

Разработка и исследование МДП-варикапов с переносом заряда

Ю.В. Сурин¹, А.Б. Спиридонов², С.В. Лицоев²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский институт микроприборов-К» (г. Москва)

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Development and Investigation of MIS Varicaps with Charge Transfer

Y.V. Surin¹, A.B. Spiridonov², S.V. Litsoev²

¹Federal State Unitary Enterprise «NIIMP-K», Moscow

²National Research University of Electronic Technology, Moscow

Предложен новый тип двухэлектродного МДП-варикапа с переносом заряда. Показано, что в приборе данного типа отсутствуют отрицательные эффекты, связанные с процессами термогенерации и накопления неосновных носителей. Это позволяет повысить предельную частоту и улучшить температурную стабильность работы варикапа. Рассмотрены две конструкции прибора. Экспериментально измеренные характеристики варикапов согласуются с результатами расчетов.

Ключевые слова: МДП-варикап; варикап.

A new type of the two-electrode MIS varicap – varicap with the charge transfer – has been proposed. It has been shown that in the device of the given type the negative effects, related to the processes of thermal generation and the accumulation of minority carriers, are absent, which enables to increase the limiting frequency and to improve the temperature stability of the varicap operation. Two device constructions have been considered. The experimentally measured characteristics of varicaps match the calculations results.

Keywords: MIS-varicap; varicap.

Введение. Приборы, у которых емкость зависит от управляющего напряжения, используются во многих радиотехнических устройствах. Например, в аналоговых схемах изменение емкости обеспечивает управление частотой генераторов. Варикап с двумя стабильными значениями емкости может применяться в цифровых устройствах в качестве емкостного ключа. В большинстве СВЧ-схем управления частотой и фазой переменного сигнала используются $p-i-n$ -диоды [1]. Основным недостатком данного активного элемента – высокие потери мощности на управление состоянием прибора. Варикапы на основе МДП-структуры не имеют этого недостатка. Однако минимальное значение емкости у стационарных МДП-варикапов недостаточно стабильно, что связано с процессами термогенерации неосновных носителей заряда в области пространственного заряда полупроводника и в квазинейтральном объеме.

При разработке МДП-варикапов в работе [2] предлагается устранить эффекты, связанные с термогенерацией, путем использования в качестве рабочего диэлектрика материала с контролируемой утечкой. Наличие утечки в диэлектрике препятствует образованию инверсионного слоя в приповерхностной области полупроводника, и вольт-фарадная характеристика (ВФХ) прибора будет соответствовать нестационарному режиму и при стационарном подключении управляющего напряжения. До настоящего времени нет промышленной технологии создания таких слоев со стабильными и воспроизводимыми характеристиками.

Известна конструкция МДП-варикапа, в котором заряд неосновных носителей устраняется с помощью $p-n$ -перехода малой площади, шунтирующего базовую МДП-структуру [3]. В этом случае ВФХ прибора в режиме инверсии аналогична характеристике варикапа на основе резкого $p-n$ -перехода. Однако при управляющем напряжении, соответствующем режиму обогащения, прямой ток $p-n$ -перехода ограничивает возможность использования варикапа в качестве емкостного ключа.

Стационарно-нестационарную форму ВФХ прибора можно реализовать введением в конструкцию прибора дополнительного тактового электрода [4]. При этом заряд неосновных носителей переносится под дополнительный электрод, а затем инжектируется в подложку. Недостатком данного решения является необходимость подключения импульсного питания, что приводит к усложнению включения варикапа в схему.

В настоящей работе предлагается новый тип двухэлектродного МДП-варикапа с переносом заряда (ВПЗ). Основными элементами конструкции приборов этого типа являются базовая МДП-структура и узел стока неосновных носителей заряда.

Принцип работы МДП-варикапов. Рассмотрим два варианта реализации ВПЗ: в одном – узел стока содержит резистор и $p-n$ -переход, в другом – два $p-n$ -перехода, включенных навстречу друг другу.

На рис.1,а схематично изображена конструкция ВПЗ, реализованная по первому варианту [5]. При положительной полярности управляющего напряжения на полевым электроде емкость прибора имеет максимальное значение и определяется удельной емкостью диэлектрика и площадью полевого электрода. Величина резистора должна быть достаточно большой, чтобы шунтирующая цепь узла стока не влияла на максимальную емкость и добротность варикапа.

