

НА ПЕРЕДОВЫХ РУБЕЖАХ НАУКИ

А. Н. Выставкин

Регенеративные полупроводниковые параметрические усилители СВЧ

Одной из центральных и постоянных проблем радиотехники и электроники, как известно, является создание приемников во всех диапазонах радиочастот, обладающих наибольшей чувствительностью, естественно, при требуемых других высоких характеристиках: полосе усиления и перестройки, динамическом диапазоне, амплитудной, частотной и фазовой стабильности и др. В диапазоне СВЧ предел чувствительности приемников, описываемый их шумовой температурой $T_{ш}$, определяется либо шумовой температурой антенны, либо квантовым пределом чувствительности. Шумовая температура антенны на сравнительно низких частотах СВЧ-диапазона в большинстве случаев составляет $T_a \approx 20 \dots 30$ К и в пределе $T_a \approx 3$ К, что соответствует шумам реликтового фона Космоса для охлаждаемой антенны. При ограничении чувствительности приемной системы шумами антенны шумовая температура приемника должна составлять $T_{ш} \leq 0,3T_a \approx 6 \dots 9$ К при усилении входного каскада, обеспечивающем подавление шумов последующего каскада приемного устройства. Квантовый предел температурной чувствительности, проявляющийся на частотах, соответствующих соотношению $h\nu \gg kT$, т. е. в миллиметровом и более коротковолновых диапазонах волн [1], составляет $h\nu/k$. Шумовая температура $T_{ш}$ идеального приемника в этом случае должна быть близкой к этой величине.

Существенный отрезок истории в развитии приемников СВЧ составили охлаждаемые усилители на полупроводниковых диодах и квантовые усилители, или мазеры, работающие принципиально при очень низких температурах, в качестве входных каскадов СВЧ приемных систем. Низкая шумовая температура приемных устройств в обоих случаях достигается за счет низкой шумовой температуры входного каскада.

В 1958 г. А. Улиром была опубликована работа [2], где сообщалось, что с помощью так называемых параметрических усилителей на полупроводниковых диодах с периодически изменяющейся емкостью возможно получение шумовой температуры входного каскада приемника, существенно более низкой, чем его физическая температура. Уже первые полупроводниковые параметрические усилители (ППУ)

в длинноволновой части сантиметрового диапазона имели собственную шумовую температуру меньше его физической температуры, равной комнатной, т. е. $T_{ш} < 300$ К. Этот факт оказался для многих совершенно неожиданным и положил начало эпохе параметрических усилителей.

Принцип регенеративного параметрического усиления электрических колебаний в колебательном контуре с периодически изменяющейся реактивностью (индуктивностью или емкостью) был предложен Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в 30-е годы прошлого столетия [3]. В 1954 г. Б. М. Вулом было предложено использовать полупроводниковый диод при отрицательном смещении в качестве конденсатора, перестраиваемого электрическим смещением [4, 5]. После работы А. Улира стало ясно, что регенеративные параметрические усилители, использующие периодически изменяющуюся емкость полупроводникового диода, открывают возможность резко поднять потенциал систем радиосвязи, радиолокационных станций, систем радиоуправления, систем теплового радиовидения, в том числе радиотелескопов, существенно улучшить характеристики различной радиоизмерительной аппаратуры и т. п.

При разработке ППУ и приемных устройств на их основе встал целый ряд вопросов:

— фундаментального плана: каков механизм шума и предельные возможности по уровню шума, как зависит шум от материала диода и его физической температуры; каковы частотные свойства (диапазоны усиления и механической и электронной перестройки по частоте), способы расширения полосы усиления и предельные возможности этого расширения, амплитудная, частотная и фазовая стабильности, способы обеспечения высокой стабильности, динамический диапазон ППУ и способы его увеличения и др.;

— конструкторско-технологического плана: какова наилучшая технология изготовления полупроводниковых диодов для ППУ; как наилучшим образом включить полупроводниковый диод в СВЧ-структуру ППУ; как сконструировать приемный блок, включая генератор накачки, развязывающие устройства, связь с последующими каскадами и т. п.;

— о наилучшей методике измерения чувствительности и других характеристик ППУ;

— применения в различных радиотехнических системах и комплексах с учетом особенностей радиосигналов, имеющих в них место.

