

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ ПО МЕТОДУ ТЕРМАНА

В.Н. Давыдов, П.Е. Троян, Н.Г. Зайцев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: kolan317_1@mail.ru

Проанализированы модели расчета высокочастотных вольт-фарадных характеристик. На основе выбранной модели разработана программа расчета параметров МДП-структуры, а также идеальной вольт-фарадной характеристики и плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик.

Введение

Методы исследования структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко развиты, что позволяет определить любой параметр, характеризующий качество границы раздела полупроводник-диэлектрик и диэлектрического слоя. Наличие на границе раздела неоднородностей, обусловленных дефектами различного рода, приводит к изменению энергетического спектра электрона на поверхности по сравнению с объемом полупроводника. Наиболее полная информация о состоянии границы раздела содержится в энергетическом спектре плотности поверхностных состояний (ППС, $N_{ss}(E)$). Для его расчета, как правило, используют вольт-фарадные характеристики (ВФХ), измеренные на низкой (НЧ) или высокой (ВЧ) частотах. Использование для расчета $N_{ss}(E)$ той или иной ВФХ имеет свои преимущества и недостатки.

Основным преимуществом метода НЧ ВФХ по сравнению с методом ВЧ ВФХ является возможность определения $N_{ss}(E)$ в более широком диапазоне энергий в запрещенной зоне. В отличие от ВЧ метода, метод НЧ позволяет исследовать не только в области обеднения-обогащения, но и сильной инверсии. Несмотря на это предпочтительнее использовать ВЧ метод, т. к.:

- Измерения ВЧ ВФХ характеристик технически проще.
- Максимально достижимая чувствительность определения $N_{ss}(E)$ в ВЧ методе составляет $10^8 \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ (в НЧ методе — $10^{10} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$).
- Для использования ВЧ свойств полупроводников можно использовать характеристики МДП-структур с диэлектриком, имеющим сквозные токи порядка 10^{-9} А/мм^2 (в НЧ методе ток утечки не должен превышать 10^{-15} А/мм^2).

Существует много методов вычисления плотности поверхностных состояний по ВЧ ВФХ (см., например [1]). В этой связи необходимо их сравнение по выбранным критериям: точности определения ППС, анализируемого энергетического диапазона.

Целью данной работы является разработка программы расчета параметров МДП-структуры и построения зависимости $N_{ss}(E)$ по методу Термана, который основан на теоретически измеренной ВЧ ВФХ.

Метод Термана

В предположении однозарядового поверхностного состояния (ПС) ППС может быть определена по сдвигу экспериментальной ВФХ относительно расчетной. Если все зарядовые центры, локализованные вблизи границы раздела, как со стороны полупроводника, так и со стороны диэлектрика, «собрать» на границу раздела, то спектр ППС может быть определен с помощью выражения [1]:

$$N_{ss}(y_s) = \frac{C_{\text{дизл}}}{q} \frac{d\Delta V(C)}{dy_s}, \quad (1)$$

где $C_{\text{дизл}}$ — емкость диэлектрика, q — элементарный кулоновский заряд, y_s — безразмерный поверхностный потенциал, $\Delta V(C)$ — разность напряжений между теоретической и экспериментальной ВФХ при заданном значении емкости.

Как следует из выражения (1), для построения зависимости $N_{ss}(y_s)$ необходимо выполнить следующие операции:

- по экспериментально найденным значениям емкости МДП-структуры в режиме обогащения и сильной инверсии построить теоретическую ВФХ при отсутствии каких-либо ПС;
- сравнивая экспериментальную и теоретическую ВФХ, определить зависимость $\Delta V(C)$;
- с помощью теоретической ВФХ $C(y_s)$ из зависимости $\Delta V(C)$ построить $\Delta V(y_s)$;
- проинтегрировав по поверхностному потенциалу зависимость $\Delta V(y_s)$ и используя (1), построить спектр поверхностных состояний $N_{ss}(y_s)$.

