

Импульсный метод измерения емкости полупроводниковых структур с использованием балластного конденсатора

© В.В. Монахов, А.Б. Уткин

Санкт-Петербургский государственный университет,
198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 19 мая 1998 г.)

Изложен простой в реализации метод измерения емкости полупроводниковых структур с помощью малых по амплитуде импульсов тока. Показано, что при использовании балластного конденсатора совместно с осуществлением процедуры градуировки точность описанного метода возможно значительно улучшить. Проведен детальный анализ влияния балластного конденсатора на процесс измерения.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) широко применяются при исследовании полупроводников, и поэтому усовершенствование экспериментальной техники для их измерения является актуальной темой исследований [1,2,3]. В данной работе описан метод, позволяющий повысить точность измерений ВФХ, проводимых по двухимпульсной схеме [4] в системах электролит-полупроводник (ЭП), электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) и позволяет измерять ВФХ структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

Сущность метода состоит в зарядении исследуемой структуры и включенного параллельно с ней специально подобранного балластного конденсатора малым импульсом тока и последующим их разрядением импульсом тока той же амплитуды и длительности, но противоположной полярности. При проведении измерений в системах с электролитом и использовании тестирующих импульсов длительностью меньше $10 \mu\text{s}$, как нами установлено, в большинстве случаев можно пренебречь влиянием электрохимических процессов. В таких условиях высокочастотный импеданс межфазовой границы определяется при отсутствии диэлектрического слоя на поверхности емкостью слоя пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника C_{sc} и включенными параллельно ей импедансами поверхностных состояний (ПС), каждый из которых состоит из последовательно

включенных емкости C_{ss} и сопротивления захвата R_{ss} . Обычно при измерениях с выбранной длительностью перезаряжающих импульсов и интервалов между ними в релаксации объемного заряда участвует лишь одно ПС, постоянная времени для которого $\tau_{ss} = C_{ss}R_{ss}$ соизмерима с длительностью тестирующих импульсов тока. Исследуемую полупроводниковую структуру можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 1. Будем считать, что сопротивление электролита и объема полупроводника пренебрежимо мало. Обозначим через C_0 емкость, включающую в себя емкость кабелей, балластного конденсатора и высокочастотных ПС. При протекании постоянного импульса тока в цепи уравнение для изменения поверхностного потенциала ΔV_s запишется в следующем виде:

$$R_{ss}C_h \frac{d\Delta V_s}{dt}(t) + \Delta V_s(t) \left(1 + \frac{C_h}{C_{ss}}\right) = j_0 \frac{R_{ss}C_{ss} + t}{C_{ss}}, \quad (1)$$

где t — время, отсчитываемое от начала импульса; j_0 — амплитуда тестирующего импульса тока; $C_h = C_0 + C_{sc}$.

Решив уравнение (1) при граничном условии $\Delta V_s(0) = 0$, получим зависимость $\Delta V_s(t)$ при зарядении структуры

$$\Delta V_s(t) = \frac{j_0}{C_h + C_{ss}}(t + t_0(1 - \exp(-t/\tau))). \quad (2)$$

Здесь $t_0 = \tau_{ss}(1 + C_h/C_{ss})$, $\tau = \tau_{ss}/(1 + C_{ss}/C_h)$. После окончания импульса тока продолжительностью t_p будет происходить перераспределение заряда внутри структуры. В этом случае полный ток $j = 0$ и, следовательно, в промежутке между заряжающим и разряжающим импульсами

$$j_1 = -j_2 = -C_h \frac{d\Delta V_s}{dt},$$

$$\Delta V_s(t) = -R_{ss}C_{ss} \frac{d\Delta V_s}{dt} + \frac{j_0 t_p - C_h \Delta V_s}{C_{ss}}. \quad (3)$$

Решение данного уравнения с учетом сшивки с ранее полученным результатом (2) в точке $t = t_p$ запишется

