

К. ф.-м. н. А. А. СЕМЁНОВ, д. ф.-м. н. Д. А. УСАНОВ

Россия, Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского  
E-mail: semenovaa@info.sgu.ru

Дата поступления в редакцию  
14.10 2009 г.

Перепечатано из журнала  
«Известия высших учебных заведений. Электроника»,  
№ 4, 2009 г.

## ИНДУКТИВНОСТЬ, ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

*Показана возможность создания миниатюрного пассивного индуктивного элемента, перестраиваемого под воздействием электрического поля. Даны рекомендации по практическому применению индуктивных элементов предлагаемой конструкции.*

Катушка индуктивности является одним из распространенных пассивных элементов, используемых при создании различных электронных схем. Специфика применения катушки в современных электронных приборах с высокой степенью интеграции заключается в том, что она плохо поддается как миниатюризации, так и реализации в интегральном исполнении. В отличие от резисторов и конденсаторов, выполняемых в виде участков полупроводникового кристалла с заданной проводимостью и обратносмещенных  $p-n$ -переходов, катушки индуктивности реализуют либо схемотехнически в виде их гираторных аналогов [1, с. 252], либо в форме плоских спиралей или отрезков передающих линий методами планарной и гибридно-интегральной технологий [2]. Гираторы, представляющие собой по сути активные схемы электронных усилителей с выраженными частотно-зависимыми характеристиками, используются в диапазоне сравнительно низких частот и применяются, в основном, в частотно-избирательных схемах различных фильтров. Катушки, выполненные как в форме плоской спирали или отрезков передающих линий, так и в ином миниатюрном исполнении [3], успешно применяются в ВЧ- и СВЧ-диапазоне, но имеют общий недостаток, заключающийся в том, что изменение значения их индуктивности возможно преимущественно механическим способом.

Для достаточно длинного соленоида длиной  $l$  и площадью сечения витка  $S$  с общим числом витков  $N$  индуктивность равна

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} = \mu_0 \mu n^2 V,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  
 $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды;  
 $n$  — число витков на единицу длины,  $n = N/l$ ;  
 $V$  — объем соленоида,  $V = Sl$ .

Отметим, что значение индуктивности прямо пропорционально квадрату числа витков, занимаемому

объему и магнитной проницаемости среды. Формулы для вычисления индуктивности катушек другой формы более сложны и могут не иметь аналитического вида, но основные пропорции для указанных параметров сохраняются. Изменение этих параметров традиционно используют для управления величиной индуктивности путем механической перестройки катушки (переключения секций катушки, изменения взаимного расположения витков, введения в катушку сердечника, выполненного из магнетика). Переключение секций катушки посредством интегрального коммутатора позволяет управлять значением индуктивности электронным способом, но параметр катушки при этом можно изменять лишь дискретно. Известен способ электронного управления индуктивностью, заключающийся в подмагничивании ферромагнитного сердечника катушки [4]. Однако при этом в конструкцию катушки вводится дополнительная подмагничивающая обмотка, что не способствует миниатюризации изделия в целом.

Предлагаемый в настоящей работе способ электронного управления индуктивностью пассивной катушки заключается во введении в ее конструкцию специфического сердечника, свойства которого изменяются под воздействием приложенного электрического поля, оказывая при этом влияние на индуктивность. В качестве такого сердечника используется кремниевая структура  $n-i-p-i-n$ -типа, обладающая протяженными  $i$ -областями.

Если объект помещается внутрь катушки, то первичное переменное магнитное поле вызывает в нем вихревые токи. Электромагнитное поле катушки при этом изменится под действием поля вихревых токов. Это изменение поля вызывает такой эффект, какой получился бы, если изменить характеристики самой катушки. Анализ изменения свойств катушки под влиянием объекта, особенно если он имеет неоднородную структуру и параметры, изменяющиеся под воздействием внешнего смещения [5, с. 186—189], чрезвычайно сложен.

В общем случае на индуктивность оказывают влияние физические характеристики материала объекта — электрические и магнитные свойства, определяемые его составом и структурой: электропроводность, магнитная проницаемость, геометрические размеры, наличие неоднородностей [5; 6, с. 293].

