

СУРАЙКИН А. И., СУМЕНКОВ А. Н.

**ВАРИКАПЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
GaAs-СТРУКТУР ДЛЯ ВЧ-АППАРАТУРЫ**

Аннотация. Представлены результаты разработки и исследования полупроводниковых мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов для широкого применения в высокочастотной аппаратуре. Приводятся общие технические требования к *GaAs*-варикапам, а также основные электрические параметры и характеристики экспериментальных образцов мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов.

Ключевые слова: арсенид галлия, варикап, мезаэпитаксиальная структура, ёмкость, добротность, коэффициент перекрытия по ёмкости.

SURAYKIN A. I., SUMENKOV A. N.

**VARACTOR DIODES BASED ON MULTILAYER EPITAXIAL
GaAs-COMPOSITION FOR HIGH-FREQUENCY EQUIPMENT**

Abstract. The article presents the results of designing and studying of semiconductor mesaepitaxial *GaAs*-varactor diodes for general application in high-frequency equipment. The study provides the general technical requirements for *GaAs*-varactor diodes and the electrical parameters of the experimental mesaepitaxial *GaAs*-varactor diodes.

Keywords: gallium arsenide, varactor diode, mesaepitaxial composition, capacity, quality factor, coefficient of capacity overlap.

Одно из направлений развития электронной компонентной базы ВЧ-электроники – полупроводниковые приборы с управляемой ёмкостью, работающие в широком диапазоне управляющего напряжения и широком диапазоне рабочих температур. Разработка и производство данных приборов вполне реализуемо на основе многослойных эпитаксиальных *GaAs*-структур.

Применение *GaAs* для производства варикапов актуально ещё и тем, что он в некотором смысле отвечает приближению идеального полупроводника для варикапов. Идеальный полупроводник для варикапа должен иметь те или иные носители заряда с высокой подвижностью, обладать низкой диэлектрической проницаемостью, широкой запрещённой зоной, низкой энергией ионизации примесей и высокой теплопроводностью. Эти параметры обеспечивают минимальное сопротивление, минимальную ёмкость, небольшой ток насыщения, а также возможность работы при повышенных температурах.

За рубежом и на ряде российских предприятий имеется технология производства многослойных эпитаксиальных *GaAs*-структур. На сегодняшний день на основе таких

структур разработаны быстродействующие высоковольтные $p-i-n$ -диоды для преобразовательной и импульсной техники [1, с. 35–37]. Применение технологии производства быстродействующих высоковольтных $p-i-n$ -диодов для изготовления мезаэпитаксиальных $GaAs$ -варикапов позволяет создать необходимые предпосылки для разработки высокодобротных варикапов с широким диапазоном рабочего напряжения.

Использование в $GaAs$ -диодных структурах зависимости барьерной ёмкости от приложенного обратного напряжения с последующим нормированием этой зависимости позволяет реализовать такой полупроводниковый прибор, как варикап. Характер этой зависимости, то есть вольт-фарадной характеристики, определяется видом распределения концентрации примесей в области объемного заряда $p-n$ -перехода и, соответственно, методом его изготовления. Эти зависимости получены аналитически и достаточно известны как для резких $p-n$ -переходов, так и для плавных $p-n$ -переходов [2]. В данной работе сделана попытка получения варикапа на основе технологии формирования мезаэпитаксиальных диодных структур с резким $p-n$ -переходом.

Основные требования к мезаэпитаксиальным $GaAs$ -варикапам для $ВЧ$ -аппаратуры кратко можно представить в следующем виде:

1) ёмкость варикапа при обратном напряжении – $U_R=4$ В: 220–280 пФ (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), 55÷80 пФ (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);

2) добротность варикапа при обратном напряжении – $U_R=4$ В: не менее 200 (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), не менее 120 (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);

