

УДК 621.382.3

ФИЗИКА

Г. С. Караян, А. А. Джереджян

Лавинное умножение в многослойных структурах

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Г. М. Авакьянцем 16/VII 1973)

Как известно (¹⁻³) вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п-р-п-структуры при $\beta_2 + \beta_3 > 1$ на прямой ветви имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОС) как при наличии, так и в отсутствии лавинного умножения (ЛУ) в коллекторном р-п-переходе. Причем, ЛУ особенно сильно влияет на параметры срыва, а именно, если при ОС, обусловленном тепловой генерацией в области объемного заряда коллектора, ток срыва пропорционален квадрату коэффициента рекомбинации, то при ЛУ ток срыва является линейной функцией этого же коэффициента.

В (⁴) показано, что прямая ветвь ВАХ четырехслойной структуры может иметь ОС и при $\beta_2 + \beta_3 < 1$ (обозначения смотрите в (^{5,6}), но в этом случае ЛУ становится необходимым. Найдено также (⁴), что обратная ветвь этой структуры может иметь один или два участка с ОС, необходимым условием существования которых является наличие в коллекторных переходах ЛУ.

В (^{7,8}) показано, что ВАХ четвертого р-п-перехода пятислойной структуры имеет падающий участок за счет ЛУ в нем.

Поэтому возникает вопрос о влиянии ЛУ в коллекторах на ВАХ последних, если они входят в состав многослойной (МС) структуры.

С этой целью рассмотрим дифференциальное сопротивление k -го перехода, если в $(k-2)$ -ом и $(k+2)$ -ом коллекторах невозможна инверсия. Последнее требование, как известно (³), приводит к приближенным равенствам:

$$\bar{a}_{k-1}^{k-1} \approx a_{k-1}^{k-1}, \quad \bar{a}_{k+1}^{k+1} \approx a_{k+1}^{k+1}, \quad \bar{d}_{k-1} \approx \bar{d}_{k+1} \approx 1. \tag{1}$$

Из (17) (⁵) имеем:

$$R_k = (\tilde{d}_k + \bar{d}_k - d_k) / (\tilde{a}_k^k + \bar{a}_k^k - a_k^k). \tag{2}$$

В силу теоремы 1 (³) знаменатель в (2) положителен, поэтому знак R_k совпадает со знаком числителя.

Преобразуя (2) с учетом (1), получаем

$$R_k = \frac{1}{a_k} \left(d_k - \frac{a_k^{k-1}}{a_{k-1}^{k-1}} - \frac{a_k^{k+1}}{a_{k+1}^{k+1}} \right). \quad (3)$$

(3) совпадает с выражением для дифференциального сопротивления коллектора одноколлекторной четырехслойной структуры и в рассмотренном приближении эту формулу можно было бы получить и по теории многотранзисторной аналогии (МТА) (если коэффициенты усиления составных транзисторов известны и их можно считать по теории МТА).

Исключение инверсии в $(k-2)$ -ом и $(k+2)$ -ом переходах дало возможность рассматривать влияние только ЛУ, что и видно из формулы (3). В (5.9,10) показано, что даже при отсутствии ЛУ в k -ом переходе на его ВАХ может возникнуть участок ОС, если ограничения на $(k-2)$ -ом и $(k+2)$ -ом переходах не учитывать. Чтобы исключить другой механизм ОС, примем еще

$$\beta_k + \beta_{k+1} < 1. \quad (4)$$

В силу (4) $R_k > 0$ при $m_k = 0$. Поэтому для того, чтобы R_k стало отрицательным, необходимо наличие в переходе ЛУ (аналог теоремы (3)). Если хотя бы один из δ_{k-1} или δ_{k+1} больше двух, то наличие ЛУ в коллекторе является и достаточным условием для образования ОС на своей ВАХ.

Механизм образования ОС аналогичен рассмотренному в (4).

