

А. В. ИВАЩУК, к. т. н. В. И. БОСЫЙ, В. Н. КОВАЛЬЧУК

Дата поступления в редакцию
03.10 2002 г.

Украина, г. Киев, НПП “Сатурн”
E-mail: ivaschuk@i.com.ua

Оппонент к. т. н. А. А. КИЩИНСКИЙ
(ЦНИРТИ, г. Москва)

СВЧ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Оптимизация конструкции и применение прецизионных технологий формирования контактов позволяют получить параметры, расширяющие возможности ПТШ на GaAs.

В последние годы развитие технологии полевых транзисторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн идет по пути использования гетеро-эпитаксиальных многокомпонентных соединений A^3B^5 самого сложного состава. Именно на этих структурах достигнуты рекордные параметры приборов с наименьшим коэффициентом шума ($K_{ш}$), наибольшим коэффициентом усиления по мощности, а также наибольшей рабочей частотой (f_p) [1]. Однако объемы использования обычных полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) на GaAs не уменьшаются, эти приборы широко используются в СВЧ-микрорелектронике.

Целью данной работы является разработка конструкции и технологии изготовления СВЧ полевых транзисторов средней мощности с рабочей частотой в диапазоне 18...36 ГГц, а также разработка конструкции контактного измерительного устройства для исследования СВЧ-параметров приборов непосредственно на чипе.

Для определения размеров элементов топологии транзисторов необходимо провести детальный анализ элементов эквивалентной схемы мощного транзистора. Однако таких публикаций для мощного транзистора на частоте 30—40 ГГц и выше — немного, и они противоречивы [2, 3]. Очевидно, это связано со сложностью анализа работы ПТШ в режиме большого сигнала. Тем не менее известно, что в К- и, тем более, в Ка-диапазоне длина затвора, чтобы обеспечить коэффициент усиления по мощности ($K_{ур}$) не ниже 4,0 дБ, должна быть не более 0,3 — 0,4 мкм. Детальный анализ зависимости $K_{ур}$ от длины и ширины затвора приведен еще в работе [4].

Для оптимального использования площади кристалла топология прибора спроектирована в виде встречно-штыревых электродов стока и истока. Должны быть определены два фундаментальных параметра топологии прибора — ширина пальца затвора и расстояние между пальцами. Первый размер влияет на коэффициент усиления, а второй определяет тепло-

вое сопротивление. Для определения этих параметров использованы результаты работы [5].

Ширина пальца затвора. Транзисторы с шириной пальцев затвора от 30 до 250 мкм испытывались различными фирмами. Однако в связи с использованием самых разнообразных эпитаксиальных и ионнолегированных структур очень трудно выделить и идентифицировать потери в самом затворе. Нами в едином технологическом цикле изготавливались тестовые приборы с разной шириной пальцев затвора на одних и тех же пластинах в одном процессе. Ширина пальца изменялась от 30 до 150 мкм при общей ширине затвора $0,4 \pm 1,0$ мм. Приборы представляли собой встречно-штыревые структуры с длиной затвора около 0,4 мкм.

В диапазоне частот 4—8 ГГц коэффициент усиления ПТШ мало зависел от ширины пальца затвора, в диапазоне 12—18 ГГц эта зависимость существенно возрастала, а в диапазоне 18—36 ГГц была значительной. Таким образом, очевидно, что на частоте 18 ГГц нежелательно использовать пальцы затвора шире 100 мкм, а на частоте 36 ГГц — шире 50 мкм.

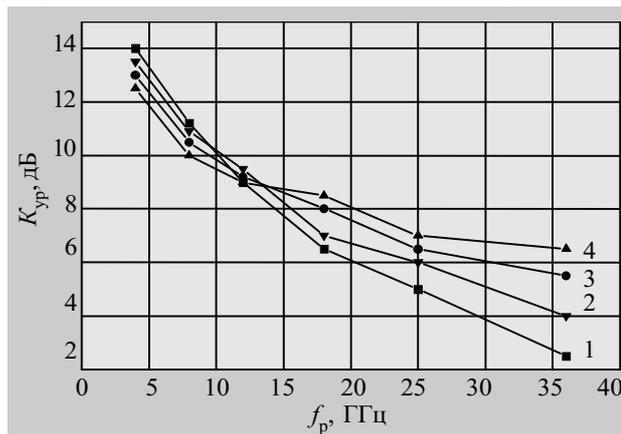


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления по мощности от рабочей частоты для транзисторов с разной шириной пальцев затвора:

1 — 150 мкм; 2 — 100 мкм; 3 — 75 мкм; 4 — 35 мкм

Экспериментальные зависимости коэффициента усиления по мощности от ширины пальца затвора на разных частотах представлены на **рис. 1**.

