

ПЛОТНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК-СТЕКЛО

Национальный университет имени М.Улугбека,
Вузгородок, г. Ташкент, 100174, Республика Узбекистан, aanasirov1962@mail.ru

Структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП–структуры) на основе кремния широко используются в современных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах. Тенденцией дальнейшего развития микроэлектроники являются повышение функциональной сложности микросхем и увеличение плотности упаковки отдельных структурных элементов. При этом стабильное и надежное функционирование таких приборов и микросхем зависит не только от технологических возможностей, оно определяется в первую очередь физическими процессами, происходящими в приповерхностных слоях полупроводника и на межфазных границах различных материалов, входящих в состав МДП–структур. Основным контролируемым параметром таких структур – энергетический спектр распределения плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника [1].

Для определения спектра распределения плотности поверхностных состояний N_{ss} по ширине запрещенной зоны полупроводника наиболее часто используется метод высокочастотных вольт-фарадных (С-V) характеристик [2–5]. Метод основан на сравнении теоретической вольт-фарадной характеристики идеальной (без поверхностных состояний) МДП–структуры с экспериментальной характеристикой реальной структуры с последующим дифференцированием результата сравнения [2]. Давая достаточно точную информацию об «интегральной» плотности поверхностных состояний, рассматриваемый метод обладает существенной погрешностью при определении распределения dN_{ss}/dE по ширине запрещенной зоны полупроводника, обусловленной операцией графического (или численного) дифференцирования разности двух близких С-V-зависимостей [2]. В [6] описан метод определения распределения $dN_{ss}/d\psi_s$ (где ψ_s – поверхностный потенциал), исключающий операцию графического дифференцирования зависимости $N_{ss}(E)$ (где E – ширина запрещенной зоны полупроводника). Существенный недостаток метода [6] – сложность расчетных соотношений, что связано с использованием теории поверхностного заряда, развитой в [7], и необходимостью предварительного построения зависимостей $R(y_s)$, $\Phi(y_s)$ [6].

Здесь предлагается метод определения спектра распределения плотности поверхностного заряда по ширине запрещенной зоны полупроводника, свободный от указанных недостатков.

Для получения расчетных соотношений воспользуемся выражением (2) работы [4], описывающим падение напряжения на идеальной МДП–структуре как функцию безразмерного поверхностного потенциала y . Прибавив к рассмотренному выражению падение напряжения ΔV на поверхностных состояниях N_{ss} , получим полное падение напряжения на реальной МДП–структуре. Продифференцировав это соотношение по y , с помощью выражения (1) работы [4] и известного соотношения $N_{ss}=C_0\Delta V/Sq$ (где C_0 – емкость диэлектрического слоя, S – площадь структуры, q – заряд электрона), запишем

$$\frac{Sq}{C_0} \frac{dN_{ss}}{dy} = \frac{dV}{dy} - \frac{\epsilon_1}{\epsilon C_0} \frac{kT}{q} C(y) - \frac{kT}{q}, \quad (1)$$

где ϵ , ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и диэлектрика соответственно, T – температура, $C(y)$ – емкость МДП–структуры как функция поверхностного потенциала.

Подставив в (1) зависимость dV/dy , полученную из выражения (2) работы [4],

$$\frac{dV}{dy} = \left(\frac{dC_s}{dV} \right)^{-1} \left(1 - \frac{C_s}{C_0} \right)^2 \frac{dC(y)}{dy}, \quad (2)$$

где C_3 – экспериментально измеренная высокочастотная емкость МДП-структуры, получим выражение, описывающее изменение поверхностного заряда при изменении поверхностного потенциала. Далее, воспользовавшись связью между поверхностным потенциалом, квазиуровнем Ферми и изгибом зон энергии полупроводника, найдем

$$\frac{dN_{ss}}{dE} = \frac{C_0}{SkT} \left(\frac{C_3 C_1}{dC_3/dV} - \left(\frac{AC_3}{C_1} + \frac{kT}{q} \right) + \frac{C_3 C_1}{dC_3/dV} \left(1 - \frac{BC_3^2}{C_1^2} \right) \frac{1}{e^y - 1} \right). \quad (3)$$