Для скорейшего решения перечисленных вопросов, учитывая важные области применения ППУ, Комиссия Совета Министров СССР по военно-промышленным вопросам издала в 1959 г. постановление, где была определена соответствующая целевая комплексная программа. Руководителем этой программы был назначен академик Владимир Александрович Котельников, а головной организацией был определен Институт радиотехники и электроники АН СССР. Участника-

ми программы были также определены Проблемная радиофизическая лаборатория (ПРФЛ) Московского государственного педагогического института (в настоящее время — Московский педагогический государственный университет), несколько научно-исследовательских институтов радиотехнической и электронной промышленности и ряда других ведомств. Для всех участников программы в ИРЭ был организован постоянный научный семинар, которым руководил В. А. Котельников. Научный семинар по проблемам ППУ с более широким составом участников действовал также и в ПРФЛ, им руководил профессор В. С. Эткин. По теме «ППУ-1», выполнявшейся по названной выше программе в ИРЭ в течение трех лет под руководством В. А. Котельникова, был выпущен отчет более чем в десяти томах. В нем содержались ответы практически на все перечисленные выше вопросы. По существу, этот отчет представлял собой основы теории и инженерных методов расчета ППУ СВЧ. Аналогичный отчет был выпущен также и ПРФЛ, оба отчета были хорошим взаимным дополнением. Оперативный выпуск и рассылка отчетов основным участникам работ по проблеме ППУ способствовали быстрому развитию работ по этой проблеме в нашей стране. Буквально в первые год-два были созданы и опробованы первые ППУ СВЧ в наземных станциях спутникового телевидения, тропосферной и спутниковой связи, в станциях обнаружения и наведения, в радиотелескопах. Одна из разработок требует особого упоминания. Одной из организаций-участниц программы на основе лабораторного макета ППУ, рассчитанного и изготовленного в ИРЭ по договору с этой организацией в рамках Программы, был рассчитан и изготовлен экспериментальный макет ППУ для станции обнаружения и наведения под городом Свердловском. Это повысило радиолокационный потенциал станции примерно вдвое и дало возможность сбить первого мая 1960 г. известный американский самолет-шпион У-2, ведомый Пауэрсом, что не удавалось сделать раньше. Это положило конец подобным полетам над нашей страной.

Теория параметрических усилителей в схемах с циркуляторами

Так называется первый том упомянутого выше отчета по теме «ППУ-1», написанный лично В. А. Котельниковым. Материал отчета не был широко опубликован. Впервые он полностью публикуется в настоящем сборнике.

В основу теоретических построений были положены схемы замещения реальных СВЧ конструкций и методы теории цепей с сосредоточенными постоянными. Хотя эти методы к анализу СВЧ конструкций с размерами, много большими длины волны, как, например, в случае ППУ на основе СВЧ резонатора с включенным в него полупроводниковым диодом, в полной мере не применимы, и таким способом удается

решить не все вопросы, но, как оказалось, они позволяют ответить на большое число принципиальных вопросов.

Основные соотношения. Для достаточно малой области, охватывающей запирающий слой полупроводникового диода, справедливы законы квазистационарного поля, и электрическое поле в ней можно считать потенциальным. Для этой области соотношение между током через диод i и напряжением на диоде u (рис. 1.1)¹⁾ будет

$$u = R_S i + u_3, \quad (1)$$

где $R_S i$ — падение напряжения на полупроводниковой базе диода, R_S — сопротивление базы диода, включенное последовательно с емкостью его запирающего слоя и являющееся постоянной величиной,

$$u_3 = f(q) \quad (2)$$

— падение напряжения на запирающем слое,

$$q = \int_{-\infty}^t i dt$$

— заряд на запирающем слое. Зависимость (2) — нелинейная. Чтобы получить периодически изменяющуюся емкость запирающего слоя, к диоду подводят колебания накачки от специального генератора (генератора накачки).

