

06

Флуктуационная модель вольт-фарадной характеристики МДП-структуры

© Т.Г. Меньшикова, А.Е. Бормонтов

Воронежский государственный университет, Воронеж
E-mail: kuplinova@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 декабря 2009 г.

Исследована форма вольт-фарадной характеристики МДП-структуры при наличии статистических флуктуаций встроенного в диэлектрик заряда. Рассмотрено влияние зарядовых флуктуаций на энергетический спектр плотности поверхностных состояний (ПС) и другие параметры МДП-структуры. Показано, что при использовании обычных емкостных методик определения плотности ПС наличие флуктуаций может привести как к завышенной оценке ее величины (в режимах обогащения и инверсии), так и к заниженной оценке (в режиме обеднения), проявляясь в последнем случае в форме „отрицательной“ плотности. Учет флуктуаций встроенного заряда необходим также для повышения точности контроля других параметров МДП-структуры емкостными методами.

Неоднородность температурных полей при окислении и отжигах, статистическое распределение по поверхности полупроводника примесей и заряженных центров, а также различные поверхностные загрязнения и дефекты приводят к неоднородному распределению встроенного заряда в МДП-структуре [1,2]. Микронеоднородность заряда и связанные с ней флуктуации поверхностного электростатического потенциала оказывают существенное влияние на электрофизические характеристики МДП-структур и приборов на их основе, вызывая ряд нежелательных эффектов — деформацию вольт-фарадных характеристик (ВФХ), сдвиг порогового напряжения, уменьшение подвижности носителей тока в инверсионных каналах, изменение динамических и частотных характеристик МДП-приборов [1–3]. Таким образом, учет влияния зарядовых флуктуаций необходим при разработке МДП-приборов и интегральных схем. Это особенно важно в связи с уменьшением размеров активных элементов полупроводниковых приборов.

Для непосредственного измерения флуктуаций электростатического потенциала и изучения характера его распределения вдоль границы

раздела полупроводник– диэлектрик удобно использовать метод вибрационного динамического конденсатора [4], однако его использование для измерения других параметров структуры затруднено. Поэтому большинство экспериментальных методик изучения МДП-структур основано на измерении ВФХ и ее сравнении с теоретической характеристикой идеальной структуры. Вместе с тем использование теоретических ВФХ, построенных без учета флуктуаций встроеного заряда, может привести к существенным погрешностям в расчетах электрофизических параметров МДП-структуры. Цель работы — разработка методики моделирования вольт-фарадной характеристики МДП-структуры при наличии зарядовых флуктуаций и анализ влияния этих флуктуаций на электрофизические параметры структуры.

Предлагаемая методика моделирования ВФХ МДП-структуры при наличии флуктуаций встроеного заряда основана на простейшей модели зарядовых флуктуаций — так называемой „мозаичной“ модели Гоэцбергера [5]. Эта модель лежит в основе теории планарно-неоднородного МДП-транзистора [6] и широко применяется для интерпретации дисперсии времени перезарядки поверхностных состояний в МДП-структуре при наличии крупномасштабных технологических флуктуаций. Именно такие флуктуации наблюдаются непосредственно в экспериментах со сканирующим ртутным зондом [7] и с использованием вибрационного динамического конденсатора (зонда Кельвина) [4]. В „мозаичной“ модели МДП-структура мысленно разбивается на большое число элементарных ячеек — микроконденсаторов, основные характеристики которых (емкость, заряд, потенциал) считаются однородными в пределах каждой элементарной ячейки.

Для каждого микроконденсатора пространственный заряд Q_{sc} и дифференциальная емкость области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника C_{sc} описываются известными соотношениями Гаррета–Браттейна [8]:

$$Q_{sc} = \frac{\varepsilon_s kT}{qL_D} F(y_s, \lambda), \quad (1)$$

$$C_{sc} = \frac{q^2}{kT} n_i L_D \left| \frac{\lambda^{-1}(\exp(y_s) - 1) - \lambda(\exp(-y_s) - 1)}{F(y_s, \lambda)} \right|, \quad (2)$$

где $F(y, \lambda) = \pm[\lambda^{-1}(\exp(y) - y - 1) + \lambda(\exp(-y) + y - 1)]$, n_i — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике, L_D — дебаевская длина экранирования в собственном полупроводнике, λ —

степень легирования полупроводника, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Естественно предположить, что флуктуации поверхностного потенциала носят случайный характер и статистически независимы в разных точках границы раздела диэлектрик–полупроводник. Это означает, что плотность вероятности существования в планарно-неоднородной МДП-структуре элементарной ячейки с поверхностным потенциалом y_s описывается распределением Гаусса

$$P(y_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{y_s - \bar{y}_s}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

где σ — стандартное отклонение поверхностного потенциала, \bar{y}_s — его среднее значение.

