

05;06;10

Экспресс-метод контроля зарядовых свойств ионно-легированных структур металл–окисел–полупроводник

© Е.Н. Бормонтов, С.Н. Борисов, В.П. Леженин, С.В. Лукин

Воронежский государственный университет

Поступило в Редакцию 22 июня 2000 г.

Представлена методика аналитического моделирования высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) ионно-легированных МОП-структур, использующая гауссовскую аппроксимацию профиля имплантированной примеси и приближение истощенного слоя (в области модуляции емкости). Проиллюстрировано применение теоретических ВФХ, рассчитанных по новой методике, для контроля зарядовых параметров МОП-структур. Методика рекомендуется для быстрой оценки зарядовых характеристик границы раздела окисел–кремний.

Благодаря своей информативности и простоте автоматизации для оценки зарядовых свойств границы раздела окисел–кремний до сих пор широко применяются высокочастотные вольт-фарадные (С–V) методы, основанные на сравнительном анализе экспериментальных и теоретических С–V кривых [1,2]. Точность этих методов зависит как от точности эксперимента, так и от правильности построения теоретических характеристик, определяемых профилем легирования полупроводника. В ионно-легированных МОП-структурах (металл–окисел–полупроводник) этот профиль существенно неоднороден. Наиболее точные результаты дает численный расчет теоретических вольт-фарадных характеристик (ВФХ) с учетом реального профиля легирования и подвижного заряда в полупроводнике, но он довольно сложен и трудоемок из-за неустойчивости решения краевой задачи для уравнения Пуассона со сложным профилем легирования в правой части. Это не всегда оправданно для быстрой оценки зарядовых параметров границы раздела SiO₂–Si. Применение же теоретических ВФХ, построенных аналитически с использованием понятия области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника и простых аппроксимаций легирующего профиля (эффективной концентрации [3], δ-функции, смещенного прямоугольника [4]), приводит к

существенным погрешностям в определении зарядовых параметров, в частности энергетического спектра поверхностных состояний (ПС) [5].

Профиль распределения имплантированной примеси в системе SiO₂-Si [6] можно описать распределением Гаусса. Последующие термообработки приводят к видоизменению профиля, который рассчитывается путем решения уравнения Фика. Показано, что в большинстве важных случаев диффузионная длина примеси либо много больше (при длительной разгонке), либо много меньше (при кратковременном низкотемпературном отжиге) стандартного отклонения имплантированных ионов в кремнии [7]. Тогда результирующий профиль с учетом сегрегации примеси на границе раздела кремний-окисел с погрешностью не более 10% также можно описать модифицированным гауссовским распределением [7]:

$$N(x) = N_B + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\exp \left[-\frac{(x_c - x)^2}{2\sigma^2} \right] + \gamma \exp \left[-\frac{(x_c + x)^2}{2\sigma^2} \right] \right), \quad (1)$$

где N_B — базовая концентрация примеси в кремнии, D_I — доза имплантированных ионов, x_c — центроид имплантированной примеси, γ — коэффициент, учитывающий профиль границы, который для фосфора равен 1, а для бора при типичных температурах термообработок (от 900 до 1100°C) $|\gamma| < 0.1$ [7]. Эффективное стандартное отклонение профиля распределения легирующей примеси $\sigma = \sqrt{\Delta R_{\text{PSi}}^2 + 2 \sum_j D_j t_j}$, где D_j — коэффициент диффузии при температуре j -го отжига, t_j — время j -го отжига, ΔR_{PSi} — среднеквадратичное отклонение имплантированных ионов в кремнии.

Наиболее информативной в дифференциальном емкостном методе [8] является область модуляции емкости, в которой поверхностный потенциал ψ_s изменяется от 0 (плоские зоны) до значения $2\varphi_0$, соответствующего началу сильной инверсии ($\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N(x=0)}{n_i} \right)$ — потенциал Ферми на поверхности полупроводника, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд электрона, n_i — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике, $N(x=0)$ — концентрация примеси на поверхности полупроводника). В этой области применимо приближение истощенного слоя полупроводника. Заряд ОПЗ в этом случае представляет собой первый интеграл уравнения Пуассона

с правой частью в виде (1) и имеет вид [9]:

$$Q_B = q \left[N_B x_0 + \frac{D_I}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{x_c}{\sigma \sqrt{2}} + \operatorname{erf} \frac{x_0 - x_c}{\sigma \sqrt{2}} \right) + \gamma \left(\operatorname{erf} \frac{x_0 + x_c}{\sigma \sqrt{2}} - \operatorname{erf} \frac{x_c}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right], \quad (2)$$

