

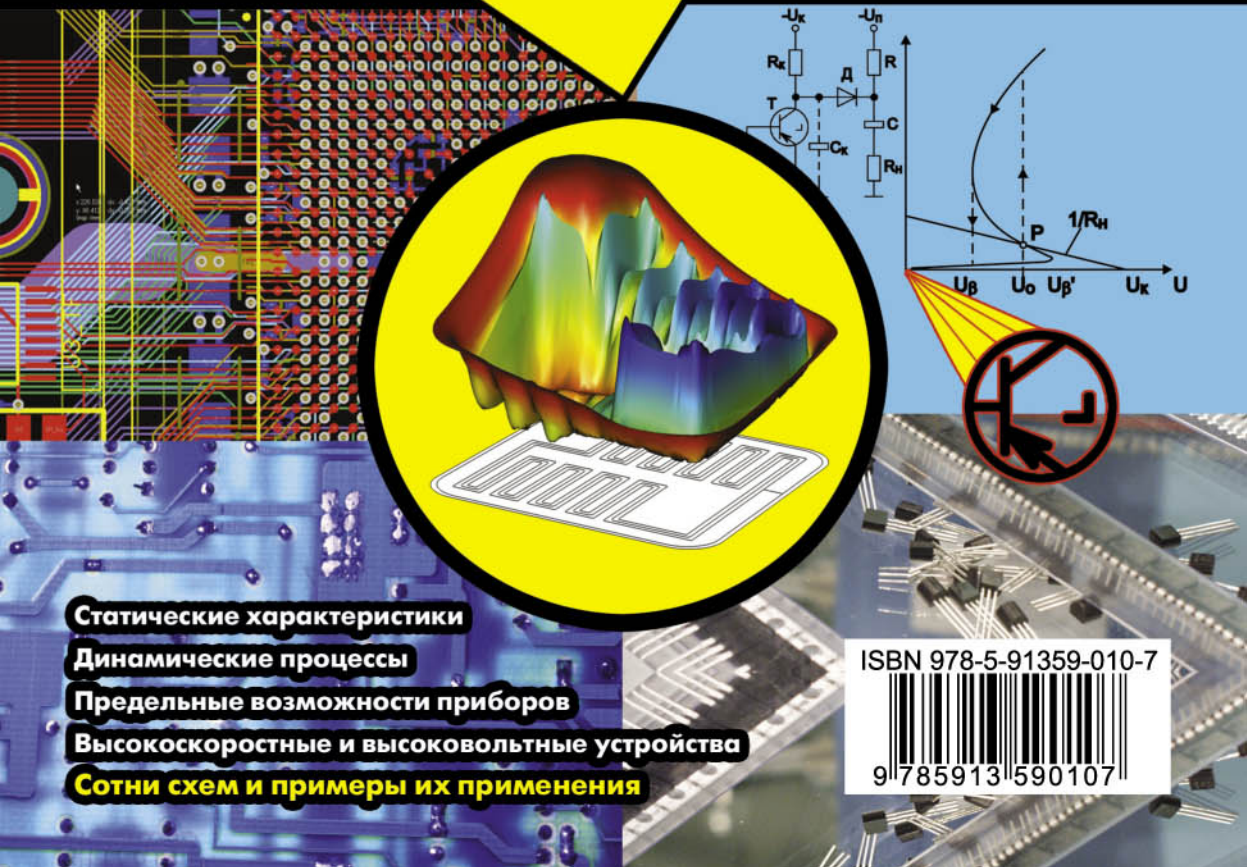
КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ
СЕРИЯ



В. П. Дьяконов

ЛАВИННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ И ТИРИСТОРЫ

ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ



Статические характеристики

Динамические процессы

Предельные возможности приборов

Высокоскоростные и высоковольтные устройства

Сотни схем и примеры их применения

ISBN 978-5-91359-010-7



9 785913 590107

УДК 621.396.6.032.98
ББК 32.844-04:30.67
Д 93

В. П. Дьяконов

Д93 Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. Серия «Компоненты и технологии». — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2014. — 384 с.: ил.

ISBN 978-5-91359-010-7

Впервые обобщены и развиты обширные исследования по теории и применению лавинных транзисторов и тиристоров. Выполнен анализ их управляемых статических характеристик. Описаны физические механизмы их сверхбыстрого переключения в условиях ограниченного расширения области объемного заряда (ООЗ). Оценены предельные возможности приборов. Особое внимание уделено фундаментальным основам построения схем и развитию схемотехники этих приборов. Описаны сотни схем и их применение в новых и в перспективных областях науки и техники: высокоскоростных линиях связи, измерительных устройствах, приборах ядерной и физической электроники, лазерных дальномерах и локаторах, видеоимпульсных радарах, георадарах, оптических и импульсных рефлектометрах и др. Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов вузов и университетов научного и технического профиля, а также для подготовленных радиолюбителей.

www.solon-press.ru
E-mail: solon-avtor@coba.ru

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Оформить заказ можно на сайте **www.solon-press.ru** в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (495) 254-44-10, 252-73-26.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте. Для этого присылайте конверт с маркой по адресу, указанному в п. 1.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса **www.solon-press.ru/kat.doc**.

Интернет-магазин размещен на сайте **www.solon-press.ru**.

По вопросам приобретения обращаться:
ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»
Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, **www.aliants-kniga.ru**

ISBN5-978-5-91359-010-7

© Макет и обложка «СОЛОН-ПРЕСС», 2014
© В. П. Дьяконов, 2014

Глава 1. Статические характеристики

Современные лавинные транзисторы относятся к сверхскоростным приборам, поведение которых в динамике резко отличается от поведения в статике. Тем не менее, анализ статических характеристик (прежде всего вольтамперных — ВАХ) имеет фундаментальное значение в оценке режимов и видов работы этих приборов. В частности он позволяет рассчитать параметры, необходимые для проектирования импульсных устройств на лавинных транзисторах и оценить принципиально возможные области применения этих приборов. Эти вопросам посвящена данная глава.

1.1. Физика лавинного пробоя p - n перехода

1.1.1. Вольтамперная характеристика идеального p - n перехода

В основе работы лавинных полупроводниковых приборов лежит обратимый лавинный пробой p - n перехода [43—46]. Однако прежде чем рассматривать это фундаментальное физическое явление, остановимся кратко на обычных представлениях о физике p - n перехода. При этом мы ограничимся рассмотрением только переходов на основе германия и кремния, поскольку только эти полупроводники пока используются для транзисторов, работающих в лавинном режиме. Приведенное ниже рассмотрение предполагает знакомство читателя с элементарной теорией работы полупроводниковых приборов.

P - n переходы образуются при контакте двух областей полупроводника с донорной и акцепторной примесью, или проще говоря, с электронной (n) и дырочной (p) проводимостью. Зависимость тока I , протекающего через переход, при напряжении на нем U называется вольтамперной характеристикой (ВАХ) p - n перехода. Она задается полученным Шокли выражением:

$$I(U) = I_0(e^{U/m\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

где $\varphi_T = kT/q$ — тепловой потенциал, m — поправочный коэффициент ($m=1$ для германиевых и $m=2$ для кремниевых p - n переходов), k — постоянная Больцмана и q — заряд электрона. В дальнейшем мы нередко будем опускать m , поскольку учет его достаточно прост. При комнатной температуре $\varphi_T=0,025$ В

Соответствующая выражению (1.1) ВАХ представлена на рис. 1.1 для $m=1$. График ВАХ типичного германиевого перехода построен с помощью системы компьютерной математики Mathematica 5 с использованием следующих вполне очевидных команд:

```
Id [Ud_] := I0*(e^(Ud/φ) - 1)
I0:=2*1*10^-5; φ:=0.025
Plot[Id[Ud], {Ud, -3, 0.25}, PlotRange->{-2*10^-4, 10^-3}]
```

При напряжении U прямой (положительной) ток, протекающий через переход, экспоненциально растет с ростом напряжения уже при малых его значениях (доли вольта). Это связано с тем, что в этом случае потенциальный барьер p - n перехода понижается и начинается инжекция дырок в n -область и электронов в p -область. Концентрация неосновных носителей в них резко возрастает, что и объясняет рост тока через переход. Это характерно как для отдельного p - n перехода, так и

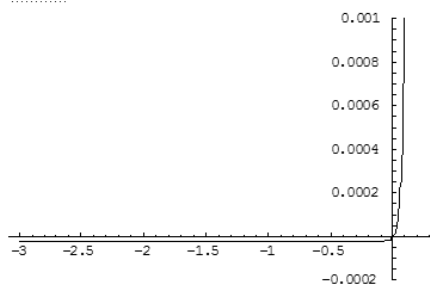


Рис. 1.1. Вольтамперная характеристика р-п перехода

эмиттерного перехода биполярного транзистора в активном режиме его работы или в состоянии насыщения.

Если напряжение U имеет обратную (отрицательную) полярность, то потенциальный барьер перехода возрастает и переход закрывается. Ток через него становится очень малым $-I_0$. Это вытекает из общеизвестного выражения для зависимости тока р-п перехода I от напряжения U на нем — (1.1). Ток I_0 составляет единицы-десятки мкА для германиевых переходов и сотые-тысячные доли мкА для кремниевых переходов. Теоретически постоянство тока наблюдается при $U > (2-4) \varphi_T$. Утечка перехода и его пробой нарушают эту закономерность и ведут к росту тока через переход с ростом обратного напряжения

1.1.2. Физика лавинного пробоя р-п перехода

При повышении обратного напряжения на переходе (по абсолютной величине) выше десятков вольт обычно наблюдается дополнительный рост тока. Отчасти он обусловлен неидеальностью перехода и наличием некоторого шунтирующего перехода сопротивления утечки, а отчасти тем или иным механизмом электрического пробоя. Но часто такое увеличение тока в некоторой узкой области напряжений переходит в резкое увеличение тока порою во много тысяч раз. Это явление и называют *пробоем*. Слово «пробой» не очень удачно, поскольку резкий рост тока обычно является обратимым, т. е. при уменьшении напряжения ток уменьшается и его значение приближается к I_0 .