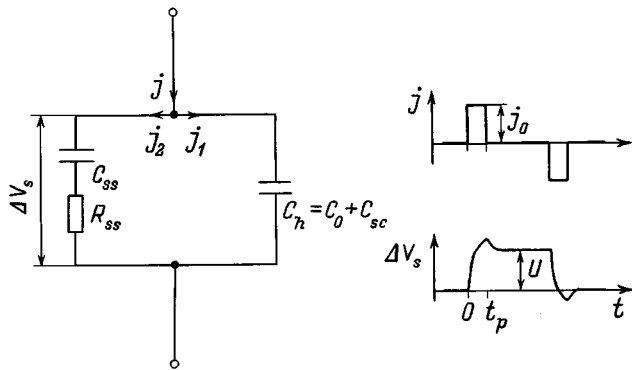


Рис. 1. Эквивалентная схема границы раздела электролит-полупроводник.

как

$$\Delta V_s(t) = \frac{j_0 t_p}{C_p + C_{ss}} + \frac{j_0 t_0}{C_h + C_{ss}} \times (1 - \exp(-t_p/\tau)) \exp(-(t - t_p)/\tau). \quad (4)$$

Если рассматривать выражение (4) при $t - t_p \gg \tau$, то величина $\Delta V_s(t)$ достигнет своего предельного значения U и перестанет зависеть от времени (рис. 1), что позволит определить суммарную емкость системы

$$C = C_h + C_{ss} = C_0 + (C_{sc} + C_{ss}) = j_0 t_p / U. \quad (5)$$

После подачи на структуру импульса тока той же длительности и амплитуды, но противоположной полярности схема вернется в исходное состояние.

Для того чтобы по измеренному напряжению U найти с высокой точностью емкость $C_{sc} + C_{ss}$ нами предлагается проводить дополнительные калибровочные измерения при замене исследуемых структур на эталонные конденсаторы. Воспользовавшись набором емкостей, известные номинальные значения для которых перекрывают интересующую область изменения емкости исследуемой структуры, построим градуировочную зависимость $U((C + C_0)^{-1})$ с линейной интерполяцией функции на участках между точками и экстраполяцией за пределы отградуированного интервала. Использование полученной кривой позволяет проводить измерения в более широком по сравнению с обычной методикой [4] диапазоне значений и учитывает наличие паразитных и балластных емкостей C_0 . Кроме того, использование градуировочной кривой дает возможность в значительной степени компенсировать отклонение зависимости $U((C + C_0)^{-1})$ от прямо пропорциональной. Оно возникает как из-за наличия нелинейности усиливающего тракта, так и из-за проникновения в него синхронных импульсных наводок от коммутирующих цифровых цепей. Последняя из упомянутых причин приводит к сдвигу кривой $U((C + C_0)^{-1})$ по оси U на некоторую постоянную составляющую U_∞ , соответствующую измеряемому импульсному напряжению на структуре при $C = \infty$. В области больших емкостей U_∞ всегда соизмеримо или даже превышает по величине полезное приращение напряжения U , показанное на рис. 1 для идеального тракта.

Рассмотрим подробнее влияние, оказываемое наличием конденсатора C_0 на точность измерения ВФХ. Наличие цепочки $R_{ss}C_{ss}$ увеличивает погрешность получаемого значения C_{sc} , поскольку часть заряда ОПЗ участвует в перезарядке ПС с постоянной времени $\tau = R_{ss}/(1/C_{ss} + 1/(C_0/C_{sc}))$. Видно, что τ растет с увеличением емкости балластного конденсатора. Таким образом, увеличивая емкость C_0 , можно замедлить вносящие погрешность релаксационные процессы. Однако, как следует из формулы (5), это действие будет сопровождаться уменьшением амплитуды измеряемого сигнала при фиксированных j_0 и t_p , что ограничивает допустимое максимальное значение емкости C_0 , связанное с