2. Расчет теоретической высокочастотной ВФХ

2.1. Классическое решение

Выражение для теоретической ВЧ ВФХ может быть легко получено в рамках модели Гаретта-Брэттана исключением из области пространственного заряда (ОПЗ) заряда неосновных носителей [2]. Это объясняется их неподвижностью в поле ВЧ тестового сигнала. Тогда выражение для расчета ВЧ ВФХ области пространственного заряда будет иметь вид:

$$C_{\text{опз}} = \frac{\text{sign}(y_s) \epsilon \epsilon_0 \lambda^{-1} (1 - e^{y_s})}{2L_d [\lambda^{-1} (e^{y_s} - 1) + (\lambda - \lambda^{-1}) y_s]^{1/2}}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε_0 – электрическая постоянная, L_d – длина Дебая собственного полупроводника, $\lambda = \frac{n_i}{n_0} = \frac{p_0}{n_i}$, где n_i – собственная концентрация

носителей в полупроводнике, p_0, n_0 – концентрация ионизованных акцепторов, доноров в примесном полупроводнике.

Рассчитанный по (2) график зависимости ВЧ ВФХ от y_s показан на рис. 1, а. Выражение (2) получено в предположении, что подвижные носители заряда подчиняются статистике Максвелла-Больцмана, но т. к. при больших поверхностных потенциалах y_s возможно их вырождение, то это приведет к ошибке в определении $C_{опз}$, рассчитанной по (2). Следовательно, в указанных областях поверхностного потенциала (обогащение, инверсия – сильная инверсия) величина расчетной емкости будет завышена по отношению к реальной. Это приведет к ошибке в определении ППС.

2.2. ВФХ характеристика с использованием распределения Ферми-Дирака

Согласно [3] выражение ВЧ ВФХ для полупроводника n типа на участке обогащения и обеднения выглядит следующим образом:

$$C_{опз}(y_s) = \text{sign}(y_s) \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{L_d} \cdot \frac{H_1(y_s)}{G_1(y_s)}, \quad y_s \geq y_{inv}, \quad (3)$$

где $H_1(y_s) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta_d \exp(W_{DF} - y_s)}{1 + \delta_d \exp(W_{DF} - y_s)} + \frac{F_{1/2}(W_{FC} + y_s)}{F_{1/2}(W_{LC})}$,

$$G_1(y_s) = \left[\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{1 + \delta_d \exp(W_{DF} - y_s)}{1 + \delta_d \exp(W_{DF})} \right) + \frac{2}{3} \frac{F_{3/2}(W_{FC} + y_s) - F_{3/2}(W_{FC})}{F_{1/2}(W_{LC})} \right]^{1/2},$$

где δ_d – отношение краткости вырождения основного состояния ионного остатка к краткосрочности вырождения основного состояния нейтрального донора, $F_{1/2}(\eta)$, $F_{3/2}(\eta)$ – интеграл Ферми-Дирака степени 1/2 и 3/2, W_{DF} – энергия от уровня энергии донора до уровня Ферми в легированном полупроводнике, W_{FC} и W_{LC} – энергия от уровня Ферми в легированном полупроводнике и энергия от уровня Ферми в собственном полупроводнике до дна зоны проводимости, y_{inv} – соответствует границе между инверсий и обеднением.

Расчет ВЧ ВФХ по (3) представлен на рис. 1, б. Видно, что при использовании распределения Ферми-Дирака при больших y_s ВФХ становится более плавной по сравнению с (2). Изменение статистики при больших y_s по очевидным причинам приводит также к большему значению емкости ОПЗ в режиме «инверсия – сильная инверсия». Недостатком расчета ВЧ ВФХ этим методом является необходимость вычисления огромного количества интегралов Ферми-Дирака, например, с помощью полиномов Лагерра.