Существует несколько механизмов электрического пробоя, но пока мы остановимся на наиболее распространенном — *лавинном пробое*. Он обусловлен ударной ионизацией носителей в области перехода с достаточно большой напряженностью электрического поля [43—46]. Первичные электроны и дырки (как входящие в переход извне, так и генерируемые в нем) дрейфуя в области объемного заряда перехода ускоряются и их энергия растет. При столкновениях электронов и дырок с большой энергией с атомами полупроводника они выбивают из них вторичные электроны и дырки. Это и есть *лавинное умножение* носителей или *лавинная инжекция* носителей. В результате данного довольно сложного физического процесса концентрация подвижных носителей в переходе возрастает и возрастает протекающий через переход ток.

Лавинный пробой хорошо изученное и широко применяемое на практике физическое явление. На нем основана работа кремниевых стабилитронов, мировой выпуск которых достигает многих миллиардов штук в год. Эти приборы показали высочайшую надежность и стабильность несмотря на то, что в них используется развитый пробой, при котором лавинное умножение носителей достигает многих

тысяч раз и «разрушение» кристаллической решетки проводника идет весьма интенсивно. Некоторые стабилитроны претендуют даже на роль источников опорного напряжения высочайшей точности и стабильности. Достаточно известно и применение лавинного умножения носителей в лавинных фотодиодах и лавинно-пролетных диодах.

1.1.3. Коэффициенты ионизации и напряжение лавинного пробоя

Количество электронно-дырочных пар, которые образуются на единице пути (1 см) носителей определяется коэффициентами ионизации — α для электронов и β для дырок. Часто вместо разных коэффициентов ионизации вводятся обобщенные коэффициенты α_i . Физические исследования показали, что коэффициенты ионизации очень сильно зависят от напряженности электрического поля в переходе. Эта зависимость близка к экспоненциальной:

$$\alpha_i(E) = c \cdot \exp(-b/E), \quad (1.2)$$

где $c=1,2 \cdot 10^7$ см-1 и $b=1,4 \cdot 10^6$ В/см для германия и $c=0,9 \cdot 10^6$ см-1 и $b=1,8 \cdot 10^6$ В/см для кремния.

Поскольку напряженность электрического поля зависит от координаты x области перехода, то и коэффициенты ионизации имеют зависимость от x . Теоретически было показано [43—46], что коэффициенты лавинного умножения для дырок и электронов определяются следующими интегральными выражениями:

$$M_p = J_p/J_n = \left[1 - \int_0^W \beta(x) dx \right]^{-1} \text{ и } M_n = J_n/J_p = \left[1 - \int_0^W \alpha(x) dx \right]^{-1}. \quad (1.2)$$

Здесь: J_p и J_n — плотности дырочной и электронной составляющей тока, текущего через переход, W — ширина области объемного заряда перехода (иногда именуемая просто шириной перехода, что менее определено). Условиями пробоя являются устремления к 0 выражений в квадратных скобках. Коэффициент лавинного умножения M определяется как:

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{M_p} + \frac{1}{M_n}. \quad (1.3)$$

Для определения коэффициентов умножения и напряжения лавинного пробоя U_M надо знать распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в переходе и зависимость коэффициентов ионизации от этого параметра. Аналитически решить эту задачу нельзя из-за сложности нелинейных зависимостей коэффициентов ионизации от напряженности электрического поля. Ученые в области физики твердого тела давно решили эту задачу с помощью моделирования на ЭВМ. Однако полученные результаты достаточно сложны и мало пригодны для практических численных расчетов. Но они были положены в основу построения достаточно простых аппроксимаций, которые несложно применить на практике. Рассмотрим некоторые из этих аппроксимаций.

Для резкого перехода (рис. 1.2), характерного для сплавных транзисторов, известны теоретические выражения для напряженности электрического поля E , ее максимального значения E_m и ширины перехода W :

$$E = E_m(1 + x/W), \quad E_m = 2U/W \text{ и } W = W_1 U^{1/2}, \quad (1.4)$$

где U — напряжение на переходе, W_1 — характеристическая ширина перехода, показывающая, насколько меняется W при изменении напряжения U на 1 В.

Характеристическая ширина перехода определяется концентрацией примеси N и аппроксимируется выражениями

$$W_1 = 3,63 \cdot 10^3 / N^{1/2} \text{ для германия}$$

и

$$W_1 = 4,25 \cdot 10^3 / N^{1/2} \text{ для кремния.}$$

Учитывая экспоненциальную зависимость коэффициентов ионизации от напряженности поля E , можно сделать вывод, что лавинное умножение носителей происходит в тонкой области резкого перехода, где E близко у E_m .

Для плавного перехода с линейным изменением концентрации примеси справедливы следующие выражения:

$$E = E_m[1 - (2x/W)^2], \quad E_m = 1,5U/W \text{ и } W = W_1 U^{1/3} = \left(\frac{2}{3} W_1^3 E_m \right)^{1/3}, \quad (1.5)$$

где $W_1 = (1,5\epsilon_0/qA)^{1/3}$ и ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, A — градиент концентрации примеси. И здесь ясно, что реально лавинное умножение происходит, в основном, в тонкой области перехода с напряженностью электрического поля, близкой к E_m (см. рис. 1.3).

Для резких переходов физический анализ напряжения пробоя позволил получить достаточно простые формулы, связывающие напряжение пробоя (в вольтах) с удельным сопротивлением высокоомной области перехода. Эти формулы представлены ниже.

Тип перехода	Ge n+-p	Ge p+n	Si n+p	Si p+n
U_M , В	$52\rho_p^{0,64}$	$83,4\rho_n^{0,61}$	$23\rho_p^{0,75}$	$86\rho_n^{0,64}$

Известна достаточно универсальная формула для напряжения лавинного пробоя для резкого p-n перехода и любого типа полупроводника:

$$U_M \approx 60(E_g/1,1)^{3/2}(N/10^{16})^{-3/4}, \quad (1.6)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника (эВ), N — концентрация примеси (см^{-3}). Аналогичная формула есть и для плавного (линейного перехода) с градиентом концентрации примеси A :

$$U_M \approx 60(E_g/1,1)^{6/5}(A/3 \cdot 10^{20})^{-2/5}. \quad (1.7)$$

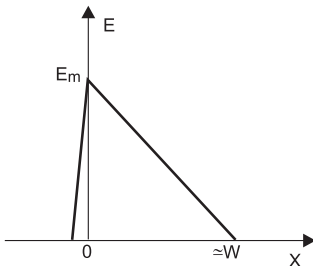


Рис. 1.2. Зависимость $E(x)$ для резкого перехода

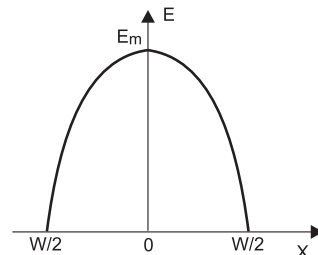


Рис. 1.3. Зависимость $E(x)$ для плавного (линейного) перехода

Формула для линейного перехода вполне применима и для экспоненциального перехода, поскольку распределение примесей у него в области, где $E(x)$ максимально, близко к таковому для линейного перехода. На напряжение пробоя могут повлиять дополнительные факторы, смыкание областей объемного заряда, микроплазменное развитие пробоя, пробой по поверхности p - n перехода и др.

Существует множество и других, более или менее точных, формул для оценки напряжения U_M , но все они представляют интерес для разработчиков полупроводниковых приборов, но не тех, кто их применяет. Для последних важно другое — то, что напряжение пробоя U_M легко измеряется как напряжение, при котором ток через p - n переход начинает резко нарастать (см. рис. 1.1).

Правда, при этом возникает некоторая неопределенность того, на каком уровне тока, протекающего через переход или диод, нужно измерять напряжение лавинного пробоя. При малом токе результат измерения окажется меньше истинного, а при большом погрешность может возрастать из-за падения напряжения на омической части перехода и возникновения дополнительного дифференциального сопротивления в области пробоя $R_{пр}$.

Оценка сопротивления $R_{пр}$ может быть сделана из выражения [6]:

$$R_{пр} = \sum_{i=p,n} \eta_i \frac{W_{iM}^2}{2\epsilon\epsilon_0 v_i S}, \quad (1.8)$$

где i — индекс, принимающий значения p или n , W_{iM} — ширина перехода при напряжении на нем $U=U_M$, v_i — скорость носителей и S — площадь перехода. Поскольку сопротивление $R_{пр}$ является дифференциальным и последовательным, его часто обозначают как R_d или R_s , нередко включая в него и омическое сопротивление областей p и n перехода и контактов.

1.1.4. Формула Миллера для коэффициентов умножения

Лавинное умножение носителей тока при больших напряжениях на переходе имеет важное значение при работе полупроводниковых приборов. Поэтому важно не только физически корректно вычислять коэффициент лавинного умножения M (1.3), но и найти достаточно простую формулу для его оценки. Высокая точность от такой формулы не требуется, поскольку разброс электрофизических параметров p - n перехода достаточно велик.

