07

Аналитические модели барьерной емкости $p-n$-перехода в высоковольтных мезаэпитаксиальных полупроводниковых структурах

© *А.И. Сурайкин, Н.Н. Беспалов, А.А. Сурайкин*

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Россия
E-mail: suraykin@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2025 г.
В окончательной редакции 18 апреля 2025 г.
Принято к публикации 30 апреля 2025 г.

Приведены результаты исследования и расчета общей барьерной емкости высоковольтных, мезаэпитаксиальных диодов. Показано, как влияет периферийная мезаобласть на величину общей барьерной емкости $p-n$-перехода в мезаэпитаксиальных диодных структурах. Предложена аналитическая модель общей барьерной емкости высоковольтных мезаэпитаксиальных диодных структур, учитывающая емкость периферийной мезаобласти. Получены самосогласованные аналитические соотношения для барьерной емкости мезаобласти в двух вариантах: с постоянным углом наклона мезафаски, с переменным углом наклона мезафаски.

Ключевые слова: мезаэпитаксиальный диод, мезаобласть, мезафаска, барьерная емкость, вольт-фарадная характеристика.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.15.60803.20320

Развитие технологии формирования мезаструктурированной границы в полупроводниковых многослойных эпитаксиальных структурах с $p-n$-переходами позволяет разрабатывать быстродействующие диодные и транзисторные структуры с рабочими напряжениями более 1200 V. Многослойные мезаэпитаксиальные диодные структуры на основе GaAs обеспечивают рабочие напряжения более 2000 V. В системе электрических параметров и характеристик указанных полупроводниковых приборов присутствует такой параметр, как емкость $p-n$-перехода при фиксированной величине обратного смещения [1]. При производстве высоковольтных мезаэпитаксиальных диодных структур в процессе контроля электрических параметров обнаруживается заметное несоответствие между расчетными значениями общей барьерной емкости $p-n$-переходов и данными, полученными при исследовании экспериментальных образцов. Априори это несоответствие обусловлено наличием широкой мезаобласти, представляющей собой фаску, сформированную с некоторым конечным значением угла наклона. В работе [2] были получены результаты, учитывающие влияние положительной фаски с различными углами наклона на ширину области пространственного заряда (ОПЗ) в структурах с p^+-n-переходом. Однако зависимости барьерной емкости от размера фаски и угла ее наклона в высоковольтных мезаэпитаксиальных диодных структурах как с положительной, так и с отрицательной фаской не приведены ни в одной из опубликованных работ. В процессе исследования этой задачи авторы получили уникальный результат, приведенный в настоящей работе.

Возникновение так называемой „невязки" (ΔC_{tot}), которая может быть соизмерима с проектной емкостью диодной структуры, может быть количественно определено либо по разнице между расчетным и экспериментальным значениями общей барьерной емкости диода при максимальном обратном напряжении, либо с применением такого параметра, как „коэффициент перекрытия по емкости". „Невязка" ΔC_{tot} стремится к нулю при увеличении площади $p-n$-перехода и возрастает с ее уменьшением.

На рис. 1, *a* представлена упрощенная физическая структура высоковольтного мезаэпитаксиального диода при обратном смещении, показывающая распределение пространственного заряда как в объемной области, так и в мезаобласти (без учета искажений границ ОПЗ на поверхности мезаобласти) в пренебрежении распространением ОПЗ в анодную p^+-область.

Таким образом, с учетом распределения ОПЗ в периферийной мезаобласти общая барьерная емкость высоковольтных мезаэпитаксиальных диодов складывается из двух составляющих: проектной или активной, обусловленной расчетным размером кристалла диода со стороной a (кристалл диода, приведенный к квадрату), и периферийной, обусловленной мезаобластью шириной c (рис. 1, *a*).

С учетом указанного эквивалентная схема высоковольтного мезаэпитаксиального диода будет включать дополнительный элемент — барьерную емкость $p-n$-перехода в мезаобласти C_{jM} (рис. 1, *b*).