Номинальное значение резистора имеет ограничение, связанное с работой прибора при отрицательных напряжениях на полевым электроде. В этом режиме $p-n$ -переход должен быть смещен в обратном направлении, чтобы профиль потенциала вдоль поверхности полупроводника обеспечивал удаление неосновных носителей заряда из-под полевого электрода через узел стока во внешнюю цепь. Таким образом минимальное значение емкости ВПЗ будет соответствовать состоянию нестационарного обеднения МДП-структуры при сколь угодно длительном подключении отрицательного управляющего напряжения к полевому электроду.

Конструкция ВПЗ, реализованная по второму варианту, приведена на рис.1,б [6]. При положительной полярности управляющего напряжения на полевым электроде n^+-p -переход смещен в обратном направлении и цепь узла стока изолирована от МДП-структуры. В этом режиме варикап находится в состоянии с максимальным значением емкости.

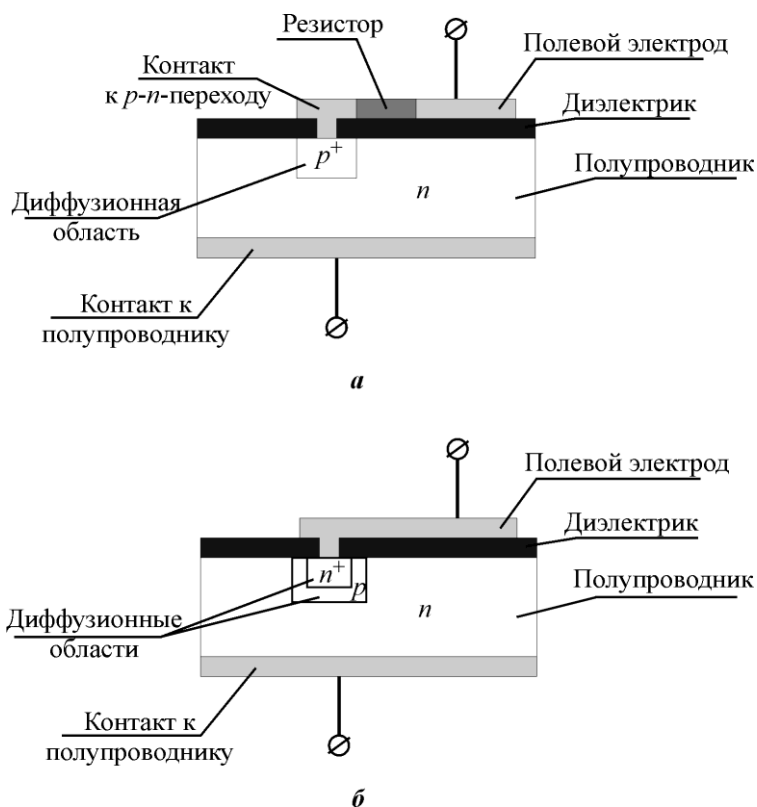


Рис.1. Схематическое изображение варикапа с переносом заряда с узлом стока на основе резистора и р-п-перехода (а) и двух р-п-переходов (б)

Если к полевому электроду подключено отрицательное напряжение, n^+ -р-переход смещен в прямом направлении, а р-п-переход (диффузионная р-область – n-полупроводник) – в обратном направлении. Неосновные носители, появляющиеся в результате процессов термогенерации в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника под полевым электродом, удаляются во внешнюю цепь через обратносмещенный р-п-переход. У варикапа такой конструкции ВФХ прибора такая же, как и у МДП-структуры в нестационарном режиме при любых вариантах подключения управляющего смещения.

Функционирование узла стока в рассматриваемых МДП-варикапах обеспечивается при выполнении условия $V_R < V_d$, где V_R – падение напряжения на резистивном элементе узла стока ($V_R = I_0 R$); V_d – падение управляющего напряжения V_y на диэлектрике; I_0 – ток обратносмещенного р-п-перехода.

Количественную взаимосвязь модулей величин V_d и V_y для нестационарного обеднения поверхности полупроводника можно установить исходя из известной модели идеальной МДП-структуры [7]. В результате получено соотношение

$$V_d = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_D}{C_{уд}^2} \left(\sqrt{1 + \frac{2C_{уд}^2 V_y}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_D}} \right),$$

где e – заряд электрона; ε_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – электрическая постоянная; $C_{уд}$ – удельная емкость диэлектрика; N_D – уровень легирования полупроводника.

Технология изготовления ВПЗ должна обеспечивать высокое качество базовой МДП-структуры. При низкой плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик–полупроводник приборы должны быть стабильны по отношению к термополевым воздействиям. Современные достижения в области изготовления КМОП интегральных схем позволяют адаптировать эту технологию для изготовления варикапов.