Согласно [2], максимальная ошибка в определении емкости ОПЗ при 300 К для минимального значения емкости ОПЗ равна 100 %, а для емкости плоских зон – 23,5 %.

2.3. ВФХ кривая с перераспределением носителей заряда инверсионного слоя

Данная модель рассчитывается при следующих физических предположениях [4]:

- Равновесие по постоянному смещению. Для измерений ВФХ это эквивалентно тому, что скорость нарастания напряжения недостаточна для избежания глубокого обеднения.
- Учет внутреннего неравновесия носителей заряда в инверсионном слое, связанного с их высокой инерционностью и малым периодом тестового ВЧ сигнала. Это приводит к эффекту перераспределения носителей заряда, который не учитывался в предыдущих расчетах.

Согласно [4] выражение для ВЧ емкости области пространственного заряда в полупроводнике p типа имеет вид:

$$C_{опз} = C_{SLF} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot e^{y_s}}{2L_d^2 y_s'} \cdot \frac{1}{1 + y_s' \exp(-(y_s + y_b)) \int_0^{y_s} \frac{\exp^y}{(y_s')^3} dy}, \quad (4)$$

где C_{SLF} – низкочастотная емкость ОПЗ в полупроводнике, y_b – потенциал объема $-\ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$ – для полупроводников p типа, y_s' – первый интеграл,

$$(y_s')^2 = \frac{2}{L_d^2} (\text{ch}(y_s) - y_s \text{sh}(y_b) + \text{ch}(y_b) + y_b \text{sh}(y_b)),$$

$$C_{SLF} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{L_d^2 \cdot y_s'} (\text{sh}(y_s) - \text{sh}(y_b)).$$

Расчет ВФХ по (4) представлен на рис. 1, в. Полученное значение емкости хорошо совпадает во всем диапазоне с методом, представленным в п. 2.1. Принципиальным недостатком этого метода расчета является наличие глубокого минимума вблизи точки (функция меняет свой знак вблизи указанной точки) (рис. 1, в). Использование данного метода для расчета ППС без операций сглаживания кривой невозможно ввиду принципиального искажения ВФХ.

Таким образом, для вычисления спектра ПС в режиме реального времени наилучшим образом подходит расчет ВЧ ВФХ по выражению (2). Возникающая в результате его использования ошибка в спектре ПС существенна лишь в области обогащения и сильной инверсии, где ППС, по методу Термана, рассчитывается с большой ошибкой [5].

3. Описание программы

Используя методику расчета ППС МДП-структуры, написана программа, позволяющая на основе экс-