Для нахождения пространственного заряда полупроводника в планарно-гетерогенной МДП-структуре необходимо усреднить выражение (1) по всем возможным значениям поверхностного потенциала (от $-\infty$ до $+\infty$). В соответствии с правилом „трех сигм“ для гауссовского распределения промежутки интегрирования можно уменьшить до 6σ (от $\bar{y}_s - 3\sigma$ до $\bar{y}_s + 3\sigma$). Для нахождения дифференциальной емкости ОПЗ полупроводника в МДП-структуре с неоднородно распределенным поверхностным потенциалом таким же образом усредняется выражение (2). Окончательные выражения для пространственного заряда и емкости ОПЗ полупроводника в планарно-гетерогенной структуре будут иметь вид:

$$Q_{sc}(\bar{y}_s) = \frac{2qn_iL_1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{\bar{y}_s-3\sigma}^{\bar{y}_s+3\sigma} F(y_s, \lambda) \exp\left[-\frac{(y_s - \bar{y}_s)^2}{2\sigma^2}\right] dy_s, \quad (4)$$

$$C_{sc}(y_s) = \frac{q^2}{kT} \frac{n_iL_D}{\sqrt{2\pi\sigma}} \times \int_{\bar{y}_s-3\sigma}^{\bar{y}_s+3\sigma} \left| \frac{\lambda^{-1}(\exp y_s - 1) - \lambda(\exp(-y_s) - 1)}{F(y_s, \lambda)} \right| \exp\left[-\frac{(y_s - \bar{y}_s)^2}{2\sigma^2}\right] dy_s. \quad (5)$$

Для нахождения полной емкости структуры помимо дифференциальной емкости ОПЗ C_{sc} необходимо учесть последовательно включенную

геометрическую емкость диэлектрического слоя C_i :

$$C(\bar{y}_s) = \frac{C_i C_{sc}(\bar{y}_s)}{C_i + C_{sc}(\bar{y}_s)}. \quad (6)$$

Управляющее напряжение V_g , приложенное к затвору МДП-структуры, делится между диэлектриком и полупроводником и определяется соотношением

$$V_g(\bar{y}_s) = -\frac{Q_{sc}(\bar{y}_s)}{C_i} + \frac{kT}{q} \bar{y}_s.$$

Соотношения (6) и (7) представляют собой параметрическое уравнение низкочастотной (НЧ) ВФХ МДП-структуры с учетом флуктуаций поверхностного потенциала.

Для моделирования высокочастотной (ВЧ) ВФХ достаточно в выражении для емкости ОПЗ C_{sc} (5) пренебречь вкладом неосновных носителей заряда, так как при высоких частотах тестового сигнала они (вследствие инерционности рекомбинационных процессов) не успевают следовать за изменением поверхностного потенциала. Поэтому в случае ВЧ их вклад в емкость ОПЗ равен нулю, и выражение (5) для полупроводника p -типа примет следующий вид:

$$C_{sc}(\bar{y}_s) = \frac{q^2}{kT} \frac{n_i L_D \sqrt{\lambda}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{\bar{y}_s - 3\sigma}^{\bar{y}_s + 3\sigma} \frac{[\exp(-y_s) - 1]}{\sqrt{\exp(-y_s) + y_s - 1}} \exp\left[-\frac{(y_s - \bar{y}_s)}{2\sigma^2}\right] dy_s, \quad (8)$$

а для полупроводника n -типа

$$C_{sc}(\bar{y}_s) = \frac{q^2}{kT} \frac{n_i L_D}{\sqrt{2\pi\lambda\sigma}} \int_{\bar{y}_s - 3\sigma}^{\bar{y}_s + 3\sigma} \frac{[\exp(y_s) - 1]}{\sqrt{\exp(y_s) - y_s - 1}} \exp\left[-\frac{(y_s - \bar{y}_s)}{2\sigma^2}\right] dy_s. \quad (9)$$

В то же время неосновные носители участвуют в экранировке внешнего электрического поля, поэтому зависимость $V_g(\bar{y}_s)$ имеет одинаковый вид (7) в случаях НЧ и ВЧ.