Тепловое сопротивление и расстояние между активными областями. С целью улучшения надежности мощного GaAs-ПТШ и улучшения его СВЧ-па-

раметров очень важно не допускать роста температуры в его активной области.

Тепловое сопротивление (R_T) ПТШ определяется, в первую очередь, следующими факторами:

- расстоянием между активными областями (W_a);
- шириной пальца затвора (W_n);
- толщиной подложки (H).

Расчеты и измерения, проведенные нами, и результаты разработок мощных ПТШ других фирм показывают, что для типичных GaAs-транзисторов с толщиной кристалла 60—80 мкм продольный тепловой поток пренебрежимо мал на расстоянии, превышающем толщину кристалла, и незначителен на расстоянии около 25—30 мкм. Чтобы максимально снизить тепловое влияние каналов друг на друга, значение W_a тоже должно быть в пределах 25—30 мкм. Дальнейшее уменьшение R_T и, соответственно, H всегда желательно, однако возникает технологические проблемы при работе с очень тонкой подложкой.

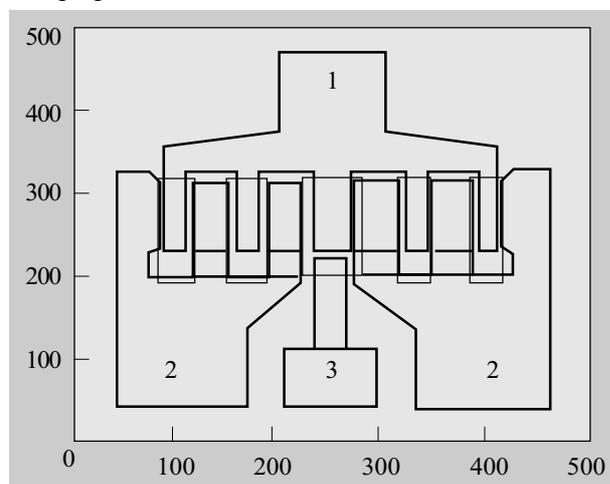


Рис. 2. Топология полевого СВЧ-транзистора средней мощности:

1 — сток; 2 — истоки; 3 — затвор

На основании проведенных расчетов и экспериментальных результатов спроектирована топология (рис. 2) с общей шириной затвора 400 мкм, длиной одного пальца 40 мкм, расстоянием между затворами 25 мкм.

Ток и напряжение смещения стока. Как известно [5, с. 117], выходная высокочастотная мощность на единицу ширины затвора (1 мм) мощного ПТШ пропорциональна потребляемой мощности по постоянному току на единицу ширины затвора. Ток стока, как правило, составляет от одной трети до половины максимального тока стока, если прибор работает в режиме класса А, и определяется концентрацией носителей заряда в активном слое, а также напряжением отсечки.

Экспериментальные исследования ведущих фирм свидетельствуют о том, что для нормальной работы ПТШ необходимо пробивное напряжение затвора не менее 10 В. Если концентрация носителей заряда в активном слое $\cong (1,5...2,0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т. е. достаточная для получения необходимого коэффициента усиления в диапазоне 18—36 ГГц, то напряжение отсечки должно быть менее 5 В, а ток стока — менее 300 мА на 1 мм

ширины затвора. Таким образом, оптимальное значение тока стока, определенное по критериям максимального усиления и максимальной выходной мощности для работы мощных транзисторов в диапазоне 18—36 ГГц с шириной затвора 400 мкм, составляет 100...150 мА.