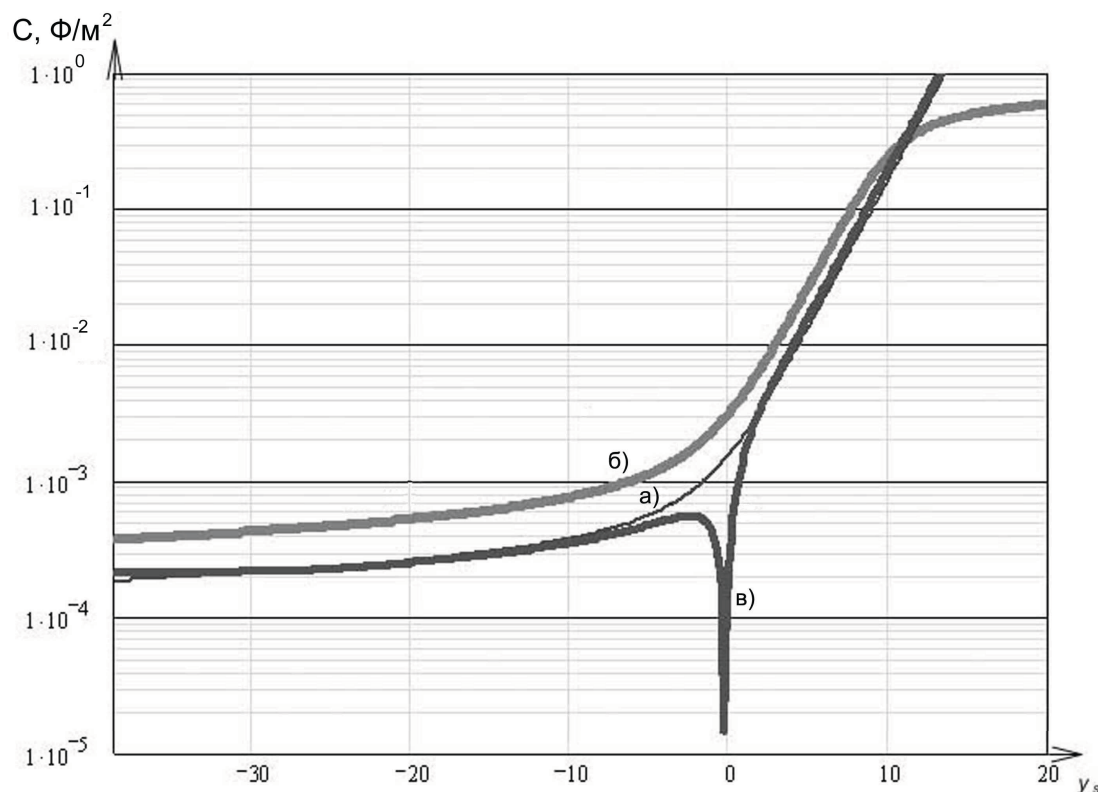


Рис. 1. ВЧ ВФХ зависимости ОПЗ в идеальной МДП-структуре: а) классическая, б) с применением распределения Ферми-Дирака, в) с учетом перераспределения носителей заряда инверсного слоя

периментальных ВЧ ВФХ определять $N_s(E)$, а также основные параметры МДП-структуры. Вид пользовательского интерфейса программы показан на рис. 2.

Окно программы имеет четыре вкладки:

Вкладка «Измерение»

На ней находится набор элементов для управления измерительным комплексом «МЕТРОНОМ-2», описанным в работе [6];

Вкладка «Расчет параметров МДП-структуры»

Здесь осуществляется открытие ранее сохраненных данных при нажатии кнопки «Открыть». Имеется возможность одновременного построения 10-ти графиков. Если открытые данные ВФХ не устраивают оператора по каким-либо причинам, то их можно обнулить, указав номер обнуляемого графика в элементе ComboBox с названием «График» и нажав кнопку «Сброс». Построенные графики можно сохранить в виде массива чисел. Так же возможно распечатать отображаемые результаты ВФХ.

Перед началом расчета параметров МДП-структуры необходимо указать следующее: материал полупроводника, материал диэлектрика, площадь полевого электрода МДП-структуры, температура, при которой проводилось измерение. Путь к последнему открытому файлу с данными отображается в поле «Путь». Расчет параметров МДП-структуры осуществляется нажатием кнопки «Расчет».

Рассчитывается выбранный график согласно алгоритму, изложенному выше. Для того чтобы из

расчета исключить случайные ошибки в величине емкости перед началом расчета параметров МДП-структуры осуществляется согласование экспериментальной ВФХ при помощи алгоритмов сглаживания. Чувствительность сглаживающего алгоритма к различного рода ошибкам на ВФХ задается в текстовом поле с названием «Коэффициент сглаживания». На рис. 2 показана экспериментальная кривая, полученная при коэффициенте сглаживания 10^{-3} и отмеченная численными значениями $C_{\text{дизл}}$ емкости плоских зон и емкости в инверсии.

