

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ AlGaAs/GaAs БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

А. М. Бобрешов, Л. И. Аверина, А. В. Хрипушин

Воронежский государственный университет

В работе исследовано влияние электрофизических, геометрических параметров и режима по постоянному току AlGaAs/GaAs биполярного транзистора с гетеропереходом на его верхнюю границу динамического диапазона по блокированию с учетом изменения коэффициента усиления. На основе проведенного исследования предложен подход к выбору параметров для улучшения характеристик электромагнитной совместимости усилителей на биполярных транзисторах с гетеропереходом.

ВВЕДЕНИЕ

Биполярные транзисторы с гетеропереходом (НВТ) в настоящее время нашли широкое применение в системах коммуникационной связи. Из-за малости коэффициента шума, большого коэффициента усиления и высокой линейности они используются как в маломощных усилителях (МШУ), так и в усилителях мощности СВЧ диапазона. Их преимуществом также является однополярное питание (по сравнению с необходимостью в отрицательном напряжении на затворе для полевых транзисторов), что существенно упрощает схемотехнику. Наконец, надо отметить технологическую простоту структуры НВТ. Будучи вертикальной, она существенно экономит площадь кристалла. Кроме того, тонкие слои транзистора формируются в процессе эпитаксии, что снижает требования к литографическому оборудованию и существенно удешевляет прибор [7].

С ростом интереса к проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС), наряду с коэффициентом усиления K_y , важной характеристикой входных усилителей становится верхняя граница динамического диапазона (ВГДД) по блокированию D_{bl} . Этот параметр позволяет с помощью простых инженерных формул рассчитать с приемлемой точностью величины ВГДД по линейности, интермодуляции, перекрестным искажениям и др. [10].

Целью работы является исследование влияния электрофизических, геометрических параметров и режима по постоянному току на величину динамического диапазона по блокированию с учетом коэффициента усиления.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НВТ ТРАНЗИСТОРА

Схематичная структура НВТ выглядит следующим образом (рис. 1)

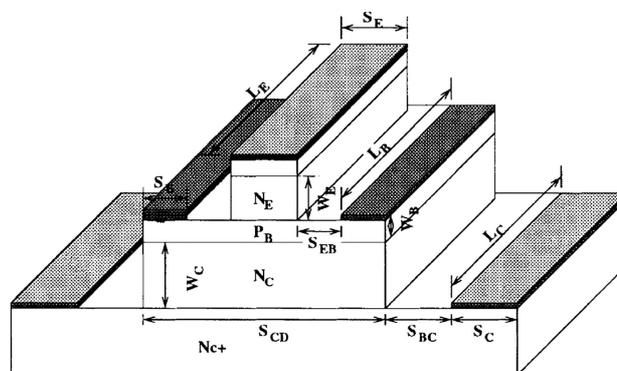


Рис. 1. Схематичная структура НВТ. S_E, S_B, S_C — ширина эмиттера, базы и коллектора соответственно; L_E, L_B, L_C — длина эмиттера, базы и коллектора соответственно; W_E, W_B, W_C — толщина эмиттера, базы и коллектора соответственно; S_{EB}, S_{BC} — расстояние между базой и эмиттером и базой и коллектором соответственно

Для анализа необходимо перейти от схематичной структуры к модели транзистора. Общее количество элементов модели может выбираться, исходя из двух различных соображений. С

одной стороны, эквивалентная схема с большим числом элементов моделирует транзистор в заданном частотном диапазоне с большей точностью. С другой стороны, чем больше в схеме элементов, тем сложнее процесс получения их параметров. Выбор общего количества элементов должен проводиться через достижение компромисса между точностью моделирования и сложностью определения параметров эквивалентной схемы. На рис. 2 представлена модель НВТ наиболее точно описывающая его нелинейные свойства.

