

УДК 621.38.049.77

Д. ф.-м. н. А. А. СЕМЕНОВ, д. ф.-м. н. Д. А. УСАНОВ, А. А. КОЛОКИН

Россия, Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
SemenovAA@info.sgu.ru

ИНДУКТИВНОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРОЙ

Предложена теоретическая модель плоской пассивной катушки индуктивности с электронным управлением. Приведены расчетные графики зависимости добротности и индуктивности колебательного контура от напряжения прямого смещения $n-i-p-i-n$ -структуры, используемой в качестве специфического сердечника, свойства которого изменяются под воздействием приложенного электрического поля. Сравнение расчетных значений с экспериментальными показало их хорошее соответствие друг другу.

Ключевые слова: электрически перестраиваемая индуктивность, $n-i-p-i-n$ -структура, регулируемый электрическим полем сердечник.

Электрически управляемая полупроводниковая емкость является распространенным элементом микроэлектронных устройств [1]. В то же время проблема изменения параметров индуктивности под воздействием приложенного электрического поля окончательно не решена. Специфика применения катушек индуктивности в современных электронных приборах с высокой степенью интеграции заключается в том, что они плохо поддаются как миниатюризации, так и реализации в интегральном исполнении, а изменять величину их индуктивности можно преимущественно способом механической перестройки.

Экспериментально возможность реализации катушки индуктивности, регулируемой электрическим полем, была показана нами в [2–4]. Предлагаемый способ электронного управления индуктивностью плоской пассивной катушки заключался во введении в ее конструкцию специфического сердечника — его свойства изменяются под воздействием приложенного электрического поля, оказывая при этом влияние на величину индуктивности. В качестве такого сердечника использовалась кремниевая структура $n-i-p-i-n$ -типа, обладающая протяженными i -областями, проводимость которых изменяется в широком диапазоне в зависимости от величины приложенного к структуре напряжения смещения.

Анализ изменения индуктивности такой системы под влиянием введенного в ее состав объекта с неоднородной структурой и параметрами, изменяющимися под воздействием внешнего смещения, чрезвычайно сложен [5, с. 186–189].

В общем случае на величину индуктивности оказывают влияние физические характеристики материала, используемого в качестве сердечника, — электрические и магнитные свойства,

определяемые его составом и структурой (электропроводность, магнитная проницаемость), геометрические размеры сердечника, наличие в нем неоднородностей [5; 6, с. 293–294].

В настоящей работе рассматривается теоретическая модель плоской пассивной катушки с электрическим управлением.

Предложен следующий механизм взаимодействия катушки индуктивности с полупроводниковой структурой $n-i-p-i-n$ -типа. При введении в индуктивный элемент $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения в него, по сути, вносятся отрезки полупроводника собственной проводимости (i -области) с областями неоднородной проводимости (участки p -, n -типа и переходов) и небольшими участками диамагнетика (контакты из меди или золота). Введение в катушку диамагнетиков (материалов с магнитной проницаемостью $\mu < 1$) и материалов, содержащих свободные носители заряда, должно привести к уменьшению ее индуктивности и к снижению добротности, поскольку при изменении концентрации носителей заряда в базе в сердечнике образуются вихревые токи, представляющие собой элементарные катушки индуктивности. Магнитное поле вихревых токов противодействует возбуждавшему их магнитному полю катушки, что в совокупности можно рассматривать как возникновение некоторой эквивалентной индуктивности, взаимодействующей с исходной и включенной параллельно высокоомной $n-i-p-i-n$ -структуре без смещения.

Таким образом, $n-i-p-i-n$ -структуру, помещенную в объеме катушки индуктивности, можно представить в виде комплексного сопротивления Z (характеризующего импеданс полупроводниковой структуры по отношению к вихревым токам), индуктивно связанного через эле-

мент связи L с колебательным контуром, образованным индуктивностью L_0 и сопротивлением потерь контура R_0 и емкостью C , подключенной параллельно L_0 .

Вихревые токи в $n-i-p-i-n$ -структуре создают магнитное поле, которое изменяет первичное магнитное поле H_0 в объеме катушки индуктивности L_0 . Взаимодействие этих токов с первичным магнитным полем катушки L_0 определяется коэффициентом связи M .

Эквивалентная схема колебательного контура, в индуктивном элементе которого размещена кремниевая структура $n-i-p-i-n$ -типа с протяженными i -областями, представлена на рис. 1.