Из сглаженной экспериментальной кривой ВЧ ВФХ определяется емкость диэлектрика, емкость плоских зон, а также минимальная емкость ОПЗ и соответствующие им напряжения. Полученные значения емкостей отображаются на сглаженной ВФХ кривой в виде значений емкостей (рис. 2). Кроме этого, используя данные о МДП-структуре, рассчитываются следующие параметры: тип проводимости полупроводника, толщина диэлектрика, максимальная ширина ОПЗ, концентрация доноров (акцепторов), емкость плоских зон, напряжение плоских зон, встроенный заряд в диэлектрике и на поверхностных состояниях границы раздела полупроводник-диэлектрик.

Используя рассчитанные параметры, строится теоретическая ВФХ по формуле (2). Как показано выше, данное выражение оптимальным образом описывает емкость ОПЗ в идеальной МДП-структуре. Пересчитанная функция емкости от поверхностного потенциала $C(y_s)$ в функцию от напряже-

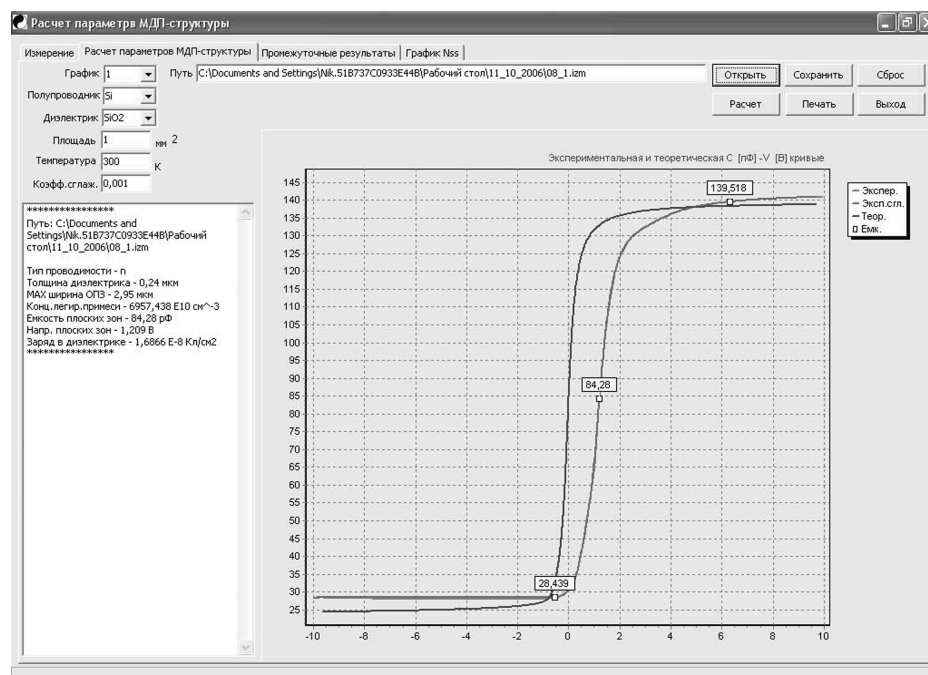


Рис. 2. Вид пользовательского интерфейса

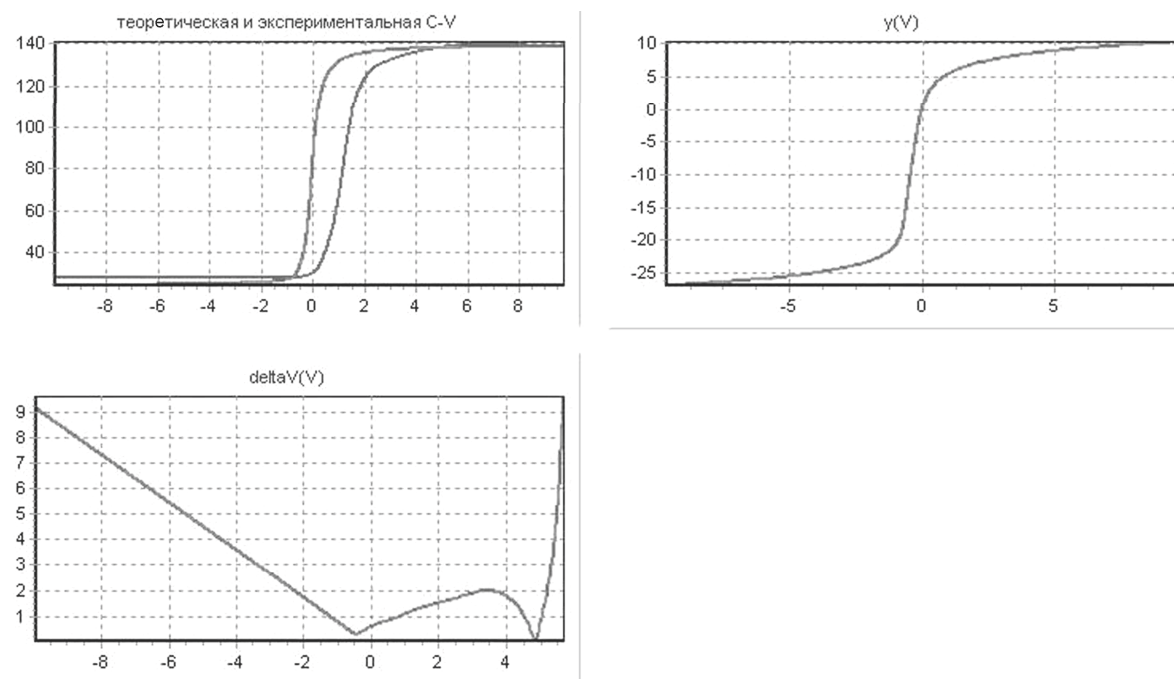


Рис. 3. Вкладка «Промежуточные результаты»

ния $C(V)$ отображается на графике вместе с экспериментальными данными.

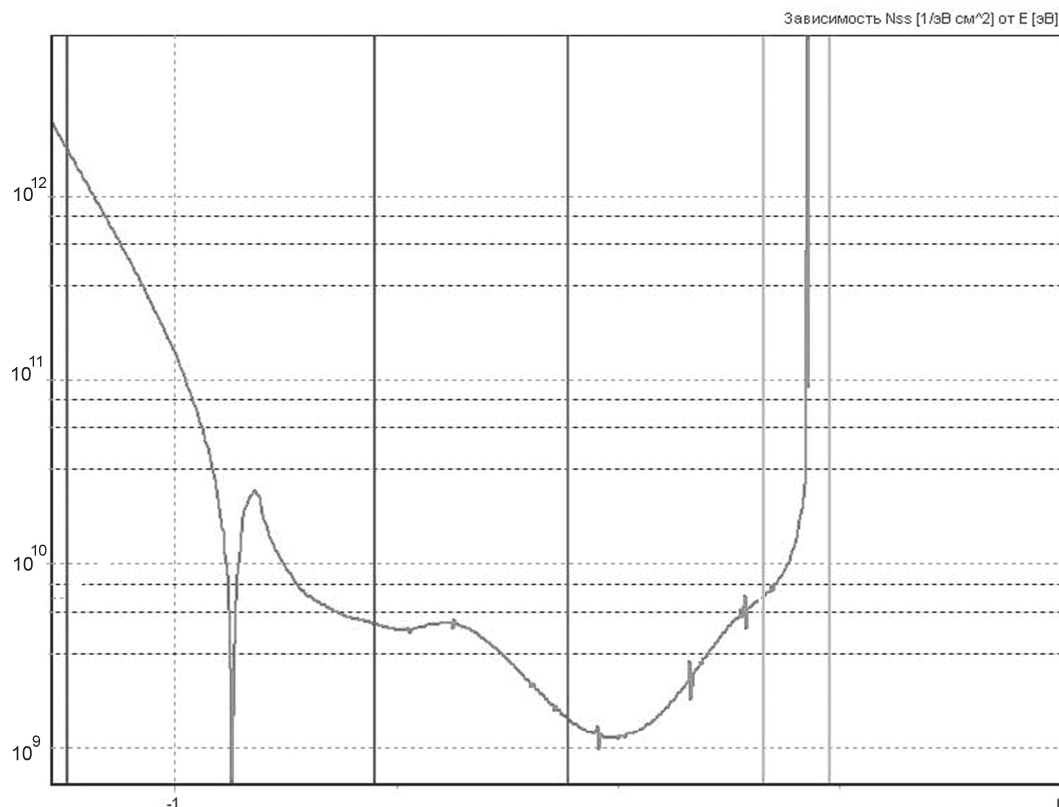
Вкладка «Промежуточные результаты»