Рассмотрим случай, когда в усилителе присутствуют только эти колебания. Напряжение накачки на запирающем слое в общем виде будет связано с зарядом соотношением $u_{нз} = f(q_3)$, где q_3 — соответствующий заряд на запирающем слое (без учета заряда, соответствующего постоянному отрицательному напряжению смещения). Пусть далее в усилителе возникают дополнительные малые колебания от подаваемого сигнала. Тогда

$$u_n = u_{нз} + u_d = f(q_3 + q_c) = f(q_3) + \frac{\partial f(q_3)}{\partial q_3} q_c \quad (3)$$

где u_d и q_c — добавочные напряжение и заряд от сигнала. Отсюда

$$u_d = \frac{1}{C} q_c, \quad (4)$$

где

$$\frac{1}{C} = \frac{\partial f(q_3)}{\partial q_3}. \quad (5)$$

¹⁾ Номера рисунков даются по отчету, см. настоящий сборник. С. 181.

Соотношение между током через диод и напряжением малых добавочных колебаний на нем, вызванных сигналом (далее индекс «с» будем опускать), будет

$$u_n = R_s i + \frac{1}{C} q, \quad (6)$$

где

$$q = \int_{-\infty}^t i dt, \quad (7)$$

Для описания процессов в усилителе необходимо также знать соотношение между током i и напряжением u для внешней области, охватывающей диод [6], для любого линейного двухполюсника, а внешняя область по отношению к диоду может рассматриваться как такой двухполюсник, соотношение между током и напряжением будет таким же, как и для схемы замещения, изображенной на рис. 1.2, а. В этой схеме $e(t)$ — напряжение при холостом ходе, т. е. напряжение при отсоединенном диоде, когда $i = 0$. Величина $z(\omega)$ — некоторое комплексное сопротивление, зависящее от частоты соответствующего тока. Таким образом, полная схема, описывающая колебания, вызванные в усилителе сигналом, примет в соответствии с рисунком 1.2, а и соотношением (6) вид, изображенный на рис. 1.3, независимо от того, содержит ли усилитель сосредоточенные емкости и индуктивности или распределенные в виде волноводов, объемных резонаторов и т. п.

Для дальнейшего анализа процессов в усилителе примем, что под действием колебаний накачки емкость запорного слоя диода изменяется по закону

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} [1 + 2M \cos(\omega_n t + \varphi_n)], \quad (8)$$

где $2M$ — коэффициент модуляции емкости диода, $1/C_0$ — постоянная составляющая обратной величины емкости запорного слоя диода при его смещении постоянным напряжением, φ_n — начальное значение фазы.

Изложенное выше является обоснованием применения методов теории цепей с сосредоточенными постоянными, включая их ограничения, к анализу полупроводниковых параметрических усилителей СВЧ. Многие авторы проводили подобный анализ, просто строя схемы ППУ из колебательных контуров с сосредоточенными параметрами. При этом часть результатов была тем не менее правильной: максимальный коэффициент усиления, частотная характеристика в случае простейших резонаторов, шумовая температура, предельно допустимая глубина модуляции емкости диода и др. Помимо обоснования подобных расчетов, основные соотношения, приведенные выше, указывают на параметр — это $z(\omega)$, который должен быть получен из электродинамического расчета.

Некоторые параметры ППУ. Отсылая читателя в отношении выкладок к первоисточнику, приведем некоторые результаты, полученные В. А. Котельниковым.

Прежде всего, это шумовая температура ППУ. На рис. 3.2 изображена зависимость шумовой температуры двухчастотного (двухконтурного) усилителя $T_{ш}$ от частоты сигнала ω_1 , второй (холостой) частоты ω_2 и критической частоты ω_K полупроводникового диода

$$\omega_K = \frac{M}{R_S C_0} \quad (9)$$

при температуре усилителя, точнее, при температуре диода, равной комнатной, т. е. 300 К. Видно, что при определенных параметрах шумовая температура усилителя действительно может быть ниже его физической температуры. Связано это с регенеративным механизмом усиления за счет периодического изменения реактивного параметра (в данном случае емкости). Минимальное значение шумовой температуры

$$T_{ш \min} = 2 \frac{\omega_1}{\omega_K} \left(\frac{\omega_1}{\omega_K} + \sqrt{\frac{\omega_1^2}{\omega_K^2} + 1} \right) T_S \quad (10)$$

стремится к нулю при стремлении к нулю R_S , правда, при этом стремится к нулю и полоса усиления усилителя. Видно также, что $T_{ш \min}$ пропорциональна физической температуре диода, откуда ясно, что при снижении температуры диода снижается и шумовая температура усилителя.