Для синтеза модели общей барьерной емкости высоковольтного мезаэпитаксиального диода с аналитическим дополнением емкости мезаобласти сформулируем ряд условий: $p-n$-переход резкий, асимметричный с однородно легированной базой; $p-n$-переход находится под обратным смещением, поэтому справедливо приближе-

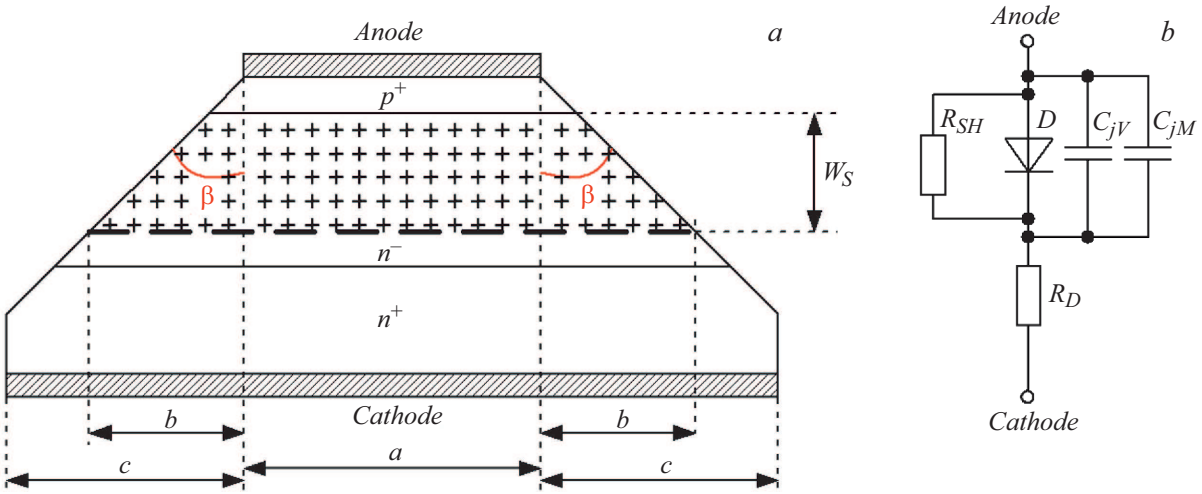


Рис. 1. *a* — физическая структура кристалла высоковольтного мезаэпитаксиального диода: β — угол наклона мезаобласти, a — сторона квадрата анодной области диода, b — длина нижней границы ОПЗ в мезаобласти, c — ширина мезаобласти, W_S — ширина ОПЗ; b — эквивалентная схема диода: D — идеальная диодная структура, C_{jV} — барьерная емкость проектной части кристалла диода, C_{jM} — барьерная емкость мезаобласти кристалла диода, R_D — последовательное сопротивление диода, обусловленное омическим сопротивлением полупроводника, а также контактами анода и катода, R_{SH} — паразитное сопротивление, шунтирующее p–n-переход.

ние обеднения ОПЗ и применима формула емкости плоского конденсатора; диод содержит периферийную мезаобласть с постоянной величиной угла наклона мезафаски — $\beta < 90^\circ$; ширина ОПЗ в проектной части кристалла диода и в мезаобласти одинакова.

Для решения поставленной задачи воспользуемся данными, приведенными на рис. 1, *a*. Вертикальную структуру спроецируем на плоскость и применим формулу емкости плоского конденсатора для расчета общей барьерной емкости высоковольтного мезаэпитаксиального диода [3]. Соотношение для барьерной емкости p–n-перехода запишем в дифференциальной форме

$$dC_{tot} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 dS(W_S)}{W_{S0}}, \qquad (1)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала, ε_0 — электрическая постоянная, $S(W_S)$ — площадь p–n-перехода диода как функция ширины ОПЗ, W_S — ширина ОПЗ, W_{S0} — ширина ОПЗ при нулевом внешнем обратном напряжении смещения на диоде, $dS(W_S)$ — бесконечно малое изменение площади p–n-перехода при бесконечно малом изменении напряжения смещения.

На основе проекции физической структуры кристалла диода на плоскость его площадь (площадь p–n-перехода) можно представить в виде

$$S(W_S) = a^2 + 4ab + 4b^2 = (a + 2b)^2$$
$$= (a + 2W_S \operatorname{tg}\beta)^2. \qquad (2)$$

В соотношении (2) переменная величина b (параметр) представлена как $b = W_S \operatorname{tg}\beta$, т. е. переменная b — это ширина ОПЗ в мезаобласти. Ширина ОПЗ в приближении обеднения идентифицируется известным соотношением [1,3].

Подставляя в соотношение (1) полный дифференциал соотношения (2), получим следующее:

$$dC_{jM} = \frac{4a\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta}{W_{S0}} dW_S + \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 W_S \operatorname{tg}^2\beta}{W_{S0}} dW_S. \qquad (3)$$

После интегрирования уравнения (3) получим соотношение для емкости мезаобласти кристалла высоковольтного мезаэпитаксиального диода

$$C_{jM} = \varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}} [4a + (W_S + W_{S0}) \operatorname{tg}\beta]. \qquad (4)$$

На практике в реальных высоковольтных мезаэпитаксиальных диодных структурах $-4a \gg (W_S + W_{S0}) \operatorname{tg}\beta$, поэтому соотношение (4) вырождается в простую формулу для барьерной емкости мезаобласти

$$C_{jM} = 4a\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}}$$
$$= P\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}}, \qquad (5)$$

где $P = 4a$ — периметр мезаобласти кристалла диода по сторонам его проектной (расчетной) части.