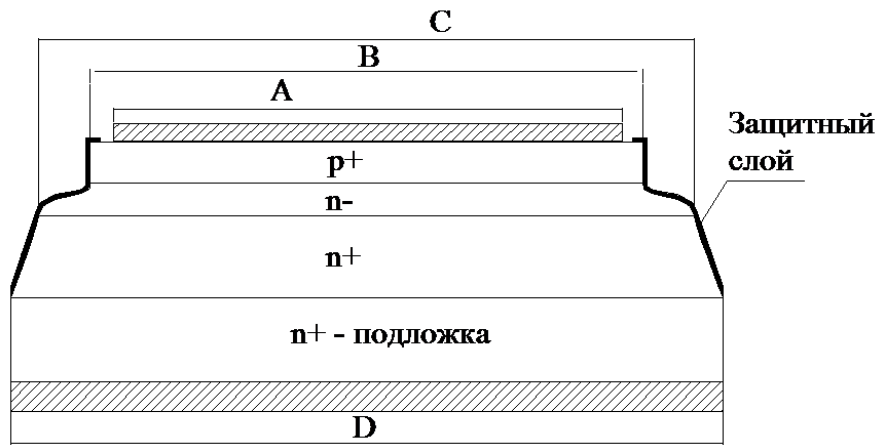
3) коэффициент перекрытия по ёмкости варикапа (отношение ёмкости варикапа при $U_R=4$ В к ёмкости варикапа при $U_R=100$ В): не менее 3,5;

4) постоянный обратный ток варикапа при $U_R=100$ В в рабочем диапазоне температур – не более 1 мкА;

5) рабочий диапазон температуры окружающей среды от –60 до +85 °С.

Структура кристалла мезаэпитаксиального $GaAs$ -варикапа приведена на рисунке 1.

Структура, приведенная на рисунке 1 формируется методами жидкофазной эпитаксии. Полученные эпитаксиальные $p^+-n^-n^+-n^+$ -структуры имеют несколько металлургических переходов внутри структуры [3, с. 36–47].



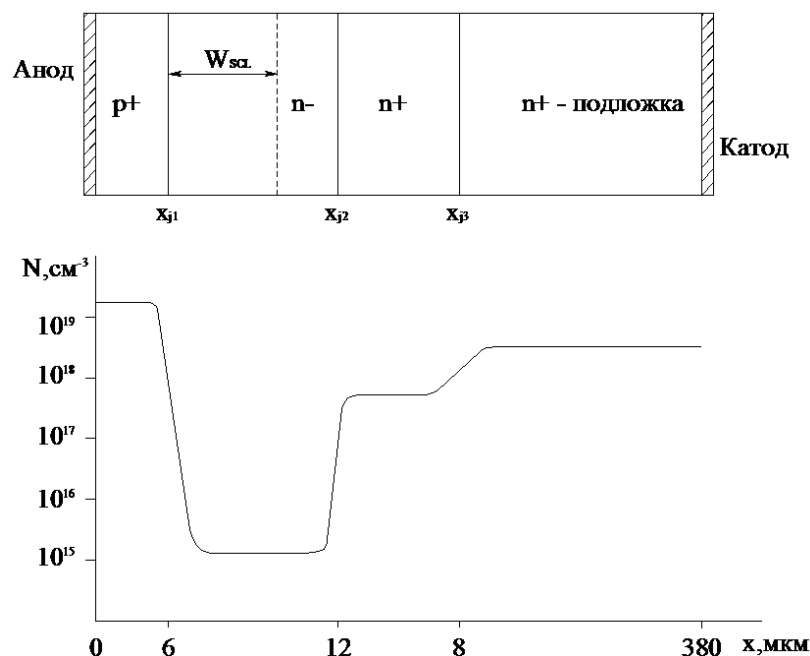
А – контакт анода, В – анодная область (p^+), С – высокоомная n^- -область, D – катод. В качестве защитного слоя могут использоваться диэлектрические плёнки SiO_2 и Si_3N_4 , а также полимерные материалы типа фотоимидов

Рис. 1. Структура кристалла GaAs-варикапа.

