

Анализ зарядов и поверхностных состояний на границах раздела структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник

© Л.С. Берман, Е.И. Белякова, Л.С. Костина, Е.Д. Kim*, S.C. Kim*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

*Korea Electrotechnology Research Institute,
South Korea

(Получена 17 января 2000 г. Принята к печати 18 января 2000 г.)

Разработан метод определения энергетического спектра зарядов и плотностей поверхностных состояний на границах раздела структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник, основанный на анализе вольт-фарадных характеристик. Экспериментальная проверка метода выполнена на структурах кремний–двуокись кремния–кремний, изготовленных путем прямого срачивания как зеркально полированных гладких пластин, так и пластин с регулярным мезаскопическим рельефом на внутренней поверхности из срачиваемых пластин. На поверхностях с регулярным рельефом плотность поверхностных состояний меньше, чем на поверхностях без рельефа.

Введение

Для создания структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник (ПДП), например кремний–двуокись кремния–кремний и др., используется прямое срачивание [1–4]. На основе этих структур разрабатываются как дискретные металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) транзисторы, так и интегральные схемы [5–8]. В тонкой пластине полупроводника область объемного заряда под электродами на внешней (рабочей) поверхности может расширяться на всю толщину пластины. В этом случае поверхностные состояния (ПС) на обратной стороне пластины ухудшают параметры МДП транзисторов: пороговое напряжение, подвижность носителей в канале и др. [8,9]. Поэтому анализ ПС на границах раздела (ГР) прямосраченных структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник является актуальной задачей. В МДП транзисторах эта задача может быть решена методом накачки заряда [10–12]. Однако параметры ГР нужно знать еще до создания готовых приборов, в стадии их разработки. Для этого можно сошлифовать и (или) стравить одну из пластин и нанести металл на диэлектрик [2], затем измерение параметров другой ГР выполняется методами, детально разработанными для МДП структур [13,14]. Однако при этом возможно дополнительное загрязнение поверхности, а при сошлифовывании — дополнительные механические напряжения. В работе [15] выполнено моделирование структур кремний–двуокись кремния–кремний: вычислены низкочастотные и высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) $C_{lf}(V)$ и $C_{hf}(V)$ для различных параметров структур. В работе [15] рекомендуется определять параметры структур ПДП (в том числе, порядок величины плотности ПС) путем сравнения расчетных характеристик $C_{hf}(V)$ и $C_{lf}(V)$ с экспериментальными. Этот метод использован также в работах [16,17]. Однако измерение характеристик $C_{hf}(V)$ во всем рабочем интервале напряжений является весьма трудно осуществимой задачей, так как при обогащении

значения τ_{th} могут быть порядка наносекунд и менее (где τ_{th} — время термоэмиссии с тех ПС, уровень которых совпадает с уровнем Ферми в полупроводнике). Это значит, что для достижения значений $\omega\tau_{th} \gg 1$ нужны частоты порядка нескольких GHz и выше (где f — частота измерения емкости, $\omega = 2\pi f$).

В настоящей работе предложен новый метод определения энергетического спектра зарядов и ПС на обеих ГР структуры ПДП. Метод основан на анализе ВФХ, измеренных на одной частоте; это позволяет избежать трудности, указанной выше, а также позволяет использовать цифровые измерители емкости и таким путем повысить точность измерений. Метод использован для определения спектров ПС на ГР структуры Si–SiO₂–Si, изготовленной путем прямого срачивания.

