

УДК 621.3.049.774.2

Разработка МДП-варикапа с переносом заряда в СВЧ-диапазоне

А. Б. Спиридонов, С. В. Лицоев, И. И. Петручук

Выполнен расчет характеристик МДП-варикапа с переносом заряда в ВЧ- и СВЧ-диапазоне. Показано, что предельная частота прибора не менее чем в два раза выше предельной частоты обычного варикапа на основе системы МДП. Разработана конструкция МДП-варикапа с узлом стока неосновных носителей заряда для СВЧ-фазовращателей. Изготовлены экспериментальные образцы прибора на основе структур монокристаллического кремния толщиной 10 мкм с тонким эпитаксиальным слоем. Предложена методика измерения параметров эквивалентной схемы прибора в СВЧ-диапазоне. Экспериментальные характеристики прибора соответствуют результатам расчета. Проведенные расчеты и полученные характеристики образцов ВПЗ позволяют сделать вывод о перспективности использования прибора для реализации каскадной схемы плавных фазовращателей.

PACS: 73.40.Qv

Ключевые слова: МДП-варикап, варикап, разработка, экспериментальные характеристики.

Введение

Варикапы на основе системы «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП) могут быть использованы в электронных устройствах ВЧ- и СВЧ-диапазона для управления частотой и фазой переменного сигнала, а также для умножения частоты. В настоящее время базовым элементом СВЧ-фазовращателей является $p-i-n$ -диод [1]. Разработка для этих целей варикапа на основе системы МДП обеспечивает принципиальную возможность снижения мощности управления. Имеются сообщения о разработке СВЧ-варикапа с двухслойными диэлектрическими пленками из оксидов редкоземельных элементов [1]. Однако данная конструкция прибора по совокупности основных электрофизических характеристик уступает МДП-варикапам с использованием оксидов кремния.

Однако недостатком обычного МДП-варикапа является нестабильность минимального значения емкости вследствие процессов термогенера-

ции неосновных носителей заряда. Ряд конструкций варикапов на основе системы МДП обеспечивает удаление неосновных носителей из приповерхностной области полупроводника под полевым электродом.

Известна модификация МДП-варикапа для СВЧ-устройств — МДП-варикап с переносом и инжекцией заряда (ВПИ) [2]. Варикап данного типа — трехэлектродный прибор. Два электрода (полевой и тактовый) расположены на диэлектрике, а третий контактирует к объему полупроводника. Малый зазор между полевым и тактовым электродами обеспечивает зарядовую связь между МДП-структурами под этими электродами. При подключении импульсов напряжения к тактовому электроду вольт-фарадная характеристика (ВФХ) структуры «полевой электрод-диэлектрик-полупроводник» соответствует нестационарному режиму. Наличие импульсного питания приводит к усложнению включения варикапа в схему и является недостатком этого решения.

В работе [3] предложены конструкции двухэлектродного МДП-варикапа, в которых нестационарную ВФХ получают с помощью узла стока неосновных носителей заряда. Такой варикап с переносом заряда (ВПЗ) сочетает в себе преимущества МДП структуры и $p-i-n$ диода и перспективен для использования в устройствах СВЧ-диапазона, например, в фазовращателях.

Коэффициентом перекрытия по емкости варикапа K называют отношение максимального зна-

Спиридонов Александр Борисович, главный специалист.

Лицоев Сергей Владимирович, инженер.

Петручук Иван Иванович, консультант.

АО «НИИМП-К».

Россия, 124365, Москва, г. Зеленоград, Георгиевский проспект, 5.

Тел. 8 (495) 944-70-33.

E-mail: niimpk@mail.compnet.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

чения емкости к минимальному. При идентичных электрофизических параметрах МДП-структуры значение K у ВПЗ больше по сравнению со случаем обычного варикапа. Следовательно, при заданном диапазоне изменения емкости толщина диэлектрического слоя и уровень легирования полупроводника у ВПЗ могут быть увеличены по сравнению со случаем обычного МДП-варикапа. Последнее позволяет повысить фактор качества варикапа на основе системы МДП и разработать прибор с высокими предельными характеристиками при большей толщине диэлектрика и, соответственно, лучшем уровне надежности.