Для проверки возможности создания индуктивного элемента с электронной перестройкой изготов-

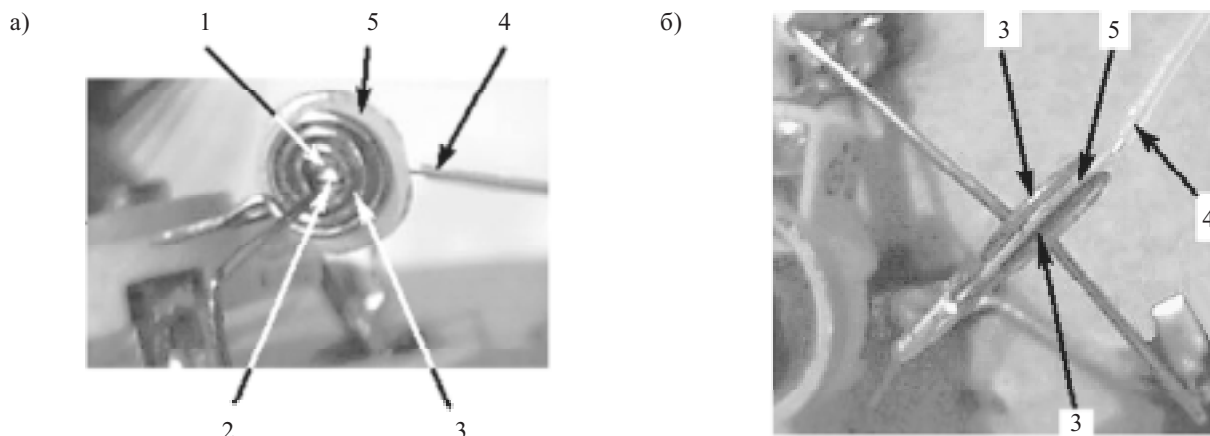


Рис. 1. Конструкция катушки индуктивности, перестраиваемой электрическим полем:  
а — вид сбоку; б — вид сверху

лена двухсекционная катушка (рис. 1), сердечник 1 которой представляет собой кремниевую  $n-i-p-i-n$ -структуру с толщиной  $i$ -областей 200 мкм. В качестве такой структуры использовался выпускаемый промышленностью бескорпусный диод типа 2A505, конструктивно объединяющий в себе две  $p-i-n$ -структуры с общей  $p$ -областью, имеющей гибкий соединительный вывод. Контакты  $n$ -областей диода 2 имеют вид металлических площадок из материала с хорошей проводимостью. Диод, длина которого вместе с контактами составляет  $\approx 0,8$  мм, размещался между двумя секциями катушки 3, намотанными виток к витку в форме плоской спирали на оправке диаметром 0,9 мм, причем изолированный вывод  $p$ -области 4 пропускаться наружу между плоскостями секций, а  $p-i-n$ -структуры заполняли области внутри секций. Сам диод центрировался по оси катушки с помощью тонкой изолирующей диэлектрической прокладки 5.

Обе секции содержали по три витка медного провода в лаковой изоляции диаметром 0,5 мм. Элек-

трический контакт с  $n$ -областями диода осуществлялся с помощью прижимных графитовых электродов 6, не оказывающих влияние на индуктивность катушки (рис. 2).

Таким образом, магнитное поле изготовленной катушки сосредоточено во внутреннем объеме секций, преобладающую часть которого занимали протяженные  $i$ -области (базы) диода, размер которых значительно превышал размеры  $p$ - и  $n$ -областей. В отсутствие прямого смещения базовые области  $p-i-n$ -структур представляют собой по сути диэлектрик с магнитной проницаемостью  $\mu=1$ .

Добротность катушки при введении в нее  $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения снижалась на 15—18%, значение индуктивности уменьшалось на величину порядка 0,5%.

При подаче на  $p-i-n$ -диод напряжения прямого смещения происходит процесс инжекции носителей заряда в высокоомную  $i$ -область диода, в результате чего концентрация носителей заряда в базе возрастет на несколько порядков и, соответственно, увеличивается проводимость базы [7, 8]. В таком случае говорят, что база диода «заливается» носителями заряда или «металлизуется».

Диод, находящийся в магнитном поле исследуемой катушки индуктивности, представляет собой объект, проводимость которого изменяется в широком диапазоне в зависимости от величины приложенного напряжения.

Зависимость параметров катушки от величины напряжения прямого смещения, прикладываемого к  $n-i-p-i-n$ -структуре, выполняющей роль управляемого электрическим полем сердечника, исследовалась с помощью измерителя добротности ( $Q$ -метра) типа Е4-11, позволяющего определить резонансным методом как значение индуктивности, так и величину потерь.