Теория

Анализ зарядов и ПС на ГР выполнен методом стационарных C – V -характеристик [13–15]. На рис. 1 приведена энергетическая диаграмма прямосраченной структуры n -Si–SiO₂– n -Si, эта структура показана на вставке к рис. 1. Напряжение на пластине 2 определяется из выражения [15]

$$V + V_{bi} = \Psi_{s1} - \Psi_{s2} - (Q_{sc1} + Q_{ss1} + \bar{x}Q_f/d)/C_i, \quad (1)$$

где V_{bi} — контактная разность потенциалов между пластинами 1 и 2, (индексы 1 и 2 здесь и в дальнейшем соответствуют пластинам 1 и 2); Ψ_{s1} , Ψ_{s2} — потенциалы поверхностей 1 и 2 соответственно; Q_{sc1} , Q_{ss1} — приповерхностный объемный заряд и заряд поверхностных состояний соответственно; Q_f — фиксированный заряд в SiO₂; \bar{x} — центр тяжести заряда Q_f , отсчитанный от x_2 , d — толщина SiO₂, C_i — емкость диэлектрика.

Из условия электрической нейтральности следует соотношение

$$Q_{sc1} + Q_{ss1} + Q_f + Q_{sc2} + Q_{ss2} = 0. \quad (2)$$

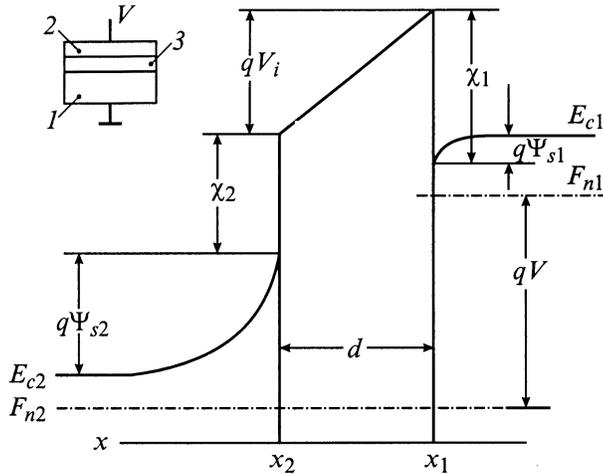


Рис. 1. Энергетическая диаграмма структуры кремний–двуокись кремния–кремний. 1 — пластина 1 без рельефа, 2 — пластина 2 с рельефом на внутренней стороне, 3 — двуокись кремния. К пластине 2 приложено положительное напряжение. V_i — падение напряжения в диэлектрике, χ — сродство к электрону, F_n — уровень Ферми, E_c — нижний край зоны проводимости, x — координата. Остальные пояснения в тексте.

Емкость структуры определяется из формулы

$$C = [(C_{sc1} + C_{ss1})^{-1} + (C_{sc2} + C_{ss2})^{-1} + C_i^{-1}]^{-1}, \quad (3)$$

где $C_{sc1,2}$, $C_{ss1,2}$ — емкость области объемного заряда и емкость поверхностных состояний соответственно.

Значения $Q_{sc1,2}$ и $C_{sc1,2}$ могут быть вычислены через потенциалы поверхностей $\Psi_{s1,2}$ [13,14]. Емкость ПС C_{ss} и плотность ПС N_{ss} связаны соотношением [18]

$$C_{ss} = qN_{ss} \operatorname{arctg}(\omega\tau_{th})/\omega\tau_{th}, \quad (4)$$

где q — заряд электрона. Выражение (4) справедливо, если плотность ПС и сечение захвата электрона σ_n не зависят от энергии в интервале $\pm kT$.

Значение τ_{th} определяется из формулы [13,14]

$$\tau_{th} = (\sigma_n b_n T^2)^{-1} \exp\left(\frac{E_c - F_n - q\Psi_s}{kT}\right), \quad (5)$$

где b_n — параметр полупроводника, F_n — уровень Ферми в полупроводнике. Используем понятие критического потенциала Ψ_{scr} , для которого $\omega\tau_{th} = 1$ (см. также [19]). Тогда

$$\omega\tau_{th} = \exp\left[\frac{q(\Psi_{scr} - \Psi_s)}{kT}\right]. \quad (6)$$

При изменении Ψ_s от $\Psi_{scr} + (3-5)kT$ до $\Psi_{scr} - (3-5)kT$ емкость соответствующей ГР уменьшается от низкочастотной емкости $C_{lf} = C_{sc} + qN_{ss}$ до высокочастотной емкости $C_{hf} = C_{sc}$.