Теперь интерпретируем процесс с точки зрения МТА. Из (4) вытекает, что при $m_k = 0$

$$\left(1 + j \frac{\partial}{\partial j} \right) (\alpha_k + \alpha_{k+1}) < 1, \quad (5)$$

тогда, как срыв возникает при равенстве. Если $m_k > 0$ то условие срыва имеет вид

$$\left(1 + j \frac{\partial}{\partial j} \right) (\alpha_k + \alpha_{k+1}) = 1 - m_k. \quad (6)$$

Очевидно, что коэффициенты усиления составных транзисторов α_k и α_{k+1} могут удовлетворять (6) и тогда, когда в (5) имеет место строгое неравенство.

Если в (3) положить $R_k = 0$, то условие срыва k -го перехода даст уравнение относительно напряжений V_{k-1} , V_k , V_{k+1} .

Чтобы получить уравнение относительно плотности тока, необходимо из системы уравнений (4), (5) и (3) исключить эти напряжения. В нашем приближении это легко получить

$$\begin{aligned} V_{k-1} &= 2 \ln (i_{k-1} - \delta_{k-1}/2), \\ V_{k+1} &= 2 \ln (i_{k+1} - \delta_{k+1}/2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$m_k = 1 - \beta_k - \beta_{k+1} + \frac{1}{j} \left[\beta_k i_{k-1} \delta_{k-1} (i_{k-1} - \delta_{k-1}/2) + \beta_{k+1} i_{k+1} \delta_{k+1} \left(i_{k+1} - \frac{\delta_{k+1}}{2} \right) - \Theta_k^* \right],$$

где

$$\lambda_k = \left(1 + \frac{j}{l} \frac{\delta^2}{4} - \beta_{k-1} - \beta_{k+1} \right)^{1/2}, \quad \Theta_k^* = \Theta_k - \beta_k^2 i_{k-1} - \beta_{k+1}^2 i_{k+1} (\beta_{k+1} + \beta_{k+2})$$

Заметим, что формулы (7), которые верны независимо от знака $(\beta_k + \beta_{k+1} - 1)$, описывают ВАХ $(k-1)$ -го, k -го и $(k+1)$ -го переходов. Подставляя первые два уравнения из (7) в (3), получаем следующее соотношение для срыва k -го перехода

$$1 - \beta_k - \beta_{k+1} - m_k = -\frac{\delta_{k-1} \beta_k}{2i_{k-1}} - \frac{\delta_{k+1} \beta_{k+1}}{2i_{k+1}}. \quad (8)$$

Очевидно, что для выполнения (8) необходимо, чтобы левая часть равенства была меньше нуля, так как правая часть всегда отрицательная. Поэтому, или $\beta_k + \beta_{k+1} > 1$, или наличие ЛУ в коллекторе обязательно. Решение (8) напишем для двух частных случаев:

$$1. \quad \delta_{k-1} = \delta_{k+1} = \delta, \quad i_{k-1} = i_{k+1} = i,$$

$$J_{\text{ср}} = \frac{i\delta^2}{4} \left[\left(\frac{\beta_k + \beta_{k+1}}{1 - \beta_k - \beta_{k+1} - m_k} \right)^2 - 1 \right], \quad (9)$$

2. $\delta_{k+1} \ll \delta_{k-1} = \delta$ (или наоборот).

$$J_{\text{ср}} = \frac{i\delta^2}{4} \left[\frac{\beta_k^2}{4(1 - \beta_k - \beta_{k+1} - m_k)^2} - 1 \right]. \quad (10)$$

Из (3) видно, что $\frac{\partial}{\partial J} R_k(J - J_{\text{ср}}) < 0$, поэтому $J = J_{\text{ср}}$ есть точка максимума.

Если $\beta_k + \beta_{k+1} > 1$, то (9) и (10) имеют смысл и при $m_k = 0$, причем m_k уменьшает ток срыва. Но (9) и (10) при $\beta_k + \beta_{k+1} < 1$ верны только при $m_k \geq 1 - \beta_k - \beta_{k+1} > 0$.