Соотношение для общей барьерной емкости p–n-перехода высоковольтного мезаэпитаксиального кристалла диода будет следующим:

$$C_{tot} = C_{jV} + C_{jM} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S_0}{W_S} + P\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}}, \qquad (6)$$

где $C_{jV} = \varepsilon\varepsilon_0 S_0/W_S$ — проектная составляющая общей барьерной емкости кристалла диода, обусловленная фотолитографическим размером его активной области (площадью S_0), $C_{jM} = P\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta(W_S - W_{S0})/W_{S0}$ — периферийная составляющая общей барьерной емкости диода, обусловленная размером и углом наклона фаски мезаобласти.

Ограничением применения модели барьерной емкости в виде соотношения (6) является то, что в этой модели угол наклона фаски мезаобласти β принят величиной постоянной. В этой связи соотношение (6) хорошо применимо к тем структурам высоковольтных мезаэпитаксиальных диодов, в которых форма мезаобласти допускает линейную аппроксимацию с определением средней величины угла наклона фаски мезаобласти $<\beta>$.

Для распространения модели общей барьерной емкости высоковольтного мезаэпитаксиального диода на случай мезаобласти произвольной формы в перечне исходных предположений изменим требование постоянства угла наклона фаски мезаобласти (с постоянной величины на величину переменную). Таким образом, общая емкость высоковольтного мезаэпитаксиального диода будет являться функцией двух переменных величин (ширины ОПЗ W_S и угла наклона фаски мезаобласти β):

$$C_{tot} = f(W_S, \beta). \tag{7}$$

Рассмотрим бесконечно малое изменение общей емкости варикапа, вызываемое бесконечно малым изменением ширины ОПЗ и угла наклона фаски мезаобласти. Тогда в предположении линейной независимости переменных W_S и β допустим, что существует не равная нулю вторая производная

$$\frac{\partial^2 C_{tot}}{\partial\beta\partial W_S} = F(\beta, W_S) \neq 0. \tag{8}$$

При этом угол β будем рассматривать как параметр, изменение которого происходит в диапазоне от 0 до $\beta < 90^\circ$. Запишем соотношение (5) при бесконечно малом изменении угла наклона фаски мезаобласти β для фиксированного значения границы ОПЗ W_S:

$$dC_{jM} = \left(P\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg}\beta \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}}\right) d\beta. \tag{9}$$

Выполнив интегрирование соотношения (9) по параметру β, получим

$$C_{jM} = P\varepsilon\varepsilon_0 \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}} \ln\left|\frac{1}{\cos\beta}\right|. \tag{10}$$

Общая барьерная емкость $p-n$-перехода высоковольтного мезаэпитаксиального диода для случая произвольной формы мезаобласти

$$C_{tot} = C_{jV} + C_{jM} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S_0}{W_S} + P\varepsilon\varepsilon_0 \frac{W_S - W_{S0}}{W_{S0}} \ln\left|\frac{1}{\cos\beta}\right|, \tag{11}$$

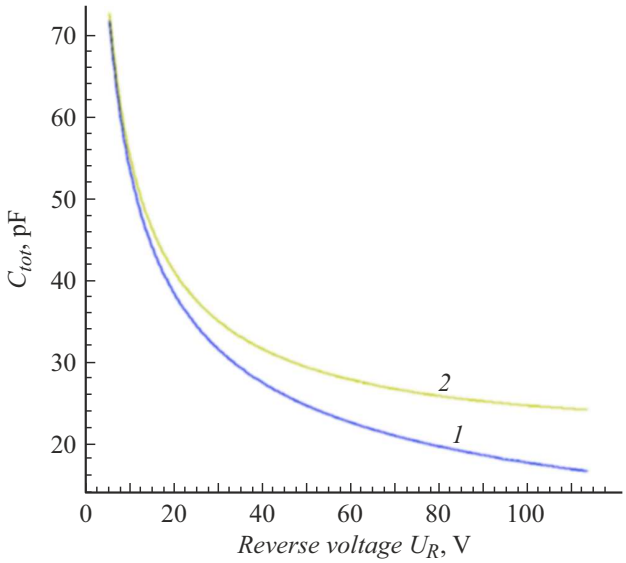


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика барьерной емкости $p-n$-перехода высоковольтного мезаэпитаксиального GaAs-диода ($S_0 = 1.2 \cdot 10^{-2}$ cm^2, $N_D = 2 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}, $T = 300$ K) без учета влияния мезафаски (*1*) и с учетом влияния мезафаски ($\beta = 60^\circ$) (*2*).