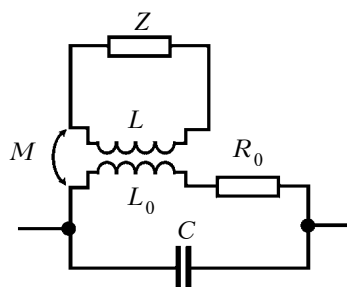


Рис. 1. Эквивалентная схема колебательного контура с кремниевой структурой $n-i-p-i-n$ -типа в объеме катушки

При включении напряжения прямого смещения в $n-i-p-i-n$ -структуре происходит обогащение i -областей носителями заряда, что, с одной стороны, приводит к увеличению количества элементарных индуктивностей, образуемых вихревыми токами, а с другой — увеличивает шунтирующее влияние самой $n-i-p-i-n$ -структуры на величину совокупной индуктивности вихревых токов.

Следует также отметить, что при прямом смещении в $n-i-p-i-n$ -структуре существует собственный ток, образованный направленным дрейфом в поле носителей заряда. Участие этих зарядов в образовании вихревых токов должно привести к образованию спиральных траекторий, что эквивалентно увеличению расстояния между «витками» совокупной индуктивности вихревых токов и, следовательно, к уменьшению ее величины.

Таким образом, внесение в индуктивный элемент $n-i-p-i-n$ -структуры и изменение концентрации носителей заряда в ее высокоомных областях будет приводить к изменению исходной величины индуктивности.

Влияние $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения на параметры колебательного контура можно приблизительно представить на основе экспериментальных данных [2–4] в виде эквивалентного изменения этих параметров:

$$L'_0 = L_0 - N\Delta L; R'_0 = R_0 + K\Delta R,$$

где $\Delta L, \Delta R$ — изменение величины индуктивности и сопротивления потерь контура соответственно;

N, K — коэффициенты пропорциональности, отражающие степень влияния коэффициента связи M на L_0 и R_0 соответственно.

Это позволяет приблизительно представить колебательный контур, в состав которого входит $n-i-p-i-n$ -структура (рис. 1), в виде эквивалентной схемы, изображенной на рис. 2, а. Уменьшение индуктивности отражено здесь противофазным подключением ΔL , параллельно которой включено сопротивление $n-i-p-i-n$ -структуры r , значение которого при отсутствии смещения велико.

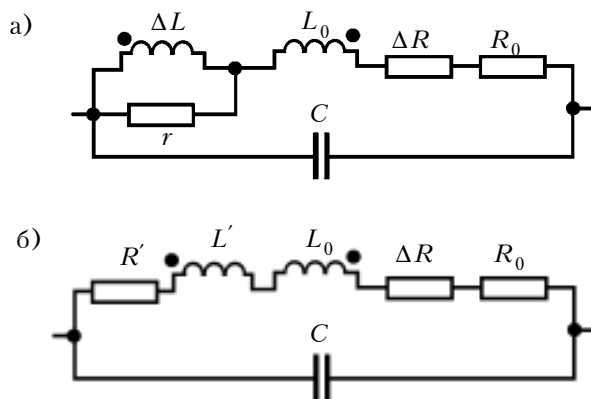


Рис. 2. Эквивалентные схемы колебательного контура с учетом влияния $n-i-p-i-n$ -структуры

При подаче на $p-i-n$ -диоды напряжения прямого смещения происходит процесс инжекции носителей заряда в высокоомные i -области диода (базы), в результате чего концентрация носителей заряда в базе возрастает на несколько порядков и, соответственно, увеличивается проводимость базы [7, 8]. Сопротивление r уменьшается, а величина вихревых токов при этом также изменяется, что и отражается на результирующем магнитном поле индуктивности L'_0 .

Для теоретического анализа влияния $n-i-p-i-n$ -структуры на параметры индуктивного элемента, в состав которого она входит, эквивалентная схема контура была преобразована к виду, приведенному на рис. 2, б, где вместо элементов контура ΔL и r , включенных в исходной схеме параллельно, имеется последовательное соединение L' и R' .

