

зависимостей, получаемых подобным способом, — зависимость степени перекрытия волновых функций различных ям от расстояния между ними.

Представляет интерес форма гиперповерхности, на которой ищется минимум функционала Q . На рис. 3 глубина соответствующего минимума характеризуется зависимостью Ψ^{-1} от $R\sqrt{E}$ при фиксированном значении γ_2 .

Отметим, что довольно громоздкий функционал допускает тем не менее проведение ориентированного расчета. Проведенные выкладки позволили уточнить представляющую интерес область изменения варьируемых параметров, что заметно снизило необходимые затраты машинного времени.

4. Выводы. Наиболее важными для приложений, по-видимому, являются результаты, полученные для дальней области. Она начинается с расстояний порядка 3—4 радиусов локализации. Каждая из функций ψ_1 и ψ_2 практически совпадает с атомной, включая лишь экспоненциально малую добавку от «чужой» ямы. Зависимость от разностей энергий Δ практически отсутствует, хотя на границе области существует участок с заметным еще эффектом квантового отталкивания уровней. При уменьшении расстояния между ямами функции ψ_1 и ψ_2 становятся равными соответственно симметричной и антисимметричной линейным комбинациям атомных функций. Размеры «промежуточной» области определяются величиной разброса уровней, ближняя граница ее находится на расстоянии порядка двух радиусов локализации. Представляется интересной попытка учета этих эффектов при рассмотрении состояний электронов, принадлежащих комплексу сравнительно близких потенциальных ям. Результаты, относящиеся к ближней области, следует рассматривать как явную демонстрацию эффекта сильного отталкивания уровней. Конкретные численные данные, однако, должны восприниматься как ориентировочные ввиду ограниченности класса пробных функций.

Таким образом, с помощью метода оптимальной флуктуации в настоящей работе явно продемонстрирован характер убывания вероятности появления двух близких по энергии состояний в хвосте плотности состояний при сближении их центров локализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Миронов А. Г., Новак М. Г. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1984, 25, № 2, с. 25. [2] Лифшиц И. М. ЖЭТФ, 1967, 53, № 2, с. 743. [3] Бояч-Бруевич В. Л. ЖЭТФ, 1970, 59, № 2, с. 985. [4] Миронов А. Г. ТМФ, 1982, 50, № 2, с. 308.

Поступила в редакцию
28.06.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 2

УДК 621.374.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ НЕЛИНЕЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

В. С. Макаров, В. И. Медведев

(кафедра физики колебаний)

§ 1. Введение. В настоящее время делители частоты находят широкое применение в различных областях науки и техники. На протяже-

нии ряда лет на кафедре физики колебаний исследовался новый тип делителей частоты [1], названных нелинейно-параметрическими делителями. Теоретически объяснен физический механизм работы таких делителей и показано, что при воздействии на высокочастотную нелинейную систему внешнего высокочастотного колебания с частотой ω в ней могут установиться колебания на частоте $\Omega = \omega/n$ (n — целое число), лежащей в интервале собственных частот данной нелинейной системы [2]. Изучено влияние фиксированного времени взаимодействия между делимым колебанием и колебанием поделенной частоты [3]. Экспериментально исследованы нелинейно-параметрические делители частоты на электромеханических маятниках балансного типа [4, 5], электрические делители частоты на электронных лампах по схеме недовозбужденного генератора с цепью Вина [6].

Электромеханические делители частоты на базе промышленных электрических часов позволяли получить кратность деления в одном каскаде $m \leq 20$. Специально сконструированный высокочастотный механический маятник балансного типа давал возможность осуществить деление в $m \leq 100$ раз. Максимальная кратность деления электрического варианта делителя на лампах составляла $m \leq 50$, а на полупроводниковых приборах $m \leq 30$.

Однако из теоретического рассмотрения механизма работы нелинейно-параметрических делителей частоты следует, что указанные выше кратности деления не являются предельными, а могут быть существенно увеличены. Высокие кратности деления частоты могут быть получены путем использования стабильных по добротности и частоте колебательных систем и применения импульсной синхронизации автоколебательных систем. В настоящей работе показана возможность более высокой кратности деления в одном каскаде, что особенно важно в ряде практических случаев. Важным представляется также проведенное экспериментальное изучение работы делителя частоты при высоком уровне шумов в делимом колебании, переходных процессов в делителе при скачкообразном изменении фазы исходного колебания и многокаскадных нелинейно-параметрических делителей частоты.

