

на алюмооксидной подложке с нанесенными газочувствительными слоями $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ на поверхность информационных электродов из платины, толщиной 0,5 мкм. Данные элементы отличаются числом газоаналитических слоев и режимами высокотемпературного отжига. На элементе № 1 нанесено десять слоев при температуре отжига первого слоя 700 °С, на элементе № 2 – двенадцать слоев (температура отжига первого слоя 850 °С).

Для чувствительных элементов сенсора (рис. 3) применялись разные температуры отжигов и наносилось разное число слоев пленок. В результате наблюдается увеличение числа дефектов на элементе № 2 и частичное разрушение газочувствительного слоя. Нарушение аналитической по-

верхности может приводить к выходу из строя сенсора и оказывать негативное влияние на его работоспособность при долговременной эксплуатации.

Применение золь-гель пасты позволяет получать высокоразвитую поверхность, как в случае полупроводниковой композиции $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$, что приводит к высокой газовой чувствительности сенсора при анализе состава воздуха.

Литература

1. Реутская, О. Г. Разработка газочувствительных сенсоров на основе алюмооксидных структур с низким энергопотреблением / О. Г. Реутская, Н. И. Мухуров, И. А. Таратын // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр.: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 119–124.

УДК: 621.315.592

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Шарибаев Н.Ю., Джурраев Ш.С., Турсунов А.А., Муллабоева Н.Ш.

*Наманганский инженерно-технологический институт
Наманган, Республика Узбекистан*

Аннотация. Вероятности опустошения поверхностных состояний зависят от времени и от природы самого центра. Для определения плотности поверхностных состояний приводится сравнение функции вероятности опустошения энергетического уровня $\rho(t, E, T)$ со ступенчатой функцией Ферми-Дирака. Исследуется производная от функции $\rho(t, E, T)$ по энергии, и сравнивается дельта – функцией Дирака. Показано, что производная от вероятности опустошения энергетического уровня по энергии $GN(E_0, E, T)$ при низких температурах превращается в дельта – функцию Дирака. Использование этого факта дало возможность предложить математическую модель определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик в приборах с зарядовой связью ПЗС.

Ключевые слова: МОП-структура, энергетический уровень, дискретные уровни, плотность поверхностных состояний, дельта – функцией Дирака

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DETERMINING THE DENSITY OF SURFACE STATES

Sharibaev N., Dzhurraev Sh., Tursunov A., Mullaboeva N.

*Namangan Institute of Engineering and Technology
Namangan, Republic of Uzbekistan*

Abstract. The probabilities of emptying surface states depend on time and on the nature of the center itself. To determine the density of surface states, the comparison of the energy level depletion probability function $\rho(t, E, T)$ with the Fermi-Dirac step function is given. The derivative of the function $\rho(t, E, T)$ with respect to energy is investigated and compared with the Dirac delta function. It is shown that the derivative of the probability of depletion of the energy level with respect to energy $GN(E_0, E, T)$ at low temperatures turns into a Dirac delta function. The use of this fact made it possible to propose a mathematical model for determining the density of surface states at the semiconductor-dielectric interface in CCD devices with charge-coupling.

Keywords: MOS structure, energy level, discrete levels, density of surface states, Dirac delta function

*Адрес для переписки: Шарибаев Н.Ю., ул. Касансай, 7, Наманган, Республика Узбекистан
e-mail: sharibayev_niti@mail.ru*

В идеализированной модели утверждается, что за время генерации $\tau = \tau(E)$, где $E = E_c - E$, из-за тепловой генерации все состояния с энергиями между E_c и E_v полностью освобождаются. И считается, что состояния с энергией ниже E_v полностью заполнены электронами. Вероятность опустошения уровня с энергией E имеет следующий вид [6]:

$$\rho(E) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E)}\right) \quad (1)$$

Здесь $\tau(E)$ определяется квантовыми процессами перехода между локализованными поверхностными состояниями и зоной проводимости. В общем случае, она является достаточно сложной функцией энергии и температуры, которая определяется природой исследуемого центра. Расчет

$\tau(E)$ требует довольно сложных вычислений [28]. Однако, известно, что $\tau(E)$ сильно зависит от энергии E и температуры kT . Как будет видно из дальнейшего, точное знание зависимости $\tau(E)$ не существенно, существенно то, чтобы $\tau(E)$ сильно возрастало с ростом энергии. Это требование необходимо для того, чтобы функция $GN(E)$ – производная от функции вероятности опустошения энергетических состояний, при $T \rightarrow 0$ описала δ – функцию Дирака.