Из приведенных на рис. 3 зависимостей добротности  $Q$  и индуктивности  $L$  исследуемой катушки от напряжения смещения  $U$  видно, что добротность начинает заметно снижаться непосредственно с появлением тока через  $n-i-p-i-n$ -структуру.

Уменьшение добротности с ростом приложенного к  $n-i-p-i-n$ -структуре напряжения может быть

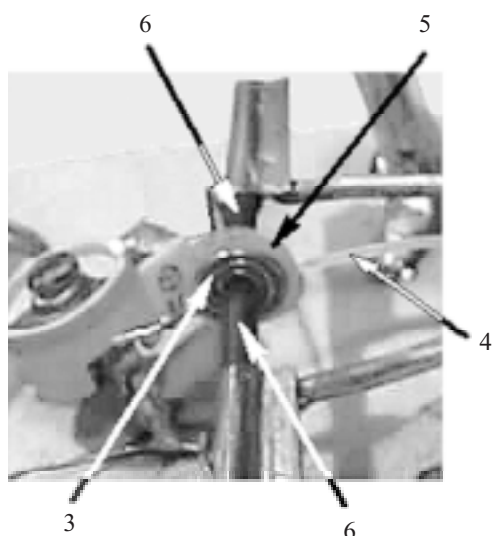


Рис. 2. Внешний вид катушки индуктивности с подключенными угольными контактными прижимными электродами

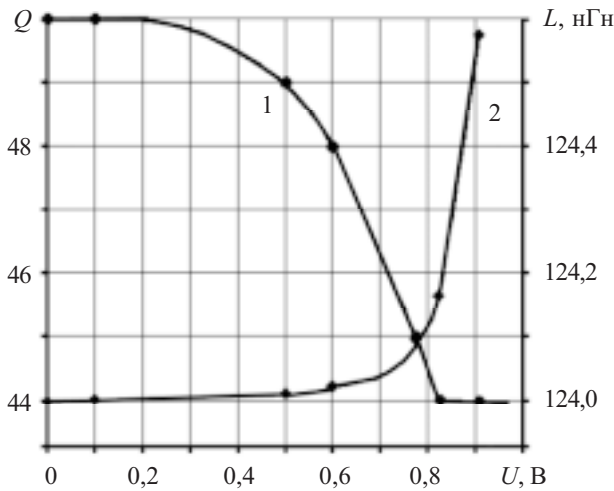


Рис. 3. Экспериментальные зависимости добротности (1) и индуктивности (2) исследуемой катушки от величины напряжения смещения

объяснено увеличением мощности потерь, связанным с ростом числа инжектированных носителей заряда. Наблюдающийся участок «насыщения» на зависимости  $Q$  от  $U$  может быть объяснен возрастанием токов «утечки» через переходы при высоком напряжении смещения на переходах и связанным с этим уменьшением уровня инжекции носителей заряда через переходы.

Форма графика зависимости индуктивности катушки от напряжения смещения обнаруживает сходство с ВАХ  $p-i-n$ -структуры, что позволяет предположить пропорциональность изменения величины индуктивности значению проходящего через структуру тока.

Следует отметить, что обнаруженный эффект в значительной мере зависит от соотношения геометрических размеров катушки и  $n-i-p-i-n$ -структуры. Так, при диаметре намоточного провода 1 мм зависимость индуктивности от напряжения смещения выражена весьма слабо. Большое значение имеет также выбор конкретного экземпляра  $n-i-p-i-n$ -структуры. Как показала практика, диоды имеют значительный разброс характеристик в пределах партии, причем возможна заметная неидентичность характеристик  $p-i-n$ -диодов отдельно выбранной  $n-i-p-i-n$ -структуры. Не последнюю роль, оказывающую влияние на величину как индуктивности, так и добротности, играет качество изготовления самой катушки.

В связи с этим для изготовления управляемой катушки индуктивности можно рекомендовать материалы, обладающие хорошей проводимостью, что повысит начальное значение добротности и позволит выбрать диаметр намоточного провода, сравнимый с размерами  $i$ -областей диода. Геометрия индуктивного элемента определяется преимущественно размерами используемого диода и должна обеспечивать концентрацию магнитного поля катушки в объеме  $p-i-n$ -структуры.