§ 2. Усовершенствованный нелинейно-параметрический делитель частоты повышенной кратности. Принципиальная схема делителя показана на рис. 1. Основой делителя является высокочастотная колебательная система с собственной частотой $f_0 \approx 330$ Гц, собранная по схеме недовозбужденного генератора с цепью Вина на операционном усилителе $A1$. Резистор $R4$ типа СП5-2 служит для точной установки коэффициента передачи операционного усилителя. Ключ K служит для запуска делителя частоты: при его замыкании в системе возбуждаются колебания, при замыкании ключа колебания постепенно затухают и при определенной их амплитуде начинается процесс деления. Компаратор $A2$, дифференцирующая цепочка $C5R9$, ждущий мультивибратор $O1$, не являющийся необходимым элементом схемы, ключ $V2$ обеспечивают взаимодействие делимого колебания с системой в течение половины периода делимой частоты. При этом достигается наиболее эффективное вложение энергии в систему.

Существенное повышение долговременной добротности недовозбужденного генератора $Q \approx (4 \div 6) \cdot 10^3$ получено в результате использования в схеме операционных усилителей типа К284УД1 с полевыми транзисторами на входе. Кратковременные значения добротности (в течение 2—3 мин) составляли $(2 \div 2,5) \cdot 10^4$. (При ранее использованном в схеме операционном усилителе типа К1УТ401А лишь кратковремен-

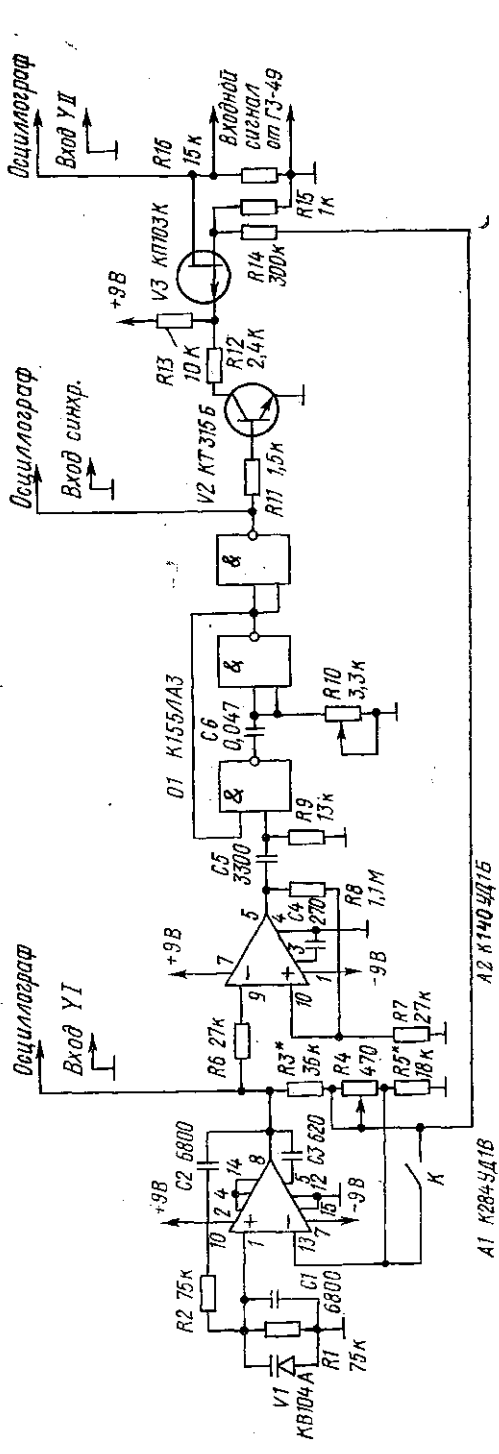


Рис. 1. Принципиальная схема нелинейно-параметрического делителя частоты на полупроводниковых приборах ($\Omega_0/(2\pi) \approx 331$ Гц)

ные значения добротности достигали $Q \sim 10^3$.) Таким образом удалось существенно увеличить кратность деления до $m=120$.

Наряду с увеличением кратности деления при повышении добротности колебательной системы расширяется полоса деления Δf . Например, для $m=60$ Δf составляет 39 Гц при $Q \approx 6000$ и 5,6 Гц при $Q \approx 1000$. Это объясняется нелинейными амплитудно-частотными и фазо-частотными зависимостями в колебательной системе, позволяющими в более широких частотных пределах сохранить когерентный режим деления.