Физическая структура и распределение концентрации в $p^+n^-n^+n^+$ -структуре кристалла варикапа приведена на рисунке 2. Принимая в расчет общую протяженность эпитаксиальных областей и подложки GaAs-варикапа такой, как показано на рисунке 2, то на переходах x_{j1} , x_{j2} , x_{j3} возникают диффузионные потенциалы, сумма которых дает полное диффузионное напряжение такое же, как и на GaAs $p-i-n$ -диоде при $T=300\text{ K}$ [1–2]:

$$U_{VD} = U_{xj1} + U_{xj2} + U_{xj3} \leq 1,2B. \quad (1)$$

Так как варикап представляет собой, прежде всего, диодную структуру, то практически все параметры, включая присущие непосредственно варикапам, определяются удельным сопротивлением и толщиной высокоомного эпитаксиального слоя. В этом факте содержится как положительный момент (весь расчет варикапа мы можем свести к расчету параметров высокоомного эпитаксиального слоя), так и небольшой минус: неконтролируемое изменение параметров высокоомной эпитаксиальной пленки, а также параметры всех остальных эпитаксиальных слоев, включая паразитные сопротивления металлических контактов приводят к заметному разбросу ряда электрических параметров, таких как ёмкость и добротность.



W_{SCL} – область пространственного заряда в высокоомном эпитаксиальном слое.

Рис. 2. Физическая структура и распределение концентрации носителей заряда в структуре *GaAs*-варикапа.

Поэтому, в конечном итоге, только исследование экспериментальных образцов варикапов с последующей нормировкой значений электрических параметров позволяет оптимизировать структуру кристалла варикапа.

Используя формулу плоского конденсатора, для структуры, приведенной на рисунке 2, можно записать:

$$C_{VD} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pn}}{W_{SCL} (U_R)}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость *GaAs*,

ε_0 – электрическая постоянная;

S_{pn} – площадь *p-n*-перехода варикапа;

W_{SCL} – ширина области пространственного заряда высокоомного эпитаксиального слоя (базы), зависящая от приложенного обратного напряжения – U_R .

Учитывая, что разрабатываемые варикапы на основе *GaAs* выполнены полностью по эпитаксиальной технологии с разностью концентраций в несколько порядков, то вполне приемлемо приближение «Резкого» асимметричного *p-n*-перехода. Для такого перехода, в

приближении обеднения (при обратных напряжениях), ёмкость можно аппроксимировать следующим соотношением [4, с. 80–88]:

$$C_{VD} = S_{pn} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_D}{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}}, \quad (3)$$

где N_D – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа (высокоомном эпитаксиальном слое);

U_{pn}^* – контактная разность потенциалов p – n -перехода варикапа.

Принимая во внимание то, что ёмкость варикапов (C_{VD}) и диапазон обратных напряжений (U_R), как правило, оговариваются в исходных технических требованиях, а контактную разность потенциалов – U_{pn}^* можно вычислить в соответствии с (1), то на основании (3) можно определить в первом приближении площадь варикапов при уровне легирования базовой области $(1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$:

$$S_{pn} = C_{VD} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_D}}. \quad (4)$$

Использования соотношения (4) при разработке варикапов удобно тем, что одну и ту же структуру мы можем использовать для изготовления двух типов варикапов.

а) При обратном напряжении $U_R=4$ В и ёмкости $C_{VD}=250$ пФ мы получим значение площади p – n -перехода для первого варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 5,5 \text{ мм}^2$.

б) При обратном напряжении $U_R=4$ В и ёмкости $C_{VD}=68$ пФ мы получим значение площади p – n -перехода для второго варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 1,6 \text{ мм}^2$.

Толщину высокоомного эпитаксиального (базового) слоя h_{Bepi} выберем исходя из условия, что данная величина должна быть больше ширины области пространственного заряда (ОПЗ) $W_{SCL\text{max}}$ при максимальном обратном напряжении $U_{R\text{max}}$ в (5).

$$h_{\text{Bepi}} > W_{SCL\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (U_{pn}^* + U_{R\text{max}})}{q \cdot N_D}}. \quad (5)$$

Согласно (5), при $U_{R\text{max}} = 100$ В, получим $W_{SCL\text{max}} \approx 12$ мкм.

Таким образом, на основании полученных данных выбор толщины высокоомного эпитаксиального (базового) слоя $h_{\text{Bepi}} > 12$ мкм вполне приемлем.

Все вышеприведенные параметры – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа, толщина эпитаксиального слоя базовой области варикапа – непосредственно связаны с величиной добротности (6).

