506
 - корпус — охладитель 519
 - охладитель — среда 521
 - переходное 537
 - теплопроводности 506
- Стабилитрон 108
- Сток 299
- Структура полупроводникового прибора 24
- Температура структуры 501
- Теплообмен 503
- Теплопроводность 503
- Теплостойкость 502
- Термоциклирование 543
- Тиристор 13, 205
- запираемый 274
- полевой 289
- симметричный (симистор) 261
- Тиристор-диод 281
- Транзистор 13
- биполярный 115
- бездрейфовый 129
- дрейфовый 159
- составной 197
- полевой 286
- с индуцированным каналом 288, 299
- со встроенным каналом 288
- с управляющим переходом 288, 322
- со статической индукцией СНТ 330, 343
- Угол излучения 381
- Усиление лазерное 388
- Фотодиод 409
- лавинный 423

с гетероструктурой 423
с $p-n$ -структурой 420
Шоттки 422

Фотоприемник 401
Фототранзистор 425
— составной 427
Фототиристор 428
Функция теплового накопления 548

Чувствительность фотоприемника 405

Электролюминесценция 365
Эмиттер 116

Эффект:
высокого уровня легирования 40
квазинасыщения 157, 163
Кирка 154, 165
локализации энергии 231, 542
Миллера 17
оттеснения тока эмиттера 172
фотогальванический 401
фотопроводимости 402

Эрли 170
 di/dI 224, 231
 du/dI 238, 243

Оглавление

Предисловие	3
Обозначения основных величин и параметров	7
Введение. Общие вопросы применения полупроводниковых приборов	11
Глава первая. Основы физики полупроводников и электронно-дырочных переходов. Полупроводниковые диоды	23
1.1. Основы физики полупроводников	23
1.1.1. Основные свойства полупроводников	25
1.1.2. Проводимость полупроводников	30
1.1.3. Основная система уравнений	33
1.1.4. Эффекты в полупроводниках при высоких уровнях легирования и больших концентрациях носителей заряда	39
1.2. Переходы металл — полупроводник	46
1.2.1. Высота потенциального барьера	46
1.2.2. Вольт-амперная характеристика перехода металл — полупроводник (диода Шоттки)	50
1.2.3. Омические переходы	52
1.3. Диоды на основе электронно-дырочных переходов	53
1.3.1. Энергетическая диаграмма $p-n$ перехода. Контактная разность потенциалов	53
1.3.2. Толщина области пространственного заряда и барьерная емкость резкого $p-n$ перехода	57
1.3.3. Толщина области пространственного заряда и барьерная емкость плавных $p-n$ переходов	61
1.3.4. Вольт-амперная характеристика диода на основе $p-n$ перехода при низком уровне инжекции	65
1.3.5. Вольт-амперная характеристика диода на основе p^+-n-n^+ структуры в области больших токов	74
1.3.6. Обратная ветвь ВАХ и пробой диодов с $p-n$ переходом	82
1.3.7. Переходные процессы в диодах с $p-n$ переходом	94
1.3.8. Частотные свойства диодов с $p-n$ переходом	100
1.4. Разновидности и классификация полупроводниковых диодов	103
1.4.1. Принципы классификации полупроводниковых диодов	103
1.4.2. Выпрямительные диоды	105
1.4.3. Импульсные диоды	107
1.4.4. Стабилитроны	108
1.4.5. Диоды Шоттки	110
Глава вторая. Биполярные транзисторы	115
2.1. Принцип действия и классификация биполярных транзисторов	115
2.1.1. Принцип действия и схемы включения транзистора	116
2.1.2. Классификация биполярных транзисторов	122
2.1.3. Краткие сведения по технологии изготовления транзисторов	123
2.2. Основы физики биполярных транзисторов	127
2.2.1. Основные допущения идеализированной теории биполярных транзисторов	127
2.2.2. Концентрация и токи неосновных носителей заряда в базе транзистора	130
2.2.3. Вывод уравнений ВАХ транзистора при низком уровне инжекции	134
	571