§ 3. Делитель частоты высокой кратности на основе импульсной синхронизации возбужденного генератора. Такой режим работы делителя осуществлялся в той же схеме (см. рис. 1) при уменьшении глубины отрицательной обратной связи. Это вызвало возбуждение генератора; остальные функциональные свойства схемы оставались без изменения. Сущность явления может быть пояснена методом фазовой плоскости [7]. Если время воздействия синхронизирующего импульса на автоколебательную систему равно периоду колебания делимой частоты, то система испытывает две коррекции фазы противоположного знака, в результате чего эффективность воздействия окажется минимальной. Непрерывное воздействие на автоколебательную систему (АКС) можно свести к этому случаю. Если же на АКС действует синхронизирующий импульс длительностью в

полупериода делимой частоты, то это обеспечивает максимальное воздействие на систему. Результаты экспериментального изучения именно этого варианта синхронизации АКС приведены ниже. При этом значительно, до $m \approx 300$, увеличивалась кратность стабильного деления частоты, а кратковременная (2÷3 мин) доходила до $m=430$. Ограничение кратности деления происходило в результате влияния различных технических факторов, приводящих к фазовым флуктуациям колебаний.

Относительная полоса деления $\Delta f/f$ при изменении значения кратности деления монотонно уменьшалась от $7 \cdot 10^{-3}$ при $m=25$ до $4 \cdot 10^{-4}$ при $m=200$. С ростом амплитуды внешнего воздействия плавно расширяется область, в которой может изменяться делимая частота. Такая экспериментальная зависимость для двух кратностей деления: $m=25$ и $m=100$ — приведена на рис. 2 (пунктирные линии). Экспериментальное изучение работы делителя частоты показало, что существует некоторый оптимальный уровень генерации в АКС, при котором достигается как наибольшая кратность деления на один каскад, так и максимально широкая область деления (см. рис. 2, сплошные линии).

При расчете и создании делителей

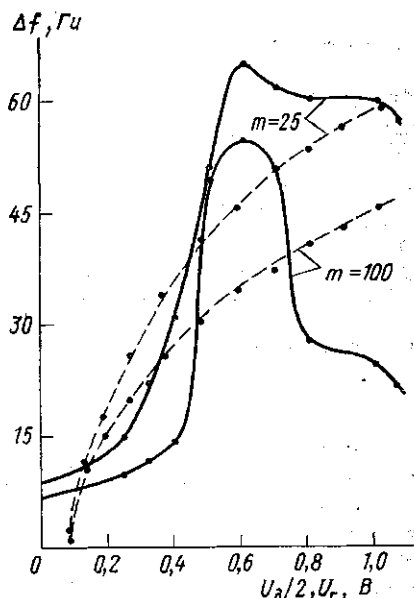


Рис. 2. Зависимость полосы когерентного деления делителя в режиме импульсной синхронизации АКС от амплитуды делимого сигнала (пунктирные линии) и амплитуды АКС в отсутствие воздействия делимого колебания (сплошные линии); U_r и U_d — амплитуды генератора и делимого колебания соответственно

частоты высокой кратности необходимо учитывать влияние изменения окружающей температуры на параметры недовозбужденной или возбужденной колебательной системы и использовать соответствующие ТКЕ и ТКС фазовращающих элементов.

§ 4. Работа нелинейно-параметрического делителя частоты при высоком уровне шума. Изучение устойчивости режима деления под действием механических вибраций было проведено ранее для электро-механических делителей [4]. Исследования на вибростенде показали высокую устойчивость таких делителей к вибрациям большой амплитуды ((10÷30)g, g — ускорение свободного падения) при кратностях $m=10 \div 30$ в диапазоне частот вибраций от 100 Гц до 1 кГц.

Исследование устойчивости работы электрического делителя частоты на полупроводниковых приборах при наличии флуктуаций делимого колебания проводилось путем подачи на его вход наряду с колебанием делимой частоты «белого» шума с широким спектром частот от генератора шума. При этом делимое колебание испытывает как амплитудные, так и фазовые флуктуации. В данной работе мы ограничились исследованием влияния фазовых флуктуаций делимого колебания на процесс деления, так как оно является решающим в нелинейно-параметрическом механизме деления частоты.

Рис. 3 иллюстрирует процесс деления частоты с кратностью $m=10$ при различных уровнях шума в делимом колебании. Из рис. 3

видно, что уширение линии поделенного колебания происходит лишь при максимальном уровне шума (последний фрагмент), который вызывает среднеквадратичные флуктуации фазы делимого колебания $\overline{\Delta\varphi^2} \approx 120^\circ$, что близко к условию нарушения фазовых соотношений в делителе частоты [5].

