

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
О. А. АБДУЛХАЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, ФТИ НПО «Физика-Солнце»  
E-mail: karimov@uzsci.net.

Дата поступления в редакцию  
13.02 2009 г.

Оппонент к. т. н. Я. Я. КУДРИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЕ $p^+n-p^+$ -СТРУКТУРЫ С ОБЕДНЯЕМОЙ БАЗОВОЙ ОБЛАСТЬЮ

*Показано, что механизм токопереноса через  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуру определяется инжекционно-туннельным и генерационно-рекомбинационным механизмами. Структуры представляют интерес для создания ограничителей напряжения и электронных переключателей.*

Полупроводниковые  $p^+n-p^+$ -структуры отличаются разнообразием функциональных характеристик и сфер применения. Управляемое изменение параметров определенных областей  $p^+n-p^+$ -структуры приводит к существенным изменениям электронных процессов, протекающих в них. В случае смыкания обедненных областей  $p^+n$ -переходов они превращаются в инжекционно-пролетные диоды, а при неполном обеднении становятся основой биполярных транзисторов, предназначенных для усиления электрических сигналов. Исследования  $p-n-p$ -структур как элементов биполярного транзистора проводятся широко, в то время как сведения об исследовании  $p^+n-p^+$ -структур в режиме смыкания приведены в единичных работах [1, 2], хотя они в качестве ограничителей напряжения должны обладать определенным пре-

имуществом в части термостабильности и быстродействия, по сравнению с диодами типа  $p^+n-n^+$ , основанными на лавинном или зинеровском пробое [3].

В настоящей статье приведены некоторые характеристики арсенид-галлиевой  $p^+n-p^+$ -структуры как основы для изготовления ограничителей напряжения.

Исследуемая  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структура получена выращиванием из жидкой фазы в едином процессе эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p^+$ -типа проводимости на сильнолегированной арсенид-галлиевой подложке  $p^+$ -типа толщиной 400 мкм. Толщина эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p^+$ -типа составляет 1,5 и 2,5 мкм, соответственно. Концентрация носителей в базовой области  $nGaAs$  равна  $N_n=7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . С целью предотвращения расширения слоя обеднения в полученный эпитаксиальный слой  $p^+$ -типа, т. е. для сохранения высокой концентрации примесей в эпитаксиальном слое, в раствор-расплав  $Ga+p^+GaAs$  дополнительно добавляли металлический цинк. С другой стороны, этот прием предусматривал уменьшение концентрации носителей у границы базовой области  $nGaAs$  и сосредоточение области объемного заряда в самой базовой области (рис. 1, а). Эквивалентная схема  $p^+n-p^+$ -структуры состоит из навстречу включенных переходов  $p^+$ (подложка)- $n$ (пленка) и

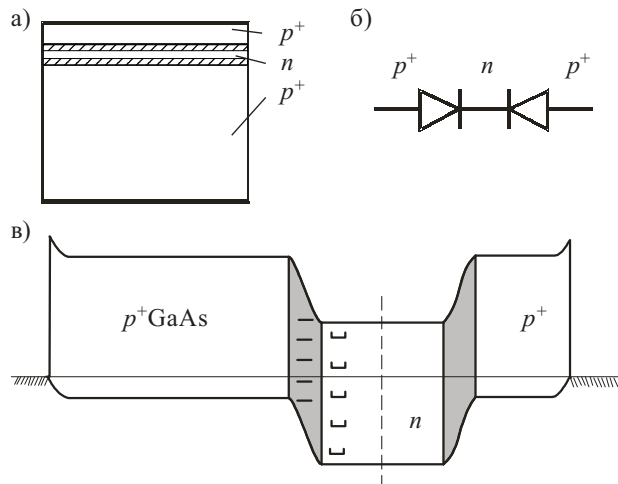


Рис. 1. Геометрическая конструкция (а), эквивалентная схема (б) и качественная энергетическая зонная диаграмма (в)  $p^+n-p^+$ -структуры