Формула (9) совпадает с соответствующей формулой в (2). (9) и (10) являются уравнениями относительно $J_{\text{ср}}$, если $m_k \neq 0$.

Чтобы найти $J_{\text{ср}}$ как функцию только начальных данных структуры, необходимо пользоваться третьим уравнением (7).

Из (9) имеем

$$J_{\text{ср}} = 2lp_{k1}(p_{k1} + q_{k1}), \quad (11)$$

где

$$p_{k1} = |\Theta_k^* / i (\beta_k + \beta_{k+1})|^{1/2}.$$

Аналогично, из (10) получаем

$$J_{\text{ср}} = 2i_{k-1} p_{k2} (p_{k2} + q_{k2}), \quad (12)$$

где

$$p_{k2} = \Theta_k^* / \beta_k i_{k-1}, \quad q_{k2} = \frac{\delta}{2} + \Theta_k^* / \delta \beta_k i_{k-1}.$$

Из (9) и (10) видно, что при $m_k = 0$ и $\beta_k + \beta_{k+1} > 1$, $J_{\text{ср}}$ пропорциональна квадрату коэффициента рекомбинации. Если $m_k \neq 0$, то независимо от знака $(\beta_k + \beta_{k+1} - 1)$, плотность тока срыва является линейной функцией от коэффициента рекомбинации.

Из (8) видно, что $R_k < 0$ при всех $J > J_{\text{ср}}$, если $\beta_k + \beta_{k+1} < 1$, и имеет место $\lim_{J \rightarrow \infty} R_k = 0$, а функция $V_k(J)$ обладает вертикальной асимптотикой. Напряжение на k -ом переходе при этом определяется по формуле

$$m_k = 1 - \beta_k - \beta_{k+1}, \quad (13)$$

$$V_k = m_k^{-1} (1 - \beta_k - \beta_{k+1})$$

и зависит от формы р-п-перехода (резкий, диффузионный и т. д.).

Заметим, что от формы коллекторного перехода и от механизма ЛУ зависит только напряжение срыва на переходе, а токи (11), (12) и т. д. от этих факторов не зависят: это является очень важным фактором с точки зрения практического применения приборов, обладающих теми или иными параметрами срыва и т. д.

Очевидно, что инверсия на k -ом переходе возможна только при $\beta_k + \beta_{k+1} > 1$ (чтобы $a_k + a_{k+1} = 1$ в теории МТЛ). Если $(\beta_k + \beta_{k+1} - 1) \rightarrow 0$, то $J_{\text{ср}} \rightarrow \infty$. Из (13) видно, что асимптотическое значение напряжения V_k монотонно убывает с ростом $(1 - \beta_k - \beta_{k+1})$ и $(V_k \rightarrow 0)$ при $(1 - \beta_k - \beta_{k+1}) \rightarrow 0$, т. е. переход находится на грани инверсии, что и следовало ожидать.

Если считать k -й переход резким, то из (13) можно определить V_k . Имеем:

$$V_k = V_{0k} \ln^2 [1 + \varphi_{0k} (1 - \beta_k - \beta_{k+1})] \quad (14)$$

(обозначения см. в (6)).

Для других видов р-п-перехода расчет проводится аналогично.

Как известно, для коэффициентов ударной ионизации существует ряд формул, при помощи которых составляют коэффициент ЛУ m_k (как правило, эту процедуру можно совершить только приближенно).

Далее, m_k зависит еще от технологии изготовления р-п-переходов. Поэтому, измеряя параметры срыва или V_k , можно по соответствующей формуле судить о механизме ударной ионизации ЛУ и форме перехода.

Практически, формула (14) имеет место при токе на порядок больше по сравнению с рекомбинационным током.

