ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

И.Н.Каримов, М.З.Носиров, М.Эргашева, М.Абдувалиев, Л.Мадумарова

Мақолада яримўтказгичли тузилмаларнинг параметрларини тез баҳолашга имкон берувчи рақамли режимдаги DLTS методи чуқур таҳлил қилинган ва тавсифланган. Сиғимли методлар таҳлили уларнинг кўп қатламли яримўтказгичли тузилмаларнинг электрофизик хоссаларини тадқиқ қилишнинг оптимал усули эканлигини кўрсатди.

***Калит сўзлар**: металл-диэлектрик-яримўтказгич, сиғимли методлар, кўп қатламли тузилмалар, электрофизик хоссалар.*

В статье подробно проанализирован и описан метод DLTS в цифровом режиме, который используется для быстрой оценки параметров полупроводниковых структур. Анализ емкостных методов показал, что они являются оптимальным способом исследования электрофизических свойств многослойных полупроводниковых структур.

***Ключевые слова**: металл-диэлектрик-полупроводник, емкостные методы, многослойные структуры, электрофизические свойства.*

The article analysed and described the method of DLTS in digital mode, which is used for fast estimation of the parameters of semiconductor structures. Analysis of capacitive methods showed that these methods are the best way to study electrophysical properties of multilayer semiconductor structures.

***Key words**: metal-insulator-semiconductor capacitive methods, multilayer structures electrophysical properties.*

Непрерывное совершенствование интегральных схем, применение разнообразных диэлектрических слоев, повышение требований к параметрам многослойных структур и интегральных схем ставят задачи улучшения качества диэлектрических слоев, управления и значительного улучшения слоя диэлектрика и границы раздела полупроводник-диэлектрик. Существует много методов исследования электрофизических свойств многослойных структур. Из всего многообразия методов исследования параметров полупроводниковых структур нами были выбраны методы, использующие емкостные характеристики. Все емкостные методы исследования параметров полупроводниковых структур основаны на единой, хорошо развитой теории барьерной емкости р-п перехода и емкости многослойных конденсаторов. Такое обстоятельство позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты измерений независимо от типа используемых структур. Емкостные методы обладают высокой информативностью, т.е. позволяют в едином измерительном цикле получать информацию о многих параметрах полупроводникового материала, диэлектрического слоя и границы раздела полупроводник-диэлектрик. Эти методы позволяют получить высокую чувствительность и точность значений измеряемых параметров. Важным их преимуществом является неразрушающий контроль, т.е. возможность использования без повреждения исследуемой полупроводниковой структуры. В основе емкостных методов исследования, использующих статические характеристики, лежит сравнение экспериментальных вольт-фарадных характеристик реальных МДП структур с расчетными характеристиками.

При выводе уравнений, описывающих поведение расчетных вольт-фарадных характеристик МДП структур, используются некоторые общепринятые приближения [1]. К таким приближениям можно отнести отсутствие градиента концентрации легирующей примеси и поверхностных состояний на границе полупроводник-диэлектрик, и зарядов в слое диэлектрика, равенство нулю разности работ выхода из полупроводника и из металла. Для расчета теоретических вольт-фарадных характеристик используются два предположения, соответствующих частотным и высокочастотным вольт-фарадным характеристикам. В соответствии с этими предположениями используются методы низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) измерений емкости структур металл-диэлектрик- полупроводник.

В настоящей работе для исследования электрофизических свойств МДП-структур (как для «толстых», так и для туннельных) использован емкостный метод с некоторыми видоизменениями, направленными на улучшение точности измерения и автоматизации их обработки [2].