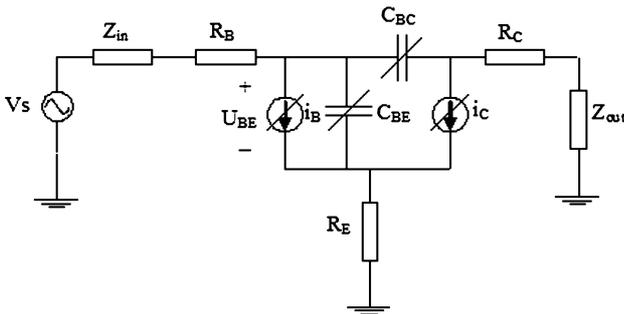


Рис. 2. Нелинейная модель НВТ

Для расчета элементов эквивалентной схемы была использована одномерная модель НВТ, реализованная в предположении о наличии резкого анизотипного гетероперехода и одномерного характера переноса носителей.

Линейными компонентами эквивалентной схемы являются R_E — сопротивление эмиттера, R_B — сопротивление базы, R_C — сопротивление коллектора. Они определяются следующими соотношениями [1, 3]:

$$R_3 = \frac{\rho_{EC}}{S_E L_E} + \frac{1}{q\mu_{nE} N_E} \frac{W_E}{S_E L_E}, \quad (1)$$

$$R_6 = \frac{R_{SB} S_E}{12L_E} + \frac{R_{SB} S_{EB}}{2L_E} + \frac{\sqrt{\rho_{BC} R_{SB}}}{2L_B} \coth S_B \sqrt{\frac{R_{SB}}{\rho_{BC}}}, \quad (2)$$

$$R_x = \frac{R_{SC} S_{CD}}{12L_C} + \frac{\sqrt{\rho_{CC} R_{SC}}}{2L_C} \coth S_C \sqrt{\frac{R_{SC}}{\rho_{CC}}} + \frac{R_{SC} S_{BC}}{2L_C} + \frac{1}{q\mu_{nC} N_C} \frac{W_C}{S_{CD} L_C}. \quad (3)$$

Здесь N_{nE} , N_{pB} , N_{nC} — концентрация примесей эмиттера, базы и коллектора соответственно, μ_{nE} , μ_{nB} , μ_{nC} — подвижность электронов в

эмиттере, базе и коллекторе соответственно, ρ_{EC} , ρ_{BC} , ρ_{CC} — удельные сопротивления контакта эмиттера, базы и коллектора соответственно.

Нелинейными элементами в модели являются источники тока базы i_B и коллектора i_C , а также емкость база-эмиттер C_{BE} и емкость база-коллектор C_{BC} . Для расчета ВГДД используется метод функциональных рядов Вольтерра. Суть метода заключается в том, что исходя из значений линейных и нелинейных параметров модели устройства составляются системы алгебраических уравнений, в которых все свободностоящие токи и напряжения заменяются ядрами соответствующих порядков, а входное воздействие заменяется 1 для линейной подсистемы и 0 для подсистем высших порядков. Эти подсистемы, следовательно, решаются относительно ядра искомой переменной. Для возможности применения метода рядов Вольтерра нелинейные элементы должны быть представлены в виде разложения в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки.

Ток базы является экспоненциальной функцией напряжений база-эмиттер и база-коллектор:

$$I_B = I_{SB1} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{\eta_B V_T}\right) - 1 \right] + I_{SB2} \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{\eta_B V_T}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

где I_{SB1} , I_{SB2} — токи насыщения, зависящие от исследуемых параметров, η_B — фактор идеальности тока базы, $V_T = \frac{k \cdot T}{q}$.

При разложении этой функции в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки получаем [1, 4]

$$i_b = \frac{I_B}{\eta_B V_T} v_{be} + \frac{I_B}{2\eta_B^2 V_T^2} v_{be}^2 + \frac{I_B}{6\eta_B^3 V_T^3} v_{be}^3 \equiv g_1 v_{be} + g_2 v_{be}^2 + g_3 v_{be}^3, \quad (5)$$

где I_B — ток базы в рабочей точке, i_b и v_{be} — малосигнальные компоненты тока базы и напряжения база-эмиттер.