С целью исследования возможности практического применения предложенного электронного эле-

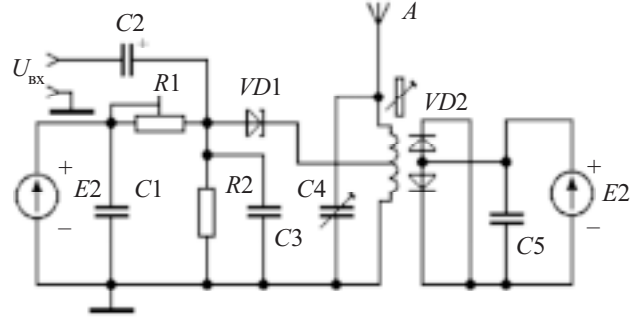


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема УКВ ЧМ-радиопередатчика, в резонансном контуре которого используется катушка индуктивности предложенной конструкции

мента сконструирован простой маломощный УКВ ЧМ-радиопередатчик вещательного диапазона частот 88—108 МГц (FM2) [9, 10], в резонансном контуре которого применена катушка индуктивности описанной выше конструкции. Принципиальная электрическая схема разработанного устройства приведена на рис. 4.

ЭДС источника питания  $E1$  и включенный параллельно источнику резистивный делитель напряжения  $R1, R2$  определяли положение рабочей точки на ВАХ туннельного диода  $VD1$ , при котором возникает устойчивая высокочастотная генерация, причем резистор  $R2$  определял величину внутреннего сопротивления цепи питания диода, в связи с чем его номинал был выбран достаточно малым. Конденсатор  $C3$ , включенный параллельно нижнему плечу делителя  $R1, R2$ , образовывал фильтр цепи питания туннельного диода, а емкость  $C1$  осуществляла блокировку источника питания  $E1$  по высокой частоте.

Катушка индуктивности  $L$  и включенный параллельно ей конденсатор  $C4$  представляли собой колебательный контур, резонансная характеристика которого определяла частоту ВЧ-несущей передатчика. Для согласования величины отрицательного дифференциального сопротивления туннельного диода с сопротивлением потерь контура, а также с целью уменьшения влияния активного элемента на резонансные характеристики было применено частичное подключение диода к контуру генератора, что не вызвало конструктивных трудностей, поскольку управляемая катушка  $L$ , намотанная поверх  $n-i-p-i-n$ -структуры ( $VD2$ ), имела две секции с общим отводом (см. рис. 1). Триммер  $C4$  позволял осуществлять предварительную настройку передатчика на частоту диапазона FM2, не занятую вещательной станцией.

Через разделительную емкость  $C2$  в схему передатчика подавался низкочастотный синусоидальный модулирующий сигнал  $U_{вх}$  от звукового генератора типа ГЗ-112, причем амплитуда сигнала подбиралась по минимуму искажений синусоиды на выходе приемника. Низкочастотный сигнал  $U_{вх}$ , складываясь с постоянным смещением в цепи питания диода, приводил к изменению положения рабочей точки на падающем участке ВАХ туннельного диода, что вызывало девиацию частоты высокочастотного генерато-



ра и, соответственно, частотную модуляцию ВЧ-несущей, излучаемой штыревой антенной *A*.

Диод *VD2* представлял собой *n-i-p-i-n*-структуру типа 2A505, его питание осуществлялось от отдельного источника ЭДС *E2* типа Б5-43, гальванически не связанного со схемой передатчика. Конденсатор *C5* емкостью 47 нФ блокировал источник питания *E2* по высокой частоте. В качестве активного элемента передатчика был использован туннельный диод типа АИ101, остальные элементы схемы имели следующие номиналы:  $R1=220\ \text{Ом}$ ,  $R2=20\ \text{Ом}$ ,  $C1=68\ \text{нФ}$ ,  $C2=10\ \text{мкФ}$ ,  $C3=10\ \text{нФ}$ ,  $C4$  от 8 до 30 пФ. Источник питания *E1* представлял собой гальванический элемент типа 373, ЭДС=1,2—1,5 В.

Прием частотно-модулированного сигнала осуществлялся приемником НАИКО F28D, имевшим опцию автоматического поиска станций и цифровой индикатор настройки на принимаемую станцию (встроенный частотомер).

При изменении напряжения источника питания *n-i-p-i-n*-структуры, управляющей перестройкой индуктивности *L*, в диапазоне 0—0,9 В несущая частота передатчика сдвигалась в среднем на 150 кГц в сторону уменьшения. Графики зависимостей несущей частоты и индуктивности от напряжения на различных участках диапазона (88, 89 и 90 МГц) приведены на рис. 5. Значения индуктивности рассчитаны по графику изменения частоты несущей, исходя из известной величины емкости контура, постоянной в каждом частотном диапазоне.