Исследование умножения носителей в p - n переходах при их освещении позволило получить довольно точные экспериментальные данные для малых и умеренно больших значений M . Используя данные математического моделирования процесса умножения носителей и данные эксперимента Миллер в [45] представил одну из самых простых и достаточно точных для германиевых и кремниевых переходов формулу:

$$M = \frac{I(U)}{I_0} = \frac{1}{1 - (U/U_M)^n}, \quad (1.9)$$

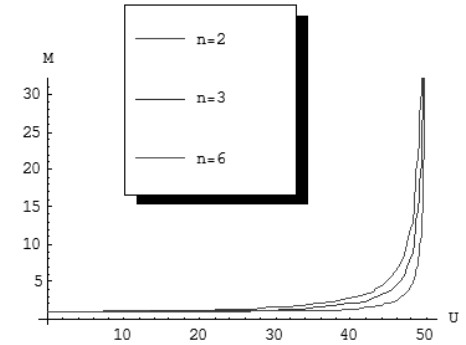
где $n=6$ для n^+ - p и $n=3$ для германиевых p^+ - n переходов, и $n=2$ и $3,5$ для кремниевых переходов n^+ - p и p^+ - n .

Эта формула отражает степенную зависимость коэффициентов умножения от обратного напряжения на переходе U при известном напряжении лавинного пробоя $U_M=U_m$. Вид этой зависимости для разных значений n показан на рис. 1.4 (в

оригинале кривые различаются цветом, для $n=2, 3$ и 6 они представлены сверху-вниз).

Из него видно, что малые n обеспечивают большие значения коэффициента лавинного умножения M при напряжениях U заметно меньших U_M .

В последующем, например в [46], было неоднократно показано, что формула Миллера имеет приближенный характер и может давать большую погрешность при вычислениях, особенно для переходов особой конструкции (планарных, цилиндрических и др.). Однако это несколько не умаляет ее огромной практической значимости, позволяющей учитывать интегрально сложнейшие физические явления в лавинных полупроводниковых приборах. Погрешность вычисления по ней (примерно до 10–15%) остается намного меньшей, чем технологический разброс параметров полупроводниковых приборов и погрешность их измерений. В связи с этим формула Миллера положена в основу теории работы лавинных транзисторов, представленной в данной книге.



-Graphics-

Рис. 1.4. Зависимость M от U для $n=2, 3$ и 6 и $U_M=50$ В

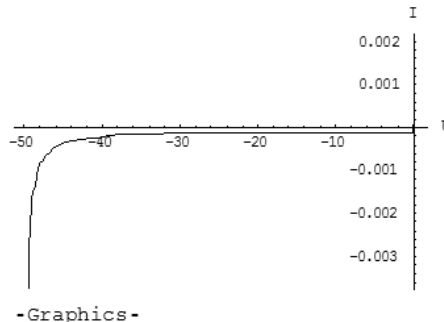
1.1.5. ВАХ p-n перехода с учетом лавинного умножения носителей

Выражение для ВАХ перехода с учетом эффекта лавинного умножения носителей нетрудно получить, умножив правую часть (1.1) на значение M (1.9).

$$I(U) = M \cdot I_0(e^{U/m\phi_T} - 1) = I_0(e^{U/m\phi_T} - 1)[1 - (U/U_M)^n]^{-1} \quad (1.10)$$

Поправка (умножение на M) практически сказывается только на виде обратного участка ВАХ, где возможны большие значения напряжения U . Следующие команды СКМ Mathematica строят обратную ветвь ВАХ p-n перехода по (рис.1.5) приведенной выше формуле:

```
n:=3;Um:=50;I0:=1*10^-4;
Ic[uc_]:=M[-uc,Um,n]*I0*(Exp[1]^(uc/0.025)-1)
Plot[Ic[uc],{uc,-50,0.5},AxesLabel->{"U","I"}]
```



-Graphics-

Рис. 1.5. Обратная ветвь ВАХ перехода с $U_M = 50$ В и $n = 3$

В области пробоя $U \approx U_M$ и можно для тока записать выражение:

$$I = MI_0 = -I_0[1 - (U/U_M)^n]^{-1} \quad (1.10)$$

или

$$U = U_M \sqrt[n]{1 - M^{-1}} \text{ или } U = U_M \sqrt[n]{1 - I_0/I}. \quad (1.11)$$

Здесь важно отметить, что уже небольшое уменьшение напряжения U относительно значения U_M ведет к значительному снижению M . Это означает, что лавинные транзисторы (в отличие от кремниевых стабилитронов и лавинно-пролетных диодов) работают при слабо развитом лавинном пробое. Это означает, что приписываемые развитому лавинному пробое явления локализации тока и развития пробоя к микроплазмам [46] имеют малое значение.

Принимая во внимание сопротивление R_d , включающее в себя компоненту $R_{пр}$ (1.8), последнюю формулу можно уточнить и для ВАХ перехода в области лавинного пробоя записать выражение:

$$U = U_M \sqrt[n]{1 - I_0/I} + IR_d. \quad (1.12)$$

Расчеты показывают, что величина R_d составляет единицы-десятки Ом и это сопротивление порождает характерный наклон пробойного участка ВАХ перехода (или диода) в области пробоя, видный на рис. 1.5. Детальное построение прямого участка ВАХ перехода (рис. 1.6) по формуле (1.12) с помощью СКМ Mathematica 5 реализуется командами:

```
Ic[uc_] := M[-uc, Um, n] * I0 * (Exp[1] ^ (uc/0.025) - 1)
Plot[Ic[uc], {uc, 0, 0.2}, AxesLabel -> {"U", "I"}, PlotRange -> {0, 1*10^-2}]
```

Влияние R_d на обратную ветвь ВАХ перехода хорошо иллюстрирует следующий расчет в СКМ Mathematica:

```
U[Ic_, Um_, Rd_] := Um * \sqrt[n]{1 - I0/Ic} + Ic * Rd
Plot[{U[Ic, 50, 0], U[Ic, 50, 50], U[Ic, 50, 100]}, {Ic, 0.0001, 0.05},
AxesLabel -> {"I", "U"}, PlotStyle -> {Hue[.33], Hue[.75], Hue[1]},
LegendPosition -> {1, 0}, PlotLegend -> {"Rd=0", "Rd=50 Ohm", "Rd=100 Ohm"}]
```

Построенные по нему зависимости падения напряжения на переходе от тока, протекающего через него, представленные на рис. 1.7. В оригинале кривые выделяются цветом, верхняя кривая соответствует $R_d=100$ Ом. Хорошо видно, что при

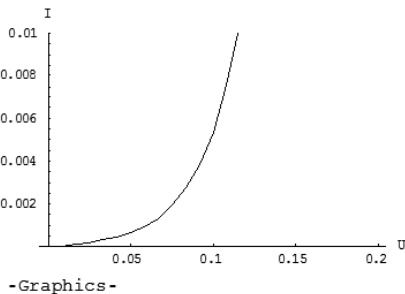


Рис. 1.6. ВАХ перехода на прямой ветви

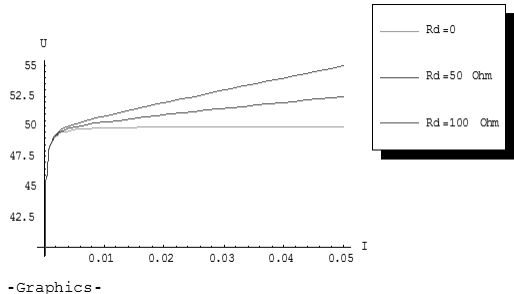


Рис. 1.7. Участки ВАХ при лавинном пробое с учетом R_d

отличном от 0 значении R_d участок пробоя заметно отличается от вертикали и имеет участок, на котором приращение напряжения практически линейно растёт с увеличением приращения тока.

1.1.6. Другие виды пробоя *p-n* переходов

Лавинный пробой далеко не единственный механизм пробоя *p-n* переходов. Первоначально считалось, что механизм пробоя переходов является туннельным или полевым. Для оценки напряжения пробоя этого вида U_z существуют достаточно простые формулы:

$$U_z = \begin{cases} 99p_n + 48p_p & \text{длIII Ge} \\ 39p_n + 8p_p & \text{длIII Si} \end{cases}$$

В низкокачественных переходах с большими токами утечки возможен тепловой пробой. Как правило, он необратим и ведет к порче перехода. Однако для современных *p-n* переходов, технология изготовления которых гарантирует получение очень малых токов утечки, этот вид пробоя не характерен. Но он возможен как вариант вторичного пробоя после разогрева перехода предшествующим лавинным или полевым пробоем.

В транзисторах число видов пробоя значительно больше, чем у одиночных переходов. Мы рассмотрим их в дальнейшем по мере описания физики работы транзисторов в лавинном режиме. Пока лишь отметим, что оценка значений U_M и n показывает, что только два класса биполярных транзисторов могут эффективно использоваться в качестве лавинных — это германиевые *p-n-p* типа и кремниевые *n-p-n* типа. Германиевые *n-p-n* транзисторы имеют максимальное значение параметра n , что означает малые значения M при $U < U_M$. У кремниевых *p-n-p* транзисторов расчетное (и реальное) напряжение полевого пробоя обычно меньше напряжения лавинного пробоя, так что он проявляется слабо.

