

Адмитанс и нелинейная емкость многослойной структуры металл–полупроводник

© Н.В. Востоков[¶], В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 24 июля 2007 г. Принята к печати 12 ноября 2007 г.)

Проведены теоретические исследования нелинейных свойств емкости и частотной зависимости адмитанса многослойной структуры металл–полупроводник. Показано, что адмитанс такой структуры зависит от частоты малого зондирующего сигнала. Зависимость емкости от напряжения, измеряемая зондирующим сигналом малой частоты, может иметь немонотонный характер. Исследовано поведение емкости структуры при большой амплитуде воздействующего сигнала. Через некоторое время после начала высокочастотного воздействия система переходит в установившийся режим, которому соответствует определенный заряд металлического слоя и емкость системы. После этого заряд металла и емкость не зависят от мгновенного значения напряжения, а определяются его амплитудой.

PACS: 73.40.Vz, 73.40.Ty

1. Введение

Полупроводниковые материалы с металлическими наноразмерными включениями вызывают интерес исследователей в качестве искусственной нелинейной среды, перспективной для различных приложений. Одной из особенностей такого материала является существование в полупроводнике обедненных областей вокруг металла, приводящих к возникновению нелинейных емкости и проводимости. Возможность формирования такой среды, представляющей собой матрицу монокристаллического GaAs с внедренными слоями металлических нанокластеров Al, Mo и W, была продемонстрирована в работах [1–3]. В работе [4] исследованы структуры, содержащие алюминиевые металлические слои в GaAs, с количеством алюминия в нанокластерном слое во много раз большим, чем на стадии его зарождения. Металлические слои представляли собой сетку сцепленных между собой нанокластеров с высотами, много меньшими их поперечных размеров. В такой ситуации простейшей моделью, описывающей среду с нанокластерами, является полупроводник, содержащий плоские сплошные слои металла. В рамках этой модели в настоящей работе изучаются нелинейные свойства емкости и частотная зависимость адмитанса многослойной полупроводниковой структуры со слоями плотно расположенных металлических нанокластеров. Рассматриваются два варианта структур: с металлическими слоями, окруженными диэлектрическими барьерами, — SIMIS-структура (например, в структурах Al/GaAs такими барьерами могут быть слои AlGaAs, образовавшиеся на интерфейсах во время роста), и без диэлектрических барьеров — SMS-структура.

Рассмотрим один период многослойной структуры металл–полупроводник, представляющий собой металлический слой, окруженный с обеих сторон полупроводником. Энергетическая диаграмма и эквивалентная

схема одного периода (в дальнейшем — структуры) показаны на рис. 1, *a* и *b*. Для величин пространственных зарядов полупроводника и напряжений на барьерах Шоттки можно записать систему уравнений:

$$u = u_1 + u_2 + \frac{e}{kT} j_s R S \left[\exp(u_1) - \exp(-u_2) - \frac{d\sigma_1}{du_1} \frac{du_1}{dt} + \frac{d\sigma_2}{du_2} \frac{du_2}{dt} \right], \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{d\sigma_2}{dt} = \exp(u_1) + \exp(-u_2) - 2, \quad (2)$$

$$\sigma_1^2 = \exp(u_1 - u_0) - u_1 + u_0 - 1, \quad (3)$$

$$\sigma_2^2 = \exp(-u_2 - u_0) + u_2 + u_0 - 1. \quad (4)$$

Уравнение (1) отражает тот факт, что приложенное к структуре напряжение u равно сумме падений напряжений на барьерах и квазинейтральных областях полупроводника, (2) следует из уравнения непрерывности,

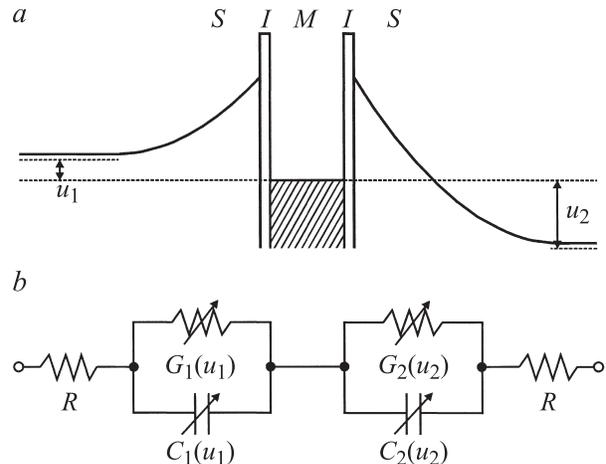


Рис. 1. *a* — энергетическая диаграмма и *b* — эквивалентная схема одного периода многослойной структуры металл–полупроводник.