Теоретические НЧ и ВЧ ВФХ кремниевой МДП-структуры (с концентрацией акцепторной примеси $N_A = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и толщиной окисла $d_i = 40 \text{ nm}$), рассчитанные предложенным методом для различных

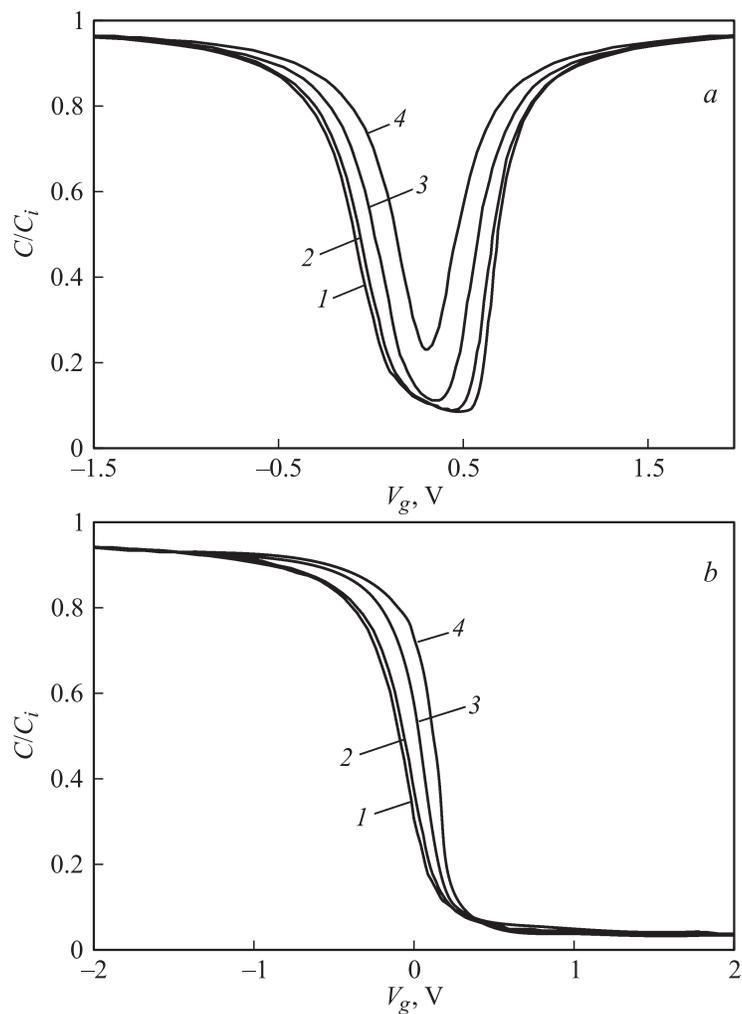


Рис. 1. НЧ (a) и ВЧ (b) ВФХ МДП-структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с концентрацией акцепторной примеси $N_A = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной окисла $d_i = 40 \text{ nm}$ при различных значениях флуктуационного параметра σ : 1 — $\sigma = 0$; 2 — $\sigma = 2$; 3 — $\sigma = 4$; 4 — $\sigma = 6$.

значений флуктуационного параметра σ , приведены на рис. 1. Видно, что влияние флуктуаций проявляется в существенно неравномерной деформации этих характеристик. В диапазонах напряжений, соответствующих режимам обогащения и инверсии, характеристики под влиянием флуктуаций становятся более пологими, а в области обеднения — круче характеристик идеальной структуры (без флуктуаций). Вместе с тем хорошо известно, что при наличии поверхностных состояний (ПС) и под влиянием их перезарядки деформация ВФХ всегда сводится к ее растягиванию по оси напряжений. Энергетический спектр этих состояний определяется обычно по степени отклонения характеристик реальных приборов со структурой МДП от расчетных зависимостей, отвечающих идеальной (без поверхностных состояний) МДП структуре.

Итак, результаты расчетов показывают, что флуктуации электростатического потенциала оказывают существенно иное влияние на форму ВФХ МДП структур в области обеднения, чем поверхностные состояния. Поэтому, если анализировать вольт-фарадные характеристики реальных структур с помощью емкостных методик определения плотности поверхностных состояний [9,10], наличие флуктуаций может привести как к завышенной оценке плотности (в режимах обогащения и инверсии), так и к заниженной оценке (в режиме обеднения), проявляясь в последнем случае как артефакт расчетов, в форме „отрицательной“ плотности ПС (рис. 2). Как следует из расчетов, абсолютная величина этой отрицательной плотности вполне сопоставима с плотностью настоящих поверхностных состояний. Следовательно, появление участка с „отрицательной“ плотностью ПС в середине запрещенной зоны полупроводника (при стандартной обработке ВФХ) должно свидетельствовать о высоком качестве границы раздела полупроводник–диэлектрик (малой плотности настоящих ПС). Чтобы получить корректную информацию о спектре поверхностных состояний, нужно в качестве теоретической ВФХ использовать характеристику, рассчитанную с учетом флуктуаций электростатического потенциала, оценив предварительно величину флуктуационного параметра, например методом вибрационного динамического конденсатора [4].