Напряжение на стоке должно составлять менее половины пробивного напряжения стока при условии полного запирания канала транзистора. В диапазоне 18—36 ГГц в мощном GaAs-ПТШ концентрация носителей заряда составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, стоковое пробивное напряжение при запираании канала — от 20 до 30 В. Таким образом, напряжение стока в работающем приборе (для граничных значений) будет около 10 В, а его максимальное значение составит 15 В.

Пробивное напряжение затвора. Явления, происходящие при пробое затвора Шоттки в GaAs-ПТШ, чрезвычайно сложны [6, с. 141—144]. Пробивное напряжение затвора зависит от сочетания целого ряда параметров геометрии затвора и электрофизических свойств эпитаксиальной структуры, в первую очередь, от концентрации носителей заряда в активном слое, напряжения отсечки, расстояния "затвор—сток", состояния поверхности GaAs, а также от наличия или отсутствия смещения на стоке. Оно возрастает с уменьшением концентрации носителей заряда в канале и напряжения отсечки и зависит от максимального тока стока. Экспериментальные результаты разработок мощных ПТШ большинства фирм подтверждают возможность получения более высоких пробивных напряжений затвора, чем для объемного GaAs. Это, очевидно, обусловлено наличием обедненного слоя в подложке, который распространяется от истока до области затвора. Зависимость пробивных напряжений от расстояния "затвор—сток" также, вероятно, объясняется этой причиной.

Пробивное напряжение "затвор-сток" часто возрастает с увеличением отрицательного смещения затвора и, соответственно, с уменьшением тока стока. Это обусловлено наличием дипольного слоя, сформированного отрицательной дифференциальной подвижностью носителей заряда в GaAs.

Максимальные значения пробивного напряжения при оптимальном токе и напряжении смещения стока удается получить в конструкциях транзисторов с плавно утопленным и самосовмещенным затвором [7]. Именно эта конструкция, схематически представленная на рис. 3, применена авторами.

Соединения ячеек. Все затворы, стоки и истоки должны между собой параллельно соединяться. С технологической точки зрения это непросто. Существует три основных пути решения задачи, которыми следуют различные фирмы.

Первый вариант — соединение отдельных истоков металлизированными мостиками, которые расположены на пленке диэлектрика, например SiO_2 или же полимере. Однако такой мостик пригоден только для приборов с f_p до 18 ГГц, потому что в такой конструкции появляется дополнительная паразитная входная емкость. На более высоких частотах используются воздушные мостики. Такая технология традиционна для японских фирм Fujitsu и NEC, и при исполь-

Исток и сток ПТШ в виде омических контактов (ОК) изготавливались по технологии, описанной в работе [10], и обеспечивали $\rho_c \leq 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, $R_{\text{из}} \leq 0,50 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$. Перед нанесением металлизации поверхность GaAs протравливалась в аммиачно-перекисном травителе. Использовалась металлизация AuGe (50 нм)—Au (250 нм) или AuGe (50 нм)—Ni (20 нм)—Au (200 нм). Условия нанесения металлизации более детально описаны в [11, 12]. Формирование омических контактов осуществлялось в печи в атмосфере сухого водорода (точка росы ниже -60°C).

Затвор в виде барьерного контакта (БК) формировали взрывной литографией, напылением тугоплавких металлов и их композиций, например $\text{Ti}_x\text{N}_{1-x}$ [13, 14]. Зазор в электронном резисте размером $0,35\text{—}0,40 \text{ мкм}$ создавался электронно-лучевой (ЭЛ) литографией на установке ZBA-21. Таких же размеров была длина затвора, реализованная в металле. Рас травливание n^+ -слоя на стороны выбиралось в пределах $0,15\text{—}0,20 \text{ мкм}$, что обеспечивало достаточные пробивные напряжения между затвором и стоком, а также истоком, с одной стороны, и минимально возможное $R_{\text{из}}$, с другой.

Для снижения сопротивления металлизации затвора барьерный контакт дополнительно металлизировали золотом толщиной $0,50\text{—}0,60 \text{ мкм}$ по технологии, описанной в [11, 12].