Для контроля правильности расчета параметров на вкладке «Промежуточные результаты» выводятся три графика (рис. 3): теоретическая и экспериментальная сглаженная ВФХ, зависимость поверх-

ностного потенциала ψ_s от приложенного напряжения, разность напряжений между теоретической и экспериментальной кривыми при заданном значении емкости от приложенного напряжения.

Вкладка «График N_{ss} »

Здесь (рис. 4) отображается рассчитанный по ур. (1) спектр ППС МДП-структуры.

Рис. 4. Вкладка «График N_{ss} »

Для качественной оценки рассчитанных данных на графике отмечены энергии, соответствующие дну зоны проводимости (E_c), потолку валентной зоны (E_v), уровню Ферми (E_f), а также симметричному уровню Ферми относительно такового в собственном полупроводнике ($2E_f$), уровню Ферми в собственном полупроводнике (E_i), уровню энергии, при которой наступает глубокая инверсия ($2\ln(\lambda)-3$). Полученная зависимость $N_{ss}(E)$ может быть сохранена в виде точечного рисунка и распечатана на принтере. Как можно видеть, полученный спектр ППС имеет классическую U -образную форму и типичные значения ППС для кремниевых МДП-структур. В дополнение к этому рассчитанный спектр ППС демонстрирует наличие локальных минимумов ППС вблизи середины запрещенной зоны полупроводника. Данное обстоятельство является спецификой использованной МДП-структуры, связанной с особенностями технологии ее изготовления и обработки.

Заключение

Разработана программа расчета параметров МДП-структуры, позволяющая на основе экспериментальных высокочастотных ВФХ определить тип проводимости полупроводника, толщину диэлектрика, максимальную ширину ОПЗ, концентрацию доноров (акцепторов), емкость и напряжение плоских зон, величину суммы встроенного заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях раздела полупроводник-диэлектрик.

Используя параметры МДП-структуры, программа позволяет рассчитать теоретическую ВФХ и спектр плотности поверхностных состояний, что может иметь самостоятельное применение.

Все результаты расчетов отображаются в графической форме и могут быть сохранены или распечатаны на принтере. Программа имеет удобный пользовательский интерфейс с возможностью просмотра промежуточных результатов расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колешко В.М., Каплан Г.Д. C-V методы измерения параметров МОП-структур. — М.: ЦНИИ Электроника, 1977. — 83 с.
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. А.Ф. Трутко. — М.: Энергия, 1973. — 656 с.
3. Карамышев В.П. Влияние функции распределения на теоретическую емкость области пространственного заряда полупроводника в МДП-структуре // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. — 1976. — № 3(63). — С. 13–18.
4. Berman A. Model of high-frequency capacity MOS — the structures, based on redistribution of a charge inversion a layer // Solid State Electron. — 1974. — V. 17. — № 7. — P. 735–742.
5. Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990. — 230 с.
6. Беляев С.В., Давыдов В.Н., Зайцев Н.Г. Измерительные возможности автоматизированного комплекса «МЕТРОНОМ-2» // Научная сессия ТУСУР-2006: Матер. Всеросс. конф. — Томск, 2006. — Ч. 4. — С. 12–15.