Целью данной работы является расчет возможных характеристик МДП-варикапа с переносом заряда в ВЧ- и СВЧ-диапазоне, проведение экспериментальных исследований опытных образцов и сравнение экспериментальных результатов с расчетными.

Методика расчета параметров ВПЗ

Исходными данными для расчета элементов конструкции ВПЗ в СВЧ-диапазоне и электрофизических параметров базовой МДП-структуры являлись следующие значения: номинальная емкость прибора $C_n = 3$ пФ, коэффициент перекрытия по емкости $K = 2,5$, напряжение прокола $U_p = 10$ В, предельная частота f_n не менее 30 ГГц при $C = C_n$.

Предполагалось, что полупроводниковая подложка является двухслойной и содержит низкоомное основание и высокоомный эпитаксиальный слой. При заданном напряжении прокола U_p нестационарная ширина области пространственного заряда полупроводника W достигает границы между эпитаксией и низкоомным основанием.

При проведении вычислений использовались формулы для расчета стационарных и нестационарных вольт-фарядных характеристик МДП структуры [4]. Основное соотношение для обычного МДП-варикапа выглядит так:

$$K = \frac{C_{ox}W_m}{\varepsilon_s\varepsilon_0} + 1, \quad (1)$$

где C_{ox} — удельная емкость диэлектрика; W_m — стационарная ширина области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника; ε_s — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 — электрическая постоянная.

Ширина ОПЗ рассчитывалась по параметрам эпитаксиального слоя:

$$W_m = \sqrt{\frac{4kT\varepsilon_s\varepsilon_0}{N_D e^2} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)}, \quad (2)$$

где N_D — концентрация легирующей примеси в эпитаксиальном слое; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; e — заряд электрона; n_i — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.

При расчетах предполагалось, что для обычного МДП-варикапа максимальная глубина обеднения полупроводника W_m при стационарном режиме подключения напряжения управления U равна толщине эпитаксиального слоя $d_{эп}$.

Для ВПЗ величины K и W определялись из соотношений:

$$K = \frac{C_{ox}W}{\varepsilon_s\varepsilon_0} + 1, \quad (3)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0\phi_s}{eN_D}}, \quad (4)$$

где ϕ_s — поверхностный потенциал полупроводника.

Зависимости толщины эпитаксиального слоя $d_{эп}$ и концентрации примеси в нем N_D от удельной емкости диэлектрика C_{ox} приведены на рис. 1.

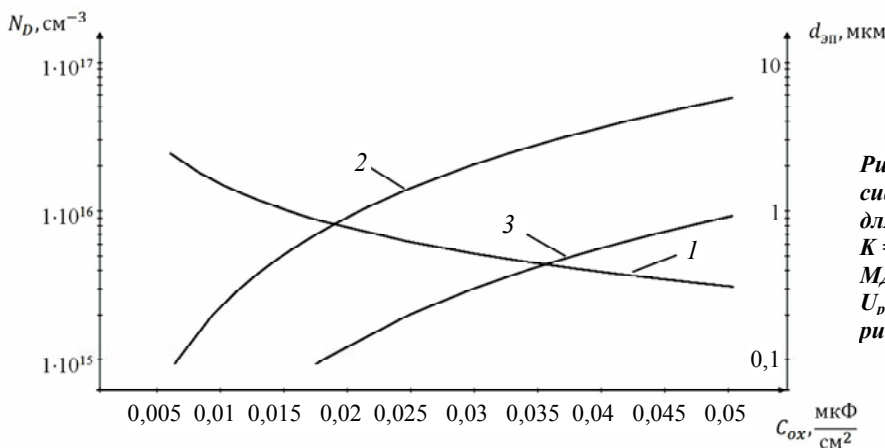


Рис. 1. Зависимость параметров эпитаксиального слоя от емкости диэлектрика для ВПЗ и обычного МДП-варикапа при $K = 2,5$: кривая 1 — $d_{эп}$ (ВПЗ, обычный МДП варикап); кривая 2 — N_D для ВПЗ при $U_p = 10$ В; кривая 3 — N_D для обычного варикапа при $W_m = d_{эп}$.