Одним из основных параметров прибора является предельная частота f_n . При заданном номинальном значении емкости можно увеличить f_n , если минимизировать последовательное сопротивление потерь прибора R_s . Существенный вклад в величину R_s вносит активное сопротивление полупроводниковой подложки.

Исходя из этих требований ясно, что конечная часть технологического маршрута изготовления варикапа должна заканчиваться уменьшением толщины полупроводника до минимально возможных значений. Известна технология изготовления датчиков давления, работающих на основе тензорезистивного эффекта, когда приборы изготавливают на основе монокристаллического кремния толщиной 20–50 мкм [8]. Для работы ВПЗ в устройствах СВЧ-диапазона мембрану кремния необходимо уменьшать до 5–10 мкм.

С целью экспериментальной проверки предложенных решений изготовлены образцы варикапов двух вариантов. В качестве подложки использовали монокристаллический кремний, легированный фосфором, типа КЭФ-0,5. Рабочий диэлектрик получали методом термического окисления. Толщина слоя SiO_2 составляла примерно 0,14 мкм. Диффузионные n^+ - и p^+ -области формировали по технологии истоков и стоков в МДП-транзисторах. Глубина и поверхностное сопротивление для n^+ -слоя соответственно составляли 0,5–0,6 мкм и 40 Ом/□, для p^+ -слоя – 1,0–1,2 мкм и 120 Ом/□.

Резистор изготавливали из нелегированной области поликристаллического кремния. Полевой электрод состоял из нескольких слоев. Непосредственно на термический окисел наносили поликристаллический кремний, легированный фосфором, затем осаждали слой золота с подслоем хрома. Толщину кремния изменяли до значений менее 10 мкм методом изотропного травления. Контакт к полупроводнику с обратной стороны сформирован из золота.

Типовые ВФХ образцов ВПЗ с узлом стока на основе резистора и p - n -перехода представлены на рис.2. Измерения проводили при частоте переменного сигнала 1 МГц на измерительном комплексе Agilent V1500A. Для сравнения на рисунке приведены ВФХ тестовой МДП-структуры. Результаты эксперимента совпадают с расчетом. Аналогичные зависимости получены для ВПЗ с узлом стока на основе двух навстречу включенных p - n -переходов.

Проведено исследование параметров ВПЗ в СВЧ-диапазоне. Последовательное сопротивление потерь прибора R_s определяли с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи P4-11. По этим результатам рассчитывали предельную частоту $f_n = 1/2\pi R_s C_s$ (C_s – эквивалентная последовательная емкость варикапа).

Контур, состоящий из емкости измеряемого образца и индуктивности ввода к нему, включен параллельно линии передачи. Величину R_s определяли на основе анализа уровня мощности, прошедшей в нагрузку в условиях последовательного резонанса.

Полученные в результате измерений значения предельной частоты при максимальной емкости $f_n = 10$ –12 ГГц примерно в два раза меньше расчетных. Проведенный экспериментальный анализ позволяет утверждать, что эта разница связана с низким качеством исходного кремния и сопротивлением контакта к объему полупроводника.

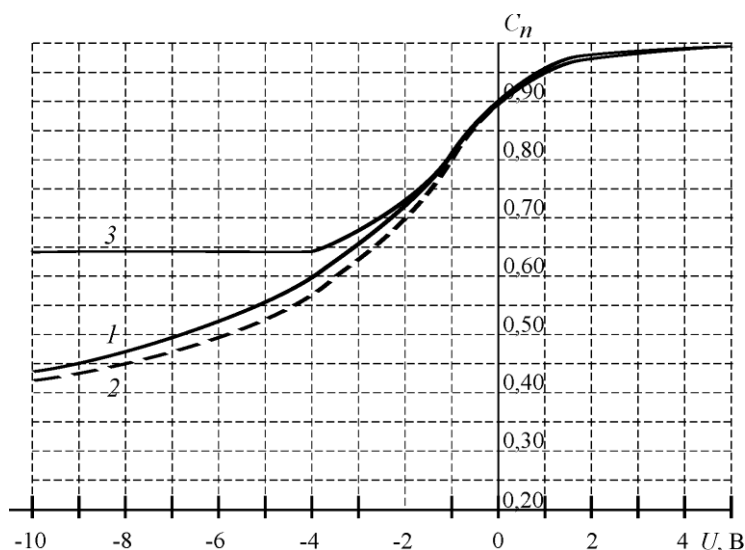


Рис.2. Вольт-фарадные характеристики варикапа с переносом заряда (1 – эксперимент; 2 – теория) и МДП-структуры (3)

Температурная стабильность варикапов с переносом заряда. Для определения температурной стабильности параметров ВПЗ измерены характеристики прибора в диапазоне температур. На рис.3 представлены зависимости минимального значения емкости варикапа и МДП-структуры от температуры.