В некоторых источниках, например в [46], показано, что развитый пробой в переходах большой площади часто носит микроплазменный характер. Микроплазма это область перехода с пониженным напряжением пробоя. В такой области наблюдается локализация тока. Расчеты на ЭВМ показали, что в области микроплазмы возможен падающий участок у зависимости плотности тока от напряжения на микроплазме и на переходе. Это означает регенеративное усиление тока, усиление его локализации и уменьшение размеров микроплазмы. Как правило, это приводит к выгоранию части перехода и деградации его характеристик.

Микроплазмы были обнаружены экспериментально в виде маленьких светящихся областей микронных размеров, наблюдаемых в переходах большой площади. Однако, для переходов современных маломощных транзисторов и транзисторов средней мощности роль микроплазменного пробоя не стоит переоценивать. Эксперименты с применением даже обычных транзисторов в лавинном режиме показывают, что (за редчайшими исключениями) никакого микроплазменного пробоя у них нет, либо эти приборы можно рассматривать как одноплазменные с микроплазмой, площадь которой примерно равна площади эмиттерного перехода. Это связано как с малой площадью переходов у таких транзисторов, так и мерами, принимаемыми для уменьшения вероятности развития микроплазменного пробоя.

Реальные переходы в диодах и транзисторах никогда не являются строго плоскопараллельными областями *p* и *n*. Их поверхность не идеальная плоскость, а скорее многоэкстремальная поверхность. Естественно, что даже без учета шнуrowа-

ния тока в микроплазмах, умножение носителей по площади поверхности будет всегда, в какой то мере, неравномерным. Оценка неравномерности лавинного пробоя будет дана ниже (в главе 3).

1.1.7. Выводы о свойствах лавинного пробоя p - n перехода

Проведенное выше обзорное рассмотрение свойств лавинного пробоя p - n переходов и диодов на их основе позволяет сделать ряд полезных выводов:

1. Лавинное умножение носителей в p - n переходах является фундаментальным физическим явлением, которое наблюдается в различных переходах на полупроводниках различного типа и, прежде всего, в самых распространенных — германии и кремнии.

2. Название «пробой» для эффекта увеличения тока при росте напряжения на переходе является не вполне удачным, так как процесс роста тока при отсутствии или ограничении вторичных эффектов (например, теплового или микроплазменного пробоя) является вполне обратимым и не ведущим к разрушению приборов. Высокая надежность приборов, использующих сильно выраженный эффект лавинного умножения носителей в переходе доказана серийным выпуском в огромных масштабах кремниевых стабилитронов, лавинных фотодиодов, лавинно-пролетных диодов и лавинных транзисторов.

3. Эмпирическая формула Миллера неплохо описывает резкий рост коэффициента лавинного умножения носителей M при наступлении лавинного пробоя, когда обратное напряжение на переходе приближается к пробивному U_M . При этом значение M лежит в пределах от 1 до бесконечности.

4. Важно отметить, что значения $M > 1$ отмечаются даже при напряжениях, намного меньших U_M , что приводит к значениям $\alpha_0 M > 1$ [48] и превращает лавинные транзисторы в негатроны — приборы, имеющие S- и N-образные вольтамперные характеристики.

5. Резкость наступления лавинного пробоя зависит от показателя n в формуле Миллера.

6. Последовательное омическое сопротивление R_d диода делает кривые пробоя более плавными. Напряжение на p - n -переходе при этом может превышать U_M , но коэффициент лавинного умножения M определяется напряжением на зажимах диода за вычетом падения напряжения на сопротивлении R_d .

7. Лавинный пробой развивается очень быстро, поскольку область умножения носителей занимает малую часть ширины очень тонкого p - n перехода, при этом умножение носителей происходит в области сильного электрического поля. Время развития пробоя — тысячные доли наносекунды, что позволяет считать лавинное умножение носителей безынерционным процессом.

8. Неконтролируемый лавинный пробой крайне опасен для диодов и транзисторов, поскольку способен мгновенно вывести их из строя, однако контролируемый лавинный пробой широко используется на практике.

1.2. Лавинный пробой в основных схемах включения биполярного транзистора

1.2.1. Пробой транзистора при обрыве эмиттера и подключении его к базе

Биполярный транзистор состоит из двух близко расположенных переходов — эмиттерного и коллекторного. Эмиттерный переход обычно смещен в прямом направлении и инжектирует неосновные носители в базовую область. Эти носители двигаются в базе за счет диффузии и, в общем случае, и дрейфа. Дрейф происходит в том случае, если распределение примеси в базе неравномерное, что имеет место в транзисторах, изготавливаемых по диффузионной и планарной технологиям.

Сразу отметим, что пока мы рассматриваем транзисторы, у которых явно нет смыкания переходов, т. е. у которых коллекторная и эмиттерная области объемного заряда (ООЗ), обедненные носителями тока, не перекрываются. В этом случае в базе есть заметный по размеру участок, в котором носители диффундируют и дрейфуют (если в базе есть электрическое поле) в направлении к базовой границе ООЗ коллекторного перехода. По пути к коллекторному переходу часть неосновных носителей рекомбинирует с основными носителями, что порождает ток базы. Кроме того, внешний прямой ток базы вызывает ввод избыточных зарядов основных носителей, вызывающий снижение потенциального барьера эмиттерного перехода и инжекцию зарядов неосновных носителей, которые пройдя базовую область входят в ООЗ коллекторного перехода и вызывают увеличение коллекторного тока.

Большая часть носителей, инжектируемых эмиттерным переходом, доходит до базовой границы ООЗ коллекторного перехода и порождает управляемую часть коллекторного тока. Таким образом, в схеме с общей базой он равен:

$$I_k = \alpha I_z + I_{k0}, \quad (1.13)$$

где α — коэффициент передачи тока эмиттера. Значение α у современных транзисторов весьма близко к 1, но все же принципиально важно помнить, что все же немного меньше 1.

Это, хорошо известное из элементарной теории транзисторов, выражение описывает работу транзистора в схеме с общей базой без учета явления лавинного умножения носителей в коллекторном переходе. Из него следует, что в схеме с общей базой транзистор является управляемым током эмиттера трехполюсником. Его входное сопротивление мало, а выходное велико. Учет лавинного умножения в этой схеме достаточно прост — он сводится к умножению на M обеих составляющих коллекторного тока на M :

$$I_k = M\alpha I_z + MI_{k0} = \frac{\alpha I_z + I_{k0}}{1 - (U/U_M)^n}. \quad (1.14)$$

Для понимания качественных отличий работы транзисторов в лавинном режиме от их работы в обычном режиме важно рассмотреть механизмы пробоя транзистора в типовых схемах включения при обрыве управляющего электрода [47—50]. Две такие схемы представлены на рис. 1.8.

При обрыве эмиттера работает только коллекторный переход и составляющая $M\alpha I_z = 0$. Таким образом, в первом приближении ВАХ транзистора при обрыве эмиттера является просто ВАХ коллекторного перехода. Она уже детально рас-

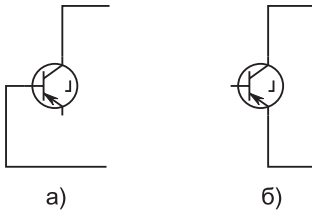


Рис. 1.8. Схемы включения транзистора при обрыве эмиттера и при обрыве базы

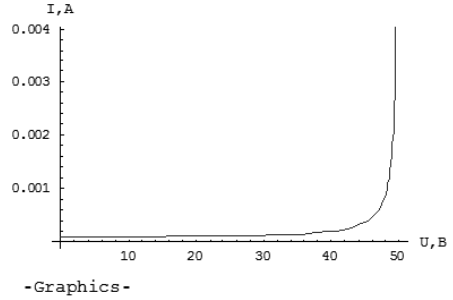


Рис. 1.9. Пример расчета ВАХ транзистора при обрыве эмиттера

считывалась выше. Ниже представлен фрагмент расчета ВАХ (рис. 1.9) схемы с обрывом эмиттера средствами СКМ Mathematica 5:

```
Icb[I0_, U_, Um_, n_] := I0 * M[U, Um, n]
Ice[I0_, a0_, U_, Um_, n_] := I0 / (1 - a0 - (U/Um) ^ n)
Plot[Icb[I0, U, 50, 3], {U, 0, 50}, PlotStyle -> Hue[1],
AxesLabel -> {"U, В", "I, А"}]
```

Подключение эмиттера к базе не меняет характер ВАХ, поскольку эмиттерный переход оказывается короткозамкнутым и ток во внешней цепи также обусловлен лишь коллекторным переходом.

1.2.2. Пробой транзистора при обрыве базы

Как видно из рис. 1.9 данная ВАХ ничего примечательного не содержит. Совсем иначе обстоит дело в схеме с обрывом базы — рис. 1.8,б. Фактически это схемы включения с общим эмиттером или с общим коллектором, у которых база отключена от внешней цепи. Для схемы с общим эмиттером уравнение токов задается выражением:

$$I_{\text{к}} = BI_{\text{з}} + (B + 1)I_{\text{к0}}, \quad (1.15)$$

где

$$B = \alpha / (1 - \alpha) \quad (1.16)$$

коэффициент передачи тока базы

Физически ток базы обусловлен рекомбинацией носителей в базовой области. Поэтому он обычно является лишь малой частью тока эмиттера. Если ток базы задан внешней цепью, то вводимые им в базу заряды понижают потенциальный барьер эмиттерного перехода, что вызывает инжекцию в базу неосновных носителей и появление составляющей коллекторного тока \$BI_{\text{б}}\$. Даже при \$I_{\text{б}}=0\$ ток коллектора возрастает от значения \$I_{\text{к0}}\$ до \$(B+1)I_{\text{к0}}\$. Это связано с механизмом взаимодействия переходов, создающим внутреннюю положительную обратную связь по току.