Ток коллектора также моделируется как

$$I_C = I_{SC1} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{\eta_C V_T}\right) - 1 \right] + I_{SC2} \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{\eta_C V_T}\right) - 1 \right], \quad (6)$$

где I_{SC1} , I_{SC2} — токи насыщения, зависящие от исследуемых параметров, η_C — фактор неиде-

альности тока коллектора. При разложении в ряд [4, 4]:

$$i_c = \frac{I_C}{\eta_C V_T} v_{be} + \frac{I_C}{2\eta_C^2 V_T^2} v_{be}^2 + \frac{I_C}{6\eta_C^3 V_T^3} v_{be}^3 \equiv (7)$$

$$\equiv g_{m1} v_{be} + g_{m2} v_{be}^2 + g_{m3} v_{be}^3,$$

где I_C — ток коллектора в рабочей точке, i_c — малосигнальный компонент тока коллектора.

Емкость база-эмиттер определяется из заряда, накопленного в переходе база-эмиттер Q_{BE} который в свою очередь является суммой диффузионного и барьерного заряда [1, 3, 4]:

$$q_{be} = (C_{diff} + C_{depl}) v_{be} + \left(\frac{I_C}{2\eta_C^2 V_T^2} \tau_B + \frac{I_B}{2\eta_B^2 V_T^2} \tau_E + \frac{C_{depl}}{4(V_{bi} - V_{BE})} \right) v_{be}^2 + \left(\frac{I_C}{6\eta_C^3 V_T^3} \tau_B + \frac{I_B}{6\eta_B^3 V_T^3} \tau_E + \frac{C_{depl}}{8(V_{bi} - V_{BE})^2} \right) v_{be}^3 \equiv (8)$$

$$\equiv c_1 v_{be} + c_2 v_{be}^2 + c_3 v_{be}^3,$$

$$C_{depl} = A_E \sqrt{\frac{q \varepsilon_E \varepsilon_B N_{nE} N_{pB}}{2(\varepsilon_E N_{nE} + \varepsilon_B N_{pB})(V_{bi} - V_{BE})}}, (9)$$

$$C_{diff} = \frac{I_C}{\eta_C V_T} \tau_B + \frac{I_B}{\eta_B V_T} \tau_E, (10)$$

где τ_B — время пролета неосновных носителей в базе, τ_E — время пролета неосновных носителей в эмиттере, A_E — площадь эмиттера, N_E — концентрация примесей в эмиттере, V_{bi} — внутренний потенциал перехода база-эмиттер, V_{BE} — постоянное напряжение база-эмиттер, $\varepsilon_E, \varepsilon_B$ — диэлектрические проницаемости эмиттера и базы соответственно.

Емкость база-коллектор определяется из следующих соотношений:

$$C_{BC} = \varepsilon_C A_C \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{1}{2}} + \frac{\varepsilon_C A_C}{2} \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{3}{2}} V_{CB} + \frac{3 \varepsilon_C A_C}{8} \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{5}{2}} V_{CB}^2 + (-\frac{\varepsilon_C A_C}{2} \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{3}{2}} - \frac{3 \varepsilon_C A_C}{4} \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{5}{2}} V_{CB}) v_{CB} + (\frac{3 \varepsilon_C A_C}{8} \sqrt{\frac{q N_{nC}}{2 \varepsilon_C}} (V_{bi} + V_{CB})^{\frac{5}{2}}) v_{CB}^2, (11)$$

где ε_C — диэлектрическая проницаемость коллектора, V_{CB} — постоянное напряжение коллектор-база, v_{CB} — малосигнальная компонента напряжения коллектор-база.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НВТ НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