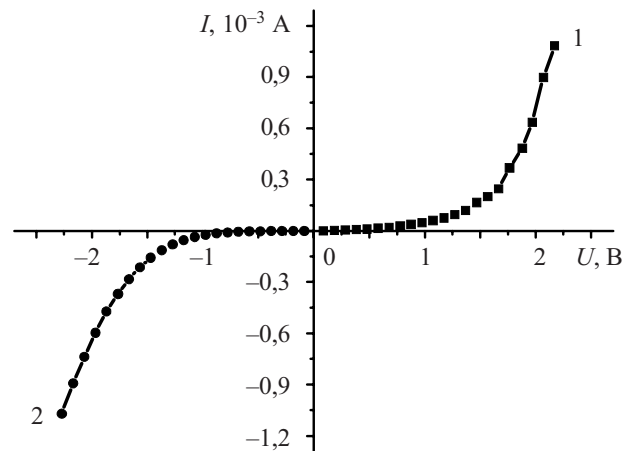


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры при различных режимах включения:

1 —  $(- )p^+n-p^+(+)$ , обратное смещение переход  $p^+$ (подложка)- $n$ ;  
2 —  $(+)p^+n-p^+(-)$ , обратное смещение переход  $n-p^+$ (пленка)

Таблица 1

Температурные коэффициенты структуры  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$  при различных режимах включения.

$\Delta T = T_2 - T_1, ^\circ C$	$\alpha, B/^\circ C$	
	$(+)p^+-n-p^+(-)$	$(-)p^+-n-p^+(+)$
40—20	0,005	0,0055
60—40	0,0056	0,0055
80—60	0,006	0,005

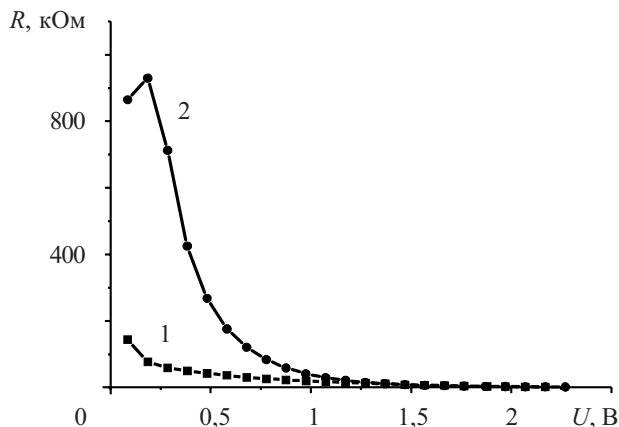


Рис. 3. Дифференциальное сопротивление  $p^+-n-p^+$ -структуры при различных режимах включения: 1 —  $(-)p^+-n-p^+(+)$ ; 2 —  $(+)p^+-n-p^+(-)$

$n$ (пленка)— $p^+$ (пленка) (рис. 1, б), что также показано на энергетической зонной диаграмме (рис. 1, в).

Исследования темновых вольт-амперных характеристик показали, что при смене полярности прикладываемого напряжения получаются две обратные ветви, обусловленные поочередным запираем  $p^+-n$  и  $n-p^+$ -переходов (рис. 2, кривые 1, 2). Отличие этих переходов состоит в том, что  $p^+-n$ -переход сформирован на объемной подложке из  $p^+GaAs$ , выращенного методом Чохральского, марки АГЧЦ, а  $n-p^+$ -переход является эпитаксиальным. Области как  $n$ -типа, так и  $p^+$ -типа представляют собой эпитаксиальные слои. Сопоставление сопротивлений обоих переходов при напряжении 0,08 В показывает, что эпитаксиальный  $n-p^+$ -переход имеет в 6,5 раз большее сопротивление, по сравнению с сопротивлением  $p^+-n$ -перехода, и, надо полагать, большую толщину слоя объемного заряда (рис. 3). Величина сопротивления  $n-p^+$ -перехода резко уменьшается с увеличением приложенного напряжения, как и у ограничителей напряжения [4]. Именно в режиме запираения  $n-p^+$ -перехода наблюдается переход из низкопроводящего состояния в высокопроводящее, а в другом  $p^+-n$ -переходе это состояние выражено неярко. Это указывает на то, что