Метод DLTS используется для быстрой оценки параметров. Время прохождения температурного интервала 80 – 300 К в одном направлении составляет 40 – 50 минут. В этом методе температура не стабилизируется, зависимость C(t) за один период после темного переключения записывается в т ячеек памяти (обычно т — 19 или 38), эта запись повторяется d раз (обычно d > 10), т.е. C(t) усредняется за d циклов. Скорость охлаждения или нагрева выбирается таким образом, чтобы за время записи d циклов температура изменилась бы не более чем на 0.5°. Далее производится вычисление ΔC_{21}. Для уменьшения флуктуации и помех первые К значений C(t) (обычно К=8-9 или 16-18) умножаются на -1, а последующие К умножаются на +1 (рис. 1 а), причем увеличение количества точек в машинном варианте эквивалентно увеличению длительности строб-импульса в аналоговом.

Суммирование всех значений C(t) с последующим делением на dK дает значение ΔC_{21}, которое через цифровоаналоговый преобразователь ЦАП подается на вход «Y» графопостроителя. При этом масштаб выбирается автоматически. Когда значение ΔC_{21} становится больше некоторой заданной величины, оно делится сначала в 3 раза, затем в 10 раз, в 30 и т.д. Термо Э.Д.С., измеренная цифровым вольтметром Щ1516, пересчитывается в температуру и через ЦАП подается на вход «X» графопостроителя – таким путем обеспечивается линейный масштаб по температуре (обычно 1° – 1 mm). В ходе изменения температуры значения $\Delta t0(\tau)$ записываются в память Д3-28 и после окончания измерения построение графика может быть автоматически повторено. Имеется программа аппроксимации зависимости ΔC_{21} (τ) полиномом n-ой степени (n≤7).

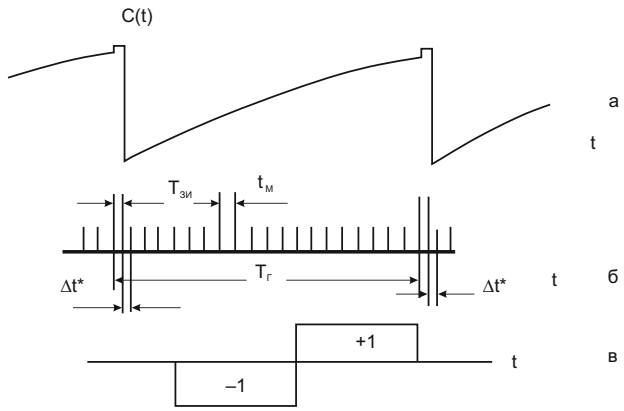


Рис. 1. *Временная диаграмма работы измерительной установки.*

Если глубокий центр имеет дискретный энергетический уровень и когда Nr<<NM и Vk<<V, значение Nr в ООЗ резкого р-п перехода вычисляется из выражения [5.12] или [5.14], [5.15] работы [3]. В эти формулы входит величина DC – полная амплитуда релаксации емкости после заполняющего воздействия на образец. Она связана со значением ΔC_{21}M – в максимуме спектра DLTS соотношением:

$$DC = 2.46\ \Delta C_{21}M\ \exp(Dt_0/tM), \quad (1)$$

где Dt_0–интервал времени между окончанием заполняющего импульса и началом умножения C(t) на -1 (предыдущее значение C(t) в этом случае при обработке вообще не учитывается (рис. 1). Коэффициент 2.46 отражает то обстоятельство, что ΔC_{21} вычисляется не как разность $C(t_2)$- $C(t_1)$, а путем умножения К значений на -1 и +1. Программа вычисления τ(T) по одной экспериментальной зависимости ΔC_{21} (T) составлена на основе теории, изложенной в работах [4].

Для глубоких центров со сплошным энергетическим спектром и при $N_г << N_М$ и Vk<<V имеется программа вычисления плотности состояний $N_г(E_1 - E_2)$ по формуле (1.33) работы [5]. Для определения энергии, соответствующей данной плотности состояний, необходимо знать коэффициент $C_п$ и $C_р$ (формулы (1.31) и (1.34) работы [6]).