здесь

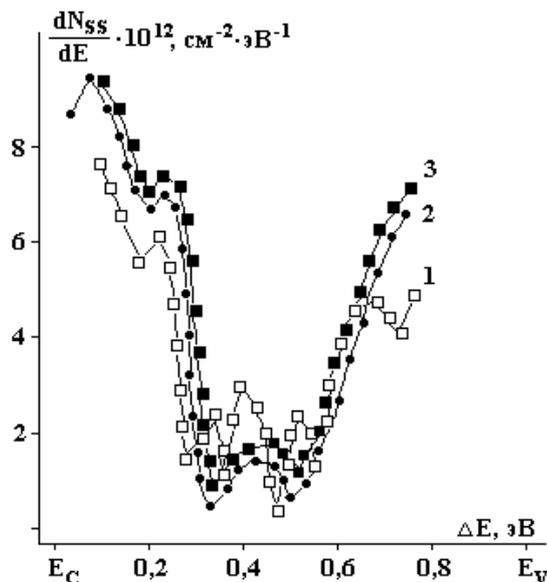
$$C_1 = 1 - \frac{C_3}{C_0}, \quad A = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon C_0} \frac{kT}{q}, \quad B = \frac{kT}{\varepsilon \varepsilon_0 N_M (qS)^2},$$

где N_M – концентрация примеси в полупроводнике, ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Из выражения (3) видно, что спектр плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника E можно определить, непосредственно используя экспериментальные значения C_3 ; dC_3/dV ; V ; T . Значение y , входящее в (3), находится из равенства $\left. \frac{C}{C_0} \right|_{теор} = \left. \frac{C}{C_0} \right|_{эсп}$.

Проверка полученных соотношений проводилась на тестовых МДП-структурах, изготовленных путем нанесения свинцово-боросиликатного (СБС) стекла на подложку кремния n -типа, полученного методом бестигельной зонной плавки, с кристаллографической ориентацией (111). Состав стекла: SiO_2 – 32,9 %, PbO – 49%, B_2O_3 – 15%, Al_2O_3 – 2,1%, Ta_2O_5 – 1%, содержание оксидов щелочных металлов (KO и NaO) составляет менее 0,01%. Электрофизические характеристики СБС стекла и способ его нанесения на кремниевую подложку аналогичны описанным в [8]. Температура формирования границы раздела Si-стекло составляла 700°C . Площадь управляющего электрода полученных структур составляла $0,01 \text{ см}^2$. Толщина слоя диэлектрика, определенная по емкости МДП-структур в режиме обогащения, равнялась $(2 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

На рисунке приведены спектры dN_{ss}/dE для исследуемых МДП-структур, полученные согласно методам [2] (кривая 1), [6] (кривая 3), и методу, предложенному в данной работе (кривая 2).



Распределение dN_{ss}/dE для МДП-структуры типа Al-СБС стекло- n -Si, построенное по предлагаемой методике (2), согласно методам [2] (1) и [6] (3)

Из сравнения полученных распределений dN_{ss}/dE по ширине запрещенной зоны кремния (см. рисунок) видно, что распределение 2, построенное при помощи выражения (3), совпадает с кривой 3 во всем энергетическом интервале и является более «гладким» по сравнению с

распределением 1. В распределении 2 отсутствует разброс значений dN_{ss}/dE , обусловленный погрешностью графического дифференцирования и воспринимаемый в виде отдельных пиков распределения dN_{ss}/dE . Следовательно, метод электрического дифференцирования с использованием выражения (3) для определения распределения плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника менее трудоемок по сравнению с [6] и более точен и однозначен по сравнению с [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nicollian E.H., Brews J.R.* MOS physics and technology. Wiley. N.Y. 1982. P. 900.
2. *Terman L. M.* An investigation of surface state at silicon / silicon oxide interface employing metal – Oxide – Silicon diodes // Sol. St. Electron. 1962. V. 5. № 2. P. 285–299.
3. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. М.: Мир.1984. Кн.1. 456 с.
4. *Власов С.И., Зайнабидинов С.З., Каримов И.Н.* Определение плотности поверхностного заряда на границе раздела полупроводник–диэлектрик // ДАН УзССР. 1985. № 4. С. 28–30.
5. *Власов С.И.* Эффекты влияния приповерхностных глубоких центров на параметры переходных слоев полупроводник-диэлектрик.: Автореф. дис. док. физ.-мат. наук. Л.: ФТИ, 1991.
6. *Gorban A.P., Litovchenko V.G.* Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by a differential $C - V$ method // Phys. St. Sol.(a). 1972. V.10. № 1. P. 289–296.
7. *Garrett C.G.B., Brattain W.H.* Physical theory of semiconductor surfaces // Phys.Rev. 1955. V.99. № 2. P. 375–387.
8. *Парчинский П.Б., Власов С.И., Насиров А.А.* Исследование медленно релаксирующего заряда в пассивирующих покрытиях на основе свинцово-боросиликатных стекол методом изотермической релаксации емкости // Письма в ЖТФ. 2001. Т.27. № 18. С. 65–70.

Поступила 14.02.08

Summary

The method of determination of surface state density at semiconductor-glass interface of MIS-structure is offered. It is shown, that the method of differentiation of C - V -dependence is more exact and unequivocal, and also less labour-intensive in comparison with known methods.