Анализ также показал, что при использовании простейшего резонатора в случае вырожденного двухчастотного ППУ (холостая частота примерно равна частоте сигнала) произведение полосы усилителя $\Delta\omega$ (по половине уровня усиленного сигнала) на коэффициент усиления в центре полосы K_M составляет

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} K_M = M \left(1 - \frac{\omega}{\omega_K} \right) \quad (11)$$

или при $\omega_K \rightarrow \infty$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} K_M = M. \quad (12)$$

В. А. Котельников в отчете предложил способ расширения полосы усилителя за счет применения так называемой схемы компенсации, которая представлена на рис. 7.1. Последовательно с диодом, эквивалентная схема которого приведена на рис. 1.3, подключена реактивность $jX_{ш}$; $R_{Э}$, $\varepsilon_{Э}$ — эквивалентное сопротивление и ЭДС источника сигнала. При надлежащем выборе $X_{П}$ и $X_{Ш}$ в случае вырожденного ППУ соотношение для $\Delta\omega$ и K_M получается таким:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \sqrt{K_M} \approx M \left(1 - \frac{\omega}{\omega_K} \right), \quad (13)$$

или при $\omega_K \rightarrow \infty$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \sqrt{K_M} = M. \quad (14)$$

Видно, что при прочих равных условиях при применении простейшей схемы компенсации можно расширить полосу усилителя примерно в $\sqrt{K_M}$ раз.

Развитие теории ППУ. Идеи, заложенные в отчете по теме «ППУ-1», нашли развитие в работах лаборатории В. А. Котельникова, которая была создана в начале 1960 года в Институте радиотехники и электроники АН СССР в качестве головной для выполнения упомянутой выше программы по ППУ.

Соответствующие результаты исследований [6–8] следующие:

- развиты методы расширения полсы усиления ППУ, предложены методы перестройки ППУ;
- рассмотрены вопросы стабильной работы ППУ, включая методы их стабилизации;
- изучены вопросы построения волноводно-коаксиальных конструкций ППУ с максимально высокими характеристиками;
- теоретически и экспериментально изучены вопросы построения ППУ миллиметрового диапазона волн.

Существенным вопросом для понимания механизма работы ППУ в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн и получения их высоких характеристик является вопрос включения полупроводникового диода в объемный СВЧ резонатор усилителя. В реальном усилителе СВЧ из-за его объемной природы электрическая энергия запасается не только в полупроводниковом диоде, но и в объеме резонатора. Это обстоятельство учитывается коэффициентом включения в резонатор [8]:

$$k = \int_{\Delta V} E_r^2 dV / \int_V E_r^2 dV, \quad (15)$$

где E_r — электрическая составляющая электромагнитного поля в резонаторе, включая диод; ΔV — объем запорного слоя, в котором присутствует электрическая составляющая поля; V — объем резонатора, включая объем запорного слоя.

Коэффициент включения k (15) есть не что иное, как отношение электрической энергии поля в запорном слое диода к электрической энергии во всем резонаторе, включая запорный слой диода. Коэффициент включения (15) существенным образом влияет на характеристики усилителя: чем он меньше, тем меньше полоса усиления, полоса электронной перестройки, усиление и др. Идеальным является случай, когда $k = 1$.

Развитый электродинамический подход позволяет рассматривать и исследовать ППУ как резонатор, включенный в волноводный или коаксиальный тракт с применением всех известных электродинами-

ческих методов исследований таких СВЧ-структур. Развитый подход дает также возможность рассматривать коэффициент включения диода в конкретный резонатор и с его учетом — характеристики усилителя [8]. Такой подход дает возможность понять влияние геометрии СВЧ-камеры усилителя на коэффициент включения диода и, далее, на характеристики усилителя. Путь увеличения коэффициента включения диода — это минимизация объема СВЧ-камеры усилителя с целью снижения объемов, где запасается электрическая энергия поля помимо запорного слоя диода. Развитые представления и методы расчета позволили сконструировать параметрические диоды и СВЧ-камеры усилителей с максимально возможными коэффициентами включения, что дало, в свою очередь, возможность получить максимально широкие полосы усиления и другие высокие характеристики усилителей. Они были реализованы на изготовленных экспериментальных макетах усилителей.