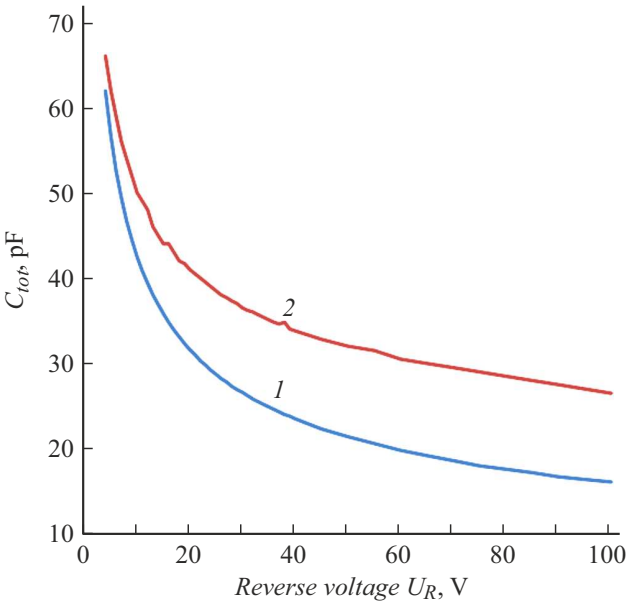


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики барьерной емкости $p-n$-переходов двух экспериментальных образцов высоковольтных мезаэпитаксиальных GaAs-диодов ($S_0 = 1.2 \cdot 10^{-2}$ cm^2, $N_D = 2 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}, $T = 300$ K). *1* — диод с мезаобластью, полученной в одном цикле жидкостного селективного травления ($\beta < 15^\circ$); *2* — диод с мезаобластью, полученной в двух циклах жидкостного травления ($\beta \approx 60^\circ$).

где $\beta < 90^\circ$ — непостоянный угол наклона фаски мезаобласти.

На основе модели (6) был выполнен расчет барьерной емкости $p-n$-перехода в мезаобласти GaAs-диодной

структуры [3]. На рис. 2 приведены две расчетные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) высоковольтного мезаэпитаксиального GaAs-диода: ВФХ *1* — без учета влияния мезафаски, ВФХ *2* — с учетом влияния мезафаски с углом наклона 60°. Полученные расчетные характеристики соответствуют характеристикам экспериментальных образцов высоковольтных мезаэпитаксиальных GaAs-диодов, мезаобласти которых получены в процессе жидкостного травления [4,5]. На рис. 3 приведены ВФХ двух однотипных высоковольтных мезаэпитаксиальных GaAs-диодов с различной формой мезаобласти.

Таким образом, получены аналитические математические модели общей барьерной емкости высоковольтных мезаэпитаксиальных структур, учитывающие вклад емкости мезаобласти в общую барьерную емкость $p-n$-переходов. Модели позволяют с приемлемой точностью производить расчет вольт-фарадных характеристик высоковольтных мезаэпитаксиальных быстродействующих диодов, транзисторов, высоковольтных варикапов во всем рабочем диапазоне напряжения смещения при любой геометрической форме мезаобласти [6]. Кроме этого, полученные модели позволяют осуществлять неразрушающий контроль формы мезаобласти и проводить вычисление плотности поверхностного заряда в мезаобласти.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices* (John Wiley and Sons, Inc., 2007), p. 80–86.
[2] А.С. Кюрегян, ФТП, **45** (1), 67 (2011). [A.S. Kyureguan, Semiconductors, **45** (1), 66 (2011). DOI: 10.1134/S1063782611010155].
[3] S.M. Sze, M.K. Lee, *Semiconductor devices, physics and technology* (John Wiley and Sons, Inc., 2010), p. 95–96.
[4] K.A. Jackson, W. Schroeter, *Compound semiconductor devices: structures, and processing* (Wiley-VCH, Weinheim–N.Y.–Brisbane–Singapore–Toronto, 1998), p. 85–86.
[5] C.Y. Chang, F. Kai, *GaAs high-speed devices: physics, technology and circuit applications* (John Wiley and Sons, Inc., 1994), p. 119–123.
[6] А.И. Сурайкин, А.А. Сурайкин, Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, № 2 (269), 20 (2023). DOI: 10.36845/2073-8250-2023-269-2-20-31