Обычно для $\tau(E)$ используется следующая функция [3, 4]:

$$\tau(E, T, t) = \tau_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

где $\tau_0 = \frac{1}{\nu_n N_c}$.

Из (1) и (2) получим следующее выражение для вероятности опустошения уровня с энергией E [1]:

$$\rho(E, T, E_0(t)) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{E_0 - E}{kT}\right)\right), \quad (3)$$

где $E_0(t) = kT \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right)$. (4)

Эти выражения связывают вероятности опустошения уровня E электронов с поверхностных состояний с температурой и временем.

Математическая модель процесса определения ППС на границе раздела диэлектрик – полупроводник. Число электронов $N(t)$, генерированных с поверхностных состояний за время t , при непрерывном распределении уровней по энергиям определяется следующим выражением [2]:

$$N(t) = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \rho(E) dE, \quad (5)$$

где $\rho(E)$ вероятность опустошения уровня с энергией E (1).

Если t заменим переменной $E_0(t)$ из (2) получим [1]

$$N(E_0) = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \rho(E_0, E, T) dE. \quad (6)$$

Продифференцировав выражения (2.18) по E_0 , получим [1]

$$\frac{\partial N_{ss}(E)}{\partial E_0} = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \frac{\partial \rho}{\partial E_0} dE, \quad (7)$$

где

$$\frac{\partial \rho}{\partial E_0} = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E - E_0)\right)\right), \quad (8)$$

при $T \rightarrow 0$ получаем [1]

$$\frac{\partial N_{ss}(E)}{\partial E_0} = \int_{E_v}^{E_c} N_{ss}(E) \delta(E - E_0) dE = N_{ss}(E_0) / \quad (9)$$

Количество электронов, покинувших дискретных поверхностных состояний, определяется следующим выражением

$$N(t) = \sum_i N_{ss}(E_i) \rho(E_i, T, t). \quad (10)$$

Продифференцировав выражение (10) по E_0 , получим

$$N_{ss}(E_0) = \sum_{i=1}^n N_{ss}(E_i) \frac{\partial \rho_i}{\partial E_0}, \quad (11)$$

выражение (11) имеет вид [1]

$$N_{ss}(E_0) = \sum_{i=1}^n N_{ss}(E_i) GN(E_0(t), E, T), \quad (12)$$

где

$$GN(E_0(t), E_i, T) = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right).$$

Это выражение удобно для обработки экспериментальных данных энергетической плотности поверхностных состояний. Исходным данным обработки с помощью модели является экспериментально определенный сплошной спектр плотности поверхностных состояний при температуре эксперимента T_0 .

С помощью подбора находим значения N_{ss} для каждого E_i при температуре T_0 так, чтобы значения $N_{ss}(E, T)$ построенные согласно математической модели и эксперименту максимально приблизились между собой. После этого вместо температуры T_0 подставляются, по возможности, низкие температуры T_1 и вычисляется дискретный спектр плотности поверхностных состояний.

Выводы. Определение плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ в приборах с зарядовой связью дает возможность установить связь между энергией состояния и временем генерации электрона из этого состояния. Если $E_0 = kT \ln(nT_0/\tau_0)$, где время генерации определяется числом пропущенных нулей n и периодом переключений электродов прибора с зарядовой связью T_0 , то функция вероятности опустошений энергетических состояний $\rho(E_0(t), E, T) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{E_0 - E}{kT}\right)\right)$ является ступенчатой функцией, ее производная

$$\frac{\partial \rho}{\partial E} = GN(E_0(t), E, T) = \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0) - \exp\left(\frac{1}{kT}(E_i - E_0)\right)\right).$$

при низких температурах описывает дельта – функцию Дирака.

Построена модель процесса определения плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ разложением спектра плотности поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ в ряд по $GN(E_0, E, T)$ функции.

Литература

1. Гулямов, Г. Определение плотности поверхностных состояний границы раздела, полупроводник–диэлектрик, в МДП–структуре / Г. Гулямов, Н. Ю. Шарифаев // ФТП. – 2011. – Т.45, №2. – С. 178–182.
2. Носов, Ю. Р. Основы физики приборов с зарядовой связью / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. – Москва. Наука, 1986. – 362 с.