Рассмотрим случай обеднения поверхности 1 и обогащения поверхности 2. В этом случае, как правило, выполняется неравенство $C_{sc2} \gg C_{sc1}$, поэтому

$(C_{sc2} + C_{ss2})^{-1} \ll (C_{sc1} + C_{ss1})^{-1}$. В первом приближении пренебрежем слагаемым $(C_{sc2} + C_{ss2})^{-1}$ в формуле (3). Тогда формула (3) аналогична формуле для емкости МДП структуры. На этом основании определим в первом приближении зависимости $\Psi_{s1}(V)$, $Q_{ss1}(\Psi_{s1})$ и $N_{ss1}(\Psi_{s1})$ по ВФХ тем же методом, что и для МДП структуры [13,14]. Для удобства анализа аппроксимируем зависимость $Q_{ss1}(\Psi_{s1})$ полиномом n -й степени ($n = 3-5$):

$$Q_{ss1}(\Psi_{s1}) = Q_{0(1)} + Q_{1(1)}\Psi_{s1} + Q_{2(1)}\Psi_{s1}^2 + \dots + Q_{n(1)}\Psi_{s1}^n \quad (7)$$

(индексы (1) и (2) относятся к первой и второй поверхности соответственно). Тогда

$$N_{ss1}(\Psi_{s1}) = -1/q(\partial Q_{ss1}/\partial \Psi_{s1}) \\ = -1/q(Q_{1(1)} + 2Q_{2(1)}\Psi_{s1} + \dots + nQ_{n(1)}\Psi_{s1}^{n-1}). \quad (8)$$

При обеднении поверхности 2 аналогичным путем определим в первом приближении зависимости $\Psi_{s2}(V)$, $Q_{ss2}(\Psi_{s2})$ и $N_{ss2}(\Psi_{s2})$; зависимость $Q_{ss2}(\Psi_{s2})$ также аппроксимируем полиномом. Используя полученные результаты и формулы (1)–(6), вычислим в первом приближении ВФХ структуры ПДП и сравним ее с экспериментальной ВФХ.

Далее методом прямого поиска [20,21] производится подбор коэффициентов полиномов, а также значений Ψ_{scr} и Q_f до наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной ВФХ (по визуальному контролю и наименьшей дисперсии).

Эксперимент и сравнение с теорией

В наших предыдущих работах [22,23] было показано, что регулярный рельеф в виде сети взаимно перпендикулярных канавок является геттером структурных дефектов. В настоящей работе экспериментальная проверка метода анализа ПС была выполнена на структурах n -Si–SiO₂– n -Si, изготовленных путем прямого сращивания как зеркально полированных гладких пластин, так и пластин с регулярным мезаскопическим рельефом на внутренней поверхности одной из сращиваемых пластин.

Образцы были изготовлены из n -Si (111) Cz, $\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщина пластин 300 мкм, толщина окисла 0.75 мкм, площадь образцов 0.12 см². На одной из двух сращиваемых пластин создавался регулярный рельеф — сеть взаимно перпендикулярных канавок шириной 50 мкм, глубиной 0.2–0.3 мкм с расстоянием между канавками 200 мкм. Подробности технологии изготовления образцов приведены в работах [22,23].

Измерения ВФХ (при $T \approx 293 \text{ К}$), определение зависимостей $\Psi_{s1,2}(V)$, $Q_{ss1,2}(\Psi_{s1,2})$ и $N_{ss1,2}(\Psi_{s1,2})$, а также определение коэффициентов полиномов были выполнены на автоматизированной установке [24]. Экспериментальная ВФХ была введена в компьютер. Расчет ВФХ по формулам (1)–(6), подбор коэффициентов полиномов и сравнение расчетной ВФХ с экспериментальной были выполнены на компьютере.