Из расчетов следует, что при одинаковой величине $d_{\text{эп}}$ необходимый уровень легирования эпитаксиального слоя примерно в 7 раз выше у варикапа с переносом заряда по сравнению со случаем обычного варикапа.

Предельная частота $f_{\text{п}}$ связана с потерями мощности переменного сигнала и определяется соотношением:

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ox}} R_s}. \quad (5)$$

Величину $f_{\text{п}}$ для ВПЗ рассчитывали при напряжении управляющего смещения U , соответствующем максимальному значению емкости прибора.

Предполагалось, что последовательное эквивалентное сопротивление потерь прибора R_s состоит из сопротивления эпитаксиального слоя $R_{\text{эп}}$ и паразитного сопротивления потерь $R_{\text{п}}$. Величина $R_{\text{п}}$ характеризует уровень технологии производства прибора и включает в себя сопротивление подложки и источники потерь мощности типа контактных потерь, потерь мощности в электродах и выводах к ним.

В результате исследования зависимостей $f_{\text{п}}(R_s)$ при различных значениях $R_{\text{п}}$ установлено наличие оптимального значения C_{ox} , соответствующего максимальной величине $f_{\text{п}}$. Это обусловлено двумя тенденциями. При малых емкостях предельная частота $f_{\text{п}}$ возрастает при увеличении емкости диэлектрического слоя C_{ox} в связи с уменьшением потерь в эпитаксиальном слое. При дальнейшем росте C_{ox} величина $f_{\text{п}}$ уменьшается согласно выражению (5). Соответственно, в области значений C_{ox} , меньших оптимальной величины, доминирующим механизмом потерь мощности являются потери в эпитаксиальном слое. При более тонких диэлектрических слоях значение $f_{\text{п}}$ ограничивается в первую очередь одним из соответствующих величине $R_{\text{п}}$ механизмов потерь.

Расчеты показали, что в диапазоне изменения параметра $R_{\text{п}}$ от 2×10^5 Ом см² до 1×10^4 Ом см² теоретическое значение предельной частоты $f_{\text{п}}$ у ВПЗ более чем в 2 раза превышает соответствующую величину у обычного варикапа.

Методика измерения в СВЧ-диапазоне

Для экспериментального определения значений последовательного сопротивления СВЧ-потерь образцов ВПЗ был использован метод измерения элементов эквивалентной схемы варикапов с p - n -переходом, известный как метод Делоча [5]. Метод основан на анализе коэффициента передачи СВЧ-сигнала в передающей линии при условии последовательного резонанса в колебательном контуре, который образован из емкости C_s

измеряемого образца и индуктивности L_s ввода к нему, а также имеет параллельное включение в линию передачи.

Таким образом, рассматривается цепь L_s - C_s - R_s , представляющая собой параметры эквивалентной схемы ВПЗ, которая включена параллельно СВЧ-линии передачи с волновым сопротивлением Z_0 (рис. 2, а). При условии резонанса в последовательном контуре $L_s C_s$, что обеспечивается выбором частоты измерительного сигнала и напряжением смещения на полевом электроде ВПЗ, реактивная составляющая полного сопротивления контура становится равной нулю, и эквивалентная схема варикапа в линии передачи будет иметь вид, показанный на рис. 2, б.

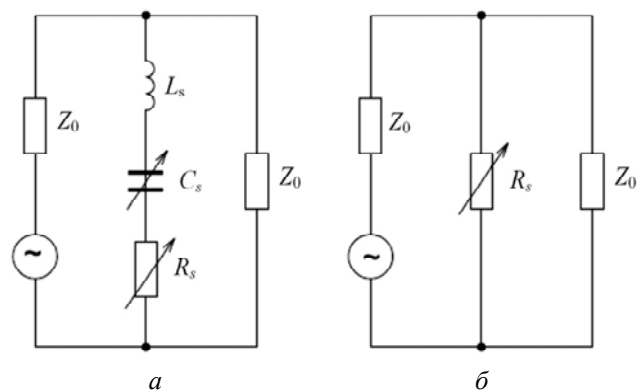


Рис. 2. Эквивалентная схема варикапа в линии передачи: а — общий вид; б — при резонансе. C_s и R_s — последовательные емкость и сопротивление потерь ВПЗ; L_s — индуктивность ввода к образцу, Z_0 — волновое сопротивление линии передачи.