электронные процессы несколько отличаются друг от друга при смене полярности рабочего напряжения. Из последовательности расположения  $p$ - и  $n$ -областей вытекает, что область объемного заряда  $p^+GaAs-nGaAs$ -перехода в режиме  $(-)p-n-p(+)$  расширяется противоположно направлению тока, в частности в сторону  $nGaAs-p^+GaAs$ -перехода. При этом у границы области объемного заряда противоположного перехода остается квазинейтральная область, что исключает возможность проявления ТОПЗ-механизма [5]. Аналогичная картина предполагается и в другом режиме  $(+)p-n-p(-)$ .

Что касается температурных свойств, отметим, что температурные зависимости вольт-амперных характеристик структуры с  $p-n$ -переходами могут дать сведения о ее функциональных возможностях. В частности, опираясь на значения температурного коэффициента  $\alpha$  (отношение изменения падающего напряжения к разности температур, вызывающей это изменение,  $\alpha = \Delta U / \Delta T$  [6]) можно характеризовать полупроводниковый прибор с  $p-n$ -переходами как термодатчик или как ограничитель напряжения. В нашем случае температурные исследования вольт-амперной характеристики  $p^+-n-p^+$ -структуры на основе арсенида галлия при различных режимах включения (рис. 4) показали, что температурный коэффициент имеет низкие значения (см. табл. 1).

Следует отметить, что перестроив графики температурной зависимости вольт-амперной характеристики в двойном логарифмическом и полулогарифмическом масштабах (рис. 5, кривые 1—4), можно определить закономерности зависимости тока от напря-

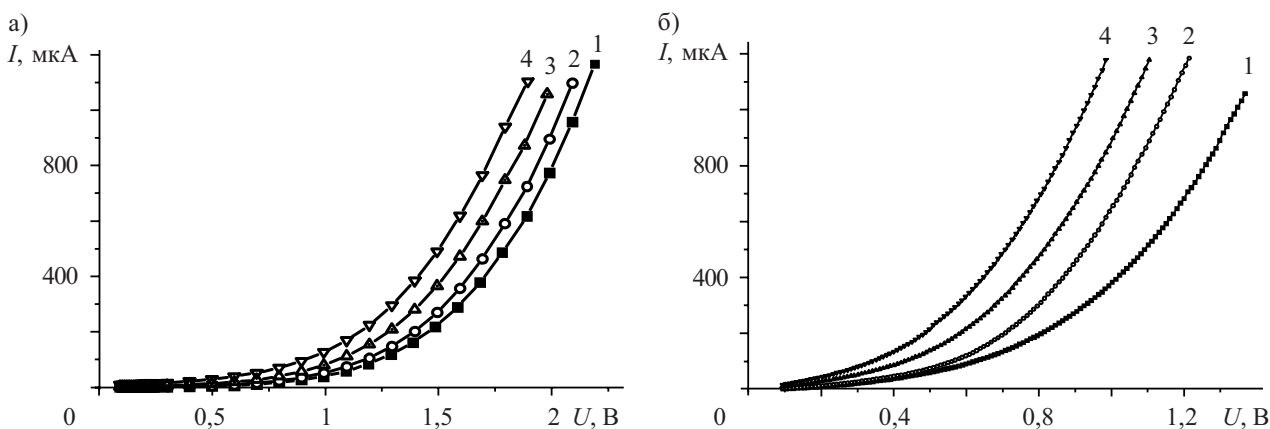


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структуры на основе арсенида галлия для различных  $T$  в  $^\circ C$  (1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80) при режимах включения: а —  $(+)p^+-n-p^+(-)$ ; б —  $(-)p^+-n-p^+(+)$