[¶] E-mail: vostokov@ipm.sci-nnov.ru

(3) и (4) из уравнения Пуассона. В уравнениях использованы безразмерные переменные, которые связаны с размерными следующими соотношениями:

$$u = \frac{e}{kT} \hat{u}, \quad \sigma = \hat{\sigma} \sqrt{\frac{2\pi}{NkT\varepsilon}}, \quad t = \frac{\hat{t}}{\tau},$$

где

$$\tau = \frac{1}{j_S} \sqrt{\frac{NkT\varepsilon}{2\pi}}.$$

Здесь u_1 и u_2 — напряжения на барьерах Шоттки, σ_1 и σ_2 — соответствующие поверхностные плотности заряда обедненных областей полупроводника, σ — их сумма, а также величина поверхностной плотности заряда противоположного знака, сосредоточенного в металлическом слое; R — последовательное сопротивление квазинейтральной области полупроводника, u_0 — изгиб зон в полупроводнике при нулевом напряжении, j_S — плотность тока насыщения, S — площадь структуры, N — концентрация примеси в однородно легированном полупроводнике (для определенности, n -типа), ε — его диэлектрическая проницаемость, e — элементарный заряд, k — постоянная Больцмана, T — температура. Такое описание имеет силу, если между металлическими слоями существуют квазинейтральные области полупроводника.

2. Емкость SIMIS-структуры

Рассмотрим ситуацию, когда металлический слой окружен тонкими непроницаемыми для заряда диэлектрическими барьерами, падением напряжения на которых мы пренебрежем. В этом случае ток проводимости через структуру отсутствует, и в уравнении (1) слагаемые с экспонентами равны нулю, а уравнение (2) примет следующий вид: $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma = \text{const}$. Для частот изменения приложенного к структуре напряжения, много меньших обратного времени максвелловской релаксации, пренебрежем в (1) слагаемыми с производными по времени, в результате уравнение (1) преобразуется к виду: $u_1 + u_2 = u$. При $u_2 + u_0 \gg 1$ можно в выражении (4) пренебречь экспонентой, тогда, решая систему уравнений, найдем связь между u_1 и u :

$$u = \sigma^2 \mp 2\sigma \sqrt{\exp(u_1 - u_0) - (u_1 - u_0) - 1} + \exp(u_1 - u_0). \quad (5)$$

Знак (–) нужно брать при $u_1 - u_0 < 0$, а знак (+) при $u_1 - u_0 > 0$. Емкость на единицу площади структуры равна:

$$C = \left| \frac{d\hat{\sigma}_1}{d\hat{u}} \right| = \left| \frac{d\hat{\sigma}_1}{d\hat{u}_1} / \frac{d\hat{u}}{d\hat{u}_1} \right|.$$

Поэтому, используя (3) и (5), получим

$$C = \frac{\varepsilon}{4\sqrt{2}\pi\lambda_D} \times \frac{|\exp(u_0 - u_1) - 1|}{\sqrt{\exp(u_1 - u_0) - (u_1 - u_0) - 1 + \sigma |\exp(u_0 - u_1) - 1|}}, \quad (6)$$

где $\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon kT}{4\pi N e^2}}$ — длина Дебая. Таким образом, выражения (5) и (6) являются параметрическим заданием зависимости $C(u)$ для SIMIS-структуры, где u_1 является параметром. Эти выражения описывают емкость структуры для произвольной величины σ , если выполнено условие $u_2 + u_0 \gg 1$. Очевидно, те же выражения описывают емкость структуры полупроводник–диэлектрик–полупроводник (SIS) в ситуации, когда заряд σ расположен не в металлическом слое, а в диэлектрическом барьере, а падением напряжения на барьере можно пренебречь. В случае идеальной SIS-структуры, когда $\sigma = 0$, можно получить выражение для емкости, не пренебрегая экспонентой в (4). Решая, как и раньше, систему четырех уравнений для u_1 , u_2 , σ_1 , σ_2 и учитывая падение напряжения на диэлектрическом слое (которое становится существенным, если толщина диэлектрика больше или порядка длины Дебая), получим:

$$\bar{u} = u + \frac{\sqrt{2}\varepsilon d}{\varepsilon_l \lambda_D} \sqrt{\frac{1}{Z} + \ln Z - 1}, \quad (7)$$

$$C = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{2}\pi\lambda_D} \left[\frac{\sqrt{2}\varepsilon d}{\varepsilon_l \lambda_D} + \frac{2uZ\sqrt{\frac{1}{Z} + \ln Z - 1}}{2 + u(Z - 1) - Z - \frac{1}{Z}} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$Z = \frac{\exp(u) - 1}{u}. \quad (9)$$