Исследованы СВЧ-параметры приборов на рабочих частотах $18\text{—}36 \text{ ГГц}$, а также некоторые вольт-амперные характеристики:

- максимальный коэффициент усиления по мощности ($K_{\text{ур макс}}$);
- выходная мощность на 1дБ компрессии ($P_{\text{вых}}$ на 1 дБ);
- минимальный коэффициент шума ($K_{\text{ш мин}}$);
- ток насыщения "сток-исток" ($I_{\text{си0}}$);
- крутизна ВАХ при нулевом смещении на затворе (S_0);
- пробивное напряжение "сток-исток" ($U_{\text{си проб}}$);
- ток затвора (I_z).

Типичные вольт-амперные характеристики транзисторов представлены на рис. 5 ($U_{\text{зи}}$ — напряжение "затвор-исток").

Значительный разброс значений тока $I_{\text{си}}$ при типичном смещении на затворе от 70 до 190 мА свидетельствует, прежде всего, о неравномерности толщины канала прибора на разных участках пластины. Это

в значительной степени обусловлено неравномерностью толщины n -слоя GaAs, а также некоторыми технологическими погрешностями, особенно при травлении канала.

Крутизна ВАХ транзистора находится в пределах $25\text{—}35 \text{ мА/В}$, или $\sim 70\text{—}80 \text{ мСм/мм}$, что соответствует расчетным значениям этого параметра. Такой крутизны достаточно для получения работоспособных приборов.

Напряжение насыщения тока $U_{\text{си}} 1,2\text{—}1,5 \text{ В}$. Пробивное напряжение "сток-исток" составляет $9\text{—}14 \text{ В}$ и, как правило, значение этого напряжения больше в транзисторах с меньшим током насыщения $I_{\text{си}}$. Следует заметить, что для надежной работы прибора $U_{\text{св пр}}$ не может быть меньшим 10 В .

Учитывая также то, что оптимальный режим работы мощного транзистора будет в том случае, когда ток насыщения $I_{\text{си0}}$ будет соответствовать значениям в пределах $150\text{—}300 \text{ мА}$ на 1 мм ширины затвора при концентрации носителей заряда $N_D \sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, можно утверждать, что в приборах с $I_{\text{си0}} \geq 130 \text{ мА}$ толщина канала не оптимальная. Этот фактор приводит также к уменьшению пробивного напряжения.

Напряжение перекрытия $U_{\text{зи пер}}$ большинства исследованных транзисторов не превышает 6 В и находится в пределах $3\text{—}5 \text{ В}$. Такое значение этого параметра является оптимальным как для эффективного функционирования, так и для надежных характеристик приборов.

Для исследований СВЧ-параметров были разработаны и смонтированы два стенда (для измерений $K_{\text{ур макс}}$ и $K_{\text{ш мин}}$; для измерений $K_{\text{ур макс}}$ и $P_{\text{вых}}$ на 1 дБ компрессии), а также специальное зондовое контактное устройство, обеспечивающее измерения этих параметров непосредственно на чипе.

Здесь под максимальным коэффициентом усиления по мощности $K_{\text{ур макс}}$ и коэффициентом шума $K_{\text{ш}}$ подразумевается режим комплексно-сопряженного согласования входа и выхода транзистора с измерительным трактом; под минимальным коэффициентом шума $K_{\text{ш мин}}$ и связанным коэффициентом усиления по мощности $K_{\text{ур}}$ — режим согласования входа транзистора по минимальному значению коэффициента шума.

Принцип измерений $K_{\text{ур}}$ СВЧ-транзисторов основан на сравнении проходных сигналов при калибровке и измерении. Калибровка в этом случае состоит в замещении транзистора отрезком стандартной линии, коэффициент передачи которой близок к единице. В процессе измерений приращение мощности сигнала на входе испытываемого транзистора компенсируется ослаблением, которое вводится прецизионным аттенуатором.