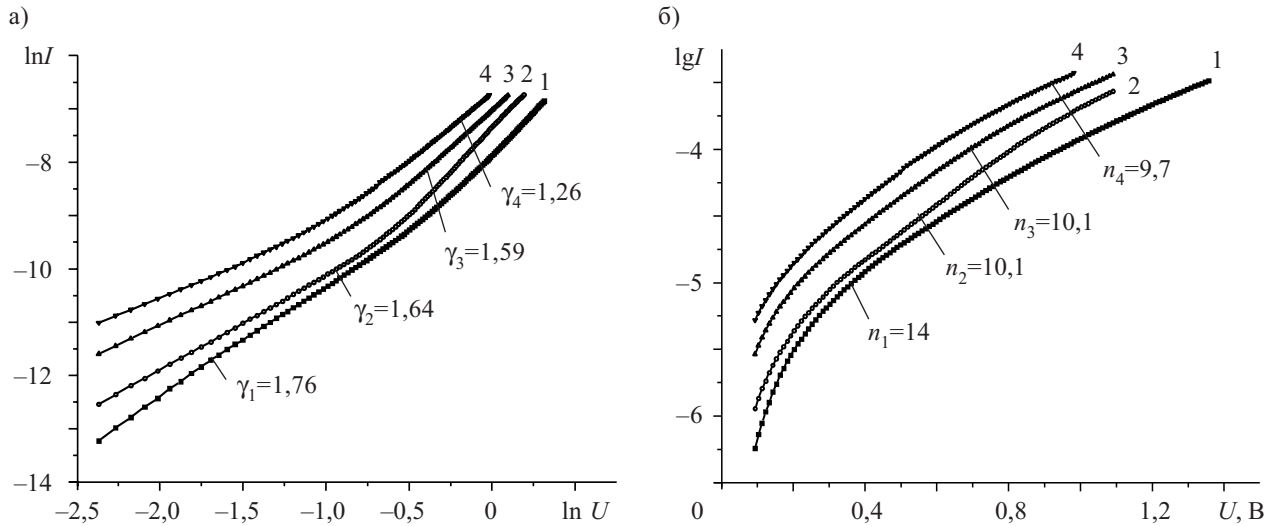


Рис. 5. ВАХ структуры в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (б) масштабах в режиме  $(-)p^+-n-p^+(-)$  для различных  $T$  в  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80

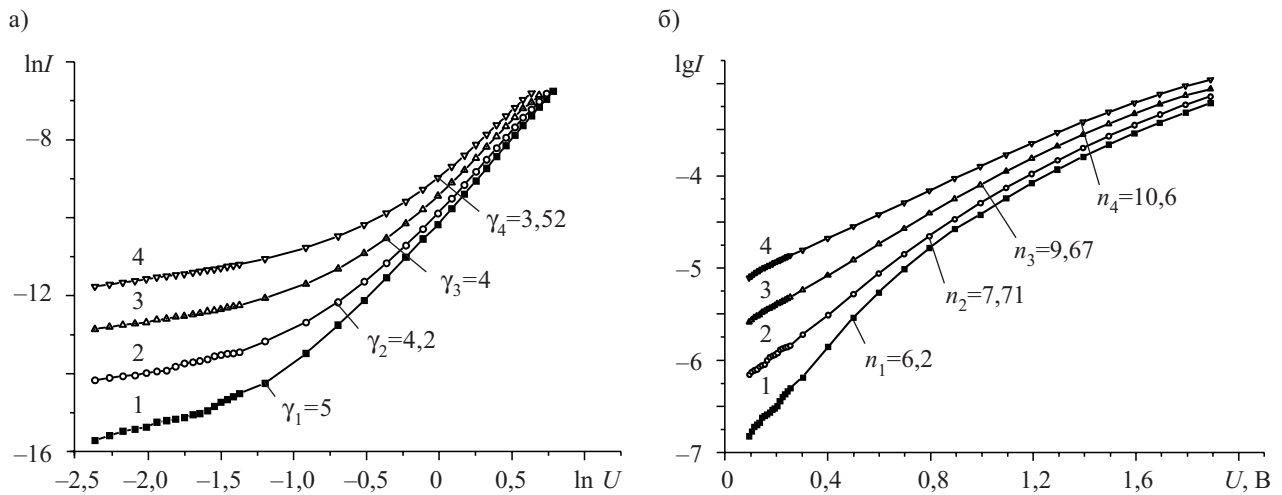


Рис. 6. ВАХ структуры в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (б) масштабах в режиме  $(+)p^+-n-p^+(-)$  для различных  $T$  в  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80