Флуктуации зарядовых свойств оказывают заметное влияние не только на энергетический спектр ПС, но и на все другие электрические параметры МДП-структуры. В частности, существенным образом изменяется значение напряжения плоских зон V_{FB} , соответствующее значению $\bar{y}_s = 0$, а также пороговое напряжение V_T , под которым

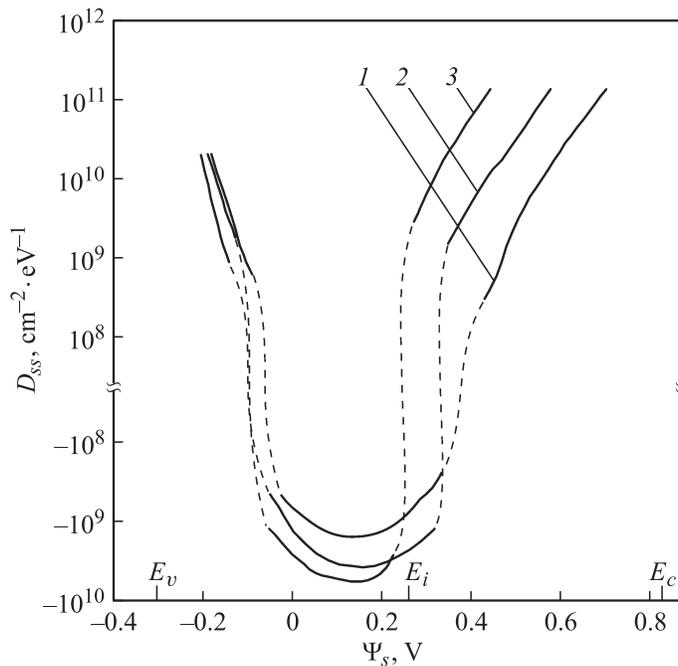


Рис. 2. Энергетический спектр ПС, как артефакт стандартной обработки теоретической ВФХ микронеоднородной МДП-структуры по методике [9]: 1 — $\sigma = 2$, 2 — $\sigma = 4$; 3 — $\sigma = 6$.

понимается напряжение на затворе МДП-структуры, отвечающее среднему поверхностному потенциалу $\bar{y}_s = 2 \ln \lambda$. Так, для МДП-структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с концентрацией акцепторной примеси $N_A = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной окисла $d_i = 40 \text{ nm}$ при $\sigma = 2$ величина напряжения плоских зон $V_{FB} = 0.03 \text{ V}$, при $\sigma = 4$ величина $V_{FB} = 0.13 \text{ V}$, а при $\sigma = 6$ величина $V_{FB} = 0.22 \text{ V}$ (без учета флуктуаций поверхностного потенциала напряжение плоских зон идеальной МДП-структуры равно нулю). Для этой же МДП-структуры при $\sigma = 0$ значение порогового напряжения $V_T = 0.45 \text{ V}$, при $\sigma = 2$ значение $V_T = 0.65 \text{ V}$, при $\sigma = 4$ значение $V_T = 0.86 \text{ V}$, а при $\sigma = 6$ значение $V_T = 2.92 \text{ V}$.

Таким образом, результаты моделирования ВФХ планарно-неоднородных МДП-структур можно использовать для более точного расчета

их электрофизических характеристик емкостными методами. При этом следует учитывать, что эффект деформации ВФХ вызывается не только флуктуациями поверхностного потенциала, но и наличием поверхностных состояний на границе раздела полупроводник–диэлектрик. Учет флуктуационного рельефа поверхностного потенциала позволяет избежать ошибок в расчетах энергетического спектра ПС, которые могут появиться, если использовать ВФХ идеальной МДП-структуры, без учета флуктуационных эффектов, и повысить точность контроля других электрофизических параметров МДП-структуры.

Список литературы

- [1] *Nicollian E.N., Brews J.R.* MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and technology. N.Y.: Wiley, 1982. 928 p.
- [2] *Гуртов В.А.* Твердотельная электроника. М.: Техносфера, 2005. 406 с.
- [3] *Бормонтов Е.Н., Левин М.Н., Гитлин В.Р., Меньшикова Т.Г., Татаринцев А.А.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 9. С. 73-81.
- [4] *Крячко В.В., Левин М.Н., Татаринцев А.В., Бормонтов Е.Н.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 10. С. 128–133.
- [5] *Nicollian E.H., Goetzberger A.* // Bell Syst. Tech. J. 1967. V. 46. N 5. P. 1055–1133.
- [6] *Бормонтов Е.Н., Левин М.Н., Вялых С.А., Борисов С.Н.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 2. С. 61–66.
- [7] *Nahmanson R.S., Sevastianov S.B.* // Solid State Electronics. 1984. V. 27. N 10. P. 881–891.
- [8] *Garrett C.G., Brattain W.H.* // Phys. Rev. 1955. V. 99. N 2. P. 376–397.
- [9] *Terman L.M.* // Sol. St. Electron. 1962. V. 5. N 3. P. 285–299.
- [10] *Berglund C.N.* // IEEE Trans. on ED. 1966. V. ED-13. N 10. P. 701–705.