В работе анализируется транзистор со следующими параметрами: толщина базы 0,1 мкм, толщина коллектора 1 мкм, концентрация примесей эмиттера $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, концентрация примесей базы 10^{25} м^{-3} , концентрация примесей коллектора $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Модель рассчитывалась на частоте 10 ГГц. Исследовались зависимости K_y и D_{ω} от толщины базы W_B , толщины коллектора W_C , концентрации примесей эмиттера N_{nE} , концентрации примесей базы N_{pB} и концентрации примесей коллектора N_{nC} с целью использования его потенциальных возможностей для увеличения значения ВГДД. Изменение W_C и N_{nC} не оказали существенного влияния на нелинейные характеристики транзистора. Результаты, полученные для W_B, N_{nE} и N_{pB} представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3 а, увеличение толщины базы W_B позволяет добиться увеличения ВГДД, но в результате снижается K_y . Поэтому выбор толщины базы проводится на основе компромисса с учетом допустимого изменения K_y .

С ростом концентрации основных носителей в эмиттере N_{nE} растут ВГДД и K_y , поэтому за счет повышения концентрации может быть увеличено значение ВГДД по блокированию (рис. 3 б). Однако в этом случае необходимо помнить, что рост концентрации носителей ведет к увеличению емкости база-эмиттер, что в свою очередь приводит к уменьшению граничной частоты усилителя f_T . Напротив, увеличение концентрации акцепторов в базе хоть и приводит в свою очередь к увеличению ВГДД, но сопровождается резким падением коэффициента усиления (рис. 3 в). Здесь опять же можно говорить о выборе компромисса между исследуемыми величинами.

На величину ВГДД влияют не только конструктивные параметры транзистора, но и режим по постоянному току.

Из рис. 4 видно, что с ростом напряжения на базе U_{ω} коэффициент усиления K_y растет, а ВГДД по блокированию имеет минимум, следовательно, существует возможность выбора