В результате импеданс образца представляет собой чисто активное сопротивление, равное последовательному сопротивлению СВЧ-потерь R_s . Величина R_s определяется из выражения работы [6]:

$$R_s = \frac{Z_0}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{T} - 1}, \quad (6)$$

где Z_0 — волновое сопротивление линии передачи; T — модуль коэффициента передачи сигнала, равный отношению мощности падающей волны к мощности волны, прошедшей через резонансный контур.

Если параметр T выразить в децибелах, то формула (6) будет иметь вид:

$$R_s = \frac{Z_0}{2} \cdot \frac{1}{10^{\frac{L}{20}} - 1}, \quad (7)$$

где L — величина ослабления СВЧ-сигнала в линии передачи на частоте резонанса, выраженная в децибелах (дБ).

Для варикапов на основе системы МДП частота последовательного резонанса указанного колебательного контура может изменяться в широких пределах за счет выбора площади полевого электрода и геометрических параметров индуктивного элемента. Данное обстоятельство позволило реализовать на основе метода Делоча практическое измерение величины R_s образцов ВПЗ в дециметровом диапазоне частот ($f = 0,5 \div 1,5$ ГГц) с использованием векторного анализатора цепей R&S ZVL-13 фирмы Rohde & Schwarz GmbH & Co. (Германия).

Для включения образца ВПЗ в измерительный тракт применялась специальная СВЧ-камера в виде отрезка воздушной коаксиальной линии передачи с входным и выходным разъемами. Центральная часть камеры изолирована по постоянному току от ее концевых частей с помощью слюдяных прокладок, которые обеспечивают две проходные емкости величиной 560 пФ. Это позволяет подавать на центральную часть камеры постоянное напряжение от внешнего источника, используемое в качестве напряжения смещения измеряемого варикапа.

Для реализации отмеченного выше колебательного контура образец ВПЗ помещается в специальный измерительный СВЧ-патрон (рис. 3). Такой патрон содержит цилиндрический корпус 1, наконечник 2, закрепленные пайкой на диэлектрической пластине 3, которая имеет контактные металлизированные площадки 4 и 5 соответственно. Индуктивный элемент 6 игольчатой формы через упругий демпфер 7 соединен с внутренним торцом корпуса патрона. Предметный столик 8, где размещается измеряемый образец, соединен с контактной площадкой 5, а, следовательно, и с наконечником 2.

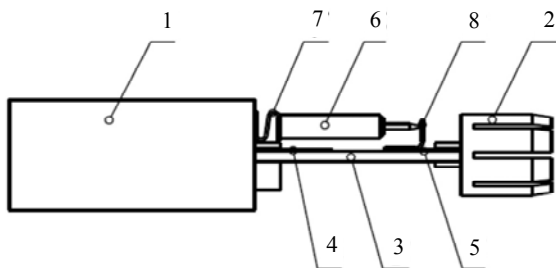


Рис. 3. СВЧ-патрон для измерений образцов ВПЗ: 1 — корпус патрона; 2 — наконечник; 3 — диэлектрическая пластина; 4, 5 — контактные площадки; 6 — индуктивный элемент; 7 — демпфер; 8 — столик предметный

Когда измеряемый прибор устанавливают на предметный столик, индуктивный элемент должен контактировать с его полевым электродом, при этом демпфер 7 ограничивает избыточное давление на МДП-структуру.

В рабочем положении наконечник СВЧ-патрона благодаря многолепестковой конструкции надежно контактирует с центральным проводником измерительной камеры, а корпус патрона имеет контакт с ее наружной оболочкой, что обеспечивает параллельное включение ВПЗ в линию передачи СВЧ-сигнала. При этом подаваемое на камеру постоянное напряжение приложено к индуктивному элементу 6 и, соответственно, к полемому электроду измеряемого прибора.