где x_0 — глубина области обеднения, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ — функция ошибок (интеграл вероятности). Емкость ОПЗ C_{sc} представляет собой производную от заряда ОПЗ Q_B по поверхностному потенциалу ψ_s , который находится аналитически, как второй интеграл уравнения Пуассона в точке $x = 0$ [9]:

$$\begin{aligned} \psi_s = & -\frac{q}{2\varepsilon_s} \left\{ N_B x_0^2 + D_I \left[\sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\exp\left(-\frac{x_c^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{(x_0 - x_c)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \right. \right. \\ & + x_c \left(\operatorname{erf} \frac{x_c}{\sigma \sqrt{2}} + \operatorname{erf} \frac{x_0 - x_c}{\sigma \sqrt{2}} \right) \left. \right] + \gamma \left[x_c \left[\operatorname{erf} \frac{x_c}{\sigma \sqrt{2}} - \operatorname{erf} \frac{x_0 + x_c}{\sigma \sqrt{2}} \right] \right. \\ & \left. \left. + \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\exp\left(-\frac{x_c^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{(x_0 + x_c)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \right] \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Заряд ОПЗ и изгиб зон представляют собой функции параметра x_0 . Взяв производную $dQ_B/d\psi_s$ как от функции, заданной параметрически, получим выражение для емкости ОПЗ C_{sc}

$$C_{sc} = \frac{dQ_B}{d\psi_s} = \frac{dQ_B/dx_0}{d\psi_s/dx_0} = \frac{\varepsilon_s}{x_0}. \quad (4)$$

Полная емкость МОП-структуры C рассчитывается по формуле

$$C = \frac{C_i C_{sc}}{C_i + C_{sc}} = \frac{C_i \varepsilon_s}{C_i x_0 + \varepsilon_s}, \quad (5)$$

где C_i — геометрическая емкость окисла.

Напряжение на затворе V_g , соответствующее изгибу зон ψ_s , определяется по известной формуле [1]

$$V_g = -\frac{Q_B(x_0)}{C_i} + \psi_s(x_0). \quad (6)$$

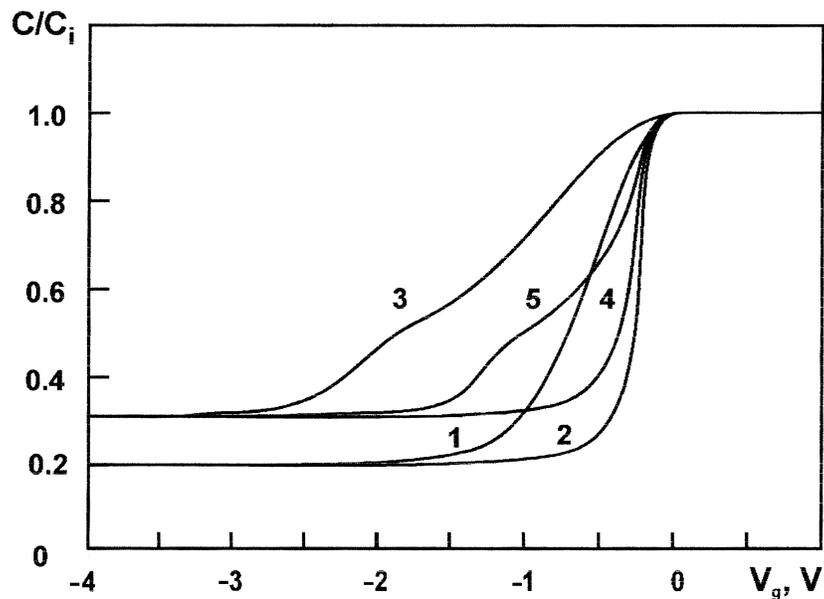


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МОП-структуры на подложке с базовой концентрацией фосфора $N_B = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной окисла $d_i = 24 \text{ nm}$ до и после легирования ионами фосфора ($E = 100 \text{ keV}$, $D_I = 0.06 \text{ } \mu\text{C/cm}^2$): 1 — экспериментальная ВФХ структуры до имплантации; 2 — теоретическая ВФХ структуры до имплантации; 3 — экспериментальная ВФХ структуры после имплантации; 4 — теоретическая ВФХ, рассчитанная в приближении эффективной постоянной концентрации; 5 — теоретическая ВФХ, рассчитанная численно с учетом гауссовского профиля имплантированной примеси.

Уравнения (5) и (6) представляют собой параметрическую зависимость $C(V_g)$ с параметром x_0 — глубиной обедненного слоя.