Таким образом, показано, что фазочувствительные нелинейно-параметрические делители частоты могут эффективно работать при большом уровне шума в делимом колебании, при этом в процессе деления отфильтровывается полезный сигнал от шумовых составляющих. Благодаря высокой избирательности колебательной системы делителей ча-

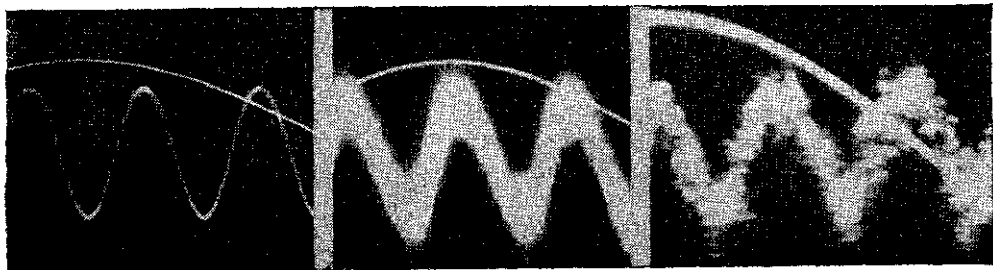


Рис. 3. Фрагменты осциллограмм режима деления частоты при разных уровнях шума сигнала делимой частоты

стоты можно практически полностью избавиться от помех, что видно из рассмотрения осциллограмм.

§ 5. Переходные процессы в нелинейно-параметрическом делителе частоты. Теоретическое исследование переходных процессов в делителях частоты [8] показало, что в зависимости от величины и закона изменения фазы делимого колебания, а также от параметров низкочастотной колебательной системы могут наблюдаться квазикогерентный режим деления, т. е. деление частоты и фазы с определенной точностью; режим преобразования ЧМ в АМ; режим изменения амплитуды с последующим ее восстановлением и др.

Для экспериментального изучения переходных процессов при скачкообразном изменении фазы колебания делимой частоты ($m=10$), которое может носить случайный или регулярный характер, использовался специальный фазовращатель с широким диапазоном значений устанавливаемых фазовых сдвигов.

В результате экспериментов обнаружена высокая устойчивость нелинейно-параметрического делителя частоты к скачкообразным изменениям фазы $|\Delta\varphi_0|$ в диапазоне до 115° . Следует отметить, что примерно такая же величина максимально допустимых фазовых флуктуаций была обнаружена при шумовом воздействии на делитель частоты. При скачкообразном изменении фазы $\Delta\varphi_0$ от стационарной в пределах $60^\circ \leq \Delta\varphi_0 \leq 100^\circ$ наблюдались различные по форме переходные характеристики $A(t)$ с последующим восстановлением стационарной амплитуды A_0 (рис. 4).

Переходная характеристика $A(t)$ без осцилляций соответствует максимально эффективному вложению энергии в колебательную систему и наблюдается в середине полосы деления. Эта зависимость совпадает с теоретически рассчитанной [7]. Наблюдался также колебательный характер переходных процессов, который имеет место при дли-

тельности взаимодействия, отличной от оптимальной ($\tau \geq T/2 = \pi/\omega$) в силу наличия в колебательной системе нелинейных реактивностей.

§ 6. **Двухкаскадный нелинейно-параметрический делитель частоты.** Для получения нескольких когерентных частот от одного высокочастотного источника необходимо использовать многокаскадный делитель частоты. Экспериментально собран и исследован двухкаскадный делитель. Для этого к описанному выше делителю был добавлен еще один более высокочастотный каскад, в функциональные узлы которого были внесены непринципиальные изменения в связи с его работой на более высоких частотах.

Изучение работы двухкаскадного делителя частоты проводилось в двух режимах: а) с подкачкой энергии в высокодобротную колеба-

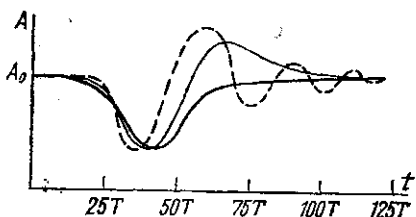


Рис. 4. Различная форма переходных характеристик в нелинейно-параметрическом делителе частоты при скачкообразном изменении фазы сигнала делимой частоты ($60^\circ \leq \Delta\varphi_0 \leq 100^\circ$)

тельную систему и б) с импульсной синхронизацией автоколебательной системы.

В первом случае после деления исходного колебания частоты $f_0 = 358,441$ кГц от кварцевого генератора ГЗ-49 были получены еще два когерентных колебания с частотами $f_1 = 11,948$ кГц и $f_2 = 331,89$ Гц. Кратности деления соответственно равны $m_1 = 30$ и $m_2 = 36$. Общая кратность деления делителя $m = m_1 m_2 = 1080$.