Исходя из выражения для полного сопротивления $Z = \alpha + j\beta$, где $\alpha = \text{Re}Z$, а $\beta = \text{Im}Z$, для последовательно соединенных сопротивления R' и индуктивности L' по схеме на рис. 2, б, справедливы соотношения

$$R' = \frac{\omega^2 \Delta L^2 r}{r^2 + (\omega \Delta L)^2}; L' = \frac{X'_{L'}}{\omega} = \frac{\Delta L r^2}{r^2 + (\omega \Delta L)^2},$$

где L', R' — соответственно, эквивалентные индуктивность и сопротивление потерь, вносимые ΔL и r (см. рис. 2, а);

ω — круговая частота;

$X'_{L'}$ — индуктивное сопротивление.

С учетом этих соотношений запишем выражения для совокупной индуктивности контура, в состав которого входит индуктивный элемент

с управляемой электрическим полем $n-i-p-i-n$ -структурой

$$L'_0 = L_0 - N'L', \quad (1)$$

и для полного сопротивления потерь

$$R'_0 = R_0 + \Delta R + K'R', \quad (2)$$

определяющего добротность индуктивного элемента. (Здесь N' и K' — безразмерные коэффициенты пропорциональности.)

Сопротивление i -слоя $p-i-n$ -структуры в режиме прямого тока хорошо описывается выражением [8]

$$R_i = \omega^2 / (2\mu\tau I_0),$$

где ω — толщина i -слоя;

μ — подвижность носителей заряда;

τ — время жизни носителей заряда;

I_0 — величина прямого тока через структуру.

Для диодов с толстой базой, предназначенных для коммутации СВЧ-колебаний с большим уровнем мощности, время жизни обычно составляет около $5 \cdot 10^{-6}$ с [8].

Для колебательного контура, в состав которого входят параллельно соединенные C и L'_0 , а также сопротивление потерь R'_0 , включенное последовательно с индуктивностью L'_0 , справедливо следующее равенство, определяющее добротность контура:

$$Q = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{L'_0}{C}}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) аппроксимируют экспериментальные зависимости [3–5] с точностью до констант, значения которых определяются экспериментально в каждом отдельном случае. С учетом констант формулы приобретают следующий вид:

$$L'_0 = L_0 + N'L' - L_C; \quad (4)$$

$$Q = P \left(\frac{1}{R_0 + \Delta R + K'R'} \sqrt{\frac{L'_0}{C}} \right) - Q_C, \quad (5)$$

где L_C и Q_C — эмпирически найденные константы;
 P — коэффициент пропорциональности.

Для расчетов значения тока и падения напряжения измерялись непосредственно на диодах $n-i-p-i-n$ -структуры, остальные параметры имели следующие значения:

$$\begin{aligned} L_0 &= 1,24 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; & R_0 + \Delta R &= 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; \\ \Delta L &= 2 \cdot 10^{-10} \text{ Гн}; & C &= 25,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}; \\ L_C &= 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; & Q_C &= 70,2; & \omega &= 565,5 \cdot 10^6; \\ N' &= 8,6; & K' &= 1,1; & P &= 1,85. \end{aligned}$$

Полученные расчетные зависимости добротности и индуктивности колебательного контура (см. рис. 1) от напряжения прямого смещения $n-i-p-i-n$ -структуры представлены на **рис. 3**, где видно хорошее количественное и ка-

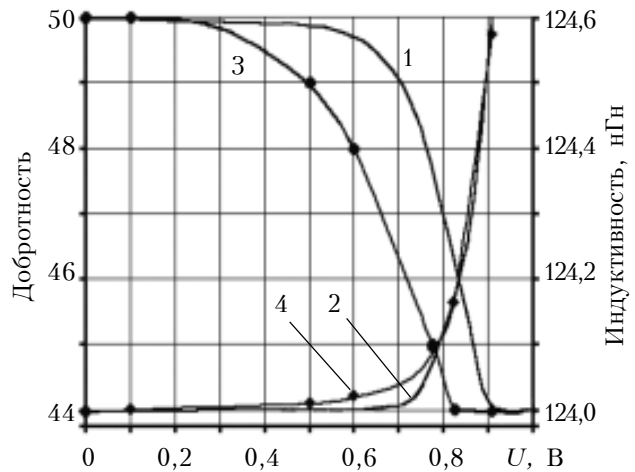


Рис. 3. Расчетные (1, 2) и экспериментальные (3, 4) зависимости добротности (1, 3) и индуктивности (2, 4) колебательного контура от напряжения прямого смещения $n-i-p-i-n$ -структуры

чественное соответствие предложенной теоретической модели экспериментальным данным.