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{VD} \cdot R_{VD}}, \quad (6)$$

где C_{VD} – общая ёмкость варикапа при некотором заданном обратном напряжении – U_R ;

$f=50$ МГц – частота переменного напряжения, на которой осуществляется измерение добротности при некотором заданном обратном напряжении – U_R ;

R_{VD} – общее активное сопротивление структуры варикапа, с приемлемой точностью можно принять равным сопротивлению базовой области варикапа (сопротивлением контактов и высоколегированных областей можно пренебречь).

С учетом вышесказанного, общее активное сопротивление структуры варикапа [5, с. 147–303]:

$$R_{VD} \approx R_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D} \cdot \frac{W_B}{S_{pn}} = \rho_B \cdot \frac{W_B}{S_{pn}}, \quad (7)$$

где $\rho_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D}$ – удельное сопротивление базовой области варикапа;

S_{pn} – площадь p – n -перехода варикапа;

W_B – толщина квазинейтральной области базы варикапа.

Толщину квазинейтральной области базы варикапа можно вычислить следующим образом (рис. 2):

$$W_B = h_{\text{Вер}} - W_{SCL} = x_{j2} - x_{j1} - W_{SCL}, \quad (8)$$

где $h_{\text{Вер}}$ – толщина эпитаксиального слоя базовой области;

W_{SCL} – ширина ОПЗ в базовой области варикапа.

Соотношение (7) показывает преимущества применения полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда для изготовления варикапов. В данном случае применение $GaAs$ для изготовления варикапов со структурой, приведенной на рис. 1, обеспечивает подвижность электронов в базовой области – $\mu_n \approx 5000$ см²/В.с (для сравнения, в кремнии – $\mu_n \approx 1420$ см²/В.с). Это обеспечивает более низкие, по сравнению с Si , значения полного активного сопротивления варикапов и, как следствие, на основании (6), более высокие значения добротности $GaAs$ -варикапов.

Следует отметить, что и при расчете, и при измерении толщины и удельного сопротивления базового слоя варикапа имеет место существенная погрешность. Кроме всего,

что связано непосредственно с объемом структуры варикапов на параметры существенное влияние оказывает поверхность («Меза»-область), где имеют место нарушения кристаллической структуры и, как следствие, высокая плотность зарядовых состояний. Структура «Меза»-области приведена на рисунке 3.

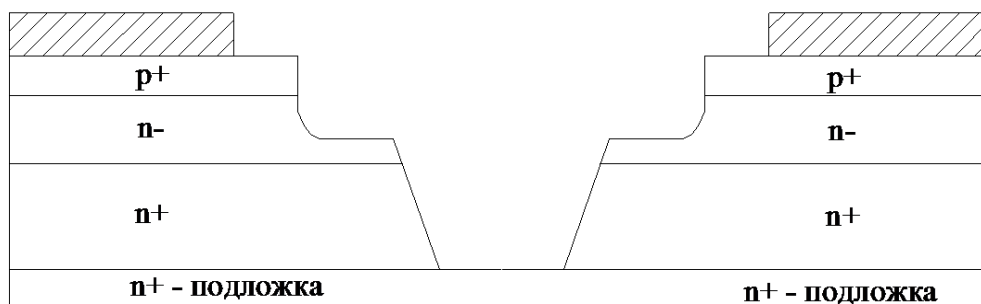


Рис. 3. Структура «Меза»-области кристаллов варикапов.

Поэтому на практике чаще всего сопротивление R_{VD} устанавливают экспериментальным путем на основе измерения динамического сопротивления прямой ветви вольт-амперной характеристики варикапа.

После сборки экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов (корпус типа ТО-251), было проведено исследование их вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Также было проведено измерение добротности.

Вольт-фарадные характеристики 10 штук экспериментальных образцов варикапов первого типа (одиночные кристаллы) при $T=300\text{ K}$ приведены на рисунке 4.

Исследуя рисунок 4 можно отметить, что линейность вольт-фарадных характеристик наблюдается практически во всем рабочем диапазоне обратных напряжений, начиная от 4 В и до 100 В. Лишь на участке менее 4 В наблюдается резкое возрастание ёмкости, но это не регламентированный для работы интервал обратных напряжений.