Запуск генератора импульсов Г5-56 и МЦЕ осуществляется и синхронизируется таймером, который представляет собой кварцевый генератор с программно-управляемым делителем частоты. Таймер работает в составе УСО АЦ СКС-1024-001 (УСО) измерительного комплекса 15 ИПГ (3) и позволяет проводить измерения в одном из указанных в таблице 1 режимов.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7
$Dt_г$, с	1.28	2.56	5.12	10.24	2.56	5.12	10.24
$Dt_М$, мс	64	128	256	512	64	128	256

$\Delta t_г$ – период запуска генератора Г5-56 – в секундах; $\Delta t_М$ – период запуска моста МЦЕ – в миллисекундах; в качестве кварцевого генератора используется кварцевый генератор магистрального расширителя УСО с частотой 5 МГц.

Время одного измерения емкости (т.е. время уравновешивания ЦМ после его запуска) $\Delta t_г$ порядка десятков ms; для ЦМ типа МЦЕ-12А и МЦЕ-13А $\Delta t_М$ ~ 50 ms. Очевидно, что $\Delta t_г$ задается больше, чем $\Delta t_М$. Современные ЦМ измеряют емкость и tgd с точностью до 4-го или 5-го знака.

На исследуемый образец подаются постоянное обратное смещение (V),малое переменное напряжение (V) и заполняющие импульсы (ЗИ). Чувствительность измерительной установки без компенсации емкости $N_г/N_М = 10^{-4}$, а в режиме с компенсацией – $N_г/N_М = 10^{-5}$.

Стабилизация температуры осуществляется путем сравнения ЭДС. термопары $V_Т$, измеряемой цифровым вольтметром, с расчетным значением термо-ЭДС. при заданной температуре $V_Т$расч., записанной в память компьютера. После окончания каждого измерения емкости показания ЦМ вводятся в память компьютера. До начала следующего ЗИ вводятся m значений C(t); из них m/2 значений C(t) за интервал Δt суммируются и умножаются на 1, а за последующий интервал Δt — суммируются и умножаются на -1. Обычно при заданной температуре зависимость C(t) вводится несколько раз и усредняется.

Релаксация емкости после переключения от 0 до Vобр описывается формулой

$$C(t) = C_Н + \Delta C[1 - exp(-t / \tau)], \quad (2)$$

где $C_Н$ – начальное значение емкости после переключения; ΔC — амплитуда изменения емкости.

Согласно этому методу, в ходе медленного изменения температуры после каждого переключения автоматически измеряются значения C(t) при $t=t_1$ и $t=t_2$ и их разность $\Delta C_{21}=C(t_2)-C(t_1)$, а также температура T(ЭДС. термопары). Зависимость $\Delta C_{21}(t)$ имеет максимум при некотором темпе – $T_М$. Тогда значение τ при $T = T_М$ определяется из выражения

$$\tau(T_М) = (t_2 - t_1) / \ln(t_2 / t_1). \quad (3)$$

При измерении в цифровом режиме исключается погрешность, обусловленная нестабильностью тракта и температуры генератора частоты $f_г$. Это существенно, если необходима высокая точность измерения емкости или ее релаксации (например, при сравнении C(t) при близких температурах).

Таким образом, использование цифровой измерительной техники и компьютеров значительно повышает точность и чувствительность измерений. Чувствительность повышается благодаря накоплению сигналов в памяти компьютера.

Составлены программы по измерению длительных переходных процессов для исследования глубоких центров в объеме диэлектрика.

Литература:

1. Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников.- Л.: Наука, 1972

2. Власов С.И. Дисс. на соискание уч.степени д.ф-м.н.- Т., 1990.

3. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках.- Л.: Наука, 1981

4. А.В.Васильев, С.А.Смагулова, С.С.Шаймеев. К вопросу о методике обработки спектров DLTS // ФТП, 17(1), 162(1983)

5. R.W.Fathaur and L.J.Schowalter Surface morphology of epitaxial CaF2 films on Si substractes films // Appl.Phys.Lett., 215, 519(1984)

6. М.Т.Толстобров. Дисс. на соискание уч.степени к.ф-м.н,- Л., 1988.

Андижон давлат университети,
2017 йил 20 ноябрда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. Р.Алиев)