Таким образом, проведенные исследования показали, что катушка, выполненная на сердечнике, который является $n-i-p-i-n$ -структурой с толстой базой, представляет собой индуктивный элемент, обладающий способностью к перестройке под воздействием потенциала, приложенного к выводам $n-i-p-i-n$ -структуры. Разработанная модель, описывающая поведение такого элемента, позволяет проводить анализ электронных цепей, содержащих катушку индуктивности предложенной конструкции, с достаточной для инженерного расчета точностью.

Перестраиваемые электрическим полем катушки индуктивности удобны для изготовления в планарных интегральных схемах, когда витки формируются напылением или травлением материала поверхности вокруг $p-i-n$ -структуры, расположенной в объеме катушки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Берман Л. С. Нелинейная полупроводниковая емкость. — Москва: Физматгиз, 1963. [Berman L. S. Nelineinaya poluprovodnikovaya emkost'. Moskva. Fizmatgiz, 1963]
- Семенов А. А., Усанов Д. А. Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем // Изв. ВУЗов. Электроника. — 2009. — № 4(78). — С. 34–40. [Semenov A. A., Usanov D. A. // Izv. VUZov. Elektronika. 2009. N 4(78). P. 34]
- Семенов А. А., Усанов Д. А. Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 3–9. [Semenov A. A., Usanov D. A. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2009. N 5. P. 3]
- Пат. 2384910 РФ. Катушка индуктивности, перестраиваемая электрическим полем / А. А. Семенов, Д. А. Усанов. — 2010. — Бюл. № 8. [Pat. 2384910 RF. / A. A. Semenov, D. A. Usanov. 2010. Bull. 8]
- Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций. —

Москва: Высшая школа, 2004. [Baranov V. M., Karasevich A. M., Sarychev G. A. Ispytaniya i kontrol' kachestva materialov i konstruktсии. Moskva. Vysshaya shkola, 2004]

6. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Диагностика материалов и конструкций. — Москва: Высшая школа, 2007. [Baranov V. M., Karasevich A. M., Sarychev G. A. Diagnostika materialov i konstruktсии. Moskva. Vysshaya shkola, 2007]

7. Дзехпер Г. Б., Орлов О. С. $P-i-n$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — Москва: Сов. радио, 1970. [Dzekhtser G. B., Orlov O. S. $P-i-n$ -diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh. Moskva. Sov. radio, 1970]

8. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства на полупроводниковых диодах. — Москва: Радио и связь. 1987. [Vaisblat A. V. Kommutatsionnye ustroystva na poluprovodnikovyykh diodakh. Moskva. Radio i svyaz'. 1987].

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.03 2012 г.

Semenov A. A., Usanov D. A., Kolokin A. A. **Inductance, electrically adjusted by semiconductor structure.**

Keywords: electrically controlled inductance, $n-i-p-i-n$ -structure, electric field-adjusted core.

A theoretical model of a passive flat inductor with electronic control is offered. Design charts of tank inductance and Q factor dependence on the forward bias voltage of $n-i-p-i-n$ -structure, used as a

specific core, the characteristics of which are regulated under the influence of an applied electric field, are presented. The comparison of design values with experimental features has shown their good correspondence with each other.

Russia, Saratov, Saratov State University by N. G. Chernyshevskij.

Семенов А. А., Усанов Д. О., Колокин О. А. **Индуктивность, что электрично перестроюється напівпровідниковою структурою.**

Ключові слова: електрично перенастроювана індуктивність, $n-i-p-i-n$ -структура, регульоване електричним полем осердя.

Запропоновано теоретичну модель плоскої пасивної котушки індуктивності з електронним управлінням. Наведено розрахункові графіки залежності добротності та індуктивності коливального контуру від напруги прямого зміщення $n-i-p-i-n$ -структури, що використовується як специфічне осердя, властивості якого змінюються під дією прикладеного електричного поля. Порівняння розрахованих значень з експериментальними показало їх добру відповідність одне одному.

Росія, Саратовський державний університет ім. М. Г. Чернишевського.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств.— Москва: Техносфера, 2012.— 472 с.

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств. Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, ученых, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных применений, использующих современные микроэлектронные устройства.