Перед выполнением измерений величины R_s экспериментальных образцов ВПЗ были определены собственные СВЧ-потери в элементах колебательного контура используемого измерительного патрона. Для этого был изготовлен тестовый конденсатор с диэлектриком из кварца и емкостью $C = 0,54 \times 10^{-12}$ Ф. Конденсатор имел прямоугольную форму с габаритными размерами 3×3 мм и золотые обкладки, сформированные методом гальванического осаждения. Данный конденсатор устанавливали в измерительный патрон между предметным столиком и торцом индуктивного элемента, а затем патрон помещали в полость коаксиальной камеры. По ослаблению СВЧ-сигнала на резонансной частоте и выражению (7) была определена величина эквивалентного сопротивления СВЧ-потерь контура, которая составила 0,38 Ом. Поскольку потери, вносимые только тестовым конденсатором, составляют не более 10 % от этой величины, то в качестве эквивалентного сопротивления собственных СВЧ-потерь измерительного патрона было принято значение $R_{cont} = 0,34$ Ом. Это значение вычиталось из измеряемых величин R_s варикапов в патроне.

Описание образцов

Для проведения настоящих исследований были изготовлены ВПЗ с узлом стока на основе p - n -перехода и резистора из нелегированного поликристаллического кремния. Схема конструкции прибора и описание принципа действия приведены в работе [3].

В качестве полупроводниковой подложки использовались пластины типа КЭС-0,01 с эпитаксиальным слоем n -типа толщиной 2 мкм, имеющим удельное сопротивление 0,5 Ом см. Минимальная толщина эпитаксиального слоя ограничена необходимостью формирования в его объеме диффузионной области p -типа.

Толщина подзатворного диэлектрика из SiO_2 была выбрана исходя из требований к коэффициенту перекрытия по емкости и составляла 0,14 мкм.

Полевой электрод базовой МДП-структуры варикапа содержит два слоя. Нижний слой сформирован из легированного поликристаллического кремния толщиной 0,5 мкм и с поверхностным

сопротивлением 20 Ом/кв. Верхний слой получали путем напыления золота в вакууме. Толщина золота составляла примерно 1 мкм. МДП структура Si-SiO₂-Si* формировалась с использованием стандартных технологических операций, используемых при изготовлении КМОП ИС. Исследования электрофизических параметров тестовых МДП структур подтвердили возможность использования данной технологии для изготовления варикапов.

В финальной части маршрута изготовления ВПЗ толщина полупроводниковой подложки уменьшалась до 10—15 мкм. 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 значений 12—10 мкм методом изотропного травления кремния. Затем с обратной стороны пластины формировалась балка путем гальванического наращивания золота. Эта балка обеспечивала электрический контакт к низкоомному полупроводнику. К полювому электроду приваривалась тонкая проволока из золота.

Обсуждение результатов

Измерение характеристик ВПЗ в ВЧ- и СВЧ-диапазоне подтвердило реализацию запланированных параметров. Основные результаты сводятся к следующим выводам.

1. Номинальная емкость экспериментальных образцов составляла значения $C_n = 2,5—3,5$ пФ, коэффициент перекрытия по емкости K при напряжении смещения $U = 10$ В находился в диапазоне от 2,4 до 2,7.

2. В СВЧ-диапазоне измеряли последовательное сопротивление потерь R_s по описанной выше методике. В результате соответствующего расчета экспериментальных значений предельной частоты f_n при нулевом напряжении смещения на полювом электроде получены значения этого параметра в диапазоне от 30 до 40 ГГц.

3. Следует отметить более слабую зависимость величины R_s от управляющего напряжения для ВПЗ по сравнению со случаем изолированной МДП-структуры. В обычном МДП-варикапе сопротивление потерь в режиме обеднения меньше по сравнению со случаем обогащения поверхности полупроводника. Это можно понять, если учесть, что приповерхностный слой в пределах ширины области пространственного заряда полупроводника не вносит вклад в сопротивление потерь в состоянии обеднения, а при номинальной емкости необходимо учитывать всю толщину эпитаксиаль-

ного слоя. В ВПЗ этот эффект частично компенсируется потерями мощности в цепи узла стока.

4. Расчет теоретических значений величины f_n составляет 45—50 ГГц, что удовлетворительно совпадает с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, проведенные расчеты и полученные характеристики образцов указывают на перспективность и целесообразность использования МДП-варикапа с переносом заряда для реализации каскадной схемы плавных фазовращателей.