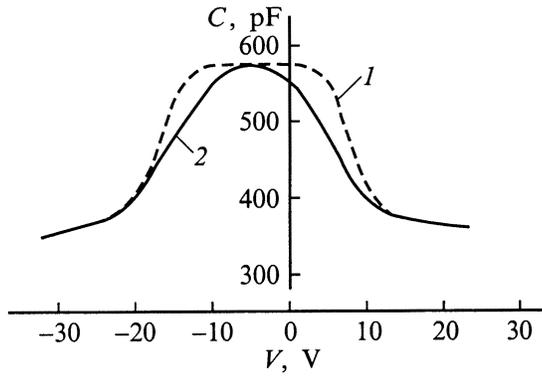


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики структуры ПДП. 1 — расчетная (первое приближение), 2 — экспериментальная. Напряжение измеряется на пластине 2 (см. вставку к рис. 1).

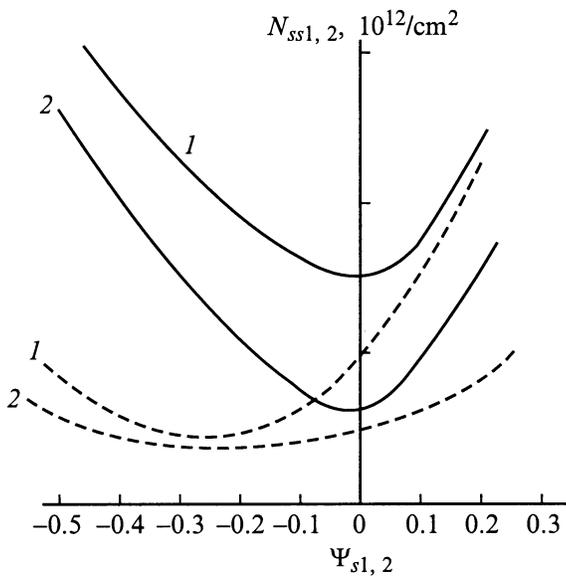


Рис. 3. Зависимость плотности поверхностных состояний от потенциала поверхности: 1 — на поверхности пластины 1, 2 — на поверхности пластины 2. Штриховые линии — первое приближение, сплошные линии — уточненные значения.

На рис. 2 приведены расчетная ВФХ (первое приближение) и экспериментальная ВФХ. Левая часть ВФХ соответствует обеднению поверхности пластины 1 (без рельефа), а правая — обеднению поверхности пластины 2 (с рельефом на внутренней стороне). Наклон правой части ВФХ круче, чем наклон левой части. Это указывает на меньшую плотность ПС на поверхности с рельефом и подтверждает результаты наших работ [22,23], где было показано, что регулярный рельеф является эффективным геттером структурных дефектов. Сдвиг ВФХ в сторону отрицательных напряжений указывает на положительный заряд ПС на поверхности 1 и (или) на отрицательный заряд ПС на поверхности 2. При совпадении расчетной и экспериментальной ВФХ полу-

чены следующие значения параметров: $\Psi_{scr1} = -0.15V$, $\Psi_{scr2} = -0.15V$, $Q_f = -0.24 \cdot 10^{-7}$ Кл/см², $\bar{x}/d = 0.5$. Заряды на поверхностях 1 и 2 при потенциалах плоских зон $Q_{0(1)} = 0.4 \cdot 10^{-8}$ Кл/см², $Q_{0(2)} = -0.3 \cdot 10^{-7}$ Кл/см².

На рис. 3 приведены зависимости $N_{ss1,2}(\Psi_{ss1,2})$. Во всем интервале изменения потенциала поверхности плотность ПС на поверхности с рельефом меньше, чем на поверхности без рельефа.