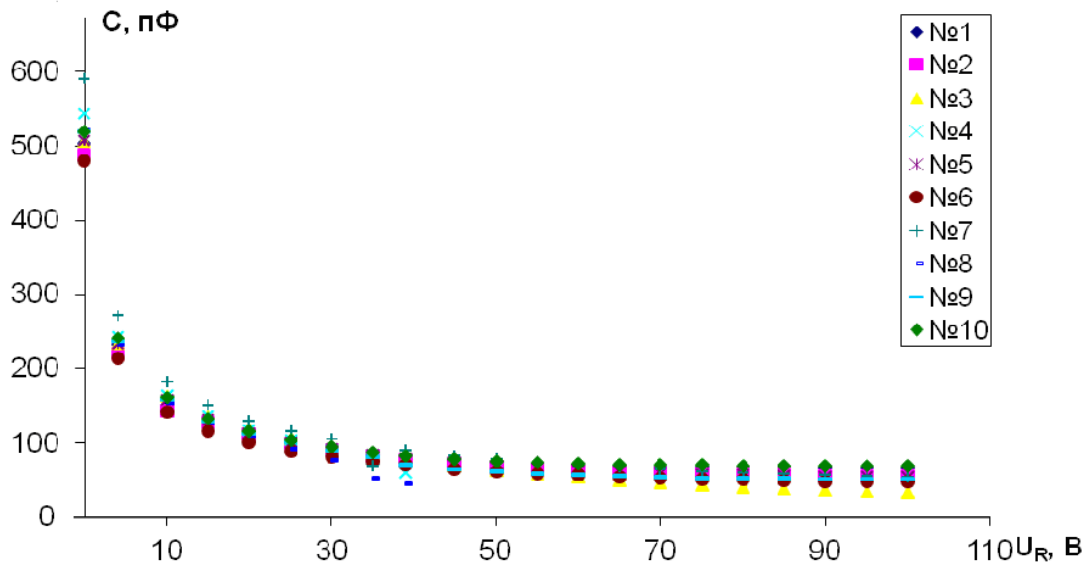


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики десяти экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов первого типа (одиночные кристаллы) при $T=300\text{ K}$.

Вольт-фарадные характеристики 10 шт. экспериментальных образцов варикапов второго типа (сдвоенные кристаллы) при $T=300\text{ K}$ приведены на рисунке 5.

Рисунок 5 показывает результат аналогичный предыдущему (см. рис. 4) с точки зрения линейности характеристики. Отличие в том, что величина ёмкости данного варикапа ниже, чем у предыдущего варианта (измерения проводились на одном, произвольно выбранном варикапе).