Здесь d — толщина диэлектрика, ε_l — его диэлектрическая проницаемость, \bar{u} — напряжение на всей структуре, включая диэлектрик. Выражения (7), (8) и (9) являются параметрическим заданием зависимости емкости от напряжения $C(\bar{u})$ для идеальной SIS-структуры, где u является параметром. Полученные формулы описывают емкость варакторов на барьерных гетероструктурах [5,6]. На рис. 2 показаны зависимости безразмерной емкости на единицу площади ($C\lambda_D$) SIMIS-структуры от напряжения для различных σ . Каждой величине σ соответствует свой изгиб зон при нулевом напряжении — u_0 . Зависимости построены для трех значений заряда $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2(\dot{u}_0 = 0.7\text{ В})$, $\sigma_3 = 2\sigma_2(\dot{u}_0 = 2.7\text{ В})$, для GaAs ($\varepsilon = 12.8$) с использованием (5)–(9). В выражениях (7) и (8), которые использовались для построения зависимости при $\sigma = 0$, толщина диэлектрика d была взята равной нулю. Как видно из рисунка, когда $\sigma \neq 0$ ($u_0 \neq 0$), для напряжений на структуре меньше некоторой величины емкость почти не изменяется. Емкость начинает заметно спадать при напряжениях, больших напряжения, соответствующего выпрямлению зон прямо смещенного (левого) контакта. До этого момента суммарная ширина

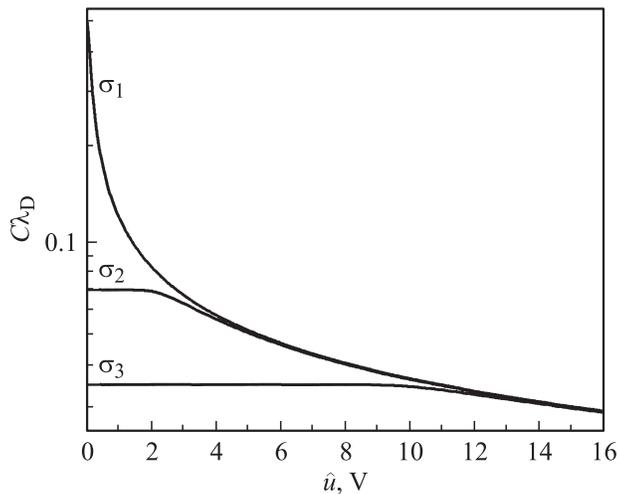


Рис. 2. Зависимости безразмерной емкости на единицу площади SIMIS-структуры от напряжения для различных величин заряда металлического слоя σ .

обедненных областей контактов не меняется с изменением напряжения на структуре, поэтому не меняется ее емкость. Постоянство суммарной ширины обедненных областей полупроводника связано с его однородным легированием. В случае неоднородного легирования емкость будет зависеть от напряжения во всем диапазоне. С увеличением напряжения на многослойной структуре полупроводник между слоями металла полностью обедняется, и емкость перестает зависеть от напряжения.

3. Адмитанс SMS-структуры

Рассмотрим ситуацию, когда диэлектрические барьеры вокруг металлического слоя в полупроводнике отсутствуют, и структура представляет собой встречно-включенные контакты Шоттки. В этом случае через структуру может протекать ток проводимости. Пусть к структуре приложено напряжение $u(t) = v + \tilde{v}(t)$, где $\tilde{v} \propto \exp(i\omega t)$ — малое ($|\tilde{v}| \ll 1$) переменное напряжение, а v — постоянное напряжение произвольной величины. Будем искать решение системы (1)–(4) в виде $u_{1,2}(t) = v_{1,2} + \tilde{v}_{1,2}(t)$, где $v_{1,2}$ — постоянные, а $\tilde{v}_{1,2} \propto \exp(i\omega t)$ — малые переменные напряжения на каждом из барьеров Шоттки. При этом пренебрежем, как и раньше, в уравнении (1) слагаемыми в квадратных скобках, поскольку рассматриваемая частота ω много меньше обратного времени максвелловской релаксации, а постоянный ток мал (меньше тока насыщения). Линеаризуя (2), получим связь между $v_{1,2}$ и v :