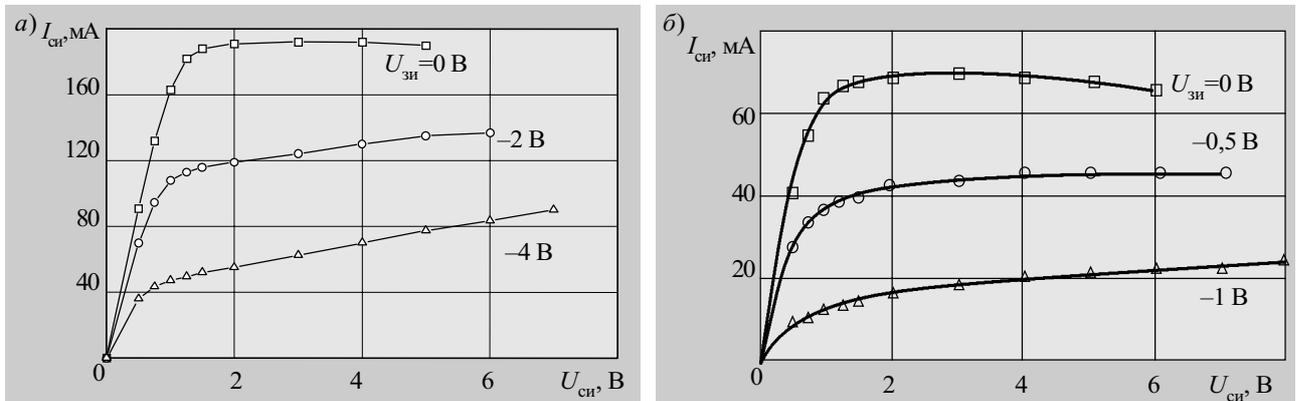


Рис. 5. Типичные выходные ВАХ для образцов № 1 (а) и № 2 (б) транзисторов средней мощности

При измерении коэффициента усиления по мощности сигнал на вход транзистора подается от генератора сигналов. Усиленный транзистором сигнал поступает на измерительный приемник. После настройки с помощью согласующих трансформаторов и элементов настройки по максимуму передачи K_{yP} определяется непосредственно по шкале выходного аттенуатора.

Метод измерения шумовой температуры транзисторов основан на поддержании с помощью аттенуатора постоянного выходного уровня сигнала в СВЧ-тракте. Измерение шумовых характеристик сводится к измерению отношения мощности сигнала на выходе транзистора при определенном изменении уровня мощности сигнала на его входе, например, при подключении на вход транзистора поочередно двух генераторов шума с различными шумовыми характеристиками.

Измерение максимальной выходной мощности транзистора в линейном режиме проводится путем измерения мощности на выходе прибора, согласованного с измерительным трактом по входу и выходу на максимум передачи сигнала. Верхняя граница линейности амплитудной характеристики СВЧ-транзистора определяется путем измерения мощности на выходе прибора, при котором K_{yP} уменьшается на 1 дБ по сравнению с линейным режимом.

Конструктивно измерительное устройство состоит из двух разделенных перегородкой волноводных переходов прямоугольного сечения на П-образный плавно изменяющийся волновод, что обеспечивает непосредственное включение транзистора в измерительный тракт СВЧ. Подача смещения на электроды транзистора через разъем питания осуществляется изоляцией клина от корпуса с помощью диэлектрической прокладки. Контактные площадки электродов транзистора гальванически связаны с клиньями и корпусом с помощью четырех зондов.

С целью устранения излучения СВЧ-мощности в окружающее пространство и уменьшения потерь предусмотрены четвертьволновые короткозамкнутые волноводы в крышке. Испытуемый транзистор устанавливается под зонды топологией вверх и соответствующим образом ориентируется.

Для более качественного согласования входного и выходного импедансов транзистора наряду с внешними трансформаторами емкостного типа в измерительном устройстве предусмотрены дополнительные элементы подстройки. Включение измерительного устройства в СВЧ-тракт осуществляется с помощью двух волноводов.

Проведенные исследования экспериментальных образцов транзисторов показали следующие параметры на рабочих частотах 18, 25 и 36 ГГц:

— максимальный коэффициент усиления по мощности — $6,8 \div 7,0, 5,0 \div 5,7, 4,0 \div 4,5$ дБ на рабочих частотах 18, 25 и 36 ГГц, соответственно;

— выходная мощность на 1дБ компрессии — около 100 мВт;

— минимальный коэффициент шума — не более 3,0 дБ;