Лавинное умножение носителей в схеме с общим эмиттером учитывается умножением \$I_{\text{к0}}\$ и \$\alpha\$ на \$M\$. Для рассматриваемого пока случая обрыва базы \$I_{\text{б}}=0\$ и

$$I_{\text{к}} = \frac{\alpha M I_{\text{к0}}}{1 - \alpha M}. \quad (1.17)$$

Отсюда видно, что ток коллектора стремится к бесконечности, если $\alpha M \rightarrow 1$. Подставив в это условие значение M из формулы Миллера (1.9) нетрудно найти напряжение пробоя для этого случая:

$$U_{\beta} = U_M \sqrt[n]{1 - \alpha}. \quad (1.18)$$

Напряжение пробоя при обрыве базы оказывается намного меньше U_M . Так, найдем его при $\alpha = a_0 = 0,98$:

```
a0 := 0.98; Ub := Um * ^[1 - a0; N[Ub]
13.5721
```

Найденное значение оказалось равным около 13,6 В для транзистора с $U_M = 50$ В. Построим ВАХ транзистора при пробое с обрывом эмиттера и базы (рис. 1.10):

```
Plot[{Icb[I0, U, Um, n], If[U < Ub, Ice[I0, a0, U, Um, 3], 0.15]},
{U, 0, 50}, PlotRange -> {0, 0.05}, PlotStyle -> {Hue[1], Hue[.6]},
AxesLabel -> {"U, В", "I, А"}]
```

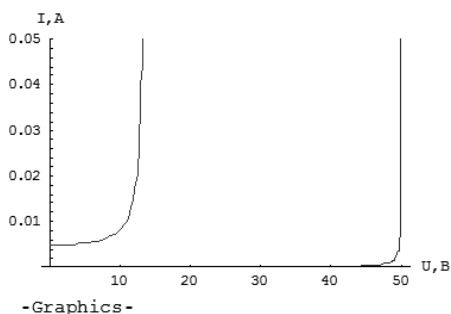


Рис. 1.10. ВАХ транзистора при пробое с обрывом эмиттера (кривая справа) и базы (кривая слева)

Нетрудно заметить, что при малых напряжениях ток коллектора в схеме с обрывом базы значительно больше, чем ток I_{k0} в схеме с обрывом эмиттера. А напряжение пробоя, напротив, заметно меньше. Важно, что пробой в этом случае наблюдается при токах коллектора, при которых рассеиваемая транзистором мощность вполне допустима и порой намного больше максимально допустимой рассеиваемой мощности. Это говорит о том, что снять ВАХ можно не только с помощью импульсного характеристикографа, но даже и на постоянном токе. Область напряжений на коллекторе до U_{β} соответствует обычному режиму работы транзисторов, а область напряжений от U_{β} до U_M — область лавинного режима.

1.2.3. Феномен падающего участка ВАХ при обрыве базы

Итак, в схеме с общим эмиттером с разорванной базой напряжение лавинного пробоя транзистора оказывается заметно меньше, чем U_M . На практике нередко ВАХ транзистора в таком включении имеет падающий участок, т. е. с ростом тока напряжение на приборе падает. Это превращает транзистор, работающий в лавинном режиме, в *негатрон* и позволяет создавать на его основе самые разнообразные электронные схемы. Рассмотрим механизм возникновения падающего участка ВАХ.

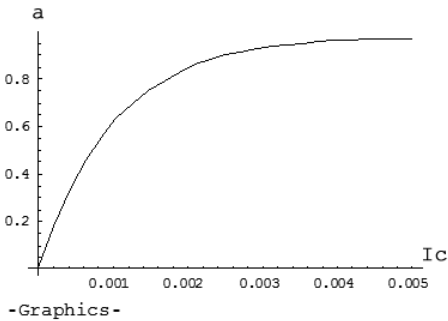


Рис. 1.11. Задание нарастающей зависимости $\alpha(a)$ от тока

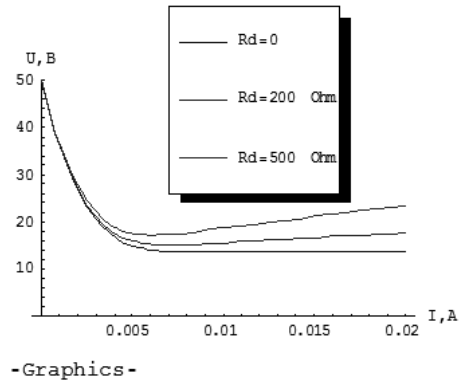


Рис. 1.12. Семейство S-образных ВАХ для схемы с оборванной базой при разных R , включенных последовательно с транзисторов

Падающий участок ВАХ возникает, если коэффициент передачи тока эмиттера оказывается нарастающей функцией от тока коллектора (и эмиттера) I_c . Пусть эта зависимость формально описывается нарастающей экспонентой (рис. 1.11):

```
a[Ic_] := a0 * (1 - Exp[-Ic/10^-3])
Plot[a[Ic], {Ic, 0, 5*10^-3}, AxesLabel -> {"Ic", "a"}]
```

Если помимо нарастающей зависимости $\alpha(I_c)$ учесть последовательное сопротивление R , включаемое последовательно с транзистором, то ВАХ такой цепи будет описываться выражением:

$$U(I_c) = U_M \sqrt{1 - \alpha(I_c)} + R \cdot I_c. \quad (1.19)$$

Построим эту ВАХ (рис. 1.12) с помощью СКМ Mathematica:

```
U[Ic_, R_] := Um*sqrt[1 - a[Ic]] + R*Ic
Plot[{U[Ic, 0], U[Ic, 200], U[Ic, 500]}, {Ic, 0, 2*10^-2},
PlotRange -> {0, 50}, AxesLabel -> {"I, A", "U, B"}, PlotStyle ->
{Hue[.7], Hue[.75], Hue[1]}, LegendPosition -> {- .3, 0}, PlotLegend ->
{"Rd=0", "Rd=200 Ohm", "Rd=500 Ohm"}]
```

В данном случае при тока I_c порядка единиц мА α (или a) меняется от 0 до $a_0=0,98$ (задавалось ранее). Подобная зависимость достаточно характерна для многих маломощных биполярных транзисторов. С учетом изменения $a(I_c)$ и падения напряжения последовательном сопротивлении в цепи коллектора R получаемая ВАХ оказывается S-образной и имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления. Другими словами транзистор становится *негатроном*.

Экспериментальное исследование серийных транзисторов показало, что в схеме с оборванной базой участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением выражен довольно слабо — см. рис. 1.13. Особенно это характерно для германиевых транзисторов. Причина такого поведения транзисторов связано со слабым изменением коэффициента передачи тока эмиттера.

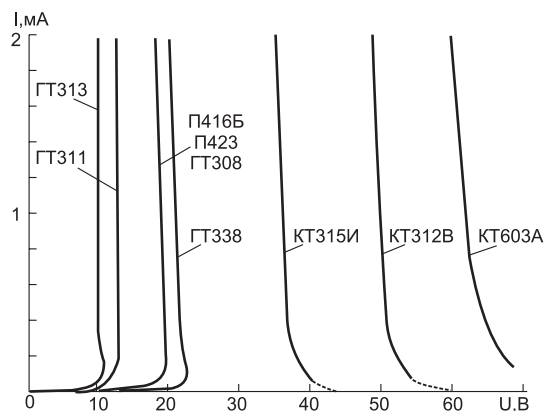


Рис. 1.13. ВАХ ряда транзисторов при обрыве базы

1.2.4. S-образная ВАХ лавинного транзистора с резистором в цепи базы

На практике существует довольно простой способ получения ярко выраженного падающего участка (S-типа), путем включения между эмиттером и базой резистора R_6 (рис. 1.14). При малых токах эмиттера сопротивление эмиттерного перехода транзистора велико и эмиттерный переход сильно шунтируется резистором R_6 . В этом случае вольтамперная характеристика близка к показанной на рис. 1.10 — правая кривая (напомним, что это ВАХ коллекторного перехода с участком пробоя). А при больших токах эмиттера сопротивление эмиттерного перехода мала и базу в первом приближении можно считать отключенной. При этом ВАХ приближается к показанной на рис. 1.10 левой кривой (это ВАХ при обрыве базы с участком пробоя). В результате как бы перехода от одной схемы включения транзистора к другой и формируется падающий участок ВАХ.

Форму S-образной ВАХ в схеме рис. 1.14 можно дополнительно менять, включив параллельно R_6 источник тока базы. Можно менять форму ВАХ и другими способами. Более детальный анализ этих случаев выполнен ниже. Будут рассмотрены также S-образные ВАХ со стороны эмиттера и N-образные со стороны базы.