Заключение

В ходе работы выполнен расчет характеристик МДП-варикапа с переносом заряда в ВЧ- и СВЧ-диапазоне. Показано, что предельная частота прибора не менее чем в два раза выше предельной частоты обычного варикапа на основе системы МДП. Разработана конструкция МДП-варикапа с узлом стока неосновных носителей заряда для СВЧ-фазовращателей. Изготовлены экспериментальные образцы прибора на основе структур монокристаллического кремния толщиной 10 мкм с тонким эпитаксиальным слоем. Предложена методика измерения параметров эквивалентной схемы прибора в СВЧ-диапазоне. Экспериментальные характеристики прибора соответствуют результатам расчета.

Проведенные расчеты и полученные характеристики образцов ВПЗ позволяют сделать вывод о перспективности использования прибора для реализации каскадной схемы плавных фазовращателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вендик О. В., Парнес М. А. // Компоненты и технологии. 2007. № 9. С. 164.
2. Рожков В. А., Родионов М. А., Пашин А. В., Гурьянов А. М. / Материалы 14-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004). Севастополь, 13–17 сентября 2004 г. — Севастополь: Вебер, 2004. С. 566.
3. Петручук И. И., Спиридонов А. Б. // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. 1979. Вып. 2(14). С. 32.
4. Сурин Ю. В., Спиридонов А. Б., Лицоев С. В. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. Т. 20. № 4. С. 391.
5. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов — М.: Мир, 1984.
6. Deloach B. C. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1964. Vol. MTT-12. P. 15.
7. СВЧ полупроводниковые приборы и их применение. Ред. Вотсон Г. — М.: Мир, 1972.
8. Земляничков Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Михайлов Ю. А. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 32.

Development of MIS varicaps with charge transfer for UHF range

A. B. Spiridonov, S. V. Litsoev, and I. I. Petrychuk

NIIMP-K, Inc.
5 Georgievskii av., Zelenograd, Moscow, 124365, Russia
E-mail: niimpk@mail.compnet.ru

Received March 18, 2016

A calculation of characteristics of a MIS varicap with the charge transfer for HF and SHF range has been carried out. It has been shown that the limiting frequency of the device at least 2 times higher as compared to standard MIS varicap. A construction of the MIS varicap with a sink node of minority carriers for SHF range phase shifter has been designed. It has been produced experimental samples of the varicap based on ten-microns-thick monocrystalline silicon structures with a thin epitaxial layer. A measurement methodology of SHF range devices parameters has been developed. Experimentally measured characteristics of varicaps are consistent with the calculation results. From the calculations and obtained characteristics of the samples, it can be also concluded that this device is perspective for the implementation of the smooth shifters cascade scheme.

PACS: 73.40.Qv

Keywords: MIS varicap, varicap, development, experimental characteristics.

REFERENCES

1. O. V. Vendik and M. A. Parnes, *Komponenty i Tekhnologii*, No. 9, 164 (2007).
2. V. A. Rozhkov, M. A. Rodionov, A. V. Pashin, and A. M. Gur'yanov, in *Proc. XIY Intern. Krym. Conf KryMiKo '2004* (Sevastopol', 2004). P. 566.
3. I. I. Petrychuk and A. B. Spiridonov, *Elektron. Tekhnik. Ser. 10*, No. 2, 32 (1979).
4. Yu. V. Surin, A. B. Spiridonov, and S. V. Litsoev, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Elektronika* **20** No. 4, 391 (2015).
5. S. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. (New York: John Wiley and Sons.1981: Mir, Moscow, 1984).
6. B. C. Deloach, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques* **MTT-12**, 15 (1964).
7. *Microwave Semiconductor Devices and Their Circuit Applications*, Edited by H. A. WATSON (McGRAW-HILL BOOK COMPANY, NEW YORK, 1969; M.: Mir, 1972).
8. N. S. Zemlyannikov, N. L. Danilova, V. V. Pankov, V. S. Sukhanov, and Yu. A. Mikhailov, *Nano- Mikrosistem. Tekhnika*, No. 4, 32 (2013).