

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ
НА 10 КИЛОВОЛЬТ

Г. С. КАРАЯН, А. А. ДЖЕРЕДЖЯН

Показана возможность создания полупроводниковых многослойных структур на 10 киловольт и рассчитаны начальные параметры восьми- и десятислойных структур с максимальным напряжением свыше 10 киловольт и минимальным — порядка 1 вольта.

Современный уровень техники и технологии полупроводниковой электроники дает возможность создания многослойных структур, содержащих десятки слоев с определенными параметрами [1—3]. Поэтому в настоящее время вполне реально думать об изготовлении и расчете восьми- и десятислойных структур, которые при остальных идентичных параметрах могут выдержать гораздо большие напряжения по сравнению с переключателями с меньшим числом слоев.

С ростом числа коллекторных переходов в многослойных структурах увеличивается максимальное напряжение. Однако при этом необходимо, чтобы напряжение на каждом участке структуры, а также рассеиваемая на приборе во включенном состоянии мощность по возможности имели бы минимальную величину, что увеличит коэффициент полезного действия и долговечность таких приборов. При этом, однако, возникают следующие трудности физического характера. Как уменьшение концентрации примесей, так и увеличение числа слоев многослойных структур препятствуют инверсии знака напряжения (ИЗН) коллекторов, которая необходима для малости остаточного напряжения. Базы нужно делать достаточно длинными во избежание эффекта прокола при больших напряжениях на коллекторах. Это, в свою очередь, требует увеличения диффузионной длины неосновных носителей с целью увеличения коэффициентов β_k , значительная величина которых обеспечивает инверсию знака напряжения обратносмещенных переходов [4, 5]. Уже в случае шестислойных структур для выполнения вышеуказанных условий требуются огромная технологическая точность и очень большие диффузионные длины носителей в базах. При больших числах слоев выполнение указанных условий становится практически невозможным. Единственным выходом является использование эффекта взаимодействия (ЭВ) несоседних переходов многослойных структур [4], который облегчает не только условие ИЗН коллекторов, но и дает возможность иметь для ряда обратносмещенных переходов S-образную вольт-амперную характеристику (ВАХ) без каких-либо утечек в соседних эмиттерах.

Указанный эффект облегчает требование к многослойной структуре до такой степени, что практически становится возможным изготовление сверхмощных структур. На основе работ [4, 5] численный расчет исходных параметров таких приборов желательно проводить на ЭВМ в связи с необходимостью решения системы сложных нелинейных алгебраических уравне-

ний с многими неизвестными, причем необходимо определять, пользуясь этими уравнениями и рядом неравенств, например, для восьмислойных структур не меньше 24 параметров: концентрации примесей и времена жизни неосновных носителей во всех базах и ширины баз.

В некоторых случаях, однако, из физических соображений можно упростить задачу и провести расчет без ЭВМ [5]. В качестве примера рассмотрим восьмислойную структуру. Как следует из общих положений [4, 5], для упрощения расчетов необходимо рассматриваемый токовый интервал разделить на подинтервалы в зависимости от характера ЭВ. Указанный ЭВ, в свою очередь, выберем в зависимости от технологических возможностей изготовления прибора и от желаемых значений параметров структуры. В нашем случае требуется, во-первых, чтобы максимальное значение напряжения было бы не менее 10 кВ и, во-вторых, чтобы рассеиваемая мощность на приборе не превосходила 10 Вт при токе 10 А. Первое из этих условий требует, чтобы базы были достаточно длинными и не очень сильно легированными, а напряжения на коллекторах достигали своих максимальных значений при мало отличающихся значениях токов срыва. Согласно второму условию, начиная с некоторого значения тока для всех коллекторов должны выполняться критерии ИЗН.

Из вышесказанного следует, что времена жизни (диффузионные длины) неосновных носителей в средних базах должны быть достаточно большими. Следовательно, в некрайних эмиттерах рекомбинация носителей будет играть пренебрежимо малую роль и не может стать средством обратной связи между пространственно разделенными частями структуры. Для этого достаточно иметь интенсивную рекомбинацию в крайних эмиттерах [4, 5], так как в этом случае наряду с ЭВ обратной связью будет обеспечен любой коллектор, если только выполняются условия

$$\beta_2^* > 0, \quad \beta_6^* > 0,$$

которые обеспечивают также ИЗН второго и шестого переходов. Все эти условия можно легко осуществить за счет сильного легирования крайних баз с малыми временами жизни неосновных носителей. Следует подчеркнуть, что это технологически легко реализуемо.

Далее, для ИЗН центрального перехода необходимо, чтобы $\beta_4^{\text{эф}} + \beta_5^{\text{эф}} > 1$, тогда как при срыве напряжения должно выполняться неравенство $\beta_4 + \beta_5 < 1$ (в противном случае V_4 было бы очень мало). Эти условия не противоречивы [5].