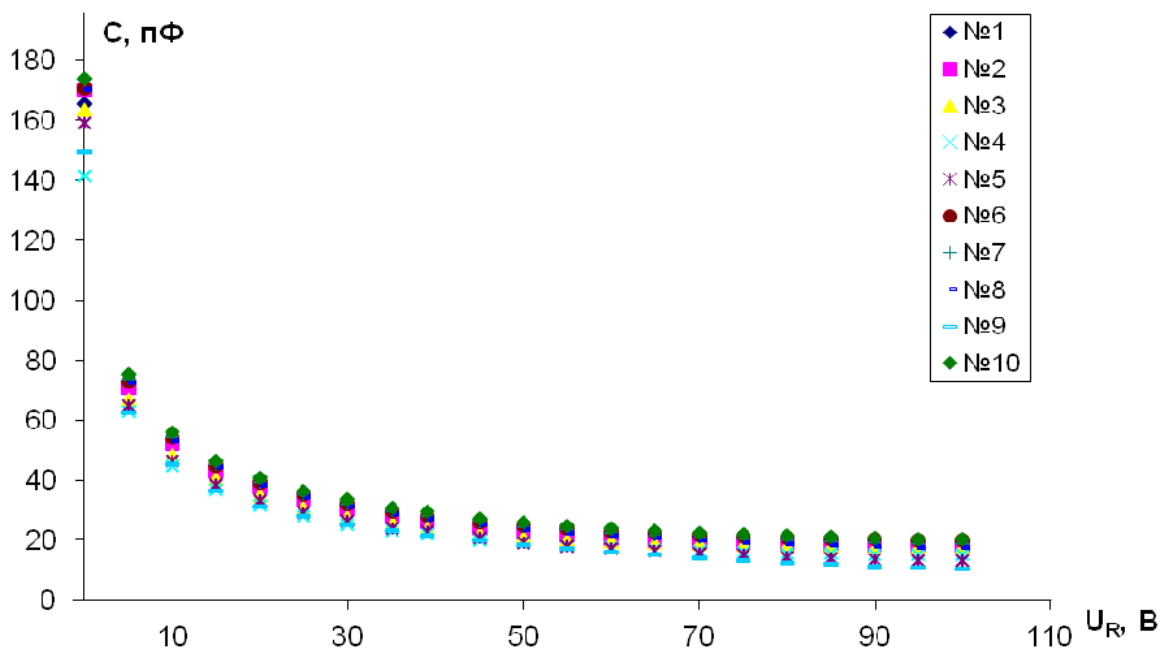


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики 10 шт. экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов второго типа (два варикапа на одном кристалле) при $T=300\text{ K}$.

Измерение добротности варикапов, а также зависимости данной добротности от частоты проводилось с помощью измерителя добротности Е4-11. Результаты измерения приведены на рисунках 6 и 7.

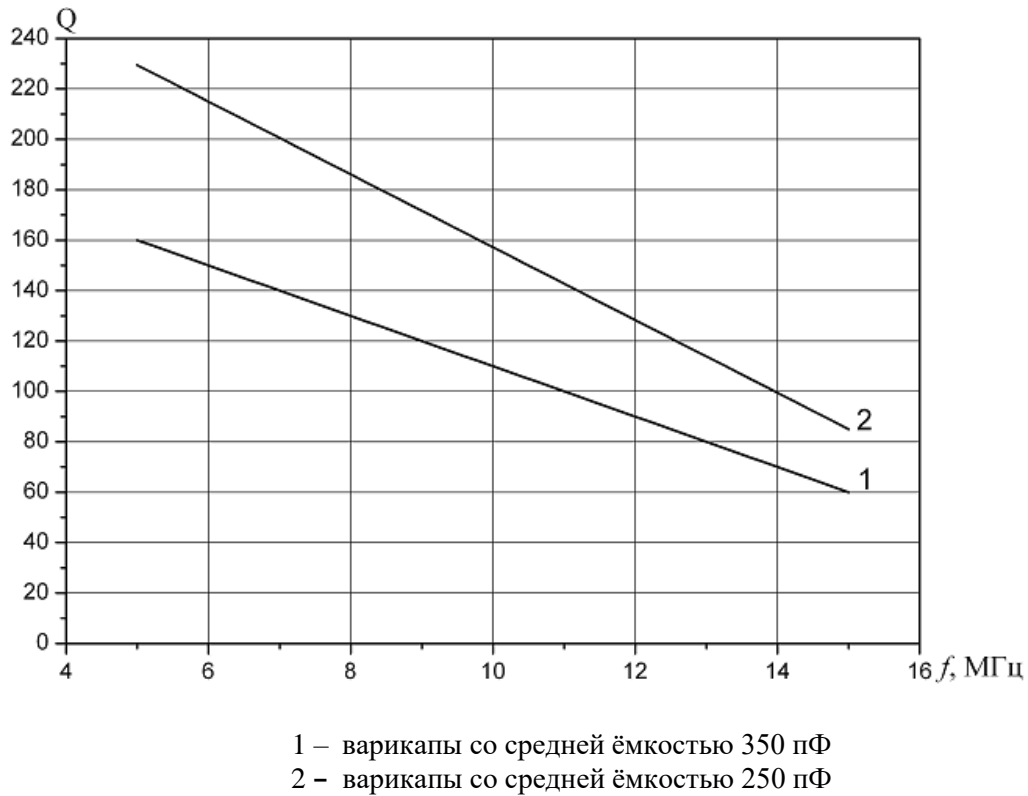


Рис. 6. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов первого типа от частоты.