Во втором режиме работы в результате деления были получены два ряда когерентных колебаний с разными кратностями деления в каскадах:

1) $f_0 = 989,924$ кГц, $f_1 = 11,9268$ кГц ($m_1 = 83$), $f_2 = 331,30$ Гц ($m_2 = 36$), общая кратность деления $m = m_1 m_2 = 2988$;

2) $f_0 = 994,5$ кГц, $f_1 = 33,15$ кГц ($m_1 = 30$), $f_2 = 331,5$ Гц ($m_2 = 100$), общая кратность деления $m = 3000$.

Приведенные выше экспериментальные исследования работы нелинейно-параметрических делителей частоты показали следующее: на полупроводниковых приборах могут быть получены высокие кратности деления в одном каскаде ($m = 100 \div 300$); режим деления в нелинейно-параметрических делителях ($m = 10$) не нарушается до уровня шумов, составляющих $\sim 30\%$ от амплитуды делимого колебания; большие случайные или регулярные скачки фазы делимого колебания ($|\Delta\varphi_0| \leq 115^\circ$, $m = 10$) приводят к возникновению переходного процесса, в результате которого восстанавливается стационарная амплитуда и когерентный режим деления; с помощью небольшого числа каскадов можно осуществить деление частоты на много порядков и получить набор когерентных колебаний разной частоты с небольшим содержанием гармоник.

Следует отметить, что нелинейно-параметрические делители частоты могут быть реализованы полностью в интегральном исполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пеннер Д. И. и др. ДАН СССР, 1972, 204, № 5, с. 1065. [2] Карасев М. Д. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1974, 15, № 3, с. 365. [3] Карасев М. Д. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1977, 18, № 4, с. 109. [4] Кара-

сев М. Д. и др. Тр. НИИЧаспром, 1976, 22, с. 29. [5] Балакин Л. В., Карасев М. Д., Медведев В. И. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1981, 22, № 3, с. 3. [6] Балакин Л. В., Карасев М. Д., Медведев В. И. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1981, 22, № 3, с. 60. [7] Радиотехнические цепи и сигналы. Под ред. К. А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. [8] Балакин Л. В., Медведев В. И. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1982, 23, № 4, с. 59.

Поступила в редакцию
01.07.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 2

УДК 550.383:523.4—845:523.038

ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ И НАМАГНИЧИВАНИЕ

В. И. Григорьев, Е. В. Григорьева

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

Попытки выяснения физической природы магнитных полей Земли, Солнца и других небесных тел предпринимались уже давно, но после появления моделей динамо [1] (обширные библиографические сведения см., например, в [2—7]) все более укреплялось мнение, что основная роль при генерации этих полей принадлежит магнитогидродинамическим эффектам.

Цель настоящей работы — обратить внимание еще на один класс эффектов, которые могут существенно влиять на магнитные поля небесных тел. Эти эффекты обуславливаются поляризацией вещества под действием гравитационного поля.

Первое высказывание о влиянии гравитационного поля на перераспределение зарядов в веществе, следствием чего должно быть появление магнитного поля при вращении тела, принадлежит, по-видимому, Сузерленду [8]. Однако его работа, появившаяся в начале века, не имела надежного теоретического основания и была забыта, хотя в свое время она привлекла внимание Лебедева, который поставил эксперимент с целью обнаружить магнитное поле вращающихся тел* [9].

Попытаемся показать, что для объяснения гравитационной поляризации излишне привлечение каких-то новых гипотез, но необходим учет квантовых эффектов.

Первые довольно грубые оценки можно получить таким образом: рассмотрим единичный элемент объема в теле; макроскопическое условие равновесия имеет вид

$$F_{\text{гр}} + F_{\text{эл}} + F_{\text{п}} = 0, \quad (1)$$

где $F_{\text{гр}}$ — действующая на элемент объема гравитационная сила, $F_{\text{эл}}$ — электрическая сила, а $F_{\text{п}}$ отражает взаимодействия, связанные с принципом Паули. Учет последних имеет первостепенное значение: известно, например, что оценки модулей упругости в рамках модели свободных электронов, т. е. модели, учитывающей лишь обязанную принципу Паули упругость при деформации сжатия, дают для метал-

* Опыты Лебедева, как и более поздние эксперименты Сванна и Лангакра [10], не привели к обнаружению ожидавшегося магнитного поля. Однако, существенно усовершенствовав методику эксперимента, Б. В. Васильев в Дубне в 1983 г. смог обнаружить порождение магнитного поля при вращении нейтрального тела [13]. Более подробное освещение этого круга вопросов предполагается в отдельной публикации.