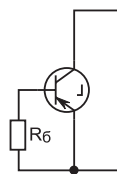


Рис. 1.14. Двухполюсник на лавинном транзисторе с базой, подключенной к эмиттеру через резистор R_6

1.3. Анализ и синтез управляемых ВАХ лавинного транзистора

1.3.1. Анализ S-образных ВАХ со стороны коллектора

Большинство устройств на лавинных транзисторах основано на использовании их S-образных ВАХ со стороны коллектора, детальный анализ которых выполнен в [8, 71]. Обобщенная схема включения лавинного транзистора для получения таких ВАХ представлена на рис. 1.15,а. Для получения максимальных возможностей

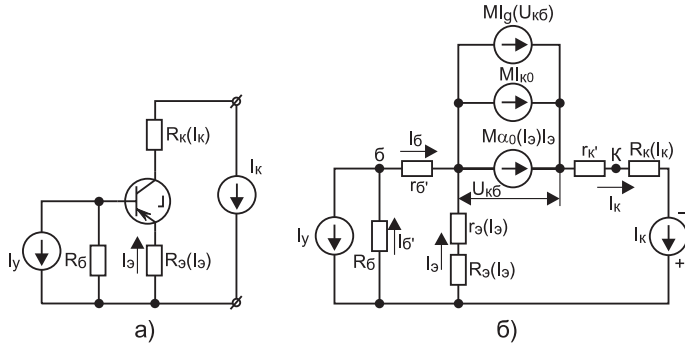


Рис. 1.15. Обобщенная (а) и эквивалентная (б) схемы включения лавинного транзистора со стороны коллектора

получения (синтеза) ВАХ нужной формы схема рис. 1.15,а, по сравнению с упрощенной схемой рис. 1.14, дополнена источником управляющего тока I_y и цепи базы и нелинейными резисторами $R_E(I_E)$ и $R_K(I_K)$.

На эквивалентной схеме рис 1.15,б транзистор представлен Т-образной схемой замещения на постоянном токе, содержащей нелинейное сопротивление $r_E(I_E)$ эмиттерного перехода, линейное сопротивление базы r_B , последовательное сопротивление коллектора r_K и источники тока, представляющие три основные составляющие коллекторного тока: генерационную I_g , обратного тока I_{K0} и составляющей эмиттерного тока $\alpha(I_E) I_E$. Для всех этих составляющих учтено (умножением на M) лавинное умножение их носителей в коллекторном переходе.

Для эквивалентной схемы рис. 1.15,б можно записать следующую систему исходных уравнений:

$$I_K = I_g + I_{K0}, \quad (1.20)$$

$$I_K = M[\alpha_0(I_E) I_E + I_{K0} + I_g(U_{KB})], \quad (1.21)$$

$$I_E = I_y - I_{K0}, \quad (1.22)$$

$$r_E I_E + R_E I_E = r_E(I_E) I_E + R_E(I_E) I_E. \quad (1.23)$$

Из этих уравнений можно найти ток базы:

$$I_E = \frac{\Phi_T}{R_E + r_E} \ln\left(\frac{I_E}{I_{E0}} + 1\right) + I_y \frac{R_E(I_E)}{R_E + r_E} - I_y \frac{R_E}{R_E + r_E}. \quad (1.24)$$

Затем из (1.24), (1.20) и (1.21) нетрудно найти значение

$$M = \frac{\frac{\Phi_T}{R_E + r_E} \ln\left(\frac{I_E}{I_{E0}} + 1\right) + I_y \frac{R_E(I_E)}{R_E + r_E} - I_y \frac{R_E}{R_E + r_E} + I_g}{\alpha_0(I_E) I_E + I_{K0} + I_g(U_{KB})}. \quad (1.25)$$

Выразив из формулы Миллера напряжение через M , и используя (1.25) получаем:

$$U_{KB} = U_M \sqrt[n]{1 - \frac{\alpha_0(I_E) I_E + I_{K0} + I_g(U_{KB})}{\frac{\Phi_T}{R_E + r_E} \ln\left(\frac{I_E}{I_{E0}} + 1\right) + I_y \frac{R_E(I_E)}{R_E + r_E} - I_y \frac{R_E}{R_E + r_E} + I_g}}. \quad (1.26)$$

Напряжение на выходных зажимах схемы рис. 1.15,а равно:

$$U = U_{\kappa\delta} + I_{\beta}r_{\beta}(I_{\beta}) + I_{\beta}R_{\beta}(I_{\beta}) + I_{\kappa}R_{\kappa}(I_{\kappa}) + I_{\kappa}r_{\kappa}'. \quad (1.27)$$

Используя выражения (1.20)—(1.27) можно получить уравнения ВАХ, заданные в виде параметрических зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} I_{\kappa} &= \varphi(I_{\beta}) \\ U &= \psi(I_{\beta}, I_{\kappa}, U_{\kappa\delta}) \end{aligned} \right\}$$

Или в полном виде:

$$I_{\kappa} = \frac{\Phi_T}{R_{\delta} + r_{\delta}} \ln \left(\frac{I_{\beta}}{I_{\beta 0}} + 1 \right) + I_{\beta} \left[\frac{R_{\beta}(I_{\beta})}{R_{\delta} + r_{\delta}} + 1 \right] - I_{\beta} \frac{R_{\delta}}{R_{\delta} + r_{\delta}}, \quad (1.28)$$

$$U = U_M \sqrt[n]{1 - \frac{\alpha_0(I_{\beta})I_{\beta} + I_{\kappa 0} + I_g(U_{\kappa\delta})}{I_{\kappa}}} + \frac{\Phi_T}{R_{\delta} + r_{\delta}} \ln \left(\frac{I_{\beta}}{I_{\beta 0}} + 1 \right) + I_{\beta}R_{\beta}(I_{\beta}) + I_{\kappa}R_{\kappa}(I_{\kappa}) + I_{\kappa}r_{\kappa}'. \quad (1.29)$$

Уравнения (1.28) и (1.29) являются обобщенными уравнениями для ВАХ лавинного транзистора со стороны эмиттера, заданными параметрически. По ним при известных зависимостях $\alpha_0(I_{\beta})$, $R_{\beta}(I_{\beta})$, $R_{\kappa}(I_{\kappa})$ и $I_g(U_{\kappa\delta})$ можно рассчитать ВАХ любой частной схемы, вытекающей из обобщенной схемы рис. 1.15. Определенные трудности вызывает учет зависимости, делающей уравнений (1.28) и (1.29) неявными. В этом случае они могут быть решены методами последовательных приближений. Однако, на практике эта зависимость играет далеко не главную роль и соответствующий ей член может быть отброшен. В этом случае вычисление зависимости $U(I_{\kappa})$ не вызывает трудностей — см. рис. 1.16.

Этот расчет заметно упрощается при использовании СКМ Mathematica 5. Для этого зададим функции:

```
Ic[Ie_, Ir_] := (Phi/Rb) * Log[ (Ie/Ie0+1) ] + Ie - Ir
U[Ie_, Ir_] := Um * (1 - (a0*Ie + Ic0) / Ic[Ie, Ir]) ^ (1/n)
```

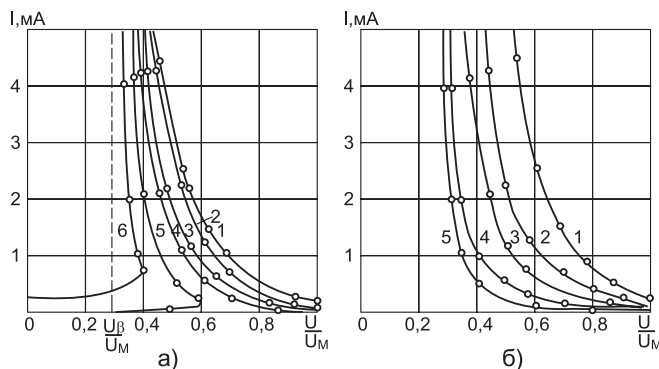


Рис. 1.16. Расчетные семейства ВАХ лавинного транзистора со стороны коллектора при: а — $(R_{\delta} + r_{\delta}) = 1$ кОм и $I_{\beta} = -200, 0, 50, 100, 150$ и 200 мкА (кривые 1-6) и б: $I_{\beta} = 0$ и $R_{\delta} + r_{\delta} = 0,5, 1, 2, 5$ и 10 кОм (кривые 1-5). Значения $n=3$, $I_{\kappa 0}/I_{\beta 0}$, $\alpha_0(I_{\beta}) = 0,98 = \text{const}$.

Содержание

Введение	3
Глава 1. Статические характеристики	10
1.1. Физика лавинного пробоя p - n перехода	10
1.1.1. Вольтамперная характеристика идеального p - n перехода	10
1.1.2. Физика лавинного пробоя p - n перехода	11
1.1.3. Коэффициенты ионизации и напряжение лавинного пробоя	12
1.1.4. Формула Миллера для коэффициентов умножения	14
1.1.5. ВАХ p - n перехода с учетом лавинного умножения носителей	15
1.1.6. Другие виды пробоя p - n переходов	17
1.1.7. Выводы о свойствах лавинного пробоя p - n перехода	18
1.2. Лавинный пробой в основных схемах включения биполярного транзистора	19
1.2.1. Пробой транзистора при обрыве эмиттера и подключении его к базе	19
1.2.2. Пробой транзистора при обрыве базы	20
1.2.3. Феномен падающего участка ВАХ при обрыве базы	21
1.2.4. S-образная ВАХ лавинного транзистора с резистором в цепи базы	23
1.3. Анализ и синтез управляемых ВАХ лавинного транзистора	23
1.3.1. Анализ S-образных ВАХ со стороны коллектора	23
1.3.2. Синтез S-образных ВАХ со стороны коллектора	26
1.3.3. Анализ зависимости дифференциального отрицательного сопротивления от тока	29
1.3.4. Анализ пусковой характеристики	30
1.3.5. Анализ и синтез S-образных ВАХ со стороны эмиттера	32
1.3.6. Анализ и синтез N-образных ВАХ со стороны базы	35
1.3.7. Особенности ВАХ в лавинном режиме кремниевых транзисторов	38
1.3.8. Итоговые выводы по анализу ВАХ лавинного транзистора	39
1.4. Особые виды включения и пробой биполярных транзисторов	39
1.4.1. Включение с источником тока в цепи базы	39
1.4.2. Сквозной пробой транзисторов и его влияние на ВАХ со стороны коллектора	41
1.4.3. Вторичный пробой инжекционного характера	43
1.4.4. Пробой кремниевых транзисторов при двойной лавинной инжекции	45
1.4.5. Работа в лавинном режиме интегральных кремниевых транзисторов	46
1.4.6. Лавинный пробой инверсно включенных кремниевых транзисторов	47
1.5. Оптическое управление лавинными транзисторами	49
1.5.1. Перспективы создания оптически управляемых лавинных полупроводниковых приборов	49
1.5.2. Фотоионизация в p - n переходе	50
1.5.3. Оптически управляемые лавинные транзисторы	52
1.5.4. Оптическое управление лавинными транзисторами от внешних фотоприемников	54
Глава 2. Динамические процессы	57
2.1. Малосигнальные эквивалентные схемы	57
2.1.1. Специфика малосигнального анализа лавинных транзисторов	57
2.1.2. Эквивалентная схема при включении со стороны коллектора	57
2.1.3. Эквивалентная схема при включении со стороны эмиттера	61