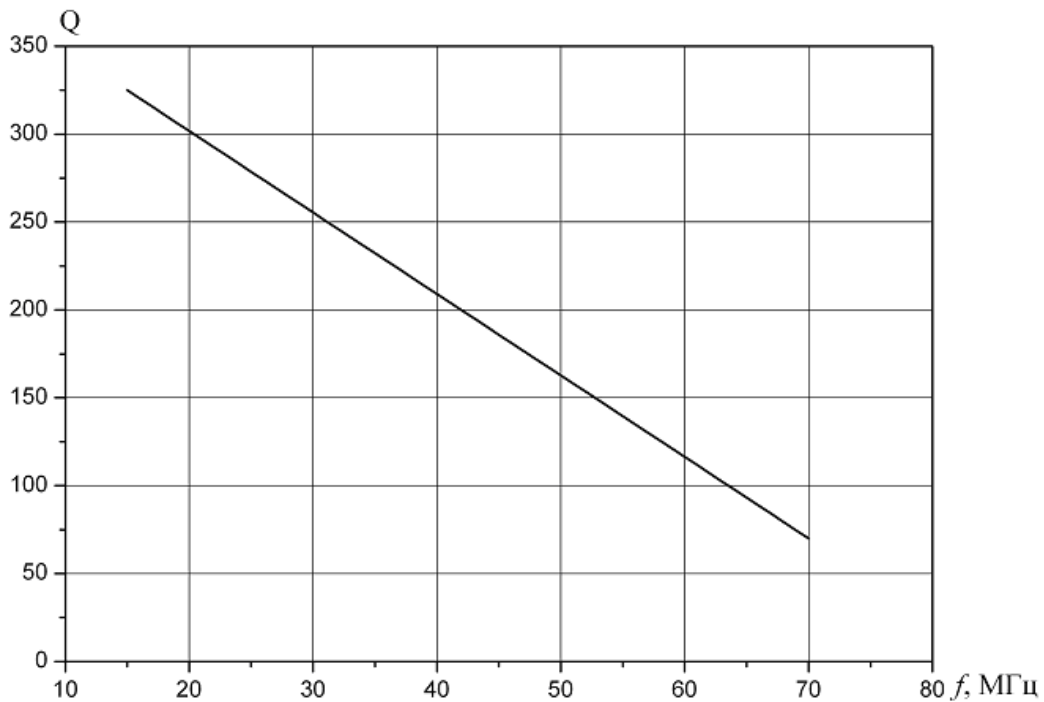


Рис. 7. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов второго типа от частоты (среднее значение ёмкости – 68 пФ).

В результате проведенной работы выполнен расчет физической структуры мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов двух типов: однокристальный вариант и вариант с двумя варикапами на одном кристалле. Изготовлены экспериментальные образцы мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов, проведено исследование их электрических параметров и характеристик.

В результате исследования электрических характеристик мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов, включая вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики установлено, что полученные зависимости позволяют использовать их наряду с кремниевыми варикапами в радиотехнической аппаратуре общепромышленного применения. Более широкий диапазон рабочих напряжений мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов позволяет применять их более широко, включая высоковольтную аппаратуру. Полученные значения добротности варикапов, величины которых превосходят добротности аналогичных кремниевых варикапов, обеспечивают возможность применения мезаэпитаксиальных *GaAs* – варикапов в *ВЧ*- и *СВЧ*-аппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сурайкин А. И. Быстродействующие высоковольтные *GaAs*-диоды для преобразовательной техники и импульсных устройств // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 35–37.
2. Сурайкин А. И., Федотов Е. Н. Быстродействующие высоковольтные *GAAS* диоды для силовой электроники [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2014. – № 22. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/bystrodejstvuyushhie-vysokovoltnye-gaas-diody-dlya-silovojj-ehlektroniki>.
3. Арсенид галлия. Получение, свойства, применение / Под ред. Ф. П. Кесаманлы, Д. Н. Наследова. – М.: Наука, 1973. – 472 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. / Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Уотсон Г. *СВЧ*-полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Г. Уотсона. – М.: Мир, 1972. – 662 с.