Из вышесказанного следует, что достаточно рассмотреть две области изменения тока, а именно, вблизи тока срыва, когда система уравнений сводится к трем независимым, легко разрешаемым подсистемам, и вблизи остаточного тока, когда трансцендентность системы уравнений исчезает и она становится аналитически разрешимой. Такое разложение системы уравнений удобно также для учета изменения длин баз в зависимости от напряжения.

Исходя из вышесказанного, нами рассчитаны исходные параметры восьми- и десятислойных структур, значения которых приведены соответ-

ственно в табл. 1 и 2, где значения величин β_k и $i_k \beta_k^2$ приведены соответственно для закрытого и открытого состояний. При расчетах выбраны такие значения параметров, которые в настоящее время технологически реализуемы. Вычисления проведены с учетом эффекта расширения переходов.

Таблица 1

Параметры	Номер базы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
χ [см ⁻³]	10 ¹⁹	10 ¹⁶	3·10 ¹³	4·10 ¹³	4·10 ¹³	3·10 ¹³	10 ¹⁶	10 ¹⁹
W [мкм]	10	14	720	250	400	500	22	7
τ [с]	7,8·10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	1,7·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	1,7·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	2,3·10 ⁻⁹
L [мкм]	5	35	720	600	720	600	55	2
m		0,413		0,02		0,323		
V [В]		4180		2100		4000		
β		0,919	0,4	0,563	0,406	0,570	0,92	
		0,919	0,382	0,377	0,586	0,235	0,92	
β^2	1,7·10 ⁵		0,3		0,33		3,6·10 ⁵	
[CGS]	1,7·10 ⁵		0,82		0,83		3,6·10 ⁵	

Исследованная восьмислойная структура обладает следующими характерными параметрами: максимальное напряжение на приборе $V_{\max}^{(8)} = 10280$ В достигается при токе $J_{cr}^{(8)} = 8$ мкА; при этом оно распределено по коллекторам так:

$$V_2^{(8)} = 4180 \text{ В}, \quad V_4^{(8)} = 2100 \text{ В}, \quad V_6^{(8)} = 4000 \text{ В}.$$

Прибор включается при $J_{\min} = 50$ мА, $V_{\min} = 0,73$ В. Выделяемая на приборе мощность на единицу поверхности поперечного сечения составляет 0,082 Вт в закрытом режиме и 1 Вт — в открытом режиме при токе порядка 1 А. При более значительных плотностях тока расчет следует проводить в приближении высокого уровня инжекции. Оценка времен включения по методу [6, 7] показывает, что время экспоненциального нарастания тока порядка $1,4 \cdot 10^{-5}$ с.

Соответствующие параметры для десятислойной структуры имеют следующие значения:

$$V_{\max}^{(10)} = 10800 \text{ В}, \quad J_{cr}^{(10)} = 8,8 \text{ мкА}, \quad V_{\min}^{(10)} = 0,6 \text{ В}, \quad J_{\min}^{(10)} = 7,7 \text{ мА},$$

а максимальное напряжение распределяется по коллекторам следующим образом:

$$V_2^{(10)} = 3600 \text{ В}, \quad V_4^{(10)} = 1730 \text{ В}, \quad V_6^{(10)} = 1770 \text{ В}, \quad V_8^{(10)} = 3700 \text{ В}.$$

Вкратце обсудим физический принцип работы этих структур, механизмы образования падающих участков на ВАХ коллекторов и роль эффекта взаимодействия.

Таблица 2

Параметры	Номер базы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
χ [см ⁻³]	10^{19}	10^{16}	$3 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	10^{16}	10^{19}
W [мкм]	10	11	600	237	300	227	300	472	18	10
τ [с]	$1,2 \cdot 10^{-8}$	10^{-6}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-6}	$0,72 \cdot 10^{-8}$
L [мкм]	5	35	600	550	500	550	600	600	55	5
m		0,176		$< 0,01$		$< 0,01$		0,205		
V [В]		3600		1730		1770		3700		
β		0,95	0,509	0,459	0,505	0,475	0,491	0,494	0,95	
		0,95	0,402	0,348	0,561	0,307	0,645	0,206	0,95	
R^2	$8,1 \cdot 10^{-4}$		0,46		0,42		0,33		$9,2 \cdot 10^{-4}$	
[CGS]	$8,1 \cdot 10^{-4}$		1,2		1,1		0,98		$9,2 \cdot 10^{-4}$	

Сначала рассмотрим восьмислойную структуру. Из табл. 1 видно, что в данном случае в третьем и пятом эмиттерных переходах утечки отсутствуют. При этом чтобы центральный переход с самого начала не работал в режиме малых напряжений, коэффициенты β_4 и β_5 выбраны таким образом, что имеет место следующее условие:

$$\beta_4 + \beta_5 \approx 0,97 < 1. \quad (1)$$

В силу постоянства тока через любое сечение образца и неравенства (1) напряжение на четвертом переходе должно быть большим.

Участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ второго и шестого переходов образуется за счет взаимосвязи соседних — первого и седьмого — эмиттеров. При этом нетрудно обеспечить срыв напряжения V_2 и V_6 практически при одном и том же токе. В то же время образование на ВАХ $V_4(J)$ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением невозможно за счет соседних эмиттеров, так как они лишены утечек, необходимых для обратной положительной связи [5]. Однако в силу неравенств (см. табл. 1)

$$\beta_2 + \beta_3 = 1,35 > 1, \quad \beta_6 + \beta_7 = 1,155 > 1 \quad (2)$$

обеспечена инверсия знака напряжения второго и шестого переходов, при которой существует эффект взаимодействия между крайними эмиттерами и центральным коллекторным переходом. За счет эффекта взаимодействия на ВАХ $V_4(J)$ образуется падающий участок [5] практически одновременно с остальными коллекторами.

Здесь необходимо обратить внимание на эффект расширения баз за счет сужения области объемных зарядов коллекторов с уменьшением напряжения на них. Этот эффект приводит к значительному уменьшению некоторых коэффициентов β_k , в результате чего сумма $(\beta_4 + \beta_5)$ при инверсии знака напряжения четвертого перехода становится меньше своего же значения при срыве, что препятствует ИЗН четвертого перехода. Однако за счет ЭВ между несоседними переходами обеспечивается выполнение необходимого и достаточного условия ИЗН четвертого перехода [5]:

$$\beta_4^{\text{эф}} + \beta_5^{\text{эф}} = 1,138 > 1, \quad (3)$$

причем эффект взаимодействия учтен с обеих сторон. Неравенства (2) и (3) обеспечивают малость остаточного напряжения на структуре.

Рассмотренная десятислойная структура отличается от восьмислойной лишь тем, что для четвертого перехода учитывается ЭВ только слева, а для шестого — только справа. Тогда вместо (3) выполняются следующие неравенства: $\beta_4^{\text{эф}} + \beta_5 = 1,015 > 1$ и $\beta_6 + \beta_7^{\text{эф}} = 1,04 > 1$, которые обеспечивают существование инверсионных состояний четвертого и шестого коллекторных переходов и, следовательно, ослабляют требования к материалу. Действительно, сравнивая рассчитанные восьми- и десятислойные структуры, нетрудно убедиться, что при одинаковых концентрациях примесей, во-первых, максимальное напряжение на каждом коллекторе десятислойной структуры (3700 В) меньше, чем в случае восьмислойной структуры

(4180 В) и, во-вторых, уменьшается диффузионная длина неосновных носителей в базах для десятислойной структуры

$$(L_{\max}^{(8)} = 720 \text{ мкм}, L_{\max}^{(10)} = 600 \text{ мкм}).$$

Авторы выражают глубокую благодарность проф. Г. М. Авакьянцу за обсуждение результатов работы.

Институт радиофизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 3.1.1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Г. Лозинова, М. И. Овсянников, Ю. А. Романов. Микроэлектроника, 2, 80 (1973).
2. Л. Маттера. Электроника, 48, 460 (1975).
3. В. И. Стафеев. ФТП, 5, 408 (1971).
4. Г. М. Авакьянц, Г. С. Караян, А. А. Джереджан. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 402 (1974).
5. Г. С. Караян. Кандидатская диссертация, Ереван, 1976.
6. А. И. Уваров. Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов, Изд. Наука, Л., 1969.
7. А. А. Лебедев. Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов, Изд. Наука, Л., 1969.

10 ԿԻԼՈՎՈԼՏԻ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՓՈԽԱՆՋԱՏԻՉՆԵՐ

Հ. Ս. ՂԱՐԱՅԱՆ, Հ. Հ. ԶԵՐԵՅԱՆ

Տեսականորեն հետազոտված է փակ վիճակում 10 կՎ լարման տակ աշխատող կիսահաղորդչային ութաշերտ և տասնաշերտ կառուցվածքների ստեղծման մեթոդը: Բաց վիճակում լարումը կառուցվածքների վրա մեկ վոլտից փոքր է: Դա իրականացվում է ոչ հարևան p-n-անցումների փոխազդեցության երևույթի օգտագործման ճանապարհով: Հաշվված ուն չափերի կառուցվածքների հիմնական պարամետրերը:

THE 10 KILOVOLT SEMICONDUCTOR SWITCHES

H. S. KARAYAN, H. H. JEREJYAN

A method of the formation of eight and ten-layer semiconductor structures working under 10 kilovolt in a closed state has been investigated. In an open state the voltage on the structures is less than one volt. It is achieved on the account of the interaction effect between non-neighbouring p-n-junctions. The main parameters of such structures have been calculated.