2.1.4. Эквивалентная схема при включении со стороны базы.....	63
2.2. Устойчивость и режимы работы схем на лавинных транзисторах	63
2.2.1. О значении анализа устойчивости.....	63
2.2.2. Устойчивость схемы с включением лавинного транзистора со стороны коллектора	64
2.2.3. Диаграммы устойчивости и режимов работы.....	66
2.2.4. Особенности выбора положения линии нагрузки	67
2.2.5. Анализ устойчивости других основных схем	68
2.3. Анализ релаксатора на лавинно-инжекционном транзисторе	69
2.3.1. Обзор ранних работ.....	69
2.3.2. Общий обзор переходных процессов	71
2.3.3. Анализ стадии задержки запуска	72
2.3.4. Уточненный анализ разряда конденсатора	74
2.3.5. Метод динамического пробоя.....	77
2.3.6. Вход в насыщение и выход из него.....	81
2.3.7. Стадия восстановления.....	82
2.3.8. Об оптическом запуске релаксаторов на лавинном транзисторе	82
2.4. Динамика лавинных транзисторов с ограниченной ООЗ	83
2.4.1. Феномен сверхбыстрого переключения ЛТОООЗ	83
2.4.2. Работа ЛТОООЗ в релаксационных схемах	86
2.4.3. Физические основы работы ЛТООЗ в области больших токов	88
2.4.4. Особенности эпитаксиальных ЛТОООЗ	93
2.5. Компьютерное моделирование релаксаторов	95
2.5.1. Моделирование на аналоговой ЭВМ	95
2.5.2. Моделирование методом динамического пробоя в системе Mathematica	98
2.5.3. Моделирование емкостного релаксатора на цифровой ЭВМ	100
2.5.4. Моделирование индуктивного релаксатора на цифровой ЭВМ.....	105
2.5.5. Моделирование емкостного релаксатора с конденсатором в цепи эмиттера на цифровой ЭВМ.....	109
2.6. Универсальная математическая модель биполярного транзистора	113
2.6.1. Описание модели.....	113
2.6.2. Математическая модель транзистора.....	114
2.6.3. Моделирование ключа в обычном режиме работы транзистора.	116
2.6.4. Моделирование релаксатора на ЛИТ	118
2.6.5. Моделирование релаксатора на ЛТОООЗ.....	119
Глава 3. Конструкция, параметры, измерения и предельные возможности	121
3.1. Конструкция лавинных транзисторов	121
3.1.1. Корпуса лавинных транзисторов	121
3.1.2. Классификация лавинных транзисторов.....	122
3.1.3. Структура и технология изготовления лавинных транзисторов	124
3.1.4. Структура отечественных лавинных транзисторов ГТ338	126
3.1.5. Структура кремниевых лавинных транзисторов.....	128
3.2. Параметры лавинных транзисторов и их измерение	129
3.2.1. Измерение статических параметров	129
3.2.2. Измерение импульсных параметров лавинных транзисторов.....	131
3.2.3. Измерение эффективного времени пролета	136
3.2.4. Измерение параметров оптически управляемых лавинных транзисторов.....	137
3.2.5. Измерение параметров в субнаносекундной области времен.....	138

3.2.6. Совместное применение цифрового и стробоскопического осциллографов	141
3.3. Параметры лавинного режима транзисторов	141
3.3.1. Параметры транзисторов класса ЛИТ	141
3.3.2. Параметры маломощных транзисторов, которые можно отнести к классу ЛТОООЗ	144
3.3.3. Параметры режима ЛТОООЗ для транзисторов средней и большой мощности	146
3.3.4. Параметры специальных лавинных транзисторов	150
3.3.5. Сводная таблица параметров отечественных транзисторов в лавинном режиме	151
3.4. Серийные ЛТОООЗ фирмы Zetex Semiconductors	152
3.4.1. Конструкция и параметры ЛТОООЗ FMMT413, FMMT415, ZTX415 и FMMT417	152
3.4.2. Параметры в обычном режиме работы	153
3.4.3. Характеристики ЛТОООЗ FMMT413, FMMT415, ZTX415 и FMMT417	153
3.5. Надежность и предельные возможности транзисторов в лавинном режиме	156
3.5.1. Предпосылки к надежной работе транзисторов в лавинном режиме	156
3.5.2. Неоднородность лавинного пробоя	156
3.5.3. Разброс напряжений лавинного пробоя	159
3.5.4. Данные о надежности работы транзисторов в лавинном режиме	160
3.5.5. Температурная стабильность параметров лавинных транзисторов	161
3.6. Предельные возможности лавинных транзисторов	166
3.6.1. Предельная крутизна изменения напряжения и тока	166
3.6.2. Роль локальных явлений и их устранение	169
3.6.3. Импульсный перегрев ООЗ и предельная импульсная мощность	171
3.6.4. Работа лавинных транзисторов при криогенных температурах	172
3.7. Параметры тиристоров в лавинном режиме работы	174
3.7.1. Измерение параметров тиристоров в лавинном режиме	174
3.7.2. Результаты измерений параметров тиристоров в лавинном режиме	175
Глава 4. Принципы построения и расчета основных схем	177
4.1 Двухстабильные схемы на лавинных транзисторах	177
4.1.1. Основная двухстабильная цепь на лавинном транзисторе	177
4.1.2. Эквивалентная схема двухстабильной цепи	177
4.1.3. Расчет статики двухстабильных цепей на лавинном транзисторе	178
4.1.4. Оценка динамики двухстабильной цепи	180
4.1.5. Улучшение устойчивости и зоны работоспособности двухстабильной цепи	181
4.1.6. Примеры построения триггеров с отдельным и счетным запуском	182
4.1.7. Триггер со счетным запуском на двух транзисторах	183
4.1.8. Кольцевой счетчик на лавинных транзисторах	184
4.1.9. Микро мощный триггер на интегральном ЛИТ	185
4.1.10. Оценка перспектив двухстабильных схем на ЛИТ	187
4.2. Релаксационные генераторы	188
4.2.1. Основные варианты схемы емкостного релаксатора	188
4.2.2. Условия работоспособности релаксаторов	188
4.2.3. Энергетические соотношения для основной схемы релаксатора	189
4.2.4. Особенности построения ждущих релаксаторов	192
4.2.5. Коррекция нарастания импульсов	193

4.2.6. Низковольтные и микромощные релаксаторы на лавинных транзисторах.....	194
4.2.7. Синхронизация релаксаторов и деление частоты	195
4.2.8. Релаксаторы с времязадающей цепью в цепи эмиттера	195
4.3. Мультивибраторы на лавинных транзисторах.....	197
4.3.1. Мультивибратор на одном лавинном транзисторе.....	197
4.3.2. Мультивибратор на лавинном и обычном транзисторах.....	200
4.3.3. Автоколебательный мультивибратор на двух лавинных транзисторах	201
4.3.4. Ждущий мультивибратор на двух лавинных транзисторах.....	203
4.3.5. Мультивибратор на одном лавинном транзисторе с опрокидывающим конденсатором	204
4.3.6. Многофункциональный мультивибратор на одном ЛИТ.....	205
4.3.7. Мультивибраторы на лавинном и обычном транзисторах	206
4.4. Генераторы прямоугольных импульсов с накопительной линией.....	210
4.4.1. Основные схемы	210
4.4.2. Принцип действия и расчет	210
4.4.3. Коррекция фронтов импульсов.....	212
4.4.4. Генератор с разрядной линией на кремниевом ЛТОООЗ	213
4.4.5. Генератор с линией, согласованной в конце	214
4.4.6. Генератор с двухсторонним включением линии	216
4.4.7. Генератор с двумя линиями и двойной амплитудой импульсов.....	216
4.5. Низкочастотные релаксаторы	217
4.5.1. Принципы построения релаксаторов с емкостной обратной связью.....	217
4.5.2. Примеры построения релаксаторов с емкостной обратной связью	219
4.5.3. Релаксатор с термическим времязадающим элементом	220
4.6. Генераторы пилообразных напряжений	221
4.6.1. Принципы построения	221
4.6.2. Простые генераторы с зарядом конденсатора через резистор	222
4.6.3. Простой ждущий генератор пилообразного напряжения.....	223
4.6.4. Генератор с триггером на туннельном диоде.....	224
4.6.5. Генератор развертки осциллографа	224
4.6.6. Генератор с токостабилизирующим транзистором	225
4.6.7. Генератор с емкостной обратной связью	225
4.6.8. Генератор треугольных импульсов.....	226
4.7. Устройства временной задержки.....	226
4.7.1. Схема задержки управляемой напряжением.....	226
4.7.2. Схема задержки с линейным законом управления	227
4.7.3. Схема генератора задержанных наносекундных импульсов.....	228
4.8. Генераторы ступенчатого напряжения	229
4.8.1. Принципы построения	229
4.8.2. Основы расчета.....	230
4.8.3. Простые схемы	232
4.8.4. Стабилизация длительности и амплитуды ступенек	233
4.8.5. Генераторы с управлением положением ступенек	234
4.9. Высокостабильные емкостные релаксаторы.....	235
4.9.1. Методы стабилизации емкостных релаксаторов	235
4.9.2. Релаксаторы с синхронизацией и автосинхронизацией	237
4.9.3. Релаксаторы с задержанной обратной связью (рециркуляторы)	238
4.9.4. Релаксаторы со стабилизацией разности пороговых напряжений	239