жения в заданном диапазоне напряжений, т. е. физические процессы, объясняющие механизмы токопереноса. Как видно из рис. 5, а, в режиме запирающего  $(-)p^+-n$ -перехода на начальном участке (до напряжения 0,68 В) при комнатной температуре имеем степенную зависимость с показателем  $\gamma_1=1,76$ , обусловленную рекомбинационными процессами в области объемного заряда и квазинейтральной области базы. Далее, с повышением напряжения от 0,6 до 1,4 В, имеет место экспоненциальная зависимость тока от напряжения с коэффициентом неидеальности  $n=14$ , связанная с инжекционными процессами в  $n-p^+$ -переходе (рис. 5, б). С повышением температуры от комнатной до  $80^{\circ}\text{C}$  показатель степени  $\gamma$  последовательно уменьшается до 1,26, а коэффициент неидеальности  $n$  уменьшается вначале до 10,1, а затем до 9,7. Такое поведение токовой зависимости можно объяснить рекомбинационно-генерационными и инжекционно-туннельными процессами.

В режиме запирающего  $n-p^+(-)$ -перехода (рис. 6) до напряжения 0,8 В имеет место экспоненциальная зависимость с коэффициентом неидеальности 6,2, обусловленная инжекционными процессами в  $p^+-n$ -переходе, поддерживаемыми туннелированием носителей через  $n-p^+(-)$ -переход. Далее, в интервале напряжения от 0,8 до 2 В, наблюдается степенная зависимость с показателем  $\gamma=5$  (рис. 6, а), связанная с туннельно-рекомбинационными процессами. С повышением температуры процесс инжекции носителей усиливается и коэффициент неидеальности увеличивается до 10,6, а показатель степени  $\gamma$  уменьшается до 3,52. Наблюдаемые зависимости можно объяснить инжекционно-рекомбинационными процессами.

Анализ результатов исследования вольт-амперных характеристик показывает, что на начальном участке в  $p^+-n$ -переходе имеем степенную зависимость, а на  $n-p^+$ -переходе — экспоненциальную, и наоборот, при напряжении, превышающем контактную разность

Таблица 2

Характеристические параметры  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуры при различных режимах включения в зависимости от температуры

T, °C	(-)p-n-p(+)		(+)p-n-p(-)	
	$\gamma$ при $I \sim U^n$	n при $I \sim \exp qU/(nkT)$	$\gamma$ при $I \sim U^n$	n при $I \sim \exp qU/(nkT)$
20	1,76	14	5	6,2
40	1,64	10,1	4,2	7,71
60	1,59	10,1	4,0	9,57
80	1,26	9,7	3,52	10,6

Примечание: q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана

потенциалов, в  $p^+-n$ -переходе имеем экспоненциальную зависимость, а на  $n-p^+$ -переходе — степенную (табл. 2).

Отсюда следует, что механизмы токопереноса в  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуре определяются параметрами модулируемой части базовой области. Это объясняется тем, что базовая область как бы разбивается на две части. Независимо от направления хода модуляции базы, при модуляции со стороны, прилегающей к подложке этой части базы, вольт-амперная зависимость является степенной функцией, а при модуляции со стороны эпитаксиального  $n-p^+$ -перехода зависимость становится экспоненциальной. Сопоставление значений тока показывает, что при запирации  $p^+-n$ -перехода ток в 6 раз больше, чем при запирации эпитаксиального  $n-p^+$ -перехода ( $I=6 \cdot 10^{-7}$  А против  $1 \cdot 10^{-7}$  А при  $U=0,0865$  В). С другой стороны, наблюдаемые токовые характеристики можно объяснить технологическим разделением базовой области на две части — более совершенную и дефектную. В частности, со стороны подложки (с концентрацией дефектов  $10^4$  см<sup>-2</sup>) в эпитаксиальном слое создаются дефекты, концентрация которых убывает по толщине. В результате создаются условия для инжекции, туннелирования дырок и захвата их на уровни, а также последующей их рекомбинации с электронами (рис. 7).