Дальнейшее развитие работ по полупроводниковым параметрическим усилителям СВЧ в стране. Среди важнейших результатов, полученных в последующие годы после завершения создания теоретических основ ППУ СВЧ, следует отметить освоение электронной промышленностью технологических методов получения эпитаксиальных структур из арсенида галлия и изготовление на их основе параметрических диодов с барьером Шоттки. Важным было также создание в ПРФЛ МГПУ и ряде институтов радио- и электронной промышленности интегральных конструкций приемных камер и волноводных структур усилителей, включая вторые каскады приемников, на основе охлаждаемых транзисторных усилителей с температурой шума до 50 К и ниже, создание экономичных и малогабаритных охлаждающих устройств до температур азотного и водородного уровней и всех остальных необходимых электронных блоков сверхвысокой, промежуточной и низкой частот.

На описываемом этапе определяющую роль сыграла также программа, принятая в 1963 году по инициативе министра электронной промышленности СССР А. И. Шокина, в соответствии с которой в Киеве был создан научно-исследовательский институт «Сатурн» во главе В. Н. Алфеевым с экспериментальными и серийными заводами, а также цеха в производственных подразделениях НИИ «Сапфир» в Москве и НИИ «Салют» в Горьком (ныне — Нижний Новгород), в которых было развернуто производство названной выше элементной базы полупроводниковых параметрических усилителей СВЧ. Важной также была организация прикладных лабораторий и производственных участков для изготовления приемных систем СВЧ с ППУ на входе в Московском НИИ приборостроения, НИИ радио, Институте космических исследований АН СССР, Главной астрономической обсерватории АН СССР (впоследствии перешедшей в состав Специальной астрономической обсерватории АН СССР).

Вследствие всего сказанного созданные на основе ППУ приемники СВЧ, включая приемники миллиметрового диапазона, начиная с 1962–1963 гг., обеспечили и долгое время (25–30 лет) продолжали обеспечивать высокий потенциал важнейших радиотехнических комплексов страны в таких областях, как спутниковое телевидение (включая телевизионное вещание за рубежом), спутниковые и тропосферные системы связи Министерства обороны и Министерства связи, а также наземных, самолетных и спутниковых радиолокационных станций, систем космической разведки и целеуказания, радиотелескопов и самолетных радиометрических лабораторий.

Как это часто бывает в технике, к настоящему времени ведущее положение у полупроводниковых параметрических усилителей СВЧ постепенно отобрали усилители на неохлаждаемых и охлаждаемых полевых транзисторах.

Литература

1. *А. Н. Выставкин, В. В. Мигулин.* Приемники миллиметровых и субмиллиметровых волн. Радиотехника и электроника, 1967, т. 12, № 11.
2. *А. Улир.* Потенциальные возможности полупроводниковых диодов в ВЧ-связи. Ргос. IRE (пер. с англ.), 1958, т. 46, № 6.
3. *Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси.* К вопросу о параметрической регенерации. Изв. электропромышленности слабого тока, 1935, № 3.
4. *Б. М. Вул.* О емкости переходных слоев в полупроводниках. ДАН СССР, 1954, т. 96, № 2.
5. *Б. М. Вул.* Авторское свидетельство № 110441, 1954.
6. *А. Н. Выставкин.* К электродинамике полупроводниковых параметрических усилителей СВЧ, Отчет по теме «ППУ-1» (руководитель В. А. Котельников), ИРЭ АН СССР, 1960, т. 10.
7. *А. Н. Выставкин.* Включение полупроводникового диода с периодически изменяющейся емкостью в СВЧ-резонаторов. Вопросы Радиоэлектроники. Сер. Полупроводниковые приборы, 1962, № 3.
8. *А. Н. Выставкин, С. М. Клич.* К расчеты характеристик полупроводникового параметрического усилителя 8-мм диапазона. Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер. Общетехническая, 1967, № 27.