2.2.1. Коэффициенты передачи тока при низком уровне инжекции	138
2.2.2. Особенности работы транзистора в режиме больших плотностей токов	146
2.2.3. Расширение базы при высоких плотностях токов	154
2.2.4. Физические процессы в базе дрейфового транзистора при низком уровне инжекции	158
2.2.5. Физические процессы в дрейфовых транзисторах при больших плотностях тока	161
2.2.6. Неоднородные процессы в транзисторе. Сопротивление базы транзистора	171
2.2.7. Статистические характеристики транзистора	175
2.2.8. Переходные процессы в транзисторе	181
2.3. Система параметров и режимы эксплуатации транзисторов	193
2.3.1. Система параметров транзисторов	193
2.3.2. Мощные транзисторы	196
2.3.3. Предельные режимы работы биполярных транзисторов	199
Глава третья. Тиристоры	205
3.1. Основные особенности и классификация тиристоров	205
3.1.1. Внутренняя положительная обратная связь в тиристоре	205
3.1.2. Классификация и система обозначений тиристоров	207
3.2. Выходная вольт-амперная характеристика тиристора	210
3.2.1. Уравнение выходной ВАХ тиристора	210
3.2.2. Выходная ВАХ тиристора в обратном направлении	215
3.2.3. Влияние температуры на выходную ВАХ тиристора	217
3.2.4. Статические параметры тиристора	219
3.3. Переходные процессы в тиристорах	223
3.3.1. Динамические параметры тиристоров	223
3.3.2. Переходный процесс включения тиристора током управления при малых анодных токах	225
3.3.3. Переходный процесс включения тиристора током управления при больших анодных токах	230
3.3.4. Переходный процесс включения тиристора по аноду (эффект du/dt)	238
3.3.5. Переходный процесс выключения тиристора	244
3.4. Построение цепи управления тиристором	252
3.4.1. Построение цепи управления в статических режимах эксплуатации	252
3.4.2. Выбор режима формирователя импульсов управления	255
3.4.3. Параметры импульса управления в импульсных режимах эксплуатации	256
3.4.4. Помехоустойчивость тиристоров	258
3.5. Симметричные тиристоры (симисторы)	261
3.5.1. Структура симистора	261
3.5.2. Выходная ВАХ симистора	267
3.5.3. Динамические свойства симисторов	270
3.5.4. Особенности применения симисторов	273
3.6. Запираемые тиристоры	274
3.6.1. Физические процессы при выключении	275
3.6.2. Анализ переходного процесса выключения	277
3.6.3. Ограничения в применении	279
3.6.4. Построение цепи управления	280

3.7. Тиристоры-диоды	281
3.8. Сравнительная характеристика тиристора и транзистора	284
Глава четвертая. Полевые полупроводниковые приборы	286
4.1. Классификация и система обозначений полевых полупроводниковых приборов	286
4.1.1. Классификация и основные особенности	286
4.1.2. Система обозначений полевых транзисторов	290
4.2. МДП-структура с индуцированным каналом	292
4.2.1. Режим обеднения МДП-структуры	292
4.2.2. Режим инверсии МДП-структуры	295
4.2.3. Емкость МДП-структуры	296
4.2.4. МДП-структура как управляющий элемент полевого прибора	298
4.3. МДП-транзистор с индуцированным каналом	299
4.3.1. Конструкция и принцип действия	299
4.3.2. Выходные ВАХ МДП-транзистора	301
4.3.3. Уравнение выходной ВАХ МДП-транзистора	303
4.3.4. Прходные ВАХ МДП-транзистора	307
4.3.5. Влияние подложки	308
4.4. Параметры и характеристики МДП-транзистора	310
4.4.1. Параметры и характеристики МДП-транзистора в усилительном режиме	310
4.4.2. Параметры МДП-транзистора в ключевом режиме	316
4.4.3. Комплементарные МДП-транзисторы в ключевом режиме	321
4.5. Полевой транзистор с управляющим $p-n$ переходом	322
4.5.1. Структура и основные особенности	322
4.5.2. Принцип действия	323
4.5.3. Вольт-амперные характеристики	326
4.5.4. Параметры и режимы эксплуатации	328
4.6. Мощные полевые транзисторы	329
4.6.1. Мощные МДП-транзисторы	331
4.6.2. Физические основы эксплуатации мощных МДП-транзисторов в ключевом режиме	336
4.6.3. Транзисторы со статической индукцией	343
4.6.4. Физические основы эксплуатации мощных полевых транзисторов в усилительном режиме	345
4.6.5. Сравнение МДП- и биполярного транзисторов	348
4.7. Полевые приборы с зарядовой связью	350
4.7.1. Области применения	350
4.7.2. Режимы работы МДП-структуры в ПЗС	352
4.7.3. Вывод информации из ПЗС	354
Глава пятая. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	358
5.1. Оптическое излучение	358
5.1.1. Энергетические и световые параметры	358
5.1.2. Когерентность оптического излучения	362
5.1.3. Механизмы генерации излучения в полупроводниках	364
5.2. Некогерентные излучатели — излучающие диоды	370
5.2.1. Внешний квантовый выход и потери излучения	370
5.2.2. Излучательная характеристика	372
5.2.3. Спектральная характеристика	374
5.2.4. Параметры светонизлучающих диодов (СИД)	376