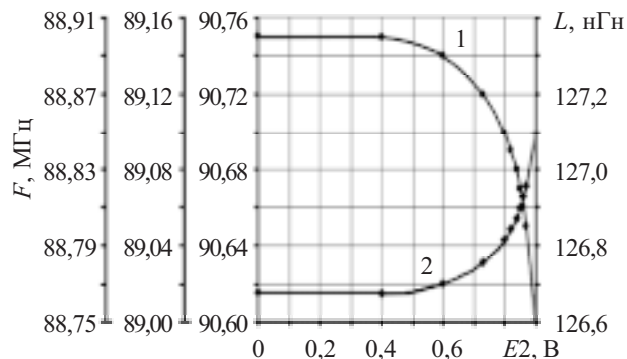


Рис. 5. Графики экспериментальных зависимостей несущей частоты (1) и индуктивности катушки (2) от напряжения

Поскольку источник питания имел дискретное управление с шагом 0,01 В, а разрешение индикатора частоты приемника составляло 0,01 МГц, измерения проводились следующим образом. Точное значение частоты выставлялось по индикатору, после чего передатчик перестраивался на эту частоту изменением величины напряжения смещения. Далее приемник включался в режим автопоиска сигнала передатчика, и если найденная частота отличалась от изначально выставленной, то она корректировалась подстройкой величины напряжения на *n-i-p-i-n*-структуре. После этого процесс повторялся до наиболее точного совпадения заданной частоты с частотой, определенной в режиме автопоиска. Поскольку в процессе поиска станции приемник подходит к несущей со сто-

роны низких частот, погрешность определения частоты носит систематический характер, вследствие чего общий вид зависимости можно считать достоверным, что подтвердилось при проведении измерений на разных участках диапазона.

Из полученного графика видно (см. рис. 5), что зависимость индуктивности от напряжения смещения на *n-i-p-i-n*-структуре хорошо коррелирует с аналогичной экспериментальной характеристикой катушки индуктивности (см. рис. 3), измеренной прибором Е4-11.

Диапазон изменения величины индуктивности можно весьма просто увеличить, изготовив многосекционную катушку, поскольку геометрия *n-i-p-i-n*-структуры позволяет это сделать без значительных конструктивных трудностей. Катушки индуктивности предлощенной конструкции удобны для изготовления в планарной форме, когда витки формируются напылением или травлением материала поверхности вокруг *p-i-n*-структуры, расположенной в объеме. Несомненным преимуществом конструкции является также то, что цепь управления индуктивностью гальванически развязана от схемы, в которую катушка включена.

Таким образом, проведенные исследования показали, что катушка, выполненная на сердечнике, являющемся *p-i-n*-структурой с толстой базой, представляет собой индуктивный элемент, обладающий способностью к перестройке под воздействием потенциала, приложенного к выводам *p-i-n*-структуры. Это позволяет считать доказанной возможность создания миниатюрного пассивного индуктивного элемента, перестраиваемого под воздействием электрического поля. Катушки такого типа в качестве миниатюрных управляемых индуктивностей могут представлять интерес при конструировании современной радиоэлектронной аппаратуры, в схемах генераторов, модуляторов, фильтров, частотно-избирательных усилителей высокочастотного диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1.— М.: Мир, 1983.
2. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, Ю. Н. Алехин и др.— М.: Высш. шк., 1988.
3. Голубев И. Высококачественные индуктивные элементы компании ТОКО // Компоненты и технологии.— 2006.— № 1.— С. 14—16.
4. Шольц Н. Н., Пискарев К. А. Ферриты для радиочастот.— М.: Энергия, 1966.
5. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций.— М.: Высш. шк., 2004.
6. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Диагностика материалов и конструкций.— М.: Высш. шк., 2007.
7. Дзехцер Г. Б., Орлов О. С. *P-i-n*-диоды в широкополосных устройствах СВЧ.— М.: Сов. радио, 1970.
8. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства на полупроводниковых диодах.— М.: Радио и связь, 1987.
9. Янчук Е. В. Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах.— М.: Энергия, 1967.
10. Морозов В. Некоторые схемы на туннельных диодах // Радио.— 1965.— № 4.— С. 37—39.