$$v_{1,2} = \pm \ln \left(\frac{2}{1 + \exp(\mp v)} \right) \quad (10)$$

и выражение для адмитанса SMS-структуры: $G(v) + i\omega C(v)$, где

$$G(v) = j_s \frac{e}{kT} \frac{G_1 G_2 (G_1 + G_2) + (\omega \tau)^2 (G_1 C_2^2 + G_2 C_1^2)}{(G_1 + G_2)^2 + (\omega \tau)^2 (C_1 + C_2)^2}, \quad (11)$$

$$C(v) = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{2}\pi\lambda_D} \frac{G_1^2 C_2 + G_2^2 C_1 + (\omega \tau)^2 C_1 C_2 (C_1 + C_2)}{(G_1 + G_2)^2 + (\omega \tau)^2 (C_1 + C_2)^2}, \quad (12)$$

$$G_{1,2}(v_{1,2}) = \exp(\pm v_{1,2}), \quad (13)$$

$$C_{1,2}(v_{1,2}) = \frac{|1 - \exp(\pm v_{1,2} - u_0)|}{2\sqrt{\exp(\pm v_{1,2} - u_0) \mp v_{1,2} + u_0 - 1}}, \quad (14)$$

и в выражениях (10), (13) и (14) верхние знаки соответствуют индексам „1“. Таким образом, $G(v)$ и $C(v)$ — дифференциальные проводимость и емкость SMS-структуры для малого зондирующего сигнала. Как видно из (11) и (12), они зависят от частоты. Дисперсия имеет место на частотах, меньших или порядка некоторой характерной частоты $\omega_0 = \frac{1}{\tau C_1(0)}$, которая определяется временем перезарядки емкости обратным током. На частотах, много больших ω_0 , емкость и проводимость от частоты практически не зависят. На рис. 3, а показаны зависимости безразмерной емкости на единицу площади ($C_{лД}$) SMS-структуры от величины приложенного к структуре постоянного напряжения для различных частот ω переменного напряжения. Зависимости построены для GaAs для значений параметров $T = 300$ К, $\lambda_D = 6.8$ нм, $j_s = 1.3$ мкА/см² (для таких значений параметров $\omega_0 = 218$ Гц), для трех различных частот: $\omega_1 = 0$, $\omega_2 = 300$ Гц, $\omega_3 = 3$ кГц. Как видно из

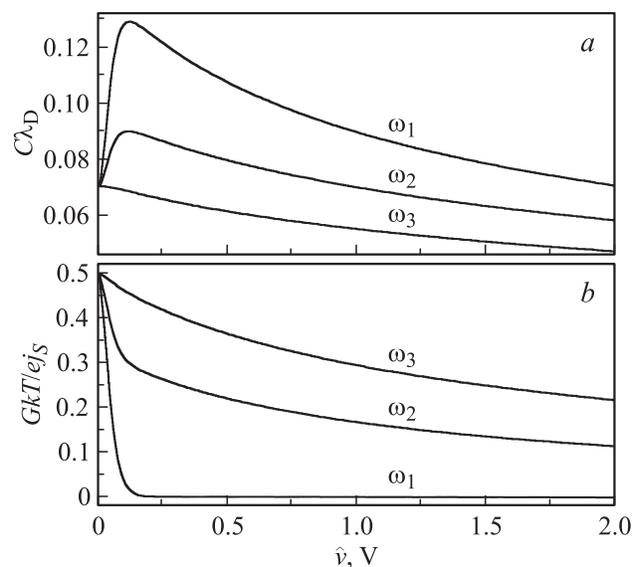


Рис. 3. а — зависимости безразмерной емкости на единицу площади и б — безразмерной проводимости на единицу площади SMS-структуры от величины приложенного к структуре постоянного напряжения для различных частот ω переменного напряжения.

рисунка, на низких частотах зависимости носят немонотонный характер. На рис. 3, *b* показаны зависимости безразмерной проводимости на единицу площади ($G \frac{kT}{e j_s}$) SMS-структуры для тех же параметров и частот. Все зависимости построены с использованием выражений (10)–(14). Если структура многослойная, то при некоторой величине постоянного напряжения полупроводник между слоями металла полностью обедняется. После этого зависимости проводимости одного периода многослойной структуры от напряжения на нем для разных частот переходят в одну зависимость, соответствующую (11) при $\omega = 0$. Емкость выходит на постоянное значение, являющееся продолжением зависимости (12) при $\omega = \infty$. Те же результаты получатся, если рассмотреть в качестве периода многослойной структуры полупроводниковый слой, окруженный с обеих сторон металлом. Такие структуры металл–полупроводник–металл используются в СВЧ-электронике в качестве инжекционно-пролетных диодов [7]. Приведенное описание поведения емкости SIMIS-структуры и адмитанса SMS-структуры важно для диагностики полупроводниковых структур с внедренными металлическими слоями.