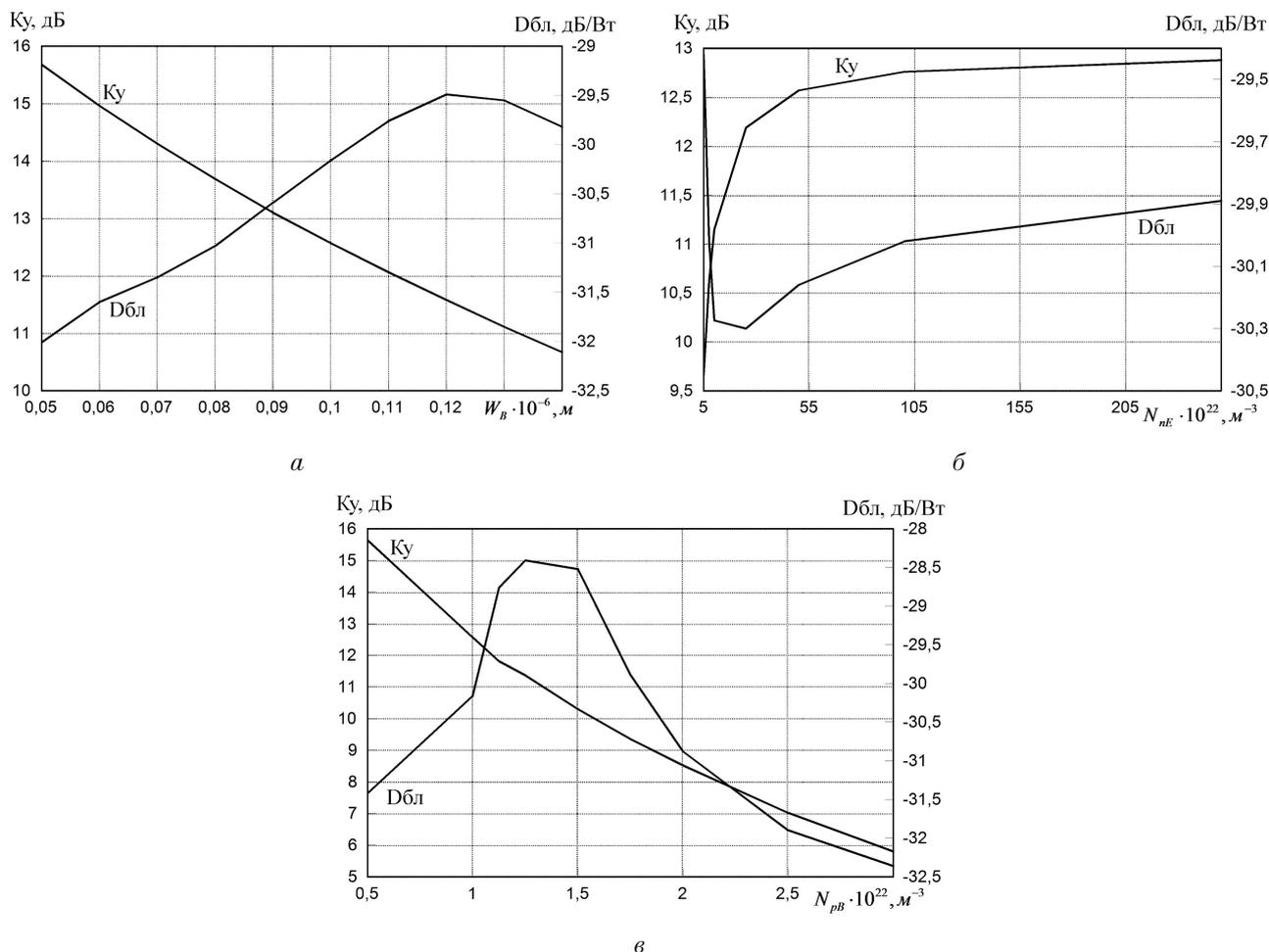


Рис. 3. Зависимость K_y и $D_{бл}$ (ВГДД) от конструктивных параметров НВТ

рабочей точки с приемлемыми значениями K_y и ВГДД по блокированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были выбраны следующие параметры НВТ, позволяющие добиться увеличения ВГДД при допустимом ухудшении других характеристик: $W_B = 0.12 \text{ мкм}$, $N_{nE} = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $N_{pB} = 1.1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Нелинейные свойства усилителя в присутствии интенсивной помехи будем характеризовать коэффициентом блокирования с учетом изменения коэффициента усиления устройства:

$$\bar{K}_{бл} = \frac{K_{yopt}}{K_y} \cdot K_{бл},$$

где K_y — коэффициент усиления МШУ с исходными параметрами, K_{yopt} — коэффициент усиления МШУ с параметрами, выбранными на основе анализа.

Для получения интегральной оценки расширения ВГДД по блокированию рассмотрим

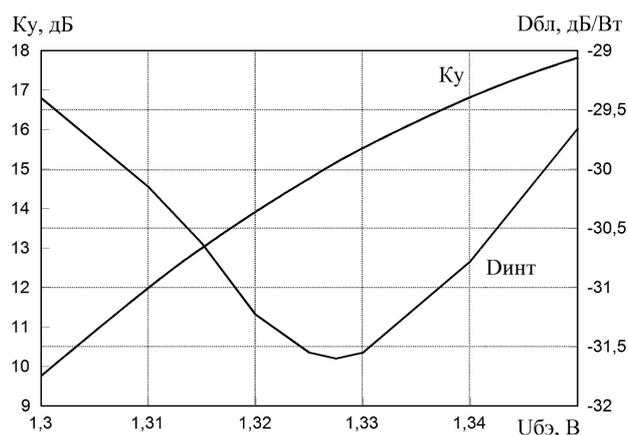


Рис. 4. Зависимость K_y и $D_{бл}$ (ВГДД) от режима НВТ по постоянному току

зависимость $\bar{K}_{бл}$ от мощности входного сигнала для НВТ с исходными параметрами (кривая 1 на рис. 5) и НВТ с параметрами, выбранными на основе анализа (кривая 2 на рис. 5). Как видно из рис. 5 для уровня блокирования в 3 дБ значение ВГДД может быть увеличено на