Если задать допустимую температурную нестабильность минимального значения емкости 3%, то верхний температурный предел работоспособности ВПЗ на 80 °С выше по сравнению со стационарным МДП-варикапом. Вертикальная штрихпунктирная линия на рис.3 соответствует температуре истощения донорной примеси и началу собственной проводимости.

Увеличение скорости роста минимального значения емкости МДП-структуры при температурах выше 140 °С описано в [7]. Этот эффект связан с изменением механизмов генерационных явлений. При более низких температурах для МДП-структур с низкой плотностью поверхностных состояний процесс накопления неосновных носителей заряда в инверсионном слое связан с генерацией в ОПЗ полупроводника. При более высоких температурах доминирует поток неосновных носителей из области квазинейтрального объема полупроводника, прилегающей к краю ОПЗ в пределах диффузионной длины. Нестационарная ширина ОПЗ полупроводника не зависит от температуры в широком диапазоне изменения ее значений, что и определяет температурную стабильность минимальной емкости ВПЗ.

Заключение. Разработанный МДП-варикап с переносом заряда обладает высокой температурной стабильностью по сравнению с обычным МДП-варикапом. Установлено

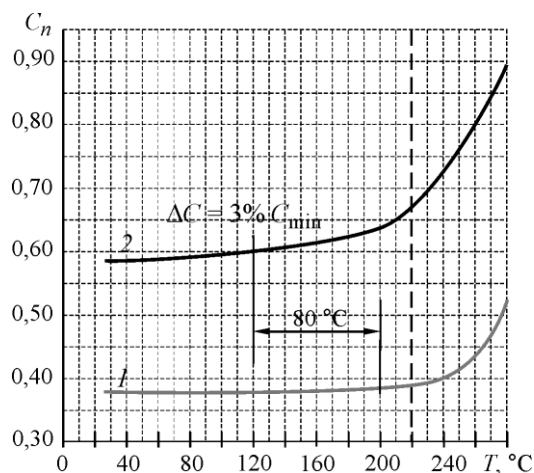


Рис.3. Зависимость минимального значения емкости ВПЗ (1) и МДП-структуры (2) от температуры. Напряжение на полевом электроде –10 В

соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей в ВЧ-диапазоне, выявлены факторы, ограничивающие добротность прибора в СВЧ-диапазоне. Показана перспективность использования ВПЗ в радиотехнических устройствах ВЧ- и СВЧ-диапазона.

Литература

1. **Вендик О.В., Парнес М.А.** Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий // Компоненты и технологии. – 2007. – № 9. – С. 164 – 166.
2. **Bernie Siegal.** The binary varactor – a new microwave device // Electronic Equipment News. – 1971. – Vol. 12. – № 10. – P. 43–47.
3. **Lloyd W. Hackley, Seminole Fla.** Varactor tuning diode with inversion layer // US Pat. N. 4.903.086. – US. – Feb. 20. – 1990.
4. **Петручук И.И., Спиридонов А.Б.** МДП-варактор с переносом и инжекцией заряда // Электронная техника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. – 1979. – Вып. 2 (14). – С. 32–43.
5. **Сурин Ю.В., Петручук И.И., Нечипоренко В.С., Сурин М.Ю., Лицоев С.В.** МДП-варикап с переносом заряда // Патент на полезную модель №100333, RU, МПК H01L 2900 (2006.01). – Оpubл. 2010, бюл. №34.
6. **Сурин Ю.В., Петручук И.И., Спиридонов А.Б., Мартынова В.П., Лицоев С.В.** Варикап // Патент на полезную модель №114807, RU, МПК H01L 2992 (2006.01). – Оpubл. 2012, бюл. №10.
7. **Зи С.М.** Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран / **Н.С. Земляникова, Н.Л. Данилова, В.В. Панков и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

Статья поступила
26 января 2015 г.

Сурин Юрий Васильевич – кандидат технических наук, директор ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка базовых технологий изготовления бескорпусных СВЧ- и оптико-электронных приборов для работы в составе приемопередающих модулей АФАР и малогабаритных бортовых рубидиевых стан-дартов частоты.

Спиридонов Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка и технология изготовления полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, в частности ПЗС, варикапы различных типов.

Лицоев Сергей Владимирович – аспирант кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка и технология изготовления полупроводниковых приборов на основе МДП-структуры. **E-mail: sface@mail.ru**