4. Емкость SMS-структуры при большом сигнале

Для произвольной амплитуды и частоты приложенного к SMS-структуре переменного напряжения получить аналитическое решение системы уравнений (1)–(4) не удастся. Пусть к SMS-структуре приложено переменное периодически изменяющееся напряжение на частоте много больше ω_0 , но много меньше обратного времени максвелловской релаксации. В течение каждого периода колебаний металлический слой будет заряжаться током через прямо смещенный контакт Шоттки и разряжаться током через обратно смещенный контакт. Пока величина прямого тока больше обратного, заряд металлического слоя будет расти, это будет приводить к уменьшению напряжения на прямо смещенном контакте и к увеличению напряжения на обратно смещенном. Переходный процесс будет происходить до тех пор, пока заряд, переносимый за период колебаний прямым током, не сравняется с зарядом, переносимым обратным током. Поскольку в течение переходного процесса металлический слой заряжается, емкость SMS-структуры уменьшается. В установившемся режиме емкость практически не зависит от мгновенного значения напряжения. На рис. 4 показаны зависимости емкости SMS-структуры, нормированной на свое значение при нулевом напряжении, от времени на начальных стадиях переходного процесса, после подачи на структуру периодического напряжения с частотой $\nu = 100$ ГГц и различными значениями амплитуды: 1, 2 и 10 В (кривые 1, 2 и 3 соответственно). А также после подачи на структуру напряжения в виде мгновенного скачка с амплитудой 10 В (кривая 4). На вставке показана зависимость

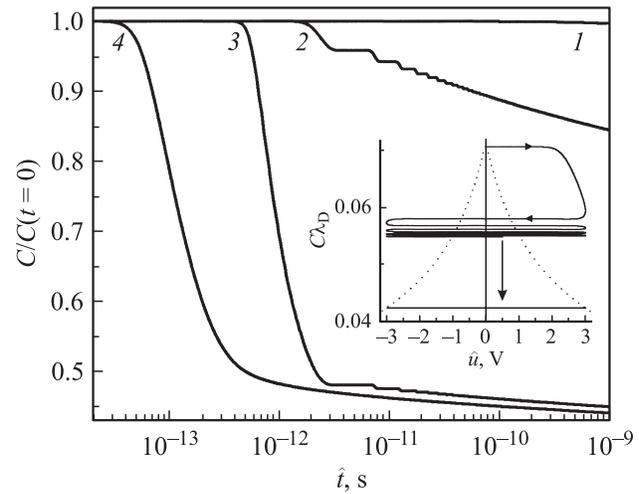


Рис. 4. Зависимости емкости SMS-структуры, нормированной на свое начальное значение от времени, после подачи на структуру периодического напряжения с частотой $\nu = 100$ ГГц и амплитудой 1, 2, 10 В (кривые 1, 2, 3) и мгновенного скачка напряжения с амплитудой 10 В (кривая 4). На вставке — зависимость безразмерной емкости SMS-структуры от мгновенного значения периодического напряжения с частотой $\nu = 100$ ГГц и амплитудой 3 В.

безразмерной емкости SMS-структуры от мгновенного значения поданного на структуру периодического напряжения с частотой $\nu = 100$ ГГц и амплитудой 3 В. Кривые получены в результате численного решения системы (1)–(4) для $\hat{u}_0 = 0.7$ В, $\epsilon = 12.8$, $T = 300$ К, $\lambda_D = 6.8$ нм, $j_s = 1.3$ мкА/см², $RS = 8.7 \cdot 10^{-7}$ Ом · см². Горизонтальной линией, на которую указывает вертикальная стрелка на вставке к рис. 4, показано значение емкости в установившемся режиме. Значение емкости в установившемся режиме в зависимости от амплитуды поданного на структуру напряжения определяет пунктирная кривая (она практически совпадает с высокочастотной емкостью SMS-структуры для малого сигнала — кривой для ω_3 с рис. 3, *a*). Зависимость емкости от мгновенного значения напряжения в установившемся режиме отсутствует по той же причине, что и зависимость емкости SIMIS-структуры, показанной на рис. 2 для случаев $\sigma \neq 0$ ($u_0 \neq 0$), от напряжений, меньших напряжения, соответствующего выпрямлению зон прямо смещенного контакта. Характерное время переходного процесса $\sim \frac{\tau}{4\sqrt{u_0}}$, в нашем случае эта величина порядка 10^{-3} с. Несмотря на это, как видно из рис. 4, при больших значениях амплитуды сигнала емкость успевает уменьшиться на десятки процентов за пикосекундное время и в дальнейшем слабо меняется за период колебаний. Это происходит из-за того, что в начале переходного процесса на прямо смещенном контакте за максвелловское время возникает большое напряжение, вызывающее большой ток зарядки металлического слоя. В случае многослойной структуры уменьшение емкости прекратится, когда полупроводник между слоями метал-