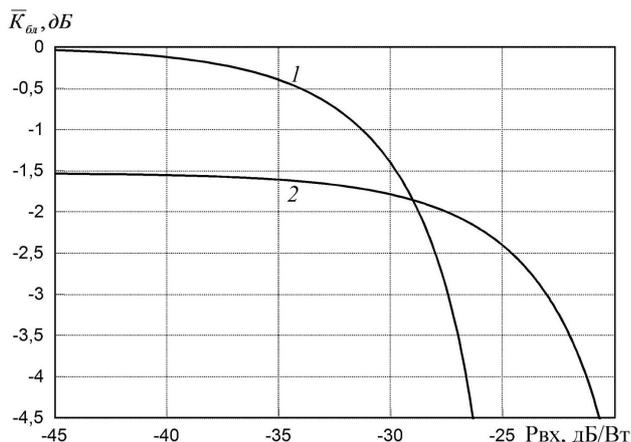


Рис. 5. Зависимость \bar{K}_{60} от мощности входной помехи для НВТ с исходными (1) и полученными в результате анализа (2) параметрами

6 дБ при незначительном уменьшении K_y (-1,5 дБ).

Приведенная методика позволяет определить значения электрофизических, геометрических параметров НВТ и режима по постоянному току с улучшенными характеристиками электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J. Intermodulation Mechanism and Linearization of AlGaAs/GaAs HBT's / J. Lee, W. Kim, Y. Kim, T. Rho, B. Kim // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — V. 45, № 12, December 1997.
2. Iwamoto M. Linearity Characteristics of GaAs HBT's and the Influence of Collector Design / M. Iwamoto, P. M. Asbeck, T. S. Low, C. P. Hutchinson, J. B. Scott, A. Cognata, X. Qin, L. H. Camnitz, D. C. D'Avanzo // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — V. 48, № 12, December 2000.
3. Kim W. The Effects of C_{bc} on the Linearity of AlGaAs/GaAs Power HBT's / W. Kim, S. Kang, K. Lee, M. Chung, Y. Yang, B. Kim // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — V. 49, № 7, July 2001.
4. Kim W. Analysis of Nonlinear Behavior of Power HBT's / W. Kim, S. Kang, K. Lee, M. Chung, J. Kang, B. Kim // IEEE transactions on microwave theory and techniques. V. 50, № 7, July 2002.
5. Palfinger G. Modelling the Heterojunction Bipolar Transistor with VBIC. Technical University Graz, 2000.
6. Hovinen A. Process development and device modelling of gallium arsenide heterojunction bipolar transistors. Dissertation for the degree of doctor of science in technology. Helsinki University of Technology. 2001.
7. Шахнович И. Твердотельные СВЧ приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции / И. Шахнович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2005. — №4.
8. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие. — Томск: Изд-во НТЛ, 2000. — 426 с.
9. Батенков В.А. Электрохимия полупроводников: учебное пособие. Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2002. — 162 с.
10. Алгазинов Э.К. Входные усилители СВЧ в свете требований электромагнитной совместимости / Э.К. Алгазинов, В.И. Мнюян // Радиотехника. — 1985. — № 8.
11. Алгазинов Э.К. Влияние электрофизических и геометрических параметров GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки на нелинейные характеристики входных малошумящих усилителей / Э. К. Алгазинов, Л. И. Аверина, А. М. Бобрешов, А. В. Дыбой // Известия вузов. Электроника. — 1998. — № 6.