Заключение

Разработан метод определения энергетического спектра зарядов и плотности поверхностных состояний на границах раздела структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник. Экспериментальная проверка метода выполнена на структурах кремний–двуокись кремния–кремний, изготовленных путем прямого сращивания как зеркально полированных гладких пластин, так и пластин с регулярным мезаскопическим рельефом на внутренней поверхности одной из сращиваемых пластин. На поверхности с регулярным рельефом плотность поверхностных состояний меньше, чем на поверхности без рельефа, так как регулярный рельеф является геттером структурных дефектов.

Список литературы

- [1] K. Mitani, U.M. Gosele. J. Electron. Mater., **21**, 669 (1992).
- [2] W.P. Waszara, G. Goetz, A. Savigla, J.B. McKittrick. J. Appl. Phys., **64**, 4943 (1998).
- [3] S. Bengston. J. Electron. Mater., **21**, 841 (1992).
- [4] M. Bruel. Electron. Lett., **31**, 1201 (1995).
- [5] J.P. Colinge. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-7**, 244 (1986).
- [6] J.P. Colinge. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-8**, 410 (1987).
- [7] T.W. Mac Elwee, I.D. Calder, R.A. Bruce, F.R. Shepherd. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-37**, 1444 (1990).
- [8] D.J. Wouters, J.P. Colinge, H.A. Maes. IEEE Transact. Electron. Dev., **ED-37**, 2022 (1990).
- [9] B. Mazhari, S. Cristoloveanu, D.E. Joannou, A.L. Cavigla. IEEE Transact. Electron. Dev., **ED-38**, 1289 (1991).
- [10] G. Groeseneken, H.E. Maes, N. Beltran, R.F. Keersmaeker. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-31**, 42 (1984).
- [11] J.S. Brugler, G.A. Gespers. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-16**, 297 (1969).
- [12] J.L. Autran, F. Seigneur, C. Plossu, B. Balland. J. Appl. Phys., **74**, 3932 (1993).
- [13] E.H. Nicollian, B.R. Brews. MOS (metal–oxide–semiconductor) Physics and Technology (N.Y., 1982).
- [14] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., 1984) т. 1.
- [15] K. Nagai, T. Sekigava, Y. Hayashi. Sol. St. Electron., **28**, 789 (1985).
- [16] F.T. Brady, S.S. Li, D.E. Burk, W.A. Krull. Appl. Phys. Lett., **52**, 886 (1988).
- [17] K. Mitani, H. Massoud. IEICE Transact. Electron., **E-75 C**, 1421 (1992).
- [18] K. Lechovec. Appl. Phys. Lett., **8**, 48 (1966).
- [19] Л.С. Берман, И.В. Грехов, И.Н. Каримов, Е.В. Остроумова. ФТП, **27**, 917 (1993).

- [20] Б. Банди. *Методы оптимизации* (М., 1988).
- [21] Д. Химмельблау. *Анализ процессов статистическими методами* (М., 1973).
- [22] Л.С. Берман, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Е.И. Белякова, Е.Д. Ким, С.Ч. Ким. Письма ЖТФ, **25** (1), 75 (1999).
- [23] И.В. Грехов, Т.С. Аргунова, Л.С. Берман, Л.С. Костина, Е.И. Белякова, Т.В. Кудрявцева, Е.Д. Ким, С.Ч. Ким, Д.М. Пак. Письма ЖТФ, **22** (23), 14 (1996).
- [24] Л.С. Берман, М.Г. Толстобров, А.Д. Ременюк. Препринт ФТИ № 974 (СПб., 1985).

Редактор В.В. Чалдышев

An analysis of charges and surface states at the interfaces of semiconductor–insulator–semiconductor structures

L.S. Berman, E.I. Beliakova, L.S. Kostina, E.D. Kim*, S.C. Kim*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

*Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract A method of determination of the energy dependences of charges and surface states at interfaces of Semiconductor–Insulator–Semiconductor structures has been developed. The method has been tested on silicon–silicon dioxide–silicon structures obtained by the direct bonding of mirror-polished plates and those having mesoscopic regular grooves. On surfaces with regular grooves the density of the surface states was lower than that on surfaces without grooves.