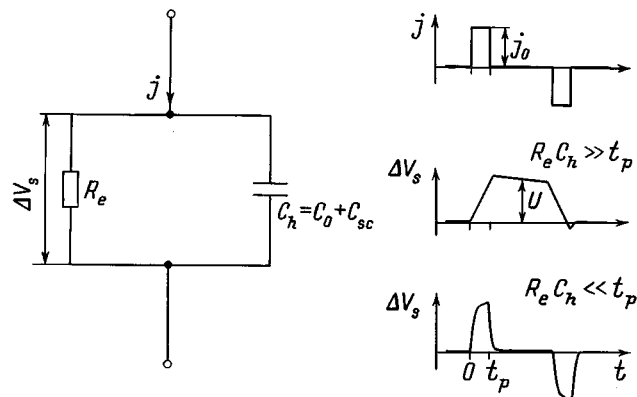


Рис. 2. Эквивалентная схема структур ЭП, ЭДП и МДП при отсутствии ПС и наличии токов утечки.

конечной разрядностью применяемого для ввода сигнала аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Заметим, что увеличение значения j_0 на высоких частотах связано со значительными сложностями и может компенсировать уменьшение сигнала с увеличением C_0 лишь до определенного предела.

При отсутствии или малом влиянии ПС основные погрешности в измерительном процессе будут связаны с наличием токов утечки. При этом в эквивалентную схему необходимо ввести сопротивление утечки R_e , включенное параллельно с емкостью $C_h = C_{sc} + C_0$ (рис. 2). Его влияние на измеряемое значение C_{sc} будет тем значительнее, чем меньше емкость C_0 , что объясняется принципиальной разницей процесса зарядки-разрядки системы с $R_e C_h > t_p$ (для которых приведенная выше зависимость $U((C + C_0)^{-1})$ остается линейной) по сравнению с $R_e C_h \ll t_p$. Увеличивая номинал балластного конденсатора, с учетом указанных выше ограничений возможно уменьшить влияние токов утечки. Другим преимуществом применения указанного конденсатора является расширение динамического диапазона измеряемых емкостей по сравнению с обычной методикой [4]. В используемой установке [5] используется 12-разрядный АЦП, обеспечивающий оцифровку по напряжению в трех с половиной порядках, в то время как емкость структуры может изменяться в шести порядках. Поскольку измеряемая величина U обратно пропорциональна емкости $C = C_0 + C_{sc} + C_{ss}$, то при фиксированных j_0 и t_p возможно подобрать номинал C_0 таким образом, что максимальное значение напряжения не будет выходить за границу оцифровываемого интервала и будет удовлетворять условию малосигнальности $U \ll kT/q$. В этом случае неизбежную потерю точности, возникающую из-за увеличения уровня шума относительно полезного сигнала, возможно частично компенсировать многократным повторением цикла измерений (от 100 до 1000 измерений АЦП на точку) с последующим усреднением. Подобный метод существенно снижает уровень помех и повышает точность как минимум на один порядок.

Таким образом, без градуировки и использования балластного конденсатора в силу перечисленных причин практически невозможны измерения $C < 100$ pF. В установке [5] используемая длительность импульсов заряжения и разряжения равна $5 \mu\text{s}$, задержка на релаксацию $5 \mu\text{s}$, интервал между импульсами $20 \mu\text{s}$, частота повторения импульсов 2 kHz ($500 \mu\text{s}$). При указанных параметрах оптимальным номиналом для балластного конденсатора является 1 nF , обеспечивающий измерение поверхностных емкостей в диапазоне от 10^{-12} до 10^{-7} F.

Список литературы

- [1] *Chudobiak M.J.* // Rev. Sci. Instr. 1995. Vol. 66. N 6. P. 3703–3705.
- [2] *Moore M.B.* // MICRO'95 IREE Soc. Milsons Point. NSW (Australia), 1995. P. 186–188.
- [3] *Шашкин И.В., Каретникова И.Р., Мюрель А.В.* и др. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 8. С. 926–930.
- [4] *Романов О.В., Соколов М.А., Султанмагомедов С.Н.* // Электрохимия. 1980. Т. 16. № 7. С. 935–943.
- [5] *Монахов В.В., Уткин А.Б.* // Вестн. СПбГУ. Сер. 4. 1997. Т. 3. № 18. С. 84–89.