4.9.5. Принцип стабилизации путем поддержания разности пороговых напряжений пропорциональной зарядному току	241
4.10. Устройства использующие отрицательное сопротивление	244
4.10.1. Генераторы синусоидальных колебаний	244
4.10.2. Управляемый делитель переменного напряжения	245
4.10.3. Переключатель переменного напряжения	246
4.11. Импульсные устройства на интегральных лавинных транзисторах	247
4.11.1. О применении интегральных транзисторов в лавинном режиме	247
4.11.2. Характеристики интегральных транзисторов в лавинном режиме	248
4.11.3. Релаксаторы на интегральных лавинных транзисторах	249
4.11.4. Мультивибраторы на интегральных лавинных транзисторах	250
4.11.5. Генераторы пилообразного напряжения на интегральных лавинных транзисторах	250
4.11.6. Генераторы ступенчатого напряжения на интегральных лавинных транзисторах	252
Глава 5. Высоковольтные и сильноточные нано- и субнаносекундные импульсные устройства	254
5.1. Генераторы наносекундных импульсов на одном лавинном транзисторе	254
5.1.1. Специфика работы на низкоомную нагрузку	254
5.1.2. Улучшение формы импульсов	256
5.1.3. Трансформаторы на отрезках линий передачи	257
5.1.4. Автотрансформаторное и трансформаторное включение нагрузки	258
5.1.5. Генераторы наносекундных импульсов на кремниевых ЛТОООЗ	259
5.2. Генераторы сверхкоротких импульсов	261
5.2.1. Генератор с нелинейной укорачивающей RC-цепью	261
5.2.2. Генератор импульсов с $t_f \approx 0,1$ нс для испытания широкополосных устройств	262
5.2.3. Генератор импульсов с питанием от LC контура с ударным возбуждением	263
5.3. Генераторы серий наносекундных импульсов	265
5.3.1. Генератор серии импульсов с запуском на коллектор	265
5.3.2. Генератор серии импульсов с запуском на базу	266
5.3.3. Генератор серии импульсов с эмиттерной времязадающей цепью	266
5.3.4. Генераторы серии синусоидальных колебаний	267
5.3.5. Генератор серии импульсов с пониженным вдвое напряжением питания	268
5.4. Генераторы и формователи прямоугольных импульсов	269
5.4.1. Генераторы с накопительной линией	269
5.4.2. Диоды с накоплением заряда (ДНЗ)	271
5.4.3. Генератор с формователем прямоугольных импульсов на ДНЗ	272
5.4.4. Основная схема генератора на лавинном транзисторе и ДНЗ	274
5.4.5. Другие схемы генераторов на лавинном транзисторе и ДНЗ	274
5.4.6. Генераторы с отдельным формированием фронта и среза импульсов	276
5.4.7. Формователи высоковольтных импульсов на емкостной нагрузке	277
5.4.8. Формователь импульсов подсветки для многоканального осциллографа	279
5.4.9. Формователь прямоугольных импульсов с коммутируемым источником тока	280
5.5. Генераторы мощных наносекундных импульсов	280
5.5.1. Генераторы с последовательным включением лавинных транзисторов	280
5.5.2. Генераторы импульсов по схеме Аркадьева-Маркса	282

5.5.3. Генераторы с параллельным включением лавинных транзисторов.....	283
5.5.4. Генераторы и модули с комбинированным включением лавинных транзисторов	286
5.6. Генераторы мощных наносекундных импульсов на лавинных тиристорах.....	287
5.6.1. Генератор с емкостным накопителем.....	287
5.6.2. Генератор прямоугольных импульсов с накопительной кабельной линией.....	288
5.6.3. Генератор прямоугольных импульсов с формирующим двухполюсником	289
5.7. Схемы с запуском ключевых приборов от лавинных транзисторов.....	291
5.7.1. Формирователи коротких импульсов на лавинных и мощных СВЧ биполярных транзисторах.....	291
5.7.2. Формирователи прямоугольных импульсов на лавинных и мощных СВЧ биполярных транзисторах.....	293
5.7.3. Формирователи импульсов на двухполюсниках с лавинным и мощным СВЧ МДП транзисторами.....	294
5.7.4 Формирователи импульсов с запуском мощного СВЧ МДП-транзистора от лавинного.....	296
5.7.5 Формирователи импульсов с запуском мощного СВЧ GaAs полевого транзистора от лавинного.....	298
5.8. Лавинные транзисторы в лазерной технике	301
5.8.1. Перспективы лавинных транзисторов в лазерной технике	301
5.8.2. Простейшие генераторы мощных импульсов для запуска лазерных светодиодов.....	302
5.8.3. Генератор 1,5-нс импульсов с током 25 А	303
5.8.4. Генераторы мощных импульсов на многих лавинных транзисторах	305
5.8.5. Конструктивное выполнение генераторов для запуска лазерных диодов.....	306
5.8.6. Лавинные транзисторы в устройствах контроля динамики лазерного излучения	308
5.8.7. Импульсные генераторы и оптические модули фирмы DEI.....	311
5.8.8. Высоковольтные модули HVS фирмы ALPHALAS.....	313
5.8.9. Модули питания маломощных гетеролазерных диодов.....	313
5.9. Управление другими электронными приборами	315
5.9.1. О применении лавинных транзисторов для управления электронными приборами.....	315
5.9.2. Запуск электронных и электронно-полупроводниковых ламп	315
5.9.3. Схема стробирования фотоэлектронного умножителя	316
Глава 6. Измерительная техника и электроника	318
6.1. Лавинные транзисторы в измерениях и электронике	318
6.2. Дискриминаторы и сравнивающие устройства	319
6.2.1. Быстродействующие пороговые устройства и дискриминаторы	320
6.2.2. Дискриминаторы с уменьшенным временем восстановления.....	322
6.2.3. Балансный дискриминатор.....	322
6.2.4. Построение измерителя амплитуды импульсов.....	323
6.2.5. Диодно-регенеративное сравнивающее устройство на лавинном транзисторе	324
6.2.6. Управляемый релаксатор на основе диодно-регенеративного сравнивающего устройства	326
6.3. Быстродействующая импульсная логика	327
6.3.1. Назначение импульсной логики	327
6.3.2. Импульсный полуинвертор	328

6.3.3. Оценка динамики импульсных логических схем	328
6.3.4. Импульсная логическая схема ИЛИ-НЕ.....	329
6.3.5. Импульсная логическая схема И-НЕ	330
6.3.6. Импульсная логическая схема антисовпадений	330
6.4. Измерительные преобразователи	331
6.4.1. Высокоскоростной 0,75 ГГц — преобразователь параллельного кода в последовательный.....	331
6.4.2. Преобразователь амплитуды импульсов в число импульсов.....	332
6.4.3. ВЧ-преобразователи напряжения в частоту.....	335
6.4.4. Широкодиапазонные преобразователи напряжения в частоту.....	337
6.4.5. Демонстрационная схема АЦП на лавинных транзисторах.....	338
6.4.6. Квантователи по уровню меняющихся напряжений	340
6.5. Лавинные транзисторы в рефлектометрах, уровнемерах и толщиномерах	342
6.5.1. Импульсные рефлектометры	342
6.5.2. Радиоимпульсный рефлектометр с диодом Ганна	343
6.5.3. Сверхскоростная развертка на лавинных транзисторах.....	343
6.4.4. Радарные и резонансные уровнемеры	344
6.4.5. Скоростные устройства стробирования	347
6.4.6. Лавинные транзисторы в ультразвуковых эхо-импульсных толщиномерах	348
6.6. Устройства управления лазерным излучением.....	350
6.6.1. Лавинные транзисторы в схемах управления ячейками Поккельса	350
6.6.2. Схемы управления ячейками Поккельса на лавинных транзисторах в комбинации с другими приборами.....	352
6.6.3. О других средствах формирования высоковольтных импульсов с субнаносекундными фронтами	353
6.6.4. Управление 0,25 ГГц импульсным лазерным излучением	354
6.7. Генераторы спектра и умножители частоты.....	356
6.7.1. Генератор спектра	356
6.7.2. Генератор амплитудно-модулированного спектра	357
6.7.3. Умножитель частоты с высокой кратностью	358
6.8. Схемы управления тиристорами и термостатирования	359
6.8.1. Простейшие схемы запуска тириستоров.....	359
6.8.2. Формирователи импульсов запуска тиристоров оптимальной формы.....	360
6.8.3. Схемы фазового управления тиристорами.....	361
6.8.4. Применение лавинных транзисторов в тиристорном регуляторе температуры	364
Заключение и выводы.....	366
Литература.....	368