Так как из $\beta_k + \beta_{k+1} < 1$ следует, что $\alpha_k + \alpha_{k+1} < 1$ при всех значениях J , то условие инверсии для k -го перехода, то есть равенство $\alpha_k + \alpha_{k+1} = 1$ не выполняется и поэтому инверсия не должна иметь место. Отсутствие инверсии приводит к тому, что процессы в переходах, находящихся слева и справа k -го перехода, не влияют друг на друга: это следует из (5, 6, 9, 10), по которому роль надбарьерного тока через k -й переход мала и расчет смежных условных транзисторов по МТА может дать достаточно верный результат.

Итак, образование ОС на ВАХ k -го перехода при $\beta_k + \beta_{k+1} < 1$ возможно только при условии, что в этом коллекторе должны существовать ЛУ и утечка (необязательно рекомбинационная, так как при любой другой утечке процесс расчета не изменяется) хотя бы в одном из соседних эмиттеров (см. формулы (9) и (10)).

Наличие ЛУ в переходе уменьшает ток срыва этого же перехода и препятствует взаимодействию других коллекторных переходов, находящихся по разные стороны от него. А расчет k -го перехода сводится при этом к расчету одноколлекторной р-п-р-п-структуры с переходами $(k-1)$, k , $(k+1)$.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. АН Армянской ССР Г. М. Авакьянцу за постоянное внимание и руководство работой.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Հ. Ս. ՂԱՐԱՅԱՆ, Հ. Հ. ԶԻՐԵՋՅԱՆ

Հեղեղային բազմապատկումը բազմաշերտ կառուցվածքներում

Բազմաշերտ (ՐՇ) կիսահաղորդչային կառուցվածքների հակառակ շեղված p - n -անցումների ծավալային լիցքի տիրույթում դիտարկված է լիցքակիրների հարվածային իոնիզացիայի շնորհիվ հեղեղային բազմապատկման (ՀԲ) երևույթը:

Ցույց է տրված, որ կոլեկտորային անցման մեջ ՀԲ առկայությունը բերում է այն բանին, որ այդ անցման խզման հոսանքը գծային ֆունկցիա է հանդիսանում ուկոմբինացիայի գործակցից ի տարբերություն բացասական դիֆերենցիալ դիմադրողության առաջացման ջերմային մեխանիզմից, երբ այն համեմատական է այդ իսկ գործակցի բառակուսուն:

Ստացված են $(k-1)$, k և $(k+1)$ -րդ անցումների վոլտ-ամպերային բնութագրերը k -րդ անցման մեջ ՀԲ առկայության դեպքում, գտնված են նրա բնութագրական կետերը և ասիմպտոտները:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ В. А. Кузьмин, Тиристоры малой и средней мощности, Изд. «Советское радио», М., 1971. ² Е. В. Лазарев, (канд. диссертация), ³ И. В. Грехов, А. А. Лебедев, И. А. Линийчук, В. М. Тучкевич, А. И. Уваров, В. Е. Челноков, В. Б. Шуман, Н. И. Якивич, Физика р-п переходов, стр. 494, Рига, 1966. ⁴ Г. М. Авакьянц, Г. С. Караян, А. А. Джереджян, «Известия АН Арм. ССР», Физика, т. 1, 44, (1972). ⁵ Г. М. Авакьянц, Г. С. Караян, А. А. Джереджян, «Известия АН Арм. ССР», т. 8, 54, (1973). ⁶ Г. С. Караян, А. А. Джереджян, Тезисы докладов республиканской конференции молодых физиков Армении, посвященной XXX-летию Ереванского физического института, стр. 54, Ереван, 1973. ⁷ Г. М. Авакьянц, Г. С. Караян, А. А. Джереджян, «Известия АН Арм. ССР», Физика, т. 7, 435 (1972). ⁸ Г. М. Авакьянц, Г. С. Караян, А. А. Джереджян, «Известия АН Арм. ССР», Физика, т. 8, 205 (1973). ⁹ Г. С. Караян, А. А. Джереджян, Тезисы докладов республиканской конференции молодых физиков Армении, посвященной XXX-летию Ереванского физического института, Ереван, стр. 55, 1973.