5.2.5. Электрические параметры излучающего диода	381
5.2.6. Излучающие диоды на основе гетероструктур	383
5.3. Когерентные излучатели — полупроводниковые лазеры	386
5.3.1. Лазерное усиление	386
5.3.2. Населенность и инверсия населенности	389
5.3.3. Генерация излучения	390
5.3.4. Порог генерирования лазера	392
5.3.5. Параметры и режимы работы	393
5.3.6. Полупроводниковые лазеры	395
5.3.7. Инжекционные лазеры	397
5.3.8. Лазеры с гетерогенной структурой	399
5.3.9. Сравнительная характеристика лазеров	400
5.4. Фотоприемники	401
5.4.1. Внутренний фотоэффект в полупроводниках	401
5.4.2. Параметры и характеристики фотоприемников. Чувствительность	405
5.4.3. Фотодиод, принцип действия и режимы эксплуатации	409
5.4.4. Характеристики и параметры фотодиода	413
5.4.5. Разновидности фотодиодов	420
5.4.6. Фотоприемники с внутренним усилением	425
5.5. Оптопары	429
5.5.1. Элементы оптопары	429
5.5.2. Входные и выходные параметры оптопар	435
5.5.3. Передаточные параметры и параметры изоляции оптопар	437
5.5.4. Режимы эксплуатации диодных оптопар	439
5.5.5. Режимы эксплуатации транзисторных оптопар	443
5.5.6. Система обозначений оптопар	445
Глава шестая. Модели полупроводниковых приборов	447
6.1. Модели полупроводниковых приборов в системе проектирования электронных устройств	447
6.1.1. Особенности моделирования полупроводниковых приборов	447
6.1.2. Классификация моделей полупроводниковых приборов	452
6.1.3. Особенности построения функциональных моделей	457
6.1.4. Особенности физико-топологических моделей полупроводниковых приборов	459
6.2. Модели полупроводниковых диодов	462
6.2.1. Статистические модели диодов	463
6.2.2. Динамическая модель диода	464
6.2.3. Динамическая зарядоуправляемая модель	465
6.2.4. Определение параметров моделей диода	466
6.3. Модели биполярных транзисторов	469
6.3.1. Динамическая модель Эберса — Молла	469
6.3.2. Статистические модели	472
6.3.3. Динамические зарядоуправляемые модели	474
6.3.4. Динамическая передаточная модель Эберса — Молла	477
6.3.5. Динамические модели малого сигнала	478
6.4. Модели полевых транзисторов	483
6.4.1. Динамическая модель большого сигнала	483
6.4.2. Динамическая модель малого сигнала	486
6.4.3. Статистическая модель мощного МДП-транзистора	487
6.4.4. Динамические модели мощных полевых транзисторов	488

6.5. Модели тиристоров	490
6.5.1. Статистические модели	490
6.5.2. Динамическая двухступенчатая модель тиристора	492
6.5.3. Динамическая трехэлектродная модель тиристора	495
6.6. Модели оптоэлектронных приборов	498
Глава седьмая. Тепловые режимы работы полупроводниковых приборов	501
7.1. Основные особенности тепловых режимов полупроводниковых приборов	501
7.1.1. Теплообмен полупроводниковый прибор — окружающая среда	501
7.1.2. Электротепловая аналогия	505
7.1.3. Тепловые модели и классификация тепловых режимов полупроводниковых приборов	508
7.1.4. Тепловая обратная связь в полупроводниковых приборах	511
7.2. Тепловой расчет в режиме постоянного тока	513
7.2.1. Мощность потерь и внутреннее тепловое сопротивление	515
7.2.2. Тепловое сопротивление корпус — охладитель	519
7.2.3. Тепловое сопротивление охладитель — среда	521
7.2.4. Выбор типа охлаждения и охладителя	524
7.2.5. Учет тепловой обратной связи	532
7.3. Тепловой расчет в импульсном высокочастотном режиме	533
7.3.1. Импульсный периодический режим	533
7.3.2. Тепловой расчет импульсного «накаленного» режима	535
7.3.3. Переходное тепловое сопротивление	537
7.4. Импульсные неоднородные тепловые режимы полупроводниковых приборов	541
7.4.1. Теплостойкость неоднородных режимов	541
7.4.2. Тепловой расчет без учета накопления тепла	544
7.4.3. Тепловой расчет с учетом накопления тепла	547
Глава восьмая. Последовательное и параллельное соединение полупроводниковых приборов	550
8.1. Особенности эксплуатации модулей с последовательным и параллельным соединением приборов	550
8.2. Выравнивание распределения напряжения в последовательном соединении приборов	552
8.3. Выравнивание распределения напряжения в переходном режиме	553
8.4. Особенности параллельного соединения полупроводниковых приборов	553
Приложение 1. Частотные свойства и характеристические частоты биполярного транзистора	562
Приложение 2. Теплофизические и электрические свойства некоторых металлов, полупроводников и диэлектриков при 300К	562
Приложение 3. Свойства собственного Si, Ge и GaAs при 300К	564
Приложение 4. Фундаментальные физические постоянные и соотношения	564
Список сокращений	565
Список литературы	566
Предметный указатель	568

Уважаемые читатели!

В Энергоатомиздате в 1989 г. вышла книга «Алмаз в электронной технике». Это первая в нашей стране книга об алмазе—полупроводниковом материале XXI в., как его иногда называют. В ней освещены вопросы материаловедения алмазов, физические свойства и основы функционирования приборов и устройств на природных и синтетических алмазах. Рассмотрены электронные приборы на алмазах: транзисторы, диоды, фотоприемники, оптоэлектронные переключатели, гибридные приборы и т. п., а также новые направления алмазной технологии — эпитаксиальные пленки, ионно-имплантированные структуры и др.

Показана перспективность применения алмазов для электроники и их преимущества по сравнению с традиционными материалами полупроводниковой техники.

Книга предназначена для научных работников, инженеров, студентов, а также широкого круга читателей, интересующихся проблемами эволюции современной электроники.