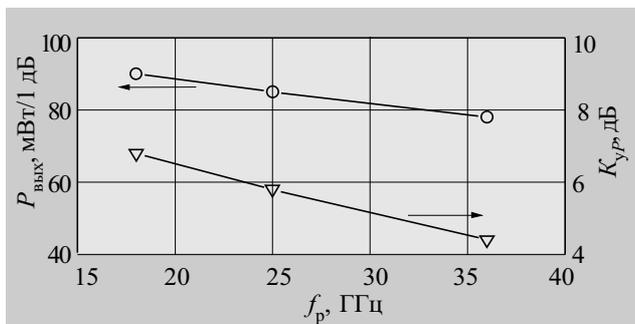


Рис. 6. Частотные зависимости выходной мощности на 1 дБ компрессии ($P_{\text{вых}}$) и коэффициента усиления по мощности (K_{yP})

— ток насыщения "сток-исток" — $80 \div 120$ мА;
 — крутизна ВАХ при нулевом смещении на затворе — $30 \div 35$ мА/В;
 — пробивное напряжение "сток-исток" — более 10 В;
 — ток затвора — менее 0,1 мкА.

Типичные частотные зависимости выходной мощности на 1 дБ компрессии и коэффициента усиления по мощности представлены на рис. 6.

Таким образом, оптимизация конструкции и применение прецизионных технологических процессов формирования омических и барьерных контактов позволяют разрабатывать СВЧ полевые транзисторы средней мощности миллиметрового диапазона длин волн на GaAs с параметрами, которые дают возможность использовать эти приборы в различных схемах усилителей, усилителей/конверторов, генераторов для систем наземной и спутниковой связи, телевидения, радиоастрономии, радиометрии и других устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yamashita Y., Endoh A., Higashiwaki M. et al. High f_T 50-nm-gate InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors lattice-matched to InP substrates // Jpn. J. Appl. Phys.— 2000.— Vol. 39.— P. L838—L840.
2. Osorio R., Berroth M., Narseth W. et al. Analytical charge conservative large signal model for MODFET's validated up to mm-wave range // IEEE MTT-S International Microwave Symposium.— 1998.— Vol. II.— P. 595—598.
3. Fernandez-Barclea M., Tasker P. J., Demmler M. et al. Simplified nonquasi-static FET modelling approach experimentally validated up to 118,5 GHz // Ibid.— 1997.— Vol. III.— P. 1499—1502.
4. Dilorenzo J. V. Progress in the development at low noise high power GaAs FET's / Proc. 6th Biennial Cornell Electrical Engineering Conf.— New York, Aug. 1987.— P. 1.
5. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / Под ред. Ди Лоренцо, Д. Д. Канде-луола.— М.: Радио и связь, 1988.
6. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмена.— М.: Мир, 1988.
7. Пат. 16878 Украины. Спосіб виготовлення польових транзисторів з бар'єром Шотткі / М. Г. Данилов, А. В. Івашук, В. П. Кохан.— Опубл. в Бюл.— 1997, № 4.
8. Drukier J., Camisa R., Jolly S. et al. Medium power GaAs field-effect transistors // Electron Letters.—1975.— Vol. 11.— P. 104—105.
9. D'Asaro J. A., Dilorenzo J. V., Fukui H. Improved performance of GaAs microwave field-effect transistors with low inductance vias through the substrate // IEEE Transactions on Electron Devices.— 1978.— Vol. ED-25, N 10.— P. 527—529.
10. Івашук А. В. Формування омичних контактів з одночасним очищенням поверхні арсеніду галію і її легуванням атомами германію // Наук. вісті НТУУ "КПІ".— 2000.— Вип. 2.— С. 5—8.
11. Пат. 16340 Украины. Пристрій для наплення речовини в вакуумі / А. В. Івашук, В. П. Комаров, В. П. Кохан та ін.— Опубл. в Бюл.— 1997, № 4.
12. Пат. 16341 Украины. Випарник для наплення речовини в вакуумі / А. В. Івашук, В. Г. Корнус, В. П. Кохан, В. М. Яшник.— Опубл. в Бюл.—1997, № 4.
13. Івашук А. В., Босній В. И., Семашко Е. М., Кохан В. П. Электрофизические характеристики контакта титан-GaAs // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы.— 1984.— Вып. 1.— С. 46—51.
14. Пат. 16522 Украины. Спосіб виготовлення структур польових транзисторів з бар'єром Шотткі / В. І. Босній, А. В. Івашук, В. П. Кохан та ін.— Опубл. в Бюл.—1997, № 4.