Варьируя параметр x_0 в пределах от эффективной дебаевской длины $L_{Def} = \sqrt{\epsilon_s kT / [q^2 N(x=0)]}$ до максимального значения $x_{0 \text{ max}}$, достигаемого при наступлении сильной инверсии, рассчитываем ВФХ в области модуляции емкости, а затем, сопрягая ее с областями обогащения ($C = C_i$) и сильной инверсии ($C = C_{\text{min}}$), совпадающими с соответствующими областями экспериментальной кривой, получа-

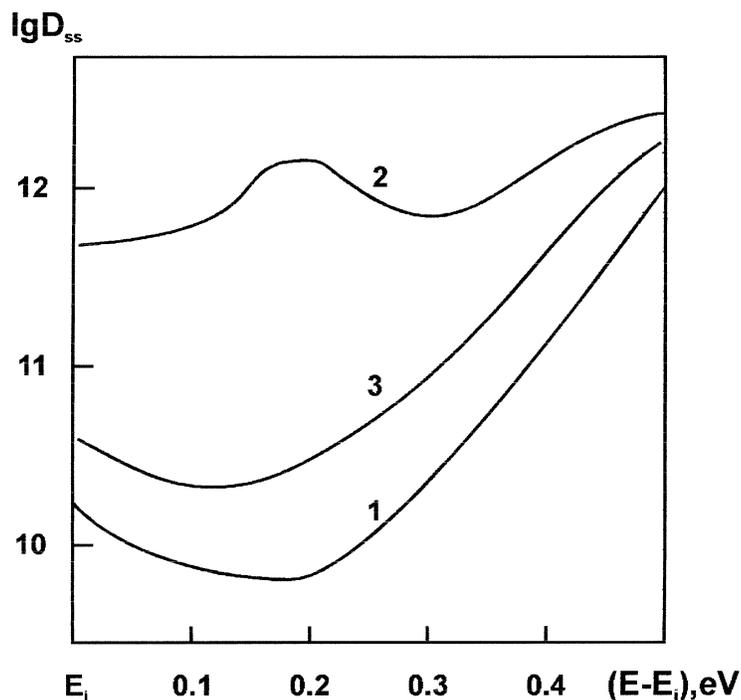


Рис. 2. Энергетические спектры поверхностных состояний исходной и легированной ионами фосфора ($E = 100 \text{ keV}$, $D_I = 0.06 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) МОП-структур на подложке с базовой концентрацией фосфора $N_B = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной окисла $d_i = 24 \text{ nm}$: 1 — спектр нелегированной структуры; 2 — спектр ионно-легированной структуры, рассчитанный в приближении эффективной концентрации; 3 — спектр ионно-легированной структуры, полученный с использованием теоретической ВФХ, рассчитанной аналитически с учетом гауссовского профиля легирования.

ем теоретическую высокочастотную ВФХ ионно-легированной МОП-структуры. Достижение режима сильной инверсии контролируется по приближению поверхностного потенциала ψ_s к его максимальному значению $2\varphi_0$. Таким образом, высокочастотная ВФХ ионно-легированной МОП-структуры строится аналитически. Отметим, что аналитически

рассчитанные предложенным методом ВФХ почти совпадают с C–V кривыми, рассчитанными с помощью численного решения уравнения Пуассона для гауссовского профиля легирования (рис. 1). Также в качестве примера на рис. 2 приведен расчет энергетического спектра ПС МОП-структуры с использованием предложенного метода. На рис. 2 видно, что ионная имплантация не приводит к искажениям спектра ПС (появлению ложного моноуровня), как это может быть неверно истолковано с использованием приближения эффективной концентрации, а лишь незначительно увеличивает спектральную плотность ПС.

Таким образом, использование распределения Гаусса в качестве аппроксимации имплантированного профиля позволяет избежать численного решения уравнения Пуассона и с высокой точностью полностью аналитически построить ВФХ ионно-легированных МОП-структур для использования в высокочастотных C–V методах.

Список литературы

- [1] *Zi C.M.* Физика полупроводниковых приборов / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [2] *Бормонтов Е.Н., Головин С.В.* // Изв. вузов. Электроника. 1998. № 4. С. 95–100.
- [3] *Garrett C.G., Brattain W.H.* // Phys. Rev. 1955. V. 99. N 2. P. 376.
- [4] *Karmalkar S., Bhat K.N.* // Sol.-St. Electron. 1991. V. 34. P. 681–692.
- [5] *Бормонтов Е.Н., Борисов С.Н., Волков О.В., Левин М.Н., Лукин С.В.* // Изв. вузов. Электроника. 1999. № 5. С. 33–39.
- [6] *Ishivara H. et al.* Ion implantation in semiconductors. N. Y.: Plenum Press, 1975.
- [7] *Bormontov E.N., Lezhenin V.P.* Si–SiO₂ interface property vs T with respect to boron // 1997 MRS Spring Meeting. San Francisco. Symposium E. Abstract # 10425.
- [8] *Terman L.M.* // Sol.-St. Electron. 1962. V. 5. N 3. P. 155–163.
- [9] *Бормонтов Е.Н., Леженин В.П.* // Микроэлектроника. 1995. Т. 24. № 5. С. 343–348.