ла полностью обеднится. При соответствующем подборе периода и уровня легирования многослойной структуры можно ограничить уменьшение емкости в самом начале переходного процесса. Время разрядки металла после выключения напряжения можно приблизительно оценить по формуле $\hat{t} = \frac{\Delta\hat{\sigma}}{2j_s} \approx \frac{\hat{\sigma}(u=0)}{2j_s}$. Для наших значений параметров эта оценка дает 0.24 с. Описанные свойства емкости SMS-структуры могут найти практическое применение, например, в устройствах для защиты входных цепей или в нелинейных распределенных системах.

5. Заключение

Проведены теоретические исследования нелинейных свойств емкости и частотной зависимости адмитанса SIMIS и SMS структур. Получены аналитические выражения для зависимости емкости SIMIS-структуры и адмитанса SMS-структуры от приложенного напряжения. Показано, что на частотах, меньших или порядка некоторой характерной ω_0 , адмитанс SMS-структуры зависит от частоты малого зондирующего сигнала. При этом зависимость емкости от напряжения имеет немонотонный характер. Частота ω_0 определяется временем перезарядки емкости обратным током. Полученные закономерности важны для диагностики полупроводниковых структур с внедренными металлическими слоями.

Исследовано поведение емкости SMS-структуры при большой амплитуде воздействующего сигнала. Через некоторое время после начала высокочастотного воздействия система переходит в установившийся режим, которому соответствует определенный заряд металлического слоя и емкость системы. После этого заряд металла и емкость не зависят от мгновенного значения напряжения, а определяются его амплитудой. Уменьшение емкости на начальных стадиях переходного процесса может происходить очень быстро — на десятки процентов за пикосекундное время. Такие свойства емкости SMS-структуры могут найти практическое применение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-16474).

Список литературы

- [1] T. Noda, T. Mano, N. Koguchi. *Appl. Surf. Sci.* **252**, 5408 (2006).
- [2] Н.В. Востоков, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.И. Корытин, А.В. Мурель, В.И. Шашкин. *ФТП*, **39**, 92 (2005).
- [3] V.I. Shashkin, B.N. Zvonkov, N.V. Vostokov, Yu.A. Danilov, Yu.N. Drozdov, A.V. Murel. *Booklet of Extended Abstracts of 11th European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy* (Switzerland, Lausanne, 2005) p. 119.
- [4] Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.А. Прякин, В.И. Шашкин, И.Ю. Шулепова. *Письма ЖТФ*, **33** (10), 83 (2007).

- [5] A. Rydberg, H. Gronqvist, E.L. Kollberg. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **11**, 373 (1990).
- [6] J. Vukusic, T. Bryllert, T.A. Emadi, M. Sadeghi, J. Stake. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **28**, 340 (2007).
- [7] К.А. Валиев, Ю.И. Пашинцев, Г.В. Петров. *Применение контакта металл–полупроводник в электронике* (М., Радио и связь, 1981).

Редактор Л.В. Беляков

Admittance and nonlinear capacitance of a multilayer structure metal–semiconductor

N.V. Vostokov, V.I. Shashkin

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Nonlinear properties of capacitance and frequency dependence of admittance for a multilayer metal–semiconductor structure are investigated theoretically. Admittance of such a structure depends on frequency of a small probing signal. The dependence of capacitance on bias voltage with low-frequency probing signal can have a nonmonotone character. The behavior of capacitance for large amplitude of signal is studied. After a transient time from the moment of switching on the high-frequency signal, the system goes to steady state with defined charge of the metal layer and capacitance of the system. In the steady state the charge of metal and the capacity does not depend on instantaneous value of voltage and are determined by the amplitude of signal.