Таким образом, ток через  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структуру определяется инжекционно-туннельным и генерационно-рекомбинационным механизмами. При модуляции части базы, содержащей дефекты, преобладает инжекционно-туннельный ток, а при модуляции части базы с меньшей дефектностью определяющими являются генерационно-рекомбинационные токи. В режиме запиарания  $n-p^+$ -перехода, из-за низких значений обратных токов инжекционные токи через прямовключенный  $p^+-n$ -переход ограничиваются, т. е. определяются обратным током  $n-p^+$ -перехода. Вместе с тем, поскольку база является тонкой, инжектированные дырки не могут изменить ее параметры.

\*\*\*

Результаты проведенных исследований показывают, что хотя сама  $p^+GaAs-nGaAs-p^+GaAs$ -структура

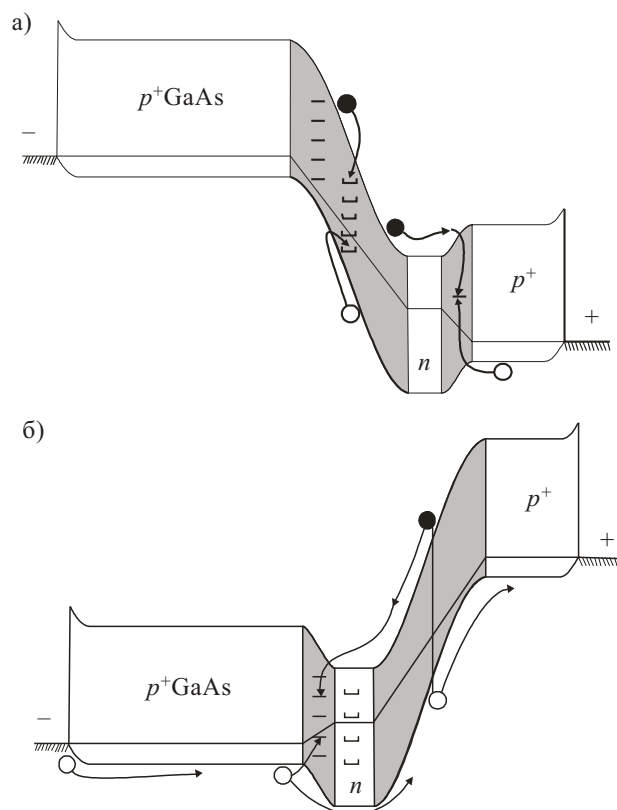


Рис. 7. Качественные энергетические зонные диаграммы  $p^+-n-p^+$ -структуры

внешне является симметричной, ее характеристиками можно управлять за счет создания эпитаксиального  $nGaAs-p^+GaAs$ -перехода с малыми обратными токами. Режим малых обратных токов является целесообразным для ограничителей напряжения.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Cohen E. D. Trapatts and impatts — state of the art and application // Microwave J.— 1977.— N 20.— P. 22.
2. Пат. 2006994 РФ. Структура полупроводникового инжекционно-пролетного прибора / А. В. Наумов, В. И. Санкин.— 30.01 1994.
3. Козлов В. А., Кардо-Сысоев А. Ф., Брылевский В. И. Волновой ударно-ионизационный пробой дрейфовых диодов с резким восстановлением // ФТП.— 2001.— № 5.— С. 629—632.
4. Рассел Билл. Защита систем передачи данных от переходных процессов. [http://www.icquest.ru/html/articles/semtech\\_art.html](http://www.icquest.ru/html/articles/semtech_art.html)
5. Лебедев Э. А., Диттрих Т. Ток, ограниченный пространственным зарядом, в пористом кремнии и анатазе (TiO<sub>2</sub>) // ФТП.— 2002.— № 10.— С. 1268—1271.
6. Тиходеев Ю. С., Трутко А. Ф. Обзор и анализ возможностей расчета полупроводниковых приборов и некоторые идеи создания новых СВЧ полупроводниковых приборов // Сб. статей. Полупроводниковые приборы и их применение.— М.: Сов. радио.— 1971.— Вып. 25.— С. 315—328.